

- McIntosh, P.D., Eden, D.N. and Burgham, S.J., 1990. Quaternary deposits and landscape evolution in northeast Southland, New Zealand. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, 81: 95–114.
- Milne, J.D.G., Clayden, B., Singleton, P.L. and Wilson, A.D., in press. Soil Description Handbook. DSIR Land Resources, Report.
- N.Z. Soil Bureau, 1968. Soils of South Island, New Zealand. N. Z. Soil Bur. Bull., 27: 404 pp.
- N.Z. Meteorological Service, 1983. Summaries of climatological observations to 1980. N. Z. Meteorol. Serv. Misc. Publ., 177: 172 pp.
- Parfitt, R.L., Saigusa, M. and Eden, D.N., 1984. Soil development processes in an Aqualf-Ochrept sequence from loess with admixtures of tephra, New Zealand. *J. Soil Sci.*, 35: 625–640.
- Smalley, I.J. and Davin, J.E., 1982. Fragipan horizons in soils: a bibliographic study and review of some of the hard layers in loess and other materials. N.Z. Soil Bur. Bibl. Rep., 30: 122 pp.
- Soil Survey Staff, 1990. Keys to Soil Taxonomy, 4th ed. SMSS Tech. Monogr., 6. Blacksburg, VA, 422 pp.
- Taylor, N.H. and Pohlen, I.J., 1968. Soils of New Zealand. Part 1. N.Z. Soil Bur. Bull., 26(1): 142 pp.
- Wood, B.L., 1966. Geological Map of New Zealand 1:250,000. Sheet 24, Invercargill. DSIR, Wellington, New Zealand.

Premiers stades d'altération de ponces volcaniques en climat tropical humide (Montagne Pelée, Martinique)

P. Quantin^a, J. Balesdent^b, A. Bouleau^a, M. Delaune^a et C. Feller^c

^aORSTOM, 70-74 Route d'Aulnay, 93140 Bondy, France

^bINRA, Station de Science du Sol, Route de Saint-Cyr, 78026 Versailles Cédex, France

^cORSTOM, c/o CPB-CNRS, B.P. 5, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cédex, France

(Reçu le 26 juin 1989; accepté après révision le 31 janvier 1991)

ABSTRACT

Quantin, P., Balesdent, J., Bouleau, A., Delaune M. et Feller C., 1991. Premiers stades d'altération de ponces volcaniques en climat tropical humide (Montagne Pelée, Martinique) [First stages of volcanic pumices weathering under a humid tropical climate (Montagne Pelée, Martinique)]. *Geoderma*, 50: 125–148.

The early stages (0–2000 years) of soil development on dacito-andesitic pyroclasts in the humid tropics were studied in a chronosequence made of three main deposits, dated 48 BP, 650 BP and 1670 BP, respectively, which cover the massif of Montagne Pelée (Martinique). The initial pumices are essentially glassy, rich in silicon and aluminium, calcium and sodium. The nature of secondary products was investigated through particle-size fractionation, elemental analysis, selective dissolution of amorphous products, differential thermal analysis, XR diffraction and electron microscopy. Within this period, the weathered horizon reached a depth of 30 to 50 cm. The median size of particles decreased from approximately 2 mm (48 BP) to 0.2 mm (1670 BP). The mass of secondary products was estimated to be 1–2% in the youngest soil (48 BP) and approximately 10% in the oldest one (1670 BP). Seventy percent of the secondary products were found in particles finer than 20 µm. These products are aluminium-rich and mainly composed of allophanic products. Low quantities of clay minerals were detected, mainly microspheric halloysite.

RÉSUMÉ

Les premiers stades de différenciation de profils de sols développés sur matériaux pyroclastiques dacito-andésitiques sont étudiés, en climat tropical humide, dans une chronoséquence, à partir de trois dépôts du massif de la Montagne Pelée (Martinique), datés respectivement de 48, 650 et 1670 ans BP. Les ponces initiales sont essentiellement vitreuses, riches en Si et Al, Ca et Na. Les constituants secondaires sont étudiés sur différentes fractions granulométriques par analyse élémentaire, dissolution sélective des produits amorphes, analyse thermique différentielle, diffractométrie RX et microscopie électronique. En 1700 ans, l'horizon d'altération atteint une profondeur de 30 à 50 cm, le diamètre médian des particules décroît approximativement de 2 mm (48 BP) à 0.2 mm (1670 BP) et la masse des constituants secondaires croît

Agg

environ de 1–2% (48 BP) à 10% (1670 BP), 70% de ceux-ci étant retrouvés dans les particules de tailles inférieures à 20 μm . Les constituants secondaires, riches en Al, sont principalement composés de produits allophaniques. De faibles quantités de minéraux argileux sont détectées, essentiellement sous forme d'halloysite microsphérique.

INTRODUCTION

La Montagne Pelée en Martinique (Petites Antilles) a eu, depuis les quatre derniers millénaires, une quinzaine d'épisodes éruptifs, qu'une équipe du Bureau de la Recherche Géologique et Minière a étudié et daté (Westercamp, 1972; Bellon et al., 1974; Traineau, 1982). Six d'entre eux, dont l'âge varie de 4060 à 20 BP, ont donné lieu à des dépôts pyroclastiques de grande étendue, et portent les sols actuels du massif. Ainsi cette série de dépôts, dont les caractéristiques minéralogiques et pétrographiques sont presque constantes, pourrait constituer une chronoséquence de sols, sous réserve de considérer l'effet des autres facteurs d'évolution des sols (climat, topographie, érosion) identique pour toutes les situations choisies, dans l'intervalle de temps considéré. Or, en milieu volcanique insulaire, compte-tenu des variations climatiques spatiales très rapides, de l'importance des phénomènes d'érosion, de topographies mouvementées et de la variabilité du chimisme des dépôts volcaniques, il est rare de rencontrer des situations adaptées à une véritable étude de chronoséquence. La majorité des travaux dans la littérature sur ce sujet concernent, le plus souvent, des chrono- et topo-climoséquences où les seuls effets de l'âge du sol sont difficiles à isoler des effets du climat, de la topographie ou de la roche-mère.

L'objectif de ce travail a donc été d'identifier des situations pédologiques dans le Massif de la Montagne Pelée se rapprochant d'une véritable chronoséquence de sols (pluviométrie et topographie identiques, érosion limitée) afin d'étudier les premiers stades d'altération des ponces sous un climat tropical humide.

MATERIEL ET METHODES

Dépôts pyroclastiques

Les quatre premiers épisodes principaux sont des éruptions de ponces dacito-andésitiques blanches se traduisant, entre autre, par le dépôt d'un nuage de cendres et de ponces de taille millimétrique à pluricentimétrique, dit dépôt plinien. Ces dépôts (que nous étudions ici) couvrent une étendue de 10 à 15 km de rayon autour du cratère. Leur puissance varie de quelques centimètres sur le littoral, à quelques mètres près du cratère. Ces éruptions ont été datées au radiocarbone de bois calcinés et dénommées par Traineau (1982):

P5=4060 \pm 90 BP*, P3=2010 \pm 140BP, P2=1670 \pm 40BP et P1=650 \pm 20BP.

*BP="Before Present" où Present désigne l'année 1950.

Les deux derniers épisodes sont des nuées ardentes ayant donné lieu à des écoulements de blocs d'andésite grise massive ou scoriacée, accompagnées de nuages cendres déferlants dont la puissance est du même ordre de grandeur que celle des pliniens précédents, mais dont l'étendue est moindre. Il s'agit des éruptions de 1902 (48 BP), qui détruisit la ville de Saint-Pierre, et de 1929 (21 BP).

La Figure 1 donne la répartition spatiale des dépôts pliniens et des nuages cendres déferlants. Le plinien P5 a approximativement la même étendue que P3. Ni l'un ni l'autre n'ont été rencontrés à l'affleurement dans le Massif. La présente étude porte donc sur les dépôts de 1670 BP (P2), de 650 BP (P1) et de 48 BP (éruption de 1902), sur lesquels la quasi-totalité des horizons A actuels des sols du massif est développée.

Sols étudiés

Les sols sont tous du type "Sols peu évolués sur cendres et ponces" (Colmet-Daage et Lagache, 1965); ils sont apparentés aux "andosols vitriques"

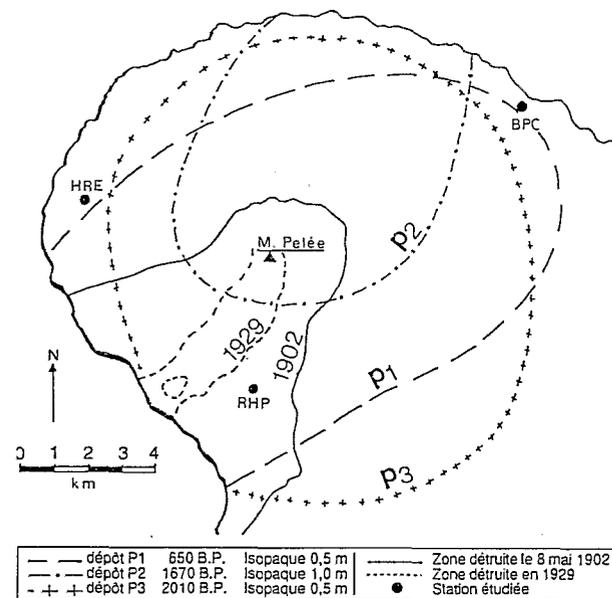


Fig. 1. Extension des principaux dépôts récents de la Montagne Pelée (d'après Traineau, 1982) et localisation des stations étudiées.

Fig. 1. Extension of the main recent deposits of the Montagne Pelée (after Traineau, 1982) and localization of studied sites.

(Groupe de Travail Andosols, 1972; Leamy, 1987), leur produit d'altération étant un complexe allophanique. Leur profil est de type A/C avec une transition A-C nette située entre 15 et 40 cm, déplacée éventuellement par le labour. La texture est sableuse grossière à graveleuse, avec toujours moins de 5% de particules inférieures à 2 μm . Les pH en surface sont de 5 à 6. Tous les sols sont parfaitement drainants.

Les stations retenues pour les trois dépôts (48 BP, 650 BP et 1670 BP) sont localisées sur la Fig. 1. Une coupe schématique des profils est présentée en Fig. 2.

Toutes les stations sont choisies en situation plane, afin d'éviter les phénomènes d'érosion et des apports par colluvionnement. Elles reçoivent toutes une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 2000 et 2500 mm, ce qui correspond à l'altitude de 50 m sur le flanc Est de la Montagne Pelée et à 200–250 m sur le flanc Ouest (côte sous le vent). On distingue les stations suivantes:

- Station 48 BP. Profil RHP. Altitude 240 m. Forêt secondaire. Sol sur 50 cm de cendres et ponces. Profil peu différencié. Horizon A non mélanisé (7.5YR 5/3). Horizon C, gris, de cendres non altérées.
- Station 650 BP. Profil HRE. Altitude 220 m. Forêt secondaire. Sol sur 60 cm de ponces, recouvert par 15 cm de cendres fines de 48 BP dont il ne sera pas tenu compte ici. Horizon A mélanisé, très sombre (7.5YR 4/2 à 2/2). Horizon C de ponces très claires, peu altérées. La transition A-C est légèrement rougeâtre, coloré par des oxyhydroxydes de fer.
- Station 1670 BP. Profil BPC. Altitude 50 m. Cultures d'ananas. Sol sur 60

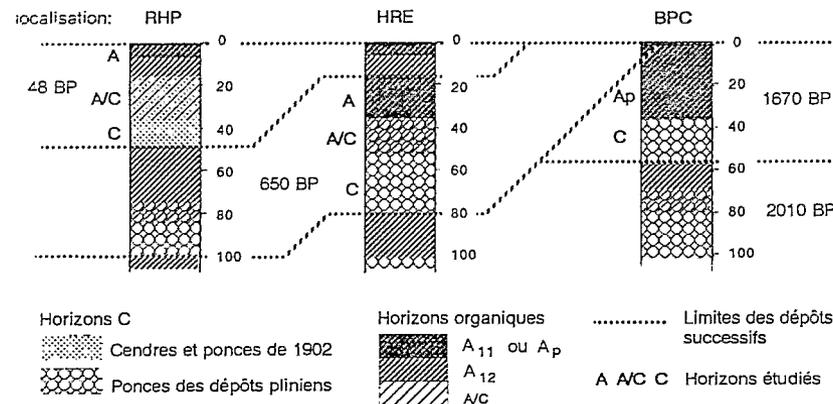


Fig. 2. Profil schématique des trois sols étudiés.

Fig. 2. Schematic profile of the three studied soils.

cm de ponces. Il n'a pas été mis en évidence d'apport de ponces de 650 BP. Horizon Ap (dû au travail du sol jusqu'à 40 cm) mélanisé (7.5YR 4/2). Horizon C de ponces très claires identique à celui de 650 BP.

Méthodes d'analyse

Les fractions granulométriques inférieures à 2 mm sont séparées par tamisage et sédimentation après traitement par H_2O_2 , dispersion par NH_4OH et agitation ultrasonique.

Le carbone organique est déterminé par combustion sous oxygène et dosage chromatographique du CO_2 (autoanalyseur CHN).

L'analyse élémentaire des lapilli de tailles supérieures à 1 cm est obtenue par dosage en absorption atomique de l'extrait global par fusion au métaborate de strontium.

L'analyse élémentaire des autres fractions (inférieures ou supérieures à 2 mm) des sols est effectuée sur deux phases, (i) une phase solubilisée par attaque "triacide" (qui inclut les produits d'altération et une partie des verres), (ii) une phase résiduelle, dissoute ensuite par HF-HClO_4 (qui concerne les minéraux primaires les plus stables). On ne distinguera pas ici ces deux phases mais les analyses élémentaires totales, présentées pour les sols 0–2 mm et les fractions granulométriques sont calculées à partir des sommes pondérées des phases solubles et résiduelles de l'attaque "triacide". K_i est le rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Les constituants "amorphes" sont déterminés par une méthode de dissolution par HCl 4N adaptée de Ségalen (1968): 1 g d'échantillon (sol ou fraction granulométrique) non broyé (ou faiblement broyé pour des fractions inférieures à 20 μm) est traité par 50 ml de HCl (4N) pendant 30 min. Après centrifugation, séparation d'un culot et d'un surnageant, Si, Al et Fe en solution sont dosés par colorimétrie (à pH ajusté) sur Technicon. L'opération est reproduite successivement 8 fois sur le même échantillon avec de nouveaux réactifs. On établit ainsi une courbe cumulative des éléments Al, Fe, Si extraits à chaque opération, exprimés en oxyde. Par détermination graphique (Fig. 3), on distingue pour chaque oxyde, une phase dite très soluble (ts) et une phase lentement soluble (ls). La phase "ts" est considérée comme représentant les constituants "amorphes" et para-cristallins de l'échantillon et la phase "ls" les constituants cristallisés (Quantin et Bouleau, 1983). Dans la suite de ce texte, on utilisera l'un ou l'autre de ces vocables ("produits très solubles" ou "amorphes", "produits lentement solubilisés" ou produits "cristallins"). On définit des taux d'extraction, $\Sigma \text{ts} \%$ et $\Sigma \text{ls} \%$, des quantités totales ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) solubilisées dans les phases ts et ls, ainsi qu'un facteur de solubilisation (f) représentant le rapport $\Sigma \text{ts}/\Sigma \text{ls}$.

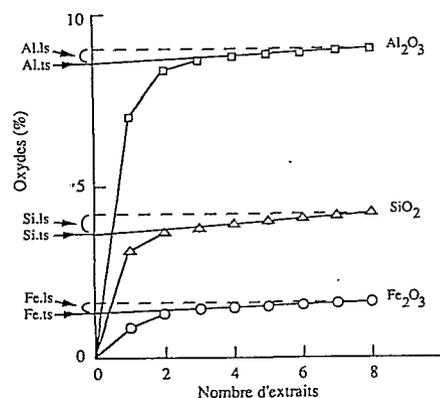


Fig. 3. Exemple de détermination graphique des teneurs en produits "très solubles" (ts) et "lentement solubles" (ls) obtenus par dissolution cinétique à HCl (4N). Sol 1670 BP, horizon C.

Fig. 3. Example of graphic determination of the "very soluble" (ts) and "slightly soluble" (ls) products obtained by kinetic dissolution with HCl (4N). Soil 1670 BP, C horizon.

La minéralogie est étudiée par diffractométrie RX (Co, $K\alpha$) sur poudres, par microscopie électronique en transmission (MET) et analyse thermique différentielle (ATD).

RESULTATS

Les matériaux originels. Etude les lapilli ponces centimétriques

La composition exacte des matériaux originels est difficile à connaître, aucun de ces dépôts n'ayant été strictement conservé dans son état initial. Toutefois, cette composition initiale peut être approchée par l'analyse de ponces grossières apparaissant peu altérées sur le terrain. Ces lapilli grossiers ont été prélevés dans différents horizons des dépôts de 48 BP, 650 BP et 1670 BP.

Pétrographie

Les lapilli grossiers, observés en microscopie optique présentent une composition peu variable, proche des dacites andésitiques. On observe essentiellement:

- une pâte vitreuse claire intégrant des microlites de plagioclases calco-sodiques (albite, oligoclase, andésine), de magnétite, de pyroxènes et parfois de cristobalite;

- des phénocristaux de plagioclases (surtout calciques), des pyroxènes constitués surtout d'hypersthène, et des traces d'augite. Absence ou traces de quartz et d'amphiboles.

Dans les lapilli de 1670 BP, on note un début d'altération à la surface des verres et au cœur des plagioclases (transformation partielle d'augite en épidote, diffusion du fer dans les fissures et à la périphérie de l'augite). Ces phénomènes sont encore peu visibles pour les lapilli de 650 BP. Enfin, les lapilli de 48 BP sont formés essentiellement de ponces dacitiques fraîches, inaltérées (correspondant à la venue magmatique de 48 BP) et de fragments de lave plus andésitique, déjà un peu altérée, provenant probablement d'une éruption antérieure, et reprise lors de l'explosion péleenne de 48 BP.

Analyse élémentaire

L'analyse élémentaire des lapilli ponces centimétriques (Tableau 1) montre une assez bonne homogénéité des matériaux des trois éruptions successives. Leur composition très siliceuse ($SiO_2 = 64.4 \pm 2\%$), alumineuse et calco-alcaline, les apparente tous à des dacites (champ A7, selon la classification de Rittmann, 1963). Les moins siliceux d'entre eux sont à la limite des andésites "acides" (Fichaut, 1986) et des andésites étudiées par Traineau (1982) provenant des brèches des mêmes éruptions. Notons que ces produits sont riches en Al_2O_3 (17 à 19%), en CaO (5 à 6.5%) et en Na_2O (3 à 3.5%). Les rapports K_i varient de 5.4 à 6.6.

Les faibles variations de composition entre les ponces grossières des horizons A et C d'une part, et celles de 48 BP, 650 BP ou 1670 BP d'autre part, confirment la faible altération des matériaux initiaux. On doit tout de même noter que:

(a) les teneurs en CaO et MgO sont plus faibles pour les ponces de 650 BP et 1670 BP que pour celles de 48 BP, mais il est difficile d'attribuer ces variations à des compositions différentes de matériau originel ou à une évolution pédogénétique;

(b) les pertes au feu (H_2O^+) des lapilli des horizons A sont, d'une part plus élevées que celles des horizons C correspondants et que d'autre part, elles augmentent avec l'âge du matériau: 0 à 1% pour 48 BP, 2 à 3% pour 650 BP et 3.8 à 5.7% pour 1670 BP. Ces pertes au feu sont très élevées relativement au pourcentage de fraction argileuse. Elles sont à attribuer, probablement, à la présence de produits allophaniques. En effet:

- le diagramme ATD, après destruction de la matière organique de la fraction 0–20 μm du sol 1670 BP (Fig. 4), est caractéristique de l'allophane avec un fort endotherme entre 50 et 300°C et une perte continue par déshydroxylation entre 300 et 600°C (Wada, 1977);
- la diffraction RX (Tableau 3) ne met en évidence que des traces de minéraux argileux.

TABLEAU 1

Analyse chimique totale effectuée sur des lapilli (tailles centimétriques) et de la terre fine (0-2 mm) des sols.

| Matériau/Élément | Dépôt: 48 BP | | | | 650 BP | | | 1670 BP | | Moyenne** |
|--|--------------|------|-------|------|--------|------|------|---------|-------|-----------|
| | Horizon: A | | A/C C | | A | A/C | C | Ap | C | |
| Lapilli ponceux (> 1 cm) | | | | | | | | | | |
| Nature* | p | p | p | c | p | p | p | p | p | |
| Total oxydes | 98.4 | 99.4 | 99.5 | 98.5 | 95.8 | 97.2 | 95.8 | 92.2 | 95.5 | |
| H ₂ O ⁻ (100°C) | 0.19 | 0.08 | 0.03 | 0.11 | 0.51 | 0.35 | 0.22 | 1.90 | 1.15 | |
| H ₂ O ⁺ (1000°C) | 0.98 | 0.10 | 0.01 | 0.41 | 2.94 | 1.93 | 2.13 | 5.65 | 3.78 | |
| Total dosé | 99.5 | 99.6 | 99.5 | 99.0 | 99.3 | 99.5 | 98.1 | 99.7 | 100.4 | |
| Teneurs en oxydes, normalisées à 100% | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 62.9 | 64.3 | 62.6 | 60.9 | 66.4 | 64.9 | 66.2 | 62.8 | 65.1 | 64.4 |
| Al ₂ O ₃ | 18.1 | 17.8 | 18.2 | 19.2 | 17.2 | 17.8 | 17.6 | 19.7 | 19.1 | 18.2 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.2 | 1.9 | 2.0 | 1.9 | 1.5 | 1.7 | 1.3 | 1.8 | 1.6 | 1.7 |
| FeO | 3.5 | 3.4 | 3.9 | 4.1 | 3.3 | 3.2 | 3.1 | 3.5 | 2.8 | 3.4 |
| TiO ₂ | 0.48 | 0.43 | 0.49 | 0.50 | 0.46 | 0.45 | 0.42 | 0.50 | 0.44 | 0.46 |
| MnO | 0.14 | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.10 | 0.14 | 0.10 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| CaO | 6.2 | 5.9 | 6.3 | 6.9 | 5.0 | 5.7 | 5.3 | 5.4 | 5.2 | 5.6 |
| MgO | 1.91 | 1.65 | 1.96 | 2.05 | 1.25 | 1.40 | 1.06 | 1.54 | 1.01 | 1.47 |
| K ₂ O | 1.01 | 1.03 | 0.93 | 0.88 | 1.18 | 1.03 | 1.15 | 0.98 | 1.08 | 1.05 |
| Na ₂ O | 3.5 | 3.4 | 3.4 | 3.3 | 3.5 | 3.5 | 3.7 | 3.4 | 3.6 | 3.5 |
| P ₂ O ₅ | 0.08 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0.07 | 0.13 | 0.12 | 0.09 |
| K _i | 5.9 | 6.1 | 5.9 | 5.4 | 6.6 | 6.2 | 6.4 | 5.4 | 5.8 | 6.0 |
| Terre fine (0 à 2 mm) | | | | | | | | | | |
| Total oxydes | 93.3 | 97.2 | 97.6 | | 96.6 | 97.8 | 97.9 | 90.2 | 97.0 | |
| H ₂ O ⁺ (1000°C) | 5.4 | 1.8 | 1.3 | | 2.7 | 1.2 | 1.1 | 9.5 | 2.4 | |
| Total dosé | 98.7 | 99.0 | 99.0 | | 99.3 | 99.0 | 99.0 | 99.7 | 99.4 | |
| Teneurs en oxydes, normalisées à 100% | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 60.2 | 60.7 | 59.7 | | 57.1 | 57.3 | 27.8 | 58.4 | 58.7 | |
| Al ₂ O ₃ | 18.7 | 18.8 | 18.9 | | 20.3 | 20.4 | 19.3 | 20.1 | 18.9 | |
| Fe ₂ O ₃ | 8.2 | 7.8 | 7.9 | | 8.8 | 8.8 | 8.9 | 8.4 | 7.7 | |
| TiO ₂ | 0.46 | 0.43 | 0.43 | | 0.44 | 0.41 | 0.39 | 0.45 | 0.42 | |
| MnO | 0.27 | 0.26 | 0.25 | | 0.25 | 0.29 | 0.27 | 0.26 | 0.22 | |
| CaO | 5.0 | 4.9 | 5.1 | | 5.2 | 5.4 | 5.8 | 5.8 | 7.0 | |
| MgO | 2.8 | 2.9 | 3.1 | | 3.7 | 3.5 | 3.5 | 3.1 | 2.9 | |
| K ₂ O | 0.91 | 0.83 | 0.95 | | 0.69 | 0.63 | 0.63 | 0.67 | 0.80 | |
| Na ₂ O | 3.4 | 3.4 | 3.6 | | 3.5 | 3.3 | 3.3 | 2.8 | 3.4 | |
| K _i | 5.5 | 5.5 | 5.4 | | 4.8 | 4.8 | 5.1 | 4.9 | 5.3 | |

*p=ponce, c=cendre.

**Moyenne des 8 échantillons (sans l'échantillon de cendre).

Les sols

Granulométrie et teneurs en matière organique

On observe (Tableau 2 et Fig. 5) que la granulométrie est toujours plus fine dans les horizons A que dans les horizons C correspondants, et plus fine

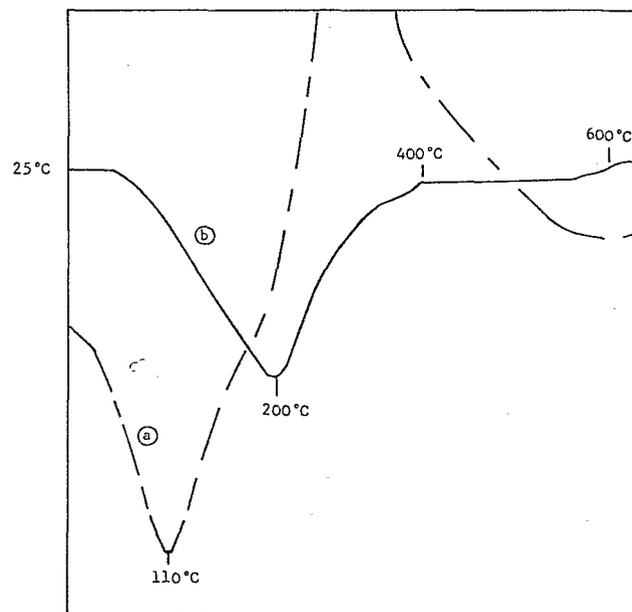


Fig. 4. Courbes ATD d'une fraction 0-20 µm (sol 1670 BP, horizon C) avant (a) et après (b) traitement H₂O₂.

Fig. 4. DTA curves of a 0-20 µm fraction (soil 1670 BP, C horizon) before (a) and after (b) H₂O₂ treatment.

TABLEAU 2

Distribution granulométrique des particules après attaque H₂O₂ en pourcentage du sol minéral total. Carbone organique en mg (g sol)⁻¹ (0-2 mm).

| Fraction | Dépôt: 48 BP | | | 650 BP | | | 1670 BP | |
|------------------------------------|------------------|------|------|--------|------|------|---------|------|
| | Horizon: A | | C | A | A/C | C | Ap | C |
| | Profondeur (cm): | | | | | | | |
| 0 à 0.02 mm (%)* | 9.6 | 1.6 | 0.5 | 11.6 | 4.9 | 4.3 | 24.9 | 8.5 |
| 0.02 à 0.05 mm (%) | 3.6 | 1.2 | 0.5 | 3.9 | 1.0 | 1.2 | 7.9 | 3.5 |
| 0.05 à 2 mm (%) | 64.2 | 62.1 | 68.2 | 66.5 | 61.8 | 54.2 | 49.7 | 34.6 |
| Supérieure à 2 mm (%) | 22.6 | 35.1 | 30.8 | 18.0 | 32.3 | 40.3 | 17.6 | 53.5 |
| Carbone mg (g sol) ⁻¹ * | 26 | 2 | 4 | 7.8 | 2.6 | 1.2 | 37 | 3 |

*Sol ou fraction séchés à 105°C.

pour les sols âgés que pour les sols jeunes. Les teneurs en éléments fins (0-20 µm) sont respectivement égales à 9.6, 11.6 et 24.9% pour les horizons A de 48 BP, 650 BP et 1670 BP. On remarquera (Fig. 5) que l'accroissement de

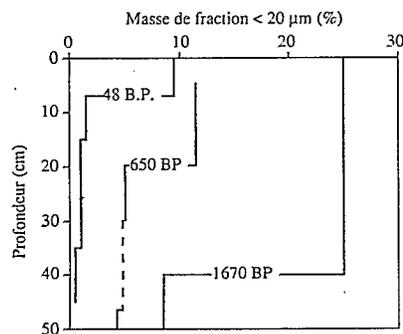


Fig. 5. Profils du pourcentage pondéral de la fraction 0–20 µm des sols.

Fig. 5. Variations with depth of the 0–20 µm soil s fraction (weight in percent).

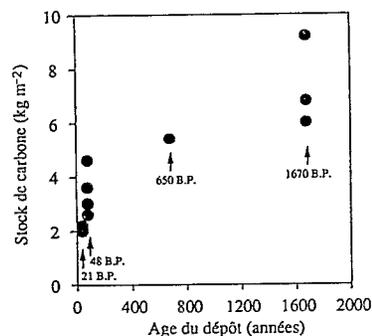


Fig. 6. Représentation du stock (kg/m^2) de carbone organique de l'horizon A de dix sols de la chronoséquence.

Fig. 6. Representation of the A horizon organic carbon stock for ten soils of the chronosequence.

cette fraction, en fonction du temps (en particulier pour les horizons A) est bien supérieur de 650 BP à 1670 BP que de 484 à 650 BP. Les sols conservent cependant une texture sableuse, puisque les tailles médianes des particules du sol 0–2 mm au maximum, sont restées supérieures à 200 µm.

Les teneurs en carbone organique (Tableau 2) sont plus élevées en surface qu'en profondeur, et plus élevées dans le sol de 1670 BP. Le sol de 650 BP se prête mal à la comparaison car il a été recouvert de 20 centimètres de cendres en 1902 et son horizon A n'a plus été alimenté en apports organiques depuis. Par ailleurs les teneurs en matière organique de ces sols sont dépendantes de la production végétale et de leur mode d'incorporation au sol. C'est plutôt au niveau régional que l'on observe l'augmentation du stock organique avec l'âge

du dépôt. En effet, la Figure 6 où sont présentés les stocks de carbone organique contenus dans l'horizon A de dix sols du massif, montre que les stocks, déjà élevés dans les sols les plus jeunes (2.5 à 4.5 kg/m^2 pour les sols de 48 BP) sont encore supérieurs pour les sols les plus âgés (jusqu'à 10 kg/m^2 pour les sols de 1670 BP).

Minéralogie

(a) *Terre fine* (0–2 mm). La diffraction RX (Tableau 3) confirme la grande similitude des minéraux cristallins des différents horizons et des différents sols: dominance de plagioclases (oligoclase surtout) et d'hypersthène, traces de quartz, de cristobalite, d'augite et de magnétite ou ilménite.

(b) *Fractions supérieures à 20 µm* (horizon A, sol 1670 BP). On retrouve, globalement, en microscopie optique, la composition décrite pour la terre fine avec les précisions suivantes: plagioclases dans toutes les fractions, pyroxènes surtout dans les fractions supérieures à 50 µm, cristobalite abondante dans la fraction 20–50 µm.

(c) *Fractions 0–20 µm*. Elles diffèrent pour les trois sols: – en diffraction RX (Tableau 3), les minéraux primaires (plagioclases) diminuent quand l'âge du sol augmente: dominants dans 48 BP, ils disparaissent pratiquement dans 1670 BP. A l'exception de traces d'un minéral argileux mal cristallisé (raie à 7 Å) dans 48 BP, on ne détecte pratiquement ni phyllo-silicates, ni oxyhydroxydes de fer dans 650 BP et 1670 BP;

TABLEAU 3

Etude par diffraction RX de la minéralogie des sols (0–2 mm) et des fractions 0–20 µm.

| Sol ou fraction | Situation | Horizon | Pl | Hy | A | Cr | Q | Ma | Ht | Am | |
|-----------------|-----------|---------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|---|
| 0–2 mm | 48 BP | A | +++ | + | tr | + | + | + | – | tr | |
| | | A/C | +++ | + | + | + | – | tr | – | tr | |
| | 650 BP | A/C | +++ | + | tr | tr | tr | tr | – | + | |
| | | C | ++ | tr | tr | + | tr | tr | – | + | |
| | 1670 BP | Ap | ++ | tr | tr | tr | tr | tr | tr | – | + |
| | | C | +++ | + | + | tr | tr | tr | – | tr | |
| 0–20 µm | 48 BP | A | ++ | – | – | ++ | tr | tr | + | ++ | |
| | | A/C | ++ | – | – | ++ | tr | tr | tr | ++ | |
| | 650 BP | A/C | + | – | – | + | tr | – | tr | +++ | |
| | | C | tr | – | – | tr | tr | – | tr | +++ | |
| | 1670 BP | Ap | tr | – | – | tr | tr | – | tr | +++ | |
| | | C | tr | – | – | tr | tr | – | tr | +++ | |

Abréviations: Pl=Plagioclase; Hy=Hypersthène; A=Augite – aegyrinique; Cr=Cristobalite; Q=Quartz; Ma=Magnétite–Ilménite, Ht=Halloysite, Am=produits "amorphes".
+++ = abondant; ++ = moyen; + = un peu; tr = traces.

TABLEAU 4

Analyse chimique totale des fractions granulométriques des sols.

| Élément | Dépôt: 48 BP | | | | 650 BP | | | | 1670 BP | | | | | |
|---|----------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|--|
| | Horizon: A | | A/C | | A | | C | | AP | | AP | | C | |
| | Fraction (µm): | | 0-20 | | 0-20 | | 0-20 | | 0-20 | | 0-20 | | 0-20 | |
| Total | 73.9 | 80.6 | 85.4 | 92.2 | 98.2 | 69.5 | 94.7 | 97.5 | 99.3 | 84.8 | 96.4 | 100.0 | 97.3 | |
| oxydes | 26.7 | 18.5 | 14.6 | 6.2 | 1.2 | 29.4 | 4.5 | 2.3 | 1.0 | 11.0 | 3.2 | 0.6 | 1.8 | |
| H ₂ O ⁺ | 100.6 | 99.1 | 100.0 | 98.4 | 99.4 | 98.9 | 99.2 | 99.8 | 100.3 | 95.8 | 99.6 | 100.6 | 99.1 | |
| Total dosé | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Teneurs en oxydes normalisées à 100%</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 61.91 | 59.55 | 65.10 | 69.88 | 60.16 | 61.53 | 67.27 | 60.82 | 54.62 | 63.14 | 64.00 | 53.96 | 61.19 | |
| Al ₂ O ₃ | 19.99 | 21.68 | 21.55 | 17.24 | 18.08 | 27.56 | 16.61 | 18.54 | 18.49 | 23.47 | 18.48 | 20.44 | 18.49 | |
| Fe ₂ O ₃ | 7.09 | 7.69 | 4.92 | 4.12 | 6.61 | 5.47 | 6.02 | 7.04 | 10.89 | 5.02 | 5.67 | 9.31 | 6.56 | |
| TiO ₂ | 0.41 | 0.36 | 0.29 | 0.26 | 0.37 | 0.35 | 0.40 | 0.43 | 0.48 | 0.26 | 0.40 | 0.43 | 0.36 | |
| MnO | 0.20 | 0.19 | 0.13 | 0.10 | 0.21 | 0.20 | 0.17 | 0.21 | 0.34 | 0.13 | 0.18 | 0.38 | 0.24 | |
| CaO | 4.36 | 4.33 | 3.00 | 3.13 | 6.39 | 1.77 | 4.54 | 6.21 | 7.27 | 2.97 | 5.74 | 7.69 | 6.72 | |
| MgO | 1.95 | 1.69 | 0.95 | 0.61 | 2.20 | 0.76 | 1.64 | 2.49 | 4.55 | 0.86 | 1.41 | 4.07 | 2.24 | |
| K ₂ O | 1.14 | 1.43 | 1.18 | 0.72 | 0.45 | 0.83 | 0.39 | 0.58 | 0.29 | 0.60 | 0.49 | 0.50 | 0.61 | |
| Na ₂ O | 2.95 | 3.09 | 2.87 | 3.95 | 3.73 | 1.52 | 2.96 | 3.68 | 3.05 | 3.54 | 3.64 | 3.23 | 3.61 | |
| Σ bases | 10.4 | 10.5 | 8.0 | 8.4 | 12.8 | 4.9 | 9.5 | 13.0 | 15.3 | 8.0 | 11.2 | 15.5 | 13.1 | |
| K _i | 5.3 | 4.7 | 5.1 | 6.9 | 5.6 | 3.8 | 6.9 | 5.6 | 5.0 | 4.6 | 5.9 | 4.5 | 5.6 | |

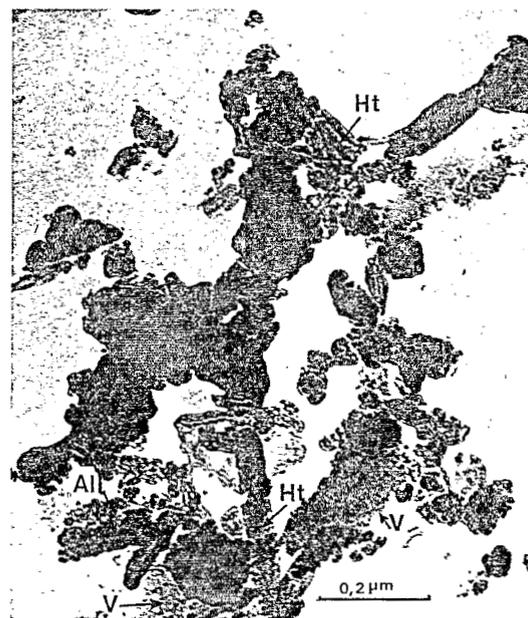


Fig. 7. Observation en MET de la fraction 0-20 µm (Horizon A, sol 1670 BP). All=allophane, V=verre altéré, Ht=halloysite.

Fig. 7. TEM observation of the 0-20 µm fraction (A horizon, soil 1670 BP). All=allophane, V=weathered glasses, Ht=halloysite.

– en MET (Fig. 7), on observe généralement des fragments de verres (ou frustules de diatomées) altérés en amas de granules (opale ou allophane), des traces d'halloysite microsphérique ou microtubulaire et des proportions variables de minéraux primaires. Les proportions relatives apparentes de minéraux primaires et de granules (allophanes) varient en sens inverse de 48 BP à 1670 BP.

Analyse élémentaire

(a) *Terre fine* (0-2 mm). L'analyse élémentaire de la terre fine est présentée au Tableau 1.

Les teneurs en SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ varient respectivement de 57.1 à 60.7%, de 18.8 à 20.4% et de 7.7 à 8.9%. Comparée aux lapilli ponceux (Tableau 1), la terre fine est un peu appauvrie en silice et enrichie en fer et aluminium, ce qui conduit à des K_i de la terre fine (4.8 à 5.5) systématiquement inférieurs à ceux des lapilli ponceux (5.4 à 6.6).

Les pertes au feu des horizons A sont élevées (2.7 à 9.5%), et systématique-

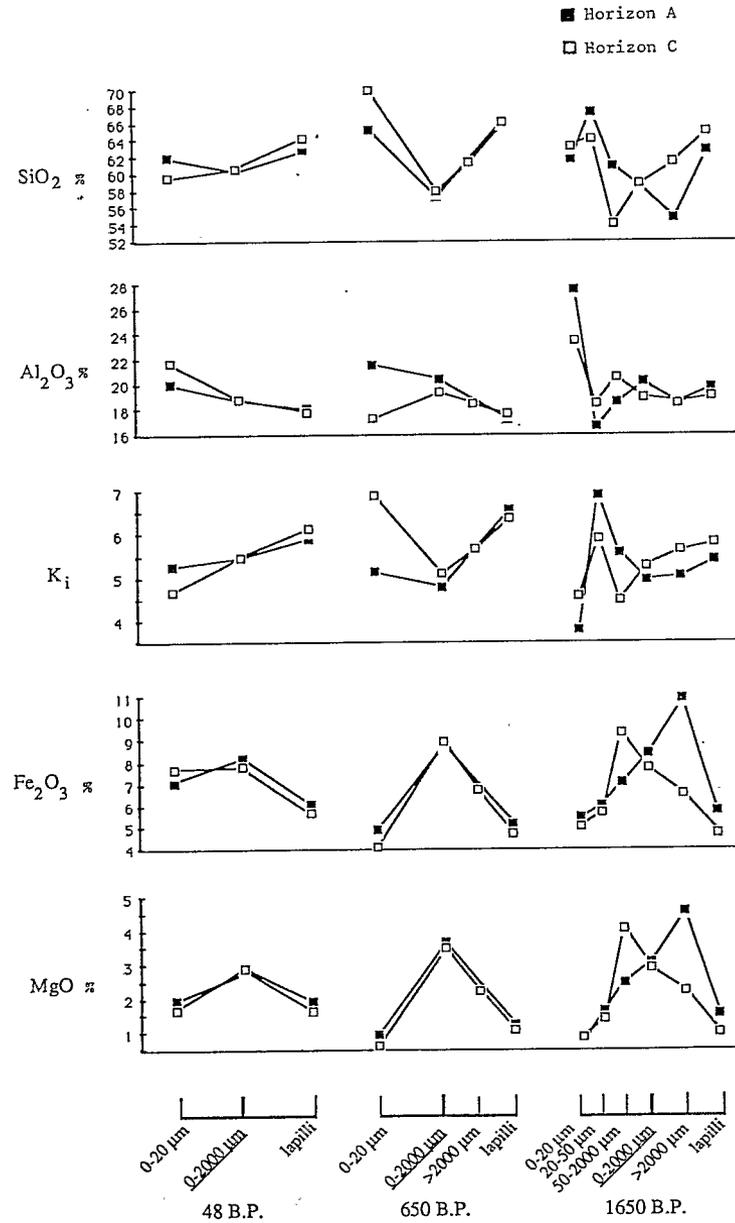


Fig. 8. Variations des teneurs en oxydes pour les lapilli, les sols (0-2 mm) et les fractions granulométriques. Résultats exprimés en pourcent des oxydes totaux de l'échantillon.

Fig. 8. Variations in oxides contents for the lapilli, the 0-2 mm soils and the size-fractions. Results expressed in percent of the total oxides of the sample.

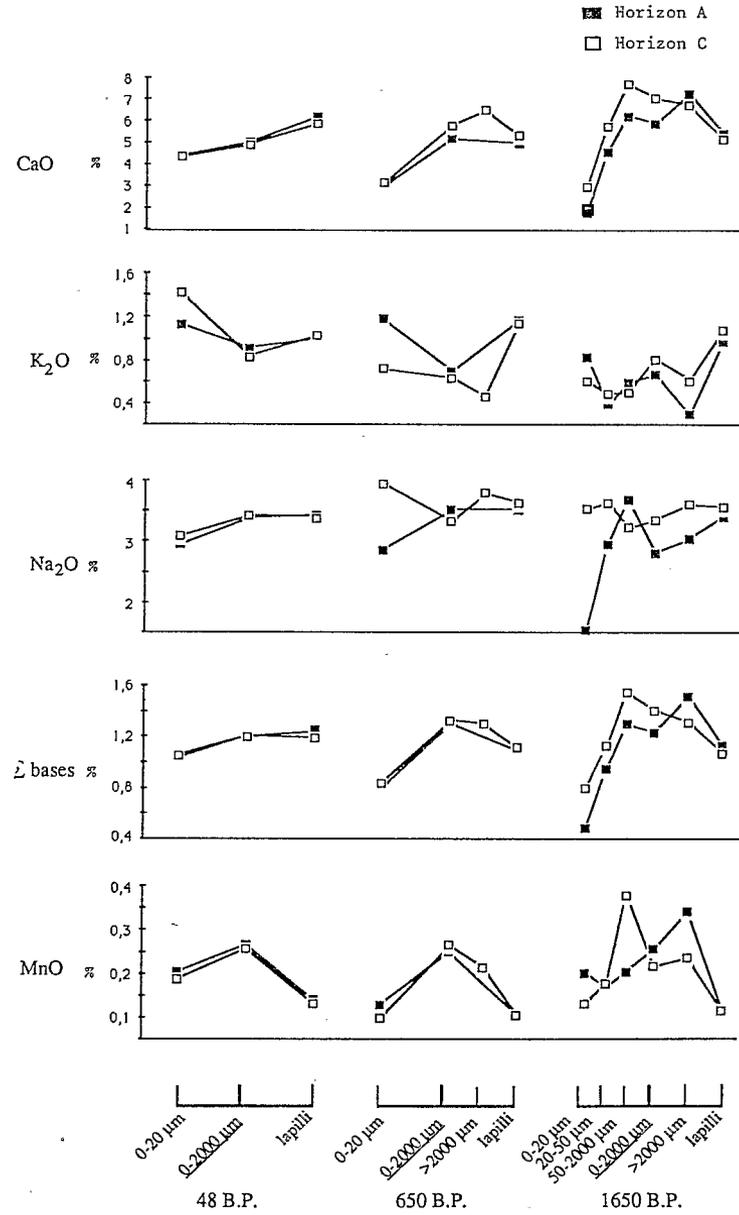


Fig. 8. Variations des teneurs en oxydes pour les lapilli, les sols (0-2 mm) et les fractions granulométriques. Résultats exprimés en pourcent des oxydes totaux de l'échantillon.

Fig. 8. Variations in oxides contents for the lapilli, the 0-2 mm soils and the size-fractions. Results expressed in percent of the total oxides of the sample.

TABLEAU 5

Réserve totale en bases (TRB) des sols et de différentes fractions granulométriques. Résultats exprimés en meq/100 g d'après les teneurs normalisées des Tableaux 1 et 2.

| Matériau | Dépôt: | 48 BP | | | 650 BP | | | 1670 BP | |
|--------------------------------|--------|----------|-----|-----|--------|-----|-----|---------|-----|
| | | Horizon: | A | A/C | C | A | A/C | C | Ap |
| Lapilli ponceux (≥ 1 cm) | | 223 | 204 | 227 | 172 | 194 | 172 | 193 | 168 |
| Fractions | | | | | | | | | |
| > 2 mm | | | | | | | 466 | 590 | 480 |
| 0.05 à 2 mm | | | | | | | | 476 | 591 |
| 0.02 à 0.05 mm | | | | | | | | 347 | 402 |
| 0 à 0.02 mm | | 372 | 368 | | 272 | | | 284 | 168 |
| Terre fine (0 à 2 mm) | | 446 | 446 | 473 | 496 | 484 | 501 | 465 | 519 |

TABLEAU 6

Produits solubilisés par cinétique de dissolution HCl (4N). Sols (0–2 mm). Expression en oxydes. K_1 = rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molaire.; Σ = somme $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$.

| Dépôt | Horizon | Produits solubilisés | | | | | | | | | | | |
|---------|---------|-------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------|---------------|-----------------------|----------------|
| | | Très solubles % * | | | | | Lentement solubles % * | | | | | Total solubilisé | |
| | | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | SiO_2 | Σts [1] | K_1 (ts) | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | SiO_2 | Σls [2] | K_1 (ls) | Σs [1]+[2] | f [1]/[2] |
| 48 BP | A | 0.45 | 0.28 | 0.07 | 0.80 | 0.3 | 0.08 | 0.13 | 0.12 | 0.33 | 2.6 | 1.13 | 2.4 |
| | A/C | 0.27 | 0.22 | 0.05 | 0.54 | 0.3 | 0.14 | 0.19 | 0.17 | 0.50 | 2.1 | 1.04 | 1.1 |
| | C | 0.18 | 0.07 | 0.10 | 0.35 | 1.0 | 0.35 | 0.11 | 0.20 | 0.66 | 1.0 | 1.01 | 0.5 |
| 650 BP | A | 0.94 | 0.23 | 0.36 | 1.53 | 0.7 | 0.35 | 0.16 | 0.17 | 0.68 | 0.9 | 2.21 | 2.3 |
| | A/C | 0.58 | 0.17 | 0.20 | 0.95 | 0.6 | 0.39 | 0.17 | 0.29 | 0.85 | 1.3 | 1.8 | 1.1 |
| | C | 0.39 | 0.08 | 0.15 | 0.62 | 0.7 | 0.30 | 0.12 | 0.24 | 0.66 | 1.4 | 1.28 | 0.9 |
| 1670 BP | A | 3.45 | 0.75 | 1.25 | 5.45 | 0.6 | 0.27 | 0.15 | 0.15 | 0.57 | 1.0 | 6.02 | 9.6 |
| | C | 1.35 | 0.23 | 0.55 | 2.13 | 0.7 | 0.29 | 0.15 | 0.18 | 0.62 | 1.1 | 2.75 | 3.4 |

*en % du sol 0–2 mm, séché à 105°C.

ment supérieures à celles des horizons C correspondants, les valeurs les plus élevées étant observées pour le sol 1670 BP. Dans le sol 48 BP, la terre fine présente des pertes au feu nettement plus élevées que celles des lapilli; pour les autres sols, ces variations ne sont pas systématiques.

(b) *Fractions granulométriques.* L'analyse élémentaire (Tableau 4) a été effectuée sur toutes les fractions granulométriques du sol de 1670 BP (0–20, 20–50, 50–2000 et > 2000 μm), sur les fractions 0–20 μm des sols de 48 BP et 650 BP, et sur la fraction > 2000 μm de l'horizon C du sol de 650 BP.

Les teneurs en SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 varient de façon importante d'une fraction à l'autre et d'un sol à l'autre sans qu'apparaissent nettement de variation ordonnée (Fig. 8). Il en est de même pour le rapport K_1 . La comparaison de

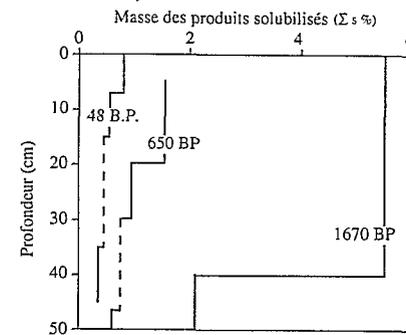


Fig. 9. Profils de la teneur en produits amorphes (Σts) des sols. Détermination par cinétique de dissolution avec HCl (4N). Expression en pourcent des oxydes totaux de l'échantillon.

Fig. 9. Variations with depth of the soils amorphous products (Σts). Determination by dissolution kinetic with HCl (4N). Results expressed in percent of the total oxides sum of the sample.

ces teneurs avec celles de la terre fine (0–2 mm) ou des lapilli ponceux n'apparaît pas plus explicative.

Des variations systématiques des teneurs en CaO , MgO et Na_2O sont observées: les fractions 0–20 μm ont (à l'exception de Na_2O , horizon A/C, sol 650 BP) des teneurs systématiquement plus faibles (ou égales) que celles des fractions supérieures à 20 μm ; les teneurs augmentent généralement des fractions les plus fines aux plus grossières.

Les teneurs en K_2O sont faibles et leurs variations n'apparaissent pas ordonnées comme celles des autres bases.

Globalement, la somme des bases (comme CaO) des fractions 0–20 μm diminue quand l'âge du matériau augmente. L'étude des réserves totales en bases (TRB) précise ces données.

Réserve totale en bases (TRB)

Le critère TRB (réserve totale en bases: Na, K, Mg, Ca, en meq/100 g) est proposé pour indiquer, indirectement, la teneur en minéraux altérables des sols (Herbillon, 1989). Il est utilisé ici pour comparer les sols et les différentes fractions granulométriques entre eux (Tableau 5).

D'une manière générale, tous ces sols jeunes sont évidemment très riches en bases (TRB = 445 à 520 meq/100 g). Les fractions supérieures à 20 μm ont des TRB égaux ou supérieurs à 350 meq/100 g et celles inférieures à 20 μm des TRB égaux ou inférieurs à 370 meq/100 g. Pour toutes les fractions inférieures à 2 mm, le TRB augmente quasi systématiquement des fractions fines vers les fractions grossières, des horizons A vers les horizons C, du sol le plus ancien (1670 BP) vers les sols les plus jeunes.

TABLEAU 7

Produits solubilisés par cinétique de dissolution HCl (4N). Fractions granulométriques. Expression en oxydes. K_i =rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molaire; Σ = somme $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$.

| Dépôt | Horizon | Fraction (μm) | Produits solubilisés | | | | | | | | | | Total solubilisé | |
|---------|---------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|--------------------|------------|-------------------------|-------------------------|----------------|--------------------|------------|-----------------------|----------------|
| | | | Très solubles %* | | | | | Lentement solubles %* | | | | | Σs [1]+[2] | f [1]/[2] |
| | | | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | SiO_2 | Σts [1] | K_i (ts) | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | SiO_2 | Σls [2] | K_i (ls) | | |
| 48 BP | A | 0-20 | 2.95 | 1.25 | 0.45 | 4.65 | 0.3 | 0.71 | 0.69 | 0.55 | 1.95 | 1.4 | 6.6 | 2.4 |
| | A/C | 0-20 | 4.10 | 1.65 | 0.80 | 6.55 | 0.3 | 0.84 | 0.93 | 0.57 | 2.34 | 1.2 | 8.89 | 2.8 |
| 650 BP | A | 0-20 | 6.75 | 1.25 | 2.55 | 10.55 | 0.7 | 0.47 | 0.36 | 0.55 | 1.38 | 2.1 | 11.93 | 7.6 |
| | C | 0-20 | 3.95 | 0.45 | 1.15 | 5.55 | 0.5 | 0.11 | 0.22 | 0.40 | 0.73 | 6.4 | 6.28 | 7.6 |
| 1670 BP | A | >2000 | 0.34 | 0.09 | 0.17 | 0.60 | 0.9 | 0.16 | 0.16 | 0.35 | 0.67 | 3.9 | 1.27 | 0.9 |
| | | 0-20 | 13.15 | 1.85 | 4.60 | 19.60 | 0.6 | 0.36 | 0.34 | 0.60 | 1.30 | 2.9 | 20.9 | 15.1 |
| | C | 20-50 | 3.50 | 0.45 | 1.50 | 5.45 | 0.8 | 0.16 | 0.15 | 0.25 | 0.56 | 2.8 | 6.01 | 9.7 |
| | | 50-2000 | 1.35 | 0.25 | 0.75 | 2.35 | 1.0 | 0.20 | 0.18 | 0.26 | 0.64 | 2.3 | 2.99 | 3.7 |
| | C | >2000 | 0.90 | 0.15 | 0.45 | 1.50 | 0.9 | 0.18 | 0.15 | 0.32 | 0.65 | 3.1 | 2.15 | 2.3 |
| | | 0-20 | 8.55 | 1.25 | 3.55 | 13.35 | 0.7 | 0.45 | 0.30 | 0.66 | 1.41 | 2.6 | 14.76 | 9.5 |
| | | 20-50 | 2.00 | 0.25 | 1.15 | 3.40 | 1.0 | 0.20 | 0.33 | 0.34 | 0.87 | 3.0 | 4.27 | 3.9 |
| | | 50-2000 | 1.10 | 0.10 | 0.35 | 1.55 | 0.6 | 0.22 | 0.18 | 0.33 | 0.73 | 2.6 | 2.28 | 2.1 |
| | | >2000 | 0.90 | 0.15 | 0.60 | 1.65 | 1.2 | 0.17 | 0.18 | 0.65 | 3.1 | 2.3 | 2.5 | |

*En % du sol 0-2 mm séché à 105°C.

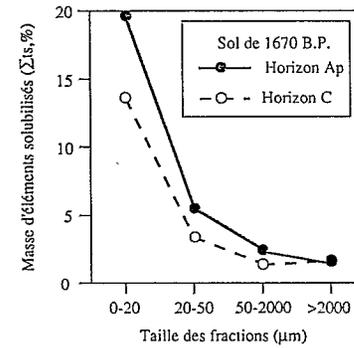


Fig. 10. Variation des produits amorphes (Σts) selon la taille des fractions (sol 1670 BP, horizons Ap et C). Résultats exprimés en pourcent des oxydes totaux de la fraction.

Fig. 10. Variation of the amorphous products (Σts) within the size-fractions (soil 1670 BP, Ap and C horizons). Results expressed in percent of the total oxides of the fraction.

Produits amorphes et para-cristallins

La méthode cinétique de dissolution par HCl (4N) des trois éléments majeurs Al, Fe et Si est appliquée à la terre fine (0-2 mm), aux fractions 0-20 μm de tous les horizons et aux fractions 20-50, 50-2000 et supérieures à 2000 μm des horizons Ap et C du sol de 1670 BP. Les résultats sont présentés aux Tableaux 6 et 7.

(a) *Terre fine* (0-2 mm) (Tableau 6). Les pourcentages de produits solubilisés (taux d'extraction Σs) augmentent des horizons C aux horizons A et des sols les plus jeunes aux sols les plus vieux. On remarquera (Fig. 9) que l'accroissement de ces produits en fonction du temps est bien supérieur de 650 à 1670 BP que de 48 à 650 BP, particulièrement pour les horizons A riches en éléments fins.

Les teneurs en composés lentement solubles (Σls) sont faibles; elles varient peu en valeur absolue (0.33 à 0.85%) selon les différents échantillons. Par contre, les composés très solubles (Σts) augmentent nettement des horizons C vers les horizons A, et des sols les plus jeunes vers les sols les plus vieux (respectivement 0.80 et 5.45% pour les horizons A de 48 BP et 1670 BP). Il en résulte un facteur de solubilité f ($\Sigma ts/\Sigma ls$) qui augmente des horizons C vers les horizons A, et des sols les plus jeunes vers les sols les plus vieux. Al_2O_3 prédomine dans les composés très solubles, mais il est plus faible dans les composés peu solubles. Il en résulte des rapports K_i (ls) inférieurs ou égaux à 1 et des rapports K_i (ts) supérieurs ou égaux à 0.9.

(b) *Fractions granulométriques* (Tableau 7). Les pourcentages de produits solubilisés (taux d'extraction Σs) sont élevés pour les fractions 0-20 μm (de 6.3 à 20.9) et plus faibles pour les fractions supérieures à 20 μm (1.3 à 8.9).

Ils augmentent systématiquement des fractions grossières vers les fractions fines. Pour un même type d'horizon (A ou C) et de fractions (0–20 μm , etc.), à l'exception du sol 48 BP (horizon A/C, fraction 0–20 μm), Σs augmente des sols les plus jeunes aux sols les plus vieux. Les teneurs en composés lentement solubles Σls varient beaucoup moins (0.56 à 2.34) que celles des composés très solubles Σts (0.6 à 19.6). Ces dernières augmentent des fractions grossières vers les fractions fines, des horizons C vers les horizons A (exception 48 BP A/C) et globalement des sols les plus jeunes vers les sols les plus vieux (Fig. 10). Le facteur de solubilité f ($\Sigma\text{ts}/\Sigma\text{ls}$) augmente des fractions les plus grossières vers les plus fines, des horizons C vers les horizons A et, pour un même type d'horizon et de fraction, des sols les plus jeunes vers les sols les plus vieux. Al_2O_3 domine fortement dans les produits très solubles, ce qui n'est pas le cas dans les produits peu solubles. Il en résulte des rapports K_i (ts) faibles (0.3 à 1.2) et K_i (ls) élevés (1.2 à 6.4).

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Nous avons vu que les matériaux ponceux, sur lesquels se sont développés les sols de la Montagne Pelée, sont essentiellement dacitiques. Leur composition peu variée permet de suivre, à station climatique semblable, une chronoséquence d'altération de 48 BP à 1670 BP.

La progression de l'altération s'exprime par la différenciation morphologique des horizons humifères et l'augmentation pondérale de la fraction 0–20 μm aux caractéristiques différentes de celles des ponces initiales.

À 48 BP, les sols sont encore, morphologiquement, très peu différenciés (couleur grisâtre d'ensemble, horizon A11 peu épais, stock de carbone faible); la différenciation des horizons est déjà nettement plus marquée à 650 BP (horizon A11 noir, épais) et s'accroît à 1670 BP en ce qui concerne les stocks de carbone. Une tendance générale de l'augmentation des stocks organiques des sols en fonction de l'âge du dépôt est d'ailleurs mise en évidence (Fig. 6). Toutefois, la variabilité du granoclassement initial du dépôt (plus ou moins fin) et le mode d'occupation du sol ont pu aussi influencer le stockage de la matière organique.

L'augmentation des teneurs en éléments fins (0–20 μm) est très nette quand on passe des horizons C aux horizons A et du sol de 48 BP à 1670 BP (Fig. 5). La quantité, en masse de minéral, des produits d'altération du sol superficiel (0–20 à 0–40 cm) peut être estimée à 1 ou 2% après 80 ans et au moins 10% après 1700 ans. Sur la base d'un bilan iso-Al, cette dernière valeur signifie que près de 30% du verre volcanique a été altéré en près de 2000 ans. En outre, la zone d'altération s'est approfondie de 20 à 60 cm et le produit d'altération atteint 5% dans le niveau 40–60 cm. On peut penser que la vitesse d'altération a augmenté au cours du temps: on observe en effet sur le flanc Est

du massif des paléosols datés d'environ 4000 ans, dont les 50 premiers cm sont presque totalement argilisés. Cette donnée est comparable aux vitesses d'altération données par Ruxton (1968) pour des verres dacitiques d'andosols de Nouvelle-Guinée pour lesquels la durée de l'altération de la moitié de leur masse ($t_{1/2}$) est comprise entre 1650 et 5600 ans. Elle est plus rapide que celle calculée par Neall (1977) pour l'altération de verres andésitiques en Nouvelle-Zélande, mais en climat plus froid ($t_{1/2} = 7000$ ans). Dans le cas de cendres basaltiques en climat similaire au Vanuatu, la durée d'altération quasi complète, sur un mètre d'épaisseur est estimée à environ 5000 ans (Quantin, non publié), mais il s'agit de verres basiques et de cendres fines, plus altérables.

L'évolution minéralogique et géochimique de ces dépôts de près de deux mille ans s'exprime, avec des intensités différentes selon l'âge du dépôt et le type d'horizon, sur toutes les fractions granulométriques des sols. Ainsi, des fractions les plus grossières aux plus fines, on note que:

– les ponces centimétriques les moins "altérées" des différents horizons, ne présentent pas d'altération importante des phénocristaux de plagioclases et d'hypersthène, mais laissent apparaître une altération des verres en allophane. Celle-ci s'exprime, en particulier, par des teneurs non négligeables en pertes au feu (H_2O^+) qui croissent des horizons C vers les horizons A et des sols les plus jeunes vers les sols les plus vieux.

– Les sables et graviers ponceux (fractions supérieures à 50 μm) dont les teneurs pondérales diminuent des horizons C aux horizons A et des sols les plus jeunes aux sols les plus vieux, ont une composition élémentaire en oxydes encore proche de celles des ponces centimétriques. Les produits "très solubles" par HCl (4N) (amorphes et paracrystallins) représentent, tous horizons confondus, moins de 2% en oxydes de Fe, Si et Al des fractions correspondantes. Ces produits sont très alumineux et probablement sous forme d'allophane et d'oxyhydroxydes d'alumine, ce qui est en accord avec leur K_i compris entre 0.6 et 1.0. Celui-ci est très différent de ceux des ponces peu altérées (5 à 6), de la terre fine 0–2 mm (4.8 à 5.5) et des produits "lentement solubles" (ls) des fractions et horizons correspondants (2.3 à 3.9). La comparaison des Σts de 650 à 1670 BP montre que les produits "amorphes" (ts) au sein des sables et graviers ponceux, augmentent sensiblement avec l'altération, alors que les teneurs en produits lentement solubles (composés "cristallins") restent à peu près constantes.

– Les limons grossiers (fractions 20–50 μm) dont les teneurs pondérales augmentent aussi avec l'altération (des horizons C vers A et des sols jeunes vers les sols plus vieux) se différencient des sables et graviers (i) par une diminution systématique des bases totales (surtout en CaO et MgO), (ii) par une augmentation de l'eau de constitution (H_2O^+) et une forte augmentation des produits "amorphes" (Σts de 3.5 à 5.5%) alors que les composés "cristallins" solubilisés restent à un niveau faible et identique à celui des sables et graviers.

– Les éléments fins (fractions 0–20 μm) dont les teneurs pondérales augmen-

tent fortement avec l'altération (des horizons C vers A et des sols jeunes vers les sols plus vieux) sont caractérisés par la présence prédominante d'allophe. Ils contiennent aussi des minéraux résiduels (plagioclase, cristobalite, verre), dont les quantités diminuent avec le degré d'altération des ponces, ainsi que des traces d'halloysite, même dans le sol le plus jeune. La présence d'allophe est confirmée par des teneurs élevées en eau de constitution (H_2O^+ de 10 à 30%) et en produits très solubles (Σts de 5 à 20%), très alumineux (K_f de 0.3 à 0.7). Les quantités "d'amorphes" de cette fraction augmentent, avec l'altération, des horizons C vers les horizons A et de 48 BP vers 1670 BP. La masse globale des oxydes très solubles des sols, qui passe de 2% dans le sol de 48 BP à 10% dans le sol de 1670 BP, est retrouvée à 70% dans les particules de tailles inférieures à 20 μm . Les teneurs en Ca, Mg et Na des fractions 0–20 μm sont systématiquement plus faibles que celles des autres fractions. La présence d'halloysite, qui apparaît presque immédiatement ici sous une pluviométrie de 2000–2500 mm, est souvent notée dans les séquences de sols sur matériaux d'origine volcanique en milieu tropical et subtropical (Delvaux et al., 1989; Quantin, 1974; Van Oort, 1988).

Pour la Martinique, il est probable que les sols dérivés de ponces vont se transformer en près de 10,000 ans en des sols "brun rouille à halloysite" (riches en halloysite et goethite fines), semblables à ceux observés, plus au Sud, par Colmet-Daage et Lagache (1965), sur le Massif des Pitons du Carbet. Wada (1977) montre d'ailleurs que la durée de vie des allophanes excède rarement la dizaine de milliers d'années, l'évolution vers des phyllites argileuses étant contrôlée par les apports de silice postérieurs à la formation de l'allophe, notamment lors de l'altération de nouveaux apports de cendres en surface des sols.

En conclusion, l'altération en 2000 ans de ponces dacitiques, sous un climat tropical humide à 2500 mm de pluie moyenne annuelle, est caractérisée (i) par la formation très précoce (dès les 50 premières années) d'allophe très alumineux, toujours accompagné de faibles quantités d'halloysite, (ii) par une perte de Ca, Mg et Na mais non de K. Ces deux caractéristiques semblent distinguer l'altération des ponces dacitiques calco-sodiques, menant à la formation précoce d'allophe riche en Al, de celle, encore plus rapide, des verres basaltiques (riches en Fe, Mg et K), conduisant à une lixiviation de K et à la formation de produits secondaires riches en silice et en fer (opale, hisingérite, ferrihydrite), puis ultérieurement, selon les situations, à l'apparition d'allophe, d'halloysite, de goethite et/ou d'interstratifiés (Quantin, 1985; Quantin et Rambaud, 1987; Uchiyama et al., 1968; Shoji et Masui, 1969, 1971).

La vitesse d'altération des ponces ne paraît pas constante; elle augmenterait au cours du temps comme l'attestent les forts accroissements observés en éléments fins et en amorphes totaux entre 650 et 1670 BP. Si l'altération affecte, à des degrés divers, toutes les fractions granulométriques du sol, on peut toutefois distinguer trois compartiments granulométriques aux caractéristiques

nettement différentes: les sables et graviers peu altérés, les limons grossiers au degré d'altération plus marqué et les éléments fins (argiles et limons fins) qui représentent à eux seuls 70% des produits secondaires formés.

A plus long terme (10,000 ans) et sous la même pluviométrie, ces sols sableux et allophaniques, peu évolués sur ponces, deviendront probablement des sols bruns plus argileux et à halloysite.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'apport scientifique et amical de Denis Westercamp et Hervé Traineau du B.R.G.M. qui nous ont permis de définir la chronostratigraphie des dépôts de la Montagne Pelée, à l'origine de cette étude. Nous remercions vivement aussi M.A. Herbillon, professeur à l'Université de Nancy I, pour ses nombreuses observations et son aide dans la rédaction de ce travail.

REFERENCES

- Bellon, H., Pelletier, B. et Westercamp, D., 1974. Données géochronométriques relatives au volcanisme martiniquais, Antilles françaises. C.R. Acad. Sci. Fr. Paris, 279: 457–460.
- Colmet-Daage, F. et Lagache, P., 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés des roches volcaniques aux Antilles françaises. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 8: 113–172.
- Delvaux, B., Herbillon, A.J. et Vielvoye, L., 1989. Characterization of a soil weathering sequence derived from volcanic ash in Cameroon. Taxonomic, mineralogical and agronomic implications. Geoderma, 45: 375–388.
- Fichaut, M., 1986. Magmatologie de la Montagne Pelée (Martinique). Thèse Univ. Bretagne Occidentale, Brest, France (Bull. PIRPSEV, 120), 318 pp.
- Groupe de Travail Andosols, 1972. Proposition de classification des Andosols. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 10: 302–303.
- Herbillon, A.J., 1989. Chemical estimation of weatherable minerals present in the diagnostic horizons of Low Activity Clay Soils. Proc. 8th Int. Soil Classification Workshop, Rio de Janeiro, pp. 39–48.
- Leamy, M., 1987. Circular letter No. 9. Int. Com. Classif. Andisols (ICOMAND). N.Z. Soil Bureau, Lower Hutt, New-Zealand.
- Neal, V.E., 1977. Genesis and weathering of Andosols in Taranaki, New Zealand. Soil Sci., 123: 400–408.
- Quantin, P., 1974. Hypothèses sur la genèse des andosols en climat tropical: évolution de la "pédogenèse initiale" en milieu bien drainé, sur roches volcaniques. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 12: 3–12.
- Quantin, P., 1985. Presence of iron-rich allophe or hisingerite in an Eutrandedpt deriving from basaltic ash. Aoba, Vanuatu. Communication to 1985 Int. Conf., Denver, Colo., USA, Abstract, p. 192.
- Quantin, P. et Bouleau, A., 1983. Détermination des constituants minéraux amorphes et cryptocristallins d'andosols par l'analyse cinétique de leur dissolution par HCl et NaOH. Sci. Sol., 4: 217–234.
- Quantin, P. and Rambaud, D., 1987. Genesis of spherical halloysite from basaltic ash, at Ambrym (Vanuatu). In: R. Rodriguez and Y. Tardy (Editors), Proc. Int. Meet. Geochem. Earth Surface. CSIC-CNRS, Madrid, pp. 506–522.

- Rittman, A., 1963. Les Volcans et leur Activité. Masson Ed., Paris, 458 pp.
- Ruxton, B.P., 1968. Rates of weathering of quaternary volcanic ash in north-east Papua. In: Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci., Adélaïde, Vol. 4: 367-376.
- Ségalen, P., 1968. Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 6: 105-126.
- Shoji, S. and Masui, J., 1969. Amorphous clay minerals of recent volcanic ash in Hokkaido. Soil Sci. Plant Nutr. (Tokyo), 15: 161-168, 191-201.
- Shoji, S. and Masui, J., 1971. Opaline silica of recent volcanic ash in Japan. J. Soil Sci., 22: 101-108.
- Traineau, H., 1982. Contribution à l'étude géologique de la Montagne Pelée, Martinique. Evolution de l'activité éruptive au cours de la période récente. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 209 pp.
- Uchiyama, N., Masui, J. and Shoti, S., 1968. Crystalline clay minerals derived from recent volcanic ashes in Hokkaido, Japan. Soil Sci. Plant Nutr. (Tokyo), 14: 125-140.
- Van Oort, F., 1988. Présence et évolution des minéraux argileux accessoires de type 2:1 dans des sols ferrallitiques d'origine volcanique de la Guadeloupe. Conséquences physico-chimiques. C.R. Acad. Sci. Paris, 307, Sér. II: 1297-1302.
- Wada, K., 1977. Allophane and imogolite. In: T.B. Dixon and S.B. Weed (Editors), Minerals in Soils Environments. Soil Sci. Soc. Amer., Mad., Wisc., 948 pp.
- Westercamp, D., 1972. Contribution à l'étude du volcanisme en Martinique. Thèse de 3è cycle, Univ. Paris-Sud, Orsay, 278 pp.

Current Titles in Soil Science

Part I

- Adamenko, O. M.; Gnibilin, V. N.; Gindidenko, Z. N.; *et al.* Pozdnepleystotsenovyye klimaticheskiye kolebaniya v Zakarpat'ye po dannym izucheniya razreza paleoliticheskoy stoyanki Beregovoy I [Upper Pleistocene climatic variations in the Transcarpathians according to the study of the Beregovoy I Paleolithic site section]: in Chetvertichnyy period; paleogeografiya i litologiya (Yanshin, A. L., editor), p. 162-170 (incl. English sum.), illus. (incl. 2 tables), Izd. Shtiintsa, Kishinev, USSR, 1989.
- Adamenko, O. M.; Medyanik, S. I.; and Myrlyan, N. F. Opyt rekonstruktsii klimata antropogena yuga Moldavii metodami palinologii i geokhimii [An experience of Quaternary climate reconstruction in southern Moldavia utilizing methods of palynology and geochemistry]: in Chetvertichnyy period; paleogeografiya i litologiya (Yanshin, A. L., editor), p. 66-73 (incl. English sum.), illus. (incl. 1 table), Izd. Shtiintsa, Kishinev, USSR, 1989.
- Ahuja, L. R. Modeling soluble chemical transfer to runoff with rainfall impact as a diffusion process: Soil Science Society of America Journal, 54(2), p. 312-321, illus. (incl. 1 table), 1990.
- Alexander, E. B.; Adamson, C.; Graham, R. C.; *et al.* Mineralogy and classification of soils on serpentinized peridotite of the Trinity Ophiolite, California: Soil Science, 149(3), p. 138-143, illus. (incl. 3 tables), 1990.
- Allen, B. L.; and Hajek, B. F. Mineral occurrence in soil environments: in Minerals in soil environments (Dixon, Joe Boris, editor; *et al.*), 2nd edition, p. 199-278, 14 tables, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, United States, 1989.
- Allison, John B. Soil survey of Nash County, North Carolina: 127 p., illus. (incl. 19 tables, sect., strat. cols., sketch map; soils map 1:24,000; colored soils map 1:253,440), 1989. *available from*: U. S. Dep. Agric., Soil Conserv. Serv., United States (Prep. in coop. with N.C. Dep. Nat. Resour. and Commun. Dev., N.C. Agric. Ext. Serv., N.C. Agric. Res. Serv. and Nash Cty. Board Comm.).
- Anamosa, Paul R.; Nkedi-Kizza, Peter; Blue, William G.; *et al.* Water movement through an aggregated, gravelly Oxisol from Cameroon: in Transport of water and solutes in macropores (van Genuchten, Martinus T., editor; *et al.*), Geoderma, 46(1-3), p. 263-281, illus. (incl. 7 tables), 1990. *American Society of Agronomy, 80th annual meeting.*
- Anderson, S. H.; Peyton, R. L.; and Gantzer, C. J. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography: in Transport of water and solutes in macropores (van Genuchten, Martinus T., editor; *et al.*), Geoderma, 46(1-3), p. 13-29, illus. (incl. 1 table), 1990. *American Society of Agronomy, 80th annual meeting.*
- Andriyenko, B. B. Geokhimicheskiye osobennosti landshafta yuga Ukrainy [Landscape-geochemical features of the southern Ukraine]: Vestnik Khar'kovskogo Universiteta, 341, p. 19-25, 2 tables, 1989.
- April, Richard; and Keller, Dianne. Mineralogy of the rhizosphere in forest soils of the Eastern United States; mineralogic studies of the rhizosphere: Biogeochemistry, 9(1), p. 1-18, illus. (incl. 1 table, 1 plate, sketch map), 1990.
- Araki, Toshio; and Maeno, Norikazu. Measurements of dielectric properties of frozen soils: Low Temperature Science, Series A: Physical Sciences = Teion Kagaku, Butsuri-Hen, 48, p. 27-40 (Japanese, incl. English sum.), illus. (incl. 2 tables, charts), 1989.
- Arnell, N. Humid temperate sloping land: in Comparative hydrology; an ecological approach to land and water resources (Falkenmark, Malin, editor; *et al.*), p. 163-207, illus. (incl. 9 tables, sketch maps), UNESCO, Paris, France, 1989.
- Bach, Leslie B. Soil moisture movement in response to temperature gradients: 174 p., Doctoral, 1989, Colorado State Univ., Fort Collins, CO. *available from*: Univ. Microfilms, Ann Arbor, MI, United States.
- Bailey, Roy A.; Huber, N. King; and Curry, Robert R. The diamicton at Deadman Pass, central Sierra Nevada, California; a residual lag and colluvial deposit, not a 3 Ma glacial till: Geological Society of America Bulletin, 102(9), p. 1165-1173, illus. (incl. sects., geol. sketch map), 1990.