

Altération déferruginisante des cuirasses massives et formation des horizons gravillonnaires ferrugineux dans les sols de l'Afrique Centrale humide

Dieudonné BITOM et Boris VOLKOFF

Résumé — Dans les sols de la zone forestière équatoriale du Sud-Cameroun on observe une carapace qui constitue une étape transitoire dans la dégradation *in situ* d'une cuirasse ferrugineuse massive en matériaux nodulaires meubles. La cuirasse d'abord hématitique et massive devient progressivement nodulaire, nodules et ciment internodulaire restant hématitiques. Dans la carapace, le ciment internodulaire subit une goethitisation, mais la charpente initiale de la cuirasse se maintient grâce à des ponts internodulaires restés hématitiques. La déferruginisation de ces ponts provoque l'effondrement des structures initiales de la cuirasse et donne naissance à un matériau meuble nodulaire à matrice argileuse à kaolinite et à goethite.

Iron gravel layer formation and iron duricrust degradation in the soils of humid Central Africa

Abstract — A mottled soft nodular ironcrust, which constitutes a transitory stage in the degradation *in situ* of a massive hematitic duricrust, is found in the forest region of southern Cameroon. Nodular volumes progressively appear in the massive iron duricrust, while the nodules and the internodular matrix remain hematitic. In mottled soft ironcrust, the internodular matrix undergoes goethitization, but the initial framework of the duricrust is conserved owing to internodular bridges, remnants of the hematitic internodular matrix of the duricrust. The deferruginization of these bridges causes the collapse of the initial structures of the duricrust and leads to the formation of a soft nodular material with a clayey matrix containing kaolinite and goethite.

Abridged English Version — It is assumed that the several metres thick soft ferruginous nodular layers of many ferralitic soils of the Central Africa forest (Martin, 1967; Stoops, 1968; Muller *et al.*, 1981) are relicts of an ancient iron duricrust (Bocquier *et al.*, 1984). In southern Cameroon, a ferruginous duricrust which forms a continuous level in the soil, which could be an example of this initial duricrust, has been found. The petrographic, mineralogical and geochemical study of the successive facies at the periphery of this duricrust will indicate the relationships between the soft nodular layers and the duricrust.

The studied zone is located at the southern part of the Cameroon forest region, on latitude 3°N and about longitude 12°E (*fig. 1*), on a plateau with red ferralitic soils developed on granite.

The duricrust is deep and occupies the summit of a dissymmetrical hill. A cross-section shows well differentiated layers (*fig. 2*) with the five following ferruginous facies:

(i) A massive duricrust consisting of a hard reddish-brown hematitic matrix with diffused less consistent purple-red spots (*fig. 3*) and some soft light-yellow kaolinitic and goethitic (table) areas.

(ii) A nodular duricrust (*fig. 4*) with hematic nodules and hematitic internodular cement.

(iii) A pisolitic duricrust only represented at the top of the interfluve.

(iv) A mottled soft nodular ironcrust around the hard nodular duricrust. The nodules are identical with those of the nodular duricrust. Mottled material consists of a yellow matrix and ferruginous bridges between the nodules. The yellow matrix is heterogeneous and composed of an association of dark yellow and light yellow domains and yellow ferrargilans. This matrix is kaolinitic without hematite and contains little goethite. The ferruginous bridges present a

Note présentée par Georges PÉDRO.

continuous series of colours ranging from rusty-brown at the nodules contacts to reddish in the bridge core. Hardness changes according to the colour: reddish parts are less indurated than rusty-brown ones. They contain hematite and kaolinite. The reddish parts are poorer in hematite and richer in kaolinite than the rusty-red parts (table).

(v) In the nodular horizon, nodules are mainly hematitic. They are wrapped in an orange-coloured soft clayey matrix containing kaolinite, quartz and goethite. Red and coherent hematitic spots are found at their contacts with nodules.

Analyses (*fig. 6*) on average samples (macroanalyses) show that nodular phases are slightly richer in Fe than the reddish-brown matrix F1 of the massive duricrust. Microprobe analyses show that there is a progressive relative loss of iron in internodular materials of the mottled soft nodular ironcrust. There is then a redistribution of iron in the duricrust, with the nodules becoming richer than the internodular cement, followed by a progressive leaching of iron in the internodular materials of the mottled soft nodular ironcrust.

The duricrust described initially is hematitic and massive, as currently observed in intertropical zones (Yongué, 1986; Nahon, 1976; Ambrosi and Nahon, 1986). It is transformed into a nodular duricrust while remaining hematitic. In the mottled soft nodular ironcrust the yellow matrix results from internodular cement that has undergone partial goethitization, from illuvial clays and from light-yellow material remaining from the massive duricrust. The ferruginous bridges are the relicts of the hematitic internodular cement unaffected by goethitization; they are discoloured while iron is progressively leached out. Traces of these bridges are found in the forms of red spots at the contacts of the nodules at the bottom of the soft nodular layer: that proves that the nodules of this layer belonged to a previous mottled soft nodular ironcrust.

During the transformation of the massive duricrust in a soft nodular layer, there is a relative iron loss and there would have been, on the whole, hematite-goethite replacement (Schwertmann, 1971; Didier, 1983; Beauvais and Tardy, 1991). Actually hematite dissolution and hematite-goethite replacement are involved simultaneously.

It is thus shown that the soft nodular layers, omnipresent in Central African soils, can be formed by *in situ* alteration of an initial hematitic and massive duricrust.

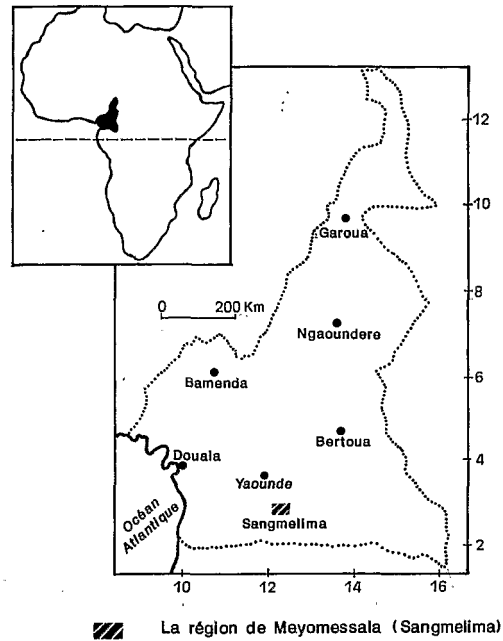
I. INTRODUCTION. — En Afrique Centrale, beaucoup de sols ferrallitiques sous forêt présentent un horizon gravillonnaire à nodules ferrugineux et blocs de cuirasses, épais de plusieurs mètres (Martin, 1967; Stoops, 1968; Muller *et al.*, 1981).

On admet généralement que ces horizons gravillonnaires proviennent de la dégradation d'anciennes cuirasses (Bocquier *et al.*, 1984), mais on n'a pas encore pu le prouver d'une manière irréfutable par une description complète de la transformation.

Dans le Sud Cameroun, il a été observé des cuirasses ferrugineuses formant dans le sol un niveau continu et qui montrent des différenciations importantes à leur périphérie. L'étude pétrographique, minéralogique et géochimique de ces différenciations permet de décrire les mécanismes de formation des horizons gravillonnaires à partir de la cuirasse.

II. LE MILIEU NATUREL SUD CAMEROUNAIS. — La zone étudiée se trouve au Sud de la région forestière du Cameroun (*fig. 1*) sur un plateau d'altitude moyenne de 700 m couvert de sols ferrallitiques rouges. Le module pluviométrique annuel est de 1 600 mm. Le substrat géologique est constitué d'un granite.

Fig. 1. — Carte de localisation.
Fig. 1. — Location map.



III. COUPE DE LA SÉQUENCE CUIRASSE. — La cuirasse occupe la partie sommitale d'un interfluve à versants dissymétriques. La partie étudiée présente une succession d'horizons bien différenciés depuis le substratum rocheux jusqu'à la surface (fig. 2) :

- une roche altérée violet pâle (isaltérite), gibbsitique et de texture limoneuse;
- un horizon rouge orangé (2,5YR 5/8), argilo-limoneux, gibbsitique et kaolinique;
- un horizon à volumes ferrugineux indurés irréguliers et à terre fine orangée, argileuse;

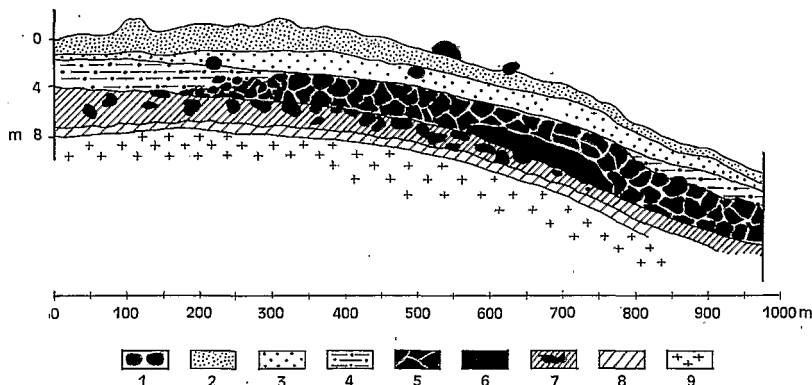


Fig. 2. — Coupe de la séquence cuirassée : 1, blocs de cuirasse; 2, horizon argileux meuble; 3, horizon nodulaire meuble; 4, carapace nodulaire tachetée; 5, cuirasse ferrugineuse fragmentée; 6, cuirasse ferrugineuse continue; 7, horizon caillouteux; 8, horizon argilo-limoneux rouge orangé; 9, isaltérite.

Fig. 2. — Cross-section of duricrust sequence; 1, duricrust blocks; 2, clayey soft layer; 3, soft nodular layer; 4, mottled soft nodular ironcrust; 5, dismantled duricrust; 6, massive duricrust; 7, ferruginous pebbly layer; 8, clay-loam reddish layer; 9, saprolite.

- une cuirasse, d'abord continue et à structure massive, puis très fragmentée : les blocs du niveau de cuirasse fragmentée sont à structure nodulaire, voire pisolitique au sommet de l'horizon; entre les blocs la terre fine est orangée et argileuse;
- un horizon nodulaire tacheté à consistance de carapace, prolongeant la cuirasse latéralement sur les replats et au sommet de l'interfluve;
- un horizon nodulaire meuble, à nodules ferrugineux et matrice argileuse orangé, qui coiffe la cuirasse fragmentée et la carapace;
- un horizon argileux meuble, jaune-orangé.

Au total, grâce à cette coupe, on peut distinguer cinq faciès ferrugineux différents qui se succèdent verticalement et latéralement à partir d'une cuirasse massive : une cuirasse à faciès nodulaire, un faciès pisolitique, une carapace nodulaire et enfin un horizon nodulaire à nodules libres.

IV. CARACTÈRES PÉTROGRAPHIQUES DES DIFFÉRENTS FACIÈS FERRUGINEUX. — La **cuirasse massive** présente (*fig. 3*) un fond brun-rouge très induré avec des passées très diffuses rouge violacé moins consistantes et quelques plages jaune clair meubles centimétriques. Le fond brun-rouge est essentiellement hématitique, alors que les domaines jaune clair sont kaolinitiques et goethitiques (*table*).

TABLEAU
Composition minéralogique des principaux faciès.
Mineralogical composition of the main facies.

Faciès		Kaolinite	Quartz	Gibbsite	Hématite	Goethite
<i>Horizon nodulaire meuble :</i>						
Terre fine inter-nodulaire	T _f	+++	++	ε	ε	+
Taches rouge-orangé	T _a	+++	++	–	+	ε
Nodules brun-jaune	N ₅	+	–	–	+	++++
Nodules brun	N ₄	+	ε	–	++++	+
<i>Carapace nodulaire tachetée :</i>						
Nodules brun	N ₃	+	–	–	++++	+
Matrice inter-nodulaire jaune	D _c D _i D _s	+++	++	–	–	+
<i>Ponts inter-nodulaires</i>						
rouge-orangé	I _o	+++	++	–	+	ε
<i>Ponts inter-nodulaires</i>						
brun-orangé	I _b	++	++	–	++	ε
<i>Ponts inter-nodulaires</i>						
brun-rouille	I _r	++	ε	–	+++	+
<i>Cuirasse pisolitique :</i>						
Cortex brun-jaune	C _x	+	–	–	+	++++
Nucléus brun	N ₂	+	–	–	++++	+
<i>Cuirasse nodulaire :</i>						
Nodules brun	N ₁	+	–	–	++++	+
<i>Ciment inter-nodulaire</i>						
brun-rouge	F ₂	++	ε	–	+++	+
<i>Cuirasse massive :</i>						
Domaines brun-rouge	F ₁	+	–	–	+++	+
Domaines jaune clair	D _{ii}	++++	+	ε	–	+

–, non identifiable; ε, traces; +, peu abondant; ++, assez abondant; +++, abondant; +++++, très abondant.

–, non identified; ε, traces; +, poorly represented; ++, represented; +++, abundant; +++++, very abundant.

Microscopiquement, le fond brun-rouge présente un plasma ferrugineux opaque avec des quartz à incrustations noires ferrugineuses, très corrodés et flottant souvent dans des cavités micrométriques. Les domaines argilo-ferrugineux jaune clair consistent en un plasma argilasépique très biréfringent à kaolinite et goethite dans lequel sont disséminés des quartz limpides et à contours réguliers.

La **cuirasse nodulaire** fait apparaître des volumes nodulaires bruns et très indurés, de 1 à 2 cm de diamètre, cimentés par un fond brun-rouge identique à celui décrit dans la

Fig. 3. — La cuirasse massive.
Fig. 3. — *The massive duricrust.*

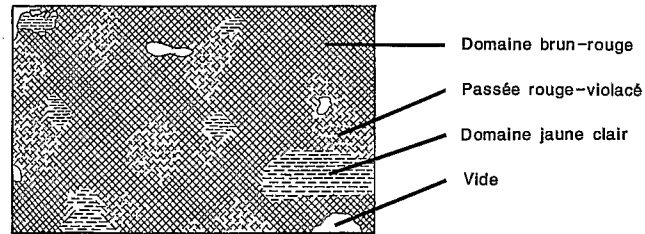


Fig. 4. — La cuirasse nodulaire.
Fig. 4. — *The nodular duricrust.*

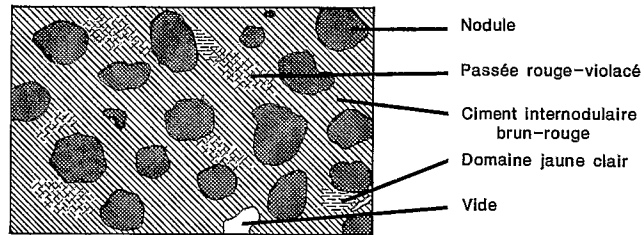
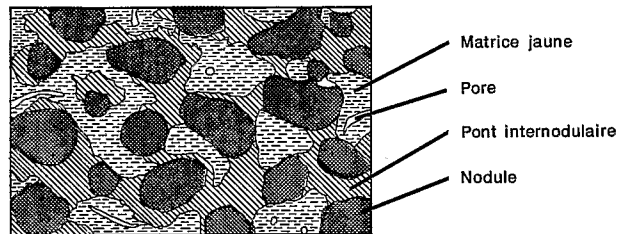


Fig. 5. — La carapace nodulaire tachetée.
Fig. 5. — *The mottled soft nodular ironcrust.*



0 2cm

cuirasse massive (fig. 4). Le passage de la cuirasse massive à la cuirasse nodulaire se fait sur 1 m, les nodules apparaissant d'abord sous forme de volumes à contours diffus. Les nodules sont plus nettement hématitiques que ne l'était le fond brun-rouge hématitique de la cuirasse massive. Le fond brun-rouge de la cuirasse nodulaire contient un peu plus de kaolinite (tableau). Microscopiquement, les nodules hématitiques présentent un plasma opaque et dense, sans quartz avec seulement quelques vides de dissolution.

La **cuirasse pisolitique** n'est bien représentée qu'au sommet de l'interfluve. Elle est constituée de pisolites centimétriques à fin cortex brun-jaune, cimentés par un fond matriciel brun-rouge. Le fond brun-rouge est celui observé sur les précédents faciès de la cuirasse. Le nucleus des pisolites est fortement hématitique comme l'étaient les nodules. Par contre, le cortex est essentiellement goethitique (tableau).

Autour de blocs de cuirasse à faciès nodulaire, on observe un matériau clair, tacheté, cohérent, moins dur que la cuirasse, à nombreux nodules ferrugineux; il s'agit de la **carapace nodulaire**. Les nodules de cette carapace sont hématitiques et identiques à ceux

de la cuirasse nodulaire. Entre les nodules, la matrice est de couleur et de consistance très hétérogènes. On y observe des domaines ferrugineux constituant des ponts entre les nodules, et entre ces ponts, une matrice jaune (*fig. 5*).

La matrice jaune est friable mais non plastique. Elle est kaolinitique, sans hématisation et contient un peu de goéthite. Au microscope elle est hétérogène, et regroupe en fait trois types de matériaux : (a) des domaines jaune sombre biréfringents, peu poreux, pauvres en squelette, contenant des îlots de plasma opaque rouge-noir à rares quartz « flottants »; (b) des ferriargilanes jaune sans quartz; (c) des domaines jaune clair très biréfringents, ayant les mêmes caractéristiques que les domaines clairs de la base de la cuirasse massive.

Les ponts ferrugineux sont à hématisation et à kaolinite (tableau). Ils font apparaître une gamme continue de couleur allant du brun-rouille au contact des nodules, au rouge-orangé au cœur des plages inter-nodulaires. La dureté varie parallèlement à la couleur : les parties brun-rouille sont indurées, les parties rouge-orangé sont peu indurées. Au microscope, l'ensemble présente un squelette quartzique à quartz très corrodés à incrustations noires ferrugineuses.

Dans l'**horizon nodulaire** enfin, les nodules sont emballés dans une matrice argileuse meuble, principalement constituée de kaolinite et de quartz. Au contact avec les nodules, on observe des taches rouges et cohérentes, d'épaisseur < 1 mm, formant des enveloppes discontinues autour des nodules. Elles correspondent à un léger enrichissement en hématisation. Les nodules ont de 1 à 2 cm de diamètre; ils sont très indurés, bruns et hématisés; quelques rares nodules brun-jaune sont goéthitiques.

V. GÉOCHIMIE. — Les analyses chimiques ont été faites, soit sur des échantillons moyens (macro-analyses), soit par microsonde sur plaques minces (microanalyses). Sur

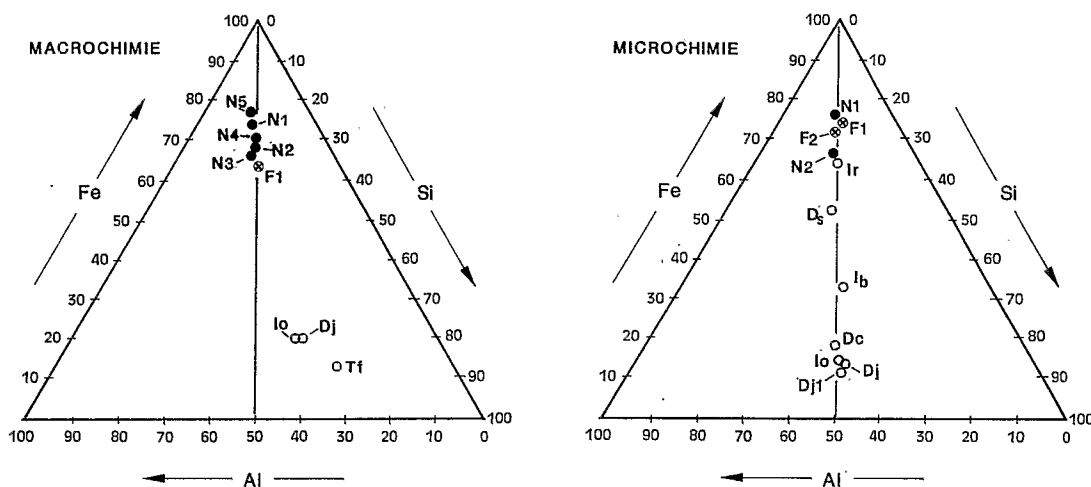


Fig. 6. — Composition chimique des matériaux dans les triangles Al-Si-Fe.
Signification des symboles : voir tableau.

Fig. 6. — Chemical composition of the materials in ternary diagram Al-Si-Fe:
average composition (macrochemistry), microprobe composition (microchemistry). Symbols: see table.

les diagrammes triangulaires Fe-Si-Al (*fig. 6*), la plupart des points s'alignent sur une droite correspondant à un rapport Si/Al constant, voisin de 1; leur position sur la droite dépend donc uniquement des proportions relatives de fer et de kaolinite dans l'échantillon. Seuls les points correspondant aux résultats des macroanalyses des domaines jaune clair

(Dj), des ponts inter-nodulaires rouge-orangé (lo) de la carapace nodulaire, et de la terre fine (Tf) de l'horizon nodulaire meuble s'écartent sensiblement de cette droite. Ce décalage est dû à la présence de quartz dans ces matériaux.

Sur les échantillons totaux, on constate une légère augmentation du fer lorsqu'on passe du fond brun-rouge F1 de la cuirasse massive aux phases nodulaires N.

En microanalyse, l'appauvrissement en fer apparaît prononcé mais progressif lorsqu'on passe des matériaux F1, F2, N1 des cuirasses à la matrice jaune, domaines jaune sombre (Ds), jaune clair (Dj) et jaunes cutaniques (Dd), puis aux ponts inter-nodulaires, brun rouille (lr), brun orangé (lb) et rouge orangé (lo), de la carapace nodulaire.

Il y a donc d'abord redistribution du fer dans la cuirasse, les nodules devenant plus riches en fer que le ciment inter-nodulaire, puis déferruginisation progressive des matériaux inter-nodulaires au sein de la carapace nodulaire.

VI. DISCUSSION ET INTERPRÉTATION. — La cuirasse décrite est donc initialement hématitique et massive, comme cela est couramment observé en zone intertropicale (Nahon, 1976; Ambrosi et Nahon, 1986; Yongué, 1986).

Progressivement, en remontant vers le haut des profils, la cuirasse prend un faciès nodulaire, quelquefois pisolitique. Elle demeure ici essentiellement hématitique.

La cuirasse nodulaire fait place graduellement à un matériau tacheté à consistance de carapace. Ce matériau est constitué de nodules hématitiques, reliés entre eux par des ponts ferrugineux hématitiques, et d'une matrice meuble qui provient de parties du ciment inter-nodulaire ayant subi une goethitisation, de ferriargilanes formés dans les vides de dissolution du ciment inter-nodulaire, et du matériau des domaines jaunes qui existaient déjà à la base de la cuirasse massive.

Les ponts ferrugineux sont des reliques du ciment inter-nodulaire hématitique, ayant échappé à la goethitisation. Ils demeurent indurés et assurent le maintien de la charpente initiale de la cuirasse. Vers le sommet des profils, ils se déferruginisent et perdent leur cohésion. Ils sont alors le siège de phénomènes de pédoturbation qui vont provoquer l'effondrement des structures initiales de la cuirasse. On trouve la trace de ces ponts sous forme de taches rouges au contact des nodules à la base de l'horizon meuble nodulaire.

Les mécanismes de dégradation d'une cuirasse ferrugineuse hématitique nodulaire en carapace, puis en horizon meuble à nodules sont donc ici les suivants :

1° goethitisation par plages du ciment inter-nodulaire; le nouveau plasma n'est pas induré;

2° déferruginisation progressive du réseau hématitique résiduel qui forme des ponts rigides entre les nodules;

3° pédoturbation qui débute dans les plages goethitisées et qui, passé un certain degré de déferruginisation, détruit les ponts hématitiques. A ce moment, l'architecture initiale de la cuirasse s'effondre et il y a homogénéisation des matrices meubles. Le résultat final consiste en l'individualisation d'un matériau argileux à kaolinite, goethite et très peu d'hématite.

Le bilan de cette dégradation se traduit par une perte en fer, une hydratation de l'hématite en goethite (Schwertmann, 1971; Didier, 1983; Beauvais et Tardy, 1991) et un enrichissement (en partie par accumulation relative, en partie par transferts pédobiologiques) de kaolinite.

VII. CONCLUSION. — Il apparaît ainsi que les horizons nodulaires meubles, qui sont omniprésents dans les sols d'Afrique Centrale, peuvent se former par altération *in situ*

d'une cuirasse nodulaire qui elle-même dérive d'une cuirasse massive et hématitique. Cette dégradation met en œuvre deux évolutions parallèles : d'une part une déferruginisation consécutive à la dissolution de l'hématite et d'autre part une transformation de l'hématite en goethite sans déferruginisation.

Note remise le 26 janvier 1993, acceptée après révision le 24 mars 1993.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- J. P. AMBROSI et D. NAHON, Petrological and geochemical differentiation of lateritic iron crust profiles, *Chem. Geol.*, 57, 1986, p. 371-393.
- A. BEAUVAIS et Y. TARDY, Formation et dégradation des cuirasses ferrugineuses sous climat tropical humide à la lisière de la forêt équatoriale, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 313, série II, 1991, p. 1539-1545.
- G. BOCQUIER, J. P. MULLER et B. BOULANGÉ, Les latérites : connaissance et perspectives actuelles sur les mécanismes de leur différenciation, *Livre jubilaire de l'AFES*, 1984, p. 123-138.
- P. DIDIER, Paragenèses à oxydes et hydroxydes de fer dans les bauxites et les cuirasses ferrugineuses, *Thèse 3^e cycle*, Univ. Poitiers, 1983, 150 p.
- D. MARTIN, Géomorphologie et sols ferrallitiques dans le Centre Cameroun, *Cah. ORSTOM*, sér. pédol., V, (1), 1967, p. 189-218.
- D. MULLER, G. BOCQUIER, D. NAHON et H. PAQUET, Analyses des différenciations minéralogiques et structurales d'un sol ferrallitique à horizons nodulaires du Congo, *Cah. ORSTOM*, sér. pédol., XVII, (2), 1981, p. 87-109.
- D. NAHON, Cuirasses ferrugineuses et encroûtement calcaires au Sénégal Occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie, structures, relais et coexistence, *Mém. Sci. Géol.*, Strasbourg, 44, 1976, 232 p.
- U. SCHWERTMANN, Transformation of hematite to goethite in soils, *Nature*, London, 232, 5313, 1971, p. 624-625.
- G. STOOPS, Micromorphology of some characteristic soils of the lower Congo (Kinshasha), *Pédologie*, 18, 1968, p. 110-149.
- R. YONGUÉ, Contribution à l'étude pétrologique de l'altération et des faciès de cuirassement ferrugineux des gneiss migmatitiques de la région de Yaoundé, *Thèse de 3^e cycle*, Univ. Yaoundé, 1986, 214 p.

D. B. : *Faculté des Sciences, Université de Yaoundé, BP n° 812, Yaoundé, Cameroun;*

B. V. : *ORSTOM, 72, route d'Aulany, 93143 Bondy Cedex, France.*