

PREMIÈRES OBSERVATIONS SUR L'ALTÉRATION DE QUELQUES ROCHES DES HAUTES TERRES MALGACHES

Claude GENSE *

RÉSUMÉ

L'altération de différentes roches (ankaratrite, basalte à olivine, projections trachytiques et granites) des Hautes Terres Malgaches a été étudiée. Le but de ce travail est de préciser les conditions de formation de différents minéraux argileux.

Dans les exemples étudiés, la nature des néoformations est déterminée par le drainage. Sur ankaratrite, lorsque la pluviométrie est de 1 200 mm (répartie sur cinq mois), un peu de gibbsite se forme à partir de la roche mère, uniquement en condition de très bon drainage. L'halloysite apparaît en milieu bien percolé.

Les projections trachytiques déposées dans un lac sont transformées en montmorillonite ; par contre, celles qui ont subi l'altération météorique sont transformée en minéraux de la famille de la kaolinite.

La kaolinite s.s. présente en grande quantité dans les produits d'altération de granite, n'a pas été déterminée dans les produits d'altération de roches basiques.

Dans la zone d'altération, les minéraux secondaires s'organisent rapidement, les produits amorphes ou mal cristallisés n'ont qu'une existence éphémère.

ABSTRACT

The weathering of different rocks (ankaratrite, olivinebasalt, trachytic projection and granits) on the highlands of Madagascar was studied. The purpose of this work is to specify the conditions of formation of different clay minerals. In the studied examples, the nature of secondary minerals is determined by water circulation. On the ankaratrite rock, when it rains 1 200 millimeters only during five months, little gibbsite is formed from the unweathered rock only when the water runs very well. The halloysite appears in well drained environment.

* Géologue ORSTOM - Centre de Tananarive - B.P. 434 - Madagascar.

The trachytic projections, laid down in a lake, transformed into montmorillonite; on the other hand, the weathered ones, are transformed into kaolinite.

The kaolinite s.s. which is important in the weathering granit products, was not determined in the alteration products of basic rocks.

In the weathering zone, the secondary mineral crystallize quickly, the amorphous substances or bad crystallized products have only a short existence.

PLAN

1. MÉTHODES D'ÉTUDE DES MINÉRAUX ARGILEUX

2. ALTÉRATION DE L'ANKARATRITE ET DU BASALTE

2.1. *Ankaratrite*

2.2. *Basalte à olivine de la région située en bordure est de l'Ankaratra entre Ambatolampy et Antsirabé.*

2.3. *Quelques produits d'altération particuliers dans l'ankaratrite du versant est de l'Ankaratra entre 1 600 et 2 600 m d'altitude*

3. ALTÉRATION DE PROJECTIONS TRACHYTIQUES

3.1. *Altération météorique*

— Bordure est de l'Ankaratra

— Bordure ouest de l'Ankaratra

3.2. *Milieu lacustre*

3.3. *Conclusions*

4. ALTÉRATION DES GRANITES DE CARION

5. CONCLUSIONS

5.1. *Genèse des principaux minéraux secondaires*

5.2. *Influence des facteurs d'altération sur la nature des néoformations*

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Les sols sur roches volcaniques basiques de Madagascar ont été étudiés par SEGALIN (1957). Le but de ce travail est de préciser la genèse et l'évolution des minéraux argileux dans la zone d'altération située sous la zone de pédogenèse. Des travaux routiers dans l'est de l'Ankaratra et des coupes naturelles (ravines profondes) dans le nord et l'ouest de ce massif ont permis l'étude de quelques zones d'altération



1. MÉTHODES D'ÉTUDE DES MINÉRAUX ARGILEUX

Les techniques utilisées dans ce travail, pour déterminer les minéraux argileux, sont l'analyse thermique différentielle, et la diffractométrie des rayons X. L'analyse thermique différentielle a été effectuée sur l'argile inférieure à 2 μ , séchée à 40 °C. Les diagrammes de rayons X ont été réalisés sur les agrégats

orientés et sur les poudres. Pour les interprétations des diffractogrammes, nous avons utilisé les critères définis par LUCAS, CAMEZ, MILLOT (1959) et LUCAS (1962). Les minéraux de la famille de la kaolinite ont été déterminés à partir des critères définis par SIEFFERMANN (1969). Rappelons quelques-uns de ces critères :

— Les diagrammes de poudre de la kaolinite s.s. présentent des pics aigus et intenses à 7,15 Å et 3,56 Å, et des pics distincts à 4,43, 4,35, 4,15 Å, toujours inférieurs aux pics à 7,1 et 3,56 Å. En lame orientée les pics à 4,43, 4,35 et 4,15 disparaissent, alors que les pics à 7,1 et 3,56 augmentent considérablement.

— Les diagrammes de poudre de la kaolinite désordonnée présentent des pics à 7,15 et 3,56 Å, aigus mais d'intensité généralement moins grande que pour la kaolinite s.s., une bande entre 4,43 et 4,12 Å souvent continue où les pics se dégagent ou non suivant l'état de désordre ; l'intensité de cette bande peut atteindre celle des pics à 7,15 et 3,56 Å. En lame orientée la bande entre 4,43 et 4,12 Å diminue considérablement de hauteur, et les pics à 7,15 et 3,56 Å augmentent d'intensité.

— Les diagrammes de poudre de la métahalloysite présentent un pic de valeur moyenne 7,2 Å, souvent large, un pic à 3,56 Å de même intensité ou légèrement inférieur, une bande très asymétrique entre 4,40 et 4 Å d'intensité égale ou supérieure aux pics à 7,2 et 3,56 Å. En lame orientée la bande entre 4,40 et 4 Å reste d'intensité égale ou supérieure aux pics à 7,20 et 3,56 Å.

— Les diagrammes de poudre ou lame orientée de l'halloysite hydratée (séchée à l'air) présentent un pic à 10 Å intense, symétrique ou non, une bande large très asymétrique, diminuant d'intensité de 4,40 à 4 Å souvent plus intense que le pic à 10 Å, un pic à 3,33 Å généralement d'intensité moitié de la bande à 4,40 Å. Au glycérolage de la lame orientée séchée à l'air le pic à 10 Å passe à 11 Å et le pic 3,33 Å à 3,64 Å. L'halloysite deshydratée à 80 °C présente sur les diagrammes une bande ou pic autour de 7,3 Å asymétrique, s'étendant souvent jusque vers 9 Å.

2. ALTÉRATION DE L'ANKARATRITE ET DU BASALTE

2.1. ANKARATRITE

Les coupes étudiées sont situées dans la zone Imerintsiatosika-Arivonimamo (Ankaratra-Nord). Cette région de plateaux est formée de coulées basiques recouvertes de sols ferrallitiques typiques, sous groupe des sols rouges (SEGALEN). Ils contiennent dans leurs horizons profonds de la métahalloysite qui se transforme dans le haut du profil en kaolinite et gibbsite (SEGALEN).

Le climat est caractérisé par :

- une pluviométrie moyenne annuelle de 1 200 mm répartis sur cinq mois environ ;
- une température moyenne annuelle de 18 °C.

L'ankaratrite est formée d'une pâte microlitique et de phénocristaux d'augite et d'olivine partiellement serpentinisée ; sa composition chimique est la suivante (exprimée en pourcentages) :

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Mn ₂ O ₄	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
40,8	10,1	15,2	13,4	12,8	0,21	2,80	2,16	1,03

On va étudier l'altération de la coulée d'Arivonimamo, et deux exemples situés près d'Imerintsia-tosika.

2.1.1. Altération de la coulée d'Arivonimamo

Sur cette coulée on reconnaît deux faciès d'altération d'ankaratrite le pain d'épice et l'argile grise (10 YR 6/1)¹ qui se transforment dans le sol en argile rouge jaunâtre (5 YR 5/8). Le pain d'épice existe en position de très bon drainage, l'argile grise semble recouvrir la plus grande partie de la coulée, elle se forme chaque fois que le drainage est moins bon.

Du point de vue minéralogique :

— Le pain d'épice est constitué d'halloysite et de kaolinite désordonnée en assez grande quantité, de gibbsite en petite quantité, de goethite et de minéraux amorphes.

— L'argile grise renferme de la kaolinite désordonnée en grande quantité, de l'halloysite en petite quantité et de la goethite.

INTERPRÉTATION

Sur ankaratrite, dans les conditions climatiques d'Arivonimamo, la gibbsite a des difficultés à se former directement à partir de la roche, elle apparaît uniquement dans le cas de très bon drainage. La plus grande partie de la gibbsite se forme dans le sol par transformation d'un minéral de la famille de la kaolinite (SEGALEN). Les conditions de bon drainage semblent favorables à la formation d'halloysite, ce qui a déjà été montré dans les sols sur basaltes récents du Cameroun par SIEFFERMANN et MILLOT (1968) : lorsque le drainage est moins bon il semble que ce soit la kaolinite désordonnée qui se forme.

2.1.2. Etude de deux exemples d'altération situés dans la région d'Imerintsia-tosika

2.1.2.1. PREMIER EXEMPLE : ROCHES ENTIÈREMENT ALTÉRÉES

Dans cette région les coupes apparaissent dans des ravines profondes où l'érosion est importante. Elles montrent que les roches sont altérées sur de grandes épaisseurs qui atteignent plus de dix mètres. Sur ces coupes, généralement complexes, deux faciès d'altération ont été reconnus : le pain d'épice et l'argile grise plus ou moins violette. Sur la même verticale, les formations suivantes affleurent ; de bas en haut :

- argile rouge violacée (10 R 5/2) ;
- pain d'épice (2 à 3 m d'épaisseur) avec de rares boules d'ankaratrite saine ;
- argile gris-rougeâtre (2 m) (10 R 6/1) et les horizons supérieurs du sol.

La limite entre le pain d'épice et l'argile gris-rougeâtre est très nette. Il s'agit vraisemblablement de deux coulées superposées très altérées. Les deux couches d'argile se seraient formées en milieu mal drainé ; la couche supérieure dans une zone hydromorphe située à la base de la coulée supérieure au contact

¹ Le code MUNSELL a été utilisé pour désigner les couleurs (échantillon sec).

de la coulée inférieure altérée, la couche inférieure à une époque où le niveau de base général de la région était situé à une altitude plus élevée qu'actuellement (avant la reprise de l'érosion). Le pain d'épice s'est développé dans la partie supérieure bien drainée de la coulée ancienne.

Du point de vue minéralogique : ces faciès contiennent tous les minéraux de la famille de la kaolinite (halloysite, métahalloysite, kaolinite désordonnée), de la goethite et des traces de gibbsite. Dans les deux formations d'argile (rouge violacée et gris rougeâtre), le minéral dominant est la kaolinite désordonnée. Dans les deux échantillons de pain d'épice étudiés, un prélevé au contact de la roche saine, l'autre au milieu de la formation de pain d'épice, le minéral dominant est l'halloysite.

L'halloysite semble se former lorsque le drainage est bon, la kaolinite désordonnée lorsqu'il est moins bon.

2.1.2.2. DEUXIÈME EXEMPLE : ANKARATRITE PEU ALTÉRÉE

De l'ankaratrite massive affleure à proximité de la coupe précédemment étudiée. Il s'agit d'une couche d'ankaratrite fissurée qui repose sur un niveau argileux.

On a la coupe suivante de bas en haut :

- argile rouge noirâtre (2,5 YR 3/6) dont la partie supérieure est recoupée par des fissures remplies de produit blanc ;
- un niveau argileux brun rougeâtre clair (5 YR 6/3) de 50 cm ;
- une couche d'ankaratrite de 2 m d'épaisseur, très fissurée ; les fissures délimitent des blocs de roche saine entourés d'écailles argileuses de 2 cm.

Minéralogie du niveau argileux et des produits d'altération de l'ankaratrite : l'argile rouge noirâtre est constituée :

- dans la zone inférieure de l'affleurement par de la kaolinite désordonnée dominante, de l'halloysite en faible quantité et de la goethite ;
- dans la zone supérieure (avec dépôts blancs dans fissures) : montmorillonite dominante, de traces de kaolinite-halloysite et de goethite ;
- l'argile blanche extraite des fissures contient uniquement de la montmorillonite ;
- l'argile brun rougeâtre clair située au-dessus de l'argile rouge noirâtre est constituée de montmorillonite et de goethite.

Les écailles argileuses, entourant les blocs d'ankaratrite contiennent de la montmorillonite dominante, de l'halloysite-métahalloysite et de la goethite.

INTERPRÉTATION

1) l'argile rouge noirâtre et l'argile brun rougeâtre clair se sont formés à partir de roches inconnues et dans des conditions difficiles à préciser (probablement en milieu hydromorphe pour l'argile brun rougeâtre clair qui contient de la montmorillonite) ;

2) la montmorillonite des remplissages blancs des fissures de la partie supérieure de l'argile rouge noirâtre semble se former à partir d'éléments en solution provenant de zones d'altération avoisinantes ;

3) l'altération actuelle (écailles argileuses entourant l'ankaratrite saine) est caractérisée par la néoformation de montmorillonite. Cette altération se produit dans une zone humide toute l'année, l'an-

ratrite reposant sur un niveau argileux imperméable (des suintements d'eau au milieu de la saison sèche ont été observés).

Dans cette région lorsque le drainage est bon (2.1.2.1₁) l'ankaratrite s'altère en halloysite et gibbsite, lorsqu'il est mauvais (2.1.2.2₂) en montmorillonite.

CONCLUSION

Le drainage détermine la nature des néoformations. Dans le Nord de l'Ankaratra, il y a néoformation d'halloysite et de gibbsite en de petite quantité lorsque le drainage est bon, de kaolinite désordonnée lorsqu'il est moins bon, de montmorillonite lorsqu'il est mauvais.

2.2. BASALTE A OLIVINE DE LA RÉGION SITUÉE SUR LA BORDURE EST DE L'ANKARATRA ENTRE AMBATOLAMPY ET ANTSIRABÉ

Le massif de l'Ankaratra est constitué d'une chaîne axiale au relief important et de plateaux périphériques. Partant de la chaîne axiale les coulées basaltiques se sont dirigées vers l'Est et ont recouvert le socle migmatitique précambrien. Des travaux routiers ont fait apparaître de très belles coupes Nord-Sud transversales aux coulées et situées à leur extrémité Est ; ce sont ces coupes qui ont été étudiées.

Le climat de cette région est caractérisé par :

- une pluviométrie moyenne annuelle de 1 400 à 1 700 mm (pluies fortes pendant 5 mois et crachins pendant les 7 autres mois) ;
- une température moyenne annuelle de 18 °C.

Les sols sont ferrallitiques bruns ou brun-rouge.

Le basalte est formé de pâte constituée de microlites de plagioclases, de pyroxènes et de minéraux opaques de petite taille et de phénocristaux d'augite et d'olivine partiellement serpentinisée (antigorite).

Etude de quatre coupes :

Coupe 1 : transversale à une coulée de basalte reposant sur un paléosol.

La coupe (6 m de hauteur) est constituée de basalte massif à olivine se débitant en prismes (pain d'épice dans les fissures) recouvert d'un sol brun de 0,5 m d'épaisseur et reposant sur un paléosol. Un niveau argileux bigarré avec petites cuirasses ferrugineuses (1 cm d'épaisseur) s'est formé au contact de la coulée et du paléosol.

Le pain d'épice des fissures et le niveau argileux bigarré ont des compositions minéralogiques voisines, ils contiennent de l'halloysite et de la métahalloysite (dans les mêmes proportions), de la goéthite et des traces de chlorite ; le pain d'épice contient, en plus, de la gibbsite en petite quantité.

Coupe 2 : altération du basalte en milieu mal drainé (base de la coupe à 2 m au-dessus de la rizière).

La coupe est constituée d'une masse argileuse et de nodules de roche saine situés au centre de polyèdres délimités par le réseau de fissures de la roche-mère. En passant de la roche saine à la zone la plus évoluée (fissures) on a la succession : argiles brun très pâle (10 YR 7/3), olive pâle (5 Y 6/3), blanche (10 YR 8/1) et jaune (10 YR 7/8).

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES DIFFÉRENTS ÉCHANTILLONS

Minéraux Echantillons	Halloysite	Metahal- loysite	Kaolinite désordonnée	Chlorite	Gibbsite	Goethite	Cristallinité des minéraux
2-4 Argile jaune	Minéraux de la famille de la Kaolinite mal cristallisés 9			1		×	Très mal cristallisés
2-3 Argile blanche	9			1		×	Mal cristallisés
2-2 Argile olive pâle	6	3		1	×	×	Assez bien cristallisés
2-1 Argile brun très pâle	6		3	1	×	×	Assez bien cristallisés

Les valeurs numériques indiquent approximativement les quantités de phyllosilicates présents dans l'échantillon, la quantité totale de ces minéraux étant par convention égale à 10. Une croix indique la présence du minéral sans aucune estimation quantitative, dans l'échantillon correspondant.

Ce tableau montre que l'halloysite et la kaolinite désordonnée des échantillons 2-1 et 2-2 sont remplacées, dans les échantillons 2-3 et 2-4, par des minéraux de la famille de la kaolinite mal cristallisés. Cette évolution est montrée par la diffractométrie des rayons X et l'analyse thermique différentielle (cf. schémas 1 et 2). Il y aurait transformation, dans les fissures de la zone d'altération, de l'halloysite et de la kaolinite désordonnée, en minéraux de la famille de la kaolinite mal cristallisés.

Coupe 3 : la coupe est un assemblage de polyèdres constitués chacun d'un bloc de roche saine (10 à 80 cm) entouré d'écailles jaune brunâtre (10 YR 6/8) (5 cm) et d'argile gris clair (5 YR 7/1) (2 cm) ; les fissures délimitant ces polyèdres sont bordées d'argile rouge clair (2,5 YR 6/8). La coupe a sa base située à 5 m au-dessus de la rizièrre, elle est mieux drainée que celle de l'exemple 2. Elle montre un stade d'altération du basalte moins avancé que dans l'exemple 2.

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES DIFFÉRENTS ÉCHANTILLONS

Minéraux Echantillons	Halloysite	Metahalloysite	Kaolinite désordonnée	Chlorite	Gibbsite	Goethite
3-3 Argile rouge clair		2	7	1		×
3-2 Argile gris clair	6		3	1		×
3-1 Ecailles jaune brunâtre	7	2		1	×	×

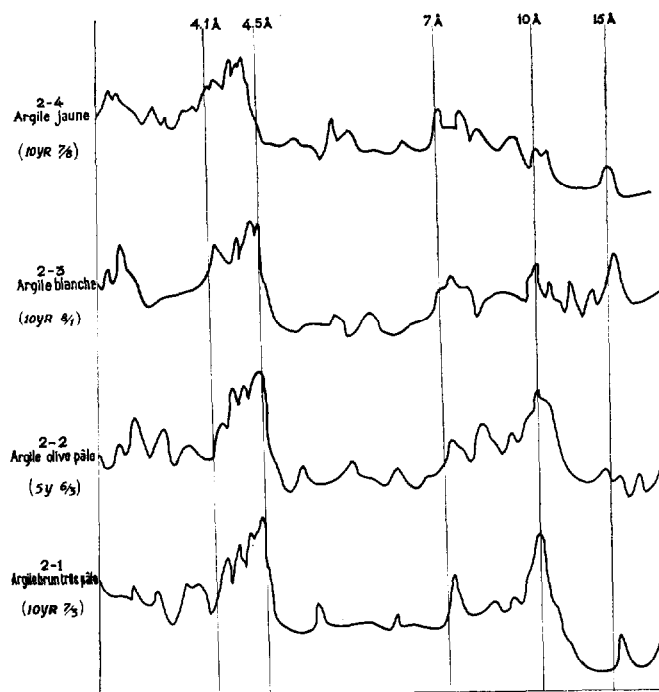


FIG. 2.

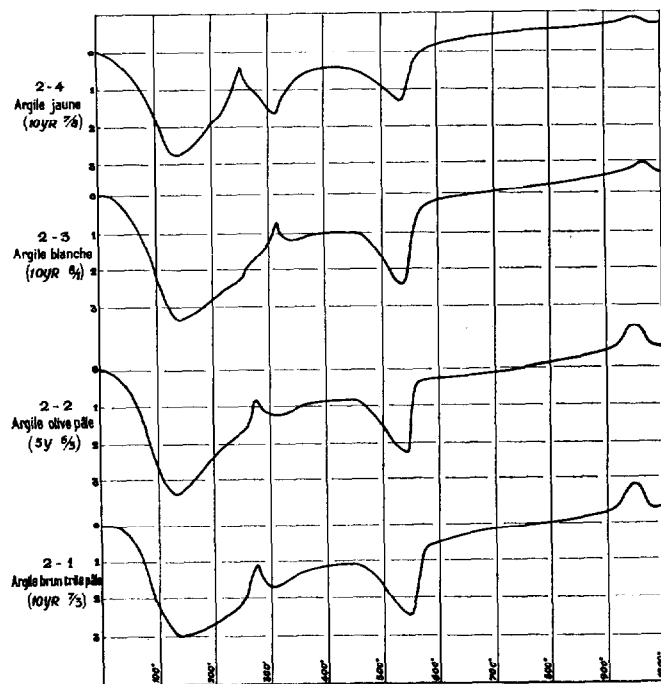


FIG. 3.

Le tableau montre que l'halloysite des écailles jaune brunâtre est remplacée, dans les argiles gris clair et rouge clair, par de la kaolinite désordonnée.

Dans cette coupe on assiste à la transformation rapide d'halloysite en kaolinite désordonnée, ce qui est montré sur les diffractogrammes de rayons X de poudres par l'évolution de la bande 4,43 Å, 4,07 Å, où l'on voit apparaître et grandir les pics à 4,43, 4,37, 4,16 Å (cf. schéma 3). Cette évolution est aussi visible sur les courbes d'analyse thermique différentielle (cf. schéma 4). La transformation de ces minéraux se produit en milieu assez bien drainé. Dans cet exemple l'altération n'est pas suffisamment avancée, pour que la dégradation des minéraux argileux dans les fissures puisse se produire (comme dans la coupe 2).

Coupe 4 : elle est taillée dans une coulée de basalte entièrement altérée en argile gris rose (5 YR 6/2) et en sphérolites d'argile verte ; la base de la coupe est située à 2 m au-dessus de la rizière. Cette argile dans laquelle on reconnaît la structure du basalte est constituée de montmorillonite et de goethite.

CONCLUSION

Sur la bordure Est de l'Ankaratra, en milieu bien ou assez bien drainé, le basalte s'altère en halloysite, métahalloysite et kaolinite désordonnée ; lorsque le milieu est très mal drainé, il y a formation de montmorillonite.

2.3. QUELQUES PRODUITS D'ALTÉRATION PARTICULIERS DANS L'ANKARATRITE DU VERSANT EST DE L'ANKARATRA, ENTRE 1 600 ET 2 600 m D'ALTITUDE

Le versant Est de l'Ankaratra est très arrosé. Vers 2 000 m d'altitude la pluviométrie est de 2 300 mm, vers 2 600 m elle est de 3 000 mm. A 2 600 m, la température moyenne annuelle est de 8,8 °C. Les sols de cette région sont des sols ferrallitiques humifères bruns ou bien des andosols (SEGALEN).

1) A 2 600 m, à proximité du sommet de Tsiafajavona, sur pente importante, les fissures d'un affleurement d'ankaratrite saine et altérée (halloysite, gibbsite en petite quantité) sont remplies de produits blancs et noirs. Ces produits sont constitués de gibbsite en grande quantité et de traces de minéraux de la famille de la kaolinite mal cristallisés. La gibbsite semble s'être formée à partir de solutions qui auraient migré le long des pentes.

2) A 2 300 m, au col de Mahafonpona, sur pente forte, des produits blancs remplissent les fissures (1 cm d'épaisseur), traversant l'ankaratrite saine et altérée en place. L'ankaratrite altérée et le remplissage de fissures ont des compositions minéralogiques identiques : halloysite très bien cristallisée en grande quantité et goethite.

Le remplissage blanc est constitué de glomérules (observation au microscope électronique).

On aurait dans ce cas de l'halloysite qui se serait formée sur place à partir d'ankaratrite et de l'halloysite qui se serait formée à partir de solutions (dans les fissures).

3) Vers 2 000 m d'altitude, sur des formations basaltiques très altérées et au relief « mou », on trouve des nodules blancs (1 à 5 cm) contenant de la gibbsite en grande quantité et un peu de goethite. L'observation microscopique montre que ces nodules dérivent d'une lave à phénocristaux, la transformation se serait faite avec conservation des volumes.

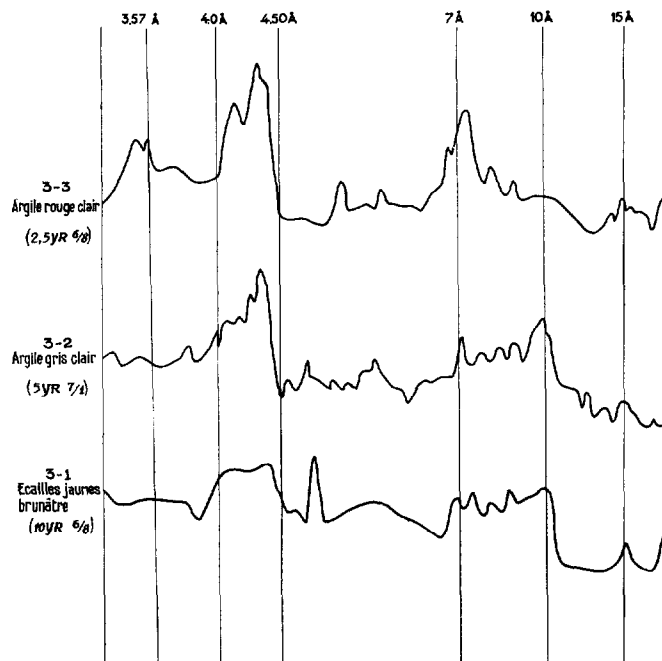


FIG. 4.

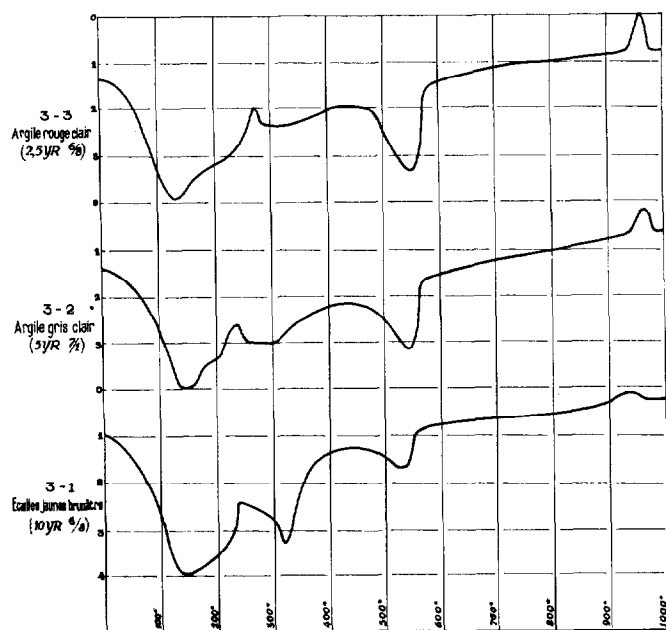


FIG. 5.

CONCLUSION

Les produits blancs situés dans les fissures sont constitués soit de gibbsite, soit d'halloysite. L'origine de ces minéraux pose un problème. Ils peuvent s'être formés à partir des solutions d'altération de l'ankaratrite qui migrent le long des pentes ; l'halloysite peut avoir aussi une origine hydrothermale, ce qui a déjà été envisagé par BROUSSE (1967) pour des filonnets argileux du Massif Central français.

3. ALTÉRATION DE PROJECTIONS TRACHYTIQUES

Etude de :

- L'altération météorique sur deux affleurements (l'un sur la bordure est de l'Ankaratra entre Ambatolampy et Antsirabé, et l'autre dans l'ouest du massif situé près de Faratsiho).
- L'altération en milieu lacustre (coupe située près de Faratsiho).

3.1. L'ALTÉRATION MÉTÉORIQUE

3.1.1. Bordure Est de l'Ankaratra

Le climat est celui de la région d'Ambatolampy déjà décrit au paragraphe 2.2.

La coupe est située sur une tranchée de route, les projections trachytiques litées reposent sur un paléorelief sédimentaire (stratifications entrecroisées). On reconnaît une succession de lits argileux blancs (10 YR 8/2) avec zones jaune-rougeâtre (5 YR 7/8), un lit sur deux contient des éléments anguleux blancs (entièrement transformés en argile). L'analyse par diffractométrie des rayons X de deux échantillons prélevés, l'un dans un lit à éléments anguleux, l'autre dans un lit sans éléments anguleux, a montré que les deux avaient des compositions minéralogiques identiques : halloysite dominante, kaolinite désordonnée, chlorite-montmorillonite en traces.

3.1.2. Bordure Ouest de l'Ankaratra

Le climat est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle de 1 700 mm avec saison sèche de six mois et par une température moyenne annuelle de 13 °C.

La coupe est située au pied d'une colline de projections trachytiques (profil de bas de pente) ; la roche altérée blanche (5 Y 8/1) est recouverte d'un sol jaune pâle (2,5 Y 1/4).

Dans la zone d'altération il y a formation de minéraux de la famille de la kaolinite. Dans le sol ces minéraux sont mieux cristallisés (métahalloysite, kaolinite désordonnée). On a aussi déterminé quelques minéraux hérités : chlorite, illite, plagioclases.

3.2. MILIEU LACUSTRE

A 10 km de la colline trachytique dont il a été question au paragraphe 3.1.2. on a rencontré une formation volcano-sédimentaire. Il s'agit de projections trachytiques qui se sont déposées et altérées dans un lac (stratifications entrecroisées, galets plats déposés horizontalement). Ces projections constituent une formation argileuse blanchâtre de 1 à 100 m d'épaisseur dans laquelle on reconnaît des séquences à deux termes (terme inférieur gris clair (5 YR 7/2) à éléments anguleux noirs, terme supérieur gris rose (7,5 YR 7/2). Des couches ferrugineuses de 1 à 5 cm d'épaisseur et des couches d'argile verte de 0,5 à 2 cm sont situées entre ces séquences. Les deux échantillons d'argile prélevée dans les deux termes d'une séquence et l'argile verte contiennent de la *montmorillonite* en grande quantité, des traces d'*illite* et des *plagioclases*.

3.3. CONCLUSIONS

3.3.1. Comparaison des altérations météoriques et en milieu lacustre de projections trachytiques

On observe la formation :

- par altération météorique de minéraux de la famille de la kaolinite (*halloysite* en grande quantité dans certains exemples, *métahalloysite*, *kaolinite* désordonnée).
- en milieu lacustre de *montmorillonite* en grande quantité.

3.3.2. Comparaison des altérations météoriques de projections trachytiques et de basaltes

Les minéraux formés par altération de ces deux roches, dans des conditions de drainage semblables sont les mêmes : *halloysite*, *métahalloysite*, *kaolinite* désordonnée.

Les différences de composition chimique et de structure existant entre ces roches ne semblent pas intervenir dans l'altération. Dans des conditions de très mauvais drainage, le basalte s'altère en *montmorillonite*, on se rapproche du milieu lacustre dans lequel les projections trachytiques donnent les mêmes néoformations.

4. ALTÉRATION DES GRANITES DE CARION

Le massif de Carion est formé de granite porphyroïde et de microgranite qui sont constitués de :

- quartz, microcline, *plagioclases*, *myrmekite*, *hornblende* verte, *biotite* et minéraux opaques (phénocristaux de microcline dans le granite porphyroïde).

Le climat de cette région est caractérisé par :

- une pluviométrie annuelle de 1 550 mm, avec une saison sèche de six mois marquée (10 % des pluies);
- une température moyenne annuelle de 18 °C.

L'altération météorique se fait dans des conditions de bon ou assez bon drainage.

Les résultats obtenus sont les suivants :

1) Il se forme dans un premier stade du gel (hydrolyse des feldspaths), des minéraux de la famille de la kaolinite mal cristallisés et de la gibbsite en grande quantité, parfois des interstratifiés 10-14 V (dégradation d'illite). En Guyane, LELONG (1967) a montré que ces interstratifiés provenaient de la dégradation des micas.

2) Dans un deuxième stade, les minéraux mal cristallisés de la famille de la kaolinite et la gibbsite sont remplacés par la métahalloysite, la kaolinite désordonnée et la *kaolinite s.s.*; les interstratifiés disparaissent.

3) Les minéraux mal cristallisés de la famille de la kaolinite et les gels ont, dans la zone d'altération, une existence éphémère, ils ont seulement été reconnus dans les premiers stades, à proximité de la roche saine. Les sols étudiés contiennent des minéraux secondaires bien cristallisés; kaolinite s.s. et gibbsite.

4) Dans la partie supérieure de la zone d'altération et dans le sol il y a transformation de la kaolinite en gibbsite.

5) L'altérabilité des minéraux est par ordre croissant : quartz - biotite - hornblende verte - microcline - plagioclases.

La gibbsite se forme actuellement à Carion. Les résultats de l'observation sur le terrain et les calculs de TARDY (étude des eaux) sont concordants.

5. CONCLUSIONS

5.1. GENÈSE DES PRINCIPAUX MINÉRAUX SECONDAIRES

5.1.1. Gibbsite

5.1.1.1. La formation directe de gibbsite à partir des plagioclases a été observée par de nombreux auteurs. Sous les climats tropicaux humides elle a été décrite en particulier par BONIFAS en Guinée (1959), DELVIGNE en Côte d'Ivoire (1966), GENSE à Madagascar (Côte est) (1968).

Dans ce travail nous avons vu que la gibbsite se formait directement à partir des plagioclases :

- en grande quantité dans les zones d'altération bien drainées du massif granitique de Carion;
- en faible quantité et exceptionnellement sur basalte et arkaratrite des plateaux nord et de la bordure est de l'Ankaratra.

5.1.1.2. La formation de gibbsite se fait également par dégradation des minéraux de la famille de la kaolinite. A Madagascar, la transformation des minéraux de la famille de la kaolinite en gibbsite a été envisagée sur les Hautes terres par SEGALIN (1957); sur la côte est par GENSE (1968).

5.1.1.3. Le fait que l'on trouve des produits blancs essentiellement constitués de gibbsite dans des fissures traversant la roche saine et altérée (halloysite, gibbsite en faible quantité) semble indiquer que la gibbsite peut aussi se former à partir de solutions qui migrent le long des pentes.

5.1.2. Minéraux de la famille de la kaolinite

5.1.2.1. HALLOYSITE

SIEFFERMANN et MILLOT (1968) ont montré que dans les sols sur basalte la synthèse d'halloysite se produit en milieu bien percolé. Les profils d'altération que nous avons précédemment étudiés montrent que l'halloysite se forme en grande quantité sur basalte, ankaratrite et projections trachytiques, directement à partir de la roche saine, dans des conditions de bon ou assez bon drainage (dans les premiers stades d'altération, elle est souvent associée à des petites quantités de gibbsite).

Il semble que l'halloysite peut aussi se former à partir des solutions qui migrent le long des pentes (remplissage de fissures du col de Mahafompona).

5.1.2.2. MÉTAHALLOYSITE

Elle se forme :

- dans les premiers stades d'altération par transformation des minéraux de la famille de la kaolinite mal cristallisés ;
- dans les horizons supérieurs des sols.

5.1.2.3. KAOLINITE DÉSORDONNÉE

Elle se forme dans la *zone d'altération* par :

- évolution des minéraux de la famille de la kaolinite mal cristallisés, dans des conditions de drainage moyen ;
- transformation de l'halloysite, lorsque le drainage est assez bon.

5.1.2.4. KAOLINITE s.s.

Elle se forme à partir de produits d'altération de granite, par silification de la gibbsite et transformation de méthalloysite et kaolinite désordonnée.

5.1.3. Montmorillonite

On a trouvé de la montmorillonite formée par altération :

- d'ankaratrite, dans des conditions de *mauvais drainage* (Imerintsiatosika) ;
- de basalte dans des conditions de *mauvais drainage* (bordure est de l'Ankaratra) ;
- de projections trachytiques en *milieu lacustre*.

Remarquons que l'altération dans des conditions de mauvais drainage ou en milieu lacustre produit le même minéral de néoformation : la montmorillonite.

5.1.4. Goethite

Tous les produits d'altération que nous avons étudiés contiennent en plus ou moins grande quantité de la goethite. Celle-ci se forme par altération de roches différentes et dans des conditions climatiques et de drainage très variées.

5.2. INFLUENCE DES FACTEURS D'ALTÉRATION SUR LA NATURE DES NÉOFORMATIONS

On vient d'étudier l'altération d'ankaratrite, de basaltes, de projections trachytiques, et de granite dans des conditions climatiques assez voisines (sauf pour les remplissages de fissures et les nodules gibbsitiques du versant est de l'Ankaratra) caractérisées par :

- une pluviométrie moyenne annuelle de 1 500 mm environ (1 200 mm pour Arivonimamo) avec une grande saison sèche de six mois ;
 - une température moyenne annuelle de 18 °C, et dans des conditions de drainage assez variables.
- On a reconnu que :

1° Pour la genèse de la kaolinite s.s. la nature de la roche mère est importante. Ce minéral se forme uniquement sur granite (bon drainage) par silification de la gibbsite et transformation de la métahalloysite et de la kaolinite désordonnée. Le problème de la silification de la gibbsite en kaolinite a été étudié par de nombreux auteurs, récemment par TARDY (1969), qui explique ce phénomène par des mécanismes d'altération différentielle. Il considère que la silice libérée par altération de minéraux riches en cet élément resiliçifie la gibbsite formée dans un stade précédent à partir de minéraux moins riches en silice. Il semble que ces mécanismes puissent expliquer les observations faites à Carion ; en effet dans un premier stade d'altération, on observe que les plagioclases sont en partie transformés en gibbsite, alors que les microclines sont parfaitement sains. Dans un deuxième stade, la gibbsite ainsi que les microclines disparaissent, alors que la quantité totale des minéraux de la famille de la kaolinite augmente, et que la kaolinite s.s. apparaît.

2° Sur ankaratrite, le drainage détermine la nature du faciès d'altération : un bon drainage détermine la formation de pain d'épice, un mauvais drainage celle d'argile grise.

3° Sur roches basiques et projections trachytiques, la genèse des minéraux secondaires est déterminée par le drainage :

- a) bon drainage : halloysite en grande quantité et gibbsite (traces) ;
- b) mauvais drainage et altération lacustre : montmorillonite ;
- c) entre ces deux termes extrêmes on a formation de kaolinite désordonnée et de métahalloysite.

4° Dans la zone d'altération, les minéraux secondaires s'organisent rapidement, les produits amorphes ou mal cristallisés n'ont qu'une existence éphémère.

5° La transformation d'halloysite en kaolinite désordonnée peut se produire dans les premiers stades d'altération ; lorsque le drainage est assez bon.

6° Dans les fissures de la zone d'altération, les minéraux bien cristallisés de la famille de la kaolinite tendent à se dégrader ; il y a formation de minéraux mal cristallisés.

BIBLIOGRAPHIE

- BONIFAS (M.), 1959 — Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. Thèse. Fac. Sciences Strasbourg. *Mém. Serv. Cart. géol.*, Ab-Lon., n° 17, Strasbourg, 163 p.
- BROUSSE (R.), THONON (P.), 1967 — Argiles d'origine fumerollienne dans les formations volcaniques. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, XIX, pp. 61-69.
- DELVIGNE (J.), 1965 — Pédogenèse en zone tropicale. *Mém. ORSTOM*, n° 13, Paris, 177 p.
- GENSE (C.), 1968 — L'altération des roches volcaniques basiques de la côte est de Madagascar. Premières observations. Semaine géologique de Madagascar. Impr. nat., Tananarive, 5 p.
- LELONG (F.), 1967 — Sur les formations latéritiques de Guyane Française « manière d'être » de la kaolinite et de la gibbsite ; origine des phyllites micacées. *C.R. Acad. Sc.*, 264, pp. 2713-2716.
- LUCAS (J.), CAMEZ (T.), MILLOT (G.), 1959 — Détermination pratique aux rayons X des minéraux argileux simples et interstratifiés. *Bull. Serv. carte géol. Als. Lorr.*, n° 12, pp. 21-33.
- LUCAS (J.), 1962 — La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Etude sur les argiles du Trias. *Mém. Serv. carte géol. Als. Lorr.*, n° 23, Strasbourg, 202 p.
- SEGALEN (P.), 1957 — Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. Thèse Sciences nat., Paris, *Mém. Inst. Sciences Madagascar*, D, VIII, 182 p.
- SIEFFERMANN (G.), MILLOT (G.), 1968 — L'hallowysite des sols jeunes sur basaltes récents du centre Cameroun. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, XX, pp. 25-38.
- SIEFFERMANN (G.), 1969 — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical. Thèse Sciences nat., Strasbourg, s.l.n. éd., 290 p. *multigr.*
- TARDY (Y.), 1969 — Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Fac. Sciences, Strasbourg, 274 p. *multigr.*