

Étude pétrographique et géochimique de profils d'altération latéritique cuirassés dans le sud-est de la République centrafricaine

A. BEAUVAIS ⁽¹⁾

Résumé : Une étude pétrographique, micromorphologique, minéralogique et géochimique est menée sur plusieurs profils d'altération latéritique coiffés par des cuirasses ferrugineuses dans la région de Dembia-Zémio dans le sud-est de la République centrafricaine (RCA).

D'un point de vue géomorphologique, génétique et géodynamique, on distingue trois grands systèmes cuirassés, emboîtés géographiquement les uns dans les autres.

Dans le premier système A, présent sur les hauts plateaux, les profils d'altération sont épais, la cuirasse est massive, riche en hématite et en kaolinite héritée de la lithomarge. Cette cuirasse apparaît comme la plus évoluée. Elle surmonte des horizons nodulaires meubles, épais, où s'effectuent des transferts d'argile et de fer. A la base de ces horizons une carapace pseudonodulaire, vacuolaire, riche en goethite, se reconstitue. La lithomarge sous-jacente conserve la structure de la roche mère. Elle est kaolinique à sa base et gibbsitique au sommet. Elle ne renferme aucun minéral parental.

Dans le second système B, présent sur les versants, les profils d'altération sont caractérisés par une épaisse carapace ferrugineuse tachetée, essentiellement constituée de goethite et de kaolinite. La cuirasse au sommet du profil est pseudonodulaire vacuolaire, riche en hématite et en gibbsite. Elle résulte de la dégradation et du démantèlement géochimique de la cuirasse massive du système A, par tassement du paysage sur lui-même et érosion différentielle des plateaux et des versants cuirassés.

Dans le troisième système C, on trouve les profils d'altération les moins épais et les cuirasses les moins évoluées. Celles-ci sont à faciès vacuolaire tacheté, et renferment goethite, kaolinite et quartz, la kaolinite étant ici d'origine illuviale et les quartz étant hérités de la roche. La lithomarge apparaît moins ferrugineuse que celle du système A, plus riche en kaolinite, dépourvue de gibbsite, pauvre en goethite. Elle renferme encore quelques minéraux primaires non altérés autres que le quartz (micas, feldspaths).

D'un point de vue géochimique, les cuirasses des trois systèmes cuirassés sont mal différenciées. En revanche les lithomarges se différencient mieux. La lithomarge du système A, le plus évolué, est la plus ferrugineuse et la plus riche en éléments traces de transition, tandis que celle du système C, le moins évolué, est plus siliceuse et plutôt enrichie en alcalino-terreux et terres rares légères.

Mots-clés : Latérites - Cuirasses ferrugineuses - Micromorphologie - Géochimie
- Kaolinite - Gibbsite - Goethite - Hématite - Éléments traces - Éléments de transition
- Terres rares.

Abstract : Petrographical and geochemical study of lateritic weathering profiles capped by ferricretes in the South-East of the Central African Republic. A petrographical, micromorphological, mineralogical and geochemical study is conducted on several lateritic weathering profiles capped by ferricretes in the area of Dembia-Zémio, in the South-East of the Central African Republic.

From a geomorphological, genetic and geodynamic point of view, three ferricrete systems are distinguished.

(1) Centre ORSTOM, B.P. 893, Bangui, République centrafricaine.

In the first system A, which is present on high plateaus, weathering profiles are thick, the massive ferricrete is rich in hematite and kaolinite inherited from the lithomarge. This ferricrete is the most evolved. It overlies thick nodular layers in which occur transports of clay and iron. At the bottom of these layers appears a pseudonodular vacuolar soft ferricrete, which is rich in goethite. The underlying lithomarge maintains the structure of the parent-rock, kaolinitic at its base, and gibbsitic at its top, without containing parent minerals.

In the second system B which is present on slopes, the weathering profiles are characterized by a thick mottled soft ferricrete which is essentially composed of goethite and kaolinite. At the top of the profile, the ferricrete is pseudonodular vacuolar, rich in hematite and gibbsite. It derives from the massive ferricrete of system A by geochemical degradation and dismantling, by subsidence on itself of the landscape, and by differential erosion of plateaus and slopes.

In the third system C, the weathering profiles are the thinnest, and the ferricretes are the least evolved. They exhibit a mottled massive vacuolar facies, and contain goethite, kaolinite and some quartz. Kaolinite is illuvial and quartz is inherited from the rock. The lithomarge appears less ferruginous than in the first system A. It is richer in kaolinite, without gibbsite, poorer in goethite. It contains some unweathered parent minerals like micas and feldspars.

From a geochemical point of view, the ferricretes of the three systems show no clear differentiation, which however is more clearly expressed in the lithomarges. The lithomarge of system A, which is the most evolved, is the most ferruginous and the most enriched in transition elements, whereas that of system C, which is the least evolved, is more siliceous, and rather enriched in earth alkalis and rare earth elements.

Key words : Laterites - Ferricretes - Micromorphology - Geochemistry - Kaolinite - Gibbsite - Goethite - Hematite - Trace elements - Transition elements - Rare earth elements.

Resumen : Estudio petrográfico y geoquímico de perfiles de alteración laterítica acorazada en el sureste de la República Centro Africana. Un estudio petrográfico, micromorfológico, mineralógico y geoquímico es realizado sobre algunos perfiles de alteración laterítica coronados por corazas ferruginosas en la región de Dembia-Zemba al sureste de la República Centro Africana (RCA).

Tres grandes sistemas acorazados se encuentran encajados los unos dentro de los otros desde un punto de vista geomorfológico, genético y geodinámico.

En el primer sistema A, presente en los altiplanos, los perfiles de alteración son espesos, la coraza es masiva, rica en hematita y en caolinita proveniente del litomargen. Esta coraza parece la más evolucionada y sobre yace a horizontes nodulares blandos, espesos, donde se efectúan transferencias de arcilla y fierro. Por debajo de estos horizontes se puede formar un caparazón pseudonodular vacuolado, rico en goetita. Este litomargen sub-yacente conserva la estructura de la roca madre. El es caolinitico en su base y gibbsitico en la parte superior, y no contiene ningun mineral parental.

En el segundo sistema B, presente en las laderas, los perfiles de alteración están caracterizados por un caparazón espeso, ferruginoso y manchado, esencialmente constituido por goetita y por caolinita. La coraza de la parte superior del perfil es pseudonodular, vacuolada, rica en hematita y en gibsitita. Ella resulta de la degradación y del desmantelamiento geoquímico de la coraza masiva del sistema A, tras una disección profunda del paisaje con erosión diferencial de la meseta y de las laderas acorazadas.

En el tercer sistema C, se encuentran los perfiles de alteración menos espesos y las corazas las menos evolucionadas. Estas son con facies vacuolado manchado y contienen goetita, caolinita y cuarzo, la caolinita estando de origen iluvial y el cuarzo procediendo de la roca madre. El litomargen aparece menos ferruginoso que en el sistema A, más rico en caolinita, sin gibsitita y pobre en goetita. Además del cuarzo, este contiene aun algunos minerales primarios no alterados (micas, feldespatos). Desde un punto de vista geoquímico las corazas de los tres sistemas A, B y C están mal diferenciadas. Al contrario, los litomargenes se diferencian mejor. El litomargen del sistema A que es el más evolucionado, es el más ferruginoso y el más rico en elementos trazos de transición. Al contrario, el del sistema C, que es el menos evolucionado, tiene más silíceo y es enriquecido con alcalino-terreos y tierras raras ligeras.

Palabras claves : Lateritas - Corazas ferruginosas - Micromorfología - Geoquímica - Caolinita - Gibsitita - Goetita - Hematita - Elementos en trazas - Elementos de transición - Tierras raras.

INTRODUCTION

Les manteaux d'altération latéritiques qui couvrent une grande partie de l'Afrique centrale peuvent être localement cuirassés. C'est le cas notamment dans la région de Dembia-Zémio dans le sud-est de la République centrafricaine.

Dans cette région, qui est l'une des plus cuirassées du monde, la pluviométrie moyenne annuelle est de 1 600 mm, la température moyenne annuelle est de 25 °C, et l'humidité relative de l'air moyenne annuelle est de 80 %. Le climat est tropical humide à saisons contrastées.

Le substratum n'affleure jamais. Il est constitué de roches métamorphiques basiques (amphibolites, amphiboloschistes...) appartenant au complexe amphibolo-pyroxénique de Mbomou (MESTRAUD, 1982), recoupé d'intrusions granitiques et basiques (dolérites...) selon deux grandes directions structurales, N140E et N50E. D'un point de vue géomorphologique, cette région est caractérisée par deux surfaces qui sont toutes les deux cuirassées : la première culmine en moyenne à 650 m d'altitude et domine la seconde d'une cinquantaine de mètres. La surface cuirassée à 600 m est rattachée à la surface centrafricaine (BOULVERT, 1982). Du fait de la pluviosité moyenne annuelle relativement importante on trouve des mares d'eau temporaires sur la plupart des plateaux à la saison pluvieuse.

Les cuirasses qui constituent environ 70 % du paysage se distribuent uniformément sur des hauts plateaux, des bas plateaux et des versants qui rattachent les plateaux entre eux (fig. 1) (BEAUVAIS et MAZALTARIM, 1988). Les 30 % restants sont occupés par les entailles boisées d'une forêt humide et les enclaves et auréoles boisées de savane ou de forêt semi-humide, au cœur et autour des plateaux où les cuirasses se dégradent et se démantèlent. Les vallées représentent environ 20 % du paysage.

Deux séquences de puits creusés manuellement sont étudiées d'un point de vue pétrographique et géochimique. Tous les puits sont différenciés en fonction de leur position topographique, des faciès qui les composent et de leur appartenance à l'un des trois grands systèmes cuirassés déjà définis auparavant (BEAUVAIS et MAZALTARIM, 1988). Aucun des puits creusés n'atteint la roche mère et les faciès d'altération sont trop évolués pour que l'on puisse l'identifier avec certitude.

DISTRIBUTION DES PRINCIPAUX FACIÈS DANS LES PROFILS LATÉRIQUES

Chaque puits a été interrompu dans la nappe d'eau ou par des émanations de gaz carbonique pour ceux qui ont été implantés sous couvert végétal.

On a distingué huit horizons, qui sont d'épaisseur variable en tous points du paysage, ou absents.

De la base au sommet des différents profils on a :

- une lithomarge isaléritique ou saprolite fine (horizon I),
- une argile tachetée (horizon II),
- un horizon nodulaire tacheté meuble (horizon III),
- une carapace tubulaire tachetée (horizon IV),
- une cuirasse massive vacuolaire tachetée (horizon V),
- une cuirasse pseudonodulaire vacuolaire (horizon VI),
- une cuirasse massive (horizon VII),
- un horizon caillouteux et graveleux (horizon VIII).

Il ne sera question que des sept premiers horizons.

ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE

Observations macroscopiques

On compare les caractères pétrographiques de chacun des horizons qui se succèdent depuis la base vers le sommet des profils d'altération, dans chaque système.

LA LITHOMARGE

La lithomarge apparaît à 10 m sous la surface topographique dans le profil du premier système (système A) et à 7 m dans celui du troisième (système C) (fig. 2 et 3). La structure de la roche mère est conservée. Elle consiste en une structure microlitée, à texture poudreuse. La lithomarge est de couleur ocre-brunâtre, avec de petites ponctuations violacées et blanches, de taille millimétrique. Cet assemblage est recoupé par un réseau de petites veinules remplies d'argiles blanches, et par des veines de quartz.

Dans la lithomarge du système C, certains quartz sont hérités de la roche mère, alors qu'il n'y en a pas dans celle du système A. Plus haut, dans ce profil (horizon I2), le matériau apparaît plus induré, et de couleur ocre. Quelques minéraux parentaux ferruginisés de couleur violacé foncé sont présents (biotite ?). Cet ensemble est recoupé de veinules qui sont remplies par de l'argile brun rougeâtre. La transition avec les argiles tachetées (horizon II), est progressive, ondulée et festonnée. Dans le profil du système C, la lithomarge est ocre blanchâtre, et semble donc moins ferrugineuse que celle du système A.

L'ARGILE TACHETÉE (horizon II)

L'argile tachetée dans le système A a environ 3 m d'épaisseur, tandis qu'elle est épaisse de 3 à 3,5 m dans le second système B, et à peu près de 1 m dans le système C.

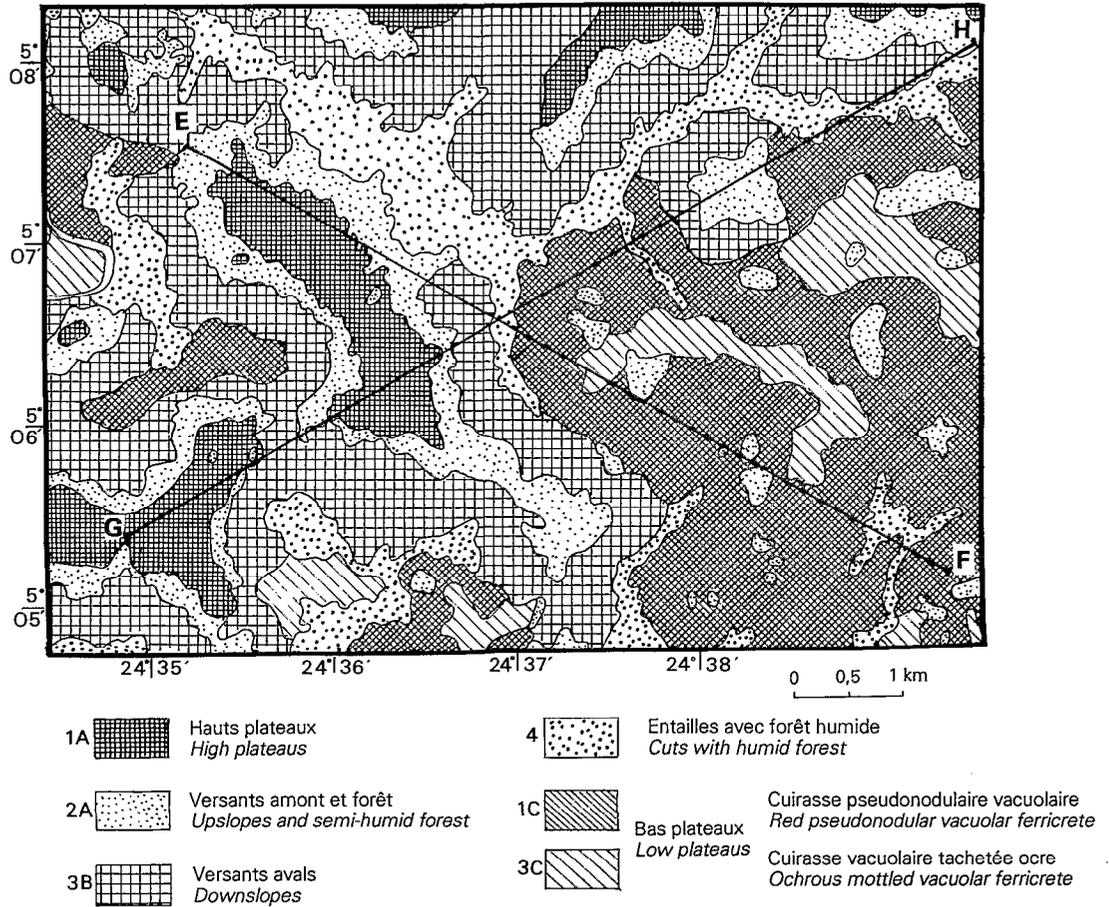


Fig. 1a. — Carte géomorphologique des plateaux cuirassés de la région de Dembia-Zémio en Centrafrique.
Geomorphological map of ferricrete plateaus in the Dembia-Zémio area in Centrafrique.

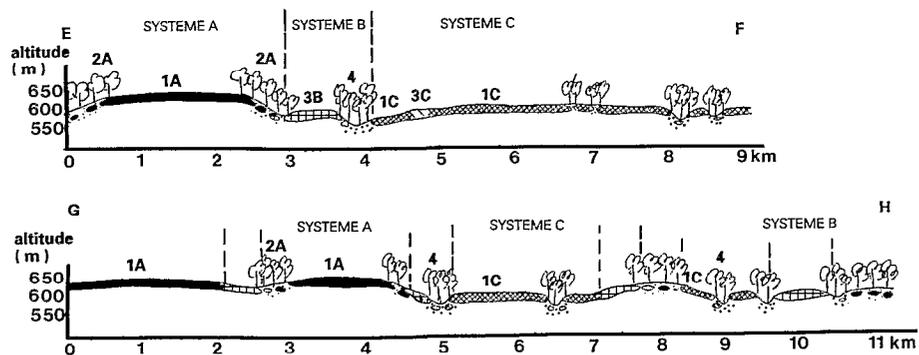


Fig. 1b. — Coupe à travers les trois systèmes cuirassés A, B et C dans la région de Dembia-Zémio en Centrafrique.
Cross sections through the three ferricrete systems A, B and C present in the Dembia-Zémio area in Centrafrique.

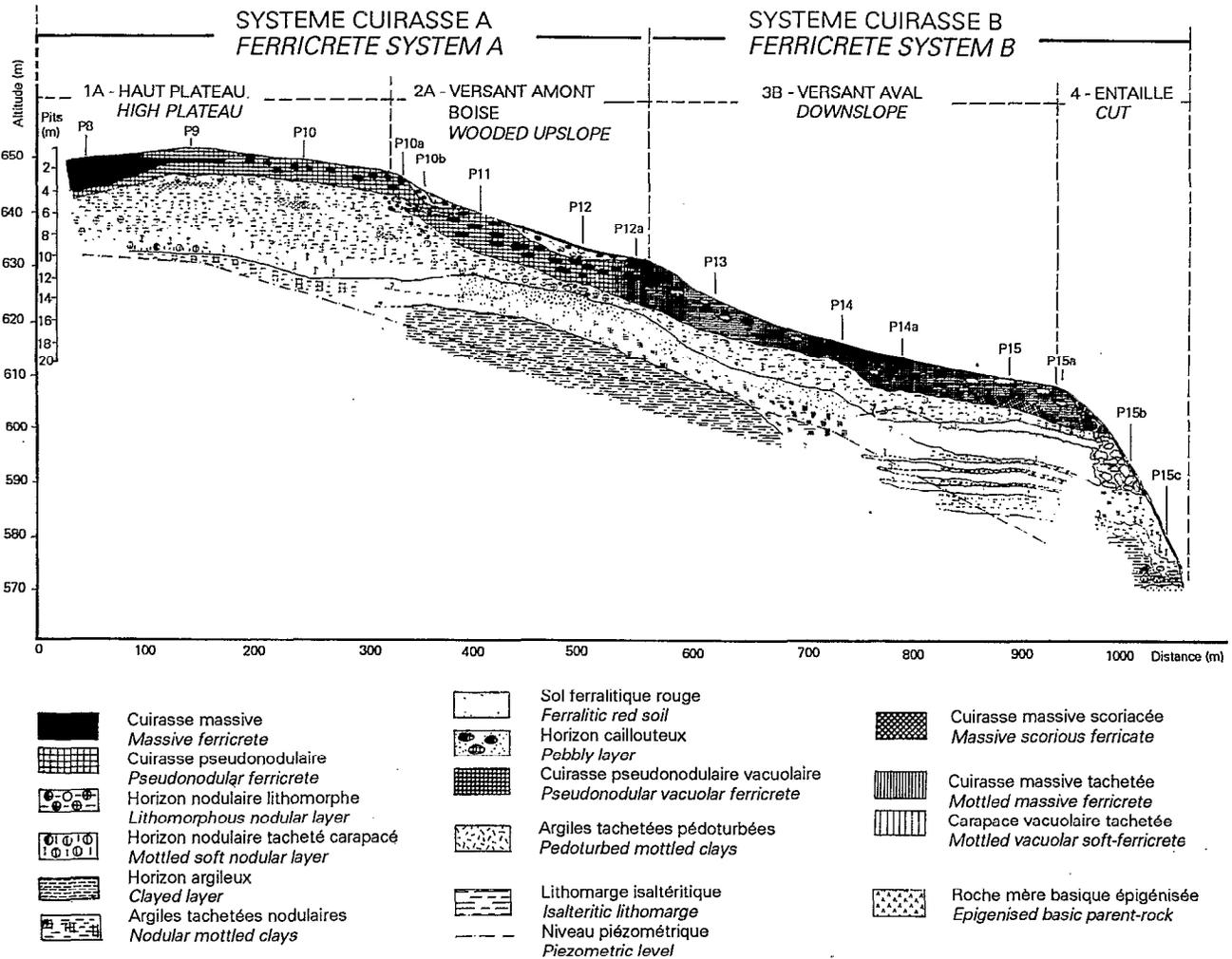


Fig. 2. — Toposéquence recoupant les deux premiers systèmes cuirassés de la région de Dembia-Zémio.
Toposequence crossing the first two ferricrete systems of the Dembia-Zémio area.

Dans le système A, et dans la partie inférieure de l'horizon (horizon III1), l'argile tachetée conserve partiellement des domaines de lithomarge. Là aussi, un réseau de petites veinules apparaît. Elles sont remplies d'argile blanche. L'argile tachetée est constituée d'une association de domaines, de couleurs différentes, et de taille centimétrique à pluricentimétrique. Dans celle du premier système, on observe des domaines rouges, blanc ocreux et orangés. Ici, l'argile tachetée est recoupée par de petits canalicules d'origine biologique, remplis par un matériau argilo-silteux brun-rougeâtre. Dans la partie supérieure de l'horizon l'argile tachetée est pédoturbée et le contraste entre les taches s'estompe. Les domaines blanc ocreux deviennent rares, et les domaines diffus

violacés sont mélangés à une matrice ferrugineuse pédoturbée brun rougeâtre.

Dans le système C, l'argile tachetée est constituée par des domaines ocre et violacé foncé. Ces derniers préfigurent les nodules de l'horizon nodulaire meuble situé au-dessus. Les quartz sont encore présents.

Dans le système B, l'argile tachetée consiste en une association de grands domaines pluricentimétriques argileux et ferrugineux, de couleur ocre brunâtre, dans lesquels on observe quelques rares nodules violacés peu indurés. De grosses tubules recoupent cet assemblage, et ils sont remplis d'un matériel blanc argileux glaiseux, où subsistent des quartz de taille millimétrique.

L'HORIZON NODULAIRE MEUBLE TACHETÉ (horizon III)

L'horizon nodulaire meuble tacheté est épais de 7 m dans la partie supérieure du système A, 2,50 m dans la partie inférieure (fig. 2), environ 1 m dans le système B, et 0,5 à 2 m dans les profils du système C (fig. 3).

Il est constitué d'une matrice argileuse brun rougeâtre, qui contient des nodules ferrugineux, de taille centimétrique. Présentant la structure microlitée héritée de la lithomarge sous-jacente, on les appelle alors nodules lithomorphes, et nodules argilomorphes lorsque la structure est effacée. Les nodules lithomorphes sont plus nombreux dans le système A, que dans les profils du système C, où ce sont les argilomorphes qui sont les plus nombreux. La forme des nodules est irrégulière à polyédrique (argilomorphes), ou plate (lithomorphes). A la cassure, leur couleur varie du violacé (lithomorphe) au brun rougeâtre, ou au brun (argilomorphes). Les nodules représentent à peu près 80 % du volume de l'horizon. La matrice est rouge, mais elle peut être tachetée de jaune. Elle présente une structure polyédrique (agrégats de 3 à 4 mm). Elle peut être aussi recoupée d'une trame brune, particulièrement à la base de l'horizon du système A (horizon III2), mais également dans les profils de B et C. Dans ces sites les nodules sont coalescents, cimentés les uns aux autres par une matrice brune. A cet endroit, l'horizon est induré et apparaît comme une carapace pseudonodulaire vacuolaire, qui préfigure une future cuirasse.

La partie supérieure de l'horizon nodulaire du système A juste sous la cuirasse est plus argileuse (horizon III3), et dépourvue de nodules.

Dans les systèmes A et B, les horizons nodulaires tachetés se situent sous la cuirasse pseudonodulaire vacuolaire (fig. 2), tandis que dans les profils du système C, on les trouve entre l'argile tachetée et la carapace tubulaire tachetée, ou encore entre la cuirasse massive vacuolaire tachetée et celle qui est pseudonodulaire vacuolaire (fig. 3).

LA CARAPACE ET LA CUIRASSE VACUOLAIRES TACHETÉES (horizons IV ET V)

Carapace et cuirasse vacuolaires tachetées n'apparaissent que dans les systèmes B et C. Elles sont respectivement épaisses de 6,5 m dans le système B, et 0,5 à 4 m dans le système C pour la carapace, et 1 m dans le système B contre 5 m dans le système C pour la cuirasse. La transition entre la carapace et l'argile tachetée est très festonnée, particulièrement dans le profil C. La transition entre la carapace et la cuirasse est assez floue et progressive, essentiellement marquée par une différence de degré d'induration.

La carapace tachetée est composée de grands domaines ferrugineux, centimétriques à pluricentimétriques, de couleur brune, recoupés de tubules et vacuoles, remplis d'argile blanche à ocre ou rouge jaunâtre, où subsistent de petits quartz. Du manganèse s'accumule dans les domaines ferrugineux bruns. Les nodules rouge violacé sont rares.

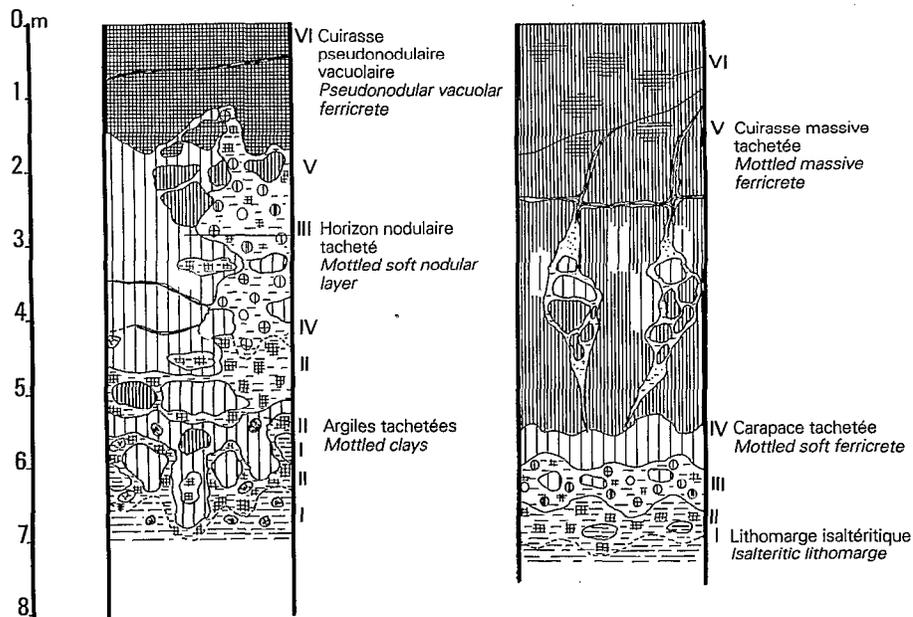


Fig. 3. — Profils d'altération du troisième système cuirassé de la région de Dembia-Zémio.
Weathering profiles of the third ferricrete system in Dembia-Zémio area.

La cuirasse tachetée est constituée de rares nodules rouge violacé cernés d'un halo brun, et cimentés dans une matrice argiloferrugineuse indurée de couleur ocre brunâtre. Des nodules bruns peuvent se différencier et être plus nombreux que ceux de couleur rouge violacé. En moyenne, ils sont tous de taille centimétrique. Tubules et vacuoles sont marqués sur leur bordure par des cutanes bruns. Les nodules peuvent être coalescents et donner un aspect massif à la cuirasse. Quelques quartz sont encore présents.

LA CUIRASSE PSEUDONODULAIRE VACUOLAIRE (horizon VI)

La cuirasse pseudonodulaire vacuolaire apparaît généralement dans la partie aval du système A, et dans les systèmes B et C, sous forme de reliques dans ce dernier (fig. 2 et 3). Elle est épaisse de 3,5 m dans le profil du système A, de 2 m dans celui de B et seulement de 1 m dans le système C.

Elle est constituée de nodules violacés de taille centimétrique. La matrice qui les cimente est indurée. De couleur rouge, elle est rare dans le profil du système A, rouge jaunâtre à jaune brunâtre et plus abondante dans les faciès des systèmes B et C. Les vacuoles sont de taille millimétrique, évidées ou remplies d'un matériau argilo-silteux rouge ou jaunâtre. Elles sont plus nombreuses dans les faciès des systèmes B et C et montrent des cutanes bruns contre leurs bords. Des cortex de même nature peuvent cerner les nodules. Dans les faciès des systèmes A et B, les nodules sont en majorité lithomorphes, tandis qu'ils sont plutôt argilomorphes dans le système C. Le quartz est encore présent dans les cuirasses des systèmes B et C.

LA CUIRASSE MASSIVE (horizon VII)

La cuirasse massive existe seulement dans les profils à l'amont du système A, sur les hauts plateaux. Ailleurs, elle se présente sous forme de « boules résiduelles » conservées au sein du faciès décrit précédemment. Son épaisseur est comprise entre 3,5 m au milieu du plateau et 1 m sur les bordures. Elle est composée d'un matériau argiloferrugineux violacé très induré sans structure apparente, qui peut être affecté de nombreuses petites vacuoles de taille millimétrique, remplies par un matériau blanc argileux, parfois brillant. Des trames brunes peuvent recouper l'ensemble. Des cristallisations d'oxyde de fer noirs à éclat métallique (hématite) sont également fréquentes dans ce faciès.

Étude micromorphologique

Sous le microscope polarisant à lumière transmise, on étudie sur des lames minces polies, chaque domaine précédemment décrit, horizon par horizon le long des profils d'altération de chacun des trois systèmes cuirassés.

LE FACIÈS LITHOMARGE (horizon I)

L'étude micromorphologique de la lithomarge permet d'observer un plasma argileux non orienté, argilasépique au sens de BREWER (1964), sans minéraux parentaux dans le profil du système A, auquel se surimpose un plasma ferrugineux diffus goethitique. A la base de la lithomarge du système A (horizon I1), le plasma argileux est composé de petites kaolinites de 10-20 μm et de plus grosses en « accordéons » de 100-200 μm (fig. 4). Le plasma ferrugineux qui est leur associé apparaît comme un halo diffus. Dans la partie médiane de l'horizon (horizon I2), les « accordéons » de kaolinite sont transformés en kaolinites plus petites, et des domaines plasmiques pédoturbés apparaissent. Dans ce site, et plus haut dans l'horizon (horizon I3), le plasma argilasépique se transforme en plasma cristallin gibbsitique (fig. 5).

Dans la lithomarge du système C, on observe quelques plages de plasma argileux cryptocristallin d'illuviation, présentant une extinction onduleuse. Quelques quartz, feldspaths et micas partiellement altérés sont encore présents. Le plasma ferrugineux est bien moins développé que dans la lithomarge du système A.

LE FACIÈS ARGILE TACHETÉE (horizon II)

Le faciès argile tachetée est constitué de domaines de couleurs et textures variées (fig. 6).

Dans la partie inférieure de l'horizon du système A (horizon II1), il est composé de domaines rouges, qui correspondent à un mélange de goethite et d'hématite, de domaines blanc ocre, à grosses kaolinites en « accordéons », qui sont hérités de la lithomarge sous-jacente, et de domaines brun orangé qui représentent le plasma non orienté et pédoturbé, constitué de kaolinite microcristalline et de goethite. Les accordéons de kaolinite sont progressivement ferruginisés, et dans la partie médiane du profil, ils disparaissent.

Plus haut dans l'horizon (horizon II2), la pédoturbation s'accroît, et le plasma ferrugineux s'oriente dans une ou deux directions (plasma masépique ou bimasépique de BREWER, 1964) (fig. 7). On peut observer dans ce site quelques minéraux primaires relictuels (biotite ?) ferruginisés par de l'hématite. La porosité y est bien développée, et des cristaux de gibbsite se néoformant dans les vacuoles et aux dépens des kaolinites des plasmas argilasépiques relictuels.

Dans les systèmes B et C, le faciès argile tachetée est constitué d'un plasma gris blanchâtre et de quelques plages à extinction onduleuse, associés à un plasma ferrugineux brun orangé anisotrope et non orienté, où subsistent quelques quartz et micas partiellement dissous.

Dans la partie supérieure de l'horizon, des nodules argilomorphes peuvent se différencier. Leurs bordures sont irrégulières. Des vacuoles et des tubules sont

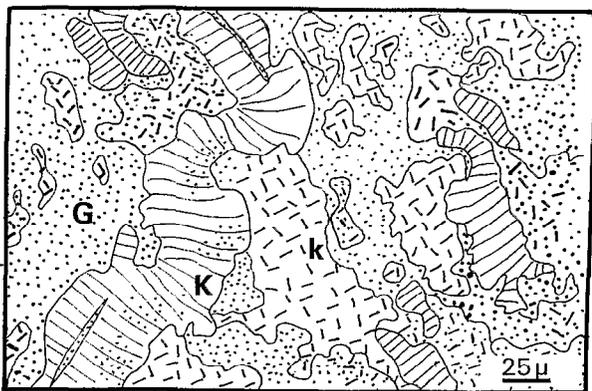


Fig. 4. — Micromorphologie de la lithomarge kaolinique dans le système A (K : « accordéons » de kaolinite ; k : plasma argilasépique à petites kaolinites ; G : plasma ferrugineux goéthitique).

Micromorphology of kaolinic lithomarge in system A (K : « booklets » of kaolinite ; k : argilasepic plasma with small kaolinites ; G : goethitic ferruginous plasma).

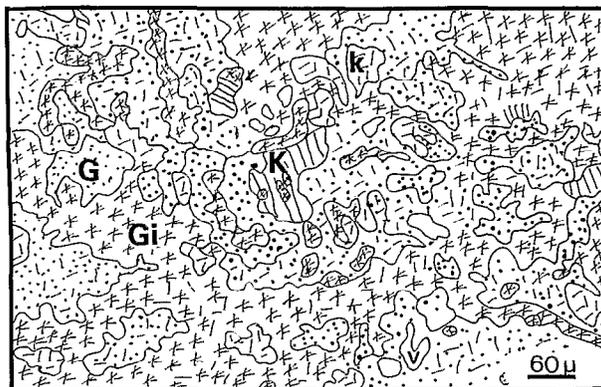


Fig. 5. — Micromorphologie de la lithomarge gibbsitique dans le système A (K : « accordéons » de kaolinite ; k : plasma argilasépique à petites kaolinites ; G : plasma goéthitique ; Gi : plasma gibbsitique ; V : vides).

Micromorphology of gibbsitic lithomarge in system A (K : « booklets » of kaolinite ; k : argilasepic plasma with small kaolinites ; G : goethitic plasma ; Gi : gibbsitic plasma ; V : vugs).

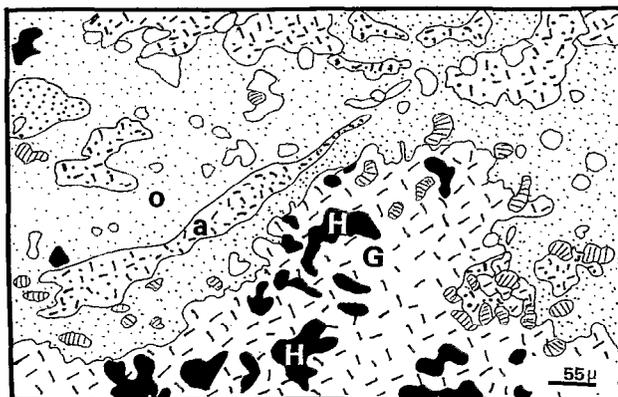


Fig. 6. — Micromorphologie du faciès argile tacheté dans le système A (o : plasma argilasépique ocre ; a : argilaferrane ; k : kaolinite ; G : plasma goéthitique ; H : plasma micronodulaire hématitique ; V : vides).

Micromorphology of mottled clay facies in system A (o : ochrous argilasepic plasma ; a : argiliferane ; k : kaolinite ; G : goethitic plasma ; H : micronodular hematitic plasma ; V : vugs).

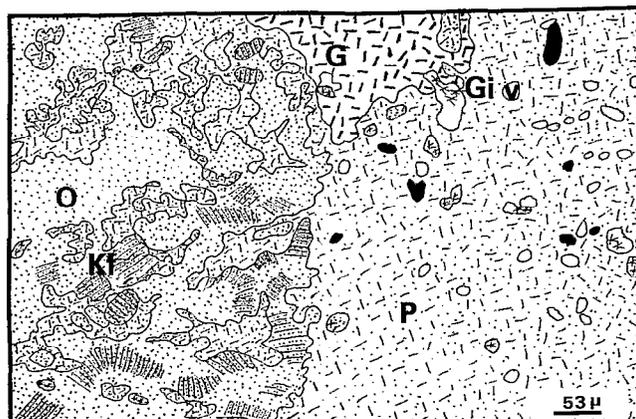


Fig. 7. — Micromorphologie de la transition entre le faciès argile tacheté et le faciès nodulaire tacheté dans le système A (P : plasma argiloferrugineux pédoturbé ; G : plasma goéthitique ; Gi : gibbsite ; Kf : « accordéons » de kaolinite hérités et ferruginisés ; o : plasma argilasépique ocre ; V : vides).

Micromorphology of the transition between mottled clay and mottled nodular facies in system A (P : argiloferruginous pedoturbated plasma ; G : goethitic plasma ; Gi : gibbsite ; Kf : « booklets » of inherited and ferruginised kaolinite ; o : ochrous argilasepic plasma ; V : vugs).

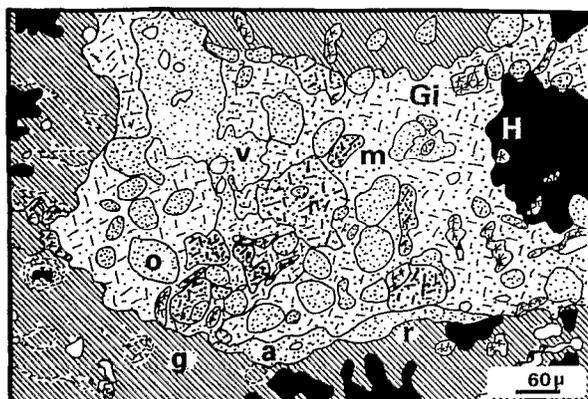


Fig. 8. — Micromorphologie du faciès nodulaire tacheté dans le système A (H : nodule hématitique ; m : plasma micronodulaire ; r : plasma micronodulaire rouge ; o : plasma micronodulaire ocre ; a : argilane ; Gi : gibbsite ; G : trame brune de goéthite ; V : vides).

Micromorphology of mottled nodular facies in system A (H : hematitic nodule ; m : micronodular matrix plasma ; r : red micronodule ; o : ochrous micronodule ; a : argilane ; Gi : gibbsite ; g : goethane ; V : vugs).

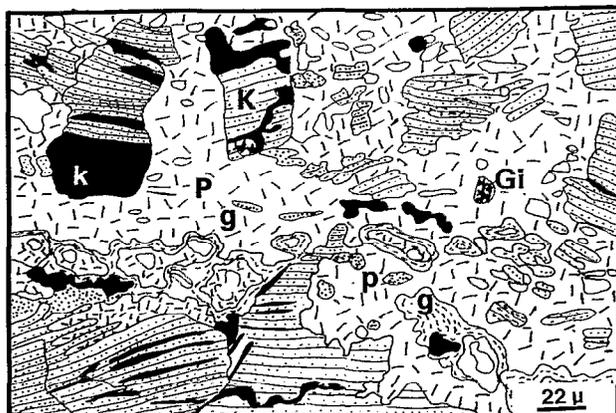


Fig. 9. — Pseudomorphose des « accordéons » de kaolinite dans un nodule lithomorphe du faciès nodulaire dans le système A (P : plasma asepique rouge ; p : plasma argilasépique ocre ; K : kaolinite ferruginisée par de la goéthite ; k : kaolinite ferruginisée par de l'hématite ; g : goéthane ; Gi : gibbsite ; V : vides).

Pseudomorphic weathering of kaolinite « booklets » in a lithomorphous nodule of the nodular facies in system A (p : red asepic plasma ; p : ochrous argilasepic plasma ; K : kaolinite ferruginised by goethite ; k : kaolinite ferruginised by hematite ; g : goethane ; Gi : gibbsite ; V : vugs).

bordés de cutanes de goethite, qui se développent également autour des domaines nodulaires.

LE FACIÈS NODULAIRE TACHETÉ (horizon III)

Sous le microscope polarisant, le faciès nodulaire tacheté est un assemblage agglomératif (BREWSTER, 1964). La matrice meuble est un plasma asépique rouge ponctué de quelques plages rouge jaunâtre masépiques. Sa structure est généralement micronodulaire (fig. 8). Les nodules lithomorphes sont constitués de nombreux « accordéons » de kaolinite qui sont épigénisés par les oxyhydroxydes de fer (fig. 9). Les bordures des nodules sont très irrégulières et altérées. Le plasma ferrugineux des nodules est un mélange de goethite et d'hématite.

Dans les nodules lithomorphes la gibbsite se développe à partir de la dissolution incongruente de la kaolinite, et peut aussi cristalliser dans les vacuoles, et même au contact avec des grains de quartz reliques. Dans le premier cas elle résulte d'une accumulation relative d'aluminium, tandis que dans le second elle provient d'une accumulation absolue. Du quartz et des micas partiellement altérés sont encore présents dans les horizons des systèmes B et C. Un réseau tramé ocre jaune de goethite recoupe les plasmas et cerne les nodules (fig. 10). De plus, on observe quelques nodules goethitiques, d'autant mieux différenciés que l'on se situe dans l'horizon des systèmes B et C. A la base de l'horizon nodulaire tacheté du système A, dans ce qui préfigure une cuirasse pseudonodulaire vacuolaire, les plasmas brun orangé à goethite secondaire sont très bien développés et recoupent toutes les structures primaires (nodules hématitiques et matrice micronodulaire rouge).

LES FACIÈS CARAPACE ET CUIRASSE VACUOLAIRES TACHETÉES (horizon IV et V)

Les faciès carapace et cuirasse vacuolaires tachetées présentent les mêmes organisations que le faciès argile tachetée dans les systèmes B et C.

Dans la carapace, le plasma ferrugineux est brun isotrope, avec quelques domaines de goethite orangés (fig. 11). Les nodules violacés sont rares, de type argilomorphe dans le système B et de type plutôt lithomorphe dans le système C. Les quartz sont encore présents mais apparaissent plus altérés que dans le faciès argile tachetée. Dans les nodules lithomorphes, quelque micas partiellement altérés sont encore protégés dans une couche de fer, héritée de la lithomarge. Les plasmas gris blanchâtre deviennent ocre, et présentent quelques ferri-argilanes (fig. 11). Les nodules sont généralement cernés d'une trame brune goethitique. Les nodules argilomorphes hématitiques se transforment en plasma goethitique orangé (fig. 12).

Dans la cuirasse, quartz et micas sont entièrement dissous. Dans le système C, un plasma asépique rouge est ponctué de plages de plasma jaunâtre masépique (orienté). Les vacuoles qui affectent le plasma rouge peuvent être remplies de cristaux de gibbsite.

LE FACIÈS CUIRASSE PSEUDONODULAIRE VACUOLAIRE (horizon VI)

Le faciès cuirasse pseudonodulaire vacuolaire est constitué de nodules hématitiques et d'un plasma rouge avec quelques domaines jaunâtres asépiques. La plupart des nodules sont lithomorphes et présentent des cristaux de gibbsite dans les vides (fig. 13).

Dans le système A, à la base de la cuirasse, les nodules hématitiques argilomorphes évoluent en nodules goethitiques. Le plasma de la matrice est asépique, micronodulaire, rouge, avec quelques plages jaunâtres qui apparaissent comme des domaines argilasépiques hérités de la lithomarge. La gibbsite se développe aux dépens des kaolinites reliques.

Dans la cuirasse du système B, les nodules sont lithomorphes et le plasma de la matrice est argilomorphe, et recoupé par une trame brune goethitique (fig. 14).

Dans la cuirasse du système C, et à la base de l'horizon, les nodules argilomorphes sont constitués d'un plasma rouge micronodulaire, jaunâtre à sa périphérie. On peut encore observer des nodules lithomorphes avec des micas reliques. Quelques cristaux de gibbsite peuvent se développer dans les vacuoles. La porosité est bien développée et les quartz sont encore présents. Plus haut dans l'horizon, les trames brun orangé goethitiques sont bien développées aux dépens des plasmas et autour des nodules argilomorphes.

LE FACIÈS CUIRASSE MASSIVE (horizon VII)

Le faciès cuirasse massive est composé de domaines lithomorphes et argilomorphes. Les premiers sont constitués d'« accordéons de kaolinite » ferruginisés, hérités de la lithomarge. Les seconds sont constitués d'un plasma rouge orangé asépique, hérité des argiles tachetées. A la base de l'horizon, une trame brune goethitique se développe dans les domaines argilomorphes et lithomorphes. Des cristaux de gibbsite se forment dans les vacuoles.

MINÉRALOGIE ET GÉOCHIMIE DES FACIÈS D'ALTÉRATION

Les compositions minéralogiques et géochimiques moyennes de chaque faciès se succédant dans les profils d'altération de chacun des trois systèmes cuirassés sont comparées les unes aux autres.

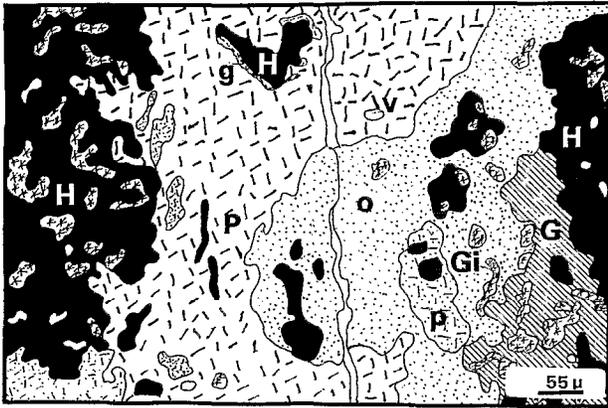


Fig. 10. — Micromorphologie du faciès nodulaire tacheté dans la partie inférieure du système A (H : plasma nodulaire hémattique ; G : plasma isotrope goéthitique ; o : plasma aséptique ocre ; p : plasma aséptique brun orangé ; P : plasma aséptique rouge ; g : goethane ; Gi : gibbsite ; V : vides).

Micromorphology of mottled nodular facies in the lower part of system A (H : nodular hematitic plasma ; G : isotropic goethitic plasma ; o : ochrous aseptic plasma ; p : brown-orange aseptic plasma ; P : red aseptic plasma ; g : goethane ; Gi : gibbsite ; V : vugs).

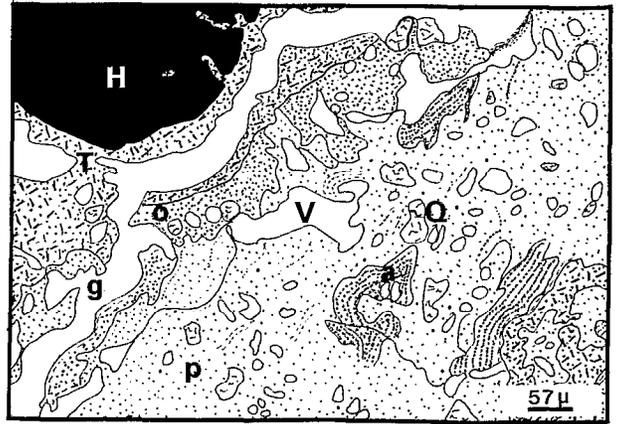


Fig. 11. — Micromorphologie de la carapace tubulaire tachetée dans le système B (H : nodule hémattique ; T : trame brun orangé goéthitique ; o : plasma aséptique ocre ; p : plasma argileux cryptocristallin blanc grisâtre ; a : argilane ; g : goethane ; Q : quartz ; V : vides).

Micromorphology of mottled tubular soft ferricrete in system B (H : hematitic nodule ; T : brown-orange goethitic framework ; o : ochrous aseptic plasma ; p : grey-white cryptocrystalline clayey plasma ; a : argilanes ; g : goethane ; Q : quartz ; V : vugs).

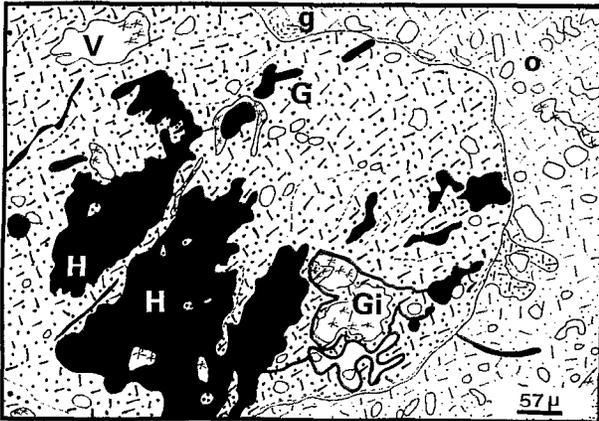


Fig. 12. — Micromorphologie de la cuirasse massive vacuolaire tachetée dans le système B (H : plasma nodulaire hémattique ; G : plasma orangé anisotrope goéthitique ; o : plasma aséptique ocre ; Gi : gibbsite ; g : goethane ; V : vides).

Micromorphology of mottled massive vacuolar ferricrete in system B (H : nodular hematitic plasma ; G : orangeous anisotropic goethitic plasma ; o : ochrous aseptic plasma ; Gi : gibbsite ; g : goethane ; V : vugs).

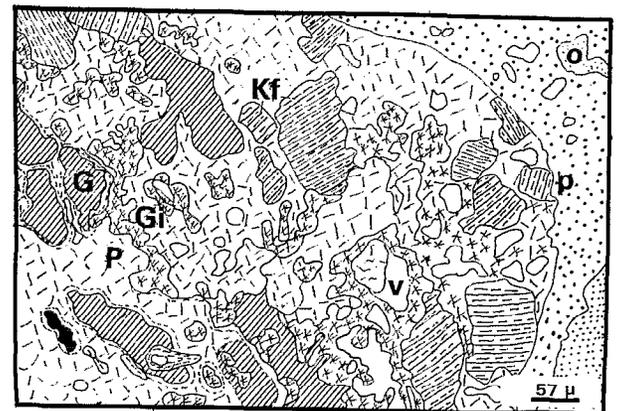


Fig. 13. — Transformation géochimique *in situ* d'un nodule lithomorphe dans la cuirasse pseudonodulaire vacuolaire du système B (Kf : « accordéons » de kaolinite partiellement ferruginisés par la goéthite ; G : plasma goéthitique ; P : plasma nodulaire aséptique rouge ; p : plasma rouge aséptique de la matrice ; o : plasma aséptique ocre ; Gi : plasma gibbsitique ; g : goethane ; V : vides).

In situ geochemical transformation of a lithomorphous nodule in pseudonodular vacuolar ferricrete of system B (Kf : kaolinite « booklets » partially ferruginised by goethite ; G : goethitic plasma ; P : red nodular aseptic plasma ; p : red aseptic matrix plasma ; o : ochrous aseptic plasma ; Gi : gibbsitic plasma ; g : goethane ; V : vugs).

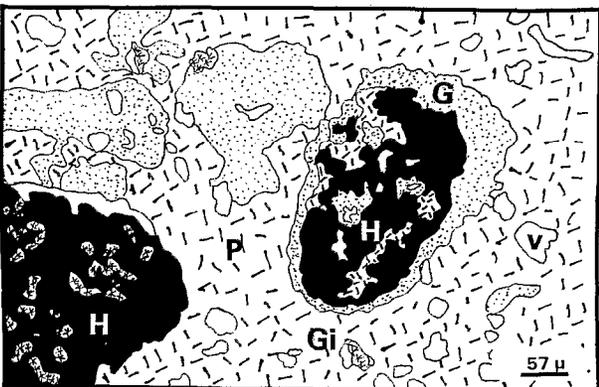


Fig. 14. — Micromorphologie de la cuirasse pseudonodulaire vacuolaire du système B (H : nodule hémattique ; G : trame ocre goéthitique ; P : plasma aséptique rouge ; Gi : gibbsite ; V : vides).

Micromorphology of pseudonodular vacuolar ferricrete of system B (H : hematitic nodule ; G : ochrous goethitic framework ; P : red aseptic plasma ; Gi : gibbsite ; V : vugs).

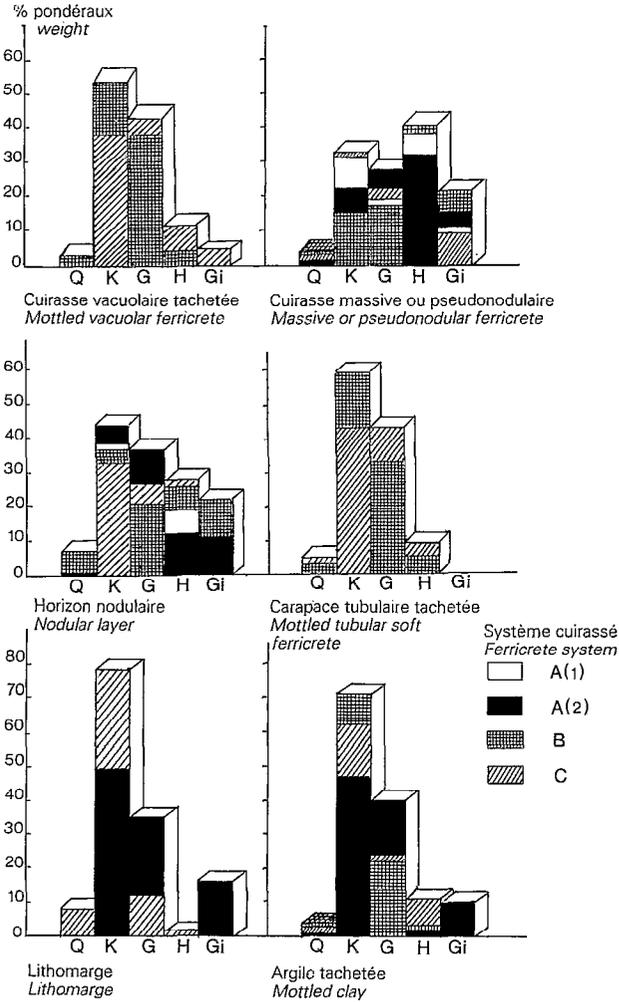


Fig. 15. — Compositions minéralogiques moyennes de chaque faciès d'altération dans chacun des trois systèmes cuirassés (Q : quartz ; K : kaolinite ; G : goethite ; H : hématite ; Gi : gibbsite).

Average mineralogical composition of each facies in the three ferricrete systems (Q : quartz ; K : kaolinite ; G : goethite ; H : hematite ; Gi : gibbsite).

Connaissant les densités apparentes moyennes de chaque faciès, les résultats d'analyses brutes figurant dans les tableaux sont recalculés pour un même volume d'échantillon (MILLOT et BONIFAS, 1959), et comparés dans des diagrammes minéralogiques et géochimiques (fig. 15, 16 et 17).

Minéralogie

Les compositions minéralogiques moyennes de chacun des faciès des trois systèmes cuirassés sont données dans les tableaux I, II, III et IV. Elles ont été

TABLEAU I

Composition minéralogique moyenne de chaque faciès dans le profil de la partie supérieure du système A
Average mineralogical composition for each layer in the profile of the upper part of system A

Faciès	1	2	3	4	5		
n	2	2	1	5	5		
Minéral	moy.	moy.	moy.	moy.	é.t.	moy.	é.t.
Quartz	2	0	1	1	1	0	1
Kaolinite	33	40	63	44	12	31	4
Goethite	59	24	19	37	22	19	9
Hématite	4	35	16	19	17	38	11
Gibbsite	0	0	0	0	0	11	3
Total	98	99	99	101		99	

(n : nombre d'échantillons ; moy. = moyenne ; é.t. = écart type).
Faciès 1 : carapace pseudonodulaire vacuolaire tachetée ; 2 : horizon nodulaire lithomorphe ; 3 : horizon argilomorphe ; 4 : horizon nodulaire tacheté ; 5 : cuirasse pseudonodulaire.
(n : number of samples ; moy. = mean ; é.t. = standard deviation).
Layer 1 : mottled pseudonodular soft ferricrete ; 2 : lithomorphous nodular layer ; 3 : argilomorphous layer ; 4 : mottled nodular soft layer ; 5 : pseudonodular ferricrete.

estimées à partir de la hauteur des pics de diffraction X de chacun des minéraux. Des coefficients d'étalonnage empiriques ont été utilisés pour relier la hauteur du pic caractéristique d'un minéral à sa teneur dans l'échantillon (MAZALTARIM, 1989). La précision de cette méthode semi-quantitative a été vérifiée en comparant les teneurs en éléments majeurs calculés à partir de la composition minéralogique qu'elle fournit avec

TABLEAU II

Composition minéralogique moyenne de chaque faciès dans le profil de la partie inférieure du système A
Average mineralogical composition for each layer in the profile of the lower part of system A

Faciès	1	2	3	4			
n	7	8	3	9			
Minéral	moy.	é.t.	moy.	é.t.	moy.	moy.	é.t.
Quartz	0	0	1	1	0	1	3
Kaolinite	49	24	47	12	39	22	5
Goethite	35	6	40	6	37	28	10
Hématite	0	0	2	3	12	32	11
Gibbsite	16	22	10	7	11	15	4
Total	100		100		100	100	

(n, moy. et é.t. comme dans le tableau I). Faciès 1 : Lithomarge isaltérique ; 2 : argile tachetée ; 3 : horizon nodulaire tacheté ; 4 : cuirasse pseudonodulaire vacuolaire.
(n, moy. and é.t. as in table I). Layer 1 : isalteritic lithomarge ; 2 : mottled clay ; 3 : mottled nodular soft layer ; 4 : pseudonodular vacuolar ferricrete.

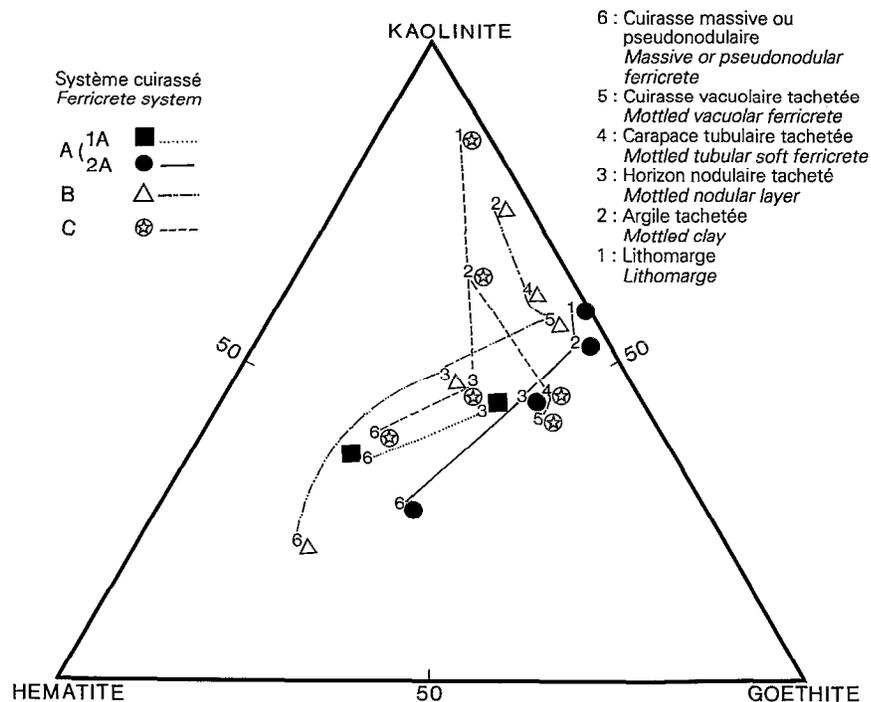


Fig. 16. — Composition minéralogique moyenne de chaque faciès d'altération dans un triangle kaolinite - hématite - goethite.
Average mineralogical composition of each weathering facies in a ternary diagram kaolinite - hematite - goethite.

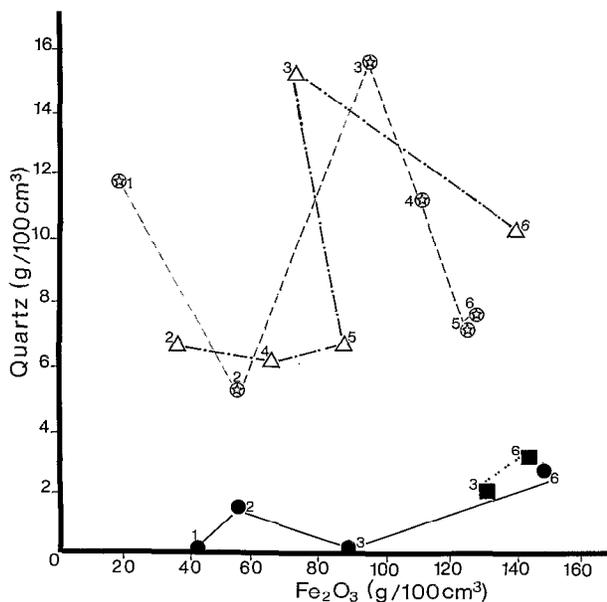


Fig. 17 — Diagramme binaire Quartz [g/100 ml] = f Fe₂O₃ [g/100 ml] (mêmes symboles que dans la figure 16).
Binary diagram Quartz [g/100 ml] = f Fe₂O₃ [g/100 ml] (same symbols as in figure 16).

les teneurs mesurées par spectrométrie ICP. Dans l'ensemble on observe une assez bonne corrélation entre les teneurs obtenues par voie chimique et celles obtenues par le calcul à partir de la composition minéralogique (MBONGO, 1989).

En moyenne (fig. 15 et tab. V) :

— La lithomarge des profils du système A est plus riche en gibbsite et en goethite que celle de C, qui est elle plus riche en kaolinite, hématite et quartz (fig. 17), et qui conserve encore des micas, détectés en diffraction des rayons X par la raie à 10 Å.

— L'argile tachetée des profils d'altération du système A est la plus riche en goethite et gibbsite. Celle du système B est la plus kaolinique et celle des profils du système C présente des compositions moyennes peu homogènes (tabl. IV).

— L'horizon nodulaire du système A est le plus riche en kaolinite et goethite. Celui du système B est le plus quartzueux et le plus gibbsitique et celui du système C est le plus hématitique.

— La carapace tubulaire tachetée du système B est la plus kaolinique, et celle du système C est la plus riche en quartz, goethite et hématite.

— La cuirasse vacuolaire tachetée du système B est la plus riche en quartz et kaolinite tandis que celle du système C est la plus riche en goethite, hématite et gibbsite.

TABLEAU III

Composition minéralogique moyenne de chaque faciès dans le profil du système B
Average mineralogical composition for each layer in the profile of system B

Faciès	1		2		3	4	5	
n	7		6		2	3	5	
Minéral	moy.	é.t.	moy.	é.t.	moy.	moy.	moy.	é.t.
Quartz	4	3	3	2	3	7	4	2
Kaolinite	71	4	59	3	54	33	15	2
Goethite	22	5	33	3	38	21	17	2
Hématite	3	1	5	2	4	26	41	10
Gibbsite	0	0	0	0	0	22	22	5
Total	100		100		99	99	99	

(n, moy. et é.t. comme dans le tableau I). Faciès 1 : argile tachetée ; 2 : carapace tubulaire tachetée ; 3 : cuirasse vacuolaire tachetée ; 4 : horizon nodulaire tacheté ; 5 : cuirasse pseudonodulaire vacuolaire.
(n, moy. and é.t. as in table I). Layer 1 : Mottled clay ; 2 : mottled tubular soft ferricrete ; 3 : mottled vacuolar ferricrete ; 4 : mottled nodular soft layer ; 5 : pseudonodular vacuolar ferricrete.

TABLEAU IV

Composition minéralogique moyenne de chaque faciès dans le profil du système C
Average mineralogical composition for each layer in the profile of system C

Faciès	1		2	3		4		5		6	
n	5		3	5		6		9		6	
Minéral	moy.	é.t.	moy.	moy.	é.t.	moy.	é.t.	moy.	é.t.	moy.	é.t.
Quartz	8	8	3	7	7	5	5	3	2	3	2
Kaolinite	78	5	62	37	8	43	3	38	8	33	14
Goethite	12	9	24	27	7	43	4	43	11	22	9
Hématite	2	1	11	18	9	9	3	12	9	32	14
Gibbsite	0	0	0	11	5	0	0	5	7	9	10
Total	100		100	100		100		101		99	

(n, moy. et é.t. comme dans le tableau I). Faciès 1 : Lithomarge isaltérique ; 2 : argile tachetée ; 3 : horizon nodulaire tacheté ; 4 : carapace tubulaire tachetée ; 5 : cuirasse tubulaire tachetée ; 6 : cuirasse pseudonodulaire vacuolaire.
(n, moy. and é.t. as in table I). Layer 1 : Isalteric lithomarge ; 2 : mottled clay ; 3 : mottled nodular soft layer ; 4 : mottled tubular soft ferricrete ; 5 : mottled vacuolar ferricrete ; 6 : pseudonodular vacuolar ferricrete.

— La cuirasse pseudonodulaire du système A est la plus riche en goethite. Celle du système B est la plus riche en quartz, hématite et gibbsite, et celle du système C est la plus kaolinitique.

Dans les profils d'altération des trois systèmes cuirassés l'hématite augmente progressivement depuis les argiles tachetées jusqu'aux cuirasses ferrugineu-

ses. Les plus hématitiques sont celles à faciès massif et pseudonodulaire vacuolaire des systèmes A et B (fig. 16).

Dans le premier système A, depuis la lithomarge vers la cuirasse, le profil d'altération s'appauvrit en kaolinite et s'enrichit en hématite à goethite quasiment constante (fig. 16).

TABLEAU V

Matrice des compositions minéralogiques moyennes maximales dans les profils d'altération des trois types de systèmes cuirassés de la région de Dembia-Zémio

Matrix of maximum of mean mineralogical compositions in weathering profiles from the Dembia-Zémio area

Minéral	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Gibbsite
Faciès:					
Lithomarge	C	C	A(2)	C	A(2)
Argile tachetée	B	B	A(2)	C	A(2)
Horizon nodulaire	B	A(2)	A(2)	C	B
Carapace tubulaire tachetée	C	B	C	C	C
Cuirasse vacuolaire tachetée	B	B	C	C	C
Cuirasse massive ou pseudonodulaire	B	C	A(2)	B	B

(A(2) = versant boisé ; B = bas-versant ; C = bas-plateau).
 (A(2) = wooded upslope ; B = downslope ; C = low plateaus).

Dans les deux autres systèmes B et C on observe deux voies de ferruginisation distinctes : (1) depuis la lithomarge ou l'argile tachetée vers la cuirasse vacuolaire tachetée, il y a appauvrissement en kaolinite et enrichissement en goethite, l'hématite restant

constante, et (2) depuis l'argile tachetée vers la cuirasse pseudonodulaire, il y a un appauvrissement deux fois plus important en kaolinite et un enrichissement en hématite, la goethite restant constante (fig. 16).

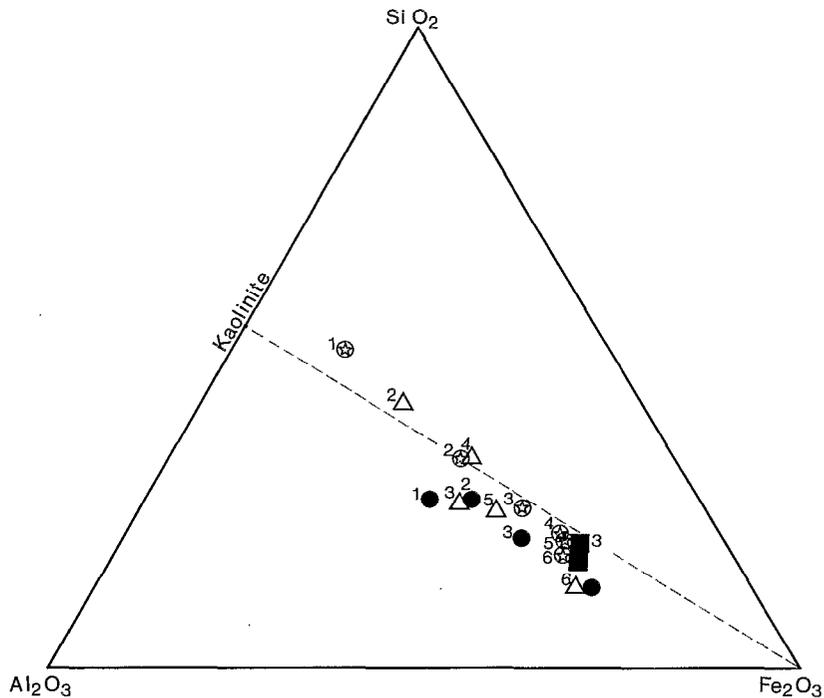


Fig. 18. — Composition chimique moyenne de chaque faciès d'altération dans un triangle SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃ (mêmes symboles que dans la figure 16).
Average chemical composition of each facies in a ternary diagram SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃ (same symbols as in figure 16).

Les cuirasses les plus kaolinitiques sont celles à faciès pseudonodulaire vacuolaire et massif des systèmes A et C (tabl. I et IV, fig. 16). Les plus gibbsitiques sont celles à faciès pseudonodulaires vacuolaire des systèmes A et B (fig. 15). La plus goethitique est celle à faciès massif vacuolaire tacheté du système C (fig. 16).

Globalement et en moyenne :

— La lithomarge du système C est le faciès d'altération le plus kaolinitique (fig. 16).

— Les horizons nodulaires tachetés des systèmes B et C sont les plus riches en quartz (fig. 17).

— La carapace et la cuirasse vacuolaire tachetée du système C sont les faciès les plus goethitiques (fig. 16).

— La cuirasse pseudonodulaire vacuolaire du système B est le faciès le plus riche en hématite et gibbsite (fig. 15 et 16), laquelle est également très bien représentée dans l'horizon nodulaire tacheté (fig. 15 et tabl. III).

Géochimie

Les compositions chimiques moyennes des différents faciès se succédant dans les profils d'altération de chacun des trois systèmes cuirassés sont données dans les tableaux VI, VII, VIII et IX.

Dans le diagramme ternaire $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (fig. 18) on montre qu'en moyenne :

— La lithomarge du système C est le faciès le plus siliceux.

— La cuirasse pseudonodulaire vacuolaire du système A est le faciès le plus ferrugineux.

— La lithomarge du système A est le faciès le plus alumineux.

En comparant les mêmes faciès les uns aux autres on voit que :

— La cuirasse pseudonodulaire vacuolaire du système B est la cuirasse la plus alumineuse.

— La cuirasse massive vacuolaire tachetée du système C est la plus siliceuse et la moins ferrugineuse.

— L'horizon nodulaire tacheté du système A est le plus ferrugineux, tandis que celui du système B est le plus siliceux et le plus alumineux.

— L'argile tachetée du système B est la plus siliceuse et la moins ferrugineuse, tandis que celle de A est la plus riche en fer et en aluminium.

— La carapace et la cuirasse vacuolaires tachetées du système C sont plus ferrugineuses que celles du système B.

La figure 19 montre que les cuirasses ne sont pas très bien différenciées par leur composition chimique moyenne en éléments traces, bien que les cuirasses du système A soient les plus ferrugineuses et qu'elles soient également les plus riches en éléments de

TABLEAU VI

Composition chimique moyenne de chaque faciès du profil de la partie supérieure du système A
Average chemical composition of each layer in the profile of the upper part of system A

Faciès	1	2	3	4	
n	2	2	1	5	
Oxyde %	moy.	moy.	moy.	moy.	é.t.
SiO_2	10,50	15,80	27,80	14,70	2,2
Al_2O_3	13,70	15,50	25,00	18,40	1,4
Fe_2O_3	61,00	54,40	32,90	53,10	3,6
Mn_3O_4	0,04	0,10	0,07	0,08	0,02
MgO	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02
K_2O				0	0
TiO_2	1,85	2,25	2,40	2,10	0,08
P_2O_5	0,92	0,31	0,32	0,40	0,03
H_2O	12,10	9,90	11,25	10,10	0,9
Total	100,15	99,30	99,77	98,90	
Traces ppm					
Sr	292	58	313	15	1
Ba	803	168	119	15	1
V	1124	1225	757	1186	130
Ni	39	80	48	64	27
Co	14	23	10	20	3
Cr	221	285	392	309	103
Zn	59	96	58	64	27
Cu	512	251	118	197	81
Sc	93	65	32	45	9
Y	20	8	11	7	1
Zr	233	294	378	303	31
La	183	44	220	20	6
Ce	425	238	361	44	13
Eu	8		1	0	0
Yb	1		1	1	0
Nb	13	16	22	16	3

(n, moy. et é.t. comme dans le tableau I). Faciès 1 : Carapace nodulaire tachetée ; 2 : horizon nodulaire lithomorphe ; 3 : horizon argilomorphe ; 4 : cuirasse pseudonodulaire.

(n, moy. and é.t. as in table I). Layer 1 : Mottled nodular soft ferricrete layer ; 2 : lithomorphous nodular soft layer ; 3 : argilomorphous soft layer ; 4 : pseudonodular ferricrete.

transition (V, Ni, Co, Cr, Zn et Cu), en alcalino-terreux (Sr, Ba, Y) et en terres rares légères (La, Ce et Yb).

En revanche, les lithomarges sont mieux différenciées. Ainsi, la lithomarge du système A est la plus ferrugineuse et la plus enrichie en (V+Ni+Co+Cr+Zn+Cu), alors que celle du système C est la moins ferrugineuse, on l'a vu la plus siliceuse, et la plus enrichie en (Sr+Ba+Y+La+Ce+Yb).

TABLEAU VII

Composition chimique moyenne de chaque faciès du profil de la partie inférieure du système A
Average chemical composition of each layer in the profile of the lower part of system A

Faciès	1		2		3	4	
n	7		8		3	9	
Oxydes %	moy.	é. t.	moy.	é. t.	moy.	moy.	é. t.
SiO ₂	21,80	10,6	21,80	4,2	17,90	10,70	1,4
Al ₂ O ₃	28,80	6,0	24,50	1,7	21,90	18,10	1,8
Fe ₂ O ₃	30,50	5,5	35,70	4,8	44,70	57,30	2,3
Mn ₃ O ₄	0,14	0,03	0,12	0,01	0,09	0,07	0,02
MgO	0,06	0,04	0,04	0	0,03	0,04	0,02
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0
TiO ₂	3,20	0,5	3,20	0,4	2,40	1,80	0,2
P ₂ O ₅	0,27	0,05	0,22	0,07	0,26	0,35	0,07
H ₂ O	14,70	4,2	13,20	0,8	12,40	11,10	0,7
Total	99,47		98,78		99,68	99,46	
Traces ppm							
Sr	0	1	3	2	5	36	45
Ba	16	11	5	1	5	71	72
V	1001	161	1067	167	1387	1346	129
Ni	92	33	70	16	51	56	12
Co	11	7	9	3	8	13	3
Cr	190	46	153	47	226	363	95
Zn	90	27	92	13	93	76	7
Cu	225	54	386	116	441	322	72
Sc	88	12	83	9	71	71	9
Y	15	7	20	4	15	11	2
Zr	236	28	291	81	275	318	57
La	6	6	11	6	6	35	24
Ce	151	86	100	27	113	161	52
Eu	0	1	0	0	0	0	0
Yb	1	2	2	1	1	0	0
Nb	12	3	19	5	18	18	4

(n, moy. et é.t. comme dans le tableau I). Faciès 1 : Lithomarge isalterique ; 2 : argile tachetée ; 3 : horizon nodulaire tacheté ; 4 : cuirasse pseudonodulaire.

(n, moy. and é.t. as in table I). Layer 1 : Isalteric lithomarge ; 2 : mottled clay ; 3 : mottled nodular soft layer ; 4 : pseudonodular ferricrete.

Globalement et en moyenne :

— Depuis les lithomarges ou les argiles tachetées jusqu'aux cuirasses, les teneurs moyennes en éléments de transition augmentent progressivement, à l'exception de l'horizon nodulaire tacheté sous cuirasse du système B qui présente une diminution de cette teneur moyenne (fig. 19).

— Les teneurs moyennes en alcalino-terreux et terres rares augmentent de la même manière dans la partie inférieure du système A, mais diminuent dans les autres systèmes.

— Dans le système A, comparé aux autres faciès, l'horizon nodulaire lithomorphe, présente une anomalie de teneur en alcalino-terreux et terres rares (tabl. VI et fig. 19).

Une analyse factorielle en composante principale (SAS) a été menée sur l'ensemble des analyses chimiques obtenues sur tous les faciès d'altération des trois systèmes cuirassés (fig. 20).

Le facteur 1 oppose le groupe géochimique constitué de SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, kaolinite, Zr et Y au groupe du fer et du vanadium, ce qui illustre l'opposition géo-

chimique entre les lithomarges et les cuirasses ferrugineuses.

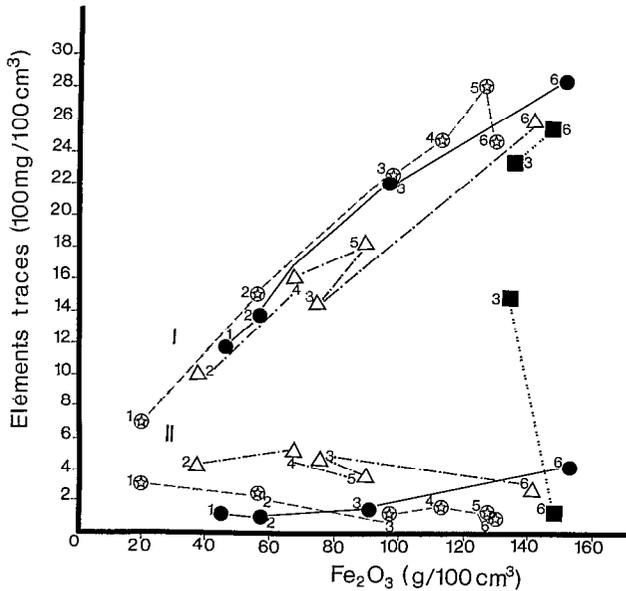
Le facteur 2 oppose le groupe de la goethite à laquelle sont associés Sc, Zn et Cu au groupe de l'hématite, ce qui illustre bien l'antagonisme entre la ferruginisation goethitique de la base de l'horizon nodulaire du système A et la ferruginisation hématiti-

que de la cuirasse en haut de profil. Dans les systèmes B et C, on caractérise de la même manière l'opposition géochimique entre les carapaces et cuirasses vacuolaires tachetées goethitiques et la cuirasse pseudonodulaire vacuolaire hématitique des sommets de profils.

Le facteur 3 caractérise le groupe P_2O_5 , Sr, Ba, La, Ce et Eu, ce qui illustre peut-être la présence dans les cuirasses de minéraux phosphatés telle la monazite (MAZALTARIM, 1989).

Le facteur 4 associe Mn_3O_4 et Co, qui représente les minéraux manganésifères du type asbolanes.

Le facteur 5 oppose gibbsite et kaolinite, ce qui illustre bien l'opposition géochimique entre les milieux humides et bien drainés, et ceux qui le sont moins. On retrouve ici la dualité kaolinite-gibbsite mise en évidence dans la lithomarge lors de l'étude pétrographique.



DISCUSSION ET CONCLUSION

Les trois systèmes cuirassés de la région de Dembia-Zémio sont emboîtés les uns dans les autres d'un point de vue géomorphologique, géochimique et génétique :

Le premier système A comprend les hauts plateaux cuirassés et leurs bordures escarpées et boisées. Le profil d'altération du haut plateau est caractérisé par une cuirasse massive riche en hématite et kaolinite en « accordéons » héritée de la lithomarge sous-jacente. Elle résulte donc d'une accumulation absolue du fer sous forme d'hématite au sein des plasmas argilasépiques de la lithomarge. Cette cuirasse surmonte un horizon nodulaire épais, constitué de nodules lithomorphes riche en hématite et kaolinite et d'une

Fig. 19. — Diagramme des éléments traces [100 mg/100 ml]=f Fe₂O₃ [g/100 ml] ; groupe I : (V+Ni+Co+Cr+Zn+Cu), groupe II : (Sr+BA+Y+La+Ce+Yb) (mêmes symboles que dans la figure 16).

Binar diagram traces elements [100 mg/100 ml]=f Fe₂O₃ [g/100 ml] (same symbols as in figure 16).

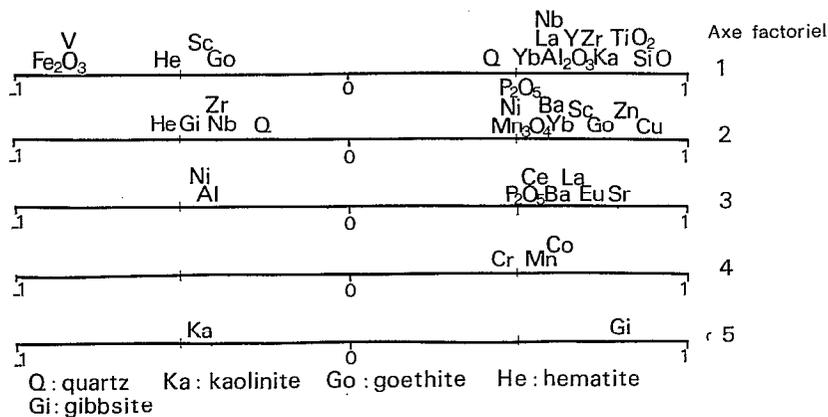


Fig. 20. — Analyse factorielle en composante principale (SAS). Principal component factorial analysis (SAS).

TABLEAU VIII

Composition chimique moyenne de chaque faciès du profil du système B
Average chemical composition of each layer in the profile of system B

Faciès	1		2		3	4	5	
n	7		6		2	3	5	
Oxydes %	moy.	é. t.	moy.	é. t.	moy.	moy.	moy.	é. t.
SiO ₂	34,90	3,2	27,50	2,3	21,10	22,00	11,00	1,5
Al ₂ O ₃	26,40	1,6	23,00	1,5	22,60	26,80	19,90	3,5
Fe ₂ O ₃	22,10	4,1	33,60	2,4	40,00	34,60	54,30	5,9
Mn ₃ O ₄	0,10	0,01	0,13	0,10	0,06	0,16	0,06	0,02
MgO	0,06	0,00	0,06	0,01	0,05	0,05	0,03	0,01
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0
TiO ₂	4,10	0,3	3,20	0,3	2,40	3,20	2,40	0,5
P ₂ O ₅	0,36	0,06	0,46	0,05	0,50	0,26	0,43	0,2
H ₂ O	11,80	0,26	12,00	0,4	12,60	12,40	10,70	1,7
Total	99,82		99,95		99,31	99,47	98,82	
Traces ppm								
Sr	63	6	48	5	46	28	32	18
Ba	99	12	124	119	56	43	32	10
V	556	80	784	57	859	679	1250	424
Ni	46	8	59	8	54	61	52	5
Co	18	2	24	4	26	57	19	1
Cr	176	37	249	36	257	320	458	110
Zn	87	12	107	11	95	70	54	8
Cu	326	74	407	55	347	184	142	29
Sc	47	7	59	1	72	45	43	4
Y	43	3	37	3	25	60	11	3
Zr	535	61	428	45	355	583	474	116
La	134	24	89	13	61	35	31	12
Ce	168	77	229	185	136	253	84	18
Eu	2	1	1	1	0	0	0	0
Yb	5	0	5	1	3	2	1	1
Nb	23	1	22	2	18	31	24	7

(n, moy. et é.t. comme dans le tableau I). Faciès 1 : Argile tachetée ; 2 : carapace tubulaire tachetée ; 3 : cuirasse vacuolaire tachetée ; 4 : horizon nodulaire tachetée ; 5 : cuirasse pseudonodulaire vacuolaire.

(n, moy. and é.t. as in table I). Layer 1 : Mottled clay ; 2 : mottled tubular soft ferricrete ; 3 : mottled vacuolar ferricrete ; 4 : mottled nodular soft layer ; 5 : pseudonodular vacuolar ferricrete.

matrice argilo-sableuse rouge. Cet horizon est le siège de lessivages et d'accumulations du fer et d'argile. Ainsi, dans sa partie supérieure il est très argileux et lessivé en fer alors qu'il est plutôt ferrugineux à sa base, dans la zone de battement de la nappe où se forme une carapace pseudonodulaire vacuolaire riche en goéthite secondaire. Cette goéthite se développe par réhydratation de l'hématite contenue dans les nodules et la matrice (accumulation relative) d'une part, et par migration verticale du fer, au sein des vides (accumulation absolue) d'autre part.

Le profil d'altération de la bordure boisée est caractérisé par une cuirasse pseudonodulaire plus riche en goéthite que la cuirasse massive du haut plateau. Elle est moins riche en hématite et kaolinite et contient de la gibbsite. La lithomarge sous-jacente est dépourvue de minéraux parentaux. Elle est riche en kaolinite, mais aussi en gibbsite dans sa partie supérieure, la goéthite représentant en moyenne 35 % du poids total d'un échantillon moyen de lithomarge.

Le second système B correspond aux bas versants et il est caractérisé par un profil d'altération qui com-

TABLEAU IX
Composition chimique moyenne de chaque faciès du profil du système C
Average chemical composition of each layer in the profile of system C

Faciès	1		2		3		4		5		6	
n	5		3		5		6		9		5	
Oxydes %	moy.	é.t.	moy.	moy.	é.t.	moy.	é.t.	moy.	é.t.	moy.	é.t.	
SiO ₂	42,40	7,5	28,10	21,00	3,0	17,50	2,0	16,80	2,3	15,80	3,7	
Al ₂ O ₃	29,70	1,8	23,90	20,70	2,2	17,60	0,5	18,10	2,4	18,90	1,8	
Fe ₂ O ₃	12,60	8,8	32,40	43,30	3,9	49,80	3,3	50,40	4,2	52,20	5,6	
Mn ₃ O ₄	0,10	0,03	0,09	0,08	0,03	0,07	0,01	0,07	0,01	0,07	0,02	
MgO	0,04	0,02	0,04	0,04	0,01	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	
K ₂ O	0,07	0,05	0,05	0	0	0,07	0,08	0	0	0	0	
TiO ₂	3,70	0,9	2,90	2,30	0,9	1,80	0,2	1,60	0,	1,4	0,4	
P ₂ O ₅	0,21	0,04	0,31	0,30	0,08	0,43	0,12	0,40	0,10	0,26	0,05	
H ₂ O	10,80	1,5	11,50	11,10	1,0	11,85	0,5	11,90	0,6	10,8	0,6	
Total	99,62		99,29	98,82		99,16		99,30		99,45		
Traces ppm												
Sr	60	37	27	15	5	16	5	13	3	8	2	
Ba	61	31	47	23	21	51	56	14	3	15	8	
V	388	219	1095	995	257	1322	361	1241	237	1055	205	
Ni	50	26	51	41	6	55	14	57	20	47	11	
Co	16	6	17	19	1	18	2	19	4	15	4	
Cr	301	289	381	712	261	335	207	400	111	660	225	
Zn	66	28	71	70	7	79	23	92	31	70	29	
Cu	127	62	186	200	93	367	145	428	244	154	99	
Sc	37	20	52	51	12	74	18	74	13	47	20	
Y	20	5	13	13	2	13	6	16	9	10	3	
Zr	527	130	409	441	192	285	57	277	71	228	122	
La	108	71	63	30	21	20	10	22	13	15	7	
Ce	192	134	102	47	24	28	20	30	20	39	57	
Eu	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Yb	2	1	2	1	1	2	1	3	3	0	1	
Nb	28	11	30	27	10	13	4	14	4	18	6	

(n, moy. et é.t. comme dans le tableau I). Faciès 1 : Lithomarge isaltérique ; 2 : argile tachetée ; 3 : horizon nodulaire tacheté ; 4 : carapace tubulaire tachetée ; 5 : cuirasse vacuolaire tachetée ; 6 : cuirasse pseudonodulaire vacuolaire.

(n, moy. and é.t. as in table I). Layer 1 : Isalteric lithomarge ; 2 : mottled clay ; 3 : mottled nodular soft layer ; 4 : mottled tubular soft ferricrete ; 5 : mottled vacuolar ferricrete ; 6 : pseudonodular vacuolar ferricrete.

prend une cuirasse pseudonodulaire vacuolaire riche en hématite et gibbsite surmontant une carapace tubulaire tachetée épaisse riche en kaolinite d'illuviation et goéthite. La cuirasse renferme du quartz et se dégrade à sa base, entraînant la formation d'un horizon nodulaire lessivé plus riche en quartz. Elle renferme également des « boules relictuelles » de cuirasse massive. Elle résulte donc de la dégradation et du démantèlement géochimique et mécanique de la cuirasse massive. Sa situation sur les versants implique qu'elle ait subi de nombreuses phases

d'érosion (MICHEL, 1969 ; GRANDIN, 1973), qu'elle ait donc été rajeunie, et qu'elle résulte à la fois d'un enfoncement vertical et latéral du paysage (MAIGNIEN, 1958 ; 1966) qui semble avoir été plus important que sur les hauts plateaux.

Le troisième système C correspond aux profils d'altération des bas plateaux et il est caractérisé par une cuirasse vacuolaire tachetée riche en goéthite et kaolinite d'illuviation, pauvre en hématite et dépourvue de gibbsite. Cette cuirasse provient d'une accu-

mulation absolue de fer sous forme de goethite au sein de plasmas argileux illuviés hérités de l'argile tachetée sous-jacente. La lithomarge est moins ferrugineuse que celle du système A, dépourvue de gibbsite, plus riche en kaolinite, et contient encore quelques minéraux primaires (micas, feldspaths et quartz). De plus elle est moins riche en éléments de transition (V, Ni, Co, Cr, Cu et Zn), mais présente des teneurs moyennes en Y, alcalino-terreux et terres rares (Sr, Ba, La, Ce, et Yb) supérieures à celles mesurées dans la lithomarge du système A.

La lithomarge et l'horizon nodulaire des profils d'altération du système cuirassé A sont plus épais que ceux des systèmes B et C.

Les différences géochimiques observées dans les lithomarges augurent soit une différence de roches mères comme l'ont montré de nombreux auteurs (NAHON, 1976 ; LEPRUN, 1977, 1979 ; PION, 1979 ; BLOT, 1981 ; AMBROSI, 1984 ; AMBROSI et NAHON, 1986 ; TARDY et NAHON, 1985 ; NAHON, 1986), soit une différence de degré de maturation ou d'évolution des faciès d'altération développés sur une même roche mère, en relation avec un changement de l'environnement géomorphologique et pédobioclimatique (BOCQUIER, 1971 ; BOULET, 1972, 1974 ; NAHON, 1976 ; CHAUVEL, 1977 ; CHAUVEL *et al.*, 1977 ; BOCQUIER, 1979 ; BOCQUIER *et al.*, 1982 ; NAHON et BOCQUIER, 1983 ; BOULANGE, 1983 ; BOCQUIER *et al.*, 1984 ; NAHON, 1986 ; MULLER, 1987).

Deux types de ferruginisation ont été définis dans les profils d'altération du premier système A. L'une est hématitique et c'est la plus ancienne. Elle concerne la ferruginisation des « accordéons » de kaolinite des nodules lithomorphes sous la cuirasse massive qui s'est elle-même formée selon le même processus. L'autre est goéthitique, elle recoupe la précédente et apparaît donc comme plus récente. Elle se développe aux dépens de l'hématite par réhydratation dans les milieux mal drainés, que ce soit au voisinage avec la nappe à la base de l'horizon nodulaire, ou en surface au-dessus de la cuirasse massive et au voisinage avec les nappes d'eau temporaires qui sont fonctionnelles à la saison humide. Dans le premier cas, l'accumulation de fer au sein des plasmas argilasépiques est absolue. Dans le second elle est relative et procède d'un réarrangement des plasmas argilo-ferrugineux à hématite + kaolinite en un plasma goéthitique en accord avec les variations des conditions physico-chimiques du milieu : péjoration du drainage, activité biologique accrue, qui modifient le pH et l'Eh (NAHON, 1976), mais aussi la taille des pores et par conséquent l'activité de l'eau dans le profil qui conditionnent la formation d'hématite ou de goéthite (DIDIER, 1983 ; DIDIER *et al.*, 1985 ; TARDY et NAHON, 1985 ; TROLARD et TARDY, 1986 ; TARDY *et al.*, 1988).

Dans les deux autres systèmes la ferruginisation sous la cuirasse est à dominante goéthitique. La goéthite ferruginise un matériau kaolinitique d'illuviation. L'accumulation de fer est absolue, et les apports sont

verticaux et latéraux. De plus cette ferruginisation secondaire s'accompagne d'une diminution des teneurs moyennes en kaolinite, et d'une augmentation de la gibbsite dans la cuirasse, notamment dans le profil d'altération du système B.

C'est dans l'horizon nodulaire du système A et dans une moindre mesure dans celui du système B que l'on trouve les plus grandes quantités de nodules hématitiques lithomorphes. En revanche, l'horizon nodulaire du système C est essentiellement constitué de nodules argilomorphes.

Le front de ferruginisation est plus profond dans les profils du système A que dans ceux des deux autres systèmes, et il fonctionne probablement depuis plus longtemps.

Il apparaît clairement que les faciès d'altération les plus évolués et donc les plus anciens sont situés sur les points hauts du paysage, tandis que sur les points bas on trouve plutôt une majorité de faciès présentant des caractères morphologiques et géochimiques moins évolués.

Dans tous les cas les cuirasses ferrugineuses s'enfoncent verticalement aux dépens des horizons qui se trouvent dessous, et au fur et à mesure que progresse le front d'altération des roches (MILLOT *et al.*, 1976 ; NAHON et MILLOT, 1977).

Ou bien le paysage, tel qu'il se présente aujourd'hui, a toujours eu *grosso modo* la même allure en évoluant lentement sur lui-même par enfoncement vertical, ou bien il résulte d'une succession de phases climatiques antagonistes ayant entraîné par des périodes d'érosion répétées des inversions de relief (TRICART et CAILLEUX, 1965).

Par conséquent, à la lumière de cette étude, il semble bien que la vitesse et la durée des phénomènes d'altération, de ferruginisation et d'érosion aient oscillés dans l'espace, mais aussi dans le temps au gré des fluctuations des paléoclimats qui se sont succédé dans la région de Dembia-Zémio, au cours de la lente migration des domaines climatiques tropicaux sur le continent africain, sous l'effet de la dérive des plaques continentales depuis environ 100 Ma (TARDY *et al.*, 1988 ; BEAUVAIS et TARDY, 1989).

Remerciements

Cette étude a été menée dans le cadre du programme GEOLAT de l'ORSTOM d'une part, et du programme PIRAT d'autre part. L'auteur remercie le haut commissariat à la Recherche scientifique et technique ainsi que le Bureau des mines et de la géologie de la République centrafricaine pour leur aide sur le terrain, ainsi que le Laboratoire de géochimie de la surface de Strasbourg qui a réalisé les analyses géochimiques de ce travail, M. J.-M. WACKERMANN et un correcteur anonyme qui ont bien voulu relire ce manuscrit et faire bénéficier l'auteur de leur expérience des latérites.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 3 août 1989

RÉFÉRENCES

- AMBROSI (J.P.), 1984. — Pétrologie et géochimie d'une séquence de profils latéritiques cuirassés ferrugineux de la région de Diouga, Burkina Faso. Thèse de Doct. 3^e cycle, Univ. de Poitiers, 223 p.
- AMBROSI (J.P.) et NAHON (D.), 1986. — Petrographical and geochemical differentiation of lateritic iron crust profiles. *Chem. Geol.*, 57 : 371-393.
- BEAUVAIS (A.) et MAZALTARIM (D.), 1988. — Étude des cuirasses latéritiques de la région de Dembia-Zémio en Centrafrique. Pétrographie, minéralogie et géochimie. *Sci. Géol. Bull.*, 44 : 47-69.
- BEAUVAIS (A.) et TARDY (Y.), 1989. — Âge, distribution et évolution des cuirasses ferrugineuses d'Afrique. Dérive des paléoclimats tropicaux périatlantiques depuis 150 millions d'années. *C.R. Acad. Sci. Paris, sér. II* (soumis).
- BLOT (A.), 1980. — Altération climatique des massifs de granite du Sénégal. *Trav. Doc. ORSTOM*, 114 : 434 p.
- BOCQUIER (G.), 1971. — Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse de Doct. Sci., Univ. de Strasbourg ; *Mém. ORSTOM*, 62 (1973) : 350 p.
- BOCQUIER (G.), 1979. — Les structures d'accueil et les mécanismes d'accumulation de matière dans les paysages. Modèles expérimentaux correspondants. *Sci. Géol. Bull.*, 53 : 19-26.
- BOCQUIER (G.), BOULANGE (B.), ILDEFONSE (P.), NAHON (D.) et MULLER (D.), 1982. — Transfers, accumulation modes, mineralogical transformation and complexity of historical in lateritic profiles. Dans Proc. Int. Symp. Laterisation, São Paulo (A.J. Melfi et A. Carvalho, Eds.), 2 : 331-343.
- BOCQUIER (G.), MULLER (J.P.) et BOULANGE (B.), 1984. — Les latérites : connaissances et perspectives actuelles sur les mécanismes de leur différenciation. In : Livre Jubilaire du Cinquantième de l'AFES : 123-138.
- BOULANGE (B.), 1983. — Les formations bauxitiques latéritiques de Côte d'Ivoire. Les faciès, leur transformation, leur distribution et l'évolution du modèle. *Trav. Doc. ORSTOM*, 175 : 360 p.
- BOULET (R.), 1972. — Modalités d'action du lessivage dans les sols tropicaux développés sur granite (Haute-Volta). Étude micro-morphologique. *Cah. ORSTOM, sér. pédol.*, 10 : 321-342.
- BOULET (R.), 1974. — Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Équilibres dynamiques et bioclimats. Thèse de Doct. Sci., Univ. de Strasbourg ; *Mém. ORSTOM*, 85 (1978) : 272 p.
- BOULVERT (Y.), 1982. — Pétrologie et géochimie. Notes géomorphologiques régionales en Centrafrique. Rapport ORSTOM, Bangui, 2 : 296 p.
- BREWER (R.), 1964. — Fabric and mineral analysis of soils. Wiley, 470 p.
- CHAUVEL (A.), 1977. — Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. *Trav. Doc. ORSTOM*, 62 : 532 p.
- CHAUVEL (A.), BOCQUIER (G.) et PEDRO (G.), 1977. — Les mécanismes de la disjonction des constituants des couvertures sableuses dans les régions intertropicales de l'Afrique de l'Ouest. *Sci. Géol. Bull.*, 30 : 255-264.
- DIDIER (P.), 1983. — Paragenèses à oxydes et hydroxydes de fer dans les bauxitites et les cuirasses alumineuses. Thèse de Doct. 3^e cycle, Univ. de Poitiers, 150 p.
- DIDIER (P.), PERRET (D.), TARDY (Y.) et NAHON (D.), 1985. — Équilibres entre kaolinites ferrifères, goéthites alumineuses et hématites alumineuses dans les systèmes cuirassés. Rôle de l'activité de l'eau et de la taille des pores. *Sci. Géol. Bull.*, 38 : 383-397.
- GRANDIN (G.), 1973. — Aplatissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. Thèse de Doct. Sci., Univ. de Strasbourg ; *Mém. ORSTOM*, 82 (1976) : 275 p.
- LEPRUN (J.C.), 1977. — La dégradation des cuirasses ferrugineuses. Étude et importance du phénomène pédologique en Afrique de l'Ouest. *Sci. Géol. Bull.*, 30 : 265-274.
- LEPRUN (J.C.), 1979. — Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse. Transformation. Dégradation. *Sci. Géol. Mém.*, 58 : 224 p.
- MAIGNIEN (R.), 1958. — Le cuirassement des sols en Guinée. *Mém. Service Carte géol. Als. Lorr.* 16 : 204 p.
- MAIGNIEN (R.), 1966. — Compte rendu de recherches sur les latérites. *Coll. Rech. Ressources Nat., UNESCO, Vaillant-Carmagne*, 4 : 155 p.
- MAZALTARIM (D.), 1989. — Géochimie des cuirasses ferrugineuses et des bauxites d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Thèse de Doct. Sci., Univ. de Strasbourg ; 260 p.
- MBONGO (B.H.), 1989. — Cartographie géochimique et minéralogique des cuirasses latéritiques de la région de Dembia-Zémio (RCA). Rapport de DEA, Univ. de Strasbourg ; 31 p.
- MESTRAUD (J.C.), 1982. — Géologie et ressources minérales de la République centrafricaine. État des connaissances fin 1963. *Mém. Bur. Rech. Géol. Min.*, 60 : 185 p.
- MICHEL (P.), 1969. — Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique. Thèse de Doct. Sci., Univ. de Strasbourg ; *Mém. ORSTOM*, 63 (1973) : 752 p.
- MILLOT (G.) et BONIFAS (M.), 1955. — Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latérisation et de bauxitisation. *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.* 8 : 3-20.
- MILLOT (G.), BOCQUIER (G.) et PAQUET (H.), 1976. — Géochimie et paysages tropicaux. *La Recherche*, 65 : 236-244.
- MULLER (J.P.), 1987. — Analyse pétrologique d'une formation latéritique meuble du Cameroun. Essai de traçage d'une différenciation supergène par les paragenèses minérales secondaires. Thèse de Doct. Sci., Univ. de Paris VI : 188 p.
- NAHON (D.), 1976. — Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie, structures, relais et coexistence. Thèse de Doct. Sci., Univ. d'Aix-Marseille III ; *Sci. Géol. Mém.*, 44 (1976) : 232 p.
- NAHON (D.) et BOCQUIER (G.), 1983. — Petrology of element transfers in weathering and soils systems. In : Coll. Int. Pétrologie des altérations et des sols, CNRS, Paris ; *Sci. Géol. Mém.*, 73 (1983) : 111-120.
- NAHON (D.B.), 1986. — Évolution of iron crusts in tropical landscapes. Colman et Dethier, 9 : 169-187.
- PION (J.C.), 1979. — Altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Étude de toposéquences en Haute-Volta. *Sci. Géol. Mém.*, 57 : 220 p.
- TARDY (Y.) et NAHON (D.), 1985. — Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Am-hematite, and Fe³⁺-kaolinite in bauxites and ferricretes. An approach to the mechanisms of concretion formation. *Amer. J. Sci.*, 285 : 865-903.
- TARDY (Y.), MELFI (A.J.) et VALETON (I.), 1988. — Climats et paléoclimats tropicaux périatlantiques. Rôle des facteurs climatiques et thermodynamiques : température et activité de l'eau sur la répartition et la composition minéralogique des bauxites et des cuirasses ferrugineuses, au Brésil et en Afrique. *C.R. Acad. Sci. Paris, sér. II*, 308 : 289-295.
- TARDY (Y.), BARDOSSY (G.) et NAHON (D.), 1988. — Fluctuations de l'activité de l'eau et successions des minéraux hydratés et déshydratés au sein de profils latéritiques ferrugineux et bauxitiques. *C.R. Acad. Sci. Paris, sér. II*, 307 : 753-759.
- TRICART (J.) et CAILLEUX (A.), 1965. — Le modèle des régions chaudes, forêts et savanes. *Traité de Géomorphologie*. SEDES, 5 : 322 p.
- TROLARD (F.) et TARDY (Y.), 1986. — The stabilities of gibbsite, boehmite, aluminous goethites and aluminous hematites in bauxites, ferricretes and laterites as a function of water activity, temperature and particle size. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 51 : 945-957.