

Note sur la nature et la fertilité des sols sur cendres volcaniques provenant d'éruptions récentes dans l'archipel des Nouvelles-Hébrides ⁽¹⁾

1^{re} PARTIE

P. QUANTIN

Pédologue de l'ORSTOM - S.S.C.-Bondy

RÉSUMÉ

L'arc volcanique de l'archipel des Nouvelles-Hébrides est situé dans le Sud ouest de l'océan pacifique entre 13° et 21° de latitude Sud, 166° et 170° de longitude Est. Le climat y est en majeure partie équatorial très humide et en petite partie tropical.

Des éruptions volcaniques aériennes ont eu lieu pendant tout le Pléistocène et jusqu'à maintenant : elles ont fortement rajeuni toutes les formations géologiques ou pédologiques précédentes et ont ainsi contribué, d'une manière très importante à la formation des sols de l'ensemble de l'archipel.

Il a paru particulièrement intéressant de comparer les sols actuellement en début de formation sur les volcans encore actifs d'Ambrym et de Tanna, avec ceux d'Aoba et des Iles Banks dont les dernières éruptions remontent à environ un millénaire, et avec ceux des Iles Shepherd âgés seulement de quelques milliers d'années. En plus de l'âge des matériaux originels ont été remarquées les influences sur la pédogenèse de l'intensité pluviométrique et de la taille des cendres volcaniques.

Sous l'effet d'un climat équatorial, l'altération des verres volcaniques très poreux commence instantanément et la vie végétale s'installe aussitôt. Trente années ont suffi pour la formation dans l'île Ambrym d'un sol fertile au-dessus d'une coulée basaltique. Au début de

l'altération, les minéraux et les verres sont soumis à une hydrolyse intense et toujours renouvelée ; ils libèrent, en plus des éléments basiques (Ca, Mg, K, Na), des substances « amorphes » très riches en silice, encore mal définies, et un peu d'hydroxydes. La libération intense d'éléments basiques et de phosphore facilement soluble explique la fertilité de sols encore très jeunes bien que ceux-ci ne contiennent que de 1 à 5 % de fraction minérale inférieure à deux microns et de 1 à 3 % de matières organiques.

Il est intéressant de noter que dans la région Nord d'Ambrym ou la pluviométrie est modérée (3 m par an) et les cendres sont plus fines, apparaissent des minéraux argileux bien cristallisés : halloysite et montmorillonite et en même temps des sols plus fertiles. De plus la quantité d'argile s'accroît en profondeur, c'est-à-dire en fonction de l'âge des dépôts de cendres.

Après 1 000 ans environ, les sols sont déjà profondément « évolués » : plus de la moitié des verres et minéraux

(1) Note présentée par G. AUBERT au Congrès des Sciences du Pacifique à Canberra, août 1971.

— Les analyses physiques et chimiques de sol ont été faites par le laboratoire du Centre ORSTOM de Nouméa. Les analyses minéralogiques d'argiles ont été obtenues par le laboratoire de Sédimentologie et Géochimie de la Surface, du CNRS à Strasbourg.

primaires sont altérés ; la fraction inférieure à deux microns représente de 10 à plus de 30 % du sol. Les sols des régions modérément pluvieuses (2 à 3 m par an), à Aoba, sont des andosols eutrophes, c'est-à-dire saturés en cations ; ils sont riches en substances amorphes très siliceuses et en argiles : halloysite, vermiculite-chlorite et montmorillonite. Ce sont des sols très fertiles bien qu'ils retiennent assez fortement le phosphore. On remarque la formation dominante de montmorillonite dans les régions les plus sèches, d'halloysite et de vermiculite dans les régions les plus humides. Les sols des régions très pluvieuses (plus de 4 m par an), aux îles Banks, sont des andosols oligotrophes, c'est-à-dire plus ou moins fortement désaturés en cations. Ils sont riches en substances amorphes souvent très alumineuses (allophanes), en gibbsite et parfois en imogolite dans les horizons profonds, souvent en cristobalite dans l'horizon humifère ; mais ils sont relativement pauvres en argiles : principalement de l'halloysite, et des traces de kaolinite et d'argile à 14 Å ; ils retiennent très énergiquement le phosphore ; à cause de leur forte désaturation, de leur pauvreté en phosphore soluble et bien qu'ils soient riches en réserves minérales, la fertilité des andosols oligotrophes est limitée.

Après deux milliers d'années environs, sous un climat à pluviométrie moyenne (2 à 3 m par an), les sols des îles Shepherd sont encore plus profondément « évolués ». Ils sont considérés comme Bruns Eutrophes mais aussi comme andiques : ils contiennent encore beaucoup de minéraux primaires en cours d'altération, un peu de substances amorphes, déjà beaucoup de minéraux argileux : halloysite-métahalloysite surtout et un peu de montmorillonite, plus un peu de goethite. Ce sont des sols saturés en cations et très fertiles bien qu'ils retiennent assez fortement le phosphore.

Dans l'île Tanna, où le volcanisme a repris son activité récemment, il a été constaté que la différenciation et le degré d'« évolution » des sols s'accroît en fonction de l'éloignement du cratère éruptif, c'est-à-dire en même temps que la diminution de la taille des cendres et de la quantité des apports.

ABSTRACT

The New Hebrides volcanic arc is located in the South-West of the Pacific, between 13° and 21° South and between 166° and 170° East. The climate is mostly very wet equatorial and scarcely tropical.

Aerial volcanic eruptions have occurred right throughout the Pleistocene up until the present time ; they have

deeply rejuvenated the surface of all of the preceding geological or pedological formations, and they have greatly contributed to the genesis of almost all of the soils of the Archipelago.

It is especially interesting to compare the soils which are beginning to form on the still active volcanoes of Ambrym and Tanna, with those of Aoba and Banks Islands, where the last eruptions occurred about 1 000 years ago, or with those of Shepherd Islands which are a few thousand years old. As well as the weathering time, the effects of the rainfall intensity and of the particle size on the genesis of soils, should be taken into account.

Under an equatorial climate, the weathering of very porous volcanic glasses begins immediately and the plants grow almost simultaneously. On Ambrym Island, 30 years only sufficed for a fertile soil to form on a basaltic lava flow. As soon as the weathering starts, minerals and glasses are subjected to a very strong and constantly renewed hydrolysis. As well as basic elements (Ca, Mg, K, Na), amorphous products which are very rich in silica and not well known, and little hydroxides are released. The rapid release of basic elements and available phosphorus explains the fertility of these very young soils, although these soils contain only 1-5 % of less than 2 microns fraction and 1-3 % of organic matter.

It is noteworthy that in the North of Ambrym, where the rainfall intensity is moderate (3,000 mm/year) and where the ash particles are the finest, well crystallized clay minerals (halloysite and montmorillonite) appear and consequently result in more fertile soils. Furthermore, the clay amount of soil rises with the depth as well as the age of ash layers.

On Aoba and Banks Islands, after about 1,000 years, the soils are already fairly matured : more than 50 % of glasses and primary minerals are weathered ; the less than 2 microns fraction constitute 10 to more than 30 % of whole soil. In Aoba, where the rainfall is moderate (2-3 m/year), they are eutrophic andosols (with Exchange Capacity saturated by cations) ; these soils are rich in very siliceous amorphous products and clays like halloysite, vermiculite-chlorite and montmorillonite. These soils are very fertile, although they retain rather strongly the phosphorus. It is noteworthy that montmorillonite prevails in the driest country while halloysite and vermiculite are more frequent in the wettest country. In Banks Islands, where the rainfall is very great (more than 4 m/year), they are oligotrophic andosols (with cation exchange capacity more or less strongly desaturated) ; these soils are rich in very aluminous amorphous products (allophanes) in all of the profile, often in

gibbsite and sometime in imogolite in the deep (B) horizons, and often in cristobalite in the humic A horizon ; but they are rather poor in clay minerals : they contain only a few halloysite and traces of kaolinite and of 14 Å clay mineral; they retain energetically phosphorus ; because of this and of their cation desaturation, they are probably rather poor, although they still contain a lot of primary minerals.

In the Shephard Island, after two or little more thousands of years, under a climate of wich the rainfall is moderate (2 - 3 m/year), the soils are rather strongly matured. These soils are called Eutrophic Brown

Soils ; but they still remain andic. They still contain mainy primary minerals and a few amorphous products, but already they have much clay minerals ; mostly halloysite and metahalloysite, a little montmorillonite, and a little goethite. These soils are saturated by exchangeable cations and very fertile, although they retain rather strongly phosphorus.

In Tanna Island where the volcanic activity started again recently, the differenciation and the maturity of soils grow up with the distance of eruptive crater, that is to mean that the maturity of soils increase with the diminution of ash size and of depht ash layers.

PLAN

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION

1. Situation
2. Géologie
3. Climat
4. Végétation
5. Géomorphologie

1^{re} PARTIE

SOLS MINÉRAUX BRUTS ET SOLS PEU ÉVOLUÉS D'APPORT SUR CENDRES BASALTIQUES

- 1.1. Sols Minéraux Bruts, non climatiques, d'apport volcanique, formés sur une coulée très récente de lave basaltique, à Ambrym.
- 1.2. Sols Peu Evolués, non climatiques, d'apports volcaniques friables, formés sur plusieurs dépôts très récents de cendres basaltiques, à Ambrym.
 - 1.2.1. Zone humide de Sud-ouest et de Sud
 - a) propriétés physiques
 - b) propriétés chimiques
 - c) minéralogie de la fraction inférieure à 2 microns
 - d) fertilité
 - 1.2.2. Zone alternativement humide et sèche de Nord-Ouest

Conclusions sur la pédogénèse des Sols Peu Evolués sur cendres.

2^e PARTIE

ANDOSOLS EUTROPHES ET OLIGOTROPHES SUR CENDRES BASALTIQUES

- 2.1. Andosols eutrophes, sur cendres, lapilli et laves basaltiques datant de 1 000 à 1 500 ans, à Aoba.
 - a) propriétés physiques
 - b) propriétés chimiques

- c) minéralogie de la fraction inférieure à 2 μ
- d) fertilité
- e) aperçus sur la pédogénèse.

- 2.2. Andosols oligotrophes, sur cendres, tufs et laves basaltiques, datant de quelques milliers d'années, aux îles Banks.

2.2.1. Andosols moyennement désaturés

- a) propriétés physiques
- b) propriétés chimiques
- c) minéralogie de la fraction inférieure à 2 μ
- d) fertilité

2.2.2. Andosols fortement désaturés

- a) propriétés physiques
- b) propriétés chimiques
- c) minéralogie de la fraction inférieure à 2 μ
- d) fertilité

Conclusions sur la pédogénèse des Andosols eutrophes et oligotrophes.

3^e PARTIE

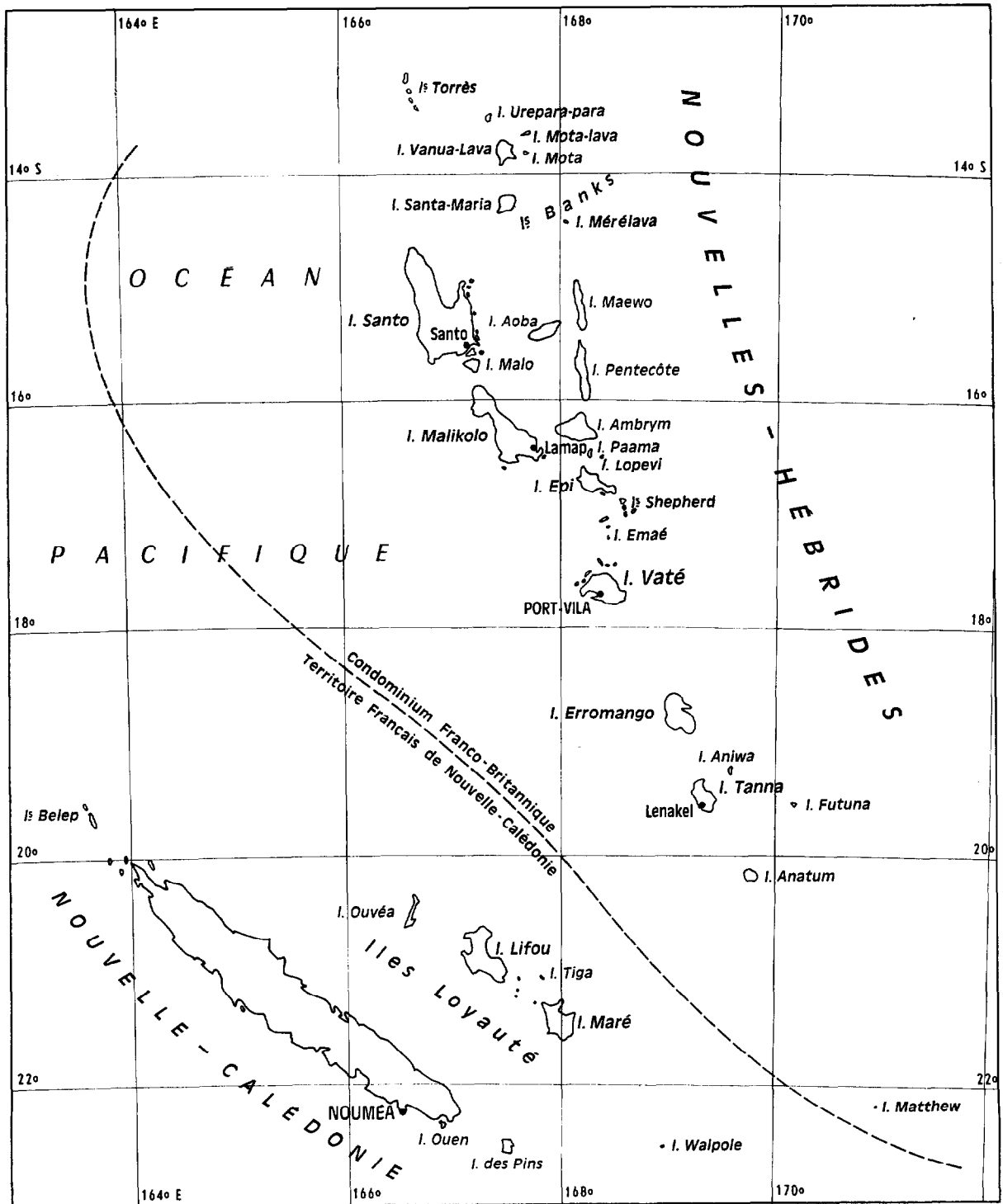
SOLS BRUNS EUTROPHES TROPICAUX SUR LAPILLI BASALTIQUES ; SÉQUENCE DE DIFFÉRENCIATION DE SOLS SUR CENDRES EN FONCTION DE L'ÉLOIGNEMENT DU CRATÈRE ÉRUPTIF

- 3.1. Sols Bruns Eutrophes tropicaux andiques sur lapilli basaltiques, datant d'environ 2 000 ans, aux îles Shephard.
 - a) propriétés physiques
 - b) propriétés chimiques
 - c) minéralogie de la fraction inférieure à 2 μ
 - d) fertilité
- 3.2. Séquence de différenciation de Sols sur cendres andésitiques, en fonction de l'éloignement du cratère éruptif, à Tanna.

CONCLUSIONS

Bibliographie

Annexes, sur les méthodes.



Carte de situation

AVANT-PROPOS

Cette note a été rédigée en juin 1971 pour une communication présentée par G. AUBERT au Congrès des Sciences du Pacifique à Canberra en août 1971. Elle a fait le point des connaissances obtenues à cette époque sur les sols formés sur cendres volcaniques d'âge récent aux Nouvelles Hébrides. Depuis, les connaissances, ainsi que les termes utilisés pour la typologie se sont précisés et feront l'objet de nouvelles publications.

Pour des raisons de commodité, cette note est présentée dans les Cahiers de l'ORSTOM, en trois articles :

Le premier, après une introduction résumant les données générales, traite des sols minéraux bruts et des sols peu évolués sur cendres basaltiques ;

Le deuxième donne les principales caractéristiques des Andosols eutrophes et oligotrophes sur cendres basaltiques ;

Le troisième décrit tout d'abord les sols bruns eutrophes tropicaux sur lapilli basaltiques, puis analyse une séquence de différenciation de sols sur cendres andésitiques en fonction de l'éloignement du cratère éruptif, et enfin, donne les conclusions générales de cette étude.

Les deux premières parties paraissent dans ce numéro des Cahiers de l'ORSTOM ; la troisième sera publiée dans le numéro suivant.

INTRODUCTION

1. SITUATION

L'archipel des Nouvelles-Hébrides forme un arc volcanique, situé dans le Sud-Ouest Pacifique, entre les parallèles 13° et 21° Sud d'une part, les méridiens 166° et 170° Est d'autre part. Il prolonge au sud l'archipel des Iles Salomon, dont il se rapproche fortement par sa formation géologique, son climat, la nature de ses sols et sa végétation.

2. GÉOLOGIE

Les îles des Nouvelles-Hébrides sont d'origine volcanique. L'âge du début de leur formation, daté par les sédiments qui ont accompagné les éruptions, remonte pour les plus anciennes à l'époque miocène. Le volcanisme s'est poursuivi jusqu'à maintenant et il demeure actif. La composition pétrographique des

laves et des formations pyroclastiques associées varie assez largement : de dacite à andésine à des ankaramites ; mais la moyenne des formations les plus fréquentes se situe entre les labradorites et les andésites.

L'ensemble de l'arc volcanique a subi un mouvement ascendant, de sorte qu'ont émergé successivement des sédiments et des récifs calcaires d'âge miocène, pliocène pleistocène et holocène. Au fur et à mesure, roches volcaniques sous-marines ou terrestres, sédiments et calcaire récifaux, ont été recouverts par des projections volcaniques pyroclastiques, de sorte que presque toutes les formations superficielles, en dehors de la dernière terrasse littorale calcaire (+2 à 3 m), sont principalement constituées de matériaux d'origine volcanique et d'âge récent. Il en résulte que la plupart des sols des Nouvelles-Hébrides dérivent de produits volcaniques d'âge récent.

3. CLIMAT

La majeure partie de la surface des Nouvelles-Hébrides jouit d'un climat équatorial, presque constamment humide et chaud ; cependant, en allant du Sud au Nord, le climat devient de plus en plus humide et chaud. Ainsi l'on note les variations suivantes : en situation comparable de Sud et à basse altitude les moyennes annuelles de pluviométrie, pluviosité et température varient respectivement de 2 300 mm, 16-17 jours de pluie par mois et 23°3 C au Sud, à 4 000 mm, 20 jours de pluie par mois et 26 °C au Nord. Il y a une alternance annuelle de deux saisons, mais peu différenciées : l'une plus fraîche et moins pluvieuse (10 à 16 jours de pluie par mois), l'autre plus chaude et plus pluvieuse (17 à 25 jours de pluie par mois) ; cette différence est plus sensible au Sud qu'au Nord. Il n'y a pas de mois statistiquement sec. Dans ces conditions les sols subissent une percolation fréquente et une altération intense.

Au-delà d'une altitude de 500 à 600 m, l'« ennuagement » est presque permanent et la pluviométrie s'accroît très fortement ; les sols y sont soumis à une lixiviation presque permanente et à une humidité constante.

Dans les régions Nord-ouest, des îles à fort relief, « sous le vent » des alizés, la pluviosité diminue sensiblement et la température augmente ; les sols y sont soumis à des alternances saisonnières d'hydratation-percolation et de dessiccation.

4. VÉGÉTATION

Une brousse forestière dense recouvre la majeure partie des îles. Cependant des savanes ou une brousse

arbustive claire s'étendent sur les régions plus sèches de Nord-ouest, ou sur les dépôts très abondants de cendres volcaniques à proximité des volcans en activité.

5. GÉOMORPHOLOGIE

Les volcans en activité ou récemment éteints ont des formes typiques de cônes vulcaniens avec cratère (Lopévi, par exemple) ou de dôme hawaïen avec caldera (Aoba par exemple).

Les formations anciennes, émergées, donnent aux îles l'aspect de horst : ce sont des chaînes volcaniques ou des plateaux volcano-sédimentaires entourés d'anneaux concentriques de gradins d'érosion marine, souvent bordés ou recouverts de récifs calcaires frangeants.

Cette étude sera limitée au cas des sols encore jeunes, formés sur des cendres volcaniques récentes, depuis celles fraîchement émises par les volcans en activité, jusqu'à celles datant probablement de quelques milliers d'années seulement, ou au cas de sols récemment rajeunis. Il sera traité successivement : des sols peu évolués sur cendres basaltiques très récentes d'Ambrym ; des Andosols eutrophes d'Aoba sur cendres basaltiques datant de 1000 à 1500 ans ; des Andosols oligotrophes des Iles Banks sur cendres basaltiques âgées au plus de quelques milliers d'années ; des sols bruns eutrophes tropicaux andiques des Iles Shepherd sur cendres et lapilli basaltiques datant de 2000 à quelques milliers d'années ; d'une chaîne de sols de l'île Tanna allant de sols peu évolués à des sols bruns andiques sur cendres andésitiques dont la nature des sols varie en fonction de l'éloignement d'un cratère volcanique actuellement en activité.

1. SOLS MINÉRAUX BRUTS ET SOLS PEU ÉVOLUÉS D'APPORT SUR CENDRES BASALTIQUES

1.1. Sols minéraux bruts non climatiques, d'apport volcanique, formés sur une coulée très récente de lave basaltique, très faiblement recouverte par des cendres, à Ambrym.

A Ambrym, en 1966, on remarquait déjà sur une coulée de lave basaltique émise en 1936 (P. DION, 1963), une végétation de petits arbres et arbustes, indiquant la formation d'un sol ; cependant la lave n'est encore apparemment que peu altérée : la partie externe de la coulée, extrêmement bulleuse, est rubéfiée seulement

sur une épaisseur de 5 à 10 mm ; les fines lamelles vitreuses constituant les bulles sont recouvertes d'une mince pellicule brunâtre ou brun-rougeâtre. L'examen aux rayons X des verres rubéfiés ne montre que la présence de substances « amorphes » et l'absence de minéraux secondaires bien cristallisés ; de même l'analyse chimique totale indique que la roche mère n'a pas subi de modification importante ; mais il n'a pas été possible d'isoler et d'analyser séparément la trop fine pellicule de substance rubéfiée. En réalité le sol est constitué de ces pellicules rubéfiées, de cendres fines qui remplissent les cavités externes de la lave et s'altèrent rapidement, de la matière organique déposée par les lichens, puis les fougères, arbustes et arbres qui le colonisent peu à peu : C'est surtout un milieu drainant bien et retenant cependant beaucoup d'eau et de substances dissoutes par la constante hydrolyse des verres volcaniques, favorable à l'installation des végétaux (le climat est régulièrement humide et chaud). Le fait que des petits arbres, hauts de quelques mètres, s'y soient développés montre que les sols minéraux bruts sur laves récentes sont déjà fertiles : d'ailleurs les habitants d'Ambrym commencent à y planter cocotier, ananas et patate douce. Le même phénomène a été constaté dans l'île Hawaï, où des cultures industrielles d'ananas, arbres fruitiers, fleurs, et même de canne à sucre, sont faites couramment sur les coulées de lave datant seulement de quelques décades ; mais des techniques particulières et une fertilisation appropriée y sont pratiquées.

1.2. Sols peu évolués, non climatiques, d'apports volcaniques friables, formés sur plusieurs dépôts très récents de cendres basaltiques stratifiés, à Ambrym.

A Ambrym, les émissions de cendres fines sont actuellement très abondantes et fréquentes : elles ont recouvert toute l'île, d'un épais manteau de dépôts stratifiés ; à chaque cycle éruptif se sont déposés à la base un niveau grossier de petits lapillis scoriacés et au sommet une couche de cendres fines ; aux cendres fines correspond l'intervalle éruptif le plus long et le plus propice à la pédogenèse (1). Ces dépôts se succèdent rapidement : dans le Sud Ouest les niveaux grossiers sont épais de 5 à 10 cm, et les niveaux cendreux de 15 à 20 cm. Leur âge est très récent (P. DION, 1963 ; A.J. WARDEN, 1968) : dans le Sud, une éruption

(1) Le dépôt de cendres fines se fait plus lentement ; il n'empêche pas le développement des végétaux supérieurs ; les cendres fines s'altèrent beaucoup plus vite que les cendres grossières.

commencée en 1949, avait recouvert en 1966 le précédent dépôt par environ 20 cm de cendres ; une coulée de lave formée en 1886 était recouverte de 50 cm de cendres en 1966. On remarque en surface une série de cinq sols peu évolués très récents superposés, recouvrant vers 1 à 1,50 m de profondeur d'autres sols plus anciens, bruns et plus argileux.

1.2.1. ZONE HUMIDE DE SUD-OUEST ET DE SUD

Chaque sol peu évolué est constitué d'un horizon humifère bien différencié sur cendres fines, gris-brun foncé, épais de 5 à 15 cm, contenant de 1 à 7 % de matière organique, et d'un horizon C - R plus grossier, gris, parfois rubéfié, n'ayant que 0,2 à 0,7 % de matière organique. Les sols les plus récents ne contiennent que très peu de fractions inférieures à 2 μ : de 1 à 7 % ; ils sont donc très pauvres en produits secondaires d'altération ; ces substances paraissent totalement amorphes par diffraction aux rayons X. L'analyse du sol superficiel (horizon A₁) fait ressortir les caractéristiques suivantes :

a Propriétés physiques (tab. 1)

La texture est sableuse ; la structure est très faiblement agrégée grumeleuse et très friable. Le sol contient seulement de 1 à 7 % d'éléments inférieurs à deux mi-

TABLEAU 1

Propriétés physiques des sols peu évolués sur cendres basaltiques * (Partie supérieure des sols de la zone humide et de la zone alternativement sèche et humide).

Horizon	A	C-R
Profondeur en cm	0 à 5-15	5-15 à 20-50
Couleur Munsell	5YR 2-3/0-1	5YR 2/1
Granulométrie %		
< 2 μ	1,0- 6,7	0,8- 2,0
2- 20 μ	5,4-11,8	1,2-11,4
20- 200 μ	36,3-78,9	34,0-80,2
200-2 000 μ	6,1-55,7	8,0-63,5
Matière organique.....	1,1- 6,7	0,15- 0,9
Eau		
H ₂ O à pF = 3 %	9,0-38,5	6,6-21,9
pF = 4,2 %	2,6-21,0	2,5-13,3
Hygroscopicité	0,4- 2,4	0,3- 2,5
Densité-porosité		
Densité apparente.....	1,1- 1,2	1,2
Porosité vol. %	59 -60	59

* Analyses effectuées sur sol conservé humide, rapportées au poids de sol séché à 105°.

crons mais déjà de 1 à 7 % de matière organique. Il est très fortement drainé. Sa capacité de rétention pour l'eau n'est cependant pas négligeable : de 9 à 37 % à pF = 3 et de 3 à 21 % à pF 4,2. La densité apparente est relativement faible : 1,1 à 1,2 ce qui entraîne une porosité élevée d'environ 60 %. Le sol contient environ de 6 à 16 % d'eau facilement disponible aux plantes.

b Propriétés chimiques (tab. 2)

Les sols peu évolués sur cendres volcaniques sont faiblement à moyennement humifères : leur contenu

TABLEAU 2

Propriétés chimiques des sols peu évolués sur cendres basaltiques * (Partie supérieure des profils)

Horizon	A ₁	C-R
Profondeur en cm	0 à 5-15	5-15 à 20-50
Matières organiques %	1,0 - 6,7	0,15- 0,9
C/N.....	9,3 -12,7	8,8 -11,8
pH (eau)	6,0 - 7,0	6,8 - 8,4
Éléments échangeables		
Ca mé p. 100 g ...	2,2 -11,7	0,45- 3,3
Mg — —	0,2 - 2,3	0,10- 0,50
K — —	0,15- 0,25	0,02- 0,08
Na — —	0,01- 0,28	0,02- 0,06
CEC — —	2,8 -13,8	1,0 - 4,6
Taux de saturation %	90 -100	100
Phosphore		
Assimilable (Truog)		
ppm	50 -200	15 -200
Total (HClO ₄) %	0,4 - 0,6	0,2 0,5
Analyse totale (HClO ₄)		
Sol total		Sol total : < 2 μ
Perte au feu %	1,4 - 2,2	0,2- 2,6 : 14,7
Résidu %	66,7 -69,2	64,9- 73,1 : 18,5(1)
SiO ₂ %	12,3 -14,8	10,7- 15,8 : 50,7 (2)
Al ₂ O ₃ %	5,9- 6,6	4,9- 5,8 : 2,75
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ %	3,5- 3,8	3,6- 4,8 : 31,3 (2)
Fe ₂ O ₃ %	4,2- 4,5	4,1- 5,6 : 10,5
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	2,4- 2,7	2,4- 2,9 : 9,1
Ca mé p. 100 g	104 -120	77 -116 : 47,1
Mg — —	63 - 83	53 - 79 : 90,3
K — —	7,0- 7,9	4,9- 9,1 : 4,9
Na — —	31 - 33	27 - 34 : 8,7

* Analyse sur sol séché-air, rapportée au poids de sol séché-air.

NB : 1. Le résidu d'attaque perchlorique sur la fraction inférieure à < 2 μ contient 11,63 % de SiO₂ ; ce qui représente 63 % de son poids, soit plus que dans les cendres basaltiques (54 %).

2. La quantité de SiO₂ dans la fraction inférieure à 2 μ est au total de 62,33 % ; ce qui représente, compte tenu de la perte au feu. 71,5 % de la matière minérale. Il y aurait de la silice libre et amorphe (absence de quartz) en forte quantité ; d'où la valeur anormale de SiO₂ : Al₂O₃.

en matière organique varie de 1 à 7 % ; mais il n'est le plus souvent que de 1 à 3 %. Cette substance est bien humifiée : le rapport C/N varie de 9,3 à 12,7 ; il est le plus souvent voisin de 10.

Le pH est faiblement acide dans l'horizon humifère : de 6 à 7 ; il est remarquable que cette valeur est faiblement alcaline : 7 à 8,4 dans les horizons C - R, de cendre en début d'altération ; il est probable que l'hydrolyse des minéraux primaires se développe en milieu alcalin au contact des cendres fraîches*.

La capacité d'échange de cations est encore relativement faible : elle varie de 2,2 à 13,8 mé p. 100 g ; elle est due probablement en grande partie à la matière organique, la capacité d'échange minérale n'étant que de 1 à 5 mé p. 100 g tout au plus. Le taux de saturation en cations est très élevé : il oscille de 90 à 100 % ; il n'y a que 0,10 à 0,25 mé p. 100 g de potassium échangeable ; mais cet élément est constamment renouvelé par hydrolyse. Les teneurs en phosphore facilement soluble (méthode Truog) sont très élevées : de 50 à 200 ppm, en tenant compte de l'extrême jeunesse du sol ; c'est une des caractéristiques les plus remarquables des sols peu évolués sur cendres.

L'analyse « totale » par extraction à l'acide perchlorique du sol total laisse un résidu inattaqué de 67 à 69 % dans l'horizon A₁ et de 65 à 73 % dans les horizons C - R ; ceci confirme le faible degré d'altération des cendres volcaniques ; dans l'extrait acide on remarque une légère diminution des rapports silice/alumine : 3,5 - 3,8 et silice/hydroxydes : 2,4 - 2,7 relativement à la roche totale : 5,4 et 3,6 ; ce qui pourrait indiquer le début de la libération de la silice et de la concentration relative en hydroxydes. L'extrait acide est très riche en cations, surtout en calcium, magnésium et sodium, et relativement pauvre en phosphore (400 à 600 ppm).

c Minéralogie de la fraction inférieure à deux microns (tab. 4)

— Dans la partie supérieure du profil, jusqu'à environ une profondeur d'un mètre, les horizons A et C - R ne contiennent que quelques pour cent de fraction inférieure à deux microns. Cette fraction est composée essentiellement de substances paraissant amorphes par diffraction des rayons X et d'un peu de minéraux primaires : feldspaths, pyroxènes et magnétite.

(*) Le pH des solutions au contact des minéraux primaires très basiques en cours d'hydrolyse, est probablement plus élevé que celui mesuré sur une solution de sol en laboratoire.

TABLEAU 3

Analyse chimique totale* de cendres et laves basaltiques

Echantillon n°	Cendre 2072	Basalte 2030
Perte au feu %	0,28	0,03
SiO ₂ %	53,8	52,6
Al ₂ O ₃ %	17,0	16,7
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	5,38	5,35
Fe ₂ O ₃ %	13,3	13,1
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	3,59	3,57
CaO %	10,0	10,0
MgO %	4,70	4,55

* Analyse par spectrographie au quantomètre. Y. BESNUS, C.S. et G.S. Strasbourg. 1968.

TABLEAU 4

Minéralogie de la fraction inférieure à deux microns*

Sols peu évolués sur cendres basaltiques ; zone humide	
Horizon A ₁	(échantillons 2121, 2071, 2091)
	— substances amorphes (riches en silice)
	— un peu de minéraux primaires : feldspaths plagioclases, pyroxènes et magnétite
Horizon C-R	(échantillons 2012 et 2072)
	— substances amorphes (riches en silice)
	— un peu de minéraux primaires : feldspaths plagioclases, pyroxènes et magnétite
Horizon II A-R	(échantillons 2013 et 2074)
	— substances amorphes (riches en silice)
	— traces d'argiles : montmorillonite, halloysite et interstratifiés
	— un peu de minéraux primaires.

* Minéralogie obtenue au laboratoire de Sédimentologie et Géochimie de la Surface à Strasbourg.

— Diffraction de rayons X, par G. JEHL, H. PAQUET, G. SIEFFERMANN et P. QUANTIN.

— Microscopie électronique, par G. SIEFFERMANN.

Au microscope électronique on observe de très fines particules ($d = 10^3 \text{ \AA}$) et des formes en réseau dérivant probablement de verres volcaniques. L'analyse chimique (tab. 2) montre que ces substances laissent encore un résidu important à l'attaque acide : 18,5 % (dont 11,6 % de silice) correspondant à des minéraux primaires, et contiennent dans leur partie soluble aux acides une quantité extrêmement élevée de silice : 50,7 % une assez forte quantité d'hydroxydes de fer : 10,5 %,

de calcium : 1,3 %, de magnésium : 1,8 %, mais peu d'alumine : 2,75 % ; il en résulte des valeurs anormalement élevées des rapports silice/alumine et silice/hydroxydes. Il faut surtout remarquer que la teneur en silice totale : 71,5 % est beaucoup plus élevée que celle de la roche initiale : 53 % (tab. 3). La forme de cette concentration relative en silice n'a pas pu être déterminée ni par diffraction des rayons X, ni au microscope électronique ; elle est probablement amorphe, son origine pourrait être recherchée dans la destruction partielle des silicates par hydrolyse.

— Dans la partie profonde, du profil, ayant subi une plus longue altération, l'apparition d'un peu d'argile, dont de la montmorillonite, de l'hallowite et des interstratifiés, s'ajoute aux substances contenues dans le haut profil. En climat tropical humide, l'apparition des minéraux argileux ne demanderait donc que quelques dizaines d'années.

d Fertilité

Les sols peu évolués sur cendres basaltiques sont considérés comme assez fertiles (du moins, ceux assez éloignés des cratères éruptifs, contenant plus de 1 % de matière organique dans l'horizon A₁ ; une forte éruption stérilise le sol pendant 5 années seulement). Malgré l'extrême jeunesse des cendres, constamment renouvelée, le sol est suffisamment humifère, libère assez de cations échangeables et de phosphore facilement soluble et retient assez d'eau pour favoriser la croissance des plantes. Cependant il faut éviter les cultures vivrières trop intensives et couvrant mal le sol, car elles permettent une lixiviation trop forte des éléments fertilisants. Il est probable qu'un apport complémentaire d'azote et de potassium et qu'une bonne couverture du sol par un mulch pourraient permettre d'accroître sensiblement les rendements ; mais aucun essai n'a été fait aux Nouvelles-Hébrides.

1.2.2. ZONE ALTERNATIVEMENT HUMIDE ET SÈCHE DE NORD-OUEST (tab. 5, 6 et 7, fig. 1 et photos 1 et 2)

A l'extrémité Nord-Ouest d'Ambrym, le climat est plus sec et plus contrasté ; de plus les apports de cendres sont moins abondants et plus fins, en raison de l'éloignement des cratères éruptifs actuellement actifs.

Le profil est composé de trois séquences pédogénétiques correspondant à trois cycles d'apports successifs : de 0 à 40 - 50 cm, un sol supérieur, à profil AC

TABLEAU 5

Propriétés physiques des sols sur cendres basaltiques de la zone alternativement sèche et humide *

(Sol peu évolué, andosol eutrophe et sol brun eutrophe, superposés).

Horizon	A ₁	II (B)-C	III (B)
Profondeur en cm	0 à 15	15 à 120	120 à 300
Echantillon	2111	2112	2114
Couleur Munsell	5 YR 2/1	5 YR 3/2	5 YR 3/3
— Granulométrie %			
< 2 μ	4,30	2,25	15,24
2 - 20 μ	9,13	5,84	18,06
20 - 200 μ	68,83	60,68	32,55
200 - 2 000 μ	15,50	30,15	33,53
— Matière organique ..	2,24	1,08	0,62
H ₂ O à pF = 3	26,17	34,36	52,08
pF = 4,2	10,53	24,40	28,01
Eau			
Hygroscopicité %	1,83	6,66	10,52
Densité apparente	1,1	—	0,84
Porosité %	60	—	64,4

* Analyse effectuée sur sol conservé humide ; rapportée au poids de sol séché à 105°.

creux, gris foncé et faiblement brunifié, correspond aux dépôts les plus récents et aux sols peu évolués sur cendres basaltiques précédemment décrits dans le Sud ; de 50 cm à 1,50 m, un sol brunifié, mais encore creux et friable, correspond à l'horizon (B) - C d'un andosol eutrophe sur un dépôt de cendres plus ancien ; enfin, entre 1,50 m et plus de 3 m, un sol brun rouge foncé paraissant argilo-limoneux et collant, correspond à l'horizon (B) d'un sol brun eutrophe-andique formé sur le dépôt de cendres le plus ancien.

Le sol supérieur, peu évolué d'apport volcanique, sur cendres basaltiques, est très semblable à ceux décrits dans la zone humide de Sud-Ouest et de Sud : il contient dans l'horizon A₁ 2,2 % de matière organique, au moins 4,3 % de fraction inférieure à deux microns, 0,4 mé p. 100 g de potassium échangeable et 80 ppm de phosphore facilement soluble (Truog) ; il a une capacité d'échange de cations de 7,6 mé p. 100 g saturée à près de 100 % et une capacité de rétention pour l'eau de 30 %. La fraction inférieure à deux microns est encore essentiellement constituée de substances très siliceuses paraissant amorphes aux rayons X ; l'extrait amorphe obtenu par la méthode Segalen représente 5,4 % du sol total et il est caractérisé par

TABLEAU 6

Propriétés chimiques des sols sur cendres basaltiques de la zone alternativement sèche et humide *

(Sol peu évolué, andosol/eutrophe et sol brun eutrophe, superposés).

Horizon	A ₁	II (B)-C	III (B)	
Profondeur en cm ..	0 à 15	15 à 120	120 à 130	
Echantillon	2111	2112	2114	
Matière organique %	2,24	1,08	0,62	
C/N	8,7	9,6	10,3	
pH (eau)	6,4	6,9	7,0	
Éléments échangeables				
Ca mé p. 100 g ...	5,42	15,76	20,68	
Mg — ...	1,45	6,42	10,03	
K — ...	0,42	2,28	3,00	
Na — ...	0,10	0,28	1,03	
CEC — ...	7,60	25,85	38,00	
Taux de saturation %	97,2	95,7	91,4	
Phosphore				
Assimilable (Truog)				
ppm	80	80	58	
Total (HClO ₄) ‰	1,7	0,6	1,7	
Analyse totale (HClO ₄)			Sol total	< 2 μ
Perte au feu %....	5,22	10,55	17,32	32,56
Résidu	66,00	43,22	25,73	2,27
SiO ₂	12,72	22,22	27,03	30,83
Al ₂ O ₃	6,47	10,28	13,87	15,40
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,3	3,7	3,3	3,4
Fe ₂ O ₃	4,44	7,80	10,71	16,40
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	2,3	2,5	2,2	2,0
TiO	0,26	0,46	0,71	1,20
Ca mé p. 100 g....	99,9	120,5	31,4	3,2
Mg	60,5	78,4	150,3	10,9
K	5,3	6,2	4,2	0,2
Na	24,8	20,3	13,9	1,3
Extraits d'amorphes (Segalen)**				
SiO ₂ %....	2,33	—	14,2	—
Al ₂ O ₃ %....	1,23	—	7,8	—
Fe ₂ O ₃ %....	1,88	—	10,0	—
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ %....	3,21	—	3,09	—

* Analyses effectuées sur sol séché-air et rapportées au poids de sol séché-air.

** Résultats rapportés au poids de sol séché à 105°.

un rapport silice/alumine de 3,2. Il est surtout intéressant de remarquer l'apparition de traces d'argile dans la fraction inférieure à deux microns du sol superficiel.

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. X, n° 2, 1972 : 123-133.

L'andosol-eutrophe, sous-jacent, est encore peu évolué ; car l'attaque par l'acide perchlorique laisse un résidu représentant 43 % du sol total ; mais il est fortement rubéfié, il a une capacité d'échange de cations de 25 mé p. 100 g et une capacité de rétention pour l'eau de 40 %. Il contient beaucoup de cations échangeables : 15,8 mé p. 100 g de calcium, 6,4 mé p. 100 g de magnésium et 2,3 mé p. 100 g de potassium, et beaucoup de phosphore facilement soluble (Truog) ; 80 ppm P₂O₅.

La fraction inférieure à deux microns est riche en substances amorphes très siliceuses ; mais il est intéressant de remarquer la présence d'un peu d'hallowysite et de traces de montmorillonite.

En profondeur, le sol brun eutrophe andique, plus ancien, paraît aussi beaucoup plus évolué : il retient 60 % d'eau et il a une capacité d'échange de cations de 38 mé p. 100 g. Cependant la valeur du rapport silice/alumine de la fraction inférieure à deux microns est encore de 3,4. Il est surtout intéressant de constater que cette fraction est riche en argile bien cristallisée : elle contient beaucoup d'hallowysite et un peu d'argile 2 : 1 ; mais elle contient encore une part importante de substances amorphes.

TABLEAU 7

Minéralogie de la fraction inférieure à deux microns des sols sur cendres basaltiques de la zone alternativement humide et sèche *

Horizon A ₁	(échantillon 2111)
—	substances amorphes (riches en silice)
—	traces d'argiles : montmorillonite et hallowysite (?)
—	un peu de minéraux primaires ; feldspaths plagioclases, pyroxène, magnétite.
Horizon II (B)-C	(échantillon 2112)
—	substances amorphes (riches en silice)
—	un peu d'argile : hallowysite dominante et traces de montmorillonite et interstratifiés (M-C)
—	un peu de minéraux primaires : feldspath plagioclase et pyroxène
Horizon III (B)	(échantillon 2114)
—	beaucoup d'argile : hallowysite dominante et traces de montmorillonite
—	un peu de substances amorphes
—	un peu de minéraux primaires : feldspaths plagioclases et pyroxène.

* Minéralogie obtenue au laboratoire de Sédimentologie et Géologie de la Surface à Strasbourg.

— Diffraction de rayons X. par G. JEHL, H. PAQUET, G. SIEFFERMANN et P. QUANTIN.

— Microscopie électronique, par G. SIEFFERMANN.



Photo 1, N° 2012. — Horizon C. Sol peu évolué sur cendres basaltiques - allophanes - siliceuses. Cliché G. SIEFFERMANN, Inst. Géol. Strasbourg.



Photo 2, N° 2112. — Horizon II (B), C. Sol peu évolué sur cendres basaltiques - allophanes - siliceuses et argiles (halloysite et montmorillonite). Cliché G. SIEFFERMANN, Inst. Géol. Strasbourg.

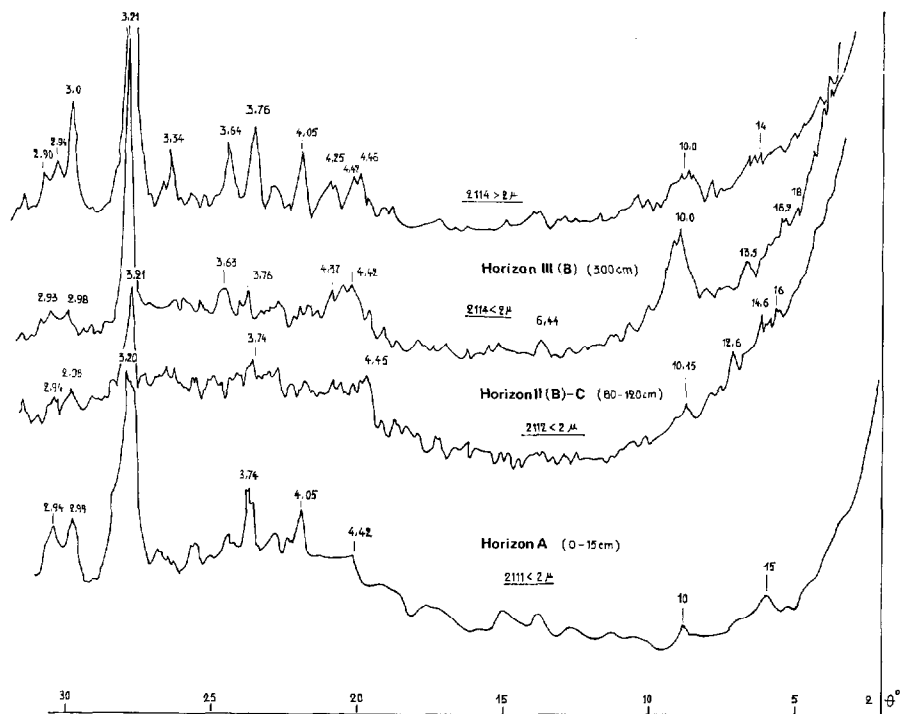


FIG. 1. — Diagramme de diffraction de rayons X (Cu). Sol peu évolué sur cendres basaltiques. Nord Ambrym (sol dispersé par ultra-sons).

CONCLUSIONS SUR LA PÉDOGENÈSE DES SOLS PEU ÉVOLUÉS SUR CENDRES

Les sols peu évolués sur cendres basaltiques d'Ambrym sont pauvres en produits secondaires d'altération. Ces substances sont beaucoup plus riches en silice que les cendres dont elles proviennent ; de plus, elles ne sont généralement pas cristallisées. Cependant en comparant les sols peu évolués de la zone « humide » et ceux de la zone « sèche », il est remarquable de constater que la cristallisation des minéraux argileux apparaît et que le degré d'évolution des profils s'accroît en allant de la zone humide à la zone sèche, contrairement à ce que l'on aurait pu imaginer a priori. Ceci s'explique d'une part par le fait que la plus grande

finesse des cendres et la réduction du volume des apports permettent d'accroître relativement le développement de l'altération, d'autre part parce qu'un climat plus sec pourrait favoriser la cristallisation des silicates secondaires en argiles. On remarque, parallèlement à ce phénomène, que les sols de la région Nord-Ouest, sont nettement plus fertiles que ceux de la région Sud-Ouest. Des observations analogues ont été faites dans l'île Tanna.

En conclusion, la pédogenèse se manifeste très rapidement sur les cendres volcaniques, et ceci d'autant plus que les cendres sont plus fines et que la quantité des apports n'est pas trop abondante.

Manuscrit reçu au S.C.D. le 23 juin 1972.

Note sur la nature et la fertilité des sols sur cendres volcaniques provenant d'éruptions récentes dans l'archipel des Nouvelles-Hébrides ⁽¹⁾

2^e PARTIE

P. QUANTIN

Pédologue de l'ORSTOM - S.S.C.-Bondy

2. ANDOSOLS EUTROPHES ET OLIGOTROPHES SUR CENDRES BASALTIQUES

2.1. Andosols eutrophes, sur cendres, lapillis et laves basaltiques datant de 1 000 à 1500 ans (basaltes très basiques, apparentés aux ankaramites (2), à Aoba.

A Aoba, d'après une datation (3) au C. 14 de sols humifères enterrés, l'âge des dernières éruptions serait compris entre 1000 et 1500 ans. La formation des sols est donc récente. Cependant le profil est bien différencié, de type A, (B), C ou A, (B) - C ; l'horizon (B) ou (B) - C est profondément rubéfié, doué d'une capacité d'échange de cations souvent élevée et toujours saturé (taux de saturation supérieur à 70 %). Les sols sont souvent polyphasés et constitués de plusieurs dépôts volcaniques. Bien qu'ils ne contiennent

apparemment qu'une faible quantité de fraction inférieure à deux microns : 4 à 22 % en A₁ et 3 à 16 % en (B) - C, ces sols sont riches en substances amorphes très siliceuses ; mais ils sont relativement pauvres en argiles bien cristallisées. Enfin, ils sont très humifères : 5 à 15 % de matière organique à rapport C/N voisin de 10. Ce sont des andosols eutrophes (1).

a Propriétés physiques (tab. 8)

La texture paraît au toucher sablo-limoneuse ou sablo-graveleuse ; à l'analyse, elle semble le plus souvent limono-sableuse. Il est probable que l'on ne parvient pas toujours à bien extraire la fraction inférieure à deux microns ; car la valeur mesurée ne rend pas bien compte des autres propriétés physiques et chimiques. La densité apparente est faible : 0,7 à 0,8 dans l'horizon A₁ ; il en résulte une forte porosité d'environ 70 % ; ce sont des sols très fortement drainés. Ils ont cependant une capacité de rétention pour l'eau (à pF = 3) relativement élevée : variant de 28 à 76 % dans l'horizon A₁ et de 16 à 57 % dans les horizons (B) et (B) - C ; ils contiennent de 10 à 15 % d'eau facilement disponible aux plantes.

(1) La première partie in *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* vol. X, n° 2, 1972, pp. 123-134.

(2) Basaltes étudiés par A.J. WARDEN, 1968.

(3) Datation effectuée en 1968 par Mme G. DELIBRIAS, au laboratoire des faibles radioactivités du CNRS à Gif-sur-Yvette, sur les échantillons de sols n° 2463 et 2468 prélevés respectivement à 3 m et 1 m de profondeur.

(1) Les andosols eutrophes correspondent pour une part aux Eutrandedpts et pour une autre aux Vitrandepts de la classification américaine (USDA, 1967).

TABLEAU 8

Propriétés physiques des andosols eutrophes d'Aoba*

Zone climatique	Très humide		Humide		Humide-sec	
	A ₁	II (B) - C	A ₁	(B) - C	A ₁	(B) - C
Horizon						
Profondeur (cm)	0 à 15	100 à 150	0 à 10-25	40 à 120	0 à 15-20	40 à 100
Couleur Munsell	10 YR 2/2	7,5 YR 3/2	5 à 10 YR 2-3/2	5 à 7,5 YR 3/2 à 4/4	7,5 à 10 YR 3/2 à 3/4	7,5 à 10 YR 3/3 à 4/4
Granulométrie %						
< 2 μ	14,1	10,6	4,3-22,1	2,4- 5,9	9 -18,8	2,8-12,6
2- 20 μ	18,1	17,8	10,7-26,8	5,2-18,4	13,3-28,1	7,1-23,8
20- 200 μ	16,7	42,8	14,7-38,8	20,5-34,8	17,1-34,8	25,6-63,3
200-2 000 μ	41,7	27,5	12,7-45,5	39,4-70,0	11,1-53,5	26,3-54,0
Matière organique	9,4	1,3	5,4-15,0	0,7- 3,1	5,8-13,8	0,4- 1,8
Eau						
H ₂ O à pF = 3 %	76,1	62,6	28,3-75,6	16,1-57,2	30,3-53,6	9,8-38,4
pF = 4,2 %	43,3	35,9	17,6-61,2	8,9-39,9	19,5-39,3	8,2-28,3
Hygroscopicité %	7,1	8,0	5,5-10,5	3,5-10,5	5,4- 9,2	1,1- 9,2
Densité-porosité						
densité apparente	0,75	—	0,77	—	—	—
porosité vol. %	71,4	—	69,3	—	—	—

* Analyses effectuées sur sol conservé humide et rapportées au poids de sol séché à 105°.

b Propriétés chimiques (tab. 9)

Les andosols eutrophes sont très humifères : 5 à 15 % de matière organique dans l'horizon A₁ et de 0,4 à 3 % dans les horizons (B) et (B) - C. Cette substance est bien humifiée : le rapport C/N varie de 8 à 12. Le pH est en général faiblement acide dans tout le profil : 5,9 à 7,4 dans le A₁ et 6,5 à 7,7 dans les (B) et (B) - C ; exceptionnellement il s'abaisse à 5,6 dans le A₁ des sols perhumides, en altitude. La valeur de la capacité d'échange de cation varie de 21 à 49 mé p. 100 g dans l'horizon A₁ et de 8 à 38 mé p. 100 g dans les horizons (B) et (B) - C ; cette valeur élevée relativement à la quantité de fraction inférieure à deux microns est caractéristique de la présence abondante d'allophane. Le taux de saturation en cations varie de 74 à 100 % dans l'horizon A₁, et de 80 à 100 % dans les horizons (B) et (B) - C. Les andosols eutrophes sont très riches en calcium, magnésium, potassium et sodium ; la teneur en potassium échangeable varie de 0,3 à 4,5 mé p. 100 g dans l'horizon A₁. Ils sont modestement pourvus en phosphore facilement assimilable (méthode Truog) : 3 à 78 ppm dans le A₁ et 1 à 55 ppm dans le (B) - C ; bien qu'ils soient riches en phosphore total : 1 600 à 3 900 ppm dans le A₁ ; ceci provient de la forte rétention du phosphore par les allophanes. L'analyse chimique totale (par attaque

à l'acide perchlorique) montre que les minéraux primaires sont incomplètement altérés : ils laissent un résidu d'attaque variant de 22 à 30 % dans l'horizon A₁ et de 3,5 à 4,6 dans le (B) - C ; les sols sont donc jeunes et exceptionnellement riches en silice dans leurs produits d'altération.

c Minéralogie de la fraction inférieure à deux microns (tab. 10 et fig. 2, 3, 4 et 5)

Dans tous les andosols eutrophes, la fraction inférieure à deux microns contient encore une part importante : de 3 à 8 % environ, de minéraux primaires (feldspaths et pyroxènes) ; il est intéressant de noter que le résidu d'attaque à l'acide perchlorique est sensiblement plus riche en silice que la roche mère ; ce qui indiquerait la présence d'un peu de silice amorphe (en l'absence constatée de quartz et de cristobalite) dont la forme n'a pu être déterminée. Une substance amorphe riche en silice semble dominer ; la valeur du rapport silice/alumine de la fraction inférieure à deux microns varie de 2,6 à 13,0, au lieu de 1 à 2 pour les substances reconnues habituellement comme allophanes. Cette substance amorphe que l'on pourrait appeler « allophane-siliceuse », est associée, outre un peu de minéraux primaires, à des quantités variables d'argiles : vermiculite, montmorillonite, interstratifiés,

TABLEAU 9

Propriétés chimiques des andosols eutrophes d'Aoba (1)

Zone climatique	Très humide		Humide		Humide-sec	
	A ₁	II (B) - C	A ₁	(B) - C	A ₁	(B) - C
Horizon	A ₁	II (B) - C	A ₁	(B) - C	A ₁	(B) - C
Profondeur (cm)	0 à 15	100 à 150	0 à 10-15	40 à 120	0 à 15-20	40 à 100
Matière organique %..	9,4	1,3	5,4 - 15,0	0,7 - 3,1	5,8 - 13,8	0,4 - 1,8
C/N	11,4	9,6	8,1 - 12,4	9,6 - 11,2	8,7 - 10,0	8,9 - 10,9
pH (eau)	5,6	6,9	5,9 - 7,4	6,5 - 7,7	6,1 - 6,9	6,7 - 7,6
Eléments échangeables						
Ca mé p. 100 g ...	10,53	8,60	10,4 - 36,7	8,4 - 19,6	13,6 - 33,1	4,0 - 22,8
Mg — — — ...	2,74	3,76	4,2 - 10,5	3,0 - 11,0	4,4 - 12,5	2,2 - 10,1
K — — — ...	0,32	1,27	0,3 - 2,0	0,5 - 3,9	1,0 - 4,5	0,2 - 3,2
Na — — — ...	0,21	0,29	0,15- 1,3	0,17- 0,84	0,18- 0,33	0,20- 0,56
CEC — — — ...	21,4	18,2	25,0 - 44,6	13,8 - 37,5	22,7 - 48,8	7,8 - 36,2
Taux de saturation %.	64,5	76,6	74 - 100	80 - 100	85 - 100	90 - 100
Phosphore assimilable (Truog) p.p.m.	12	1	3 - 78	1 - 20	18 - 25 (580)	(55)
total (HClO ₄) ‰ ..	3,9	0,8	2,1 - 5,0	0,4 - 3,3	1,6 - 3,7	0,8 - 1,3
Analyse totale (HClO ₄)	Sol < 2 μ	Sol < 2 μ	Sol < 2 μ	Sol < 2 μ	Sol < 2 μ	Sol < 2 μ
perte au feu %	22,7	30,8	13,3- 30,7	21,4-24,2	6,3- 22,0	27,5-29,0
résidu %	27,2	*4,8	21,6- 29,7	*6,4- 8,4	8,4- 38,0	*3,3- 5,0
SiO ₂ %	21,6	23,4	22,7- 28,5	33,8-51,0	26,0- 33,1	31,0-36,4
Al ₂ O ₃ %	10,0	10,7	8,0- 10,3	6,7- 9,2	10,2- 15,4	11,6-15,3
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,7	3,7	4,3- 5,4	6,2-13,0	3,6- 4,6	3,4- 5,3
Fe ₂ O ₃ %	9,9	25,3	7,8- 9,9	11,0-16,9	8,1- 12,4	15,7-17,7
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ ...	2,3	1,5	2,5- 3,3	2,9- 6,3	2,4- 3,0	2,0- 2,7
Ca mé p. 100 g ..	56,7	7,8	58,1	3,6	63 -115	18 -29
Mg**	298,6	190,4	391,8	29,8	208 -360	69 -85
K — — — ...	2,5	1,3	1,9	0,6	2,3- 6,6	1,3- 1,7
Na — — — ...	8,4	2,6	8,4	1,9	8,7- 24,8	2,6- 1,6
Extractions d'amorphes (SEGALIN) (2)						
SiO ₂ %	—	9,9	3,8	—	9,5-10,1	—
Al ₂ O ₃ %	—	6,9	2,85	—	7,3- 4,2	—
Fe ₂ O ₃ %	—	6,8	3,0	—	7,0- 4,3	—
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	—	2,45	2,26	—	2,2- 4,0	—

(1) Analyses effectuées sur sol séché-air et rapportées au poids de sol séché-air.

(2) Résultats d'amorphes rapportés au poids de sol séché à 105°.

N.B. — (580), (55) résultats exceptionnels du phosphore assimilable sur horizon C de lave altérée.

* Résidus de la fraction < 2 μ importants (3,3 à 8,4 %) et très siliceux contenant de 2,05 à 4,49 % de SiO₂, soit de 48,4 à 66,2 % du poids de résidu. La roche mère ne contenant que 46 à 49 % de SiO₂, il y a eu enrichissement en SiO₂ sous une forme non cristallisée (pas de quartz, ni de cristobalite).

** Les sols issus de roches très basiques sont riches en magnésium ; les argiles en contiennent un peu dans leurs réseaux.

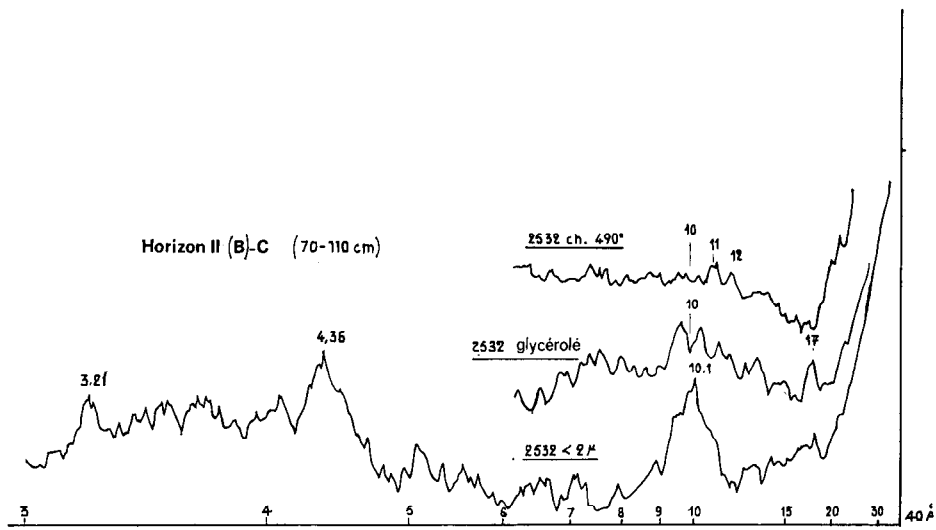


FIG. 2. — Diagramme de diffraction de rayons X (Cu). Andosol eutrophe sur cendres et tufs basaltiques d'Aoba (climat humide) (sol dispersé par ultra-sons).

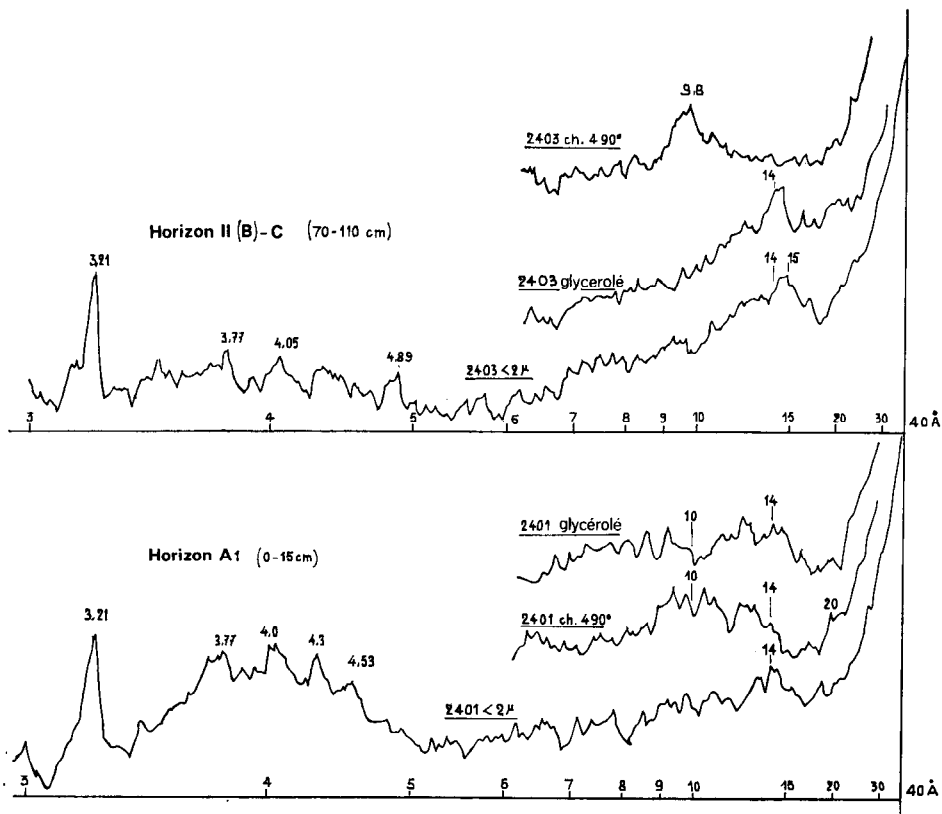


FIG. 3. — Diagramme de diffraction de rayons X (Cu). Andosol eutrophe sur cendres basaltiques d'Aoba (climat humide) (sol traité par méthode SEGALIN et dispersé par ultra-sons).

TABLEAU 10

Minéralogie de la fraction inférieure à deux microns, des andosols eutrophes d'Aoba*

1. ZONE CLIMATIQUE TRÈS HUMIDE ET PERHUMIDE

a) *Sommet*, vers 1 250 m, profil n° 256 :*horizon A₁* (échantillon 2561)

— beaucoup d'allophane ; traces d'argiles (probablement halloysite)

horizon II (B) - C (échantillon 2563)

— beaucoup d'argiles : montmorillonite et halloysite ; un peu d'allophane

— beaucoup de minéraux primaires : feldspaths plagioclases et pyroxènes.

b) *Transition*, vers 450 m, profil n° 244 :*horizon A₁* (échantillon 2441)

— beaucoup d'allophane ; un peu de vermiculite

— un peu de feldspaths plagioclases

horizon (B) - C (échantillons 2442 et 2443)

— beaucoup d'allophane ; un peu d'argiles Interstratifiées (M - C ?) ; traces d'halloysite

— un peu de minéraux primaires : feldspaths plagioclases et pyroxènes.

2. ZONE CLIMATIQUE HUMIDE

a) *Sols sur cendres* (Sud-Est), profils n°s 238, 243, 245, 246 :*horizons de surface A₁ et A - (B)*

— beaucoup d'allophane ; un peu de vermiculite et traces d'argiles Interstratifiées ; parfois un peu d'halloysite

— un peu de minéraux primaires : feldspaths plagioclases et pyroxènes

horizons de profondeur (B) - C

— beaucoup d'allophane ; un peu de vermiculite et traces d'argiles Interstratifiées ; parfois des traces d'halloysite ou d'illite.

— beaucoup de minéraux primaires : feldspaths plagioclases et pyroxènes

sols enterrés, profil n° 246 :*horizons II C, IV A, V A - (B)*

— un peu d'allophane ; beaucoup de montmorillonite ; traces d'argiles Interstratifiées (M - C), d'halloysite et de talc ; un peu de feldspaths plagioclases et pyroxènes

horizons V C, VI C, VII A

— allophane ; un peu d'halloysite et de montmorillonite ou d'interstratifié (M - C) ; quantité variable de minéraux primaires (feldspaths et pyroxènes).

b) *Sols sur tufs* (Sud), profil n° 253 :*horizons de profondeur II (B) - C*

— beaucoup d'halloysite ; un peu d'allophane et de montmorillonite

— traces de feldspaths plagioclases

tufs récent (lahar), en surface : présence nette de montmorillonite (et traces d'interstratifié M - C) ; beaucoup de minéraux primaires : feldspaths et pyroxènes.

3. ZONE CLIMATIQUE HUMIDE-SÈCHE, profils n°s 247, 248, 249 et 250 :

a) *Horizons de surface A₁, A - (B), (B) - C*

— un peu d'allophane ; beaucoup de montmorillonite ou d'argiles Interstratifiées (M - C) ; parfois des traces de talc, ou d'halloysite déshydratée en métahalloysite

— souvent un peu de minéraux primaires : feldspaths plagioclases et pyroxènes.

b) *Sols enterrés* : mélange d'allophane, montmorillonite (et, ou interstratifié M - C), halloysite, feldspaths et pyroxènes.c) *Basalte altéré* : présence abondante de montmorillonite-ferrière ; traces d'halloysite-métahalloysite ; beaucoup de feldspaths plagioclases et un peu de pyroxènes et d'olivine.

* Minéralogie obtenue principalement au laboratoire de Sédimentologie et Géochimie de la Surface à Strasbourg par diffraction de rayons X par G. JEHL et G. SIEFFERMANN, et en partie au laboratoire du CSIRO à Adélaïde par J. PICKERING (éch. 2432, 2453 et 2563).

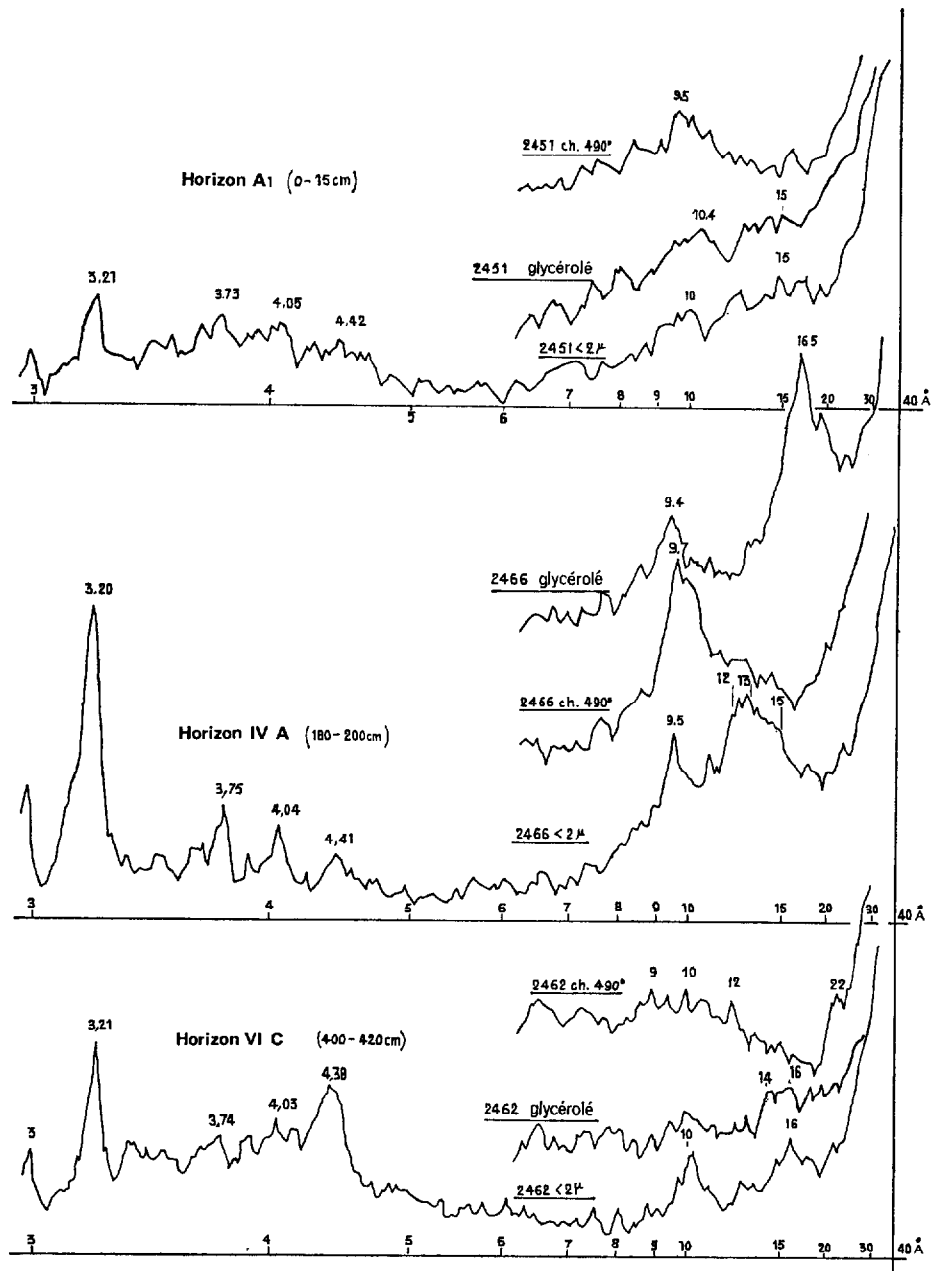


FIG. 4. — Diagramme de diffraction de rayons X (Cu).
Andosol eutrophe sur cendres basaltiques d'Aoba (climat de transition humide-sec).
Comparaison d'un sol récent et de sols enterrés (sol traité par méthode SEGALIN et ultra-sons).

halloysite, métahalloysite ; ces quantités varient de traces à de fortes teneurs.

d Fertilité

Les andosols eutrophes sont considérés comme très fertiles. En effet ils se drainent bien et retiennent cependant fortement l'eau et les éléments fertilisants. Il ne semble pas qu'il y ait déficience en phosphore

malgré la rétention de cet élément par les allophanes ; ce phénomène serait moins énergique avec les allophanes-siliceuses des andosols eutrophes qu'avec les allophanes-alumineuses des andosols oligotrophes étudiés plus loin. Les andosols eutrophes supportent très bien des cultures pérennes ; mais ils peuvent cependant s'épuiser rapidement en culture annuelle trop intensive et couvrant mal le sol, sans doute du fait

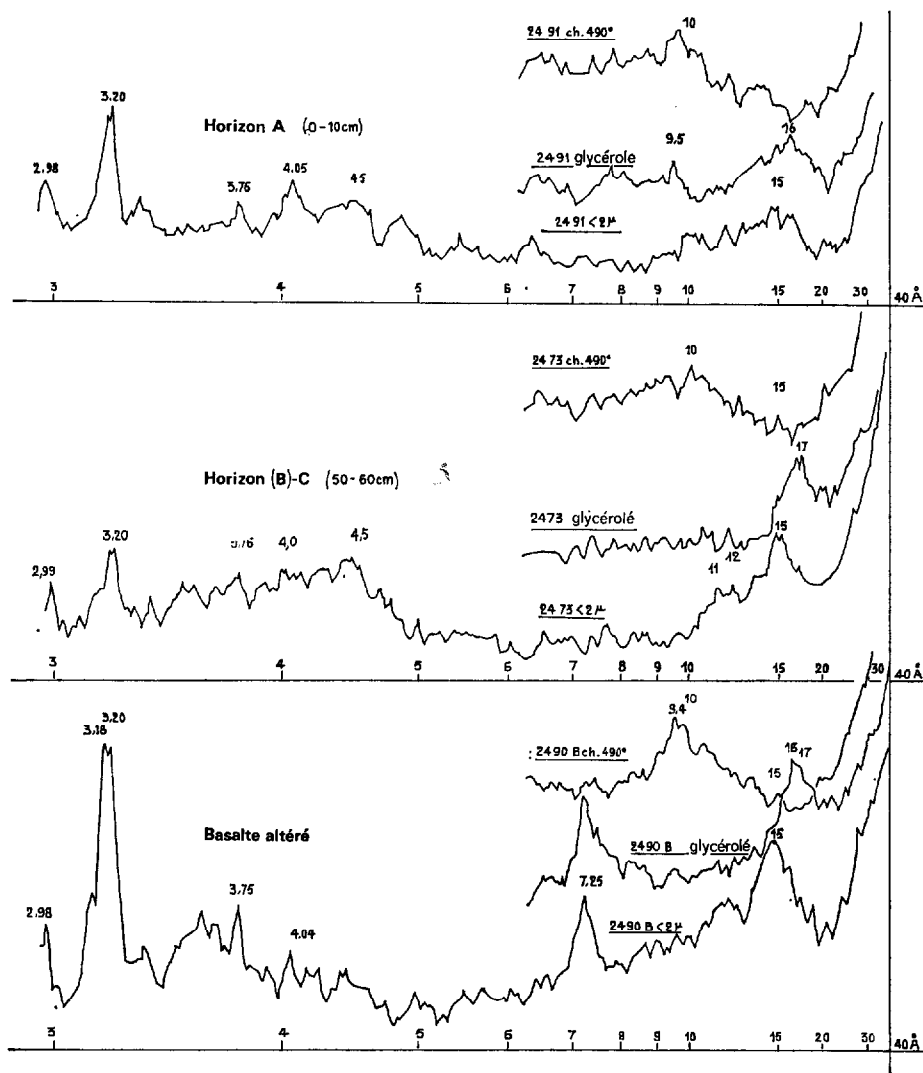


FIG. 5. — Diagramme de diffraction de rayons X (Cu). Andosol eutrophe sur cendres et laves basaltiques d'Aoba (climat alterné humide-sec) (sol traité par H_2O_2 et ultra-sons).

d'une lixiviation trop intense ; il peut être facilement remédié à ce danger.

e Aperçus sur la pédogenèse

L'analyse minéralogique et chimique des andosols eutrophes fait ressortir trois données importantes :

1. *Rapidité de l'altération.* Dans la partie supérieure des sols peu évolués sur cendres basaltiques d'Ambrym, datant seulement de quelques dizaines d'années, il n'est pas possible d'extraire plus d'un à quelques pour cent de fraction inférieure à deux microns ; les cendres paraissent presque totalement inaltérées ; la fraction inférieure à deux microns ne contient pas d'argiles ou exceptionnellement des traces à peine perceptibles. Les andosols eutrophes sur cendres basaltiques d'Aoba, datant d'environ 1000 à 1500 ans, sont déjà profondément altérés : à l'attaque par l'acide perchlorique ils ne laissent qu'environ 25 % de résidu insoluble ; il est possible d'extraire de 9 à 24 % de substances amorphes par la méthode Segalen, et de 4 à 22 % de fractions inférieure à deux microns par dispersion acide ou alcaline. Cette fraction contient toujours un peu et parfois beaucoup de minéraux argileux. Un millier d'années suffit donc en milieu tropical très humide pour la formation d'un sol bien différencié et profondément évolué contenant des minéraux argileux, dont principalement : vermiculite, montmorillonite et halloysite.

2. *Influence de la durée d'altération sur la nature des minéraux argileux.* En observant la répartition des minéraux argileux dans un profil polyphasé, composé de 7 sols superposés, sur une profondeur de 5 m, on constate :

— en surface, dans le sol le plus récent, datant au plus de mille ans, la fraction inférieure à deux microns est constituée essentiellement de beaucoup d'allophanes-siliceuses et d'un peu de vermiculite (ou d'interstratifiés) ; il s'y ajoute parfois des traces d'illite ou d'halloysite.

— à mi-profondeur, dans des sols datant d'environ 1500 ans, la montmorillonite est devenue abondante ; il demeure de l'allophane ; parfois apparaît un peu d'halloysite.

— en bas du profil, dans des sols un peu plus anciens que 1500 ans, l'halloysite est le minéral argileux le plus abondant ; elle est encore associée à un peu d'allophane et de montmorillonite.

3. *Influence de la répartition de la pluviométrie sur la nature des minéraux argileux.* Il est intéressant d'observer la répartition des minéraux argileux dans la

partie supérieure des profils en fonction de la répartition de la pluviométrie :

— En climat perhumide : il y a beaucoup d'allophane, des traces seulement d'halloysite et d'interstratifiés et très peu de minéraux primaires. Il est à noter que les argiles : halloysite et montmorillonite, sont abondantes à la base du profil, d'âge plus ancien.

— En climat humide, subissant de courtes périodes de dessiccation : l'allophane est encore abondante ; mais apparaissent des quantités importantes de vermiculite ; il s'y ajoute des traces d'interstratifiés et un peu de minéraux primaires, parfois seulement un peu d'halloysite. Il est remarquable que l'halloysite est abondante à la base du profil dans les sols plus anciens.

— En climat « alterné », avec longues périodes de dessiccation : l'allophane paraît être peu importante, car la montmorillonite est abondante ; il s'y ajoute encore un peu d'interstratifiés, de minéraux primaires et parfois d'halloysite partiellement déshydratée en métahalloysite. Il faut noter que la montmorillonite persiste en profondeur dans les sols plus anciens, mais aussi que l'halloysite y augmente sensiblement.

En conclusion, il est remarquable que : dans les régions perhumides l'allophane domine dans le haut des profils ; dans les régions humides la vermiculite est importante dans le haut des profils et l'halloysite à leur base ; dans les régions à climat alterné, la montmorillonite est abondante dans tout le profil.

2.2. Andosols oligotrophes, sur cendres, tufs et laves basaltiques (labradorites et basaltes), datant de quelques milliers d'années, aux Iles Banks

Aux îles Banks, le volcanisme est récent : dans l'île Santa Maria un petit cône volcanique est encore actif, mais très faiblement et très rarement ; les sols contiennent, toujours plus de minéraux primaires en haut du profil qu'en profondeur ; d'après leur degré d'altération, situé entre les andosols eutrophes d'Aoba et les sols bruns eutrophes andiques de Tongoa, la majeure partie de leur matériau originel daterait tout au plus de quelques milliers d'années seulement. D'autre part, le climat des îles Banks est si pluvieux : pluviométrie minimum de 4 000 mm au niveau de la mer, que la majeure partie des sols sont fortement désaturés en cations et oligotrophes.

Les sols ont un profil bien différencié : A (B), C ou A, (B) - C ; ils sont souvent polyphasés. Ils sont tous

désaturés en cations : (moins de 50 % dans l'horizon (B) et très humifères : 11 à 41 % de matière organique à C/N = 8 à 13 dans l'horizon A₁. Ils ont une très faible densité apparente : 0,3 à 0,5. Enfin, ils sont tous fortement hydratés : en général plus de 100 % d'eau dans tout le profil.

Il a été distingué deux groupes suivant le degré de saturation en cations, leur répartition correspondant en même temps à deux zones climatiques :

— Les andosols moyennement désaturés (1) ont un taux de saturation en cations dans l'horizon (B) compris entre 20 et 50 % ; ils subissent de faibles déshydratations temporaires dans la partie supérieure du profil ; ils contiennent en plus d'allophanes une quantité importante d'argiles, halloysite surtout, dans l'un de leurs horizons.

— Les andosols fortement désaturés (2), ont un taux de saturation en cations dans l'horizon (B) inférieur à 20 %, souvent voisin de 10 %, et malgré cela une valeur de pH modérément acide, entre 5,5 et 6,5 ; ils ne subissent pas de déshydratation temporaire, même en surface, et demeurent « perhydratés » ; leur capacité de rétention pour l'eau est très élevée : elle varie de 80 à 285 % dans l'horizon (B) ; ils sont très riches en allophane, souvent riches en gibbsite, et ils ne contiennent que peu d'argiles : principalement halloysite et kaolinite.

2.2.1. ANDOSOLS MOYENNEMENT DÉSATURÉS

Ce sont des sols bien différenciés à profil A, (B), C, polyphasés (2 à 3 sols superposés), très humifères : contenant de 11 à 20 % de matière organique bien humifiée (C/N voisin de 10) dans l'horizon A₁ et de 1 à 3 % à plus d'un mètre de profondeur, dont le matériau originel a été assez profondément altéré et rubéfié : couleur 5 YR 3/3 à 4/4 dans le (B) ; ils contiennent au moins de 35 à 70 % d'éléments fins (0 à 20 μ) dans tout le profil ; l'attaque à l'acide perchlorique laisse un résidu souvent assez faible : 8 à 45 % dans l'horizon A₁ rajeuni, et, seulement 2 à 12 % dans l'horizon II (B), le plus ancien et le plus altéré.

(1) Les andosols moyennement désaturés, correspondent aux Entic et Typic Dystrandepts de la classification américaine (USDA, 1967).

(2) Les andosols fortement désaturés, correspondent aux Hydrandepts et Oxic Dystrandepts de la classification américaine (USDA, 1967).

a Propriétés physiques (tab. 11)

La texture paraît limoneuse au toucher ; le sol est fortement hydraté ; cependant il n'adhère que faiblement aux doigts. A l'analyse par dispersion acide ou basique, la texture se révèle argilo-limono-sableuse en haut du profil et argilo-limoneuse en profondeur : la teneur en fraction inférieure à deux microns, du moins celle que l'on a pu disperser avec beaucoup de difficultés, varie de 17 à 28 % dans l'horizon A₁, de 24 à 43 % dans le (B) et de 28 à 35 % dans le II (B).

TABLEAU 11

Propriétés physiques des andosols oligotrophes moyennement désaturés en (B), des îles Banks

Horizon	A ₁	(B)	II (B)
Profondeur en cm	0 à 10-20	40 à 70-110	70-110 à 180
Couleur Munsell ..	5 YR 3/2-4	5 YR 3-4/4	5 YR 3-4/4
Granulométrie * %			
< 2 μ	16,8 - 27,9	24,4 - 42,7	27,9-35,4
2 - 20 μ	18,5 - 32,5	20,3 - 29,4	24,6-32,1
20 - 200 μ	18,2 - 46,4	25,0 - 42,0	24,7-29,6
200 - 2 000 μ	5,5 - 14,7	1,9 - 11,4	9,0-12,4
Matière organique	11,5 - 19,9	1,1 - 4,2	1,3- 2,8
Eau			
H ₂ O à pF = 3 * %	79,9 - 118,2	100,4 - 128,3	78,6-109,0
à pF = 4,2 * %	39,8 - 89,0	68,1 - 99,2	57,9-65,5
Hygroscopicité %	8,1 - 24,4	16,7 - 34,7	18,1-18,6
Densité-porosité			
Densité apparente	0,39- 0,47	0,33- 0,42	—
Porosité vol. %	79,9 - 82,3	83,8 - 87,2	—

* Déterminé sur sol conservé humide; rapporté au poids de sol séché à 105°.

Il est intéressant de remarquer que l'extraction de substances « amorphes » par la méthode Segalen dans le profil n° 231 a fourni des quantités : 33 à 40 % ; légèrement supérieures à celles obtenues par dispersion pour la fraction inférieure à deux microns : 28 à 32 % ; ce qui indique la présence rémanente de substances secondaires dans les fractions plus grossières, notamment celles des limons. La densité apparente est très faible : elle varie de 0,4 à 0,5 dans l'horizon A₁ et de 0,3 à 0,4 dans le haut de l'horizon (B) ; il en résulte une très forte porosité (surtout microporo-

sité) variant de 80 à 87 %. Ce sont des sols bien drainés. La capacité de rétention pour l'eau (à $pF = 3$) est élevée : elle varie de 80 à 118 % dans l'horizon A_1 , de 100 à 128 % dans le (B) et de 80 à 110 % dans le II (B) ; les sols contiennent généralement près de 100 % d'eau dans l'ensemble du profil, dont 30 à 40 % sont facilement disponibles aux plantes.

b Propriétés chimiques (tab. 12)

Les andosols moyennement désaturés sont très humifères : leur contenu en matière organique varie de 11 à 20 % dans l'horizon A_1 , de 1 à 4 % dans le

(B) et de 1 à 3 % dans le II (B) ; cette substance est caractérisée, par une basse valeur du rapport C/N, oscillant de 8 à 13 dans l'horizon A_1 , de 8 à 11 dans l'horizon (B) et se stabilisant vers 9 dans l'horizon II (B). Le pH est moyennement acide dans l'horizon A_1 ; (5,2 - 6,3), faiblement acide dans le (B) (6,4 - 7,0) et à nouveau modérément acide dans le II (B) (5,6 - 6,5) ; ceci, malgré un taux de saturation en cations assez faible dans ces horizons (B), caractérise les sols riches en allophane. Les valeurs de capacité d'échange de cations sont relativement élevées, en regard des teneurs mesurées en fraction inférieure à deux microns : elles varient de 21 à 62 mé p. 100 g

TABLEAU 12

Propriétés chimiques des andosols oligotrophes moyennement désaturés en (B), des îles Banks (1)

Horizon	A_1		(B)		II (B)	
Profondeur (cm)	0 à 10-20		40 à 70-110		70-110 à 180	
Matière organique %	11,5 -19,9		1,1 - 4,2		1,3 - 2,8	
C/N	7,6 -12,6		8,1 -11,1		9,1 - 9,3	
pH (eau)	5,2 - 6,3		6,4 - 7,0		5,6 - 6,5	
Éléments échangeables						
Ca mé p. 100 g	4,3 -34,9		1,5 - 9,2		2,0 - 4,1	
Mg — —	1,7 -10,1		0,6 - 6,8		0,8 - 3,9	
K — —	0,21- 1,06		0,05- 0,58		0,32- 1,10	
Na — —	0,13- 0,49		0,04- 0,33		0,12- 0,53	
CEC (2) — —	21,5 -61,8		11,3 -38,6		15,7 -16,8	
Taux de saturation %	48,9 -71,3		26,8 -42,7		24,1 -57,5	
Phosphore						
assimilable (Truog) p.p.m.	0 - 2		0 - 1		0 - 8	
total ($HClO_4$) ‰	0,8 - 8,4		0,5 - 5,8		1,6 - 4,2	
Analyse totale ($HClO_4$)	Sol		Sol		Sol	
perte au feu %	< 2 μ		< 2 μ		< 2 μ	
résidu %	24,5 -46,4	28,9-38,0	25,2-32,5	31,6-38,5	28,8-35,2	23,2-32,0
SiO_2 %	8,5 -44,9	0,5- 4,8	14,5-29,8	0,9- 2,2	2,4-12,5	0,7- 7,2
Al_2O_3 %	14,2 -21,4	18,6-23,5	19,0-20,0	21,4-25,0	12,6-17,7	12,7-20,9
SiO_2/Al_2O_3	7,2 -25,8	20,7-30,7	15,7-20,0	22,1-27,2	23,4-31,8	20,7-23,1
Fe_2O_3 %	1,4 - 3,9	1,2- 1,9	1,6- 2,1	1,4- 1,9	0,7- 1,3	0,9- 1,7
$SiO_2/Al_2O_3+Fe_2O_3$	5,5 -14,1	11,7-16,6	9,1-11,8	11,0-13,2	14,6-16,8	23,6-29,3
Ca mé p. 100 g	1,0 - 2,6	0,8- 1,3	1,2- 1,5	0,9- 1,3	0,5- 0,9	0,7- 1,0
Mg — —	5,0 -59,2	0,0-54,9	6,1-28,5	2,1-54,9	3,9-11,4	0,4- 2,5
K — —	19,3 -55,1	6,9-29,8	11,0-62,5	0,0-21,3	13,9-33,7	9,9-16,9
Na — —	0,64- 1,7	0,2- 1,5	0,4- 1,7	0,0- 2,0	0,8- 1,1	0,6- —
Na — —	1,94- 8,39	0,3-29,0	1,6- 3,9	0,9-40,3	1,0- 1,9	1,6-75,8
Extraits d'amorphes (SEGALEN) (3)	n° 2311		n° 2312		n° 2313	
SiO_2 (%)	5,70		9,7 -10,3		8,8 - 9,6	
Al_2O_3	14,25		24,4 -26,5		8,9? -19,5	
Fe_2O_3	12,75		16,8		18,8	
SiO_2/Al_2O_3	0,68		0,68- 0,66		1,68? - 0,84	

- (1) Analyses sur sol séché-air et rapportées au poids de sol séché-air.
- (2) CEC déterminé par NH_4 - acétate à $pH = 7$, sur sol séché à l'air.
- (3) Résultats d'amorphes en poids de sol séché à 105° .

dans l'horizon A₁, de 11 à 39 mé p. 100 g dans l'horizon (B) et de 15 à 17 mé p. 100 g dans l'horizon II (B). Le taux de saturation en cations échangeables est modéré en surface, faible en profondeur : il oscille de 49 à 71 % dans l'horizon humifère, de 27 à 43 % dans le (B) et de 24 à 57 % dans le II (B). Malgré cela, en raison des fortes capacités d'échange de cation, les sols sont assez riches en calcium, magnésium et même en potassium dont les teneurs varient de 0,2 à 1 mé p. 100 g dans le A₁ et encore de 0,3 à 1,1 mé p. 100 g dans le II (B). Par contre les quantités de phosphore facilement assimilables (méthode Truog) paraissent très faibles (0-2 ppm) en regard des quantités de phosphore total qui sont assez élevées ; car la rétention du phosphore par les allophanes est très forte. L'analyse chimique totale (par attaque à l'acide perchlorique) montre que si la partie supérieure des sols est parfois encore riche en résidu insoluble et en silice, par suite d'un rajeunissement récent, par contre en profondeur les sols sont relativement enrichis en hydroxydes d'alumine et de fer. Le rapport silice/alumine du sol total varie de 1,4 à 3,9 dans l'horizon A₁ et de 1,4 à 2,0 dans les horizons (B). Il est remarquable que les sols contiennent encore des quantités appréciables de calcium, de magnésium et même de potassium

c Minéralogie de la fraction inférieure à deux microns (tab. 13, fig. 6)

La fraction inférieure à deux microns des andosols moyennement désaturés des îles Banks, en comparaison avec celle des andosols eutrophes d'Aoba, ne contient fréquemment plus de minéraux primaires : feldspaths et pyroxènes, ou seulement des traces ; on n'en trouve plus des quantités importantes (5 à 7 %) qu'exceptionnellement dans les sols rajeunis. Le rapport silice/alumine est toujours inférieur à 2 : il varie de 1,2 à 1,9 dans l'horizon A₁, de 1,6 à 2,0 dans le (B) et de 1,4 à 1,9 dans le II (B). Les allophanes et la gibbsite dominent dans l'ensemble des profils profonds des sols de plateau formés sur des cendres ; il y a toujours un peu d'halloysite ; mais elle est peu abondante et partiellement déshydratée en métahalloysite dans la partie supérieure du profil ; par contre elle est un peu plus abondante et typiquement hydratée dans les horizons (B). Il est intéressant de noter l'importante quantité de cristobalite dans le haut du profil (très fréquente dans les andosols oligotrophes), et l'apparition d'un peu de goethite à la base du profil. Dans un sol de versant formé sur cendres et laves, peu profond, l'abondance des argiles : halloysite et métahalloysite, par

TABLEAU 13

Minéralogie de la fractions inférieure à deux microns des andosols moyennement désaturés des îles Banks*

- | |
|---|
| <p>1. SOL DE PLATEAU SUR CENDRES BASALTIQUES</p> <p>a) <i>Horizon A₁</i> (éch. 2341)
— beaucoup d'allophane ; un peu d'halloysite, métahalloysite ; beaucoup de gibbsite et de cristobalite</p> <p>b) <i>Horizon (B)</i> (éch. 2342)
— beaucoup d'allophane ; un peu d'halloysite, de gibbsite et de goethite ; traces de feldspaths et pyroxènes.</p> <p>c) <i>Horizon II (B)</i> (éch. 2313)
— beaucoup d'allophane et de gibbsite ; un peu d'halloysite et de goethite.</p> <p>2. SOL DE VERSANT SUR CENDRES ET TUF BASALTIQUES</p> <p>a) <i>Horizons A₁ et (B) - 4</i> (éch. 4621 et 4622)
— beaucoup d'allophane ; un peu de gibbsite et de minéraux primaires (feldspaths et pyroxènes).</p> <p>b) <i>Horizon II (B)</i> (éch. 4624)
— beaucoup d'allophane et de gibbsite ; un peu d'halloysite, de feldspaths et de pyroxènes.</p> <p>3. SOL DE VERSANT SUR LAVES BASALTIQUES ET CENDRES</p> <p>a) <i>Horizon A₁</i> (éch. 2321)
— beaucoup d'halloysite, métahalloysite et de cristobalite ; un peu d'allophane et de gibbsite.</p> <p>b) <i>Horizon C</i> (éch. 2323)
— beaucoup d'halloysite-métahalloysite ; un peu d'allophane et de goethite ; traces de gibbsite.</p> |
|---|

* Minéralogie obtenue principalement par le laboratoire de Sédimentologie et Géochimie de la Surface, à Strasbourg par diffraction de rayons X par G. JEHL et G. SIEFFERMANN ; et en partie au laboratoire du CSIRO à Adélaïde par J. PICKERING (éch. 2313 et 2342).

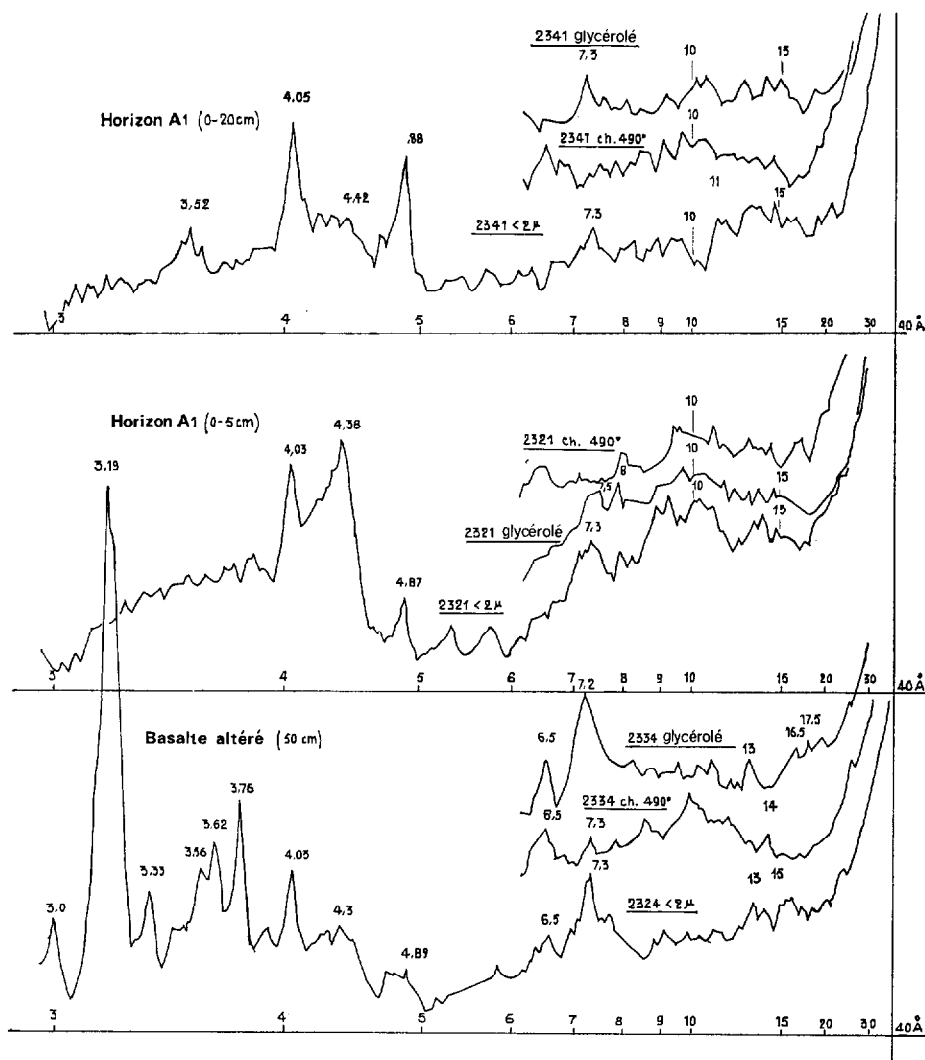


FIG. 6. — Diagramme de diffraction de rayons X (Cu). Andosol oligotrophe moyennement désaturé sur cendres et laves basaltiques (sol traité par méthode SEGALIN et ultra-sons).

rapport aux allophanes et à la gibbsite est remarquable ; on l'observe aussi dans le cortex d'altération des laves : l'altération produirait relativement plus d'argiles cristallisées dans les laves que dans les cendres ; ici encore, on a remarqué l'abondance de la cristobalite dans l'horizon humifère.

d Fertilité

Les andosols moyennement désaturés sur cendres basaltiques ont un niveau de fertilité assez élevé ; les

plantes cultivées ne manifestent pas de signes de carence ou de déficience, malgré la forte rétention du phosphore par les allophanes : ils retiennent bien l'eau et sont en même temps bien drainés ; ils sont riches en azote, calcium et magnésium, assez riches en potassium échangeable et en réserve de phosphore ; l'apparente déficience en phosphore facilement assimilable est peut être compensée par l'aptitude des plantes à prélever d'autres formes de phosphore liées aux allophanes ou aux minéraux primaires en cours d'altération ; la fertilisation phosphatée n'a pas été expé-

mentée sur ces sols aux Nouvelles-Hébrides mais elle pourrait probablement améliorer les rendements. Etant donné leurs caractéristiques physico-chimiques, un appauvrissement rapide des sols par lixiviation n'est pas à craindre et n'a pas été constaté.

2.2.2. ANDOSOLS FORTEMENT DÉSATURÉS

Ce sont des sols bien différenciés, à profil (A, (B), C), polyphasés (2 à 3 sols superposés), extrêmement humifères (11 à 41 % de matière organique en A₁ ; 2 à 10 % en (B) et 1 à 3 % en II (B), et dont le matériau originel a été profondément altéré et rubéfié (couleur 7,5 à 5 YR-3/4 à 4/4) : ils contiennent au moins de 20 à 40 % d'éléments fins (0-20 μ) dans tout le profil ; le résidu d'attaque à l'acide perchlorique varie de 8 à 51 % dans l'horizon humifère supérieur, et de 20 à 32 % dans l'horizon II (B) le plus profond ; sans doute certains de ces sols, proches de foyers éruptifs très récents, ont ils été fortement rajeunis.

a Propriétés physiques (tab. 14)

Le sol n'adhère que très faiblement aux doigts et semble très hydraté, la texture paraît au toucher limo-

TABLEAU 14

Propriétés physiques des andosols oligotrophes fortement désaturés en (B), des îles Banks

Horizon	A ₁	(B)	II (B)
Profondeur en cm	0 à 10-20	40 à 70-110	70-110 à 180
Couleur Munsell..	5 YR 3/2-4 10-7,5 YR 3/2	5-7,5 YR 3-4/4	5-7,5 YR 4/4
Granulométrie %			
< 2 μ	15,2 - 23,9	10,0 - 26,9	12,3- 14,0
2 - 20 μ	10,6 - 14,8	9,2 - 11,1	9,8- 12,3
20 - 200 μ	24,0 - 50,2	44,9 - 67,0	56,6- 64,7
200 - 2 000 μ	0,9 - 8,6	3,9 - 26,8	8,2- 17,7
Matière organique	11,1 - 41,2	1,7 - 10,1	1,2- 3,2
Eau			
H ₂ O à pF = 3 *	88,9 -236,5	90,7 -285,4	87,5-168,0
pF = 4,2 *	48,4 -173,9	55,7 -238,4	57,0-114,0
Hygroscopicité %	6,5 - 38,7	9,1 - 31,6	17,4- 18,0
Densité-porosité			
Densité apparente	0,30	0,29	—
Porosité vol. %	87,8	86,9	—

* Déterminé sur sol conservé humide et rapporté au poids de sol séché à 105°.

neuse dans les sols plus « évolués », ou limono-sableuse dans les moins évolués ; à l'analyse elle varie d'argilo-limono-sableuse à sablo-limoneuse. La fraction inférieure à deux microns que l'on a pu obtenir (difficilement) par dispersion, oscille de 15 à 24 % dans l'horizon A₁, de 10 à 27 % dans le (B) et de 12 à 14 % dans le II (B) ; cette valeur est probablement bien inférieure à la réalité : la dispersion a été obtenue le plus souvent en milieu acide (pH = 2 - 3), mais imparfaitement. La densité apparente est très faible : 0,3 dans l'horizon A₁ et le haut de l'horizon (B) ; il en résulte une très forte porosité (principalement microporosité) d'environ 85 à 90 % dans tout le profil. La capacité de rétention pour l'eau (à pF = 3) est extrêmement élevée : elle varie de 89 à 236 % dans l'horizon A₁, de 91 à 285 % dans le (B) et de 87 à 168 % dans le II (B) ; le plus souvent elle est bien supérieure à 100 % dans tout le profil ; les sols contiennent de 30 à plus de 100 % d'eau facilement disponible aux plantes.

b Propriétés chimiques (tab. 15)

Les andosols fortement désaturés sont très humifères : la quantité de matière organique varie de 11 à 41 % dans l'horizon humifère, de 2 à 10 % dans l'horizon (B) et de 1 à 3 % dans le II (B) ; cette substance est caractérisée le plus souvent par une basse valeur du rapport C/N oscillant de 10 à 13 dans le A₁, de 7 à 13 dans le (B) et de 11 à 12 dans le II (B) ; exceptionnellement, sur les sommets très « ennuagés », une valeur de 17 a été constatée dans l'horizon A₁ et le haut du (B). Le pH est fortement acide : 4,5 à 5,1 dans l'horizon humifère ; mais il remonte sensiblement dans l'horizon (B) : de 5,3 à 6,0, et dans l'horizon II (B) : de 5,9 à 6,1, malgré un très faible taux de saturation en cations ; cette propriété caractérise les sols très riches en allophanes. La valeur de la capacité d'échange de cations est de 19 à 55 mé p. 100 g dans l'horizon A₁, 8 à 25 mé p. 100 g dans le (B) et d'environ 17 mé p. 100 g dans le II (B). Les taux de saturation en cations sont extrêmement faibles : 6 à 20 % dans le A₁, 2 à 11 % dans le (B) et 5 à 8 % dans le II (B). Dans l'horizon A₁ en raison de la forte capacité d'échange due à la matière organique, les sols sont encore moyennement à médiocrement riches en cations échangeables, y compris le potassium dont les teneurs varient de 0,3 à 0,6 mé p. 100 g ; par contre, dans les horizons (B) les teneurs en cations échangeables sont très faibles ; ce qui indique une lixiviation très poussée. Les quantités de phosphore facilement assimilable (méthode Truog) sont nulles dans tout le profil ; car il y a une forte rétention du phosphore par l'allophane. Les teneurs en phosphore total sont moyennes à mé-

TABLEAU 15

Propriétés chimiques des andosols oligotrophes fortement désaturés en (B), des îles Banks (1)

Horizon	A ₁		(B)		II (B)	
Profondeur (cm)	0 à 10-20		40 à 70-110		70-110 à 180	
Matière organique %	11,1 -41,2		1,7 -10,1		1,2 - 3,2	
C/N	10,0 -12,7		6,9 -12,5		11,2 -12,0	
pH (eau)	4,5 - 5,1		5,3 - 6,0		5,9 - 6,1	
Éléments échangeables						
Ca mé p. 100 g	0,44- 2,45		0,13- 0,94		0,53- 0,84	
Mg — —	0,84- 2,75		0,08- 0,72		0,02- 0,60	
K — —	0,33- 0,65		0,03- 0,05		0,03- 0,06	
Na — —	0,17- 0,50		0,04- 0,11		0,05- 0,06	
CEC (2) — —	18,7 -54,8		7,6 -25,1		16,7 -17,4	
Taux de saturation %	5,7 -19,5		2,3 -10,9		5,4 - 8,2	
Phosphore						
assimilable (Truog) p.p.m.	0 - 2		0		0	
total (HClO ₄) (‰)	0,9 - 5,6		0,5 - 2,8		0,6 - 0,7	
Analyse totale HClO ₄	Sol		Sol		Sol	
perte au feu %	< 2 μ		< 2 μ		< 2 μ	
résidu %	22,9-62,9	23,0-43,1	19,2-51,0	35,3-47,1	25,0-30,6	36,0-38,2
SiO ₂ %	8,4-51,0	1,1- 6,8	10,3-49,1	0,3- 1,5	19,7-32,1	0,7- 2,5
Al ₂ O ₃ %	10,4-16,7	11,1-38,2	10,9-17,7	11,2-18,2	10,7-15,2	14,4-22,4
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	5,3-10,5	10,5-15,3	8,8-21,2	20,9-25,5	14,7-23,6	20,4-23,1
Fe ₂ O ₃ %	1,9- 4,6	1,3- 4,3	0,8- 2,6	0,9- 1,3	0,7- 1,7	1,2- 1,6
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	5,4-11,6	14,2-30,5	7,8-13,9	18,3-21,3	10,0-14,3	13,2-22,5
Ca mé p. 100 g	1,0- 2,8	0,6- 2,7	0,6- 1,7	0,6- 1,0	0,5- 1,2	0,7- 1,2
Mg — —	6,1-19,3	0,0-16,4	3,9-30,7	2,8- 7,1	2,9- 9,3	3,9- 6,8
K — —	10,9-23,3	27,8-44,1	12,9-77,9	12,4-16,9	28,8-30,8	22,3-25,8
Na — —	0,6- 1,9	0,4- 3,0	0,2- 1,5	0,2- 0,8	0,4- 0,4	0,2- 0,4
	1,6-10,0	4,8-21,9	0,3-11,3	18,4-45,8	1,0- 1,9	0,3-28,7

(1) Analyse sur sol séché-air et rapportée au poids de sol séché à l'air.

(2) CEC déterminée par NH₄-acétate à pH = 7, sur sol séché à l'air.

diocres : 900 à 5 600 ppm dans le A₁, 500 à 2 800 ppm dans le (B) et 600 à 700 ppm dans le II (B). L'analyse chimique totale du sol (par l'attaque à l'acide perchlorique) montre que si certains sols sont déjà assez fortement « évolués » dans tout le profil, d'autres probablement par suite d'un rajeunissement récent dans le haut du profil, contiennent encore de fortes teneurs en substances insolubles à l'acide perchlorique (minéraux primaires et silice). Le rapport silice/alumine de l'extrait de sol total varie de 1,9 à 4,6 dans l'horizon A₁, de 0,8 à 2,6 dans le (B) et de 0,7 à 1,7 dans le II (B).

c Minéralogie de la fraction inférieure à deux microns (tab. 16, fig. 7 et photos 3 et 4)

Dans les andosols fortement désaturés, la fraction inférieure à deux microns ne contient plus que des

traces de minéraux primaires (feldspaths et pyroxènes). L'allophane domine tous les autres constituants dans l'ensemble du profil. Dans l'horizon humifère il n'y a que des traces de gibbsite ; il apparaît un peu d'halloysite, partiellement déshydratée en métahalloysite et l'on remarque la présence de beaucoup de cristobalite comme dans les sols moyennement désaturés. Dans l'horizon (B), une forme fibreuse d'allophane, analogue à l'imogolite du Japon (N. YOSHINAGA et S. AOMINE, 1962 b) a été observée au microscope électronique (1) ; on note encore la présence de beaucoup de cristobalite, un net accroissement des teneurs en gibbsite et des traces d'argiles : kaolinite, halloysite et peut être une

(1) Observations de G. SIEFFERMANN, au laboratoire Géologie du CNRS à Strasbourg en 1969.

TABLEAU 16

*Minéralogie de la fraction inférieure à deux microns des andosols fortement désaturés, des îles Banks**

1. SOLS DES HAUTS-PLATEAUX SUR CENDRES BASALTIQUES FORTEMENT ALTÉRÉES

a) *Horizon A₁* (éch. 2331, 4441, 4551, 4631)

- beaucoup d'allophane ; parfois un peu d'hallowysite et des traces d'argiles à 14 Å
- un peu ou beaucoup de cristobalite ; parfois des traces de gibbsite et de feldspaths plagioclases.

b) *Horizon (B)* (éch. 2332, 4442, 4552, 4652)

- beaucoup d'allophane et souvent beaucoup de cristobalite ; un peu ou beaucoup de gibbsite ; un peu ou des traces de feldspath plagioclase ; parfois des traces de pyroxène ; un peu ou des traces d'argiles (hallowysite, kaolinite, argile à 14 Å) ; dans l'échantillon 2332, il a été observé une forme fibreuse analogue à l'imogolite.

c) *Horizon II (B)* (éch. 2333)

- beaucoup d'allophane et de gibbsite ; un peu de cristobalite
- traces d'argiles (hallowysite, kaolinite) et de minéraux primaires (feldspaths et pyroxènes).

2. SOLS DES HAUTS-VERSANTS SUR CENDRES ET TUFS BASALTIQUES PEU ALTÉRÉS

a) *Horizon A₁* (éch. 4421)

- beaucoup d'allophane ; un peu de montmorillonite.

b) *Horizon (B) - C* (éch. 4422)

- beaucoup d'allophane et de cristobalite ; un peu de minéraux primaires (feldspaths plagioclase et pyroxène).

* Minéralogie obtenue principalement par le laboratoire de Sédimentologie et Géochimie de la Surface à Strasbourg : par diffraction de rayons X par G. JEHL et G. SIEFFERMANN - Microscopie électronique par G. SIEFFERMANN, et en partie par le laboratoire du CSIRO à Adélaïde par J. PICKERING (éch. 2333).

argile à 14 Å. Dans l'horizon II (B), il y a beaucoup d'allophane (imogolite ?) et de gibbsite, et seulement des traces d'argiles (kaolinite, hallowysite) ; on remarque qu'il n'y a plus qu'un peu de cristobalite.

Ce sont donc des sols très riches en allophanes, plus ou moins riches en gibbsite et toujours pauvres en argiles bien cristallisées ; la présence d'imogolite dans l'horizon (B) et l'accroissement très fort de la cristobalite dans le haut du profil méritent d'être signalés.

Le rapport silice/alumine de la fraction inférieure à deux microns est normalement inférieur à 2. Cependant, en raison d'un fort rajeunissement il peut dépasser cette valeur dans le haut du profil : il varie en A₁ de 1,3 à 4,3, dans le (B) de 0,9 à 1,3 et dans le II (B) de 1,2 à 1,6.

d *Fertilité*

Les andosols fortement désaturés ne sont plus cultivés aux Nouvelles-Hébrides ; il est probable qu'ils ont une fertilité médiocre du fait de leurs teneurs très faibles en phosphore assimilable et médiocres en potassium échangeable, de leur forte lixiviation permanente et de la forte acidité du sol dans l'horizon humifère (pouvant entraîner des toxicités par les ions Al et Mn). Leur mise en valeur nécessiterait probablement

l'apport de fortes quantités de phosphates de calcium, ainsi que cela a été démontré ailleurs (Japon, Nouvelles Zélande, Hawaï) sur des sols analogues.

2.2.2. CONCLUSIONS SUR LA PÉDOGENÈSE DES ANDOSOLS EUTROPHES ET OLIGOTROPHES

Les andosols eutrophes d'Aoba sont des sols jeunes sur cendres volcaniques basaltiques d'âge récent (1000 à 1500 ans) ; ils se forment sous un climat à pluviométrie de 2 à 3 m par an environ ; cependant, malgré cette forte pluviométrie, leur capacité d'échange cationique reste saturée. Ils contiennent une quantité de minéraux primaires encore importante ; mais déjà ils sont riches en substances amorphes très siliceuses et plus ou moins riches en argiles. La part des argiles par rapport aux substances amorphes augmente nettement des régions les plus pluvieuses aux plus sèches. L'hallowysite apparaît plus abondamment dans les zones climatiques les plus humides ou dans les sols enterrés, plus anciens. La vermiculite est associée à l'hallowysite dans les régions moyennement humides et seulement dans le haut des profils, plus récent. La montmorillonite se forme abondamment dans la zone climatique la plus sèche, caractérisée par de fréquentes

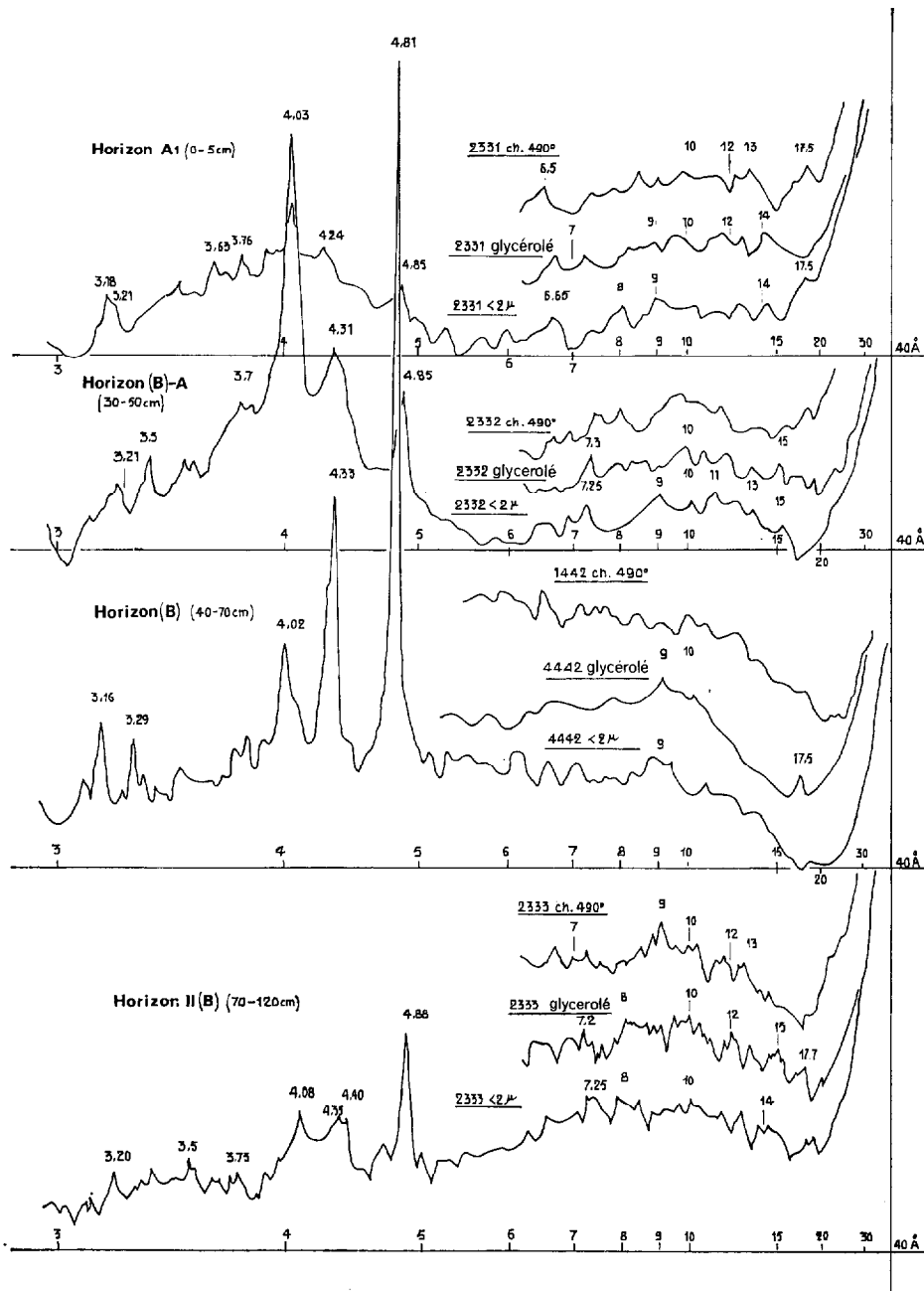


FIG. 7. — Diagramme de diffraction de rayons X (Cu). Andosol oligotrophe fortement désaturé sur cendres basaltiques des îles Banks (climat très humide permanent) (sol traité par méthode SEGALIN et ultra-sons).

périodes de forte évaporation ; dans ce cas elle est observée en forte quantité dans tout le profil.

Les andosols oligotrophes des îles Banks sont aussi des sols jeunes sur cendres volcaniques basaltiques d'âge récent ; mais ils se forment sous un climat à très forte pluviométrie (plus de 4 m par an, avec seulement de très courtes périodes d'évaporation) ; pour cette raison probablement, ils sont plus fortement « évolués » et leur capacité d'échange cationique est désaturée. Ils contiennent peu de minéraux primaires (feldspaths et pyroxènes) dans leur fraction inférieure à deux microns ; par contre ils sont riches en substances amorphes fortement alumineuses et ferrifères et souvent pauvres en argiles. De la cristobalite est souvent abondante dans le haut des profils, surtout dans l'horizon humifère, bien qu'il s'agisse de la partie rajeunie et la moins « évoluée » du profil ; au contraire, la gibbsite est fréquemment abondante dans les horizons (B) qui constituent la partie la plus ancienne et la plus « évoluée » du profil. Les argiles : principalement de l'hallowysite, et des traces de kaolinite et de minéraux à 14 Å, sont généralement peu abondantes dans les andosols oligotrophes : présentes en petites quantités dans les andosols moyennement désaturés, elles ne sont plus que des traces dans les andosols fortement désaturés. Une forme fibreuse analogue à celle de l'imogolite décrite au Japon (YOSHINAGA et AOMINE, 1962), a été observée dans l'horizon (B) d'un andosol fortement désaturé, associée à beaucoup de gibbsite, un peu d'allophane et seulement des traces de kaolinite et d'hallowysite (en tubes). La montmorillonite paraît exceptionnelle dans les andosols oligotrophes formés sous un climat perhumide à très forte pluviométrie : elle n'a été observée que dans deux cas paraissant particuliers ou accidentels (l'horizon A d'un andosol fortement rajeuni par des cendres ; un horizon II (B) - C de tuf altéré, faiblement désaturé).

Ces observations peuvent être rapprochées de celles de G. SIEFFERMANN au Cameroun (1969) : Dans les sols jeunes sur cendres volcaniques basaltiques, la quantité de substances amorphes augmente des régions les plus sèches aux plus humides ; réciproquement, les argiles paraissent mieux cristallisées et sont plus abondantes sous les climats les plus secs. L'hallowysite est plus abondante et plus stable dans les sols saturés en cations des régions moyennement humides à courtes périodes d'évaporation. La gibbsite est très importante dans les andosols désaturés des climats très humides, où elle accompagne une allophane riche en alumine et parfois une forme analogue à l'imogolite. La vermiculite se situe de préférence dans le haut des profils d'andosols eutrophes et dans la zone climatique intermédiaire entre celle plus humide des sols à hallowysite et celle plus sèche des sols à montmorillonite. Une observation distingue nettement les andosols des Nouvelles-Hébrides par rapport à ceux du Cameroun : la montmorillonite est abondante dans tout le profil des andosols eutrophes des régions les plus sèches ; mais elle n'a été observée qu'exceptionnellement et dans une partie du profil des andosols oligotrophes formés sous un climat très humide. Il apparaît que les andosols eutrophes n'ont pas été décrits au Cameroun ; de plus, il semble normal que la montmorillonite soit rare sous un climat très fortement pluvieux et fréquente sous un climat plus sec.

Manuscrit reçu au S.C.D. le 23 juin 1972.