

Formation et dégradation des cuirasses ferrugineuses sous climat tropical humide, à la lisière de la forêt équatoriale

Anicet BEAUVAIS et Yves TARDY

Résumé — Dans la région très cuirassée du Haut-Mbomou en Centrafrique, on étudie le démantèlement géochimique des cuirasses ferrugineuses à la lisière de la forêt équatoriale. En climat tropical contrasté à tendance humide, il existe sous forêt des zones où les cuirasses à hématite et kaolinite se dégradent, et où des sols ferrallitiques à goéthite et gibbsite se forment sous l'effet de l'hydratation et de la réduction.

Degradation features of iron duricrusts under tropical humid climate at the edge of the equatorial rain forest

Abstract — In the highly lateritic Haut-Mbomou area in Central Africa, the geochemical degradation of iron duricrusts is studied at the edge of the equatorial forest. In tropical contrasted humid climate under forest, the degradation of hematite and kaolinite iron-rich duricrusts and the formation of ferrallitic soils made of goethite and gibbsite operate under hydration and reduction effects.

Abridged English Version — In the southeastern part of the Central African Republic close to the equatorial rain forest, the Haut-Mbomou area exhibits old and thick lateritic profiles all capped by iron duricrusts, which, however, have been degraded within the forested areas ([7], [8], [27]). The climate is humid tropical with 3 months of dry season. On average and per year, the rainfall is about 1,600 mm/yr., the temperature is close to 25°C and the relative humidity of the air is on the average around 80%. The parent-rocks are amphibolites and amphiboloschists [7].

This lateritic landscape consists of three iron duricrust systems [27], which present domains of iron duricrust degradation. One distinguished (1) high plateaus at altitudes of 650 m, (2) slopes between 640 m and 610 m, and (3) plateaus at altitude of 600 m. Patches and rings of forest develop respectively in the core of the plateaus, at the edges of the high plateaus and the uppermost part of the slopes, and in the valleys. In these forested sites, the iron duricrusts are destroyed and replaced by soft micronodular red soils.

The optimal stage of the iron duricrust formation shows a close association of the two poorly hydrated and dehydrated minerals: kaolinite and hematite ([14] to [16], [20]), [26], [37]). On the other hand, the surface gritty layer which is ubiquitous over most iron duricrust surfaces of Africa ([1] à [4], [19]), shows the association of two hydrated minerals: goethite and gibbsite.

The dismantling of the iron duricrusts occurs either at the top of most of the profiles covered by savannah [3], or within the iron duricrust profiles covered by forest (*Fig. 1 a*). Hydration induces the transformation of hematite into goethite and the transformation of kaolinite into gibbsite (*Fig. 2*). Furthermore, the proportion of kaolinite increases in the micronodular soft matrix but not in the iron duricrust, so that an important amount of iron is leached out (*Fig. 3*). Obviously, the relative loss of iron is due to a decrease of Eh, as a result of growth forest.

Thus, under humid tropical climates, iron duricrusts are both formed and degraded. In all the iron duricrust profiles forming under tropical contrasted climate, local hydration involves the formation of a surficial pisolitic layer ([3], [33]), while local dehydration favours

Note présentée par Georges MILLOT.

the iron duricrust regeneration in the deep nodular layer. Under forest, the iron duricrust dismantling is mostly due to hydration, reduction and leaching of iron.

In the studied area, the high plateaus are nibbled away and tend to disappear while the lowermost part of slopes and the low plateaus are reinforced by lateral accumulations of iron lost from the rings of dismantling located above.

Consequently, under tropical contrasted climate, landscapes are covered by savannah, and iron duricrusts are forming. If the climate becomes more humid, rings and tongues of forest progress, hydration and reduction increase, chemical dismantling accelerates and takes precedence over the formation of the iron duricrust. The iron duricrusts are relayed by soft ferrallitic soils. If the climate becomes more arid, rings and tongues of forest regress and both the chemical dismantling and the lateral restorage of iron duricrusts slow down. Surficial hydration and internal dehydration are the dominant mechanisms of iron duricrust vertical dynamics.

Thus, iron duricrust formation appears as limited towards the arid zone by the formation of montmorillonite soils and towards the humid zone by the formation of goethite and gibbsite-rich ferrallitic soils. The iron duricrust dismantling therefore reflects more humid climatic conditions. All in all, the variety of iron duricrusts facies results from climatic changes caused by the migration of continental plates during the Tertiary era [26].

I. INTRODUCTION. — En Afrique sous climat tropical à saisons contrastées, les profils d'altération latéritique sont souvent coiffés d'une cuirasse ferrugineuse ([1] à [4]). Dans les régions du sahel au Nord en climat tropical à tendance aride [4], le démantèlement des cuirasses résulte de processus d'érosion mécanique [21], qui découpent le paysage et isolent des buttes cuirassées étagées ([1], [9] à [15], [18], [19]). A l'inverse, dans les régions de forêt, au Sud, sous climat tropical perhumide ([5], [6]), le démantèlement des cuirasses résulte de processus d'érosion chimique ([22] à [25]). Entre ces deux domaines de démantèlement où les cuirasses apparaissent comme des reliques, témoins des paléoclimats [26], le cuirassement ferrugineux perdure sous des climats tropicaux contrastés [1], entre les isohyètes 1 200 et 1 800 mm. C'est le cas dans le Haut-Mbomou, dans le SE du Centrafrique, où le cuirassement est général ([7], [8]), à l'exception des domaines de forêt où la cuirasse se démantèle ([8], [27]). D'une manière générale, le substratum est constitué d'amphibolite et amphibolo-schistes [7].

A la différence des régions voisines du centre et de l'Est de l'Afrique [2], le Haut-Mbomou enclavé au cœur du craton africain est resté tectoniquement stable depuis la fin du Crétacé, et semble n'avoir subi que l'influence des changements climatiques du Tertiaire, consécutifs à la lente migration vers le Nord de la plaque africaine [26]. Située à la charnière entre la forêt humide au Sud et les savanes sèches au Nord, elle constitue une zone clé pour l'étude des processus de latéritisation sous l'influence des changements climatiques.

II. LE PAYSAGE CUIRASSÉ DU HAUT-MBOMOU ET SES ZONES DE DÉMANTÈLEMENT. — La région du Haut-Mbomou est soumise à un climat tropical contrasté à tendance humide, caractérisé en moyennes annuelles par une pluviosité de 1 600 mm, une température de 25°C, une humidité relative de l'air de 80 % (comprise entre 50 et 95 %), et trois mois de saison sèche [30]. Le paysage est composé de trois systèmes cuirassés ([8], [27]) : des plateaux élevés, à 650 m d'altitude moyenne, armés d'une cuirasse à hématite et kaolinite, et dépourvue de quartz; des versants en contre bas, situés entre 630 et 600 m, et couverts

d'une cuirasse plus riche en goethite et gibbsite, moins riche en kaolinite et plus quartzreuse que celle des plateaux élevés; des bas-plateaux à l'altitude moyenne de 600 m, recouverts d'une cuirasse moins ferrugineuse, mais plus riche en goethite [27]. Chacun des trois systèmes cuirassés, possède un ou deux domaines de démantèlement localisés sous forêt au cœur et en bordure des plateaux, ou dans les vallées. Les aires forestières où le démantèlement est opérant se développent à la périphérie de zones endoréiques, inondées à la saison pluvieuse, ou sur des surfaces concaves à l'amont des versants.

III. CARACTÈRES PÉTROGRAPHIQUES. — Outre la présence d'horizons gravillonnaires superficiels, dans la forêt, la cuirasse se démantèle en blocs et nodules emballés dans une matrice rouge, argilo-sableuse et micro-agrégée (agrégats de 3-4 mm de diamètre). Au microscope, les agrégats constituent un assemblage de micronodules de taille comprise entre 10 et 100 μm , séparés par des vides connectés de taille équivalente [28].

On examine ici un profil cuirassé démantelé typique, situé sur un plateau élevé, et constitué de cinq horizons (*fig. 1 a*), décrits de haut en bas.

— Un horizon humifère (I), de 0,1 à 0,7 m d'épaisseur, renfermant des nodules ferrugineux hématitiques de taille centimétrique, à cerne brun périnodulaire, goethitique.

— Une cuirasse ferrugineuse (II) de 1 à 2 m d'épaisseur, fragmentée, et parcourue de nombreux joints de circulation, entre lesquels se forme un sous-horizon meuble nodulaire.

— Un horizon nodulaire meuble (III) de 7 à 9 m d'épaisseur, constitué de nodules centimétriques, et d'une matrice fine, argilo-ferrugineuse rouge, à structure polyédrique se débitant en agrégats de 3 à 4 mm constitués de micronodules (10-100 μm). Les nodules sont plus gros au sommet de l'horizon (plusieurs centimètres) qu'à la base, et ils ont les mêmes caractères pétrographiques que la cuirasse.

Au microscope, les nodules hématitiques présentent des bords déchiquetés et ourlés d'une frange de déferruginisation jaune à goethite et kaolinite (*fig. 1 b*). Il sont aussi fragmentés par des cortex rubanés de goethite (*fig. 1 b*). La matrice micronodulaire est constituée de domaines orientés jaunes à kaolinite et goethite, et de domaines orangé à kaolinite, goethite et hématite (*fig. 1 b*). Sous l'effet de l'activité biologique, elle est pédoturbée, très poreuse et bien drainée, ce qui stimule la néoformation de cristaux automorphes de gibbsite de 10 à 20 μm dans les vacuoles de 50 à 200 μm (*fig. 1 b*).

— Au cœur de cet horizon nodulaire, s'individualise un sous-horizon argilo-ferrugineux meuble (IV) dépourvu de nodules (*fig. 1 a*). La matrice est micronodulaire et parcourue de radicules et de canalicules d'origine biologique (vers de terre, termites...).

— A la base de l'horizon nodulaire, les nodules sont coalescents, et forment des domaines décimétriques de carapace ferrugineuse (V) [27].

IV. MINÉRALOGIE ET GÉOCHIMIE. — Les cuirasses et surtout les nodules qui sont en moyenne les plus ferrugineux sont riches en hématite et en kaolinite. En revanche, les matrices sont essentiellement riches en gibbsite, contiennent plus de goethite et peuvent renfermer beaucoup de quartz, qui apparaît en grains fins. Il est envisagé que ce quartz ait été enrichi soit par concentration relative résultant de la fonte de la cuirasse, soit par concentration absolue, remonté par les termites depuis les horizons argileux sous-jacents [16], ou transporté latéralement sur de courtes distances lors de processus d'érosion. Quoi qu'il en soit, les rapports hématite/goethite et kaolinite/gibbsite diminuent sensiblement des cuirasses aux matrices en même temps que le rapport $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (*fig. 2*), ce qui est caractéristique des processus d'hydratation, et de dissolution par réduction sous les effets combinés de l'activité de l'eau et de la matière organique

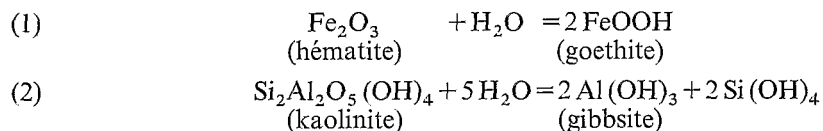
abondante sous forêt. Le démantèlement des cuirasses ferrugineuses du haut-Mbomou est donc avant tout géochimique. On enregistre ainsi un appauvrissement en fer et un enrichissement relatif en aluminium et en silicium dans la matrice (*fig. 3*) qui s'enrichit par ailleurs en magnésium et en potassium, ce qui est pour le magnésium, symptomatique de l'activité termitique [6].

V. RÔLE DE L'ACTIVITÉ DE L'EAU. — L'activité de l'eau avec la température et les pressions de CO₂ et d'O₂, sont les agents régulateurs des processus de transformations minéralogiques dans des profils d'altération latéritique ([32] à [37]).

L'activité de l'eau varie au cours du temps avec l'alternance des saisons sèches et humides, et dans l'espace le long des profils d'altération et en tous lieux du paysage.

Dans les profils latéritiques formés sous climat tropical contrasté, l'activité de l'eau est égale à 1 dans la zone de battement de la nappe; elle est inférieure à 1 dans le milieu du profil au niveau du creux hydrique [36]; en surface, elle est égale à l'humidité relative de l'air fixée par le climat ambiant.

Dans les profils du Haut-Mbomou, deux types de réactions géochimiques contrôlent les différenciations minéralogiques :



Tous les profils étudiés, présentent dans leur partie médiane un horizon induré continu ou discontinu riche en hématite et en kaolinite, ce qui prouve l'existence d'un creux hydrique permanent caractérisé par une activité de l'eau inférieure à 1 en milieu non saturé sous climat tropical contrasté [36]. A l'inverse, la base ou le sommet de tels profils sont souvent saturés d'eau, et constituent des sites privilégiés pour la formation des faciès goethitiques.

Sous climat tropical contrasté à tendance humide, le domaine du creux hydrique tend à s'amincir voire à disparaître partout où la nappe affleure à la saison des pluies, et partout où se développe la forêt. Ces changements pédoclimatiques sont responsables du démantèlement géochimique de la cuirasse. Il se traduit par l'hydratation de l'hématite qui se transforme en goethite, et par celle de la kaolinite qui se désilicifie et se transforme finalement en gibbsite.

VI. CONCLUSIONS. — Une cuirasse ferrugineuse est constituée d'un assemblage de minéraux ferrugineux, la goethite étant plus hydratée que l'hématite, et de minéraux alumineux, la gibbsite étant plus hydratée que la kaolinite.

Dans le Haut-Mbomou en Centrafrique, les maxima du cuirassement sont observés sur les plateaux élevés pour des teneurs en fer de l'ordre de 55 %, et pour une composition minéralogique moyenne de 30 % de kaolinite, 10 % de gibbsite, 20 % de goethite et 40 % d'hématite, d'où un rapport RHG (100* hématite/(hématite + goethite) de l'ordre de 70 % ([8], [14], [27])). La maturité du cuirassement se mesure donc (1) à la richesse en fer, avec de fortes proportions d'hématite par rapport à la goethite, (2) à la dissolution totale du quartz, (3) au maintien d'une certaine quantité de kaolinite en association stable avec l'hématite [36].

Le démantèlement des cuirasses correspond à la déstabilisation par hydratation de l'association kaolinite-hématite stable en milieu peu hydraté et oxygéné [36]. Il se produit de trois manières : selon une voie dite normale, en climat tropical à saisons contrastées

sous des pluviosités de 1 200 à 1 600 mm/an, et selon deux voies limites, l'une caractéristique des climats à tendance aride sous des pluviosités inférieures à 1 000 mm/an, l'autre caractéristique des climats à tendance humide sous des pluviosités supérieures à 1 600 mm/an.

La première voie, normale, correspond à la formation des horizons gravillonnaires de surface que l'on trouve au toit de tous les profils cuirassés. La dégradation de la cuirasse résulte toujours de l'hydratation de l'hématite et de sa transformation en goethite, et dans certains cas de celle de la kaolinite et de sa transformation en gibbsite. Cependant, plus bas, la cuirasse se reconstitue à partir des éléments (fer, aluminium, silicium...) lixiviés dans l'horizon de dégradation sus-jacent. Au total, la surface cuirassée s'enfonce sur elle-même ([3], [29]).

La seconde voie, limite, est celle que décrit Leprun [4] en climat semi-aride. La cuirasse se dégrade depuis la base de l'horizon vers le sommet. Il se développe un horizon lessivé (A_2) sous cuirasse, et un horizon d'altération smectitique sous la lithomarge kaolinitique à la base du profil.

La troisième voie, limite, est celle du démantèlement des cuirasses en forêt sous des pluviosités moyennes annuelles supérieures ou égales à 1 600 mm, décrit dans le Haut-Mbomou en Centrafrique, après qu'il le fut ailleurs en Afrique centrale ([5], [6], [22]) et au Brésil [25]. Dans un tel environnement, le démantèlement des cuirasses résulte des effets conjugués de l'humidité, de la décomposition de la matière organique et de la respiration racinaire qui provoquent hydratation et réduction, responsables de la transformation de l'hématite en goethite, de la kaolinite en gibbsite et de la dissolution sélective du fer par rapport à l'aluminium. Au total, partout où se développe la forêt, un système de sols rouges ferrallitiques micronodulaires progresse dans tous les sens aux dépens des anciennes couvertures cuirassées formées jadis sous climat tropical plus contrasté.

Finalement, ce sont les variations climatiques du sec vers l'humide, au cours de la migration des plaques continentales du Sud vers le Nord [26] qui provoquent les changements de régime hydrique dans les profils d'altération latéritique [36]. Au total, le paysage évolue vers d'autres formes en équilibre avec les nouvelles conditions climatiques. Ainsi, en allant vers le Sud ou vers l'humide, aux formes anciennes des plateaux tabulaires cuirassés se substituent des reliefs plus jeunes et non cuirassés de collines en « demi-orange » qui renferment souvent les reliques démantelées des anciennes cuirasses [6].

Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'Opération Latérites du Programme PIRAT de l'I.N.S.U. et de l'ORSTOM. Les auteurs remercient J. J. Trescases pour sa lecture critique du manuscrit.

Note remise le 11 juillet 1991, acceptée après révision le 28 octobre 1991.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. MAIGNIEN, *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 16, 1958, 239 p.
- [2] M. J. MCFARLANE, *Laterite and landscape*, Academic Press, Londres, 1976, 151 p.
- [3] D. NAHON, *Mém. Sci. Géol.*, 44, 1976, 232 p.
- [4] J. C. LEPRUN, *Mém. Sci. Géol.*, 58, 1979, 224 p.
- [5] D. MARTIN, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Paris, 5, 2, 1966, p. 189-218.
- [6] A. NOVIKOFF, *Thèse Sci.*, U.L.P., Strasbourg, 1974, 248 p.
- [7] Y. BOULVERT, *Coll. Colloques et Sémin. Région., Latérites*, ORSTOM, Paris, 1987, p. 93-107.
- [8] A. BEAUVAIS et D. MAZALTARIM, *Sci. Géol. Bull.*, 41, 1, 1988, p. 47-69.
- [9] R. BOULET, *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, VIII, 3, 1970, p. 245-272.
- [10] J. C. LEPRUN, *Bull. liaison ORSTOM, Thème B*, 2, 1071, p. 39-53.

- [11] J. C. LEPRUN, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 275, série D, 1972, p. 1207-1210.
 [12] B. KALOGA, *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, XIV, 4, 1976, p. 299-319.
 [13] J. L. BOEGLIN et D. MAZALTARIM, *Sci. Géol. Bull.*, 42, 1, p. 27-44.
 [14] D. MAZALTARIM, *Thèse*, Univ. Strasbourg, 1989, 264 p.
 [15] J. L. BOEGLIN, *Thèse*, Univ. Strasbourg, 1990, 187 p.
 [16] Ph. FREYSSINET, *Thèse*, Univ. Strasbourg, 1990, 261 p.
 [17] J. C. MESTRAUD, *Mém. Bur. Géol. Min.*, 60, 1982, 185 p.
 [18] P. MICHEL, *Mém. ORSTOM*, 63, 1973, 752 p.
 [19] G. GRANDIN, *Mém. ORSTOM*, 82, 1976, 349 p.
 [20] Y. TARDY, D. MAZALTARIM, J. L. BOEGLIN, C. ROQUIN, J. C. PION, H. PAQUET et G. MILLOT, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 307, série II, 1988, p. 1765-1772.
 [21] J. C. LEPRUN, *Sci. Géol. Bull.*, 30, 1977, p. 265-273.
 [22] D. MARTIN, Y. CHATELIN, J. COLLINET et E. GUICHARD, *Les sols du Gabon, Carte au 1/200 000 et Notice explicative n° 92*, ORSTOM, Paris, 1981, 66 p.
 [23] B. VOLKOFF, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 21, 4, 1986, p. 225-236.
 [24] A. J. MELFI, G. PEDRO et B. VOLKOFF, *R. Bras. Ciencias Solo*, 3, 1979, p. 47-54.
 [25] D. NAHON, A. MELFI et C. N. CONTE, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 308, série II, 1989, p. 755-760.
 [26] Y. TARDY, A. MELFI et I. VALETON, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 306, série II, 1988, p. 289-295.
 [27] A. BEAUVAIS, *Géodynamique*, ORSTOM, Paris, 4, 2, 1989, p. 71-91.
 [28] A. CHAUVEL, G. BOCQUIER et G. PEDRO, *Sci. Géol. Bull.*, 30, 4, 1977, p. 255-264.
 [29] D. NAHON et G. MILLOT, *Sci. Géol. Bull.*, 30, 4, 1977, p. 275-282.
 [30] P. FRANQUIN, R. DIZIAIN, J. P. COINTEPAS et Y. BOULVERT, *Agroclimatologie du Centrafrique*, ORSTOM, éd., Paris, 1988, 522 p.
 [31] Y. BOULVERT, *Notice de la Carte Phytogéographique au 1/1 000 000*, ORSTOM, Paris, 1988, 131 p.
 [32] Ph. DIDIER, D. NAHON, B. FRITZ et Y. TARDY, *Mém. Sci. Géol.*, 71, 1, 1983, p. 35-44.
 [33] Y. TARDY et D. NAHON, *Am. J. Sci.*, 285, 1985, p. 865-903.
 [34] F. TROLARD et Y. TARDY, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 51, 1987, p. 945-957.
 [35] Y. TARDY et A. NOVIKOFF, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 306, série II, 1988, p. 39-44.
 [36] Y. TARDY, G. BARDOSSY et D. NAHON, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 307, série II, 1988, p. 753-759.
 [37] J. P. AMBROSI, *Thèse*, Univ. Poitiers, 1990, 379 p.

A. B. et Y. T. : *Institut français de Recherche scientifique pour le Développement en Coopération*,
 213, rue La Fayette, 75480 Paris Cedex 10.

A. B. : *Laboratoire de Pétrologie de la Surface*, 40, avenue du Recteur-Pineau, 86022 Poitiers Cedex;

Y. T. : *Centro de Energia Nuclear na Agricultura (C.E.N.A.)*, Université de Sao Paulo,
 C. P. 96, C.E.P. 13400, Piracicaba, S.P. Brésil.

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 1. — *a*. Développement d'un profil latéritique demantelé sur un plateau élevé du Haut-Mbomou (I : horizon humifère; II : horizon de cuirasse demantelée; III horizon nodulaire meuble; IV : horizon argilo-ferrugineux meuble sans nodules; V : carapace ferrugineuse; VI : horizon d'argile tachetée; d : joints de circulation; b : figure 1 b). *b*. Micromorphologie de nodules hématitiques en voie de dégradation.

Fig. 1. — *Development of a dismantled lateritic profile on a high plateau in the Haut-Mbomou* (I: humic layer; II: dismantled iron duricrust layer; III: nodular soft layer; IV: clay-ferruginous soft layer without nodules; V: soft iron duricrust; d: circulation joints; b: figure 1 b).

Fig. 2. — Augmentation simultanée de la goéthite et la gibbsite dans les faciès de démantèlement de la cuirasse à hématite et kaolinite.

Fig. 2. — *Simultaneous increase of goethite and gibbsite in dismantling facies of iron duricrust made of hematite and kaolinite.*

Fig. 3. — Lessivage préférentiel du fer par rapport à l'aluminium lors du démantèlement de la cuirasse ferrugineuse.

Fig. 3. — *Preferential leaching of iron with regard to aluminium during the iron duricrust dismantling.*

