

KONINKLIJK MUSEUM VOOR MIDDEN-AFRIKA — Tervuren, België Annales —
GEOLOGISCHE WETENSCHAPPEN — Vol. 107, 2002

**LES CUIRASSES LATERITIQUES ET AUTRES FORMATIONS
FERRUGINEUSES TROPICALES EXEMPLE DU HAUT KATANGA
MÉRIDIONAL**

Jean Alexandre

MUSÉE ROYAL DE L'AFRIQUE CENTRALE — Tervuren, Belgique Annales —
SCIENCES GÉOLOGIQUES — Vol. 107, 2002



DEPARTEMENT GEOLOGIE EN MINERALOGIE KONINKLIJK
MUSEUM VOOR MIDDEN-AFRIKA (K.M.M.A.)

*DÉPARTEMENT DE GÉOLOGIE ET DE MINÉRALOGIE MUSÉE
ROYAL DE L'AFRIQUE CENTRALE (M.R.A.C.)*

Leuvensesteenweg, 13
B-3080 Tervuren - België

S 32 2 769 52 11
Fax 32 2 769 56 38
E-mail : info@africamuseum.be
<http://www.africamuseum.be/>

Composition et layout par Magda Geyskens (M.R.A.C. Tervuren)
Imprimé chez n.v. Peeters s.a. (Herent, België)

COUVERTURE : Face : Bowal au nord de Mitwaba (fig. 60 dans le texte)
Dos : Crevasse dans cuirasse pisolithique (fig. 39 dans le texte)

© K.M.M.A. - M.R.A.C. - Tervuren

ISSN 0368-489X
VOL. 107
D/2002/0254/09

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos.....	IX
Korte Inhoud - Abstract.....	XI
1. Introduction	1
1.1. Un lexique	
1.2. La région étudiée et son relief	4
1.3. Le substratum et les altérites	4
1.4. Le profil, contexte des formations ferrugineuses.....	5
1.5. Sources consultées et observations réalisées	8
1.5.1. Les citations	8
1.5.2. Les observations.....	8
2. L'horizon bariolé	9
2.1. Introduction.....	9
2.1.1. Description.....	9
2.1.2. Vocabulaire	9
2.2. Profils en milieu sableux.....	9
2.2.1. Profil de Kiniamana.....	9
2.2.2. Profil de Kinkolobwe.....	10
2.2.3. Profil de la Kisa Moyal	10
2.2.4. Profil de la Ditanto.....	11
2.2.5. Discussion et conclusion.....	13
2.2.6. L'horizon pallide	13
2.3. Profils sur les roches précambriennes	14
2.3.1. Profil du Campus de la Kasapa.....	14
2.3.2. Profil de la Haute Luilu	15
2.3.3. Profil de dembos	15
2.3.4. Conclusion.....	16
2.4. Discussion et conclusion.....	16
2.4.1. Lanodulation.....	16
2.4.2. Relation avec la nappe aquifère.....	17
2.4.3. Les horizons bariolés en milieu sableux et sur roche précambrienne.....	17
2.4.4. Lessivage oblique	17
2.4.5. Etat du fer	18
2.4.6. Age	18
3. La stone-line ferrugineuse et l'horizon superficiel.....	19
3.1. Dénominations	19
3.1.1. Stone-line	19
3.1.2. Horizon superficiel.....	19
3.2. Analyse de quelques profils.....	19
3.2.1. Sur substratum précambrien.....	19
3.2.2. En milieu sableux.....	21
3.2.3. Sur terrasse fluviale.....	22
3.3. Epaisseur des niveaux	23
3.3.1. Horizon superficiel.....	23
3.3.2. Stone-line.....	23
3.4. Mise en place.....	24
3.4.1. Origine des éléments ferrugineux	24

3.4.2.	Processus intervenant dans la mise en place	24
3.5.	Occurrence	25
3.6.	Age et pérennité	26
4.	Les cuirasses. Leur structure	27
4.1.	Eléments de la macrostructure	27
4.1.1.	La matrice	27
4.1.2.	Les éléments figurés	27
4.1.3.	Les vides	27
4.1.4.	Les enduits	28
4.2.	Types de macrostructure	28
4.2.1.	Les critères	28
4.2.2.	Typologie	28
4.3.	Analyse d'échantillons	29
4.3.1.	Faciès massif	29
4.3.2.	Faciès vermiforme	31
4.3.3.	Faciès alvéolaire	35
4.3.4.	Faciès conglomératique	35
4.3.5.	Faciès bréchique	35
4.3.6.	Faciès lamellaire	37
4.3.7.	Faciès nodulaire	39
4.3.8.	Faciès gravillormaire	43
4.3.9.	Faciès pisolithique	45
4.4.	Conclusion sur les types de faciès	46
4.4.1.	Faciès massif	46
4.4.2.	Faciès vermiforme	47
4.4.3.	Faciès alvéolaire	49
4.4.4.	Faciès conglomératique	49
4.4.5.	Faciès bréchique	50
4.4.6.	Faciès lamellaire	50
4.4.7.	Les faciès nodulaire et gravillormaire	51
4.4.8.	Faciès pisolithique	52
5.	Les processus	55
5.1.	Les enduits ferrugineux	55
5.1.1.	Définitions	55
5.1.2.	Surfaces d'accueil	55
5.1.3.	Structure et composition	57
5.1.4.	Formation	59
5.2.	Mode de formation et déplacements des différents types de concrétion	63
5.2.1.	Les concrétions	65
5.2.2.	Les nodules et la nodulation	65
5.2.3.	Les imprégnations	66
5.2.4.	La libération des nodules	66
5.2.5.	Les gravillons	66
5.2.6.	Les fragments de cuirasse	66
5.2.7.	Les nodules pédorelictuels	67
5.2.8.	Les pisolithes	67
5.2.9.	Conclusion	68
5.3.	L'action des termites	68
5.3.1.	Historique	68
5.3.2.	Activités	69
5.3.3.	La bioturbation	69
5.3.4.	Formation de la matrice et des nodules pédorelictuels	70
5.3.5.	Le travail de la terre	70
5.3.6.	Les cuirasses termitiques	71

5.3.7. Le démantèlement des cuirasses.....	71
5.4. La formation des cuirasses sableuses.....	71
5.5. Les processus d'induration.....	73
5.5.1. Les degrés d'induration.....	73
5.5.2. Le siège de l'induration.....	73
5.5.3. Induration des éléments.....	73
5.5.4. Induration de l'ensemble.....	73
6. Les datations	75
6.1. Les critères	75
6.1.1. L'altitude.....	75
6.1.2. La nature des enduits ferrugineux	75
6.1.3. Critères secondaires.....	77
6.2. Cuirasses et dépôts corrélatifs	79
6.2.1. Les grès polymorphes	81
6.2.2. Le cailloutis des hauts plateaux.....	81
6.2.3. Les sables de types Kalahari (dits sables ocre)	81
6.2.4. Les dépôts de terrasse fluviale	83
6.2.5. Les enduits des cuirasses et les dépôts corrélatifs.....	83
6.3. Caractères intrinsèques des niveaux de cuirasses	84
6.3.1. Cuirasse la plus ancienne (n°1).....	84
6.3.2. Cuirasse intermédiaire (n°2)	84
6.3.3. Cuirasse principale (n°3).....	84
6.3.4. Cuirasse fin-Tertiaire (n°4)	85
6.4. Histoire géomorphologique du haut Katanga méridional	85
6.4.1. Le dépôt des grès polymorphes.....	85
6.4.2. Le niveau de Kisiba Salabwe.....	85
6.4.3. Le cailloutis des plateaux.....	88
6.4.4. La surface de Mitwaba.....	88
6.4.5. Le dépôt des sables ocre	88
6.4.6. La surface de Lubumbashi	88
6.4.7. La surface de Kyubo	89
6.4.8. Les formes quaternaires	89
6.5. Comparaison avec l'Afrique de l'Ouest	91
6.5.1. Les surfaces et niveaux de l'Afrique de l'Ouest	91
6.5.2. Position stratigraphique des cuirasse.....	93
6.6. Dégradation	95
6.6.1. Action mécanique.....	95
6.6.2. Action chimique	95
7. L'environnement.....	97
7.1. Le site	97
7.2. Le climat.....	98
7.2.1. Introduction	98
7.2.2. Le Quaternaire	98
7.2.3. Le Tertiaire	100
7.2.4. Comparaison entre le Quaternaire et le Tertiaire.....	101
7.2.5. La cuirasse pisolithique.....	102
7.2.6. Problèmes connexes	102
Synthèse.....	105
Jalons.....	112
Références	115

AVANT-PROPOS

A l'aube de la présente étude sur les cuirasses latéritiques, il y a de cela plus de quarante ans, le périple africain de trois spécialistes venait de se terminer et chacun s'était retiré sous sa tente, qui pour confronter les observations faites en commun à une thèse en voie d'achèvement, qui pour soumettre à une analyse approfondie au microscope polarisant les échantillons recueillis. Un premier auteur, R. Maignien, sous le concept de lessivage oblique, plaçait la genèse des cuirasses dans son contexte topographique. Il postulait un apport de fer nourrissant une accumulation absolue que D'Hoore distinguait définitivement des enrichissements par départ de parties pauvres en fer ou accumulation relative. Ces deux grands principes définitivement bien établis ne venaient guère en aide à un néophyte qui découvrait avec émerveillement le monde africain. L'observation des cuirasses, dans la complexité de ses structures et de sa minéralogie, pratiquée par le troisième, J. T. Alexander était mieux adaptée à ces premiers pas, encore que un peu trop détaillée pour une initiation.

Les premiers contacts avec l'Afrique ont rapidement imposé la vision omniprésente du termite non seulement dans le temps présent mais aussi dans des formations géologiques du passé où la géométrie de certains chenaux dans les cuirasses latéritiques n'est guère très différente de celle des galeries en activité. Les observations de Nye et de Heinzelin ont été, à l'époque, accueillies avec une certaine indifférence par un grand nombre d'auteurs traitant des stone-lines et par tout le monde sauf un (H. Erhardt) en ce qui concerne les cuirasses latéritiques.

Une autre évidence que le terrain fait apparaître, est la quasi-généralisation des enduits ferrugineux qui, dans leur continuité, couvrent la surface des cuirasses, leurs diaclases et les chenaux qui les minent. Au départ, la continuité de ces enduits avait été observée par D'Hoore, mais non reconnue comme telle: concrétions enrobées, pisolithes, chenaux étançonnés étaient cependant loin d'être des inconnus. Curieusement, les enduits de surface étaient presque complètement ignorés. Et c'est dommage, car ils se différencient selon l'âge et ont permis, en ce qui concerne le haut Katanga méridional, de confirmer les enseignements tirés de l'étagement des niveaux cuirassés et de leur position vis-à-vis de certains dépôts continentaux malheureusement mal datés.

Par ailleurs, les terrains sableux, moins sujets aux bioturbations des termites, ont conservé, quelquefois presque intacts, des profils originels qui laissent entrevoir les conditions dans lesquelles se sont formés les nodules que l'on va retrouver dans les stone-lines et dans les cuirasses.

Après le temps nécessaire mis à se poser les bonnes questions, ont commencé les analyses de laboratoire: dosage du fer, analyse de plaques minces et de surfaces polies et pour certains problèmes, observations au microscope électronique à balayage.

De nombreux retours sur le terrain ont permis de vérifier certaines hypothèses, d'étendre le domaine d'application de quelques principes et de préciser l'extension des niveaux cuirassés et de leurs dépôts corrélatifs.

La relecture des ouvrages essentiels dont l'excellente thèse de V. Eschenbrenner, a précédé la mise en chantier du texte définitif. Elle est venue conforter un certain nombre de déductions auxquelles les observations nous avaient conduits.

Dans les différentes phases de ce travail de longue haleine, nous avons pu bénéficier d'une aide innombrable - la mémoire est prise en défaut! - dans un grand nombre de domaines. La grande expérience de J. Lepersonne (M.R.A.C.) a guidé nos premiers pas. L'intendance des travaux sur le terrain a été assurée dès le début par L. et Y. Lemaire. Lors de nos déplacements, l'hospitalité nous a toujours été largement offerte par les entreprises minières (U.M.H.K. puis Gécamines, les cimenteries de Lubudi, les mines de Mitwaba), les grands élevages des plateaux (Kundelungu, &re\co sur les Bianco), plusieurs missions catholiques. Des avis et des renseignements importants nous ont été prodigués par des géologues (A. François, J. Bellière, P. Dumont, J. Cl. Icart, X. Van Caillie), par des biologistes (M. Streel, J. J. Symoens et F. Malaisse, pour les plantes; G. Goffinet, pour les termites), par des pédologues (C. Sijs, J. Aloni), par des préhistoriens (le père A. Anciaux de Faveau) et, bien sûr par des géomorphologues et géologues des terrains superficiels (J. De Ploey, M. De Dapper, G. Seret, J. Soyer et bien entendu S. Alexandre-Pyre).

Une grande partie des travaux de laboratoire ont été réalisés à l'Université de Liège : le dosage du fer et la confection des plaques minces au Service de Géomorphologie; les surfaces polies et leur analyse au Service de Géologie appliquée (Prof. P. Evrard et enfin E. Pirard) avec l'aide de A. Pierson; les observations et mesures semi-quantitatives au microscope électronique à balayage au Département de Zoologie (G. Goffinet) avec l'aide de Tshidibi Nyama ya Badi, ainsi qu'au Centre de Recherches Métallurgiques (A. Greday et J.C. Herman) et au Service de Palynologie (Prof. M. Streel). Les analyses des poudres (argiles et oxydes de fer) ont été soumises aux rayons X et à l'analyse thermo-pondérale sous la supervision du Prof. J. Thorez. Quant aux mesures de réflectances, elles ont été faites au Service de Géologie des Facultés Polytechniques de Mons (Prof. A. Beugnies).

Le retour sur un terrain de moins en moins accessible n'a été possible que grâce au dévouement de G. De Plaen et de A. Lequarré. Le texte définitif a été revu, en tout ou en partie par A. Demoulin, P. Alexandre, S. Alexandre-Pyre et J. Delhal. Les photographies sont dues à l'art de L. Lemaire, Ph. Gérienne, E. Warner, A. Pierson et M. Streel.

Dans ce travail, il a été fait appel à la bonne volonté d'un grand nombre de personnes dont beaucoup étaient déjà ou sont devenus des amis. Notre reconnaissance leur est acquise.

Jean M.N. Alexandre
Professeur Emérite à l'Université de Liège Ancien Professeur à l'Université
d'Elisabethville (Lubumbashi) Membre de l'Académie royale des Sciences
d'Outre-Mer de Belgique.

Laterietkappen en andere oppervlakkige tropische ijzerhoudende afzettingen. Voorbeeld van Zuidelijk Katanga

Onder de diverse oppervlakkige ijzerhoudende afzettingen hebben de laterietkappen zeker de grootste interesse opgewekt. Ze zijn inderdaad het voorwerp geweest van talrijk onderzoekswerk en van enkele gedenkwaardige controverses. Behalve de laterietkappen - en in zekere mate ermee geassocieerd - zijn formaties zoals laterietkorsten, ijzerhoudende stone-lines en bontgekleurde bodemhorizonten eveneens het bestuderen waard. Trouwens, tussen deze formaties en de echte laterietkappen komen min of meer nauwe associaties voor, waarvan dit volume de complexiteit probeert te ontwarren.

Al deze oppervlakkige continentale afzettingen zijn aaneengekit door al dan niet gehydrateerde ijzeroxides en komen, behalve uitzondering, preferentieel voor in de tropen.

Het hoofddoel van deze studie is dubbel. Enerzijds, zo gedetailleerd mogelijk de genese van de laterietkappen - en aansluitend van de andere tropische ijzerhoudende afzettingen - te ontcijferen op basis van terreinwaarnemingen en analyses van de structuur van de bemonsterde stalen. Anderzijds, van de geïdentificeerde laterietkappen een stratigrafische reeks voor te stellen met toepassing ervan op de geomorfologische evolutie van Zuidelijk Katanga.

Abstract

Iron duricrust and ferruginous stone-line in Southern High Katanga

In Southern High Katanga, the ferruginous formations such as iron duricrusts and stone lines with lateritic nodules show a diversity as broad as in Western Africa. Bauxites are nevertheless almost absent proving that, here, aluminium does not contribute to the genesis of duricrust, leaving iron as the only responsible.

Among that wide diversity, the indurated sands form a special case because of their dual origin. Because of a large porosity favouring a fast iron penetration and fixation, some of the sandy concretions or duricrusts may have a short history and some of them may even be very recent. Nevertheless the others have a genesis that fits in with the general longer scheme.

The most frequent type of laterite crust is also the most complex one. Its facies is both nodular and vermicular. Several agents and climatic phases are involved in its formation :

- A first planation surface with wide-open valleys where the water table lies near the surface induces favourable circumstances for the next step;
- In such circumstances, nodules are shaped in the mottled soil horizon. One exceptionally well-preserved site evidences the proximity between mottles (the nodules to be) and water table level at the end of the dry season;
- A revival of erosion enhances river down cutting which in turn lowers the water table so that termites can reach the mottled horizon;
- Nodules are mechanically concentrated by elimination of the non-indurated zones (relative accumulation): within the soil, by termites (on shaly rocks), at the surface by run off (often, on sandy rocks, unfavourable to termites activity);

- Finally the run off extends to both types of rock and denudes the indurated zone;
- A ferruginous coating forms on different substrates : upper laterite surface, internal joints, termite galleries as well as on any gravel at the soil surface. The coating lies unbroken from one object to the other but the outer surface is frequently eroded. The superficial coating could be a rock varnish formed by bacteria during a desertic period. The coating of galleries partly inhibits bioturbation because they collapse no more. The network of the strengthened galleries constitutes an internal skeleton reinforcing the laterite mantle;
- With the return of a less severe climate, termites from below the laterite mantle again bring up material. The resulting upper fine deposit often exceeds 2 meter.

All those processes imply important climatic variations :

- A steppe vegetation with a scanty grass cover favouring run off and planation;
- A relatively arid climate for the coatings formation;
- A contrasted seasonal regime, not so different from the present day climate (six months dry season) for vertical erosion and intense termite activity.

The weathering of rocky materials except for the iron impregnated ones (nodules, ferricretes and so on) requires a humid climate. This is happening nowadays but the more humid Quaternary phases were more effective in that respect.

The characteristics of the outer coatings (thickness, colour, conservation state of the included quartz grains) allow us to identify four levels of ferricrete. Their succession is confirmed by the relative position of the coatings between them and by the correlated continental deposits. Because of their coatings, all those ferricretes are dated back to the Tertiary (because of the desertic climate needed for the formation of the rock varnish). Their levels overlook the Quaternary river terraces.

The oldest ferricrete is quite different from the others. It shows neither nodules nor termite galleries. Its facies is thus very different from the nodular/vermiform of the three younger ones. It shows three facies, sometimes superimposed : pisolithic, massive or breccia-like. Moreover, the ferricrete of the corresponding level in West Africa contains bauxite. Its genesis is the result of a very different sequence of processes, some aggressive and linked to a humid climate with a great supply of iron and others resulting from more arid conditions producing the thick pisolith coatings.

Ferruginous stone-lines present a wider variety of concretions than duricrust. Their upper part is the result of a concentration mainly by run off that occurred during several periods of the Quaternary. Cover loam is each time built up again by the termites from weathered rocks below the stone-line. The same phenomenon is seen on ferricretes.

The soil profile where ferruginous formations can be seen consists of horizons of different ages. Weathering of saprolite and soil lifting are still active nowadays. Whereas some stone-line profiles are renewed at each Quaternary dry phase, the ferricrete profiles are build up during a long period of time extending from the Tertiary till now.

A new definition of iron duricrust is proposed that is not based on weathering in depth or on the presence of aluminium.

Key words : Laterite, ferricrete, stone-line, termite, bioturbation, soil profile, ferricrete facies, geomorphology, river terraces, erosion surfaces, tropical weathering, iron nodules, iron pisolithes, iron coating, rock varnish, iron impregnation, iron bacteria, absolute and relative accumulation, oblique leaching, Quaternary, Tertiary, Katanga.

Mots-clés : *Laterite, cuirasse latéritique, stone-line, termite, bioturbation, profil pédologique, faciés (des cuirasses), géomorphologie, terrasses fluviales, surfaces d'aplanissement, alteration tropicale, nodules ferrugineux, gravillons ferrugineux, pisolithes ferrugineuses, concrétions ferrugineuses, enduit ferrugineux, vernis désertique, impregnations ferrugineuses, bactéries ferrugineuses, accumulation absolue et relative, lessivage oblique, sables ocre, gres polymorphes, Quaternaire, Tertiaire, Katanga.*

1. INTRODUCTION

Parmi les formations ferrugineuses, les cuirasses latéritiques sont certainement celles qui ont soulevé le plus grand intérêt. Elles ont, en effet, été l'objet de nombreuses recherches et de quelques controverses mémorables. A côté des cuirasses latéritiques et en quelque sorte associées à celles-ci, des formations telles que les carapaces, les stone-lines ferrugineuses et les horizons bariolés, sont également dignes d'intérêt. Par ailleurs, entre ces dernières et les cuirasses latéritiques, il existe des associations plus ou moins étroites dont nous allons tenter de démêler l'écheveau.

Toutes ces formations continentales superficielles, consolidées par des oxydes de fer, hydratés ou non, sont, sauf exception, l'apanage du monde intertropical.

Les termes "latérite" et "latéritique" aujourd'hui encore employés non sans danger -revêtent une signification qui relève de deux disciplines bien distinctes, la géologie, d'une part, et la pédologie de l'autre. Une cuirasse latéritique est une roche dont la résistance, acquise ou en devenir, est due essentiellement au fer (*ferricrete*). Les **"sols" latéritiques**, sont des sols auxquels sont souvent associés des altérites, caractérisés par de nombreux minéraux de néoformation, les uns ferrugineux, les autres riches en alumine libre. Cuirasses et sols sont le produit d'une altération chimique, présumée importante. Ils présentent, de ce fait, une série de caractères communs, entre autres, une faible teneur en bases, un appauvrissement généralisé en silice et assez souvent, un quartz fragilisé sinon en voie de disparition.

1.1. Un lexique

Dans le domaine des formations ferrugineuses tropicales, la diversité d'acception qui affecte la plupart des termes utilisés, impose, d'emblée, une définition un tant soit peu précise de chacun de ceux-ci.

L'optique de chaque auteur, son degré de rigueur et la progression générale des connaissances font qu'un même terme peut être ignoré des uns, et utilisé par d'autres dans des sens

très divers. Il en est ainsi de termes essentiels tels que concrétion ou pisolit(h)e.

Certes, un vocabulaire un tant soit peu personnel est licite pour autant que chaque mot soit défini sans équivoque et permette une bonne compréhension des phénomènes. Il n'est toutefois pas souhaitable de continuer à l'infini le petit jeu qui consiste à se définir un vocabulaire particulier, comme ont dû le faire les pionniers. Depuis quelque temps, la nécessité d'utiliser un langage commun est perçue par la plupart des chercheurs.

Un premier glossaire, qui sert toujours de référence, a été dressé par Brewer (1964). Définitions et descriptions sont juxtaposées. Il se limite, malheureusement aux sols en général, à leur composition minérale et à leur structure en particulier. D'une très grande utilité, il n'aborde cependant pas les problèmes spécifiques des formations ferrugineuses.

Deux tentatives dans ce sens ont été accomplies récemment :

- L'une réalisée en langue anglaise sous les auspices de l'ISRIC (International Soil Reference and Information Centre, Wageningen) est le fruit du travail d'un groupe de spécialistes conduit par Aleva (1994). Cette nomenclature, souhaitée exhaustive, s'est voulue descriptive, comme une première étape avant d'envisager la genèse des latérites en général;
- Dans son ouvrage de référence, Tardy (1993) a eu le mérite, de son côté, de discuter et de préciser la signification de chaque terme utilisé et même de créer, au besoin, certains néologismes. Les définitions choisies comportent souvent des implications génétiques.

Une nomenclature descriptive peut être considérée comme le garant d'une démarche objective. Toutefois, elle conduit souvent à un luxe de détails dont on ne sait s'ils sont toujours bien nécessaires. Des définitions fondées sur les processus, vont, par contre, à l'essentiel, mais le lexique le plus anodin peut alors instiller un présupposé susceptible de servir une thèse et, à la limite, avoir valeur de démonstration.

Figure 1.-Le relief du Haut Katanga méridional.
Carte hors texte. Equidistance : 100 m. (d'après les cartes topographiques au 1/100.000 du Comité Spécial du Katanga.

LÉGENDE

- a alluvions quaternaires
- sables ocre
- Karoo
- Kundelunguien
- Ka arkosique
- Falaise
- Ks silteux
- Km métamorphique
- Grand Conglomérat
- Roan (schisto-dolomitique)
- Kibarien
- A calcaire de Kikosa
- granite
- δ dolerite (nappes de Kipambale)
- faille
- lac
- route
- frontière



Fig. 2. - La géologie du haut Katanga méridional
d'après la carte géologique du Zaïre au 2.000.000ème de **J.**
Lepersonne (1974), avec de légères modifications d'après nos
travaux et ceux de S. Alexandre-Pyre (1972). M. De Dapper (1981).
J. Soyer (1978), P. Dumont (articles en préparation). **Ko** : Kolwezi;
Li : Likasi; **Lu** : Lubumbashi; **Mi** : Mitwaba.



Le choix des termes est donc un exercice périlleux pour qui veut être clair et succinct tout en conservant la plus grande objectivité possible. Pour notre part, nous aurions aimé adopter un lexique, comme celui de Tardy, qui puisse servir de norme. Chemin faisant, nous n'avons pas toujours pu nous rallier aux interprétations que quelques termes sous-tendaient. Force nous a donc été de nous écarter de certains termes ou de certaines définitions. Toutefois, dans la mesure du possible, les termes ou les concepts feront référence au lexique de Tardy.

1.2. La région étudiée et son relief

Le Sud du haut Katanga s'inscrit dans le cadre approximativement triangulaire formé par le graben du Kamolondo à l'ouest, la dépression du Luapula-Moero à l'est et la crête de partage entre les bassins du Zaïre et du Zambèze au sud. Il a été choisi, entre autres, pour la diversité de ses formations ferrugineuses, diversité dont le cadre topographique et géologique ne sont pas tout à fait irresponsables. Dans ces domaines, le Sud plissé et faille s'oppose au Nord tabulaire ou constitué de massifs plus anciens (figs.1 et 2).

Dans la partie méridionale, les buttes résiduelles qui émergent de surfaces largement aplanies soulignent la direction des plis et les lames de charriage de l'arc cuprifère, SE-NW entre Lubumbashi et Likasi, puis E-W vers Kolwezi. Constitués, pour une grande part, par de la dolomie silicifiée (système de Roan), ces parties émergentes s'opposent au complexe "schisto-gréseux" (système du Kundelungu), nivelé par l'érosion. Les surfaces d'aplanissement sont plus élevées à l'ouest de la Lufira (1450 m au sud de Likasi et près de Kolwezi) que dans l'extrémité orientale (1250 m, dans la région de Lubumbashi). A l'extrémité occidentale, sur le plateau de la Manika, subsiste un vaste placage de sables ocre (tertiaires, 6.2.3) épais de quelques dizaines de mètres.

Dans le Nord, une série de hauts plateaux, sableux pour une très grande partie, s'ordonnent autour de la large dépression de la Lufira moyenne (entre 850 et 1050 m): à l'ouest, le plateau des Bianco, à l'est, le plateau des Kundelungu, de grande extension méridienne, et au nord, le plateau des Kibara, assez profondément disséqué. Les sommets de ces différents plateaux dépassent les 1700 m. La moitié orientale du plateau des Bianco et le plateau des Kundelungu présentent un relief tabulaire, avec, vers la dépression de la Lufira,

d'imposantes falaises couronnées par les grès et les arkoses du Kundelunguien supérieur. Le substratum de l'ouest des Bianco et du plateau des Kibara est constitué de larges massifs granitiques auxquels viennent se greffer les plis serrés de quartzite et de phyllade d'étages plus anciens, appartenant au groupe des Kibara.

La dépression de la Lufira moyenne n'est que très partiellement couverte par des alluvions fluviales. Celles-ci sont encerclées par de larges surfaces d'érosion, taillées dans les roches subhorizontales du Kundelunguien. Ces glacis ont réglé le profil de la dépression, depuis les versants des hauts plateaux jusqu'aux nappes fluviátiles imbriquées de la Lufira, formant ainsi une vaste pédiplaine d'une centaine de kilomètres de largeur. De profondes reculées, occupées en leur centre par des affluents de la Lufira (Pande, Lofoi), prolongent la pédiplaine jusqu'à très loin à l'intérieur des hauts plateaux.

A l'exception de la large plaine de la Lufira moyenne, chacune des régions décrites recèle un nombre important de cuirasses latéritiques et de stone-lines ferrugineuses.

1.3. Le substratum et les altérites

Toutes les roches ne sont pas également favorables aux formations ferrugineuses. Les puits de prospection sont révélateurs à cet égard. Programmés pour des zones susceptibles d'être riches en minerais de cuivre, ils sont donc creusés dans les secteurs où prédominent la Série des Mines, particulièrement riche en dolomie souvent fort impure. Malgré la disparition d'une grande partie de la dolomie, ce milieu carbonaté reste peu propice à la fixation du fer. Dans les secteurs de Shangulowe, Luishia et Midiashi, la proportion des puits traversant une formation ferrugineuse (cuirasse ou stone-line) est particulièrement faible: entre 2 et 7%, valeurs qu'il faut opposer au 25% du secteur de Lubumbashi, beaucoup plus marginal vis-à-vis des zones exploitables. Les terres résiduelles du calcaire du Kundelunguien inférieur (calcaire de Kakontwe) se révèlent encore moins riches en formations ferrugineuses.

La partie méridionale du haut Katanga contient, fort heureusement pour notre propos, une série dite schisto-gréseuse (Kundelunguien inférieur) dont les nombreuses couches à grain fin, des siltites (Bellièrre, 1966) et des shales pour la plupart, sont abondamment couvertes de cuirasses et de stone-

lines. La partie gréseuse (série de Mwashya, *pro parte*) est, la plupart de temps portée en relief et donc peu propice aux formations ferrugineuses.

Dans le Nord de la région étudiée, hauts plateaux et glacis sont relativement riches en formations ferrugineuses tandis que les nappes alluviales de la moyenne Lufira en sont, évidemment, dépourvues. Le milieu est ici beaucoup plus sableux, qu'il s'agisse, soit de la Série des sables ocre (6.2.3), soit des grès et arkoses du Kundelunguien supérieur, altérés dans leur partie supérieure. Le départ entre les deux est aisé à faire, les sables ocre étant souvent beaucoup plus fins. Ces sables ocre se retrouvent également dans la partie méridionale du haut Katanga, sur le plateau de la Manika. Par contre, les glacis, au pied des hauts plateaux ont modelé un complexe silto-gréseux du Kundelunguien moyen.

Les granites et les roches du Kibarien, présents dans l'ouest des hauts plateaux, sont fortement disséqués et soumis à la dénudation. Le voisinage de la dépression tectonique du Kamolondo y est pour beaucoup. Cependant, au nord de Mitwaba, les phyllades du Kibarien supportent des formations ferrugineuses étagées tandis que le quartzite arme les sommets qui dominent la topographie.

En ce qui concerne la profondeur du manteau d'altération, nous avons peu de données pour le Nord de la région. Par contre, dans la région de Lubumbashi, une étude hydrologique de Beugnies (1954) nous livre de nombreuses données. Sur les siltites et les shales du Kundelunguien, les altérites ont une épaisseur moyenne supérieure à 10 m (entre 12 et 16,5 m). Ces siltites et ces shales forment, ici, une grande famille de roches riches en composants altérables. A côté du quartz et de la séricite, se trouvent des feldspaths, de la chlorite, des dolomies et de petits débris de roches magmatiques (Bellière, 1966). Les proportions entre ces différents composants sont assez variables. Les siltites font souvent place à des passées, soit plus argileuses, soit plus gréseuses ou encore, plus dolomitiques. Presque toutes ces roches présentent, par ailleurs, un fin litage qui leur donne l'aspect d'un schiste. Selon leur composition, ces roches sont de modérément à fortement altérables. Leur teneur en Fe_2O_3 varie entre 5 et 12%.

Dans les calcaires et les dolomies, le manteau d'altération dépasse les 30 m. Il en est de même du Grand Conglomérat qui est une diamictite dotée de galets de toutes tailles (jusqu'à quelques

décimètres) et de toutes natures, dans une pâte argilo-dolomitique.

Si, comme nous essayerons de le démontrer, la plupart des formations ferrugineuses sont le résultat d'un phénomène hâtif, emprisonnant un substratum peu altéré, une grande partie du manteau d'altération sous-jacent s'est formé ultérieurement et n'a donc pu jouer un rôle dans leur élaboration.

En ce qui concerne les formations ferrugineuses, il convient donc de faire le départ entre quatre types de sous-sol :

- Les dolomies et les calcaires, peu favorables aux cuirasses et aux stone-lines;
- Les roches de granularité très fine, shales et siltites, pour lesquelles l'avis plus général de Leprun (1979, p.193) pourrait s'appliquer: "la nature de la roche mère est souvent peu apparente dans les caractères de la cuirasse";
- Les roches gréseuses et sableuses, pour lesquelles, comme nous le verrons plus tard, l'intervention des termites n'interviendra que rarement dans l'élaboration des formations ferrugineuses;
- Enfin, les roches suffisamment résistantes à l'altération, pour rester en relief, lors de la formation de la surface d'érosion; ce sont surtout certains grès, des dolomies silicifiées et des conglomérats étayés par des filons de quartz. Une fois mises en relief, ces roches jouissent d'une certaine immunité vis-à-vis, d'une part, de l'altération ultérieure, et vis-à-vis du développement de formations ferrugineuses, d'autre part.

Malgré un substratum riche en feldspath, les formations ferrugineuses rencontrées au Katanga sont rarement bauxitiques. L'éventail des cas analysés en sera donc appauvri. Toutefois, cette absence permettra de mieux cerner la part de responsabilité qui revient aux seuls composés du fer, dans l'élaboration des cuirasses latéritiques. En effet, le caractère bauxitique implique des néoformations où fer et alumine sont intimement liés au point de se conditionner mutuellement.

1.4. Le profil, contexte des formations ferrugineuses

Des profils complets, tels que celui qui va être décrit, sont assez rares. Ils sont souvent le résultat de la synthèse d'observations partielles (fig. 3).

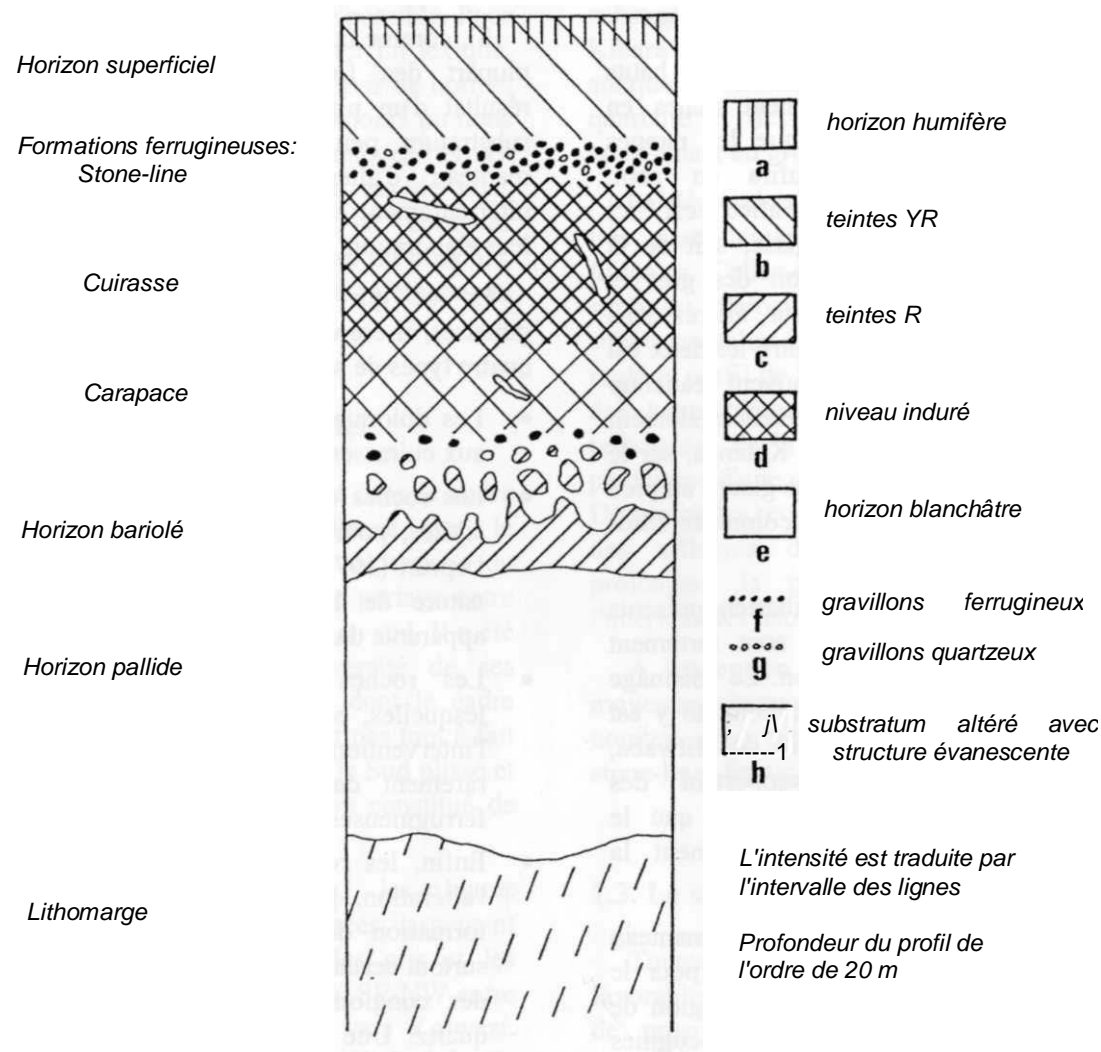


Fig. 3. - Le profil, contexte des formations ferrugineuses. Les teintes R et YR sont celles de la Munsell Colour Chart.

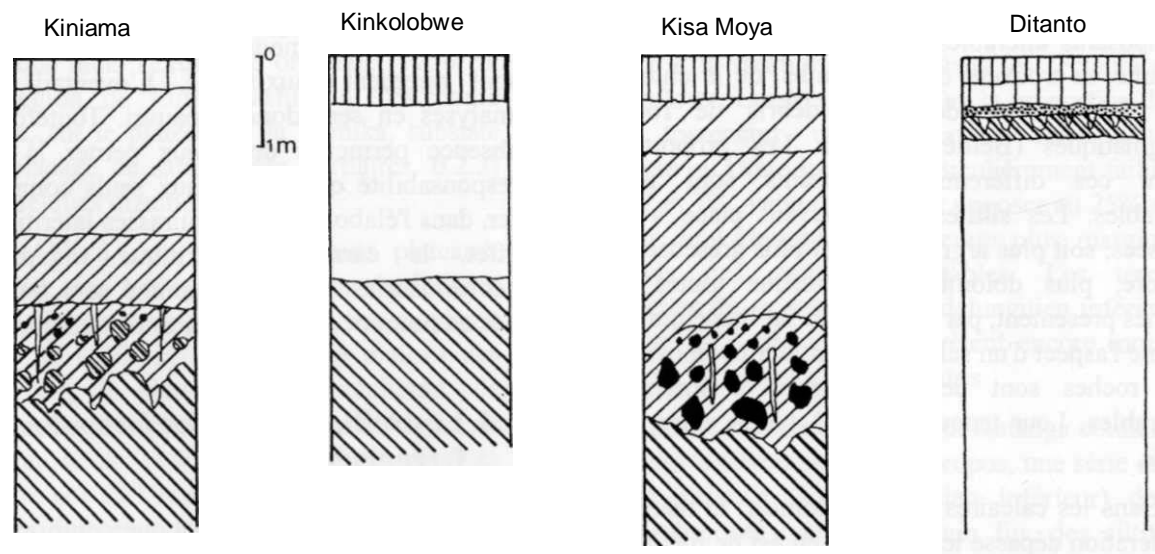


Fig. 4. - Les profils sur sable : horizon bariolé et variantes. Mêmes conventions de signes qu'à la figure 3.

La succession d'horizons ou de niveaux est, de haut en bas, la suivante:

5. Un horizon superficiel, composé de terres meubles comportant un horizon peu ou prou humifère. C'est, sans doute, en raison de la présence de cet humus que pas mal d'auteurs donnent à cette zone le nom de "sol". Son épaisseur moyenne est de deux mètres. Sa base est souvent assez nette.

4. Une ou plusieurs formations ferrugineuses du type stone-line, cuirasse ou carapace. Elles peuvent se superposer dans cet ordre, ou se rencontrer seules, ou deux à deux. Des passages latéraux d'un faciès à l'autre existent également. Chacune de ces formations présente une épaisseur qui varie entre quelques décimètres et quelques mètres.

- La *cuirasse* latéritique peut être considérée une accumulation indurée de fer, de structures spécifiques mais trop diverses pour entrer dans une définition simple. L'analyse de ces structures permettra, ultérieurement, de donner une définition plus circonstanciée (8);
- La *carapace* est une version moins indurée de la cuirasse (5.5.1). En ce qui concerne les structures, il n'y a pas lieu de faire le départ entre les cuirasses et les carapaces. Lorsque ce sera le cas, ces dernières seront donc comprises des cuirasses, *lato sensu* sous-entendu. Dans les autres cas, lorsque le contexte l'exigera, le terme de cuirasse *stricto sensu* sera utilisé. Les auteurs anglais désignent la cuirasse et carapace par les termes de *hard upper layer* et de *laterite, main zone*. Souvent décrite comme une formation sous-jacente de la cuirasse, la carapace peut, toutefois, exister en l'absence de celle-ci et même se retrouver en affleurement;
- La stone-line ferrugineuse est constituée de gravillons et/ou de nodules ferrugineux libres entre eux. Les termes de gravillons ou de nodules désignent des types de concrétions qui ont été dégagées ou non du milieu où ils ont pris naissance. Le terme stone-line désigne, en fait, une nappe d'éléments grossiers de petite taille (de quelques millimètres à quelques centimètres), vue de profil sur la tranche de l'affleurement. Comme les autres formations ferrugineuses, elles peuvent contenir des éléments étrangers, c'est-à-dire non ferrugineux.

3. Un horizon bariolé formé à la base de taches claires (blanc, beige, jaune) dans un ensemble sombre (rouge violacé, rouge brique, brun). La phase claire devient prépondérante vers le haut et englobe alors des taches sombres: il se mue, ainsi, en horizon tacheté. L'ensemble fait souvent moins d'un mètre dans les sables. Sur les roches précambriennes, la limite inférieure sera plus difficile à déterminer et l'épaisseur de l'horizon demande une interprétation (2.3.1).

2. Un horizon fortement décoloré, blanc la plupart du temps, que les auteurs anglophones appellent *pallid zone*. Celle-ci ne se présente que dans un milieu très poreux (arène granitique, sable). Cet horizon peut être assez profond, quelquefois plus de 10 mètres.

1. Enfin le substratum altéré, ou altérites, a conservé, sur une certaine hauteur, la structure originelle, accompagnée éventuellement d'une structure due à l'altération chimique telle que les écailles d'une structure en boule. Ces structures s'estompent progressivement vers le haut et seraient accompagnées de la formation de minéraux nouveaux, souvent de taille plus petite. Cette partie supérieure des altérites, appelée lithomarge (Tardy, 1993) ou saprolite (Aleva, 1994), a souvent été considérée comme la roche mère du profil surincombant. La zone altérée est, en général, très épaisse, d'une vingtaine de mètres en moyenne.

Utiliser le terme de profil, pour la succession d'horizons et de profils qui figure plus haut, n'est pas sans danger. En effet, apparaissent en filigrane des relations simples entre les différents horizons: éluviation et illuviation, roche mère et profil élaboré, genèse pendant un seul épisode. Or, les cuirasses sont assez anciennes. Leur histoire, déjà assez longue, implique que les phénomènes suivants ont pu se produire :

- Les cuirasses ont été incluses dans plusieurs profils pédologiques, appartenant à différents âges: les effets des premiers profils sont éteints depuis longtemps alors que le dernier est toujours en action;
- La nappe aquifère a migré en passant d'un profil à l'autre et ne se trouve que très exceptionnellement au même niveau que celui des battements de la période actuelle;
- Les profils ont été tronqués, dans des proportions telles que certaines zones du profil

sont plus des niveaux géologiques que des horizons pédologiques;

- La bioturbation a affecté des masses de terre telles qu'elle a provoqué de véritables renversements, des éléments des horizons inférieurs venant coloniser des horizons de surface, et quelquefois vice-versa;
- L'altération de la partie profonde a continué à se produire.

Comme on le verra, les stone-lines ferrugineuses ont eu une vie plus courte, et les conditions de gisement actuelles sont restées plus proches de celles qui existaient lors de leur formation.

Les développements qui vont suivre seront surtout centrés sur les différents types de formation ferrugineuse. Afin de ne pas créer de distorsions trop importantes dans le déroulement des chapitres, des regroupements ont été effectués entre horizons ou niveaux, selon leur affinité ou selon le lien qui existe dans la genèse des uns et des autres. La justification de ces rapprochements apparaîtra dans le courant de l'exposé. Les titres des prochains chapitres seront donc :

1. **L'horizon bariolé** (y compris l'horizon pallide);
2. **Les stone-lines ferrugineuses** (y compris l'horizon superficiel);
3. **Les cuirasses latéritiques** (y compris les carapaces).

1.5. Sources consultées et observations réalisées

1.5.1. Les citations

Exprimer l'avis exposé dans chacun des ouvrages ou articles consultés ne peut entraîner qu'une grande confusion. Par contre, les ordonner en fonction d'une thèse est se condamner à une partialité certaine pour prix d'une meilleure clarté. Le sujet a été tellement analysé, débattu, synthétisé

qu'une grande partie des propos que nous allons tenir ont déjà été exposés, d'une façon ou d'une autre, avec des poids différents et bien souvent, dans d'autres contextes. Les jalons qui ont guidé ce travail seront repris en annexe, après la synthèse.

1.5.2. Les observations

En dehors des observations de terrain, menées entre 1957 et 1991, la principale démarche de ce travail a été d'interroger les structures visibles à l'œil nu ou à la loupe afin de dégager les processus qui ont abouti à l'élaboration des différentes formations ferrugineuses.

Les analyses de laboratoire n'ont été réalisées que pour répondre à des problèmes bien spécifiques.

Sauf dans des cas bien particuliers, les observations au microscope polarisant se sont révélées assez décevantes, du fait de l'opacité des plages ferrugineuses. Les sections polies sous le microscope à lumière réfléchie ont livré beaucoup plus de détails.

Les enduits ferrugineux rubanés (5.1.3.2) ont été étudiés plus en détail. Le pouvoir réflecteur des différentes parties a été mesuré par M. Tshidibi grâce à un photomultiplicateur d'électrons du service de géologie de l'université de Mons. Des photos au microscope électronique à balayage de ces mêmes enduits ont également été réalisées. Quelques analyses semi-quantitatives ont été effectuées grâce à une microsonde électronique.

Des analyses quantitatives traditionnelles du fer ont également été menées (complexation à l'EDTA).

Les observations géomorphologiques de terrain ont été prolongées par une analyse des photos aériennes, au 1/10.000 pour la région de Lubumbashi, au 1/40.000 pour le reste du haut Katanga.

2. L'HORIZON BARIOLÉ

2.1. Introduction

2.1.1. Description

La principale caractéristique de cet horizon est son aspect bigarré, avec des alternances de rouge violacé, de rouge brique, d'ocre jaune et de blanc, présentant tous les interstades quant à leurs proportions respectives. L'essentiel est toutefois de faire la distinction entre les zones foncées (rouges) et claires (jaunes, blanches). Les premières sont riches en fer par opposition aux secondes. Des teneurs en fer seront détaillées ultérieurement. Vers le haut, les parties claires, progressivement plus développées, réduisent les parties sombres à quelques taches isolées qui peuvent acquérir une certaine résistance mécanique. Pour des raisons qui seront données plus loin, la prédominance graduelle des parties claires est surtout visible sur les profils dans les sables.

Sur les roches précambriennes, il existe une variante de l'horizon bariolé, plus respectueuse de la structure de la roche en place.

Comme on le verra, la zone bariolée n'est pas toujours présente sous les formations ferrugineuses.

2.1.2. Vocabulaire

Plusieurs termes ont été utilisés pour désigner cette zone bigarrée:

- zone, horizon ou argile *bariolée*;
- zone, horizon ou argile *tachetée*, *mottled clay*;
- *plinthite* (du grec brique, carreau).

Un horizon bariolé peut se développer aussi bien sur les sables tertiaires que sur la roche précambrienne. Le terme *mottled clay* n'est donc pas suffisamment général.

D'autre part, le qualificatif de "tacheté" convient très bien pour désigner la partie supérieure de la zone où les parties sombres sont réduites. Leprun (1979) fait, à juste

consistance et sont, alors, désignées sous le terme de *nodules diffus* (Eschenbrenner, 1987).

Il semble que ce soit par erreur que le terme *plinthite* ait été utilisé. En effet, il désigne un tout autre phénomène, bien particulier, de réseau réticulé (Buol *et al.*, 1973). A l'inverse d'une tache ferrugineuse occupant le centre de volumes élémentaires, dans la *plinthite*, les centres sont désertés par le fer, lequel se porte vers les limites extérieures du volume considéré.

Les points communs existant entre la zone tachetée et les pseudo-gleys, d'une part, et la *ground water laterite* (cuirasse de nappe, *pro parte*), seront envisagés ultérieurement, après avoir pris connaissance des modes de formation probables (2.4.2).

2.2. Profils en milieu sableux

Seul parmi les hauts plateaux du Katanga, le plateau des Bianco présente une couverture sableuse suffisamment mince (6.2.3) pour confirmer la relation entre horizon bariolé et nappe aquifère. En effet, une faible épaisseur des sables et l'imperméabilité des roches précambriennes sous-jacentes peuvent y maintenir une nappe aquifère à faible profondeur. Par ailleurs, milieu sableux et nappe sont peu favorables à l'activité des termites (5.3.2) et, de ce fait, les profils seront peu bioturbés.

La partie méridionale du plateau est le siège d'un élevage extensif de bovins dont le passage répété a éliminé le tapis herbeux et provoqué un ravinement accéléré. Malgré une mise en défens, l'érosion a atteint la nappe aquifère et de ce fait, continue de s'étendre vers l'amont par érosion régressive. Une érosion latérale concomitante a été favorable au rafraîchissement des coupes.

2.2.1. Profil de Kiniama

Ce profil apparaît dans une érosion artificielle taillée dans le versant en pente douce de la vallée de la Kalule Nord. Il présente la succession suivante (Alexandre, 1978, p. 140) (fig. 4a) :

- 0-30 cm, horizon humifère sombre (10YR 3/1),

- 110-160 cm, horizon bariolé de même couleur de fond que le précédent, avec des taches rouges de plus en plus larges vers le bas (10R de 3/6 à 4/8); parallèlement les concentrations en Fe_2O_3 vont en diminuant de plus de 20% à moins de 9%. Au sommet de cet horizon, les taches rouges ont une teneur en fer de 20,5%, le fond ocre de 3,7 à 4,7%, les passées jaune orange de 0,8 à 1,7%. Par ailleurs les taches de cet horizon ont acquis une certaine dureté, en relation avec leur teneur en Fe_2O_3 et la forme sous laquelle celui-ci se trouve. La présence de goethite est confirmée par les analyses aux rayons X et par un léger palier entre 300 et 480° dans les analyses thermopondérales,
- 160-210 cm, horizon rouge (5R 5/8) avec quelques taches jaunes allongées verticalement, de 4,5 à 6% de Fe_2O_3 . La disparition du palier caractéristique de la goethite, dans les analyses thermo-pondérales, laisse supposer que le fer se présente sous forme hématitique.

La partie supérieure de l'horizon rouge coïncide approximativement avec le sommet de la nappe aquifère lorsque celle-ci est au plus bas, c'est-à-dire à la fin de la saison sèche. La nappe a, en effet, été légèrement abaissée par le creusement du ravin. Pendant la saison des pluies, cette nappe vient en affleurement. Les conditions hydrologiques ne sont probablement plus tout à fait les mêmes que lors de la formation de l'horizon bariolé (à supposer qu'il ne se forme plus!). L'horizon rouge s'est toujours trouvé dans la nappe, comme en atteste l'absence d'éluviation. Les décolorations y sont, en effet, confinées à la proximité des racines.

Ce cas est exceptionnel, car dans la plupart des coupes observées dans les érosions du plateau, l'enfoncement préalable des vallées a fortement abaissé le niveau des nappes.

En supposant une porosité homogène, un rapide calcul montre que si la partie supérieure du profil (0-160 cm) avait, au départ, la même teneur en fer que la base, il ne serait pas nécessaire de faire appel à des apports latéraux importants: l'estimation donne 5,6% de Fe_2O_3 en moyenne contre une teneur originelle de 4,5 à 6%.

Cet exemple concret montre la relation étroite qui peut exister entre l'horizon bariolé et la nappe aquifère. La transformation des taches en concrétion se produit dans la zone de battement entre un minimum où le lessivage peut pénétrer parfois et une autre où il pénètre toujours. Le

battement de la nappe à prendre en considération est donc celui du minimum à la fin de la saison sèche. La position basse fait suite à une période de une ou plusieurs années très peu arrosées, tandis que le maximum se produit après une période particulièrement humide

2.2.2. Profil de Kinkolobwe

Dans un site topographique peu différent du précédent, mais avec un drainage moins efficace, l'abondance de l'humus associé à un débit plus soutenu de la nappe, semble avoir inhibé la formation des horizons tacheté et bariolé. En effet, la succession suivante est observée (fig.4b) :

- a) de 0 à 60 cm, horizon humifère très sombre;
- b) de 60 à 100 cm, horizon blanc;
- c) de 100 à 190 cm, horizon rouge sombre (7,5R3/6) avec quelques rares taches jaune orange (7,5YR7/8), plus ou moins allongées verticalement.

Aucune partie de l'horizon rouge n'a subi la moindre induration. Cet horizon était, manifestement, le siège de la nappe aquifère avant le creusement du ravin. Le versant de part et d'autre du ravin est occupé par une ligne de sourcins qui entretiennent le milieu très hydromorphe.

2.2.3. Profil de la Kisa Moya

Ce profil est développé dans des sédiments de remplissage d'un ravin naturel, affluent de la Kisa Moya, creusé au cours d'une (dernière?) phase sèche quaternaire (S. Alexandre-Pyre, 1972, 124) (figs. 4c et 5). Ces sédiments devaient être entièrement de teinte rouge au moment de leur dépôt comme il est possible de le vérifier sur une longueur de plus de 400 m. Un profil pédologique s'est ensuite développé aux dépens de la partie supérieure. Entre 1,25 et 1,55 m de profondeur, un horizon tacheté est associé à un horizon bariolé visible jusqu'à 2,35 m. Ce dernier est traversé de traces de racines verticales et horizontales sans aucune perturbation due aux animaux fouisseurs. A la différence du profil de Kiniama, l'horizon tacheté est composé de taches de même dimension et de même teneur en fer. L'absence de gradient selon l'un ou l'autre caractère pourrait être attribuée à la constance de la profondeur minimale de la nappe.

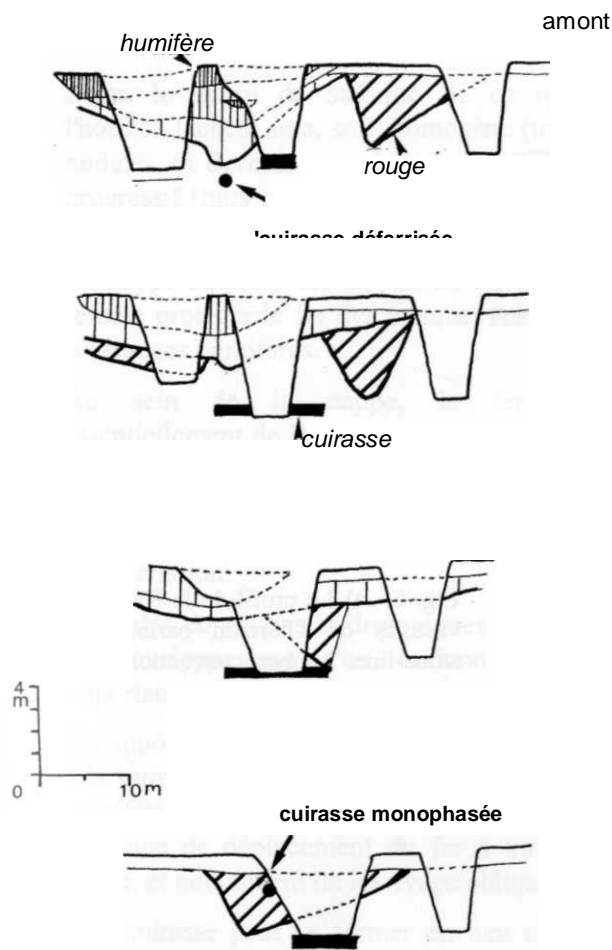


Fig. 5.- Les ravins colmatés de la Kisa Moya. Mêmes conventions de signes que la figure 3, sauf pour la-cuirasse. Cuirasse monophasée: position des profils des figures 4 et 10, ainsi que de l'échantillon de cuirasse B101 (4.3.8.1) de la figure 29. Cuirasse déferriée: position de la cuirasse dégradée de la figure 63.

En un endroit de la partie inférieure du ravin, le sommet de l'horizon bariolé est induré. Le départ des parties blanches lui a conféré un aspect alvéolaire. La teneur en Fe_2O_3 est largement supérieure à 20%. Il s'agit d'une variante du faciès massif de la cuirasse (4.3.8.1). La couleur rouge brique indique une accumulation de fer, essentiellement hématitique, devant très peu au lessivage effectué avec l'aide des matières humifères. A moins qu'elle ne soit originelle, cette couleur rouge est tributaire des apports effectués à partir du substratum précambrien, par l'intermédiaire de la nappe.

2.2.4. Profil de la Ditanto

Sous un horizon humifère très sombre (7,5YR2/2) puis de plus en plus clair (brun grisâtre, 7,5YR6/2), se trouve, à quelque 55 cm de profondeur, un horizon jaune orange de 15 cm avec des nodules parfaitement circonscrits dont le cœur est resté bien rouge (10R4/8). Il surmonte un horizon bariolé de 28 cm dont la partie rouge augmente vers le bas, de 50 à 100%. Le bas du profil est constitué d'un horizon blanchâtre (7,5YR8/2). Ce dernier est un horizon pallide (fig.4d).

En comparaison avec le profil de Kiniama, l'absence de l'horizon éluvial jaune orange serait l'indice d'un tronquage du profil. Les horizons tacheté et bariolé se rapprochent, ici, de l'horizon humifère, sans toutefois en être fortement affectés. Le plus grand développement de l'humus suggère des conditions locales plus humides.

L'horizon pallide qui se trouve au-dessous, a dû se développer après un approfondissement de la nappe, antérieur au creusement de la ravine. A la fin de la saison sèche, l'eau se trouve maintenant à quelque 2,30 m de profondeur.

Il convient de se pencher ici sur les raisons qui ont éliminé l'horizon rouge inférieur et maintenu presque intact l'horizon bariolé, et cela malgré le voisinage de l'horizon humifère. Deux hypothèses se présentent qui ne sont pas incompatibles :

- le dépôt de goethite sur l'hématite originelle, aurait protégé celle-ci;
- une dessiccation aurait produit des minéraux mieux cristallisés.

2.2.5. Discussion et conclusion

Les horizons tachetés développés en milieu sableux ont été riches en enseignement sur les processus et les conditions de leur développement.

- L'association entre, d'un côté, le sommet de la nappe aquifère et d'autre part, la transition entre l'horizon bariolé et l'horizon tacheté apparaît clairement. C'est, probablement, dans cet esprit que Mac Farlane (1971, p. 526) a utilisé le terme de *groundwater laterite*, en donnant, toutefois, la pallid zone comme origine à une grande partie du fer.

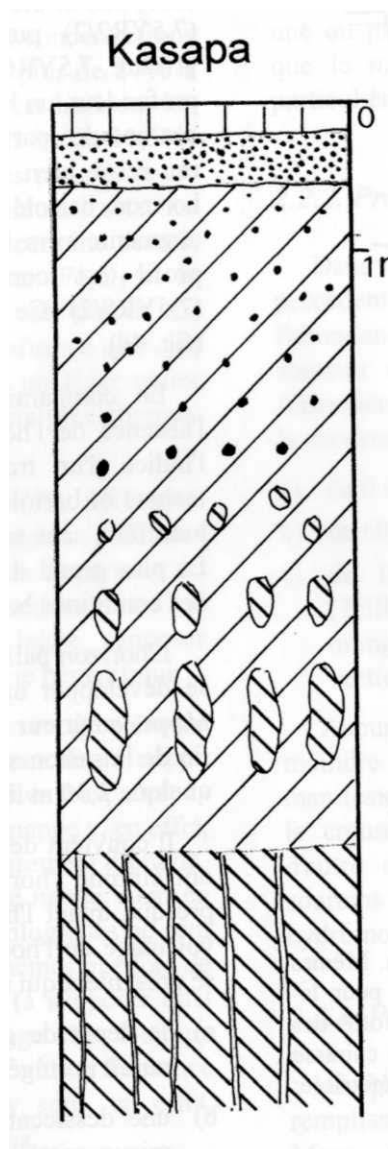


Fig. 6.- a) Le profil de la Kasapa: vestiges de l'horizon bariolé et stone-line. Mêmes conventions de signes que la figure 3.

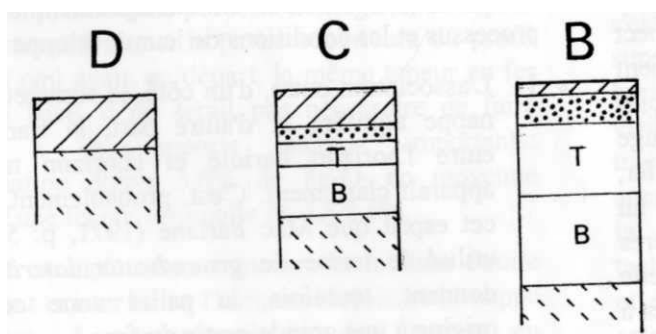


Fig. 6. - b) Position du profil de la Kasapa (B) vis-à-vis de la cuirasse (A) et des observations voisines (C et D). L'intervalle entre les profils est de 100 m environ.

2. Le niveau inférieur de la nappe, qui détermine la position de l'horizon tacheté, est ici précisé: c'est celui de la fin de la saison sèche.
3. Selon le degré de stabilité de ce niveau, l'horizon tacheté sera, soit homogène (tous les nodules en devenir sont de même taille), soit progressif (plus grands à la base et plus petits au sommet).
4. La nappe aquifère est un milieu oxygéné qui semble protéger le fer des attaques venant des substances humifères.
5. Au sein de la nappe, le fer serait essentiellement de l'hématite, de couleur rouge violacé (7,5R) et se transforme, vers le haut, en rouge brique (10R) par adjonction d'une goethite de couleur orange (7,5YR), apportée par éluviation.
6. Dans des conditions hydrologiques favorables au développement d'un horizon humifère important, l'horizon bariolé n'existe pas.
7. Un apport extérieur de fer n'est pas nécessaire à la formation d'un horizon bariolé. Ceci n'est, toutefois, pas un argument en faveur de l'absence de déplacement du fer à travers la nappe, et notamment de lessivage oblique.
8. Une cuirasse peut se former en lieu et place d'un horizon tacheté, pour autant que l'apport de fer soit suffisant. Cette cuirasse est de structure massive ou alvéolaire dans la mesure où les parties blanchâtres ont été enlevées. Nous verrons ultérieurement que ces cuirasses que nous qualifierons de **monophasées**, ne sont pas toujours de couleur rouge. Il en existe aussi de couleur brun foncé (4.3.3.3).
9. La résistance des horizons tachetés et du sommet de l'horizon bariolé aux attaques ultérieures des composés de l'humus, alors que l'horizon rouge est lessivé, implique une transformation particulière du fer qui mérite un grand intérêt.
10. La formation de nodules diffus au sein de l'horizon tacheté s'est produite jusqu'à une époque assez avancée dans le Quaternaire. Le climat actuel, avec ses alternances saisonnières, y serait favorable. Toutefois, l'abaissement général de la nappe et le lessivage de la zone située sous l'horizon bariolé (horizon pallide), donne à penser que le phénomène ne se produirait plus à l'heure actuelle.

L'horizon pallide demande que l'on ouvre ici une parenthèse.

2.2.6. L'horizon pallide

Son épaisseur est souvent de plusieurs mètres et, dans certains cas, peut même atteindre une trentaine de mètres (Mulcahy, 1960; de Swardt et Trendall, 1970). Il ne se développe que sur un matériel assez poreux, arène granitique ou sable.

Selon certains auteurs (depuis Mc Laren, en 1906, jusqu'à Lelong, en 1966 et 1969, et même Ollier, en 1988), l'horizon bariolé et même une cuirasse seraient liés à une remontée capillaire du fer; ce dernier s'immobiliserait au contact de la zone aérée. Nous verrons plus tard que cette aération ne suffit pas à fixer le fer et que la remontée capillaire atteint seulement 40cm dans un sol sableux (Duchaufour, 1965, p. 62), alors que des épaisseurs plus importantes de l'horizon pallide ont été observées.

Si une origine par lessivage n'a pas été envisagée dès le départ, c'est, précisément, en raison de la présence immédiatement au-dessus de l'horizon pallide, d'un horizon bariolé, réputé être le siège d'une illuviation. du Bois et Jeffery (1955) et Trendall (1962) sont les premiers à avoir envisagé un départ vers le bas, en le plaçant, toutefois, dans un cadre annuel. Les deux horizons, le bariolé et le pallide, seraient formés au sommet de la nappe, la formation ferrugineuse pendant la saison des pluies et la zone pallide au cours de la saison sèche. Thomas (1980) a donné un plus grand délai à cette action: l'horizon pallide se serait formé après un approfondissement des vallées et une descente subséquente de la nappe. Tardy (1993) s'est rallié à cet avis tout en le limitant aux milieux poreux. Il ne précise pas l'époque à laquelle cette éluviation s'est produite. Pour Leprun (1979), elle serait "fossile" et ne se produirait plus à l'heure actuelle.

Les observations faites sur le plateau des Bianco montrent que le lessivage qui frappe cet horizon s'est bien produit ultérieurement à la formation d'une zone bariolée, mais elles ne permettent pas d'exclure une pérennité de cette action.

Une liaison étroite existant entre la théorie de la formation des cuirasses *per ascensum* et le terme d'horizon pallide, Tardy (1993, p.42) a proposé de rejeter le terme et de le remplacer par l'expression "horizon de lessivage sous-cutané de profondeur".

Il lui attribue la lettre **E** en lieu et place de la lettre **A** qui désigne un lessivage dit de surface. La théorie de la formation *per ascensum* étant aujourd'hui obsolète, le terme d'horizon pallide reste une expression beaucoup plus courte, et désormais libre de toute connotation.

2.3. Profils sur les roches précambriennes

Ces profils s'inscrivent dans une topographie de surface d'érosion légèrement vallonnée. Rappelons que la roche mère est une siltite de composition complexe, finement litée.

2.3.1. Profil du Campus de la Kasapa

Le profil est situé dans une ballastière, près du confluent de la Kasapa avec la Lubumbashi, au nord de la ville. Il est situé au rebord de la surface de Lubumbashi, en haut du versant de la rivière et en marge d'une large zone occupée par une cuirasse latéritique (fig. 6b, point A). Dans le fond de la ballastière (fig. 6b, point B), on peut observer, comme dans pas mal d'autres endroits des environs de la ville, la succession suivante, de bas en haut (fig. 6a) :

1. De 200 à 270 cm: les siltites du substrat sont légèrement altérées et leurs joints de stratification, ici en position verticale, orientent une décoloration sur une largeur qui varie de 1 à 8 mm, isolant ainsi des blocs d'une largeur de 5 mm à 5 cm. Les parties qui ont gardé leur teinte rouge violacé (10R5/8) présentent un liséré plus foncé. Leur teneur en Fe_2O_3 est de 6,7% en moyenne contre **2,5%** dans les bandes claires (10YR8/4). Les siltites du substratum sont grises et la couleur rouge violacé est due à l'altération. D'autre part, leur teneur moyenne en fer est de l'ordre de 7%. Un léger départ pourrait s'être produit lors de l'altération en profondeur;

2. De 55 à 200 cm: les lames rouge violacé se subdivisent et s'amenuisent progressivement en produisant des nodules relativement plats. A mesure que la taille diminue, les teneurs en Fe_2O_3 augmentent (voir ci-dessous, pour un autre site de la Kasapa), avec une teneur moyenne de **32%**. Les plaquettes indurées n'ont plus la même orientation que le litage et les bandes décolorées ont fait place à une matrice claire (7,5YR7/8) dont la couleur résulte d'un mélange entre les parties claires et une masse rouge dérivée de la roche altérée. Dans cette matrice, commencent à apparaître des galeries de

termes dont certaines sont encore fonctionnelles. Au sein de cette matrice, se rencontrent quelques grains ferrugineux luisants, brun foncé, de très petite taille (de l'ordre du millimètre), qui proviennent de la couche surincombante. Leur dimension réduite a facilité leur déplacement dans les galeries, eu égard à leur faible encombrement et à la compétence (au sens sédimentologique) des termites;

3. De 20 à 55 cm: un ensemble d'éléments de petite taille (< 5 mm) dans une matrice de même nature que le niveau supérieur. Il constitue, en fait, une stone-line qui sera analysée, sous un autre angle, dans le chapitre suivant (3.2.1.1). Parmi les éléments figurés de la stone-line, se retrouvent, entre autres, des nodules de même couleur rouge violacé dont la teneur moyenne en Fe_2O_3 est de **41,9%**;

4. De 0 à 20 cm: terre limoneuse jaune orange pâle (10YR8/4) avec un horizon humifère grisâtre, à peine ébauché, (**3,8%** de Fe_2O_3).

Un autre profil, situé à quelque deux cents mètres de la ballastière (fig. 6b, point C), plus à l'écart de la cuirasse latéritique, comporte un sol de teinte orange (5YR6/8) et un niveau 2 dont les teneurs en Fe_2O_3 des nodules ont été mesurées avec précision, selon leur taille, et par conséquent, compte tenu du gradient déjà signalé, selon leur profondeur :

- de 13 à 25 mm, **21,5%**;
- de 8 à 13 mm, **32,7%**;
- de 5 à 8 mm, **40,3%**;

ces derniers passent progressivement dans la stone-line qui les couvre, à l'exclusion de tout autre élément grossier.

Enfin, dans un profil situé deux cents mètres encore plus loin que le précédent (fig. 6b, point D), les éléments colorés sont nettement moins résistants, de forme très irrégulière et complètement perturbés géométriquement.

2.3.2. Profil de la Haute Luilu

¹ Ces observations ont été menées grâce à l'obligeance de M. De Dapper qui a, par ailleurs, analysé cette coupe sous d'autres aspects (De Dapper, 1981)

l'autre le haut du versant. Ici également, l'horizon bariolé se trouve en marge d'une cuirasse latéritique. De larges blocs de cuirasse sont d'ailleurs intégrés dans la stone-line.

L'horizon bariolé est constitué de fragments de roche précambrienne imprégnés de fer, sur une épaisseur de 2 à 3 mètres. Dans la partie inférieure de l'horizon, les zones décolorées et ameublies sont bien développées. Au contraire, dans la partie supérieure, les éléments indurés sont presque jointifs. Toute la zone est soumise à une activité intense des *Macrotermes falciger* Gerstaecker, termites qui édifient des termitières géantes. Sous ces termitières, l'épaisseur des terres superficielles, de 2 à 3 m en moyenne, peut atteindre les 5 mètres, formant en quelque sorte le symétrique de la topographie de la termitière (fig. 7). Il devient évident qu'une grande partie des ces terres superficielles a été extraite des parties claires de l'horizon bariolé.

Le second faciès de l'horizon bariolé se situe sous un sol qui, aujourd'hui encore donne des signes d'hydromorphie. Les différences avec l'horizon bariolé du plateau sont les suivantes :

- La couleur des éléments passe du rouge au brun foncé;
- La forme des concrétions, émoussée sous le plateau, est ici anguleuse.

Il pourrait s'agir de la partie supérieure d'une plinthite, mais étant donné le caractère jointif que les éléments ont acquis aujourd'hui, il n'est pas aisé d'en juger.

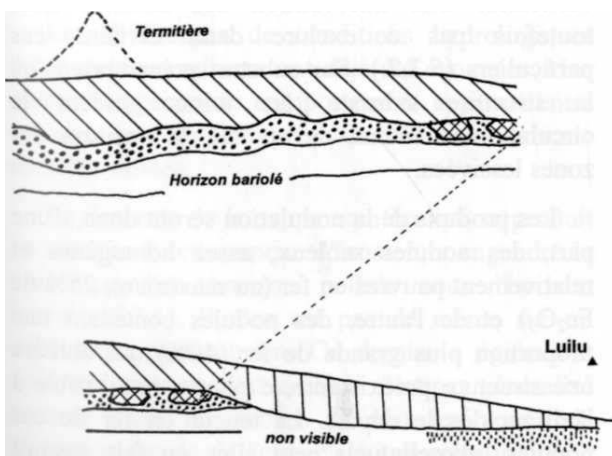


Fig. 7.-. La stone-line de la haute Luilu. La coupe a 50 m de long. Mêmes conventions de signes qu'à la figure 3.

2.3.3. Profil de dembos

Les dembos occupent des dépressions de faible profondeur et aux versants à peine marqués. Un grand nombre d'entre eux sont situés à la tête de vallées assez mal dessinées. Les dembos visités ont été le siège d'une accumulation de sédiments fins apportés par le ruissellement lors de phase(s) morphoclimatique(s) antérieure(s), probablement de caractère plus aride. La nappe y affleure en saison des pluies et se retire, la plupart du temps, à quelque 1,5 m de profondeur en saison sèche. Les dembos sont occupés par des sols hydromorphes, de couleur gris clair.

La partie du sol située sous le niveau de la nappe est de couleur brun rougeâtre (2,5YR4/6) et son sommet présente un horizon bariolé rudimentaire avec éventuellement quelques nodules indurés.

Les dembos plus humides où la nappe se maintient à moins de 1 m de la surface sont occupés par un gley qui s'oxyde à la saison sèche. Dans ce cas, à la place d'un horizon bariolé, on observe une série de taches rouge violacé peu intense entourée par de larges zones d'une même couleur grise que le gley superficiel, dans sa phase réduite.

2.3.4. Conclusion

La proximité du sommet de la nappe aquifère requise par l'horizon bariolé dans le milieu sableux, doit également constituer une condition nécessaire sur substratum précambrien. Dans ce milieu peu perméable et dans un site de bas de versant, voire de fond de vallon, de telles conditions hydrologiques peuvent toutefois entraîner la formation de sols hydromorphes. Dans les sables, une telle situation s'est révélée assez rare. Dans le profil de Kinkolobwe, la stabilité de la nappe et une circulation plus aisée de l'eau avait empêché la formation d'un horizon bariolé.

Sur le substratum précambrien, il se produit toute une gamme de conditions de drainage, si l'on en juge par les produits qui en résultent. En se rapprochant progressivement du fond mal drainé, on observe :

- Un horizon bariolé formé dans des conditions aérées, probablement semblables à celles de Kiniama (2.2.1), produisant dans sa partie supérieure des nodules rouge violacé (profil de la Kasapa et de Luilu, *pro parte*);

- Un horizon bariolé dont les éléments indurés sont, non pas rouge violacé mais brun foncé. On les observe encore aujourd'hui sous une certaine épaisseur de sols gris. L'épaisseur de l'ordre de 3 m suggère que le processus a suivi quelque temps la rivière dans son enfoncement (Luilu);
- Une absence d'horizon bariolé: à sa place s'est développé un gley, avec un faciès oxydé pulvérulent.

Le premier cas a fourni des nodules constitués de la roche en place imprégnée par le fer: ce sont des nodules lithorelictuels. Les éléments indurés du second cas sont des plaquettes qui évoquent les concentrations de fer de la plinthite. Dans le troisième cas, le matériel de base est constitué de colluvions accumulées dans de légères dépressions mal drainées. Les teintes rouges de l'horizon bariolé et les ébauches de nodules, semblent en complet divorce avec le sol hydromorphe qui les surmonte. L'ébauche d'horizon bariolé est très probablement héritée de conditions moins humides.

L'horizon bariolé observé à la Kasapa constitue la norme car, l'érosion verticale des rivières a éliminé la plupart des parties mal drainées éventuelles. Cette érosion n'est pas la seule à avoir modifié l'environnement. En effet, les termites ont, non seulement évacué le matériel terreux des parties non indurées de l'horizon bariolé et ont en outre intégré la partie supérieure de cet horizon dans la stone-line.

2.4. Discussion et conclusion

2.4.1. La nodulation

Tardy (1993, p. 72) est le premier à avoir clairement défini la dualité qui oppose les parties fortement colorées aux plages plus claires. Les taches rouges ou brunes sont le siège d'une illuviation tandis que les plages claires sont décolorées par l'éluviation. La circulation de l'eau, plus aisée dans ces dernières, entraîne une accélération des départs. Selon Tardy, même la kaolinite serait lixiviée. Dans les zones colorées, par contre, les pores, obstrués par les dépôts de fer, sont progressivement de plus petite taille, ce qui les place en dehors des flux d'eau de gravité. Une autocatalyse renforce donc le phénomène.

Il n'y a donc pas de migration *directe* des oxydes de fer des zones claires vers les taches

sombres. En effet, il n'y a pas concomitance entre la fixation du fer et le lessivage. La fixation se produit à la fin de la saison sèche, période favorable à la concentration en fer et à la dessiccation. Le lessivage se produit ultérieurement, lorsque les eaux des premières pluies atteignent la nappe. Elles sont alors au maximum de leur agressivité car elles entraînent de nouvelles substances humiques et n'ont pas encore subi la dilution du cœur de la saison des pluies. Un point reste à éclaircir. S'il est acquis que les départs dans les zones claires se font par lessivage localisé, l'enrichissement des zones sombres ne peut se produire que par l'intermédiaire de la nappe. Ces apports sont-ils répartis de façon homogène dans toute la zone ou bien se portent-ils directement vers des points de concentration? Ce mouvement centripète est vraisemblable si le fer déjà concentré s'y trouve à l'état cristallisé.

L'ensemble de ce mécanisme complexe sera désigné sous le terme de *nodulation*, terme emprunté à Tardy (1993, p. 70). Ce dernier attribue, toutefois, un rôle décisif à la kaolinite dans la fixation du fer. La nodulation présentée ici, est simplement liée à la surface de la nappe aquifère. En ce qui concerne la formation des nodules sableux, il est en effet difficile de prêter un rôle quelconque à la kaolinite. Quant à la nappe aquifère, elle s'est retirée après la nodulation (5.2.2), et ses effets seraient problématiques si le profil de Kinima n'avait pas montré son rôle capital.

En milieu homogène, la localisation des parties claires est guidée par le réseau radicaire comme le suggère la prédominance des orientations verticales. Une intervention des termites n'est toutefois pas à exclure dans certains cas particuliers (5.3.2.). Sur substrat précambrien, où la structure subsiste, les joints guident la circulation et fixent, de ce fait, la position des zones lessivées.

Les produits de la nodulation seront donc, d'une part, des nodules sableux, assez homogènes et relativement pauvres en fer (au maximum, 25% de Fe_2O_3) et de l'autre, des nodules contenant une proportion plus grande de fer (40%) qui oblitère une structure préexistante, d'ailleurs peu visible à l'œil nu dès le départ. La teneur en fer de ces nodules lithorelictuels peut aller, en fait, jusqu'à 60%. Ces derniers nodules ne se trouvent plus dans l'horizon bariolé, car ils ont été intégrés par les termites dans la formation ferrugineuse immédiatement supérieure (3.2.1.2.).

2.4.2. Relation avec la nappe aquifère

La zone bariolée semble donc être étroitement liée à la partie supérieure de la nappe aquifère. La question a cependant été diversement appréciée par les spécialistes.

- Pour certains, toute relation semble sans fondement. Cette opinion se fonde sur la prise en compte, à côté des nodules dus au processus de nodulation, de différents autres types de concrétions (5.2) dont certains sont sans relation directe avec l'horizon bariolé;
- D'autres pensent que la zone serait associée non avec la nappe phréatique, mais avec une nappe suspendue, niveau d'engorgement (hydromorphie) quasi-permanent (Maignien, 1966, p.106 et dans le cadre d'un schéma plus complexe, Leprun, 1979, p. 197), Ces derniers se fondent sur une certaine analogie entre la zone bariolée et les pseudo-gleys;
- Enfin d'autres encore, avaient déjà noté la présence d'un horizon illuvial près du sommet de la nappe (de Swardt, 1964) ou d'une zone de formation de nodules ("spaced pisolithic laterite" de Mac Farlane, 1976, p. 23), zone qui serait le stade initial d'une *groundwater laterite*. Cet auteur, comme le terme utilisé l'indique, attribue à la nappe phréatique une responsabilité certaine dans la formation de l'horizon bariolé, sans toutefois décrire plus en détail les processus impliqués.

2.4.3. Les horizons bariolés en milieu sableux et sur roche précambrienne

Les différences de conditions hydrologiques entre les deux milieux ont déjà été évoquées. Une autre divergence de comportement apparaît entre ceux-ci, lors de la reprise de l'érosion verticale dans les vallées.

La descente de la nappe aquifère qui se produit en réponse à cette reprise d'érosion, a engendré la naissance d'un horizon pallide sous l'horizon bariolé (2.2.6). Il n'en est pas de même sur un substratum précambrien. Ce dernier a également subi un lessivage mais celui-ci n'est pas généralisé comme dans les sables. Il suit les zones de migration rapide de l'eau, c'est-à-dire les joints de stratification et éventuellement les diaclases. De cette façon, l'horizon bariolé s'étend en apparence vers le bas, et de ce fait semble plus épais que sur les sables. Dans certains cas exceptionnels, la

nodulation peut suivre momentanément cette descente (exemple de la Luilu). Dès que le site est mieux drainé, la zone sous l'horizon bariolé continue de s'altérer sans enrichissement notoire en fer, même localisé. Il suffit de comparer les teneurs en fer à celles de la roche fraîche (profil de la Kasapa, 2.3.1).

Une dernière différence sépare les horizons bariolés des deux milieux, précambriens et sableux. Dans les premiers, la partie lessivée étant devenue meuble, a pu être emmenée par les termites, pour autant qu'elle se trouve au-dessus de la nappe. Ce n'est que rarement le cas dans l'horizon bariolé des sables. Le calcul effectué antérieurement pour estimer un apport extérieur de fer et fondé sur une teneur moyenne de l'horizon bariolé, nodules et partie lessivée confondus (2.2.1), n'était donc justifié qu'en milieu sableux, hors de la présence des termites.

2.4.4. Lessivage oblique

Comme nous venons de le rappeler, en milieu sableux, la teneur globale en fer de la zone bariolée serait un peu plus élevée que dans la lithomarge. Cependant, Eschenbrenner (1987, p. 429) a démontré que, dans les régions qu'il a étudiées en Côte d'Ivoire, l'apparition de taches ("glébulles diffus" est la désignation pédologique utilisée par l'auteur) peut se faire sans arrivée de fer supplémentaire, par simple différenciation.

De telles constatations mettent en question le lessivage oblique invoqué par Maignien (1966, p. 107) pour expliquer partiellement l'enrichissement en fer des cuirasses secondaires. Il est cependant indubitable qu'une certaine quantité de fer s'échappe du profil. On le retrouve dans les eaux des rivières et dans les précipitations des sourcins de bas de versant. Il se produit donc un transit latéral du fer à travers l'horizon bariolé. Dans certaines conditions, ce fer en transition est donc susceptible d'être piégé dans un profil de bas de versant.

Dans les sables, il arrive quelquefois que l'horizon bariolé soit tellement riche en fer qu'il forme, sans plus attendre, une sorte de cuirasse de faciès massif dans le cœur, et d'aspect contourné dans la partie extérieure (4.3.8.1). Ces cuirasses que nous avons désignées sous le terme de cuirasses monophasées, ont dû bénéficier d'un apport de fer extérieur, qui selon son origine, a donné un produit rouge (à partir de la nappe), ou ocre brun (le produit d'un lessivage superficiel).

2.4.5. *Etat du fer*

Pourquoi le fer a-t-il pu être éliminé de l'horizon pallide et non de l'horizon tacheté? (profil de l'érosion de Katentania). Étant donné que l'eau chargée de matières organiques vient du haut, l'horizon tacheté, formé auparavant, aurait dû être éliminé en premier lieu. Le fer s'y trouve donc sous une forme moins facile à attaquer. Nous reviendrons sur ce problème (5.5.4.2).

D'autre part, à quel moment cette fixation s'est-elle produite ? A-t-il fallu attendre un abaissement de la nappe pour qu'elle se manifeste, comme le suggère Maignien (1966) ?

2.4.6. *Age*

L'horizon bariolé s'est développé, entre autres, dans des sables remaniés au cours du Quaternaire.

Une partie ces horizons date donc de cette époque. Les siltites précambriennes, par contre, ne fournissent pas un tel argument. Toutefois, comme on vient de le voir, la nodulation n'est pas compatible avec une nappe trop basse. L'horizon a donc dû être fonctionnel avant la reprise d'érosion qui s'est produite, au plus tard, dans le courant du Quaternaire (6.4.8). Le phénomène dut se produire également au cours du Tertiaire puisque nous retrouvons des nodules lithorelictuels, produits de la nodulation, dans des cuirasses datées de cette époque (4.3.7). Il a donc continué à se produire jusqu'à une époque assez avancée dans le Quaternaire. Sans reprise d'érosion dans les vallées, il semble qu'il pourrait se produire encore à la période actuelle (profil de Kiniamo, 2.2.1).

3. LA STONE-LINE FERRUGINEUSE ET L'HORIZON SUPERFICIEL

Une observation hâtive des fossés de la route, au sommet des versants, pourrait donner la fausse impression que la couche des éléments grossiers de la stone-line est fréquemment en affleurement. En fait, cette couche disparaît la plupart du temps sous des terres de couverture auxquelles elle est, par définition, liée. Il n'est pas de stone-line sans un système à trois niveaux: terres superficielles, nappe de gravats, et soubassement qui est, presque toujours, la roche en place altérée. L'horizon superficiel est indissociablement lié à la notion de stone-line, et l'un et l'autre seront donc traités de concert. Ceci n'exclut pas la présence d'un horizon superficiel au-dessus des cuirasses; sa mise en place ne pose pas de problèmes distincts.

3.1. Dénominations

3.1.1. Stone-line

C'est parce qu'elle est, le plus souvent, observée dans les deux dimensions d'une coupe, que la couche d'éléments grossiers a reçu le nom de *stone-line*, terme qui a été largement adopté, même dans les travaux en français. Une traduction littérale dans cette dernière langue n'aurait pu se faire qu'au prix d'une perte d'identité. C'est, en fait, de *stone-layer* ou de *nappe de gravats* (de Heinzelin, 1955) qu'il faudrait parler. Le terme de gravats évoque toutefois le produit d'une destruction, ce qui n'est que partiellement le cas.

Les éléments grossiers de cette nappe contiennent fréquemment une certaine proportion d'éléments ferrugineux, nodules, gravillons, voire débris de cuirasse. Des précisions sur ces différents termes seront données en 5.2. Mac Farlane (1971, 1976) utilise, pour désigner de telles stone-lines ferrugineuses, l'expression "pisoliths (entendez : nodules) accumulating as a sheet", qu'elle distingue d'une "spaced pisolithic laterite" qui serait l'équivalent des nodules de l'horizon tacheté.

Les éléments ferrugineux de la stone-line ont parfois été désignés sous l'appellation de *grenailles latéritiques*. Outre que ce terme doit être utilisé au singulier car il désigne un collectif, il évoque une liberté des éléments les uns vis-à-vis des autres,

bien venue dans le cas des stone-lines mais non dans celui des cuirasses. Il inhibe, de ce fait, tout parallèle entre les deux formations.

3.1.2. Horizon superficiel

La dénomination d'horizon superficiel est, en apparence, uniquement descriptif et semble ne s'engager dans aucune voie interprétative. Cependant, tout horizon superficiel est partie intégrante d'un profil, profil qu'il convient de bien définir et de ne pas confondre avec l'ensemble des horizons sous-jacents dont les formes caractéristiques, acquises antérieurement, ont été à peine retouchées depuis lors.

Terres de recouvrement est un terme qui anticipe sur une des interprétations qui ont été données pour l'origine des stone-lines. Il ne convient d'ailleurs pas aux recouvrements sableux.

3.2. Analyse de quelques profils

Des différences sensibles peuvent se produire dans la composition en éléments grossiers, dans l'agencement interne et dans le type de contact avec le soubassement. Ces caractères sont assez souvent associés et paraissent être sous la dépendance soit de la nature du soubassement, soit du type de mise en place.

3.2.1. Sur substratum précambrien 3.2.1.1.

Observation

• La nappe de concrétions ferrugineuses

La partie supérieure du profil de la Kasapa (2.3.1, fig. 6a) est occupée par une stone-line au-dessus d'un horizon bariolé commenté ci-dessus.

Entre 55 et 20 cm de profondeur, se trouve une concentration d'éléments ferrugineux d'une taille assez comparable à ceux de la cuirasse toute proche (4.3.7.1). Leur nature varie progressivement selon la profondeur.

A la base, les nodules sont essentiellement de nature lithorelictuelle et leur teneur en Fe_2O_3 est légèrement supérieure à 40%. Ils sont cernés d'un liséré de décoloration et leur forme est émoussée. A mesure que l'on progresse vers le haut, apparaissent quelques nodules plus riches en fer (jusqu'à 60%), sans décoloration, et d'autres nodules couverts d'une patine, des grains de quartz,

et surtout des débris de cuirasse. Comme il sera vu plus tard, les nodules couverts d'une patine ont effectué un séjour en surface et constituent de ce fait des gravillons. Afin de ne pas présumer d'un diagnostic entre nodule et gravillon, qui sera exposé plus loin (4.4.7), les gravillons seront considérés comme d'(anciens) nodules. Les débris de cuirasses se reconnaissent aisément à leur contour anguleux et à leur teneur élevée en Fe_2O_3 (souvent plus de 50%). Rappelons cependant que certains petits fragments (de l'ordre du millimètre) se retrouvent, transportés par les termites, jusque dans l'horizon bariolé sous-jacent (niveau 2 de 2.3.1).

Tout comme dans cet horizon bariolé, il existe au sein de la stone-line des galeries de termites encore en activité ou récemment abandonnées. La couleur des terres de remplissage indique soit des mouvements vers le haut (couleurs ocre ou rouge), soit, plus fréquemment, vers le bas (couleurs blanchâtres, grises, voire noirâtres). Ces galeries d'un diamètre moyen de l'ordre de 2 à 3 mm, ne sont, elles-mêmes, jamais étançonnées par un enduit (4.4.2.3.2).

La stone-line ne recèle, d'ailleurs, aucun enduit (4.4.1.4). A la différence de l'enduit, la patine signalée plus haut ne consiste pas en une couverture étrangère à la surface qu'elle couvre, mais en une modification de la partie externe du nodule. Selon Eschenbrenner (1987, p. 124), la patine est moins poreuse que la partie interne et progressivement plus ferrugineuse. Elle se formerait par dissolution et précipitation du fer.

• Les terres de couverture

Les dix premiers centimètres du profil sont occupés par une couche limono-argileuse qui n'est autre que l'horizon superficiel. A quelque distance de la gravière, cet horizon devient plus épais et dépasse les deux mètres.

Un horizon humifère gris, peu épais (quelque dix cm) sous forêt claire, couvre un horizon ocre (10YR7/6). Ce dernier est le siège de quelques galeries de termites en activité.

La composition est assez homogène, mais une analyse granulométrique (fig. 8) montre que la partie supérieure est quelque peu différente. Dans les 30 premiers centimètres, se dessine un appauvrissement en argile (0-2 μm), un statu quo dans la fraction silteuse (2-100 μm) et une augmentation importante des sables fins (100-1000 μm).

D'autre part, quelques éléments de la stone-line sous-jacente sont quelquefois dispersés dans la masse.

3.2.1.2. Interprétation

• La nappe de concrétions ferrugineuses

La partie inférieure de la stone-line est une simple prolongation de l'horizon bariolé. La matrice y est simplement un peu moins abondante sans toutefois que les éléments grossiers soient toujours jointifs. Leur plus grande concentration peut, ici aussi, être attribuée au départ de matériel meuble sous l'action des termites dont les galeries d'exploitation sont encore visibles. Cette partie inférieure est donc autochtone et, pour des raisons évidentes, sa limite inférieure manque de netteté.

La partie supérieure est, au contraire, le mélange d'un même matériel et d'apports externes. Le trajet effectué par ces derniers n'est pas nécessairement très grand. En l'occurrence, il pourrait provenir de la cuirasse toute proche, voire d'une partie de celle-ci qui couvrirait la zone auparavant. Le déplacement n'a pas dû être bien grand. Le fait important est que cette partie de la stone-line a séjourné à la surface du sol. Elle y a, probablement, été soumise à l'impact des gouttes de pluie et à un ruissellement diffus qui pourrait être responsable des déplacements.

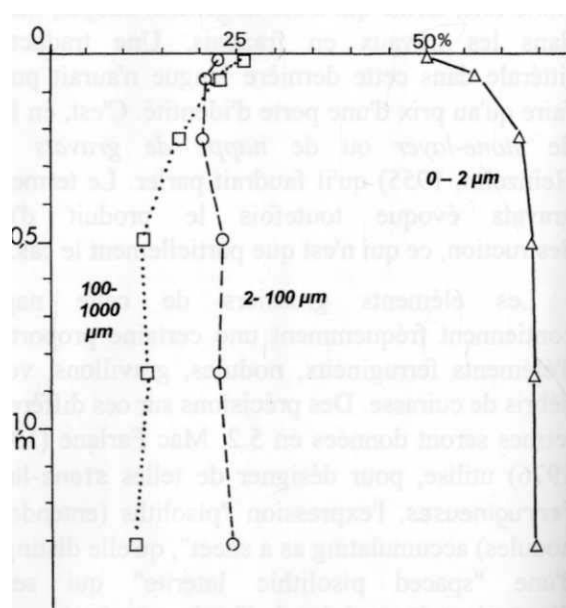


Fig. 8.- Granulométrie de la partie supérieure de l'horizon superficiel. Carence en éléments fins de l'horizon superficiel dû à un départ sélectif par ruissellement, malgré le fractionnement des particules par les termites de leurs apports en surface.

Une telle partition de la stone-line avait déjà été constatée par Laporte (1962). C'est toutefois à Stoops (1967) que revient le mérite d'avoir précisé le phénomène en ce qui concerne les stone-lines ferrugineuses. Dans les profils du Bas-Congo, la partie inférieure de la stone-line est plus épaisse qu'au Katanga et peut atteindre le mètre. En outre, une structure géologique mieux apparente y témoigne des faibles perturbations géométriques du matériel. Des filons de quartz y ont gardé un tracé peu perturbé à travers toute la stone-line inférieure. Dans la partie supérieure, ils se fragmentent et s'éparpillent selon une surface assez nette (fig. 9). Une telle disposition est également signalée dans des cuirasses d'imprégnation de l'Afrique Occidentale (D'Hoore, 1954, p. 62), par ailleurs de structure proche de notre exemple 5216 (4.3.6.1).

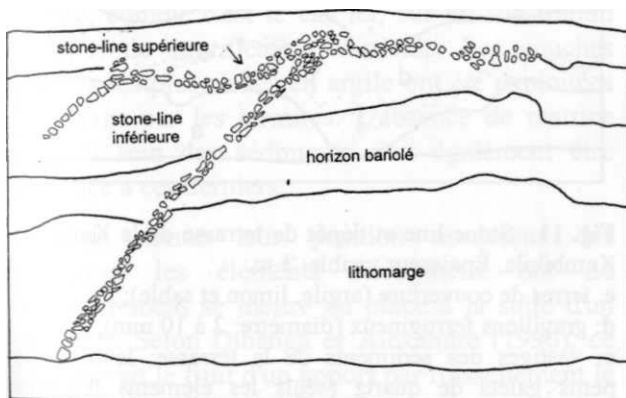


Fig. 9.- Filons de quartz et stone-lines supérieure et inférieure (d'après Stoops, 1967, fig. 6). Hauteur du profil: 3 m.

De ce qui précède, la filiation entre l'horizon tacheté et la stone-line, sur un substratum précambrien, paraît évidente. Une telle filiation a été évoquée dès 1918 par Woolnough, et ensuite par une série d'auteurs parmi lesquels Tricart et Cailleux (1965), Mac Farlane (1976), Alexandre (1978), entre autres. Ces derniers, en utilisant leurs propres termes, ont fait de cette liaison la pierre angulaire d'interprétations par ailleurs assez divergentes (3.3.2, en particulier).

• Les terres de couverture

Les terres de couvertures trouvent leur origine dans les différents types de dépôts provisoires que les termites ont aménagés à la surface ou à proximité de celle-ci, et qui sont toujours visibles à l'heure actuelle. Outre les remblaiements de

galeries dans le sol, il existe donc un grand nombre de sites où les remontées des termites seront exposées, tôt ou tard, à l'impact des gouttes de pluie:

- Les grandes termitières s'érodent par ruissellement et par glissement; les produits s'étalent au pied du monticule, souvent couverts des mêmes graminées exigeantes (*Setaria*) que la termitière (Aloni, 1975);
- Certains arbres sont le support de galeries provisoires assez fragiles qu'une pluie violente détruit aussitôt, laissant sur le tronc des traces de galeries jusqu'à une hauteur de 2 à 3 mètres. Des galeries semblables existent aussi à même le sol mais plus rarement;
- Des arbres morts ont leur intérieur éliminé et remplacé par de la terre.

L'impact des gouttes de pluie dissocie les agrégats et les livre au ruissellement diffus qui étale les produits à la surface du sol.

La différenciation granulométrique décelée dans les 30 centimètres supérieurs de l'horizon superficiel a également été notée par Eschenbrenner (1987, p. 430) dans le Centre et le Nord de la Côte d'Ivoire. Elle ne peut être attribuée au seul effet du splash et du ruissellement. Il faut y ajouter la division des particules d'une certaine taille par la trituration des termites. Si le pourcentage de particules silteuses reste constant, c'est, en fait, parce que la partie la plus fine de cette fraction granulométrique est érodée en même temps que les argiles, tandis que les sables fins dont la proportion augmente par accumulation relative, se fractionne partiellement en éléments de la taille des silts.

3.2.2. En milieu sableux

3.2.2.1. Observation

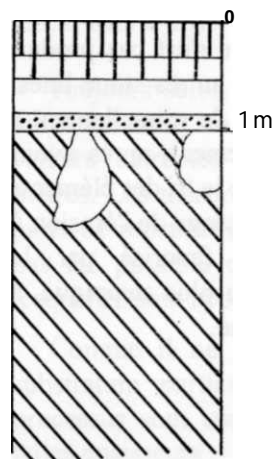


Fig. 10.- Profil de la stone-line de la Kisa Moya. Mêmes conventions de signes qu'à la figure 3.

De haut en bas du profil de la stone-line de la Kisa Moya (fig. 10) :

- de 0 à 32 cm: horizon noir,
- de 32 à 56 cm: horizon brun (7,5YR5/4),
- de 56 à 84 cm: horizon blanchâtre, semblable aux poches observées sous la stone-line,
- de 84 cm à 1 m : stone-line, composée uniquement de nodules sableux de couleur rouge brun sombre (2,5YR3/6) et d'une taille moyenne de 6mm, relativement bien triés,
- de 1 à 4 m (visibles) : sable rouge (7,5R4/8) avec des taches et des traînées ocre (7,5YR7/8); les 40 cm supérieurs sont affectés de larges poches blanchâtres (7,5YR8/4).

La base de la stone-line est particulièrement nette.

3.2.2.2. Interprétation

Sous les stone-lines sableuses, on ne retrouve aucune trace d'un horizon bariolé. Le sable est un matériau plus facile à éroder. L'érosion superficielle a donc tronqué le profil et l'horizon bariolé a été éliminé. Seule, la composante la plus grossière, les nodules, a subsisté sous forme de dépôt résiduel. C'est pourquoi une partie des stone-lines du plateau des Bianco repose directement, soit sur l'horizon rouge inférieur (v. le profil de Kiniama, 2.2.1), soit sur un horizon pallide, l'horizon rouge ayant été complètement lessivé. Cette érosion superficielle explique la limite inférieure bien nette de la stone-line. Le milieu sableux ne présente donc pas de passage progressif comme c'est le cas sur le substratum précambrien.

En l'absence de termites, l'enfouissement des stone-lines en milieu sableux ne s'est pas produit de la même façon que pour les autres stone-lines. Le sable étant facilement érodé, le ruissellement a apporté le matériel de recouvrement, après avoir, dans une phase antérieure, opéré le tri des éléments grossiers de la stone-line. Ce passage de l'érosion à la sédimentation a dû être favorisé par le développement d'une végétation plus steppique, à la suite d'une variation climatique.

3.2.3. Sur terrasse fluviale

3.2.3.1. Observation

Les exemples d'une terrasse transformée en stone-line sont nombreux. Il est, en outre, fréquent que les vestiges d'alluvions fluviales soient surmontés par des éléments ferrugineux. C'est le cas dans une terrasse de la Kafubu (Dibanga et Alexandre, 1996, p. 39) (fig. 11). Les différents niveaux sont affectés d'involutions dont l'amplitude peut dépasser 2 m. Même si l'on fait abstraction de celles-ci, les épaisseurs varient fortement en l'espace de quelques mètres. De haut en bas :

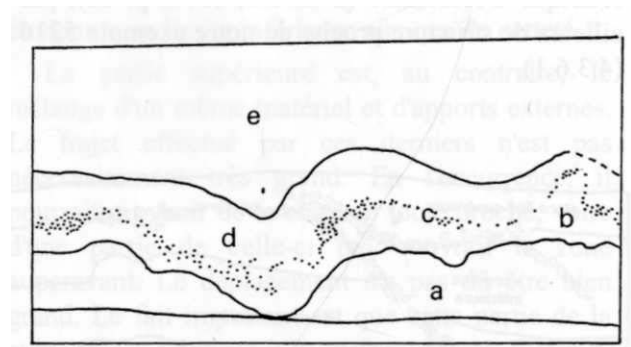


Fig. 11.- Stone-line et dépôt de terrasse de la Kafubu à Kambikila. Épaisseur visible: 3 m.

- e: terres de couverture (argile, limon et sable);
- d: gravillons ferrugineux (diamètre: 2 à 10 mm);
- c: vestiges des sédiments de la terrasse: lentilles de petits galets de quartz (seuls les éléments les plus grossiers, plus de 1 cm, ont été dessinés);
- b: Substratum imprégné de fer, en fines plaquettes;
- a: substratum altéré, de structure non oblitérée.

- Entre quelques centimètres et 2,5 m, un limon de couverture orange (de 5 à 7,5YR7/6);
- Entre 0,13 et 0,40 m d'épaisseur, une stone-line ferrugineuse, composée d'anciens nodules lithorelictuels avec un léger liséré de décoloration, de quelques débris de cuirasse et de rares grains de quartz;
- Une couche épaisse de 0 à 0,80 m, de cailloutis modérément émoussés (quelques-uns sont toutefois bien arrondis), avec 80% de quartz, accompagnés de quartzites, de grès et de débris de chert;
- 0,40 m au maximum, de roche précambrienne en place, se débitant en petites plaquettes fortement imprégnées de fer;

- Enfin, de 0 à 2,5 m visibles, le Précambrien en place, altéré mais non imprégné; la stratification de ce substratum est, ici, verticale.

A la base du cailloutis, se rencontrent des outils préhistoriques d'une facture assez grossière attribués à une industrie assez ancienne (Pebble Culture). Les angles plus ou moins émoussés témoignent d'un remaniement par la rivière.

Le sommet de la stone-line est souligné par des esquilles de quartz posées à plat, esquilles qui sont manifestement le produit d'une activité humaine.

3.2.3.2. Interprétation

Les formes ondoyantes de la stone-line sont provoquées par un soutirage différentiel de produits terreux, exercé par les termites à partir de la profondeur. Ce soutirage différentiel peut devenir très important au droit des termitières, ou encore, comme c'est le cas ici, sur un substratum varié et de stratification verticale. Les couches altérées les plus riches en argile ont été exploitées davantage par les termites. L'absence de matrice fine au sein des sédiments doit également être attribuée à ces derniers.

Étant donné leur position au-dessus des alluvions, les éléments ferrugineux ont dû nécessairement se mettre en place à la suite d'un transport. Selon Dibanga et Alexandre (1996), ce dépôt serait le fruit d'un apport par ruissellement le long du versant tout proche. Cette sédimentation se serait produite au cours d'une phase climatique plus sèche, au cours du Quaternaire.

La présence d'artefacts non repris par la rivière confirment la présence, à un moment donné, de la stone-line à l'air libre. En effet, au départ, ils auraient été abandonnés par l'homme à la surface du sol. Une objection à cet argument subsiste toutefois. En effet, ces artefacts auraient pu descendre au sein des terres de couverture à la faveur d'une modification de l'indice de liquidité de celles-ci (Moeyersons, 1987). L'indice de liquidité à atteindre est toutefois tel que l'éventualité en est fort peu probable.

Malgré les déformations dues aux termites, la base de la stone-line, c'est-à-dire le contact avec les alluvions fluviales, est marquée nettement.

Les stone-lines dérivées de dépôts de terrasses, ou du moins de ce qui en a subsisté, ont beaucoup de traits communs avec l'horizon supérieur des stone-lines sur roches précambriennes. En effet, si la partie fine de l'horizon bariolé a été emportée

par les termites, ne laissant subsister sur place que les éléments grossiers, il en a été de même pour des colluvions contenant des concrétions ferrugineuses. Il est, ici, évident que ces dernières ont, dans ce dernier cas, subi un transport non négligeable.

3.3. Épaisseur des niveaux

3.3.1. Horizon superficiel

D'après une enquête (Aloni *et al.*, 1987), malheureusement limitée à certaines zones du Katanga susceptibles de contenir du cuivre, la profondeur de l'horizon superficiel est, en moyenne de 2,6 m, avec des minimums de 0 m et des maximums de l'ordre de 20 m.

Les ondulations qui animent la stone-line n'ont aucune répercussion à la surface du sol (fig. 11). Les apports des termites à la surface ont été étalés sous l'action de l'impact des gouttes de pluie et du ruissellement diffus. Le résultat en est une grande régularité de la surface du sol qui dissimule les imperfections de la base, modifiée par le soutirage des termites. Quelquefois, il en est de même pour certains phénomènes karstiques de faible ampleur.

Ces festonnements de la stone-line n'existent que rarement dans les sables, car, en général, ces derniers sont désertés par les termites. Ils apparaissent toutefois lorsque la couverture sableuse est peu épaisse et laisse le substratum précambrien à la portée des termites. Tel est le cas dans la carrière de Tshilongo (Biano), où 5 mètres seulement séparent la surface du sol du soubassement argileux. Le même schéma peut être réalisé, lorsque le sable provient de l'altération d'un grès avec des interstratifications de nature plus argileuse.

3.3.2. Stone-line

Toujours selon Aloni *et al.* (1987), l'épaisseur moyenne de la stone-line est de 2 mètres avec des valeurs extrêmes de quelques centimètres à 5 mètres. Les mesures ayant été effectuées dans des puits de prospection espacés de 10 à 20 m, il n'a pas été possible de préciser les conditions dans lesquelles sont apparues ces épaisseurs hors norme.

Comme il ne peut être fait appel, ici, à un substratum particulièrement riche en fer, deux processus sont susceptibles de rendre compte de telles épaisseurs :

- a. Un lessivage oblique apportant un supplément de fer à un horizon bariolé dont la destruction a engendré la stone-line;
- b. Un apport important d'éléments ferrugineux par ruissellement dans la partie supérieure du versant.

Ces deux explications sont toutefois réservées aux secteurs situés au bas d'un versant, encore visible ou éliminé par une érosion ultérieure (Maignien, 1966, p. 104).

Une autre explication a été avancée par plusieurs auteurs (Trendall, 1962; de Swardt, 1964) et développée ensuite par Mac Farlane (1976). Cet auteur fait intervenir une descente sur place de tout le profil à mesure que la nappe aquifère s'abaisse à la suite de reprises d'érosion dans les vallées. Au cours de cette descente, l'épaisseur des différents horizons est conservée à l'exception de celle de la stone-line, moins sujette à des dégradations. De ce fait, elle augmente en importance tout en se retrouvant à une altitude inférieure. Nous suivrons Maignien (1966) lorsqu'il ne pense pas que les conditions de nappe aquifère favorables à la genèse de nodules puissent se reproduire à tous les niveaux, au cours de l'abaissement de la nappe. En effet, comme il a été vu (2.3.4), la nodulation ne peut se produire qu'à une profondeur modérée.

3.4. Mise en place

3.4.1. Origine des éléments ferrugineux

Les lieux de formation des éléments ferrugineux de la taille des nodules sont divers. Dans la présente analyse et selon différents auteurs, ils sont au nombre de quatre :

- la naissance dans la partie supérieure de l'horizon bariolé;
 - la néoformation de nodules au sein même de la stone-line;
 - la dégradation d'une cuirasse préexistante;
 - l'apport de gravillons venant de l'extérieur.
- a. La naissance de nodules dans l'horizon bariolé tant sur substratum précambrien (2.3.1), que sur sable (2.2.5) et leur intégration ultérieure dans la partie inférieure de la stone-line (3.2.1 et 3.2.2), a été suffisamment décrite.
 - b. La formation de nodules dans un horizon superficiel a été évoquée par Mac Farlane (1976, p.

22). Cet auteur les désigne sous le terme de nodules pédologiques sans aborder leur processus de formation. Il peut s'agir, en fait, de nodules pédorelictuels, qui seront décrits dans les faciès de cuirasse (4.3.7.3). Dans ce cas, assez rare, à notre avis, leur individualisation et leur intégration dans une stone-line seraient semblables à celle des nodules lithorelictuels et des nodules sableux décrite ci-dessus.

c. La dégradation d'une cuirasse a fourni les débris rencontrés dans la partie supérieure de certaines stone-lines. Ce processus semble confiné aux marges de cuirasses bien développées ou, peut-être, à la place de cuirasses formées *in situ* et disparues par après, parce que trop minces. Pour Levêque (1970, p. 197) ainsi que pour Tardy (1993, p. 63), la plupart des sols à nodules, et par conséquent, toutes les stone-lines ferrugineuses seraient le produit de la destruction de cuirasses.

d. Enfin, les gravillons ferrugineux peuvent se déplacer sur un versant même en pente douce. C'est le cas de la stone-line de la Kafubu (3.2.3). Les observations de Laporte (1962), relatives à une nature des éléments de la stone-line strictement liée à celle du substratum, pour être remarquables, ne sont toutefois pas d'application universelle. A la sortie sud de la ville de Lusaka, par exemple, des gravillons ferrugineux ont été observés sur un calcaire métamorphique, roche bien incapable d'avoir pu les produire.

3.4.2. Processus intervenant dans la mise en place

La liste des processus auxquels il a été fait appel, dans l'interprétation des profils analysés, compte tenu de l'origine des éléments ferrugineux, est la suivante :

1. Altération du soubassement rocheux;
2. Tri par les termites;
3. Tri par le ruissellement aréolaire, après mise en affleurement;
4. Apport, par ruissellement, de matériel alloch-tone, gravillons et éventuellement matrice fine;
5. Déplacement, par ruissellement, de gravillons autochtones;
6. Formation d'une couverture fine due à un transport vertical par les termites et redistribution par le ruissellement;

7. Formation d'une couverture par apport latéral de matériel allochtone par ruissellement ou tout autre agent de transport.

La formation des stone-lines sur roches précambriennes a fait appel aux mécanismes 1, 2, (3)¹, (5) et 6; celle sur sable, aux mécanismes 3, 4, (5), 7; celle à partir de colluvions sur nappe alluviale, aux mécanismes 4, 1, 2, 6. La position des colluvions au-dessus d'une nappe alluviale a été choisie uniquement parce que cette dernière était un garant de l'allochtonie des gravillons.

Le tri par ruissellement, agissant seul, ne peut assurer une grande épaisseur à la stone-line. En effet, le matériel grossier résiduel, assure une protection à la partie inférieure de l'horizon bariolé en voie d'érosion et celle-ci s'arrêterait assez vite, si le processus n'était pas assisté par une certaine bioturbation réalisée, cette fois, non par les termites mais par les fourmis. Un tel micro-dallage protecteur peut s'observer actuellement dans la région de Zinder (Karimoune, 1994). Par ailleurs, le ruissellement s'est également chargé de la mise en affleurement préalable de l'horizon bariolé. Tricart et Cailleux (1965) dans un schéma (fig. 28) suggère ce double effet de l'érosion.

A la différence du ruissellement, les termites commencent leur tri assez tôt déjà pendant le stade de formation de l'horizon bariolé. L'action peut se faire à l'intérieur du sol et ne demande aucune dénudation. Au contraire, les termites, en remontant du matériel de la profondeur, couvrent les éléments grossiers et les mettent à l'abri d'une érosion superficielle. C'est particulièrement le cas pour la partie inférieure de la stone-line. D'autre part, un tel processus rend compte des observations de Laporte (1962) faites sur des coupes pratiquement continues le long du chemin de fer Comilog au Congo-Brazzaville. Dans ces affleurements, les gravillons de différentes natures restent strictement confinés aux substratums qui leur ont donné naissance.

Toute érosion superficielle est nécessairement liée à une exposition à l'air libre. Les indices à l'appui de cette dernière sont nombreux et ont déjà été évoqués (patines, mélanges, divorce entre concrétions et substratum, artefacts).

Les nodules ayant une taille de l'ordre de quelques millimètres, à la limite de la compétence

du ruissellement aréolaire, ne peuvent effectuer qu'un trajet assez limité. Une capacité un peu plus grande du ruissellement, à la faveur d'une légère concentration, peut toutefois déplacer quelque peu ces éléments. Même lorsqu'ils ne constituent qu'un dépôt résiduel, les nodules deviennent, alors, des sédiments et peuvent désormais être désignés sous le terme de *gravillons*.

Le ruissellement auquel il est fait allusion est de type aréolaire, c'est-à-dire actif sur toute la surface du sol. Toutefois, certains auteurs (De Dapper, 1987) pensent qu'il peut également agir linéairement, par sapement d'une microfalaie, abandonnant derrière lui un dépôt résiduel qui, par recouvrement alors que la microfalaie s'éloigne, évoluera en stone-line. Ce phénomène, du moins en ce qui concerne le recul de la microfalaie, a été observé à maintes reprises (Michel, 1978). Selon Maignien (1966), ce processus devrait entraîner une inversion des matériaux qui, à notre connaissance, n'a jamais été signalée dans les observations.

L'enlèvement des particules fines en surface n'est pas un procédé antinomique du tri par les termites et les deux processus ont donc pu se produire sinon simultanément du moins dans des intervalles de temps suffisamment rapprochés pour combiner leurs effets. L'optimum climatique pour chacun des processus doit, en effet, être quelque peu différent.

3.5. Occurrence

Dans la région de Lubumbashi, un champ de puits de prospection (Aloni *et al.*, 1987), a permis de calculer la fréquence des profils selon leur différenciation en horizons.

15%	sans aucune structure
6%	avec 2 niveaux (terres de couverture sur altérites)
54%	avec stone-line non ferrugineuse
15%	avec stone-line ferrugineuse
11%	avec cuirasse ou carapace

Les profils avec stone-line représentent la grande majorité. Toutefois les stone-lines ferrugineuses ne forment que 22% de l'ensemble des stone-lines.

Les formations ferrugineuses ne se présentent que dans 26% des profils. C'est une estimation par défaut, car les zones de prospection contiennent une proportion exagérée de roches peu favorables à

¹ Les numéros entre parenthèses se rapportent à des processus qui sont aléatoires ou secondaires dans la formation des stone-lines.

ce type de formation (4.1.3). Parmi les formations ferrugineuses, les stone-lines sont ici plus fréquentes que les cuirasses.

3.6. Age et pérennité

À l'exception des ondulations provoquées par le soutirage différentiel des termites, les stone-lines se trouvent encore, à l'heure actuelle, dans leur site de formation, mais à quelque distance en contrebas. Les termites continuant leur activité de façon patente, la stone-line continue à s'accroître vers le bas, en conséquence du départ des produits fins sous-jacents.

Grâce à des recherches archéologiques minutieuses (Roche, 1987, p. 174), on a pu mettre une date sur la base des terrains de couverture: 6025 B.P. pour les plus récentes. C'est dire que, pendant la dernière phase climatique sèche du Quaternaire (Léopoldvillien, Ogolien), les éléments de la stone-line étaient à découvert. Il a dû en être ainsi à chaque oscillation du climat

quaternaire vers l'aride. Gras (1970, 281) pense que le matériel d'une stone-line peut avoir été mis à découvert, recueillir des additions de matériel, puis être à nouveau enfouie.

Ces successions de mise à découvert et d'enfouissements successifs ont pu durer pendant une grande partie du Quaternaire.

Un argument supplémentaire en faveur de la pérennité d'une seule et même stone-line en un endroit déterminé, est l'absence de dédoublement. Au Katanga, il est particulièrement rare et très localisé. Il a été trouvé dans deux sites :

1. Sur un versant où s'était produit un fauchage de la stone-line, exploitant une légère dénivellation dans la roche sous-jacente; ce phénomène est limité à quelques dizaines de centimètres;
2. Dans des zones d'affaissement karstique, avec apports répétés d'éléments grossiers à partir de la périphérie et remplissage par des produits fins dans l'intervalle.

4. LES CUIRASSES, LEUR STRUCTURE

4.1. Éléments de la macrostructure

La macrostructure peut être observée à l'œil nu ou, à la rigueur, à l'aide d'une loupe. La microstructure demande des moyens d'investigation plus puissants : microscope polarisant, microscope électronique à balayage, etc. L'observation de la macrostructure a donc été effectuée à l'échelle du millimètre ou du centimètre.

La description des macrostructures qui s'applique couramment aux cuirasses, peut être étendue aux autres formations ferrugineuses tropicales.

La classification des macrostructures se fonde sur la nature, les proportions et les relations géométriques de quatre éléments :

- Les éléments figurés,
- La matrice,
- Les vides,
- Les enduits.

Les enduits se rangent difficilement dans une des trois premières catégories. Ils se présentent, dans certains cas, avec une telle fréquence qu'un traitement séparé nous a paru justifié.

Si les vides ont à peu près la même acception qu'en micropédologie, éléments figurés, matrice et enduits ne couvrent toutefois pas les mêmes concepts que les termes de squelette, plasma et cutanés (Brewer, 1964) dont ils sont, par ailleurs, le pendant. Surgit ici le même dilemme que pour la description des zones du profil (horizons ou niveaux ?) : convient-il d'adopter un lexique relevant de la pédologie ou de la géologie ou mieux encore, s'inspirant de l'une et l'autre ?

4.1.1. La matrice

La matrice est prise dans un sens proche de son acception sédimentologique qui ne s'éloigne guère de la notion de fond matriciel (Tardy, 1993). Elle comprend, à la fois, des grains de squelette (grains de sable, par exemple), du plasma (matériel colloïdal, minéral ou humique) et des microvides

(inférieurs à 1 mm de diamètre). En principe, c'est un matériel interstitiel dont le domaine augmente à mesure que les éléments figurés s'écartent.

4.1.2. Les éléments figurés

Ces éléments figurés sont composés de tous les corps minéraux qui peuvent être individualisés et identifiés à l'œil nu et qui tranchent sur la matrice.

Ils sont de nature assez diverse, entre autres :

- Des glébules ferrugineux (taches, nodules, gravillons, fragments d'enduit)¹;
- Des débris de roche ou de quartz (souvent un quartz polycristallin), dans un état de dégradation plus ou moins avancé;
- De petites masses de matrice bien circonscrites par un enrobage ferrugineux.

Leur diamètre est la plupart du temps de quelques millimètres, mais il peut descendre d'une part jusqu'au sable² moyen (1 mm) et, d'autre part, atteindre la taille d'un galet (quelques centimètres).

4.1.3. Les vides

Les vides au sein des formations ferrugineuses sont de taille et de forme variées. Ces dernières sont, (selon Tardy, 1993, légèrement modifié) :

- Soit des cavités équidimensionnelles, fermées (vésicules) ou ouvertes (alvéoles, vacuoles);
- Soit des cavités développées dans une (chenaux, canalicules) ou deux directions (crevasses). Souvent, les chenaux présentent une section calibrée et s'ouvrent sur des diverticules.

L'origine des vides tombe souvent sous le sens et leur mention apporte une précision supplémentaire. Les plus simples sont :

- Les fentes de retrait et les cassures dans un matériel soumis à la dessiccation ou à des compressions;
- Le départ de substance par altération et lessivage, laissant quelquefois une structure fantomatique (Benza, 1836);

¹ Termes qui seront définis dans la suite.

² Le grain de sable pourrait donc être, en principe, à la fois élément figuré et partie intégrante de la matrice. Toutefois, s'il fait partie de la matrice, il est dans l'impossibilité de trancher sur celle-ci.

- Le défaut de remplissage des zones interstitielles, par un enrobage (un enduit) d'éléments figurés;
- Les actions biologiques dues aux racines et/ou aux animaux fouisseurs, plus particulièrement les termites.

4.1.4. Les enduits

Les enduits (coatings)¹ comprennent tous les revêtements de surface par un plasma ferrugineux. Ils ne constituent donc qu'une partie des cutanes (Brewer, 1964), car ceux-ci comprennent, outre les revêtements, des modifications *in situ* du plasma en périphérie du nodule (par exemple, les patines). Les termes tels que cutanes ou cortex évoquent aussi une telle origine. Or, comme on le verra plus loin (5.1.2), les enduits ont une origine externe.

Les enduits sont constitués principalement de plasma ferrugineux rubané, avec parfois des intercalations de fines strates de matériel étranger (sable, silt, argile). Ces revêtements n'affectent pas que les seuls nodules; on les retrouve à la partie supérieure de certaines cuirasses, sur les parois des diaclases et des vides tabulaires. Ils peuvent exceptionnellement s'être formés à même la surface d'un sol et sur des galets de quartz.

4.2. Types de macrostructure

4.2.1. Les critères

Une typologie des macrostructures se fonde, entre autres, sur :

- Les assemblages entre les éléments figurés et la matrice;
- La forme des éléments figurés;
- La proportion et la forme des vides;
- La présence et l'importance des enduits.

La description des assemblages peut s'inspirer de la classification proposée par Brewer (1964, 170) comme suit :

- **Porphyrique** : les éléments figurés sont noyés dans la matrice et flottent dans celle-ci;
- **Aggloméré** : la matrice forme un remplissage de l'espace entre des éléments figurés jointifs (conglomérat);
- **Granulaire** : aucune matrice.

Par ailleurs, la disposition du fer contribue à l'identification des assemblages :

- **Intertextuelle** : les éléments figurés sont reliés par des ponts d'oxyde de fer;
- **Enrobant** : les oxydes de fer entourent entièrement les éléments figurés et de ce fait, les attachent entre eux.

4.2.2. Typologie

Il est rare qu'une cuirasse ne présente qu'un seul faciès. Bien souvent elle relève de deux, voire de plusieurs types, avec des proportions variables suivant les plages considérées. Même lorsque les critères de chaque faciès peuvent être évalués quantitativement, donc de la façon la plus objective possible, la désignation du faciès prédominant est quelquefois un exercice difficile, certains critères présentant un caractère plus marquant, plus "spectaculaire" que d'autres.

Les faciès les plus fréquemment rencontrés dans la littérature, sont les suivants :

- massif,
- vermiculaire, (*vermicular, vermiform, tubular, tube-shaped, pipe-shaped*),
- alvéolaire, cellulaire, (*vesicular, cellular, kidney-shaped*)
- conglomératique,
- bréchique,
- lamellaire,
- nodulaire,
- gravillonnaire,
- pisolithique.

Ces termes se veulent descriptifs mais sont néanmoins imprégnés d'une certaine dose d'interprétation dont il faut être conscient et sur laquelle on reviendra.

¹ Terme qui sera mieux défini dans la suite.

Un classement dichotomique pourrait être tenté:

- | | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Éléments figurés : | |
| peu nombreux | 2 |
| assez fréquents (>10%) | 4 |
| 2. Vides : | |
| peu importants vides | faciès massif |
| prédominants | 3 |
| 3. Vides: | |
| tabulaires équidimensionnels | faciès vermiforme faciès |
| 4. Éléments figurés: | alvéolaire |
| non ferrugineux ferrugineux | |
| 5. Éléments : | 5 |
| émoussés | 6 |
| anguleux | |
| 6. Éléments: | faciès conglomératique faciès |
| aplatis | bréchique |
| équidimensionnels | |
| 7. Enduits: | faciès lamellaire |
| minces ou absents épais, | 7 |
| zonaires | |
| 8. Traces de séjour en surface : | 8 |
| absentes | faciès pisolithique |
| présentes | |
| | faciès nodulaire faciès |
| | gravillonnaire. |

Comme tout classement, celui-ci est réducteur. En présence de plusieurs faciès simultanés, l'observateur doit juger du critère le plus important. L'ambiguïté d'un tel choix avait déjà préoccupé Prescott et Pendleton (1952). Selon l'orientation de la face observée, le même échantillon de cuirasse peut apparaître sous des faciès différents: par exemple, alvéolaire ou vermiforme (de Swardt, 1964), suivant l'orientation du plan de coupe vis-à-vis de l'allongement des canalicules.

Par ailleurs, les caractères qui attestent d'un séjour en surface des éléments figurés, ont été, par le passé, perçues de façons assez différentes. Elles sont l'objet d'une interprétation et ne constituent plus, dès lors, un critère objectif. C'est en raison d'une genèse assez différente des faciès nodulaires et gravillonnaires que la distinction a cependant été maintenue (4.4.7).

4.3. Analyse d'échantillons

Une cuirasse latéritique ne présentant qu'un seul type de structure est exceptionnelle. Dans les exemples choisis pour illustrer les différentes structures distinguées, il conviendra de faire porter 1 éclairage sur certains aspects et de laisser d'autres

dans l'ombre, même si ces derniers sont quelquefois prépondérants. Une même cuirasse pourra par ailleurs être présentée comme paradigme de deux structures assez différentes.

4.3.1. *Faciès massif*

Le faciès massif affecte principalement les substrats sableux. Comme ce faciès se définit pratiquement de lui-même, on envisagera ici une variante légèrement plus complexe.

4.3.1.1. Échantillon 5277 (Longe 1) (fig. 12)

Le site où cet échantillon a été recueilli, est une colline allongée. Le sous-sol est constitué de quartzites et de phyllades du Kibarien.

Observation :

Le substrat sur lequel s'est fixé le fer est constitué de lentilles de sable grossier (¹), relativement épaisses (plusieurs centimètres) et de lentilles de sable silteux (²), de plus faible extension et d'épaisseur moindre (un demi-centimètre).

Les sables grossiers sont de teinte sombre (5YR3/4), tandis que les sables silteux sont plus clairs (5YR6/4).

Des traces estompées de stratification entrecroisée (³) apparaissent dans les sables grossiers. Ceux-ci sont également affectés par des fentes de dessiccation perpendiculaires (⁴) à la stratification. En outre, ces sables contiennent quelques éléments un peu plus gros qui ont été altérés (⁵) et éliminés en grande partie, abandonnant une structure fantomatique qui révèle une ancienne structure bréchique locale.

Des tubulures (⁶) traversent localement l'échantillon. Elles ont été ensuite, en grande partie, remblayées par du matériel sableux plus riche en produits fins et de teinte violacée (7,5R3/6). La fine stratification des sédiments n'a pas été perturbée par la bioturbation, alors qu'elle comporte des éléments assez fins susceptibles d'intéresser les termites.

Interprétation :

Le matériel qui a été induré est constitué de sédiments déposés par une petite rivière. Le site actuel est donc le résultat d'une inversion de relief.

Dans une partie de l'échantillon, apparaissent de timides manifestations de l'activité des termites. En effet, les tubules sont des galeries et leur remplissage est l'œuvre des termites. Cette intervention est toutefois intervenue après l'élaboration du faciès massif. En effet, une partie des sédiments indurés présente une granulométrie fine qui aurait pu être remaniée par les termites, mais ne l'a pas été.

L'identification du faciès massif repose plus sur le critère d'une absence de structure acquise pendant le développement du caractère ferrugineux. Ces structures héritées, peuvent être très différentes d'un échantillon à l'autre. Leur imprégnation constitue le caractère distinctif qui permettra d'identifier le faciès vis-à-vis des cuirasses de structure plus complexe.

¹ Ces chiffres se rapportent aux numéros apparaissant sur les photos des différents échantillons.

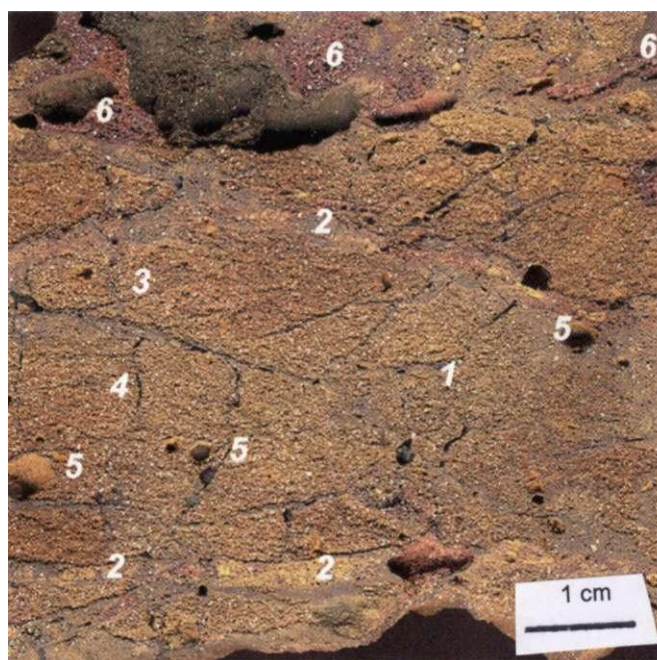


Fig. 12.- Faciès massif (5277) (variante: imprégnation d'un dépôt sableux de chenal fluvial).

Un sable grossier (1) traversé de lentilles silteuses (2) et présentant des stratifications entrecroisées faiblement visibles (3). Traces d'un âge ancien: fentes de dessiccation (4) et fragments de roche altérés (5). Remplissage de tubules postérieurs (6).

Tous les échantillons observés sans l'aide du microscope ne sont que légèrement agrandis (+ 50%).

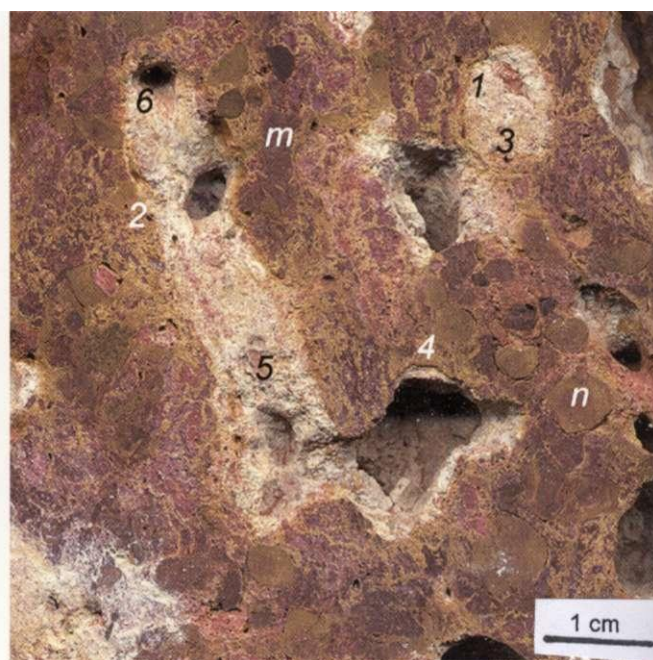


Fig. 13.- Faciès vermiforme 1 Luena.

Dans un contexte de faciès nodulaire (n et m), nombreux tubules perpendiculaires entre eux (1 et 2). Dans les tubules, un produit blanchâtre (3), éliminé partiellement par les termites (4 et 6) et quelquefois rempli à nouveau par un mélange de produit blanc et de matrice (5).



Fig. 14.- Faciès vermiforme 2 (7137) Luishia 1.

La matrice rouge est percée d'un tubule, sans préparation préalable par les racines. Contact direct entre la matrice et le remplissage du tubule qui est constitué d'un matériel terreux résultant du mélange de la matrice rouge et d'un apport extérieur clair (3).

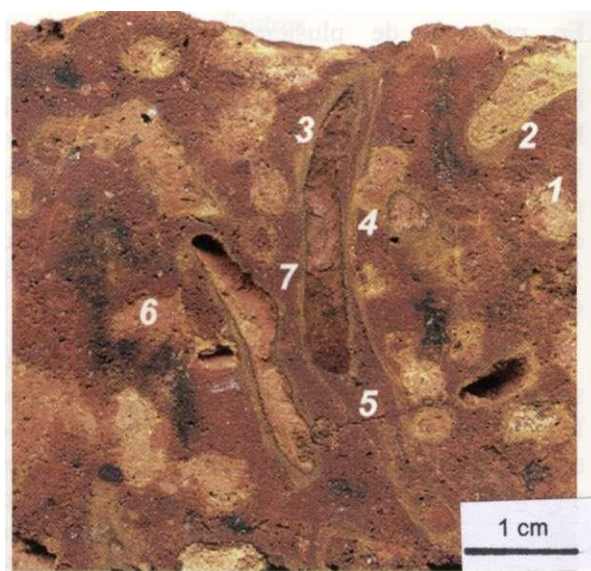


Fig. 15.- Faciès vermiforme 3 (7129) Luishia 2.

Contact entre la matrice et le remplissage des tubules de deux types: a) direct (1) (comme 7137), b) par l'intermédiaire d'un enduit rubané brun (2 et 3). Les tubules du premier type entament quelquefois une partie de l'enduit du second type et sont donc plus récents (4). Les remplissages de tubules anciens ont une couleur proche de celle de la matrice (5) tandis que ceux des plus récents sont le produit d'un mélange de la matrice et de terres plus claires (5), importées des horizons supérieurs.

Âge présumé¹ :

Cette cuirasse, partiellement de faciès massif, s'inscrirait dans le premier niveau de cuirasses et serait donc très ancienne. Les galeries ont été creusées ultérieurement; le matériel de remplissage violacé daterait d'une période plus récente (6.3.2).

4.3.2. Faciès vermiforme

Les échantillons illustrent ce faciès dans un ordre croissant de complexité. Toutefois, comme le faciès vermiforme consiste en une série de tubules, vides ou remplis, développés au sein d'une masse possédant elle-même des caractères morphologiques propres, ceux-ci sont quelquefois prédominants et peuvent, de ce fait, occulter la valeur exemplative du cas traité. Les faciès qui n'appartiennent pas au type vermiforme, seront décrits rapidement ci-dessous sous l'étiquette de "contexte".

4.3.2.1. Échantillon de la mine de Luena (fig. 13)

Substrat : argilite panachée à teinte rougeâtre prédominante de la Série de la Lukuga (Permien).

Observation :

Contexte : un faciès nodulaire composé de nodules lithorelictuels (°) (4.3.7) dans une structure porphyrique, la matrice rouge violacée (°) étant parcourue par de nombreuses veinules de décoloration ocre. La roche est à peine consolidée.

Faciès : De larges tubules (1 cm de diamètre), perpendiculaires entre eux (°), forment un réseau. Ils sont, la plupart du temps, remplis d'une masse argileuse blanchâtre (°). Lorsqu'ils sont vides, les bords en sont particulièrement nets mais un enduit blanchâtre indique qu'ils ont été vidés de leur substance (°). Les digitations blanchâtres ont une cohérence moindre que la masse encaissante. De fines parcelles légèrement colorées (roses ou ocre jaune) s'y trouvent disséminées (°).

Des galeries ouvertes, de plus petit diamètre, occupent une partie des tubules encore remplis (°).

Interprétation :

Les tubules étaient, au départ, des gaines déferrisées entourant des racines (réseau à angles droits). Le cas est donc assez comparable à celui de la base de l'horizon bariolé (2.3.1), à la seule différence que l'ensemble possède une plus grande cohérence.

Les termites dont certaines galeries sont encore apparentes ont exploité ces tubules de consistance moindre. Après exploitation complète des zones tubulaires déferrisées, ils ont comblé une partie des galeries aux dimensions plus larges que leur norme (fines macules de matériel plus coloré arraché aux épontes). Les bords bien nets et couverts d'un léger crépi blanc

des galeries actuellement vides laissent supposer que celles-ci ont été exploitées une deuxième fois.

4.3.2.2. Échantillon 7137 (Luishia 1) (fig. 14)

Substrat : comme pour les trois échantillons suivants, il est constitué du complexe "schisto-gréseux" du Kundelunguien.

Observation :

Contexte : Faciès à la fois nodulaire (4.4.7) et conglomératique (grains de quartz), de structure porphyrique, dans une matrice rouge sombre (7,5R3/6).

Faciès : Un tubule de 5mm de diamètre (°), est presque entièrement rempli de matériel fin homogène. Les gros éléments figurés de la matrice en sont exclus, à l'exception d'un seul (observé sur une autre face).

La couleur du remplissage est plus claire que celle de la matrice: il s'agit, en fait, d'un mélange de cette dernière (°) et d'un matériel plus clair (°) (7,5YR2/6).

Interprétation :

Le diamètre se trouve dans la gamme des dimensions habituelles des galeries de termites.

La granulométrie du remplissage est de la compétence des termites. Le gros élément est tombé dans la galerie lors des travaux de terrassement.

Le matériel plus clair est dû au mélange de la matrice avec le matériel légèrement décoloré d'un horizon supérieur et amené lors du remblaiement de la galerie. Ce transport mécanique du haut vers le bas et ce mélange constituent des arguments supplémentaires en faveur du travail des termites.

Âge présumé :

Cette cuirasse, comme les trois suivantes, a été récoltée sur la surface de Lubumbashi, c'est-à-dire la surface n°3, datée de la fin du Tertiaire.

*4.3.2.3. Échantillon 7129 (Luishia 2) (fig. 15)**Observation :*

Contexte : Assez semblable au précédent, les éléments figurés y sont plus rares et la matrice est affectée de quelques macules noires de goethite.

Faciès : Les tubules, vides ou remplis, ont un diamètre moyen de 3mm. Ils appartiennent à trois types selon la façon dont leurs parois sont soulignées :

- Le contact est direct entre le remplissage et la matrice (°);
- Le contact est souligné par un mince liséré de teinte différente (2,5YR5/3) (°). Le tubule est tapissé d'un enduit rubané, fait de strates de même apparence que le liséré précédent et de fines couches d'un matériel semblable à la matrice; le tout se termine par une couverture brun foncé (2,5YR3/3) épaisse de quelque 0,1 mm, faite de hydrogoethite presque pure (°). Un tubule du premier type recoupe très localement un autre du troisième type (°).

Le remplissage des galeries présente une série de colorations allant du rouge foncé (7,5R3/6) (°) au rose orange (2,5YR7/6) (°). Les remplissages de teinte foncée occupent les galeries du second type ou participent au troisième type. Les

¹ L'âge supposé de la cuirasse est donné, ici, à titre indicatif. La datation des cuirasses sera justifiée ultérieurement, dans le chapitre 6.

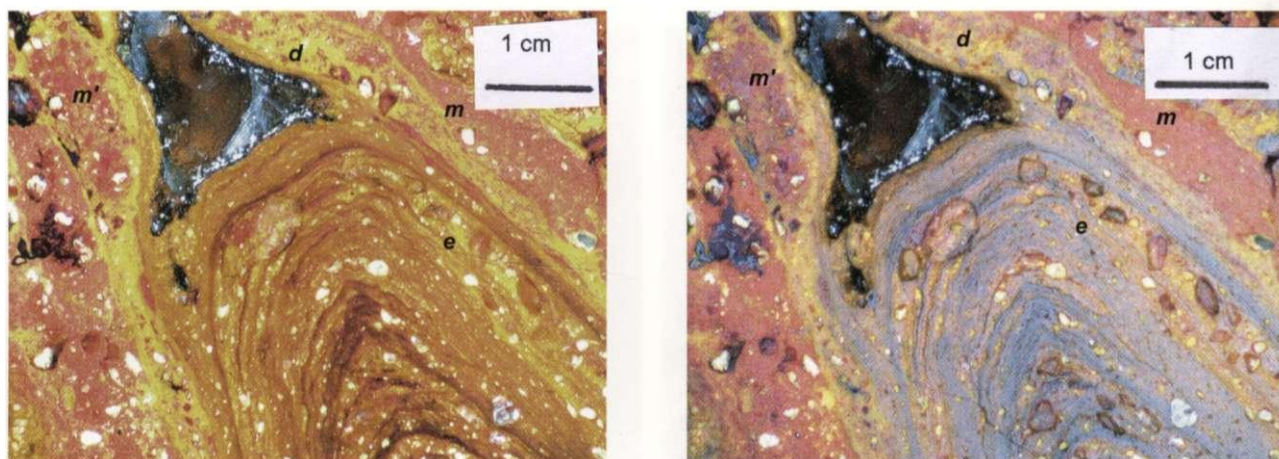


Fig. 16.- Détails du contact entre matrice et enduit rubané au sein d'un tubule (surface polie sous microscope à lumière réfléchie) : à gauche, en lumière naturelle; à droite, avec niçois croisés à 60°. Largeur totale 800 µm.

Les fines couches ferrugineuses de l'enduit (e) apparaissent en brun (a) ou gris bleu clair (b). Cette dernière couleur est due aux réflexions internes de l'hydrogoëthite; elle serait plus sombre s'il s'agissait de goëthite pure. Les strates argileuses entre les parties ferrugineuses, sont de la même teinte que le fin liseré de décoloration (d) lui-même légèrement imprégné d'hydrogoëthite, mais sans gradient dégressif à partir de la surface du tubule. La matrice (m) apparaît en rouge sur les deux images, mais avec des zones (gris bleu) plus ou moins riches en hydrogoëthite, ce qui indique une certaine complexité au sein de la matrice (m') (réalisé avec l'aide de A. Pierson).

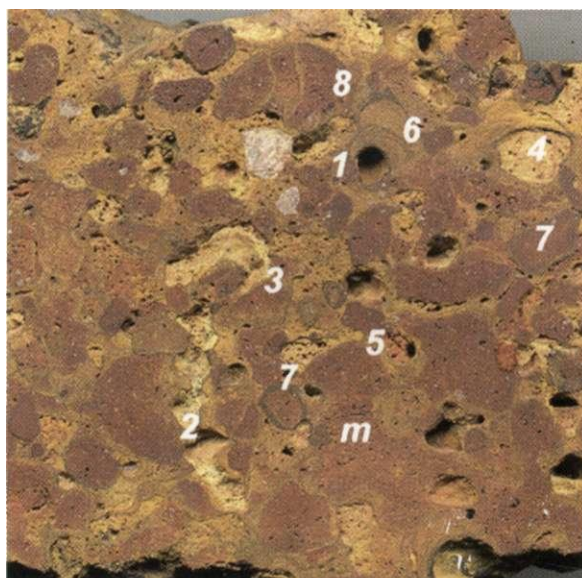


Fig. 17.- Faciès vermiforme 4 (7143) Lubumbashi.

Les tubules ont soit un diamètre bien calibré (1) et dans ce cas, ils sont cernés d'un enduit épais (6), soit, au contraire, une forme très irrégulière (2) et, dans ce cas, dépourvue d'enduit (3). Ces derniers sont en voie d'effondrement et ont été partiellement remblayés par des terres ocre clair, c'est-à-dire assez récemment. Quelques concrétions sont également couvertes d'un enduit (7). Un striotubule (8) est également le vestige d'une activité déjà assez ancienne des animaux fouisseurs (matériel rouge).

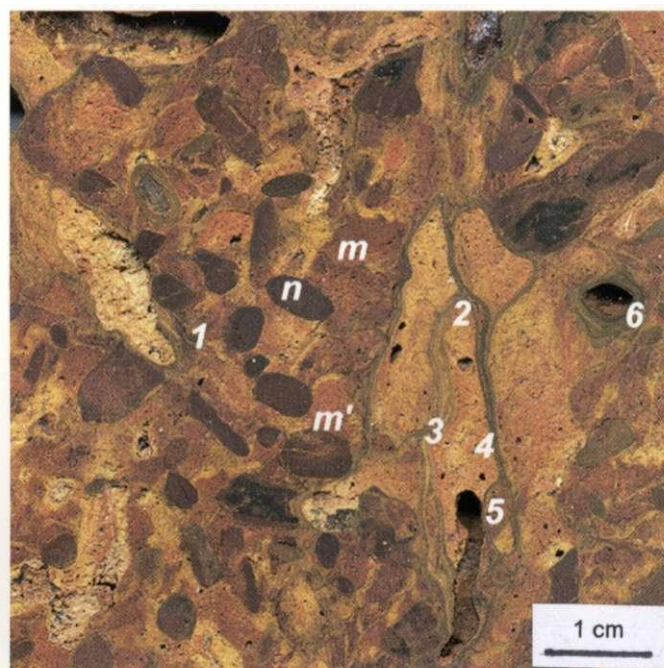


Fig. 18.- Faciès vermiforme 5 (7110) Luishia 3.

Cet exemple est une variante du faciès vermiculaire: le faciès lobé de Boulangé *et al.* (1973). Au sein d'un matériel dérivé de la matrice, de teinte légèrement variée (mélanges avec des apports plus clairs) (1 et 3), des enduits rabanes (2) séparent des digitations terreuses. Celles-ci présentent des pores grossiers (4) et même des galeries ouvertes (5). Pendant la formation des enduits, les animaux fouisseurs (en l'occurrence, des termites) ont continué leurs travaux de terrassements, présentant ainsi de nouvelles surfaces aux enduits en formation. Pendant ce temps, des galeries, plus stables ont continué à se garnir d'un enduit de plus en plus épais (6).

remplissages les plus clairs occupent le centre de tous les types y compris les galeries sans le moindre liséré.

La matrice présente des plages de différentes teintes dont certaines sont proches de celles du matériel de remplissage.

Interprétation :

L'événement important est la formation de l'enduit rubané. La couche ferrugineuse terminale passe, sans discontinuité, à un enduit de même nature mais plus épais à la surface de la cuirasse. Le rubanement est le résultat d'une fine sédimentation sur toute la périphérie de la galerie. Il se distingue nettement des terrassements effectués par les termites, où les produits fins dégagés sont entassés en vrac. En certains endroits, le matériel de remblaiement qui recouvre l'enduit rubané a lui-même été recouvert, après érosion, par un nouvel enduit ('). Le travail des termites s'est donc poursuivi pendant la période de formation de l'enduit. D'autre part, la galerie ainsi tubée par l'enduit acquiert une grande résistance à l'effondrement et donc une grande longévité. Ici, toutefois, l'enduit primitif a été suffisamment fin pour avoir été percé, très localement, par les termites.

La partie inférieure du rubanement se présente en plusieurs endroits comme une imprégnation qui aurait précédé l'enduit d'hydrogoethite. Le grossissement de la zone de contact sous le microscope à lumière réfléchie montre que si la limite externe de l'enduit rubané est nette, la matrice encaissante n'est pas dépourvue d'hydrogoethite en marge de l'enduit. Il n'existe cependant aucun gradient dans les teneurs, à partir de la paroi du tubule (fig. 16).

L'équivoque sera levée lors de l'analyse du prochain échantillon (4.3.2.4).

La coloration des remplissages varie selon l'ancienneté. Ce phénomène, déjà entrevu dans l'échantillon précédent (D322), apparaît de façon évidente. Les plus anciens sont de même couleur que la matrice, les plus récents sont beaucoup plus clairs. Sur la foi de ces remplissages, il apparaît que certaines galeries ont été creusées puis remblayées après l'épisode de formation de l'enduit rubané, puisqu'elles en sont dépourvues et que très localement elles ont érodé cet enduit.

4.3.2.4. Échantillon 7143 (Lubumbashi) (fig. 17)

Observation :

Contexte : Matrice rouge violacé (") prépondérante (45% en volume), très peu d'éléments figurés (5%), comportant quartz et nodules lithorelictuels. Les micropores de la matrice permettent de distinguer celle-ci des nodules nettement plus compacts.

Faciès : Les tubules représentent, avec leurs parties externes, les 50% restants. Il existe deux types de tubules :

- Certains sont de diamètre bien calibré sur toute leur longueur (de l'ordre de 2mm); ils sont étançonnés par des enduits rubanés (');
- Les autres sont, au contraire, très irréguliers sous cet aspect ('). Le fait a été vérifié sur un échantillon de 15cm coupé en tranches de 3cm. Ces derniers ne sont jamais entourés d'un enduit.

La partie inférieure des enduits est, en certains endroits, nettement mieux stratifiée que dans l'échantillon précédent (4.3.2.3) (').

De l'intérieur vers l'extérieur de la zone cuirassée, la succession des remplissages de tubule est la suivante :

1. Un matériel terreux ocre-jaune puis rouge (6YR 5/3 puis 4/2) dans lequel se trouvent quelquefois quelques petits (1mm) éléments figurés (');
2. Un produit fin de même nature et de même couleur que la matrice (');
3. Un enduit d'argiloferrane, de teinte plus sombre (2,5YR5/3) présentant, en certains endroits une stratification nette et même une discordance de stratification (');
4. Un mince enduit d'hydrogoethite (').

Une plage de la matrice montre une structure que l'on pourrait assimiler à des lignes de flux ('), un liséré de matériel décoloré séparant plusieurs petites masses rouge violacé, incurvées, et qui s'interpénètrent.

Interprétation :

Les galeries non "tubées" par un enduit ferrugineux rigide sont susceptibles d'affaissements locaux qui expliquent leurs largeurs fluctuantes voire leur disparition locale;

La partie inférieure de l'enduit est bien un dépôt et non une imprégnation de la matrice encaissante;

La discordance (') qui affecte cette partie de l'enduit est l'indice d'une retouche de la galerie par terrassement et donc une certaine concomitance entre le dépôt de l'enduit et le travail des termites;

Les "lignes de flux" observées localement dans la matrice sont, en fait, une sorte de striotubule, c'est-à-dire une succession de ménisques dus au remblaiement d'une cavité par des animaux fouisseurs, qui, ici, pourraient être autres que les termites.

4.3.2.5. Échantillon 7110 (Luishia 3) (fig. 18)

Observation :

Contexte : Il est assez comparable à celui de l'échantillon 7143 (4.3.2.4) à l'exception de deux points :

- La proportion de nodules (') est légèrement supérieure (10% contre 5%);
- A côté de la matrice rouge violacé ("), se présente une autre, plus claire et moins uniforme ('), entre 7.5 R et 2.5 YR.

Faciès : Tous les enduits sont finement stratifiés avec une prédominance de strates d'hydrogoethite (').

L'intérêt de cet échantillon est dû à la présence d'enduits au sein même d'une masse terreuse (') qui peut être assimilée à la matrice. Une telle disposition a été observée par Boulangé *et al.* (1973) qui l'ont baptisé de faciès *lobé*. La zone comprise au sein des digitations ainsi circonscrites par un enduit, présente quelquefois des pores assez grossiers (') voire un tubule ouvert (').

Un tubule sans remplissage est entouré d'un enduit rubané nettement plus épais (') que ceux du faciès *lobé*. Son importance est assez comparable à celle de l'enduit qui entoure extérieurement la cuirasse.

Interprétation :

Le dépôt des enduits s'est produit à plusieurs reprises, avec chaque fois, intercalation de matériel remanié par les termites.

Ce matériel a une couleur qui est le résultat d'un mélange de matrice rouge violacé et de terre plus claire, venue du haut.

Certaines galeries semblent ne jamais avoir été remblayées. Le décryptage de la fine stratification de l'enduit



Fig. 19.- Faciès alvéolaire 1 (B235) Kiesangie 1.

Au sein d'une cuirasse gravillonnaire sableuse (1), des alvéoles de deux types se sont développés: a) les premiers sont dus au défaut d'occupation des espaces libres (2), b) les seconds proviennent de l'altération et l'élimination de fragments de roche, altérés après la formation de la cuirasse (3)



Fig. 20.- Faciès alvéolaire 2 et bréchique (5276) Longe2.

L'occupation par une hydrogoethite presque pure des espaces libres, interstices (1) et fractures (4), dans une roche altérable a fourni, dans un premier temps, un faciès bréchique. L'altération et l'élimination ultérieures (2) ont ensuite formé les alvéoles. Les fines fractures ainsi mises en relief constitue un boxwork (5). Ce faciès est associé à un faciès pisolithique (3).

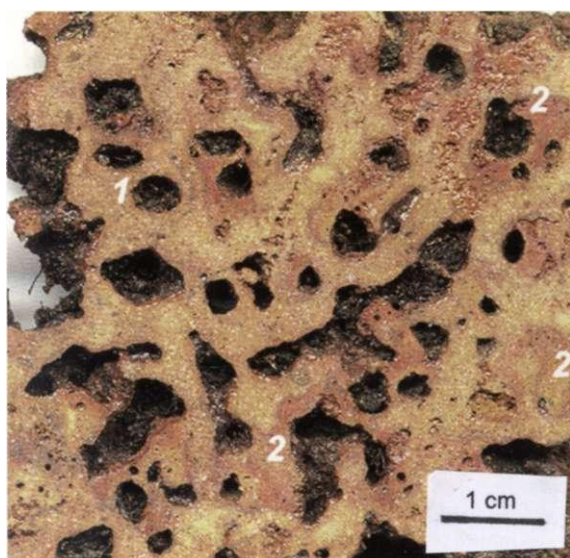


Fig. 21.- Faciès pseudo-alvéolaire (7205) Lwanza.

Les alvéoles apparentes (1) ne sont en fait que des sections transversales de tubules. Ceci illustre le manque de distinction nette, par le passé, entre les deux faciès. Les galeries de termites dans le sable ne sont pas très fréquentes: les remplissages un tant soit peu argileux (2) montrent que la roche précambrienne est proche.



Fig. 22.- Faciès conglomératique.

Ce faciès se définit de lui-même. La quantité de fer nécessaire pour assurer la cohésion, n'est pas nécessairement importante grâce à une structure intertextuelle.

montre que, en fait, elles ont été, au moins partiellement, remblayées et ensuite, presque entièrement dégagées.

4.3.3. *Faciès alvéolaire*

Contrairement aux vides tubulaires qui sont restés longtemps controversés, les vides équidimensionnels ont une origine souvent moins discutable.

4.3.3.1. Échantillon B235 (Kiesangie 1) (fig. 19)

Observation :

Le corps principal de la cuirasse est constitué de nodules sableux enrobés dans un enduit rubané de couleur brun rougeâtre (2,5YR4/4)(¹). Les dernières couches de l'enduit emprisonnent plusieurs nodules.

Les alvéoles qui s'y dessinent appartiennent à deux types distincts :

- Les premiers, de forme parfois allongée (¹), évoquent de prime abord des galeries. Ils n'en possèdent ni la continuité, ni le calibrage. Ils occupent une position externe par rapport aux enduits qui enrobent les nodules sableux, quelquefois assez complexes (4.3.8.3);
- Les seconds, plus courts (¹), contiennent un fragment rocheux en voie d'altération plus ou moins poussée et sont situés à l'intérieur des enduits.

Interprétation :

Les nodules sableux, avant d'être emprisonnés par l'enduit, se trouvaient à l'état libre à la surface du sol et pouvaient donc se déplacer. La présence de concrétions et de fragments de roche étrangers au milieu sableux, en attestent. L'enduit s'est donc formé en surface. En agglutinant les nodules, l'enduit a aménagé des recoins qui, au départ, étaient inoccupés. Ce n'est que plus tard qu'ils ont été envahis par des sables de couverture. Ces sables ne sont pas imprégnés et sont particulièrement labiles.

Les fragments de roche ont été altérés et quelquefois vidés de leur substance, après avoir été enrobés par l'enduit.

Les enduits confèrent à la cuirasse une rigidité favorable à la conservation des deux types d'alvéole.

Le faciès principal de la cuirasse est donc un faciès gravillonnaire. Le faciès alvéolaire est secondaire; l'exemple a été choisi en raison de la variété de l'origine des vides.

Les fragments de roche, aujourd'hui altérés, laissent entrevoir que la cuirasse s'est formée alors que les roches du substratum précambrien étaient dans un état relativement frais

Age présumé :

L'enduit brun foncé de la cuirasse et sa position sur la surface d'une altitude moyenne de 1575 m indiquent un âge fin-Tertiaire.

4.3.3.2. Échantillon 5276 (Longe 2) (fig. 20)

Observation :

La masse principale de cette formation ferrugineuse est constituée par un lacs d'oxydes de fer (¹) emprisonnant des

petits fragments de roche très profondément altérée et presque entièrement éliminée ultérieurement. (¹).

Les oxydes de fer sont représentés par de l'hydrogoethite. Celle-ci contient une proportion modérée mais constante de grains de quartz.

Un rubanement de type pisolitique (¹) n'apparaît que dans une seule plage autour d'un vide large et aplati.

Une crevasse assez longue traverse l'échantillon (¹).

Certains éléments disparus étaient enveloppés dans une double pellicule de fer tandis que leurs diaclases n'existent plus aujourd'hui que par la grâce du fin remplissage ferrugineux qui les a pénétrés, formant ainsi un fin "boxwork" (¹).

Interprétation :

Sans une altération aussi importante, cet échantillon aurait un faciès bréchique. La disparition presque totale des éléments prisonniers lui confère un grand âge. Il se trouve d'ailleurs sur le niveau cuirassé le plus élevé.

4.3.3.3. Échantillon 7205 (Lwanza) (fig. 21)

Cet échantillon est présenté à titre de curiosité. Il est, en fait, constitué d'une série de galeries de termites juxtaposées, sans pratiquement aucune communication perpendiculaire à leur axe.

Une section transversale de ces galeries les fait apparaître sous forme d'alvéoles (¹).

Les remplissages partiels sous forme de terre fine rougeâtre (¹) attestent du travail des termites et de la présence à une profondeur accessible d'une roche susceptible de fournir des produits argileux, condition *sine qua non* de l'activité des termites.

4.3.4. *Faciès conglomératique*

4.3.4.1. Échantillon Rh109 (fig. 22)

Un poudingue ferrugineux n'est pas chose rare, et l'exemple présenté ici n'est là que pour rappeler que le résultat peut être acquis en utilisant une proportion relativement faible de sels de fer. Une structure intertextuelle permet une consolidation du cailloutis à l'aide de quelques points de soudure.

4.3.5. *Faciès bréchique*

4.3.5.1. Échantillon 5276 (Longe 2) (fig. 20), voir aussi 4.3.3.2.

Si l'attention se porte sur les fragments de roche anguleux, l'échantillon peut être considéré comme représentatif du faciès bréchique.

Il convient de noter ici que les grains de sables présents dans les dépôts ferrugineux ne sont pas jointifs. Il ne s'agit donc pas d'une imprégnation. D'autre part, dans le faciès bréchique, les dépôts ne sont pas rubanés. Ils représentent une catégorie différente des enduits ferrugineux décrits dans les autres exemples.



Fig. 23.- Faciès lamellaire 1 (5216) Kiesangie 2.

Ce faciès est produit par l'imprégnation d'une roche à grain fin et de structure finement litée. La séparation de la roche en fines lamelles donne l'aspect caractéristique du faciès. Dans les exemples choisis, cet aspect met en relief les perturbations mécaniques que subissent les éléments de la future cuirasse sous l'impulsion des termites.

La roche diversement imprégnée (2 et 3), est percée de galeries dont certaines suivent la stratification. Les galeries ont facilité une attaque préalable du fer (4). Un enduit léger s'est ensuite développé à partir de la surface de la cuirasse (5 et 6, et aussi fig.35). Certaines galeries ont été comblées, après utilisation, par les termites (7), tandis que d'autres contiennent de petites boulettes, vestiges de leur passage récent (9).

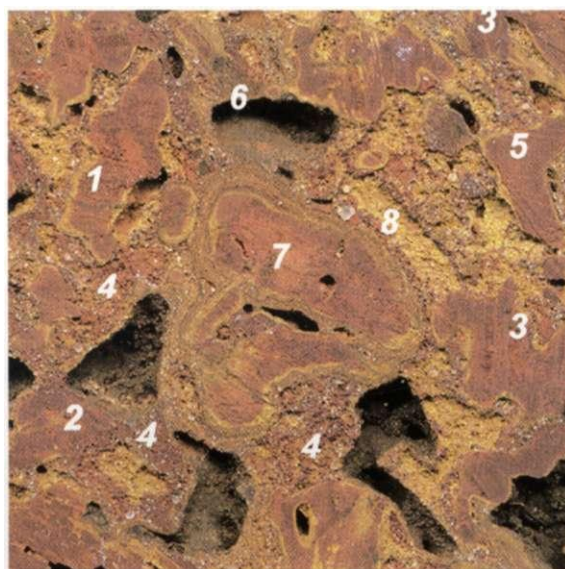


Fig. 24.- Faciès lamellaire 2 (B400) Kiesangie 3.

Dans une matrice argilo-sableuse plus abondante (4), les éléments allongés ne sont plus parallèles (1 et 2), et présentent quelquefois des formes biscornues (3) et des lisérés de décoloration incomplets (5). Des vides dus au manque de compaction sont couverts d'un enduit (6). Il en est de même de quelques fragments de roche imprégnée (7).

4.3.6. Faciès lamellaire

Dans certaines conditions qui seront précisées (5.2.3 et 7.2.5), la partie supérieure du substratum précambrien a pu échapper à l'importante altération qui a affecté la roche en profondeur. La roche précambrienne qui est ici une siltite, peut alors se diviser suivant la stratification, en fragments plats, de taille réduite. Les plaquettes ainsi formées donnent à la cuirasse qui les contient un faciès lamellaire. Les différents échantillons ont été choisis de façon à suivre le passage des siltites précambriennes imprégnées de sels de fer à un faciès presque lamellaire. Ce faciès apparaît de façon plus nette dans un affleurement situé à quelques mètres de l'endroit où ont été prélevés les échantillons qui vont être analysés (4.3.6.1 et 4.3.6.2), (voir aussi Alexandre-Pyre, 1971, p. 64).

4.3.6.1. Échantillon 5216 (Kiesangie 2) (fig. 23)

Observation :

La formation ferrugineuse s'est développée à partir d'une siltite précambrienne conservée dans un certain état de fraîcheur et dans laquelle la stratification a été mise en valeur par les différents processus qui ont été mis en œuvre.

Certaines couches ont été évidées partiellement à partir de tubules dont certains s'observent encore(°).

Dans la roche qui a résisté à cette érosion interne, des plages de couleur différente peuvent être observées :

- Des zones de couleur violacée sombre (7,5R3/6) (°) forment la grande majorité. Elles ont une forte teneur en fer (entre 10 et 20%);
- Au sein de ces dernières, avec un contact diffus, des plages plus claires (10R5/6) et moins résistantes mécaniquement accusent un certain départ de fer (°);
- En bordure de quelques parties évidées, apparaît un liséré orange (5YR7/6) (°), d'une épaisseur de 1 mm environ;
- La plupart des évidements sont bordés d'un enduit de couleur brune (7,5YR4/3) (°), d'une épaisseur comparable à celle du liséré (0,5mm).

Une observation rapide ne permet pas toujours de faire le départ entre le liséré et l'enduit. Il peut toutefois être fait grâce à certains indices :

- Les enduits internes se prolongent, sans discontinuité, jusqu'à un enduit externe, bien développé et sans équivoque;
- L'enduit est quelquefois superposé au liséré de décoloration (°);
- Le remplissage sableux est souvent prisonnier de ce même enduit (°).

En effet, les vides se trouvent partiellement remplis par un matériau composé de la roche réduite en fragments minuscules, additionnée de grains de sable (°).

Dans les vides restés ouverts, quelques boulettes (°) de moins d'un millimètre attestent le passage des termites.

Interprétation :

L'imprégnation ferrugineuse a préservé la roche en place de l'altération qui a affecté la roche sous-jacente. Les zones internes mal imprégnées sont d'ailleurs en voie d'altération.

Une altération superficielle, due vraisemblablement au milieu réducteur entretenu par la matière organique, a mis à profit les zones de faiblesse constituées par les joints de stratification.

Les termites ont évacué une partie de la roche ainsi altérée. Leurs galeries ont servi, à leur tour, de voie de pénétration aux eaux agressives.

Les galeries ont dû être colmatées par les termites (probablement pour des raisons de sécurité). Les extractions ultérieures ont laissé subsister une fraction de ce matériau de remblayage. Il est formé essentiellement par un fond argilo-siltique (trituration des termites ?) auquel se sont joints des grains de sable provenant d'une ancienne couverture. Nous verrons ultérieurement le rôle que cette couverture sableuse a joué dans l'imprégnation de la roche (5.2.3).

Un enduit s'est ensuite développé à la surface de la roche imprégnée ainsi que dans les galeries et autres pertuis qui en exploitaient la partie interne. Cet enduit a également pénétré les pores les plus larges des résidus sableux de colmatage.

Un certain nombre de galeries n'ont pas été affectées par ce remplissage, elles ont dû être creusées ultérieurement. Elles comportent, néanmoins, un liséré de décoloration.

Âge présumé :

La roche imprégnée est couverte d'un enduit brun orange (voir aussi fig. 35), caractéristique de la toute dernière cuirasse, datée de l'extrême fin du Tertiaire.

4.3.6.2. Échantillon B400 (Kiesangie 3) (fig. 24)

Observation :

Cet échantillon a été recueilli à quelques mètres du précédent et présente cependant quelques différences sensibles:

- Les joints soulignés par les galeries et les décolorations, ont des orientations diverses (°);
- Les galeries occupent un volume moindre et ne sont pas aussi continues; par contre, des chambres aux formes biscornues(°) sont bien développées;
- Une matrice sableuse à fond argileux rouge est plus largement distribuée (°) et n'est donc plus confinée à quelques poches dans des fonds de galeries;
- Les lisérés orange ne sont plus tout à fait continus et les plages violacées sont quelquefois en contact direct avec les vides (°);
- L'enduit est mieux développé. Il est même épais (plus de 2 mm) et rubané en certains endroits (°) et notamment autour d'un gros élément figuré;
- A côté des remplissages de galerie à matrice rouge, d'autres, plus récents, de teinte orange (7,5YR8/8) (°) prennent de l'importance;
- La fine structure sédimentaire étant complètement disloquée, la cohérence de la cuirasse est assurée par un enduit brun qui, s'il n'est pas présent autour de tous les fragments de roche, affecte néanmoins une matrice sableuse assez poreuse.

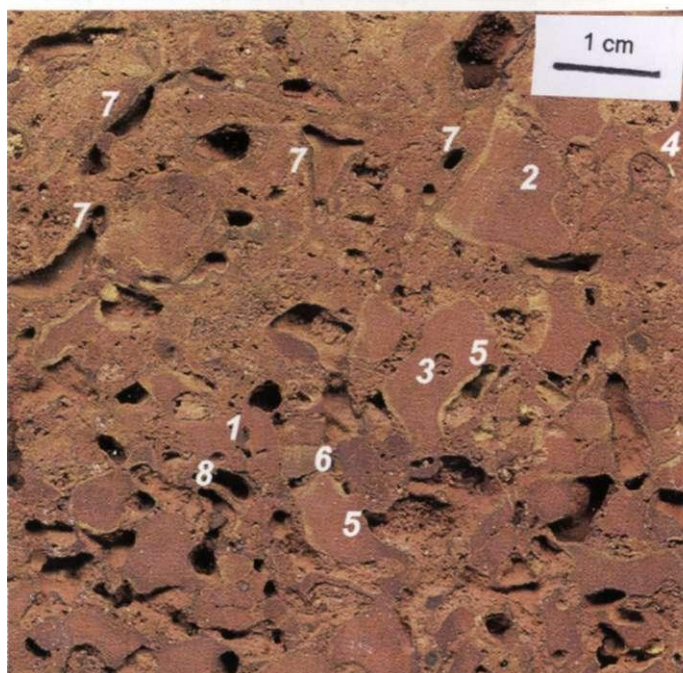


Fig. 25.- Faciès lamellaire 3 (7112) Midiashi.

En comparaison avec l'échantillon B400, la roche a été moins bien imprégnée, la taille des fragments est plus disparate (1 et 2) et la matrice plus abondante. Cette dernière est un mélange de la roche amenuisée et du sable de couverture. Les galeries, plus nombreuses, y sont creusées de préférence. Elles sont bordées d'un enduit rubané (7) qui rend à la formation sa cohérence perdue par bioturbation.

Cet échantillon fait la transition entre les cuirasses d'imprégnation et les cuirasses nodulaires telles que l'échantillon 6017(4.3.7.1).

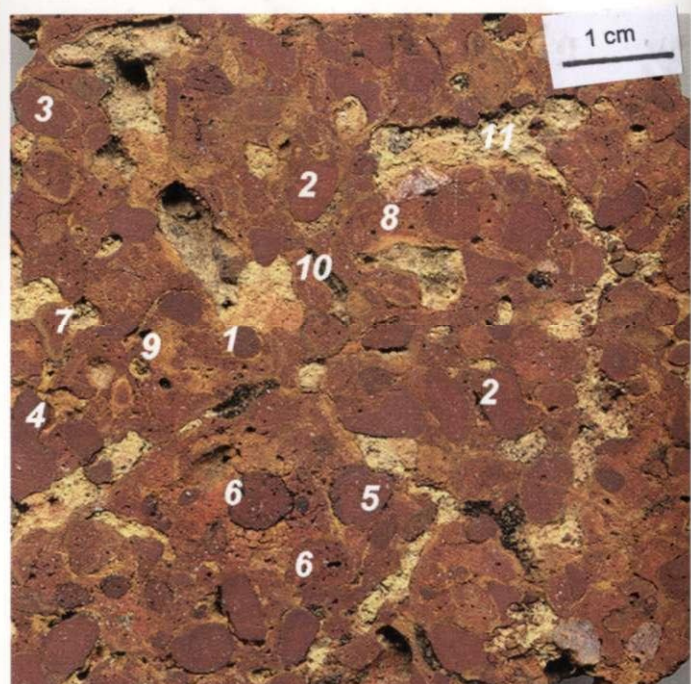


Fig. 26.- Faciès nodulaire 1 (6017) Kasapa.

Deux types de nodules: **a)** des nodules lithorelictuels, rouge violacé (1 et 2), homogènes, bordés de liséré de décoloration interrompu (3), de forme quelquefois brisée (4) ou biscornue (5) et **b)** des nodules pédorelictuels de même texture que la matrice (grains de quartz, microvides (6), mais de teinte nettement plus rouge, ici sans liséré de décoloration. Une faible proportion des nodules sont couverts d'un enduit rubané (7). Les nodules ont donc subi deux types de parcours: les uns se sont trouvés dans un site où se formaient les enduits (la surface du sol), tandis que les autres restaient au sein de la formation.

Les remplissages de galeries présentent toute une gamme de couleurs depuis le rouge (8) jusqu'au beige très clair (9), ceux-ci étant les derniers à avoir été mis en place.

Interprétation :

L'altération guidée par les galeries a eu raison de la rigidité de la roche en place. Par affaissement des galeries, les éléments résistants ont pivoté.

Le phénomène a dû se produire à de nombreuses reprises et notamment encore récemment, car certaines galeries sont encore utilisées.

Le gros élément couvert d'un enduit rubané (°) a dû séjourner en surface; sa présence implique des mélanges relativement importants.

L'enduit rubané brun implique un âge très probablement tertiaire (6.1.2) qui est favorable à de nombreuses reprises du mécanisme.

4.3.6.3. Échantillon 7112 (Midiashi) (fig. 25)**Observations :**

Les fragments de roche sont de dimension très variable, depuis le millimètre jusqu'à plus de deux centimètres (¹⁶¹²). Ils sont quelquefois percés en leur centre (°) ou sur les bords, produisant, dans ce cas, des formes contournées, en forme de faucille, par exemple (°). Leur proportion a diminué vis-à-vis de l'échantillon précédant (quelque 20% contre 50). Les lisérés de décoloration sont parfois incomplets (¹⁶¹⁶).

La matrice, poreuse et chargée de quelques grains de quartz, a pris de plus grandes proportions (50%, contre 10% dans B400) (4.3.6.2). Les galeries y sont creusées de préférence. La plupart d'entre elles sont bordées d'une zone brune (7,5YR4/3) (°) d'une épaisseur moyenne du millimètre. Cette zone est un enduit rubané assez semblable aux enduits observés dans le faciès vermiforme. Il se termine par une lame brillante brun rougeâtre (10R4/6) d'oxyde de fer presque pur(°).

Interprétation :

Les fragments de roche, localement moins imprégnés, ont été transformés plus aisément en matrice qu'à la Kiesangie.

Il n'y a pas de différence notoire entre les remplissages anciens de galeries et la matrice qui sert de tissu conjonctif entre les éléments figurés; tous deux sont de même couleur rouge, de même porosité et contiennent quelques grains de quartz.

Par leur taille et leur forme, les fragments de roche imprégnée ne sont plus très différents des nodules lithorelictuels.

L'enduit rubané étançonne les galeries et les préserve de tout foudroyage, ce qui explique leur continuité et la proportion plus grande de galeries au sein de la cuirasse (45 contre 30%).

Faute d'imprégnation, les fragments de roche ont perdu leur aspect lamellaire. Cet échantillon a, néanmoins, été placé à la fin des exemples de ce faciès, parce qu'il représente le chaînon intermédiaire entre une cuirasse dérivée directement d'une roche imprégnée alors qu'elle était encore assez fraîche (Kiesangie) et une cuirasse comme celle de la Kasapa (4.3.7.1), où une roche semblable est passée par le stade d'horizon bariolé avec formation de nodule lithorelictuel.

Âge présumé :

La cuirasse a été trouvée sur un point haut qui diminue la surface de Lubumbashi et daterait du milieu du Tertiaire.

4.3.7. Faciès nodulaire**4.3.7.1. Échantillon 6017 (Kasapa gravière) (fig- 26)**

L'échantillon de cuirasse a été recueilli, sur la surface de Lubumbashi (fig. 6b, point A), à proximité de la gravière dont le profil est décrit dans le paragraphe de l'horizon bariolé sur roche précambrienne. Comme nous allons le voir, les nodules lithorelictuels libres de cet horizon se retrouvent dans la cuirasse avec un assemblage géométrique et une proportion des éléments figurés assez semblables.

Observation :

Un comptage des différentes phases a donné les proportions suivantes :

- Nodules : 28%;
- Matrice : 45%;
- Galeries de termites : 26%;
- Grains de quartz : 1%.

Les nodules ont un bon classement granulométrique, avec une médiane de 6 à 7mm., Quelques éléments sont nettement plus grands (jusqu'à 2 cm) et un certain nombre de grains ont une taille de l'ordre du millimètre. L'éroussé est important sans être toujours parfait.

Les nodules relèvent de deux types distincts.

1.- le premier présente les caractéristiques suivantes :

- Une couleur rouge violacé, dont on peut se demander si elle n'est pas lithologique plutôt que pédologique car elle ne figure pas au Munsell Colour Chart, les couleurs les plus proches dans celui-ci sont 7,5R4/6-8; les plages sont assez uniformes, mais varient légèrement entre elles, les unes étant un peu plus claires que les autres (¹⁶¹²);
- Un fin (0,5-1 mm) liséré de décoloration (7,5YR7/8, assez rare et qui, lorsqu'il existe, n'entoure pas complètement le nodule (°);
- D'autres éléments présentent des fissures ou sont cassés en plusieurs morceaux voire percés par un tubule (¹⁶¹⁶);

2.- le second, un peu moins fréquent (quelque 30% contre 70%) se distingue du précédent par une nature plus complexe :

- Sa substance est proche de la matrice de la cuirasse: elle consiste en une pâte faite à partir de la roche mère fortement divisée, additionnée de nodules plus petits, de grains de quartz; les microvides (<1 mm) y sont également présents(°);
- A la différence de la matrice, la couleur de la pâte reste très colorée, assez proche de celle des nodules du premier type;
- Il ne présente pas de liséré de décoloration.

Un enduit très fin, brun foncé (7,5YR4/4) (°) existe autour d'une partie des nodules des deux types ainsi que dans un très petit nombre de galeries.

La matrice est bariolée avec des taches rouges, proches de celle des nodules lithochromes (°) jusqu'à des teintes orange (°) semblables à celles des lisérés de décoloration. Celles-ci sont quelquefois marginales, mais la plupart du temps, un grand désordre existe dans la répartition de ces taches de couleur.

La couleur des produits de remplissage des galeries varie selon leur ordre d'apparition: les plus anciens ont une teinte proche de celle de la matrice (2,5YR7/8) tandis que les plus



Fig. 27.- Faciès nodulaire 2 (5265) Lukata 1.

Tous les nodules sont pédorelictuels: ils sont poreux (2), crevassés (3), contiennent des grains de quartz bien arrondis (4), objets d'un héritage ou sont quelquefois de nature composite et recèlent, dans ce cas, des enduits rubanés internes (5). Un enduit rubané tapisse certaines galeries de termites, par contre, un certain nombre de nodules n'en sont pas enrobés.

La matrice rouge, importée, souligne la silhouette des nodules.

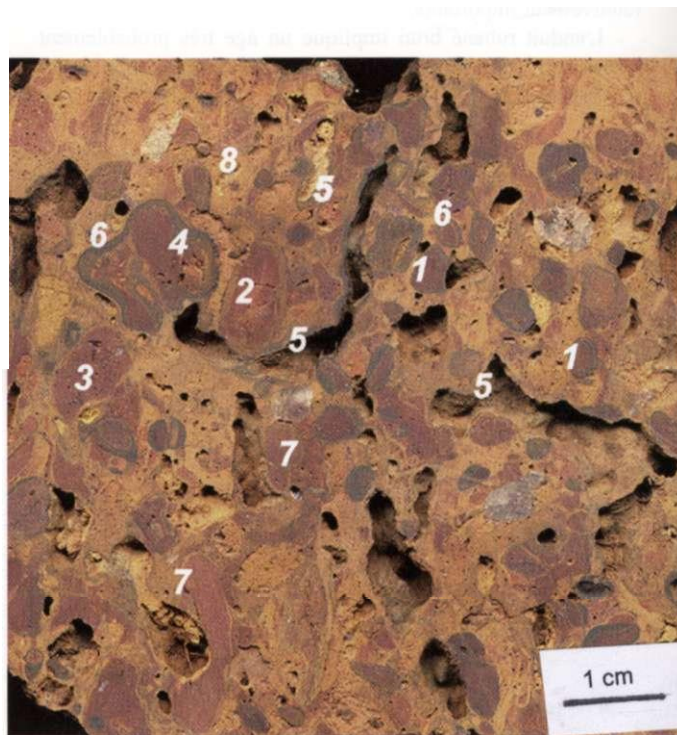


Fig. 28.- Faciès nodulaire 3 (7115) Luishia 4.

Diversité des nodules: a) lifhorelictuels, fortement (1) ou faiblement (2) indurés, b) pédorelictuels contenant des grains de sable importés (3), dotés de grands pores (4), ou composites (5). La plupart des nodules sont couverts de l'enduit rubané (6), mais quelques-uns en sont toutefois dépourvus (7). Ils restent le témoignage d'une élaboration interne de la cuirasse, les éléments couverts d'un enduit ayant été intégrés progressivement à partir de la surface par la bioturbation.

Certaines galeries de termites sont tapissées par un enduit rubané et très souvent sont restées vides, l'enduit en ayant interdit l'accès. D'autres, par contre, en sont dépourvues et ont été comblées après usage pour des raisons de sécurité. Les remplissages ont des couleurs proches de celles de la matrice pour les premières formées et ensuite de plus en plus claires pour les plus récentes. Le creusement de ces dernières galeries s'est produit alors que l'enduit rubané ne se formait plus.

récentes sont nettement plus claires (7,5YR à 10YR 8/4). Des fragments de nodules sont présents dans ces dépôts de colmatage; leur dimension dépasse rarement le millimètre.

Interprétation :

Les deux types de nodule ont des origines différentes :

- Les premiers présentent toutes les caractéristiques des nodules *lithorelictuels*, rencontrés dans l'horizon bariolé;
- Le second type est le produit d'un mélange mécanique de fragments du substrat, parfois modérément décomposés et de grains de quartz qui, par leur disposition erratique, attestent d'un mélange mécanique; l'enduit ferrugineux confère à certains d'entre eux une identité indiscutable (¹⁰). Ces nodules formés au départ dans le sol, sont qualifiés de *pédorelictuels*.

L'irrégularité du diamètre de certaines galeries (¹¹) est le témoignage de l'effondrement partiel qu'elles ont subi. L'absence d'un "tubage" par un enduit ferrugineux a rendu ce début de destruction possible. Leur colmatage par des terres assez claires, c'est-à-dire assez récentes, montre que des galeries ont été ouvertes plus récemment, après la formation de l'enduit.

La composition et la couleur légèrement bariolée de la matrice donnent l'apparence d'un stade intermédiaire entre les nodules *pédorelictuels* et les remplissages anciens de galeries. Elles sont probablement le résultat d'une bioturbation antérieure à celle des galeries apparentes.

De par leur disposition relative, les uns aux dépens des autres, il est possible d'établir une échelle de l'ancienneté des remplissages de galeries. Les premiers ont une couleur rouge foncé, proche de celle des nodules tandis que les plus récents sont très clairs, indiquant ainsi un changement de milieu dans leur lieu d'origine.

La proportion en volume des nodules est légèrement moindre que dans l'horizon tacheté tout proche (2.3.1). Dans ce dernier, les dépôts de produits fins dus à l'activité des termites ont été importants, et les galeries d'exploitation se sont effondrées. De ce fait, les nodules restés sur place ont acquis une certaine importance (accumulation relative). Dans la cuirasse, au contraire, toutes les galeries ne se sont pas effondrées, grâce à l'étalement de certaines par des enduits ferrugineux. Par conséquent, les termites ont dû remblayer les galeries inemployées afin de se prémunir contre leurs prédateurs. Ce phénomène a contribué à la diminution de l'importance relative des nodules.

La cohérence de la cuirasse est assurée par un enduit très mince (de l'ordre de 0,2 mm), brun foncé (7,5YR4/4), autour d'une partie des nodules et quelquefois en bordure de certaines galeries. Un nombre très restreint de nodules sont eux-mêmes circonscrits par un enduit plus épais (1 mm), qui peut être un héritage. D'autres sont, par contre, dépourvus de toute enveloppe et ont même été légèrement dessoudés de l'ensemble au cours du sciage.

La cuirasse contient d'une part, des gravillons, ce sont les anciens nodules couverts d'un enduit, et de l'autre, des nodules pour lesquels aucun indice ne permet d'affirmer qu'ils se sont trouvés à la surface du sol. Les gravillons ont pu être intégrés dans la future cuirasse par le travail des termites, tandis que les nodules restaient, en quelque sorte, sur place. C'est en raison de ce rassemblement effectué **dans le sol** que le faciès nodulaire a été attribué à cette cuirasse.

Âge présumé :

Le manque de cohésion de la cuirasse fait penser à une formation datant de l'extrême fin du Tertiaire. Cet échantillon a été récolté en marge d'une zone cuirassée très large qui, elle, présente toutes les caractéristiques des cuirasses de la surface de Lubumbashi et donc un âge légèrement plus ancien.

4.3.7.2. Échantillon 5265 (Lukata 1) (fig. 27)

Observation :

De larges nodules (diamètre souvent supérieur au centimètre), de couleur brun clair (7,5YR5/4) se distinguent aisément d'une matrice rouge vif(¹).

Outre leur couleur, les nodules présentent les caractéristiques suivantes :

- Ils sont très poreux (²);
- Ils sont largement crevassés, certaines crevasses ayant été envahies par la matrice (³);
- Ils contiennent presque tous des grains de quartz bien arrondis (⁴);
- Quelques-uns ont un caractère nettement composite (⁵);
- Et un certain nombre présente un liséré de décoloration incomplet (⁶).

Les nodules paraissent localement entourés d'un enduit rubané, composé principalement de deux couches, l'une, intérieure, est rouge (7,5R6/6), à l'instar de la matrice, l'autre, externe, est de couleur brune.

Il n'est pas aisé de faire le départ entre la matrice et le colmatage de galeries. Des plages de couleur rouge foncé voisinent avec des zones allongées plus claires (⁷) qui passent sans transition à des remplissages de galeries. Une grande partie des galeries sont tapissées du même enduit brun que certains nodules (⁸).

Interprétation :

L'intérêt de cet échantillon est de présenter :

- Des nodules "pédorelictuels", de facture bien nette;
- Un passage progressif d'un produit que l'on pourrait considérer comme une matrice à un matériel manifestement apporté par les termites;
- La nature plus argileuse de la matrice et sa couleur rouge indiquent une introduction de matériel de la profondeur, introduction réalisée par les termites, grands amateurs de produits argileux.

Par contre, la simulation d'un enduit autour de nodules est due à un concours de circonstances assez particulier. En fait, des galeries étalementées, au parcours tortueux, ont emprisonné des lames plus ou moins épaisses de matrice rouge contre certaines faces des nodules, donnant ainsi l'impression d'enduits périnodulaires faits d'hydrohématite brun foncé et d'argiloferrane rouge.

En l'absence d'enduits périnodulaires caractéristiques et dûment déterminés, il n'est pas aisé de faire la preuve que les concrétions sont des gravillons qui se sont trouvés à un moment donné de leur existence, à la surface du sol. Cependant, un assemblage aggloméré, avec des concrétions jointives, suggère un pavage par ruissellement. Cet exemple montre la difficulté du diagnostic.



Fig. 29.- Faciès gravillonnaire 1 (B101) Kisa Moya 1. Des concrétions sableuses de deux générations: la première (1) a été dégagée de l'horizon tacheté où elle s'est formée par le ruissellement; la seconde (2) contient des éléments fins provenant du Précambrien sous-jacent et leur remontée implique le travail des termites, termites qui sont eux-mêmes responsables des galeries (4). Un léger enduit (3) forme des ponts entre les concrétions, dans une structure intertextique. Cas assez complexe et rare de la transformation d'un faciès gravillonnaire en faciès nodulaire.

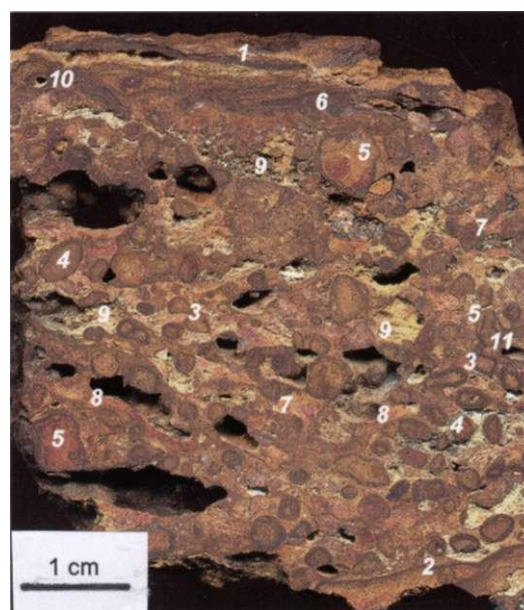


Fig. 30.- Faciès gravillonnaire 2 (E1222) Mabaya. Deux surfaces couvertes (1 et 2) d'un enduit rubané enserrant la zone cuirassée. Ces enduits n'ont pu se former qu'à la surface du sol et sont donc les garants de la liberté de se déplacer dont ont joui les concrétions. Ce sont donc des gravillons accompagnés de produits fins qui se sont déposés simultanément. Ils sont tous enrobés par un enduit rubané (3). Ce dernier constitue une caractéristique des gravillons (non sableux). Une grande diversité des concrétions : nodules lithorelictuels, pédorelictuels parfois composites (5). A côté des galeries tapissées d'un enduit rubané (11), de larges chambres vides, et dans ce cas avec enduit, ou remplies de terres bariolées (9) pour les plus anciennes ou gris clair (10), pour les plus récentes.

Âge présumé :

Échantillon recueilli sur la surface n°2 ou surface intermédiaire, considérée comme datant de la mi-Tertiaire.

4.3.7.3. Échantillon 7115 (Luishia 4) (fig. 28)**Observation :**

Cet échantillon résume la diversité observée dans les exemples de faciès nodulaire qui précèdent.

Diversité des éléments figurés :

- Grains de quartz polycristallins;
- Nodules lithorelictuels sombres, bien imprégnés par le fer^(*);
- Nodules lithorelictuels faiblement imprégnés^(*);
- Nodules pédorelictuels contenant des grains de sable^(*);
- Nodules pédorelictuels dotés de grands pores, visibles à l'œil nu^(*);
- Nodules pédorelictuels complexes^(*).

Des enduits de différentes épaisseurs :

- Tapissant des galeries^(*);
- Autour de bon nombre de nodules de différents types^(*).

Notons toutefois que certains nodules en sont dépourvus^(*).

Quelques galeries ne présentent aucun enduit. La plupart de celles-ci sont remblayées par des terres de couleur rouge, rose ou ocre^(*), alors que les galeries garnies d'un enduit sont presque toutes vides.

Interprétation

Les enduits dans les galeries ont figé le bâti de la cuirasse. L'occlusion de certaines galeries y a empêché tout passage ultérieur. De nouvelles galeries ont été creusées aux dépens de la matrice et des nodules les moins indurés. Toutefois, la rigidité due aux premières galeries a empêché l'effondrement des secondes, qu'il a donc fallu remblayer après usage.

La diversité des éléments figurés est due à un mélange. Les quelques nodules dépourvus d'un enduit, dont on peut donc penser qu'ils ont eu une origine souterraine, laissent à penser que ce mélange se serait effectué dans le sol.

Les nodules pédorelictuels sont tous entourés d'un enduit, ce qui leur assure une certaine solidité. Par ailleurs, ils étaient déjà formés, comme tous les autres nodules enrobés, à un moment où ils étaient libres de se déplacer et donc dans une phase antérieure à la consolidation des galeries.

4.3.8. *Faciès gravillonnaire*

Un gravillon est, ici, un nodule qui, non seulement a été détaché du milieu où il s'est formé (Tardy, 1993, p. 438) mais qui a, en outre, séjourné à la surface du sol. Les critères qui peuvent être utilisés en faveur d'une présence, à un moment donné, à la surface du sol, ont été interprétés différemment par certains auteurs. Les premiers exemples seront donc choisis en fonction de caractères qui, outre les enduits périnodulaires, témoigneraient de leur passage à l'air libre.

4.3.8.1. Échantillon B101 (Kisa Moya 1) (fig. 29)**Observation :**

Les concrétions sableuses sont de dimension assez homogène. Elles étaient entourées d'un sable meuble de couleur beaucoup plus claire (7,5YR8/6) dont il subsiste quelques traces.

La couleur des concrétions oscille entre 7,5 et 10 R3/6, les plus sombres^(*) sont dénuées de la porosité qui affecte les plus claires^(*). Ces derniers contiennent d'ailleurs une légère proportion d'argile rouge.

L'échantillon est traversé de galeries^(*).

Certaines concrétions sont reliées entre elles par des ponts de sable fortement imprégné de couleur brune (7,5YR5/3), formant ainsi une structure intertextique^(*).

Interprétation :

Les concrétions appartiennent à deux générations.

La première, faite d'éléments uniquement sableux, a été dégagée d'un horizon tacheté par le ruissellement. De nodules, elles sont passées au stade de gravillons.

Les éléments de la seconde génération contiennent des éléments fins amenés du Précambrien sous-jacent par les termites. Ceux-ci, par bioturbation, ont composé avec les sables un mélange qui a servi de matrice aux gravillons dont ont dérivé les secondes concrétions qui sont, en fait, des nodules pédorelictuels. Ils ont été individualisés par l'action des termites dont les galeries sont encore visibles.

La cuirasse est donc passée, dans ce cas, d'un faciès gravillonnaire à un faciès nodulaire.

Âge présumé :

L'échantillon a été collecté dans des sables rouges, déposés après un remaniement au cours du Quaternaire. Sans indication sur le site originel de formation, il n'est pas possible de déterminer l'âge de la cuirasse. La présence d'un enduit serait plutôt caractéristique du Tertiaire.

4.3.8.2. Échantillon E1222 (Mabaya) (fig.30)**Observation :**

La zone des nodules est comprise entre deux surfaces couvertes chacune d'un enduit ferrugineux^(*).

Les concrétions sont toutes enrobées d'un enduit ferrugineux rubané brun (7,5YR4/3)^(*), d'une épaisseur d'un millimètre environ. Leur diamètre varie entre 1 mm et 1 cm, avec des plages où le classement granulométrique est assez bon.

Les concrétions sont d'anciens nodules, soit lithorelictuels, et de couleur rouge violacé et de taille assez petite^(*), soit pédorelictuels, et souvent plus gros et de nature composite^(*). Ces derniers comportent, entre autres, de plus petits nodules lithorelictuels associés à des masses terreuses de couleur souvent peu différente de celle de la matrice.

Les nodules enrobés sont légèrement espacés dans la matrice (assemblage presque conglomératique). Un certain nombre sont toutefois attachés entre eux par l'enduit.

Sous l'enduit supérieur, on peut observer une structure lobée^(*) (4.2.3.5).

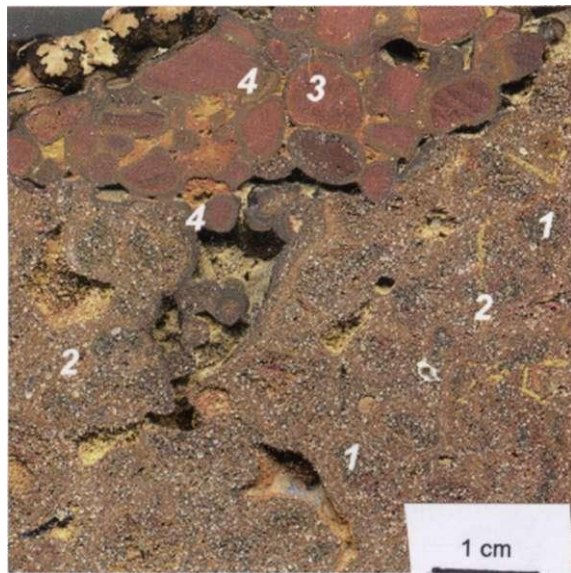


Fig. 31.- Faciès gravillonnaire 3 (5242) Kafumbe. Des concrétions lithorelictuelles originaires d'un affleurement local du Précambrien sous-jacent (3 et 4) sont venues se souder sur le sommet d'une cuirasse sableuse. On en retrouve également au sein de cette cuirasse (figure 32). L'agglomération s'est produite grâce à un enduit rubané et les concrétions sableuses elles-mêmes sont soudées entre elles par un enduit où fer et sable alternent (1 et 2, ainsi que figure 32).

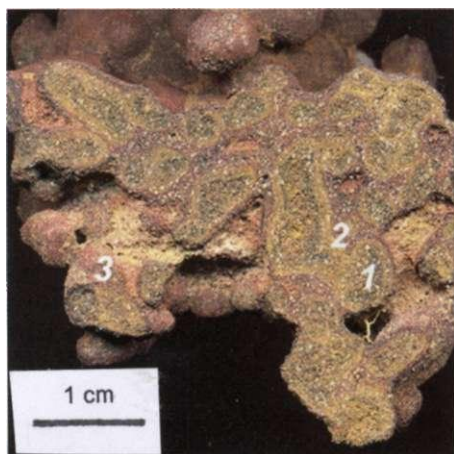


Fig. 34.- Faciès pseudo-pisolitique 2 (B246) Kisa Moya 2.

Les concrétions (1) sont entourées de couches zonaires de couleur différente (2), mais ne constituent pas une cuirasse pisolitique. En effet, les deux couches périphériques ne se sont pas formées en surface, mais au sein d'un milieu sableux dont les grains ont été emprisonnés dans la formation. Ils se distinguent des grains de sable qui viennent se coller localement à l'enduit et en soulignent la stratification.



Fig. 32.- Faciès gravillonnaire 3, lame mince taillée dans l'échantillon précédent. (échelle x2: largeur totale: 25 mm).

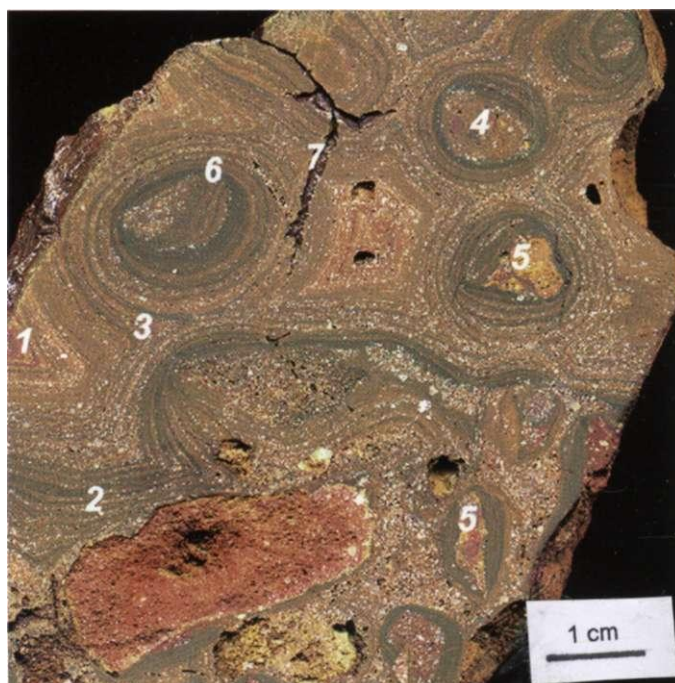


Fig. 33.- Faciès pisolitique 1 (8106) Kibwe wa Sanga. Les enduits rubanés acquièrent une grande épaisseur; ils sont fixés sur des surfaces, au départ assez petites, faites de fragments de roche (5) aujourd'hui altérés ou de sable imprégné (4). La cuirasse est complexe. Elle est subdivisée en deux étages par un plancher constitué par un enduit rubané épais (2). Dans la partie inférieure, les pisolithes sont peu développés et intégrés dans une matrice sableuse, avec des fragments de roche ou des blocs de sable imprégné. La partie supérieure est plus typique: les pisolithes y ont joui d'une certaine liberté jusqu'à ce que les couches successives de l'enduit les emprisonnent et forment la partie supérieure de la cuirasse. Un noyau est formé lui-même partiellement d'un fragment de l'enduit pisolitique (6). Ce fragment est une partie d'un enduit précédent, érodé avant le dépôt du second enduit. La discordance constitue un indice sérieux d'une formation externe des enduits. Cette cuirasse est très ancienne, comme en témoignent les crevasses de dessiccation profondes (7). Par ailleurs, l'enduit terminal est de teinte rougeâtre (1), mais ne se trouve plus que dans des sites à l'abri de l'érosion ultérieure.

Il n'est pas toujours aisé de faire le départ entre la matrice (°) et certains remplissages de galeries (°), l'une et les autres présentant une même coloration bariolée, rouge brique et orange (10R5/8 et 5YR7/8).

Les vides sont, soit des galeries formant un réseau, soit des chambres de dimensions plus larges. Certains vides ont été remplis par des masses terreuses dont les plus anciennes sont de couleur bariolée (°) et les dernières arrivées gris clair (7,5YR8/2) (°). On y retrouve de très petits (<1mm) nodules sans enduit.

Certaines galeries, par contre, sont tapissées d'un enduit rubané, épais de plus de 1mm (°).

Interprétation :

Les nodules ont été couverts d'un enduit rubané dans des conditions et à une époque assez semblables à celles du plancher inférieur. Un agent de transport (le ruissellement) les a, ensuite ou même presque simultanément, amenés dans leur site actuel.

Les enduits qui encadrent cet échantillon se sont formés non sur une surface d'une certaine résistance mais sur un matériel en partie terreux (5.1.2).

Les enduits des galeries et la structure lobée (qui ne représente qu'un autre aspect du même phénomène) sont à peu près contemporains de l'enduit qui constitue le toit de la formation.

Les surfaces couvertes d'un enduit qui encadrent la couche de concrétions, montrent avec évidence que la partie insérée entre elles, est un dépôt formé à la surface du sol. Un ruissellement en surface est vraisemblablement à l'origine de ce dépôt. Le classement granulométrique en est assez mauvais. Cette sédimentation en vrac se peut-être le fruit d'un gros orage. Aucun tri, comme il s'en produit dans les stone-lines sableuses, ne s'est produit ultérieurement. On peut attribuer ce phénomène à la rareté, à cette époque, des pluies efficaces et la formation peu de temps après de l'enduit supérieur qui les a préservés de toute érosion ultérieure. Le faciès gravillonnaire de cette cuirasse exceptionnelle ne peut faire aucun doute.

Age présumé :

Cet échantillon a été prélevé sur un versant en pente légère de la surface de Lubumbashi qui date de la fin du Tertiaire.

4.3.8.3. Échantillon 5242 (Kafumbe) (figs. 31 et 32)

Observation :

Deux parties bien distinctes s'observent :

- La masse principale est constituée de nodules sableux assez sombres (°) enrobés par un enduit rubané qui comporte de nombreuses strates sableuses un peu plus claires (5YR4/3) (°). Très souvent, comme dans la cuirasse B235 (4.3.3.1), les nodules qui étaient passés au stade de gravillons, ont été soudés entre eux par l'enduit. Parmi ces concrétions sableuses de bonne taille (8 mm, en moyenne), quelques éléments rouges plus petits sont de même nature que les suivants;
- Très localement, au-dessus des concrétions sableuses, des placages de gravillons rouge violacé, provenant de la roche précambrienne(°), sont emprisonnés par un enduit finement rubané (°). Ces gravillons sont, soit homogènes et lithorelictuels, soit pédorelictuels et composés d'une

masse argileuse rouge mélangée à une certaine proportion de grains de sable. Les gravillons ne se touchent pas directement et l'enduit qui les réunit, laissent subsister des vides par défaut de remplissage.

Interprétation :

Le plateau des Bianco d'où provient cet échantillon, comporte des points plus élevés momentanément non recouverts à cette époque par les sables du Kalahari et où le substratum précambrien est en affleurement.

La différence de nature des gravillons atteste le déplacement en surface des gravillons rouge violacé du placage superficiel. Ce raisonnement peut être étendu aux autres petits nodules rouges disséminés dans la masse sableuse et même, pour le moins, aux nodules sableux enrobés voisins, nodules qui sont donc devenus des gravillons.

La mise en place des gravillons rouge violacé est contemporaine de la formation de l'enduit.

La présence d'un enduit ne présente ici qu'un argument supplémentaire en faveur du faciès gravillonnaire de la cuirasse.

Âge présumé :

Cet échantillon possède une série de caractéristiques en commun avec B235 (4.3.3.1). Il est donc rattaché à la surface de Lubumbashi (fin du Tertiaire).

4.3.9. *Faciès pisolithique*

4.3.9.1. Échantillon 8106 (Kibwe wa Sanga) (fig. 33)

Observation :

La part prise par les enduits rabanes est ici prépondérante.

Dans les endroits favorables, on compte jusqu'à plus de quarante petites strates superposées (°). Elles se présentent à la manière des varves, en formant des couples de strates plus sombres ou plus colorées et d'autres plus claires et souvent plus riches en grains de quartz. Dans cette succession, les strates sombres sont mieux développées et plus rapprochées à la base qu'au sommet. Presque toutes les strates colorées sont formées d'hydrogoethite.

L'échantillon est traversé par une sorte de plancher (°), fait d'un enduit rubané continu, qui le divise en deux parties de faciès quelque peu différent. Cet enduit couvre une surface préexistante dont il épouse les irrégularités; de ce fait, il indique l'ordre dans lequel les parties se sont formées et par conséquent, le sens dans lequel il faut considérer l'échantillon :

1. La partie supérieure est uniquement composée de pisolithes dont le cœur est formé soit d'un fragment de roche (lithorelictuel), soit d'un amalgame de sable et de petits fragments de roche. Les strates qui enrobent chaque centre, finissent par se rejoindre (°) pour ne plus former qu'une seule et même couche dont la géométrie contournée suit de façon décalée le contour des éléments sous-jacents.
2. La partie inférieure est plus disparate. Les enduits des pisolithes y sont moins bien développés et se limitent souvent à la partie inférieure plus foncée des enduits de la partie supérieure (°). Au sein des pisolithes, se trouve un corps sableux rouge d'une certaine dimension (°) ainsi

que de petits débris brun foncé. Une matrice sert ici de tissu conjonctif entre les différents éléments, alors qu'elle était inexistante dans la partie supérieure.

Les fines couches des enduits qui entourent les pisolithes présentent fréquemment des discordances parfois très accusées (*). Quelques strates sont taillées en sifflet et reproduisent la disposition d'une stratification entrecroisée.

La cuirasse est traversée par des crevasses qui passent au travers des enduits (*).

Les vides par défaut de remplissage entre les pisolithes sont assez fréquents, surtout dans la partie inférieure.

Interprétation :

Dans une première phase, se sont formées, autour de nucléus divers, les premières couches, sombres, de l'enduit. Il semble que le phénomène ait été général et qu'il ait affecté toutes les pisolithes, tant celles de la partie inférieure que celles de la partie supérieure. Seuls les fragments de petite taille avaient pu faire office de nucléus.

Il s'est ensuite formé un dépôt d'une partie des pisolithes ainsi que de fragments de roche ou de sable consolidé dans un faciès massif. Un sable s'est déposé en même temps. Il a servi de matrice entre les éléments plus grossiers et a été imprégné, probablement peu de temps après.

La partie inférieure a ensuite été placée sous une chape constituée de nouvelles strates pisolithiques. Ces dernières épousent la forme des éléments sous-jacents, et de ce fait sont de géométrie assez irrégulière.

Les pisolithes restées libres ont continué de croître en se couvrant d'un enduit, éventuellement contemporain de celui de la chape. Certaines d'entre elles avaient auparavant été débarrassées d'une partie de leur enduit primitif. Le dépôt des strates de la seconde phase a donc pu se faire en discordance avec les premières.

L'alternance des strates d'une pisolithe s'est fort bien accommodée d'une formation à la surface du sol. Celle-ci demande toutefois une analyse et une interprétation plus approfondie sur laquelle nous reviendrons (5.1).

Âge :

Les pisolithes épaisses sont la caractéristique principale des cuirasses les plus anciennes de la région.

L'échantillon suivant ne contient aucun pisolithe, mais possède une structure légèrement comparable qui peut éclairer le mode de formation de ces derniers.

4.3.9.2. Échantillon B246 (Kisa Moya 2) (fig. 34)

- Cet échantillon se trouve dans des dépôts sableux provenant du remaniement quaternaire des sables du Kalahari.

Observation :

Des nodules sableux brun foncé (2,5YR3/2) (*) sont entourés de deux couches millimétriques superposées de teinte différente. L'une, interne, est brun clair (2,5YR5/4) (*), tandis que l'autre est rouge violacé (7,5R3/6) (*).

Alors que dans les pisolithes, les grains de sable étaient distants l'un de l'autre et s'organisaient en une structure du type porphyrique, ils sont jointifs dans le présent échantillon.

Aucun enduit ferrugineux n'est présent, ni à l'extérieur, ni au sein de l'échantillon.

Interprétation :

Les couches zonaires brune et rouge se sont formées alors que la cuirasse reposait au sein d'un milieu sableux. Le sable qui se trouvait en marge a été emprisonné par une imprégnation ferrugineuse.

Le phénomène s'est produit à deux reprises et dans des conditions différentes. Ces couches sableuses se distinguent, par ailleurs, des fines strates sableuses au sein des pisolithes où des grains de sable isolés ont été piégés par l'enduit ferrugineux en voie de formation.

La superposition de couches rouges sur d'autres de couleur brune est particulière. Le profil de Kiniama (2.2.1) opposait les couches rouges de profondeur aux couches brunes superficielles, produit d'un contact avec les matières humiques. La couche rouge se trouve ici au-dessus de la couche brune. Une modification de l'environnement en est la cause. Au cours du Quaternaire, des couches rouges d'origine profonde ont été déposées en surface, en l'absence d'humus, c'est-à-dire sous un climat relativement sec.

Quelle que soit la nature des sels de fer dans les deux couches, il convient de noter l'attraction exercée par l'une sur l'autre.

4.4. Conclusion sur les types de faciès

4.4.1. *Faciès massif*

4.4.1.1. Définition

A l'exception de quelques rares éléments figurés, ce faciès est constitué d'une matrice consolidée grâce à une cimentation par les oxydes de fer. Il est développé presque uniquement dans les terrains sableux, ne comportant qu'une faible proportion d'argile. On le trouve aussi dans des substrats gréseux altérés au préalable (Massif de Ndias, Nahon, 1976). Les exemples présentés ci-dessus sont, en plus des sédiments de rivière indurés (4.3.1.1), les colluvions sableuses indurées de la Kisa Moya (4.3.8.1). Ce dernier échantillon présente les modifications affectant les marges déchiquetées d'un faciès massif.

Le faciès massif consiste, en fait, en un grès ferrugineux, formation très répandue, même hors des régions tropicales. On les rencontre, par exemple, dans certaines couches marines du Secondaire ou du Tertiaire des moyennes latitudes.

4.4.1.2. Caractères

Hormis les sédiments bien identifiables tels que ceux du lit d'une rivière (4.3.1.1), le faciès massif a été rencontré dans des masses sableuses peu différenciées (4.3.8.1). Pour ces dernières, la différence vis-à-vis des autres grès ferrugineux

réside dans la géométrie de leurs marges. La forme externe est, en effet, assez contournée. Elle apparaît mieux lorsque la partie consolidée est dégagée des sables meubles qui l'entourent.

4.4.1.3. Mode de formation

Les teneurs en fer impliquent une arrivée de fer venant de l'extérieur. Les marges très contournées de B101 (4.3.8.1) sont dues à un processus très proche de la nodulation, certaines parties subissant un lessivage pendant que les autres augmentent leur teneur en fer. Un apport latéral rendrait compte du supplément de fer vis-à-vis de l'horizon bariolé.

L'échantillon 5277 (4.3.1.1) est fort ancien et est associé à d'autres faciès, bréchique-alvéolaire ou pisolitique, qui sont également caractérisés par un apport de fer assez important (6.3.1).

4.4.1.4. Âge

Le faciès massif n'est pas spécialement caractéristique d'un âge déterminé. Le façonnement de la cuirasse B101 date probablement de la fin du Tertiaire tandis que la cuirasse 5277 est, au vu de son association avec d'autres faciès, d'un âge très ancien, probablement du début du Tertiaire.

4.4.2. *Faciès vermiforme*

4.4.2.1. Définition

En principe, ce faciès est caractérisé par une prédominance de tubules. La proportion en volume peut aller au-delà de 50%. La taille de ces tubules varie entre 1 et 5 mm, avec une prépondérance des diamètres de 2-3 mm. De fines tubulures d'une largeur inférieure au millimètre existent dans certaines cuirasses; elles sont souvent assez espacées et ne contribuent donc pas à conférer à la cuirasse une structure vermiforme.

Ces tubules sont en partie vides, en partie remplies d'un matériel terreux qui se distingue de la matrice du contexte encaissant. Cette distinction est facilitée par une coloration différente ou/et par un enduit qui souligne les limites du chenal. Le remplissage est la plupart du temps de teinte plus claire.

Une structure *lobée* décrite par Boulangé *et al.* (1973) sur le niveau intermédiaire de la Côte d'Ivoire (1973), pourrait être, d'après les photos,

des galeries développées partiellement les unes aux dépens des autres, et garnies chacune d'un enduit rubané d'hydrogoethite.

4.4.2.2. Contexte

Le faciès vermiforme affecte les formations ferrugineuses sur tous les substrats. Il est cependant beaucoup moins fréquent dans les sables (4.3.3.3). Il est absent des cuirasses les plus anciennes.

La structure vermiforme peut affecter les horizons/niveaux les plus divers: les cuirasses, les carapaces auxquelles elle assure une certaine cohésion (4.3.2.3 et 4.3.2.4 ainsi que fig. 47) et même au sein de la roche en place altérée (Mac Farlane, 1976, 78).

La plupart du temps, la structure vermiforme se surimpose sur un faciès de base, nodulaire ou gravillonnaire.

4.4.2.3. Mécanismes de formation

4.4.2.3.1. Les conduits

La taille des conduits et leur continuité militent en faveur d'une intervention des animaux fouisseurs, vers de terre et surtout termites. En outre, certaines galeries sont encore fonctionnelles à l'heure actuelle, au sein même des niveaux cuirassés, comme le montrent la présence des insectes eux-mêmes et les dépôts récents qu'ils ont abandonnés sous forme de minuscules boulettes (< 1 mm).

La régularité du diamètre se trouve quelquefois en défaut. La raison en est que les galeries non tapissées d'un enduit s'effondrent facilement par endroits sinon complètement. Par ailleurs, les éléments figurés contenus dans la matrice ne peuvent pas toujours être évités, ils sont alors contournés au prix d'une certaine irrégularité de la galerie.

La rareté du faciès vermiforme dans les sables s'explique par le fait qu'il est impératif pour les termites de disposer d'une certaine proportion d'argile (quelque 10%) pour réaliser leurs constructions. En milieu sableux, la chose ne sera possible que si le Précambrien, riche en produits argileux se trouve à faible profondeur sous le sable ou si, parmi les couches gréseuses du substrat, se trouve quelque intercalation plus fine.

L'attitude des chercheurs vis-à-vis de l'activité des termites présente la plus grande diversité, depuis celui qui refuse, d'emblée, de leur accorder le moindre crédit (Mac Farlane, 1976, 77), voire même d'en aborder l'hypothèse, jusqu'à ceux qui leur attribuent les plus grandes vertus sinon la responsabilité de la totalité de la cuirasse (en particulier, la structure termitique, Erhart, 1951). Étant donné l'attention qu'il convient de leur prêter, nous leur consacrerons ultérieurement un chapitre particulier (5.3).

4.4.2.3.2. Les parois

Les parois des canalisations se présentent sous différents aspects :

- Elles sont nues et dans ce cas, ont une surface bien nette (4.3.2.1);
- Elles sont couvertes par un enduit rubané: les fines straticules (d'une épaisseur nettement <1 mm) sont composées d'argillane, les unes issues directement de la matrice (et souvent de couleur rouge), les autres de couleur brune et plus riches en fer;
- Elles sont tapissées d'un enduit rubané composé principalement d'hydrogoethite; des intercalations argileuses trop épaisses pour être des argillanes peuvent séparer les enduits rubanés.

Il est exceptionnel que le dépôt d'un enduit soit précédé d'une imprégnation de la matrice encaissante.

Par contre, les enduits peuvent présenter des structures où des straticules présentent des discordances; il y a donc eu érosion des premières strates déposées avant un nouveau dépôt. Par ailleurs, il existe des enduits percés par une galerie plus récente. Tout semble indiquer que la formation d'un enduit n'a pas nécessairement interrompu l'activité des termites.

D'autre part, la formation des enduits s'est produite pendant une période limitée. Les galeries formées auparavant, si elles ont existé, se sont effondrées faute de protection par un tubage. En effet, lorsqu'ils sont présents, les enduits ferrugineux des galeries confèrent à l'ensemble de la future cuirasse une certaine rigidité. Ils consolident l'édifice de la même façon que les spicules d'éponge au sein de ces organismes. Kubiena (1956) avait déjà noté que "le durcissement n'est pas toujours généralisé: il commence par les zones qui sont en contact avec l'oxygène de l'air, le long des canaux,..."

4.4.2.3.3. Les remplissages

Les remplissages comportent une faible partie de matériel strictement local comme les débris tombés des épontes au moment du remblaiement et les quelques éléments d'une dimension supérieure à la compétence des termites. Rappelons que celle-ci est de l'ordre du millimètre (5.3.2). Le reste des remplissages provient principalement des horizons supérieurs, plus ou moins décolorés par les acides humiques. Une exception importante se présente sur substrat sableux (4.3.3.3). L'argile nécessaire aux constructions des termites n'étant présente que dans le Précambrien sous-jacent, les remplissages sont alors colorés en rouge.

Un âge relatif peut être attribué aux remplissages: les plus anciens ayant une couleur assez proche de la matrice encaissante, les plus récents étant très clairs et même blancs quelquefois. Au fil des temps, les conditions ont donc évolué, soit qu'une érosion superficielle ait rapproché la galerie considérée de la surface, soit qu'une évolution climatique vers l'humide ait permis une augmentation de l'importance des formations humifères.

Un certain nombre de conduits sont restés vides. Parmi ceux-ci, il faut compter :

- Les galeries encore fonctionnelles, comme en témoignent les petites boulettes que les termites y ont abandonnées;
- Les galeries tapissées d'un enduit ferrugineux relativement épais et qui ont été obturées à leurs extrémités. L'accès à la galerie a été supprimé.

4.4.2.3.4. La matrice

Les plages de couleurs légèrement différentes, rouge, rose, ocre et blanche, quelquefois sans contours nets, sont le résultat d'une intense bioturbation, secondée quelquefois par un léger lessivage. Les structures de "flux" (4.3.2.4) dans des galeries ou dans des chambres remblayées ont une même origine. Le problème sera abordé ultérieurement (5.3).

4.4.2.4. Âge

Les enduits ferrugineux épais permettent de dater une partie des faciès vermiformes et par conséquent l'ensemble cuirassé. Comme il sera vu plus loin (6.1.2), les enduits ne se sont formés que dans le courant et à la fin du Tertiaire. La plupart des tubules sans enduit se sont formés

ultérieurement, au cours du Quaternaire. Certaines galeries sans remplissage ont encore été creusées il y a peu de temps.

4.4.3. *Faciès alvéolaire*

4.4.3.1. Définition

Dans le faciès alvéolaire, les cavités doivent avoir des dimensions suffisamment grandes pour être visibles à l'œil nu, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que les nodules (à partir d'un millimètre). Elles doivent aussi présenter une proportion en volume suffisante, de l'ordre de 15%, sans être nécessairement prépondérantes.

Il existe de nombreux termes à peu près équivalents pour désigner les vides. Il n'est pas toujours certain que chacun des auteurs qui ont utilisé l'un ou l'autre de ces termes dans leur description, souhaitaient faire le départ, avec précision, entre des formes bien identifiées..

Bien qu'une nomenclature objective soit toujours préférable, des considérations génétiques semblent apporter plus de clarté vis-à-vis d'un lexique descriptif plutôt confus. La plupart des vides résultent, en effet, de mécanismes pour lesquels il subsiste rarement la moindre équivoque (4.1.3).

Par ailleurs, selon l'orientation de la section, des tubules peuvent prendre l'aspect d'alvéoles (4.3.3.3).

4.4.3.2. Mode de formation

Le faciès alvéolaire résulte de la disparition de substance par altération et lessivage. L'exemple B235 (4.3.3.1) montre des débris de roche en voie d'altération et d'élimination. L'exemple 5276 (4.3.2.2) laisse découvrir la structure fantomatique qui résulte de ce départ.

Très tôt, ce processus a été évoqué pour interpréter les alvéoles: Benza (1836); Blanford (1859), Oldham (1893). Une disposition en nid d'abeille (structure fantomatique) a été attribuée au départ de fragments de roche ou de minéraux altérés (déjà dans de Chételat 1938, p. 91).

Certains alvéoles doivent être associés à l'enrobage par des sels de fer (imprégnation ou enduits) d'une masse meuble ou ultérieurement ameublie et qui serait ensuite éliminée (Maignien, 1966, 105).

Le défaut d'occupation par un enduit de l'espace libre entre deux concrétions, est aussi à l'origine de certains alvéoles (4.3.3.1).

4.4.3.3. Âge

Les creux circonscrits par des enduits ferrugineux ont l'âge de ces derniers. Ils sont donc au plus tard tertiaires.

Les structures fantomatiques caractérisent les cuirasses les plus anciennes qui ont subi une longue altération.

4.4.4. *Faciès conglomératique*

Ce faciès se définit de lui-même. Un cailloutis composé d'éléments grossiers, non ferrugineux, est cimenté par des oxydes de fer, soit par l'imprégnation de sa matrice (sédimentaire) fine, soit par un dépôt dans les interstices libres. Comme pour le faciès massif, la question est ici d'inclure ou non ce type de consolidation dans les cuirasses ferrugineuses. En effet, il n'en présente pas la morphologie, du moins si on s'en réfère à la plupart des définitions et, entre autres, à celle de la synthèse. De plus, les formations de ce type ne sont pas spécifiques des régions tropicales et se rencontrent sous d'autres climats. Les terrasses les plus anciennes de la Meuse, par exemple, présentent les mêmes caractères. Il est vrai que ces dépôts de la Traînée mosane datent, au plus tard, de la transition entre le Tertiaire et le Quaternaire (Alexandre-Pyre, 1976).

Dans la mesure où les faciès massifs ou conglomératiques sont étroitement associés aux autres faciès, on manque d'arguments supplémentaires pour les traiter séparément.

Le matériel caillouteux du faciès conglomératique peut avoir différentes origines :

- Les alluvions d'une rivière;
- Le matériel résiduel d'un conglomérat ancien après altération, en l'occurrence le Petit ou le Grand Conglomérat du Kundelunguien;
- Une formation continentale grossière très ancienne, comme le cailloutis des plateaux (6.2.2).

Au Katanga, les dépôts caillouteux de terrasse les plus récents peuvent s'observer dans les berges sapées par l'érosion latérale de la rivière, quasiment dans leur site originel de formation. Les autres sont portés en terrasse par l'incision des vallées.

Dans les terrasses récentes, la consolidation est acquise avec une quantité réduite de fer, à l'aide de simples points de soudures (structure inter-textique). Dans les plus anciennes formations, le fer occupe tous les espaces libres.

Le faciès conglomératique se rencontre dans tous les étages cuirassés, depuis les cuirasses sommitales jusqu'au fond des vallées, comme nous venons de le voir.

4.4.5. *Faciès bréchique*

Dans le faciès bréchique, un fer presque pur joue, en quelque sorte, le rôle de tissu conjonctif entre des éléments non ferrugineux légèrement espacés les uns vis-à-vis des autres. Contrairement aux enduits ferrugineux, il ne présente jamais d'aspect rubané. Il est, cependant, souvent associé à un faciès pisolithique, où le fer est précisément toujours rubané. Le faciès bréchique semble toujours occuper une position moins superficielle.

Comme tous les faciès de la cuirasse la plus ancienne, il semble que la formation de celui-ci ait pu disposer d'un apport de fer antérieur assez important.

4.4.6. *Faciès lamellaire*

4.4.6.1. Définition

Dans les exemples analysés, les lamelles sont des plaquettes détachées de la roche, en l'occurrence une siltite finement stratifiée. Dans les échantillons choisis, les fragments de roche sont légèrement plus épais que des plaquettes. Ces échantillons ont cependant été pris en compte en raison de leur contribution à l'observation des modifications géométriques dues à la bioturbation. Dans la figure 35, prise dans le même site de la Kiesangie, le forme en plaquettes est mieux visible.

Une structure lamellaire d'un ordre tout différent a été signalée dans les alluvions fluviales où des niveaux peu épais ont été indurés par les sels de fer. Au Katanga, de telles indurations ont pu être observées dans une terrasse de la Katentania (plateau des Bianco), sans qu'il y ait toutefois dégagement de lamelles.

Une structure lamellaire a également été signalée, qui serait due au remplissage des diaclases de la roche avec destruction ultérieure du moule encaissant. Il pourrait s'agir, dans ce cas,

d'un fragment d'enduit ferrugineux ou d'un faciès bréchique particulier.

4.4.6.2. Mode de formation

Dans les exemples analysés (4.3.6), un certain nombre de processus jouent un rôle essentiel dans l'édification du faciès lamellaire tandis qu'une partie de l'action des termites constituent ici des épiphénomènes sur lesquels nous reviendrons plus tard. La succession des mécanismes est la suivante:

- Induration périphérique des siltites précambriennes en place;
- Altération selon les joints dont les lisérés de décoloration gardent la trace;
- Dégagement, à plusieurs reprises, de la partie altérée par les termites à partir de leurs galeries;
- De façon concomitante, colmatage des galeries par ces mêmes termites;
- Individualisation des plaquettes de siltite puis basculements à la suite de l'action répétée des altérations et affouillements par les termites;
- Formation d'un enduit rubané d'argiloferrane se terminant par une couche de ferrane.

L'enduit s'est formé en un seul épisode, figeant le matériel qu'il affecte au stade acquis après l'une des phases qui précèdent (de la deuxième à la cinquième, ci-dessus). L'enduit a étagonné certaines des galeries qui, de ce fait, n'ont plus subi d'effondrement.

La formation de plaquettes de siltite suffisamment rigides est le fruit d'une imprégnation qui s'est produite alors que le matériel n'avait subi qu'une très faible altération. En effet, une altération plus poussée aurait fait disparaître le litage, comme c'est le cas, aujourd'hui, en profondeur dans la même roche.

Les circonstances favorables à cette imprégnation sont la présence d'une couverture sableuse peu épaisse et d'une nappe phréatique peu profonde. Les couches sableuses servent de vecteur aux eaux chargées de fer et la faible profondeur est favorable à la fixation du fer. Un même phénomène a été observé, en plus petit, dans le bedrock d'une nappe alluviale. Sous le gravier d'une basse terrasse consolidé par le fer, les shales du bed-rock, subdivisés en fines plaquettes, ont été imprégnés de la même façon (terrasse de la Kafubu, à Kambikila, Dibanga et Alexandre, 1996) (3.2.3.1).

La comparaison entre la partie supérieure du substratum précambrien où la roche a été figée dans un certain état de fraîcheur et la partie plus profonde (dès avant 2 m) complètement ameublie, ne permet, en aucun cas, de considérer que la première résulte d'une évolution à partir de la seconde. L'imprégnation a donc été un phénomène hâtif qui a protégé les fragments de roche contre une altération importante.

La seconde conclusion importante, qui résulte d'observations qui ont été rendues possibles grâce au faciès lamellaire, est relative à l'activité des termites :

- Les plaquettes soulignent les modifications dans la géométrie du substratum;
- La comparaison entre le matériel de colmatage des galeries et la matrice montre que cette dernière est elle-même le résultat d'une bioturbation.

La consolidation du bâti qui, dans un premier temps, était due à l'imprégnation, s'est quelque peu relâchée et a ensuite été remplacée par la fermeté assurée par le réseau des galeries garnies d'un enduit.

La formation des plaquettes indurées n'est pas sans présenter des analogies avec celle des nodules dans l'horizon tacheté sur substratum précambrien. Toutes deux sont dépendantes d'une nappe aquifère. Toutefois, dans le cas des plaquettes de siltite, un apport de fer a dû être postulé alors que pour les nodules, si un lessivage oblique n'est pas exclu, le bilan du fer ne demande souvent aucun apport important (2.2.1).

4.4.6.3. Âge

Les cuirasses données en exemples, tant à la Kiesangie qu'à Midiashi, sont datées par leur enduit qui se serait formé à la fin du Tertiaire. On a toutefois le sentiment que ce faciès n'est pas caractéristique d'une époque déterminée.

4.4.7. Les faciès nodulaire et gravillonnaire

La distinction entre les deux faciès n'est pas des plus aisées. En principe, il suffirait d'être à même de faire le départ entre un nodule et un gravillon et de déterminer lequel des deux est prépondérant. Le problème est légèrement plus complexe et c'est la raison pour laquelle la définition des deux faciès sera donnée après l'analyse des caractères de chacun.

4.4.7.1. Caractérisation des deux faciès

Différencier le faciès gravillonnaire du faciès nodulaire revient à établir si tous les nodules ont été dégagés par une érosion superficielle et portés à la surface du sol ne fût-ce qu'un court instant.

Le faciès gravillonnaire fournit les meilleures conditions pour faire la distinction des caractères spécifiques. En effet, les échantillons E 1122 et 5212 (4.3.8.2 et 4.3.8.3) exhibent uniquement des gravillons, à l'exclusion de tout nodule. Le premier (E 1122) est constitué d'un lit épais de concrétions inséré entre deux surfaces couvertes chacune d'un épais enduit rubané, enduit dont la formation en surface sera démontrée (5.1.2). Ces enduits constituent les garants d'une sédimentation en surface des concrétions. Le second (5212) montre un placage de concrétions ferrugineuses formées à partir d'un substratum précambrien et importées au-dessus d'un ensemble de nodules sableux. Cet ensemble contient lui-même quelques concrétions étrangères de même origine. Les concrétions des deux échantillons se sont donc déplacées à la surface du sol et constituent bien des gravillons.

Les deux échantillons possèdent en commun les caractéristiques suivantes :

- Tous les gravillons sont enrobés dans un enduit rubané, isolément au départ. Les dernières couches de l'enduit peuvent les agglomérer, par petits groupes ou dans des ensembles plus importants;
- Les gravillons sont jointifs ou presque et la matrice est particulièrement peu importante. Son rôle consiste à remplir les interstices entre les éléments grossiers;
- La diversité des gravillons indique des apports de sources extérieures.

Les deux derniers critères se retrouvent dans la partie supérieure de la stone-line, qui est également une formation gravillonnaire. Le premier critère par contre est spécifique des gravillons de cuirasse. Les cuirasses se sont formées au Tertiaire (5.1.4.3), les stone-lines au Quaternaire. Dans l'enchaînement des processus qui ont contribué à l'élaboration de la cuirasse, les phases de libération des nodules par ruissellement et de formation de l'enduit ont coïncidé au moins en partie.

Les caractères du faciès nodulaire peuvent être établis, en contrepoint du faciès gravillonnaire. L'observation des échantillons 6017 et 7115

(4.3.7.1 et 4.3.7.3) permet de préciser les points suivants :

- Les nodules sont nus, sans le moindre enduit. Des nodules enrobés d'enduit qui sont donc des gravillons, peuvent coexister avec les nodules. Les proportions sont très variables;
- Une matrice relativement abondante les entoure de toute part. L'importance de la matrice est en partie masquée par le grand nombre de galeries qui sont des lieux de transformation de la substance de la matrice;
- Les nodules sont autochtones.

Dans cette opposition entre les deux faciès, nous sommes loin d'un comptage des concrétions de chaque espèce. Nous accédons en fait à une opposition nette entre deux modes de formation.

4.4.7.2. Mode de formation des deux faciès

Le façonnement d'un faciès gravillonnaire comprend les opérations suivantes :

- Elaboration de nodules de différentes espèces, lithorelictuels, pédorelictuels ou sableux;
- Dégagement et déplacement des nodules par le ruissellement superficiel;
- De façon presque concomitante, enrobage des gravillons par un enduit rubané; cet enrobage peut souder les gravillons entre eux et même les immobiliser.

Dans le faciès nodulaire, il ne se produit aucun déplacement: La succession des mécanismes est la suivante :

- Formation de nodules dans l'horizon tacheté, dans la plupart des cas lithorelictuels, exceptionnellement sableux;
- Sélection des nodules grâce à une remontée des parties meubles par les termites;
- Eventuellement formation de nodules pédorelictuels;
- Intégration de gravillons amenés en surface, sous l'action des termites.

D'un côté, le travail du ruissellement est prépondérant et de l'autre, c'est la bioturbation due aux termites qui joue ce rôle. Dans un sol sableux, peu favorable aux terrassements des termites, le faciès gravillonnaire prédominera.

Ces vues s'écartent des hypothèses avancées par les autres auteurs. Ils ont fait, en la matière, preuve d'une grande inventivité et ont mis sur pied des successions de mécanismes cohérents, souvent diamétralement opposés les uns par rapport aux autres.

4.4.7.3. Définition des faciès gravillonnaire et nodulaire

Dans ces définitions, la priorité sera donc accordée aux processus de formation plutôt qu'à la nature des concrétions.

Le faciès gravillonnaire comprend **exclusivement** des gravillons, reconnaissables en l'occurrence à leur enduit enrobant. Tous les autres caractères, matrice rare et allochtonie, sont implicites.

Le faciès nodulaire comprend **au moins un** nodule. Ce ou ces nodules attestent une élaboration locale, ce qui implique une intervention des termites, avec ses signes extérieurs galeries et matrice relativement abondante.

4.4.7.4. Âge

En se fondant sur la nature des enduits extérieurs (6.3), les faciès nodulaire et gravillonnaire se retrouvent dans toutes les cuirasses tertiaires, à l'exception de la plus ancienne. Dans celles-ci, le faciès est pisolithique (4.3.9.1), massif (4.3.1.1) ou bréchique (4.3.3.2). Ces faciès n'ont rien en commun avec le faciès des périodes ultérieures...

4.4.8. *Faciès pisolithique*

4.4.8.1. Définition

Le faciès pisolithique est caractérisé essentiellement par des enduits ferrugineux zonaires très épais, de l'ordre de 0,5 cm. Nous suivrons Tardy quand il propose de garder le terme quelle que soit la dimension de l'élément (1993, p. 438). En effet, les dimensions sont supérieures à celles d'un pois.

4.4.8.2. Caractères

Il serait vain de chercher une série progressive entre le faciès gravillonnaire, pourtant nanti de nodules quelquefois très largement enrobés et le

faciès pisolithique. En effet, le cœur des pisolithes ne recèle aucun nodule. Leur nucleus de base est un minéral, un fragment de roche éventuellement un débris d'une cuirasse. Dans la plupart des cas, l'épaisseur des enduits est telle que leur support revêt une importance tout à fait secondaire.

Les enduits sont **rubanés** et comportent un grand nombre de fines strates, d'épaisseur souvent inférieure au millimètre. On en compte souvent plusieurs dizaines. Des passées riches en sable ou en produits très fins soulignent la stratification.

4.4.8.3. Mode de formation

Les processus qui conduisent à la genèse des pisolithes seront exposés après avoir pris connaissance des problèmes que pose la formation des enduits ferrugineux.

Dès à présent, on peut rapprocher les gravillons enrobés des pisolithes en ce qui concerne leurs conditions de formation. Dans les deux cas, l'enduit n'a pu se former qu'en l'absence de matériel encaissant. L'échantillon B246 (4.3.9.2) a montré que le sable dans lequel était enfoui un nodule ou une cuirasse, est forcément inclus dans la couche ferrugineuse d'accroissement qui se forme en

périphérie. Un autre témoignage de présence des pisolithes à la surface du sol est la stratification entrecroisée que certains d'entre eux présentent. Comme toute stratification entrecroisée, elle est le résultat d'une succession dépôt, érosion puis à nouveau dépôt.

Les éléments qui s'entourent progressivement d'un enduit, restent pendant un certain temps indépendants, comme en attestent des couches continues. Ils finissent toutefois par être soudés entre eux par de nouvelles couches qui les englobent progressivement.

La matrice entre les éléments est souvent absente. On ne trouve pas non plus de traces de l'activité des termites.

4.4.8.4. Âge

Le faciès pisolithique franc, c'est-à-dire dont la partie rubanée est très importante vis-à-vis de l'élément de base, est caractéristique des cuirasses les plus anciennes. Il convient de bien faire la distinction avec un faciès gravillonnaire dont les éléments porteraient un enduit particulièrement épais, comme c'est le cas pour les gravillons sableux de l'échantillon 5212 (4.3.8.3).

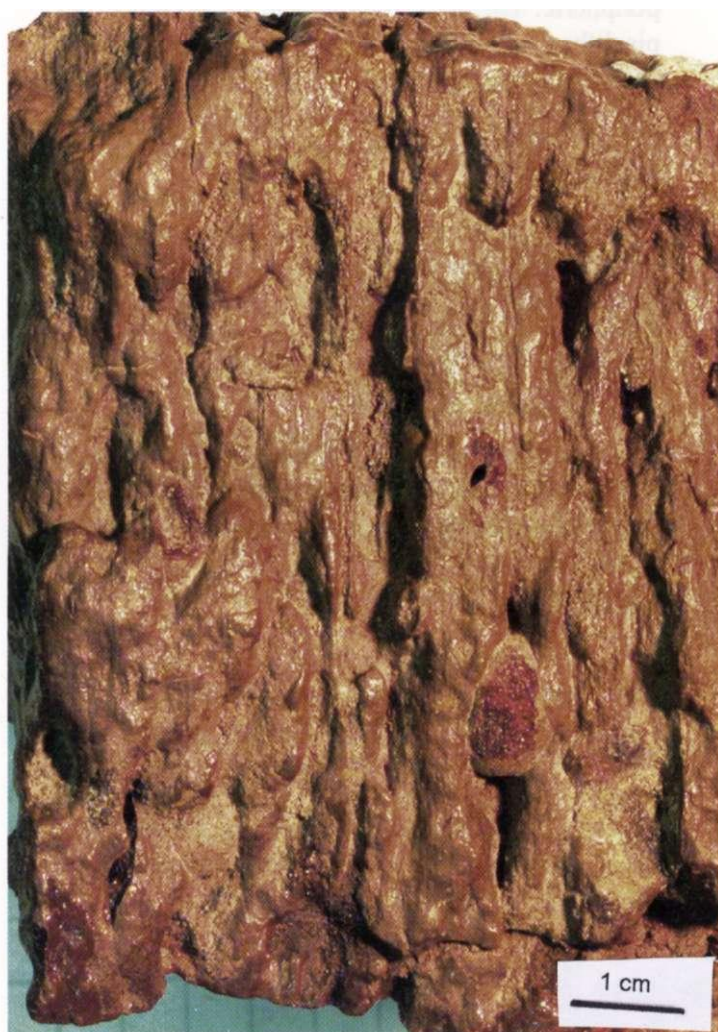
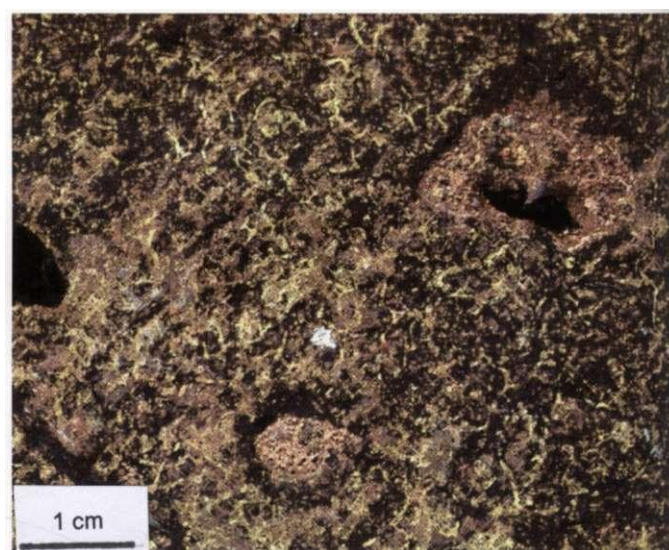


Fig. 35.- Cuirasse d'imprégnation d'une roche finement litée, montrant distinctement les lamelles en puissance qui auraient pu s'en détacher. Enduit superficiel ocre jaune de la fin du Tertiaire (cliché réalisé avec l'aide de Ph. Gérienne).



Fig. 36.- Les enduits ferrugineux dans les galeries de termites.

a: un réseau de galeries creusé par les termites, à la faveur d'un joint de la roche. Les galeries ont été tapissées par le fer (1) après une décoloration marginale locale (2), et une imprégnation de la roche (3). Elles ont ensuite été colmatées par une terre très claire de même nature que l'horizon superficiel (4).



b: Le remplissage clair souligne le réseau complexe de galeries tapissées d'enduit qui peut constituer le principal de la cuirasse (cliché réalisé avec l'aide de E. Warner).

5. LES PROCESSUS

5.1. Les enduits ferrugineux

5.1.1. Définitions

Des enduits ont été observés de longue date. Mais faute d'un vocabulaire suffisamment précis, il n'est pas toujours possible de le vérifier. Cependant, D'Hoore (1954, p. 90) les a décrits, sans toutefois les interpréter, à propos de l'induration des cuirasses. "Des films brillants et durs", écrit-il, "recouvrent les surfaces internes des canaux (galeries), alvéoles et fissures, et souvent (...) des surfaces extérieures". Tricart (1965, p. 220), parle également de films d'oxyde de fer, lisses et brillants, à allure d'enduit de caverne qui forment des pellicules superposées atteignant parfois une épaisseur de 1 cm. Alexander *et al* (1962, p. 9), à propos de certains minéraux ferrugineux, précisent "*These minerals coat channel walls, pores and nodules*".

La définition du terme "enduit" figure en 4.1.4. Il est la traduction littérale du terme anglais *coating*. Il désigne ici un revêtement ferrugineux reposant sur une surface d'accueil bien nette. La plupart du temps, il n'existe aucune couche intermédiaire, entre l'enduit et la surface à couvrir. Une imprégnation préalable de la surface à couvrir est exceptionnelle. Les lisérés de décoloration sous l'enduit sont souvent incomplets.

La matière première provient de l'extérieur et est étrangère à la surface. Les termes cortex ou cutane, désignant la partie extérieure d'un organe, évoquent une subdivision interne de celui-ci. Ils sont donc à déconseiller. Quand on sait qu'un enduit ferrugineux peut se fixer sur un galet de quartz, on ne peut imaginer que celui-ci ait un quelconque rapport avec celui-là, hormis une fonction de support.

Le mot "enduit" sera donc pris dans le sens restreint que donne Tardy (1993, p. 442) au terme cutane, c'est-à-dire un matériel plasmique (argile, oxyde de fer) disposé en revêtement sur une paroi ou à l'intérieur d'un vide. Tardy propose, pour ce revêtement, un nom selon le site occupé: cortex, autour d'une pisolithe; frange, autour d'un granule (nodule) et marge, autour d'un vide. Étant donné la continuité de l'enduit entre la plupart des sites qu'il

occupe (5.1.2), cette distinction ne semble pas bien utile.

Le terme de ferrane sera utilisé en lieu et place d'enduit lorsque l'attention se portera plus spécialement sur la composition chimique et minéralogique. Brewer (1964) restreint le terme de cutane, et donc celui de ferrane, aux seuls phénomènes pédologiques. Certains enduits ferrugineux, situés à la surface du sol, ne pourraient donc recevoir cette dénomination, alors que leur composition et leur structure sont les mêmes. Par contre, les enduits constitués d'argile ferrugineuse sont toujours limités à la partie interne du sol et c'est sans la moindre réserve qu'ils seront désignés comme tels.

Du concept de l'enduit, ont été exclus les revêtements ferrugineux qui se sont mis en place au sein d'un matériel poreux, sans aucune relation aucune avec l'air libre. A titre d'exemple, les couches brune et rouge qui entourent la cuirasse B246 (4.3.9.2) contiennent les particules sableuses qui entouraient la cuirasse avant leur formation. Elles ne constituent donc pas un enduit.

5.1.2. Surfaces d'accueil

Les enduits occupent les sites les plus divers :

- La surface de la cuirasse. Curieusement, les enduits qui couvrent les cuirasses, n'ont pas été notés en premier lieu par les observateurs. En contact fréquent avec les matières humiques au cours de leur histoire, ils ont fréquemment été rongés par ceux-ci;
- Bien souvent, c'est dans des sites de refuge qu'ils seront plus régulièrement présents, comme par exemple les diaclases qui affectent les cuirasses en voie de régression, ou le périmètre des galeries de termites (fig. 36) jusqu'à une certaine profondeur qui semble être de l'ordre du mètre. Des enduits déposés dans des chenaux (non identifiés, à l'époque) avaient déjà été remarqués par Alexander et Cady (1962, p. 60). De façon plus générale, Leprun (1979, p. 23) parle de vides biologiques;
- L'enduit se retrouve à même la roche en place dénudée. Par exemple, les roches de l'exemple 5216 (4.3.6.1), après avoir été l'objet d'une imprégnation ferrugineuse, ont été elles-mêmes couvertes d'un enduit orange (fig. 35);

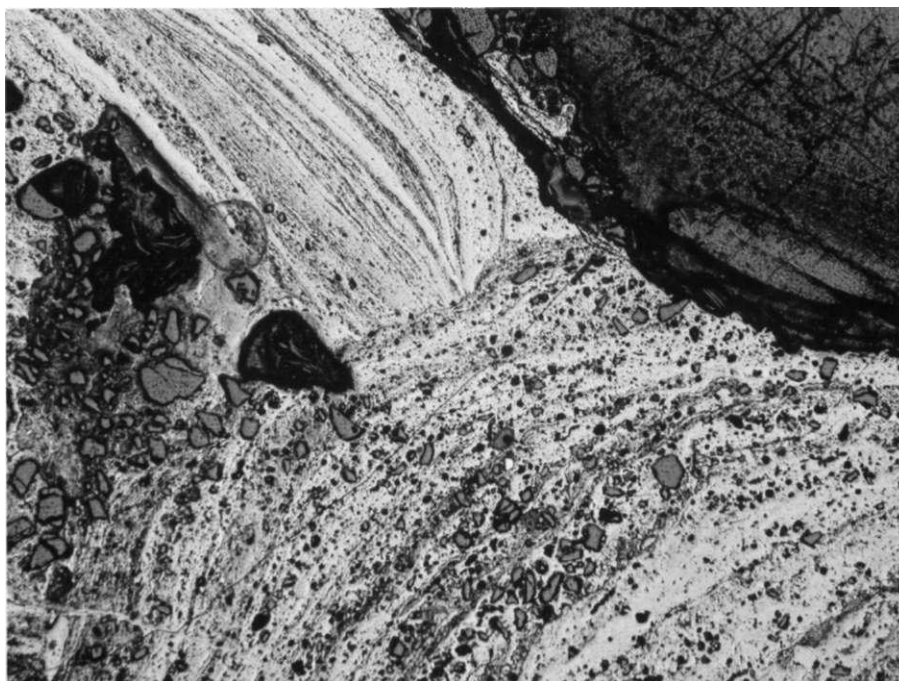


Fig. 37. - Structure d'un enduit pisolithique. Microscope à lumière réfléchie, largeur réelle de la photo: 1600 μm . Les stromaticules discernées ont une épaisseur de quelque 50 à 250 μm . Les grains de sable et les poussières soulignent la stratification. Les cernes noirs autour des gros grains sont des vides provenant de leur corrosion. Discordance à 90° provoquée par l'arrachement d'un pisolithe en voie de soudure à la masse principale (cliché réalisé avec l'aide de A. Pierson).

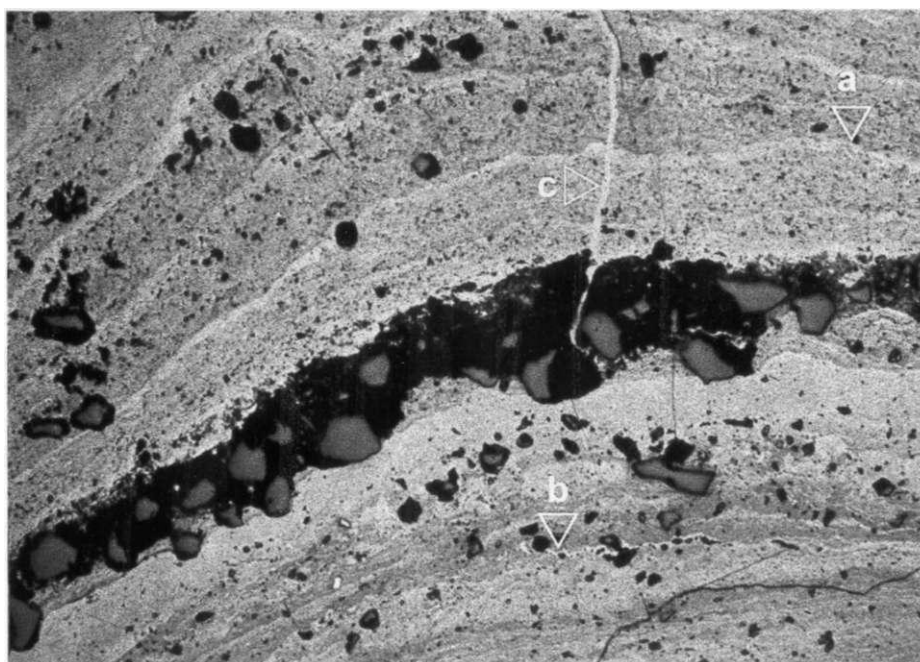


Fig. 38. - Structure d'un enduit pisolithique. Microscope à lumière réfléchie, largeur réelle de la photo: 1100 μm . Certaines stromaticules ont moins de 10 μm d'épaisseur. Elles se regroupent en couches plus épaisses qui se terminent par une strate plus claire (a), moins hydratée. L'enduit est affecté de crevasses parallèles (b) ou perpendiculaires (c) à la stratification. Les fines lignes noires sont des artefacts dus à la confection de la surface polie (cliché réalisé avec l'aide de A. Pierson).

- L'enduit peut, dans un site de piémont, couvrir le sommet de colluvions argilo-limoneuses, comme c'est le cas au bas de la butte résiduelle de Kalukuluku. Sous l'enduit, des galeries ont servi elles-mêmes de conduits aux eaux chargées de fer et, de ce fait, sont également pétrifiées (éch. 1222, 4.3.8.2). Phénomène assez proche, une alternance de colluvions fines et d'enduits ferrugineux a été décrite par Beaudet *et al.* (1977). Une superposition semblable s'est aussi produite dans des alluvions fines (Tricart, 1965, p. 220);
- Les enrobements de gravillons, pisolithes ou débris de cuirasse ont été détaillées dans les différents exemples des chapitres 5.3.7, 8 et 9;
- Enfin, les galets de quartz n'échappent pas aux enduits ferrugineux. Ceux-ci couvrent la totalité du galet ou forment des pustules bien circonscrites et d'une épaisseur non négligeable (1 cm). La même disposition a été observée sur des grès polymorphes après altération et imprégnation préalable.

Il est souvent possible d'observer le prolongement de l'enduit d'un site à l'autre. Le passage d'un enduit de la surface de la cuirasse vers les diaclases ou les galeries peut se suivre aisément sur bon nombre d'échantillons. D'autre part, l'enduit de surface retient prisonniers des gravillons ferrugineux dont certains ont été, eux-mêmes, enrobés par le même enduit. Eschenbrenner (1987, p. 144) ne fait guère de différence entre un ferrane de chenal et celui d'une pisolithe. En outre, cet auteur constate que les ferranes se développent sur différents types de support. Donner un nom différent aux enduits selon leur site de formation, comme le fait Tardy, serait donc la négation de cette continuité.

5.1.3. Structure et composition

5.1.3.1. Macrostructure

L'épaisseur totale d'un enduit oscille entre moins d'un millimètre et plusieurs centimètres.

Sa limite basale est nette quel que soit le support. Exceptionnellement, l'enduit peut toutefois s'immiscer dans un matériel grossier, comme un sable très poreux et souder celui-ci (échantillon B101, 4.3.8.1)

La structure est rubanée, c'est-à-dire composée de straticules (*laminés* d'Eschenbrenner) de 10 à 60 μm . Il peut exister des discordances entre les straticules et même des stratifications entrecroisées

(point 6 de l'échantillon 8106, 4.3.9.1 et fig. 37). Ces dernières sont surtout bien développées dans les pisolithes. Des crevasses perpendiculaires ou parallèles interrompent quelquefois la belle ordonnance de ces straticules.

Autour de certains nodules, l'enduit peut ne comporter qu'une seule couche, souvent plus épaisse que la normale (jusqu'à 200 μm).

5.1.3.2. Composition et microstructure

La teneur en fer des enduits est de l'ordre de 50%, avec, pour certaines plages, un maximum de 85% et un minimum de 12%.

Le fer se trouve, en ordre principal, sous forme d'hydrogoethite, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, avec $1 < n < 1,5$. Comme la plupart des limonites, ce minéral présente une cristallisation imparfaite, la présence d'eau supplémentaire perturbant le réseau de la goethite (Kanourkov, 1970). Dès 1945, Hanlon avait émis l'hypothèse que la structure rubanée était liée à la présence de colloïdes et de cristalloïdes. Au microscope électronique à balayage (MEB), on aperçoit des particules très fines ($< 0,5 \mu\text{m}$) sans forme cristalline nette (confirmé par Eschenbrenner, 1987). Quelques straticules d'hydrohématite se trahissent par leur éclat plus brillant sur les surfaces polies sous le microscope à lumière réfléchie.

Les straticules sont de composition différente. L'alternance de zones sombres et de zones plus claires soulignent la stratification. Cette dernière se distingue difficilement sur les lames minces mais apparaît d'une façon claire sur les surfaces polies et sur la partie externe de la cuirasse qui, dans la nature, a subi une longue altération. La réflectance, au photomultiplicateur d'électron, permet de juger le degré d'hydratation des straticules: sombres, elles sont plus brillantes, et donc plus proches de la constitution de la goethite (fig. 38). Entre nicols croisés à 60° , les réflexions internes font apparaître des teintes plus ou moins proches du gris bleu de la goethite (fig. 16). Au MEB, les couches sombres sont plus massives, tandis que dans les claires, les particules sont mieux individualisées et l'ensemble plus poreux.

Dissimulées au sein des ferranes, certaines substances minérales sont détectées grâce à l'analyse semi-quantitative au MEB :

- L'alumine et la silice ont un sort fortement lié dans la mesure où elles composent la kaolinite.

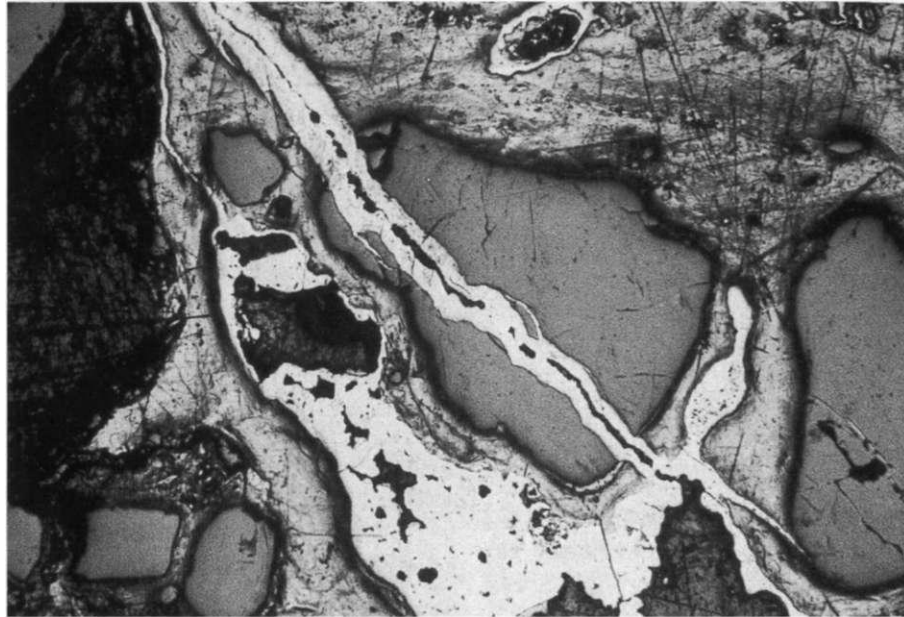


Fig. 39. - Crevasse dans cuirasse pisolitique, traversant plusieurs phases dont l'enduit rubané et des grains de quartz. Une goethite presque pure s'est déposée dans les fissures et dans les cavités abandonnées par des éléments altérés depuis la formation de la cuirasse (cliché Tshidibi ya B.).

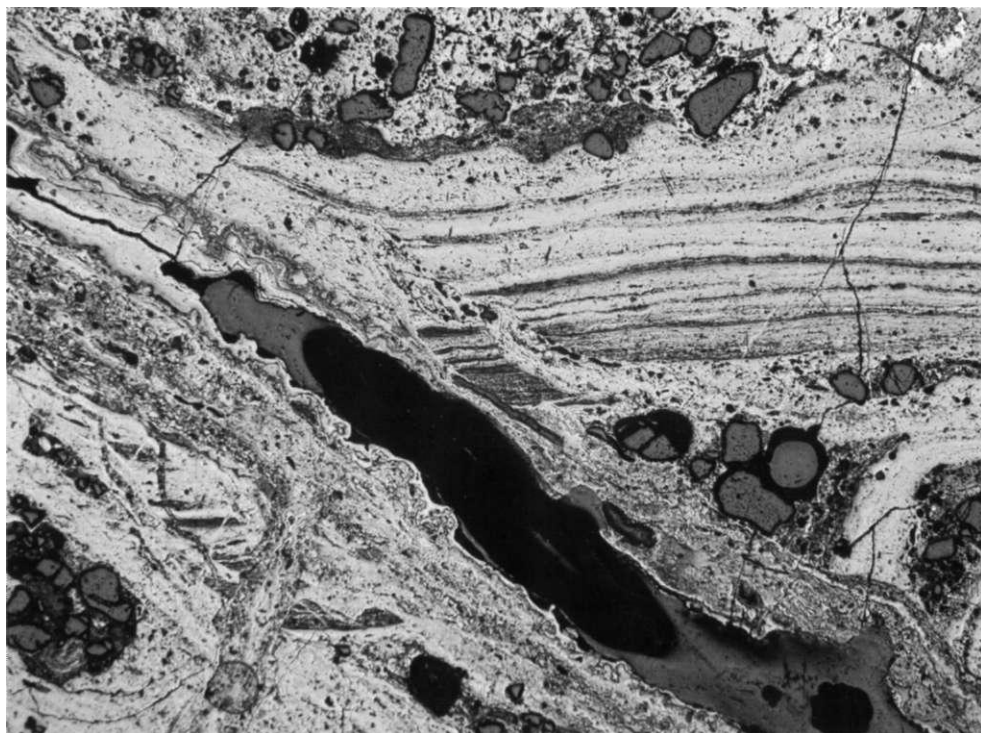


Fig. 40. - Fracture multiple avec déplacements sous l'effet probable d'un échauffement important, colmatages des parties ouvertes. Les fractures ont soudées à l'aide de fragments d'enduit et de néocristallisation. Lumière réfléchie, largeur réelle de la figure 1600 um (cliché réalisé avec l'aide de A. Pierson).

Il apparaît, toutefois, que la teneur en Al est plus grande que celle nécessitée par la composition de la kaolinite. L'alumine libre est toutefois en proportion insuffisante (<10%) pour justifier la présence de gibbsite. Il s'agit donc d'un aluminium de substitution au sein de l'hydrogoethite (Alexandre et Tshidibi, 1984; Eschenbrenner, 1987);

- Le manganèse, par contre, sans être absent des enduits, s'y rencontre moins fréquemment qu'au sein de la cuirasse (Alexandre et Tshidibi, 1984).

D'autres corps étrangers se distinguent mieux au sein des ferranes :

- Les grains de quartz sont la plupart du temps inclus dans les straticules les plus claires ou forment eux-mêmes des strates bien individualisées;
- Non seulement la kaolinite est incluse dans les enduits sous forme de couches d'impuretés de la taille du μm , mais elle peut aussi former des couches bien individualisées sous forme de ferriargillane. Ces couches se présentent uniquement dans les galeries de termites où elles ne dépassent guère les 100 μm .

Enfin, trois phénomènes remarquables sont à signaler dans la structure des enduits.

Les crevasses : Les crevasses perpendiculaires au rubanement (fig. 37) ont une ouverture de 30 à 100 μm et partent de la surface extérieure de l'enduit. Leur largeur est fonction de l'épaisseur de l'enduit. Rares sont celles qui restent béantes. La plupart sont comblées par un matériau de même nature que l'enduit. Ce matériau est uniquement de couleur sombre et de complexion massive. A la surface de l'enduit, ces crevasses comblées forment une excroissance linéaire, une sorte de suture, de quelques millimètres de large et de haut. Ces bourrelets forment un réseau qui ne présente pas la régularité de la dessiccation mais ne s'en éloigne guère, compte tenu de la géométrie très contournée de la surface affectée (fig. 50).

Le second type de crevasse est strictement interne, sans contact avec l'extérieur. L'orientation en est perpendiculaire, oblique ou partiellement parallèle à la stratification. Dans ce dernier cas, la crevasse constitue une sorte de décollement des couches et peut se combiner au réseau radial. Ces crevasses internes peuvent traverser plusieurs phases (enduit, quartz, roche ou minéral provenant du substratum) (fig. 39) et prennent quelquefois un aspect de microtectonique (fig. 40). Elles sont

toujours remplies de goethite ou d'hématite presque pure. Ce détail avait déjà été noté par Alexander et Cady (1962, p. 51).

Le vernis rocheux (rock varnish) : Les couches externes des enduits peuvent présenter, sous le MEB, une microstructure particulière. Des globules de l'ordre du micromètre forment des couches bien distinctes. De telles couches globuleuses que certains qualifient de botryoïdes (Dorn et Oberlander, 1982) car elles évoquent un tapis de grains de raisin légèrement aplatis, sont quelquefois associées à un réseau de filaments évoquant un mycélium (fig. 41). Ces filaments, larges de 1 μm à la base, forment un réseau continu de géométrie quelquefois désordonnée, quelquefois de maille assez régulière, large de 10 μm et de forme subhexagonale. D'autres filaments, enfin, restent isolés et se prolongent sur une certaine distance. Eschenbrenner (1987, p. 146) a signalé, de son côté, des couches couvertes de fibres anastomosées de 0,05 à 0,3 μm de diamètre et de 1 à 6 μm de longueur.

Les lames de silice : Au sein des couches externes de l'enduit, se trouvent, dans des cas bien précis, des lames de silice de néoformation, apparemment contemporaines des couches globuleuses voisines (fig. 42).

L'association d'une structure botryoïde et d'un mycélium, les crevasses et les lames de silice sont caractéristiques d'un vernis rocheux de région désertique (Dorn et Oberlander, 1982, p. 333).

5.1.4. Formation

5.1.4.1. Formation à l'air libre ou en milieu bien aéré

Toutes les surfaces qui servent de support aux enduits étaient, au moment de la formation de ceux-ci, dans un milieu aéré. Certains enduits se sont formés à même la surface du sol. Les cuirasses étaient dénudées, voire déjà en voie de dégradation. En effet, les diaclases se forment lors de la dislocation de la cuirasse, par le sapement exercé à la base par les termites (5.3.2). Par ailleurs, les galeries tapissées de l'enduit sont restées en communication avec l'extérieur jusqu'à l'occlusion effectuée par le même enduit.

Le degré de pureté des enduits est lui-même un garant de leur formation à l'air libre. Avec une surface d'accueil enfouie, l'enduit aurait été forcé d'englober le matériel encaissant, comme le montre l'exemple de la cuirasse de la Kisa Moya (4.3.9.2).

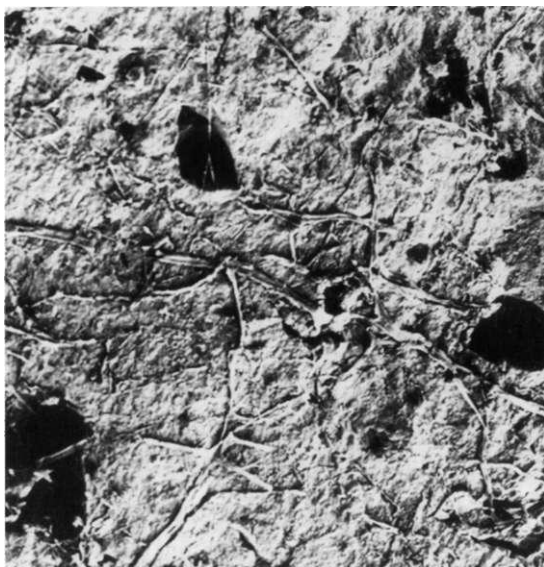
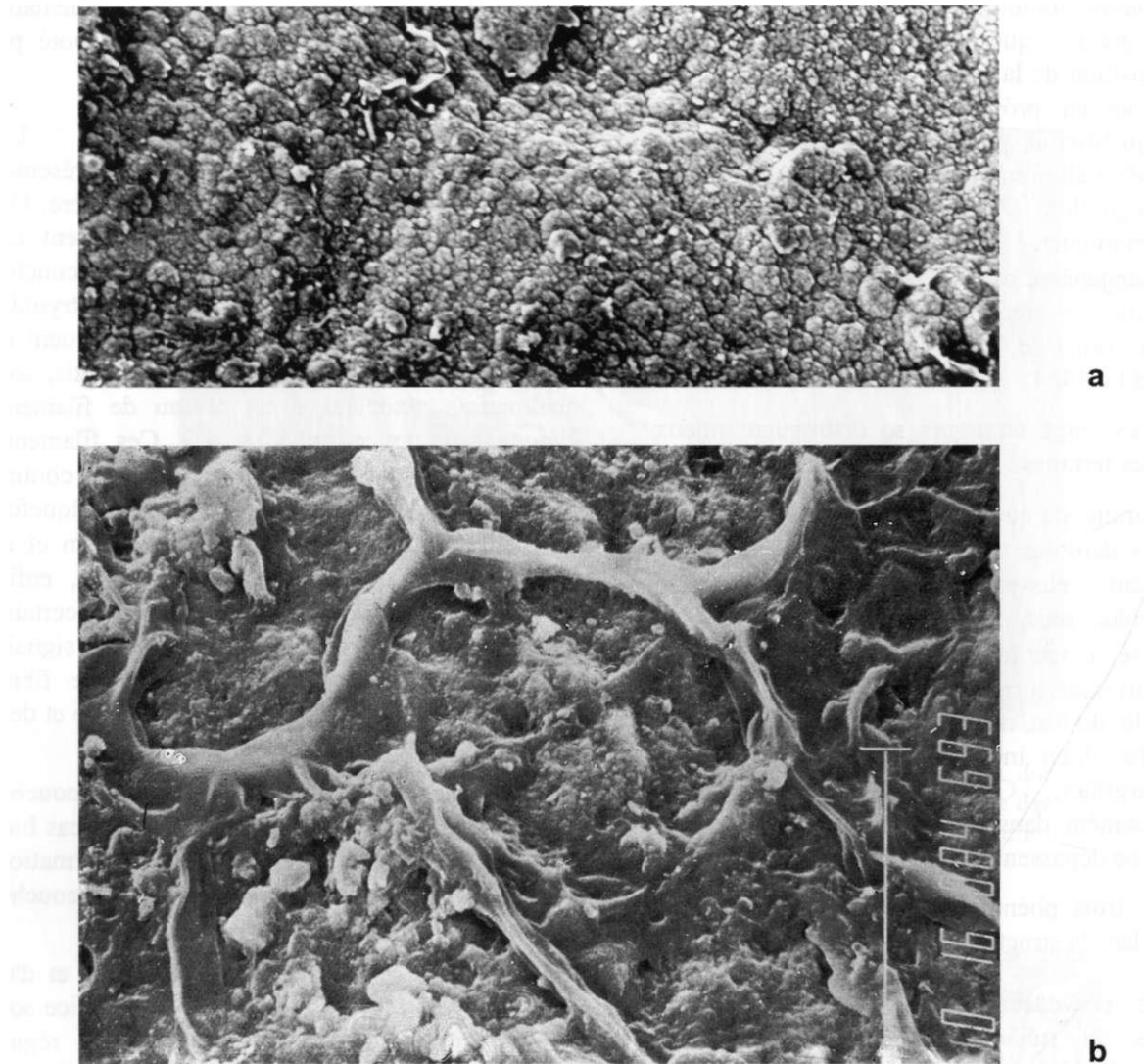


Fig. 41.- Association bactérie - mycélium dans certaines couches de l'enduit rubané.

a) aspect botryoïde des dépôts d'hydrogoethite sous l'action des bactéries; ils forment, ici, des amas complexes. Largeur réelle de la figure: 65 μm .

b) Mycélium développé en symbiose avec les dépôts dus à l'action des bactéries. Le mycélium se présente sous forme de réseau. Largeur réelle de la figure : 33 μm .

c) Vue d'ensemble d'un réseau moins régulier de mycélium. Les filaments sont vides et les plus larges ont été écrasés. Largeur de la figure: 250 μm .

(Clichés réalisés avec l'aide de M. Streel et Tshidibi ya B.).

c

Quelques intercalations de sable ou de zones riches en particules fines montrent, toutefois, que la présence à l'air libre n'exclut pas toute pollution par le vent.

Les fines strates de l'enduit rubané révèlent toutes les caractéristiques d'une stratification sédimentaire :

- Alternance de couches de nature différente (goethite plus ou moins hydratée, strates riches en sable ou en poussières);
- Epaisseur en fonction de la forme de la surface, fine sur les sommets, plus épaisse dans les creux;
- Discordance et même stratification entrecroisée.

Une sédimentation plus particulière est celle qui a présidé au recouvrement des parois de galeries. La tension superficielle, et peut-être une affinité des minéraux ferrugineux entre eux, ont dû contrarier les effets de la pesanteur.

Les conditions d'aération ne sont contraignantes qu'au moment de la formation de l'enduit. L'évolution ultérieure peut amener ce dernier dans un milieu fermé. Le meilleur exemple est celui des galeries finalement obturées par l'enduit. Bon nombre de nodules ont acquis un enrobage, puis ont migré vers la profondeur sous l'effet de la bioturbation. Ils s'y retrouvent parmi d'autres nodules dépourvus d'enduit. La présence de ces derniers apporte la preuve que le site actuel n'est pas celui de la formation de l'enduit (v. le faciès nodulaire, par exemple, 4.4.7).

5.1.4.2. Le site topographique

Selon le mode de fixation présumé du fer, le site peut ne présenter aucun intérêt ou, au contraire, revêtir la plus grande importance. S'il s'agit d'un vernis rocheux (5.1.4.3), la source de fer est à rechercher dans l'atmosphère et, dans ce cas, la topographie est tout à fait secondaire. Toutefois, les vrais vernis désertiques ont une épaisseur assez faible qui atteint rarement les 500 µm (Dorn et Oberlander, 1982, p. 317). Or, la plupart des enduits observés sont d'un tout autre ordre de grandeur, souvent plus de 5 mm. Il faut donc rechercher un autre mode d'apport. Les auteurs précités, Dorn et Oberlander, qui se sont fait une spécialité des vernis rocheux (*rock varnish*), désertiques ou non, pensent qu'il faut faire appel à un écoulement superficiel local et, forcément, temporaire (1982, p. 356).

Nous avons pu observer un tel écoulement, sous un climat vraisemblablement plus humide puisque le site était celui du campus de la Kasapa, près de Lubumbashi. L'écoulement chargé de fer s'est produit, à la suite d'une arrivée en surface de la nappe, au bas d'une pente douce, en marge d'une cuirasse dont il a déjà été fait mention (4.3.7.1). Après un parcours de quelques mètres, le fer a été précipité par des bactéries et le floculat s'est ensuite desséché. Le fer est resté à l'état pulvérulent à la surface des gravillons présents (fig. 43), sans jamais perdre son caractère amorphe ni prendre l'aspect d'une couche ferme. Le climat et probablement la nature des bactéries n'y étaient pas favorables.

La leçon à tirer de cette observation est que l'apport de fer ne se produit pas lors d'un ruissellement fortuit, mais dans un écoulement en lame à partir d'une ligne de "sources" très momentanées. Dès lors, les abords sinon le centre d'une vallée secondaire, même si celle-ci est peu encaissée, paraissent un site convenable. Nous vérifierons ultérieurement qu'un tel site est bien celui où se sont formées la plupart des cuirasses latéritiques et par conséquent, celui où se trouvaient la surface et les parties internes (crevasses et galeries), destinataires de ces apports ferrugineux de l'époque.

Un site de piémont peut également être favorable à une arrivée en surface, d'eau chargée de sels de fer. Les surfaces couvertes d'enduit ferrugineux y alternent quelquefois avec des colluvions fines apportées par un ruissellement plus violent. Toutefois, les plateaux ou les collines auxquels sont adossés ces piémonts n'ont pas toujours été suffisamment riches en fer. Les enduits y sont donc exceptionnels.

5.1.4.3. Le climat

Il existe plusieurs indices sur lesquels on peut fonder une appréciation du climat qui existait au moment de la formation des enduits. Ces indices suggèrent une gamme de climats qui va de l'aride au subhumide.

Le vernis rocheux : Les couches de globules associés à un mycélium et des lames de silice au sein de l'enduit sont caractéristiques d'un vernis rocheux de milieu désertique (v. ci-dessus). En général, ces enduits rocheux ont une couleur, soit brun foncé quand ils contiennent du manganèse, soit orange clair quand ils sont plus ferrugineux (Dorn et Oberlander, 1982, p. 332). Dans les vernis

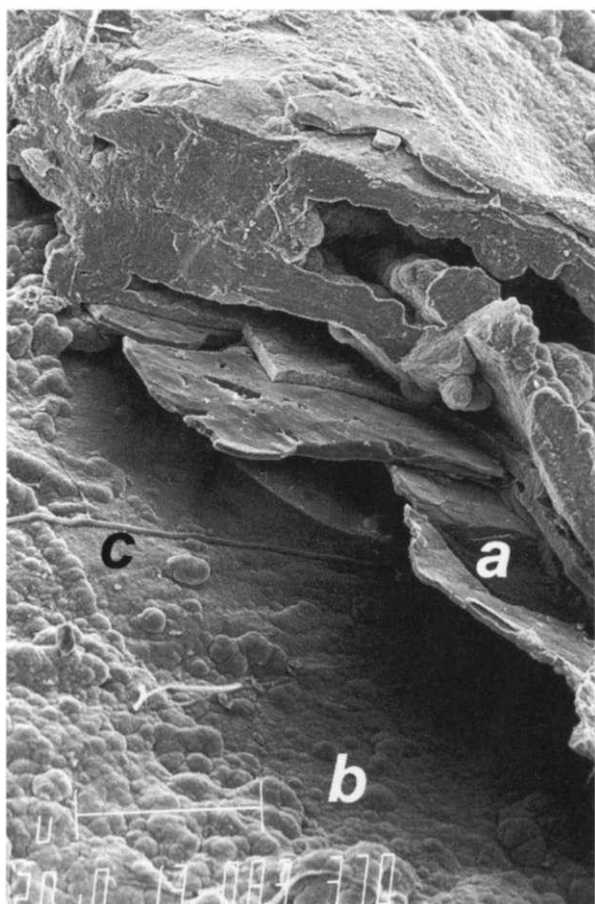


Fig. 42.- Lames de silice (a) en compagnie de dépôts à l'aspect botryoïde (b) et de filament de mycélium (c). Échelle de 100 μ m (cliché Tshidibi ya B.).



Fig. 43.- Dépôt de fer pulvérulent sur des gravillons, résultant de la dessiccation de fer colloïdal précipité à partir d'une arrivée d'eau riche en fer par affleurement de la nappe aquifère. D'autres dépôts forment des pellicules (a) sur un feutrage végétal. Ces dépôts, après une longue dessiccation, ne donnent aucune réponse à l'analyse aux rayons X.

observés au Katanga, la teneur en Mn est faible, plus faible que dans la partie interne de la cuirasse (observation faite à la microsonde électronique). La carence en manganèse ne semble donc pas devoir être imputée à la composition de la cuirasse. On a noté un certain parallélisme entre les vernis rocheux ferrugineux et un milieu alcalin, défavorable à la fixation du manganèse (Walker, 1979 et El-Baz et Prestal, 1980, dans Dorn et Oberlander, 1982, p. 339). Les enduits observés au Katanga se trouvent être assez anciens et caractérisés par la présence de nombreux débris de roches altérables (et altérées depuis). L'alcalinité nécessaire aux vernis désertiques ferrugineux pourrait donc leur être attribuée. Toutes les couches de l'enduit ne sont toutefois pas de ce type; on peut donc affirmer qu'au moins, à certains moments de l'élaboration des enduits, régnait un climat désertique.

Les crevasses : La partie superficielle des enduits est affectée par un réseau de fentes de dessiccation assez larges. Un dépôt colloïdal est, certes, sujet à de telles fentes de retrait. Toutefois, les crevasses affectent un grand nombre de strates, à partir de la surface jusqu'à une certaine profondeur. Un retrait dû à l'état colloïdal devrait affecter chaque strate selon son degré de déshydratation. Même s'il y avait un effet d'entraînement d'une couche inférieure vers la supérieure au moment du dépôt, des distorsions auraient dû se produire et des anomalies apparaître dans la structure. Au contraire, le comblement de ces crevasses par exsudation ne s'est produit qu'à la fin du dépôt. Il n'est donc pas exclu que les crevasses soient liées à un échauffement excessif, dans une atmosphère desséchée. Ce sont, en fait, les enduits les plus foncés quant à leur couche externe qui sont le plus affectés par ces crevasses.

L'activité des termites : Les termites sont susceptibles de fournir des indications sur le climat qui régnait au moment de la formation des enduits. Si l'on connaît les exigences en eau de termites tels que les Macrotermes, responsables du creusement des galeries, il est fort probable que leur absence est liée à une trop grande profondeur, voire une disparition de la nappe aquifère.

Or, précisément, les galeries de termites sont absentes des cuirasses les plus anciennes, aux enduits particulièrement épais (5277, 4.3.1.1, 5276, 4.3.3.2 et 8106, 4.3.9.1). Toutefois, la question doit être posée de savoir si les termites existaient déjà à cette époque et dans ce cas, s'ils étaient présents dans la région. Et ceci, même au cours de phases

climatiques plus humides que celles où se sont formés les enduits.

Dans les cuirasses plus récentes, la formation des enduits dans les galeries a interrompu l'activité des termites. Dans maints échantillons, le tubage des galeries s'est produit dans un premier temps, en présence de termites. En effet, les terres de remblaiement apportées par les termites y alternent avec des strates de l'enduit. Par après, l'enduit est resté seul à se former (par exemple 4.3.2.3). Un certain nombre de galeries ont, d'ailleurs, été définitivement obturées. Le milieu dans lequel s'est formée la première phase du tubage des galeries, pourrait être celui d'une steppe devenant de plus en plus aride au point de chasser les termites bâtisseurs.

Enfin, dans d'autres cuirasses, de même âge que les précédentes, les travaux des termites ont continué pendant que se déposaient différentes couches de l'enduit. Dans le faciès lobé (4.3.2.5), variante du faciès vermiculaire, des galeries ont été creusées, tapissées d'un enduit rubané puis remblayées et cela, à plusieurs reprises. Bien que de grande dispersion géographique, puisque ce faciès existe aussi en Côte d'Ivoire (Boulangé *et al*, 1973, p. 66), ce type d'enduit se révèle plutôt rare et probablement limité aux secteurs qui ont pu rester mieux approvisionnés en eau profonde.

L'absence d'enduit au Quaternaire
Comme il a été vu plus haut, les enduits ne se forment plus à l'heure actuelle, pas plus d'ailleurs qu'ils ne se sont formés dans le cours du Quaternaire. Les surfaces qui datent de cette époque en sont dépourvues. Les termites terrassiers sont toujours présents et les phases sèches des oscillations climatiques quaternaires auraient pu créer des circonstances favorables. Il est donc possible que le climat n'ait jamais été suffisamment aride ou ne l'ait pas été pendant suffisamment longtemps.

5.2. Mode de formation et déplacements des différents types de concrétion

Il a été fait allusion à de nombreuses reprises au mode de formation ainsi qu'à l'évolution ultérieure de certains nodules ou d'autres éléments ferrugineux de la même taille. Ces considérations apparaissent en ordre dispersé dans les lignes qui précèdent. Il convient maintenant d'en faire la synthèse et saisir cette occasion pour préciser une série de définitions relatives à ces différentes concrétions (fig. 44).

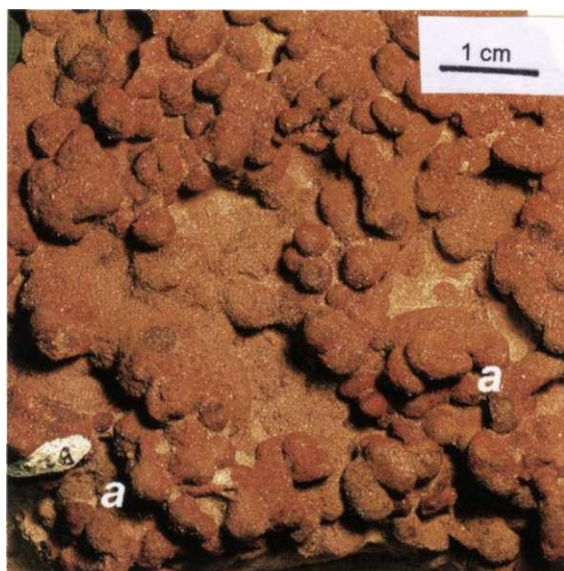


Fig. 44- Cuirasse formée de gravillons sableux et de pédodes (a), résultant d'une imprégnation des sables à la périphérie de racines (cliché réalisé avec l'aide de Ph. Gerienne).

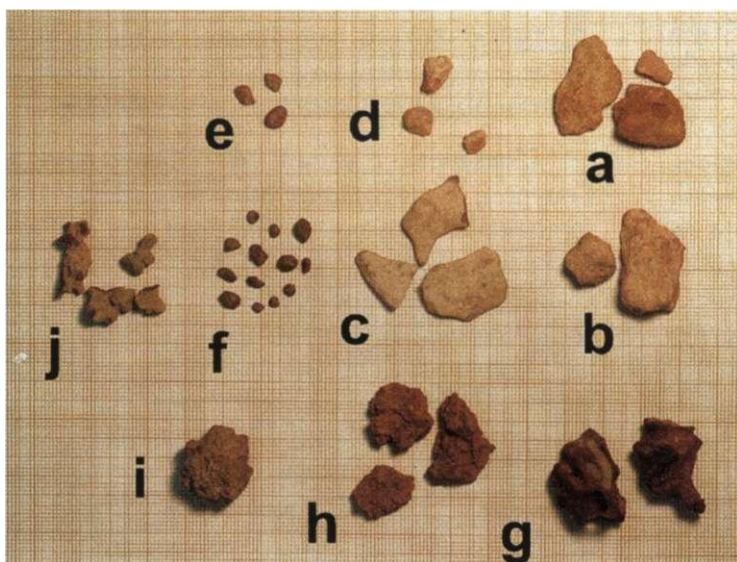


Fig. 45- Types de concrétions:

a-d) stades de transition dans les nodules lithorelictuels depuis la lamelle, relativement grande, jusqu'au nodule de l'horizon tacheté. Tous sont pourvus d'un liséré de décoloration.

e-f) anciens nodules, jadis dans la partie supérieure de l'horizon tacheté, ils ont une petite taille et une forte teneur en fer acquise lors du processus de nodulation (voir figure 47b). Ils ont reçu une patine au cours de leur séjour dans la stone-line supérieure.

g) nodule d'imprégnation, l'imprégnation s'étant produite à un stade avancé d'attaque par les termites, responsable des formes biscornues du nodule.

h-j) fragments de cuirasse dont le contour trahit la complexité de la composition (cliché réalisé avec l'aide de Ph. Gerienne).

5.2.1. Les concrétions

Le premier souci a été de choisir un terme générique pour désigner les éléments ferrugineux indurés, dont la taille oscille entre 1 mm et 5 cm. La littérature offre le choix entre deux termes, les glébules et les concrétions.

Un **glébule** désigne une concentration en un constituant déterminé qui se différencie du milieu environnant soit par une limite nette, soit par une différence de structure, soit les deux ensemble. Il n'est pas nécessairement induré et sa forme est équidimensionnelle ou allongée. La définition est dite en compréhension par la mathématique moderne, car elle s'appuie sur une propriété commune à chacun de ses éléments.

La seconde définition est une définition en extension, qui consiste en une énumération des éléments qui en font partie: non seulement les nodules et les formes qui en sont dérivées, mais aussi les morceaux de roche imprégnée et les fragments de cuirasse d'une taille moyenne. Leurs formes sont très diverses, subsphériques comme les nodules, mais aussi cylindriques comme les pédodes ou en forme de plaquette, comme les imprégnations de roche finement stratifiée. Le terme de **concrétions**, qui est communément employé pour cet ensemble, ne remporte une adhésion totale, ni de la part des pédologues ni de celle des spécialistes des sciences voisines (Levêque, 1970 p. 324). En effet, Brewer, emboitant le pas à Pettijohn (5.2.7) a choisi ce terme pour désigner ce que d'autres appellent pisolithes. Si l'on rejette cette acception curieuse, le terme de concrétion devient libre, et il est alors possible de souscrire à l'usage courant qui en est fait.

Pour désigner l'ensemble auquel nous le destinons, le terme glébule n'est pas tout à fait adéquat car il comprend également des éléments non indurés. Chemin faisant, nous n'hésiterons toutefois pas, à l'utiliser dans certains cas particuliers.

5.2.2. Les nodules et la nodulation

Le terme nodule est utilisé ici dans une acception plus large que celle que lui confère Brewer (1964, p. 266). S'il s'agit bien d'un glébule ferrugineux, plus ou moins induré, de forme plus ou moins émousée; il n'est toutefois pas homogène et présente assez souvent une différenciation interne.

Les nodules, dans leur site de formation, ont reçu différentes appellations qui sont toutes acceptables par une large audience. Selon les cas, il s'agit de nodules orthiques (Tardy, 1993), de subnodules et peut-être de "*spaced pisolithic laterite*" (Mac Farlane, 1976, fig. 1), ce dernier auteur désignant les nodules sous l'appellation de *pisoliths*.

Dans l'horizon tacheté, ces nodules sont, dans certains cas, entourés d'un halo d'accroissement. Ce fait n'a pu être observé par nous qu'en milieu sableux. Ce type de nodule a été signalé en milieu argileux homogène, au sein d'une *mottled clay*. Au Katanga, les sites favorables, c'est-à-dire les fonds de cuvette à pentes douces où se déposent les argiles nécessaires, sont aussi le siège d'une hydromorphie qui inhibe la formation de nodules (2.2.2 et 2.2.3)

Un horizon tacheté intact ne peut s'observer que dans les sables dont la nature minéralogique écarte les termites. Un horizon tacheté intact dans sa position vis-à-vis de la nappe aquifère, au moment où il était fonctionnel n'a été observé qu'une seule fois (à la Kiniama, 2.2.1). Il est peu épais (quelques dizaines de centimètres) et peu profond (environ 1 m)

Sur les roches précambriennes, la nodulation se produit à partir d'un matériel faiblement altéré, au départ. Des nodules lithorelictuels enrichis en fer s'opposent à des zones en voie d'altération et de lessivage. La nodulation s'est produite tant que la nappe s'est maintenue à un niveau suffisamment proche de la surface. Une reprise d'érosion verticale dans les rivières a ensuite abaissé le niveau de la nappe et la nodulation s'est arrêtée. Le profil n'est pas resté en l'état, comme c'était le cas dans les sables. Plusieurs modifications sont intervenues: 1) l'évacuation des parties meubles par les termites, 2) l'intégration de la partie supérieure des nodules dans la stone-line ou la cuirasse surincombante, 3) la persistance de l'altération en profondeur.

Il existe de grandes différences parmi les nodules lithorelictuels, quant à leur teneur en fer, leur couleur et leur état de conservation. Les nodules de la partie supérieure sont petits, de couleur sombre et de teneur relativement élevée en fer (jusqu'à 60%); leurs contours sont nets et la structure lithologique est souvent oblitérée. Les nodules de la partie inférieure, de teinte rouge, deviennent progressivement moins riches en fer, moins résistants mécaniquement (les termites

peuvent les tarauder) et plus fragiles vis-à-vis de l'altération chimique (décolorations marginales et quelquefois internes, en suivant les joints).

5.2.3. *Les imprégnations*

La nodulation consiste en une imprégnation ponctuelle en contrepartie d'un départ généralisé dans le reste de la formation. Elle peut se concevoir sans apport extérieur de fer. Les imprégnations envisagées dans ce chapitre, dépendent essentiellement d'un tel apport de fer d'une origine plus ou moins lointaine, et donc sans contrepartie locale. Elles ont donc tendance à être moins ponctuelles et demandent un milieu poreux qui facilite l'importation du fer.

Les imprégnations affectent surtout les sables et les roches gréseuses altérées telles que les grès polymorphes. Un plus bel exemple est constitué par les *pédodes*, manchons cylindriques indurés, de quelques millimètres de diamètre et dont l'axe montre encore le vide laissé par le végétal qui a servi de prétexte à la convergence des eaux chargées de fer (fig. 44).

La roche précambrienne peut toutefois être aussi l'objet d'imprégnations. Les échantillons de cuirasses 5216 et B400 (4.3.6.1 et 2) en sont un exemple. Le manteau sableux qui couvrait le substratum ancien, a servi de vecteur aux eaux chargées de fer. Ce substratum formé d'une siltite légèrement altérée a dirigé ces eaux selon les joints d'une stratification assez fine. Il en est résulté, après intervention des termites, une série de concrétions dont certaines en forme de plaquettes.

Après leur élaboration, les éléments imprégnés de la sorte suivent l'un ou l'autre des chemins empruntés par les nodules lors de leur dégagement.

5.2.4. *La libération des nodules*

On a vu que dès l'abandon de l'horizon tacheté par la nappe aquifère, les nodules lithorelictuels étaient dégagés par les termites de la partie meuble qui les entourait (3.4.2). Ce n'est que rarement le cas pour les nodules sableux. Pour ceux-ci, il faut attendre une érosion superficielle qui les transmue aussitôt en gravillons.

Un autre processus a été envisagé qui consisterait en la disparition des parties voisines du nodule par altération chimique et lessivage. C'est ce que certains auteurs laissent entendre sans toutefois en préciser les modalités.

5.2.5. *Les gravillons*

Les gravillons ferrugineux sont peut-être l'équivalent des "packed pisolithic laterites" de Mac Farlane (1976, fig. 2). Ils sont quelque peu différents des gravillons de Tardy (1993, p. 438) qui n'ont pas nécessairement été portés en surface.

Hormis les preuves formelles de déplacement telles que la position de nodules au-dessus d'un substratum qui ne peut leur avoir donné naissance (4.3.8.3) ou entre deux surfaces couvertes d'un enduit superficiel (4.3.8.2), les seuls indices de la présence d'un nodule à l'air libre sont les patines et les enduits périnodulaires. Certains gravillons ferrugineux n'ont peut-être gardé aucune trace de leur séjour en surface.

Les patines sont visibles dans les stone-lines (3.2.1.1) tandis que les enduits n'existent que dans les cuirasses. Il a été démontré que les nodules enrobés d'un enduit peuvent être considérés comme le témoignage d'un séjour en surface (4.3.8.2 et 3).

Les enduits sur nodules ont, toutefois, donné lieu à une interprétation différente. L'hypothèse tient compte de la situation actuelle d'enfouissement. Un vide périnodulaire se serait formé puis aurait été comblé par un dépôt de fer (Leprun, 1979, p. 192). La présence de quartz corrodé au sein de l'enduit, alors que le fond matriciel voisin ne contient que des quartz frais, comme le note également Leprun, montre que l'enduit date d'un autre âge et se trouve en net divorce avec l'environnement immédiat actuel.

D'autre part, des nodules moins résistants aux actions chimiques que l'enduit qui les englobe, ont pu donner, par la différence de teneurs en fer, l'illusion d'une migration centrifuge. Conclusion dont il faut bien se garder.

5.2.6. *Les fragments de cuirasse*

Sous l'effet d'une désagrégation mécanique, une cuirasse peut se subdiviser en éléments de tailles diverses (6.6.1). À côté des blocs, apparaissent des fragments qui ont la taille des nodules. Leur apparition se fait, en principe à la surface du sol.

Ils pourraient donc suivre la même évolution que les gravillons. C'est le cas de la stone-line de la Kasapa qui se trouve en marge d'une cuirasse. Toutefois, les sites peuvent avoir été transformés. Par exemple, une cuirasse en voie de destruction occupe rarement le site en bas de versant où elle s'est formée.

Les gravillons du type nodule enrobé n'apparaissent en surface qu'à un moment bien précis de l'évolution de la cuirasse puis sont peu de temps après enfouis à nouveau, par les termites, dans la zone du sol où s'élabore la cuirasse (4.4.7). Les fragments de cuirasse sont également enfouis, mais dans la partie supérieure de la stone-line. Il y a une grande différence d'âge entre les deux: le nodule enrobé date du Tertiaire tandis que la stone-line est quaternaire.

5.2.7. Les nodules pédorelictuels

La notion de nodules formés dans le sol est apparue simultanément, en 1976, dans deux travaux, en suivant des démarches assez éloignées l'une de l'autre. D'un côté, Mac Farlane, à partir de recherches de terrain, a eu l'intuition que certains nodules avaient une origine sans rapport avec la nappe aquifère, dans un niveau proche de la surface. Elle pensait toutefois à une saturation momentanée dans un sol peu épais. Nahon, à la suite d'une analyse détaillée de la structure d'une cuirasse, a défini des nodules à *faciès argilomorphes*. Des vides auraient été remplis de kaolinite et celle-ci aurait ensuite fixé le fer.

La notion de nodules formés au sein des sols a évolué depuis lors. Il est fondé, non sur un processus observé, mais sur l'identification de concrétions différentes des nodules lithorelictuels. Cette différence est quelquefois bien visible, mais demande souvent une analyse plus détaillée pour être établie.

Le départ entre les deux types de nodule repose sur une série de critères :

- La composition hétérogène des nodules pédorelictuels tranche sur la texture assez uniforme des nodules lithorelictuels. Cette hétérogénéité se marque par: 1) la présence de corps étrangers (des sables sur substrat précambrien, par exemple), 2) une plus grande porosité et surtout 3) le caractère composite de certains nodules (Eschenbrenner, 1987, p. 161). Ces nodules complexes englobent au sein d'une matrice des nodules plus petits dont certains sont lithorelictuels;
- La taille variée des nodules pédorelictuels et les formes quelquefois un peu plus contournée peuvent être opposées à la taille relativement réduite et l'aspect toujours émoussé et compact de la plupart des nodules lithorelictuels;
- Les nodules lithorelictuels peuvent être de teinte plus sombre, trahissant une teneur en Fe_2O_3 plus élevée ou un fond lithochromique.

De l'énumération de ces caractères, il apparaît que les nodules pédorelictuels sont le résultat d'un mélange, au sein de la matrice, d'éléments d'origine assez différente. Leprun (1979, p. 36) les attribue à la pédoplasation et la pédoturbation. Il note que ce type de nodule apparaît assez haut dans le profil, entre 2,5 et 1 m et qu'il n'acquiert une forme stable que lorsqu'il est couvert d'un ferrane périnodulaire. Pour les nodules complexes enrobés observés au Katanga (point 4 de la figure 28 (4.3.7.3) et point 5 de la figure 30 (4.3.8.2); l'enduit a été interprété comme l'indice d'un séjour à la surface du sol.

La plupart des "nodules" pédorelictuels sont donc devenus, par leur séjour en surface (attesté par la présence d'un enduit), des gravillons. Comme pour les autres *anciens* nodules, le terme désigne ici leur origine, et aussi l'indécision dont ils ont fait l'objet quant aux processus qui les ont modelés. De toute façon, le contexte permettra de lever toute équivoque.

Les nodules pédorelictuels ont donc une genèse qui est liée à la bioturbation. L'enchaînement des mécanismes qui ont abouti à leur formation sera envisagé dans un chapitre suivant (5.3.) consacré à l'action des termites.

5.2.8. Les pisolithes

La formation des pisolithes a été abordée implicitement dans le chapitre sur les enduits, sans toutefois leur accorder une attention plus particulière en tant que type de concrétion.

Les pisolithes sont constituées d'un enduit rubané assez épais, entourant un noyau de fixation ou nucléus. Ce dernier est souvent de dimension dérisoire. Il est formé d'un grain de quartz, d'un débris de roche, voire d'une sorte d'élément composite formé de la réunion de débris de roche eux-mêmes prisonniers d'un fragment d'enduit rubané. Les fragments de roche sont, aujourd'hui, fortement altérés, comme l'ont noté du Preez (1949), Alexander et Cady (1962).

La plus grande confusion règne quant à la signification et à l'orthographe du mot. Il en est de même quant au terme qui conviendrait pour désigner ce type de concrétion.

Trois noms ont été proposés pour désigner ce type de concrétion ferrugineuse. A côté du terme pisolithe qui s'inspire d'un parallèle avec les pisolithes carbonatées, on trouve la pseudopisolithe (Nahon, 1976), la pisolite (Tardy, 1993), l'absence de h marquant sans doute la différence de composition avec les pisolithes originelles, et aussi la concrétion, imposée par Brewer (1964, p. 267).

D'un autre côté, le terme a aussi été utilisé pour désigner un nodule, sans référence à une structure oolithique, comme si le mot "pisolithe", désignait tout simplement un fragment rocheux de la taille d'un pois. A ce propos, notons que les pisolithes peuvent atteindre plusieurs centimètres de diamètre. Nous suivons Tardy (1993, p. 438) pour écarter, ici, toute référence à la taille.

La formation des pisolithes est, selon les auteurs, le résultat, soit d'une dégradation, soit au contraire, d'une aggradation.

Selon Nahon (1976), suivi en cela par Tardy (1993), les strates rubanées seraient le résultat de la déshydratation d'un nodule. Le noyau aurait une composition où prédomine l'hématite, tandis que le cortex (notre enduit) contient essentiellement de la goethite. Dans ce cas, plusieurs questions se posent: Pourquoi une limite nette entre cortex et nodule? Pourquoi un rubanement? Pourquoi un "semblant" de discordance?

L'hypothèse alternative est celle qui a été présentée à propos des enduits en général. L'enduit est un dépôt de fer colloïdal formé à l'air libre, à l'intervention de bactéries. Il est composé essentiellement d'hydrogoethite. Les couches successives sont, en fait, de très fines strates, avec les irrégularités habituelles d'une stratification, à savoir une variation d'épaisseur en fonction du microrelief des supports, et même avec stratification entrecroisée. Cette dernière s'est développée plus facilement sur les pisolithes que dans les autres enduits. En effet, les pisolithes sont dotées, dans une première partie de leur existence, d'une certaine liberté que ne possèdent pas les autres surfaces d'accueil de l'enduit. Cette liberté permet une érosion partielle de l'enduit. La tranche des couches ainsi érodée est ensuite recouverte par de nouveaux dépôts. Ultérieurement, les dernières strates de l'enduit peuvent emprisonner la pisolithe et la priver de toute autonomie. Dans ce cas, la stratification redevient régulière, sans le moindre accident.

Un apport extérieur dans l'édification de la partie rubanée des pisolithes avait déjà été

préconisé par Mac Farlane (1976, p. 70), ébauché avec plus de précision par Alexandre (1978, p. 147-149) et précisé par Eschenbrenner (1987, p. 143 sq.)

5.2.9. Conclusion

Au terme de cet inventaire, il se vérifie que les concrétions sont d'une très grande diversité (fig. 44), et de types, et de modes de formation. Bien souvent, un examen superficiel ne peut suffire à faire le départ entre deux types de concrétion et quelquefois, le diagnostic ne peut être réalisé.

D'autre part, une telle variété rend particulièrement ardue l'interprétation des grands ensembles ferrugineux tels que les cuirasses et les stone-lines, dans lesquels elles se trouvent incluses. Il peut exister une relation entre ces ensembles et certains types de concrétion. C'est ainsi que les nodules pédorelictuels ou les pisolithes sont essentiellement liées aux cuirasses alors que les fragments de cuirasse sont plutôt présents dans les stone-lines.

Il apparaît que deux concrétions, aujourd'hui voisines, peuvent avoir une histoire très divergente. La différence d'âge peut également être très grande; des éléments d'âge tertiaire côtoient des nouveaux venus, quelquefois assez récents. Leur présence en un même lieu montre donc une indépendance totale entre les processus responsables de leur genèse et ceux qui sont à l'origine de leur concentration. C'est la conclusion à laquelle était également arrivé Eschenbrenner (1987, p. 291), en se fondant sur une diversité géochimique, minéralogique et structurale des cuirasses. C'est la leçon la plus importante de cette synthèse.

5.3. L'action des termites

5.3.1. Historique

On peut détecter sur les cuirasses, des traces de l'intervention des termites dans leur façonnement. Au fil des temps, la signification de ces traces est devenue de plus en plus évidente. Un exemple simple est celui des tabules tapissées d'un enduit ferrugineux qui ont mêmes dimensions et même agencement que les galeries actuelles. De telles évidences, cependant très claires, ont été perçues dès 1890 par Lake, mais n'ont pas retenu alors l'attention qu'elles méritaient de la part des chercheurs. Des auteurs, tels Prescott et Pendleton (1962, p. 20), signalent, dans le souci d'être

complet, la possibilité d'une intervention des termites. L'épisode des cuirasses termitiques (5.2.6) n'a guère fait progresser les recherches. On voyait dans ces cuirasses une action très ponctuelle des termites, action par ailleurs discutable puisque des spécialistes de la question, comme Grassé et Noirot, vont condamner cette interprétation (1959).

L'action importante des termites dans l'élaboration des formations ferrugineuses va toutefois être reconnue par le biais de la stone-line. Ce sera d'abord, dès 1955, la mise en place des terrains de couverture (3.4.2), puis le dégagement des nodules, dans la partie inférieure de la stone-line, par exportation vers le haut des produits fins (Stoops, 1967). Cette interprétation ne sera pas adoptée par tous, puisqu'un cahier spécial de l'ORSTOM (1969) consacré aux stone-lines, n'abordera même pas le problème.

C'est en 1978 que l'action des termites au sein des cuirasses va quitter le domaine des éventualités (De Dapper, Alexandre). Dans la suite, elle fera l'objet d'études de plus en plus détaillées de la part de Leprun (1979) et surtout d'Eschenbrenner (1987). Ce dernier, afin de donner une portée générale à ses observations, a effectué toutes ses observations dans des profils situés à plus de 80 mètres de nids hypogés.

Une phrase de Grasse (1984, p. 479) pourrait servir de conclusion à ce rapide survol de la question: "on est surpris de l'abandon dans lequel a été laissée l'étude de l'activité constructive que de nombreux termites déploient hors de leur nid".

L'étude des microfossiles qui ont vécu en symbiose avec les termites devrait permettre l'accès à de nouvelles précisions et susciter des développements ultérieurs (Barros Machado, 1994).

5.3.2. Activités

L'intervention des termites de type *Macrotermes* dans l'agencement des sols et des cuirasses a déjà été entrevue dans plusieurs chapitres antérieurs. Dans les grandes lignes, elle porte sur les points suivants :

- Le creusement aux dépens d'un matériel peu ou pas consolidé, de galeries anastomosées, d'un diamètre presque normalisé, entre 2 et 5mm;
 - L'effondrement d'une partie de ces galeries ou leur remblaiement à l'aide d'un matériel local ou provenant d'un horizon presque toujours supérieur;
 - Une sélection dans les produits transportés, en relation avec la teneur minimale en argile nécessaire aux constructions (entre 10 et 20%, selon les espèces) et avec la taille maximale qui puisse être transportée, soit 3 mm (Lee et Wood, 1971) ou 4 mm (Nye, 1955);
 - Une zone d'exploitation qui, en l'absence de nappe aquifère permanente, peut descendre assez bas, souvent à plus de 10 m, exceptionnellement 50 m, au Katanga, voire 65 m, comme le rapporte de Swardt.
- Les conséquences principales pour les milieux traversés, sont les suivantes :
- L'accès des parties souterraines à l'air et à l'eau de surface est grandement facilité. Selon les cas, l'eau véhicule des substances agressives, d'un côté ou, de l'autre, un fer susceptible de s'immobiliser sous une forme colloïdale. Cet accès conditionne donc l'altération et la formation d'enduits;
 - Les formations sableuses ne seront le siège de terrassements de la part des termites, que si une faible épaisseur et l'absence de nappe aquifère mettent le substratum précambrien un tant soit peu argileux à leur portée;
 - Les terres de couverture seront plus riches en base échangeable, dans un certain périmètre autour des grandes termitières. Aux environs de Lubumbashi, le pH est neutre (7 à 7,5) dans les termitières alors qu'il est de 5 dans les sols environnants (Sijs, 1957);
 - Enfin, il se produira une perturbation de la géométrie et de la composition des zones affectées. Elle sera détaillée dans le chapitre suivant.

5.3.3. La bioturbation

La série des échantillons de cuirasse 5216 (4.3.6.1) et B400 (4.3.6.3) ont bien montré l'utilisation par les termites des joints d'une roche précambrienne imprégnée. Le dégagement mécanique des parties ameublies a été suivi et probablement précédé par une attaque chimique, concrétisée par une frange de décoloration. Ont suivi la subdivision de la roche en fragments puis le basculement de ceux-ci. Ce dernier est attesté par des différences angulaires des joints soulignés par l'altération.

Hormis les perturbations géométriques des formations ferrugineuses, on peut attribuer aux

termite l'introduction de corps extérieurs au sein de ces formations. Le phénomène le plus évident apparaît dans le colmatage à l'aide d'un matériel terreux des galeries hors d'usage. En effet, si une partie du matériel de remblaiement est trouvé sur place, les différences de couleur par rapport à la matrice montrent qu'une autre partie a une origine externe. La plupart du temps, ces produits ont une couleur plus claire que la matrice qui révèle une origine plus superficielle. S'il se produit des importations à partir des zones inférieures, elles sont fort discrètes (4.3.3.1).

5.3.4. Formation de la matrice et des nodules *pédorelictuels*

Dès lors, se pose le problème de la formation de la matrice. L'analyse de la structure des cuirasses de faciès nodulaire ou gravillonnaire apporte la réponse.

Dans l'évolution de ces cuirasses, la formation de l'enduit à la périphérie des galeries est un épisode crucial. Il confère en effet à la formation une rigidité telle que les galeries qui, auparavant, s'effondraient lorsqu'elles étaient abandonnées, restent à présent béantes et forcent les termites à les colmater pour se protéger de leurs ennemis, en l'occurrence les fourmis.

Les galeries remblayées datent donc de la période postérieure à la formation des enduits. Les perturbations géométriques seront désormais très limitées, pour les mêmes raisons.

On peut désormais suivre le rôle exact des termites dans l'élaboration des cuirasses :

- Au départ, les nodules lithorelictuels sont intégrés dans la cuirasse, par départ des zones claires de l'horizon bariolé. Les nodules de teinte sombre du sommet de l'horizon tacheté, sont les premiers affectés. Suivent les nodules rouges, moins riches en fer et plus fragiles, aux marges souvent marquées d'une frange de décoloration;
- L'horizon rouge altéré, située auparavant dans la nappe, est à présent accessible aux termites et est injecté dans le niveau en voie de cuirassement, sous forme de remblaiement de galeries. La zone de nodulation n'a pas suivi la nappe dans son abaissement. De ce fait, l'horizon rouge ne s'est pas transformé en horizon producteur de nodules et est resté en l'état ou plus exactement a continué de s'altérer. L'introduction progressive d'une part de l'horizon rouge est à l'origine de la matrice.

Ce phénomène est, toutefois, autant le résultat d'une descente sur place de l'horizon à nodules libérés que de la remontée de produits altérés de l'horizon inférieur;

- Par le jeu des creusements et des remblaiements, des éléments des couches supérieures vont également s'introduire au cœur de la future cuirasse. C'est le cas pour les gravillons enrobés du faciès gravillonnaire;
- Simultanément, un début d'induration (5.5) va conférer à certaines parties de la matrice une individualité: ce sont les nodules *pédorelictuels* dont la partie interne a même composition et même couleur que la matrice (point 6 de 4.3.7.1). Un enrobage par l'enduit, au début de la phase de formation, lui assure une certaine pérennité (point 5 de 4.3.8.2);
- Le tubage progressif des galeries confère à l'ensemble de la zone affectée une rigidité telle que les nouvelles galeries ne s'effondreront plus et qu'il faudra les remblayer, pour une question de sécurité. Les termites vont quelquefois tenter de s'opposer à ce tubage généralisé en creusant de nouvelles galeries à côté de celles qui sont déjà garnies d'un enduit (v. faciès lobé, 4.3.2.5);
- La couleur des terres de remblaiement indique un changement dans les approvisionnements. Les terres qui sont additionnées aux produits locaux sont de plus en plus claires et sont le résultat d'une modification dans le milieu superficiel.

On verra plus loin que les enduits se sont probablement formés au plus tard à la fin du Tertiaire (7.2.4) et que les colmatages seraient quaternaires. Certains d'entre eux pourraient même être actuels.

5.3.5. Le travail de la terre

L'évacuation du matériel vers le haut est effectuée par les termites, selon un rituel qu'on observe encore à l'heure actuelle, c'est-à-dire :

- Remplissage de certaines galeries des étages supérieurs;
- Edification de la partie active de la termitière et notamment le bourgeon terminal;
- Construction de galeries provisoires à même le sol ou sur les troncs jusqu'à une hauteur de 2 mètres;
- Remplissage de l'intérieur de troncs d'arbres morts ou malades.

Ces constructions plus ou moins éphémères finissent par être la proie de l'impact des gouttes de pluie et du ruissellement et sont étalées à la surface du sol, venant ainsi épaissir les recouvrements superficiels. Toutefois, une partie de ce matériel a été exportée vers les rivières.

Les terres amenées ainsi en surface proviennent, en grande partie, non du niveau de la cuirasse mais de la zone sous-jacente. Dans la zone en voie de cuirassement, les départs et les apports sont nécessairement équilibrés: les terres excavées ont dû être remplacées par une quantité à peu près équivalente pour le remblaiement. La conséquence de cette extraction sous la cuirasse et de cette arrivée au-dessus de celle-ci, est une descente générale du profil. Une telle descente avait déjà été perçue et figurait dans les grands schémas de du Bois et Jeffery (1955), Trendall (1962) et de Swardt (1964). Ces auteurs ainsi que Mac Farlane (1976) qui a fait une analyse critique de leurs travaux, attribuaient cette descente au jeu de l'altération et du lessivage plutôt qu'à l'œuvre des termites.

5.3.6. *Les cuirasses termitiques*

Les descriptions, insuffisamment circonscrites, qu'on donne de ces cuirasses termitiques, laissent supposer qu'elles sont en fait de plusieurs origines, auxquelles les termites ne sont jamais étrangers. Il s'agirait :

- De galeries dont les parois ont été, soit imprégnées, soit couvertes d'un enduit ferrugineux, dans un milieu probablement peu induré (Erhardt, 1951);
- De fragments relativement isolés de cuirasse de faciès vermiculaire (Erhardt, 1951);
- D'un habitacle de termitière dont les parois sableuses ont été imprégnées de fer (Tessier, 1959).

C'est par assimilation que nous nous sommes permis de joindre ce dernier cas des "termitières fossiles" du cap Manuel, aux cuirasses termitiques d'Erhardt.

Hormis ce cas très particulier, les autres phénomènes ont déjà été décrits sous un aspect parfois un peu différent. Le faciès vermiculaire n'est cité ici que pour mémoire. Des galeries garnies d'enduit ont été signalées sous les enduits développés à même le sol (4.3.8.2). Les imprégnations dans un matériel sableux ont également été évoquées. Plusieurs ensembles de galeries verticales, figées par le fer sous forme

d'orgues miniatures, ont été observés. La plupart de ces imprégnations sont actuellement en affleurement et peuvent être relativement récentes.

5.3.7. *Le démantèlement des cuirasses*

Une grande partie des cuirasses ne présentent plus l'intégrité qu'elles possédaient au départ. On les retrouve la plupart du temps sous forme de gros blocs émergeant du matériel meuble qui les entourent. Cette subdivision en gros blocs a été attribuée, au départ, aux effets de la végétation, des racines des arbres qui dans leur croissance les écartent progressivement. Pour commencer leur travail, les racines ont cependant dû utiliser des diaclases.

En marge d'un versant, ces diaclases peuvent être attribuées à un sapement à la base. En terrain plan, il faut, cependant, faire appel à une descente différentielle de la cuirasse, provoquée par un soutirage irrégulier de matériel par les termites. Dans ce dernier cas, la mise en légère inversion de relief ne peut être associée, comme c'est le cas pour les *bowé*, à l'incision du réseau hydrographique, mais bien à l'effet combiné du terrassement des termites et de l'érosion par ruissellement superficiel.

5.4. La formation des cuirasses sableuses

La plupart des cuirasses formées sur les sables n'ont jamais été le siège de bioturbations de la part des termites, par manque de matière première argileuse en suffisance. La formation des cuirasses sableuses ne suivra pas le même enchaînement de processus que les cuirasses sur les roches précambriennes.

Comme le sable se laisse plus facilement imprégner par le fer, un premier type de cuirasse pourra apparaître dès le stade de l'horizon bariolé. Un apport plus important de fer, probablement à la suite d'un lessivage oblique, va transformer le sable en un faciès assez proche du faciès massif qui aurait été taraudé par certains éléments de la biosphère, réseau de racelles ou galeries de fourmis. Une fois dégagée des sables non indurés, la partie soudée par le fer, prend un aspect fortement contourné. Certaines apophyses peuvent s'en détacher et éventuellement se ressouder par après à l'ensemble. Un exemple de ce type de cuirasse est fourni par l'échantillon B101 (4.3.8.1). Ce genre de cuirasse monophasée est assez rare et toujours très local.



Fig. 46.- Carapace dont la cohésion est due principalement à la rigidité conférée à l'ensemble par un réseau de galeries tapissées de fer.

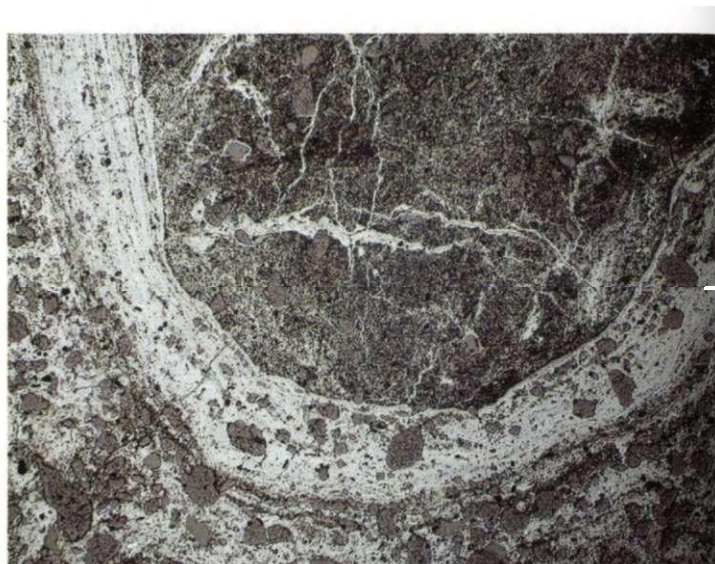


Fig. 47.- Consolidation des cuirasses: Observation au microscope à lumière réfléchie. Largeur des photos: 800 um.

a) (lumière réfléchie naturelle) consolidation des éléments, par enrobage par un enduit rubané et par précipitation d'hydrogoethite presque pure dans le réseau de crevasse d'un nodule pédorelictuel composite;

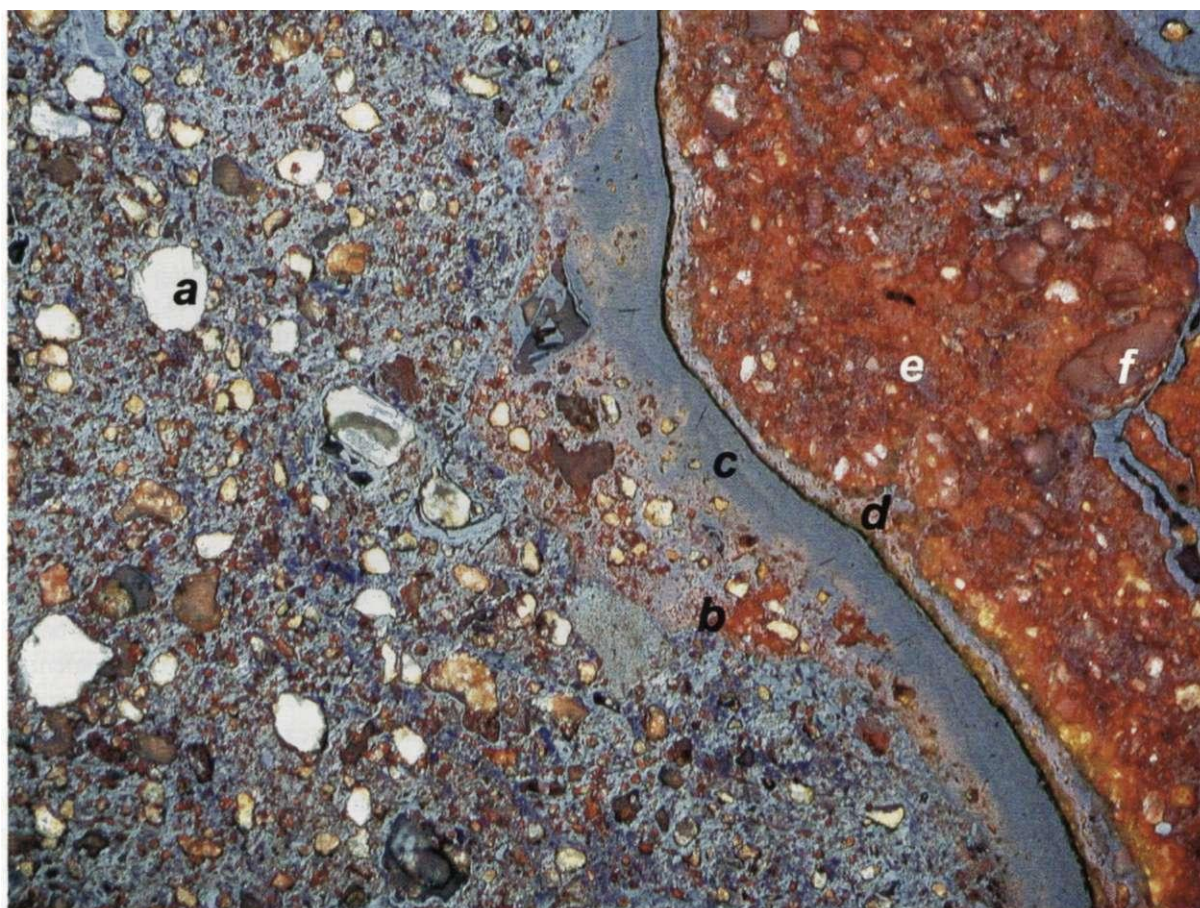


Fig. 47.- b) (lumière réfléchie avec nicols croisés à 60°) la matrice se consolide par précipitation irrégulière de goethite en son sein (e) et dans les crevasses (f) et même dans la toute fine frange de décoloration (d) formée antérieurement. Dans le voisinage, un nodule composite formé d'un nodule lithorelictuel (a) à forte concentration de fer à la suite de l'altération de certains composants de la roche et d'une petite masse de matrice (b), le tout enrobé dans un enduit (c). La crevasse à droite de c est un artefact (cliché réalisé avec l'aide de A. Pierson).

Le dégagement des nodules, n'ayant pu être effectué par les termites, devra attendre la phase d'érosion qui précède et accompagne un certain temps, la formation de l'enduit. Il ne se produit donc aucun mouvement, ni aucune concentration mécanique auparavant. C'est à cause de cette simultanéité du dégagement du nodule et de la formation de l'enduit que la plupart des cuirasses sableuses sont constituées de gravillons qui ne sont jointifs que par l'intermédiaire de leur enduit périnodulaire, comme le montrent les échantillons B235 et 5212 (4.3.3.1 et 4.3.8.3).

Toutefois, certains gravillons ne reçoivent un enduit que pendant peu de temps parce qu'ils sont enfouis avant d'être emprisonnés par l'enduit. Dans ce cas, ils peuvent être soudés par une imprégnation périphérique des sables qui les entourent. L'échantillon B246 (4.3.9.2) détaille cette opération en deux temps: un enduit périnodulaire brun est surmonté d'une couverture rouge qui, à la différence de l'enduit, est une imprégnation des sédiments environnants.

5.5. Les processus d'induration

Dans les descriptions d'échantillons qui ont été présentées, la distinction entre cuirasse et carapace n'a été faite que très accessoirement. En fait, comme le notait Alexander et Cady (1962, p. 8), les différences chimiques, minéralogiques et micromorphologiques sont peu marquées entre un matériau meuble et un matériau induré. Par ailleurs, certains mécanismes n'apparaissent pas toujours très clairement.

5.5.1. Les degrés d'induration

Maignien (1958, p. 83) a décrit une échelle simple et concrète pour apprécier les différents degrés d'induration. Selon les cas, la cuirasse :

- se casse à la main;
- se façonne à la bêche;
- éclate au marteau;
- laisse rebondir le marteau.

Dans les deux premiers cas, la formation cohérente peut être considérée comme une carapace. Dans les deux derniers, on parlera d'induration et la formation sera désignée sous le terme de cuirasse *sensu stricto*. Dans le profil cuirassé type, la carapace se trouve immédiatement sous la cuirasse. Bon nombre de carapaces peuvent, toutefois, se présenter seules.

Par ailleurs, il va sans dire que les critères décrits plus haut, s'adressent à des formations ferrugineuses qui ne sont pas en voie de dégradation. Comme nous allons le voir, le degré d'hydratation actuel doit être précisé: un dessèchement peut convertir une carapace en cuirasse.

5.5.2. Le siège de l'induration

L'induration met en cause, à la fois, les éléments et l'ensemble de la formation. Un élément non induré est un point faible de l'édifice. D'autre part, la cohésion générale doit être assurée. Pour y arriver, deux voies peuvent être envisagées: l'induration de la matrice ou la constitution d'un squelette interne grâce aux enduits.

5.5.3. Induration des éléments

L'imprégnation semble, ici, le processus principal d'induration. Les pores, quelle que soit leur dimension, sont occupés par le fer. Les sables sont les plus facilement indurés, dans les circonstances les plus diverses: dans et hors de la nappe, à proximité d'une racine (pédodes), dans une galerie ouverte.

Les roches précambriennes exigent des conditions supplémentaires. La migration y serait plus lente, ce qui pourrait demander un séjour prolongé au sein de la nappe aquifère, que ce soit lors de la nodulation (2.4.1) ou lors d'une imprégnation généralisée sous une nappe sableuse, servant de vecteur à l'eau chargée de fer (4.3.6.1). Les teneurs exceptionnelles atteintes dans les nodules lithorelictuels, quelque 60% de Fe_2O_3 , demande l'intervention d'un processus secondaire. En effet, les siltites précambriennes, à l'état frais, ne pourraient contenir une telle proportion de fer. Une altération modérée pourrait, ici, être invoquée, qui frapperait les éléments les plus fragiles inclus dans la roche (selon les cas, dolomies, chlorite, fragments de roche magmatique, feldspaths) (fig. 47b). D'autre part, l'imprégnation généralisée peut présenter un gradient, les couches plus riches de l'extérieur indiquant le sens du mouvement.

5.5.4. Induration de l'ensemble

5.5.4.1. Un réseau d'enduits

Les vertus d'un film de structure lamellaire qui recouvre, à la fois, la surface de la cuirasse, ses diaclases et les chenaux qui la parcourent, ont été décrits dès 1954 par D'Hoore (p. 90). A cette

époque, le film ne s'appelait pas encore enduit, ni les chenaux des galeries. L'enduit lui-même est d'une grande dureté, égale aux nodules les plus riches en fer. Dans sa continuité et dans sa complexité, l'enduit constitue pour la cuirasse une espèce de squelette. En outre, il emprisonne de nombreux éléments figurés et les fixe solidement à l'ensemble. Un tel réseau ne peut toutefois se réaliser que rarement en milieu sableux, du fait de l'absence des termites et de leurs galeries.

La formation ferrugineuse qui résulte de ce seul processus, ne dépasse guère le stade de la carapace (fig. 46). Comme les enduits ne se sont plus formés au Quaternaire, ce type d'induration a dû se produire avant la fin du Tertiaire.

5.5.4.2. La cohésion de la matrice

La matrice, de son côté, peut acquérir une certaine rigidité qui se répercute sur la résistance mécanique de la formation ferrugineuse. Il est fréquent, toutefois, que consolidation de la matrice et réseau d'enduits combinent leurs effets.

L'imprégnation d'une matrice sableuse fige assez rapidement la formation ferrugineuse. Le processus est peu différent de celui qui préside à la formation des nodules. Une induration complète de la matrice demanderait, toutefois, la présence d'une nappe aquifère.

Pour une matrice argileuse, la microporosité d'une part, et d'autre part la présence presque généralisée des termites rend l'induration moins facile et plus complexe. Une échelle de cohésion croissante part des remplissages récents de galerie, passe par une matrice qui a amalgamé des remplissages plus anciens, et arrive aux nodules pédorelictuels qui dérivent d'une matrice relativement ancienne (5.2.6). La cohésion acquise dans les deux derniers cas n'est jamais suffisante pour empêcher les travaux de creusement des termites, qui ne respectent, par ailleurs, que les nodules lithorelictuels et les enduits.

Les nodules pédorelictuels acquièrent une certaine individualité quelquefois malmenée, mais qui constitue, cependant, un début de cohésion. Dans la plupart des cas, les nodules pédorelictuels se sont formés avant l'épisode du tubage des galeries par les enduits. Ils ont donc subi, **par après**, les conditions de formation de ces enduits, c'est-à-dire des conditions un tant soit peu arides. L'âge a multiplié les occurrences de telles conditions. Le nodule pédorelictuel de la figure

47a, est garni d'un enduit datant du Tertiaire. Sa forte cohésion est à mettre en relation avec sa microstructure. Des microfractures, de 10 à 100 µm de largeur, formant un réseau dense, sont colmatées par de la goethite presque pure. Un tel réseau a conféré au nodule une grande rigidité, un peu à l'instar d'un réseau de galeries tapissées d'un enduit.

La figure 47b montre que, dans la cuirasse en voie d'induration, la matrice est le siège d'une imprégnation et aussi de précipitation dans les vides. Dans les deux cas, le minéral est proche de la goethite. Dans l'exemple, les vides pourraient être une galerie effondrée. Les imprégnations se développent à partir de certains centres au sein de la matrice ou dans la frange due à une décoloration antérieure.

Il est un fait d'observation que les cuirasses les plus anciennes, sont aussi, sauf exception, les plus cohérentes, sinon les plus dures. Dans les cuirasses de faciès nodulaire ou gravillonnaire, il existe une gradation dans le degré de cohésion de la matrice. Alors que les concrétions sont bien accrochées au sein de leur matrice dans la cuirasse n°2 (6.1.2), elles finissent par se détacher légèrement, au sciage, dans la cuirasse n°4.

D'autre part, la partie dénudée d'une cuirasse est toujours mieux indurée que la partie restée enfouie. Ce fait naturel, l'homme peut l'accomplir. Les blocs taillés à la bêche et exposés à l'air pendant un certain temps, peuvent servir de matériau de construction, comme l'avait déjà noté en 1807 le docteur Buchanan, l'inventeur du terme "latérite" (du latin, *later*, brique). Indépendamment de l'intervention de l'homme, ce processus se produit encore à l'heure actuelle. Même si les cuirasses ne se forment plus à l'heure actuelle, elles continuent à évoluer (Grandin, 1976, p. 179).

De telles observations montrent que des apports supplémentaires de fer ne sont pas nécessaires. Par contre, l'humectation et la dessiccation sont bien effectives. La comparaison des murs internes et externes d'une maison construite à l'aide de blocs de latérite depuis un certain temps, montre que les seconds sont nettement mieux indurés (D'Hoore, 1954, p. 94). On en conclut que la dessiccation est plus efficace si elle est assistée par une humectation répétée. Il reste maintenant à établir si, à l'échelle des minéraux ferrugineux, le réarrangement interne a été accompagné par une meilleure cristallisation.

6. LES DATATIONS

Jusqu'à présent, les cuirasses ont été abordées par le biais des caractères qu'elles présentaient à l'analyse; si un âge a été avancé, c'est uniquement par référence au présent chapitre.

6.1. Les critères

Dans les chapitres précédents, l'âge des cuirasses a été abordé incidemment et des âges différents ont été postulés. Faute de pouvoir attribuer aux cuirasses un âge absolu, un ordre d'apparition devrait être déterminé. Sur quelles observations fonder son jugement ? Le critère auquel il est le plus communément fait appel, est leur position en altitude.

6.1.1. L'altitude

Comme nous aurons l'occasion de le montrer plus loin (7.1), les cuirasses s'inscrivent dans la topographie peu accentuée d'une surface d'érosion. Les surfaces dotées de cuirasses sont étagées et l'altitude a été utilisée pour une première identification. Dans un système où l'érosion verticale des rivières prédomine, les plus élevées sont, en principe, les plus anciennes.

Toutefois, le critère de l'altitude peut être sujet à caution. Dans sa discussion sur l'étagement des surfaces de l'Ouganda, Mc Farlane (1976) a évoqué deux scénarios pour lesquels une même surface peut se présenter à deux niveaux différents:

1. Une surface unique est affectée après sa formation, par une faille radiale qui déplace une partie vis-à-vis de l'autre (Ouganda: Pallister, 1956 et de Swardt, 1964). Le haut Katanga est précisément affecté par une tectonique semblable (1.2).
2. Une surface pourrait se développer simultanément à deux niveaux différents en raison d'une différence de résistance du substratum. Ce cas théorique a été avancé par Johnson (1959).

Il existe une possibilité supplémentaire. Compte tenu du faible pouvoir érosif des rivières tropicales et de leur incapacité à éliminer les seuils rocheux, deux surfaces de même âge peuvent se développer à partir de deux niveaux de base différents. Et ceci, éventuellement sur un même substratum. Varajão

(1988) a développé la thèse que des bauxites synchrones ont pu se former à *différents niveaux* à une période de l'Éocène. Cette éventualité sera illustrée ultérieurement par un exemple pris au Katanga (6.4.6).

Par ailleurs, les restes d'une même cuirasse peuvent se trouver à des altitudes légèrement différentes, en fonction de différentes circonstances :

- La topographie de la surface d'érosion n'était pas rigoureusement plane;
- Une descente sur place s'est produite lors de la dégradation de la cuirasse. Une telle descente a été décrite à propos du travail des termites (5.3.5 et 6.6.1). Un déplacement vertical a également été envisagé par Mc Farlane (1976), suivant en cela de Swardt (1964), mais pour ces auteurs, la descente du niveau latéritique n'était pas attribuée au travail des termites mais à celui d'une érosion classique.

Dans l'étagement de surfaces auquel il sera désormais fait appel, les différents écueils signalés ci-dessus, ont été pris en compte. Cet étagement a été établi en tenant compte de la position des failles et des niveaux de base, systèmes qui dédoublent les surfaces. Le détail de ces distorsions dans l'étagement des surfaces apparaîtra dans la reconstitution détaillée de l'histoire géomorphologique du haut Katanga (6.4.6).

6.1.2. La nature des enduits ferrugineux

Une grande partie des cuirasses ont été couvertes par un enduit superficiel, enduit qui se prolonge dans les diaclasses et éventuellement, dans les galeries de termites. Seules les formations ferrugineuses les plus récentes, comme les cailloutis indurés de terrasse fluviale, en sont dépourvues.

À l'exception de formes spectaculaires telles que celles du faciès pisolitique, les enduits de la surface supérieure de la cuirasse n'ont guère attiré l'attention des observateurs. Situées en première ligne lors des attaques par la matière organique, elles ont souvent disparu (6.6.2.1). Il faut alors interroger des sites de refuge tels que les diaclasses ou les galeries. Dans ces dernières, les enduits sont connus depuis plus longtemps, grâce à leur rôle dans la fixation du faciès vermiculaire.

Lorsqu'ils sont bien conservés, ces enduits dont on sait qu'ils sont rubanés présentent, entre autres, une strate superficielle d'une couleur qui varie



Fig. 48.- Enduit ferrugineux n°1: pisolithique, fortement érodé. Age présumé: fin Secondaire, début Tertiaire.



Fig. 49.- Enduit ferrugineux n°2 (partie superficielle): couleur rouge, très brillant. Age présumé: mi-Tertiaire.



Fig. 50.- Enduit ferrugineux n°3 (partie superficielle) couleur brun foncé, réseau de crevasses avec sutures. La fréquence des sutures sur cet enduit est plus grande que sur le précédent et on ne les retrouve pas sur les enduits n°1 et 4. Age présumé fin du Tertiaire.

selon l'époque de leur formation. Ce caractère, associé à l'épaisseur, fait de ces enduits un critère de l'âge des cuirasses.

Il a donc été établi une stratigraphie des cuirasses selon la nature de la couche externe et l'épaisseur de l'enduit. Des critères secondaires viendront confirmer l'ordre de succession.

Cet ordre repose sur l'étagement des surfaces auxquelles ces cuirasses et leurs enduits sont associées. Il est confirmé par la superposition des enduits, l'enduit inférieur ayant été déposé en premier lieu.

De nombreux exemples de superposition semblable peuvent être observés. Il semble, en effet, que la cuirasse formée en premier lieu a servi de source pour le fer d'un nouvel enduit. Il n'est pas rare qu'un enduit ait subi une certaine érosion, avant le dépôt de l'enduit suivant (figs. 33 et 37 ainsi que 52 et 53).

Cette superposition met en exergue un des aléas de la méthode. La cuirasse a l'âge indiqué par l'enduit inférieur. Si celui-ci a été éliminé par érosion, le risque est grand d'attribuer à la cuirasse l'âge du second enduit. Une recherche minutieuse sur le terrain est donc nécessaire.

Échelle des enduits (figs. 48-51)

Du plus ancien au plus récent :

1. Enduit rubané **épais** (plus de 10 mm), fait de nombreuses couches en alternance claire et foncée (7,5 YR 6/8 et 3/4). Les couches ultimes, rarement préservées par l'érosion ultérieure, sont de couleur rouge sombre (7,5 R 3/4). La plupart du temps, l'enduit épais entoure des éléments isolés formant ainsi des pisolithes. Ces derniers sont soudés entre eux et forment souvent la partie supérieure de la cuirasse (fig. 48).
2. Enduit **rouge** violacé (7,5 R 3/6) assez fin et très brillant. Dans le rubanement qu'il recouvre, apparaissent des strates alternativement brun foncé et ocre (7,5 YR 3/2 et 6/8). Cet enduit est nettement moins épais que le précédent (de l'ordre de 5 mm) (fig. 49).
3. Enduit **brun foncé** (2,5 YR 3/4 à 5 YR 3/3), souvent brillant dont l'intérieur est fait de couches claires (5 YR 5/8 à 7,5 YR 6/8) et sombres. Un réseau de *sutures* est bien développé dans cet enduit et, de ce fait, en constitue un caractère remarquable. Les enduits plus anciens n'en sont toutefois pas

dépourvus. L'épaisseur est du même ordre de grandeur que dans le précédent (fig. 50);

4. Enduit **ocre** clair mat (7,5 YR 5/8) souvent moins épais que les précédents. Il couvre souvent ce dernier, mais peut aussi se présenter seul sur des cuirasses mal consolidées (fig. 51).

Les deux premiers enduits se terminent tous deux par quelques fines couches d'hydrohématite qui sont responsables de la couleur rouge terminale. Toutefois, l'enduit le plus ancien a subi une telle érosion que ces couches superficielles rouges ont disparu de la surface et ne se retrouvent plus qu'au fond de certaines commissures où elles ont été sauvegardées (fig. 48). Les deux derniers enduits sont composés uniquement d'hydrogoethite, la couleur sombre de l'un et la couleur claire de l'autre, sont dues au degré d'hydratation de l'hydrogoethite, plus faible pour le premier enduit que pour le second.

Il existe des cuirasses sans enduit. Celles-ci se trouvent uniquement sur un substrat sableux dont nous savons qu'il est favorable à une imprégnation rapide. Ces cuirasses se trouvent pour la plupart dans des sables remaniés par le ruissellement au cours du Quaternaire. L'échantillon B246 (4.3.9.2) en est un exemple.

La cause profonde de ces différences de couleur et d'épaisseur des enduits, selon les époques, n'est pas encore élucidée. Elle pourrait être attribuée à une différence de chimisme au moment de la formation de l'enduit ou à la nature des micro-organismes présents, voire à certaines modalités du climat. Le fait que la même succession de couleurs dans les enduits se soit produite dans des régions assez éloignées, donnerait l'avantage à une cause plus générale qui pourrait être l'influence du climat sur le milieu. Dorn et Oberlander (1982, p. 337) évoquent des vernis rocheux rouges (10R4/8) qui pourraient être associés à un milieu hyperaride et alcalin.

6.1.3. Critères secondaires

Des caractères autres que l'altitude et la nature des enduits sont également liés à l'âge des cuirasses, avec moins de précision toutefois. Leur intérêt consiste, la plupart du temps, en une confirmation du diagnostic établi grâce aux deux premiers.

6.1.3.1. La corrosion des grains de quartz

La surface des grains de quartz observée au MEB montre de très grandes différences selon



Fig. 51.- Enduit ferrugineux n°4: ocre jaune mat. Age présumé: extrême fin du Tertiaire. Cet enduit couvre mal l'enduit précédent n°3. La cuirasse a donc, au moins l'âge de l'enduit n°3.



Fig. 52.- Enduit rouge sur la surface externe de l'enduit pisolitique (n°1). L'enduit superficiel rouge est souvent très mince: il est donc assez labile.



Fig. 53.- Autre exemple de l'enduit n°3 à sutures, couvert par l'enduit plus récent (les clichés 48 à 53 ont été réalisés avec l'aide de Ph. Gerienne).

l'ancienneté de la cuirasse. Pour les cuirasses les plus anciennes, il n'y a guère de différence entre les grains de l'enduit et ceux de l'intérieur de la cuirasse. Pour les cuirasses les plus récentes, il convient, quelquefois, de faire la distinction entre les grains de l'enduit enrobant un nodule et ceux de la matrice qui l'entoure. Cette dernière a été apportée plus récemment par les termites et a donc un aspect beaucoup plus frais (Grandin, 1976, p. 61).

Une étude de la corrosion menée dans le haut Katanga (Tshidibi, 1984), a confirmé, en partie, la succession déduite de l'observation des enduits. Dans les deux cuirasses supérieures, les grains de quartz sont fortement corrodés et montrent de nombreuses cavités triangulaires ou en forme de V, en relation directe avec la structure cristalline (fig. 54). Les grains ont, par ailleurs, diminué de taille, flottant, à l'heure actuelle, dans un espace jadis complètement occupé. Les traces de corrosion sont nettement plus faibles dans les cuirasses plus récentes. De leur côté, Boulangé *et al.* (1973) avait déjà noté une semblable gradation en Côte d'Ivoire: quartz très corrodés sur la surface supérieure (bauxitique), corrodés sur la surface intermédiaire et frais sur les surfaces inférieures (haut et moyen glacis).

Dans la cuirasse pisolithique, les grains de quartz fortement diminués et fragmentaires au sein de la cavité qui les contient, ont été interprétés comme le résultat d'un phagocytage des quartz par le fer (Nahon, 1976, p.24). Cette hypothèse a été écartée par différents auteurs (Stoops, 1967, 1968; Eschenbrenner, 1987, pp. 101, 126-127).

6.1.3.2. Les crevasses

Les cuirasses pisolithiques sont affectées de nombreuses crevasses internes, perpendiculaires ou parallèles à la stratification. La plupart d'entre elles affectent non seulement les enduits, mais également les nucléus et les autres fragments de roche. Le fait qu'elles traversent plusieurs phases minérales au sein de la cuirasse et qu'elles soient presque toutes le siège de recristallisation (figs 39 et 40), confirme les pressions et les vicissitudes par lesquelles sont passées ces cuirasses et par conséquent, leur grand âge.

Les deux cuirasses d'âge intermédiaire (avec enduit brillant rouge ou brun foncé) présentent également des crevasses, limitées, cette fois, aux seuls enduits. Elles forment un réseau quelque peu irrégulier et qui a été, néanmoins, attribué à la dessiccation (5.1.3.2). Elles ont été comblées de

composés du fer par exsudation et ceux-ci ont même formé un bourrelet en relief (fig.50). Ces sutures sont bien apparentes et facilitent l'identification de l'enduit.

Enfin l'enduit ocre mat est dépourvu de crevasses et, lorsqu'il est superposé à l'enduit brun foncé, il se fixe fréquemment sur les bourrelets des sutures (fig. 51).

6.1.3.3. Les faciès

De même que le faciès pisolithique est caractéristique de la cuirasse la plus ancienne, il existe d'autres faciès qui, par leur association voire par leur absence, constituent des critères de l'un ou l'autre niveau cuirassé.

En fait, même la cuirasse la plus ancienne ne comporte pas un faciès unique. Sous les pisolithes qui occupent la partie supérieure, viennent se placer un faciès massif et surtout un faciès alvéolaire fait d'oxyde de fer presque pur, qui emprisonnent ou ont emprisonné avant leur disparition des fragments rocheux particulièrement altérables. De plus, il faut noter l'absence de toute trace d'une intervention des termites, contemporaine de la formation. L'échantillon 5277 (4.3.1.1) contient une série de lentilles de sédiments fins qui auraient pu être la proie des termites et qui sont restées intactes jusqu'au moment de leur imprégnation. Une galerie a été creusée et colmatée dans ce même échantillon, mais le phénomène s'est produit ultérieurement comme le montre la couleur rouge des produits de remblaiement.

Le faciès des cuirasses ultérieures est essentiellement du type gravillonnaire, sur sable. Sur substratum précambrien, le faciès est gravillonnaire ou nodulaire, et vermiforme.

6.2. Cuirasses et dépôts corrélatifs

Dans le haut Katanga, une série de formations continentales encadrent des surfaces pourvues d'une cuirasse. Une surface cuirassée peut également être taillée dans une de ces formations continentales.

Ces dépôts corrélatifs sont d'une utilisation délicate pour le problème qui nous occupe. En effet, elles sont d'une extension limitée, et quelquefois dans un mauvais état de conservation. En outre, elles sont peu fossilifères et n'ont donné jusqu'à présent aucune datation sûre. Quoi qu'il en

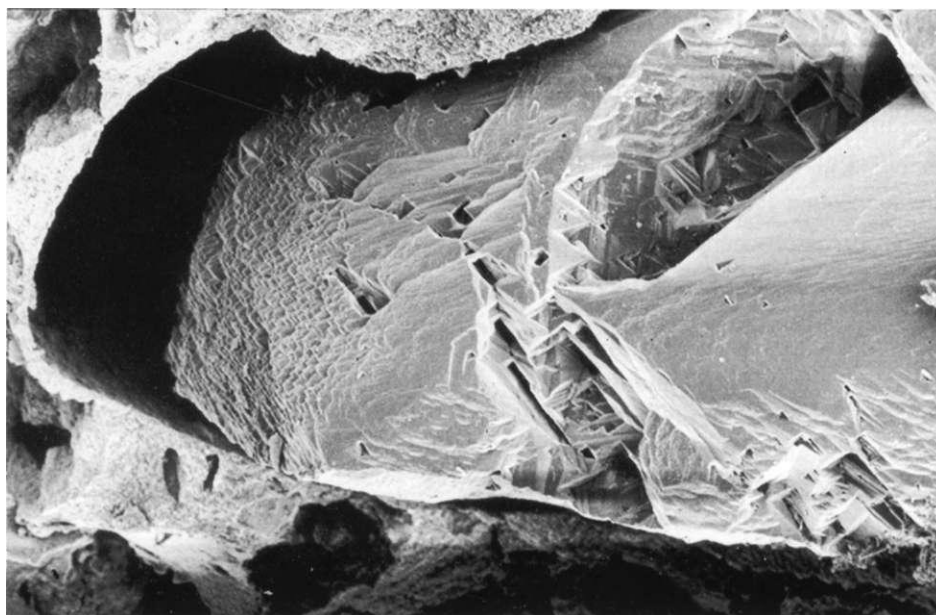


Fig. 54.- Grain de quartz corrodé au sein de la logette qu'il occupait entièrement. Les figures géométriques viennent de la révélation du réseau cristallin. Cet exemple a été pris dans une cuirasse portant l'enduit n° 2 (cliché réalisé avec l'aide de M. Streel).



Fig. 55.- Quartzite kibarien silicifié après une altération préalable. Cette silicification s'est produite en milieu aride et se place dans un profil où la partie inférieure est occupée par une cuirasse portant un enduit superficiel rouge (n°2), cuirasse couronnant un bowal.

soit, elles pourront être d'une certaine aide dans la datation relative des surfaces et des cuirasses qui y sont associées.

Ces formations seront présentées dans leur ordre d'apparition.

6.2.1. *Les grès polymorphes*

Dans le Kwango, cette formation se présente en bancs presque continus, de quelque 100 m d'épaisseur et comprend des sables, des grès et des calcaires silicifiés (Lepersonne, 1945). Au Katanga, son importance est fortement réduite, car il n'en subsiste que des éclats et surtout bon nombre de blocs erratiques.

Les grès polymorphes qui, dans l'ouest, se trouvaient sous les sables ocre, se retrouvent ici sous forme de blocs, soit sur des sommets dominant les sables ou encore, au sein de ceux-ci. Un banc de quelque 20 m de largeur a été retrouvé, sur le plateau des Bianco, près du sommet de Kaninga (1665 m). On le soupçonne d'être légèrement descendu sur place, car l'altitude des autres sommets avec grès polymorphes est de l'ordre de 1680 m dans les autres parties du plateau des Bianco, tant à l'ouest (Longe) qu'à l'est (Kisiba Salabwe et amorce du Kyankwale). Sur le plateau des Kundelungu, il n'est signalé que dans l'extrême nord, sur le point culminant (Kibwe wa Sanga, 1770 m) et dans les environs immédiats.

Les grès polymorphes des plateaux katangais sont constitués, soit de grès, soit de pseudo-quartzite, plus rarement de calcaire silicifié. Ces roches présentent, pour les premières, un ciment de calcédonite et pour les deuxièmes, une structure quartzitique avec des auréoles d'accroissement de calcédonite autour des grains de quartz primitifs. Cette calcédonite est le point faible de la roche dans sa résistance à l'altération. Ceci explique le démantèlement de la formation (Alexandre-Pyre, 1971, p. 77). Les blocs erratiques en affleurement sont cependant d'une fraîcheur qui étonne; tandis que des outils préhistoriques enterrés et soumis au lessivage sont d'une grande fragilité.

L'âge des grès polymorphes n'a pu être déterminé avec précision, malgré la présence de fossiles dont la position stratigraphique est beaucoup trop large. Dans le Kwango, ils reposent sur le Crétacé supérieur (Cahen, 1954, p. 328).

6.2.2. *Le cailloutis des hauts plateaux*

Ce cailloutis est composé de galets de quartz ou de quartzite, bien arrondi, avec un minimum de matrice. Le matériel provient probablement du Grand Conglomérat qui est à la base du Kundelungu. Il a ensuite été trié et remodelé par une rivière (Alexandre et Icart, 1980). Leur épaisseur varie entre 5 et 10m.

Un cailloutis existe sur tous les hauts plateaux du Katanga, mais ce n'est que dans la partie centrale du plateau des Kundelungu qu'il est bien identifiable. Dans l'est du plateau des Bianco et à l'extrémité sud du plateau des Kibara, il semble que le cailloutis ne représente que la partie supérieure altérée des bancs du Grand Conglomérat.

Sur les Kundelungu, le cailloutis se trouve directement au-dessous des sables ocre, à une altitude de 1675 m, c'est-à-dire à quelque cent mètres plus bas que le signal de Kibwe wa Sanga où se rencontrent les restes de grès polymorphes les plus élevés. Toutefois, le cailloutis ne contient pas de fragments de grès polymorphes; il est possible que l'état de conservation des grès ait été si mauvais qu'ils n'ont pu survivre à un transport fluvial.

Il n'est toutefois pas exclu que le cailloutis ait occupé une vallée creusée avant le dépôt des grès polymorphes.

6.2.3. *Les sables de type Kalahari (dits sables ocre)*

Les sables ocre, épais de 120 m dans l'Ouest du Congo, sont réduits à quelques dizaines de mètres sur les plateaux katangais. D'une position au-dessus des grès polymorphes, comme on vient de le voir, les sables se retrouvent ici sur une surface d'érosion en contrebas.

Une différence sensible existe dans leur mode de gisement sur les deux plateaux où ils sont le mieux développés. D'une part, l'épaisseur de l'assise est régulière (25 m) et le sommet oscille entre 1705 et 1713 m, du nord au sud du plateau des Kundelungu. Sur le plateau des Bianco, la base des sables est située à une altitude assez variable, entre 1540 et 1580 m.



Fig. 56.- Champ de dunes longitudinales développé à partir des sables de type Kalahari (sables ocre), sur le plateau des Bianco. La hauteur des dunes est aujourd'hui fortement atténuée et le contour en plan apparaît grâce à la nappe dans les sables. Ce champ de dunes se serait modelé à la fin du Tertiaire. Les surfaces sableuses des niveaux inférieurs ne portent aucune trace de ce phénomène éolien. La largeur réelle de la figure est de 6 km.



Fig. 57.- Les blocs erratiques de grès polymorphes portent dans leur partie supérieure des traces de la corrosion éolienne contemporaine des champs de dunes. Elle présente des facettes légèrement incurvées et des arêtes proéminentes.

Les sables des deux plateaux proviennent cependant d'un même stock aux caractères bien spécifiques: absence de stratification et granulométrie semblable. De part et d'autre, il s'agit d'un sable très fin (médiane de l'ordre de 125 μm), dénuée d'éléments grossiers ($>500 \mu\text{m}$), avec une fraction de silt supérieure à 20% et quelques % de produits très fins (Soyer, 1978, p. 234).

A la faveur d'un remaniement éolien de leur partie supérieure, les sables ocre ont envahi les reliefs voisins datant d'une période nettement antérieure. L'utilisation des sables ocre comme repère doit donc être faite avec beaucoup de circonspection.

L'extension des sables ocre en place est exagérée sur la plupart des cartes géologiques. Par ailleurs, certaines couvertures sableuses ne sont, en fait, que des produits de l'altération des bancs gréseux ou arkosiques sous-jacents. Il est toutefois aisé de les distinguer car ces sables ont conservé la teinte rosâtre de leurs origines et les grains de quartz sont plus volumineux et souvent mieux arrondis.

Du point de vue de la stratigraphie, les sables ocre sont postérieurs aux grès polymorphes et antérieurs à la reprise d'érosion des rivières qui s'est produit au début du Quaternaire. Sur le plateau des Bianco, ils sont considérés comme tertiaires. Cahen (1956, p. 359), sur la foi de préhistoriens, avait attribué un âge pléistocène aux sables du plateau des Kundelungu. La confusion vient d'ateliers situés en surface à proximité des affleurements de grès polymorphes ou de cailloutis des plateaux. L'étude détaillée des sables, tout le long de l'axe du plateau (Soyer, 1978), a montré des caractéristiques sédimentologiques semblables au sable des Bianco (Alexandre-Pyre, 1971).

6.2.4. Les dépôts de terrasse fluviale

À l'exception du centre de la pédiplaine de la Lufira où elles forment des nappes imbriquées, les alluvions fluviales couvrent des terrasses étagées sur les versants des grandes vallées. Les plus encaissées, comme celle de la Kalumengongo (Kibara), en comptent cinq (Mortelmans, 1950). Dans la région de Lubumbashi, elles sont seulement au nombre de deux ou trois (Dibanga, 1982).

L'apparition de ces terrasses caillouteuses marque un tournant dans l'histoire géomorphologique. Les sédiments fluviaux étaient auparavant de nature sableuse. Les sédiments

grossiers et l'encaissement de la vallée sont attribués aux conditions nouvelles qui ont régné au Quaternaire (Alexandre-Pyre, 1971, p. 135).

Les terrasses inférieures recèlent des outils préhistoriques. Les plus anciens sont d'une facture proche de la Pebble Culture comme dans la célèbre carrière du kilomètre 81 de la route de Lubumbashi à Kasenga (Mortelmans, 1950). Les plus récents sont de simples éclats de quartz posés à plat au-dessus de la stone-line associée à la terrasse.

6.2.5. Les enduits des cuirasses et les dépôts corrélatifs

Les dépôts corrélatifs s'interposent entre les différentes surfaces d'érosion datées par l'enduit associé à la cuirasse qu'elle porte et confirment la succession décrite plus haut.

1. Les cuirasses les plus anciennes, c'est-à-dire les cuirasses *pisolithiques* contiennent des éléments des grès polymorphes (à Kibwe wa Sanga) et sont donc plus récentes.
2. Les cuirasses intermédiaires, caractérisées par un *enduit externe rouge* se retrouvent sous les sables ocre en place, à l'est du plateau des Kundelungu. Sur le plateau des Bianco, elles se trouvent également sous les sables, mais ici ceux-ci ont été amenés ultérieurement par le vent. Les cuirasses ne contiennent pas de sable aussi fin que les sables ocre et sont, de toutes façons, antérieures au dépôt de ceux-ci.
3. Les cuirasses à enduit brun foncé brillant sont développées aux dépens des sables du Kalahari, sur le plateau des Bianco.
4. L'enduit ocre mat est associé à quelques cuirasses mal développées ou à des formations ferrugineuses plus particulières telles que les roches imprégnées de la Kiesangie.
5. Aucun enduit n'est associé aux terrasses fluviales. Celles-ci sont, cependant, fréquemment indurées par le fer.

Certains phénomènes viennent, par ailleurs, marquer la fin de la formation des enduits n°2 et n°3 :

- Sur le plateau des Kibara, la cuirasse intermédiaire s'inscrit dans un profil transversal où se rencontre également, à quelques mètres plus haut, un affleurement de quartzite silicifiée (fig. 55). Cette silicification est toute superficielle et s'est donc produite dans le versant où elle est observée

aujourd'hui. Les quartzites ont été imprégnés de silice après une légère altération qui leur a assuré la porosité nécessaire. Une érosion (corrasion?) a ensuite porté les parties silicifiées en relief;

- Un champ de dunes (fig. 56) s'est développé sur le sommet des sables ocre. Ces dunes sont aujourd'hui fortement dégradées et apparaissent surtout sur les photos aériennes grâce à des différences d'humidité¹. Les blocs erratiques de grès en affleurement portent dans leur partie supérieure les marques de l'action du vent que sont les facettes légèrement incurvées à la façon d'un *Dreikanter* (fig. 57). La surface du grès a ensuite été recouverte d'un film de silice. Ces dunes couvrent une grande partie du plateau des Bianco; elles ont en effet envahi les zones extérieures à l'affleurement des sables ocre (Alexandre-Pyre, 1971, fig. 9, p. 38). Elles sont plus localisées sur le plateau des Kundelungu.

Ces deux manifestations d'un climat aride sont à rapprocher des vernis désertiques qui caractérisent la partie supérieure des enduits ferrugineux. Ces épisodes désertiques marquent la fin d'un cycle d'érosion par les eaux courantes et les formes de terrain sont alors figées en grande partie. Ce qui constitue le gage d'une meilleure conservation.

6.3. Caractères intrinsèques des niveaux de cuirasses

Il convient à présent de récapituler les caractères intrinsèques de chaque niveau de cuirasse, afin de pouvoir juger de l'appartenance d'un échantillon à un niveau déterminé, en dehors de toute considération de terrain: altitude ou position vis-à-vis d'un dépôt corrélatif.

6.3.1. Cuirasse la plus ancienne (n°1)

- Faciès: pisolitique ou bréchique-alvéolaire, le premier situé au-dessus du second. Quelquefois, intercalation d'un faciès "massif, qui consiste en l'imprégnation d'un dépôt sédimentaire ou d'une roche sous-jacente altérée;

¹ La conservation de formes éoliennes datant de la fin du Tertiaire paraît surprenant. Il est cependant confirmé par les faits suivants: 1) absence de dunes sur les replats quaternaires, également couverts de sable; 2) les dunes ont imposé leur direction aux têtes de vallée, lors de la reprise d'érosion quaternaire; 3) les dunes sont tronquées par le recul des versants, dû à cette même reprise d'érosion.

- Enduit rubané épais (souvent plus de 1 cm), participant au faciès pisolitique. Couleurs: ocre et brun foncé (7,5 YR6/8 et 3/4); couche externe rougeâtre (7,5 R) souvent éliminée par l'érosion;
- Eléments grossiers inclus: quartz, débris de grès ou d'arkose du Kundelunguien supérieur, aujourd'hui altérés et partiellement éliminés, rares grès polymorphes, dans le même état.
- Quartz: fortement corrodés;
- Etat de conservation: un grand nombre de blocs de cuirasse sont fortement érodés, laissant apparaître des coupes transversales dans les pisolithes et portant des traces d'altération superficielle en jaune (2,5 Y8/8).

6.3.2. Cuirasse intermédiaire (n°2)

- Faciès: gravillonnaire (les nodules sont enrobés dans un enduit), quelquefois alvéolaire. Sur substratum précambrien, apparaît un faciès vermiforme;
- Enduit: rubané. Couleur: ocre et brun foncé (peu différente de la cuirasse précédente), partie supérieure brun foncé ou rouge, toutes les deux brillantes. Épaisseur: de l'ordre de 5 mm pour l'enduit brun, plus mince, pour le rouge. L'enduit brun est couvert par une couche très mince d'enduit rouge, qui le masque complètement ou leur confère un renforcement de l'éclat. Réseau de crevasses avec sutures en relief;
- Eléments grossiers inclus: rares sauf proximité du cailloutis des plateaux;
- Eléments sableux: (sur les hauts plateaux) sable plus grossier que les sables ocre, souvent avec bel émoussé, fortement corrodé;
- Etat de conservation: lorsque l'enduit rouge, qui est le caractère distinctif de cette cuirasse, a été érodé en surface, il faut le chercher dans les diaclases mais non à l'intérieur des galeries, car cet enduit est probablement un vernis désertique.

6.3.3. Cuirasse principale (n°3)

- Faciès: nodulaire ou gravillonnaire, et vermiforme;
- Enduit: rubané. Couleur: ocre et brun foncé (voir cuirasse précédente), fréquemment recouvert partiellement par l'enduit ocre mat d'âge postérieur (n°4). Épaisseur: de l'ordre de 2,5 mm, bien développé dans les galeries de

termes. Crevasses avec sutures en relief bien développées;

- Eléments grossiers inclus: quelques grains de quartz;
- Eléments sableux: (sur les hauts plateaux) sable fin de type Kalahari;
- Quartz: état relativement frais.

6.3.4. Cuirasse fin-Tertiaire (n°4)

- Faciès: nodulaire et vermiculaire, jamais gravillonnaire, donc sans nodules enrobés dans un enduit et sans nodules pédorelictuels;
- Enduit: souvent constitué de deux couches: une brun foncé interne, une autre en surface, ocre mat (7,5 YR5/8);
- Etat de conservation: la cuirasse est peu consolidée et certains nodules se détachent aisément. Les grains de quartz sont très frais.

6.4. Histoire géomorphologique du haut Katanga méridional

Les cuirasses latéritiques ne sont pas irréversibles (Greene, 1950), mais elles ont la vie dure. Non seulement elles protègent des fragments de surfaces, parfois très anciennes, mais en outre, elles ponctuent des fins de cycle, une reprise d'érosion, dans les vallées, remettant ensuite tout en cause. Les dépôts corrélatifs, quant à eux, n'ont pas bénéficié du même degré d'immunité que les cuirasses. Ils constituent néanmoins des jalons précieux dans la reconstitution de l'histoire géomorphologique du haut Katanga méridional (figs.58 et 59).

6.4.1. Le dépôt des grès polymorphes

De la surface d'érosion sur laquelle se sont déposés les grès polymorphes, pourtant bien présente dans le Kwango, il ne subsiste absolument rien. Les nombreux vestiges de ces grès laissent cependant supposer qu'elle a bien existé. Les vestiges de grès polymorphes, partie de banc, blocs, voire esquilles, se retrouvent eux-mêmes dans les positions les plus diverses, soit en contact direct avec le substratum ancien, soit à différents niveaux dans les sables ocre qui se sont déposés bien après. Ces grès se retrouvent dans un état de fraîcheur très variable. La proximité d'un substratum, quelque peu riche en base, semble lui être néfaste, tandis qu'un environnement uniquement sableux lui prête une plus longue vie.

6.4.2. Le niveau de Kisiba Salabwe

Le démantèlement des bancs de grès polymorphes a dû se produire au cours d'une phase d'érosion qui a laissé peu de traces, si ce n'est les quelques hectares protégés par la cuirasse n°1, au sein de laquelle se retrouvent exceptionnellement quelques fragments de grès polymorphes. La partie supérieure de la cuirasse présente un faciès pisolithique, mais deux autres faciès y sont également présents: a) un faciès gréseux massif avec des intercalations irrégulières de lits silteux, le tout affecté de très nombreuses crevasses béantes, plus ou moins parallèles; b) un faciès alvéolaire d'allure fantomatique, où les parties en relief sont les oxydes de fer qui cimentaient le tout et les parties en creux des fragments de roche altérés et parfois complètement disparus. Certains buttes ont dû perdre leur chapeau pisolithique, voire plus encore.

Ces vestiges de la cuirasse n°1 sont peu nombreux et par ailleurs, d'extension très réduite. On en retrouve sur chacun des hauts plateaux, à des altitudes concordantes: Kibwe wa Sanga (Kundelungu) à 1771 m, Longe et Kisiba Salabwe (ouest et est des Bianco) à 1660 et 1690 m, respectivement, Nord de Mitwaba et Est de Lusinga (Kibara) à 1710 et 1770 m. Dans les deux derniers cas, ils sont légèrement en contrebas d'une large butte sommitale de quartzite. Dans le secteur de Lusinga, il est recouvert par des sables qui pourraient être des sables ocre.

Les zones recouvertes par les cuirasses sont de dimensions trop réduites pour qu'il soit possible d'émettre une supposition quant au site de leur formation. Un seul point est certain: la cuirasse est particulièrement riche en fer sur un substrat qui ne l'est pas. Une telle concentration ne peut s'imaginer que dans une partie basse de la topographie.

Le relief de la partie plissée du sud du haut Katanga comporte une série de buttes résiduelles qui dominent de quelque cent mètres les surfaces aplanies environnantes, par exemple, le mont Mukwene (125m), le mont Tumbwe (125 m), et le Kalukuluku (115 m). Des formations ferrugineuses se sont développées sur des venues filoniennes riches en oligiste. Elles ont un aspect proche du faciès alvéolaire et bréchique des cuirasses du Nord, avec cette différence que les roches prisonnières des cloisonnements ferrugineux sont moins altérées. S'il s'agit d'un témoin de la surface cuirassée n°1, cette absence d'altération importante pourrait être attribuée à une mise en relief précoce qui les aurait mises hors de portée.

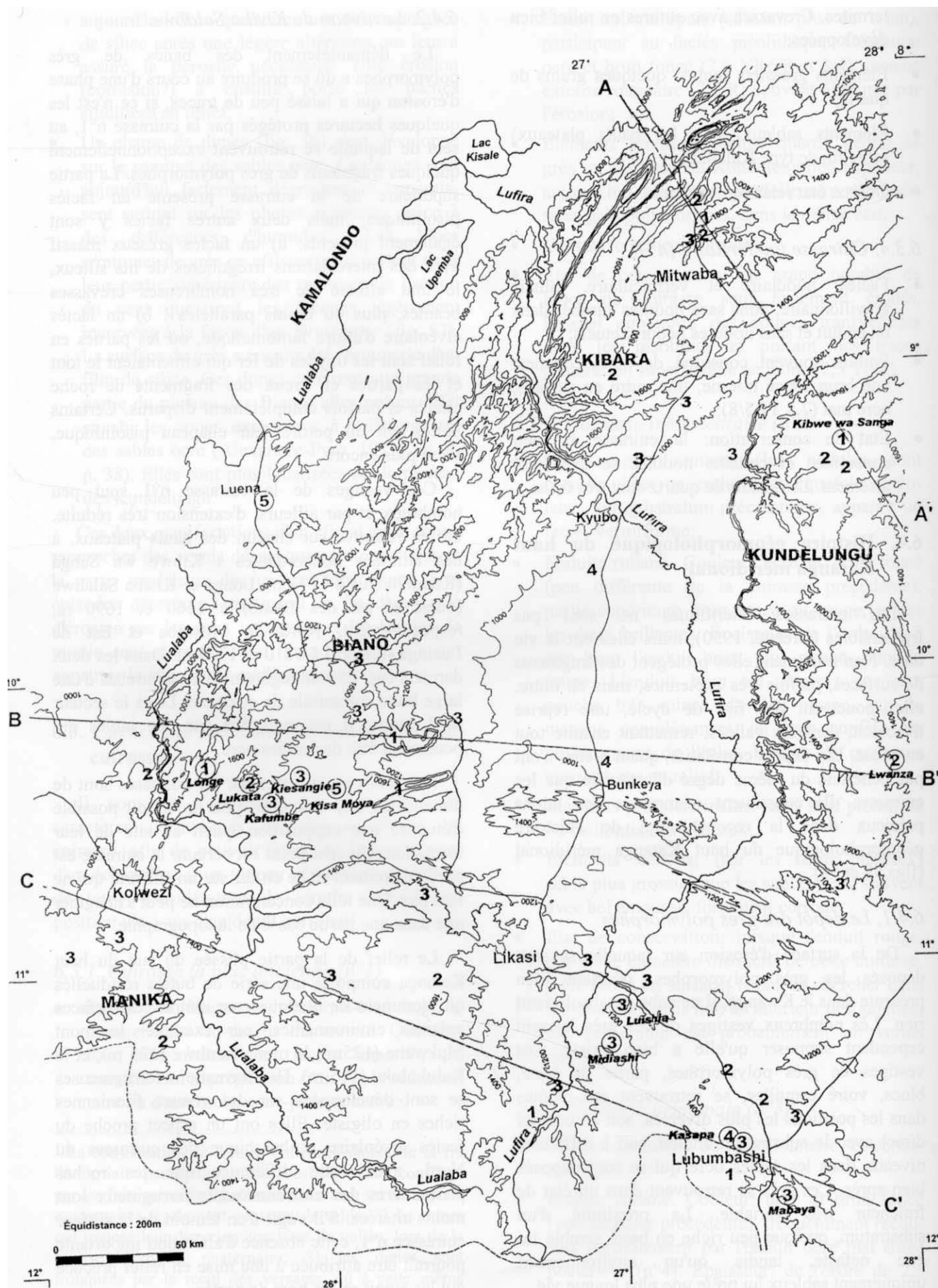


Fig. 58. - (Carte de la page 86 ci-contre). Répartition dans le haut Katanga méridional des échantillons de cuirasse observés, datés en fonction de différents critères dont la couleur des enduits superficiels.

Cuirasses latéritiques (signification des numéros sur la carte) :

1. pisolithiques ou structure associée (début du Tertiaire ?)
2. avec enduit rouge brillant (mi-Tertiaire ?)
3. avec enduit brun foncé à sutures (fin du Tertiaire)
4. peu cohérentes, avec enduit, peu épais (extrême fin du Tertiaire)
5. sur formation quaternaire

Pour les sites qui ont fourni les échantillons décrits dans le chapitre 4, le numéro est entouré d'un cercle et leur nom est indiqué.

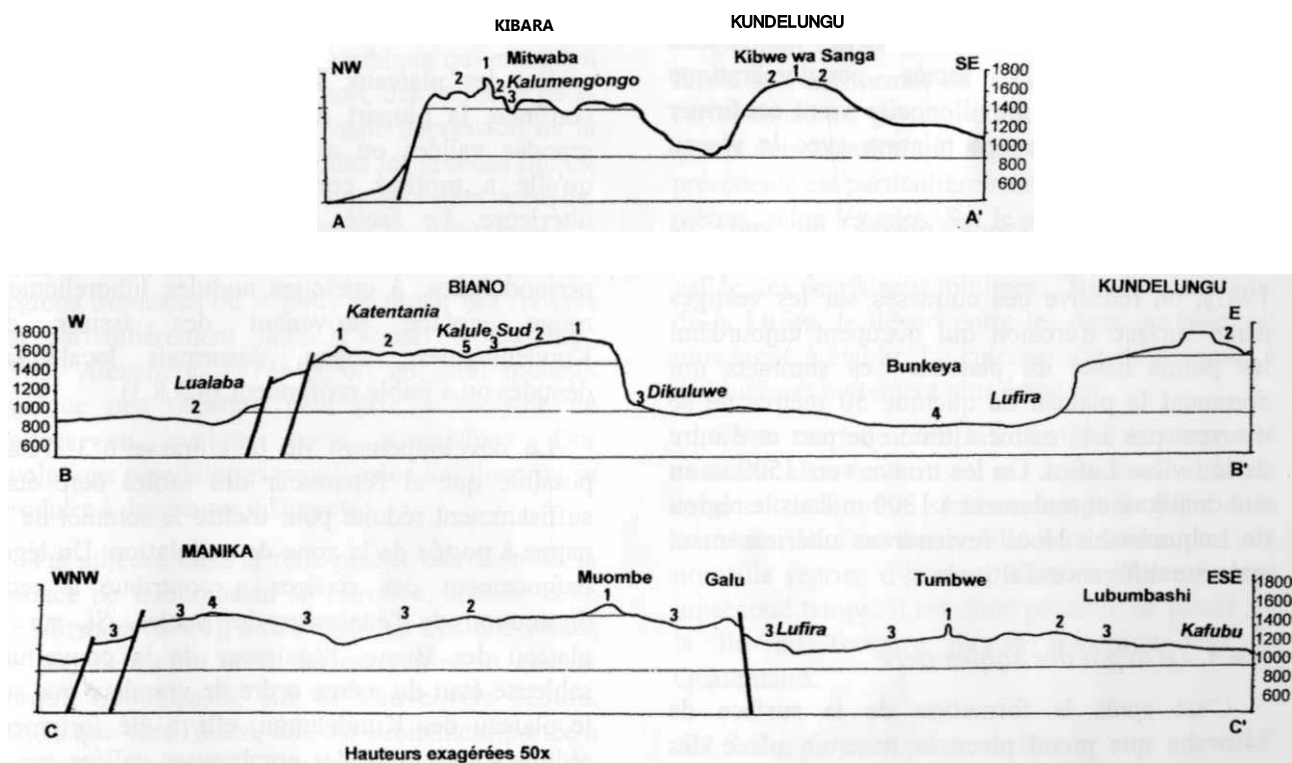


Fig. 59. - Profils tracés à partir de la carte précédente. La position de ces profils (A-A', B-B' et C-C') sont indiqués sur la carte. Les numéros des niveaux cuirassés sont identiques.

6.4.3. *Le cailloutis des plateaux*

Une nouvelle érosion a éliminé presque toute la surface associée à la cuirasse n°1. La nouvelle surface devait avoir un relief très modéré, modelé à partir du réseau de rivières responsable du dépôt d'un cailloutis. Ces alluvions traversent en écharpe le plateau des Kundelungu.

Cet épisode est toutefois problématique, la position stratigraphique du cailloutis étant mal assurée.

6.4.4. *La surface de Mitwaba*

Sur le plateau des Kundelungu, la cuirasse n°2 s'est formée, sans intermédiaire, sur le sommet du cailloutis des plateaux, emprisonnant la partie supérieure de celui-ci dans un faciès conglomératique. La cuirasse n°2 déborde toutefois ce dépôt et se retrouve, sur tous les fragments de la surface plane (1660) qui s'étend au nord de celui-ci, jusqu'au pied de la butte de Kibwe wa Sanga.

Sur le plateau des Bianco, on la retrouve, vers 1630 m, en marge de la partie centrale.

Sur les Kibara, les cuirasses de cet âge ont été portées en relief. Un bowal allongé (fig. 60) et un alignement des *bowé* ébauchent un réseau hydrographique. Un faciès conglomératique associé à un faciès gravillonnaire vient confirmer un site de formation en relation avec le réseau hydrographique.

Dans toute la zone plissée du sud, de Lubumbashi au plateau de la Manika (De Dapper, 1981), on retrouve ces cuirasses sur les vestiges d'une surface d'érosion qui occupent aujourd'hui les points hauts du plateau. Ces sommets qui dominent le plateau de quelque 50 mètres ne se trouvent pas à la même altitude de part et d'autre de la rivière Lufira. On les trouve vers 1500 m au sud de Likasi et seulement à 1300 m dans la région de Lubumbashi. Nous reviendrons ultérieurement sur cette différence d'altitude.

6.4.5. *Le dépôt des sables ocre*

C'est après la formation de la surface de Mitwaba que prend place la mise en place des sables ocre.

Dans le Kwango, là où ils n'ont pas été remaniés comme c'est visiblement le cas sur le plateau des Bianco, ces sables ne présentent aucune stratification. Leur mise en place a été attribuée à un alluvionnement "proluvial" de cours d'eau

diffus, dans un milieu sublacustre (De Ploey *et al.* 1968). L'action du vent, auquel on avait d'abord attribué leur formation, se réduit à un remaniement local ultérieur. L'épaisseur de la formation est de 80 m et est supposée aller en s'amenuisant vers l'est.

Dans toute la zone des hauts plateaux du Katanga, les sables ocre vont envahir une topographie qui s'est différenciée à partir de la surface de Mitwaba. En fait, on trouve les sables fins de cette formation sur les points les plus élevés des hauts plateaux, les Bianco et les Kundelungu entre autres. Ils y ont été portés par un remaniement éolien dont il a déjà été fait mention. Sur le plateau des Bianco, les champs de dunes s'observent à des altitudes de plus de 50 m supérieures à la base des sables (Alexandre-Pyre, 1971).

6.4.6. *La surface de Lubumbashi*

C'est avant le modelé dunaire que se place la formation de la surface en relation avec la cuirasse n°3; Celle-ci s'est développée, à la fois, sur les sables ocre des plateaux des Bianco et de la Manika et sur une grande partie des surfaces d'érosion de la zone plissée du sud, de Lubumbashi à Kolwezi.

Sur les plateaux sableux, cette cuirasse est confinée, la plupart du temps, aux rebords des grandes vallées ou aux têtes de petites vallées qu'elle a protégé contre une érosion verticale ultérieure. Le faciès gravillonnaire associe les concrétions sableuses aux larges enduits périnodulaires, à quelques nodules lithorelictuels rouge violacé provenant des assises du Kundelunguien moyen, désormais localement dénudés ou à faible profondeur (4.3.8.3).

Le développement de la cuirasse n°3 n'était possible que si l'épaisseur des sables ocre était suffisamment réduite pour mettre le sommet de la nappe à portée de la zone de nodulation. Un léger enfoncement des rivières a contribué à cette diminution de l'épaisseur des sables. Si, sur le plateau des Bianco, l'épaisseur de la couverture sableuse était du même ordre de grandeur que sur le plateau des Kundelungu, elle a été fortement réduite à proximité des nombreuses vallées qui, à l'époque, se sont légèrement encaissées dans les sables. Sur le plateau des Kundelungu, l'absence d'axes hydrographiques importants a permis la conservation de la couverture sableuse dans son épaisseur originelle et, par conséquent, a inhibé la formation des cuirasses du niveau 3.

Sur le Kundelunguien plissé du Sud, la cuirasse n°3 se retrouve, ici aussi, soit en marge des vallées, soit dans des têtes de vallée sauvegardées de l'érosion. Ces sites sont les parties basses de la surface de Lubumbashi sur lesquelles subsistent à l'état résiduel quelques sommets couronnés par la cuirasse n°2 (6.4.4).

La cuirasse n°3 couvre également une série de glacis, sur la périphérie de la pédiplaine de la Lufira, au pied des Bianco et des Kundelungu. L'altitude des points bas de ces surfaces, va de 950 m, au nord, à 1100 m, au sud. A hauteur de l'extrémité ouest du plateau des Bianco, la surface se trouve à une altitude de 1050 m. Sur le plateau, la même cuirasse est associée à une surface vers 1550 m. Une dénivellation de 500 m les sépare. Un transect dans les couches du Kundelunguien moyen et supérieur montre qu'aucune faille ne peut être invoquée. Il faut donc admettre que les surfaces se sont développées *simultanément*, à partir de deux niveaux de base distincts, dans des bassins différents, la Lufira, d'une part et les affluents du Lualaba de l'autre. Le premier est, aujourd'hui encore, peu différent de ce qu'il était à cette époque tandis que le second a été complètement modifié par les mouvements tectoniques quaternaires. Il n'est donc pas aisé de reconstituer le contexte topographique qui existait à cette époque. Quoi qu'il en soit, dès l'époque de la surface de Lubumbashi, la vaste dépression de la Lufira moyenne était déjà, dans les grandes lignes, à peu près semblable à sa configuration actuelle. Le développement de surfaces d'aplanissement à deux niveaux différents n'est possible que dans les régions tropicales où le pouvoir érosif des rivières est particulièrement faible (Tricart et Cailleux, 1965; Alexandre, 1974) et où un seuil rocheux quelque peu résistant peut être à l'origine de vallées en quelque sorte suspendues. Des évolutions parallèles et simultanées ont donc pu se produire à des étages différents.

Par ailleurs, dans la zone plissée méridionale, la surface de Lubumbashi se retrouve, comme celle de Mitwaba (6.4.4), à des altitudes très différentes de part et d'autre de la rivière Lufira. A l'est et jusqu'à Lubumbashi, elle se trouve vers 1250m, tandis que vers l'ouest, elle est subitement portée à 1450m, au sud de Likasi et se maintient à ce niveau jusque dans la région de Kolwezi (De Dapper, 1981). Il semble qu'une telle dénivellation, qui affecte deux surfaces, ait été provoquée par un déplacement vertical le long d'un système de failles radiale orienté N-S et situé aujourd'hui sur le versant gauche de la Lufira. Cette interprétation est

étayée par les observations suivantes (Alexandre et Alexandre-Pyre, 1987) :

- Il existe un palier, de topographie assez plane, à une centaine de mètres en contrebas de la partie occidentale. Les bords internes et externes en sont assez nets et la cuirasse n°3 y est largement développée. Une telle disposition est assez semblable à celle qui existe à l'ouest
- de Kolwezi, en marge du graben du Kamolondo (De Dapper, 1981);
- La partie soulevée est nettement plus disséquée que la partie orientale, alors que tous les autres facteurs restent égaux, nature du substratum et éloignement du niveau de base;
- Au pied du palier précité, se présente une forme de terrain inusitée pour la région: un talus couvert de nombreux petits cailloux de quartz qui peut être une réponse au jeu de la faille.

A l'exception de ces modifications dues à la tectonique, les grandes lignes du relief du haut Katanga méridional apparaissent déjà avec leurs caractères propres.

6.4.7. La surface de Kyubo

L'enduit qui caractérise la cuirasse n°4 ne s'est formé sur des formes de terrain propres que dans certaines zones particulières. En effet, il semble que la dénivellation qui sépare cette cuirasse de la précédente est particulièrement faible, entre 5 et 25 mètres, selon les sites. Sur le plateau des Bianco, où elles se présentent, toutes deux, en rebord de vallée, les écarts sont minimes. Dans la pédiplaine de la Lufira, le départ entre les deux surfaces est plus facile à établir. La cuirasse n°4 est associée à des surfaces nettement plus étendus.

Cette cuirasse est la dernière à avoir été couverte d'un enduit et ses caractères atténués évoquent la fin d'un système morphologique et la transition vers un autre. Elle sera suivie par une nouvelle reprise d'érosion, assez vigoureuse dans un second temps. Il est donc possible de placer ici la fin du Tertiaire ou sa transition vers le Quaternaire.

6.4.8. Les formes quaternaires

Le Quaternaire a été marqué par un événement tectonique très important: Le soulèvement du haut Katanga vis-à-vis de la partie orientale de cette région, le plateau de Kamina. Le Quaternaire aurait cependant commencé bien auparavant (Cahen, 1954, p. 468). Dans les secteurs peu touchés par le



Fig. 60.- Bowal au nord de Mirwaba. La cuirasse porte des traces de l'enduit superficiel rouge (n°2, surface de Mirwaba).



Fig. 61.- Vue partielle de la partie occidentale de la pédiplaine de la Lufira. A l'avant-plan, plaine de la Lufira avec un cours abandonné dont les levées naturelles sont soulignées par la végétation. Dans le plan moyen, glacis composite dont la partie supérieure est couverte de cuirasses couvertes de l'enduit brun foncé (n°3, surface de Lubumbashi), tandis que les parties basses constituent un glacis rénové assorti de cuirasse avec l'enduit ocre clair (n°4, surface de Kyubo). A l'arrière-plan, le pied du versant oriental du plateau des Kundelungu (cliché L. Lemaire).

soulèvement, on note déjà différentes retouches. Dans la partie supérieure de la Kafubu, s'est développé un niveau d'aplanissement couvert de concrétions latéritiques et de gravier quartzeux, à quelque 50 m sous les surfaces cuirassées (Sijs et Schmitz, 1959). Une première série de glacis se sont développés au fond de la reculée de la Pande (Alexandre-Pyre, 1971). Toutefois, il n'est pas toujours aisé de faire le départ entre ce qui a précédé et ce qui a suivi les mouvements tectoniques.

Tout d'abord, ces derniers ont eu des effets secondaires au sein du haut Katanga, fracturant, comme il a été vu, la surface n°3 et surélevant les secteurs de la Kando et de la Manika. Le contrecoup le plus important de ce soulèvement est l'enfoncement saccadé des rivières, produisant au passage des terrasses. Une partie des dépôts de terrasse ont leur partie grossière soudée par le fer, présentant ainsi un faciès conglomératique. Pas mal d'alluvions fluviales ont, également, été intégrées dans des stone-lines (3.2.3).

On compte jusqu'à cinq niveaux de terrasse (Mortelmans, 1950). Presque toutes contiennent des restes de l'activité humaine. C'est en se fondant sur les datations de ceux-ci que Cahen (1954) a daté le soulèvement tectonique de la seconde moitié du Quaternaire.

Outre les terrasses fluviales, le Quaternaire est responsable d'autres formations ou formes de terrain :

- Les nappes alluviales imbriquées du centre de la pédiplaine de la Lufira (fig. 61);
- Les glacis en piémont sur le pourtour de cette dernière;
- Des colluvions et dépôts de ruissellement, tant sur les sables que sur la roche précambrienne;
- Les stone-lines et les terres de couverture (3).

6.5. Comparaison avec l'Afrique de l'Ouest

6.5.1. Les surfaces et niveaux de l'Afrique de l'Ouest

Des similitudes dans la succession de cuirasses selon les caractéristiques des enduits ont été observées non seulement en Afrique et au Brésil, mais également aux Indes. Toutefois, c'est en Afrique de l'Ouest que les niveaux cuirassés sont les mieux documentés et les plus comparables à ceux du haut Katanga méridional.

Les niveaux supérieurs, au nombre de trois, sont bauxitiques et presque uniquement cantonnés dans les hauts reliefs du sud-ouest: Fouta Djallon et mont Nimba. Seul, le dernier de ces niveaux est plus largement répandu et forme, avec les surfaces inférieures, un étagement de quatre niveaux cuirassés (Michel, 1973). Cet étagement est particulièrement bien développé en Côte d'Ivoire. Il était intéressant de les confronter aux niveaux et surfaces identifiés dans le haut Katanga. La tâche n'était pas des plus aisées, car, en Côte d'Ivoire, hormis la cuirasse bauxitique, la nature des enduits externes n'a guère attiré l'attention et n'a, par conséquent pas été notée.

Le tableau 1 (p. 96) donne les correspondances qui pourraient être établies : 1) Le niveau le plus élevé, la surface de Fantofa, est bauxitique tandis la cuirasse n°1 du Katanga ne l'est pas. Mis à part ce caractère, très important certes, bon nombre de caractéristiques sont communes aux niveaux supérieurs des deux régions (Boulangé *et al.*, 1973):

- La cuirasse est épaisse;
- La partie supérieure de la cuirasse est de faciès pisolithique. L'enduit rubané est épais (jusqu'à 15 mm); il est affecté de fissures radiales et concentriques, ainsi que de stratification entrecroisée;
- Les grains de quartz sont fortement corrodés et les fragments de roche emprisonnés dans l'enduit sont également fracturés et, aujourd'hui, très altérés;
- Le faciès pisolithique est associé soit à un faciès massif, soit à un faciès bréchiq (alvéolaire d'altération) (Grandin, 1976, p. 46).

La similitude est grande entre les deux niveaux cuirassés, n'était l'absence d'alumine libre. Il existe, toutefois, dans les enduits des hauts niveaux du Katanga, une certaine proportion d'aluminium (5.1.3.2).

2) Du niveau intermédiaire de la Côte d'Ivoire, nous ne savons pas s'il présente également des vestiges d'enduit rouge. Toutefois, les observations suivantes ont été effectuées (sauf contre-indication, d'après Boulangé *et al.*, 1973):

- Les matrices rouges y sont largement développées, avec un rapport hématite/goethite égal à l'unité (Grandin, 1976, p. 54);
- Beaucoup de nodules (litho- et pédorelictuels) sont enrobés d'un enduit ferrugineux peu épais (<1 mm);



Fig. 62.- Marge d'une dalle latéritique, débitée en blocs par le travail de sape des termites.



Fig. 63.- Partie supérieure d'une cuirasse où même l'enduit superficiel a été érodé en présence d'un horizon humifère.

- Au faciès gravillonnaire, vient se joindre un faciès vermiforme où les parois des tubules sont eux-mêmes couverts d'un enduit épais de 1 à 4 mm, présentant parfois l'agencement plus complexe d'un faciès lobé (4.3.2.5). L'enduit rubané des galeries et des nodules serait plutôt brun foncé plutôt que rouge. Toutefois, pour les cuirasses du Katanga en tous cas, il convient de faire le départ entre les couches de la base de l'enduit qui sont brunes et les pellicules externes qui sont les seules à être rouges;
- De gros grains de quartz y sont fortement corrodés.

Au Katanga, le faciès lobé est surtout bien développé dans la cuirasse n°3.

3) Sur le niveau du haut glacis, les points communs des cuirasses avec celles du niveau correspondant du Katanga (n°3) sont les suivantes :

- Grain de quartz frais;
- Faciès gravillonnaire ou nodulaire, c'est-à-dire formé d'éléments avec ou sans un enduit rubané;
- Galeries étagées par un enduit rubané brun foncé d'une épaisseur inférieure à 2mm.

En outre, comme à la Kasapa (4.3.7.1), ces cuirasses de résistance moindre que les deux précédentes peuvent se transformer marginalement en un champ de débris susceptible de s'intégrer dans une stone-line (Grandin, 1976, p. 63).

4) Enfin, le niveau du moyen glacis est associé à une cuirasse de peu de résistance, tout comme la cuirasse ultime du Katanga :

- L'induration est faible;
- Les grains de quartz sont très frais;
- Les galeries ne présentent pas d'enduit;
- Il existe des fissures autour de certains nodules, témoignant de leur manque de solidarité vis-à-vis de l'ensemble.

6.5.2. Position stratigraphique des cuirasses

Dans un travail récent, Tardy et Roquin (1998) ont revu, avec bonheur pensons-nous, la stratigraphie des niveaux cuirassés de l'Afrique de l'Ouest. Ils ont apporté une modification importante dans l'âge probable que Michel avait attribué à certains de ces niveaux dans sa magnifique synthèse (1973). Ce dernier, par comparaison avec les terrasses du fleuve Sénégal, avait attribué un âge quaternaire à tous les niveaux de glacis, y compris le haut et le moyen glacis.

Ceci créait une distorsion sérieuse vis-à-vis de la série observée au Katanga où tous les niveaux cuirassés sont considérés comme tertiaires (Alexandre-Pyre, 1971; Alexandre et Alexandre-Pyre, 1987). Il convient ici de bien faire la distinction entre surface cuirassée et terrasse fluviale indurée par le fer qui, elles sont dénuées de tout enduit.

En se fondant sur des arguments géochimiques et sur la datation absolue de cuirasses du même niveau au Mali et au Burkina Faso (voir plus loin), Tardy et Roquin ont démontré que Haut-glacis et Moyen-glacis appartiennent bien au Tertiaire.

Par ailleurs, le Continental Terminal constitue le dépôt corrélatif de l'Afrique de l'Ouest qui pourrait venir en aide à une datation relative des niveaux cuirassés. Malheureusement, comme les sables ocre, il n'a pu être situé dans l'échelle stratigraphique générale. Le Continental Terminal pourrait dater soit de la fin de l'Eocène, soit de l'Oligo-miocène. La surface de Fantofa plonge sous le Continental Terminal, tandis que le Niveau Intermédiaire s'est développé à ses dépens.

En prenant en compte les altitudes des différents niveaux et en effectuant une estimation vraisemblable de la vitesse d'enfoncement, Tardy et Roquin (1998) ont proposé les datations suivantes que, par l'intermédiaire de la table de conversion donnée plus haut, nous osons étendre au haut Katanga (tab. 2).

Une telle estimation cadre avec l'âge probable donné aux grès polymorphes (Paléogène) et aux sables ocre (Néogène).

Des datations radiométriques ont été tentées (Tardy et Roquin, 1998, p. 307).

Un gisement manganésifère¹ du Sud-Mali inscrit dans une topographie du type haut-glacis serait miocène (Vasconcelos, 1992).

Un gisement manganésifère du Burkina Faso rattaché au niveau intermédiaire a donné un âge de 50 Ma (Hénocque *et al*, 1996, in Tardy, 1998), c'est-à-dire l'Eocène.

La surface Sul-Americana qui correspondrait à la surface Africaine (selon nos observations, ces deux surfaces seraient associées à des cuirasses à enduit rouge et correspondraient donc à la surface

¹ Toutes ces datations mesurent l'âge de l'altération de minerais de manganèse. Les cryptomélanes qui en résultent, comportent du potassium de substitution sur lequel s'opère une datation K⁴⁰-Ar⁴⁰.



Fig. 64.- Partie d'une cuirasse nodulaire sableuse complètement déferrisée sous l'effet des acides humiques provenant du remblaiement d'un ancien vallon situé à quelque 2 m au-dessus, directement à la verticale. Le remblaiement s'est produit au cours d'une phase humide du Quaternaire (voir figure 5, où l'emplacement de cette cuirasse est indiqué).



Fig. 65.- Fond de vallée à peine incisée où la végétation courte souligne l'extension de la cuirasse. Partie méridionale du plateau des Kundelungu (cliché L. Lemaire).

intermédiaire), comporte dans ses sols des produits d'altération manganésifères pour lesquels des datations entre 70 et 40 Ma ont été fournies. Par contre, pour la surface directement en contrebas (haut glacié?), la datation est seulement de 10 à 6 Ma (Miocène?).

Les datations radiométriques auraient donc tendance à livrer des âges plus anciens que ceux qui ont été supputés. Les disparités pourraient être dues à la difficulté de s'assurer que l'échantillon sur lequel les mesures ont été faites, est bien contemporain de la cuirasse.

6.6. Dégradation

6.6.1. Action mécanique

Les mécanismes les plus souvent cités sont la pression exercée par les racines des arbres et une élévation de température. La couleur sombre des cuirasses est favorable à cette dernière, à condition que la cuirasse soit exhumée.

Le travail de sape paraît cependant beaucoup plus efficace. Après mise en relief de la cuirasse par encaissement de la vallée, les terrains sous-jacents, plus tendres, sont la proie des agents d'érosion qui s'attaquent aux versants, tels que le ruissellement, les glissements de terrain, éventuellement la suffosion. Des blocs de cuirasse se détachent en suivant la pente.

L'enfoncement des vallées n'est toutefois pas nécessaire pour que le sapement commence à se produire. Le soutirage du matériel relativement meuble situé sous la cuirasse est effectué par les termites si le substratum est argileux (fig. 62), par une espèce de suffosion lorsque ce dernier est trop sableux (De Dapper et Malaisse, 1979).

Une cuirasse qui occupait le fond d'une dépression allongée, se transforme ainsi par le jeu de l'érosion superficielle et des remontées de terre par les termites, en une butte plus ou moins étroite, bordée de blocs de cuirasse, de taille de plus en plus petite. Le centre de la cuirasse paraît intact, mais les diaclases qui s'y développent sont eux-mêmes le signe d'un affaissement sur un terrain miné (fig. 62).

Une cuirasse peut donc descendre sur place et se retrouver à un niveau nettement inférieur. En tenant compte des faits suivants: 1) l'épaisseur des terres de couverture est de 2 m en moyenne, 2) cette épaisseur représente l'importance de la descente sur place, 3) ces terres de couvertures ont dû être érodées plusieurs fois au cours du

Quaternaire et chaque fois remplacées, 4) le nombre de cycles climatiques seraient au nombre d'une dizaine pour le Quaternaire (les terrasses, au nombre de 5, se sont produites après le soulèvement du haut Katanga qui s'est produit assez tard dans le Quaternaire), une estimation minimale de la descente d'une cuirasse de la fin du Tertiaire pourrait être faite. Elle pourrait atteindre et même dépasser dans certaines conditions les 20m. Des estimations faites par Eschenbrenner (1987, p. 409) arrivent à des valeurs du même ordre de grandeur pour la descente, sur place, de concrétions à partir du haut glacié, qui est l'équivalent de notre surface de Lubumbashi.

Ce travail de morcellement de la cuirasse peut aboutir à une désintégration de la cuirasse. Les fragments iront nourrir la partie supérieure d'une stone-line. Ils forment rarement la totalité de celle-ci.

Le problème a été envisagé de la transformation de ces débris, voire de cette stone-line, en matière première pour une nouvelle cuirasse, qualifiée de cuirasse secondaire. Nous n'en avons pas rencontré dans le haut Katanga.

6.6.2. Action chimique

Au Katanga, les seules attaques chimiques qui puissent être observées sur le terrain, sont le fait des composés de la matière organique du sol.

6.6.2.1. Attaque superficielle

Un amincissement progressif des terres de couverture met la surface de la cuirasse à portée de l'agression des composés organiques.

La couche humifère a une épaisseur de quelques décimètres sous la forêt claire (miombo) et peut atteindre plus d'un mètre sous la forêt dense, mais l'érosion des sols y est pratiquement nulle. Un milieu en marge des sols hydromorphes est donc plus favorable à l'action de ces composés organiques. L'imperméabilité "en petit" des dalles latéritiques facilite l'installation d'un milieu un tant soit peu hydromorphe. Dans de nombreux cas, les dommages subis par les cuirasses peuvent être constatés mais très souvent les conditions dans laquelle s'est produite l'agression ont disparu.

Lorsque le contact avec l'humus subsiste, les dégâts occasionnés par ce dernier sont quelquefois impressionnants. Même les enduits superficiels, dont nous avons vu la résistance mécanique, sont rongés par les composés organiques (fig. 63).

6.6.2.2. Attaque en profondeur

La rétrogradation complète d'une cuirasse en profondeur n'a pu être observée qu'une seule fois, dans des conditions tout à fait exceptionnelles.

Dans un petit vallon du plateau des Bianco, la Kisa Moya, une érosion artificielle a mis à jour un bloc de cuirasse sableuse complètement déferrisée. La structure de son faciès nodulaire est entièrement préservée. Les circonstances de cette déferrisation sont les suivantes. Dans les terrains surincombants, un ravinement s'est produit au cours du Quaternaire (fig. 5). A la suite d'une variation climatique, le ravin a été remblayé par des sédiments riches en matières organiques, dans un milieu apparemment submarécageux (Alexandre-Pyre, 1971, p. 129). Les acides organiques ont décoloré les terrains encaissants sous-jacents ainsi que le bloc de cuirasse. Ce dernier a, toutefois, gardé une certaine cohérence (fig. 64).

Les conditions nécessaires à une telle rétrogradation sont donc un milieu très poreux et la présence de produits humiques en suffisance. Pour extraordinaires qu'elles soient dans le haut Katanga, ces conditions pourraient être plus fréquentes dans des régions de climat plus humide où la déferrisation des bauxites est monnaie plus courante (Tardy, 1993, p. 264).

A plus petite échelle, des nodules lithorelictuels amenés avec des colluvions dans un fond où règne un sol hydromorphe, rétrogradent et deviennent pulvérulents.

6.6.2.3. Attaque interne

Dans la description des différents faciès de cuirasse, des dégradations internes ont été rencontrées.

- Des décolorations qui sont des déferrisations partielles cernent certains nodules ou maculent la matrice à partir d'une galerie encore présente ou disparue par effondrement;
- Les galeries de termites elles-mêmes ont été creusées dans une matrice relativement riche en fer et remblayée, après un dernier temps, par un matériel dont la couleur claire dénonce la pauvreté en fer;
- Les fragments de roche ou les minéraux assez fragiles, qui ont été englobés dans la cuirasse lorsqu'ils étaient à l'état frais, ont été depuis lors plus ou moins décomposés;
- Dans ce dernier cas, le fer qui les entourait garde sa rigidité mais est cependant fragilisé vis-à-vis de toute attaque mécanique.

Il existe d'autres attaques qui se produisent à une plus fine échelle et qui demanderaient des moyens d'investigation importants.

Tableau 1. - Correspondances entre surfaces et niveaux cuirassés de la Côte d'Ivoire et du Haut Katanga

	Côte d'Ivoire	Haut Katanga
1	Surface de Fantofa: niveau bauxitique	Cuirasse pisolithique
2	Niveau intermédiaire	Cuirasse à enduit rouge brillant
3	Niveau haut-glacis	Cuirasse à enduit brun foncé brillant
4	Niveau moyen-glacis	Cuirasse à enduit ocre mat

Tableau 2. - Datations de la Côte d'Ivoire étendues au haut Katanga

Côte d'Ivoire	Déni velée(m)*	Âge (en Ma)	étage	Katanga	Déni velée (en m)
Moyen glacis	100	5	Pliocène	Ocre mat	30
Haut glacis	150	20	Miocène	Brun foncé	20
Niveau intermédiaire	300	40	Eocène-Oligocène	Rouge	50
Fantofa	170	65	Début Eocène	Pisolithique	120

* Les dénivellations sont mesurées par rapport au niveau directement inférieur et, pour la première, par rapport aux premières terrasses.

7. L'ENVIRONNEMENT

La plupart des cuirasses étant assez anciennes, la restitution des conditions dans lesquelles elles se sont formées demande quelquefois une grande circonspection. Il faut surtout éviter de se laisser influencer par l'environnement actuel.

7.1. Le site

A l'heure actuelle, les cuirasses se trouvent dans les sites les plus divers :

- Au sein ou en marge de surfaces d'érosion sommitales;
- Sur des glaciés de piémont;
- Sur les interfluvés d'un relief disséqué;
- Dans des fonds de petite vallée;
- Sur des versants plus ou moins raides;
- Au sommet de colline.

Les positions que les cuirasses occupaient au moment de leur genèse étaient moins variées. Le cadre général était, en général, une surface d'érosion aux pentes faibles orientées vers les rivières. Bon nombre de cuirasses occupaient précisément le bas de ces versants et se prolongeaient éventuellement jusqu'au centre de la vallée.

Dans les vallées importantes, l'érosion verticale a éliminé le lit de la rivière et ses abords immédiats. La trace des conditions qui existaient au moment de la formation de la cuirasse, est définitivement perdue. Force est donc de recourir au modèle des petites vallées où le cours d'eau peut avoir disparu sans trop modifier l'environnement.

Il existe de très beaux exemples de fonds de vallon que la protection de la cuirasse et la faible incision du cours d'eau ont conservés dans un état très proche de celui qui existait lors de la genèse de la formation ferrugineuse (fig. 65). Ce site n'a rien pour nous surprendre, car il correspond aux impératifs de certaines phases de l'élaboration de la cuirasse :

- Les horizons tachetés où se façonnent les nodules demandent une nappe peu profonde (2.3.4);
- Le lessivage oblique qui se révèle, dans certains cas, sinon absolument nécessaire, du

moins bien utile pour rétablir un bilan en fer légèrement déficitaire;

- La migration occasionnelle de gravillons sous l'action plus ou moins complexe du ruissellement;
- L'arrivée d'eau chargée de fer en surface, matière première des différents enduits.

En marge des grandes vallées, les vestiges de la cuirasse ne subsistent, donc, que dans le haut du versant et se maintiennent sur une certaine distance, sous le plateau. Ces parties de cuirasse ne se prolongent pas très loin sous le centre du plateau {Feuer (1956), cité par Maignien (1966, p.107)}. Les puits de prospection creusés dans la surface de Lubumbashi ont montré que les cuirasses ne couvrent que 14% de la surface, malgré une présence plus fréquente en bordure de plateau (Aloni *et al.*, 1987).

En fait, certaines cuirasses de vallons secondaires peuvent disparaître sous les terres de recouvrement amenées par les termites. Dans la zone de Lubumbashi, cet apport superficiel, qui dure par ailleurs jusqu'aujourd'hui, peut dépasser les 5 mètres et les cuirasses ne sont repérées que grâce aux puits de prospection.

Au lieu d'être ainsi enfouies, certaines cuirasses des petits vallons peuvent être dénudées et même être mises en relief par l'érosion. Elles forment alors des dalles dont les marges, de bas de versant en faible pente, sont transformées en flancs de colline parsemés de blocs de cuirasse par le travail de sape des termites (fig. 62). C'est une inversion de relief, plus discrète, certes, que celle des *bowé*.

Le *bowal*, à la différence des exemples miniatures qui viennent d'être décrits, demande une profonde incision du relief par un système de grandes rivières qui, souvent, subsistent encore. L'alignement de collines, quelquefois sinueuses, accredit la thèse de l'ancien fond de vallée porté en relief (fig. 60). La présence d'un faciès conglomératique vient le confirmer.

Plusieurs auteurs ont, cependant, avancé que des cuirasses ont également pu apparaître dans les interfluvés sur lesquels ils sont actuellement perchés, de Swardt (1964) pense que les lanières cuirassées qu'on y observe, se sont formées *in situ*. Pour Leprun (1979, p. 192), une telle disposition est le résultat d'une accumulation relative au sein d'une formation autochtone, l'accumulation relative exigeant un site bien drainé, c'est-à-dire en position haute. Ce mécanisme se conçoit aisément pour un

substratum riche en fer, ce qui est rarement le cas dans le haut Katanga. Avec des teneurs plus faibles, les concrétions demandent une concentration localisée du fer (nodulation) associée impérativement à la nappe. Or une nappe temporaire perchée serait inhibée par le drainage exercé par les galeries de termites, creusées en période sèche.

Sur les glacis, les cuirasses peuvent se disposer selon différentes dispositions :

- Le long des vallons faiblement encaissés, comme sur les surfaces d'érosion sommitale (Grandin, 1976, fig. 13, p. 40);
- Sur tout le glacis ou seulement dans la partie supérieure lorsque les apports de fer hérité de la cuirasse supérieure, sont insuffisants (Pélissier Rougerie, 1953; Beudet *et al.*, 1977);
- Dans la partie basse du glacis, à proximité d'un plus grand axe hydrographique.

Le premier et le troisième cas ne sont qu'une variante du principe du conditionnement des cuirasses par les fonds de vallées faiblement encaissées. Le second dépend de l'arrivée en couverture de produits ferrugineux allochtones, débris de cuirasse ou de roche au fer abondant. Dans le haut Katanga, toutes les cuirasses développées sur glacis se trouvent sur les parties hautes de la vaste pédiplaine de la Lufira, tant au pied des Bianco que des Kundelungu. Le glacis se trouve 500 m plus bas que le plateau (6.4.6), dont le rebord n'est pas formé d'une cuirasse latéritique plus ancienne, mais de grès ou d'arkoses du Kundelungu supérieur. C'est à peine si quelques débris de la cuirasse du plateau se retrouvent dans le versant. Les cuirasses jalonnent donc, selon toute vraisemblance, une série de vallons, jadis légèrement encaissés dans le glacis. Les terres de couverture et l'absence de puits sont à l'origine du léger doute qui peut subsister.

7.2. Le climat

7.2.1. Introduction

L'occurrence d'un climat déterminé ne peut être observée directement. Il faut donc la déduire des répercussions que ce climat a produites sur d'autres éléments de l'environnement, tels que le développement d'un sol, la formation d'un dépôt, le modelé d'une forme d'érosion. Une part

d'interprétation plus grande encore que pour la restitution du site intervient donc dans l'identification du ou des climats du passé, qui ont présidé à l'élaboration d'une cuirasse déterminée.

Comme on l'a vu antérieurement, les cuirasses latéritiques couvertes d'un enduit, c'est-à-dire la majorité d'entre elles, dateraient du Tertiaire. Notre démarche sera donc d'essayer de rapprocher les conditions (mal connues) qui ont régné au Tertiaire de celles (un peu mieux connues) du Quaternaire afin de déterminer les éléments qui ont facilité ou inhibé la formation de cuirasses. Le climat est visé, mais il n'est pas le seul en cause. L'encaissement des rivières, aidé ou non par la tectonique, a également sa part de responsabilité, notamment lorsqu'il modifie, comme le climat peut le faire, le niveau de la nappe aquifère.

7.2.2. Le Quaternaire

Au cours du Quaternaire, se sont produites une série d'oscillations climatiques autour d'une position moyenne qui pourrait être le climat actuel, avec de part et d'autre, des phases plus humides et plus sèches. Un autre phénomène dont il faut tenir compte, car il va modifier les indices, est l'incision concomitante du réseau hydrographique. Cette incision n'a pas été uniquement le contrecoup des grands mouvements tectoniques qui se sont produits de part et d'autre du système de failles du Kamolondo. Il a aussi été le fruit d'un pouvoir érosif accru des rivières, lui-même sous la dépendance du climat.

En effet, tout le bassin de la Lufira dépend du niveau de base des chutes de Kyubo. Ces chutes sont, aujourd'hui, suivies, vers l'aval, d'un cañon taillé dans les grès de Kyubo. Ce cañon s'est développé à partir de la cuesta, située plus au nord-ouest et soutenue par ces mêmes grès. Le cañon est le résultat du recul de la chute, recul dû au sapement des roches tendres sous-jacentes. L'intensité de l'affouillement est à mettre en relation avec l'énergie de la rivière. C'est donc un débit accru de la rivière qui a provoqué ce recul, au cours du Quaternaire.

Ces débits supérieurs à ceux du Tertiaire constituent un premier effet à porter en compte des *phases humides*, dans le cadre des oscillations climatiques du Quaternaire. Ces phases sont responsables des phénomènes suivants :

- Les rivières sont plus actives, non seulement dans les chutes, mais aussi dans les rapides où

se creusent des marmites d'érosion, marmites où se façonnent quelques galets particulièrement bien arrondis;

- Dans les biefs plus calmes, au contraire, l'érosion est remplacée par une accumulation de sédiments. Les nappes alluviales sont composées de sédiments fins, bien stratifiés (la saturation en eau écarte les termites et inhibe la bioturbation), riches en matières organiques. Ces alluvions ne subsistent, à l'heure actuelle, que dans la terrasse la plus basse, au-dessus des graviers sous berge. La fragilité de ce dépôt vis-à-vis de l'érosion, laisse supposer que les terrasses antérieures du même type ont presque toujours disparu. Toutefois, quelques restes fossilisés de ces terrasses ont été retrouvés (Alexandre-Pyre, 1971, p. 111);
- Dans la pédiplaine de la Lufira, ces mêmes nappes alluviales sont imbriquées l'une dans l'autre, du fait de la quasi-constance du niveau de base (Van Wambeke et Van Oosten, 1956);
- En marge des plaines alluviales, se sont développées de larges zones submarécageuses que les termites bâtisseurs ont dû évacuer, abandonnant à l'érosion leurs constructions épigées (Streel, 1963);
- Les vallons secondaires sont eux-mêmes envahis par des dépôts bien classés, très riches en humus (Alexandre-Pyre, 1971, p. 129) et nous avons déjà vu l'effet de cet humus sur une cuirasse sableuse malencontreusement placée au-dessous (6.6.2.2);
- Une altération importante du substratum a dû se produire sous les surfaces d'érosion. Un manteau d'altération relativement épais (souvent plus de 20 m) existe à l'heure actuelle et ne peut être que le résultat de l'action des phases les plus humides de l'histoire géomorphologique.

Les *phases* les plus *sèches* du Quaternaire vont remplacer la biostasie des phases qui précèdent, par l'effet dynamique d'une rhexistasie :

- L'érosion des sols s'attaque aux formations meubles contenant des produits ferrugineux, en abandonnant sur les versants les éléments grossiers qui vont s'intégrer dans la stone-line;
- Au pied des versants raides, dans les secteurs où une nouvelle incision des rivières s'est produite, des glacis de piémont vont se reproduire, à l'identique des modelés tertiaires,

à un niveau inférieur (Alexandre-Pyre, 1967, p. 15);

- Au bas des versants, l'afflux de matériel nourrit des cônes de déjection, voire des nappes d'épandage (les dépôts *proluviaux* sableux de DePloey, 1965);
- Des petits vallons sont remblayés soit par une brèche limoneuse (Mbenza, communication orale), soit par des sables mal classés, ayant conservé leur couleur vive originelle (Alexandre-Pyre, 1971, p. 127);
- Le fond des vallées lui-même est garni de sédiments qui, à l'exception des chenaux d'écoulement, sont souvent mal classés. La plupart du temps, ces sédiments ont été soudés ultérieurement par le fer. Même les seuils rocheux sont fossilisés par des sédiments ferruginisés, et deviennent donc inactifs.

Les *phases intermédiaires* ont un climat assez comparable à celui de la période actuelle: alternance équilibrée de saisons sèches et de saisons des pluies. Les processus suivants sont, encore aujourd'hui, observables :

- Les terres de recouvrement des stone-lines se forment à partir des remontées effectuées par les termites (termitières, galeries superficielles sur le sol et sur les arbres, remplissage de troncs morts) avec une reprise par la pluie et le ruissellement;
- Les rivières et l'écoulement dans les vallons exercent une érosion verticale généralisée. Les seuls dépôts fluviaux observés, sont les levées naturelles qui s'édifient en marge des chenaux de pente faible (Lequarré, 1978; Alexandre et Streel-Potelle, 1979);
- Une certaine altération chimique généralisée doit se produire également. On serait tenté d'attribuer la totalité du manteau d'altération aux seules phases humides. Toutefois, la capacité d'altération du climat actuel est attestée par la dégradation rapide d'un bedrock après son incision due au recul récent d'une chute (Dibanga et Alexandre, 1996).

Un premier bilan de l'ère quaternaire, en matière d'élaboration de formations ferrugineuses, peut être tenté.

Points positifs

- L'imprégnation des graviers de terrasse fluviale, avant la reprise de l'érosion verticale des phases intermédiaires;

- La formation de nodules au cours des phases intermédiaires (en l'occurrence, actuellement). Ce phénomène a été observé de très rares fois et uniquement sur sable (Kiniana, 2.2.1). Un climat à saisons contrastées, suffisamment humide, est cependant favorable au maintien de la surface de la nappe à faible profondeur, à la fin de la saison sèche. Nous reviendrons ultérieurement sur les raisons du caractère exceptionnel de ce processus au cours du Quaternaire;

Points négatifs

- La présence, dans les vallées, de quantités importantes de matières organiques qui attaquent les concentrations ferrugineuses;
- L'érosion verticale des rivières pendant les phases intermédiaires, qui abaisse, chaque fois, le niveau des nappes et met son sommet hors de portée du niveau favorable à la nodulation;
- La phase humide, par l'abondance de la matière organique, est inconciliable avec l'édification d'une formation ferrugineuse (2.2.2), à l'exception de l'altos des zones submarécageuses de la Cuvette congolaise (Preuss, 1990).

7.2.3. Le Tertiaire

Pour cette période, il existe beaucoup moins de manifestations concrètes des mécanismes qui ont façonné l'environnement. Par contre, les formes de terrain et les cuirasses qui en sont le résultat, sont plus disertes à cet égard.

- Des surfaces d'érosion se sont formées, les unes confinées aux piémonts, les autres plus étalées et qui confinent à la pénéplanation. A la différence du Quaternaire, les glacis ont pu être façonnés à partir d'une surface quelconque, au lieu de consister en une copie décalée en altitude de glacis préexistants comme c'est le cas au Quaternaire. Toutes ces surfaces d'érosion ont nécessité une certaine altération, préalable au travail d'aplanissement. Par ailleurs, ces érosions demandent une végétation clairsemée qui n'entrave pas leur action;
- Les débris de roches et les minéraux, prisonniers des cuirasses et plus particulièrement des enduits, sont, aujourd'hui,

altérés, alors qu'ils étaient assez frais au moment de leur inclusion;

- Les cuirasses tertiaires contiennent des nodules qui se sont formés dans un horizon tacheté, lui-même tributaire d'une nappe aquifère proche de la surface;
- L'intégration de ces nodules dans le matériel venu des horizons inférieurs s'est faite à l'intervention des termites lorsque la nappe s'est abaissée;
- Les enduits externes et internes se sont formés dans un milieu assez aride, mettant fin à l'activité des termites.

L'ensemble des processus que ces observations impliquent, peuvent s'inscrire, comme pour le Quaternaire, dans des oscillations climatiques, dont la position centrale serait, cette fois, un climat de steppe, et les extrêmes, un climat proche de l'actuel, pour le pôle humide, et le désert, pour le plus aride (fig. 66).

En se fondant sur l'expérience que nous avons du Quaternaire, il est possible d'attribuer aux différentes phases climatiques d'un cycle tertiaire, les phénomènes décrits ci-dessus.

A la *phase humide* (ici, de climat peu différent du climat actuel, à saisons contrastées), on peut attribuer :

- L'incision du réseau hydrographique; il n'est, toutefois, pas exclu que cette incision se soit produite une seule fois, au début de chaque cycle;
- L'altération du substratum, sur presque tout le territoire;
- La formation des nodules au sommet de l'horizon bariolé, dans les sites favorables, en bas de versant ou dans les vallons;
- Le commencement de l'intervention des termites dans leur travail de bioturbation sur tout le territoire favorable (sauf dans les sables trop épais!) et plus particulièrement dans les mêmes sites que la nodulation, mais après l'abaissement de la nappe

Ces opérations pourraient ne pas être simultanées et s'être déroulées dans un ordre qui serait, sauf exception, celui de l'énumération ci-dessus. D'autre part, une partie de l'altération peut avoir été héritée de périodes antérieures.

Pendant la *phase de climat steppique*, les actions suivantes ont pu avoir lieu :

- Une érosion en surface par les eaux de ruissellement, avec adaptation des versants au niveau des rivières, obligatoirement fixes en altitude au cours de cette phase;
- Le pavage, par des alluvions grossières, du fond des vallons situés en piémont. Le pavage a été accompagné d'un sapement à la base des versants et a abouti, par coalescence, à un glacis généralisé;
- L'action des termites a pu résister, avec des bonheurs divers, à cette phase d'érosion aréolaire généralisée. Leurs apports en surface ont probablement été enlevés au fur et à mesure.

A la *phase désertique*, on peut attribuer les processus suivants :

- La formation généralisée des enduits, formation qui avait très probablement commencé à la fin de la phase précédente. Seuls, des grains de sable particulièrement mobiles et des poussières, ont pu venir se joindre aux enduits;
- Un ruissellement local, probablement très limité (dépôt entre deux enduits superposés, 4.3.8.2);
- La silicification de têtes de banc de quartzite;
- La formation de champs de dunes au départ de sables déposés précédemment.

Comme au Quaternaire, ces phases climatiques ne se sont pas déroulées avec la régularité du présent exposé. Il a dû se produire des répétitions, voire des retours en arrière.

7.2.4. Comparaison entre le Quaternaire et le Tertiaire

Le moment est venu de comparer la succession des conditions par lesquelles est passé un même territoire au Tertiaire et au Quaternaire et de tenter de discerner ce qui a fait le succès du premier et l'échec du second, dans l'édification des cuirasses. Cette comparaison nous permettra, incidemment, d'aborder une série d'autres problèmes relatifs aux formations ferrugineuses.

Constatons, en premier lieu, que certains mécanismes sont communs aux deux périodes et se produisent même encore à l'heure actuelle:

- L'activité des termites est presque une constante dans les transformations au sein des

cuirasses ainsi que dans les stone-lines. De nouvelles galeries sont ouvertes puis colmatées, la matrice subit de nouveaux mélanges. Cependant, la fin du Tertiaire, avec l'arrêt de la formation des enduits, a changé les règles de cette bioturbation: 1) les nouvelles galeries ne s'effondrent plus et gardent leur tracé; 2) les nodules pédorelictuels, dont la cohérence dépend d'un enduit enrobant, ne se forment plus; 3) la rigidité de la formation impose aux termites un colmatage des galeries abandonnées. Constatons toutefois que la couleur claire des colmatages de ces galeries au sein des cuirasses de la fin du Tertiaire, témoigne d'un lessivage de l'horizon dont ils proviennent, dans des conditions légèrement hydromorphes et donc plus humides en surface, au cours des périodes suivantes;

- L'induration naturelle, c'est-à-dire sans le secours de l'homme, continue de se produire. Il est cependant probable qu'elle a été plus active, lors de la formation à l'air libre de l'enduit superficiel, sous un climat plus desséchant.

Ce sont là des phénomènes secondaires, dont l'intervention n'est pas déterminante dans la formation ou non d'une cuirasse.

Deux autres mécanismes se sont révélés nettement plus importants:

- La formation des enduits, dans leur continuité à travers toutes les parties, vont fournir à la cuirasse la rigidité du bâti et sa pérennité. Comme il a été vu, leur formation s'est arrêtée avec la fin du Tertiaire;
- La nodulation dépend de la position de la nappe aquifère, à une certaine profondeur, dans les parties basses de la topographie. Or, à l'heure actuelle, les nodules sont suspendus par rapport à cette nappe: leur formation serait donc arrêtée et cela depuis l'encaissement des vallées qui contrôlent le niveau de la nappe. Au cours du Tertiaire, les vallées se sont également enfoncées dans la topographie. Toutefois, les processus d'aplanissement ont gommé les effets de cet encaissement, en ramenant la nappe à un niveau convenable. Les phases sèches du Quaternaire, dans leur érosion, n'ont pas eu cet effet. L'aridité n'a pas atteint le degré nécessaire pour déclencher les processus d'aplanissement sur les grandes surfaces d'érosion. Cette adaptation s'est toutefois opérée sur certains glacis, comme

dans la dépression de la Pande (Alexandre-Pyre, 1967).

7.2.5. La cuirasse pisolithique

S'il existe un certain parallélisme entre les cuirasses n°2 et n°3, et même éventuellement n°4, la cuirasse la plus ancienne, par contre, fait preuve d'une individualité remarquable.

- Le seul point qui la rapproche des suivantes est la présence d'enduits. Cependant, ils sont, ici, d'un tout autre ordre de grandeur;
- Le travail des termites y est totalement absent. Quelques rares traces d'interventions existent mais elles sont ultérieures à la formation de la cuirasse (4.3.1.1);
- Les trois faciès que cette cuirasse présente lui sont bien spécifiques: le pisolithique, le bréchiique avec alvéoles éventuels et le massif fracturé.

Nous possédons peu d'éléments pour élucider les conditions dans lesquelles cette cuirasse s'est formée. Ne présentant pas de nodules, la question de la présence d'une nappe aquifère reste entière. D'autre part, comment intégrer dans une même oscillation climatique les vernis désertiques et les afflux de fer qui demandent une intervention importante des matières organiques qui est le propre de conditions très humides ? Les deux phases postulées sont en effet assez éloignées. Même si le fer provient d'un héritage, comment expliquer un passage aussi rapide à des conditions désertiques? Une arrivée massive de fer suppose une action chimique importante, peu compatible avec la fraîcheur originelle des débris rocheux inclus dans les pisolithes.

7.2.6. Problèmes connexes

Un premier problème est précisément celui de l'état de fraîcheur dans lequel se trouvaient les nodules lithorelictuels, le substratum précambrien imprégné et les fragments de roches étrangères, *au moment de leur intégration* dans la cuirasse. Il a été signalé par de nombreux auteurs (Alexander et Cady, 1962; Mulcahy, 1961, entre autres). Leprun (1979, p. 58) conclut ses observations des cuirasses sur les granites de Kaya (Burkina Faso) de la façon suivante: "les minéraux altérables, reliques de la roche-mère, sont plus abondants dans les horizons

indurés que dans les argiles d'altération sous-jacentes".

On a donc le sentiment qu'il existe un net divorce entre la cuirasse elle-même et la profonde lithomarge qu'elle couvre. Il est, en effet, impossible que des fragments de cette lithomarge puissent récupérer leur lithostructure et leur fraîcheur avant d'accéder, après érosion au niveau de nodulation. L'altération a dû se produire, en grande partie, après la formation de la cuirasse. Par exemple, au cours du Quaternaire, dont certaines phases ont été plus chaudes et plus prodigues en matières organiques que précédemment. Il faudrait revoir la définition de la cuirasse latéritique qui la subordonne à un substrat profondément altéré.

L'édification d'une cuirasse ne se fait, toutefois pas sans une certaine altération du substratum. L'état de grande fraîcheur mentionné plus haut pose donc lui-même un problème auquel la géométrie du manteau d'altération est susceptible d'apporter une solution. En effet, les géologues de terrain savent que, dans une région comme le Katanga, les roches les plus fraîches s'observent dans le lit de la rivière. Dans ses recherches préparatoires à l'installation d'un barrage sur l'Inkisi (Bas-Congo), Macar (1957) a noté que le sommet de la roche non altérée, présent dans le lit de la rivière, allait en s'abaissant de part et d'autre de celle-ci, à mesure que l'on s'en éloignait. Une même constatation a été faite dans les vallées traversées par la voie ferrée COMILOG (Laporte, 1962, p. 81). La roche fraîche peut donc être présente dans le lit des rivières et dans leur proximité immédiate, alors que, sous les surfaces voisines, au même niveau, la roche est complètement pourrie. Un site de fond de vallée peut donc garantir un substratum peu ou pas altéré à faible profondeur. C'est précisément le site de formation probable de la plupart des cuirasses.

Par contre, il est difficile de se faire une opinion sur la formation éventuelle de stone-lines au cours du Tertiaire. La seule information à ce sujet ne pourrait provenir que de cuirasses qui en auraient gardé le souvenir. Toutefois les sites de formation des stone-lines et ceux des cuirasses ne coïncident pas toujours: les versants pour les unes, les fonds de vallée ou leur proximité pour les autres. Il n'est toutefois pas exclu que des éléments des premières aient été repris par les secondes, sans toutefois garder leurs marques d'origine.

Un dernier problème est celui du comportement du réseau hydrographique lors d'un encaissement

dans un paysage cuirassé. Pourquoi, sur la surface de Mitwaba (et probablement sur celle de Longe, 4.3.2.1), une reprise de l'érosion verticale produit-elle une inversion de relief, alors que la surface de Lubumbashi est incisée en son centre, laissant des fragments de cuirasse en terrasse de part et d'autre? Deux hypothèses peuvent être avancées :

- Dans la transition vers le Quaternaire, le centre des vallées de la surface de Lubumbashi a été occupée par un milieu hydromorphe qui a empêché ou détruit une cuirasse éventuelle. Dans ce cas, une incision centrale a été possible. Le fond des vallées de la surface de Mitwaba, plus ancienne, et donc sans préparation au tournant climatique du Quaternaire, n'a pas connu un tel conditionnement. L'érosion verticale des

rivières a été rejetée de part et d'autre de la cuirasse, vers des marges plus fragiles;

- La nature du lit fluvial, au moment de l'incision, peut aussi avoir influencé la façon dont cette dernière s'est produite. Un lit à chenal unique favorise une incision centrale, tandis qu'une rivière à tresses, de microtopographie légèrement bombée, dirige l'érosion verticale vers les marges du lit.

Les deux hypothèses ne sont pas incompatibles et peuvent avoir combiné leurs effets. Une incision centrale pourrait avoir été réalisée à partir d'un chenal unique au milieu d'une zone insuffisamment drainée.

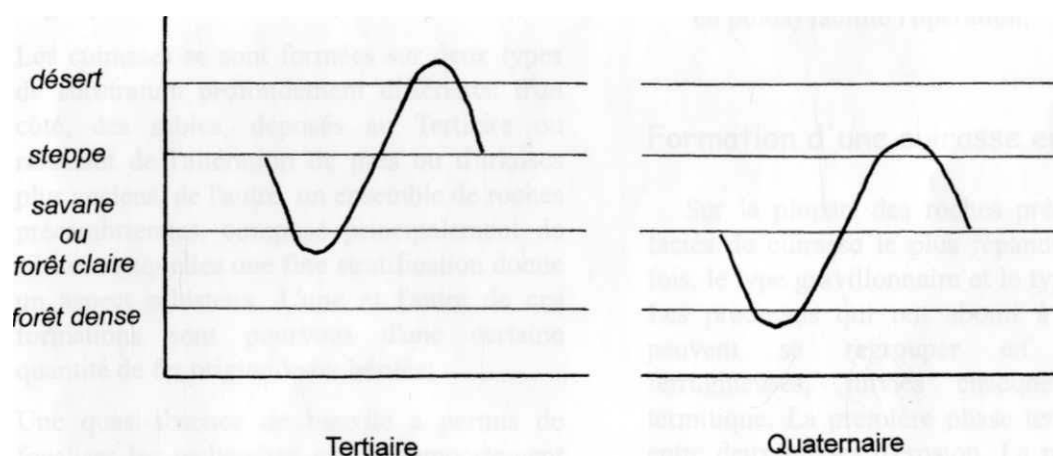


Fig. 66.- Schéma des oscillations climatiques présumées au cours du Tertiaire vis-à-vis de celles du Quaternaire (d'après Alexandre-Pyre, 1971, p. 135).

SYNTHESE

Objectif

L'objectif majeur de cette étude était double. En premier lieu, on souhaitait décrypter, avec le plus de détails possibles, la genèse des cuirasses latéritiques et, accessoirement, celle des autres formations ferrugineuses tropicales, en se fondant essentiellement sur les observations de terrain et l'analyse de la structure des échantillons recueillis. Il était, ensuite, tentant d'établir une série stratigraphique basée sur les cuirasses latéritiques et de l'appliquer à l'histoire géomorphologique du haut Katanga méridional.

Avantage du terrain

La région étudiée a présenté plusieurs avantages pour atteindre le but poursuivi :

- Les cuirasses se sont formées sur deux types de substratum profondément différents: d'un côté, des sables, déposés au Tertiaire ou résultant de l'altération de grès ou d'arkoses plus anciens, de l'autre, un ensemble de roches précambriennes, composé principalement de siltites auxquelles une fine stratification donne un aspect schisteux. L'une et l'autre de ces formations sont pourvues d'une certaine quantité de fer originelle ou héritée;
- Une quasi-absence de bauxite a permis de focaliser les recherches sur le comportement des composés du fer, en laissant dans l'ombre toute intervention de l'alumine libre;
- Les substratums très riches en fer sont également absents. Sur ces substratums, le fer une fois mobilisé est aussitôt partiellement fixé, garnissant de dépôts ferrugineux les sites les plus variés, notamment les versants en pente forte.
- Enfin, la région comporte une gamme de niveaux cuirassés, comparable à celle de l'Afrique de l'Ouest, où des études très détaillées ont déjà été conduites.

Les sables

Vis-à-vis des roches silteuses ou schisteuses du Précambrien, les sables offrent des termes de comparaison du plus grand intérêt.

- Ils ne sont pas favorables au travail des grands termites (*Macrotermes*), ceux-ci exigeant une teneur minimale en argile, pour réaliser leurs constructions. L'exclusion des termites se produit pour autant que le sable soit suffisamment épais pour leur interdire l'accès au soubassement précambrien (en saison sèche) et les empêcher d'en modifier l'imperméabilité;
- La macroporosité du sable facilite une imprégnation rapide des sables par le fer. Cette imprégnation peut se produire dans des sites assez divers, tels que conduits de toutes sortes ou la périphérie de racines. La faible quantité de fer nécessaire (une vingtaine de %, en poids) facilite l'opération;

Formation d'une cuirasse en six phases

Sur la plupart des roches précambriennes, le faciès de cuirasse le plus répandu présente, à la fois, le type gravillonnaire et le type vermiculaire. Les processus qui ont abouti à leur formation peuvent se regrouper en deux phases ferrugineuses, suivies chacune d'une phase termitique. La première phase termitique s'insère entre deux phases d'érosion. La première érosion est verticale le long des rivières, la seconde est une érosion superficielle. Ces phases géomorphologiques présentent des recouvrements avec les phases qui les encadrent.

Première phase ferrugineuse : la nodulation

La première phase ferrugineuse est la nodulation ou façonnement des nodules primaires, dans l'horizon tacheté, au sommet de la nappe dans sa position minimale, c'est-à-dire à la fin

d'une saison sèche. La teneur en fer des nodules supérieurs peut atteindre 60%. Dans ce cas, l'imprégnation doit donc être précédée d'une transformation des composants les plus fragiles de la siltite pour ménager, la place nécessaire à une telle teneur en fer. Le nodule peut garder sa structure lithologique; toutefois, celle-ci était déjà peu visible dans la roche, à l'état frais.

Simultanément, les zones entre les nodules sont soumises à une altération importante et à un lessivage qui produit des zones verticales assez claires, plus poreuses et plus favorables au départ du fer. Ce lessivage s'est produit à la faveur d'une position particulièrement basse de la nappe, après une ou plusieurs années particulièrement sèches.

Tardy (1993) a très bien décrit cette dualité entre des pôles s'enrichissant et des zones s'appauvrissant progressivement en fer.

Erosion verticale et première phase termitique

Après une descente de la nappe, en réponse à un enfoncement du réseau hydrographique et pendant que l'altération continue son travail en profondeur, les termites ont accès à l'horizon bariolé. Leur action est double. Ils creusent des galeries qui s'effondrent après usage, effectuant ainsi un mélange par bioturbation. D'autre part, les parties ameublies sont remontées de la profondeur vers la surface. Les nodules, ayant une taille dépassant la compétence des termites restent sur place ou, plus exactement, quelques centimètres plus bas, en conséquence du travail de sape des termites. Par descentes progressives, les nodules fortement indurés de l'horizon tacheté se retrouvent au même niveau que les nodules plus tendres, marqués d'une frange de décoloration, puis au niveau du matériel meuble provenant de la roche altérée sous-jacente. Dans la zone qui va devenir une cuirasse, se retrouvent donc deux types de nodules lithorelictuels et une roche altérée qui leur tient lieu de matrice.

L'efficacité des termites a été décrite en détail par Eschenbrenner (1987).

Erosion superficielle et deuxième phase ferrugineuse : les enduits

La seconde phase ferrugineuse va être accompagnée et même précédée par une érosion

en surface qui tendra à éliminer les dernières terres remontées par les termites. Ceux-ci vont d'ailleurs restreindre leur activité et finir par désertir le milieu à cause d'une trop grande aridité.

Le ruissellement aura auparavant dénudé la cuirasse en formation et libéré les nodules qui se transforment ainsi en gravillons, dégageant ainsi des surfaces d'accueil pour un enduit ferrugineux rubané.

Un écoulement très sporadique d'eau chargée de fer va engendrer un dépôt colloïdal, de quelques millimètres à quelques centimètres, sur la surface de la cuirasse, sur les gravillons qui s'y trouvent, dans les diaclases et jusque dans les galeries de termites ouvertes sur l'extérieur. Ce "tubage" des galeries va leur conférer une grande rigidité, fournissant ainsi une armature solide à l'ensemble de la cuirasse en voie de formation.

Deuxième phase termitique

Avec la disparition de la sécheresse, l'activité des termites va reprendre comme auparavant. Le creusement de galeries dans et au-dessous de la cuirasse vont recommencer. Toutefois, au sein de la cuirasse, les galeries abandonnées ne s'effondreront plus et il faudra les remblayer pour se préserver de l'agression des fourmis. Les niveaux sous la cuirasse continueront à alimenter les terres de couverture à l'aide de galeries qui, elles, disparaîtront après "foudroyage". Cette seconde phase termitique s'est prolongée, de façon peut-être intermittente, jusqu'à la période actuelle.

La succession des six phases précitées assure à la cuirasse un faciès, à la fois nodulaire ou gravillonnaire, et vermiforme. Ce faciès est le plus répandu sur les substratums, un tant soit peu argileux, ce qui est le cas d'une grande partie du Précambrien de la région.

Le cas des cuirasses sableuses

Sur les sables, l'absence de termites simplifie l'élaboration des cuirasses. Deux phases ferrugineuses suffiront, séparées par les deux phases d'érosion, érosion verticale dans les rivières puis en surface sur les versants.

La phase de nodulation se portant sur un milieu homogène, l'emplacement des nodules ne sera

plus contrôlé par la structure. La formation des nodules apparaît, ici, de façon plus claire, notamment dans le profil de Kiniamia qui a conservé, presque sans modification, le profil originel. La concentration mécanique des nodules s'est produite sans le secours des termites, par érosion superficielle, donc en même temps que leur passage au rang de gravillons. Cette phase s'est révélée plus active sur les sables, où l'on note fréquemment l'apport de gravillons étrangers.

Plus que sur le substratum précambrien, la phase de formation de l'enduit rubané, sur sable, s'est portée simultanément sur la surface de la cuirasse et sur les nodules libres qui venaient s'y souder. Sur le Précambrien, la présence en abondance de terres de recouvrement a souvent empêché le phénomène.

Stone-line ferrugineuse

La stone-line est le fruit d'une seule phase ferrugineuse et de phases termitiques. La nodulation assure la production de nodules qui vont faire l'objet d'un certain tri. L'action des termites va les concentrer mécaniquement dans la zone inférieure de la stone-line. Dans la partie supérieure de la stone-line, la sélection sera effectuée par l'érosion superficielle. La formation de l'enduit de la seconde phase ferrugineuse n'a jamais eu lieu. Les phases termitiques sont bien au nombre de deux, une avant et l'autre après l'érosion superficielle: la première n'a laissé de traces que dans la partie inférieure, la seconde est responsable des terres de recouvrement.

Grâce à l'absence d'enduit, les gravillons de la partie supérieure de la stone-line ont gardé leur liberté mais aussi, en comparaison avec les cuirasses, un certain anonymat. L'absence d'enduit ferrugineux écarte un âge tertiaire. Par ailleurs, les datations des restes végétaux trouvés dans la proximité des outils préhistoriques indiquent un âge assez récent: souvent la dernière phase sèche du Quaternaire. Ce dernier a connu de nombreuses phases de ce type et il y a tout lieu de considérer la stone-line visible actuellement, et qui est unique dans le profil, comme la dernière héritière d'un certain nombre de stone-lines antérieures qui se sont remplacées au cours du Quaternaire. Par contre, si l'élimination de la partie fine de la stone-line inférieure a continué au cours du Quaternaire, la nodulation de départ pourrait remonter, dans certains cas, au Tertiaire.

Les éléments grossiers de la stone-line ferrugineuses sont donc hérités et la nodulation postulée plus haut n'a dû se produire qu'une seule fois. En outre, d'autres types de concrétions ont pu se joindre ou se substituer aux nodules (imprégnation, débris de cuirasse).

Accumulation relative ou absolue

Au terme de cette revue des processus qui ont abouti à la formation des cuirasses et des stone-lines, il est possible de faire le départ entre les mécanismes responsables d'une accumulation relative ou d'une accumulation absolue :

- Lors de la nodulation dans l'horizon tacheté, un apport par lessivage oblique a pu se produire (accumulation absolue);
- L'élimination des parties non indurées par les termites ou par l'érosion superficielle a concentré les nodules (accumulation relative);
- L'enduit s'édifie à partir de produits ferrugineux apportés, probablement de lieux assez voisins (accumulation absolue);
- Depuis la formation de l'enduit, le travail des termites, au sein de la cuirasse, consiste dans le creusement de galeries aux dépens d'une matrice contenant plus de fer que les matériaux de colmatage qui la remplacent (accumulation relative).

Enduits ferrugineux et stratigraphie

Une stratigraphie des cuirasses a pu être réalisée grâce à la couleur de la couche externe de l'enduit rubané. Cette stratigraphie a été confirmée, moyennant certaines précautions, par d'autres critères :

- Des caractères internes tels que la présence de crevasses, le type de faciès de la cuirasse, la corrosion des quartz;
- Les altitudes des surfaces porteuses de la cuirasse;
- Les dépôts continentaux qui viennent s'intercaler dans cette stratigraphie.

En comparaison avec les deux derniers critères, la couleur des enduits présente une plus grande spécificité et surtout une plus grande permanence.

L'altitude n'est pas un critère sûr. En effet, une même surface d'érosion peut être portée à des niveaux différents par le simple jeu d'une faille radiale. Par ailleurs, du fait de la quasi-immunité des seuils rocheux face au faible pouvoir érosif des rivières en milieu tropical, deux surfaces peuvent se développer simultanément à des altitudes différentes.

Les dépôts corrélatifs sont sujets à des remaniements qui déplacent leurs vestiges sur des surfaces d'un autre âge. Les sables ocre ont été transportés par le vent sur des surfaces, de loin antérieures à leur formation. Les grès polymorphes, qui ne subsistent plus que sous forme de blocs erratiques, se retrouvent, au contraire, sur des surfaces largement postérieures à leur formation.

Toutefois, l'utilisation de la couleur des enduits de cuirasse se révèle d'une utilisation délicate. En effet, si la stratigraphie fondée sur les enduits se vérifie grâce à leur superposition sur une même cuirasse, l'âge relatif de la cuirasse est celui de l'enduit dissimulé sous l'enduit déposé ensuite.

Quatre enduits différents et trois époques remarquables

Quatre types d'enduit d'âge différent ont pu être distingués. Ils ont permis d'identifier trois époques remarquables.

1. La **première époque** est celle au cours de laquelle s'est formée la cuirasse la plus ancienne (n° 1), porteuse d'un premier type d'enduit. Elle est nettement différente des trois suivantes. En effet, elle ne porte aucune trace ni de l'activité des termites, ni d'une nodulation. Le développement des enduits y est remarquable, avec des épaisseurs qui peuvent dépasser les deux centimètres. Les faciès qu'on y rencontre témoignent d'un apport abondant de fer. Ce fer a emprisonné, à l'état frais, des débris de roches et des minéraux altérables qui sont, aujourd'hui, en voie de dégradation.

En Afrique Occidentale, ce type d'enduit se retrouve sur le dernier niveau à être formé, essentiellement, de bauxite. Il est attribué à la fin du Secondaire ou au début du Tertiaire;

2. C'est au cours de la **seconde époque** que se sont formées les cuirasses porteuses des enduits n° 2, 3 et 4. Pour chacune des trois, le faciès le plus fréquent est d'un type complexe, à la fois gravillonnaire et vermiforme. C'est à ces cuirasses que les phases de formation décrites ci-dessus se rapportaient. Leurs principaux caractères distinctifs sont les suivants :

- Sur la cuirasse n° 2, la couleur de l'enduit terminal est rouge; les grains de quartz sont fortement corrodés, comme dans la première cuirasse;
- La cuirasse n° 3 porte un enduit brun foncé et un réseau de crevasses y est particulièrement bien développé;
- La cuirasse n° 4 porte un enduit mince et incomplet de couleur ocre jaune. Les parois des galeries sont imparfaitement couvertes par l'enduit et la cohésion de la cuirasse en souffre.

Cette dernière cuirasse, par ses défauts, constitue en quelque sorte une transition vers l'époque suivante.

3. Le Quaternaire constitue la **dernière époque**. Au cours de celle-ci, il ne s'est formé aucun enduit, ni aucune nodulation en milieu non sableux. Seules avec les nodules sableux, les formations ferrugineuses dues à une imprégnation rapide ont pu voir le jour: faciès conglomératique, dans les cailloutis de terrasses fluviales, faciès massif ou vermiculaire, ainsi que pédodes, dans les sables.

Sur les roches précambriennes, les activités de sapement sous les cuirasses et les horizons bariolés hérités du Tertiaire, continuent de se produire. La formation des stone-lines ferrugineuses reste l'apanage du Quaternaire. Par ailleurs, le travail de sape, sous les cuirasses et dans leurs environs immédiats, modifie complètement la microtopographie du site et crée des inversions de relief de petite dimension. Les cuirasses descendent littéralement sur place, en se divisant en blocs et débris de toutes dimensions. En se fondant sur l'épaisseur des terres de recouvrement, et sur l'élimination périodique de celles-ci, pendant les phases climatiques favorables au cours du Quaternaire, une descente de l'ordre de 20 m des dernières cuirasses tertiaires aurait pu avoir lieu.

Site de formation des cuirasses

Les rivières, par une reprise de l'érosion verticale, ont parachevé la destruction des vestiges du site originel des cuirasses, commencée par les termites. Toutefois, malgré une défiguration par les termites, les petits vallons, restés suspendus par rapport aux grandes rivières, ont conservé la physionomie de départ. Ces vallons témoignent, de façon nette, de ce que le bas des versants en pente douce, voire le fond même de la vallée, a été le berceau de la plupart des cuirasses naissantes.

Une telle topographie est, de fait, le site idéal pour le déroulement des phases ferrugineuses. La nappe y est proche de la surface, ce que demande la nodulation, et les apports d'un lessivage oblique éventuel peuvent y être recueillis. C'est également le cas pour la convergence des eaux chargées de fer colloïdal qui vont nourrir les enduits rubanés.

Les phases termitiques n'ont pas ces exigences topographiques et peuvent également s'exercer sur les versants. Les stone-lines en sont le résultat, encore que les stone-lines ferrugineuses demandent des conditions peu différentes de celles qui sont à l'origine des cuirasses.

Climats qui ont présidé à la formation des cuirasses

A de nombreuses reprises, on a fait état d'une coïncidence entre les régions riches en cuirasses et les zones de climat actuel contrasté (saison sèche et saison des pluies, de longueur à peu près égale) auxquelles appartient le haut Katanga. Cette coïncidence est loin d'être fortuite, malgré l'écart entre l'époque où se sont formées les cuirasses et la période actuelle.

Les différentes phases de formation d'une cuirasse s'inscrivent dans une fin de cycle climatique, telle qu'elle a dû se dérouler au Tertiaire.

Après un enfoncement des rivières et un réajustement des surfaces d'érosion aux nouveaux niveaux de base, les différents mécanismes suivants ont enchaîné leur action.

1. La nodulation exige une nappe peu profonde et une saison sèche. Un climat assez semblable à l'actuel pourrait convenir, à la différence près que ce climat engendre aujourd'hui une érosion verticale dans les

rivières, ce qui n'est pas souhaitable pour le maintien du niveau de la nappe.

2. Après un certain délai, cette érosion verticale s'est enfin produite et les termites ont pu pénétrer, à leur aise, l'horizon bariolé. Les différents travaux des termites se déroulent également à l'heure actuelle, sous un même climat peu différent de l'action précédente.
3. La formation de l'enduit rubané va commencer en présence des termites. Elle exige toutefois une dénudation préalable du sommet de la cuirasse. Une telle érosion ne se conçoit que dans un milieu où la végétation se raréfie. Un climat de type steppique va donc servir de transition vers le plein développement des enduits.
4. Ce dernier va se produire dans un milieu aride. Le vernis rocheux de climat aride qui les recouvre, les silicifications et les phénomènes éoliens qui les accompagnent, en sont le témoignage.

Aucun enduit ferrugineux ne s'est plus produit depuis la fin du Tertiaire et aucune trace de climat désertique n'est à signaler, dans ces régions, au cours du Quaternaire.

D'autre part, si l'on se fonde sur l'amplitude des oscillations climatiques quaternaires dans le haut Katanga, qui vont d'un climat très humide (forêt dense) à un climat sec (steppe), le climat régional, au cours du Tertiaire, aurait connu des variations entre un pôle humide (forêt claire) et un extrême aride (désert). Il ne se serait donc pas produit de phase très humide, qui aurait pu être responsable d'une altération chimique importante en profondeur.

Reconstitution de l'histoire géomorphologique du haut Katanga

L'échelle stratigraphique fondée sur la couleur des enduits de cuirasse, ainsi que la connaissance des exigences de ces cuirasses quant à l'environnement topographique et climatique, ont permis de reconstituer l'histoire géomorphologique du haut Katanga méridional. Voici de bas en haut cette échelle stratigraphique, complétée par la succession des dépôts continentaux qui les encadrent:

1. Mise en place des grès polymorphes (fin du Secondaire),

2. Formation du niveau de Kisiba Salabwe, porteur de la cuirasse n° 1 (pisolithique),
3. Dépôt du cailloutis des plateaux (?),
4. Dégagement de la surface de Mitwaba, couplée avec la cuirasse n° 2 (enduit rouge brillant),
5. Dépôt de la couverture des sables ocre,
6. Façonnement de la surface de Lubumbashi, associée à la cuirasse n° 3 (enduit brun foncé, à sutures),
7. Formation de la surface de Kyubo, identifiée par la cuirasse n° 4 (enduit ocre jaune, mince et terne),
8. Étagement des terrasses fluviales, après un soulèvement tectonique qui a dû se produire quelque temps après le début du Quaternaire.

Les niveaux et surfaces de Kisiba Salabwe, Mitwaba, Lubumbashi et Kyubo correspondent, respectivement, à la surface de Fantofa, au niveau intermédiaire, au haut et au moyen glaciaire de l'Afrique Occidentale.

Cette reconstitution a été cartographiée (fig. 54). Elle a fait ressortir les points suivants, inconnus auparavant :

- Dans la partie méridionale de la région étudiée, la surface de Lubumbashi est déformée par une faille radiale de direction méridienne: la surface se trouve à une altitude approximative de 1300 m à l'est de la rivière Lufira et à 1500 m, à l'ouest de celle-ci;
- La même surface de Lubumbashi s'est développée à un niveau moyen de 1575 m sur le plateau des Bianco (bassin de la Kalule) et se situe seulement vers 1075 m (bassin de la Lufira), en piémont de ce même plateau;
- Les buttes résiduelles, qui dominent la surface de Lubumbashi de quelque 125 m, portent des traces de la cuirasse n° 1 et pourraient être d'anciens *bowé*, très fortement dégradés.

- L'horizon bariolé est une image, légèrement perturbée, de ce qu'il représentait dans le profil originel;
- Les altérites ont continué de se développer et de s'approfondir depuis l'époque de ce profil;
- La carapace-cuirasse est constituée, pour la partie inférieure, d'une partie du profil originel transformée par la bioturbation, et pour la partie supérieure, souvent bioturbée également, de dépôts résiduels provenant d'un sol tronqué, auxquels sont venus s'adjoindre des apports superficiels de différents types tels que des gravillons étrangers et surtout le fer des enduits;
- Le sol superficiel est constitué de terres de recouvrement, venues, récemment encore, de la profondeur.

Toutes ces parties ont des âges différents qui ont été présentés plus haut.

Il ne peut donc être question d'envisager cette succession de niveaux comme une série évolutive, où, par le passé, les niveaux supérieurs auraient été produits par des modifications successives des niveaux inférieurs. Considérer que l'avenir des horizons inférieurs pourrait être de prendre progressivement la forme des horizons supérieurs est encore plus irréaliste.

Les roches altérées de la base ne peuvent en aucun cas récupérer leur structure lithique pour continuer à fournir de nouveaux nodules lithorelictuels. Un profil ne peut donc, comme certains l'ont imaginé, descendre sur place en gardant ses modes de production.

Par ailleurs, il est remarquable que les débris de roches ou les minéraux qui ont été emprisonnés par les enduits ou même imprégnés au cours de la nodulation, se trouvaient à l'état frais au moment de leur intégration dans le milieu en voie de cuirassement. La formation de l'enduit et l'imprégnation les a préservés, pendant un certain temps, de l'altération qui frappait les horizons inférieurs.

Un profil composite

Le profil traditionnel - altérites, horizon pallide, horizon bariolé, formations ferrugineuses et sol superficiel - est une superposition d'horizons et de niveaux qui appartiennent ou ont appartenu à des profils ou des dépôts d'âge très différent. En effet :

Une définition de la cuirasse latéritique

Les définitions qui lient les latérites au contexte d'une altération profonde (Sivarajasingham *et al.* 1962; Schellmann, 1981), laissent à penser que, pour les cuirasses latéritiques, cette altération est également une condition impérative à sa formation. L'état de

fraîcheur des éléments provenant du substratum, au moment de leur engagement dans l'horizon cuirassé, montre que ce n'est pas le cas. L'altération profonde est bien présente, mais elle est, en grande partie, ultérieure. Elle aurait pu ne pas se produire et la cuirasse n'en existerait pas moins. L'altération profonde est donc, dans le cas des cuirasses, un épiphénomène.

Par ailleurs, l'alumine libre des échantillons étudiés est une alumine de substitution au sein des minéraux ferrugineux. Son rôle est ici secondaire et ne semble contribuer en rien à la consolidation de la cuirasse.

Délivrée des ses connotations d'altération profonde et d'alumine libre, une nouvelle définition peut être tentée.

La cuirasse latéritique est une roche dont la consolidation est due aux oxydes de fer et dont la structure complexe témoigne d'une formation à proximité de la surface du sol, sous un climat tropical.

La mention de proximité de la surface et de climat tropical est requise, à la fois, par les deux phases ferrugineuses et les deux phases termitiques.

D'autre part, le climat tropical s'inscrivait en filigrane dans les notions d'altération profonde et d'alumine libre. Avec la suppression de ces deux notions, l'allusion au climat tropical risquait de disparaître. Il fallait donc bien réintroduire la notion de façon claire. Les termites bâtisseurs exercent, en effet, le principal de leur activité sous ces climats. Il en est vraisemblablement de même pour les bactéries qui participent à l'élaboration des enduits rubanés.

Les faciès massifs et conglomératiques se trouvent en marge de la définition proposée qui, par ailleurs, laisse entrevoir la diversité des formes et la convergence des mécanismes au sein des cuirasses latéritiques.

JALONS CHRONOLOGIQUES

La présente étude est, en partie, le produit d'un enchaînement de pas décisifs dans la connaissance des cuirasses latéritiques et de leur genèse. Voici, par ordre chronologique, les progrès successifs apportés par les personnes qui se sont penchées sur la question, tant sur le plan des concepts, que sur celui des processus ou de la méthode.

1807. Buchanan découvre un type de cuirasse latéritique et lui donne le nom de *latérite*. En fait, il s'agit très probablement d'une carapace de faciès nodulaire et vermiforme. Le fer est seul en question. L'acception du terme va aller en s'amplifiant de façon telle qu'il faudra lui adjoindre un second terme pour qu'il retrouve une signification concrète.

1845. Newbold contribue à la fortune définitive du terme et émet l'avis qu'il s'agit d'une *roche* d'origine hydrique et mécanique.

1890. Lake fait le départ entre deux *structures* caractéristiques des cuirasses : 1) *vesicular* (vermiforme), aux nombreuses tubulures anastomosées, 2) *nodular*, aux petits éléments arrondis.

1898. Bauer signale la présence d'*alumine libre* dans les formations latéritiques. Cette découverte importante qui marque un tournant décisif dans la connaissance de la grande famille des latérites, va avoir les conséquences les plus néfastes dans la recherche du mode de formation des cuirasses latéritiques. En mettant oxydes d'aluminium et fer ferrique sur le même pied - ne sont-ils pas tous les deux des sesquioxides? - les chercheurs vont prêter aux minéraux alumineux des pouvoirs qu'ils n'ont pas. Si l'on s'en tient aux indurations de type "carapace", le terme de *cuirasse alumineuse* est licite, mais qu'en est-il si l'induration augmente?

1903. Lacroix signale, pour la première fois, la présence de formations latéritiques en *Afrique* (auparavant, seulement décrites aux Indes et en Australie).

1906. Mac Laren situe les cuirasses dans un *profil* avec la succession: cuirasse résistante, cuirasse plus tendre (entendez carapace), argile rouge et chamois (horizon bariolé), horizon grossier blanc (horizon pallide?).

1931. Nazaroff décrit les premières *cuirasses termitiques* (le terme est d'Erhardt, 1951), dues à l'arrivée des eaux de percolation dans les galeries et constructions de termites.

1955. de Heinzelin attribue la couverture des nappes de gravats (stone-lines) au travail des *termites*.

1956. D'Hoore attire l'attention sur les films brillants et durs (*enduits*), qui recouvrent, en continuité, les surfaces extérieures et internes (canaux, alvéoles, fissures) des cuirasses latéritiques. Ils sont de couleur brune ou rouge foncé, parfois jaunâtre et présentent une structure lamellaire rubanée). Il fait, également, le départ de façon nette entre *accumulation absolue* et *accumulation relative*.

1958. Maignien donne au profil cuirassé une deuxième dimension, en le plaçant dans le profil topographique du versant, mettant ainsi l'accent, par la même occasion, sur les transferts qui peuvent s'y produire (*lessivage oblique*).

1962. Alexander et Cady interrogent les *structures internes* des cuirasses à l'aide d'un microscope polarisant et révèlent ainsi leur complexité.

1967. Stoops fait le départ entre la partie supérieure (allochtone) et la partie inférieure (autochtone) des stone-lines ferrugineuses. L'accumulation relative de la partie inférieure est surtout l'œuvre des *termites*.

1971. Mac Farlane attribue à l'*érosion superficielle* le passage des nodules diffus (spaced pisolithic latérite) aux nodules concentrés (packed pisolithic latérite).

1973. Michel, dans une admirable synthèse, situe les cuirasses dans leur contexte topographique et, par conséquent, dans leur *succession dans le temps*.

1973. Boulangé, Delvigne et Eschenbrenner définissent, avec précision (texte et photographie), les *faciès* macroscopiques des cuirasses, selon les niveaux qu'elles occupent dans le relief de la Côte d'Ivoire.

1976. Nahon décrit minutieusement une série de faciès microscopiques.

1979. Leprun applique les notions de *lithorelique* et les *pédorelique* aux nodules des cuirasses. Il note, en outre, l'absence de lithoreliques dans les horizons profonds, qui est la conséquence d'une plus forte altération.

1987. Eschenbrenner attribue au travail des *termites* une grande partie de la structure interne des cuirasses et en particulier la formation des nodules complexes.

1993. Tardy réalise une *synthèse cohérente* de la genèse et de la rétrogradation des cuirasses et, chemin faisant, montre la nécessité d'un vocabulaire bien défini, non seulement dans la description mais également dans les processus.

1998. Tardy et Roquin placent l'histoire des cuirasses dans la perspective de la dérive des continents. Accessoirement, ils donnent des arguments en faveur d'un âge *tertiaire* de toutes les cuirasses latéritiques.

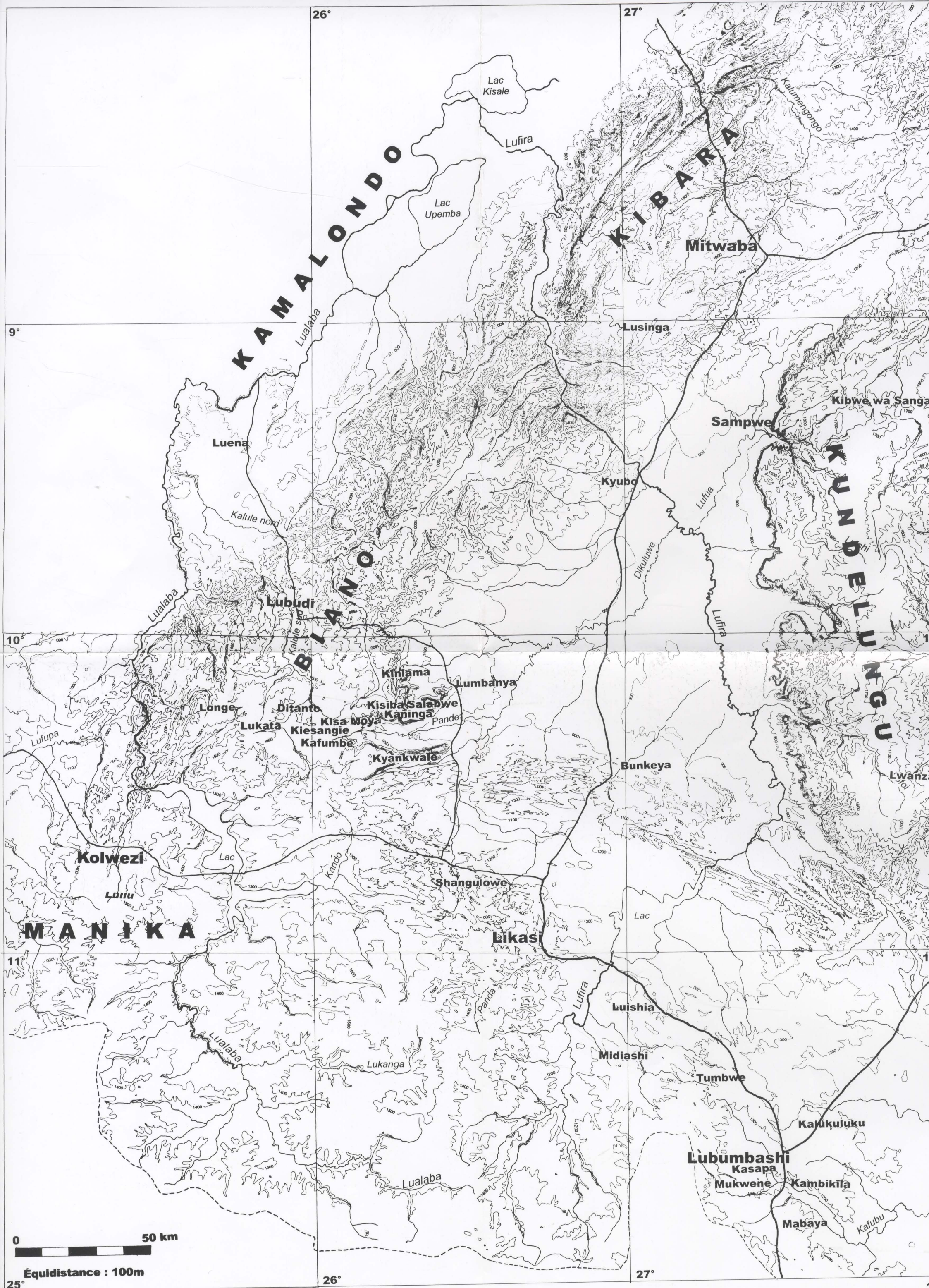
RÉFÉRENCES

- Aleva, G.J.J.** (Ed.) (1994) - Latérites. Concepts, geology, morphology and chemistry. - *ISRIC, Wageningen*, 153 p.
- Alexander L.T. and Cady J.G.** (1962) - Genesis and hardening of laterite in soils. - *U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bull.* **1282**, 90 p.
- Alexandre, J.** (1974) - L'érosion des seuils fluviaux sous différents climats intertropicaux. - *Akad. der Wissenschaften in Göttingen, Math-Phys. Klasse 3*, **29**, 174-184.
- Alexandre, J.** (1978) - Les stades de la formation des cuirasses latéritiques en haut-Shaba (Zaire) et leur signification géomorphologique. - In: *Géomorphologie des reliefs cuirassés dans les pays tropicaux chauds et humides. Travaux et Documents de Géographie tropicale. CEGET*, n°33, 133-149.
- Alexandre, J. et Lequarré, A.** (1978) - Essai de datation des formes d'érosion dans les chutes et les rapides du Shaba. - *Geo-Eco-Trop*, **2**, 279-286.
- Alexandre, J. et Alexandre-Pyre, S.** (1987) - La reconstitution à l'aide des cuirasses latéritiques de l'histoire géomorphologique du Haut-Shaba. - *Zeits. f. Geom., suppl. Bd.* **64**, 119-131.
- Alexandre, J. et Icart J.C.** (1980) - Les cailloutis superficiels du plateau des Kundelungu. - *Bull. Soc. belge Géol.*, **89**, 4, 277-289.
- Alexandre, J. et Streel-Potelle, A.** (1979) - Les alluvions anciennes de la Lupembashi inférieure (Shaba, Zaire) et l'évolution d'une plaine alluviale de région intertropicale à saison sèche pendant la fin du Quaternaire. - *Geo-Eco-Trop*, **3**, 3, 169-184.
- Alexandre, J. et Tshidibi, N. ya B.** (1984) - Les enduits ferrugineux associés aux cuirasses latéritiques successives du Haut-Shaba. Nature, structure et mode de formation. - *Geo-Eco-Trop*, **8**, 37-46.
- Alexandre-Pyre, S.** (1967) - Les processus d'aplanissement de piémont dans les régions marginales du plateau des Biano. - *Publ. Univ. Officielle du Congo à Elisabethville*, **16**, 3-50.
- Alexandre-Pyre, S.** (1971) - Le plateau des Biano (Katanga). Géologie et géomorphologie. - *Ac. roy. belge Sc d'Outre-Mer, Mém.*, 151p.
- Alexandre-Pyre, S.** (1976) - Les terrasses. - In: A. Pissart (Éd.). *Géomorphologie de la Belgique*. Liège, 52-65.
- Aloni, J.** (1975) - Le sol et l'évolution morphologique des termitières géantes au Haut-Shaba (Rép. Zaire). - *Pédologie*, **XXV**, **1**, 25-39.
- Aloni, J., Mbenza, M. et Alexandre, J.** (1987) - Composition, profondeur et répartition spatiale des stone-lines du Sud-Shaba (Zaire). - *Geo-Eco-Trop*, **11**, 109-126.
- Bauer, M.** (1898) - Über die Natur des Laterits. - *Pet. Mitt*, **44**, 280-283.
- Beaudet, G., Coque, R. et Michel, P.** (1977) - Altérations tropicales et accumulations ferrugineuses entre vallée du Niger et les massifs centraux sahariens (Aïr et Hoggar). - *Zeit.f. Geom.*, **21**, 3, 297-322.
- Bellièvre, J.** (1961) - Manifestations métamorphiques dans la région d'Elisabethville. - *Publ. Univ. Elisabethville*, **1**, 175-179.
- Bellièvre, J.** (1966) - Les sédiments kundelungiens dans l'arc Mwashia - Bunkeya. - *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **89**, B357-373.
- Benza, P.M.** (1836) - Memoir of the geology of the Neelgherry and Koondah Mountains. Madras. - *J. Lit. Sc.*, **4**, 13, 241-299.
- Beugnies, A.** (1954) - La nappe phréatique des environs d'Elisabethville et les phénomènes connexes d'altération superficielle. - *Annales du Service des Mines et du Service géographique et géologique, Comité Spécial du Katanga, sér.A*, **17**, (1952-53), 3-54.
- Stanford, W.T.** (1859) - Notes on the laterite of Orissa. - *Mem. Geol. Survey India*, **1**, 280-294.
- Boulangé, B., Delvigne, J. et Eschenbrenner, V.** (1973) - Descriptions morphoscopiques, géochimiques et minéralogiques des faciès cuirassés des principaux niveaux géomorphologiques de Côte d'Ivoire. - *Cah. ORSTOM, sér. Géol*, **V**, **1**, 59-81.
- Brewer, R.** (1964) - Fabric and mineral analysis of soils. - *John Wiley*, 470 p.
- Buchanan, F.** (1807) - A journey from Malabar through the countries of Mysore, Canara and Malabar. - *East Indian Cy, London*, 2, 440-441.
- Buol, S.W., Hole, F.D. et Mc Cracken, R.J.** (1973) - Soil genesis and classification. - *The Iowa State University Press, Ames*, 160 p.
- Cahen, L.** (1954) - Géologie du Congo belge. - Liège, 577 p.
- Cahen, L., Snelling, N.J., Delhal, J., Vail, J.R.** (1984) - The Geochronology of Africa. - *Clarendon Press, Oxford*, 512 p.

- Chételat, E. de** (1938) - Le modelé latéritique de l'ouest de la Guinée française. - *Rev. Géog physique et Géol. dynamique*, **XI**, 5-120.
- D'Hoore, J.** (1954) - L'accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux. - *Publ. INEAC, sér. sc.*, **62**, 132 p.
- De Dapper, M.** (1978) - Couvertures limono-sableuses, stone-lines, indurations ferrugineuses et action des termites sur le plateau de la Manika (Kolwezi, Shaba, Zaïre). - *Geo-Eco-Trop.*, **2**, 2, 265-278.
- De Dapper, M.** (1987) - Pedisements and stone-lines complexes in Peninsular Malaysia. - *Geo-Eco-Trop*, **11**, 37-59.
- De Dapper, M. et Malaisse, F.** (1979) - Relations entre les différents stades d'érosion d'une cuirasse latéritique et la végétation sur le plateau de la Manika (Shaba, Zaïre). - *Geo-Eco-Trop*, **3**, 2, 99-117.
- de Heinzelin, J.** (1955) - Observations sur la genèse des nappes de gravats dans les sols tropicaux. - *Publications de l'INÉAC sér. sc.*, **64**, 37 p.
- De Ploey, J.** (1965) - Position géomorphologique, genèse et chronologie de certains dépôts superficiels au Congo occidental. - *Quaternaria*, **7**, 131-154.
- De Ploey J., Lepersonne J. et Stoops G.** (1968) -Sédimentologie et origine des sables de la Série des Sables Ocre et de la Série des "Grès Polymorphes" (système du Kalahari) au Congo occidental. Musée royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, série in-8°, **61**, 4 planches, 72 p.
- de Swardt, A.M.J.** (1964) - Laterisation and landscape development in parts of Equatorial Africa. - *Zeits. f. Geom.*, **8**, 3,313-333.
- de Swardt, A.M.J. et Trendall, A.F.** (1970) - The physiographic development of Uganda. - *Overseas Geol. Miner. Resources*, **10**, 241-288.
- Dibanga, B.** (1982) - Essai d'identification des différents niveaux de terrasses dans la région de Lubumbashi (Shaba, Zaïre). - *Geo-Eco-Trop*, **6**, 2, 91-104.
- Dibanga, B. et Alexandre, J.** (1996) - Une terrasse fluviale associée à un seuil rocheux dans une région tropicale à saison sèche. La Kafubu à Kambikila, Shaba, Zaïre. - *Bull. Soc. belge d'Ét. Géog.*, 1996-1, 35-47.
- Dorn, R.I. et Oberlander, T.M.** (1982) - Rock varnish. - *Progress in physical Geog.*, **6**, 3, 317-367.
- du Bois, C.G.B. et Jeffery, P.G.** (1955) - The composition and origin of the latérites of the Entebbe Peninsula, Uganda Protectorate. - *Col. Geol. et Miner. Resources*, **5**, 387-408.
- Duchauffour, Ph.** (1965) - Précis de pédologie. -*Masson*, 481 p.
- du Preez, J.W.** (1949) - Laterite. A general discussion with a description of Nigerian occurrence. - *Bull. Agr. Congo belge*, **40**, 53-66.
- El-Baz, F. and Prestal, D.** (1980) - Desert varnish on sand grains from the Western Desert of Egypt: importance of the clay component and implications to Mars. - *Lunar and Planetary Science*, **1**, 254-256.
- Erhardt H.** (1951) - Sur l'importance des phénomènes biologiques dans la formation des cuirasses ferrugineuses en zone tropicale. - *C.R. Ac. Sc. Paris*, **233**,805-806.
- Eschenbrenner, V.** (1987) - Les glébules des sols de Côte d'Ivoire. - *Thèse Sciences, Université de Bourgogne, Dijon*, **1**, 498 p., **2**, 282 p.
- Feuer, R.** (1956) - An exploratory investigation in the soils and agricultural potential of the soils of the future federal district in the central plateau of Brazil. - *Ph. D. Thesis*, Cornell University, Ithaca, New-York.
- Grandin, G.** (1976) - Aplanissements, cuirasses et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. - *ORSTOM, Mémoires*, **82**, 275 p., 11 planches.
- Gras, F.** (1970) - Surface d'aplanissement et remaniement des sols sur la bordure orientale du Mayombe. - *Cah. ORSTOM, ser. Pédol*, **7**, 273-294.
- Grassé, P.P.** (1984) - Termitologia. T.2: Fondation des sociétés, Construction. Fondation Singer-Polignac, Masson, Paris, 613 p.
- Greene, H.** (1950) - So-called irreversible laterization. -*Trans. 4th Int. Cong. Soil Science, Amsterdam*, **2**, 175-177.
- Hénocque, O., Ruffet, G., Nahon, D., Colin, C. et Féraud, G.** (1996) - Datation des phénomènes d'altération par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. - *16^e Rast, Soc. Géol. France*, p. 112.
- Johnson, R.J.** (1959) - Physiographic evolution of Western Uganda District. - *Geol. Survey Uganda RJJ/23* (cité par Mc Farlane, 1976).
- Kanourkov, G.** (1970) - La classification des limonites. -*Ann. Soc. Géol. Belg.*, **93**, 331-336.
- Karimoune, S.** (1994) - Géomorphologie de la région de Zinder. Damagaram et plateau du Koutous. - *Geo-Eco-Trop*, **18**, 218 p.
- Kubiena, W.L.** (1956) - Rubifizierung und Lateritisierung. - *CR. 6^e Congrès Sc. Sol Paris*, 253.
- Lacroix, A.** (1913) - Les latérites de la Guinée et les produits d'altération qui leur sont associés. - *Nouv. Arch. Mus.*, **5**, 5, 255-356.
- Lake, P.** (1890) - The geology of South Malabar, between the Beypore and Ponnani rivers. - *Mem. Geol. Survey India*, **24**, 201-246.

- Laporte, G.** (1962) - Reconnaissance pédologique le long de la voie ferrée, COMOLOG. - *Inst. Rech. Scient. Congo, Rapport MC119*, Brazzaville, 149 p.
- Lee, K.E. and Wood, T.G.** (1971) - Termites and soils. - *Academic Press*, 251 p.
- Lelong, F.** (1966) - Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altération tropicale. Conséquence pour la pédogenèse. - *Sciences de la Terre*, **11**, 203-244.
- Lelong, F.** (1969) - Nature et genèse des produits d'altération des roches cristallines sous climat tropical humide. - *Mémoires, Sc. de la Terre*, 1-14.
- Lepersonne, J.** (1945) - Stratigraphie du Système du Kalahari et du Système du Karroo au Congo occidental. - *Bull. Serv. Géol. du C.B. et R.U.*, **1**, 27-49.
- Lepersonne, J.** (1974) - Carte géologique du Zaïre au 1/2.000.000. 2 feuilles en couleur et notice explicative de 67 p. - *République du Zaïre, Département des Mines, Direction de la Géologie*.
- Leprun, J.C.** (1979) - Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse, transformations, dégradations. - *Univ. L. Pasteur, Strasbourg, Sc. Géol, mémoire*, **58**, 224 p.
- Lequarré, A.** (1978) - La végétation et l'action géomorphologique des rivières dans une région tropicale humide. Exemple de la moyenne Kafubu. - *Geo-Eco-Trop.*, **2**, 1, 103-112.
- Levêque, A.** (1970) L'origine des concrétions ferrugineuses dans les sols du socle granito-gneissique au Togo. - *Cah. ORSTOM, sér. Pédol*, **VIII**, 3, 321-345.
- Machado, A. de Barros** (1994) - Massive presence of fossil termitic intestinal flagellates in laterites. - *Eurolat, Belfast Conference proceedings*, 35-38.
- Macar, P.** (1957) Les chutes de l'Inkisi et leurs divers modes d'érosion. - *Ann. Soc. géol. Belgique*, **70**, 38-50.
- Maignien, R.** (1958) - Le cuirassement des sols en Guinée, Afrique occidentale. - *Serv. Carte Géol. Alsace Lorraine, Mémoires*, 239 p.
- Maignien, R.** (1966) - Compte rendu de recherches sur les latérites. - *UNESCO*, 155 p.
- Mc Farlane, M.J.** (1971) - Lateritization and landscape development in Kyagwe, Uganda. Q. - *Jl. Geol. Soc. London*, **126**, 501-539.
- Mc Farlane M.J.** (1976) - Laterite and landscape. - *Academic Press*, 151 p.
- Mc Laren, M.** (1906) - On the origin of certain laterites. - *Geol. Mag.*, **5**, 3, 536-547.
- Michel, P.** (1973) - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Étude de géomorphologie. - *ORSTOM, Mémoires*, **63**, 3 tomes, 752 p.
- Michel, P.** (1978) - La dynamique actuelle de la géomorphologie dans le domaine soudanien de l'Ouest africain: exemples du Mali occidental et Sénégal oriental.
- Moeyersons, J.** (1987) - The concentration of stones into a stone-line, as a result from subsurface movements in fine and loose soils in the tropics. - *Geo-Eco-Trop.*, **11**, 11-22.
- Mortelmans, G.** (1950) - Observations sur la morphologie de la région de Mitwaba - Haute Kalumengongo (monts Kibara, Katanga). - *Bull. Soc. belge. Géol*, **59**, 3, 383-399.
- Mulcahy, M.J.** (1961) - Soil distribution in relation to landscape development. - *Zeits. f. Geom.*, **5**, 211-225.
- Mulcahy, M.J.** (1960) - Latérites and lateritic soils in south-western Australia. - *J. Soil Sc.*, **11**, 206-226.
- Nahon, D.** (1976) - Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs: géochimie, structures, relais et coexistence. - *Sciences Géologiques, Strasbourg*, **44**, 232 p.
- Nazaroff, P.S.** (1931) - Notes of the spongy ironstone of Angola. - *Geol. Mag.*, **68**, 443-446.
- Newbolld, T.J.** (1846) - Summary of the geology of India : Part VI. Latérite. - *Roy. Asiatic Soc.*, **8**, 227-240.
- Nye, P.H.** (1955) - Some soil-forming processes in the humid tropics. IV. The action of the soil fauna. - *J. Soil Sc.*, **6**, 73-83.
- Oldham, R.D.** (1893) - A manual of the geology of India. (2nd ed.) Calcutta, 369-390.
- Oilier, CD.** (1988) - Deep weathering, groundwater and climate. - *Geografiska Annaler*, **70**, A, 285-290.
- Pallister J.W.** (1956) - Slope, form and erosion surfaces. - *Geol. Mag.*, 93, 465-472.
- Pélissier, P. et Rougerie, G.** (1953) - Problèmes morphologiques dans le bassin du Siguiri (Haut Niger). - *Bull. I.F.A.N., sér.A*, **XV**, 1-47.
- Pettijohn, F.J.** (1957) - Sedimentary rocks. - *Harper Bros.*, New-York.
- Prescott, J.A. and Pendleton, R.L.** (1952) - Laterite and lateritic soils. - *Commonwealth Bur. Soil Sc., Technical Communication n°47*, 51 p.
- Preuss, J.** (1990) - L'évolution des paysages du bassin intérieur du Zaïre pendant les quarante derniers millénaires. - *In: Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique*, (Lanfranchi, R. et Schwartz, D., Eds.) 260-270.
- Roche, E.** (1987) - Paléoenvironnement du Quaternaire supérieur au Shaba (Zaïre). Datation de deux stone-lines par la palynologie: Kamoia et Haute Luilu. - *Geo-Eco-Trop.*, **11**, 171-183.

- Schellmann, W.** (1981) - Considerations on the definition and classification of laterites. - *In : Lateritisation processes, Proceedings International Seminar on Lateritisation Processes, Trivandrum, 1979*, 1-10.
- Sijs, C. et Schmitz, A.** (1959) - La région d'Elisabethville (Katanga). - *Cartes des sols et de la végétation du C.B. et du R.-U.*, 9, INEAC, Bruxelles, 70 p.
- Sivarajasingham, S., Alexander, L.T.A., Cady, J.G. et Cline, M.C.** (1962) - Latérite. - *Advanc. Agron.*, 14, 1-60.
- Soyer, J.** (1978) - Les sables de couverture du plateau des Kundelungu (Shaba, Zaïre). - *Coll. Sao Paulo Cartographie des Formations superficielles et son application en régions tropicales*, 1, 225-238.
- Stoops, G.** (1968) - Micromorphology of some characteristic soils of the Lower Congo (Kinshasa). - *Pédologie*, XVIII, 1, 110-149.
- Stoops, G.** (1967) - Le profil d'altération au Bas-Congo (Kinshasa). - *Pédologie*, XVII, 1, 60-105.
- Streel, M.** (1963) - La végétation tropophylle des plaines alluviales de la Lufira moyenne (Katanga méridional). - *FULRÉAC*, Liège, 242 p.
- Tardy, Y. et Roquin, Cl.** (1998) - Dérive des continents, Paléoclimats et altérations tropicales. - *B.R.G.M.*, 473 p.
- Tardy, Y.** (1993) - Pétrologie des latérites et des sols tropicaux. - *Masson*, 459 p.
- Tessier, F.** (1959) - Termitières fossiles dans la latérite de Dakar (Sénégal). Remarques sur les structures latéritiques. - *Ann. Fac. Sc. Univ. Dakar*, 4, 91-132.
- Thomas, M.F.** (1994) - Geomorphology in the tropics. A study of weathering and denudation in low latitudes. - *John Wiley*, 460 p.
- Trendall, A.F.** (1962) - The formation of apparent peneplains by a process of combined lateritisation and surface wash. - *Zeits. f. Geom.*, 6, 2, 183-197.
- Tricart, J.** (1966) - Le modelé des régions chaudes, forêts et savanes. - *SEDES*, 322 p.
- Tricart, J. et Cailleux, A.** (1965) - Introduction à la géomorphologie climatique. - *SEDES*, 305 p.
- Tshidibi, N. ya B.** (1984) - Évolution des quartz au sein des cuirasses latéritiques et des sols ferrugineux. - *Geo-Eco-Trop*, 8, 93-110.
- Van Wambeke, A. et Van Oosten, M.F.** (1956) - Carte des sols et de la végétation du Congo belge et du Ruanda-Urundi, 8. Vallée de la Lufira. - *I.N.E.A.C.*, Bruxelles, 71 p.
- Varajão, C.A.C.** (1988) - Estudo comparativo das jazidas de bauxitica do Quadrilátero ferífero, Minas Gerais, Micromorfologia, Geoquímica, Geomorfologia et Sensoriamento remoto. - *Dr. Thesis, São Paulo*, 213 p.
- Vasconcelos, P.M., Renne, P.R., Brimhall, G.H. et Becker, T.A.** (1994) - Direct dating of weathering phenomena by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar analysis of supergene K-Mn oxides. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 904-930.
- Walker, T.R.** (1979) - Red colour in dune sand. - *U.S. Geol. Survey, Prof. Paper*, 1052, 62-81.
- Woolnough, W.G.** (1918) - The physiographic significance of laterite in Western Australia. - *Geol. Mag.*, 5, 385-393.



Équidistance : 100m