

CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES SOLS DÉRIVÉS DE CENDRES VOLCANIQUES DE LA CÔTE PACIFIQUE DU NICARAGUA

F. COLMET-DAAGE*
J. et M. GAUTHEYROU

C. de KIMPE**
G. SIEFFERMANN***

M. DELAUNE****
G. FUSIL*****

RÉSUMÉ

L'étude concerne les sols dérivés de cendres volcaniques de la côte Pacifique du Nicaragua. De fréquentes comparaisons avec les sols similaires des Antilles Françaises et d'Equateur, sont faites avec l'aide principalement des rayons X, de l'analyse thermique différentielle, de la spectrographie infrarouge, du microscope électronique, des variations de la capacité d'échange de bases après divers traitements, des pF, etc.

Les sols déjà relativement argileux, à halloysite, sont très semblables dans ces trois contrées tropicales chaudes. Certaines différences sensibles apparaissent, par contre, dans les sols jeunes renfermant encore très peu d'argile.

Les sols à allophanes fortement hydratés du Nicaragua, présentent une énergie de rétention pour l'eau plus importante, à teneurs égales en eau, que les sols d'Equateur ou des Antilles, dans lesquels la majeure partie de l'eau d'hydratation disparaît irréversiblement par séchage à l'air, à température ordinaire. Les infrarouges et les rayons X révèlent un début d'organisation et le microscope électronique, des enchevêtrements de fibres bien nets. Les teneurs en bases échangeables sont relativement élevées et semblent la conséquence d'un climat modérément humide à longue saison sèche.

Les sols rouges sur cendres n'ont pas leurs homologues aux Antilles et en Equateur. Un climat à saison sèche prononcée et faible pluviométrie, une topographie plane limitant l'érosion, une végétation clairsemée et une forte insolation, sont sans doute parmi les facteurs principaux de leur formation.

* Centre ORSTOM des Antilles.

** Station de Recherches du Ministère de l'Agriculture du Canada à Québec.

*** Laboratoire de géologie — Université de Strasbourg.

**** Laboratoire de géologie — ORSTOM — France.

***** Laboratoire des Argiles — ORSTOM — France.

ABSTRACT

Various types of soils, from the pacific coast of Nicaragua, developed on volcanic ash were studied ; with frequent comparaisons with similar soils from the French West Indies and Ecuador. These studies were effected by means of X-ray diffraction, thermal analysis, infra-red spectroscopy, electron microscopy, the variations of the cation exchange capacity and others physico-chemical analysis.

The clayey soils with halloysite are very similar in these three warm tropical regions ; in contrast, the young soils containing a small amount of clay show noticeable differences.

Largely hydrated allophanic soils from Nicaragua show a higher water retention power, by equal water content, than those from Ecuador and French West Indies, in which the largest part of hydration water disappears irreversibly by air desiccation.

Infra-red spectroscopy and X-ray diffraction indicate outlines of clay minerals, and electron micrographs show clearly thread-like fine fibrous particles.

Rates of exchangeable bases are relatively high, and seem to be the consequence of the long dry season.

Red soils on volcanic ash only occur in Nicaragua. The principal factors governing the formation of these soils seem to be a relatively dry climate, flat areas limiting erosion, a sparse vegetation and a strong insolation.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Studie betrifft vulkanische Aschenböden der pazifischen Küste von Nicaragua. Zahlreiche Vergleiche werden gezogen mit ähnlichen Böden der französischen Antillen und Equators, besonders über die physiko-chemischen Eigenschaften, die thermischen Analysen, die Röntgendiffraktion, die Infrarotspektroskopie und die Elektronenmikroskopie.

Während die Halloysitböden mit relativ hohem Tongehalt dieser drei warmen Tropengebieten sich sehr ähneln, zeigen hingegen jüngere Böden, mit geringem Tongehalt wesentliche Unterschiede.

Die Böden von Nicaragua mit sehr stark hydratisierten Allophanen halten das Wasser mit grösserer Energie zurück, bei gleichem Wassergehalt, als die Böden von Equator und den Antillen ; bei letzteren lässt sich der grösste Teil des Hydratationswassers durch Lufttrocknung bei Zimmertemperatur unwiederbringlich abtreiben.

Infrarotspektroskopie und Röntgendiffraktion zeigen ein Beginnen von Organisation in der Tonfraktion ; die Elektronenmikroskopie zeigt klar das Vorkommen eines faserförmigen, oft verzweigten und vernetzten Minerals. Der relativ hohe Gehalt an austauschbaren Kationen scheint Konsequenz des nur mässig feuchten Klimas zu sein.

Die roten Böden auf Vulkanaschen kommen hingegen nur in Nicaragua vor. Ein relativ trockenes Klima, eine ebene Lage ohne Erosion, die spärliche Buschvegetation und die starke Sonnenbestrahlung können zweifellos als die hauptsächlichsten bodenbildenden Faktoren angesehen werden.

PLAN

Préambule

1. INTRODUCTION

- 1.2. Morphologie
- 1.2. Climat
- 1.3. Agriculture

2. GÉOLOGIE

- 2.1. Les volcans actifs
- 2.2. Les périodes du volcanisme
- 2.3. Nature des produits rejetés
- 2.4. Etude minéralogique des sables

3. LES SOLS A ALLOPHANES FORTEMENT HYDRATÉS

- 3.1. Conditions de formation
- 3.2. Morphologie des profils
- 3.3. Caractéristiques hydriques
- 3.4. Capacité d'échange
- 3.5. Bases échangeables — état de saturation — pH
- 3.6. Matières humiques
- 3.7. Substances minérales amorphes
 - 1) Dispersion — 2) Rayons X — 3) Infrarouge — 4) Microscope électronique
- 3.8. Transition entre les sols à allophanes fortement hydratés et les sols à halloysite

4. LES SOLS BRUN ROUILLE ARGILO-LIMONEUX A HALLOYSITE

- Morphologie
- Caractéristiques physico-chimiques
- Fraction fine inférieure à 2 μ

5. LES SOLS LIMONO-SABLEUX A HALLOYSITE

- 5.1. Conditions de formation
- 5.2. Morphologie des profils
- 5.3. Caractéristiques hydriques
- 5.4. Capacité d'échange de bases
- 5.5. Bases échangeables — état de saturation — pH
- 5.6. Matières humiques
- 5.7. Nature des substances minérales inférieures à 2 μ
- 5.8. Conclusion

6. LES SOLS ROUGES SUR CENDRES

- 6.1. Conditions de formation
- 6.2. Morphologie des profils
- 6.3. Caractéristiques hydriques
- 6.4. Capacité d'échange de bases
- 6.5. Bases échangeables — Etat de saturation — pH
- 6.6. Matières humiques
- 6.7. Fraction fine inférieure à 2 μ
- 6.8. Conclusion

7. CONCLUSION

8. BIBLIOGRAPHIE

PRÉAMBULE

Les observations de terrain ont été faites en décembre 1967, avec l'aide matérielle du Banco Nacional de Nicaragua et de l'Instituto de Fomento Nacional de Nicaragua. L'initiative de la mission dans ce pays, revient au Directeur Régional de l'Institut Français de Recherches Fruitières Outre-Mer et à P. SUBRA, représentant de cet organisme.

M. GUZMANN, Ingénieur de l'INFONAC, nous a accompagné dans une partie des tournées, nous faisant bénéficier de son expérience et de celle de divers ingénieurs du même organisme.

Les échantillons conservés dans leur humidité naturelle, ont été analysés par J. et M. GAUTHEYROU au laboratoire du centre ORSTOM des Antilles en Guadeloupe et y ont subi des traitements appropriés, avant d'être envoyés dans divers laboratoires pour des examens complémentaires.

C. de KIMPE s'est chargé de la spectrographie infrarouge et de son interprétation, à la station de Recherches du Ministère de l'Agriculture du Canada à Québec. Les clichés de microscopie électronique ont été exécutés par G. SIEFFERMANN au laboratoire de géologie du Professeur MILLOT à l'Université de Strasbourg.

L'examen des argiles aux rayons X a été réalisé par G. FUSIL dans le laboratoire de l'ORSTOM que dirige M. PINTA. M. DELAUNE s'est chargée de l'examen des sables au laboratoire de géologie de l'ORSTOM en France.

1. INTRODUCTION

1.1. MORPHOLOGIE

La région étudiée s'étend sur environ 200 km de longueur en bordure de la côte Pacifique et sur une cinquantaine de kilomètres de largeur. Elle correspond à l'axe du volcanisme récent d'Amérique Centrale et est jalonnée de nombreux volcans qui ont rejeté de très importantes quantités de cendres, ponces, scories et coulées de laves à des époques souvent récentes.

Schématiquement, on peut distinguer parallèlement à la côte, en s'éloignant de l'océan : une plaine côtière, la cordillère côtière, une plaine intérieure, et enfin les importants et vastes massifs volcaniques tertiaires qui constituent la région centrale du Nicaragua et la majeure partie du pays.

La cordillère côtière forme un ruban relativement continu, mais d'altitude variable. Près de Managua, elle atteint 1 000 m et présente d'assez vastes plateaux de 500 à 800 m d'altitude. Elle s'abaisse au sud, hormis quelques hauts volcans isolés qui dépassent 1 500 m. Au nord de Managua, la cordillère s'abaisse pour se relever à nouveau, mais suivant une ligne décalée vers l'est, en une suite presque ininterrompue de volcans soudés, dont les plus élevés atteignent 1 800 m d'altitude (Momotombo, San Cristobal). Le volcan Cossiguine marque l'extrémité nord de la chaîne avec son cône démantelé, il y a cent ans, par une terrible explosion.

La plaine côtière s'étend largement dans le nord du pays, mais est plus resserrée dans la partie centrale et au sud.

La plaine intérieure comprend de vastes régions marécageuses au nord et les deux grands lacs de Managua et de Nicaragua au centre et au sud. Bien que la rive soit située en certains endroits à moins de 25 km de la côte pacifique, les lacs appartiennent, néanmoins, au système hydrographique atlantique. Un projet de canal interocéanique concerne l'aménagement de leur déversoir naturel, le rio San Juan del Sur, frontière du Costa Rica.

A l'est, enfin, les massifs volcaniques tertiaires s'élèvent rapidement au-dessus de la plaine et s'étendent au loin vers l'Atlantique. Leur altitude peut dépasser 1 000 m.

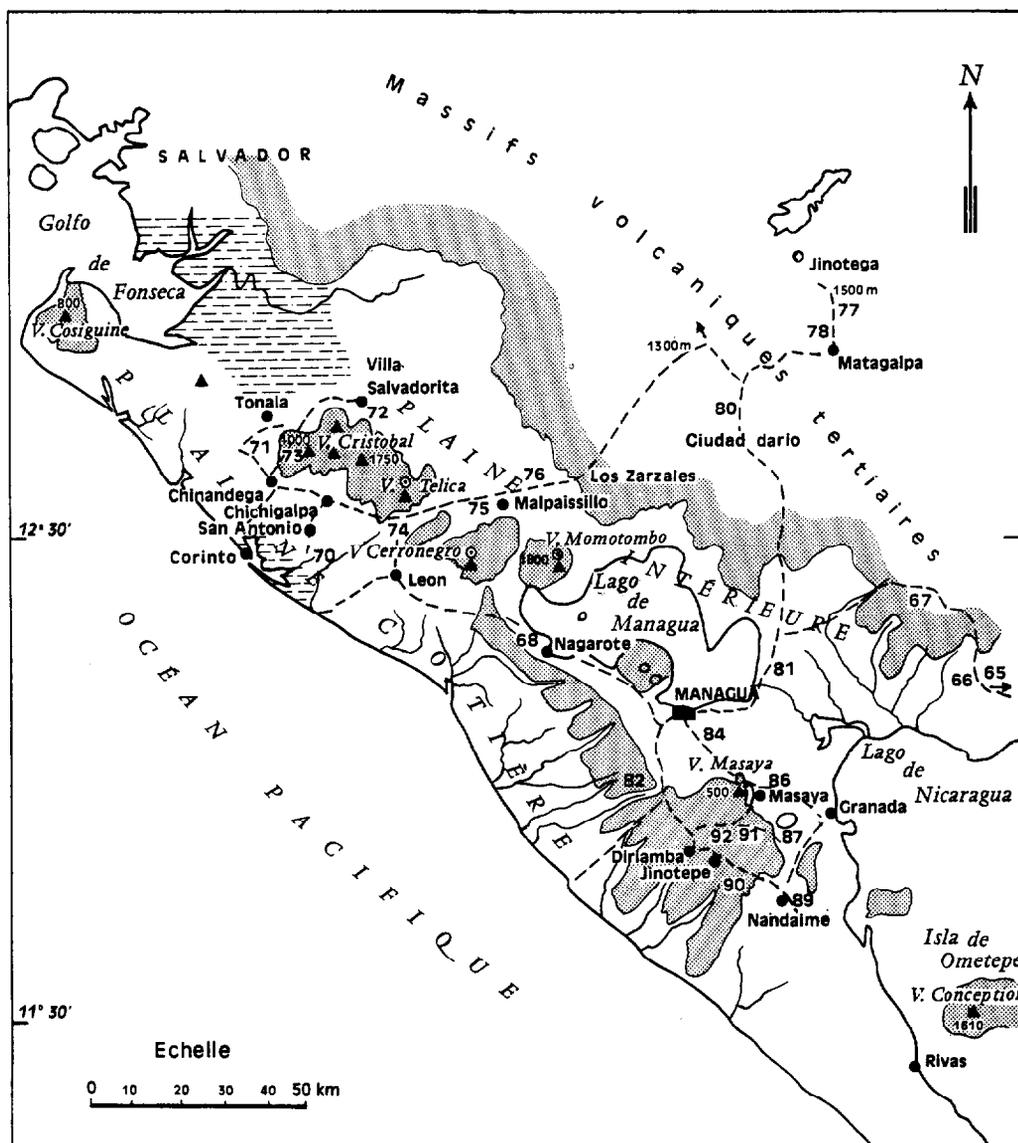


FIG. 1. — Carte de situation des profils.

1.2. CLIMAT

L'altitude n'est jamais très importante dans les régions habitées ; c'est essentiellement la pluviométrie qui conditionne l'agriculture.

Il semble que la pluviométrie augmente parallèlement à la côte du sud vers le nord, passant à 2 m par an près du volcan Cossiguine. Mais c'est, cependant, en s'enfonçant perpendiculairement à la côte, dans l'intérieur du pays, que les variations sont les plus importantes.

Aux abords de l'océan, la plaine est peu arrosée. La pluviométrie s'accroît lorsqu'on se rapproche des montagnes. Les versants accidentés des volcans ou les plateaux d'altitude sont relativement humides.

A l'est de la cordillère côtière, la pluviométrie décroît rapidement. La plaine intérieure est très sèche et les abords et contreforts des massifs tertiaires franchement arides, quasi désertiques par endroits. Plus à l'intérieur de ces massifs tertiaires, l'influence des vents humides de l'atlantique se fait davantage sentir, le paysage change souvent, très brusquement, à quelques kilomètres de distance. Certains secteurs d'altitude ennuagés ont une végétation de type super humide. La pluviométrie peut dépasser 4,5 m en bordure de la côte atlantique.

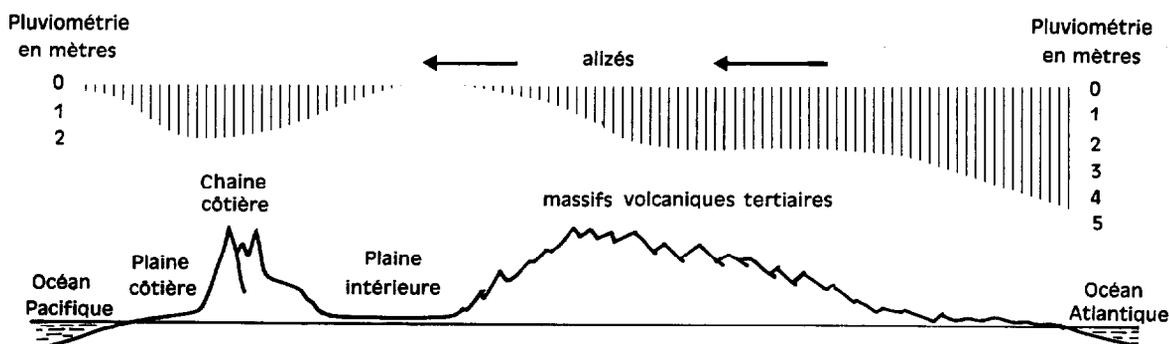


FIG. 2. — Schéma de distribution de la pluviométrie. (d'après TERAN)

Peu de renseignements très précis sont disponibles concernant les variations de la température et de la pluviométrie mensuelle.

A Managua, la température moyenne annuelle est de 27,5 °C, avec une moyenne des maxima de 32,5 °C et pour les minima de 22,5 °C. La température décroît approximativement de 1 °C par 120 m d'altitude, alors qu'en Equateur il faut 200 m environ pour obtenir la même variation. Il en résulte qu'à une altitude relativement modérée au Nicaragua, correspond un climat qui n'est rencontré en Equateur que dans des régions beaucoup plus élevées.

La carte jointe donne quelques indications sur la pluviométrie annuelle (fig. 3).

Le régime des vents varie au cours de l'année. Il conditionne la répartition des pluies. F. TERAN et J. PASQUERO (1964) donnent les explications suivantes :

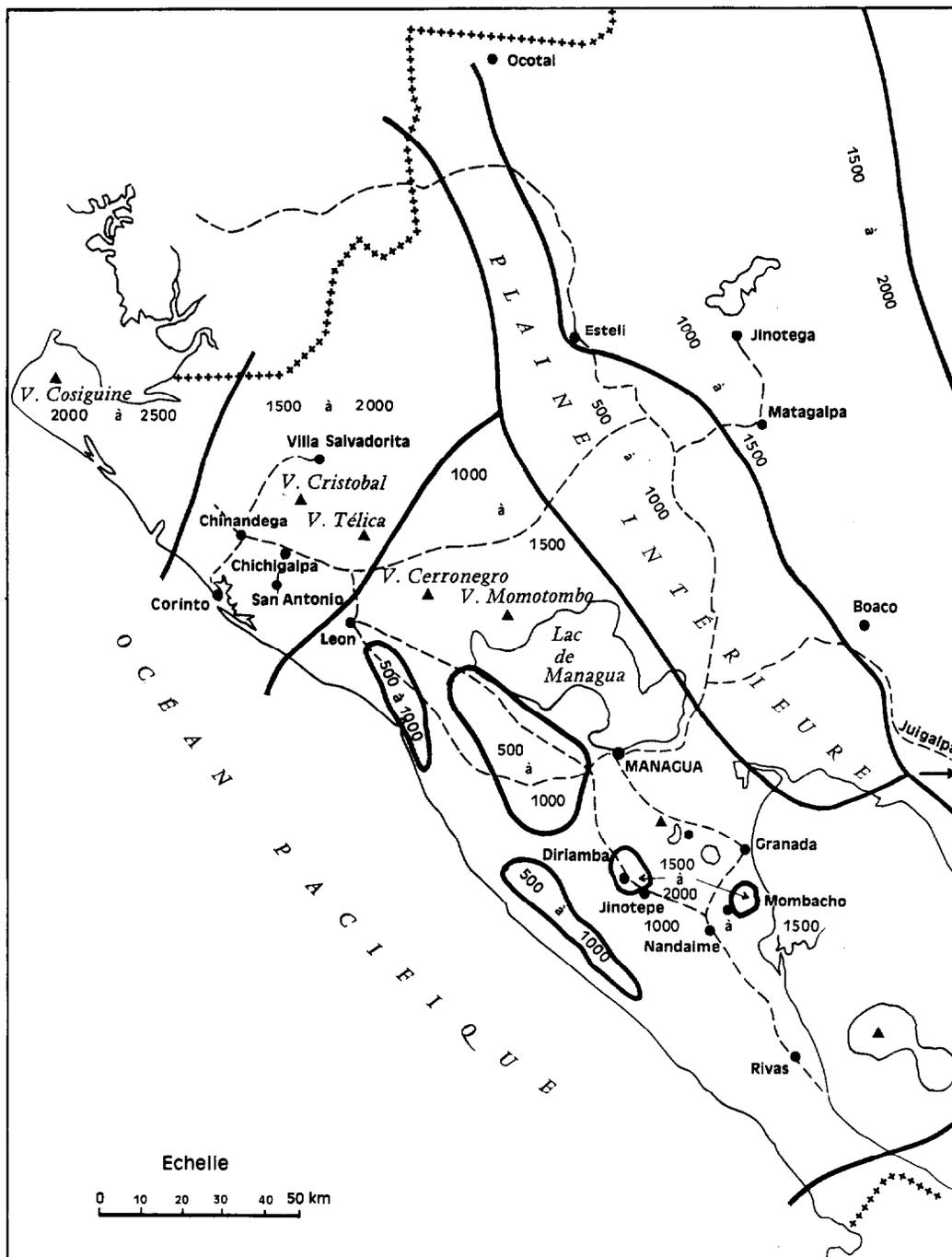


FIG. 3. — Carte de la pluviométrie annuelle (en mm).

<i>Région côtière</i>					Pluie	Temp.	Altitude
secteur nord	Pluie	Temp.	Altitude	Mombacho	2094		620
Corinto	1880		5 m	Diriamba	1760		580
Chinandega	1988	24,6	65				
Chichigalpa	2097						
Léon	1510		100				
secteur centre				Ocotal	1182	24,8	611
Managua	1213	26,5	60 m	Matagalpa	1370		700
Granada	1466		59	Jinotega	1530		1 000
Nandaime	1599	28,1	137	Esteli	1364		839
Rivas	1487			Juigalpa	1409	27,6	117
				Boaco	1575		400

Région centrale

De novembre à février, les alizés soufflent du NE vers le SO, car c'est dans l'hémisphère Nord refroidi que se trouvent les centres de hautes pressions, les vents étant déviés vers l'est par la rotation de la terre. De mars à avril, la zone de basse pression se trouve sur ces latitudes et les alizés cessent. C'est une période très chaude. De mai à septembre, les centres de hautes pressions passent dans l'hémisphère Sud et les vents viennent du sud, soufflant du SE vers le NO. C'est la période hivernale de pluies. En septembre-novembre, il y a durant quelques jours, inversion des vents, qui peuvent venir du Pacifique, apportant des pluies prolongées. Ce sont les contre-alizés du Sud-Ouest.

A Managua, il ne pleut pratiquement pas de janvier à mai. Les pluies durent de mai à novembre, avec des maxima en juin et en septembre.

1.3. L'AGRICULTURE

L'essentiel de la production agricole du pays et de la population est concentré dans cette étroite région côtière pacifique.

Les vastes plaines de cendrées volcaniques du nord du pays conviennent bien au coton en culture intensive et mécanisée, sans irrigation. Lorsque la durée de la saison pluvieuse est suffisante pour assurer la croissance de la plante, on obtient des rendements moyens qui seraient parmi les plus élevés du monde en culture non irriguée. Les traitements aériens de défense des cultures sont effectués plusieurs fois durant le cycle végétatif et une large partie des surfaces emblavées est récoltée à la machine.

La canne à sucre irriguée donne également de hauts rendements agricoles. La période de maturation est bien marquée, mais la richesse saccharine sous cette latitude, à basse altitude, est médiocre. Plusieurs sucreries sont installées le long de la côte avec, près de Corinto, dans le nord, la plus grosse d'Amérique Centrale.

La banane, en culture irriguée, occupe plusieurs centaines d'hectares et alimente un courant d'exportation, mais la plante souffre durant les périodes sèches de la faible humidité atmosphérique et des vents souvent violents.

Le coton, le café sous ombrage, et les cultures vivrières occupent les versants arrosés et les plateaux d'altitude moyenne. Dans la plaine intérieure, le coton est encore rencontré par place, mais la sécheresse accentuée limite considérablement les rendements.

Délaissant une large bande aride et totalement inculte dans la vallée intérieure et sur les versant, caillouteux du massif volcanique tertiaire, les cultures de coton recommencent à nouveau, plus à l'est sur les vertisols des petites vallées intérieures, là où l'influence de l'humidité de l'Atlantique se fait sentir. L'élevage et, dans les parties les plus élevées, le café, donnent à l'agriculture du massif tertiaire, sa physiologie actuelle. Les cafés de Matagalpa et Jinotega sont réputés.

L'irrigation est partout recherchée, mais elle ne demeure possible que dans certaines zones de la plaine côtière. Les nappes sont si profondes en bien des endroits, et les lacs de cratères souvent si encaissés, que le coût des pompes serait prohibitif.

Les eaux du lac de Managua sont trop chargées en bore pour être utilisables. Par contre, celles du lac de Nicaragua ont une qualité acceptable et sont utilisées.

La très grande perméabilité et la profondeur de beaucoup de sols sur cendres de la côte pacifique, permettent l'utilisation d'eaux relativement chargées en sel, après analyses détaillées et avis des services du Développement. Près du volcan Cristobal dans le nord, une bananeraie est irriguée avec de l'eau de pompage à 70 °C, relativement salée.

2. GÉOLOGIE

L'axe volcanique qui forme l'ossature de la région étudiée est constellé de cônes, certains bien visibles, d'autres démantelés. La ville de Managua, elle-même, et ses faubourgs, en comptent plusieurs. Le palais présidentiel est construit sur l'arête étroite du cratère de l'un d'entre eux et un lac de cratère sert de réservoir pour l'alimentation en eau de l'agglomération urbaine.

2.1. LES VOLCANS ACTIFS

Divers volcans sont encore actifs où ont émis, à plusieurs reprises, des coulées ou des produits pyroclastiques au cours du dernier siècle. A l'extrême Nord, le volcan Cossiguine explosa le 20 janvier 1835, perdant 1 000 m d'altitude et envoyant des cendres à plus de 1 500 km. Selon MacPHERSON, il avait plus de 2 000 m avant cette éruption et en a 820 actuellement. SUPPER estime à 50 km³ le volume de produits pyroclastiques divers, ainsi rejetés dans l'atmosphère, donc, davantage que le Krakatoa, lors de son éruption de 1883, où l'estimation donne 18 km³. Toute la presque île du Cossiguine fut dévastée et n'est occupée, maintenant, que par des bosquets nouvellement implantés. L'année 1835 est désignée dans les annales du Nicaragua comme « l'année de la poussière ».

Plus au sud, le volcan Telica fume encore constamment et son cratère demeure très chaud. Le profil régulier du Momotombo domine le lac de Managua. Quelques fumées s'en échappent et des coulées assez récentes dessinent de longues stries noires dans la végétation, depuis le haut du cratère égueulé à 1 800 m d'altitude, jusqu'à la base.

A proximité, le Cerro Negro est un volcan très récent dont le cône noir, sans la moindre végétation, se prolonge en de larges traînées noires de cendres et de laves, dans la végétation de la plaine environnante. Apparue en 1950 seulement, le cône atteint maintenant 600 m. Les émissions de cendres et de laves ont été fréquentes ces toutes dernières années.

Au sud de Managua, le volcan Masaya n'a que 500 m de hauteur. D'après R. ZOPPIS de SENA (1957), les premières éruptions de l'époque historique remontent à 1522-1537. En 1772, il y eut d'abondantes coulées de laves fluides qui envahirent les plaines, coupant la route de Managua à Masaya, et s'engouffrèrent dans une profonde lagune, située à proximité. Sur ces laves, extrêmement déchiquetées et crevassées, la végétation a encore à peine repris. Il y eut une éruption en 1857, puis en 1902, mais cette fois, avec d'importantes émissions de cendres qui édifièrent les deux cônes actuels et s'étendirent sur plus de 20 km aux alentours. Il ne semble pas d'ailleurs que les plantations de café de la région aient subi quelques dommages. Quelques coulées se sont épanchées en 1946. Depuis cette date, il n'y a plus qu'une activité de fumerolles et un abondant dégagement de vapeur d'eau mêlée d'anhydride sulfureux qui provoque de sérieux dégâts dans les plantations de café voisines, lorsque certaines conditions climatiques sont réunies (rosées ou bruines matinales).

Plus au sud, dans l'île d'Ometepe, le volcan Concepcion a émis quelques laves et des cendres en 1957.

2.2. LES PÉRIODES DU VOLCANISME

Tous les volcans en activité sont donc situés à proximité du Pacifique sur la chaîne côtière. En fait, il y aurait plusieurs chaînes parallèles et décalées, correspondant à différentes lignes de fracture de l'écorce terrestre, chacune de ces chaînes groupant un certain nombre de volcans.

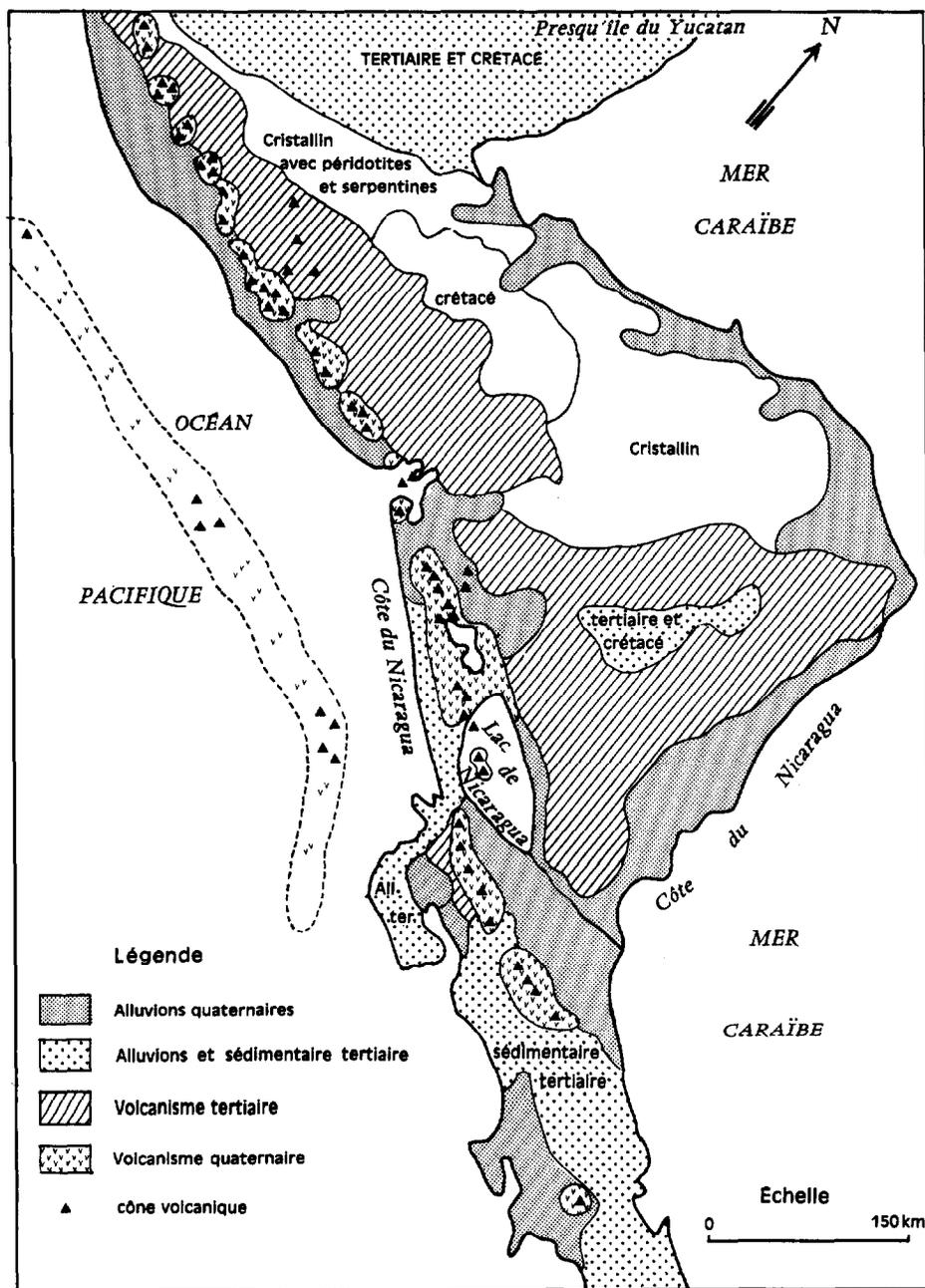


FIG. 4. — Carton géologique schématique de l'Amérique Centrale (d'après WEYL, 1961).

Examinons, maintenant, comment l'activité volcanique s'est manifestée au cours des temps géologiques et quelle fut la nature des produits rejetés.

On a coutume d'opposer le volcanisme tertiaire du centre et de l'ouest du Nicaragua au volcanisme très récent de la côte Pacifique.

En fait, d'après MCBIRNEY et HOWELL WILLIAMS (1965), les débuts des manifestations volcaniques connues, au Nicaragua, remonteraient à l'ère secondaire, puisque des basaltes ont été trouvés intercalés dans des grauwackes et des cherts datés de cette époque. Les serpentines qui viennent s'associer à certaines formations du Rio Prinzalpoca, viennent à l'appui de cette hypothèse. De même, certaines formations éocènes de la vallée du Rio San Juan reposent sur des laves sous-marines et des brèches qui correspondraient au crétacé. Les débris volcaniques sont abondants dans les formations sédimentaires de cet âge.

Il semble qu'il n'y ait pas eu d'interruption de l'activité volcanique. Au miocène apparaissent les volcans aux cônes visibles. Ils sont disposés sur une ligne voisine de celle formée par les sommets actuels du massif central ou massif volcanique tertiaire. Les laves de composition essentiellement andésitique, sont désignées par ces auteurs comme série de Matagalpa. Elles sont associées aussi à quelques épanchements dacitiques, mais très peu de basaltes. Leur équivalent existe au Guatemala et au Honduras.

Vers le milieu et la fin du miocène, on assiste à des épanchements considérables d'ignimbrites qui sortent des fissures situées sur le flanc ouest de ces volcans. Ces ignimbrites recouvrent environ le tiers ouest de la République, sur une épaisseur de 1 000 à 2 000 m. L'époque de cet épanchement est connue avec certitude, car il correspond à une formation renfermant des fossiles datés du miocène. Une grande partie de ces ignimbrites sont de type andésitique et dacitique, mais dans le nord du Nicaragua et au Honduras, les rhyodacites et les rhyolites seraient plus abondantes. De minces filons basaltiques et des sédiments tuffacés à grains fins sont intercalés dans ces ignimbrites.

On pense que la formation de la grande dépression Nicaraguayenne correspond à la fin de ces émissions d'ignimbrites, c'est-à-dire à la fin du miocène.

Durant le début et le milieu du pliocène, l'activité volcanique aurait pratiquement cessé, puis à nouveau repris sur les deux bords de la dépression Nicaraguayenne, donnant naissance à la chaîne côtière actuelle et à quelques volcans situés sur le bord Est de la dépression. De fait, quatre cônes encore bien conservés peuvent être observés en bordure du massif tertiaire.

2.3. NATURE DES PRODUITS REJETÉS

Quelle est la composition minéralogique et chimique des produits rejetés par ces volcans, ou du moins, celle des coulées les plus abondantes ?

Pour MCBIRNEY et HOWELL WILLIAM (1965), l'analyse chimique des laves quaternaires permet de distinguer les matériaux de la chaîne nord du Momotombo au San Cristobal (chaîne de Marabios) de ceux qui constituent les volcans au sud de Managua jusqu'au Costa-Rica. Les premiers sont de type andési-basaltique avec quelques épaisseurs de ponces dacitiques, mais sans roches de composition intermédiaire. Ceux du Sud présentent une gamme continue, depuis les basaltes jusqu'aux dacites. Les raisons de ces différences n'apparaissent pas clairement, bien que ces deux ensembles appartiennent à deux lignes de fractures décalées et distinctes.

SAPPER (1913), dans son ouvrage sur les volcans d'Amérique Centrale, indique la composition des laves prélevées sur la plupart des volcans du Nicaragua. Ces études ont été complétées en 1936. Les nouvelles dénominations utilisées sont signalées par WEYL (1961), mais ne concernent que certains volcans.

Malgré l'ancienneté de ces déterminations et de la terminologie qu'il y aurait intérêt à reprendre avec plus de rigueur, le tableau ci-dessous montre le caractère nettement basique des épanchements.

TABLEAU 1
NATURE DES ÉPANCHEMENTS VOLCANIQUES (d'après WEYL)

	SAPPER, 1913	Examen 1936 et 1952	
NORD			
Cossiguine	basalte andésitique	pigeonite andésite	actif 1835
CHAÎNE DE MARABIOS (Cristobal à Momotombo)			
El Chonco	basalte		
El Negro	basalte		1685
Chichigalpa	basalte andésitique		fumerolles
Telica	basalte à olivine	labradorite-andésite	1685
Santa Clara	basalte à olivine	andésite basaltique	
Rota	andésite		éteint
Las Pilas	basalte		1954-1957
Cerro Negro	basalte à olivine	(andési-basalte, pigeonite-labradorite-andésite)	depuis 1950
Momotombo	basalte et dacite	(andési-basalte)	laves 1905
CHAÎNE CENTRALE ET SUD			
Apoyeque	andésite		éteint
Masaya	basalte		laves 1946
Apoyo	basalte		éteint
Mombacho	basalte		éteint
Zapatera	basalte		éteint
Concepcion	basalte		cendres et laves 1957

Pour les examens les plus récents, on dispose des analyses totales que nous indiquons ci-dessous d'après WEYL (1961), classées du nord vers le sud du pays.

TABLEAU 2
COMPOSITION DES LAVES DES VOLCANS

	Cossiguine	Telica	Cerro Negro		Momotombo	Laguna Asosoca	Masaya
SiO ₂	58,84	52,20	48,78	49,20	53	55,95	50,6
TiO ₂	0,69	1,54	1,24	1,28	1,33	1,86	0,44
Al ₂ O ₃	17,76	17,25	18,16	19,38	17,05	14,95	17,29
Fe ₂ O ₃	2,05	5,10	4,65	4,42	6,24	3,8	8,08
FeO	5,48	4,69	5,68	5,55	4,01	5,56	3,54
MnO	0,23	0,13	0,14	0,14	0,12	0,15	0,17
MgO	2,31	4,40	6,79	5,41	4,94	4,93	5,78
CaO	6,82	9,57	11,71	11,89	9,03	8,46	11,90
Na ₂ O	3,86	2,68	2,62	1,76	3,14	2,48	1,99
K ₂ O	1,18	1,47	0,36	0,85	1,13	0,97	1,19
H ₂ O ⁺	0,26	1,01			0,08	0,80	0,005
H ₂ O ⁻	0,19						
P ₂ O ₅	0,05	0,03	0,05	0,05	0,08	0,04	0,01
TOTAL	99,7	100,7	100,18	99,93	100,15	99,95	100,99

2.4. ÉTUDE MINÉRALOGIQUE DES SABLES

La fraction des sables supérieure à 50μ a été étudiée au laboratoire de l'ORSTOM par M. DELAUNE, selon les méthodes préconisées par S. DUPLAIX (1958). La fraction légère renferme les minéraux de densités inférieures à celle d'une liqueur lourde (bromoforme) de densité 2,89. La fraction lourde comprend les minéraux ayant une densité supérieure.

La composition minéralogique varie peu dans l'ensemble, d'une région à l'autre et confirme la basicité des produits rejetés qui pouvait, a priori, être déduite de la fluidité manifeste des coulées anciennes ou récentes. Les seules variations portent sur la présence ou l'absence de minéraux accessoires, comme le zircon, et dans le pourcentage apparent de minéraux déjà nettement altérés.

Quelques kilomètres au nord de Chinandéga (échantillon 71), la fraction lourde représente 20 % des sables. L'augite domine nettement, puis vient l'hypersthène. Les minéraux paraissent légèrement altérés avec un enduit sans doute ferrugineux. La fraction légère renferme de fins plagioclases du type andésine-oligoclase. 60 % seraient altérés, les autres présenteraient déjà des signes d'altération manifestes et fort peu seraient intacts.

En se rapprochant de la côte (échantillon 69), la proportion des minéraux lourds est plus importante et outre l'augite et l'hypersthène, on note la présence de magnétite, hornblende, rutile.

Plus à l'intérieur des terres et plus près du volcan, la composition des sables est identique à celle de l'échantillon 71, mais les sables sont plus grossiers, phénomène bien normal, quand on se rapproche du centre d'émission. La composition des cendres, dans cette région Nord, est donc bien homogène.

Au sud de Managua, dans une autre région, près du volcan Masaya dont l'activité volcanique est récente, il y a moins de minéraux lourds (12 %), mais aussi une dominance d'augite. Les zircons sont en quantité relativement abondante, et sans doute s'agit-il de minéraux apparus secondairement. Environ 60 % des minéraux légers sont des plagioclases de type andésine-oligoclase, très peu altérés, mais 40 % sont des masses arrondies qui n'ont pu être encore déterminées.

Quoique l'hydratation du sol soit considérablement plus élevée (dépassant 100 %) que pour les autres profils déjà examinés, les minéraux semblent cependant plutôt moins altérés. La présence d'allopène, fortement hydratée, doit donc être attribuée ici aux conditions climatiques de l'altération (pluviométrie plus élevée à 600 m d'altitude) et non à une durée d'évolution plus poussée.

Dans la même région, mais à quelques dizaines de kilomètres, on observe deux dépôts superposés. Le dépôt supérieur est sableux, apparemment sans argile sur 40 cm, puis devient graveleux avec des ponces altérées rouille de 40 à 50 cm. En dessous, on passe à un sol enterré argilo-limoneux foncé, brun-rouille foncé, qui se prolonge jusqu'à plus de 150 cm de profondeur.

Il a paru intéressant d'examiner, non plus le niveau supérieur, mais le niveau enfoui, où la présence d'halloysite est déjà relativement importante. Les minéraux lourds représentent environ 25 % des sables, avec encore une dominance d'augite puis d'hypersthène et d'un peu de hornblende et de rutile. La fraction légère est aussi du type oligoclase-andésine, mais ces plagioclases sont très frais et rares sont ceux qui apparaissent altérés. De tous les sables examinés, ce seraient donc les moins altérés, alors qu'il s'agit d'un sol nettement plus argilisé, donc, en principe, plus évolué que les précédents.

Ces quelques observations, encore trop peu nombreuses, montrent bien que l'apparition des substances amorphes hydratées ou de l'halloysite dans les sols sur cendres, dépend, dans une certaine mesure, davantage de l'intensité de l'altération, donc des facteurs climatiques, que de la durée de l'altération. Les très fines particules sont rapidement transformées, alors que les particules plus grossières comme les sables examinés ci-dessus, dont l'altération demande un temps plus considérable, peuvent demeurer relativement peu touchées.

3. LES SOLS A ALLOPHANES FORTEMENT HYDRATÉS

Il s'agit de sols de texture apparente limono-sableuse, présentant une humidité naturelle considérable, pouvant atteindre ou dépasser 100 g d'eau pour 100 g de sol sec, ainsi que d'autres propriétés très particulières qu'il faut attribuer à la présence de substances amorphes très hydratées en l'absence d'argiles cristallines classiques.

Des sols semblables ont été étudiés aux Antilles Françaises et en Equateur, mais certaines différences importantes apparaissent entre ceux du Nicaragua et ceux de ces deux contrées. Il sera donc intéressant de souligner les ressemblances et les oppositions et d'en chercher les raisons.

3.1. CONDITIONS DE FORMATION DES SOLS

Au Nicaragua, les sols à allophanes fortement hydratés sont observés sur des plateaux ou des versants montagneux situés entre 500 et 1 000 m d'altitude. Ces régions semblent relativement bien arrosées avec une pluviométrie annuelle de l'ordre de 2 m par an. La saison sèche est bien marquée, moins cependant que dans les plaines environnantes, et l'enneuagement fréquent en atténue probablement les effets. Le sol est soumis, sur une certaine épaisseur, à des influences desséchantes manifestes.

En Equateur et aux Antilles, le maintien de l'humidité du sol est assuré tout au long de l'année, soit par une pluviométrie importante et bien répartie, de l'ordre de 3 à 4 m par an, soit par un enneuagement très important qui limite considérablement l'évapotranspiration et constitue une source d'apports occultes complémentaires. Il peut s'agir aussi de niveaux profonds enfouis sous de nouvelles couches de cendres, qui demeurent constamment humides, quoique sans engorgement. Dans ces deux pays, les sols ne se dessèchent donc pratiquement jamais, ou seulement sur une très faible épaisseur en surface.

3.2. MORPHOLOGIE

Trois profils ont fait l'objet de prélèvements au Nicaragua :

Le premier profil (N 86) est situé à 500 m d'altitude, non loin des coulées de l'époque historique du volcan Masaya. C'est un vaste plateau cultivé en coton et sorgho, et les sols seraient labourés chaque année.

Dans les 50 premiers cm, le sol est très foncé, bien humifère (10 YR 3/2). La texture apparente est limono-sableuse avec une dominance, semble-t-il, de sables fins, sans éléments grossiers. Le sol s'émiette aisément en petits agrégats peu anguleux, ce qui est l'indice d'une certaine cohésion.

De 50 à 100 cm, la coloration devient plus jaune (7,5 YR 5/6) sur le sol frais en place. La couleur du sol mouillé est beaucoup plus foncée et devient, au contraire, très claire sur le sol séché à l'air. La texture semble limoneuse à limono-sableuse, sans éléments grossiers. Des petits canalicules sont remplis de matériaux noirs issus du niveau supérieur.

Vers 1 m de profondeur, on observe un niveau de ponces beige-clair, avec quelques enduits rouille, d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, qui repose sur un sol enfoui, de coloration très foncée et d'aspect identique au niveau de surface.

On peut apercevoir dans les talus de route, sous ce deuxième sol enterré, plusieurs mètres de cendre grise très fine, mais consolidée, un peu durcie.

Le deuxième profil (N 92) a été examiné sur le vaste plateau de Jinotepe, à peu près à la même altitude que le précédent. Planté en caféiers sous ombrage, le sol n'a donc pas été travaillé depuis de très nombreuses années.

L'aspect du profil est très voisin du précédent. Le sol est plus foncé, plus riche en matières organiques dans les 50 premiers centimètres. Il demeure encore assez foncé jusqu'à 1 m et la coloration jaune est moins apparente. La texture apparente est celle d'un limon sableux à sable très fin, bien meuble.

Le troisième profil, à la différence des deux précédents est situé sur une forte pente, caractéristique de tout le versant faisant face au Pacifique, de la région de Diriamba. C'est une région très accidentée, entaillée de profonds ravins qui laissent entrevoir des épaisseurs considérables de cendres et de ponces. La culture du café est prospère jusqu'à 1 000 m d'altitude, altitude de ce prélèvement. Les sols ne sont pas travaillés, mais sont sujets à des remaniements par érosion.

Sur 1 m d'épaisseur, la coloration du sol humide est très foncée, (7,5 YR 3/2), mais très claire sur sol sec (10 YR 6/2). La texture apparente est celle d'un sable fin, mais avec quelques graviers de ponce noire dans les 40 premiers centimètres, probablement par suite de remaniements sur les pentes, et d'apports. Ces ponces ont de quelques millimètres à près de 1 cm et s'écrasent facilement entre les doigts.

On rencontre ensuite, successivement, un niveau de 10 cm d'épaisseur de ponce, beige gris clair, peu altérée, puis sur 30 cm, un niveau brun rouille (plus rouille que 5 YR 3/4) qui renferme nettement un peu d'argile, de tendance sablo-argileuse, dont les revêtements très nets, bien luisants, et le changement de coloration du sol écrasé entre les doigts, font penser aux sols brun-rouille à halloysite des Antilles et d'Equateur. Au-delà de 130 cm de profondeur, ce sont d'épais niveaux de ponces beige clair, à tâches rouilles, consolidés et assez durs à pénétrer.

Les profils observés sont donc caractérisés par une texture apparente limoneuse à limono-sableuse, à sable fin, une très faible cohésion, et un horizon humifère bien marqué d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur.

En Equateur et aux Antilles, les sols à allophanes fortement hydratés ont une morphologie un peu différente. L'horizon humifère, quand il ne s'agit pas d'un récent recouvrement de cendre, est moins profond et on passe plus rapidement au niveau jaune clair. La texture apparente est limoneuse, mais avec une légère et bien nette « cohésion allophanique », un toucher onctueux, et une consistance bien savonneuse des petits agrégats, lorsqu'ils sont écrasés entre les doigts. Ces caractères ne sont guère observés dans les profils étudiés au Nicaragua. La cohésion y est très faible, la structure très finement particulière.

En bref, pour une humidité naturelle similaire et élevée, les sols des Antilles et d'Equateur présentent des symptômes perceptibles d'hydratation nettement plus marqués que ceux du Nicaragua. Nous reviendrons plus loin sur cette différence importante.

3.3. CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES

Le tableau 3 donne pour ces trois profils, l'humidité du sol au champ au moment du prélèvement, les humidités aux pF 2,5, 3,0 et 4,2 mesurées sur échantillons conservés frais en sacs plastiques et l'humidité aux pF 2,5 et 3,0 des mêmes échantillons préalablement séchés à l'air, à la température ordinaire. Les résultats sont exprimés en eau pour 100 g de sol séché à 105 °C.

TABLEAU 3
LES VALEURS DES pF-HUMIDITÉ POUR 100 g DE SOL SÉCHÉ À 105 °C

Echantillons	Profondeur cm	Echantillons conservés humides					Echant. préalablement séchés à l'air		
		pF 2,5	pF 3,0	Eau naturelle	pF 4,2	Eau utile	pF 2,5	pF 3,0	pF 2,5 à 50 °C
							à température ordinaire		
86a	0-20	61	59	51	31	29	59	53	57
86b	60-90	108	101	88	62	45	87	78	84
86c	120-140	74	66	63	49	25	58	55	56
92a	0-20	89	81	81	48,2	41	78	73	
92b	40-80	119	102	105	72,4	46,6	83	75	
82a	0-20	65	59	56	35,5	29,5	61	59	
82b	40-60	70	62,5	57	40	30	63	58	59

S'agissant de sols à texture apparente limono-sableuse, toutes ces valeurs sont élevées ou considérables. L'humidité naturelle au moment du prélèvement, après environ un mois de saison relativement sèche, correspond à celle du pF 3, déterminée sur échantillon conservé humide. La différence entre les humidités obtenues pour les pF 2,5 et 4,2, ou encore « l'eau dite utilisable » est importante, de l'ordre de 30 à 40 d'eau pour 100 g de sol sec. Ces valeurs, très élevées pour des sols aussi légers, doivent être corrigées pour les calculs des besoins en eau exprimés en volume de sol, pour tenir compte de la densité apparente relativement faible du sol (0,7). Celle-ci n'a pu être déterminée que pour certains horizons.

Les valeurs obtenues pour les pF 2,5 et 3,0, mais après dessiccation préalable du sol à l'air, suivant la technique habituellement utilisée, sont nettement plus faibles que celles déterminées sur échantillons conservés humides, mais encore importantes. Cette diminution est de l'ordre de 15 à 25 %. Pour s'assurer de la dessiccation effective du sol, on a refait ces déterminations sur les mêmes échantillons, préalablement étalés en couches très minces et portés à 50 °C, durant une semaine. Les résultats obtenus sont très similaires. L'irréversibilité de la dessiccation après séchage à l'air n'affecte donc qu'un pourcentage restreint de l'eau initialement contenue dans le sol en place ressuyé.

En Equateur et aux Antilles, les sols sur cendres ont souvent des humidités naturelles, ou aux pF 2,5 et 3,0 déterminés sur échantillons conservés frais, aussi élevées et souvent même davantage. Par contre, une très forte différence existe entre les déterminations effectuées sur les échantillons conservés frais ou préalablement séchés à l'air. On a montré (COLMET-DAAGE *et al.*, 1965) que, même après plusieurs mois de réhumectation d'échantillons séchés à l'air, les valeurs de l'humidité au pF 2,5 restaient voisines de 30 à 40 g p. 100 de sol, au lieu des 100 et 150 trouvés lorsque la détermination était effectuée sur des échantillons conservés humides.

L'irréversibilité de la dessiccation du sol à l'air à température ordinaire est donc beaucoup plus marquée aux Antilles et en Equateur que dans les sols du Nicaragua.

Quelles sont les raisons de ces différences de comportement vis-à-vis de l'eau ? On peut, a priori, penser que la force de rétention plus énergique pour l'eau des sols du Nicaragua est la conséquence d'une structure plus stable, et que la perte d'eau importante et irréversible qui se produit dans les sols des Antilles et d'Equateur est liée à un effondrement de la structure. Une humidité constante permettrait le maintien dans le sol de fortes quantités d'eau et d'une structure distendue qui s'effondre dès que survient une dessiccation trop poussée à l'air, au-delà du pF 4,2. Avec les périodes de relative sécheresse de la région

étudiée au Nicaragua, une telle structure a peu de chances d'être rencontrée. La présence de fortes quantités d'eau dans le sol, impliquerait dans ces régions un réseau plus stable, où les forces de rétention pour l'eau sont beaucoup plus importantes. Les clichés de microscopie électronique illustrent bien ces différences de comportement et de structure.

3.4. CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE BASES

La capacité d'échange de bases déterminée sur sol conservé frais, atteint des valeurs considérables pour des sols aussi légers. Le tableau 4 montre bien le peu d'influence de la matière organique. Sauf dans le niveau de surface ou les niveaux très riches en matières organiques (teneurs supérieures à 5 %), la capacité d'échange n'est guère modifiée après traitement prolongé du sol à l'eau oxygénée. Un parallélisme apparaît nettement avec l'humidité du sol au pF 2,5 ou 3,0 déterminé sur échantillon frais, c'est-à-dire avec la quantité des substances amorphes et l'intensité de leur hydratation.

Lorsque les déterminations de la capacité d'échange sont effectuées sur sol séché à l'air, à la température ordinaire, les chiffres obtenus sont nettement inférieurs. Cette diminution est de l'ordre de 10 à 25 %, c'est-à-dire, du même ordre que celle de l'humidité au pF 2,5, déterminée sur échantillon frais et séché à l'air. Cette analogie montre bien la relation étroite qui existe entre la capacité d'échange et les substances amorphes.

En opérant, non plus à pH 7, mais à pH 9 sur échantillon frais, toujours avec l'acétate d'ammonium, on observe une nette augmentation de la capacité d'échange de bases, d'environ 15 à 20 %, phénomène d'observation courante dans les sols à substances amorphes hydratées.

TABLEAU 4
VARIATIONS DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE BASES (Sol entier)

Echantillons	Profondeur cm	Détermination sur sol conservé humide					Détermination sur échantillons séchés à l'air T pH 7 (5)
		T pH 7 (1)	T pH 9 (2)	T pH 7 après H ₂ O ₂ (3)	MO % C × 1,72	T pH 7 après traitement SEGALEN (4)	
86a	0-20	63	74	50	(6,8)	7	56
86b	60-90	93	110	92	(4,9)	5	73
86c	120-140	69	82	67	(1,7)	16	57
92a	0-20	102		48	(18,1)	4	71
92b	40-80	98		67	(10,6)	2	65
82a	0-20	73	93	46	(10,2)	8	64
82b	40-60	74	90	55	(9,9)	6	61

(1) Avec l'acétate d'ammonium à pH 7.

(2) Idem, mais à pH 9.

(3) Destruction de la matière organique à l'eau oxygénée, puis détermination de T à pH 7 comme pour (1).

(4) Trois attaques successives avec HCl, 6 N et la soude 0,5 N, puis détermination de T à pH 7.

(1), (2), (3), (4) Examens effectués sur échantillons conservés dans leur humidité naturelle. Résultats exprimés pour 100 g de sol séché à 105 °C.

(5) Idem (1), mais sur échantillon séché à l'air. (Résultats pour 100 g de sol séché à 105 °C).

Dans les sols à allophanes hydratés des Antilles et d'Equateur, la capacité d'échange de bases sur sol séché à l'air, peut ne représenter que la moitié ou les deux tiers de celle déterminée sur échantillon conservé frais. Après attaque à l'eau oxygénée, les résultats sont analogues à ceux du Nicaragua, confirmant l'importance, souvent exclusive, des substances amorphes, lorsque les teneurs en matières organiques ne sont pas très importantes et ne dépassent pas 5 % environ.

L'augmentation de la capacité d'échange déterminée à pH 9, au lieu de pH 7, est souvent plus importante, atteignant 30 à 40 % (tableau 5).

TABLEAU 5

CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE BASES DE QUELQUES SOLS À ALLOPHANES FORTEMENT HYDRATÉS DES ANTILLES ET D'ÉQUATEUR, POUR PERMETTRE LES COMPARAISONS AVEC CEUX DU NICARAGUA

Echantillons	T pH 7 (1)	T pH 9 (2)	T après traitement SEGALEN pH 7 (3)
Guadeloupe { Matouba	39	54	5
Martinique } SM 25b SM 25c SM 26d MR 4b	41	52	6
	62	84	4
	80	97	4
	42	62	7
Equateur { E 151 E 152	59	78	3
	54	71	5

+ Déterminations sur sol conservé humide.

Résultats pour 100 g de sol séché à 105 °C.

(1), (2), (3) Voir titre tableau 4.

Après trois traitements successifs du sol par l'acide chlorhydrique froid, six fois normal, puis la soude demi-normale, la capacité d'échange de bases décroît considérablement, devenant parfois pratiquement nulle (tableaux 4 et 5). Une importante proportion du sol entier est dissoute (souvent plus de la moitié), et probablement la majeure partie des substances amorphes. L'influence considérable de ce traitement préconisé par SÉGALEN (1968) pour la dissolution des produits amorphes, souligne bien les relations entre la capacité d'échange et ces substances.

Quelques remarques doivent, cependant, être faites, concernant la détermination de la capacité d'échange. Elles ne modifient d'ailleurs en rien les conclusions auxquelles on a abouti ci-dessus.

La détermination de la capacité d'échange sur les sols riches en substances amorphes est délicate, et sujette à des variations importantes pour des modifications des techniques opératoires qui peuvent sembler légères. On a vu l'importance de l'humidité du sol au moment de la détermination, surtout pour les sols des Antilles et d'Equateur, si l'humidité correspond à une valeur de pF supérieure à 4,2. Le temps de contact avec l'acétate d'ammonium lorsqu'on opère sur échantillon séché à l'air est un facteur important de variation s'il est inférieur à 12 h. Le lavage à l'alcool de l'excès d'acétate entraîne des modifications suivant qu'il s'agit d'alcool pur à 95 °C, ou dilué à 50 % dans l'eau et amené à pH 7, avec quelques gouttes d'ammoniaque. Après attaque à l'eau oxygénée pour la destruction partielle de la matière organique, le fait d'ajouter quelques gouttes d'ammoniaque, pour faciliter la destruction de l'eau oxygénée et éliminer les dégagements gazeux, entraîne une élévation sensible de la capacité d'échange, déterminée pourtant de la même manière à pH 7 avec l'acétate d'ammonium. Cette élévation momentanée du pH

a probablement suffit pour libérer des positions d'échanges, ce qui coïncide bien avec les valeurs plus élevées de la capacité d'échange déterminée à pH 9.

Les comparaisons de la capacité d'échange sur divers sols ou après divers traitements, ne sont donc valables que si le mode opératoire suivi est rigoureusement le même. Il faut donc interpréter les résultats avec une certaine prudence. Le traitement à l'eau oxygénée peut ainsi provoquer une diminution de la capacité d'échange, due à la destruction de formes actives de matières organiques, et entraîner simultanément, par suite de dissolutions libérant des positions d'échange, une augmentation de la capacité d'échange. Le bilan peut être alors négatif, nul ou positif. Seules de fortes variations et la constance de leur répétition sur des échantillons de diverses provenances, peuvent permettre de tirer des conclusions.

3.5. BASES ÉCHANGEABLES, TAUX DE SATURATION, pH DU SOL

Si la capacité d'échange de bases est une propriété bien caractéristique et particulière des substances amorphes hydratées, par contre, la teneur en bases échangeables obéit aux règles générales observées dans les sols des régions tropicales humides.

En Equateur, et aux Antilles, les sols à allophanes fortement hydratés ne se rencontrent que dans les régions à pluviométrie élevée et régulière. Les sols étant perméables et bien drainés, il en résulte un entraînement important des bases et en particulier du magnésium, quelle que soit la richesse en bases totales des matériaux primaires ou des fractions très fines. La teneur en bases échangeables dépasse rarement 5 à 10 mé p. 100 de sol dans les régions de pluviométrie annuelle relativement modérée, de l'ordre de 2,5 m et devient pratiquement nulle (inférieure à 1 mé %) dans les régions très arrosées, où les précipitations annuelles atteignent 4 à 5 m. En dépit d'un taux de saturation très faible, souvent de l'ordre de 1 à 5 %, les pH peuvent demeurer anormalement élevés et atteindre 5,5 ou 6, valeurs qu'il serait impensable d'observer sur des sols fersiallitiques ou ferrallitiques, ayant un taux de saturation analogue. L'influence de la matière organique est, cependant, très sensible et les niveaux de surface peuvent être très acides avec des pH inférieurs à 5. Lorsque la détermination du pH est effectuée dans du KCl normal, les chiffres sont voisins ou peu inférieurs à ceux du pH mesuré dans l'eau, parfois même ils peuvent être supérieurs.

Au Nicaragua, la pluviométrie est relativement modérée et une période de sécheresse limite les mouvements d'eau dans le sol et les entraînements en profondeur. Les teneurs en bases échangeables sont importantes, de l'ordre de 10 à 25 mé p. 100 g de sol (tableau 6). Le calcium demeure le cation principal, mais les valeurs du magnésium échangeable sont notables : 5 à 8 mé %, alors que dans les sols hydratés des Antilles et d'Equateur, elles dépassent rarement 1 mé et le plus souvent même : 0,5 mé % (des carences magnésiennes sur bananier seraient observées sur ces sols, en-dessous du seuil de 0,15 mé %).

Les pH demeurent également anormalement élevés (6 à 7), en regard de l'état de saturation (20 à 35 %), mais les valeurs du pH, déterminées dans KCl normal, sont nettement inférieures à celles du pH déterminé dans l'eau avec le même rapport sol/eau.

Il est possible que cette importante différence de teneurs en bases échangeables entre les sols à allophanes hydratés des Antilles et d'Equateur d'une part, et ceux du Nicaragua d'autre part, puisse avoir des répercussions profondes sur l'évolution de la fraction colloïdale. On sait l'importance du magnésium pour l'apparition de la montmorillonite dans les sols sur matériaux volcaniques ou les synthèses au laboratoire. C'est un élément qui semble très rapidement éliminé de la fraction échangeable des sols des Antilles et d'Equateur, malgré la présence de minéraux primaires ferro-magnésiens en quantités notables. On connaît moins l'influence du calcium.

TABLEAU 6

TENEURS EN BASES ÉCHANGEABLES - TAUX DE SATURATION - pH

Echantillons	Bases échangeables mé %					V %	pH	
	Ca	Mg	K	Na	S		eau	KCl
N 86a	13,5	4,5	1,8	0,10	19,9	31	6,6	5,7
N 86b	15,4	7,2	0,55	0,36	23,5	25	6,9	5,9
N 86c	16,2	6,6	0,16	1,29	24,2	35	7,1	5,5
N 92a	16,7	7,1	0,93	0,11	24,9	24	6,1	5,7
N 92b	8,1	2,9	0,25	0,11	11,3	11	5,9	5,3
N 82a	16,5	3,5	2,13	0,16	22,3	30	6,3	5,6
N 82b	17,6	3,02	0,62	0,25	21,3	29	6,5	5,7

3.6. LES MATIÈRES HUMIQUES

La proportion des acides humiques et fulviques illustre fort bien les différences climatiques qui influent sur la formation des sols fortement hydratés. Aux Antilles et en Equateur, comme dans toutes les régions tropicales de forte humidité, les acides fulviques l'emportent très largement sur les acides humiques. Au Nicaragua au contraire, la pluviométrie étant modérée et la période de sécheresse relativement bien marquée, ce sont les acides humiques qui dominent très nettement.

TABLEAU 7

LES FORMES DE MATIÈRES ORGANIQUES

Echantillons	Profondeur cm	M.O. % C × 1,72	C/N	Résultats en C pour 100 g de sol		Pourcentage des mat. humiques totales par rapport à la matière organique
				acides humiques	acides fulviques	
N 82a	0-20	10,2	10,2	1,50	0,68	21
b	40-60	9,9	9,9	1,68	0,56	23
N 86a	0-20	6,8	12,7	1,09	0,34	21
b	60-90	4,9		0,36	0,31	13
c	120-140	1,7		0,25	0,04	17
CA 4a	Antilles 0-20	13,2	13	1,20	2,20	26
b	20-40	3,2		0,02	0,30	10
CA 17a	0-20	10,1	10	0,24	0,48	7,1
b	40-60			0,12	0,18	

Cette importante proportion des acides humiques, de même que les teneurs élevées en bases échangeables, seraient donc la conséquence du climat sans qu'il soit possible de dire s'il s'agit de résultats indépendants l'un de l'autre, ou liés entre eux.

3.7. LES SUBSTANCES MINÉRALES AMORPHES

3.7.1. Dispersion

La dispersion des sols à allophanes hydratés est le plus souvent difficile ou impossible avec les agents dispersants habituellement utilisés : métaphosphate et pyrophosphate de sodium, ammoniac.

L'acide chlorhydrique dilué avec des pH compris entre 4,5 et 5,5, ou la soude, donnent les meilleurs résultats suivant qu'il s'agit de tel ou tel type de sol à allophane. Si une suspension stable peut ainsi être relativement aisément obtenue, la dispersion n'est jamais complète. Un traitement préalable aux ultrasons est indispensable pour briser les petits agrégats très stables et obtenir un dispersat bien représentatif de l'ensemble de la fraction colloïdale, laissant des sables propres, constitués de minéraux primaires ou concrétions.

Tous les échantillons du Nicaragua ont été ainsi traités à l'eau oxygénée, puis aux ultra-sons (20 kHz, 100 W), durant environ 5 mn (rapport sol/eau voisin de 1/3) et dispersés en présence d'acide chlorhydrique vers pH 4. La fraction inférieure à 2μ a été séchée à l'air sans chauffage, puis reprise plusieurs fois par l'eau oxygénée pour l'élimination des matières organiques résistantes, fortement liées aux produits amorphes.

Les sols des Antilles et d'Equateur ont subi les mêmes traitements, mais certains d'entre eux (sols à gibbsite) se dispersent surtout en milieu sodique.

3.7.2. Etude aux rayons X

Les diagrammes ne révèlent la présence d'aucune argile classique de façon bien évidente (fig. 5).

Pour l'échantillon le plus hydraté de ceux observés au Nicaragua (N 92 b), on note les raies suivantes pour les spectres de poudre : 13,9, 8,02 Å et de très petites raies : à 5,5, 4,34, 4,00, 3,28, 2,24 Å. D'après KOJIWADA (1967), ces raies pourraient être attribuées à une substance particulière définie comme l'« imogolite ». Les raies à 13,9, 4,34 et 2,51 Å peuvent aussi être attribuées à de petites quantités de montmorillonite. Sur échantillon orienté, on n'observe guère qu'un renflement vers 15 Å qui passerait à 16 Å et 20 Å après traitement au glycérol, mais de manière peu sensible et incertaine.

L'analyse thermique différentielle sur échantillon préalablement séché à 100 °C, montre un fort départ d'eau vers 150 °C, qui se prolonge jusque vers 300 °C, un départ endothermique, incertain et très faible, à 600 °C, et enfin un crochet exothermique marqué à 910 °C. Un crochet exothermique vers 580 °C existe aussi, vraisemblablement attribuable à des formes résistantes de matières organiques.

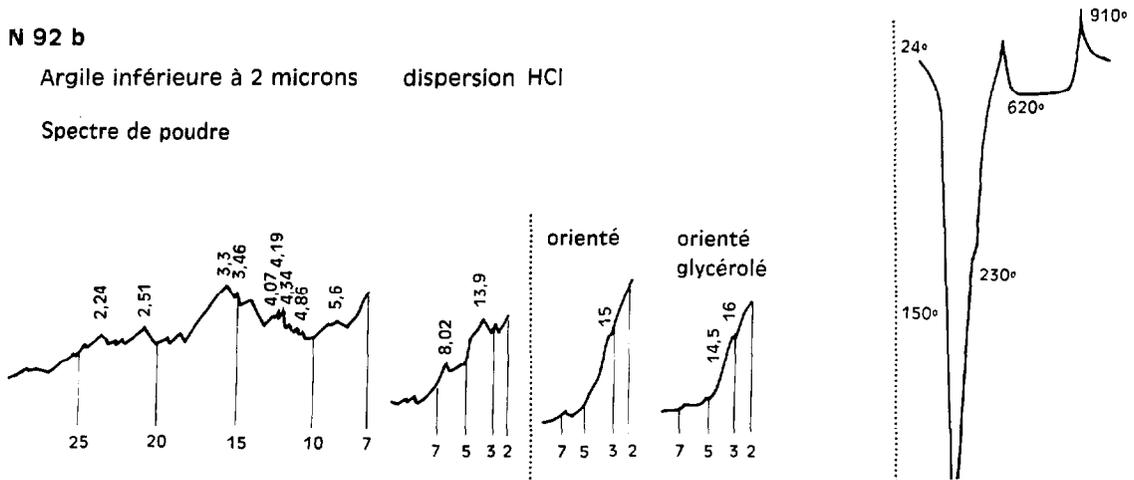
Sur les diagrammes de poudre de l'échantillon 86 b, on observe des raies bien marquées à 4,41, 3,45, 2,52 et 2,47 Å. Un léger renflement à 10 Å disparaît au chauffage à 100 °C, laissant apparaître une petite raie à 7,55 Å. Ce serait donc l'indice de la présence d'un peu d'halloysite.

La raie à 4,41 Å traduit généralement un début d'organisation. On a essayé de voir s'il ne s'agirait pas de montmorillonite dont les faibles quantités pourraient être masquées par les substances amorphes.

N 92 b

Argile inférieure à 2 microns dispersion HCl

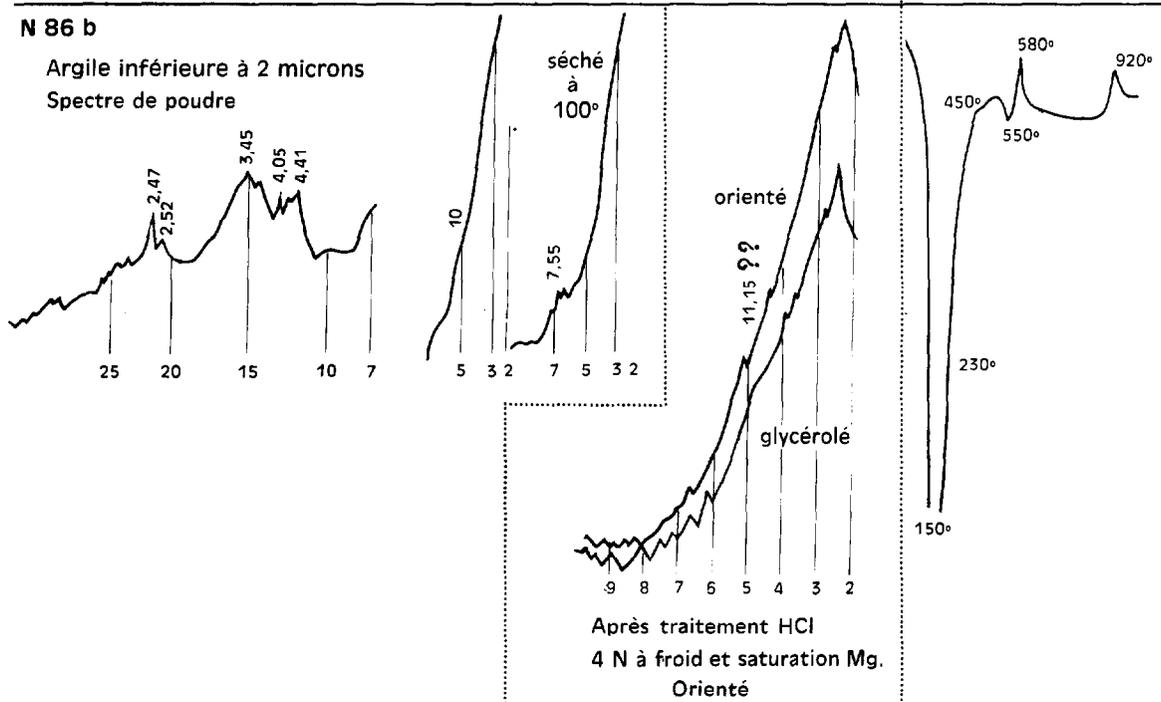
Spectre de poudre



N 86 b

Argile inférieure à 2 microns

Spectre de poudre



N 82 b

Argile inférieure à 2 microns

Spectre de poudre

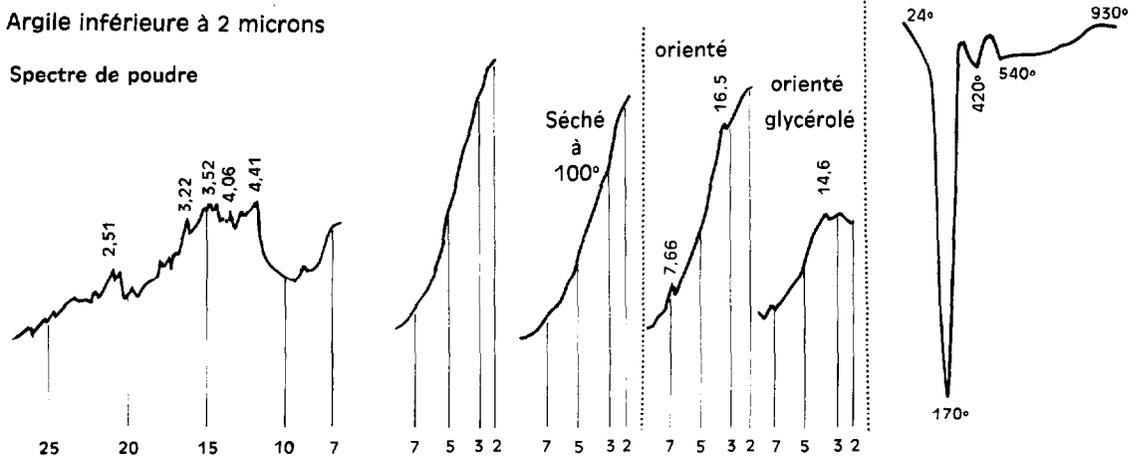


FIG. 5. — Examens aux rayons X et par l'analyse thermique différentielle.

L'argile a donc été traitée par l'acide chlorhydrique 4N à froid, afin d'éliminer la plus grande partie des substances amorphes, puis resaturée en magnésium. Le diagramme obtenu sur échantillon orienté avant et après traitement au glycérol, ne donne pas d'indications utiles.

L'analyse thermique différentielle révèle un fort départ d'eau vers 150 °C, un faible crochet endothermique vers 550 °C traduisant la présence d'un peu d'halloysite, un crochet exothermique marqué à 580 °C et un autre à 920 °C.

Le diagramme de poudre de l'échantillon 82b est assez analogue. On note aussi la présence d'une raie à 4,41 Å, traduisant un début d'organisation, et à 3,52 et 2,51 Å. De légères raies à 4,06 et 3,22 Å seraient attribuables à des minéraux primaires. Dans la bande correspondant aux valeurs de 2θ de 2 à 7, qu'il s'agisse d'échantillons séchés à température ordinaire ou à 100 °C, on observe seulement un fond important dû aux produits amorphes avec parfois traces de raie vers 14 Å (N 92b).

Sur échantillon orienté, aucun gonflement bien net n'est observé avec le glycérol.

L'analyse thermique, outre un grand départ d'eau vers 170 °C, présente un léger crochet endothermique vers 420 °C, suivi d'un autre très faible vers 540 °C et d'un crochet exothermique à 930 °C. Pour AOMINE (1965), le crochet à 420 °C serait l'indice de la présence d'« imogolite » B, qui présente aussi la particularité d'avoir une raie vers 14 Å, plus nette sur échantillon orienté que sur échantillon en poudre, passant à 18 Å par chauffage à 300 °C et disparaissant à 500 °C.

De tels crochets à 420 °C ont fréquemment été observés sur les sols à produits amorphes encore jeunes et fortement hydratés des Antilles, avec présence ou absence d'une raie plus ou moins nette vers 14 Å. Le passage de cette raie de 14 Å à 18 Å par chauffage à 300 °C sur échantillon saturé en magnésium n'a été observé avec certitude, que dans quelques cas. Le plus souvent, cette raie disparaît.

Quelques courbes d'analyses thermiques différentielles de sols des Antilles sont données ainsi à titre de comparaison dans la figure 6. L'échantillon SM 26d de Martinique présente un crochet bien net à 420 °C et le passage à 18 Å de la raie à 14 Å par chauffage à 300 °C, apparaît relativement bien. Pour la plupart des autres échantillons, la raie à 14 Å semble disparaître par chauffage à 300 °C (SM 25b et MR 39a) (fig. 6).

3.7.3. Spectrographie infrarouge

Pour faciliter les comparaisons, le diagramme correspondant à l'échantillon N 86b a été intercalé avec ceux d'autres échantillons de sols à allophanes, fortement hydratés, des Antilles et d'Equateur, classés dans un ordre « supposé » d'organisation croissante (fig. 7).

L'échantillon N 86 b en est encore à un premier stade d'organisation. La bande d'absorption Si-O vers 940 cm^{-1} des échantillons 1 et 2, traduit la forte perturbation engendrée dans le réseau silicique par la présence des atomes d'aluminium tétra-coordonnés qui y sont inclus. Les mesures de fluorescence et les études de spectrographie infrarouge ont montré, de façon certaine, que plus le contenu en Al octaédrique ou Al^{VI} augmente, plus la bande de vibration Si-O se déplace vers des fréquences élevées. Seuls, en effet, des Al^{IV} ou tétraédriques peuvent être intégrés dans le réseau silicique. C'est là un phénomène général souvent rencontré. Ainsi la bande Si-O de la biotite est située à une fréquence plus basse que celle de la kaolinite, parce que les Al^{IV} sont inclus dans la couche tétraédrique. Une augmentation de la fréquence est donc l'indice d'une meilleure séparation de Al et Si (de KIMPE et TARDY, 1968).

Dans N 86, le maximum d'absorption s'est déplacé vers $1\ 010\text{ cm}^{-1}$, reflétant la présence d'atomes d'aluminium hexacoordonnés et donc ainsi la différenciation vers une couche octaédrique. Dans les échantillons suivants (3 à 6), cette bande se déplace encore vers $1\ 030\text{ cm}^{-1}$ alors que la bande vers 950 cm^{-1} se résorbe progressivement. La bande de déformation $\text{Al}^{\text{VI}}\text{-O-H}$ vers 910 cm^{-1} n'est pas observée ; elle

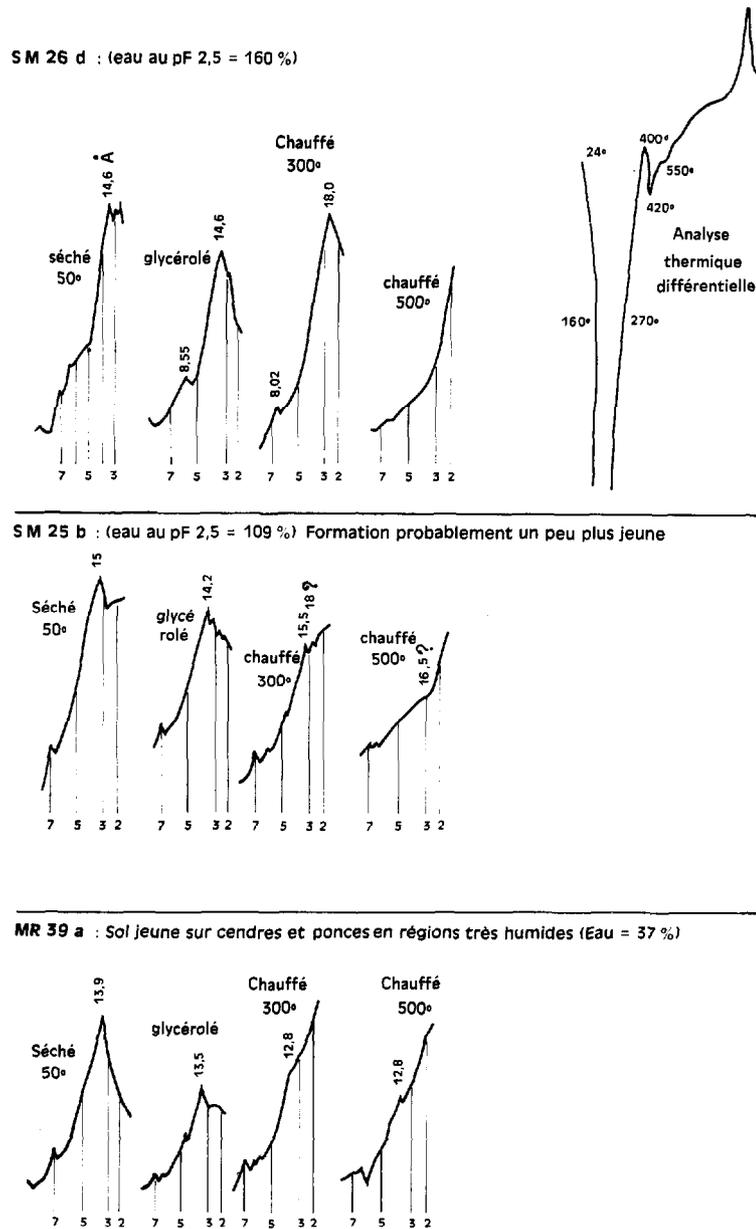


FIG. 6. — Echantillons des Antilles (Martinique). Allophanes fortement hydratés, orientés et saturés en magnésium Fraction inférieure à 2 microns dispersée avec HCl.

n'apparaît d'ailleurs sur ces diagrammes que dans l'échantillon n° 6 et, bien entendu, dans l'halloysite hydratée H-H du Nicaragua (N 71 b). Il n'y a pas de bandes nettes vers 800 cm^{-1} . Cette bande n'apparaît guère que dans l'échantillon 6. Elle est attribuée à la structure en anneau des tétraèdres de silice (FRIPIAT et al., 1963), et indiquerait un réseau silicique déjà bien agencé et non, semble-t-il, de la silice amorphe

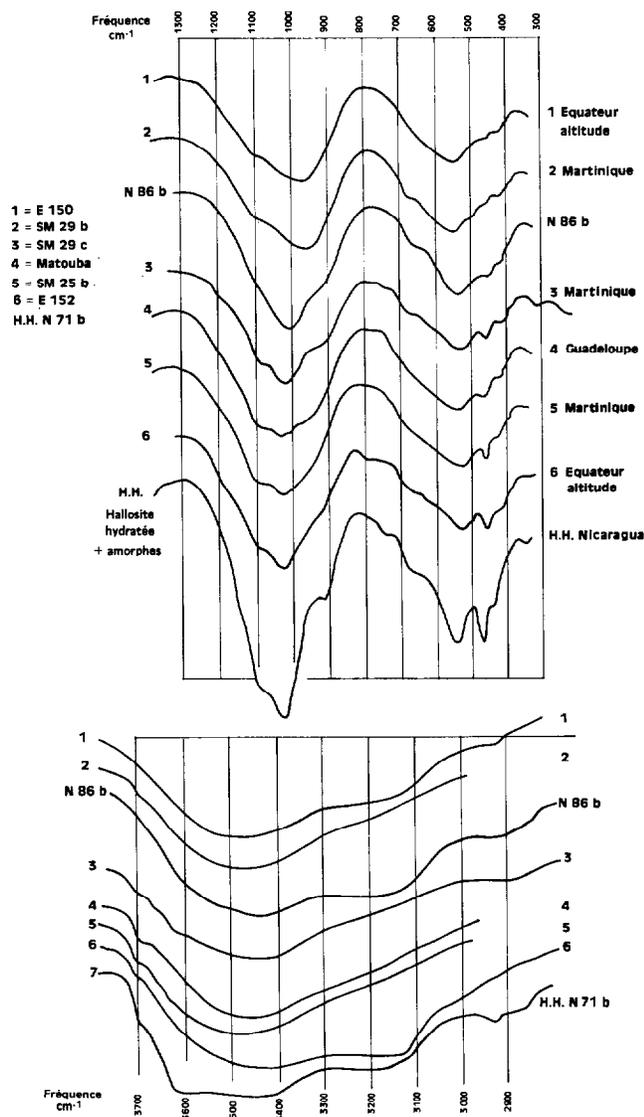


FIG. 7. — Comparaison des diagrammes de spectrographie infrarouge (PERKINS-ELMER).
(voir pl. II, photos 5 et 6).

hydratée, comme certains auteurs le pensent (FIELDER, 1955). Ce réseau silicique pourrait appartenir, soit à des matériaux résiduels, soit à des matériaux néoformés. En liaison avec ce dernier résultat, le doublet Si-O à $440\text{-}470\text{ cm}^{-1}$ est encore très peu développé, indiquant une séparation encore incomplète des couches tétraédriques et octaédriques.

Le couple de bandes Si-O-Al entre $500\text{ et }750\text{ cm}^{-1}$ est peu marqué.

Une large bande d'absorption due aux groupes hydroxyles entre $3\ 000\text{ et }3\ 700\text{ cm}^{-1}$ traduit l'abondance de matériel amorphe. Aucune trace de raies vers $3\ 700\text{ ou }3\ 620\text{ cm}^{-1}$ n'est encore visible

dans l'échantillon N 86 b. Elles font leur apparition, et avec de plus en plus de netteté, dans les échantillons 3 à 6 qui paraissent ainsi former la transition vers l'halloysite hydratée (HH. N 71 b).

La distinction de KOJIWADA (1967) entre un « allophane » qui présente de larges bandes d'absorption à 1 010 et 945 cm^{-1} et « l'imogolite » dont les maxima d'absorption sont bien définis à 990 et 925 cm^{-1} , n'apparaît pas sur ces diagrammes. Elle ne rend d'ailleurs pas compte des diagrammes des échantillons 1 et 2, dont le maximum d'absorption est situé vers 950 cm^{-1} et qui paraissent les plus amorphes, les plus riches en Al tétracoordonnés, inclus dans le réseau silicique. Ces deux échantillons correspondraient à « l'allophane A » de FIELDS (1955), « l'allophane B » avec sa bande d'absorption marquée à 800 cm^{-1} et au-delà de 1 000 cm^{-1} n'apparaissant pas.

On a vu, par ailleurs, que l'attribution de cette bande à de la silice amorphe paraît discutable. Il en serait de même de l'hypothèse d'un passage dans le temps de l'allophane B ainsi défini, vers l'allophane A. Ce serait plutôt l'inverse, semble-t-il.

CONCLUSION

Le passage de la bande d'absorption de 940 cm^{-1} à plus de 1 000 cm^{-1} , indique la formation d'une couche octaédrique et la diminution des Al^{IV} contenus dans le réseau silicique, comme dans certains minéraux primaires. L'accentuation du doublet Si-O à 440-470 cm^{-1} et de la bande à 910 Si-O-Al, l'apparition des bandes à 3 700-3 800 cm^{-1} des hydroxydes, semblent aussi caractériser un état d'organisation et d'évolution de plus en plus poussée.

3.7.4. Microscopie électronique

Le microscope électronique révèle pour l'échantillon N 86 b un réseau lâche de fibres particulièrement nettes, dont l'épaisseur peut atteindre 1/100 de micron. Les clichés 1 et 2 sont très analogues à ceux de l'imogolite des auteurs japonais.

Par contre, le cliché 3 révèle déjà l'apparition de quelques tubes d'halloysite parmi les fibres distendues.

Dans les échantillons N 82 et N 92, le réseau de fibres est moins marqué, mais apparaît nettement. Quelques tubes d'halloysite sont observés dans l'échantillon 82, mais pas un seul dans l'échantillon N 92 le plus amorphe (absence de raies à 4,41 Å).

Les clichés concernant les échantillons du Nicaragua peuvent être comparés avec ceux des sols des Antilles ou d'Equateur.

Ainsi, l'échantillon n° 3, présente un enchevêtrement dense de fines fibrilles. La même observation peut être faite sur les échantillons 4 (Matouba) et 5 (SM 25 b). Les fibres sont cependant moins nettes et l'ensemble prend davantage l'aspect d'un assemblage de très fins glomérules. Dans l'échantillon 5, acide et désaturé, on observe nettement une plaquette de kaolinite. Quelques filaments sont encore observés dans l'échantillon 6 ; par contre, 1 ne présente pas de fibres, mais seulement un amas glomérulaire.

Trois aspects peuvent donc être distingués :

1. *Les fibres larges et distendues* des échantillons du Nicaragua, surtout N 86 b, seraient très semblables au cliché de « l'imogolite » des auteurs japonais. Ce faciès traduirait une certaine « organisation » et expliquerait la forte rétention pour l'eau des sols, même après dessiccation à l'air.

Il ne semble pas que l'abondance des fibres soit en relation avec l'intensité ou la surface du crochet à 420° de l'analyse thermique différentielle, pas plus qu'avec l'intensité des bandes entre 13 et 18 Å aux rayons X, comme l'indiquent AOMINE et MIYAUCHI (1965). Le crochet à 420° est très peu marqué dans N 86, qui présente les fibres les plus nettes. Il est plus important dans 82 et peut-être 92 (renflement).

2. *Les fines fibrilles* formant un feutrage serré fin, avec déjà, par endroits, quelques plages de petits glomérules soudés, seraient l'indice d'une structure plus confuse, résultant d'une évolution en milieu constamment humide. Par dessiccation à l'air, il y aurait resserrement des fibres et prise en masses compactes, ce qui traduit bien la perte d'eau irréversible importante de ces sols et leur transformation par dessiccation, en petites masses dures.

3. Un troisième aspect serait l'assemblage de *très petits glomérules* translucides en plages irrégulières, rappelant des cellules déchiquetées, avec peu ou pas de fibres. C'est le faciès de l'échantillon 1 qui semble le plus amorphe. On l'observerait également dans des échantillons qui semblent s'organiser, soit seul, soit en mélange avec des fibres : échantillons n°s 4, 5, 6. Ces échantillons perdent irréversiblement par séchage à l'air, une forte quantité d'eau.

Il ne semble pas possible d'indiquer un ordre rigoureux de succession dans le temps. Les faciès fibreux paraissent, cependant, conserver des allophanes encore relativement jeunes, mais dans lesquels peuvent déjà s'individualiser, soit l'halloysite en bâtonnets, ou en glomérules, lorsque certaines conditions de dessiccation (liées au maintien d'une teneur en bases échangeables) prévalent, soit la kaolinite en plaquettes⁽⁵⁾, lorsque le milieu est très désaturé, ou encore la gibbsite. Les faciès en très fins glomérules translucides sont souvent observés dans les sols sur cendres les plus jeunes. Les amas déchiquetés qui forment leur assemblage semblent parfois préfigurer l'amorce d'un réseau de fibres. Ce faciès glomérulaire se maintient cependant dans des sols déjà relativement évolués (avec kaolinite et gibbsite), quoique encore très hydratés.

La taille des fibres indique-t-elle une structure particulière, responsable du comportement différent dans la rétention en eau des substances amorphes, alors que rien de bien précis, sur ce point, ne peut être déduit des diagrammes de rayons X, de l'infrarouge ou de l'analyse thermique différentielle ? Le faciès à grosses fibres paraît retenir plus fortement l'eau au séchage que les faciès à fines fibrilles ou glomérules.

Il semble difficile d'apprécier avec exactitude, la taille des fibres et la largeur moyenne des mailles, car la simple chaleur du faisceau d'électrons, suffit à faire rétracter l'assemblage des fibres au cours de l'observation. Ce phénomène est très sensible dans l'échantillon 86 b.

L'examen microscopique impliquant une observation sous vide, donc une dessiccation à l'air, on conçoit que les faciès aux larges fibres qui retiennent énergiquement l'eau, soient plus aisément et plus nettement observés que les faciès de fines fibrilles qui s'effondrent rapidement par séchage à l'air. De fait, pour ce dernier faciès, il est plus difficile de faire ressortir sur les clichés l'aspect en fibrilles. Une préparation plus soignée, un examen plus approfondi des plaques et un temps de pose plus rigoureux, par suite de la finesse et de la transparence des fibrilles, paraissent indispensables pour une observation correcte. Sans ces précautions on risque de n'observer que des amas informes plus ou moins coagulés.

3.8. TRANSITION ENTRE LES SOLS A ALLOPHANES FORTEMENT HYDRATÉS ET LES SOLS A HALLOYSITE

On a vu que les sols à allophanes fortement hydratés du Nicaragua, dans les conditions de sécheresse relative auxquelles ils sont soumis, évoluent très probablement vers l'halloysite. Les petits tubes caractéristiques de ce type d'argile que l'on observe parfois dans certains échantillons, peu nombreux, il est vrai,

parmi les fibres, en sont l'indice. On conçoit donc que toute une série d'intermédiaires puisse être observée entre les sols encore essentiellement constitués d'amorphes et les sols argileux à halloysite où ce type d'argile domine fortement.

Le profil N 91, observé sur le vaste plateau de Jinotepe, présente un certain nombre de caractères communs aux sols allophaniques fortement hydratés que l'on vient d'étudier et aux sols déjà argilisés à halloysite que l'on examinera plus loin. Il semble cependant, par l'ensemble de ses propriétés morphologiques et physico-chimiques, se rapprocher davantage des sols fortement hydratés que des sols à halloysite. Il aurait été recouvert par un niveau plus récent d'une trentaine de centimètres, avec, à la base, une mince couche de cendre durcie.

En ressemblance avec les sols fortement hydratés

- la texture est limono-sableuse et la dispersion a lieu en milieu chlorhydrique,
- les valeurs élevées des pF 2,5 (65 à 70 %) et 3,0 diminuent assez nettement par séchage à l'air ou à 50 °C (tableau 8),
- la capacité d'échange de bases est importante (70 à 80 mé %). Elle est légèrement augmentée à pH 9 et sensiblement diminuée lorsque la mesure est effectuée sur échantillons séchés à l'air (tableau 9),
- les pH eau sont anormalement élevés en regard du taux de saturation en bases (tableau 10).

En ressemblance avec les sols à halloysite

— La diminution de la capacité d'échange après traitement à l'eau oxygénée est relativement importante, soulignant ainsi le rôle plus faible des substances amorphes et l'accroissement de celui de la matière organique, même à des taux modérés (tableau 9).

— La valeur de la capacité d'échange est relativement élevée après trois traitements successifs à froid à l'acide chlorhydrique 6N, suivi de soude 0,5 N (Technique SEGALÉN).

Fortement diminuée dans le niveau de surface, probablement plus récent et plus jeune (de 82 à 9), elle se maintient plus en profondeur à 27 mé. La diminution est certes importante, davantage que dans les sols à halloysite que l'on examinera plus loin (tableau 11), mais bien moins sévère que pour les sols fortement allophanique (tableau 4).

— Les teneurs en bases échangeables sont nettement plus élevées que dans les sols fortement hydratés, en particulier le magnésium.

— Les diagrammes de rayons X montrent une raie bien développée à 4,41 Å (fig. 8) et à 2,51 Å. On observerait même une petite raie de la goethite à 4,16-2,42 Å. Un renflement marqué entre 7,8 et 8,3 Å donne une raie étalée à 7,9 Å par séchage à 100 °C, indiquant l'halloysite hydratée.

— Le microscope électronique montre des tubes relativement bien formés. Il n'y a pas de fibres, mais des ensembles diffus échevelés qui s'en rapprochent cependant.

Certains résultats sont communs aux sols fortement hydratés et aux sols à halloysite :

— Un fond important couvre aux rayons X la bande au-delà de 7 Å. Dans cette bande on distingue une petite raie vers 13,5 Å qui demeure inchangée au glycérol sur échantillon orienté.

— Les valeurs du pF 4,2 sont importantes, de l'ordre de 37 % sur sol frais (33 sur sol sec). Bien que plutôt faibles, de telles valeurs sont souvent rencontrées dans les sols fortement hydratés, et elles sont courantes pour les sols argilisés à halloysite (tableau 8).

— Les acides humiques l'emportent nettement sur les acides fulviques.

TABLEAU 8

LES VALEURS DES pF-HUMIDITÉ POUR 100 G DE SOL SÉCHÉ A 105 °C

Echantillons	Profondeur en cm	Humidité au pF 2,5 déterminée sur sol			Humidité au pF 3 déterminée sur sol		Humidité au pF 4,2 déterminée sur sol		Eau utile pF 2,5-4,2 sur sol frais
		frais	séché air	séché 50 °C	frais	séché air	frais	séché 50 °C	
N 91 a	0-20	71	64	63	64,7	59	43,2		27,8
b	60-90	66	58	55	59,2	50	38,1	33,2	27,9
c	140-160	65	61	56	57	50	37,1	33,1	27,8

TABLEAU 9

VARIATIONS DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE BASES EN MÉ POUR 100 G DE SOL SÉCHÉ A 105 °C

	Profondeur en cm	Sur sol frais				Sur sol séché air à pH 7 (5)
		à pH 7	à pH 9	H ₂ O ₂	T pH 7 après traitement SEGALEN	
		(1)	(2)	(3)	(4)	
91 a	0-20	82	91	64	9,6	72
b	60-90	71	76	57	22	54
c	140-160	71	78	60	27	56

(1) Avec l'acétate d'ammonium à pH 7.

(2) Idem, mais à pH 9.

(3) Destruction de la matière organique à l'eau oxygénée puis détermination de T à pH 7 comme pour (1).

(1) (2) (3) (4) Examens effectués sur échantillons conservés dans leur humidité naturelle. Résultats exprimés pour 100 g de sol séché à 105 °C.

(4) Trois attaques successives avec HCl, 6 N et la soude 0,5 N, puis détermination de T à pH 7.

(5) Idem à (1), mais sur échantillon séché à l'air. Résultat pour 100 g de sol séché à 105 °C.

TABLEAU 10

BASES ÉCHANGEABLES - ETAT DE SATURATION - LES FORMES DE MATIÈRES ORGANIQUES

Prof. en cm	Bases échangeables en mé %					V %		pH		en C pour 100 g de sol		M.O. total	C/N
	Ca	Mg	K	Na	S	frais	sec	eau	KCl	acides humiq.	acides fulviq.		
0-20	26,6	5,9	1,21	0,16	33,9	41	47	7,5	7,0	1,36	0,52	12,7	13
60-90	16,6	11,4	0,42	0,29	28,7	41	53	7,4	6,3			2,0	10,7
140-160	16,4	12,6	0,26	0,38	29,7	42	54	6,6	5,3	0,22	0,03	1,7	11

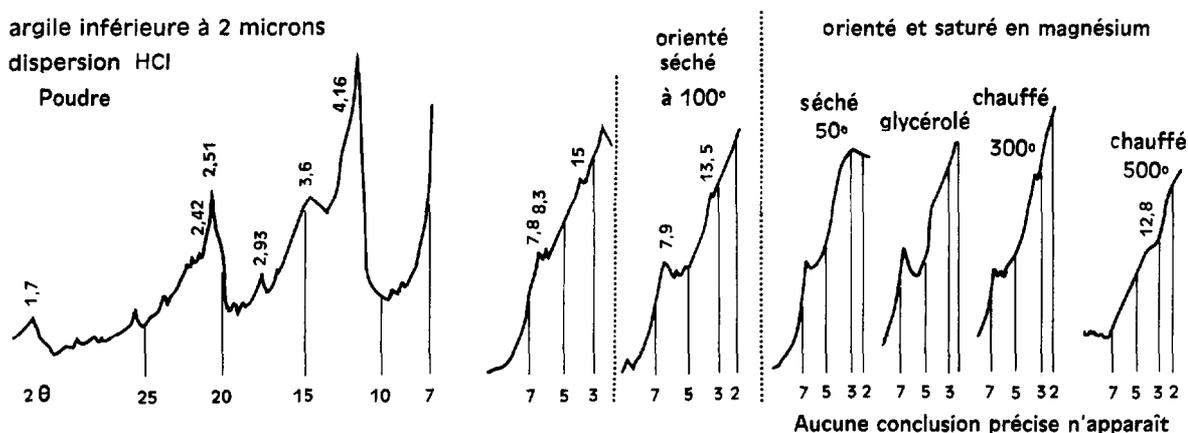


FIG. 8. — Diagramme de rayons X de l'échantillon N 91 b.

3.9. CONCLUSION

Le caractère fortement hydraté de ces sols est donc bien marqué. Leur résistance à la dessiccation à l'air, à température ordinaire, est très notablement plus importante que pour les sols fortement hydratés des Antilles et d'Equateur, situés en régions constamment humides. Une structure plus rigide, probablement par suite d'une certaine organisation du réseau (bande au-delà de $1\ 000\text{ cm}^{-1}$ aux infrarouges, raie à $4,41\text{ \AA}$ aux rayons X) correspond à ces grosses fibres que l'on aperçoit au microscope électronique, serait probablement la cause de cette énergique rétention de l'eau.

Bien que présentant la plupart des caractères de sols à allophanes fortement hydratés, à l'exception de l'irréversibilité plus faible de la dessiccation et des teneurs plus élevées en bases échangeables, reflet d'un climat plus sec, ces sols sont vraisemblablement un stade transitoire instable vers l'halloysite $4\text{ H}_2\text{O}$, quelque peu anormalement prolongé pour des motifs qui apparaissent encore bien incertains : nature des minéraux primaires, teneurs élevées en bases échangeables, elles-mêmes liées au climat, etc. Divers états intermédiaires avec passage à l'halloysite, pourraient être observés, avec encore un état d'hydratation élevé. Les faciès déjà nettement différenciés et « argilisés » ou sols brun-rouille à halloysite, sont moins hydratés et ne peuvent être classés parmi ceux-ci.

4. SOLS BRUN-ROUILLE ARGILO-LIMONEUX A HALLOYSITE

Bien que la présence de l'halloysite hydratée ait été bien mise en évidence dans certains des sols de plateau (N 91-82), les caractères propres de cette argile demeuraient imperceptibles sur le terrain. Les sols paraissaient limoneux, finement sableux, et le toucher ne révélait pas la présence d'argile au sens ordinaire.

Dans les sols brun-rouille, au contraire, la texture apparaît franchement argilo-limoneuse sur le terrain. La coloration est brun-rouille foncé, très caractéristique des sols à halloysite sur cendres. La couleur des agrégats écrasés entre les doigts s'éclaircit généralement, ce qui indique l'existence de revêtements foncés. La luisance est souvent très marquée. On observe, bien entendu, de nombreux petits minéraux noirs ou des débris de couleurs variées d'altération.

Les sols brun-rouille à halloysite sont très fréquents aux Antilles et en Equateur, dans les régions tropicales où une certaine dessiccation du sol se produit au cours de l'année. On rencontre tous les intermédiaires, tous les degrés d'évolution, soit depuis les sols encore très sableux, et même pour certains ponceux, où l'argile devient de plus en plus importante et sensible au toucher, soit depuis les sols à allophanes fortement hydratés qui perdent progressivement leurs caractères propres de toucher onctueux, savonneux, etc., et leurs propriétés physico-chimiques, hydriques en particulier, au fur et à mesure que la sensation d'argile se développe avec l'augmentation de la proportion d'halloysite hydratée et son évolution vers un meilleur état cristallin en tubes bien constitués.

Les sols brun-rouille à halloysite sont souvent observés au Nicaragua.

Certains sont *franchement argileux*, avec des revêtements foncés abondants, une luisance très nette, une coloration plus rouille que 5 YR 4/6, une consistance un peu grasse, quoique peu adhérente au toucher à l'état humide, et de nombreux petits points beiges ou noirs de minéraux altérés ou non. Leur aspect est si semblable à celui des sols des Antilles et d'Equateur qu'il n'a pas été jugé utile de les étudier en détail. On en observe de très typiques au Nord de Managua vers Leon, surmontés souvent de matériaux cendreux ou ponceux plus récents et encore peu altérés. Dans ces régions très sèches, on passe rapidement aux vertisols dans les parties plus basses et de faibles dénivellations sont suffisantes.

D'autres sont encore *relativement légers, argilo-limoneux*, plus riches en débris de minéraux, altérés ou non, et souvent aussi recouverts de matériaux plus récents. Ces matériaux plus récents peuvent être encore sableux, et mêlés de ponces ou scories, ou présenter à la base, un niveau durci ou « talpète » (cangagua d'Equateur), juste au-dessus du sol enfoui argileux brun-rouille.

De tels profils sont très fréquemment observés sur les plateaux du triangle Jinotepe-Nandaine-Granada, relativement arrosé et deux d'entre eux ont fait l'objet de prélèvements pour analyses. Les sols rouges sur cendres ne sont rencontrés que dans les plaines basses et chaudes.

MORPHOLOGIE

Près de Jinotepe, sous caféier arabica (N 90), le sol est très noir (7,5 YR 2/0) sur 40 cm, s'éclaircissant lorsqu'on l'écrase entre les doigts (3/2). Il est sableux ou finement grumeleux, la présence d'argile n'est pas sensible au toucher.

Après 10 cm d'un niveau graveleux plus clair de ponces et cendres altérés, un peu rouille, on passe au sol enfoui argilo-limoneux brun-rouille foncé, parsemé de petits minéraux noirs, uniforme sur 60 cm d'épaisseur, puis s'éclaircissant progressivement au-delà de 1 m de profondeur, en devenant moins argileux avec présence plus abondante de débris de cendre.

L'autre profil, observé entre Nandaine et Grenada (N 87), présente un recouvrement récent, sableux très foncé, épais de 20 cm, puis un niveau durci ou « talpète », de coloration rouille 7,5 YR 5/6, avant le passage au sol brun-rouille foncé argilo-limoneux.

CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHEMIQUES

Les caractéristiques chimiques des sols sont très semblables. Il y a d'ailleurs peu de variations sensibles entre les niveaux récents et argilisés brun-rouille, sauf pour les teneurs en matières organiques qui décroissent fortement.

On doit noter les valeurs encore élevées de la capacité d'échange (50 à 60 mé %) encore importante après le traitement acide de SEGALIN (1968) (30 mé %), et peu diminuée par l'attaque eau oxygénée.

Le taux de saturation en bases est voisin de 40 %, et l'écart entre pH eau et KCl modéré.

Comme dans les sols argileux, le pF 4,2 est assez élevé et par suite, « l'eau utilisable » plus réduite, de l'ordre de 10 à 15 % en poids.

FRACTION FINE INFÉRIEURE A 2 μ

Les rayons X et l'analyse thermique différentielle révèlent la présence d'halloysite hydratée. Dans les spectres de poudre, une raie nette, mais large, vers 10 Å s'affine, et passe à 7,6 Å par séchage à 100 °C. Les autres raies de l'halloysite à 4,5 Å et 2,51 Å sont bien marquées. De petites raies à 3,55 et 2,34 Å seraient déjà l'indice d'un peu de fire-clay. La goethite n'apparaît pas de manière sensible.

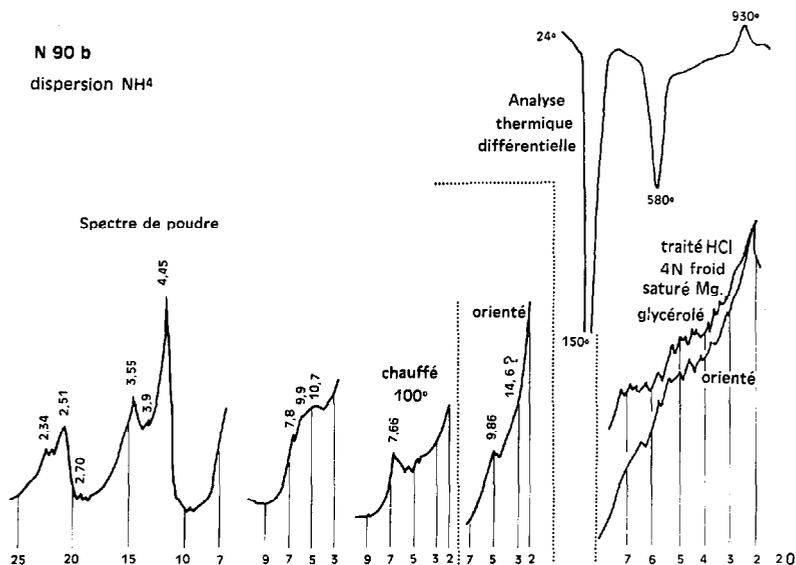


FIG. 9. — Diagramme de rayons X et analyse thermique différentielle.

Sur échantillon orienté, de petites raies à 12,8 et 17,7 Å semblent exister, ainsi qu'un renflement vers 14,6 Å qu'il faut probablement attribuer à des produits amorphes. Après traitement de l'argile par l'acide chlorhydrique 4N à froid, pour dissoudre les substances amorphes qui risquent de masquer la montmorillonite, et resaturation par du magnésium, aucun gonflement sensible n'est observé avec le glycérol.

L'analyse thermique sur échantillon séché à 100 °C révèle le fort départ d'eau de l'halloysite hydratée ou de produits amorphes à 150 °C, un crochet endothermique modéré vers 580 °C et le crochet exothermique à 930 °C. Cela signifie ou bien que la proportion d'halloysite n'est pas considérable, ou que son état de cristallisation est médiocre.

La microscopie électronique montre l'abondance des tubes, certains bien formés et allongés, d'autres encore courts et irréguliers. C'est, cependant, de tous les échantillons du Nicaragua examinés, celui où les tubes paraissent les mieux formés (photo 8.) mais de façon moins distincte, cependant, que dans certains sols brun-rouille plus argileux et évolués des Antilles et d'Equateur.

TABLEAU 11

BASES ÉCHANGEABLES ET TAUX DE SATURATION

Echantillons	Profondeur en cm	Bases échangeables en mé %					V % frais	pH	
		Ca	Mg	K	Na	S		eau	KCl
N 90a	0-20	13	5	1,66	0,15	19	33	6,2	5,3
N 90b	50-80	10,5	8,4	0,65	0,39	20	34	—	—
N 90c	110-150	12,6	8,4	0,24	0,4	22		6,8	5,4
N 87a	0-20	9	5,5	1,63	0,08	16,2	29	6,1	5,5
b	40-60	9,1	7,0	0,43	0,43	16,7	37	5,9	4,8

a : recouvrement récent.

b, c : sol brun rouille.

LES pF - HUMIDITÉ EN % DE SOL SÉCHÉ A L'ÉTUVE A 105 °C

Echantillons	Profondeur en cm	Sur sols conservés humides					Sur sol séché air	
		pF 2,5	pF 3	eau nat.	pF 4,2	eau ut. pF 2,5-4,2	pF 2,5	pF 3
N 90a	0-20	42	39,4	34,1	31,5	10,5	41	36,9
N 90b	50-80	49,5	47	42,1	38,8	10,7	43	40,5
N 90c	110-150	55	50	42,5	39,0	16,0	46	41,5
N 87a	0-20	51	45,2	40,2	28,2	22,8	47	44
N 87b	40-60	48,4	43,5	36,4	35,4	13,0	47,5	38

TABLEAU 11 (suite)

VARIATIONS DE LA CAPACITÉ TOTALE D'ÉCHANGE DE BASES. POURCENTAGE DU SOL SÉCHÉ À L'ÉTUVE À 105 °C

Echantillons	Profondeur cm	Sur sol frais				Sur sol sec pH 7 (5)	M.O. % C × 1,72	C/N
		pH 7 (1)	pH 9 (2)	Après H ₂ O ₂ pH 7 (3)	Après SEGALEN pH 7 (4)			
N90 a	0-20	60	65	46	28	53	7,5	13
N90 b	50-80	50	53	49	31	48	1,9	10
N90 c	110-150	58				45	0,8	7,4
N87 a	0-20	56				46	7,6	13
N87 b	40-80	45				41	0,93	8

(1) Avec l'acétate d'ammonium à pH 7.

(2) Idem, mais à pH 9.

(3) Destruction de la matière organique à l'eau oxygénée, puis détermination de T à pH 7 comme pour (1).

(4) Trois attaques successives avec HCl, 6 N et la soude 0,5 N puis détermination de T à pH 7.

(1), (2), (3), (4) Examens effectués sur échantillons conservés dans leur humidité naturelle. Résultats exprimés pour 100 g de sol séché à 105 °C.

(5) Idem (1), mais sur échantillon séché à l'air. Résultat pour 100 g de sol séché à 105 °C.

CONCLUSION

Les sols brun-rouille à halloysite présentent donc déjà nettement les caractères de cette argile, prise dans le sens granulométrique ou de minéral organisé. On peut s'étonner de la définition relativement médiocre de la raie à 10 Å et des crochets de l'analyse thermique, que l'on aurait pu croire meilleure. La présence de produits amorphes ou une cristallinité encore médiocre en sont peut-être la raison. Il est probable que ces critères d'identification apparaissent mieux dans les sols plus argileux, que nous avons pour cette raison, laissés de côté, tant leurs ressemblances sont apparemment étroites avec ceux étudiés dans d'autres régions.

5. LES SOLS LIMONO-SABLEUX A HALLOYSITE

5.1. CONDITIONS DE FORMATION

Ce sont les sols des basses plaines chaudes tropicales du Nord du pays, réputées parmi les plus fertiles.

Les profils observés sont, semble-t-il, bien représentatifs des sols des régions de Léon-Chinandega et des versants Nord et Est du massif volcanique Cerro Negro-Telica-San Cristobal. Cette chaîne de Mara-

bios, du volcan Momotambo au volcan San Cristobal, est parsemée de plusieurs volcans actifs : le Momotambo au sud, le Telica au nord et le très actif Cerro Negro au centre, qui envoie périodiquement des cendres dans la région de Léon. Rappelons la très violente éruption du Cossiguine en 1837, qui recouvrit de ses débris une large partie de la presqu'île nord en envoyant des cendres au loin dans toute cette zone.

Sur les contreforts aux pentes douces et régulières des volcans, les fines particules proviennent certainement d'une sédimentation aérienne avec peut-être quelques remaniements par les eaux de ruissellement. Des niveaux plus grossiers de scories et ponces alternent avec des couches de cendres très fines.

Dans les plaines immenses, il est difficile de savoir la part qui revient, dans la formation de ces sédiments, à l'alluvionnement de type classique par apports par les eaux des rivières et les inondations, et celle qui doit être attribuée à des retombées aériennes de cendres rejetées par les volcans et transportées par les vents. L'origine aérienne est la plus probable, mais quelques transports lors des inondations se sont certainement produits, au moins localement. Les profils sont uniformément constitués de très fines particules sur une grande épaisseur.

Le climat est chaud et relativement humide.

La température est nettement plus élevée que sur les plateaux où se rencontrent les sols à allophanes fortement hydratés et peut atteindre 28 à 31 °C en moyenne, certains mois.

La pluviométrie est relativement importante, avec deux maxima en juin et octobre. Sur la côte, les précipitations annuelles atteignent 1 800 mm (tableau 12). Elles sont probablement un peu plus élevées plus au Nord, vers Chinandega et au-delà, plus faibles vers Léon et à l'Est de la chaîne des volcans. Elles sont suffisantes pour assurer la croissance du cotonnier et permettre l'obtention de rendements moyens qui seraient parmi les plus élevés du monde, sans irrigation.

TABLEAU 12

PLUVIOMÉTRIE EN MILLIMÈTRES. SUCRERIE SAN ANTONIO (25 ans 1942-1966)

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	TOTAL
0	0	0	10,5	180	335	179	214	339	460	71	8,9	1 793

La saison sèche est bien marquée pendant quatre mois et entraîne une dessiccation importante du sol. C'est la période de maturation du cotonnier et de la canne à sucre, mais les jeunes repousses de cannes et les bananiers exigent l'irrigation. Durant la période sèche, de véritables vents de poussières tourbillonnent dans la région. Les routes non asphaltées sont transformées en un matelas de poussière de 20 à 30 cm d'épaisseur, dans lequel les véhicules s'enlisent aisément. La dessiccation du sol à l'air est pratiquement totale sur au moins 30 cm d'épaisseur. Ces conditions sévères de dessiccation, entraînent, comme on le verra, une évolution plus nette vers l'halloysite que pour les sols des plateaux étudiés au précédent chapitre.

5.2. MORPHOLOGIE DES PROFILS

a) Tous les profils examinés dans les plaines basses de la région de Chinandega ont une texture apparente de limon à sable très fin, sur environ 1,5 à 2 m d'épaisseur ou davantage.

Le sol est généralement foncé à noir, bien humifère (10 YR 3/2) sur 50 à 60 cm d'épaisseur, puis devient plus beige, un peu rouille (10 YR 3/3 à 4/3). Dans certaines régions plus proches de la mer, le sol reste très foncé, presque sans changement sur près de 1,5 m d'épaisseur.

La structure d'ensemble est continue et le sol s'émiette très aisément en particules élémentaires ou petits agrégats. Sec, il y a une nette tendance au durcissement, sauf pour le niveau de surface qui devient pulvérulent, véritable poussière. On observe de nombreux très petits pores, indice d'une forte rétention de l'eau par capillarité. Ecrasé entre les doigts, il y aurait un léger éclaircissement de la couleur, indice de la présence de revêtements.

b) Plus au sud, en se rapprochant de Léon et de l'actif volcan Cerro Negro, de petites scories noires ou ponces blanches sont fréquemment rencontrées, mais en quantité modérée, disséminées dans les limons finement sableux. Elles paraissent plus abondantes dans les niveaux supérieurs qu'en profondeur. La taille de ces scories varie de quelques millimètres à 1 ou 2 cm. Beaucoup sont encore noires, dures, mais certaines présentent déjà des altérations verdâtres ou rouille, ou s'écrasent aisément entre les doigts. La proximité des volcans actifs Telica et Cerro Negro, expliquerait la présence de ces éléments plus grossiers.

c) Sur les pentes encore douces et régulières des volcans, la texture est beaucoup plus grossière et hétérogène. On observe des niveaux successifs plus graveleux, avec des éléments de 0,5 à 2 cm, alternant avec des niveaux plus finement sableux, mais encore riches en graviers ponceux. Comme dans beaucoup de sols sur cendres où existe une succession de niveaux de perméabilité très variable, certains niveaux paraissent, à l'état humide, franchement très noirs avec des reflets bleutés. Les revêtements sont nets, les agrégats écrasés devenant plus brunâtres. Ces niveaux très noirs ont tendance à durcir par dessiccation, et se brisent en gros blocs à cassure angulaire, avant de s'émietter en poudre fine.

Les scories sont très déchiquetées, mais paraissent à peine altérées. Une patine claire les recouvre fréquemment, mais leur cassure est bien noire.

Ces sols de pentes souffrent davantage que les précédents de la sécheresse. Le drainage interne est très rapide et les niveaux plus grossiers ne permettent pas le maintien d'une frange capillaire élevée après la période des pluies.

Il s'agit donc de sols très légers, à fines particules, limon, et sable fin, dans lesquels la présence apparente d'argile est fort peu sensible sur le terrain. En se rapprochant des volcans, des éléments plus grossiers, scories noires ou ponces beiges, apparaissent en mélange avec les cendres fines.

5.3. CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES

Que les déterminations du pF soient effectuées sur des échantillons conservés dans leur humidité naturelle ou après séchage à l'air, n'influence guère les résultats concernant le niveau superficiel sur 20 à 30 cm. Par contre, une différence légère, mais sensible, apparaît plus en profondeur, l'écart s'accroissant nettement entre 50 et 120 cm.

Il y aurait donc dessiccation complète à l'air du niveau de surface, mais maintien plus en profondeur durant la période de sécheresse d'une certaine humidité, probablement inférieure au pF 4,2, mais supérieure à celle d'un échantillon qui serait ramené en surface et séché à l'air. Cette quantité d'eau qui disparaît irréversiblement par séchage à l'air est faible. Il n'est, par suite, pas possible de dire s'il faut l'attribuer à des substances amorphes hydratées qui se déshydratent irréversiblement, ou simplement à un durcissement, au séchage, de petites particules agglomérées, inférieures à 2 mm, qui confèrent au sol étudié quelques pores de diamètre plus important et, par suite, une rétention pour l'eau moins énergétique.

Les prélèvements ont été effectués en décembre, soit déjà après un bon mois de saison sèche. L'humidité naturelle est comprise entre les pF 3,0 et 4,2, les profils 71 et 74 étant déjà nettement plus desséchés que les autres. C'est pour ces deux profils que les différences de pF entre échantillons conservés frais ou séchés à l'air sont aussi les plus faibles.

On doit noter la dessiccation très accentuée du niveau de surface du profil N 73, dont l'humidité est nettement en dessous du pF 4,2 et le taux d'humidité encore relativement important en profondeur. C'est un profil encore très jeune, dans lequel la présence de produits amorphes au premier stade d'évolution est susceptible d'expliquer ce comportement particulier. Les différences des mesures entre les pF déterminés sur échantillons de profondeur conservés frais ou séchés à l'air, sont plus importantes que pour les autres profils et doivent, sans doute, être prises en considération (tableau 13).

TABLEAU 13

LES VALEURS DES pF-HUMIDITÉS POUR 100 g DE SOL SÉCHÉ À 105 °C

Echantillons	Profondeur cm	pF 2,5		pF 3,0		Eau naturelle prélèvement	pF 4,2		Eau utile* pF 2,5-pF 4,2 sol frais
		Sol frais	Sol sec	Sol frais	Sol sec		Sol frais	Sol sec	
Bananeraies irriguées près de la mer. San Antonio									
N 70 a.....	0-20	39,2	38,7	35	33,7	sous irrigation	21	22	18,2
N 70 b.....	30-50	37,0	35,0	32	30		19	19	18,0
N 70 c.....	80-150	40,0	35,8	35	29,5		23	21,2	17,0
Est de la Cordillère volcanique. Villa Salvadorita									
N 72 a.....	0-15	41,5	37,5	32,9		27,3	17,1	18	24,4
N 72 b.....	40-80	46,2	39,7	40,1	35	30,7	22,3	21,6	24,0
N 72 c.....	120-160	45,2	39,3	39,7	32,7	34,7	22,5	22,2	22,7
Pentes de volcan, sol jeune, totalement sec en surface, scories assez abondantes									
N 73 a.....	0-15	35,8	36	31,3	31,2	(7,2)	10,2	11,3	25,7
N 73 b.....	30-80	42,1		38	31	30,4	15,5	16,2	26,6
N 73 c.....	100-140	44,1	32	31,7	25,8	29,3	16,7	16,2	27,4
Nord Chinandega, vaste plaine									
N 71 a.....	0-20	29,8			26,7	18	13,1	12,1	16,7
N 71 b.....	30-60	34,0			28,5	22,9	17,6	15,1	16,4
N 71 c.....	90-160	36,0	34		28,7	28,8	23,0	19,5	13,0
Telica, zone plus sèche									
N 74 a.....	0-20	16,8	17	15,7	13,1	7,1	6,4	6,5	10,4
N 74 b.....	40-80	22,1	20	19,5	17,7	16,9	12,2	11,6	9,4
N 74 c.....	110-140	29,5	27	28	26,2	28,2	18,2	17,3	11,3

* La densité apparente est voisine de 1 à 1,1.

Il est donc possible de noter une tendance à une perte d'eau irréversible par dessiccation à l'air, plus marquée dans les profils les plus jeunes. Cette perte d'eau reste faible et souvent douteuse.

L'eau dite utile pour les plantes, mesurée par la différence des humidités entre pF 2,5 et pF 4,2 est importante, de l'ordre de 18 à 25 d'eau pour 100 g de sol. Il est intéressant de comparer ces résultats

avec ceux obtenus sur d'autres sols finement limono-sableux, d'alluvions issus de matériaux du cristallin, donc, ne renfermant pas d'allophanes. Des valeurs aussi importantes pour les pF 2,5 et 3,0 sont fréquemment rencontrées, mais les humidités aux pF 4,2 sont nettement plus faibles. L'eau contenue dans ces sols s'échappe donc des fins capillaires délimités par les particules, alors que pour les sols sur cendres, renfermant des amorphes ou de l'halloysite hydratée, une fraction importante de l'eau est conservée dans les mailles des particules ou prend part à leur constitution. Le tableau 14 indique quelques résultats sur divers sols de texture sensiblement analogue et souligne les faibles valeurs pour le pF 4,2 et par suite, la quantité plus importante de l'eau dite utilisable calculée par différence.

TABLEAU 14

LES VALEURS DES pF-HUMIDITÉ POUR 100 G DE SOL SÉCHÉ A 105 °C

	pF 2,5	pF 3,0	pF 4,2	Eau utile pF 2,5 - pF 4,2	Porosité		D.A.
					Totale	p2. Eau	
Alluvions	38,5	31	7	31,5	57	47	1,21
de	39,9	38,7	8,1	31,8	54	50	1,27
Colombie	42	37,1	5,8	36,2	58	49	1,16

Pour des sols dérivés de matériaux calcaires et dont les fines particules de limon et sables fins, ainsi qu'une bonne partie de la fraction inférieure à 2 μ , sont calcaires, on retrouve des valeurs analogues pour les divers pF. Notons seulement l'écart très faible entre pF 2,5 et 3,0 qui traduit une très fine microporosité, comme d'ailleurs l'indiquent les valeurs très voisines de la porosité totale et de la porosité pour l'eau (tableau 15).

TABLEAU 15

COMPARAISON AVEC QUELQUES pF DE SOLS LIMONEUX, CALCAIRES D'HAÏTI

	pF 2,5	pF 3,0	pF 4,2	Eau utile	Porosité	
					Totale	pr. l'eau
Alluvions	35	31	19	16	53	42
calcaires	34	34	18	16	47	47
d'Haïti	36	34	15	19	48	46

La présence de calcaire très fin et d'argile de type montmorillonitique explique sans doute les valeurs plus importantes des humidités au pF 4,2.

5.4. LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE BASES

Elle est de l'ordre de 30 à 40 mé pour 100 g de sol, donc sans commune mesure avec les valeurs considérables, pouvant atteindre 100 mé, des sols à allophanes fortement hydratés. On constate souvent une augmentation en profondeur, en dépit de la diminution des teneurs en matières organiques, ce qui souligne le rôle capital des substances minérales. Après attaque à l'eau oxygénée, la capacité d'échange

n'est diminuée, de façon sensible, que dans les niveaux de surface ou riches en matières organiques fraîches (5 à 8 %), mais elle demeure inchangée plus en profondeur et parfois même augmente légèrement, par suite, probablement, de phénomènes de dissolution libérant des positions d'échange.

Il y a fort peu de variations lorsque les mesures sont faites à pH 7 ou à pH 9.

TABLEAU 16

VARIATIONS DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE BASE - RÉSULTATS EN POUR 100 DE SOL SÉCHÉ A 105 °C

Echantillons	Profond. en cm	T mesuré sur échantillon frais à				T mesuré sur éch. séché à l'air pH 7 (5)	Matière organique % C × 1,72
		pH 7 (1)	pH 9 (2)	pH 7 après H ₂ O ₂ (3)	traitement SEGALEN (4)		
N 71a	0-20	28	30	26	7	24	2,4
		26	32	27	6		
N 71b	30-60	31	34	32	7	25	1,5
		32	35	32	8		
N 71c	90-160	34	31	39	10	31	0,9
		34	32	38	10		
N 72a	0-15	34	38	31	11	31	4,1
		35	37	32	11		
N 72b	40-80	38	41	37	16	32	1,75
		38	39	38	14		
N 72c	120-160	35	38	36	13	32	0,95
		34	36	36	14		
N 73a	0-15	30	28	15,4	5	27	6,9
N 73b	30-80	37	40	27	4	32	8,4
		36	39	24	4		
N 73c	100-140	31	30	20	4	29	3,8
N 74a	0-20	13		9	4	13	1,8
N 74b	40-80	22	24	17	6	20	1,3
		21	24		6		
N74 c	110-140	31	31	23	8	25	1,2

(1) Avec l'acétate d'ammonium à pH 7.

(2) Idem, mais à pH 9.

(3) Destruction de la matière organique à l'eau oxygénée puis détermination de T à pH 7 comme pour (1).

(4) Trois attaques successives avec HCl, 6 N et la soude 0,5 N, puis détermination de T à pH 7.

(1)-(2)-(3)-(4) Examens effectués sur échantillons conservés dans leur humidité naturelle. Résultats exprimés pour 100 g de sol séché à 105 °C.

(5) Idem (1), mais sur échantillon séché à l'air. Résultat pour 100 g de sol séché à 105 °C.

Après trois attaques à froid à l'acide chlorhydrique 6 N et la soude 0,5 N, la capacité d'échange décroît fortement, mais de façon moins spectaculaire cependant que pour les sols à allophanes fortement hydratés. La capacité d'échange est réduite à la moitié ou au 1/4 de sa valeur initiale dans les sols renfermant déjà nettement de l'halloysite, outre les produits amorphes (71-72-74), et près de 10 fois dans le profil 73 plus jeune et où la présence d'halloysite est encore peu marquée (tableau 16).

Toutes ces déterminations ont été effectuées sur des échantillons conservés frais. Lorsque la mesure est faite sur des sols séchés à l'air, les valeurs sont légèrement plus faibles. Bien que les différences soient sensibles, il paraît hasardeux de les prendre en considération. Avec les teneurs relativement importantes en matières organiques, il est possible qu'une période d'humectation supérieure à 16 h soit encore un peu insuffisante pour permettre la réhydratation réversible de certaines substances (tableau 16).

Conclusion

Pour des sols aussi légers, où la présence d'argile est à peine sensible sur le terrain, les valeurs de la capacité d'échange sont donc importantes. La matière organique ne semblant avoir d'influence que pour des valeurs élevées supérieures à 4 ou 5 %, ce sont donc des substances amorphes minérales ou des formes encore mal cristallisées (halloysite...) qui sont responsables de ces valeurs relativement fortes.

5.5. LES BASES ÉCHANGEABLES. TAUX DE SATURATION, pH

Les teneurs en bases échangeables sont relativement importantes pour des sols de texture aussi légère (8 à 16 mé %). On remarque la faible variation des teneurs des divers éléments d'un horizon à l'autre, conséquence de la richesse en minéraux aisément altérables de ces sols susceptibles de libérer des bases. Le rôle de la matière organique, si important dans les sols à évolution ferrallitique déjà avancée (échantillon 77, Matagalpa, tableau 17) ou les sols alluviaux quartzeux, est donc ici très modeste. Il est probable que, dans les sols vierges et non labourés chaque année, le niveau de surface conserve des valeurs plus importantes.

Le magnésium est bien représenté, mais le calcium domine très nettement. Les teneurs en potassium sont, dans l'ensemble, importantes, mais il est difficile de savoir la part qui revient à la fumure minérale.

Les valeurs élevées des pH (6,5 à 7) contrastent avec le pourcentage très modéré de saturation en bases (30 à 40 %). Pour un taux analogue dans les sols à évolution ferrallitique (tableau 17-2), les valeurs de pH sont considérablement plus faibles. Cette anomalie est bien caractéristique des sols renfermant des substances amorphes minérales. En surface, la matière organique corrige, dans une certaine mesure, cette anomalie, et les valeurs du pH sont sensiblement plus basses qu'en profondeur. L'influence de la culture et des fumures azotées minérales, ne doit pas non plus être exclue.

Les différences entre les valeurs du pH mesuré dans l'eau ou dans le chlorure de potassium normal, sont importantes, dépassant souvent une unité. Rappelons que dans les sols à allophanes fortement hydratés et désaturés des Antilles ou d'Equateur, en climat constamment humide, les pH mesurés dans l'eau ou en présence de KCl sont sensiblement les mêmes, mais que dans les sols fortement hydratés du Nicaragua, bien pourvus en bases échangeables, des différences importantes sont constatées. Elles peuvent correspondre à des substances mieux cristallisées et en voie de transformation, permettant l'apparition d'une acidité d'échange importante. Il peut s'agir de substances proches de l'halloysite ou de la montmorillo-

nite. En effet, c'est dans les sols argileux, riches en montmorillonite et bien pourvus en bases échangeables, en cours de dégradation vers l'halloysite ou les fire-clay, que l'on a observé les écarts de pH les plus élevés entre les mesures effectuées dans l'eau ou dans KCl. Dans ces sols, cependant, les pH paraissent au contraire anormalement faibles, eu égard à des états de saturation relativement élevés (tableau 17-2).

TABLEAU 17

BASES ÉCHANGEABLES - TAUX DE SATURATION, pH

Echantillons	Bases échangeables mé pour 100 g					Taux de saturation		pH		Lieu
	Ca	Mg	K	Na	S	S. frais V %	S. sec V %	Eau	KCl	
17-1										
70a	11,6	4,5	1,5	0,16	17,8	41	56	6,9	6,1	San Antonio
70b	9,7	3,9	1,56	0,31	15,5	45	50	7,0	5,9	
70c	10,1	3,1	1,13	0,50	14,8	40	48	7,1	5,8	
71a	5,9	1,3	1,07	0,06	8,3	31	34	6,2	5,2	Nord de Chinandéga
71b	8,3	2,2	1,19	0,17	11,9	37	48	6,8	5,8	
71c	9,0	3,1	1,04	0,23	13,4	39	43	7,0	5,5	
72a	9,9	2,8	2,3	0,05	15,0	44	50	6,3	5,2	Villa Salvadorita
72b	9,8	3,8	2,7	0,05	16,2	43	50	6,7	5,4	
72c	11,2	4,3	0,5	0,24	16,3	43	50	6,9	5,5	
73a	7,1	1,2	0,98	0,03	9,3	30	34	6,6	5,8	Pentes San Cristobal
73b	9,4	1,7	0,66	0,07	11,9	32	37	7,2	5,9	
73c	7,6	2,0	0,96	0,08	10,6	34	36	7,4	6,0	
74a	3,0	0,69	0,59	0,04	4,3	33	33	6,5	5,9	Telica
74b	5,9	1,56	1,14	0,15	8,7	41	42	6,7	5,9	
74c	8,8	2,77	1,31	0,23	13,1	42	52	6,8	5,7	
75a	5,3	1,0	0,62	0,03	6,9		31	6,5	5,6	Malpaisillo
75b	6,9	2,3	0,21	0,18	9,6		38	6,6	5,6	
75c	3,8	1,8	0,28	0,25	6,2		44	6,9	5,3	
17-2										
77 a	12,9	3,4	0,75	0,07	17,2		54	6,2	5,5	Sol à évolution ferrallitique } Matagalpa mas- sif tertiaire
77 b	4,3	3,0	0,23	0,14	7,7		26	5,3	4,2	
77 c	3,0	2,8	0,08	0,22	6,0		14	5,0	3,7	
79.....	23,7	22,1	1,3	1,0	48		80	5,6	3,9	Sol rouge montmorillo- nitique } montmorillo- nite dégradée.
N 31c.....	19,7	19,8	0,23	0,26	39		76	5,5	4,0	Sol jeune sur basalte } Côte Atlanti- que

Chinandéga - léon (côte pacifique)

Conclusion

Des teneurs en bases échangeables et des pH relativement élevés sont choses normales pour des sols soumis à une sévère saison sèche. Les valeurs du pH dans l'eau, particulièrement élevées en regard

du taux de saturation en bases, reflèteraient la présence de substances amorphes minérales. L'écart important entre les pH eau et KCl indiquerait, par contre, des états cristallins en cours de transformation ; phases intermédiaires (montmorillonitique ou autres ?) entre les amorphes et l'halloysite hydratée.

5.6. MATIÈRES HUMIQUES

La proportion très importante des acides humiques, cinq fois plus élevés en moyenne que les acides fulviques, reflète la rigueur de la sécheresse à laquelle ces sols sont soumis à certaines périodes de l'année. Dans les niveaux de surface des sols à allophane fortement hydratés du plateau de Masaya, les acides humiques sont deux fois plus importants que les acides fulviques. Dans les sols de transition allophanes-halloysite d'Equateur, analogues par bien des aspects à ceux étudiés dans ces régions de Chinandega-Léon, mais soumis à une saison sèche moins sévère, une insolation plus faible, et avec des précipitations occultes, les acides humiques et fulviques existent en proportion voisine. Par contre, pour les sols des régions très humides, fortement hydratés ou encore très jeunes en voie d'hydratation, les acides fulviques dominent.

TABLEAU 18

LES FORMES DE MATIÈRES ORGANIQUES - RÉSULTATS EN C POUR 100 G DE SOL SÉCHÉ À L'AIR

Echantillons	Acides humiques	Acides fulviques	Lieu	
N 70a.....	1,03	0,21	Chinandéga-Léon	Sols sur cendres de la région Chinandega-Léon
N 70b.....	0,66	0,13		
N 70c.....	0,15	0,05		
N 72a.....	0,82	0,13	Villa Salvadorita (Chinandega)	
N 72b.....	0,35	0,08		
N 72c.....	0,14	0,02		
N 73a.....	1,15	0,24	Chinandega Pentes San Cristobal	
N 73b.....	1,83	0,35		
N 77a.....	1,02	0,91	Matagalpa Sol à évolution ferrallitique	Chaîne tertiaire intérieure
N 77b.....	0,22	0,38		

5.7. NATURE DES SUBSTANCES MINÉRALES INFÉRIEURES A 2 μ

5.7.1. Dispersion

Une suspension stable peut être obtenue, soit en milieu acide, en présence d'acide chlorhydrique au voisinage de pH 5 à 5,5, soit en milieu alcalin avec l'ammoniaque. Un traitement énergique aux ultrasons est nécessaire pour éviter le maintien de petits agrégats et permettre l'obtention de sables vraiment

propres et dégagés de tout revêtement colloïdal. Un traitement à l'eau oxygénée est effectué avant passage aux ultrasons et, à plusieurs reprises, sur le décanta inférieur à 2μ , avant séchage à l'air à température ordinaire.

5.7.2. Examen aux rayons X

Tous les échantillons examinés présentent, sur spectre de poudre, la raie à 10 \AA de l'halloysite hydratée, passant à $7,4 \text{ \AA}$ par chauffage à $100 \text{ }^\circ\text{C}$, sauf pour l'échantillon 73, encore très jeune où un simple renflement est observé (fig. 10). La raie à $4,41 \text{ \AA}$, indice d'un réseau cristallin déjà important, est partout bien marquée ainsi que la raie unique et large, vers $2,5 \text{ \AA}$ de l'halloysite. Diverses raies dues à de fines particules primaires sont également observés, en particulier à $3,2$ et $4,06 \text{ \AA}$.

Il y a peu de variations sensibles dans le profil, comme le montre la comparaison des diagrammes du profil 71 pour 30-60 et 90-160 cm.

On observerait sur échantillons orientés, quelques renflements vers 13 ou 14 \AA , ne gonflant pas de manière vraiment sensible après traitement au glycérol, mais on ne peut pas vraiment parler de raies comme pour certains sols à allophanes hydratés. Sur certains échantillons, apparaît une petite raie vers $6,5 \text{ \AA}$ (échantillons 70 b-71 b) et sur d'autres vers $8,7 \text{ \AA}$ (70 b). Après saturation en magnésium et chauffage à $300 \text{ }^\circ\text{C}$, ces légers renflements à $13-14 \text{ \AA}$ sur échantillons orientés disparaissent. L'analyse thermique différentielle indique pour tous ces échantillons (sauf le plus amorphe 73 b), un crochet à $420 \text{ }^\circ\text{C}$. Rappelons que dans certains sols sur cendres du Japon, un crochet à $420 \text{ }^\circ\text{C}$ à l'analyse thermique différentielle est souvent accompagné d'une raie à 14 \AA , mieux visible sur échantillon saturé en magnésium. Cette raie à 14 \AA passe à 18 \AA par chauffage à $300 \text{ }^\circ\text{C}$ puis disparaît à $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour les auteurs Japonais, ces critères caractérisent certaines formes d'une substance appelée imogolite, possédant déjà une certaine organisation cristalline.

La présence de l'halloysite hydratée, accompagnée de substances amorphes est donc bien mise en évidence, sauf dans l'échantillon 73, le plus amorphe et le plus jeune situé sur les pentes du volcan.

5.7.3. Examen aux rayons infrarouges

Les diagrammes de spectrographie infrarouge confirment nettement la présence de l'halloysite, et une organisation déjà assez poussée de l'ensemble (fig. 11).

Les deux bandes d'absorption des OH vers $3\ 700$ et $3\ 620 \text{ cm}^{-1}$, sont bien nettes sans être, cependant, très prononcées. La bande d'absorption Si-O a des composantes nettes importantes et fines, à des fréquences supérieures à $1\ 000 \text{ cm}^{-1}$, indiquant l'abondance des Al^{VI} octaédriques et, en conséquence, une perturbation peu sensible du réseau silicique par des Al^{IV} . La bande de valence vers $1\ 100 \text{ cm}^{-1}$ est également bien marquée. La bande de déformation $\text{Al}^{\text{VI}}\text{-OH}$, donc Al octaédrique, est bien développée vers 910 cm^{-1} . La bande vers 800 cm^{-1} , attribuée à la structure en anneau des tétraèdres de silice est fort peu visible, mais le doublet Si-O à $440-470 \text{ cm}^{-1}$ est bien découpé, indiquant une bonne séparation des couches tétraédriques et octaédriques. Le complexe des bandes Si-O-Al entre 500 et 750 cm^{-1} est assez bien défini.

L'absence de bande bien définie à 800 cm^{-1} est assez générale, semble-t-il, dans les sols de basses altitudes des régions tropicales. On ne l'a vraiment observée de façon nette que pour certains sols d'altitude d'Equateur, en climat relativement tempéré, et présentant des spectres de rayons X analogues.

Pour faciliter les comparaisons, on a fait figurer le diagramme d'infrarouge d'un sol jeune sur cendre à halloysite d'altitude ($3\ 000 \text{ m}$) d'Equateur (E 162) présentant une belle raie à 10 \AA aux rayons X,

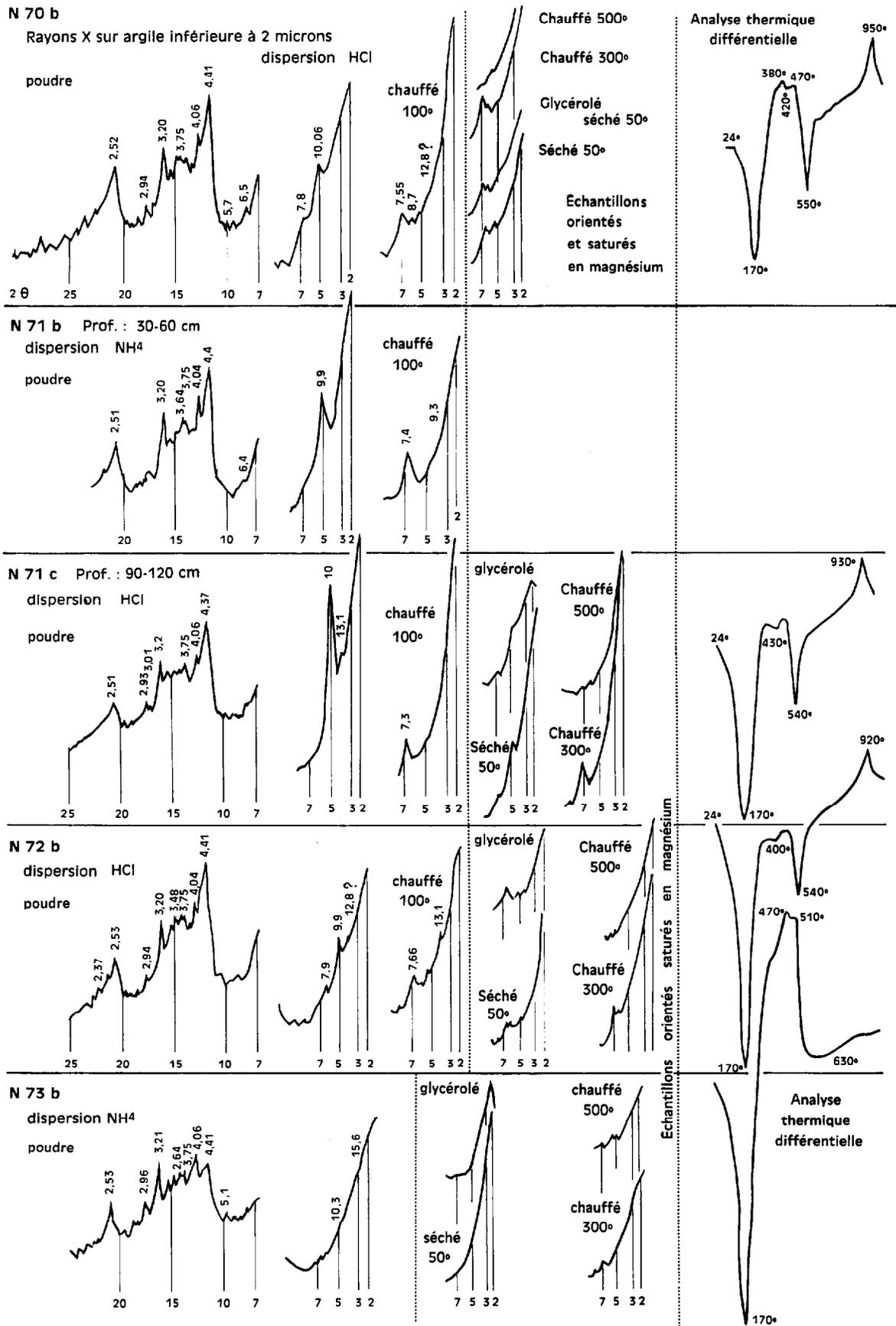


FIG. 10. — Diagrammes de rayons X et analyse thermique différentielle.

une bande d'absorption nette à 800 cm^{-1} , mais un aspect glomérulaire diffus au microscope électronique. Pour un autre échantillon de sol analogue d'Equateur, mais à basse altitude, on observe par contre, un diagramme très voisin de l'échantillon N 72 du Nicaragua, sans bande marquée à 800 cm^{-1} , et l'aspect classique en bâtonnets de l'halloysite au microscope électronique.

Rappelons que FIELDS (1955) dans les régions tempérées de Nouvelle Zélande distinguait « l'allophe A » sans bande d'absorption à 800 cm^{-1} et avec une large bande vers 950 cm^{-1} , et « l'allophe B » avec une bande à 800 et une autre au-delà de $1\ 000\text{ cm}^{-1}$.

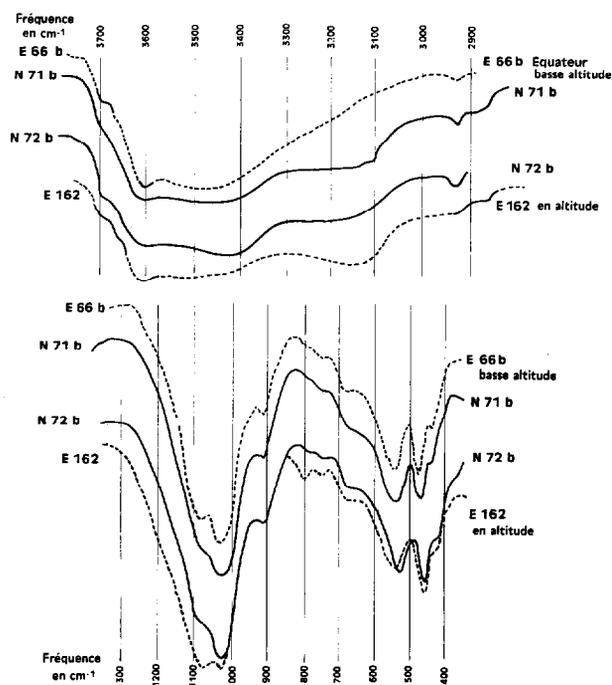


FIG. 11. — Diagrammes d'absorption dans l'infrarouge (PERKINS-ELMER).

Les rayons infrarouge comme les rayons X traduisent donc une organisation déjà marquée et la différenciation des couches octaédriques et tétraédriques.

5.7.4. Examen au microscope électronique

Les bâtonnets de l'halloysite apparaissent nettement. Ils sont, toutefois, encore très courts, souvent trapus, avec des formes assez irrégulières. A titre de comparaison, on a fait figurer le cliché d'une belle halloysite, d'un sol brun-rouille à halloysite plus évolué que ceux-ci, aux bâtonnets allongés et bien définis. Outre les bâtonnets, on distingue assez nettement des formes ovoïdes qui semblent s'écailler en auréoles concentriques. Il s'agirait probablement d'une forme antérieure aux bâtonnets que SIEFFERMANN (1968) a pu observer dans le niveau de départ de sols sur coulées basaltiques du Cameroun avec plus de netteté (planche 3). Ces glomérules enroulés s'observent bien dans les échantillons 70 b, 71 b, 72 b.

Dans l'échantillon 73, plus jeune, sur les pentes du volcan San Cristobal, probablement plus riche encore en substances amorphes, les raies de l'halloysite aux rayons X sont à peine sensibles. On n'observe pas ou très peu de bâtonnets d'halloysite, mais des paquets de fibres distendues comme dans les sols à allophanes fortement hydratés du plateau de Masaya. Ce faciès fibreux représenterait donc une phase très jeune, précédant l'apparition de l'halloysite.

5.8. CONCLUSION

Les sols limono-sableux issus de fines particules cendreuses de la région de Chinandega-Léon et soumis à une saison sèche sévère et chaude, présentent donc une évolution déjà très marquée vers l'halloysite hydratée à 10 Å qui apparaît au microscope électronique en bâtonnets tubulaires, accompagnée de formes glomérulaires.

La persistance de formes amorphes ou mal cristallisées, halloysite jeune et peut-être substances intermédiaires mal définies, confère à ces sols une capacité d'échange de bases, relativement élevée et une rétention d'eau importante. Ces valeurs sont cependant bien moins importantes que pour les sols à allophanes fortement hydratés et, à la différence de ceux-ci, la diminution de la rétention d'eau ou de la capacité d'échange après séchage à l'air est peu sensible. Les variations de la capacité d'échange entre pH 9 et pH 7 sont relativement faibles et parfois insignifiantes, mais la décroissance est importante, moins cependant que pour les sols fortement hydratés après traitement aux acides. Comme pour les sols à allophanes fortement hydratés, les pH mesurés dans l'eau sont anormalement élevés, en regard du taux de saturation, mais l'écart important entre les mesures dans l'eau et dans le chlorure de potassium semble indiquer la présence de formes cristallines en cours de transformation. La dispersion en milieu acide ou ammoniacal est symptomatique de cette association.

Les faciès les plus jeunes, sur les pentes des volcans, paraissent moins organisés et l'halloysite est encore peu perceptible aux rayons X. Le microscope électronique révèle des formes fibreuses, voisines de celles observées pour les sols plus hydratés. Les caractères des substances amorphes sont plus marqués : écart entre pF sur échantillons frais ou secs, décroissance de la capacité d'échange après traitement acide, etc. Même dans les régions à influence desséchante prononcée, les formes fibreuses paraissent précéder l'apparition de l'halloysite en bâtonnets.

6. SOLS ROUGES SUR CENDRES

6.1. CONDITIONS DE FORMATION

Les sols rouges sur cendres semblent limités aux régions tout particulièrement sèches, proches des zones franchement arides de la vallée intérieure. Ce type de sol n'a été observé ni aux Antilles, ni en Equateur. Il résulte, vraisemblablement, d'une évolution très longue dans le temps.

La rubéfaction serait la conséquence d'une dessiccation très poussée du sol durant plusieurs mois de l'année. Les deux profils cités, l'un à l'Est de Managua, l'autre près de Nandaime, présentaient au moment du prélèvement, et après seulement un mois de saison sèche, des humidités voisines ou infé-

rieures à pF 4,2 ou point de flétrissement. Ils étaient donc beaucoup plus desséchés que les autres sols examinés ailleurs.

Ces sols rouges alternent avec des vertisols classiques noirs ou beiges et le passage d'un sol à l'autre est très rapide en quelques mètres. Il semble que les sols rouges occupent des terrasses relativement plates, mais placées en position élevée par les nombreuses entailles que l'érosion y a tracées. Sur les flancs et dans le fond des fossés ou ravins, les vertisols apparaissent aussitôt et une faible dénivellation peut suffire.

D'importantes épaisseurs de cendres et de ponces fraîches, à peine altérées, recouvrent des sols rouges de même type dans certaines régions. Le remodelage déjà très poussé du relief, initialement plat, qu'il s'agisse du plateau de sol rouge ou du dépôt qui l'a recouvert, en collines et vallées, souligne la durée de la période écoulée depuis l'époque de la formation de ces sols maintenant enfouis.

La présence de vertisols, non seulement dans toutes les parties franchement basses, mais également dans les versants remaniés des ravins, semble indiquer que l'évolution actuelle est de tendance verticale avec formation de montmorillonite, ce qui paraît bien normal sous ces climats secs.

Dans les régions les plus sèches des Antilles, à pluviométrie annuelle voisine de 1,2 m et à saison sèche marquée, l'évolution des sols sur cendres est très nettement verticale. Sur les formations encore jeunes et grossières, les sols forment transition entre le vertisol classique et le sol brun-rouille à halloysite. Les caractéristiques de ces deux grandes formations s'y retrouvent : couleur rouille foncé, luisance prononcée, minéraux altérés nombreux, présence d'halloysite d'une part, caractère gras et adhérent de la montmorillonite d'autre part, avec structure à tendance massive et fissurée. La sécheresse n'est cependant pas aussi rigoureuse aux Antilles que dans ces régions du Nicaragua. Les formations sont moins anciennes, sur des pentes constamment rajeunies par l'érosion ou recouvertes de nouveaux apports et les sols n'ont pu évoluer durant d'aussi longues périodes.

Une topographie plate, évitant l'érosion et permettant le maintien du sol et une pluviométrie modérée, voisine ou inférieure à 1 m, avec une longue saison sèche bien marquée et une forte insolation, semblent donc être les conditions de formation de ces sols rouges.

6.2. MORPHOLOGIE DES PROFILS

Deux profils ont fait l'objet de prélèvements pour des analyses détaillées. Par certains aspects, ils rappellent les sols brun-rouille à halloysite, et font penser, par d'autres, aux sols rouges des régions méditerranéennes, soumis à des conditions de sécheresse voisine.

Ces sols sont caractérisés par une texture nettement argilo-limoneuse à argileuse, une couleur rouge marquée et l'apparition, à faible profondeur, de la cendre encore peu altérée.

A l'est de Managua, dans la vallée intérieure (km 23 vers San Benito), les sols rouges occupent de vastes plaines portant, par suite de la sécheresse excessive, de médiocres cultures de coton. Dans les thalwegs, entaillés par l'érosion, ou dans de faibles dénivellations, apparaissent les vertisols.

A – Sur 10 cm : Le sol est très sec, véritable poussière de couleur beige très clair (10 YR 5/8). Mouillé, la coloration devient plus foncée (3/3) et la texture semble argilo-limoneuse. Quelques débris poncés de quelques millimètres à 1 cm, blanchâtres ou verdâtres, parsèment ce niveau. Certains sont durs, d'autres se brisent aisément.

- B – De 10 à 35 cm : Le sol est brun-rougeâtre foncé (5 YR 3/4 à 3/3) avec une tendance rouille. de profondeur Ecrasé entre les doigts, la couleur devient beaucoup plus claire (5/4 à 5/6), ce qui indiquerait des revêtements importants. De texture argilo-limoneuse à l'état frais, le sol se prend en séchant en blocs fissurés assez durs, à faces subangulaires. La porosité est nette, mais très fine, le sol paraissant constitué de très petits agrégats oolithiques soudés. La structure d'ensemble a une apparence continue. Quelques débris de minéraux altérés pouvant comporter des petits morceaux de basalte de 1/2 à 1 cm, durs et peu altérés, noirs ou verdâtres, sont aussi rencontrés.
- C – De 35 à 110 cm : La coloration s'éclaircit progressivement, passant de 5 YR 4/4 à 5/6. Le sol paraît limoneux, s'émiettant en très fines particules sans apparence d'argile. On rencontre encore quelques graviers. C'est donc un niveau cendreuse rubéfié, mais encore très peu argilisé.
- D – : On passe ensuite, par une mince bande de cendre verdâtre déjà dure, à la cendre grisâtre durcie. Cette cendre, consolidée, mais se brisant aisément au marteau, semble avoir plusieurs mètres d'épaisseur. Elle paraît très fine, sans éléments grossiers.

L'autre profil, observé dans le Sud près de Nandaime, présente un aspect analogue. La région semble moins sèche et les cotonniers y sont prospères.

- Ap – Sur 20 cm : Le sol est rouge foncé (5 YR 3/3) s'éclaircissant quand on l'écrase entre les doigts (4/3). La texture apparente est argilo-limoneuse, mais le sol durcit en séchant avec de légères fissures. Les débris minéraux sont peu abondants et les éléments grossiers : ponces ou graviers rocheux très rares. La porosité est très fine et le sol semble constitué de très fins agrégats oolithiques soudés par des revêtements.
- B₁ – De 20 à 40 cm : Le sol paraît un peu plus argileux, plus rouge surtout lorsqu'il est sec et exposé au soleil sur les talus (2,5 YR 3/4 à 3/6). Il renferme davantage de petits graviers ponces ou débris de cendre durcie blanchâtre.
- B₂ – De 40 à 80 cm : Le sol devient plus riche en débris de cendre altérés : blanchâtres, roses, verdâtres... ou encore durs et grisâtres, mais s'écrasant facilement. La coloration s'éclaircit, passant au jaune rouge (5 YR 4/4 sur sol humide et 7,5 YR 5/6 sur sol sec). La proportion d'argile décroît, le sol devient limoneux, passant progressivement vers 80-100 cm à la cendre grise très fine, uniforme, relativement consolidée.
- D – : Cette cendre fine consolidée, semble, dans les talus de route, avoir plusieurs mètres d'épaisseur.

Ces deux profils présentent donc des analogies avec certains sols rouges des régions méditerranéennes, par la faible épaisseur du niveau argileux, bien marqué cependant, souvent fissuré et durci, et de coloration bien rouge. Cette ressemblance se retrouve en partie dans les caractéristiques chimiques.

6.3. CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES

Les déterminations des pF ont été effectuées soit sur des échantillons conservés dans leur état d'humidité naturelle au moment du prélèvement, soit sur échantillons séchés à l'air. On remarque dans le tableau 19 que l'humidité au moment du prélèvement est voisine ou légèrement inférieure à celle du pF 4,2, ou « point de flétrissement ».

Les différences observées entre mesures sur échantillons conservés « frais » ou séchés à l'air sont insignifiantes et ne peuvent être valablement prises en considération. Il faut noter la valeur élevée de l'humidité au pF 4,2.

TABLEAU 19

LES VALEURS DES pF-HUMIDITÉ EN EAU POUR 100 G DE SOL SÉCHÉ A 105 °C

Echantillons	Profond. en cm	Déterminations sur sol frais			Eau naturelle prélèvement	Eau utile pF 2,5-pF 4,2	Détermination sur sol séché à l'air	
		pF 2,5	pF 3,0	pF 4,2			pF 2,5	pF 3,0
N 81a	0-25	41	35,5	26,3	25,6	14,7	41	35,5
N 81b	25-35	50,5	44,4	32,0	30,0	18,5	50	43,3
N 81c	40-100	58	51	29,1	27,0	28,9	55,5	49,8
N 89a	0-15	36,4	31,0	24,5	21,1	9,9	34,8	32
N 89b	30-70	51,1	48,4	32,9	32,0	18,2	48	43,2

L'augmentation régulière en profondeur des humidités pour les différents pF et de l'eau dite « utilisable », montre l'influence limitée de la matière organique sur la rétention d'eau du sol. La présence probable dans le niveau d'altération d'une proportion de substances encore à l'état amorphe plus forte que dans les niveaux argilisés de surface pourrait être une explication.

Les valeurs de l'eau dite « utile » (pF 2,5-pF 4,2) dans le niveau limono-sableux de cendre altérée, peuvent atteindre 30 % en poids. Le cotonnier peut donc encore trouver en profondeur, après les premières semaines de sécheresse, quelques réserves en eau importantes. Cependant, au moment de ces prélèvements, fin décembre, ces réserves paraissaient déjà épuisées. Rappelons que dans la région de Chinandega-Leon les humidités des sols en place à la même époque, étaient comprises entre celles des pF 3,0 et 4,2 et pour la plupart plus proches du premier pF, sauf pour certains niveaux de surface (pente du San Cristobal, Malpaissillo).

6.4. LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE BASES

Les valeurs de la capacité d'échange sont importantes et augmentent assez sensiblement en profondeur, bien que les teneurs en matières organiques décroissent fortement (tableau 20). Après attaque à l'eau oxygénée, la capacité d'échange est peu modifiée, confirmant ainsi le peu d'influence de la matière organique. Elle est diminuée de façon sensible en surface avec plus de 5 % de matières organiques, mais demeure inchangée en profondeur avec parfois tendance à s'accroître.

Lorsque la détermination est effectuée sur sol séché à l'air, les chiffres trouvés sont légèrement plus faibles. Faut-il voir là l'influence de substances amorphes comme dans les sols hydratés ou plus simplement d'une réhumectation difficile après dessiccation des revêtements d'hydroxydes ? On n'attachera donc pas de signification particulière, jusqu'à nouvel ordre, à ces différences.

En opérant à pH 9, au lieu de pH 7, toujours dans l'acétate, l'augmentation est peu sensible, pouvant atteindre, cependant, 10 % pour certains échantillons.

TABLEAU 20

VARIATIONS DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DE BASES EXPRIMÉE EN MÉ POUR 100 g DE SOL SÉCHÉ À 105 °C

Echantillons	Profondeur cm	Mesurée sur échantillon conservé frais à :				Mesurée sur échantillon séché à l'air à pH 7 (5)	M.O. %
		pH 7 (1)	pH 9 (2)	pH 7 ap. H ₂ O ₂ (3)	après traitement SEGALEN (4)		
N 81a	0-25	60	66	58	37	51	3,3
N 81b	25-35	68	76	71	42	53	2,5
		67	75	69	41		
N 81c	40-100	74	81	80	37	59	1,4
		73	81	77	38		
N 89a	0-15	50	53	43	33	44	5,1
N 89b	30-70	52	56	50	36	48	1,0

(1) Avec l'acétate d'ammonium à pH 7.

(2) Idem, mais à pH 9.

(3) Destruction de la matière organique à l'eau oxygénée puis détermination de T à pH 7 comme pour (1).

(4) Trois attaques successives avec HCl, 6 N et la soude 0,5 N, puis détermination de T à pH 7.

(1), (2), (3), (4) Examens effectués sur échantillons conservés dans leur humidité naturelle. Résultats exprimés pour 100 g de sol séché à 105 °C.

(5) Idem (1), mais sur échantillon séché à l'air. Résultat pour 100 g de sol séché à 105 °C.

La particularité la plus intéressante de ces sols est la valeur encore relativement importante de la capacité d'échange de bases après trois traitements successifs, à froid, à l'acide chlorhydrique 6N et à la soude N/2. Elle représente encore 60 à 80 % de la valeur initiale. Il existerait donc, outre les substances amorphes habituelles dissoutes par ces traitements, soit des argiles cristallines capables de maintenir la capacité d'échange à ce haut niveau, comme la montmorillonite ou la vermiculite, soit des substances mal cristallisées ou amorphes, mais plus résistantes au traitement par les acides. L'hypothèse de telles substances riches en fer est peut-être à retenir et à approfondir.

Le maintien d'une valeur importante de la capacité d'échange de base après traitement acide SEGALEN (1968), quelle qu'en soit la raison exacte, distingue très nettement ces sols des allophanes fortement hydratés et des sols encore très jeunes limono-sableux à halloysite des régions de Chinandega-Leon.

6.5. LES BASES ÉCHANGEABLES. TAUX DE SATURATION. pH

Les teneurs en bases échangeables sont relativement importantes, de l'ordre de 20 à 25 mé p. 100 g de sol. On constate, en profondeur, une augmentation sensible des teneurs en magnésium. Est-elle liée, comme dans bien des sols, à une augmentation de la proportion d'argile montmorillonitique ? Les différences relativement importantes des valeurs des pH mesurés dans l'eau ou dans KCl, renforceraient cette hypothèse.

TABLEAU 21

BASES ÉCHANGEABLES. TAUX DE SATURATION. pH

Echantillons	Prof. cm	Bases échangeables mé pour 100 g					Sous sol		pH	
		Ca	Mg	K	Na	S	frais V %	sec V %	Ea ₁	KCl
N 81a	0-25	14,5	6,9	0,80	0,11	22,3	37	44	6,4	5,2
N 81b	25-35	16,9	9,2	0,24	0,16	26,5	40	50	6,5	5,4
N 81c	40-100	12,8	12,9	0,09	0,24	26,0	38	44	6,3	5,0
N 89a	0-15	11,7	6,4	0,84	0,08	18,9	38	43	5,7	4,9
N 89b	30-70	11,1	9,1	0,15	0,13	20,5	39	43	6,2	5,0

6.6. MATIÈRES HUMIQUES

La proportion importante des acides humiques, surtout en surface, par rapport aux acides fulviques et le faible pourcentage de leur somme par rapport à la matière organique totale, reflètent les conditions de sécheresse du climat.

TABLEAU 22

RÉSULTATS EN C POUR 100 g DE SOL SÉCHÉ À L'AIR

Echantillons	Profondeur cm	Acides humiques	Acides fulviques	M.O. % total
N 81a	0-25	0,39	0,11	3,3
N 81b	25-35	0,19	0,16	2,5
N 89a	0-15	0,85	0,86	

6.7. ÉTUDE DE LA FRACTION INFÉRIEURE A 2 μ

La dispersion de ces sols ne pose pas de problèmes particuliers. Les suspensions sont stables dans l'ammoniaque. Les ultrasons ont été utilisés comme pour les autres échantillons.

Aux rayons X, les niveaux les plus argileux de ces deux profils présentent une importante raie vers 4,41 Å, indiquant la présence d'argile cristalline, une raie à 3,5 Å et une raie à 2,50 Å bien marquée et large à la base. Un peu de goethite se signifierait par un renflement vers 4,16 Å et une petite raie à 2,67 Å (fig. 12).

L'échantillon N 89 b de Nandaime, montre, en outre, une raie large, étalée, mais nette entre 7,6 et 8,2 Å, que l'on peut attribuer à un mélange de métahalloysite et d'halloysite. Cette raie s'affine

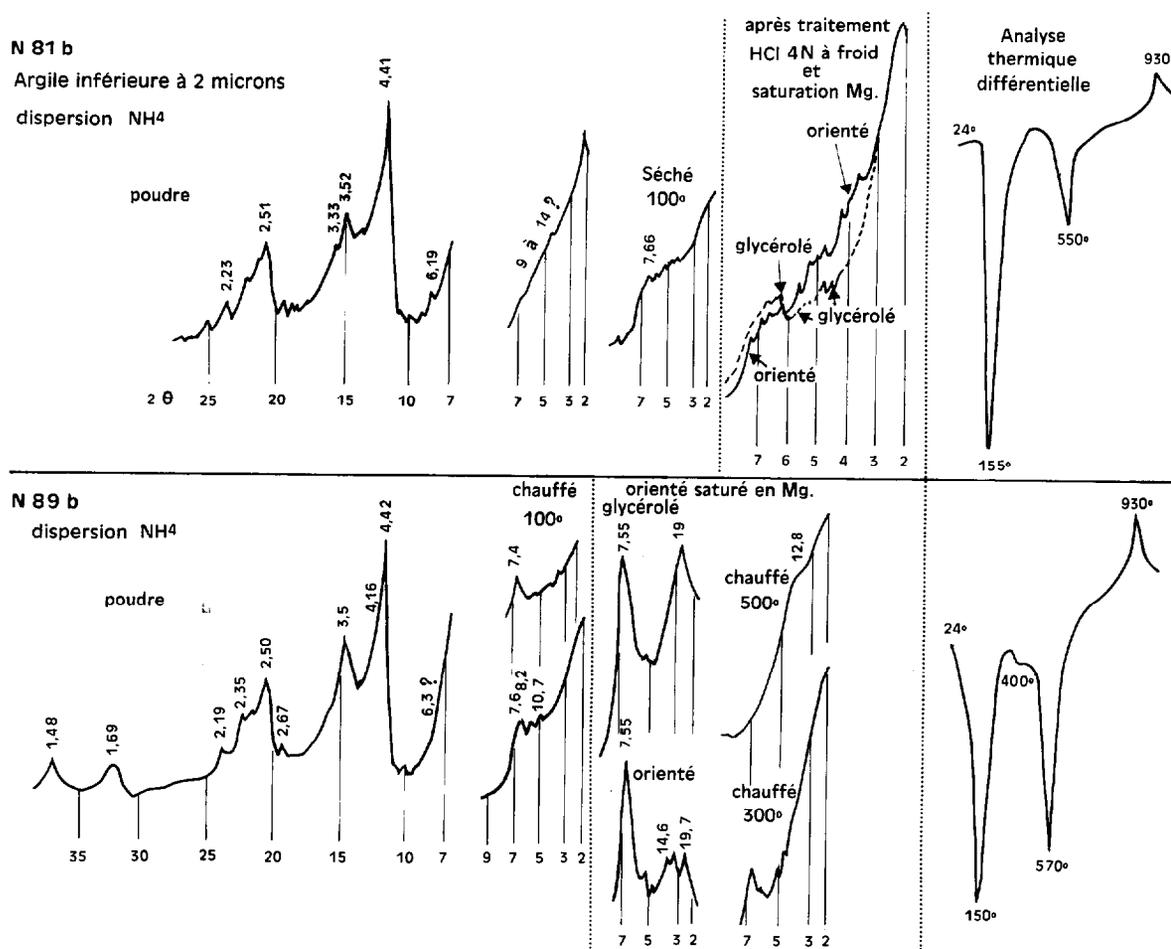


FIG. 12. — Diagrammes de rayons X et analyse thermique différentielle.

et se déplace vers 7,4 Å par séchage à 100 °C. On n'observe que la trace d'une raie à 10 Å. Les raies à 1,69 et 1,48 Å appartiendraient aussi à la métahalloysite. L'importance des raies à 3,5 et 2,35 Å permet d'envisager la présence en mélange de fire-clay. Sur échantillon orienté saturé en magnésium on observerait une raie vers 14,6 Å qui semble passer à 19 Å par traitement au glycérol et disparaître par chauffage à 300 °C et 500 °C (renflement à 12,8 Å). L'analyse thermique différentielle n'indique pas le crochet endothermique classique de la montmorillonite et on ne saurait affirmer la présence de ce type d'argile.

Dans l'échantillon N 81 de la plaine intérieure de Managua, aucune raie marquée n'apparaît dans le spectre poudre au-delà de 7 Å, mais seulement un fond important. Un léger renflement vers 10 Å ferait penser à l'halloysite, car par séchage à 100 °C, il y a apparition d'une raie assez nette, quoique large, vers 7,6 Å. Les raies à 3,52 et 2,35 Å sont peu marquées. Une petite raie apparaîtrait vers 6,19 Å.

Sur échantillon orienté, on observe un renflement entre 8 et 9 Å.

Ce profil semble donc dans un état d'évolution moins avancé que le précédent, avec présence surtout d'halloysite hydratée et de produits amorphes. On peut relier cette observation à la minceur du niveau argileux et à la valeur plus importante de la capacité d'échange.

La présence d'halloysite ou de métahalloysite n'explique pas les fortes valeurs de la capacité d'échange, surtout pour l'échantillon 81 b (68 mé %). Si la présence de produits amorphes est probable et bien illustrée par la chute de la capacité d'échange après traitement acide à froid, elle n'est pas aisée à mettre en évidence aux rayons X, en présence d'halloysite.

La présence éventuelle de montmorillonite, plus facile à distinguer, pourrait aussi expliquer ces capacités d'échange élevées. On a donc traité l'argile par l'acide chlorhydrique 4N à froid, pour éliminer les produits amorphes susceptibles de masquer son apparition, puis essayé le traitement au glycérol sur l'échantillon orienté et saturé en magnésium. Aucun gonflement n'apparaît de façon sensible (fig. 12).

L'analyse thermique différentielle, d'habitude très sensible à la présence de montmorillonite, ne montre aucun crochet endothermique au-delà de celui de l'halloysite vers 580 °C (fig. 12).

6.8. CONCLUSION

La présence, soit d'argile de type halloysite, soit de métahalloysite et fire-clay, avec un peu de goethite et des produits amorphes, caractérise donc ces sols.

L'hypothèse d'argiles cristallines à forte capacité d'échange de type montmorillonitique ne peut, cependant, être tout à fait exclue. Du fer inclus dans le réseau peut inhiber le gonflement au glycérol. Si montmorillonite il y a, l'absence de raies marquées de 12 à 14 Å implique, cependant, qu'il s'agit de faibles quantités. L'hypothèse de substances encore mal cristallisées semble devoir mieux rendre compte des valeurs élevées de la capacité d'échange.

7. CONCLUSION

Bien des sols issus de cendres volcaniques au Nicaragua, présentent donc d'étroites ressemblances avec ceux que l'on a déjà étudiés aux Antilles Françaises et en Equateur (COLMET-DAAGE et *al.*, 1965-1967). Le sens de l'évolution paraît sensiblement le même. Il y a apparition de substances amorphes qui se caractérisent par leur hydratation marquée, puis passage vers l'halloysite hydratée $4H_2O$, et enfin vers la métahalloysite et les fire-clay. On observe, cependant, diverses variantes dans la succession des différents stades d'évolution et peut-être aussi dans les processus.

Les motifs de ces variations ne sont pas connus avec certitude. Il y a certainement influence du climat sur l'intensité et la durée de la dessiccation des sols. La nature des minéraux primaires altérables est peut-être aussi en cause, de même que la durée de l'évolution.

Les régions tropicales chaudes d'Equateur et des Antilles sont soumises, dans l'ensemble, à des conditions climatiques plus humides. Les fortes pluviométries annuelles sont fréquentes et l'intensité de la dessiccation des sols plus réduite. Ces conditions « ferrallitiques » sont favorables aux altérations et à une « argilisation » rapide des sols. Les substances amorphes hydratées augmentent dans les régions très humides avec, par la suite, apparition de gibbsite. L'halloysite prend de plus en plus d'importance dans les sols soumis à certaines périodes de dessiccation même modérées, en donnant naissance aux sols brun-rouille ou bruns eutrophes tropicaux, avec des stades d'évolution plus avancés franchement ferrallitiques (COLMET-DAAGE et *al.*, 1965-1967).

Dans les régions les plus sèches des Antilles et d'Equateur, se rapprochant de celles du Nicaragua, l'érosion est très active, arasant les sols formés, et mettant sans cesse à jour de nouvelles couches peu altérées de cendres ou de ponces ensevelies. Des apports aériens récents sont également fréquents. Il n'est donc possible, dans ces conditions, que d'observer des sols présentant une évolution très peu poussée.

Les conditions plus sévères, mais variées, de la sécheresse au Nicaragua, n'empêchent pas cependant, l'apparition de *substances amorphes parfois très fortement hydratées*. Dans la mesure où il est possible d'établir des comparaisons avec les données climatiques dont on dispose, il paraît peu probable que, dans les régions de climat similaire des Antilles et d'Equateur, des sols aussi hydratés puissent être observés. L'halloysite existerait déjà en quantité notable et les humidités du sol pour les divers pF seraient bien moins élevées.

Une résistance toute particulière des substances amorphes du Nicaragua à la dessiccation à l'air, à température ordinaire, expliquerait leur persistance. Une structure plus rigide, avec les larges fibres observées, serait peut-être liée à ce comportement spécial dont les causes profondes d'apparition demeurent incertaines. S'agit-il de la nature de minéraux primaires plus basiques, des teneurs plus importantes en bases échangeables, reflet d'un climat plus sec..., etc. ?

Ce stade amorphe très hydraté paraît, à la différence des sols des Antilles ou d'Equateur, provisoire. Quelques bâtonnets d'halloysite et une raie relativement marquée à 4,41 Å, sont observés dans certains de ces sols. Les faciès « de transition » renferment nettement de l'halloysite, tout en présentant des valeurs très élevées d'humidité, attribuables aux substances amorphes. La formation de l'halloysite, quoique retardée, est donc certaine.

La présence de sols argilo-limoneux brun rouille à halloysite $4H_2O$, à faible distance de ces sols fortement hydratés, vient confirmer l'évolution générale vers ce type d'argile. Sauf différences climatiques importantes à de très faibles distances que nous ignorons, on ne voit pas bien, en effet, comment sur ces plateaux de Jinotepe-Masaya, d'autres motifs que la jeunesse du sol, peuvent expliquer ces divers faciès. On n'observe pas comme aux Antilles et en Equateur, des régions nettement distinctes dans lesquelles le sens d'évolution des sols consiste manifestement, soit dans le maintien des produits amorphes fortement hydratés, soit dans l'accroissement de la proportion de l'halloysite, soit même dans certaines régions, dans l'apparition de la montmorillonite.

La distinction entre sols fortement hydratés et sols à halloysite est donc possible au Nicaragua, mais moins nette, moins évidente par certains caractères que pour les sols des Antilles et d'Equateur. C'est déjà un faciès de transition vers l'halloysite, dans lequel certaines caractéristiques des substances amorphes, pour des raisons peu claires, ont permis leur maintien dans des conditions peu habituelles et retardé d'autant la formation en quantité notable de l'halloysite.

Dans les *régions Nord de Chinandéga-Léon*, soumises à une sécheresse et une insolation beaucoup plus sévères, le stade amorphe hydraté paraît restreint et peu prononcé. L'halloysite apparaît déjà en quantité notable (rayons X, infrarouge, microscope électronique). La forte diminution de la capacité d'échange de bases après traitements acides à froid (SEGALEN, 1968) indique cependant la présence d'importantes quantités de substances solubles, probablement amorphes. Faut-il alors voir dans les teneurs en eau et les valeurs de la capacité d'échange, moins élevées que pour les sols fortement hydratés, une plus faible proportion de substances amorphes ou une nature différente de ces substances. Cette nature différente peut-elle, d'ailleurs, résulter simplement d'une déshydratation partielle ?

Les fibres bien caractéristiques des amorphes apparaissent seulement dans le profil le plus jeune, examiné sur les pentes du volcan. Il s'agirait là d'un stade fugace dont l'existence est, malgré tout, bien mise en évidence, même sous ces climats secs.

Par leurs propriétés, ces sols correspondent sensiblement aux sols « de transition à allophanes-halloysite » des Antilles ou d'Equateur, mais avec un stade amorphe probablement plus fugace, du fait de la dessiccation beaucoup plus accentuée des sols.

Les *sols rouges* sur cendres n'ont été observés ni aux Antilles, ni en Equateur. Une sécheresse sévère, liée à une forte insolation, une végétation clairsemée et une longue durée d'évolution, favorisée par une topographie très douce, semblent permettre leur apparition. La fraction sable est peu représentée.

On peut être surpris de ne pas identifier la montmorillonite dans la fraction argileuse et de trouver une proportion de produits amorphes apparemment encore importante. L'existence de vertisols sur les mêmes formations, mais remaniées, indique pourtant que la formation de ce type d'argile est bien actuelle. Il est permis de penser que le stade montmorillonite existe, mais que par suite de la grande lenteur de l'altération de ces sols de plateaux, placés sous des conditions climatiques extrêmes, le renouvellement de cette argile est moins rapide que sa transformation en d'autres argiles. Les zones remaniées par l'érosion sont nécessairement en position plus basse, donc plus longtemps humides et la montmorillonite apparaît et se maintient plus facilement.

L'absence de montmorillonite, si effectivement absence il y a, et le fait que cette argile n'est pas masquée par certains éléments intercalés dans les feuillets (fer par exemple) venant gêner son identification, pourraient donc s'expliquer par la durée fort longue de l'évolution. Cette hypothèse ne rend pas bien compte de la présence des produits amorphes et de la capacité d'échange très importante.

Elle peut aussi être invoquée pour expliquer la subsistance de quelques rares taches de sols rouges sur les formations volcaniques dures du versant aride et accidenté du massif tertiaire, face à la plaine intérieure. Ces sols rouges forment des îlots parmi les sols noirs, très minces et caillouteux, ou localement nettement vertisoliques. Ils sont vraisemblablement des vestiges de sols très anciennement formés et aujourd'hui disparus, sauf en ces rares endroits. Sur les surfaces rabotées par l'érosion jusqu'au niveau d'altération ou la roche, une nouvelle évolution plus actuelle de type vertique expliquerait, sur ces formations dures comme sur les cendres de la plaine, l'abondance des sols noirs montmorillonitiques.

Les diverses méthodes utilisées pour établir une distinction entre les substances amorphes et l'halloysite ou d'autres argiles ne concordent que pour les cas bien marqués : absence d'halloysite ou, au contraire présence en quantité notable et dans un bon état de cristallinité. Pour les stades intermédiaires et les mélanges, la distinction est souvent plus confuse. Telle argile donnera aux rayons X les raies faibles mais nettes à 10 \AA de l'halloysite $4\text{H}_2\text{O}$, mais se présentera en tubes mal formés, voire même en masses mal définies. Telle autre argile ne présentera qu'un renflement incertain à 10 \AA aux rayons X, mais apparaîtra sous forme de bâtonnets bien caractéristiques. Cette argile bien classique en bâtonnets verra sa capacité d'échange très fortement diminuée par attaque en milieu acide concentré à froid. Une autre, apparemment moins bien constituée, conservera une valeur de T relativement élevée. Les mêmes remarques peuvent être faites pour l'intensité des crochets à $580 \text{ }^\circ\text{C}$ et $930 \text{ }^\circ\text{C}$ de l'halloysite à l'analyse thermique différentielle.

Suivant la proportion des substances amorphes, et aussi suivant leur nature encore mal connue, les résultats fournis par ces méthodes, adaptées à la détermination d'argiles cristallines, sont perturbés. Les perturbations résultent souvent de la différence de sensibilité de chacune de ces méthodes. C'est ainsi qu'une raie déjà marquée à $4,41 \text{ \AA}$ aux rayons X se traduira toujours par une organisation déjà bien définie aux infrarouges, plus sensibles pour ces premiers stades, etc.

L'observation au microscope électronique, pourtant si féconde avec ces argiles fibreuses ou en bâtonnets, demeure très délicate. Certains tubes de l'halloysite ne sont parfois décelés qu'exceptionnellement parmi les fibres sur certains sites de la grille. Dans d'autres échantillons où l'halloysite semble peu représentée d'après les autres techniques, on peut se demander si l'abondance des tubes ne provient pas d'une dispersion préférentielle de ceux-ci, les écheveaux fibreux restant difficiles à mettre en évidence du fait de leur transparence et de leur tendance à s'agglomérer en masses informes au séchage.

Certaines formes apparemment tubulaires, courtes et renflées, indiquent-elles vraiment l'halloysite? Ne s'agit-il pas de substances intermédiaires, solubles partiellement dans les acides, et présentant

une très forte capacité d'échange, c'est-à-dire présentant des caractères que l'on a coutume d'attribuer à des substances amorphes ?

L'identification de la montmorillonite en présence de l'halloysite et des amorphes est difficile, surtout si certains atomes s'intercalent dans les feuillets en annihilant certains critères d'identification classique de ces argiles : gonflement au glycérol, effondrement à 10 Å au chauffage. Les infrarouges, comme le microscope électronique, donnent fort peu d'indications pour ce type d'argile. Le fond important des produits amorphes au-delà de 7 Å, gêne considérablement les observations aux rayons X ; aussi a-t-on essayé de les éliminer au préalable, par les acides concentrés. L'analyse thermique est parfois la technique la plus sensible. Le maintien dans certains sols de capacités d'échange élevées après traitement acide peut, dans bien des cas, faire songer à une déficience de ces techniques d'identification.

L'utilisation d'un ensemble de techniques semble donc indispensable. Celles auxquelles il a été fait appel dans ce travail, sont encore insuffisantes pour établir une distinction nette entre les divers matériaux, dits amorphes d'une part, et leur mélange avec des argiles cristallines bien définies d'autre part. Une certaine continuité exigera sans doute pour la classification des sols des limites tracées de façon quelque peu arbitraire dans un ensemble de résultats.

Mai 1969

BIBLIOGRAPHIE

- AOMINE (S.), MIYAUCHI (N.), 1965 — Imogolite of imogo-layers in Kyushu. *Soil Sci. Plant. Nutrit.*, vol. XI, n° 5, pp. 28-35.
- BROWN (G.) Ed., 1961. — The X-ray identification and crystal structures of clay minerals. *Mineralogical society*, London, 544 p.
- COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (J. et M.), LAGACHE (P.), 1965. — Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles Françaises. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. III, fasc. 2, pp. 91-121.
- COLMET-DAAGE (F.), et al., 1967. — Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. V, fasc. 1, pp. 3-37 et fasc. 4, pp. 35-391.
- COLMET-DAAGE (F.) et al., 1968. — Caractéristiques de quelques sols de formations volcaniques dures, de la côte Atlantique du Nicaragua avec carte géomorphologiques. ORSTOM, Bureau des sols des Antilles, 74 p. multigr.
- DE KIMPE (C.), TARDY (Y.), 1967. — Etude de l'altération d'une biotite en kaolinite par spectroscopie infrarouge. *Bull. Gr. fr. Argiles*, t. 19, fasc. 2, pp. 81-85.
- DUPLAIX (S.), 1958. — Détermination microscopique des minéraux des sables. 2° éd. *Libr. Polytech. Ch. Béranger*, Paris ; Liège, VIII, 96 p.
- FARMER (V.C.), RUSSEL (J.D.), 1966. — Infra-red absorption spectrometry in clays studies. *Nat. Conf. Clays and clay minerals*. 15. Pittsburgh, pp. 121-141.
- FIELDS (M.), 1955. — Clay mineralogy of New Zealand soils, Part II, Allophane and related mineral colloids. *N.Z.J.Sci. Technol.*, pp. 336-350.
- FIELDS (M.), WALKER (I.K.), WILLIAMS (P.P.), 1956. — Clay mineralogy of New Zealand soils, part III, Infra-red absorption spectra of soil clays. *N.Z., J. Sci. Technol.*, pp. 31-43.
- FISCHESSE (R.), 1959. — Données des principales espèces minérales, *J. et R. Sennac*, Paris, 683 p.
- FRIPIAT (J.J.), LEONARD (A.), BARAKE (N.), 1963. — Relation entre la structure et la texture des gels de silice. *Bull. Soc. chim. Fr.*, fasc. 1. pp. 122-140.
- GRIM (E.R.), 1953. — Clay mineralogy. McGraw Hill, London, 384 p.
- MCBIRNEY (A.), WILLIAMS (H.), 1965. — Volcanic history of Nicaragua. *Univ. California, Publ. géol. Sci.*, 55, VI, 65 p.
- MILLOT (G.), 1964. — Géologie des argiles. Masson, Paris, 464 p.
- ROUANET (G.), 1965. — Contribution à l'étude des sols du Carazzo et leur amélioration. Compte rendu mission d'études coop. technique française. pp. 8-28 multigr.
- SAPPER (K.), 1913. — Die mittelamerikanishen Vulkane. *Petermanns Mitt. Erg. H.* 178, IV, 174 p.

- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1, pp. 105-126.
- SIEFFERMANN (G.), MILLOT (G.), 1968. — L'halloysite des sols jeunes sur basaltes récents du centre Cameroun. *Bull. Gr. fr. Argiles*, t. 20, fasc. 1, pp. 25-38.
- SUDO (T.), TAKAHASHI (H.), 1955. — Shapes of halloysite particles in Japanese clays. *Nat. Conf. clays and clay minerals*. 4. Pennsylvania, pp. 67-79.
- TERAN (F.), PASQUERO (J.), 1964. — Geografía de Nicaragua. Banco Central de Nicaragua, Managua, 266 p.
- WADA (K.), 1967. — A structural scheme of soil allophane. *Amer. Mineralogist*, vol. 52, pp. 690-708.
- WEYL (R.), 1961. — Die geologie Mittelamerikas. Beitrage zur regionalen Geologie der Erde. Band. 1. Gebruder Borntraeger, Berlin, 226 p.
- WEYL (R.), 1961. — Mittelamerikanische ignimbrite. *Neues jrb. Geol. Paläontol. Abh.* 113, 1, pp. 23-46.
- YOSHINAGA (N.), YOTSUMOTO (H.), IBE (K.), 1968. An electron microscopic study of soil allophane with an ordered structure. *Amer. Mineralogist*, vol. 53, pp. 310-323.
- ZOPPI BRACCI (L.), DEL GIUDICE (D.), 1958. — Geologia de la costa del pacifico de Nicaragua. *Bol. Serv. geol. nac. Nicaragua*. n° 2, pp. 25-67.
- ZOPPI DE SENA (R.), 1957. — El volcan de Masaya de Nicaragua. *Bol. Serv. geol. nac. Nicaragua*, n° 1, pp. 45-64.

PLANCHE I

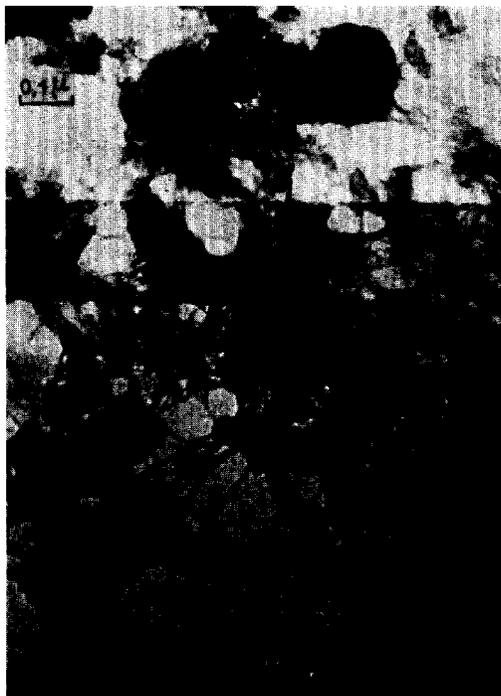


Photo 1. — N 86 b 5

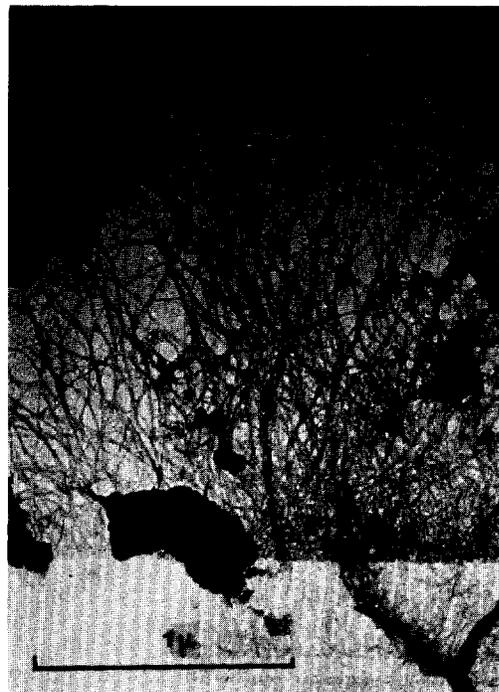


Photo 2. — N 86 b 6

Les deux clichés sont très analogues à ceux de l'Imogolite des auteurs japonais.

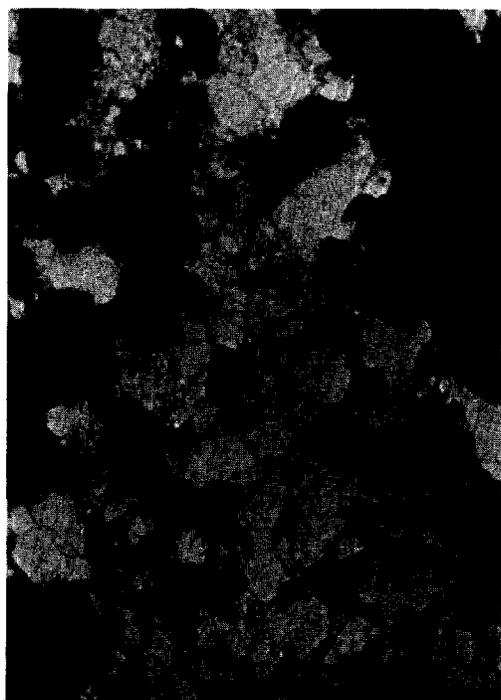


Photo 3. — N 86 b 7. Ce cliché révèle déjà l'apparition de quelques tubes d'halloysite parmi les fibres distendues.



Photo 4. — N 82 b 8.

PLANCHE II

Les numéros correspondent à ceux des diagrammes infrarouges de la figure 7 pour les photos 5 et 6.

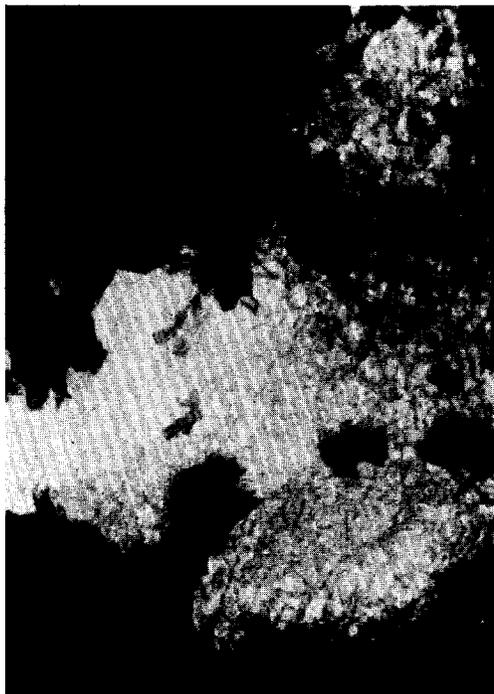


Photo 5. — SM 29 c — (Martinique), fibres enchevêtrées.

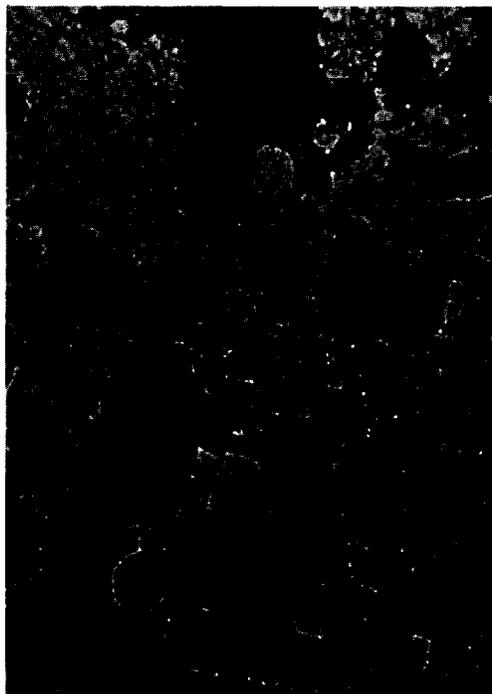


Photo 6. — Matouba — (Guadeloupe), fibres et glomérules.

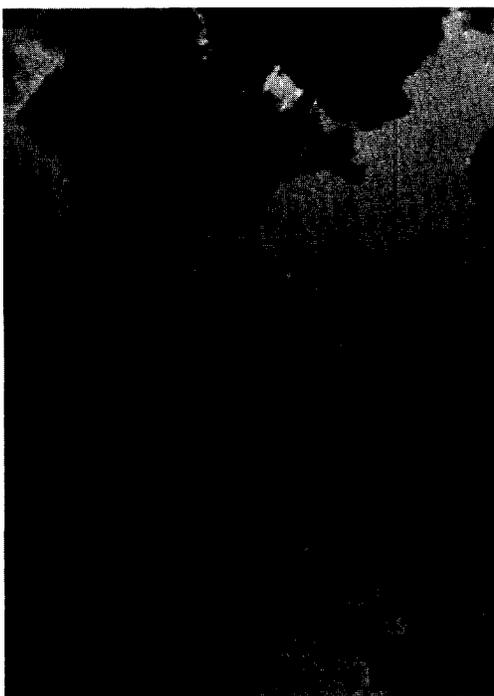


Photo 7. — N 91 b.

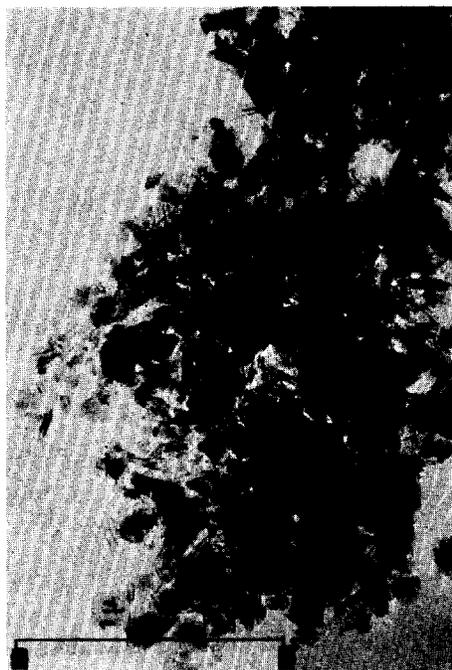


Photo 8. — N 90 b.

PLANCHE III



Photo 9. — N 70 b (San Antonio) — Glomérules concentriques et bâtonnets courts.



Photo 10. — N 71 c : 90-160 cm — Glomérules et bâtonnets courts.

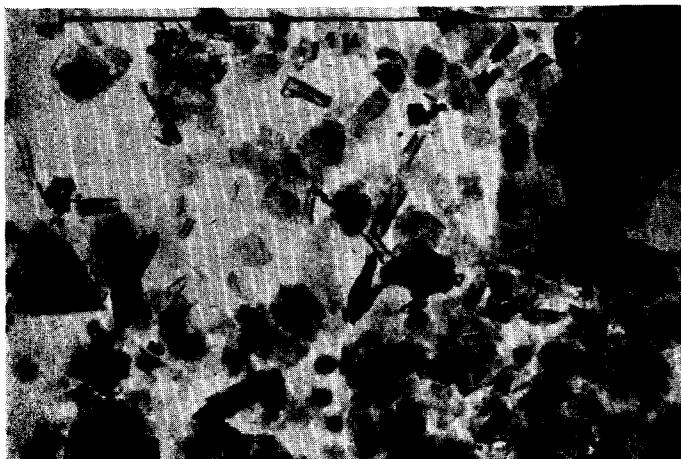


Photo 11. — N 72 b (villa Salvadovita) — Bâtonnets avec quelques glomérules.



Photo 12. — N 73 b (pente de San Cristobal) — Echantillon le plus jeune, fibres.