

MISE EN ÉVIDENCE DE MINÉRAUX SECONDAIRES, ARGILES ET HYDROXYDES,
DANS LES ANDOSOLS DES NOUVELLES-HÉBRIDES,
APRÈS LA DÉFERRIFICATION PAR LA MÉTHODE DE ENDREDY

Par P. QUANTIN*, D. BADAUT-TRAUTH** et F. WEBER**

* Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Bondy (FRANCE)

** Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface (C.N.R.S.), Strasbourg (FRANCE)

Résumé – La déferrification sélective par la méthode de de ENDREDY (1963) des extraits inférieurs à 2μ d'andosols des Nouvelles-Hébrides a permis l'observation au microscope électronique de minéraux secondaires : argiles et hydroxydes d'alumine. Une meilleure détermination de ces minéraux conduit à préciser l'évolution de la cristallogenèse et les voies de la pédogenèse selon trois domaines climatiques : ferrallitisation dans les andosols désaturés formés en climat perhumide, caractérisée par la genèse de gibbsite et d'imogolite ; monosiallitisation dans les andosols saturés de climat humide, où se forme de l'halloysite ; bisiallitisation dans les andosols saturés de climat contrasté, révélée par l'édification de smectites ferrifères.

Abstract – The selective deferrification by the de ENDREDY's method of the lower than 2μ fraction of andosols from New-Hebrides permits the authors to observe by means of electron microscope secondary minerals such as clay minerals and aluminum hydroxides. A better identification of these minerals leads to define the evolution of crystallogenesis and the itineraries of pedogenesis according to three climatic zones : ferrallitization in desaturated andosols formed under perhumid climate, which is characterized by genesis of gibbsite and imogolite ; monosiallitization in saturated andosols of humid climate in which halloysite is formed ; bisiallitization in saturated andosols of contrasted climate, which is testified by the genesis of ferriferous smectites.

I – INTRODUCTION

Les premières analyses minéralogiques de sols des Nouvelles-Hébrides ont été effectuées à Strasbourg, au Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface*, sur la fraction inférieure.

* – analyse minéralogique par diffraction de rayons X sur lame orientée, effectuée de 1967 à 1969 par H. PAQUET, G. SIEFFERMANN et G. JEHL

– microscopie électronique, en 1969, par G. SIEFFERMANN

11 SEP. 1975
O. R. S. T. O. M. Ex 2
Collection de Référence
n° 7712 Pedo

à deux microns, extraite selon la méthode classique de dispersion des minéraux argileux dans les sols et les sédiments. Dans le cas des andosols, aucun minéral argileux n'apparaissait sur les diffractogrammes de rayons X.

A la suite des travaux de SIEFFERMANN (1973), nous avons tenté d'éliminer les substances amorphes par la méthode de SÉGALEN (1968). Les résultats obtenus par cette méthode ont été le plus souvent décevants. Ils nous ont cependant permis de déceler la présence de gibbsite et d'ïmogolite dans les andosols désaturés, ou de traces d'argiles 1:1 et 2:1 en mélange, dans les andosols saturés (QUANTIN, 1972 a).

Les méthodes les plus fréquemment utilisées pour l'élimination préalable des substances amorphes (HASHIMOTO et JACKSON, 1960 ; SÉGALEN, 1968) sont, en fait, également susceptibles d'altérer des minéraux facilement solubles, tels que halloysite, imogolite, argiles 2:1 ferrifères, goethite et gibbsite finement cristallisées. Ceci a été montré par plusieurs auteurs, notamment WADA et TOKASHIKI (1972), COLMET-DAAGE *et al.* (1973), QUANTIN et LAMOUREUX (1974).

Nous avons alors repris l'étude minéralogique de ces produits, en les soumettant à un traitement physico-chimique ménagé : la fraction inférieure à 2μ a été extraite après des prétraitements à H_2O_2 et à HCl (N/20) ; la dispersion a été obtenue par agitation ultrasonique au pH optimum (QUANTIN, 1972 b). Des résultats intéressants ont été fournis par la diffraction des rayons X sur les sols bruns andiques* contenant de l'halloysite et des smectites ferrifères. Mais dans le cas des andosols*, les diffractogrammes de rayons X et les images obtenues au microscope électronique sont demeurés difficilement interprétables ; les minéraux secondaires sont en effet masqués par des gels d'hydroxydes, surtout ferrugineux.

Tirant profit des travaux de SCHWERTMANN (1964, 1973) et, plus récemment, de NOVIKOFF (1974), nous avons alors essayé la méthode de de ENDREDDY, pour extraire les hydroxydes amorphes gênants, sans trop altérer les argiles. Les échantillons ont été soumis pendant 30 mn à l'action d'une solution-tampon d'acide oxalique-oxalate d'ammonium, activée par les rayons U.V. ; après lavage, la dispersion de la fraction inférieure à 2μ a été obtenue par agitation ultrasonique pendant 15 à 20 mn. Après ce traitement, les diffractogrammes de rayons X ne présentaient pas d'améliorations notables ; par contre, on obtenait de très belles images de microscopie électronique, qui montraient des minéraux argileux, des hydroxydes d'alumine, des reliquats de verre et des diatomées. Une première tentative d'identification de ces éléments figurés a été faite au moyen de la microdiffraction et de la microsonde électroniques.

Dans l'étude ici présentée, ont été examinés des échantillons représentatifs de trois groupes de sols :

- andosols désaturés et perhydratés*, riches en alumine ;
- andosols saturés*, riches en silice ;
- sols bruns andiques*, relativement riches en minéraux argileux.

La partie profonde des profils a été distinguée de la partie supérieure, plus récente, pour analyser l'effet de la durée d'évolution. En outre, l'effet de la répartition pluviométrique sur la pédogenèse a été étudié par comparaison entre les andosols saturés de climat régulièrement humide et ceux de climat contrasté.

* voir la classification des andosols *in* QUANTIN (1972 b), p. 293 - 294.

II – OBSERVATIONS ET INTERPRÉTATIONS

1) Andosols désaturés et perhydratés

Nous avons sélectionné quelques échantillons correspondant à trois horizons : horizon A₁, n° 4551, 4441 et 4611 ; horizon (B), n° 4552, 4442 et 4613 ; horizon II(B), n° 4554. Ces trois horizons correspondent à trois durées d'évolution progressivement croissantes, du haut vers le bas du profil. Les analyses effectuées ont été réalisées sur la fraction inférieure à 2 μ des échantillons.

a) Résultats de l'analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique totale réalisée sur la fraction inférieure à 2 μ sont réunis dans le tableau 1.

Tableau 1

horizon	A		(B)			II(B)
n° échantillon	4551	4441	4613	4552	4442	4554
H ₂ O*	28,3	19,6	22,2	20,6	32,1	22,8
perte au feu	43,1	34,8	38,5	35,3	47,1	38,2
SiO ₂	22,7	17,5	21,4	16,9	11,2	14,4
Al ₂ O ₃	10,5	11,9	23,0	22,9	20,9	20,4
Fe ₂ O ₃	19,0	30,5	13,2	21,3	18,3	22,5
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,7	2,5	1,6	1,3	0,9	1,2
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	1,7	1,0	1,2	0,8	0,6	0,7
CaO**	0,46	0,24	—	0,14	0,08	0,11
MgO**	0,56	0,56	—	0,33	0,25	0,52

* H₂O en % sol sec à 105°C — autres résultats en % sol séché à l'air

** CaO et MgO proviennent d'un petit reliquat (1 - 2 %) de minéraux primaires

Dans les horizons (B) et II(B), la fraction inférieure à 2 μ est riche en hydroxydes de fer et d'alumine et elle est très hydratée (tableau 1). Les sols correspondants retiennent de 100 à plus de 200 % d'eau ; ils ont une capacité d'échange cationique de 15 à 35 me p 100 g. L'horizon A, rajeuni, est plus siliceux et il contient un peu plus de calcium et de magnésium.

b) Etude par diffraction des rayons X et analyse thermique différentielle

Les techniques de diffraction des rayons X et d'analyse thermique différentielle*, appliquées à la fraction inférieure à 2 μ non traitée, mettent en évidence de grandes quantités d'amorphes, mais ne permettent pas la détermination minéralogique des constituants cristallisés. Après traitement par la méthode SÉGALEN, les rayons X révèlent la présence de gibbsite, parfois abondante dans les horizons (B) et II(B), ainsi que de traces de plagioclases, et plus souvent de cristobalite dans

* A.T.D. par M. THIRY à Strasbourg, puis A.T.D. et T.B. par M. KOUKOUI au centre ORSTOM de Bondy

les horizons A et (B) ; les minéraux argileux, probablement dissous, n'apparaissent pas sur les diffractogrammes. Après déferrification par la méthode de de ENDREDY, les rayons X suggèrent la présence d'argiles en petite quantité.

c) Observation au microscope électronique

Les constituants secondaires de la fraction inférieure à 2μ des andosols désaturés et perhydratés sont, pour une grande part, sous forme de gels amorphes et très hydratés. Ceux-ci forment un voile, au travers duquel on devine la présence de particules, sur les images de microscopie électronique des échantillons non traités. Après déferrification sélective, il devient possible d'observer nettement des images de minéraux, en particulier des argiles.

Dans l'horizon A, rajeuni et plus siliceux, il apparaît nettement des minéraux argileux très fins, de l'ordre de $0,1 \mu$: kaolinite en plaquettes hexagonales (Planche I, photos 1 et 5), halloysite en glomérules (Planche I, photos 2 et 4) et en tubes (Planche I, photos 3 et 5). On observe aussi de l'allophane, en amas de très fines particules ($< 0,01 \mu$) (Planche I, photo 4), ou en chaînettes de très petits disques ($0,05 \mu$), d'assez rares esquilles de verre siliceux (Planche I, photo 1) et débris de tests de diatomées (Planche I, photos 1 et 5), et de très rares micas et débris de phytolites (Planche I, photo 6). Il existe aussi un peu d'hydroxydes d'alumine (Planche II, photo 1).

Dans les horizons (B) et II(B), plus alumineux, il peut y avoir ou non un peu de kaolinite et d'halloysite ; mais ces argiles sont relativement moins abondantes que dans l'horizon A, et l'halloysite n'y apparaît plus que sous une forme tubulaire très fine. Par contre, des réseaux de fibres ou de gels analogues à l'imogolite décrite au Japon (YOSHINAGA et AOMINE, 1962) y sont souvent observés en abondance (Planche II, photos 2 et 3). Il apparaît aussi une quantité importante d'hydroxydes d'alumine cristallisés, dont la nature a été confirmée par une étude à la microsonde électronique. Il s'agit probablement de gibbsite et de boehmite (Planche II, photo 4), peut-être aussi de bayérite. Par contre, les fragments siliceux, esquilles de verre, débris de diatomées et de phytolites, y sont nettement plus rares et plus altérés que dans l'horizon A.

d) Interprétation

On met en évidence une évolution géochimique et minéralogique des constituants des minéraux secondaires des andosols désaturés, du sommet rajeuni du profil vers sa base. Il s'agit principalement d'une ferrallitisation intense, sous l'effet d'un climat extrêmement pluvieux et perhumide. Cette ferrallitisation se caractérise par la formation abondante de substances minérales « amorphes » ou cryptocristallines (hydroxydes et allophanes). Elle se caractérise aussi par une transformation minéralogique : partant de l'horizon A, rajeuni et encore riche en silice, contenant une part assez importante d'argiles 1 : 1 (kaolinite et halloysite fines), de verres et de diatomées, l'on passe à l'horizon (B), progressivement enrichi en alumine, privé d'argiles et de diatomées, où de l'imogolite et de la gibbsite apparaissent en abondance. Ceci rejoint l'hypothèse de WADA et AOMINE (1973), selon laquelle l'imogolite est une phase de transformation de l'allophane vers la gibbsite. Les argiles 1 : 1, momentanément apparues dans le haut du profil, disparaîtraient elles-mêmes au profit de l'imogolite et de la gibbsite.

2) Andosols saturés

A. Andosols saturés de climat humide

Nous avons sélectionné trois échantillons, n° 2431, 2453 et 2444, appartenant respectivement à trois horizons : A₁, (B) et II(B). Ces trois horizons correspondent à des durées d'évolution progressivement croissantes, du haut vers le bas du profil. Les analyses ont été réalisées sur la fraction inférieure à 2 μ des échantillons.

a) Résultats de l'analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique sont réunis dans le tableau 2.

Tableau 2

horizon	A	(B)	II(B)
n° échantillon	2431	2453	2444
H ₂ O*	12,8	15,9	15,8
perte au feu	24,2	27,5	30,9
résidu (1)	8,4	5,0	4,4
SiO ₂ tot. (2)	38,3	34,0	—
SiO ₂ (1)	33,8	31,0	26,3
Al ₂ O ₃ (1)	9,2	15,3	17,3
Fe ₂ O ₃ (1)	16,9	17,7	19,3
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (1)	6,2	3,4	2,6
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (1)	2,9	2,0	1,5
CaO (1)	0,8	0,55	0,10
MgO (1)	1,4	1,5	0,60
K ₂ O (1)	0,06	0,06	0,03

* H₂O en % sol sec à 105°C — autres résultats en % sol séché à l'air

(1) dissolution par HClO₄, laissant un résidu insoluble (minéraux primaires)

(2) SiO₂ tot. = silice totale, y compris celle du résidu.

La fraction inférieure à 2 μ contient une part notable de minéraux primaires insolubles dans les acides. Elle paraît anormalement riche en silice, surtout dans l'horizon A qui est sans doute jeune. Mais il faut admettre qu'une part importante des cations autre que Al³⁺, à savoir Fe³⁺, Mg²⁺ et Ca²⁺, appartient au réseau des silicates. Il y a une évolution géochimique très nette de A vers (B) et II(B), par appauvrissement en silice, Ca²⁺ et Mg²⁺, et enrichissement relatif en fer et en alumine.

b) Etude par diffraction des rayons X et analyse thermique différentielle

Les techniques de diffraction des rayons X et d'analyse thermique, appliquées à la fraction inférieure à 2 μ non déferrifiée d'andosols saturés de climat humide montrent l'apparition progressive d'argiles, principalement d'hallowite, du sommet vers la base du profil. Après traitement par la

méthode de SEGALÉN, on met en évidence des traces de minéraux primaires et d'argiles 2:1 à comportement de vermiculite ; mais l'halloysite n'apparaît plus.

c) Observation au microscope électronique

Les premières observations en microscopie électronique sur des échantillons non déferrifiés ont été mauvaises. Après déferrification, de belles images sont apparues, mettant surtout en évidence la formation d'halloysite glomérulaire très fine, analogue à celle décrite par SIEFFERMANN et MILLOT (1968).

Dans l'horizon A, rajeuni et plus siliceux, il apparaît surtout des amas de très fines particules allophaniques (Planche III, photo 1), entourant des esquilles de verres et de diatomées ou de rares minéraux primaires. La présence de verres, diatomées et minéraux primaires permet d'expliquer les teneurs anormalement élevées en silice. La présence d'argiles en feuillets, ou peut-être déjà d'ébauches très fines d'halloysite, s'observe dans les amas allophaniques (Planche III, photo 2).

Dans l'horizon (B), l'apparition d'halloysite, sous une forme glomérulaire très fine ($0,05 \mu$), et plus rarement de tubes, est le phénomène majeur (Planche III, photo 3), en même temps que les produits siliceux, verres et diatomées, tendent à disparaître. Ce phénomène est accentué dans l'horizon II(B), relativement le plus ancien, où la taille de l'halloysite s'est accrue sensiblement et où les formes tubulaires sont devenues beaucoup plus fréquentes (Planche III, photo 4). Par contre, la présence d'argiles 2 : 1 y semble relativement faible.

d) Interprétation

Dans les andosols saturés de climat humide, en présence de solutions saturées en cations Ca^{2+} et Mg^{2+} et en silice, il se forme des argiles en abondance dans la partie profonde et relativement ancienne des profils : l'halloysite y est nettement prédominante sur les argiles 2:1 ; elle apparaît d'abord sous une forme glomérulaire très fine, aux dépens des très petites particules allophaniques ; puis sa taille grandit et des formes tubulaires deviennent plus fréquentes. En même temps, le sol s'appauvrit en sources de silice et de cations Ca^{2+} et Mg^{2+} , par suite de la disparition des verres, des diatomées et des minéraux primaires.

B. Andosols saturés de climat contrasté

Nous avons choisi deux échantillons, n° 2471 et 2472, appartenant aux deux horizons A₁ et (B) de la partie supérieure d'un profil. Les analyses ont été réalisées sur la fraction inférieure à 2μ des échantillons.

a) Résultats de l'analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique sont réunis dans le tableau 3.

La fraction inférieure à 2μ contient une part notable de minéraux primaires insolubles dans les acides. Elle paraît anormalement riche en silice. Mais il faut penser qu'une part importante des cations autres qu' Al^{3+} , tels que Fe^{3+} , Ca^{2+} et Mg^{2+} appartient aussi au réseau des silicates.

Tableau 3

horizon	A	(B)
n° échantillon	2471	2472
H ₂ O *	8,6	11,4
perte au feu	27,3	22,6
résidu (1)	5,1	3,4
SiO ₂ tot. (2)	—	48,7
SiO ₂ (1)	41,7	46,4
Al ₂ O ₃ (1)	9,7	10,4
Fe ₂ O ₃ (1)	16,4	14,3
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (1)	7,3	7,6
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (1)	3,5	4,0
CaO (1)	0,3	0,3
MgO (1)	2,9	2,2
K ₂ O (1)	0,5	0,2

* H₂O en % sol sec à 105°C — autres résultats en % sol séché à l'air

(1) dissolution par HClO₄, laissant un résidu insoluble (minéraux primaires)

(2) SiO₂ tot. = silice totale, y compris celle du résidu

b) Etude par diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X a montré que les andosols saturés de climat contrasté contiennent des argiles 2:1, principalement des smectites, dans l'horizon (B), et probablement aussi dans l'horizon A.

c) Observation au microscope électronique

L'observation au microscope électronique de la fraction inférieure à 2 μ déferrifiée confirme la présence importante des argiles 2:1, dès la partie supérieure du profil (Planche II, photo 5). La teneur en silice, anormalement élevée dans ces sols, s'explique par l'abondance des débris de verre et des tests de diatomées dans l'horizon A ; ceux-ci sont fortement altérés et tendent à disparaître à la base du profil. Dans l'horizon (B), les feuillettes sombres de smectites sont abondants et larges de 0,5 à 1 μ . Il est difficile d'observer des figures d'hallowysite, mais de fines particules allophaniques sphériques de 0,01 à 0,05 μ apparaissent dans l'altération des verres et des diatomées (Planche II, photo 6), ainsi que de petits disques sombres de 0,1 à 0,3 μ qui semblent se former directement à partir des verres basaltiques. Ces disques rappellent les billes observées par TRICHET (1970) et les sphères hallowysitiques de DIXON et McKEE (1974).

d) Interprétation

Dans les andosols saturés de climat contrasté, en présence de solutions riches en silice et en cations, et sous l'effet d'une alternance de périodes d'hydratation et de déshydratation accentuée, il se forme rapidement, dès la surface, et en abondance, des argiles 2:1. Ces argiles sont cependant

mieux caractérisées en profondeur, en même temps que disparaissent verres et diatomées. Enfin, certains fragments en forme de disques, dérivés des verres, pourraient être les précurseurs de ces argiles.

3) Sols bruns andiques de climat contrasté

Les trois échantillons choisis, n° 4663, 4692 et 4693, appartiennent aux horizons (B) et (B)/C de sols bruns saturés et andiques. Ces sols des îles Banks se sont formés sur des cendres basaltiques d'âge Quaternaire récent et dans la zone climatique contrastée. Ils correspondent au stade pédogénétique qui a succédé aux andosols saturés à argiles 2:1.

Les analyses ont été réalisées sur la fraction inférieure à 2 μ des échantillons.

a) Résultats de l'analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique sont réunis dans le tableau 4.

Tableau 4

horizon	(B)		(B)/C
n° échantillon	4663	4692	4693
H ₂ O*	11,3	8,9	10,5
perte au feu	23,0	23,8	25,9
résidu (1)	9,1	2,8	3,4
SiO ₂ tot. (2)	37,5	37,1	35,9
SiO ₂ (1)	31,2	35,2	33,6
Al ₂ O ₃ (1)	19,5	22,2	19,1
Fe ₂ O ₃ (1)	14,6	13,4	15,5
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (1)	2,7	2,7	3,0
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (1)	1,8	1,9	2,0
CaO (1)	0,03	0,05	0,04
MgO (1)	0,27	0,24	0,29

* H₂O en % sol sec à 105°C – autres résultats en % sol séché à l'air

(1) dissolution par HClO₄, laissant un résidu insoluble (minéraux primaires)

(2) SiO₂ tot. = silice totale, y compris celle du résidu

La fraction inférieure à 2 μ contient encore une petite part de minéraux primaires insolubles dans les acides. Les valeurs des rapports molaires silice/alumine ou sesquioxydes correspondent bien à celles d'un mélange d'argiles 1:1 et 2:1, caractérisant normalement les sols bruns.

b) Etude par diffraction des rayons X et analyse thermique différentielle

La diffraction des rayons X et l'analyse thermique différentielle ont surtout révélé la présence de métahalloysite et d'halloysite. Par diffraction des rayons X, on met également en évidence la présence d'édifices 2:1 interstratifiés.

c) Observation au microscope électronique

L'observation au microscope électronique de la fraction inférieure à 2μ déferrifiée confirme l'existence d'halloysite en tubes et glomérules (Planche III, photo 5) ; mais elle montre également la présence abondante de petits feuilletts argileux analogues à ceux de smectites (Planche III, photo 6). Par contre, il apparaît relativement peu d'allophane et on n'observe plus de verres, de diatomées ou de minéraux primaires résiduels.

d) Interprétation

Dans les sols bruns andiques saturés en cations qui se sont formés en climat contrasté, se développent des argiles 1:1 et 2:1 en mélange, dans l'ensemble du profil : l'halloysite, présente à la fois sous forme de glomérules et de tubes, est en partie transformée en métahalloysite ; les argiles 2:1, probablement des interstratifiés, sont mal caractérisées.

III – CONCLUSIONS

La déferrification sélective des sols a permis de montrer que les andosols des Nouvelles-Hébrides contiennent une quantité non négligeable de minéraux secondaires, principalement argileux. La nature des minéraux formés et le sens de leur évolution dans les profils autorisent aussi à classer les andosols selon les trois processus géochimiques définis par PÉDRO (1966) : l'allitisation dans les andosols désaturés qui se sont formés en climat perhumide, la monosiallisation dans les andosols saturés qui se sont développés en climat humide et la bisiallisation dans les andosols saturés qui sont apparus en climat contrasté. Ainsi, les trois voies principales de la pédogenèse initiale en climat tropical (QUANTIN, 1974), ressortent-elles déjà clairement de l'étude des andosols des Nouvelles-Hébrides.

Manuscrit reçu le 1 février 1975

BIBLIOGRAPHIE

- COLMET-DAAGE F. *et al.* (1973) – Etude des sols à allophane dérivés de matériaux volcaniques des Antilles et d'Amérique latine à l'aide de techniques de dissolution différentielle – *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., 11, p. 97 - 120.
- ENDREDY A.S. de (1963) – Estimation of free iron oxides in soils and clays by a photolytic method – *Clay Miner. Bull.*, 5, 29, p. 209 - 217.
- DIXON J.B. et MCKEE T.R. (1974) – Spherical halloysite formation in a volcanic soil of Mexico – *Xth Intern. Congr. Soil. Sci.*, Moscou, 7, p. 115 - 124.

- HASHIMOTO I. et JACKSON M.L. (1960) — Rapid dissolution of allophane and kaolinite - halloysite after dehydration — *Clays and clay miner.*, (7th Nat. Conf., 1958), p. 102 - 113.
- NOVIKOFF A. (1974) — L'altération des roches dans le massif du Chaillu (Rép. Pop. Congo). Formation et évolution des argiles en zone ferrallitique — Thèse Sci. Strasbourg, multigr., 298 p.
- PÉDRO G. (1966) — Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle aluminosilicique) — *C.A. Acad. Sci. Paris*, 262 - D, p. 1828 - 1831.
- QUANTIN P. (1972 a) — Note sur la nature et la fertilité des sols sur cendres volcaniques provenant d'éruptions récentes dans l'archipel des Nouvelles-Hébrides — *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., 10, p. 123 - 151 et 207 - 217.
- QUANTIN P. (1972 b) — Les andosols ; revue bibliographique des connaissances actuelles — *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., 10, p. 273 - 301.
- 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, p. 3 - 12.
- QUANTIN P. et LAMOUREUX M. (1974) — Adaptation de la méthode cinétique de SÉGALEN à la détermination des constituants minéraux de sols variés — *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., 12, p. 13 - 46.
- SCHWERTMANN U. (1964) — Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammonium oxalat-Lösung — *Z. Pflanzen-ernähr. Bodenk.*, 105, p. 194 - 202.
- SCHWERTMANN U. (1973) — Use of oxalate for Fe extraction from soils — *Can. J. Soil Sci.*, 53, p. 244 - 246.
- SÉGALEN P. (1968) — Note sur la détermination des produits amorphes des sols à hydroxydes — *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., 6, p. 105 - 126.
- SIEFFERMANN G. (1973) — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun — Thèse Sci. Strasbourg, 1969 et *Mém. ORSTOM*, 66, 183 p.
- SIEFFERMANN G. et MILLOT G. (1968) — L'halloysite des sols jeunes sur basaltes récents du Centre-Cameroun — *Bull. Gr. fr. Argiles*, 20, p. 25 - 38.
- TRICHET J. (1970) — Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques — Thèse Sci. Paris, Ecole Normale Supérieure, travaux du Laboratoire de Géologie, n°4, 153 p.
- WADA K. et TOKASHIKI Y. (1972) — Selective dissolution and difference infrared spectroscopy in quantitative mineralogical analysis of volcanic-ash soil clays — *Geoderma*, 7, p. 199 - 213.
- WADA K. et AOMINE S. (1973) — Soil development on volcanic materials during the Quaternary — *Soil Sci.*, 116, p. 170 - 177.
- YOSHINAGA N. et AOMINE S. (1962) — Imogolite in some Andosols — *Soil Sci. Pl. Nutr.*, Tokyo, 8, 3, p. 22 - 29.



PLANCHE I

Andosol désaturé perhydraté, horizon (A). Ech. 4551

Photo 1

Kaolinites hexagonales (K), tubes d'halloysite (H), fragment de verre siliceux (V) et de diatomées en voie de dissolution (D)

Photo 2

Glomérule d'halloysite (H)

Photo 3

Tube d'halloysite et son diagramme de microdiffraction

Photo 4

Allophane (A) et glomérules d'halloysite (H)

Photo 5

Diatomée en voie de dissolution (D), plaquettes de kaolinite hexagonale (K), tubes d'halloysite (H)

Photo 6

Phytolite

PLANCHE I

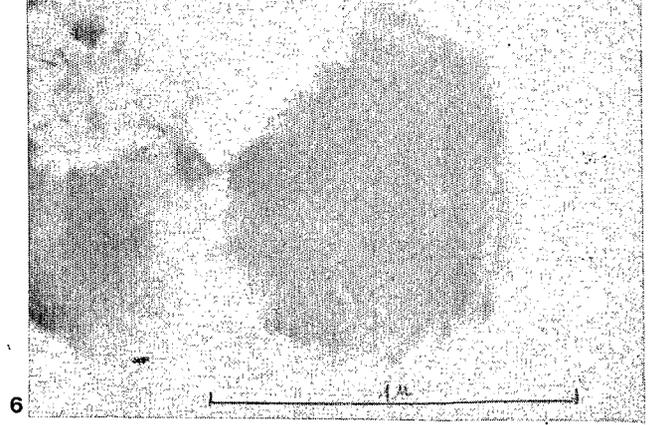
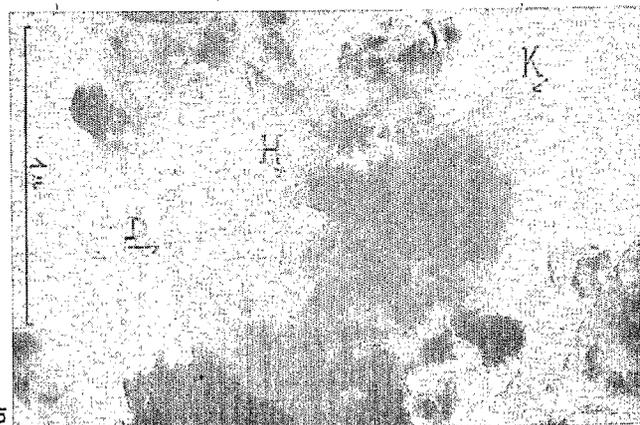
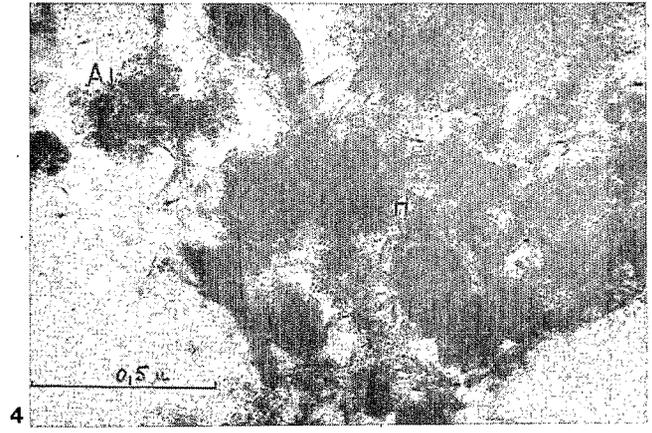
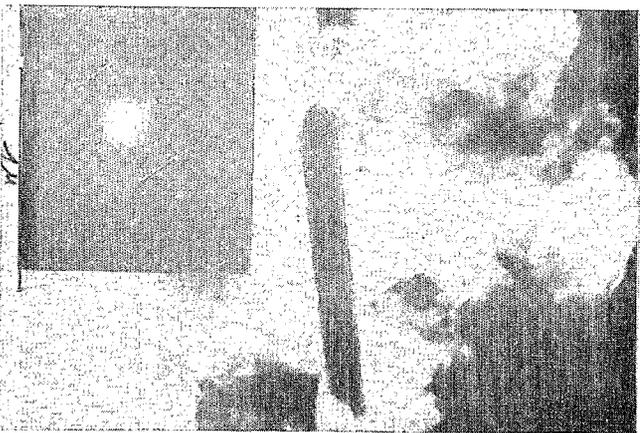
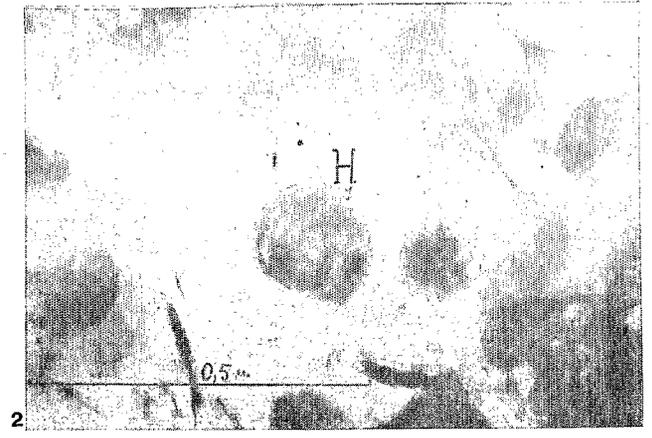
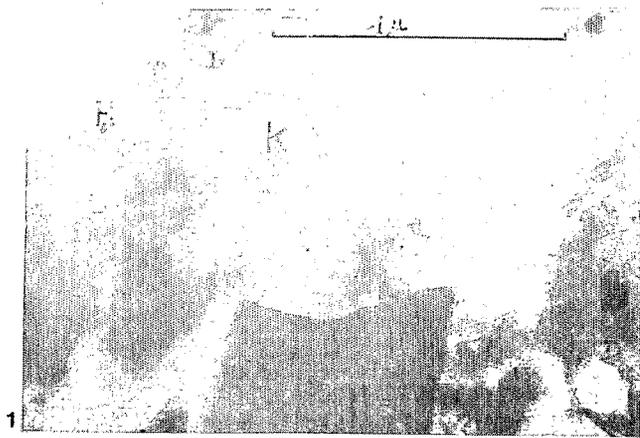


PLANCHE II

Andosol désaturé perhydraté

Photo 1

Horizon A, éch. 4551

Gibbsite transformée en corindon sous le faisceau du microscope électronique. Détermination par microdiffraction

Photo 2

Horizon (B), éch. 4613

Imogolite en réseau fibreux

Photo 3

Horizon II(B), éch. 4554

Imogolite ayant l'aspect d'un gel

Photo 4

Horizon II(B), éch. 4554

Plaques opaques : gibbsite probable (G) ; bâtonnets : boehmite probable (B) et tubes d'halloysite (H)

Andosols saturés en climat contrasté

Photo 5

Horizon A, éch. 2471

Feuillets de smectites (S) et amas allophaniques (A)

Photo 6

Horizon (B), éch. 2472

Amas d'allophane dans lequel se développent de petits disques sombres (A), tests de diatomées altérés (D) et smectites (S)

PLANCHE II

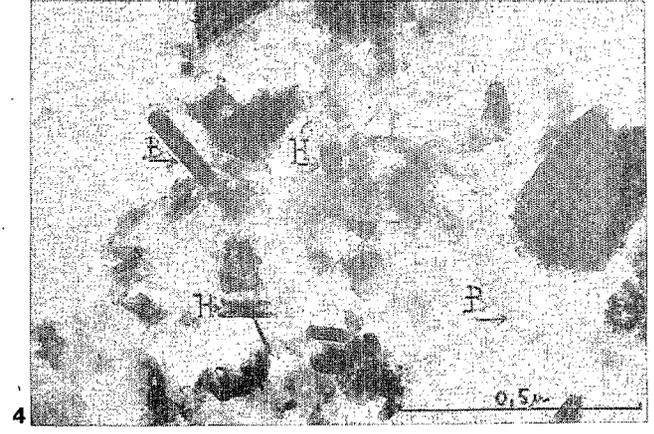
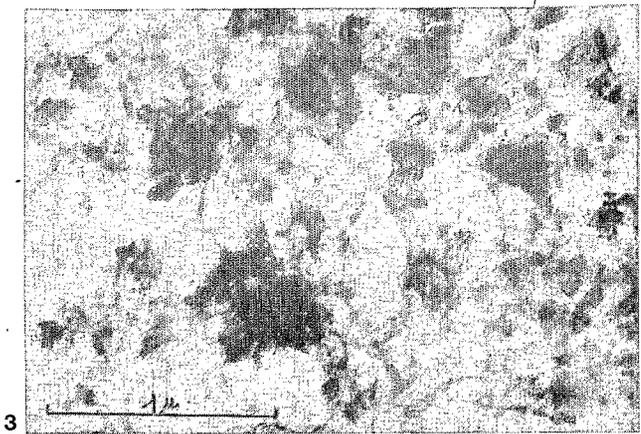
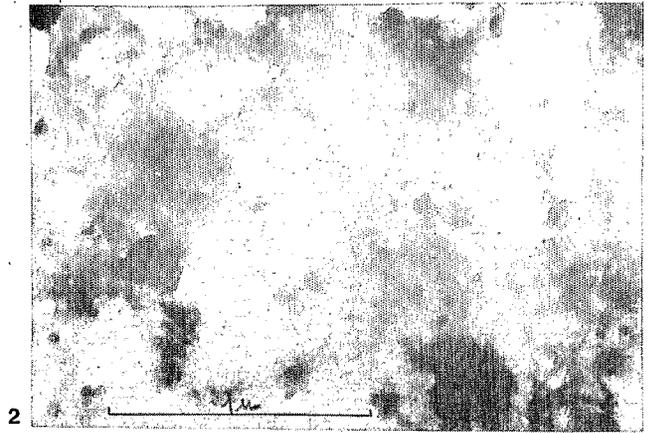
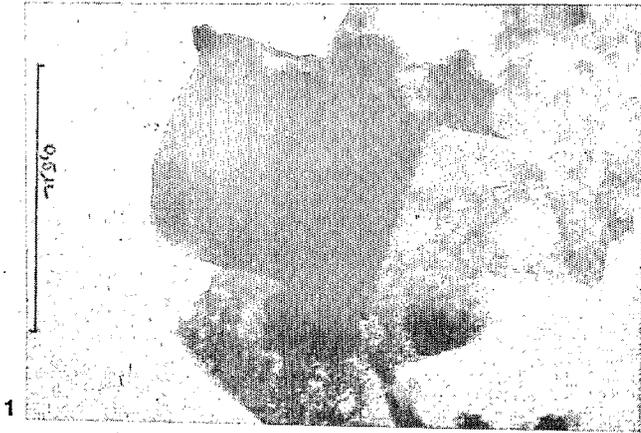


PLANCHE III

Andosols saturés de climat humide

Photo 1

Horizon A, éch. 2431
Test de diatomée en voie de dissolution

Photo 2

Horizon A, éch. 2431
Amas d'allophane avec ébauches d'halloysite, très fins glomérules et tubes

Photo 3

Horizon (B), éch. 2453
Très fins glomérules d'halloysite et feuillets très fins (argiles 2:1 ?)

Photo 4

Horizon II(B), éch. 2444
Halloysite fine en tubes et glomérules

Sols bruns andiques de climat contrasté

Horizon (B)/C, éch. 4693

Photo 5

Halloysite en tubes courts (0,1 à 0,4 μ) et rares glomérules de 0,1 μ

Photo 6

Feuillets «chiffonnés» et sombres correspondant peut-être à des smectites

PLANCHE III

