

Hypothèses sur la genèse des andosols en climat tropical :

Évolution de la « pédogenèse initiale* » en milieu bien drainé, sur roches volcaniques

P. QUANTIN

*Pédologue de l'ORSTOM
Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM
70-74, route d'Aulnay, 93140 BONDY (France)*

RÉSUMÉ

L'étude des andosols peut éclairer nos vues sur la pédogenèse en climat tropical. Il est tout d'abord rappelé les principaux faits concernant les conditions de formation et d'évolution des andosols, puis les hypothèses sur les facteurs de formation des substances minérales amorphes dans les sols, et de leur conservation en cet état ou de leur cristallisation. En conclusion, il est dégagé un schéma d'évolution de la « pédogenèse initiale » à partir de roches volcaniques, en climat tropical et en milieu bien drainé.

ABSTRACT

The study of andosols can make clear our knowledge on pedogenesis under tropical climate. To begin with, the main data concerning the andosols forming and evolving conditions are recalled ; next, the hypothesis on the formation of amorphous materials, allophanes and hydroxides, in soils ; and finally their conservation or their evolution into crystallized minerals. As a conclusion, a scheme of evolution of the « initial pedogenesis » starting from volcanic rocks under tropical conditions and free drainage is proposed.

РЕЗЮМЕ

Изучение андосолей может осветить наши представления о почвообразовании в тропическом климате. Напоминаются сперва основные факты касающиеся условий образования и развития андосолей, а затем гипотезы о факторах образования в почвах аморфных минеральных веществ и об их пребывании в этом состоянии или их кристаллизации. В заключение намечается схема развития «первоначального почвообразования» из вулканических пород, в тропическом климате и в хорошо дренированной среде.

AVANT-PROPOS

La majeure partie des idées exprimées dans ce texte a été exposée aux Journées des Pédologues de l'ORSTOM en septembre 1972 et reproduite dans le Bulletin de Liaison du Thème Andosols de mars 1973. Mais, en raison de l'intérêt suscité par ce sujet, il a paru opportun d'en faire une nouvelle mise au point dans ce numéro spécial des Cahiers de Pédologie de l'ORSTOM.

* N.B. : par « pédogenèse initiale », il est entendu surtout l'histoire géochimique des altérations superficielles, avant tout remaniement important d'ordre géomorphologique et biologique ou des « réorganisations pédologiques ».

INTRODUCTION

Les andosols sont pour la plupart des sols jeunes, formés sur des roches volcaniques, et caractérisés par une évolution très rapide de la matière minérale. Pour cette raison, ils permettent de saisir la pédogenèse initiale et d'en connaître les conditions exactes là où elle se produit, au contraire des autres sols, plus anciens et aussi plus fréquemment étudiés, où l'histoire de la pédogenèse ne peut souvent que faire l'objet d'hypothèses.

Ainsi a pu être saisi au cours de l'étude des andosols dans le monde l'effet de diverses conditions de leur genèse, dont les principales sont : le temps d'altération, le rajeunissement, l'intensité et la répartition de la pluviométrie. Il en ressort quelque hypothèses concernant, premièrement la formation des substances minérales amorphes dans les andosols, deuxièmement leur évolution au cours de la pédogenèse. En conclusion, un schéma de la « pédogenèse initiale » en climat tropical et milieu drainé sera proposé.

I. HYPOTHÈSES SUR LA FORMATION DES SUBSTANCES MINÉRALES AMORPHES DANS LES ANDOSOLS

Tout d'abord seront rappelés brièvement les effets des principaux facteurs de formation des andosols : temps d'altération, rajeunissement et climat. Ensuite seront exposées très sommairement quelques hypothèses concernant la formation des substances minérales amorphes et leur persistance à l'état non cristallin dans les sols.

Facteurs de formation

1. LE TEMPS D'ALTÉRATION ET LA CRISTALLOGÈNESE (chronoséquence)

1.1. Rapidité de l'altération des verres volcaniques

Les andosols sont généralement formés à partir de roches volcaniques riches en verre. Tous les auteurs s'accordent à reconnaître la rapidité de l'altération des verres, sans doute à cause de leur état « amorphe » et de leur très forte porosité.

Ceci a été bien étudié expérimentalement par TRICHET (1968-1970) ou montré par l'analyse des eaux percolant dans les andosols (RUXTON, 1968).

1.2. Au début, les *premiers produits d'altération* sont très siliceux et amorphes. Ils correspondent à la désagrégation des noyaux du verre, après dissolution du ciment ; ceci ressort nettement des expériences de TRICHET (1970), ou de l'analyse des cendres en début d'altération naturelle (QUANTIN, 1972a). Il n'est pas encore possible de déterminer des argiles par diffraction X, cependant des ébauches de phyllites argileuses peuvent être déjà aperçues en microscopie électronique.

1.3. *L'apparition de phyllites argileuses* peut être relativement rapide. Des ébauches de phyllites ont été notées dans des sols encore peu évolués ne datant probablement que de quelques dizaines ou tout au plus une centaine d'années. Des argiles nettement caractérisées, notamment de l'halloysite et des argiles 2 : 1 en mélange, ont été observées en quantité déjà importante dans des andosols saturés ne datant que d'un millier d'années environ (QUANTIN, 1972a). Cette durée est sensiblement plus courte que celle avancée par AOMINE (1963), pour la formation d'halloysite au Japon.

Comme on le verra plus loin, l'apparition d'argiles est favorisée par des conditions particulières ; elle semble se faire plus tôt et plus vite dans les andosols saturés que dans les andosols désaturés et perhydratés.

1.4. Au bout d'un temps relativement très court, un millier à quelques milliers d'années tout au plus, l'on peut déjà saisir la *diversification des voies de la cristallogenèse et de la pédogenèse suivant les conditions climatiques*.

Ainsi, aux Nouvelles-Hébrides, les argiles 2 : 1 apparaissent en abondance dans les andosols saturés des climats les plus contrastés, l'halloysite dans les sols plus désaturés des climats humides à courtes périodes de déshydratation et les hydroxydes : gibbsite et goethite, dans les sols fortement désaturés des régions très humides ou perhydratées (QUANTIN, 1972 a). Sans doute la vitesse de l'altération croît-elle avec l'augmentation de la pluviosité ; mais, il en résulte aussi une variation dans les équilibres géochimiques sol/solution et une diversification dans les produits résiduels et néoformés.

1.5. D'autres facteurs, d'ordre pétrographique, interviennent en outre pour hâter ou ralentir l'évolution des andosols. Parmi eux, *l'influence de la taille*

des cendres mérite d'être rappelée ; en effet, la vitesse de l'altération s'accroît avec la diminution de la taille des particules. Ainsi, dans l'île Tanna, aux Nouvelles-Hébrides (QUANTIN, 1972a), a été observée une véritable séquence pédologique à partir de formations de même âge : des sols peu évolués sur cendres grossières, suivis d'andosols saturés, jusqu'à des sols bruns sur cendres fines ; cette séquence dépend surtout de la diminution progressive de la taille des cendres en fonction de l'éloignement par rapport au centre d'émission.

2. EFFET FAVORABLE DE RAJEUNISSEMENT superficiel par des cendres fraîches sur la cristallo-genèse (genèse en chaîne).

Dans tous les profils complexes d'andosols récemment rajeunis, comportant un sol peu évolué en surface, on remarque un accroissement de la cristallisation des phyllites argileuses et des hydroxydes dans la partie profonde du sol.

Par exemple, aux Nouvelles-Hébrides (QUANTIN, 1972a), dans des andosols saturés, l'apparition d'hallowysite et d'argiles 2 : 1 est de plus en plus nette avec l'accroissement de la profondeur. De même, dans les andosols désaturés, la caractérisation d'hydroxydes : gibbsite surtout, éventuellement goethite cryptocristalline, et de phyllites argileuses : imogolite, ou hallowysite et parfois kaolinite, est plus évidente à la base des profils.

L'accroissement de la cristallo-genèse en fonction de la durée d'altération peut être ici encore invoqué pour expliquer cette évolution. Cependant, une autre hypothèse vient aussi à l'esprit : le sol peu évolué superficiel, par ses solutions d'hydrolyse, riches en silice et en cations, nourrit l'andosol sous-jacent. Ce dernier est relativement moins perméable et en même temps il est capable d'absorber une partie de certains éléments venant d'en haut. Ainsi resurgit l'hypothèse de la silicification de l'alopphone (AOMINE et WADA, 1962) pour expliquer la formation de l'hallowysite ; le même mécanisme pourrait aussi entraîner la genèse d'argiles 2 : 1, notamment de smectites. Le sol peu évolué nourrit l'andosol sous-jacent, à l'image des sols de l'amont nourrissant ceux de l'aval dans un « paysage géochimique » (PAQUET, 1970).

3. SÉQUENCE CLIMATIQUE (climatoséquence)

3.1. Répartition de la pluviosité et de l'humidité

Une séquence évolutive, fonction de la répartition pluviométrique et de l'humidité, a été fréquemment

observée en climat tropical. Les andosols sont souvent bien caractérisés sous les climats les plus humides et pluvieux ; mais il en existe sur des formations volcaniques très récentes, même sous des climats relativement secs ; la pluviométrie annuelle peut varier de 1 à plus de 10 m. Un bon exemple de séquence pluviométrique est offert par Hawaii (SWINDALE et SHERMAN, 1964). Cette séquence pluviométrique est fonction de l'orientation des versants par rapport aux vents dominants chargés de pluies et par rapport à l'altitude (tab. 1, Séquence d'Hawaii, d'après N.C.S.S., U.S.A., 1967-1968).

TABLEAU 1

Séquence d'Hawaii

Altitude (m)	Pluviométrie (mm)	Sol
(a) Versant « sous le vent », à climat contrasté		
300-1 300	500- 750	Ustollic Eutrandedpts = andosols saturés à accumulation calcaire
600-2 000	750-1 200	Typic Eutrandedpts = andosols saturés
1 000-2 200	1 000- 500	Mollic Vitrandepts = sols peu évolués à allophane, ou andosols vitriques saturés
(b) Versant « au vent », à climat pluvieux et régulièrement humide		
0- 500	1 750-2 500	Typic et Hydric Dystrandedpts = andosols désaturés non perhydratés
0-1 500	2 500-7 500	Typic Hydrandedpts = andosols désaturés perhydratés

Il en est de même dans d'autres régions : aux Antilles (COLMET-DAAGE et LAGACHE, 1965), comme en Equateur (COLMET-DAAGE *et al.*, 1967-1969), ou au Mont Cameroun (SIEFFERMANN, 1973), il est observé successivement : des andosols désaturés et perhydratés à allophane et gibbsite sous des climats perhumides, puis des andosols à allophane et hallowysite (sols bruns-andiques) sous des climats humides de transition et, enfin, des sols bruns eutrophes tropicaux à hallowysite ou des sols ferrallitiques à métahallowysite sous des climats plus contrastés.

Des observations analogues ont aussi été faites aux Nouvelles-Hébrides (QUANTIN, 1972a et observations

inédites) sur des îles volcaniques récentes. Aux Iles Banks, les andosols désaturés perhydratés, à allophane ou imogolite, gibbsite et goethite cryptocristalline, n'apparaissent que dans des conditions de pluviométrie supérieure à 4 m et régulièrement répartie ; par contre, sur les versants « sous le vent » des mêmes îles, recevant des précipitations moindres et soumis à un climat contrasté, on observe successivement des sommets perhumides aux bas versants plus secs, le passage progressif des andosols désaturés aux andosols saturés, puis aux sols bruns andiques contenant en mélange halloysite et smectites. Dans l'île Aoba, sous une pluviométrie de 2 à 4 m et sur des cendres volcaniques d'âge récent (1 000 à 1 500 ans) les andosols sont saturés, riches en silice et ils contiennent fréquemment en profondeur, en plus de l'allophane, un mélange d'argiles 1 : 1 (halloysite) et 2 : 1 (smectites et vermiculite) ; la formation plus évidente et plus abondante de smectites dans les régions climatiques les plus sèches y est également constatée, malgré l'âge très récent de ces sols. Dans des îles plus anciennes, par exemple Vaté, Santo, Pentecôte, Maewo (QUANTIN, 1972b, 1973, 1974), on n'observe plus les sols à caractères andiques très accusés (bruns - andiques ou ferrallitiques - andiques) que sur les sommets à climat perhumide, tandis qu'à basse altitude (< 300 à 500 m) se répartissent « au vent » d'une part, des sols bruns et des sols ferrallitiques, « sous le vent » d'autre part, des sols ferrallitiques.

De ces faits, il peut être déduit deux hypothèses principales :

- l'alternance des conditions d'hydratation et de déshydratation favorise la cristallogénèse des argiles,
- la permanence de l'hydratation gêne la cristallisation des argiles et des hydroxydes de fer, mais favorise celle de la gibbsite.

3.2. Séquence thermique

L'apparition d'andosols désaturés humiques, caractérisés par un horizon A₁ noir, très épais, ayant des matières organiques à rapport C/N élevé et fortement acidifiantes, correspondrait à une région climatique perhumide, plus froide que celle précédemment évoquée sous les tropiques (TAN, 1966) : climat tempéré froid du Japon (TODUKOME et KANNO, 1965) ou du Massif Central (HETIER, 1971), ou tropical d'altitude en Equateur (COLMET-DAAGE *et al.*, 1967-1969), en Indonésie (TAN, 1966) ou à La Réunion (ZEBROWSKI, 1973, par exemple.

L'évolution de ces sols vers la podzolisation, sous l'influence complexante des acides humiques, est suggérée par les observations de ZEBROWSKI (1973) sur une climato-séquence de La Réunion. Ce processus serait aussi probablement accentué, en-deçà d'un seuil thermique, par des conditions thermodynamiques et géochimiques moins favorables à la dissolution de la silice, tout en étant propices à la complexation du fer et de l'alumine (*comm. or.* TARDY, 1973).

Etat minéral amorphe : apparition et conservation de cet état dans les sols

Diverses hypothèses ont été proposées pour expliquer la formation de produits minéraux d'altération « amorphes » et leur conservation en cet état dans les sols. Il ne sera rappelé que les plus importantes :

1. FORMATION DES SUBSTANCES MINÉRALES AMORPHES

1.1. *L'héritage des verres amorphes* conduit naturellement à une structure d'allophane (TRICHET, 1970). Les premiers produits d'altération des verres, obtenus par la dissolution des ciments liant entre elles les particules élémentaires (billes ou fibres très fines), peuvent être considérés comme des précurseurs d'allophanes. Cette première forme résiduelle, très riche en silice et en cations alcalino-terreux, est probablement l'équivalent de l'allophane B de FIELDS (1955).

1.2. *Des néosynthèses de substances minérales amorphes* (silicates et hydroxydes) apparaissent rapidement, à partir des éléments dissous, soit en même temps que les produits résiduels précédents, soit ensuite et dès leur dissolution.

(1) Ainsi se forme notamment l'allophane, à partir de solutions d'altération riches en silice et en alumine. L'allophane a été définie par ROSS et KERR (1934) comme un aluminosilicate hydraté et amorphe. C'est cette forme que FIELDS (1955) désigne aussi sous le nom d'« allophane A ». Il est raisonnable de considérer l'allophane comme un ensemble d'ébauches argileuses irrégulières, qui, par suite des défauts de leur structure, paraissent « amorphes » aux diffractions de rayons X. Ces ébauches sont susceptibles, soit de se dissoudre à nouveau, soit d'évoluer naturellement vers des structures argileuses (généralement phylliteuses) plus parfaites. Pour les auteurs japonais,

notamment AOMINE et WADA (1962), l'allophane évolue normalement par silicification progressive de feuillets gibbsitiques et déshydratation vers la structure de l'halloysite; ils proposent une formule dont le rapport molaire Silice/Alumine peut varier de 1 à 2 (formule intermédiaire entre celle de l'imogolite et celle de l'halloysite). En réalité, l'observation d'andosols plus variés que ceux rencontrés au Japon, notamment celle des andosols saturés (QUANTIN, 1972a) laisse à penser qu'il existe aussi des allophanes riches en silice. Suivant les diverses conditions géochimiques de leur genèse dans les sols, il faut imaginer diverses familles d'allophane pouvant conduire naturellement aux diverses familles minéralogiques d'argiles; trois sous-ensembles peuvent schématiquement être distingués: premièrement, l'allophane-alumineuse, à rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ voisin de 1, accompagnant la formation de la gibbsite et de l'imogolite (YOSHINAGA et AOMINE, 1962 a et b); deuxièmement, l'allophane-halloysitique, à rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ voisin de 2, accompagnant la formation de l'halloysite; troisièmement, l'allophane-siliceuse à rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ supérieur à 3 et souvent très élevé, accompagnant la formation des argiles 2:1; ces dernières argiles étant souvent ferrifères et parfois magnésiennes, ceci explique la valeur anormalement élevée du rapport silice/alumine constatée. Ainsi doit-on considérer la formation d'allophane comme un stade transitoire, soit le plus fréquemment par aggradation vers la genèse d'argiles: kaolinite pour TAMURA et JACKSON (1953), halloysite pour SUDO (1954), halloysite et smectites pour TRICHET (1970), soit plus rarement par dégradation vers la formation d'hydroxydes d'alumine: gibbsite pour BATES (1960).

(2) Il apparaît également des *hydroxydes de fer et d'alumine à l'état amorphe*, et en quantité très abondante dans les andosols. Les hydroxydes d'alumine amorphe peuvent contribuer, soit à la genèse d'allophane, soit à celle de formes cristallisées. La gibbsite a été très fréquemment observée dans les andosols désaturés (COLMET-DAAGE *et al.*, 1967-1969; SIEFFERMANN, 1973; QUANTIN, 1972a). La boehmite a été rarement déterminée, et en petite quantité seulement, dans les andosols. L'alumine peut demeurer à l'état amorphe dans les andosols perhydratés, ou prendre une forme cryptocristalline très fine (ne donnant pas de raies de diffraction aux rayons X, mais se remarquant par une réaction endothermique typique vers 300° à l'analyse thermique différentielle).

Les hydroxydes de fer amorphes évoluent peu dans les andosols. Tout au plus, observe-t-on parfois des traces de lépidocrocite ou la formation de goethite

cryptocristalline très fine (difficile à déterminer par diffraction de rayons X ou analyse thermique différentielle). S'il existe parfois de l'hématite en quantité importante (BECH-BORRAS, SÉGALEN et QUANTIN, 1974), il faut plutôt penser à un héritage qu'à une néoformation. Au cours de l'évolution des andosols vers les sols tropicaux, les hydroxydes de fer cristallisent peu à peu. Ainsi, aux Nouvelles-Hébrides (QUANTIN, 1972a, 1973 et 1974), on observe sur roches volcaniques l'apparition le plus fréquemment de goethite (souvent à l'état cryptocristallin et adsorbé sur les argiles, parfois bien cristallisée) et rarement d'hématite, dans les sols ferrallitiques, les sols bruns eutrophes et parfois les sols fersiallitiques. Il est remarquable que dans les sols ferrallitiques-andiques formés sous des climats perhydratés d'altitude, les hydroxydes de fer restent à l'état amorphe ou cryptocristallin.

(3) Les principaux *facteurs favorisant la formation des substances minérales amorphes* en grande quantité dans les andosols, ressortant des faits et hypothèses précédents, peuvent être résumés brièvement ainsi: tout d'abord, deux conditions paraissent prépondérantes pour la genèse des andosols: premièrement, des roches volcaniques riches en verre et d'âge récent; deuxièmement, un climat régulièrement humide.

La nature vitreuse et très poreuse de la roche mère et le climat très humide (et souvent aussi très pluvieux) permettent une hydrolyse intense et renouvelée des verres volcaniques. C'est ce phénomène qui constitue le processus initial fondamental de la genèse des andosols. C'est à cause de lui que la pédogenèse sur des cendres volcaniques se doit d'être à la fois si rapide, même sous un climat tempéré, et caractérisée par la production abondante de substances minérales amorphes. Pour cette raison essentielle, PEDRO (1968) pense que le concept de zonalité climatique ne peut plus s'appliquer aux sols formés sur des cendres volcaniques. C'est probablement à la formation de solutions d'altération très riches en silice et en cations, produites par une hydrolyse exceptionnellement intense, que l'on doit la genèse abondante d'allophanes et d'hydroxydes amorphes. Rappelons que l'altération des verres produit elle-même, dès le départ, des silicates amorphes (TRICHET, 1970). Ce sont ensuite les conditions d'équilibre sol/solution, variant avec la nature des roches volcaniques et des climats, évoluant avec l'âge des sols ou les effets du rajeunissement superficiel et le développement de la cristallisation des produits d'altération, qui entraînent une diversification dans la nature de l'allophane et des hydroxydes et aussi dans la cristallisation de ces produits. Différents

facteurs, d'origine minérale, organique ou climatique, vont ensuite intervenir pour hâter ou retarder l'évolution des produits amorphes vers la cristallisation.

2. FACTEURS DE CONSERVATION DE L'ÉTAT MINÉRAL AMORPHE

Tandis que dans les autres sols l'état amorphe des produits d'altération paraît fugace et ne concerne qu'une partie relativement faible du profil ou des constituants, dans les andosols cet état est prépondérant et il peut persister longtemps. Plusieurs des hypothèses proposées pour expliquer le retard à la cristallisation seront brièvement exposées ci-dessous :

2.1. *La complexation des substances amorphes*, et notamment de l'allophane, par des matières organiques difficilement minéralisables, stabilise ces substances à l'état amorphe. SIEFFERMANN (1973) fonde cette hypothèse sur l'observation suivante au Cameroun : plus le climat est pluvieux et régulièrement humide, plus les sols sur basaltes sont en même temps riches en acides humiques et en allophane ; par contre, l'horizon d'altération des sols ferrallitiques sur basalte, pourtant soumis aussi à une hydratation régulière, mais presque en l'absence d'acides humiques, est riche en argile (halloysite) et pauvre en allophane. Des observations analogues ont été faites dans les autres régions du monde, où les andosols sont généralement aussi riches en matières organiques. Mais l'on pourrait se demander si la forte adsorption des acides humiques par l'allophane, retardant ainsi leur minéralisation et provoquant leur accumulation, n'est pas plus la conséquence de la présence abondante d'allophane que la cause du maintien de celle-ci à l'état amorphe. Ce problème mériterait d'être plus clairement élucidé. Il est probable cependant que l'effet stabilisant du complexe allophane-matière organique n'est pas négligeable. SCHWERTMANN *et al.*, (1968) avait émis une hypothèse analogue concernant les hydroxydes de fer, en montrant l'effet inhibiteur des acides organiques sur la cristallisation de gels synthétiques d'hydroxydes de fer.

2.2. *L'abondance de métaux de transition*, accompagnant les produits d'altération d'âge récent, gêne la cristallisation des hydroxydes de fer. NALOVIC (1970 et 1972) avait remarqué au Cameroun une corrélation entre la somme des éléments de transition et la quantité d'hydroxydes de fer amorphes dans les sols ; il a pu montrer expérimentalement ensuite le rôle inhibiteur de ces mêmes éléments sur la cristallisation de gels

synthétiques. Or, les andosols sont généralement riches en éléments de transition et en même temps en hydroxydes de fer amorphes.

2.3. *La silice amorphe, et même les silicates argileux* ont un rôle inhibiteur sur la cristallisation des hydroxydes de fer. LAMOUREUX (1972) a montré la présence relativement abondante des hydroxydes de fer amorphes adsorbés sur les feuillets argileux dans les sols fersiallitiques du Liban. PEDRO et MELFI (1970), par la voie expérimentale à partir de gels ferro-siliciques synthétiques, ont observé que des solutions saturées en silice inhibent toute cristallisation, alors que la désilicification des gels par suite d'une percolation avec de l'eau saturée en CO₂ permet la formation d'hématite. Rappelons que les andosols sont riches en allophane et que leurs solutions d'altération sont très chargées en silice (30 à 80 ppm. RUXTON, 1968).

2.4. *L'état permanent d'une forte hydratation* des produits d'altération dans les andosols, phénomène très souvent remarqué, favoriserait le maintien de ces substances à l'état amorphe (QUANTIN, 1972a). En effet, l'hydratation permanente très forte (de 100 à 300 % d'eau !) et l'abondance d'ions en solutions (due à l'effet d'une hydrolyse intense sur des minéraux primaires abondants et à des verres particulièrement très solubles) gêne la cristallisation des produits d'altération ; ces conditions peuvent entraîner des désordres dans les cristaux, empêchant ainsi leur croissance et maintenant un état permanent d'instabilité. Les ébauches de phyllites argileuses demeurent irrégulières et fragiles ; celles des hydroxydes de fer restent désordonnées et à l'état cryptocristallin ; la gibbsite seule parvient à bien cristalliser. Que cet état amorphe favorise la formation de complexes organo-minéraux, et nous sommes alors ramenés à l'hypothèse de SIEFFERMANN (1973).

Plus l'état fortement hydraté se prolonge tardivement, plus la cristallisation des argiles et des hydroxydes de fer est retardée, et d'autant se maintient l'état amorphe ou cryptocristallin des produits d'altération ; c'est le cas notamment des climats perhumides. Par contre, plus tôt cet état s'interrompt, plus vite la cristallisation des argiles et éventuellement des hydroxydes de fer peut apparaître et se développer ; c'est le cas des climats contrastés. SIEFFERMANN ajoute aussi que la déshydratation peut provoquer la destruction des complexes organo-minéraux, permettant en même temps la minéralisation de l'humus et la cristallisation des substances minérales amorphes ainsi libérées. Ceci lui permet en outre d'expliquer

la répartition climatique zonale (climato séquence) des andosols et des sols bruns andiques sur le Mont Cameroun.

II. ÉVOLUTION DE LA « PÉDOGENÈSE INITIALE » SUR ROCHES VOLCANIQUES, EN MILIEU BIEN DRAINÉ ET CLIMAT TROPICAL

En conclusion des observations et hypothèses précédentes, l'évolution de la genèse des andosols peut être résumée brièvement dans les processus suivants :

1. Une hydrolyse et une désagrégation rapide des verres volcaniques fournit en même temps des solu-

tions très chargées en silice et en cations et des résidus silicatés amorphes précurseurs d'allophane.

2. Il se forme beaucoup de produits d'altération à l'état amorphe ou cryptocristallin : ce sont des complexes d'allophane et d'hydroxydes de fer et d'aluminium. Au début, ces produits sont très siliceux ; puis ils évoluent rapidement en s'appauvrissant en silice et en bases.

3. Le maintien de ces produits à l'état amorphe sous forme de complexes organo-minéraux et sous l'effet conjugué de l'hydratation permanente et de solutions très chargées en divers éléments inhibiteurs de cristallisation, dure plus ou moins longtemps suivant les conditions d'hydratation du milieu.

4. Plus les conditions climatiques sont pluvieuses et régulièrement humides, plus la vitesse d'altération

TABLEAU 2

Schéma de l'évolution de la pédogenèse initiale* sur roches volcaniques en climat tropical en fonction du temps et de la répartition pluviométrique

STADE 0 Roche mère volcanique vitreuse	STADE 1 Sols peu évolués profil A/C	STADE 2 Andosols différenciés profil A (B)/C	STADE 3 Sols pénévulés et évolués profil A (B)/C ou A B/C
Verres et microlites	Verres et microlites partiellement altérés et hydratés → allophane siliceuse, ou allophane B. (FIELDES, 1955)	1 - Séquence perhumide = <i>Andosols désaturés</i> allophane alumineuse (ou allophane A de FIELDS) - imogolite (YOSHINAGA, 1962) ± gibbsite ; hydroxydes de Fe amorphes ou goethite cryptocristalline	1 - Séquence perhumide = <i>Ferralsolites-andiques</i> (Hydrandepts) à gibbsite dominante ± un peu d'allophane alumineuse (et, ou) un peu d'argiles 1 : 1 (halloysite, ou kaolinite désordonnée) ; beaucoup d'hydroxydes de Fe amorphes → goethite cryptocristalline.
Phénocristaux	<i>Phénocristaux</i> très peu altérés	2 - Séquence climat humide à déshydratation temporaire et climat contrasté = <i>Andosols saturés</i> allophane riche en silice ± mélange d'argiles 1 : 1 halloysite 2 : 1 smectites, M - V a) climat le plus humide → allophane + halloysite et traces de vermiculite b) climat le plus sec → allophane + smectites et interstratifiés N.B. : les phénocristaux (plagioclases ou olivine) → directement des smectites (SIEFFERMANN, 1973 ; QUANTIN, 1973)	2 - Séquence humide à faible déshydratation temporaire → { a) Sols bruns eutrophes tropicaux** b) <i>Ferralsolites</i> à argiles 1 : 1 dominantes, halloysite ou kaolinite désordonnée, et traces argiles 2 : 1 ; goethite, ± un peu d'hydroxydes de Fe amorphes ; ± un peu de gibbsite 3 - Séquence climat contrasté → { a) Sols bruns eutrophes tropicaux** c) <i>Ferralsolites</i> à argiles 2 : 1 dominantes smectites ± interstratifiés, 1 : 1 kaolinite désordonnée en petite quantité ; - goethite (et, ou) hématite et un peu d'hydroxydes de Fe amorphes

* Pédogenèse en milieu bien drainé ; processus essentiellement géochimique, avant tout remaniement ou autre processus (lessivage, podzolisation) important.

** Sols bruns eutrophes tropicaux = intergrade dans le temps d'évolution entre andosols saturés des climats non perhumides et sols évolués : ferrallitiques des climats humides à faible déshydratation et ferralsolites des climats contrastés.

est grande ; mais aussi plus la cristallisation des argiles et des hydroxydes de fer est retardée et, en même temps, plus la désilicification des produits d'altération est poussée.

5. Au contraire, plus le climat est contrasté, plus tôt la cristallisation des argiles apparaît et se développe et moins la désilicification des produits d'altération est poussée.

A partir de ces données, il peut être proposé de distinguer trois stades principaux de « pédogenèse initiale » sur roches volcaniques en climat tropical, en fonction du temps et (ou) du degré d'altération ; une subdivision sera faite en deux séquences à partir du deuxième stade, puis en trois séquences au troisième stade, en fonction de la diversification des conditions climatiques.

Les caractéristiques des sols correspondant à ces différents stades ou séquences ne seront exposés que très brièvement ; pour conclure, un schéma synthétique retracera cette évolution (tableau 2).

1. 1^{er} STADE. *Les sols peu évolués d'apport volcanique friable et les andosols peu différenciés* (QUANTIN, 1972a et 1974), à profil A C, sont caractérisés par :

- . l'absence d'horizon (B).
- . beaucoup de minéraux primaires et de verres en début d'altération.
- . peu de produits d'altération ; la fraction inférieure à 2 microns est constituée de résidus minéraux primaires altérés (feldspaths, pyroxènes, etc.), de produits d'altération amorphes riches en silice et en bases et relativement plus riches en silice que la roche mère, et de rares ébauches de minéraux argileux.

2. 2^e STADE. *Les andosols différenciés à profil A (B) C* (se situant entre les sols peu évolués et les sols bruns eutrophes ou les sols ferrallitiques et les sols fersiallitiques) sont caractérisés par :

- . un horizon (B) cambique.
- . des minéraux primaires encore abondants.
- . beaucoup de produits d'altération amorphes ou cryptocristallins : allophane, imogolite ; hydroxydes de fer et d'alumine à l'état de gel ou cryptocristallin.
- . peu de phyllites argileuses : 1 : 1 = halloysite surtout, kaolinite rare et (ou) 2 : 1 = smectites et interstratifiés M - V.
- . pas ou peu d'hydroxydes de fer cristallisés.
- . de l'alumine fréquemment cristallisée en gibbsite dans les andosols désaturés.

Deux séquences climatiques se diversifient :

2.1. *Séquence climatique contrastée = les andosols saturés* (QUANTIN, 1972a et 1974) se distinguent par :

des produits d'altération riches en silice, plus ou moins riches en phyllites argileuses en profondeur : halloysite dominante au pôle le plus humide ou smectites et interstratifiés M - V au pôle le plus sec ; l'absence d'hydroxydes de fer et d'alumine cristallisés.

2.2. *Séquence climatique perhumide = andosols désaturés* (COLMET-DAAGE, 1967-1968 ; QUANTIN, 1972a ; SIEFFERMANN, 1973) se distinguent par :

des produits d'altération pauvres en silice et plus ou moins riches en alumine ; pauvres en phyllites argileuses : halloysite ou imogolite surtout et kaolinite rare, smectites très rares et accidentelles ; l'apparition d'hydroxydes cristallisés : gibbsite nette et souvent abondante ; goethite cryptocristalline et souvent peu évidente ; boehmite et lépidocrite en petite quantité et peu évidentes.

3. 3^e STADE. *Les sols tropicaux ± évolués et bien différenciés* ; il s'agit de :

- . sols bruns eutrophes tropicaux = encore en cours d'évolution et d'altération, en climat tropical,
- . sols fersiallitiques } = stade d'évolution normale
- . sols ferrallitiques } en climat tropical
- . allites-ferritiques = stade extrême d'évolution en climat tropical

Ils sont caractérisés principalement par un profil A (B) C ou A B C.

Les sols bruns eutrophes tropicaux des zones climatiques humides sur roches volcaniques basiques (QUANTIN, 1972b, 1973 et 1974) sont riches en argiles : le plus souvent, ils sont surtout constitués d'argiles 1 : 1 (halloysite et métahalloysite), et seulement d'un peu d'argiles 2 : 1 (smectites et interstratifiés) ; parfois au contraire les argiles 2 : 1 (smectites) sont plus abondantes ; les phyllites argileuses dominent les substances silicatées amorphes ; les minéraux primaires sont encore abondants. Il existe des intergrades entre sols bruns et andosols (COLMET-DAAGE et LAGACHE, 1965). Les sols évolués sont toujours pauvres en minéraux primaires résiduels, dans le cas de roches basiques. Trois séquences climatiques apparaissent nettement distinctes :

3.1. *Séquence climatique contrastée = les sols fersiallitiques* (QUANTIN, 1972b et 1974), sont caractérisés par :

— un mélange d'argiles 2 : 1 (smectites) et 1 : 1 (métahalloysite ou kaolinite désordonnée), en proportion variable dépendant de l'âge du sol, de la répartition pluviométrique ou de la situation géomorphologique.

— la présence ou non d'hydroxydes de fer cristallisés : goéthite et (ou) hématite.

— la présence ou non d'un peu d'hydroxydes de fer amorphes (LAMOUREUX, 1972).

— l'absence d'hydroxydes d'alumine et d'allophane.

— la macrostructure du sol polyédrique large ou prismatique (parfois vertique).

3.2. *Séquence climatique humide* à déshydratation superficielle de courte durée = *les sols ferrallitiques* (COLMET-DAAGE et LAGACHE, 1965 ; QUANTIN, 1972, 1973 et 1974 ; SIEFFERMANN, 1973) sont caractérisés par :

— des argiles 1 : 1 kaolinite désordonnée, ou métahalloysite.

— des hydroxydes cristallisés abondants :

. de fer : goéthite fréquente, souvent à l'état cryptocristallin dans les sols saturés ou les sols relativement jeunes sur roches basiques, mais mieux cristallisée dans les sols fortement désaturés et plus anciens ; l'hématite est relativement rare.

. d'alumine : gibbsite fréquente ; boehmite très rare (dans les sols sur calcaires, COLMET-DAAGE *et al.*, 1969 ; TERCINIER, 1971).

— au pôle climatique le plus sec*, les sols ferrallitiques sont faiblement désaturés et riches en argiles kaoliniques (halloysite et matahalloysite sur roches basiques ; kaolinite désordonnée sur roches acides).

— au pôle climatique le plus humide*, les sols ferrallitiques sont fortement désaturés et gibbsitiques.

* Ces données correspondent à des sols formés sur des roches volcaniques basiques, d'âge récent, aux Nouvelles-Hébrides et aux Antilles.

Leur structure est souvent polyédrique fine. La densité apparente y est relativement plus faible que dans les sols fersiallitiques et décroît sensiblement avec l'accroissement de la pluviométrie.

— un peu de substances amorphes (ou cryptocristallines), hydroxydes de fer surtout, dans les sols les plus jeunes ou soumis aux climats les plus humides, sur roches basiques.

3.3. *Séquence climatique perhumide*, à hydratation permanente = *les sols ferrallitiques-andiques* (QUANTIN, 1972, 1973 et 1974) (ou allites-ferritiques ou hydroandeps) sont caractérisés par :

— l'absence ou presque d'argiles : kaolinite, halloysite.

— peu de silice (à l'exclusion du quartz).

— beaucoup d'hydroxydes de fer et d'alumine :

. hydroxydes de fer à l'état amorphe ou sous forme de goéthite cryptocristalline.

. hydroxydes d'alumine sous forme de gibbsite ; parfois en partie à l'état cryptocristallin dans la fraction inférieure à 2 microns.

— structure souvent continue à forte microporosité, ou polyédrique fine, à faible densité apparente.

3.4. *Séquence climatique perhumide et froide d'altitude* : une autre diversification de l'évolution pourrait être trouvée en des climats perhumides plus froids : tempérés ou « tropical d'altitude », dans les andosols humiques ; celle-ci, due à l'effet complexant des acides humiques de ces sols, conduirait à une pédogenèse podzolique à La Réunion ou à Madagascar (ZEBROWSKI, 1973), ou cryptopodzolique dans le Massif Central (HETIER, 1973).

En conclusion, l'étude des conditions de formation des andosols et de leur évolution devrait apporter une contribution importante à la connaissance de la pédogenèse.

Manuscrit reçu au SCD le 20 février 1974

BLIBLIOGRAPHIE

- AOMINE (S.), MIYAUCHI (N.), 1963. — Age of the youngest hydrated halloysite in Kyushu, *Nature*, Lond., 199, 1311-1312.
- AOMINE (S.), WADA (K.), 1962. — Differential weathering of volcanic ash and pumice resulting in formation of hydrated halloysite. *Amer. Mineralogist*, 47, 9-10, 1024-1048.
- BATES (T.F.), 1960. — Rock weathering and clay formation in Hawaii. *Min. Ind.*, 29, 1 : 4-6.

- BECH-BORRAS (J.), SEGALÉN (P.), QUANTIN (P.), 1974. — Sur la présence d'andosols à Olot (Gerona, Espagne). *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 278, sér. D : 1341-1344.

- COLMET-DAAGE (F.), LAGACHE (P.), 1965. — Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles Françaises. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, III, 2 : 91-121.

- COLMET-DAAGE (F.) *et al.*, 1967-1969. — Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, V, 1 : 1-38 et 4 : 353-392, et VII, 4 : 495-559.
- COLMET-DAAGE (F.) *et al.*, 1969. — Caractéristiques et nature de la fraction argileuse de quelques sols rouges d'Haïti situés sur calcaires durs. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VII, 3 : 345-416.
- FIELDS (M.), 1955. — Clay mineralogy of New Zealand soils. Part. 2, Allophane and related colloids. *New Zeal. J. Sci. Technol.*, B, 37 : 336-350.
- HETIER (J.M.), 1971-1973. — Caractérisation et répartition de quelques sols sur roches volcaniques du Massif Central. *Sci. du Sol*, 1971, 2 : 51-82, et 1973, 2 : 97-114.
- LAMOUREUX (M.), 1972. — Etudes des sols formés sur roches carbonatées ; pédogenèse fersiallitique au Liban. Thèse Univ. Strasbourg ; *Mém. ORSTOM n° 56*. Paris, 266 p.
- NALOVIC (Lj.), 1970. — Comportement du fer en présence des éléments traces. Centre ORSTOM de Yaoundé, 87 p. *multigr.*
- NALOVIC (Lj.) et PINTA (M.), 1972. — Comportement du fer en présence des éléments de transition. Etude expérimentale : lessivage des hydroxydes hydratés par de l'eau à l'air libre. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 275, sér. D : 153-156.
- NATIONAL COOPERATIVE SOIL SURVEY, U.S.A., 1967-1968. — Fiches descriptives de sols-types des séries de sols d'Hawaï ; inédit.
- LAQUET (H.), 1970. — Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées. Thèse Univ. Strasbourg. *Mém. Serv. Carte géol. Als.-Lorr.* 30. Strasbourg, 212 p.
- PEDRO (G.), 1968. — Notes sur le type d'altération superficielle caractérisant les projections volcaniques récentes du Puy de la Vache (Massif Central). *Bull. A.F.E.S.*, 3 : 17-20.
- QUANTIN (P.), 1972a. — 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.*, X, 2 : 123-151 et 3 : 207-217.
- QUANTIN (P.), 1972-1973-1974. — Archipel des Nouvelles-Hébrides ; Sols et quelques données du milieu naturel ; *cartes et notices*.
— Vaté, carte h.t., 22 p., ORSTOM, Paris, 1972
— Epi-shepherd, 2 cart. h.t., 23 p., ORSTOM, Paris, 1973
— Ambrym-Aoba - Maewo - Pentecôte, 4 cart. h.t., en préparation.
- ROSS (C.S.), KERR (P.F.), 1934. — Halloysite and allophane. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 185-G : 135-148.
- RUXTON (B.P.), 1968. — Rates of weathering of quaternary volcanic ash in North East Papua. *Int. Congr. Soil. Sc.* 9, 1968. Adelaïde, IV : 367-376.
- SCHWERTMANN (U.), FISCHER (W.R.), PAPENDORF (M.), 1968. — The influence of organic compounds on the formation of iron oxides. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968. Adelaïde, I : 645-655.
- SIEFFERMANN (G.), 1973. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Thèse Univ. Strasbourg. *Mém. ORSTOM n° 66*. Paris, 183 p.
- SUDO (T.), 1954. — Clay mineralogical aspects of the alteration of volcanic glass in Japan. *Clay Miner. Bull.*, 2 : 96-106.
- SWINDALE (L.D.), SHERMAN (G.D.), 1964. — Hawaiian soils from volcanic ash. *World Soil Resources Rep. n° 14*. FAO, Rome, pp. 36-49.
- TAMURA (T.), JACKSON (M.L.), 1953. — Structural and energy relationships in the formation of aluminum and iron oxides, hydroxides and silicates. *Science*, 117 : 381-383.
- TAN (K.H.), 1966. — On the pedogenetic role of organic matter in volcanic ash soils under tropical conditions. *Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap.*, 12, 2 : 80-84.
- TERCINIER (G.), 1971. — Contribution à la connaissance des phénomènes de bauxitisation et d'allitisation. Les sols des karsts d'atolls surélevés du Sud-Ouest Pacifique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, IX, 3 : 307-334.
- TODUKOME (S.), KANNO (I.), 1965. — Nature of the humus of humic allophane soils in Japan. *Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap.*, 11, 5 : 185-199.
- TRICHET (J.), 1970. — Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques, Thèse Univ. Paris. Ecole Normale Supérieure, Travaux du Laboratoire de Géologie, n° 4. Paris, 153 p.
- YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962a. — Allophane in some Ando Soils. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 8, 2 : 6-13.
- YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962b. — Imogolite in some Ando Soils. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 8, 3 : 114-121.
- ZEBROWSKI (C.), 1973. — Quelques andosols de Madagascar et de La Réunion ; Problèmes de la podzolisation sur un andosol. *Comm. Journée des Pédologues de l'ORSTOM*, septembre 1972. ORSTOM, Comité technique de Pédologie. *Bull. Liaison Thème Andosols*, n° 2 : 53-77.