

Analyse des différenciations minéralogiques et structurales d'un sol ferrallitique à horizons nodulaires du Congo

Didier MULLER*, Gérard BOCQUIER**, Daniel NAHON***, Hélène PAQUET****

* Pédologue ORSTOM, Mission ORSTOM, KP 286, Bogor, Java Barat (Indonésie)

** Laboratoire de Pédologie, Département des Sciences de la Terre, Université de Paris VII, 2, place Jussieu, 75221 Paris Cedex 05

*** Laboratoire de Pétrologie de la Surface, 40, avenue du Recteur-Pineau, 86022 Poitiers Cedex

**** Institut de Géologie de l'Université Louis-Pasteur, 1, rue Bleszig, 67084 Strasbourg Cedex

RÉSUMÉ

A l'aide de données microscopiques, microchimiques et minéralogiques, la différenciation d'un profil ferrallitique en trois ensembles est analysée simultanément d'un point de vue minéralogique et d'un point de vue structural. L'ensemble d'altération est le siège d'une accumulation par néogenèse de kaolinite ferrifère et d'une nodulation goethitique actuelle. Dans l'ensemble nodulaire, dominant des nodules hérités d'une ancienne altération gibbsitique et ferrugineuse. Ces nodules présentent des dégradations successives, qui conduisent par évolution centripète à la formation de cortex, ainsi qu'à la concentration de composés ferrugineux avec dominance d'hydroxydes mixtes de type goethite alumineuse. L'ensemble meuble supérieur, bien que macroscopiquement distinct, est microscopiquement en continuité minéralogique et structurale avec l'ensemble nodulaire. Ces données indiquent à la fois la complexité et l'autochtonie du développement de tels profils ferrallitiques.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE STRUCTURAL AND MINERALOGICAL DIFFERENTIATIONS OF A FERRALLITIC SOIL WITH NODULAR HORIZONS IN CONGO

The differentiation of a ferrallitic profile into three bodies is analysed both from a mineralogical and a structural point of view through microscopical, microchemical and mineralogical data. The weathered body is the centre of an accumulation of ferriferous kaolinite through neogenesis and of a current nodulation of goethite. In the nodular body, nodules inherited from an old gibbsitic and ferruginous weathering are prevailing. These nodules display successive degradations which lead through the centripetal evolution both to the formation of cortex and the concentration of ferruginous components along with the prevalence of mixed hydroxides composed of aluminous goethite. The upper loose body is related mineralogically and structurally to the nodular one from a microscopical point of view, although it is distinct from a macroscopical point of view. These data show both the complexity and the autochtony of the development of such ferrallitic profiles.

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION.

II. CARACTÉRISATION MINÉRALOGIQUE ET MICROSTRUCTURALE DES TROIS ENSEMBLES DU PROFIL.

1. L'ENSEMBLE D'ALTÉRATION.

1.1. L'isaltérite tachetée.

1.2. L'allotérite à nodulation ferrugineuse diffuse.

1.3. Conclusion sur la différenciation de l'ensemble d'altération.

2. L'ENSEMBLE NODULAIRE.
 - 2.1. Le fond matriciel internodulaire.
 - 2.2. Les différents types de nodules.
 - 2.2.1. Les nodules lithoreliques hématitiques.
 - 2.2.2. Les nodules hématitiques, à plages gibbsitiques, et sans cortex.
 - 2.2.3. Les nodules hématitiques, à plages gibbsitiques, et à cortex brun discontinu.
 - 2.2.4. Les nodules goëthitiques à cortex rouge continu.
 - 2.2.5. Les nodules goëthitiques fragmentés.
 - 2.3. Conclusion sur la différenciation de l'ensemble nodulaire.
3. L'ENSEMBLE MEUBLE SUPÉRIEUR.

III. DISCUSSION ET ESSAI D'INTERPRÉTATION.

1. LES NÉOGENÈSES DE KAOLINITE FERRIFÈRE.
2. LES DEUX LIGNÉES DE NODULES.
3. L'ÉVOLUTION GLÉBULAIRE.
 - 3.1. Les évolutions minéralogiques et structurales lors de la genèse des nodules lithoreliques actuels.
 - 3.2. Les évolutions minéralogiques et structurales lors de la dégradation des nodules anciens.
 - 3.3. Conclusion sur l'évolution glébulaire.

IV. CONCLUSIONS.

INTRODUCTION

L'étude des modes d'accumulation du fer et de l'aluminium dans les sols ferrallitiques a beaucoup progressé ces dernières années du fait de l'introduction des méthodes de microanalyse en place, qui permettent d'analyser conjointement les transformations aussi bien minéralogique que structurales intervenant lors de la différenciation des profils.

Ainsi, dans les seules régions tropicales de l'Afrique de l'Ouest et de l'Afrique centrale, après les travaux généraux de LACROIX (1914), D'HOORE (1954), MILLOT et BONIFAS (1955), ALEXANDER *et al.* (1962), MAIGNIEN (1958), se sont développées des études particulières pour lesquelles ont été préférentiellement utilisées — seules ou associées — des données de terrain (LAPORTE 1962, COLLINET 1969, MULLER J. P. 1977), des données d'analyse chimique (LELONG 1967, LEVEQUE 1970, 1975, 1978, WACKERMANN 1975), d'analyse minéralogique (SIEFFERMANN 1969, KALOGA 1976), puis d'analyse pétrographique (DELVIGNE 1964, STOOPS 1967, WACKERMANN 1975, BOULET 1974, NOVIKOFF 1974, CHAUVEL 1977, LEPRUN 1979, PION 1979), et enfin de diverses microanalyses en place (DELVIGNE *et al.* 1970, STOOPS 1967, BOCQUIER et NALOVIC 1972, NAHON 1976, MULLER D. 1979). Cette évolution des méthodes a conduit à un renouvellement des concepts sur ces accumulations supergènes de fer et d'aluminium liées aux altérations et aux pédogenèses tropicales (LELONG *et al.* 1976, BOCQUIER 1976, ZEEGERS et LEPRUN 1979, MILLOT 1980).

L'étude présentée ici associe un grand nombre de ces méthodes analytiques et relie plus particulièrement l'analyse microscopique en place à tout un ensemble de déterminations minéralogiques (Diffraction X. Spectrométries infra-rouge et Mössbauer. Résonance paramagnétique électronique). De plus, en réalisant des séparations de phases, qui concernent en particulier les horizons nodulaires, et qui sont basés sur des tris granulométriques et morphologiques (MULLER D. 1979), il a été possible d'obtenir certaines variations chiffrées des données minéralogiques et microstructurales.

L'ensemble des résultats obtenus concerne un seul profil de sol ferrallitique, localisé (fig. 1) dans le massif granito-gneissique du Chaillu (Congo), sous une forêt dense sempervirente et sous un climat de type

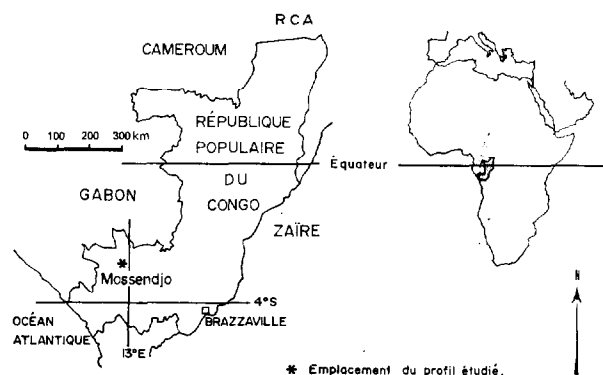


FIG. 1. — Localisation de l'étude.

équatorial gabonais (1 800 mm de pluie par an, avec une saison sèche marquée). Comme l'ont montré des travaux de cartographie pédologique (MULLER D. 1978), le profil analysé peut être considéré comme représentatif des sols de cette région. En effet, ceux-ci présentent généralement les mêmes différenciations ordonnées d'horizons, mais l'épaisseur de leurs horizons varie avec les situations géomorphologiques locales (position sur la pente), ou régionales (localisation sur les différentes surfaces étagées) (PETIT 1975).

Le profil choisi (MOM 7. *in* MULLER D. 1979), présente trois grands ensembles d'horizons, de la base vers le sommet (photo 1 et fig. 2) :

— un ensemble d'altération du granito-gneiss, très hétérogène et de plus de 6 m d'épaisseur. De telles altérations ont déjà été étudiées dans cette région par NOVIKOFF (1974).

— un ensemble *nodulaire*, où s'accumulent sur 2,50 m d'épaisseur des hydroxydes de fer et d'aluminium.

— un ensemble *meuble* supérieur, argileux, finement structuré sur 1 m d'épaisseur, et qui peut être dénommé « structichron » (CHATELIN 1972). Il se termine en surface par des horizons humifères.

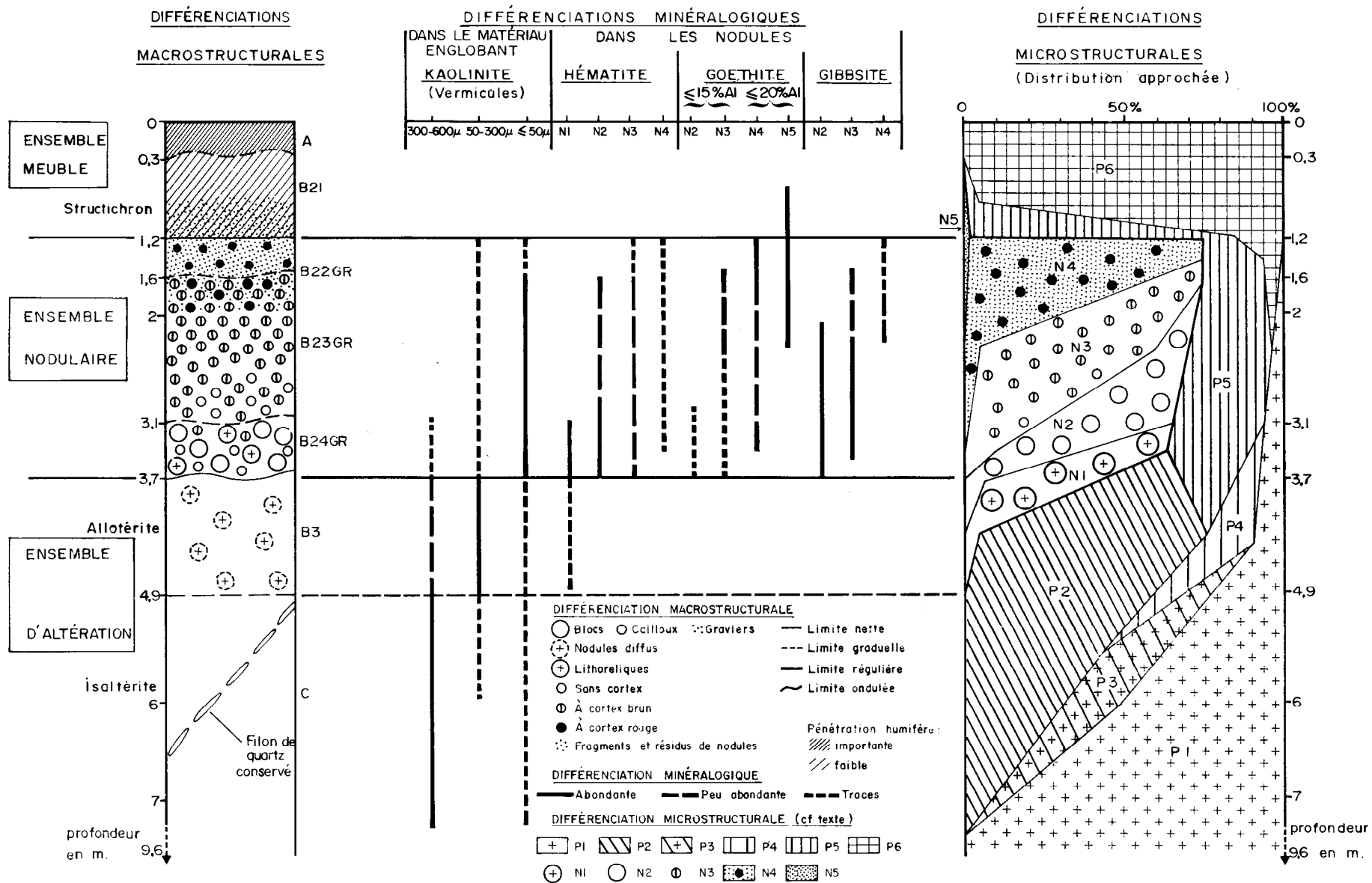


FIG. 2. — Les principales différenciations du profil (MOM 7).



— Ensemble meuble (0-1,2 m).

— Ensemble nodulaire (1,2-3,7 m).

— Ensemble d'altération (3,7 à 9,6 m et plus).

PHOTO 1. — Vue générale du profil étudié (MOM 7).

II. CARACTÉRISATION MINÉRALOGIQUE ET MICROSTRUCTURALE DES TROIS ENSEMBLES DU PROFIL

1. L'ensemble d'altération

Dans l'ensemble d'altération se succèdent :

- à la base, et sur une épaisseur d'au moins cinq mètres, une *isaltérite*, qui se définit (CHATELIN 1972) par la conservation de la structure originelle de la roche, et qui est tachetée, blanche, jaune et rouge.
- à la partie supérieure, et sur seulement un mètre d'épaisseur, une *allotérite* (CHATELIN 1972), où la structure de la roche n'est plus conservée que dans quelques plages rouges légèrement indurées, qui correspondent à des nodules ferrugineux diffus.

1.1. L'ISALTÉRITE TACHETÉE

A l'échelle macroscopique, les filons de quartz qui parcourent cette altérite ne sont pas perturbés :

ceci montre que la structure générale du granitogneiss est encore conservée.

A l'échelle microscopique, le fond matriciel comprend un *squelette* (dont les minéraux conservent bien leur arrangement lithologique originel), plusieurs *types de plasmas*, et des *vides* :

Le *squelette* est constitué principalement de quartz anguleux, peu fracturés, et dont la taille varie de celle des limons grossiers à celle des sables grossiers (50 μ à 2 mm), mais aussi de quelques grains de zircon, de rutile et d'anatase, qui sont les seuls minéraux primaires résiduels subsistant jusqu'au sommet du profil.

Les trois types de plasma :

Un plasma blanc kaolinitique : P1 (fig. 2 et 3-1).

Ce premier type de plasma P1, très abondant, se caractérise par une structure cristalline (BREWER 1964). Il est en effet presque exclusivement composé de très grands *vermicules de kaolinite* accolés, dont la taille peut atteindre 600 μ (fig. 3-1, et photo 2). Une caracté-

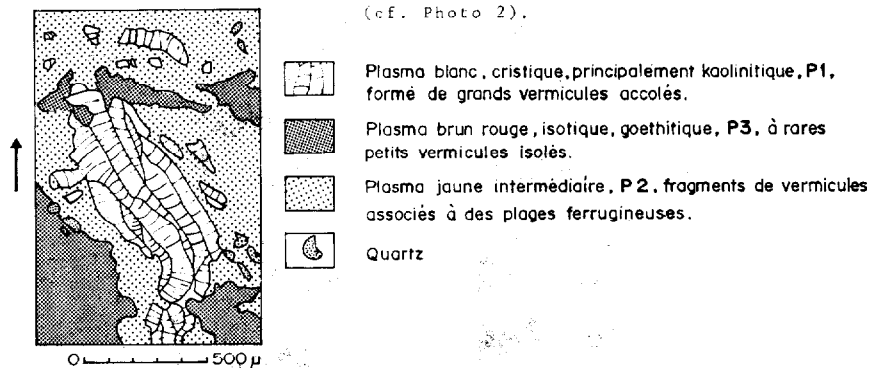
risation cristallochimique de ces vermicules, due à FAYOLLE (1979), a montré :

— la bonne cristallinité de ces kaolinites, d'après la résolution du triplet à 2,48 - 2,52 - 2,55 Å observée en diffractométrie de rayons X, et d'après la résolution

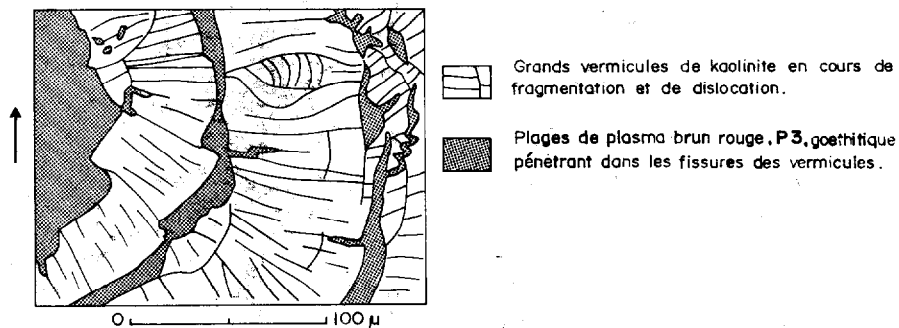
des bandes centrales 2 652 cm⁻¹ et 3 670 cm⁻¹ dans le spectre infra-rouge (1) (CAMBIER 1975).

— la présence de fer (2 à 3 % de fer, exprimé en Fe₂O₃) dans ces vermicules, d'après des détections à la microsonde, obtenues soit avec un spectromètre

1/ Relations générales entre les différents plasmas dans l'isaltérite



2/ Fragmentation des vermicules de kaolinite dans le plasma jaune, P2.



3/ Ferruginisation des fragments de vermicules, dans le plasma jaune, P2.

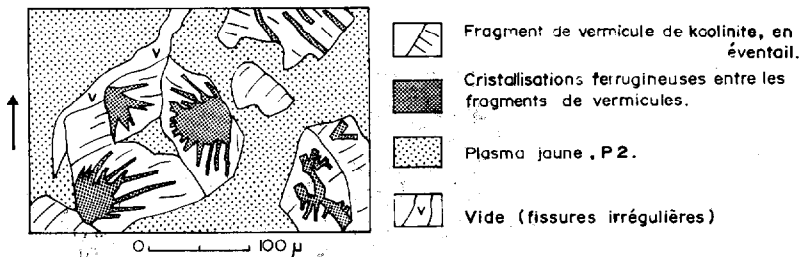


FIG. 3. — Les plasmas de l'isaltérite tachetée.

oblique à dispersion de longueur d'onde (système WDS), soit avec une diode Si-Li (système EDS) (2).

De plus, on a reconnu et pu préciser (FAYOLLE 1979), que ce fer se trouve localisé en position octaé-

drique dans le réseau de la kaolinite. Ceci d'après l'existence d'une bande à 3 600 cm⁻¹ dans le spectre infra-rouge (MENDELUVICI 1979), et d'après la présence d'un triplet à g = 5,2 - 4,5 - 4 et d'un pic intense à

(1) Diffractométrie X et spectroscopie infra-rouge réalisées au Laboratoire des sols du C.N.R.A., à Versailles (R. PROST).

(2) Microanalyse X (CAMEBAX MB1, ORTEC 6230), réalisée au Laboratoire de Pédologie de l'Université de Paris VII (M. FAYOLLE).

CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES FONDS MATRICIDES DU PROFIL MOM 7



PHOTO 3. — BASE DE L'ENSEMBLE NODULAIRE. Les vermicules de kaolinite, et leurs fragments de plus petite taille sont encore nombreux dans un plasma faiblement orienté (Plasma P5). Observation en microscopie optique entre nicols croisés.

PHOTO 4. — STRUCTICHRON. Les orientations plasmiques sont abondantes. Elles sont soit orthogonales, soit localisées autour des quartz. Les vermicules de kaolinite sont absents. (Plasma P6). Observation en microscopie optique entre nicols croisés.

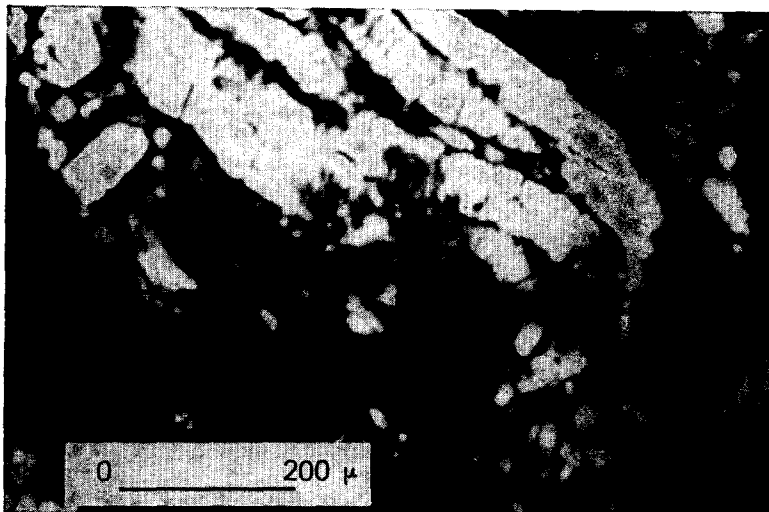


PHOTO 2. — ISALTÉRITE. Les vermicules de kaolinite, très abondants et de grande taille, sont généralement accolés (Plasma P1). Observation en microscopie optique entre nicols croisés.

$g = 9,8$ dans le spectre obtenu par Résonance paramagnétique électronique (1) (fig. 4) (MEADS 1975, HERBILLON 1976, MESTDAGH *et al.* 1980).

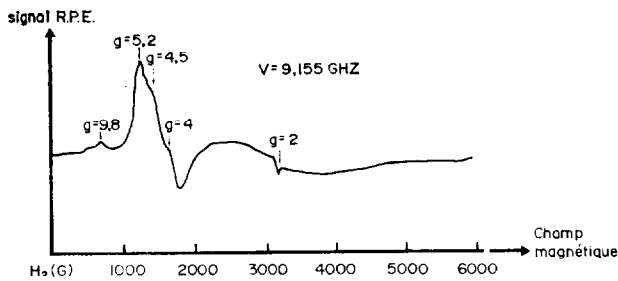


FIG. 4. — Spectre R.P.E. de vermicules de kaolinite ferrifère (Plasma P1, Échantillon MOM 77 B) (in : FAYOLLE 1979).

Ces vermicules de kaolinite ferrifère à développement automorphe se localisent dans des vides inter-cristallins et dans des fissures du squelette quartzeux. Ils représentent donc des néoformations, qui doivent être indépendantes et postérieures à l'altération des minéraux primaires.

L'examen en microscopie électronique à balayage de ces vermicules de kaolinite ferrifère a également montré, sur leur surface (photos 5 et 6), la présence de microcristallisations de forme variée, dont l'analyse en place à la microsonde précise qu'il s'agit de phosphates de calcium. NAHON (1976) avait déjà signalé la présence de néoformations phosphatées analogues, dans une altérite tachetée, dérivée de grès. Et WILHELM *et al.* (1979) ont également montré l'existence dans le chapeau de fer d'Umm ad Damar de cristallisations d'apatite supergène, qui présentent les deux mêmes morphologies, en prismes hexagonaux trapus et en gerbes de cristaux aciculaires.

Un plasma brun-rouge, goethitique et kaolinitique : P3 (fig. 3-1)

Les plages de plasma colorées en brun-rouge correspondent à des concentrations ferrugineuses. Elles sont optiquement opaques, et bien qu'elles soient très finement cristallisées en goethite d'après les données de diffractométrie, elles sont considérées à l'échelle microscopique comme isotiques (BREWER 1964). Ce plasma contient quelques rares vermicules de kaolinite, de couleur rouge et de petite dimension (50 μ environ).

Un plasma jaune, intermédiaire, à cristallisations ferrugineuses : P2

Il est localisé entre les plasmas blanc et brun-rouge (fig. 3-1). Il contient des vermicules de kaolinite

de l'ordre de 100 μ , généralement non accolés et fragmentés, associés à des plages ferrugineuses isotiques (de plasma P3) en bordure des vermicules fissurés (fig. 3-2), ou à des cristallisations ferrugineuses en aiguilles entre les fragments de vermicules (fig. 3-3).

Ces trois types de plasma (P1, P2, P3) présentent entre eux une distribution ordonnée (fig. 3-1) et des relations de filiation. Il y a *passage continu* du plasma blanc (P1) principalement kaolinitique et cristique, au plasma jaune (P2), puis au plasma brun-rouge (P3) principalement goethitique et isotique : les grands vermicules de kaolinite ferrifère, d'abord accolés, se fissurent, se fragmentent et se disloquent, en même temps qu'ils se ferruginisent d'abord sur leur bordure puis entre les fragments.

Enfin, les vides rares dans le fond matériel de cette isaltérite. Ceux qui sont localisés dans les plages de plasma brun-rouge P3, présentent des *auréoles de déferruginisation*, de plus en plus nombreuses de la base vers le sommet de l'horizon.

Ainsi, l'ensemble de ces analyses microscopiques, microchimiques et minéralogiques, précise la *chronologie relative* de la différenciation de cette isaltérite. Dans une trame quartzreuse conservant la structure originelle de la roche, se sont succédés les transformations minéralogiques et structurales suivantes :

- d'abondantes néoformations de kaolinite ferrifère, sous forme de vermicules de grande taille.

- de rares néoformations de minéraux phosphatés secondaires, qui disparaissent vers la partie supérieure de l'isaltérite.

- la fragmentation et la dislocation des grands vermicules de kaolinite ferrifère, qui se ferruginisent à leur surface après leur fragmentation.

- la concentration du fer dans des plages de plasma brun rouge P3, mais également des phénomènes de déferruginisation, qui sont localisées autour de certains vides de ces plages ferrugineuses.

1.2. L'ALLOTÉRITE À NODULATION FERRUGINEUSE DIFFUSE

Au sommet de l'altérite, et sur environ un mètre d'épaisseur, se réalisent d'autres transformations importantes, qui sont alors principalement d'ordre structural :

- la structure originelle de la roche n'est plus conservée qu'en quelques taches, qui correspondent précisément au fond matriciel à plasma brun-rouge, goethitique et isotique P3.

- ces plages de fond matriciel brun-rouge s'opacifient, s'indurent progressivement vers le sommet de l'altérite, alors que leurs limites demeurent diffuses. Elles constituent des « halos glébulaires » sinon des

(1) Résonance paramagnétique électronique : spectres réalisés à l'École Supérieure de Physique Industrielle de Paris (D. BONNIN).

MICROCRISTALLISATIONS DE PHOSPHATES DE CALCIUM DANS L'ISALTÉRITE



PHOTO 5.

Sur la surface] de vermicules de kaolinite ferrifère, deux aspects différents des microcristallisations ultimes de phosphates de calcium, dont l'analyse a été effectuée sur place à la microsonde. (Observation et mesure en microscopie électronique sur échantillon non perturbé).

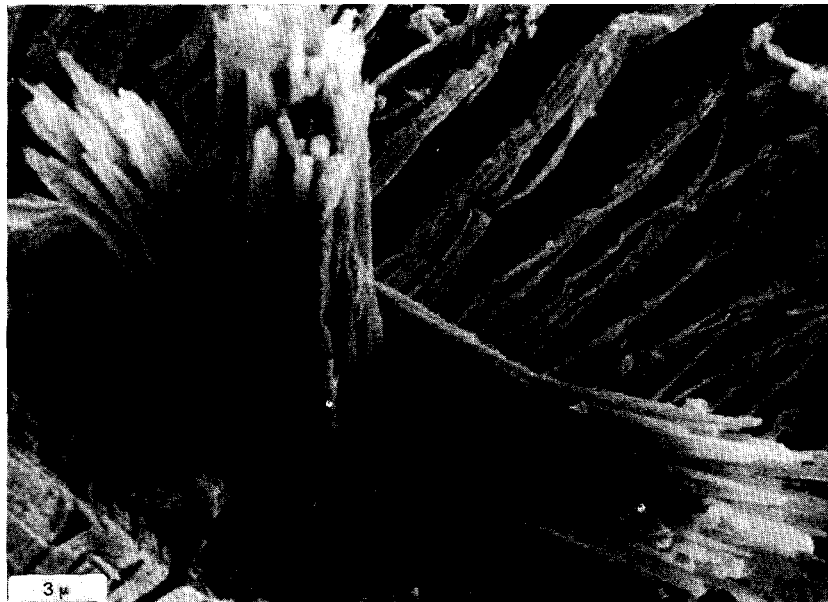


PHOTO 6.

nodules diffus (BREWER 1964), *goethitiques à structure lithorelictuelle*.

— les plages environnantes de fond matriciel jaune renferment toujours des vermicules de kaolinite ferrifère, mais ceux-ci ont une plus petite taille, de l'ordre de 200 μ . Ce plasma kaolinitique P4 se caractérise par l'apparition d'orientations préférentielles correspondant à une nouvelle structure plasmique de type masépique (BREWER, 1964) (fig. 2).

Ainsi, dans cette allotérite, à l'individualisation de nodules ferrugineux diffus à structure lithorelictuelle s'opposent dans le fond matriciel environnant, la dispersion du squelette quartzeux et l'apparition d'orientations plasmiques, qui témoignent toutes deux d'un début de pédoturbation.

1.3. CONCLUSION SUR LA DIFFÉRENCIATION DE L'ENSEMBLE D'ALTÉRATION

Dans sa différenciation, l'ensemble d'altération de ce profil ferrallitique présente donc deux voies continues de transformations minéralogiques et structurales. A partir d'un fond matriciel à structure conservée de la roche, et à plasma cristique à kaolinite ferrifère d'accumulation secondaire, se dégagent deux évolutions concomitantes et continues jusqu'au sommet de l'altérite :

— l'une aboutissant à la formation de *nodules diffus, goethitiques, à structure conservée*.

— l'autre à un *fond matriciel kaolinitique et quartzeux, pédoturbé*.

Cette différenciation se retrouvera et se poursuivra dans l'ensemble nodulaire sus-jacent à cet ensemble d'altération.

L'ensemble d'altération est donc principalement le siège d'une *accumulation par néogenèse de kaolinite ferrifère* et d'un *début de nodulation goethitique*. On remarque l'absence de toute individualisation d'hydroxydes d'aluminium.

2. L'ensemble nodulaire

L'ensemble des horizons nodulaires se compose de deux sortes de matériaux apparemment juxtaposés (fig. 2) :

— l'un, *meuble*, argilo-sableux, correspondant à la *terre fine* (inférieure à 2 mm), et emballant les nodules. C'est le *fond matriciel internodulaire*, composé de quartz, de kaolinite et d'hydroxydes de fer.

— l'autre *induré*, variablement grossier, correspondant à toute une variété de types de *nodules*, qui sont des concentrations d'oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium, réalisées au sein de fonds matriciels kaolinitiques et quartzeux.

Une étude granulométrique préalable, effectuée systématiquement sur la totalité de chacun des horizons nodulaires, a permis de montrer (MULLER D.

1979), qu'il existait dans toutes les courbes de distribution un minimum vers 2 mm, qui justifie ainsi la coupure entre la terre fine (inférieure à 2 mm) assimilable au fond matriciel, et les éléments grossiers (supérieurs à 2 mm) assimilables aux différents types de nodules (fig. 5).

2.1. LE FOND MATRICIEL INTERNODULAIRE

La terre fine emballant les nodules est donc un matériau jaune, argilo-sableux, constitué de kaolinite, de goethite, de quartz et quelques rares minéraux primaires (zircon, anatase...).

A l'échelle microscopique, ce fond matriciel se compose :

d'un *plasma P5, riche en séparations plasmiques* : « *sépique* » (photo 3). En effet, si les cristallites de kaolinite (P1) sont de moins en moins visibles vers le sommet de l'ensemble nodulaire (fig. 2), on constate par contre que des orientations préférentielles se développent sous forme de séparations plasmiques en bordure des vides, autour des grains du squelette et au sein du fond matriciel suivant deux directions : cette structure plasmique est de type *vo-squel-bimasépique* (BREWER 1964), et elle exprime la variété des contraintes exercées par la phase argileuse. Vers le sommet de l'ensemble nodulaire, ces orientations deviennent orthogonales (structure *lattisépique*), et elles définissent un réseau de fines fissures, qui individualisent elles-mêmes des micro-unités structurales (BEAUDOU *et al.* 1977, MULLER J. P. 1977, CHAUVEL *et al.* 1978).

d'un *squelette quartzeux*, dont la taille diminue progressivement vers le sommet, et dont certains grains présentent des imprégnations ferrugineuses.

des vides, de plus en plus abondants vers le sommet. Ce sont surtout des fissures irrégulières, des fissures à la périphérie des nodules, et des biovides.

On constate donc, entre l'altérite et le fond matriciel internodulaire, une *continuité minéralogique et surtout structurale*, qui s'affirme par une évolution progressive des structures plasmiques : masépique au sommet de l'altérite, puis vo-squel-bimasépique, et enfin lattisépique au sommet de l'ensemble nodulaire

2.2. LES DIFFÉRENTS TYPES DE NODULES

L'analyse granulométrique, menée sur chaque horizon de l'ensemble nodulaire montre, de la base au sommet, une *diminution générale de la taille des nodules* (fig. 5). On distingue ainsi trois horizons dans lesquels les nodules ont successivement une taille dominante, qui est celle des *blocs* (supérieure à 20 cm) dans l'horizon B 24 Gr, celle des *cailloux* (de 2 à 20 cm) dans l'horizon B 23 Gr, et enfin celle des *graviers* (de 2 à 20 mm) dans l'horizon B 22 Gr.

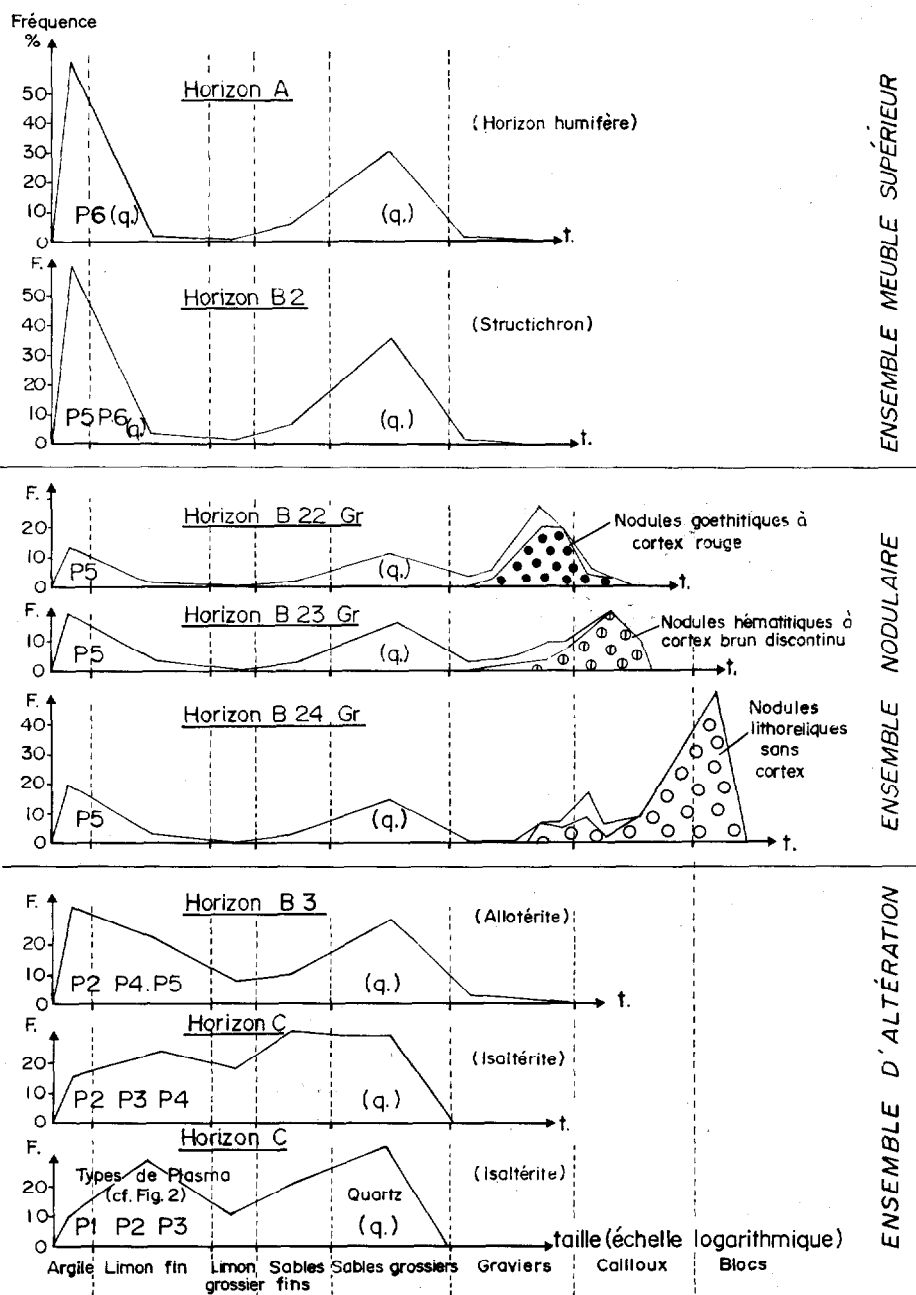


Fig. 5. — Granulométrie totale et taille des principaux types de nodules.

D'autre part, un tri manuel réalisé à l'échelle macroscopique d'après la morphologie et la structure des nodules de ces trois horizons, montre :

— qu'à la base de l'ensemble nodulaire (B 24 Gr), les nodules de la taille des blocs sont *sans cortex*.

— qu'au centre (B 23 Gr), les nodules de la taille des cailloux, ont un *cortex brun discontinu*.

— qu'au sommet (B 22 Gr), les nodules de la taille des graviers sont *compacts* et ont des *cortex rouges continus*.

Enfin à l'échelle microscopique, en associant des données minéralogiques et structurales, on précise les distinctions précédentes en définissant cinq types principaux de nodules (fig. 2) :

— les *nodules lithoreliques, hématitiques, sans cortex* : N1, à la base de l'ensemble nodulaire.

— les *nodules hématitiques, à plages gibbsitiques, et sans cortex* : N2, à la base et au centre de l'ensemble nodulaire.

— les *nodules hématitiques, à plages gibbsitiques, et à cortex brun discontinu* : N3, au centre de l'ensemble nodulaire.

— les *nodules goethitiques, compacts, à cortex rouge continu* : N4, au sommet de l'ensemble nodulaire.

— les *nodules goethitiques fragmentés* : N5, au sommet de l'ensemble nodulaire.

2.2.1. *Les nodules lithoreliques hématitiques : N1*

Dans ces nodules, qui ont la taille de blocs ou de cailloux et qui présentent une forme irrégulière, la structure originelle de la roche est encore conservée par un ciment *hématitique* renfermant lui-même des traces de *goethite alumineuse*, JANOT *et al.* 1971, NORRISCH *et al.* 1961, SCHWERTMANN *et al.* 1975 (Tabl. I). Ces nodules lithoreliques présentent deux faciès principaux, liés aux variations lithologiques : l'un quartzeux avec des alignements de quartz, et l'autre à dominance kaolinitique, avec de grands vermicules rouges de 50 à 600 μ . Plusieurs déterminations à la microsonde ont permis de préciser que la teneur en fer (exprimé en Fe_2O_3) peut atteindre 5 % dans ces vermicules rouges de kaolinite.

TABLEAU I

Analyse minéralogique des nodules par diffractométrie aux rayons X (1)

Types de nodules		HÉMATITE	GOETHITE et % de substitution par Al	KAOLINITE	GIBBSITE	
N5	<i>Nodules goethitiques fragmentés</i> (Sommet de l'ensemble nodulaire)	micro-traces	++ 15-20 %	traces	traces	
N4	<i>Nodules goethitiques à cortex rouge continu</i> (Sommet de l'ensemble nodulaire)	cortex rouge	++ 10-15 %	présente	micro-traces	
		centre du nodule	+	++ 15-20 %	présente	traces
N3	<i>Nodules hématitiques à plages gibbsitiques et à cortex brun discontinu</i> (Centre de l'ensemble nodulaire)	cortex brun	++	++ 10-15 %	présente	+
		centre du nodule	++	traces 15 %	présente	+++
N1	<i>Nodules lithoreliques, hématitiques</i> (Base de l'ensemble nodulaire)	+++	traces 10 %	présente	0	

+++ très abondante ++ abondante + peu abondante

(1) Déterminations réalisées par M^{lle} H. PAQUET, au Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la surface, du CNRS à Strasbourg.

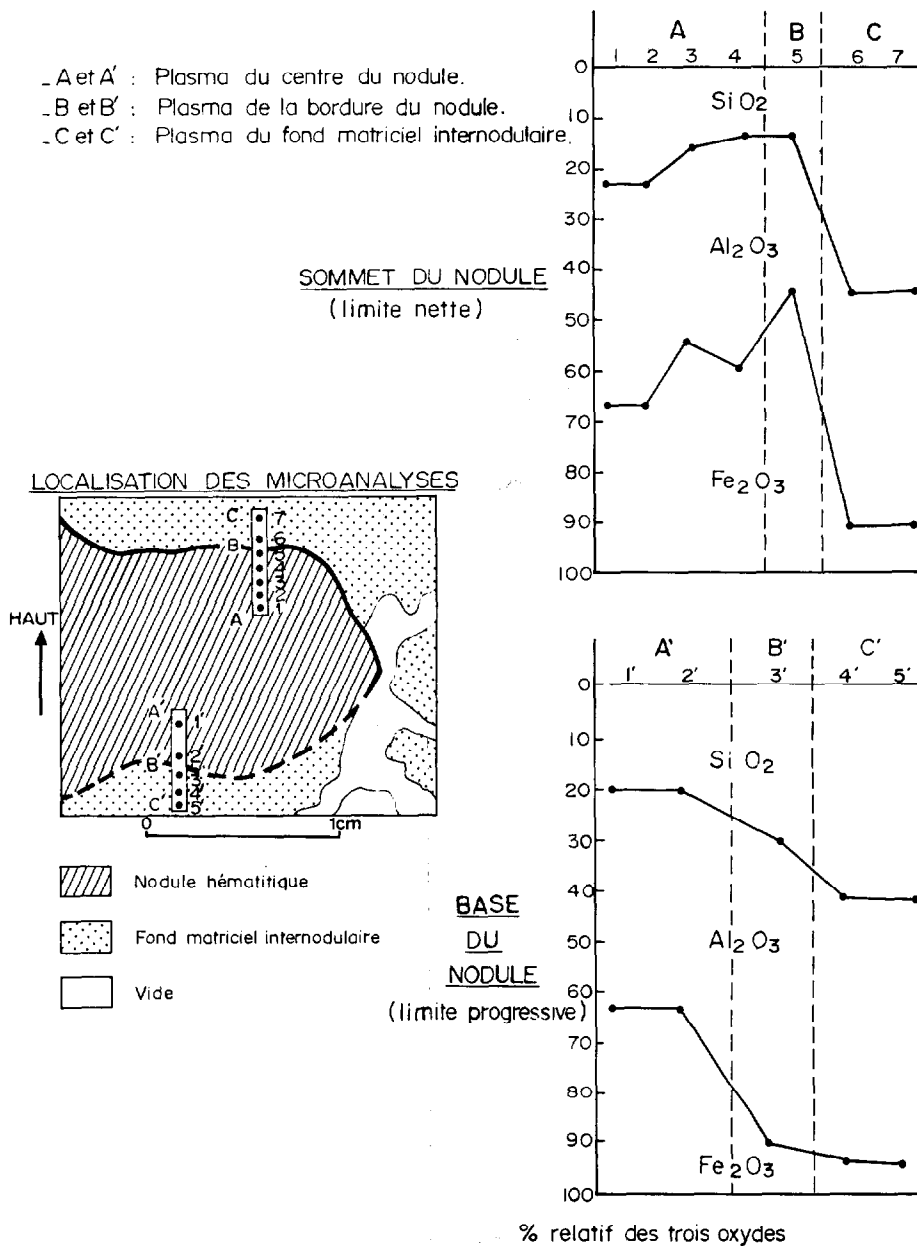


FIG. 6. — Microanalyses comparées des plasmas intra et internodulaires, au sommet et à la base d'un nodule hématitique.
 (Microsonde CAMECA système E.D.S. — HT : 15 KV — Courant 2,5 nA — Temps d'acquisition du spectre 200 s.)

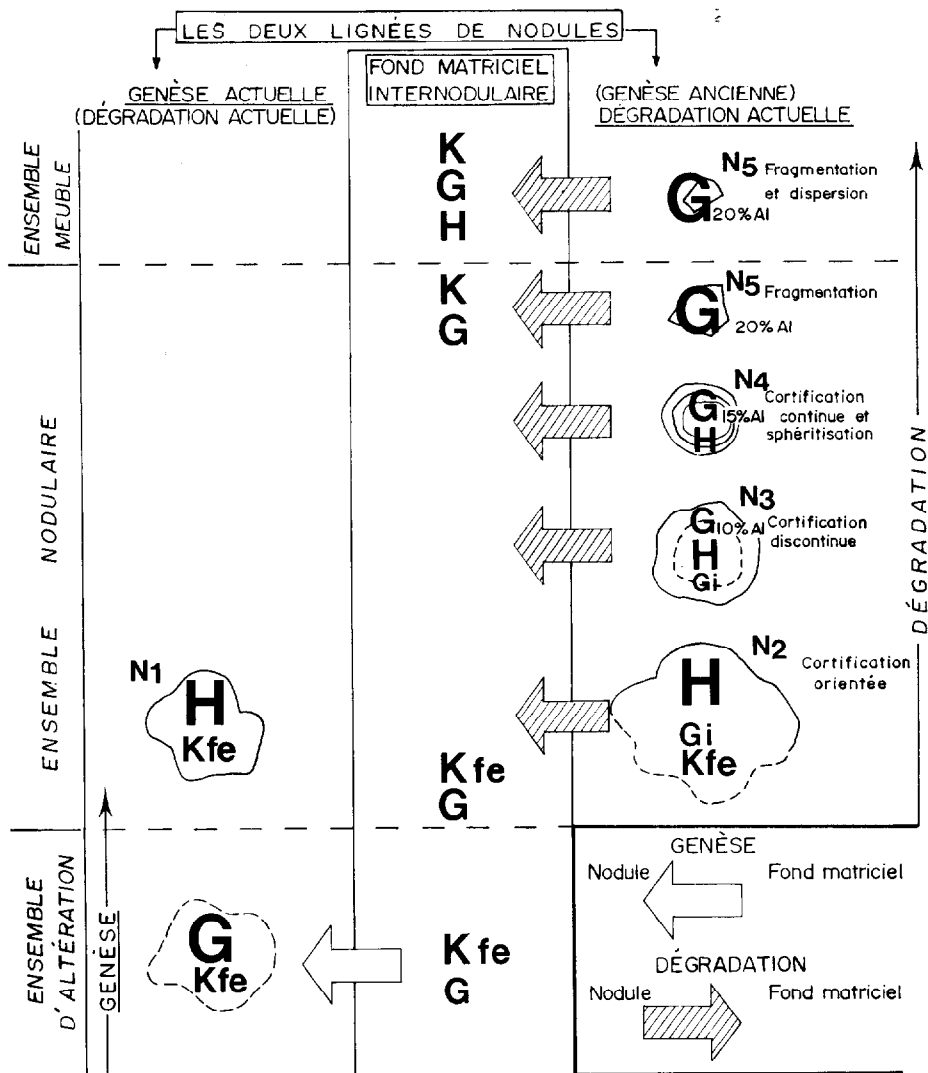


FIG. 7. — Les deux lignées de nodules et l'évolution glébulaire.

H : Hématite — G : Goéthite (et % de substitution par Al) — Gi : Gibbsite — KFe : kaolinite ferrifère — K : kaolinite de petite taille, mal cristallisée.

Ce premier type de nodules est donc *en filiation* — par concentration du fer et induration — avec les nodules diffus de l'allotérite sous-jacente (fig. 7). Ces nodules lithoreliques, qui dérivent ainsi du fond matriciel à plasma P1 à grands vermicules de kaolinite présent depuis l'isaltérite tachetée, sont donc également postérieurs aux néoformations de kaolinite ferrifère dans l'ensemble d'altération.

2.2.2. Les nodules hématitiques, à plages gibbsitiques, et sans cortex : N2

Les nodules de ce second type sont localisés à la base et au centre de l'ensemble nodulaire. Leur forme

est irrégulière et leur taille dominante est celle de cailloux. Ils sont peu indurés, et leur fond matriciel présente les caractères particuliers suivants :

— un *plasma argilo-ferrugineux*, généralement isotique à inondulique. Il est principalement *hématitique*, avec des traces de goéthite, et quelques grands vermicules rouges de kaolinite (fig. 7).

— des plages de *plasma cristique*, *uniquement gibbsitique*, à fins cristaux de 2 à 5 μ . Ces plages — par leur forme générale et la disposition en cloisons de certaines cristallisations gibbsitiques — pourraient correspondre à de la gibbsite primaire d'altération, pseudomorphosant des aluminosilicates de la roche mère (NOVIKOFF 1974, BOULANGÉ *et al.* 1973).



PHOTO 7. — Vue générale de « quartz flottant » dans les vides du plasma intranodulaire ferrugineux. Observation au microscope optique entre nicols croisés.

PHOTO 9. — Aspect de surface d'un quartz « flottant », au microscope électronique à balayage : faciès de dissolution selon les axes de cristallisation du quartz.

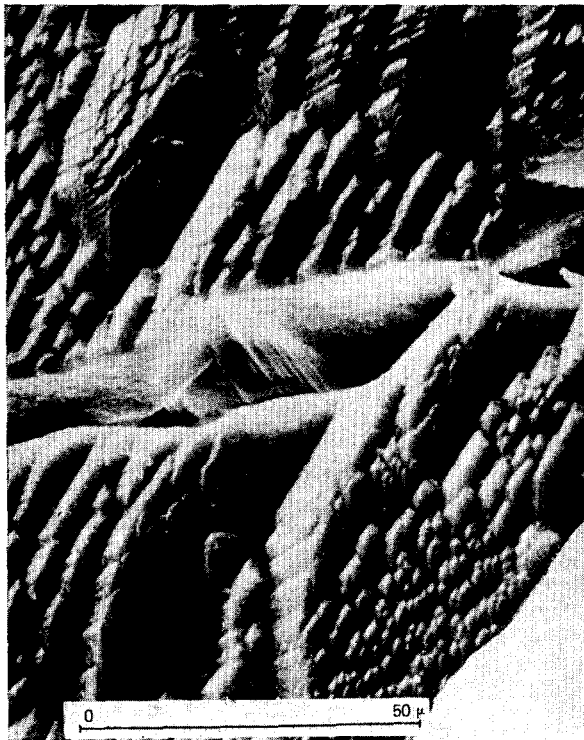


PHOTO 8. — Ponts de fer entre les fragments d'un même quartz et le plasma intranodulaire (Présence de cristallisations de goéthite en bordure du vide). (Nicols croisés).

PHOTO 10. — Argilanes d'illuviation localisés autour des quartz, et remplissant les vides de dissolution. (Nicols croisés).



— un squelette quartzueux, avec des traces de dissolution.

— des vides, rares, et souvent localisés à la périphérie des quartz.

Dans ces nodules hématitiques on peut mettre en évidence deux sortes de transformations internes, qui concernent :

. soit le squelette : il s'agit de la dissolution des quartz inclus dans le plasma argilo-ferrugineux isotique.

. soit le plasma argilo-ferrugineux lui-même, qui évolue à la périphérie des nodules, mais différemment suivant qu'il s'agit du sommet ou de la base de ces nodules : il y a alors polarité dans l'évolution en place des nodules.

(a) La dissolution des quartz

On observe en effet — comme l'avait signalé DELVIGNE dès 1965 — que dans ces nodules de nombreux quartz sont fissurés, fragmentés, bordés de vides, ou bien même qu'ils « flottent » dans des cavités (photo 7). Dans certains cas, ces quartz « flottants » demeurent reliés au plasma argilo-ferrugineux environnant par des « ponts ferrugineux » (ou argilo-ferrugineux), qui sont enracinés dans les fissures du quartz (photo 8). Les vides existants ne peuvent donc être dus qu'à une dissolution du quartz postérieure à la ferruginisation.

Dans un même nodule, on peut observer divers stades de cette dissolution à partir d'un quartz sain, totalement inséré dans un plasma argilo-ferrugineux isotique :

— quartz fissuré, aux fissures remplies de plasma argilo-ferrugineux.

— quartz fissuré bordé de quelques vides.

— quartz fissuré et fragmenté bordé de nombreux vides et relié au plasma argilo-ferrugineux par des « ponts ferrugineux ».

— quartz, ou fragments de quartz, « flottant » dans une cavité et reliés ou non au plasma ferrugineux par des ponts ferrugineux, qui se présentent alors comme des cloisons.

— présence d'argilanes d'illuviation dans les vides de dissolution du quartz. Ces argilanes ne sont présents que dans les vides situés à la périphérie du nodule. Ils recouvrent aussi bien le plasma argilo-ferrugineux, que les ponts ferrugineux, ou même la surface du quartz, ce qui tendrait à montrer que la dissolution du quartz est alors stoppée en bordure du nodule (photo 10).

De plus, l'observation au microscope électronique à balayage (M.E.B.) de ces grains de quartz « flottant », précise que leur surface se présente sous forme de « marches d'escalier », qui indiquent que la dissolution des quartz se réalise et progresse suivant les plans du réseau cristallin de ce minéral (photo 9). Un tel aspect de dissolution est dénommé par ECHENBRENNER

(communication orale) : « figure de décroissance cristalline ».

Enfin, l'analyse à la microsonde de ces « ponts ferrugineux » révèle qu'ils contiennent jusqu'à 85 % de Fe_2O_3 et un excès d'alumine, ce qui correspondrait — en accord avec les données diffractométriques — à la présence de goethite aluminieuse. Cette goethite substituée pourrait provenir de la dissolution d'une partie de la kaolinite du plasma, et de la formation d'hydroxyde mixte avec l'aluminium ainsi libéré (NAHON 1976). Ainsi peut débiter à l'intérieur des nodules une transformation du plasma, qui s'intensifie et acquiert une nette polarité sur la bordure des nodules.

(b) La polarité de la transformation du plasma argilo-ferrugineux

Sur lames minces orientées, l'observation et la micro-analyse mettent en évidence que la limite des nodules par rapport au fond matriciel internodulaire diffère au sommet et à la base de ces nodules en place :

— Au sommet, la limite est nette. Elle correspond à une concentration relative en fer, liée à une diminution du rapport SiO_2/Al_2O_3 : ceci est précisé par une suite de microanalyses ponctuelles réparties depuis le centre du nodule jusqu'au fond matriciel internodulaire (fig. 6).

— A la base, la limite est au contraire progressive. Elle correspond à une soustraction du fer, alors que le rapport SiO_2/Al_2O_3 demeure constant, ce qui indique un maintien de la kaolinite (fig. 6). On constate par ailleurs que la dissolution des quartz est moins intense à la base des nodules qu'à leur sommet, sinon nulle.

Ces transformations progressent de la périphérie vers le centre du nodule. C'est une évolution centripète, qui peut être mise en évidence par l'examen de la limite progressive de la base du nodule, où l'on remarque :

— La présence de grands vermicules de kaolinite (400 μ), qui font saillie juste à cette bordure inférieure du nodule. Des vermicules identiques sont en effet présents dans le fond matriciel intranodulaire, mais sont absents au centre des plages de fond matriciel internodulaire. Ces vermicules seraient donc libérés par la déferruginisation de la base du nodule, et ils seraient progressivement fragmentés et intégrés par la pédoturbation dans le fond matriciel internodulaire (photos 11 et 12).

— La présence, en bordure du nodule, de quartz, dont les fragments présentent une extinction simultanée dans le nodule et dans le fond matriciel internodulaire avoisinant.

— Dans le fond matriciel internodulaire, quelques rares quartz aux fissures emplies de plasma nodulaire isotique : quartz, qui n'existaient pas dans les horizons sous-jacents.

En conclusion, ces nodules hématitiques à plages gibbsitiques et sans cortex de la base de l'ensemble

TRANSFORMATIONS DE LA BORDURE DES NODULES HÉMATITIQUES

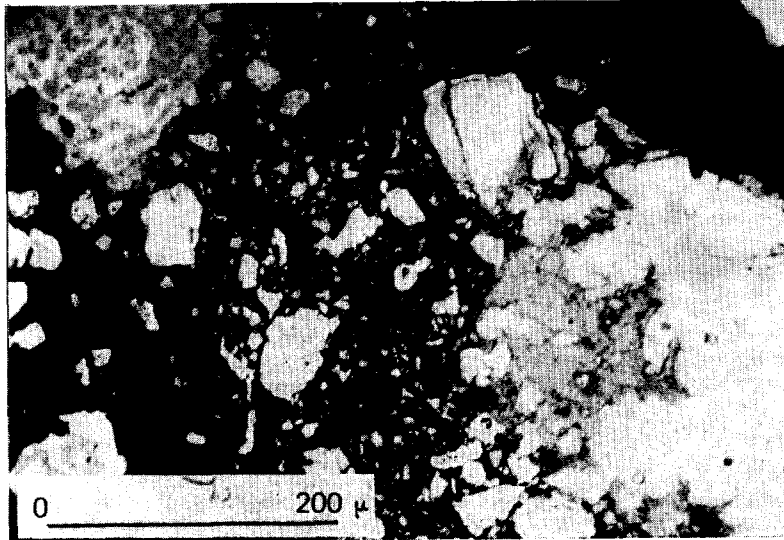


PHOTO 11. — Limite progressive de la base du nodule. La déferrugination (fig. 7), libère dans le fond matriciel internodulaire voisin de la kaolinite et des quartz, originaires du nodule. Observation au microscope optique en lumière « naturelle ».

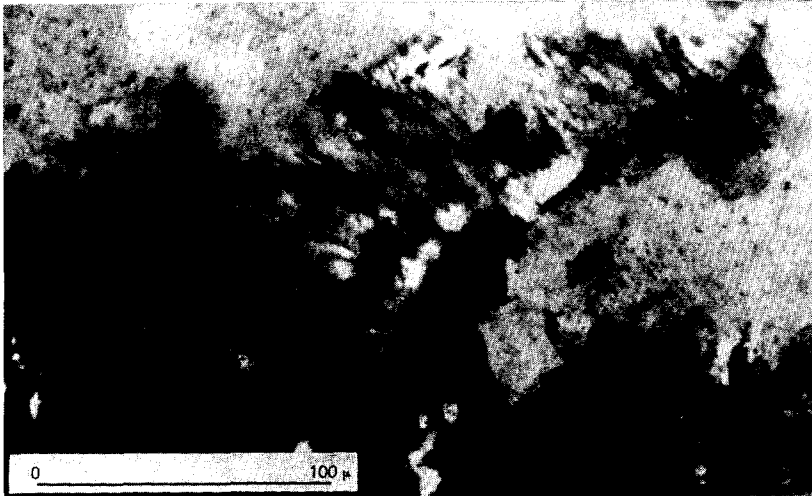


PHOTO 12. — Grand vermicule de kaolinite faisant saillie, par déferrugination centripète de la bordure inférieure du nodule. Observation au microscope optique en lumière « naturelle ».



PHOTO 13. — Plage de cristalliplasma gibbsitique enchâssé dans un cortex discontinu. Le cortex est formé par l'évolution centripète du seul plasma argilo-ferrugineux, qui est transformé minéralogiquement (apparition de goéthite Al) et structuralement (aspect rubané du cortex). Observation au microscope optique entre nicols croisés.

nodulaire, se distinguent par deux caractères très significatifs :

— Du fait de la présence de plages gibbsitiques, ils ne peuvent être affiliés à l'altérite sous-jacente, où la gibbsite ne se forme pas actuellement à partir des alumino-silicates primaires.

— Ils subsistent en place des transformations, qui sont postérieures à leur induration (dissolution des quartz), et qui présentent même une polarité : au sommet du nodule le fer s'accumule relativement du fait de la dissolution du quartz et de la kaolinite, et il y a formation de goéthite alumineuse. A la base, il y a soustraction du fer, alors que la kaolinite et le quartz se maintiennent.

— Ainsi, simultanément, fonctionnent à l'échelle d'un nodule, deux types de transformations qui sont géochimiquement opposées. Elles conduisent, au sommet des nodules à une densification par le fer, c'est-à-dire à un début de formation de cortex. Et à la base, par déferruginisation centripète, à la libération dans le fond matriciel internodulaire avoisinant, des kaolinites et des quartz du nodule. Cette évolution correspond alors à une dégradation sur place des nodules, au profit du fond matriciel avoisinant.

2.2.3. Les nodules hématitiques, à plages gibbsitiques, et à cortex brun discontinu N3, du centre de l'ensemble nodulaire

De composition minéralogique analogue à celle des nodules précédents, ces nodules N3 en diffèrent par :

— une taille plus petite (inférieure à 10 cm), et une forme arrondie, plus sphérique.

— une diminution des quartz, qui représentent une plus faible proportion du nodule à l'analyse chimique, et qui sont en fragments plus petits.

— par la présence d'un cortex brun discontinu, qui apparaît surtout au sommet du nodule.

Ces cortex dont les bords sont en biseau, ont un aspect rubané par la succession de fines lamelles parallèles, orientées et à structures plasmiques variant de mosaïque à ondulique et isotique. Leur limite intérieure est peu nette, alors que leur limite extérieure est tranchée. Celle-ci est en effet soulignée par des séparations plasmiques, qui apparaissent dans le fond matriciel internodulaire, et qui sont orientées parallèlement à la surface des nodules.

La formation de ces cortex s'effectue aux dépens du nodule, par une transformation sur place à progression centripète, comme le montrent :

— La présence, dans certains cortex, de grands vermicules de kaolinite, qui sont présents dans l'in-

térieur du nodule et absents dans le fond matriciel internodulaire.

— La présence de quartz (avec imprégnations ferrugineuses), qui « chevauchent » la limite interne du cortex.

— La présence, en bordure du nodule, de plages de cristalliplasma gibbsitique, qui font saillie hors du nodule, et qui sont ainsi enchassées dans un cortex apparaissant discontinu (photo 13).

De tels cortex progressent donc vers le centre du nodule, en respectant les plages gibbsitiques et les quartz. Leur progression centripète se réalise aux seuls dépens du plasma argilo-ferrugineux, qui est transformé et réorganisé sur place en fines écorces concentriques.

Du point de vue minéralogique, cette transformation correspond à une accumulation relative de la goéthite par rapport à l'hématite. Et cette goéthite a un taux de substitution en aluminium situé entre 10 et 15 % (Tabl. I).

Ceci rejoint les travaux de JONES (1965) au Nigeria, et ceux de NAHON (1976), NAHON *et al.* (1977) au Sénégal, qui ont montré que l'acquisition des cortex et de la forme arrondie des nodules pouvait se réaliser en place par une évolution minéralogique de la périphérie des nodules. Ici, on montre de plus que la formation du cortex présente une polarité, en débutant au sommet des nodules.

En conclusion, ces nodules hématitiques à plages gibbsitiques et à cortex brun discontinu du centre de l'ensemble nodulaire, peuvent être affiliés aux nodules hématitiques de la base de l'ensemble nodulaire, car leurs évolutions minéralogiques sont analogues, mais plus intenses, et aboutissent ici à une modification structurale : la formation de cortex rubané discontinu.

2.2.4. Les nodules goéthitiques, à cortex rouge continu N4, du sommet de l'ensemble nodulaire

Ces nodules, de la taille des graviers (2 mm à 2 cm) se caractérisent par :

— une forte concentration relative en fer, due à la diminution progressive des vermicules de kaolinite, des plages gibbsitiques et des quartz. Les vides sont néanmoins peu nombreux et ces nodules sont plus compacts, plus denses que les nodules hématitiques.

— une forte concentration de la goéthite par rapport à l'hématite, qui disparaît presque totalement dans les cortex (Tabl. I). Cette goéthite contient de 10 à 20 % d'aluminium substitué.

— la présence de cortex périphériques continus⁽¹⁾, rouges, généralement rubanés, et qui sont soit simples

(1) Avec la formation d'un cortex continu, ces nodules acquièrent une structure concentrique, et devraient alors être dénommés « concrétions » (BREWER 1964). Pour ne pas utiliser deux termes différents à l'intérieur de « l'ensemble nodulaire », et du fait que la formation de cortex résulte ici d'une transformation interne du nodule, nous avons préféré n'utiliser que le terme nodule.

(composés d'un seul ensemble de lamelles), soit complexes, c'est-à-dire multiples et souvent sécants entre eux.

Ces nodules goethitiques peuvent être affiliés aux précédents nodules hématitiques, puisque la dominance de la goethite se réalise progressivement, en même temps que la disparition de la kaolinite et des quartz, et que les mêmes types de cortex se développent, se superposent et se recoupent entre eux.

2.2.5. Les nodules goethitiques, fragmentés, N5, du sommet de l'ensemble nodulaire

Ces nodules — très peu abondants (fig. 2) — sont de très petite taille (200 μ à 2 mm). Ils sont anguleux et se présentent sous la forme de fragments soit de cortex rubané, soit de plasma dense, goethitique, sans quartz associés ni vermicules de kaolinite ou plages gibbsitiques. Ils résultent de la fragmentation sur place des nodules goethitiques précédents, et de la dispersion des fragments par pédoturbation : le fond matriciel internodulaire renferme en effet d'abondantes séparations plasmiques et de nombreux biovides.

Du point de vue minéralogique, la goethite a largement supplanté l'hématite — qui n'est plus décelée qu'à l'état de micro-traces — et cette goethite est encore plus substituée en aluminium (20 %) que précédemment (Tabl. I).

2.3. CONCLUSION SUR LA DIFFÉRENCIATION DE L'ENSEMBLE NODULAIRE

L'ensemble des horizons nodulaires se caractérise donc par :

— une *variation faible et progressive des seuls caractères structuraux du fond matriciel internodulaire* (la terre fine emballant les nodules), dont le plasma augmente ses orientations et témoigne ainsi d'une activation de la phase argileuse.

— une *très grande diversité des nodules*, qui présentent des concentrations discontinues (« glébules » : BREWER, 1964) d'hydroxydes de fer et d'aluminium. Cinq types principaux de nodules ont pu être distingués, et l'on a constaté que les caractères aussi bien minéralogiques que structuraux de ces différents types de nodules s'ordonnaient et s'affiliaient en allant de la base vers le sommet de l'ensemble nodulaire.

Cette évolution glébulaire consiste principalement en une *dégradation* de certains constituants des nodules, et les produits de cette dégradation *alimentent le fond matriciel internodulaire*.

3. L'ensemble meuble supérieur

Les caractères généraux de la partie supérieure du profil sont tout à fait comparables à ceux présentés

pour de nombreux profils ferrallitiques africains par MARTIN (1972), CHATELIN (1974), CHAUVEL (1977), MULLER J. P. (1977).

On distingue ainsi (fig. 2), sur un mètre d'épaisseur environ, un horizon meuble, coloré et structuré (« structichron ». CHATELIN 1972), surmonté, dans les 30 premiers centimètres, par un horizon humifère à forte activité biologique.

Le structichron, à l'échelle macroscopique, est jaune, argilo-sableux, finement structuré, et sa limite inférieure avec l'ensemble nodulaire est nette et régulière.

À l'échelle microscopique le fond matriciel est composé (photos 4 et 12) :

— d'un *plasma argilo-ferrugineux, kaolinitique, riche en séparations plasmiques*, dont les orientations sont soit perpendiculaires entre elles (lattisépique), soit conformes aux parois des fissures ou aux faces des grains du squelette ou des nodules (structure vo-squel-lattisépique). Les vermicules de kaolinite ferrifère sont absents de ce plasma P6. Le fer est sous forme d'hématite et de goethite (non substituée).

— d'un *squelette principalement quartzeux*, à l'exception de quelques zircons, rutilés et anatases. Les quartz présentent des caries et des fissures emplies soit de plasma jaune kaolinitique, soit de plasma rouge, isotique, ferrugineux. La taille de ces quartz est la plus fine du profil, et certains d'entre eux — de même que des zircons — sont détectés par diffractométrie aux rayons X, dans la fraction « argileuse » inférieure à 2 μ .

— des *vides* de plus en plus nombreux vers la surface, et liés à l'activité biologique.

Dans ce fond matriciel se retrouvent dispersés — principalement à la base de l'horizon — quelques *nodules goethitiques fragmentés*, qui sont identiques aux nodules N5 du sommet de l'ensemble nodulaire.

Ainsi, l'ensemble meuble supérieur, s'oppose macroscopiquement à l'ensemble nodulaire sous jacent par la brusque dominance de la terre fine. Microscopiquement ces deux ensembles sont en *continuité structurale et minéralogique* aussi bien pour le fond matriciel (internodulaire), que pour les fragments résiduels de nodules, qui disparaissent progressivement vers la surface.

III. DISCUSSION. ESSAI D'INTERPRÉTATION

1. Les néogénèses de kaolinite ferrifère

La présence de kaolinite ferrifère dans des altérites ou dans des paléo-altérites tropicales a déjà été signalée par plusieurs auteurs : RENGASAMY *et al.* (1975), HERBILLON *et al.* (1976), MENDELLOVICI *et al.* (1979), FAYOLLE (1979), qui ont généralement envisagé que ce minéral pouvait correspondre à des néoformations

secondaires. Nous précisons, dans ce profil ferrallitique du Congo, la microlocalisation de cette kaolinite, ainsi que ses relations génétiques avec la dégradation de certains horizons du profil, et avec la nodulation ferrugineuse (cf. III.2 et III.3).

En effet, la kaolinite ferrifère se localise ici dans les vides de l'altérite (principalement le cristalliplasma P1), et au sein de différents nodules (N1, N2, N3) de l'ensemble nodulaire :

dans l'altérite, cette kaolinite ferrifère résulte d'une *néogenèse indépendante et postérieure à l'altération* des minéraux primaires aluminosilicatés et ferrugineux, du granite. On a noté en effet que le développement automorphe des cristallites et des vermicules de grande taille se réalise dans tout le réseau de vides, laissé par l'altération complète (mais conservatrice de structure) des minéraux primaires autres que le quartz. Cette kaolinite ne provient donc pas de l'altération en place de certains minéraux primaires ferrugineux. Elle représente au contraire une importante *accumulation secondaire à la base du profil*, à laquelle viennent s'adjoindre des accumulations de goethite, et de rares et ultimes accumulations de phosphates de calcium. Ces néoformations abondantes peuvent avoir pour origine des solutions issues d'altérations dans les horizons supérieurs, comme le montre par exemple la dissolution de la kaolinite et du fer mise en évidence dans certains nodules (N2). L'accumulation de kaolinite ferrifère dans l'altérite peut donc se relier ici à la *dégradation de minéraux secondaires résiduels dans les horizons supérieurs, c'est-à-dire à une pédogenèse superficielle*.

dans l'ensemble nodulaire, des vermicules de kaolinite ferrifère sont séquestrés dans le plasma argilo-ferrugineux de certains nodules. Ces vermicules disparaissent progressivement vers le sommet de l'ensemble nodulaire, notamment par la déferrugineuse de la base des nodules, qui les libère et les livre au fond matriciel internodulaire. Ces vermicules présents dans des nodules, qui renferment également des plages reliques de gibbsite (nodules N2, N3, N4) peuvent alors correspondre à de *précédentes néogenèses* réalisées dans une ancienne altérite, où la gibbsite s'individualisait.

Ce profil ferrallitique présente donc dans ses horizons d'altération actuels ou anciens, des accumulations secondaires d'une kaolinite particulière, renfermant du fer dans sa structure. Et celle-ci pourrait se néoformer à partir de solutions issues d'une altération qui, dans les horizons supérieurs, dissout de la kaolinite et des composés ferrugineux.

2. Les deux lignées de nodules

Parmi tous les types de nodules, qui constituent l'ensemble nodulaire, seuls les nodules lithoreliques hématitiques (N1) sont en filiation avec l'altérite. Par

contre, tous les autres types de nodules (N2 à N5) contiennent plus ou moins de la gibbsite d'altération directe des minéraux primaires. Ils ne peuvent de ce fait dériver de l'ensemble d'altération actuel, où la gibbsite ne se forme pas. On est donc conduit à admettre l'existence de deux lignées de nodules (fig. 7) :

— l'une, *actuelle, débute dans l'altérite* par la formation de nodules diffus lithoreliques, qui résultent de la ferruginisation des vermicules de kaolinite ferrifère. Et cette nodulation, qui se poursuit par l'individualisation et l'induration de ces mêmes nodules à la base de l'ensemble nodulaire est bien postérieure aux néogenèses de kaolinite ferrifère.

— la seconde lignée de nodules est d'origine *ancienne*, mais elle présente une *évolution encore actuelle*. Elle a son premier terme représenté à la base de l'ensemble nodulaire par les gros nodules hématitiques et gibbsitiques (N2). Ces nodules montrent déjà — avec une polarité — des signes de transformations minéralogiques et structurales actuelles. Et c'est l'enchaînement de ces transformations, qui conduit à la différenciation successive des nodules N3, N4, N5, de la base de l'ensemble nodulaire jusqu'au structichron (fig. 7).

La coexistence de ces deux lignées de nodules, qui se distribuent de l'altérite au structichron, nous révèle ainsi que le développement de ce profil a été complexe, et qu'il a dû comprendre plus particulièrement dans son histoire :

— une *ancienne altération gibbsitique et ferrugineuse*, dont la trace ne débute qu'au niveau actuel de la base de l'ensemble nodulaire.

— un *enfouissement* et une *modification postérieurs de l'altération*. En effet, dans toute la base actuelle du profil, la gibbsite ne s'individualise plus. Et il ne se forme pas non plus d'autres produits secondaires provenant de l'altération en place des minéraux primaires. Ce sont plutôt des produits secondaires (kaolinite ferrifère et goethite), issus de la dégradation des horizons supérieurs, qui viennent s'accumuler dans le réseau des vides d'altération et se concentrer localement en nodules.

Dans ce profil ferrallitique, on doit donc distinguer une lignée ancienne de nodules ferrugineux et gibbsitiques, qui sont issus de la *concentration de produits secondaires élaborés en place par une ancienne altération des minéraux primaires de la roche*. Et une lignée actuelle de nodules uniquement ferrugineux, qui eux sont issus de *produits secondaires illuviaux* à partir de l'*altération actuelle des minéraux secondaires de la partie supérieure du profil*.

3. L'évolution glébulaire

L'ensemble des transformations minéralogiques et structurales, que subissent les nodules des deux lignées actuelle et ancienne, peut être regroupé sous

le terme général d'évolution glébulaire. Il s'agit bien en effet d'évolution, puisque ces transformations successives sont ordonnées verticalement dans le profil, et que les principaux stades de transformation ont été reliés génétiquement en deux lignées. D'autre part, on regroupe sous le terme général de glébulaire (BREWER, 1964) les variations microstructurales, que présentent ces diverses concentrations d'oxy-hydroxydes, qui manifestent successivement des structures de type lithorelictuel, puis nodulaire et enfin concrétionné.

Dans ce profil, l'évolution glébulaire est particulièrement intéressante, et elle montre deux sens évolutifs opposés :

— celui de la *genèse des nodules*, dans la lignée actuelle, est localisé entre l'altérite et la base de l'ensemble nodulaire.

— celui de la *dégradation des nodules*, dans la lignée ancienne, est localisé depuis la base de l'ensemble nodulaire jusqu'au structichron.

3.1. LES ÉVOLUTIONS MINÉRALOGIQUES ET STRUCTURALES LORS DE LA GENÈSE DES NODULES LITHORELIQUES ACTUELS

Entre les deux stades de formation des nodules lithoreliques actuels, les évolutions sont les suivantes (fig. 7) :

du point de vue minéralogique :

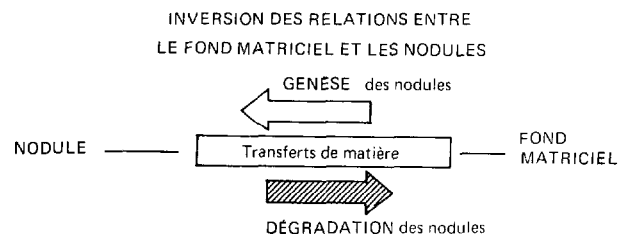
Nodules indurés de la base de l'ensemble nodulaire (N1)	Hématite	Kaolinite ferrifère	Quartz
Nodules diffus de l'allotérite	Goethite	Kaolinite ferrifère	Quartz

On retrouve donc dans ce profil, que lors de la genèse des nodules, l'induration peut être reliée à la formation d'hématite, alors que les structures lithoreliques sont conservées (NAHON, 1976).

Du point de vue structural, il y a passage continu de nodules à limite diffuse et progressive avec le fond matriciel, à des nodules individualisés, irréguliers, et indurés par rapport au fond matriciel.

Lors de leur genèse, les nodules qui étaient dans l'allotérite structurellement et minéralogiquement concordants avec le fond matriciel où ils se forment deviennent à la base de l'ensemble nodulaire discordants avec le fond matriciel avoisinant, aussi bien du point de vue structural (nodule individualisé à limite tranchée), que du point de vue minéralogique (hématite dans le nodule et goethite dans le fond matriciel). Ainsi les relations qui existaient dans l'allotérite entre

le fond matriciel et le nodule (qui se forme au sein de ce fond matriciel par concentration de composés ferrugineux), s'annulent une fois le nodule formé et individualisé à la base de l'ensemble nodulaire. Et ces relations vont s'inverser lors de la *dégradation du nodule*, qui fournira alors de la matière au fond matriciel internodulaire (cf. schéma ci-dessous, et fig. 7).



3.2. LES ÉVOLUTIONS MINÉRALOGIQUES ET STRUCTURALES LORS DE LA DÉGRADATION DES NODULES ANCIENS

Ces évolutions, schématisées dans la figure 7 du bas de l'ensemble nodulaire vers le structichron, sont principalement :

du point de vue géochimique et minéralogique :

. La concentration relative des composés ferrugineux (soit hématitiques, soit goéthitiques). Elle se réalise par les dissolutions successives du quartz, puis de la kaolinite et de la gibbsite. Elle se fait également par la fourniture au fond matriciel de vermicules de kaolinite ferrifère et de quartz, qui sont libérés par la déferruginisation de la base des nodules (N2).

. La formation d'hydroxydes mixtes de type goéthite alumineuse. L'aluminium libéré par la dissolution incongruente de la kaolinite s'intègre progressivement (de 10 à 20 %) dans le réseau de la goéthite, NAHON (1976). Et celle-ci devient dominante vers le sommet de l'ensemble nodulaire, alors que disparaît l'hématite (cf. Tabl. I et fig. 7).

. A l'échelle du nodule, ces évolutions présentent parfois une polarité, et toujours un sens de propagation vers le centre du nodule. La polarité des évolutions, mise en évidence dans les nodules N2, montre l'existence de deux systèmes géochimiques opposés : au sommet du nodule, quartz et kaolinite sont dissous. Les oxy-hydroxydes de fer s'accumulent alors relativement. A la base du nodule, les oxy-hydroxydes de fer sont évacués par déferruginisation centripète. Quartz et kaolinite sont préservés, progressivement libérés du nodule, et ils alimentent le fond matriciel internodulaire.

Ces évolutions géochimiques et minéralogiques déterminent corrélativement d'autres évolutions,

du point de vue structural :

. Il s'agit principalement de la formation des cortex. Ces cortex d'aspect rubané correspondent

vraisemblablement, après les transformations minéralogiques qui viennent d'être rappelées, à la dissolution et au dépôt sur place, puis à la réorientation des composés ferrugineux résiduels, sous forme d'écorces concentriques successives. Il a été intéressant de montrer dans ce profil que la formation des cortex pouvait *débiter au sommet des nodules* (N2) puis progresser vers le centre, d'abord, d'une manière discontinue en respectant des plages gibbsitiques (N2, N3), puis d'une manière continue, en contribuant alors à la sphérisation du nodule (N4).

Quant à la *fragmentation finale* des nodules (N5), il n'a pas été possible dans ce profil d'en étudier plusieurs stades. On peut envisager qu'elle est due à une bréchification en place, analogue à celle observée lors de la dégradation de certaines cuirasses ferrugineuses (NAHON 1976, LEPRUN 1979).

3.3. CONCLUSIONS SUR L'ÉVOLUTION GLÉBULAIRE

Les deux processus opposés de l'évolution glébulaire : la genèse et la dégradation des nodules, ont été distingués en établissant *le sens des transferts de matière entre les nodules et le fond matriciel*.

Dans ce profil, les processus de dégradation sont dominants. Et ils affectent principalement un lot de nodules hérités d'une ancienne altération gibbsitique et ferrugineuse.

Cette évolution glébulaire, qui résulte d'une succession de transformations minéralogiques et structurales étroitement liées entre elles, se caractérise globalement par la *séquence des micro-structures suivantes* :

Lithorelictuelle — Nodulaire — Concrétionnée — Fragmentée.

IV. CONCLUSIONS

Cette analyse des différenciations minéralogiques et structurales d'un sol ferrallitique à horizons nodulaires a permis tout d'abord de présenter certains caractères originaux de ce type de profil.

Il s'agit d'une part de l'accumulation, au sein de l'altérite, de kaolinite ferrifère de néogenèse, liée à la dégradation des horizons supérieurs, d'autre part de la *polarité des transformations de certains nodules*, à l'origine de la formation de cortex.

Cette analyse permet également d'illustrer deux autres conclusions plus générales déjà émises sur la pédogenèse de ces sols tropicaux.

Il s'agit tout d'abord de la *complexité du développement historique des profils*, qui est montrée ici par l'existence de deux lignées différentes de nodules.

Il s'agit ensuite de l'importance des mécanismes variés de la dégradation dans l'évolution glébulaire. Ces mécanismes, pour lesquels s'associent étroitement transformations minéralogiques et structurales, conduisent à la *concentration d'oxy-hydroxydes* en même temps qu'*augmentent les discordances* entre les nodules et le fond matriciel. Et ce sont précisément ces discordances, dont on peut établir maintenant la naissance et le développement progressif au sein du profil (c'est-à-dire leur *autochtonie*), qui avait conduit précédemment à n'envisager qu'une origine allochtone pour la mise en place de ces « gravillons » dans les horizons nodulaires.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'ORSTOM
le 20 janvier 1981*

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDER (L. T.), CADY (J. G.), 1962. — Genesis and hardening of laterite in soils. *U.S. Dept. Agric., Soil Cons. Serv., Bull., Washington*, 1282, 90 p.
- BEAUDOU (A.), CHATELIN (Y.), COLLINET (J.), MARTIN (D.), SALA (G. H.), 1977. — Notes sur la micromorphologie de certains sols ferrallitiques jaunes des régions équatoriales d'Afrique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XV, n° 4 : 361-379.
- BEAUDOU (A.), CHATELIN (Y.), 1979. — La pédoplasation dans certains sols ferrallitiques rouges de savane en Afrique Centrale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 1 : 3-8.
- BOCQUIER (G.), NALOVIC (L. J.), 1972. — Utilisation de la microscopie électronique en pédologie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 4 : 411-434.
- BOCQUIER (G.), 1976. — Géochimie des altérations. Synthèses et perspectives : migrations et accumulations de l'aluminium et du fer. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), XVIII, 1 : 69-74.
- BOULET (R.), 1974. — Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta : équilibres dynamiques et bioclimats. Thèse Sci. Nat., Strasbourg, *multigr.*, 330 p.
- BREWER (R.), 1964. — Fabric and mineral analysis of soils. Wiley & Sons, New York, 470 p.
- CAMBIER (P.), 1975. — Application de la spectrométrie d'absorption infrarouge à l'étude des minéraux argileux du sol. ORSTOM. Paris. *Multiogr.*, 37 p.
- CHATELIN (Y.), MARTIN (D.), 1972. — Recherche d'une terminologie typologique applicable aux sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 1 : 25-43.
- CHATELIN (Y.), 1974. — Les sols ferrallitiques. L'altération. ORSTOM. Paris. *Coll. Init. Doc. Tech.* n° 24 : 144 p.
- CHAUVEL (A.), 1977. — Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. ORSTOM. Paris. *Coll. Trav. et Doc.* n° 62 : 532 p.
- CHAUVEL (A.), BOCQUIER (G.), PEDRO (G.), 1977. — La stabilité et la transformation de la microstructure des sols rouges ferrallitiques de Casamance (Sénégal). Analyse microscopique et données expérimentales. *Vth Intern. Meet. Soil Micro. Grenade*. II, 779-813.
- COLLINET (J.), 1969. — Contribution à l'étude des « stone-lines » dans la région du Moyen-Ogoué (Gabon). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VII, n° 1 : 3-42.

- DELVIGNE (J.), 1965. — Pédogenèse en zone tropicale : la formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. ORSTOM. Dunod-Paris. 177. p. 54.
- DELVIGNE (J.), MARTIN (H.), 1970. — Analyse à la microsonde électronique de l'altération d'une plagioclase en kaolinite par l'intermédiaire d'une phase amorphe. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. II, n° 2 : 259-295.
- D'HOORE (J.), 1954. — L'accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux. INEAC Publ., sér. sci. 62. Bruxelles, 231 p.
- FAYOLLE (M.), 1979. — Caractérisation analytique d'un profil d'argile à silex de l'ouest du bassin de Paris. Thèse 3^e cycle. Univ. Paris VII. *Multigr.* 162 p.
- HERBILLON (A. J.), MESTDAGH (M. M.), VIELVOYE (L.), DEROUANE (E. G.), 1976. — Iron in kaolinite with special reference to kaolinite from tropical soils. *Clay Minerals*, 11, 3 : 201-220.
- JANOT (C.), GIBERT (H.), DE GRAMONT (X.), BIAIS (R.), 1971. — Étude des substitutions Al-Fe dans les roches latéritiques. *Bull. Soc. Fr. Minér. Cristallog.*, 94 : 367-380.
- JONES (H. A.), 1965. — Ferruginous oolites and pisolites. *J. Sediment. Petrol.*, 35, 4 : 838-845.
- KALOGA (B.), 1976. — Contribution à l'étude du cuirassement : Relations entre les gravillons ferrugineux et leurs matériaux d'emballage. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XIV, n° 4 : 299-319.
- LACROIX (A.), 1914. — Les latérites de la Guinée et les produits d'altération qui leur sont associés. *Novv. Arch. Mus. Hist. Nat.*, Paris, 1913, sér. 5, V, 255-356.
- LAPORTE (G.), 1962. — Reconnaissance pédologique le long de la voie ferrée Comilog (République du Congo). ORSTOM. Brazzaville. *Multigr.*, 150 p.
- LELONG (F.), 1967. — Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane Française). Thèse Fac. Sci. Nancy. *Sci. de la Terre, Mém. 14*, Nancy, 188 p.
- LELONG (F.), TARDY (Y.), GRANDIN (G.), TRESCASES (J. J.), BOULANGÉ (B.), 1976. — Pedogenesis, chemical weathering and processes of formation of some supergene ore deposits. Handbook of strat-bound and stratiform ore deposits. K. H. Wolf (ed.). Elsevier Sci. Pub. Comp. Amsterdam, 3 : 93-173.
- LEPRUN (J. C.), 1979. — Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse. Transformations. Dégradation. Thèse Sci. Nat., Strasbourg : 203 p.
- LEVEQUE (A.), 1970. — L'origine des concrétions ferrugineuses dans les sols du socle granito-gneissique au Togo. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 3 : 321-345.
- LEVEQUE (A.), 1975. — Pédogenèse sur le socle granito-gneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels. Thèse Sci. Nat., Strasbourg. *Multigr.*, 301 p.
- LEVEQUE (A.), 1978. — Les concentrations de fer dans les sols développés sur le socle granito-gneissique au Togo. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVI, n° 1 : 3-22.
- MAIGNIEN (R.), 1958. — Le cuirassement des sols en Guinée (Afrique occidentale). Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr., Strasbourg, 16, 223 p.
- MARTIN (D.), 1972. — Choix d'une notation des horizons des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 1 : 45-57.
- MEADS (R. E.), MALDEN (P. J.), 1975. — Electron spin resonance in natural kaolinites containing Fe³⁺ and other transition metal ions. *Clay Minerals*, 10 : 313-345.
- MENDELOVICI (E.), YARIV (SH.), VILLALBA (R.), 1979. — Iron-bearing kaolinite in Venezuelan laterites : I. Infrared spectroscopy and chemical dissolution evidence. *Clay Minerals*, 14, 4 : 323-331.
- MESTDAGH (M. M.), VIELVOYE (L.), HERBILLON (J.), 1980. — Iron in kaolinite : II. The relationship between kaolinite crystallinity and iron content. *Clay Minerals*, 15 : 1.
- MILLOT (G.), BONIFAS (M.), 1955. — Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latérisation et de bauxitisation. *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, Strasbourg, 8, 1 : 3-20.
- MILLOT (G.), 1980. — Les grands aplanissements des socles continentaux dans les pays subtropicaux, tropicaux et désertiques. Livre Jubilaire de la Soc. géol. de France, 1830-1980. *Mém. h. sér. Soc. géol. de France*, 10 : 295-305.
- MULLER (D.), 1978. — Les sols de Mougoundou (Massif du Chaillu), description des éléments dus à l'accumulation des sesquioxides. ORSTOM. Brazzaville. *Multigr.*, 300 p.
- MULLER (D.), 1979. — Contribution à l'étude de la différenciation des horizons modulaires de sols ferrallitiques Congolais sur granito-gneiss. Thèse 3^e cycle. Spéc. Pédol. et Amén. des sols. Univ. Paris VII. *Multigr.*, 118 p.
- MULLER (J. P.), 1977. — Microstructuration des structichrons rouges ferrallitiques, à l'amont des modelés convexes (Centre Cameroun). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XV, n° 3 : 239-258.
- MULLER (J. P.), 1977. — La microlyse plasmique et la différenciation des épépédons dans les sols ferrallitiques rouges du Centre Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XV, n° 4 : 345-359.
- NAHON (D.), 1976. — Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie, structures, relais et coexistence. *Sci. Géol. Mem.*, Strasbourg, 44 : 232 p.
- NAHON (D.), JANOT (C.), KARPOFF (A. M.), PAQUET (H.), TARDY (Y.), 1977. — Mineralogy, petrography and structures of iron crusts (ferricretes) developed on sandstones in the western part of Senegal. *Geoderma*, 19 : 263-277.
- NORRISH (K.), TAYLOR (R. M.), 1961. — The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. *J. Soil Sci.*, 12 (2) : 294-306.
- NOVIKOFF (A.), 1974. — L'altération des roches dans le massif du Chaillu (République Populaire du Congo). Formation et évolution des argiles en zone ferrallitique. Thèse Doct. ès Sc. Nat., Univ. Strasbourg. *Multigr.*, 298 p.
- PETIT (P.), 1975. — Le massif granitique du Chaillu et ses enveloppes gréseuses. Études de géographie physique. In « Études de géomorphologie tropicale » CNRS-CEGET. Bordeaux. 3-108.
- PION (J. C.), 1979. — L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Étude de quelques toposéquences en Haute-Volta. Thèse Doc. ès Sc. Nat. Strasbourg, 215 p.
- RENGASAMY (P.), KRISHNA MURTI (G. S. R.), SARMA V. A. K.), 1975. — Isomorphous substitution of iron for aluminium in some soil kaolinites. *Clays and clay miner.*, 23 : 211-214.
- SCHWERTMANN (U.), TAYLOR (R. M.), 1977. — Iron oxides. In Minerals in Soil Environments. J. B. Dixon, S. B. Weed (Ed.). *Soil Sci. Soc. of America* : 145-180.

- SIEFERMANN (G.), 1969. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. ORSTOM. Paris. *Coll. Mém.* n° 66 : 183 p.
- STOOPS (G.), 1967. — Le profil d'altération au Bas-Congo (Kinshasa). *Pédologie* (Ghent), 17, 1 : 60-105.
- WACKERMANN (J. M.), 1975. — L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale humide. Étude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal oriental. Conséquences pour la cartographie et la prospection. Thèse Sci. Nat. Strasbourg. *Multigr.*, 373 p.
- WILHELM (E.), KOSAKEVITCH (A.), 1979. — Utilisation des chapeaux de fer comme guides de prospection. *Bull. B.R.G.M.*, (2), II, 2-3 : 109-140.
- ZEEGERS (H.), LEPRUN (J. C.), 1979. — Évolution des concepts en altérologie tropicale et conséquences potentielles pour la prospection géochimique en Afrique occidentale soudano-sahélienne. *Bull. B.R.G.M.*, (2), II, 2-3 : 229-239.