

ANDOSOLS ; Note de synthèse sur les
travaux des pédologues de l'O.R.S.T.O.M.

M. LAMOUREUX

Plan

- Introduction
- 1. Définition
- 2. Facteurs de formation
 - 2.1. Climat et pédoclimat
 - 2.2. Matériau originel
- 3. Morphologie
- 4. Propriétés
 - 4.1. Dispersion
 - 4.2. Rétention pour l'eau, densité apparente, surface spécifique
 - 4.3. Liaisons allophane matière organique
 - 4.4. Capacité d'échange, saturation et bases, pH
- 5. Morphologie
 - 5.1. Minéraux primaires
 - 5.2. Minéraux secondaires amorphes ou cryptocristallins
 - 5.3. Minéraux secondaires cristallins
- 6. Genèse des principaux constituants
 - 6.1. Les conditions
 - 6.2. Les mécanismes de formation
- 7. Différents types d'andosols et sols andiques

Introduction

Les andosols ne couvrent pas une superficie considérable dans le monde, malgré une très forte dispersion géographique. Ils représentent cependant un matériel d'étude extrêmement intéressant et sont par ailleurs des sols fertiles.

Les chercheurs de l'ORSTOM ont déjà obtenu un certain nombre de résultats, en particulier sur les Andosols du Cameroun, de Madagascar, des Nouvelles-Hébrides, des Antilles, d'Ethiopie et de l'Equateur. Ces résultats sont repris dans ce chapitre de manière synthétique en s'appuyant essentiellement sur le travail de P. QUANTIN (1971) et sur divers articles dont les principaux sont les suivants :

COISET-DAAGE et LAGACHE (1965)	Andosols des Antilles
COISET-DAAGE et al (1967-69)	Andosols de l'Equateur
QUANTIN (1972)	Andosols des Nouvelles-Hébrides
SIFFERLIANN (1969)	Andosols du Cameroun

1. Définition

La définition de ces sols est inspirée de la légende de la carte des sols du monde FAO / UNESCO (1968) et de la 7ème approximation (USDA , 1967) :

Sols développés sur matériaux volcaniques où les constituants vitreux représentent plus de 60% de la fraction supérieure à 2μ . La densité apparente est très faible (souvent moins de 0,8), dans au moins les 50 premiers centimètres. Le complexe d'échange est caractérisé par une dominance de substances amorphes alumino-silicatées. Bien que fortement hydratés ces sols restent bien drainés et ne présentent pas les caractères morphologiques des sols hydromorphes.

Ce sont généralement des sols à profil A, (B), C. (B cambique).

D'autres caractères sont parfois proposés : teneurs élevées en matière organique, structure fragmentaire très fine et continue à l'état humide, impression d'une texture limoneuse à limono-sableuse au toucher, test de couleur au fluorure de sodium etc, mais ils ne caractérisent pas tous les andosols.

Nous noterons en outre que les andosols, formés le plus souvent

sur des matériaux volcaniques récents, s'inscrivent dans la séquence évolutive suivante : à partir de ces matériaux il y a une évolution très rapide vers des sols andiques peu évolués, puis des andosols eutrophes (eutrandepts) ou oligotrophes (dystrandeps). Des sols bruns eutrophes tropicaux andiques et enfin des sols ferrallitiques marquent des stades d'évolution de plus en plus poussés.

2. Facteurs de formation

2.1. Climat et pédoclimat

Les Andosols étudiés au Cameroun, à Madagascar, aux Nouvelles-Hébrides, aux Antilles ou en Equateur, sont situés dans des régions équatoriales ou tropicales très pluvieuses avec des précipitation @ 2 à 5 m et même 10 à 12 m, au pied du versant S.O. du Mont Cameroun. Une faible évapotranspiration, une saison sèche pourtant très réduite et un ennuagement presque constant en altitude maintiennent dans ces sols une humidité permanente.

Malgré des pluies abondantes le drainage est très bon et la lixiviation forte, du faite d'un substratum formé de matériaux volcaniques meubles. Ce sont là des conditions qui favorisent la formation des allophanes (SIEFFERMANN, 1969). La température souvent élevée, 23 à 29° C, peut descendre à moins de 10° C au-dessus de 3.500 m d'altitude où l'on trouve encore des andosols jusqu'à la limite des neiges éternelles (COLLET-DAAGE et al, 1967).

2.2. Le matériau originel

Par définition les andosols se forment sur des matériaux volcaniques pyroclastiques d'âge récent tels que tufs, cendres, ponces, lapillis ou brèches. Ils semblent également se former à partir de laves basaltiques sur les hauts plateaux éthiopiens (SEGALEN et RICHE, 1972). Ces matériaux finement diviés et riches en verre s'altèrent très rapidement pour donner des produits amorphes où dominent les allophanes. Plus ces matériaux sont déposés loin du cône éruptif, plus ils sont fins et facilement altérables, plus ils favorisent l'évolution rapide des andosols jusqu'aux sols bruns eutrophes ou sols ferrallitiques . En se rapprochant du cône éruptif les matériaux plus grossiers, moins facilement altérables donnent des sols peu évolués riches en silice et en allophane (PECROT et al, 1963 , QUANTIN, 1972).

3. Morphologie des andosols

Ces sols sont relativement jeunes, et contiennent encore dans le profil des minéraux primaires. On pourrait les considérer comme des sols initiaux (inceptisols) : Certains sont peu différenciés à profil A C (QUANTIN, 1972), d'autres avec un (B) de couleur ou de structure, présentent un profil A, (B), C. Enfin des profils complexes à II (B) C , III (B) C sont fréquents, soulignant les phases successives des dépôts éruptifs (COLLET-DAAGE et al, 1965-67). Parfois peu épais, ils peuvent atteindre plusieurs mètres.

Très organiques, jusqu'à 40% en surface dans des andosols des Nouvelles-Hébrides, ils peuvent encore en contenir 2% à 1 mètre de profondeur. Ils sont de couleur foncée en surface, noir (5 YR 2/1) à brun gris foncé (10 YR 3/2), souvent sur plus de 50 centimètres.

La couleur du (B) est variable : brun rouge foncé (5 YR 3/4), beige jaune (10 YR 5/8) à l'état humide , mais elle peut devenir beaucoup plus claire en séchant à l'air (COLLET-DAAGE et al, 1965-70).

La structure souvent fragmentaire et grumeleuse en surface est diffuse et moins nettement individualisée en profondeur. Il n'est pas possible de déceler sur de tels éléments de structure des revêtements argileux.

L'horizon (B), souvent humide se présente comme une masse continue restant pourtant très poreuse. La densité y est, en effet, inférieure à 0,8 et même peut atteindre 0,3 dans certains andosols des Nouvelles-Hébrides. Bien que parfaitement ressuyés, ces sols sont de véritables éponges gorgées d'eau, s'exprimant facilement entre les doigts. Faible cohérence à sec, plasticité à l'état humide avec toucher onctueux caractérisant bien ce milieu dépourvus de minéraux phylliteux ; suivant la nature des projections volcaniques, la texture peut paraître au toucher limono- sableuse à graveleuse ou limoneuse quand les cendres sont fines.

L'horizon d'altération est parfois presque inexistant si les andosols peu épais sont issus de cendres déposées sur basalte (Lt Cameroun : SIETTERMANN, 1970) ou sur roche calcaire dure (Vaté ; QUANTIN, 1972 a). Parfois (B) et C sont fondus en une succession de niveaux fins très altérés et de niveaux plus grossiers encore peu altérés (Antilles : COLLET-DAAGE et al, 1965) souvent le passage entre le (B) et le C est très progressif et les matériaux observés plus ou moins altérés et rubéfiés se reconnaissent facilement.

4. Propriétés des andosols

4.1. Dispersion des andosols

Les andosols ne se comportent pas comme les autres sols vis à vis des agents dispersants. Aucun traitement spécifique ne peut leur être appliqué. L'analyse classique laisse dans les sables une proportion notable d'éléments fins (COLMET DAAGE et al, 1967, TERCINIER et QUANTIN, 1968) et les résultats obtenus sont illusoire. Certains andosols ne se dispersent bien qu'en milieu alcalin, surtout s'ils sont très organiques (COLMET DAAGE, et al, 1970). Les allophanes riches en matières organiques se conduiraient comme des colloïdes électro-négatifs ; alors que dans certains cas (quand $\text{Si O}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2$ et quand il y a peu de matières organiques), ils se comportaient comme des colloïdes électro-positifs. Il faut avec ces derniers acidifier le milieu pour obtenir une bonne dispersion, mais celle-ci est plus ou moins bonne suivant la richesse en hydroxydes de fer. Cependant même après destruction des matières organiques QUANTIN (1972) observe que certains andosols des Nouvelles-Hébrides se dispersent mieux en milieu acide quand $\text{Si O}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 > 2$ dans la fraction fine, et quand il y a des quantités notables d'argile et de gibbsite.

Enfin si l'hexamétaphosphate de sodium ne semble pas convenir pour la dispersion des andosols, le pyrophosphate de sodium donne de bons résultats dans le cas d'horizons humifères séchés à l'air (COLMET DAAGE et al, 1970).

4.2. Rétention pour l'eau, densité apparente, surface spécifique

Une des propriétés qui caractérisent le mieux les sols à allophanes est certainement leur très forte capacité de rétention pour l'eau. Ainsi selon COLMET DAAGE et al, 1967, un échantillon d'andosol bien ressuyé, peut contenir 100 à 200 % d'eau et même plus.

- Après séchage à l'air, pendant plusieurs mois, plus un sol est riche en allophanes, moins il se réhumecte quand il est mis au contact avec un excès d'eau. Il y a donc déshydratation irréversible au-delà d'un certain taux de dessiccation à l'air, avec une très grande perte de volume.
- De tels sols, en permanence gorgés d'eau, présentent une très forte porosité atteignant 70 à 80 %, une densité apparente de 0,5 à 0,7 descendant même à 0,3 dans certains horizons (COLMET DAAGE et al, 1965, QUANTIN, 1972 b).

- Ces mêmes auteurs attribuent aux allophanes, plutôt qu'aux matières organiques, cette propriété d'adsorber une grande quantité d'eau.
- Et cette forte capacité de rétention pour l'eau des allophanes s'expliquerait par leur surface spécifique très élevée: SIEFFERMAN (1969) a mesuré sur des allophanes obtenues par dispersion des surfaces spécifiques de 400 m²/g (méthode B.E.T.) et sur fractions tamisées à sec (moins de 60 µ et contenant de 50 à 60 % d'allophanes) des valeurs de 300 m²/g . Cette forte surface spécifique explique non seulement la grande capacité de rétention pour l'eau des allophanes, mais aussi leur pouvoir adsorbant vis à vis des cations, des anions et d'autres produits amorphes.

4.3. Liaisons allophanes, matières organiques

Dans son étude sur les andosols du Cameroun SIEFFERMAN (1969) observe des variations parallèles entre teneurs en matières organiques et en colloïdes minéraux. Cet auteur pense que des complexes organo-minéraux se forment et empêchent l'entraînement des produits colloïdaux, malgré les très fortes précipitations. Il note par ailleurs que dans les sols ferrallitiques du Cameroun il n'existe pratiquement pas d'allophane en profondeur, alors que le milieu devrait être favorable à cette formation; mais celui-ci ne contient pas de matières organiques. Par contre, les andosols sont très riches en matières organiques, en particulier en acides fulviques et ceux-ci pourraient empêcher l'évolution des gels silico-alumineux. COLLET DAAGE et al, (1967) signalent en outre que de forts crochets exothermiques entre 400 et 600°, à l'analyse thermique différentielle, seraient attribuables à des complexes matière organique - allophanes. Ces crochets disparaissent par des attaques prolongées à l'eau oxygénée. Enfin de nombreux travaux (TOKUDOME et KANNO, 1963, KYUMA et KAWAGUCHI, 1964, BROADBENT, JACKMAN et M. NICOLL, 1964, WADA et INOUE, 1967) montrent qu'il se forme bien dans les andosols des complexes allophane-organiques qui présentent une grande résistance aux dégradations biologiques.

4.4. Capacité d'échange, saturation en bases, pH

4.4.1. Capacité d'échange

Une valeur stable et bien représentative de la capacité d'échange de bases des andosols est très difficile à obtenir. En effet elle dépend des pourcentages d'allophanes et de matières organiques, de l'intensité

d'hydratation des allophanes, de l'état d'humidité des sols au moment de la détermination, du pH d'extraction, de la teneur en sesquioxydes de fer et d'aluminium amorphes, enfin des moindres variations dans les techniques opératoires.

Sur le tableau 1, COLLET DAAGE et al (1967) ont présenté différents résultats obtenus sur des échantillons séchés à l'air ou à 60°C et par des échantillons frais : la capacité d'échange augmente nettement et peut même doubler quand les échantillons sont restés à l'état frais.

: Echan- : tillons	: Capacité d'échange		: Echan- : tillons	: Capacité d'échange sur		
	: sur échantillons			: échantillons		
: Equateur	: secs à l'air	: Frais	: Antilles	: secs à 60°	: secs à l'air	: frais
: 115 A	: 52	: 76	: SMA C	: 25	: 31	: 46
: B	: 39	: 56	: D	: 29	: 30	: 44
: D	: 33	: 72	:	:	:	:
: E	: 33	: 64	: CA4 B	: 23	: 25	: 46
:	:	:	:	:	:	:
: 117 A	: 52	: 82	: CA11 B	: 17	: 20	: 37
:	:	:	:	:	:	:
: 113 A	: 43	: 80	: L3 B	: 36	: 35	: 48
:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	: SL3 C	: 28	: 34	: 46
:	:	:	: D	: 23	: 23	: 40
:	:	:	:	:	:	:
: 111	: 40	: 88	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:
: 116	: 35	: 80	: SH16 C	:	: 26	: 44
:	:	:	:	:	:	:

Tableau 1 : Capacité d'échange en % de sol séché à 105 ° C (acétate d' NH_4) dans différents sols de l'Equateur et des Antilles (COLLET DAAGE et al, 1967).

Plus un sol est riche en allophanes plus la dessiccation entraîne une diminution de sa capacité d'échange.

- La capacité d'échange varie suivant le pH de la solution d'extraction (tableau 2) ceci s'expliquerait par le fait que les allophanes sont des colloïdes amphotères pouvant retenir des anions en milieu très acide et des

cations en milieu très alcalin. La capacité d'échange cationique, dépendante du pH, varie fortement quand les allophanes sont riches en alumine (avec gibbsite) et peu quand ils sont riches en silice (avec halloysite).

Echan- tillons	Profon. deur en cm	Capacité d'échange à l'acétate d'NH ₄		Idem après trait. à H ₂ O ₂	teneurs en li.O. %	Capacité d'échange à pH7 après trait. SEGALEN	
		pH 7	pH 9				
86 A	0-20	63	74	50	6,8	7	
B	60-90	93	110	92	4,9	5	
C	120-140	63	82	67	1,7	16	
92 A	0-20	102		46	18,1	4	
B	40-80	98		67	10,6	2	
82 A	0-20	73	93	46	10,2	8	
B	40-60	74	90	55	9,9	6	

Tableau 2 : Capacité d'échange de bases en fonction du pH, après destruction de la matière organique et après traitement à HCl 6N et NaOH 0,5N (COISET DAAGE et al, 1967).

COISET DAAGE et al (1967-1969) ont également montré que l'élimination des produits amorphes par la méthode SEGALEN (1968) diminue considérablement la capacité d'échange. Par contre, un traitement modéré à l'hydrosulfite (méthode JACKSON) libère quelques sites d'échange occupés par des produits amorphes et augmente légèrement la capacité d'échange.

- Les allophanes ont en outre la propriété de fixer de fortes quantités de phosphore, jusqu'à 25% de P₂O₅ par rapport au poids d'argile (QUANTIN, 1972b), tandis que les taux de phosphore assimilable sont relativement faibles et mêmes nuls dans des andosols désaturés des Nouvelles-Hébrides (QUANTIN, 1972b). Les andosols riches en gibbsite ont un rapport P assimilable / P total inférieur à 1, et n'ont qu'une faible disponibilité en cet élément, alors que les andosols riches en silice fixent moins le phosphore et ont souvent un rapport P assimilable / P total voisin de 5 à 20%, donc une forte disponibilité en cet élément (COISET DAAGE et al, 1965).

4.4.2. Saturation en bases pH.

De nombreuses analyses du complexe d'échange (Acétate d' NH_4 à pH 7) mettent en évidence des taux variables de bases échangeables, mais où domine le calcium ; le magnésium restant relativement important. Il est à noter que dans le sol total où les réserves en minéraux primaires sont abondantes le magnésium constitue jusqu'à 70 à 90% du total des bases (SIEFFERMANN, 1969). Sur le tableau 3, QUANTIN (1972) présente des andosols eutrophes, saturés entre 30 et 100%, des andosols oligotrophes désaturés entre 2 et 11%.

Les andosols des régions très humides ou à climat froid sont fortement désaturés, alors que ceux des régions à climat tropical ou subtropical moins humide sont peu ou moyennement désaturés (COLLET DAAGE et al, 1965-1967 ; SIEFFERMANN, 1969) ; QUANTIN, 1972).

Comme le montre le tableau 3, les andosols sont généralement peu acides, surtout dans l'horizon (B) et même quand ils sont désaturés (SIEFFERMANN, 1969 ; QUANTIN, 1972 ; COLLET DAAGE et al, 1967). Cependant dans les régions très pluvieuses et dans les horizons humifères de surface des pH acides de 3,5 à 4,5 ont pu être relevés. Cette faible acidité des andosols, même désaturés, s'expliquerait par le point iso-électrique élevé des allophanes, entraînant de faibles variations entre le pH - H_2O et le pH - KCl (COLLET DAAGE et al, 1967).

Types d'andosols	Horizons	Profondeur en cm.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S/T	pH
Andosols eutrophes d'Aoba (humide)	A 1 (B) - C	0 - 10 à 15 40 à 120	10,4 - 36,7 8,4 - 19,6	4,2 - 10,5 3,0 - 11,0	0,3 - 2,0 0,5 - 3,9	0,15 - 1,3 0,17 - 0,84	74 à 100 80 à 100	5,9 - 7,4 6,5 - 7,7
Andosols oligotrophes des îles Banks moyennement désaturés	A 1 (B)	0 - 10 à 20 40 à 70 - 110	4,3 - 34,9 1,5 - 9,2	1,7 - 10,1 0,6 - 6,8	0,21 - 1,06 0,05 - 0,58	0,13 - 0,49 0,04 - 0,35	48,9 à 71,3 26,8 - 42,7	5,2 - 6,3 6,4 - 7,0
Andosols oligotrophes forts désaturés des îles Banks	A 1 (B)	0 - 10 à 20 40 à 70-110	0,44- 2,45 0,13- 0,94	0,84- 2,75 0,08- 0,72	0,35 - 0,65 0,03 - 0,05	0,17 - 0,50 0,04 - 0,11	5,7 à 19,5 2,3 à 10,9	4,5 à 5,1 5,3 à 6,0

Tableau 3 : Bases échangeables , taux de saturation et pH de quelques andosols des Nouvelles- Hébrides

(QUANTIN, 1972 b).

5. Minéralogie des Andosols

5.1. Minéraux primaires

COLLET D'ARRE et al (1967) signalent que les cendres dont dérivent de nombreux andosols de l'Equateur sont dacitoïdes et renferment, dans leur fraction légère, des feldspaths plagioclases, des verres, de l'analcime, du quartz et plus rarement de la sanidine. D'après la fraction lourde ces auteurs distinguent trois faciès : un à hypersthène et hornblende verte et enfin un faciès hornblende verte avec un peu d'hypersthène.

Dans l'ensemble peu de travaux ont été effectués sur l'altération des minéraux primaires dans le but de rechercher soit leur susceptibilité plus ou moins grande à l'altération soit leur mode d'altération et leur transformation en allophanes.

5.2. Minéraux secondaires amorphes ou cryptocristallins

Ces substances sont généralement déterminées par la méthode cinétique de SEGALIN (1968). Les produits facilement extractibles paraissent amorphes aux rayons X mais si certains sont réellement amorphes, il semble que d'autres soient cryptocristallins.

5.3. Les allophanes

Les allophanes sont des constituants alumino-silicatés amorphes et hydratés. Certaines, très riches en silice, contiennent des minéraux primaires plus ou moins altérés et hydratés ou de la cristobalite, des diatomées, de l'opale etc ... D'autres, très alumineuses, contiennent de l'alumine amorphe ou cristallisée. D'autres enfin peuvent contenir de l'hallowite cryptocristalline, de l'ogolite, de l'hisingsérite, des hydroxydes de fer etc... (QUANTIN, 1971). Des Japonais (YOSHINAGA et AOKI, 1962 a, YOSHINAGA, 1966) ont tenté de purifier et de caractériser plus précisément des allophanes d'andosols du Japon, mais les résultats obtenus sont discutables et peuvent difficilement être étendus à toutes les allophanes.

Les allophanes sont très abondantes dans les andosols, mais elles sont encore plus abondantes dans les sols plus récents et dans ceux des régions les plus humides. Elles sont plus "siliceuses" et ont un rapport $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ élevé (2,6 à 13) dans les régions relativement plus sèches ou les sols les plus jeunes (QUANTIN, 1972 b).

5.2.2. Oxydes et hydroxydes amorphes

SIEFFERMANN (1969) a utilisé la méthode SEPALIN dans des andosols désaturés du Cameroun et a obtenu des taux élevés de substances amorphes : 5 à 10 % du sol total dans les horizons C ; 10 à 40 % dans les horizons (B) et A (plus du tiers en Fe_2O_3 , autant en Al_2O_3 et le reste en silice).

Mais il faut rappeler que ces substances facilement extractibles par cette méthode sont parfois plus ou moins cristallisées (COLLET DAAGE et al, 1972 ; LAPOUROUX, 1969) . La présence d'hydroxydes de fer encore amorphes s'expliquerait par un retard à la cristallisation , provoqué par leur adsorption à des substances organiques abondantes dans ces sols ou par des substances minérales telles que la silice, les phosphates, les éléments traces (SCHEFFERMANN, 1966 ; SCHEFFERMANN , 1959 ; PEDRO et al, 1970 ; HALOVIC, 1970).

En ce qui concerne la silice SIEFFERMANN (1969) en trouve 12 à 33% par rapport aux substances amorphes totales. Cette silice amorphe peut être liée à l'alumine pour former de l'allophane ou exister sous forme de diatomées ou d'opale ou enfin entrer dans la structure de l'imogolite, elle, aussi facile à extraire à HCl (ON) (SIEFFERMANN, 1969).

5.3. Minéraux secondaires cristallisés

5.3.1. Minéraux argileux

L'imogolite est un aluino-silicate secondaire cristallisé, constituant une espèce minérale (bien définie et bien caractérisée). C'est une argile à rapport $SiO_2 / Al_2O_3 = 1 -$. Son existence a été reconnue en petite quantité dans les andosols de l'Equateur (COLLET DAAGE et al, 1969), du Cameroun (SIEFFERMANN, 1969), des Nouvelles-Hébrides (QUANTIN, 1972 b). Bien que parfaitement caractérisée elle est souvent difficile à dissocier des allophanes.

L'halloysite est le minéral argileux le plus fréquemment observé dans les andosols. Il se présente sous forme de tubes ou de glomérules (SIEFFERMANN et LILLOT, 1968). La forme glomérulaire dériverait directement des allophanes (SIEFFERMANN, 1969), par enrichissement en silice (COLLET DAAGE et al, 1968).

La métahalloysite est une forme hydratée de l'halloysite. Elle est plus fréquemment reconnue dans les sols de régions moins pluvieuses que l'halloysite et généralement dans le haut des profils. Kaolinite, montmorillonite, vermiculite, illite et interstratifiés ont été mises en évidence en petite quantité dans des andosols du Cameroun (SIEFFERMANN , 1969) de l'Equateur (COLLET DAAGE et al, 1968) et des Nouvelles-Hébrides (QUANTIN, 1972 b) .

5.3.2. Oxydes et hydroxydes cristallisés

Généralement les oxydes et hydroxydes sont amorphes dans les andosols, mais plus ces sols évoluent, plus ces constituants cristallisent.

Ainsi de petites quantités de goethite ont été mises en évidence dans les andosols (COIMET DAAGE et al, 1965 ; SIEFFERMANN, 1969 ; QUANTIN, 1972 b), associée à un peu d'hématite dans les régions plus sèches du Cameroun.

De la gibbsite a été décelée en petite quantité dans les sols des régions les plus humides des Antilles et de l'Equateur (COIMET DAAGE et al, 1965 - 67 - 69), mais elle est abondante dans des andosols moyennement désaturés des Nouvelles-Hébrides (QUANTIN, 1972 b). Enfin de la boehmite a été signalée dans des andosols de l'Equateur et des oxydes de titane (SIEFFERMANN, 1969) dans ceux du Cameroun.

La silice sous forme de quartz est signalée par SIEFFERMANN (1969) au Cameroun. Elle serait résiduelle soit de trachytes ou phonolites, soit de pollutions superficielles. COIMET DAAGE et al (1965 - 67 - 69) signalent la cristobalite dans les andosols des régions très humides des Antilles et de l'Equateur, ainsi que QUANTIN (1972 b) dans les andosols fortement désaturés des Nouvelles-Hébrides.

D'autres minéraux résiduels tels que des zéolites (COIMET DAAGE et al, 1965) et de la magnétite (SIEFFERMANN, 1969) existent également dans ces sols mais en petites quantités.

6. Genèse des principaux constituants des andosols

La plupart des auteurs qui ont travaillé sur les andosols sont d'accord quant aux conditions de formation de ces sols et en particulier des allophanes. Par contre les mécanismes donnant naissance ou permettant le maintien de leurs divers constituants font l'objet d'hypothèses (SIEFFERMANN, 1969), mais n'ont pas encore été très étudiés.

6.1. Les conditions de formations des andosols

Précipitations . Tous les auteurs (COIMET DAAGE et al, 1965 - 67 - 69), SIEFFERMANN, 1969 ; QUANTIN, 1972 b ; ZEBROWSKI, 1971) soulignent l'importance des précipitations abondantes et d'un état d'humidité permanent comme facteurs indispensables au développement et au maintien d'allophanes dans les andosols. En milieu très humide, QUANTIN, (1972 b) observe des "andosols oligotrophes" moyennement à fortement désaturés et COIMET DAAGE et al (1967) signalent que

L'altération des cendres est intense avec formation de substances amorphes hydratées et d'hydroxydes d'alumine.

Dès que les précipitations diminuent et qu'une petite saison sèche apparaît, les quantités d'allophanes sont plus faibles et des minéraux argileux se forment. COHMET DAAGE et al (1967 - 70) mettent en évidence dans des andosols de l'Equateur et du Nicaragua de régions plus sèches (1m80 à 2m50) une augmentation d'halloysite et une diminution des allophanes; mêmes observations dans les andosols du Mounjo au Cameroun (SIEFFERT, 1969); QUANTIN, (1972 b) note en surface des andosols des Nouvelles-Hébrides un accroissement de vermiculite quand les périodes sèches sont courtes et un minéral à 14 Å (montmorillonite semble-t-il) quand les périodes sèches sont bien marquées. Mais ce même auteur signale que dans tous les cas, même dans les andosols de régions très humides, il observe de l'halloysite en quantité notable dans la profondeur des profils.

Drainage. Les matériaux volcaniques pyroclastiques aux dépens desquels se forment les andosols sont toujours très perméables. L'eau ne stagne jamais, même quand il pleut plus de 200 mm par mois (Mont Cameroun). La lixiviation des bases et de la silice se fait très bien; mais dès qu'un confinement se produit, pour une cause quelconque, un autre type de sol apparaît (SIEFFERT, 1969).

Roche-mère. Les andosols sont généralement observés sur des matériaux volcaniques vitreux, des lapillis, des tufs etc ... Parfois des laves basaltiques (Ethiopie). Ces matériaux facilitent une altération rapide et la formation de substances allophaniques.

Température. D'après COHMET DAAGE et al (1967) la température n'a pas d'action nette sur la formation des allophanes; ils observent des andosols en bordure de mer en régions tropicales, ainsi qu'à 3.200 m sous climat tempéré-froid. D'ailleurs des andosols ont été observés également dans le Massif Central.

Temps. QUANTIN (1972 b) a mis en évidence l'importance du temps dans la formation des andosols et dans l'évolution de leurs différents constituants :

- sur cendres récentes (quelques dizaines d'années) se sont formés des sols peu évolués andiques contenant quelques pour cent d'éléments fins, mais pas de minéraux argileux.

- dans un profil polyphasé datant en surface de 1.000 ans la fraction fine est abondamment formée d'allophanes siliceuses surtout et d'un peu de vermiculite ou d'interstratifiés ; à mi-profondeur (1.500 ans) il y a encore des allophanes, la montmorillonite devient abondante, avec un peu d'halloysite ; en profondeur (plus de 1.500 ans), l'halloysite domine, il ne reste qu'un peu d'allophane et de montmorillonite.

L'altération des matériaux pyroclastiques et l'évolution des constituants des andosols semblent donc extrêmement rapides.

6.2. Mécanismes de formation des produits minéraux secondaires dans les andosols.

SIEFFE MANN (1969) part de l'hypothèse que les matières organiques, en particulier les acides fulviques, abondants dans les andosols, forment des complexes allophano-organiques et empêchent la matière minérale de cristalliser. Il se fonde :

- sur les travaux de nombreux chercheurs (SCHWERMANN et al, 1968, par exemple).
- sur le fait que la matière organique des andosols du Cameroun est beaucoup plus difficile à détruire que celle des autres sols ;
- sur le fait que dans les sols ferrallitiques de l'Adamaoua les conditions profondes sont favorables à la formation d'allophanes, mais celles-ci ne subsistent pas parce qu'il n'y a pas de matières organiques, notamment d'acides fulviques.

En outre, les complexes allophano-organiques conditionneraient l'évolution ultérieure de la matière minérale vers des silicates argileux : ainsi vers 4 à 5 mètres de profondeur dans un sol ferrallitique fortement désaturé, quand les acides fulviques disparaissent l'halloysite est très abondant .

Nous noterons cependant que dans les andosols de zones climatiquement marginales, les minéraux silicatés apparaissent d'abord en surface, alors que les allophanes se maintiennent en profondeur. Par ailleurs, les acides fulviques sont plus généralement connus pour leur action complexante favorisant les illuviations de la matière minérale. Des réserves peuvent donc être émises quant à cette hypothèse du maintien des allophanes à l'état amorphe du fait d'une inhibition de la cristallisation par les acides fulviques. D'autres substances peuvent jouer ce rôle d'inhibiteurs et d'autres facteurs peuvent intervenir pour favoriser la cristallisation, notamment les périodes sèches (LAMOUREUX, 1972), la lixiviation des cations ou des éléments traces (NALOVIC, 1970).

6.2.2. Gibbsite

Cet hydroxyde d'alumine est avec la kaolinite le minéral secondaire le plus important des andosols du Cameroun.

Deux mécanismes sont invoqués par SILBERMANN (1969) pour sa formation:

- soit une formation directe à partir de feldspaths, s'il y a une forte lixiviation en silice ; (DELVIGNE Y.)
- soit une formation à partir des produits amorphes alumino-organiques qui se détruiraient par dessiccation. La matière organique étant détruite, les allophanes perdraient leurs propriétés et libéreraient de l'alumine qui cristalliserait lentement en gibbsite . Les deux mécanismes pourraient fonctionner simultanément.

6.2.3. Kaolinite

Différents mécanismes sont également proposés par ce même auteur pour la formation de kaolinite. Il pourrait y avoir formation de kaolinite au sein des minéraux primaires, en cours d'altération, par l'intermédiaire d'un stade "solution" éphémère selon les mécanismes décrits par MILLOT (1964). Mais l'auteur écarte cette hypothèse, de même que celle consistant en une resiliification de la gibbsite. Par contre il pense que la majeure partie de la kaolinite des andosols se forme à partir de l'alumine et de la silice des complexes allophano-organiques, tout comme la gibbsite.

6.2.4. Montmorillonite

SILBERMANN (1969) a mis en évidence 15% de montmorillonite dans la plupart des andosols désaturés, aussi bien en profondeur qu'en surface. L'origine de la montmorillonite pourrait se concevoir à partir de feldspaths et dans de micro-milieus très mal drainés ou à partir des produits amorphes eux-mêmes, mais ces hypothèses ne sont pas retenues par l'auteur. Par contre il pense que la montmorillonite peut se former à partir des minéraux ferromagnésiens (olivine).

Or la montmorillonite n'a pas été observée dans tous les andosols (COUET-DAAGE, 1967 ; QUANTIN, 1972) elle n'est présente en quantité notable que lorsque la période sèche est importante. Cette dernière remarque ferait plutôt pencher pour les deux premières hypothèses.

7. Différents types d'andosols et sols andiques

SIEFFELTANN (1969) a étudié essentiellement des andosols désaturés sur le Mont Cameroun, ainsi que le passage d'andosols désaturés à des sols bruns eutrophes tropicaux moyennement désaturés.

ZEBROWSKI (1971) à Madagascar a présenté des sols peu évolués andiques et des andosols moyennement désaturés et fortement désaturés.

QUANTIN (1972 b) distingue aux Nouvelles-Hébrides :

- des sols peu évolués sur cendres volcaniques ;
- des andosols eutrophes saturés à plus de 70%, riches en minéraux primaires et substances amorphes siliceuses, très pauvres en minéraux cristallisés ;
- des andosols oligotrophes, moyennement désaturés (20 à 50%) et fortement désaturés (moins de 20%), contenant outre des allophanes une quantité variable de minéraux argileux et de gibbsite.
- des sols bruns eutrophes tropicaux andiques où les argiles (halloysite), dominent sur les allophanes, riches en minéraux primaires et saturés. Cet auteur montre par ailleurs la séquence évolutive suivante en partant du cratère d'un volcan à Tarnna :

- 0 à 8 km - sols minéraux bruts, puis sols peu évolués d'apports volcaniques (5 à plus de 10 mètres d'épaisseur) ;
- 8 à 10 km - sols peu évolués d'apport (4 à 5 m) ;
- 15 à 16 km - andosols eutrophes sur 2 mètres de cendre ;
- 18 à 22 km - sols bruns eutrophes andiques sur 0,6 à 1 m .
- plus de 25 km - sols fersiallitiques désaturés sur tufs.

COLMET DAAGE et al (1965 - 67) distinguent aux Antilles et en Equateur toute une gamme de sols à allophanes dont les dénominations inspirées à la fois de la classification française et de la 7 ème approximation américaine ne facilitent pas la compréhension du sujet. Les auteurs décrivent :

- des sols faiblement allophaniques ou peu évolués, AC, à texture particulière aux Antilles et des "rankers" de haute montagne sur les cendres ;
- des sols fortement allophaniques, à humidité constante (hydrandepts) ;
- des sols à allophanes se desséchant temporairement en surface et désaturés (dystrandeps) ;

- des sols de transition allophanes-halloysite (sols bruns eutrophes tropicaux andiques; ultiochrandepts) ;
- des sols bruns rouille à halloysite (sols bruns eutrophes tropicaux ; rhodochrults ou rubrozemiclatosols) ;
- ainsi que des andosols des pays froids dans les hautes montagnes andines ;
- des "sols bruns fersiallitiques" etc ...

Enfin le groupe français travaillant sur les andosols (1971) a retenu les grandes catégories suivantes :

- andosols peu différenciés, à profil A - C (humiques et vitriques)
- andosols différenciés, à profil A - (B) - C.
 - andosols saturés (TB > 50%) (mélaniques, chromiques à accumulation.
 - andosols désaturés (TB < 50%) (mélaniques, chromiques)
 - andosols perhydratés (mélaniques, chromiques).

BIBLIOGRAPHIE

- BROADEBENT (F.E.), JACKMAN (R.H.), Mc NICOLL (J.), 1964. - Mineralization of carbon and nitrogen in some New Zealand allophanic soils. *Soil Sci.*, 98 : 118 - 128.
- COIMET DAAGE (F.), LAGACHE (P.), 1965. - Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles Françaises. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Pédol., vol. III, n° 2 : 91 - 121.
- COIMET DAAGE (F.) et al., 1967 et 1969. - Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques :
 - 1ère partie : *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Pédol. V, 1967 : 3 - 38
 - 2ème partie : " " " " V, 1967 : 353-391
 - 3ème partie : " " " " VI, 1969 : 493-560
- COIMET DAAGE (F.) et al., 1970. - Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la Côte Pacifique du Nicaragua. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Pédol., VIII, 2 : 113 - 172.
- COIMET DAAGE (F.) et al., 1972 a. - Dispersion et étude des fractions fines des sols à allophane des Antilles et d'Amérique Latine. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Pédol., X, 2 : 169 - 191.
- COIMET DAAGE (F.) et al., 1972 b. - Etude des sols à allophanes dérivés de matériaux volcaniques des Antilles et d'Amérique Latine, à l'aide d'une technique de dissolution différentielle. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Pédol., X, 4 (sous-presse).
- DELVIGNE (J.), 1965. - Pédogenèse et zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. *O.R.S.T.O.M.*, Mémoires n° 13, 177 p.
- F.A.O., U.N.E.S.C.O., 1968. - Definitions of Soils Units for the Soil Map of the World. *World soil Res. Rep. 33*, F.A.O., Rev. X, 72 p.
- Groupe de Travail Andosols, 1972. - Proposition de classification des andosols. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Pédol., X, 3, (sous-presse).
- KYUMA (K.), KAWAGUCHI (K.), 1964. - Oxidative changes of polyphenols influenced by allophane. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.*, 28 : 371-374.
- LAMOUREUX (M.), 1972. - Etude des sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse ferrallitique au Liban. *O.R.S.T.O.M.*, mém. 56, Thèse de doctorat es Sciences, Fac. Strasbourg, 266 p.
- MILLOT (G.), 1964. - Géologie des argiles. Masson et Cie éd., Paris, 449 p.
- NALOVIC (Ij.), 1970. - Comportement du fer en présence des éléments traces. *O.R.S.T.O.M.*, Centre de Yaoundé, Note multigr. 87 p.

- PECROT (A.) et al., 1962. - L'altération des roches et la formation des sols, au Kivu (Rép. du Congo). I.N.E.A.C., Publ. sér. Sc., 97, Bruxelles, 92 p.
- PEDRO (G.) et LIEFI (A.J.), 1970. - Recherches expérimentales sur le comportement des hydrates ferriques et les constituants silico-ferriques amorphes en milieu lessivé. Pédologie, Gand, XX, 1 : 5 - 33.
- QUANTIN (P.), 1972 a. - Archipel des Nouvelles - Hébrides. Sols et quelques données du milieu naturel, Vaté. Carte pédologique et notice explicative, O.R.S.T.O.M., 22 p.
- QUANTIN (P.), 1972 b. - Note sur la nature et la fertilité des sols sur cendres volcaniques provenant d'éruptions récentes dans l'archipel des Nouvelles- Hébrides . Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol. X,
- 1ère et 2 ème partie , n° 2 : 123 - 151.
- 3ème partie , n° 3 : (sous-presse)
- QUANTIN (P.), 1972 c. - Les andosols. Revue bibliographique des connaissances actuelles. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol. X, 3, (sous-presse).
- SCHHELLMANN (W.), 1959. - Recherches expérimentales sur la formation sédimentaire de la goethite et de l'hématite. Chemie der Erde, XX : 104 - 135.
- SCHWERTMANN (U.) 1966. - Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallisation of amorphous ferric hydroxide. Nature , 212, 5062 : 645 - 646.
- SCHWERTMANN (U.) et al., 1968. - The influence of organic compounds on the formation of iron oxides. 9 th. intern. Cong. of. Soil. Sci. trans. I : 645 - 655.
- SEGALIEN (P.), 1968. - Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., VI , 1 : 105 - 126.
- SIEFFERMANN (G.) et MILLOT (G.), 1968. - L'halloysite des sols jeunes sur basaltes récents du Centre Cameroun. Bull. Gr. Fr. Argiles, XX : 25 - 38.
- SIEFFERMANN (G.), 1969. - Les sols de quelques régions volcanique du Cameroun. Thèse Sc. Nat. Univ. Strasbourg, 285 p. multigr.
- SOIL SURVEY STAFF (U.S.D.A.), 1967. - Supplément to soil classification System (7 th Approximation), 207 p.
- TERCINIER (G.), QUANTIN (P.), 1968. - Influence de l'altération de cendres et ponces volcaniques d'âge récent sur la nature , les propriétés et la fertilité des sols aux Nouvelles-Hébrides. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol. , VI, 2 : 203 - 224.
- TODUKOME (S.), KANNO (I.), 1965. - Nature of the humus of humic allophane soils in Japan. Soil Sc. Plan Nutrit., 11, 5 : 185 - 199.

- WADA (K.), INOUE (T.), 1967. - Retention of humic substances derived from clover leaves in soils containing montmorillonite and allophane. Soil Sc. Plant. Nutrit. 13, 1 : 9 - 16.
- YOSHINAGA (N.), 1966. - Chemical composition and some thermal data of eighteen allophanes from andosols and weathered pumices . Soil Sc. Plant. Nut. Jap., 12, 2 : 47 - 54.
- YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962 a. - Allophane in some Ando Soils. Soil Sc. Plant. Nutrit. , 8, 2 : 6 - 13.
- YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962 b. - Imogolite in some Ando Soils. Soil Sc. Plant. Nutrit., 8, 3 : 114 - 121.
- ZEBROWSKI (Cl.), 1971. - Propriétés des andosols de l'Itasy et de l'Ankaratra (Madagascar). Cah. O.R.ST.O.M., sér. Pédol. IX, 1 : 83 - 108.

COMITÉ TECHNIQUE DE PÉDOLOGIE

O. R. S. T. O. M.

bulletin de liaison

DU THÈME D

"ANDOSOLS"

Numéro 2 - Mars 1973

OFFICE DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
OUTRE-MER

COMITE TECHNIQUE
DE PEDOLOGIE

BULLETIN DE LIAISON

DU THEME D
(ANDOSOLS)

"Ce document est destiné à une diffusion restreinte ; il est réservé aux Chercheurs de l'O.R.S.T.O.M. et à ceux du groupe de travail sur le Thème Andosols".

Numéro 2 - Mars 1973