Note sur la nature et la fertilité des sols sur cendres volcaniques

provenant d'éruptions récentes dans l'archipel des Nouvelles-Hébrides

3° PARTIE

P. QUANTIN

Pédologue de l'ORSTOM, SCC, Bondy

- 3. SOLS BRUNS EUTROPHES TROPICAUX-ANDIQUES SUR LAPILLIS BASALTIQUES; SÉQUENCE DE DIFFÉRENCIATION DE SOLS SUR CENDRES EN FONCTION DE L'ÉLOIGNEMENT DU CRATÈRE ÉRUPTIF
- 3.1. Sols Bruns-Eutrophes Tropicaux andiques, sur lapillis basaltiques (labradorites et basaltes) (1), datant d'environ deux milliers d'années, des îles Shepherd

Aux îles Shepherd, le volcanisme est très récent : les formes des cônes éruptifs sont parfaitement conservées. La dernière éruption, consistant en ponces et cendres dacitiques date d'environ 500 ans : un bois carbonisé mêlé aux ponces a été daté en 1966 par T.A. RASTER (DSIRO, Nouvelle-Zélande) de 490 ±37 ans par rapport au 1-1-1950. L'âge de la formation des Sols Bruns Eutrophes Tropicaux andiques, recouverts par cette dernière éruption, n'est pas exactement connu ; mais il pourrait être d'environ 2 000 ans, car l'horizon A₁ enfoui sous les ponces a été daté au ¹⁴C par Mme G. Delibrias (CNRS-Gif-sur-Yvette) de 1670 ±110 ans par rapport à 1968.

Les Sols Bruns Eutrophes Tropicaux andiques

a Propriétés physiques (tabl. 17)

La texture paraît sur le terrain limono-argileuse dans l'horizon A₁, limoneuse sur cendres ou sablograveleuse sur lapillis dans l'horizon (B) ou (B)-C; à l'analyse elle se révèle argilo-limoneuse ou argilo-limono-sableuse. Relativement aux andosols, le sol brun adhère et colle aux doigts, à l'état humide;

sont bien différenciés en horizons A, (B), C ou A, (B) - C. Ils se distinguent des Andosols eutrophes en ce que les argiles bien cristallisées dominent dans la fraction inférieure à deux microns par rapport aux allophanes; mais ils sont incomplètement « évolués » et ils diffèrent des Sols Ferrallitiques ou Fersiallitiques faiblement désaturés par l'abondance de leur contenu en minéraux primaires en cours d'altération. Les argiles sont constituées essentiellement d'halloysite, plus ou moins déshydratée en métahalloysite; des minéraux 2: 1, montmorillonite surtout et interstratifiés, semblent se loger dans les squelettes des minéraux en cours d'altération; ils peuvent passer inaperçus si l'on extrait les argiles par dispersion sans utiliser les ultra-sons. D'après des analyses de substances amorphes, le sol pourrait contenir au plus 10 % d'allophane sur un total d'au moins 50 % de substances secondaires (argile + hydroxydes de fer). Ce sont des sols assez fortement humifères (5 à 8 % de matière organique dans le A_1).

⁽¹⁾ Roches étudiées par J.-J. ESPIRAT (1964) et A.J. WARDEN (1967).

Tableau 17
Propriétés physiques des sols bruns eutrophes tropicaux-andiques, des îles Shepherd

Horizon (échantillon)	A ₁ - (1561)	(B) - (1542)	(B)-C - (1562)	(B)-C - (1543)
Profondeur (cm)	0 à 10	30 - 100	40 - 70	100 - 150
Couleur Munsell	7,5 YR 2-3/2	7,5 YR 3/2	7,5 YR 4/4	7,5 YR 3/2
Granulométrie (1) % < 2 μ	34,4 31,7 17,7 9,1 7,1	25,4 23,0 32,0 17,9 1,7	5,9 7,8 2,8 82,8 0,7	25,1 12,3 14,4 48,2 0,8
H ₂ O à pF = 3 (1) $\%$ pF = 4,2 (1) $\%$ Hygroscopicité	48,3 37,6 11,4	42,2 34,4 11,2	32,6 ? 30,0 9,5	51,2 36,6 14,8

⁽¹⁾ Déterminé sur sol conservé humide et rapporté au sol séché à 105°.

ce qui indique la présence abondante de phyllites argileuses. La dispersion des argiles est encore difficile; elle se fait normalement en milieu alcalin; mais il faut avoir recours aux ultra-sons et même au broyage pour libérer toutes les argiles des formes de pseudo-sables ou des minéraux partiellement altérés encore cimentés. La densité apparente est probablement faible et en conséquence la porosité totale est élevée. Ce sont des sols bien drainés, retenant cependant assez fortement l'eau : leur capacité de rétention pour l'eau (à pF = 3) est d'environ 40-50 % dans l'horizon A_1 et 32 à 42 % dans l'horizon (B); il y a environ de 12 à 15 % d'eau facilement disponible aux plantes dans l'horizon A_1 .

b Propriétés chimiques (tabl. 18).

Les sols bruns eutrophes sont assez fortement humifères: ils contiennent de 5 à 8 % de matière organique dans l'horizon A₁ et de 0,7 à 0,8 % dans le (B); cette substance est caractérisée par une basse valeur du rapport C/N, très voisine de 10 dans l'ensemble du profil. Le pH est voisin de 7 dans tout le profil; ce qui correspond bien à un taux de saturation en cations échangeables très élevé, variant de 93 à 100 % dans tout le profil. La capacité d'échange de cations semble grande relativement aux quantités de fraction inférieure à deux microns que l'on peut extraire par une granulométrie classique: elle varie de 33 à 37 mé p. 100 g dans

l'horizon A_1 , et de 27 à 30 mé p. 100 g dans le (B). La capacité d'échange de la fraction inférieure à deux microns, surtout constituée d'halloysite, est d'environ 30 à 35 mé p. 100 g; mais celle de la fraction sable fin, parfois riche en montmorillonite, peut atteindre une valeur surprenante de 50 à 70 mé p. 100 g. Les sols bruns eutrophes sont toujours riches en calcium et magnésium échangeable et total; ils sont aussi riches en potassium échangeable (1 à 4 mé p. 100 g) dans tout le profil. Sauf s'ils ont été rajeunis en surface, ils sont généralement très pauvres en phosphore facilement assimilable (méthode TRUOG): de 0 à 3 p.p.m.; mais ils sont moyennement riches en phosphore total: 400 à 700 p.p.m. Cette très forte rétention du phosphore ne s'explique pas par l'abondance des allophanes ou de l'alumine libre, mais semble liée à la présence d'halloysite; cette argile peut fixer au moins 10 % de phosphore (1).

L'analyse totale montre que les sols bruns eutrophes contiennent encore une part importante de résidu à l'attaque par l'acide perchlorique: 12 à 31 %; ce qui confirme la présence de minéraux altérables. Le rapport silice/alumine, dans les sols de Tongoa a une valeur de 2,6 dans l'horizon A₁, et varie de 2,4 à 3,4 dans les horizons (B) et (B)-C.

⁽¹⁾ Exprimé en P₂O₅.

TABLEAU 18

Propriétés chimiques (1) des sols bruns eutrophes tropicaux-andiques, des îles Sherpherd

Horizon (échantillon)	A ₁ - (1561)		(B) - (1542)		(B)-C - (1562)		(B)-C - (1543)
Profondeur (cm)	0 à 10		30 à 100		40 à 70		100 à 150
Matière organique %	7,1 9,7 6,7		1,7 9,8 7,2		0,7 10,0 7.0		0,8 9,6 6,8
Eléments échangeables mé/100 g Ca	23,8 10,7 1,95 3,3		12,8 10,2 0,08 ?		13,3 7,9 3,4		
Na CEC (2) Taux saturation % Phosphore assimilable (TRUOG) ppm	36,8 99,0 2		26,9 92,8 3		29,9 77,0 ? 0		29,9 82,7 3
total (HClO ₄) % Analyse totale (HClO ₄) Perte au feu % Résidu	Sol 25,0 12,2	$ \begin{array}{c c} 0,64 \\ < 2 \mu \\ 22,9 \\ 1,1 \end{array} $	Sol 18,1 31,1	$\begin{array}{c c} 0,71 \\ < 2 \mu \\ 29,0 \\ 2,1 \end{array}$	Sol 15,3 17,9	$2,45$ $< 2 \mu$ $22,8$ $2,3$	1,07 Sol 19,1 25,9
SiO ₂ Al ₂ O ₃ SiO ₂ /Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ %	26,6 17,6 2,6 14,4	32,2 24,5 2,2 18,3	20,3 14,6 2,4 11,7	29,0 23,7 2,1 15,1	30,7 15,6 3,3	34,2 24,4 2,4	21,8 14,2 2,6
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	1,7 38,9 47,6	1,5	1,6 30,7 74,4	1,5 — —	11,6 2,3 128 217	14,4 1,7 —	10,8 1,8 27,8 262
K Na	<u> </u>		5,1		0,4 ?		4,5
Extraits d'amorphes (SEGALEN) SiO ₂ % (3)	_		7,90 - 11,05 ? 5,65 - 9,15 ?				_
Fe ₂ O ₃			10,85 - 11,75 ? 2,38 - 2,05 ?				-

- (1) Analyse effectuée sur sol séché-air et rapportée au sol séché-air.
- (2) CEC déterminée par NH₄. Acétate à pH = 7, sur sol séché à l'air.
- (3) Amorphes rapportés au poids de sol séché à 105°.

c Minéralogie de la fraction inférieure à deux microns (tab. 19, fig. 8, photo 5).

La présence d'halloysite, partiellement déshydratée en métahalloysite, domine dans tout le profil, à tel point que la présence d'un peu d'allophane ou de montmorillonite pourrait passer inaperçue à l'examen aux rayons X. La métahalloysite est abondante dans le haut du profil et diminue relativement dans l'horizon (B) du sol brun eutrophe, tandis que l'halloysite devient dominante dans les anciens horizons II (B) enterrés. On remarque aussi la présence nette de goethite, indiquant une meilleure cristallisation des hydroxydes de fer dans les sols bruns eutrophes que dans les andosols. Il est à noter la forme de

l'halloysite en glomérules écailleux, en même temps que celle en tube, plus connue. Cette forme glomérulaire d'halloysite a été décrite dans les sols du Cameroun (G. SIEFFERMANN et G. MILLOT, 1968). L'allophane, plus discrète, apparaît sous la forme d'agrégats de fines particules sub-sphériques.

Dans le haut du profil le rapport silice/alumine de la fraction inférieure à deux microns a une valeur de 2,2, légèrement supérieure à celle de la méta-halloysite qui a été reconnue aux rayons X comme son constituant majeur; peut-être le léger excès de silice provient-il de l'allophane? Dans le sol total de l'horizon A₁, le même rapport a une valeur de 2,6; ceci s'explique par la présence d'un peu de

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. X, nº 3, 1972 : 207-217.

TABLEAU 19

Minéralogie (1) de la fraction inférieure à deux microns des sols bruns eutrophes tropicaux-andiques, des îles Shepherd

a - Sol brun eutrophe sur lapillis basaltiques:

Horizon A₁ (éch. 1561) = beaucoup de métahalloysite (en tubes et glomérules), un peu d'allophane probable; traces de kaolinite ; un peu de goethite.

Horizon (B) (éch. 1542) = beaucoup d'halloysite et métahalloysite (en tubes et glomérules); un peu d'allophane probable; un peu de goethite; traces de feldspath.

Horizon (B)-C (éch. 1562) = beaucoup d'halloysite et métahalloysite (en tubes et glomérules) ; un peu d'argiles interstratifiées (M-C) ; probablement un peu d'allophane ; un peu de goethite.

b — Sol Ferrallitique sur cendres basaltiques, enterré sous le sol brun :

Horizon II (B) (éch. 1544) = beaucoup d'halloysite bien cristallisée (en tubes et glomérules); un peu de goethite; un peu de substances amorphes (hydroxydes de fer et peut être allophane).

(1) Minéralogie obtenue principalement par le 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.

et en partie par le laboratoire du C.S.I.R.O. à Adélaïde, par J. Pickering (éch. 1544).

montmorillonite incluse dans la fraction sableuse (G. Tercinier et P. Quantin, 1968).

Dans l'horizon (B) le rapport silice/alumine de la fraction inférieure à deux microns est voisin de 2, ce qui correspond bien à la présence d'halloysite. Dans l'horizon (B)-C, cette valeur est de 2,38; ce qui s'explique par la présence d'un peu d'interstratifiés (M-C) et peut-être d'allophane; dans le sol total, cette valeur atteint 3,35; ce qui correspond à la présence abondante de minéraux 2: 1 (montmorillonite + interstratifiés M-C) dans la fraction sableuse.

Dans l'horizon II (B) du sol ancien enterré le rapport silice/alumine = 2,03 correspond bien à la présence presque exclusive d'halloysite dans les argiles.

Il est nettement visible que la pédogénèse des sols bruns eutrophes tropicaux sur lapillis basaltiques à Tongoa, conduit à la formation d'halloysite, en passant par des phases transitoires à allophanes ou à montmorillonite.

d Fertilité

Les sols bruns eutrophes tropicaux andiques sont très utilisés et considérés comme très fertiles, surtout ceux qui ont été rajeunis en surface. Ceci s'explique facilement par leurs qualités physiques et chimiques excellentes. Les plantes ne manifestent pas de déficience en phosphore, malgré la forte rétention de cet élément par les argiles ; cependant les rendements obtenus sont nettement meilleurs sur les sols rajeunis,

beaucoup plus riches en phosphore facilement assimilable; on peut penser qu'une fertilisation phosphatée améliorerait la production des sols les plus pauvres en phosphore.

3.2. Séquence de différenciation de sols sur cendres andésitiques, en fonction de l'éloignement du cratère éruptif, à Tanna

A Tanna, la séquence de sols suivante a été observée sur des cendres andésitiques émises par un volcan encore très actif, en allant du Centre d'émission des cendres au Sud, aux hauts plateaux du Nord:

- de 0 à 8 km: des sols minéraux bruts, puis des sols peu évolués d'apport volcanique friable, sur d'épaisses strates de cendres: de 5 à plus de 10 m:
- de 8 à 10 km : de sols peu évolués d'apport volcanique sur 4 à 5 m de cendres ;
- de 15 à 16 km: des andosols eutrophes sur 2 m de cendres;
- de 18 à 22 km: des sols bruns eutrophes tropicaux andiques sur 60 à 100 cm de cendres, recouvrant un ancien sol fersiallitique;
- à plus de 25 km : des sols fersiallitiques désaturés sur tufs, rajeunis et brunifiés par l'apport récent de 20 à 40 cm de cendres.

La différenciation des sols semble correspondre à la distribution de la taille des cendres et de la

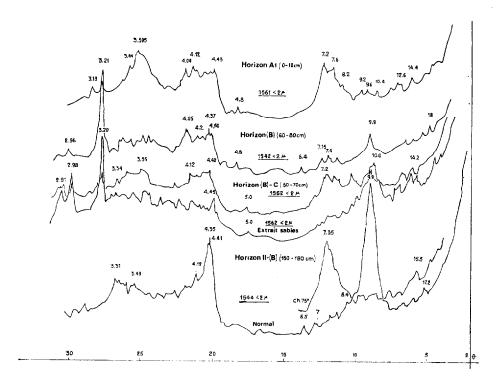


Fig. 8. — Diagramme de diffraction de rayons X (Cu). Sols bruns eutrophes tropicaux andiques sur cendres et lapillis basaltiques de Tongoa (climat humide) (sol traité par H₂O₂ et dispersé par ultra-sons).

quantité des apports, en fonction de l'éloignement du centre éruptif: près du volcan et jusqu'à 8 km au Nord, les cendres contiennent de 15 à 50 % de sables grossiers et les dépôts atteignent une épaisseur de 5 à plus de 10 m; de plus les apports sont très fréquents. A partir de 15 km du centre, au Nord, les cendres ne contiennent plus que 2 à 3 % de sables grossiers, mais elles sont composées pour 70 à 76 % de sables fins proches de la taille des limons grossiers; les dépôts récents ne dépassent pas 2 m de profondeur et les apports sont moins fréquents.

Il semble évident que l'altération s'est développée d'autant plus rapidement que les cendres étaient plus fines et moins profondément et fréquemment renouvelées: la quantité de fraction inférieure à deux microns dans l'horizon humifère supérieur (A₁) n'est que 0,9 à 2,7 % près du volcan et jusqu'à 8 km; elle atteint 7 à 9 % à 15 km, 20 % à 18-22 km et finalement 40 % à plus de 25 km du cratère. Parallèlement à cette évolution les sols sont de plus en plus différenciés au fur et à mesure qu'ils sont

plus éloignés du cratère éruptif : près du volcan les profils ne comportent que des horizons humifères assez pauvres en matière organique, alternant avec des couches de cendres grises à peu près inaltérées. A partir de 15 km, la rubéfaction et un horizon (B)-C apparaissent nettement. Dès 18 km un horizon (B) est nettement caractérisé. Dans l'horizon supérieur, l'évolution suivante est constatée : la teneur en matière organique n'est que de 1 à 2 % près du volcan (parfois sur seulement 5 cm de profondeur); elle atteint 6 à 7 % à partir de 15 km, et 8 à 10 % à plus de 20 km du cratère. La capacité de rétention en eau (à pF = 3) est de 18 à 20 % près du volcan (jusqu'à 8 km); elle croît à 35-47 % à partir de 15 km. La capacité d'échange de bases (CEC) n'est que de 1 à 3 mé p. 100 g près du volcan; elle est déjà de 18 à 22 mé p. 100 g à 15 km; elle atteint 22 à 35 mé p. 100 g à 18-22 km et 28 mé p. 100 g à 25 km; cette valeur atteint probablement un maximum entre 18 et 22 km tant que les sols contiennent en mélange des argiles et des allophanes puis diminue quand apparaissent en

Tableau 20

Evolution des caractéristiques physiques de l'horizon A₁ des sols sur cendres en fonction de l'éloignement du cratère éruptif, à Tanna

Eloignement du cratère (km)	0 - 7	8	15 - 16	18 - 22	25
Profondeur dépôt cendres (m)	5 à > 10	5	2	0,6 - 1	0,2 - 0,4
Types de sols	Minéraux bruts peu évolués	Peu évolués	Andosols eutrophes	Bruns eutrophes - andiques	Fersiallitiques désaturés rajeunis
Couleur Munsell	10 YR 2/1	5-10 YR 2-3/1	5-10 YR 2-3/1	5-10 YR 2-3/1-2	2-5 YR 2-3/2
Granulométrie (1) %					
< 2 μ	0,9 - 2,8	1,3 - 4,4	6,7 - 9,4	20,9 - 23,8	39,4
2 - 20 μ	8,9 - 11,5	8,1 - 12,2	12,8 - 19,2	19,5 - 26,1	19,2
20 - 200 μ	63,8 - 64,6	69,9 - 72,0	72,1 - 77,8	43,4 - 53,2	31,1
200 - 2 000 μ	23,3 - 23,9	13,5 - 16,3	1,7 - 3,3	0,9 - 1,7	1,9
Matière organique Eau (1) (%)	0,2 - 2,1	2,0 - 2,4	6,0 - 6,8	5,3 - 9,9	8,3
H_2O à pF = 3	5,4 - 19,9	20,5 - 27,6	34.9 - 47.1	34,8 - 56,0	47,9
pF = 4,2	5,5 - 5,9	8,4 - 11,1	21,3 - 25,9	22,8 - 45,1	36,0
Hygroscopicité	0,1 - 0,7	1,0 - 1,1	3,9 - 4,0	6,8 - 8,1	15,1
Densité porosité		, ,	, ,	, ,	'
Densité apparente		1,2	0,9	0,8	
Porosité vol. %		1,2 59	62	65	_

⁽¹⁾ Déterminé sur sol conservé humide ; rapporté au poids de sol séché à 105°.

abondance des argiles de la famille de la kaolinite. Les quantités de potassium échangeable s'élèvent rapidement: de 0,05 à 0,1 mé p. 100 g près du volcan; 0,45 à 1,14 mé p. 100 g à 15 km; plus de 1,2 mé p. 100 g au-delà de 18 km. Le taux de saturation en bases échangeables est faible dans les sols peu évolués sur cendres grossières proches du volcan, sans doute à cause de l'atmosphère chargée en vapeurs sulfureuses ; il en résulte un pH acide de 4.9 à 5.2. Dans les andosols eutrophes à 15 km. le taux de saturation en cations est élevé: il varie de 65 à 80 %, et le pH est modérément acide : 5,8 à 5,9. Dans les sols bruns eutrophes andiques le taux de saturation en cations dépasse 90 % et le pH est de 6,0 - 6,3. Dans les sols fersiallitiques désaturés mélanisés le taux de saturation en bases décroît brusquement à 40-45 %; d'où il résulte un pH acide de 5,8. Le contenu en phosphore assimilable (méthode Truog) n'est que de 8 à 40 p.p.m. dans les sols proches du volcan, encore trop peu altérés; il atteint 150 à 300 p.p.m. dans les andosols situés à 15 km, puis un maximum de 300 à 500 p.p.m. dans les sols bruns andiques à 18-22 km; il chute brutalement à quelques p.p.m. dans les sols fersiallitiques à partir de 25 km. La libération du phosphore est très élevée dans les cendres en cours d'altération. Par contre, elle est très faible dans les sols déjà altérés. L'analyse totale du sol par extraction à l'acide perchlorique, montre que le degré d'extraction acide est proportionnel au degré d'altération: les cendres peu altérées laissent un résidu insoluble de 77 à 79 %; dans les andosols situés à 15 km, ce résidu est encore de 64 %; dans les sols bruns andiques il est de 58 %; dans les sols fersiallitiques rajeunis, il descend brusquement à 14 %.

Suivant le même ordre la perte au feu (sur sol séché à l'air) croît de 3,2 - 3,3 % à 13,5 %, puis 15,5 % et finalement à 29 %. Le rapport silice/alumine de l'extrait acide est de 5 à 5,5 dans les sols peu évolués, 5,3 dans les andosols, 4,9 dans les sols bruns andiques et chute brusquement à 2,5 dans les sols fersiallitiques. Le rapport silice/alumine + fer décroît dans le même ordre de 3,3 - 3,7 à 3,3, puis 3,1 et enfin 1,5.

La fertilité des sols, dans la même succession est médiocre dans les sols peu évolués sur cendres grossières, parce qu'ils sont relativement acides, pauvres en éléments fertilisants facilement assimilables, et facilement lixiviés; la fertilité devient brusquement élevée dans les andosols et les sols bruns andiques, car ils conservent bien l'eau, sont riches en éléments fertilisants, les retiennent bien et en libèrent rapidement de nouvelles quantités; puis la fertilité chute

TABLEAU 21

Evolution des caractéristiques chimiques de l'horizon A₁ des sols sur cendres en fonction de l'éloignement du cratère éruptif, à Tanna (1)

Eloignement du cratère (km)	0-7	8	15-16	18-22	25
Profondeur dépôt cendres (m)	5-10	5	2	0,6-1	0,2-0,4
Types de sols	Minéraux bruts peu évolués	Peu évolués	Andosols eutrophes	Bruns-eutrophes -andiques	Fersiallitiques désaturés rajeunis
Matière organique %	0,20- 2,1 11,0 - 13,4 4,9 - 6,2	2,0 - 2,4 13,6 -15,1 5,9 - 5,2	6,0 - 6,8 9,3 - 10,0 5,8 - 5,9	5,3 - 9,9 10,6 - 14,3 6,2 - 6,5	8,3 14,5 5,8
Eléments échangeables mé/100 g Ca Mg K Na	0,18- 0,54 0,03- 0,70 0,05- 0,11 0,07- 0,10	0,69- 2,13 0,23- 0,74 0,11- 0,16 0,26	8,3 - 14,1 2,1 - 3,2 0,46- 1,14 0,32- 0,66	12,5 - 28,5 2,6 - 6,4 1,18- 2,21 0,81- 1,18	6,9 3,7 1,56
CEC Taux saturation %	0,7 - 3,2 35,6 -100 12 - 37 0,08- 0,5	3,7 - 4,5 24,4 -54,0 8 -14 0,2 - 0,6	17,7 - 21,6 67,3 - 78,5 150 -300 1,5 - 3,7	30,0 - 35,0 71,0 -100 80 -750 3,5 - 4,8	27,8 43,6 2 2,2
Perte au feu %	3,2 - 4,8 77,0 - 77,5 10,4 - 11,2 2,4 - 3,5 5,0 - 7,9	3,3 79,1 9,6 3,0 5,5	13,5 - 16,7 62,9 - 64,2 12,3 - 13,9 3,0 - 3,9 5,3 - 7,9	15,7 - 19,6 45,3 - 46,4 18,5 - 20,5 7,0 - 7,2 4,6 - 5,0	29,0 13,9 23,1 16,0 2,5
Fe ₂ O ₃ SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ Ca mé/100 g Mg K Na	2,0 - 3,0 3,3 - 5,2 36,7 - 40,3 21,8 - 26,8 2,3 - 2,8 17,4 - 22,6	2,2 3,7 42,4 16,9 3,0 20,6	2,5 - 3,6 3,3 - 5,1 17,5 - 25,3 16,4 - 16,9 1,9 - 2,1 7,7	6,4 - 7,6 2,8 - 2,9 27,1 - 30,1 19,8 - 22,8 2,6 - 6,2 7,1 - 8,1	15,7 1,5 8,4 15,2 2,2
Extraits d'amorphes (SEGALEN)			1041 1045 A ₁ II (B)-C		
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		 	2,5 13,3 1,0 8,1 1,0 6,9 4,3 2,8	_ _ _ _	= =

Analyses chimiques sur sol séché-air et rapportées au sol séché-air.
 Amorphes rapportés au poids de sol séché à 105°.

sensiblement dans les sols fersiallitiques désaturés; mais ceux-ci demeurent encore moyennement fertiles à cause du rajeunissement.

En conclusion, il est permis d'émettre l'hypothèse suivante : la vitesse d'altération des cendres volcaniques et de différenciation des sols, et en même temps leur degré de fertilité, dépendent non seulement de l'âge du matériau originel, mais aussi de la taille des cendres et de la fréquence des apports. On remarque aussi l'importance de la libération du phosphore facilement soluble et du potassium échangeable dans tous les sols formés sur cendres très récentes.

La variation de la différenciation des sols en fonction de l'éloignement du cratère éruptif avait été déjà signalée au Kivu (A. PECROT et al., 1962).

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. X, nº 3, 1972 : 207-217.

Conclusions

Dans l'archipel des Nouvelles-Hébrides, en climat équatorial ou tropical très humide, l'altération des minéraux et la pédogenèse sur des apports volcaniques récents sont extrêmement rapides : quelques dizaines d'années suffisent pour la formation d'un sol peu évolué, dont l'horizon humifère soit assez riche en matière organique et en alumino-silicates hydratés secondaires (allophanes et argiles) pour être fertile; en un millier d'années se développe un andosol bien différencié, très humifère et le plus souvent fertile.

Les sols peu évolués sur cendres volcaniques sont constitués essentiellement d'un horizon humifère recouvrant un dépôt de cendres peu altérées. Ils ne contiennent que très peu de substances secondaires; celles-ci sont essentiellement « amorphes » et très riches en silice. L'altération semble se faire principalement par hydrolyse en solution alcaline. L'apparition des minéraux argileux : montmorillonite, interstratifiés et halloysite n'aurait lieu qu'au bout de plusieurs décades, dans les sols enterrés, ou serait favorisée par des climats moins fréquemment pluvieux. La libération extrêmement intense de cations. en particulier de potassium et de phosphore sous forme facilement assimilable, et la faible rétention de ces éléments sont parmi les caractéristiques les plus importantes de ces sols; elles en expliquent la fertilité. Le même phénomène permet de comprendre pourquoi des sols récemment rajeunis par des apports de cendres sont très fertiles.

Les andosols eutrophes sont des sols bien différenciés, a profil A, (B)-C; ils se caractérisent, malgré leur jeunesse (1 000 à 1 500 ans), par une altération déjà profonde des cendres volcaniques. Ils contiennent des quantités importantes de substances secondaires, très siliceuses encore, mais déjà très actives, car elles retiennent de fortes quantités d'eau et de cations échangeables. Ces substances secondaires sont en grande partie « amorphes »; mais elles contiennent aussi fréquemment une part importante de minéraux argileux. Il semble que la vermiculite et l'halloysite apparaissent dans les climats les plus humides et la montmorillonite en plus grande abondance dans les climats les plus secs. Ce sont des sols très humifères, très riches en cations échangeables, dont le potassium, et plus ou moins riches en phosphore facilement assimilable; ils sont très fertiles.

Les andosols oligotrophes sont des sols bien différenciés, à profil A, (B), C, et très humifères ; ce sont

aussi des sols jeunes (datant de 1 000 à quelques milliers d'années) et déjà profondément altérés. Sans doute en raison d'un climat très pluvieux (pluviométrie supérieure à 4 m par an), ils sont désaturés en cations. En climat à pluies fréquentes alternant avec de courtes périodes de déshydratation, les sols sont moyennement désaturés; en climat toujours humide et très fréquemment pluvieux les sols sont fortement désaturés. Les andosols oligotrophes sont tous très hydratés (au moins 100 % d'eau dans tout le profil) et très riches en substances amorphes; ces substances, sauf quand le haut du profil a été récemment rajeuni par des cendres, sont riches en hydroxydes de fer et d'alumine, et comparables aux allophanes signalées ailleurs dans les andosols : une matière fibreuse, analogue à l'imogolite découverte au Japon, a été observée dans un andosol fortement désaturé et perhydraté. Tous ces sols retiennent très énergiquement le phosphore. Cependant les andosols moyennement désaturés, relativement assez riches en cations échangeables, sont encore movennement fertiles. Par contre les andosols fortement désaturés sont médiocrement fertiles. Il est à noter que les andosols movennement désaturés contiennent toujours un peu d'argile, essentiellement de l'hallovsite : tandis que les andosols fortement désaturés en climat perhumide, n'en contiennent que des traces. Il faut remarquer aussi une certaine concentration de silice sous forme de cristobalite, dans le haut de tous les profils d'andosols oligotrophes.

Les sols bruns eutrophes tropicaux andiques semblent un peu plus âgés que les sols précédents; ils ne dateraient cependant que de 2 000 à quelques milliers d'années. Ce sont des sols bien différenciés, à profil A, (B), C et très humifères, se distinguant des andosols, par leur richesse en argile. Ils sont déjà très profondément altérés; leurs substances secondaires sont principalement constituées d'halloysite et de métahalloysite, et pour une part variable de montmorillonite et de substances « amorphes ». Ce sont des sols très riches en cations échangeables, dont le potassium, et retenant bien l'eau. Mais leur rétention pour le phosphore est assez énergique. Ce sont des sols très fertiles.

L'examen des divers sols formés sur matériaux volcaniques récents a fait ressortir l'importance de la répartition de la pluviométrie sur la pédogenèse :

- en climat tropical à longues périodes sèches, il se forme moins de substances « amorphes », et plus de montmorillonite ;
- en climat régulièrement pluvieux, à courtes périodes de déshydratation, il se forme un mélange

de substances « amorphes » et d'halloysite ; si la pluviométrie moyenne est comprise entre 2,5 et 4 m par an, les sols sont faiblement désaturés, « eutrophes », et d'autant plus riches en halloysite qu'ils sont plus anciens ; si la pluviométrie dépasse 4 m par an, les sols sont désaturés, « oligotrophes », et la formation de l'halloysite ne l'emporte pas sur celle des substances « amorphes » ;

— en climat extrêmement pluvieux et « perhumide » la formation de substances « amorphes » et de gibbsite l'emporte sur celle de l'halloysite et les sols sont très fortement désaturés.

L'étude de la pédogenèse en fonction de la durée de l'altération montre qu'il se forme toujours des substances « amorphes » très siliceuses, au début de l'altération. Les minéraux argileux n'apparaissent probablement qu'au bout de quelques dizaines d'années. Leur apparition semble d'autant plus rapide et abondante que le climat comporte de plus longues périodes de déshydratation ou que le drainage interne est plus ralenti dans la profondeur du profil; au contraire ce phénomène est d'autant plus retardé que le climat est plus abondamment et fréquemment

pluvieux. Les substances « amorphes » riches en hydroxydes de fer et d'aluminium n'apparaissent que dans les andosols oligotrophes, c'est-à-dire en climat très pluvieux.

Enfin, l'observation d'une séquence de sols en fonction de l'éloignement d'un cratère actif, suggère que la vitesse d'altération et la différenciation des profils dépendent aussi en même temps de la finesse des particules des cendres et de la fréquence et de l'abondance des apports : en s'éloignant du volcan on remarque successivement le passage de sols peu évolués à des andosols eutrophes, puis à des sols bruns eutrophes tropicaux andiques. Plus les cendres sont fines et moins les apports sont fréquents, plus l'altération est rapide et les sols sont différenciés.

En conclusion, les sols sur formations volcaniques récentes aux Nouvelles-Hébrides sont généralement très fertiles, à l'exception cependant des sols trop jeunes et trop proches des volcans, ou des andosols fortement désaturés. D'autre part, leur étude fait découvrir de nombreux aperçus, dont certains sont encore peu connus, sur la pédogenèse en milieu tropical.

Manuscrit reçu au SCD le 31 octobre 1972

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), 1965. Classification des Sols, tableau des Classes, Sous-classes, Groupes et Sous-groupes de sols, utilisés par la Section de pédologie de l'ORSTOM. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., III, 3: 269-288.
- Commission de Pédologie et de Cartographie, 1967. Classification des Sols. C.P.C.S., GRIGNON, 87 p. multigr.
- DION (P.), 1963. Mission des Nouvelles-Hébrides, rapport sur l'île Ambrym (6-4 au 30-5-1963). BRGM, Nouméa. multigr.
- ESPIRAT (J.-J.), 1964. Etude géologique de l'île Tongariki et observations sur la géologie des îles Shepherd. BRGM, Nouméa, 42 p. multigr.
- PECROT (A.) et al., 1962. L'altération des roches et la formation des sols au Kivu. INEAC, Publ. sér. Sci, n° 7. Bruxelles, 92 p.
- Quantin (P.), sous presse. Notice explicative de la carte pédologique de reconnaissance à 1/100 000 d'Epi et des îles Shepherd (Nouvelles-Hébrides). ORSTOM, Nouméa.
- SÉGALEN (P.), 1968. Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., VI, I: 105-126.

- SIEFFERMANN (G.), MILLOT (G.), 1968. L'halloysite des sols jeunes sur basaltes récents du Centre Cameroun. Bull. Gr. Fr. Argiles, XX, 1: 25-38.
- SIEFFERMANN (G.), 1969. Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Thèse. Fac. Sc. Univ. Strasbourg, 290 p. multigr.
- Tercinier (G.), Quantin (P.), 1968. Influence de l'altération de cendres et ponces volcaniques d'âge récent sur la nature, les propriétés et la fertilité des sols aux Nouvelles-Hébrides. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., VI, 2: 203-224.
- U.S.D.A., 1960-1967. Soil Classification. A Comprehensive system. 7th Approximation USDA. Soil Survey Staff, VI, 265 p. + suppl. 1964 non paginé, 1967, VI, 207 p.
- Warden (A.J.), 1967. The geology of the Central Islands. New Hebrides Cond. Geol. Surv., Rep. nº 5. Port Vila, 108 p.
- Warden (A.J.), 1968. Annual Report for the year 1966, New Hebrides Cond. Geol. Surv., 60 p.
- YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962a. Allophane in some Ando Soils. Soil Sci. Plant Nutrit., 8, 2: 6-13.
- YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962b. Imogolite in some Ando Soils. Soils Sci. Plant Nutrit., 8, 3: 114-121.

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. X, nº 3, 1972 : 207-217.





Pнотоs 3 et 4(1), nº 2332. Horizon (В): Andosol fortement désaturé sur cendres basaltiques ; allophanes alumineuses et fibres analogues à de l'imogolite ; rares minéraux argileux (kaolinite et halloysite).

Cliché G. Sieffermann, Inst. Géol. Strasbourg.



 $^{\circ}$ Рнотоs 5 (2), $^{\circ}$ 1544. Horizon II (B), sol brun eutrophe tropical andique. Halloysite en tubes et glomérules écailleux.

cliché G. Sieffermann. Inst. Géol Strasbourg.

- (1) Ces deux photos font référence à l'article précédent de l'auteur, Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. X, nº 2, 1972, 148.
- (2) La photo 5 illustre la minéralogie des sols bruns.

— Annexes sur les méthodes utilisées

Classification et nomenclature des sols

Les noms de sols utilisés se réfèrent aux classifications pédologiques de G. AUBERT (1965) et du CPCS (1967). Quelques légères modifications ont été apportées au sujet des andosols et des sols andiques.

Minéralogie

L'analyse minéralogique a été faite sur la fraction de sol inférieure à deux microns, le plus souvent par diffraction de rayons X.

La majeure partie des échantillons (60) a été traitée au Centre de Sédimentologie et Géochimie de la Surface à Strasbourg. Les diagrammes de diffraction aux rayons X ont été obtenus par G. JEHL, G. SIEFFERMANN et P. QUANTIN. L'interprétation a été faite par H. PAQUET, G. SIEFFERMANN et P. QUANTIN. Une partie des extractions de la fraction inférieure à deux microns ont été obtenues par agitation ultrasonique. Certains andosols ont été traités préalablement par la méthode Ségalen d'extraction des substances amorphes pour essayer de mettre en évidence la présence d'argiles; mais le résultat obtenu n'est souvent pas excellent, car certaines argiles (halloysite, montmorillonite, vermiculite) et certains hydroxydes (goethite), à l'état finement cristallisé, peuvent être facilement dissous par cette méthode. Des observations de microscopie électronique ont été faites sur 7 échantillons par G. SIEF-FERMANN.

12 échantillons ont été analysés par diffraction de rayons X par J. PICKERING au laboratoire du CSIRO à Adélaïde (Australie).

Analyses physiques

Les analyses ont été faites, au laboratoire ORSTOM de Nouméa, sur le sol conservé humide et les résultats sont rapportés à la quantité de sol séché à 105 °C à l'étuve.

La granulométrie a souvent posé des problèmes, à cause de la difficulté à obtenir une bonne dispersion des andosols. On a toujours utilisé des sols conservés humides et préalablement traités par H_2O_2 pour les débarrasser d'une grande part de leur matière organique. La plupart ont subi une agitation aux ultrasons de quelques minutes. Tous les sols Peu Evolués, pauvres en hydroxydes, et les sols riches en argiles (Bruns-eutrophes) se sont bien dispersés en présence d'hexamétaphosphate de sodium. Par contre les Andosols, et surtout ceux qui sont oligo-

trophes et riches en hydroxydes, n'ont pu être correctement dispersés par l'hexamétaphosphate de sodium. Après une désaturation cationique par HCL (N/20), un pH optimum de dispersion a été recherché: pour les sols riches en silice (Andosols eutrophes), le pH nécessaire a été variable: alcalin, acide, ou les deux; pour les sols riches en hydroxydes d'aluminium et de fer, le pH a été le plus souvent acide variant de 2 à 3 pour les Andosols fortement désaturés et très alumineux, et de 3 à 4,5 pour les andosols moyennement désaturés. Certains andosols ont présenté deux zones de dispersion l'une acide et l'autre basique.

Analyses chimiques

Les analyses ont été faites au laboratoire ORSTOM de Nouméa sur sol séché à l'air et rapportées au poids de sol séché à l'air.

Carbone: méthode d'Anne.

Azote: méthode Kjeldahl.

Bases échangeables et capacité d'échange de cations: extraction à l'acétate d'ammonium neutre, dosage de N par KJELDAHL, de Ca et Mg par complexométrie, de Na et K par spectrophotométrie de flamme.

Sur les Andosols et sols Bruns eutrophes, la capacité d'échange a été dosée comparativement sur le sol séché à l'air et sur sol conservé humide. Dans les sols Bruns eutrophes la capacité d'échange est un peu plus élevée dans l'échantillon humide que dans le sol sec. Dans les Andosols oligotrophes, très humides, la mesure de capacité d'échange varie fortement sur l'échantillon humide : certaines mesures étaient deux à trois fois plus élevées sur sol sec, d'autres deux fois plus basses ; aucune conclusion n'a été tirée de cette étude.

Phosphore assimilable: extraction par méthode Truog.

Analyse totale: attaque par HCLO₄.

Substances amorphes

La méthode chimique d'extraction utilisée a été celle de P. SÉGALEN (1968). Les analyses ont été faites au laboratoire ORSTOM de Bondy. Les résultats sont rapportés au poids de sol séché à 105 °C à l'étuve. L'interprétation prête à discussion, car il est fort probable qu'une partie des argiles finement cristallisées a été dissoute sans qu'il soit possible de la distinguer de celle à attribuer aux substances amorphes. Une étude complémentaire sur ce sujet est en cours.