

GÉOCHIMIE DE LA SURFACE ET FORMES DU RELIEF
IV. LA DÉGRADATION DES CUIRASSES FERRUGINEUSES. ETUDE ET
IMPORTANCE DU PHÉNOMÈNE PÉDOLOGIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST

Jean-Claude LEPRUN*

RÉSUMÉ. — Des puits percés dans les cuirasses ferrugineuses sur les roches cristallines de Haute-Volta permettent d'observer la destruction sur place de ces niveaux indurés. Les mécanismes évolutifs sont mis en évidence, grâce à l'examen micromorphologique et aux analyses physico-chimiques et minéralogiques. Observé sous climat soudanien dans toute l'Afrique occidentale, ce phénomène de destruction des cuirasses a une influence sur les formes du relief. Il conduit vers le Nord aux regs sahariens et vers le Sud au modelé convexo-concave accentué de la forêt tropicale humide.

La plupart des auteurs qui ont traité des cuirassements ferrugineux de l'Afrique de l'Ouest reconnaissent et décrivent des phénomènes de dégradation de ces cuirasses (CHETELAT, 1938 ; ROSEVEAR, 1942 ; AUBERT, 1949 et 1963 ; D'HOORE, 1954 ; FOURNIER, 1956 ; ALEXANDER *et al.*, 1956 et 1962 ; ALEXANDER, 1957 ; MAIGNIEN, 1958 et 1966...). La notion d'irréversibilité des cuirasses n'est plus de mise (GREENE, 1950). De plus, il est admis que certains niveaux indurés sont issus du démantèlement des cuirasses antérieures (LAMOTTE et ROUGERIE, 1962 ; MICHEL, 1973...), et ceci rend la destruction de ces dernières nécessaire et éventuellement répétée. Paradoxalement, ces mêmes auteurs invoquent la solidité du matériel cuirassé pour rendre compte des formes aplanies du paysage qui serait « armé » par ces formations indurées. Les phénomènes avancés pour expliquer la dégradation font intervenir la mise à l'affleurement, l'action des racines, de l'eau de ruissellement et d'infiltration et de la matière organique.

En Haute-Volta orientale (fig. 1), sur le socle granitique ou migmatitique très fréquemment cuirassé, sous climat tropical à saisons contrastées, des travaux antérieurs (LEPRUN, 1971, 1972) éclairent les relations génétiques entre les roches mères et les cuirasses, ainsi que le mécanisme de destruction des cuirasses et son rôle dans le façonnement du modelé. Certains points, dans les mêmes zones, peuvent être aujourd'hui précisés.

I — ETUDE DESCRIPTIVE DES PROFILS ET CHAÎNES DE SOLS

1. La toposéquence de Thion

Entièrement située sur des migmatites à biotite et amphibole, elle joint en 120 m une butte cuirassée basse à un axe de drainage incisé dans la roche saine. La pluviosité moyenne annuelle avoisine 700 mm.

Le profil amont THN 1 présente la succession suivante :

* Institut de Géologie de l'Université Louis Pasteur, 1 rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex.

27 OCT. 1978

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 9370 Peds
0x1

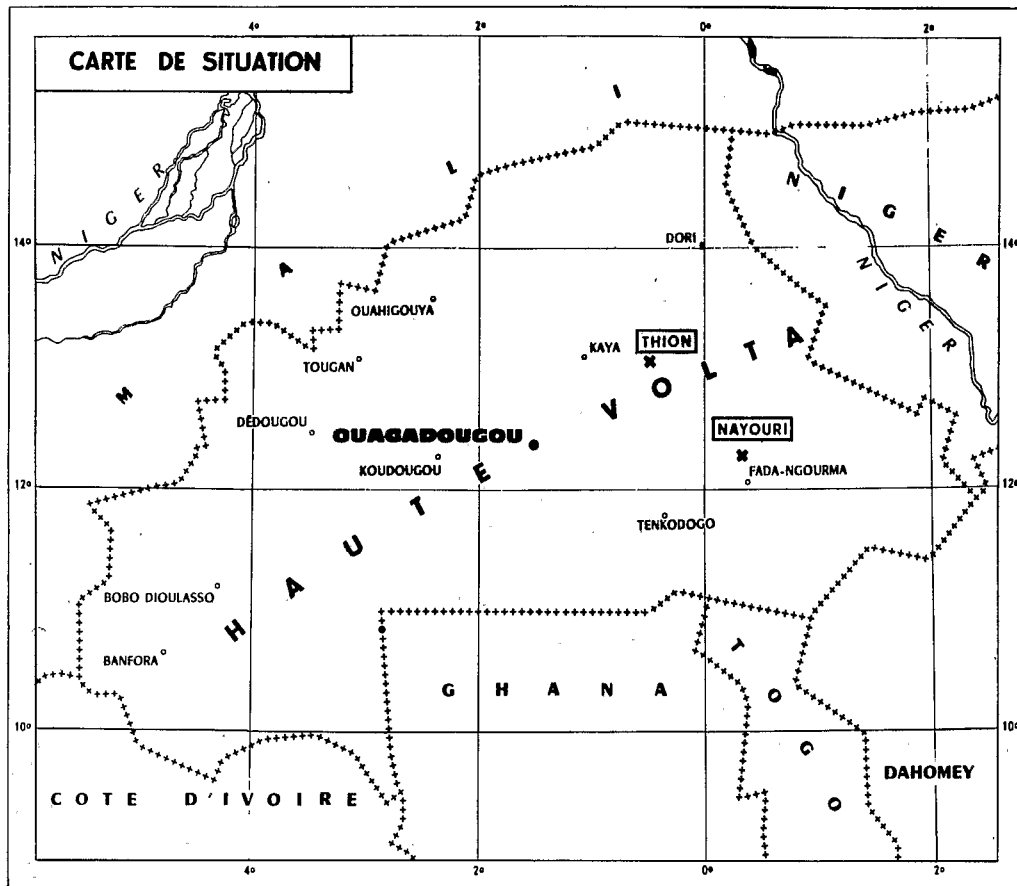


Fig. 1 — Schéma de localisation

— Sur 66 cm : dalle de cuirasse massive très dure, diaclasée en blocs de plus d'un mètre, à remplissage fissural de terre fine et de nodules ferrugineux. Des tubulures se localisent en périphérie et surtout à la base des blocs.

— De 66 à 76 cm : nodules ferrugineux de grande taille, à structure d'éléments de cuirasse emballés dans une terre fine. Ces nodules se subdivisent en éléments noduleux plus petits, plus ou moins jointifs, de 2 à 3 cm, brun-ocre en périphérie et plus noirs au centre. La porosité d'assemblage et internodulaire est bien développée. Tous les intermédiaires existent entre la dislocation périphérique des gros éléments de cuirasse et les nodules à noyaux sombres.

— De 76 à 112 cm : horizon constitué de nodules à centre sombre entièrement disjoints, emballés dans la terre fine. Revêtements argileux beige-rouge au sommet, diminuant et disparaissant vers la base en même temps que s'accroît la porosité. Diminution corrélative du nombre et de la taille des nodules qui perdent progressivement leur cortex brun, puis leur centre sombre. On aboutit à la base à un niveau graveleux, composé uniquement de quartz grossiers «lavés», de 0,2 à 0,5 cm, et de quelques nodules sombres, saupoudrés de sables blancs fins.

— De 112 à 133 cm : horizon à revêtements argileux beige-rouge emballant des quartz grossiers de 0,2 à 0,5 cm. Porosité très faible à nulle. Rares nodules noirs, petits et friables, et très rares gros éléments de 5 cm à structure de cuirasse.

— De 133 à 215 cm : deux horizons argileux bariolés, à quelques minéraux visibles, à structure verticale lissée à la base, à nodules et amas calcaires vivement effervescents à l'acide.

— De 215 à 282 cm : arène migmatitique altérée. Effervescence calcaire dans la masse, au sommet.

— Au-delà, passage arène-roche où tous les minéraux sont reconnaissables. Une passée pegmatitique quartzo-feldspathique sub-verticale se suit jusqu'à 133 cm. A ce niveau, elle s'infléchit et devient horizontale.

Vers l'aval (fig. 2) :

— Sur la pente du tronçon A, les disjonctions entre les blocs augmentent, s'élargissent. Tous les horizons précédents se retrouvent, mais les blocs de cuirasse sont moins volumineux, le remplissage de terre fine plus important, et l'efflorescence calcaire décalée vers l'arène (THN 2).

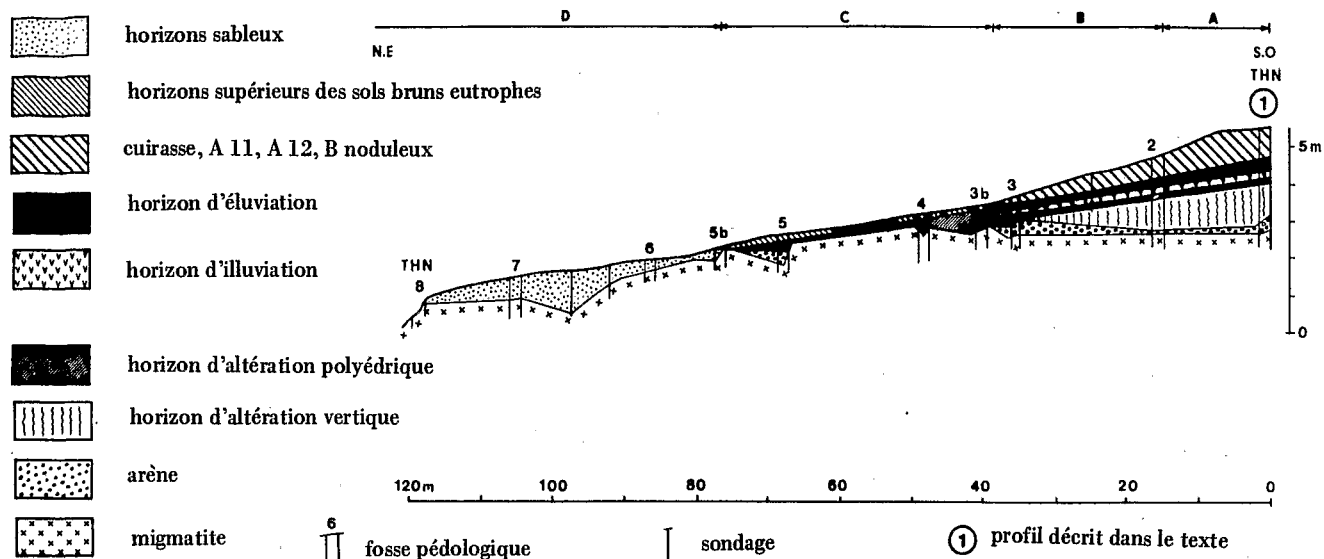


Fig. 2 - Toposéquence de Thion

- Sur le tronçon B, les blocs indurés s'amenuisent encore davantage, l'épaisseur du profil diminue nettement : les horizons à nodules ferrugineux ont 30 cm d'épaisseur, les horizons argileux à minéraux altérables 70 cm environ.
 - Sur les tronçons C et D, les nodules ferrugineux disparaissent, l'horizon argileux s'amincit encore, et disparaît en D, envahi par un matériau sableux.

2. La toposéquence de Nayouri

La roche mère est un granite fin à biotite, légèrement migmatitisé. La pluviosité annuelle moyenne est proche de 900 mm. Les puits profonds joignent, sur plus de 2 700 m, un plateau à cuirasse affleurante à un thalweg large peu incisé.

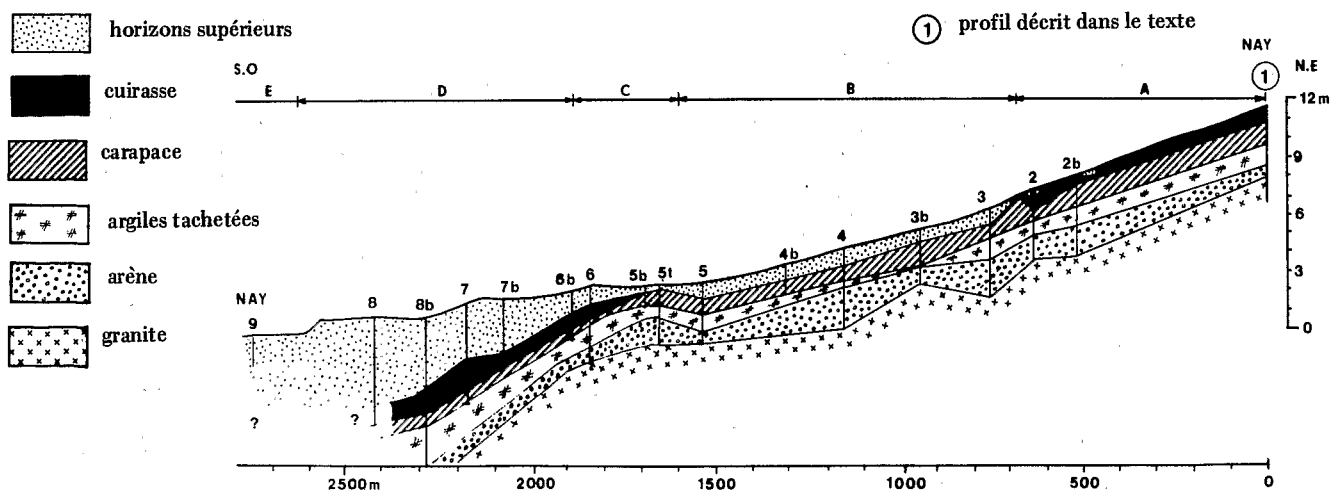


Fig. 3 - Toposéquence de Nayouri

Le profil amont NAY 1 permet d'observer la coupe suivante :

— De 0 à 130 cm : une dalle de cuirasse massive à conglomératique, très dure, subdivisée en quatre horizons.

0-45 cm : matrice sablo-argileuse cimentant des nodules ferrugineux bruns, fortement soudés entre eux. Réseau de tubulures à remplissage partiel. A la base, fissuration horizontale d'aspect feuilleté et saupoudrage de sables fins.

45-75 cm : l'aspect lamellaire augmente vers la base et aboutit à une dislocation en écailles de 2-3 cm dont le centre est sombre.

75-93 cm : les fentes horizontales se poursuivent sur toutes les faces de la fosse. Structure lamellaire, à vides sous-lamellaires importants et revêtements de sables blancs fins. Les lamelles de cuirasse disjointes présentent, de l'extérieur vers le centre, une différenciation concentrique brune, ocre et noire.

93 - 130 cm : cuirasse massive à nodules, à fissures rares et fines.

— De 130 à 270 cm : horizon moins induré, à aspect de carapace.

— De 270 à 340 cm : horizon d'argiles tachetées à matrice argilo-sableuse bariolée et à structure de la roche reconnaissable par plages vers la base.

— De 340 à 410 cm : arène granitique diaclasée, peu argilifiée.

— Au-delà de 410 cm : granite plus sain.

Vers l'aval (fig. 3), tous les puits rencontrent les mêmes niveaux sous-jacents à la cuirasse, jusqu'à la roche mère. La cuirasse sommitale manque par endroits vers l'aval, remplacée par des horizons gravillonnaires constitués de nodules ferrugineux disjoints et des débris cuirassés lamellaires plus grossiers. On la retrouve ensuite enterrée profondément.

II — EXAMEN MORPHOLOGIQUE ET RÉSULTATS ANALYTIQUES

A partir de l'observation de plusieurs lames minces taillées dans chaque horizon du profil de Thion (THN 1) décrit précédemment, on peut dresser le tableau I. Les observations micromorphologiques résumées dans ce tableau permettent les interprétations suivantes.

Tableau I
Caractères micromorphologiques du profil THN 1

Horizons	Assemblage	Plasma	Traits pédologiques
0-66 cm	porphyrosquelique	asépique	lithoreliques et nodules diffus
66-76	aggloméroplasmique	squelsépique et vosépique	argiloferranes et nodules arrondis
76-112	intertextique et granulaire	vosquelsépique	argiloferranes et squeletanes — nodules à cortex
112-133	porphyrosquelique	squelsépique et asépique juxtaposés	squeletanes et argiloferranes — quelques minéraux altérables
133-156	porphyrosquelique	asépique	nodules calcaires — papules — quelques minéraux altérables
156-215	porphyrosquelique	asépique	nodules calcaires — biotites ferruginisées — minéraux altérables
215-280	granulaire et faiblement porphyrosquelique	faiblement asépique	beaucoup de minéraux altérables biotite chloritisée
280 cm	granulaire	sans (arène)	tous les minéraux altérables reconnaissables — arène

La cuirasse sommitale présente des domaines différents.

— Des domaines dans lesquels la structure de la migmatite originelle peut être reconnue : alignements de biotites de grande taille, exfoliées, entièrement ferruginisées, non pléochroïques ; quartz engrenés à structure en mosaïque, à

extinction par plans, corrodés sur leurs bords, non microfissurés. Nous appelons ces domaines les lithoreliques.

— Des domaines à structure lithologique non reconnaissable, à quartz en mosaïque et à extinction roulante très microfissurés en maillage orthogonal emprunté par le fer, à matrice argilo-ferrugineuse et à squelette de petits quartz.

Dès l'horizon situé sous la cuirasse, les ferriargilanes apparaissent et les nodules se séparent de la matrice. Les lithoreliques donnent préférentiellement naissance aux nodules distincts. Les quartz microfissurés se défont et lâchent leurs petits cristaux dans le plasma. La désorganisation maximale est atteinte à 112 cm, l'assemblage devenant granulaire, à quartz non fissurés et à nodules ferrugineux rares et petits. Le domaine occupé par les vides est très important (> 50 %). L'horizon de 112 à 133 cm présente à sa partie supérieure des ferriargilanes entourant chaque grain de quartz, qui sont semblables à ceux de l'horizon sus-jacent. Par contre, vers sa base, les minéraux altérables augmentent, les argilanes se raréfient, le plasma n'est plus orienté. Le reste de la fosse confirme cette altéropiasmation et passe progressivement à une arène.

À Nayouri, les lames minces des niveaux de 0 à 93 cm livrent des observations analogues : lithoreliques, différenciation des nodules, granulation des quartz, formation puis diminution du plasma. Le tableau II fournit quelques résultats analytiques intéressant les horizons du profil NAY 1 décrit précédemment.

Tableau II
Quelques résultats analytiques obtenus sur les profils THN 1 et NAY 1

Analyse horizons	Granulométrie		Minéralogie				Chimie			
	argile %	sables totaux %	argiles			minéraux lourds		résidus tri-acides %	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
			kaol. inters.	mont.	goeth.	totaux % pond.	opaques			
THN 1										
0-66 cm	—	—	10		+	0,09	+	19,7	38,2	31,8
66-76	30,5	52,7	9	1	+	0,38	+	23,0	42,0	28,2
76-112	27,9	54,6	8	2	+	0,64	+	35,4	50,0	23,1
112-133	42,1	41,2	7	3	+	0,29	+	67,2	78,5	3,8
133-156	42,9	31,4	5	ε	5	0,54		42,6	61,5	4,8
156-215	37,6	36,4	4	ε	6	1,06		39,1	58,2	5,1
215-280	4,8	69,1	3		7	3,85		58,2	62,0	4,0
NAY 1										
5-20 cm	pas assez de terre fine à 2 mm		10	ε	+	0,13	+	30,5	45,8	28,1
20-45	pas assez de terre fine à 2 mm		10	ε	+	0,11	+	30,7	40,5	29,7
45-75	pas assez de terre fine à 2 mm		10	ε	+	0,31	+	38,1	54,0	22,6
75-93	29,6	51,8	10	ε	+	0,93	+	29,6	43,0	32,3

Sables totaux : fraction de 50 μ à 2 mm ; argiles : évaluation semi-quantitative de 1 à 10 suivant les surfaces des pics principaux ; goéthite : + : présente ; minéraux lourds totaux (transparents + opaques) : + : présence ; SiO₂ et Fe₂O₃ : analyses totales par colorimétrie après fusion.

III — LES LEÇONS

1. A l'échelle du profil

a) Dégradations internes par altération géochimique

À Thion, le profil amont présente une nette opposition, selon que l'on examine sa partie supérieure ou sa partie profonde. Ces deux ensembles sont séparés par la ligne de sables blanchis à 112 cm et cette limite est renforcée par le

fauchage des filons de quartz sous ce niveau. Nous interprétons ce profil comme la superposition verticale d'un manteau kaolinique ferrugineux, coiffé de sa cuirasse, sur une altération montmorillonitique et calcaire. Tous deux sont issus d'une même migmatite originelle dans deux histoires successives.

Le fractionnement de la cuirasse en blocs, puis en nodules, la libération et la granulation des quartz, l'exportation de l'argile et du fer par la circulation des eaux provoquent une véritable « fonte » de la cuirasse, principalement à sa base. Cette « fonte » provoque corrélativement la mise en place d'horizons internes, éluviaux et sableux (A₂), et d'horizons internes illuviaux argilo-sableux (B₂), au toit de l'argile d'altération. Ces horizons s'apparentent à ceux qui sont décrits par BOCQUIER (1971), puis BOULET (1974) sur les mêmes roches et sous les mêmes climats. Les valeurs fournies par les analyses granulométriques, minéralogiques et chimiques confirment cette résolution d'un niveau de la cuirasse initiale en un horizon sableux particulière.

A Nayouri, la cuirasse se ronge, se fragmente et se démantèle dans sa masse, dans la tranche située entre 75 et 93 cm. Le phénomène est moins poussé qu'à Thion et le résultat moins spectaculaire, en raison de l'épaisse altération kaolinique qui sépare cette dégradation de la roche mère sous-jacente. Des dégradations semblables ont été décrites dans des cuirasses développées sur roches sablo-argileuses sédimentaires (NAHON, 1976 ; NAHON *et al.*, 1977).

Ainsi, les cuirasses sont affectées, dans leur sein et à leur base, de phénomènes de dégradation à caractère géochimique dominant, qui les transforment en faciès sableux résiduels.

b) Dégradation superficielle à caractère mécanique dominant

A l'opposé, sur la grande majorité des affleurements de cuirasse de Haute-Volta, des figures de dislocation et de fissuration dues aux racines et à la faune, et empruntées par elles, sont visibles. De même, fréquemment, la cuirasse est jonchée de nodules ferrugineux. Certains ne sont pas encore entièrement libérés, ce qui a pour effet de donner à la surface de la cuirasse un aspect faussement conglomératique. Fragmentée par l'action pédologique, biologique, mécanique et biochimique, nettoyée par le ruissellement, la surface affleurante de la cuirasse, écimée, se rectifie lentement (LEPRUN, 1972).

Ces phénomènes superficiels, bien vus par les géomorphologues et interprétés (ALEXANDER *et al.*, 1956 ; ALEXANDER, 1957), ont été groupés sous les termes de désagrégation mécanique (MICHEL, 1973) : il s'agit d'actions pédologiques où la désagrégation mécanique est importante. Ces actions cessent ou s'estompent lorsqu'elles sont prises de vitesse par l'altération physico-chimique à l'intérieur de la cuirasse, entièrement rongée, laquelle donne naissance à un sol meuble sablo-argileux et gravillonnaire. Elles cessent aussi, lorsque affectés par un soutirage et une dégradation interne trop puissants, les blocs de cuirasse isolés se trouvent posés sur la surface du sol. Ces blocs, soustraits à la dégradation interne, mais entièrement soumis aux phénomènes de surface, persisteront longtemps. Ceci montre la primauté des dégradations internes évoquées précédemment sur les dégradations surtout mécaniques de la pédogenèse superficielle.

2. A l'échelle du versant

A Thion, on note la disparition des horizons indurés vers l'aval. La cuirasse est victime, dans sa masse et à sa base, de mécanismes hydrodynamiques et géochimiques dont l'agressivité croît avec la pente. Les lithosols de la cuirasse passent alors à des sols peu évolués gravillonnaires meubles, puis à des sols bruns eutrophes et à des planosols. Le front de la roche saine est de moins en moins profond en allant vers l'aval, par amincissement concomitant du sommet kaolinique et de l'altération montmorillonitique basale. On a passage de sols séniles à des sols juvéniles plus riches.

A Nayouri, toute une partie médiane de la séquence a perdu sa cuirasse, dont ne persistent que des débris et des nodules ferrugineux disjoints. Comme à Thion, les sols de cette partie possèdent des couples d'horizons éluviaux-illuviaux. Un manteau sablo-argileux de matériel redistribué recouvre et rectifie la portion aval du versant.

La désagrégation et la dissolution interne des cuirasses provoquent dans tous les cas, un tassement par soutirage, une contraction des dénivellations, et dans l'ensemble un adoucissement du relief.

3. A l'échelle du paysage

La formation du modelé va être fortement influencée par le décuirassement. Elle sera différente selon la zone climatique, le modelé cuirassé antérieur, et la roche originelle.

Sur les roches cristallines, si le modelé cuirassé est plan ou faiblement penté, la dégradation conduira à un modelé du type de celui de Nayouri. La cuirasse, encore robuste à l'amont, se trouvera dégradée et digérée à mi-versant, puis de nouveau solide et affleurante à proximité de l'axe de drainage. L'amont évoluera peu à peu en butte témoin, l'aval pourra s'enterrer. Si le modelé cuirassé est convexo-concave, et ce cas est plus rare, l'amont est entièrement démantelé et passe à une croupe gravillonnaire. Le cuirassement aval persiste.

En Haute-Volta centrale et orientale, la présence d'une ceinture cuirassée quasi continue a été mise en évidence (BOULET et LEPRUN, 1969) sur le socle cristallin, entre les 12 et 13^{ème} degrés de latitude Nord. Le climat est sahélo-soudanien, c'est-à-dire à saison sèche estivale stricte.

Vers le Nord du pays, sur les mêmes roches, sous climat sahélien, les reliefs cuirassés s'amenuisent, les buttes témoins tabulaires deviennent rares, peu élevées. Le modelé est très faiblement convexo-concave ; les versants appelés glacis, très plans, s'étendent sur plusieurs kilomètres. Les vestiges de la cuirasse sont parfois enterrés à faible profondeur, comme dans la toposéquence de Tassamakati (BOULET, 1974). On passe insensiblement par allongement des versants aux regs des régions désertiques. Certains de ces regs, dits « noirs », sont encore constitués de nodules ferrugineux. Tous les jalons entre la butte cuirassée et la surface caillouteuse plane sont visibles. La disparition des nodules ferrugineux fait passer aux regs à débris quartzeux de surface, lesquels ne sont que la concentration des filons de quartz ou de pegmatite issus de la roche. Quelques gros blocs de cuirasse non digérée, comme posés sur le manteau d'altération sous-jacent, permettent de faire la liaison avec les formes plus complètes. Lorsque ces blocs se trouvent en contact avec l'altération calcaire montmorillonitique, leur dégradation se fait par carbonatation, comme l'ont montré NAHON (1976) et NAHON *et al.* (1977). Ce cas, peu fréquent dans nos zones de travail, s'observe parfois en milieu engorgé sahélien (LEPRUN, 1977).

Vers le Sud, sous climat soudano-guinéen, l'altération des cuirasses conduit au modelé convexo-concave mieux dessiné, à amplitude horizontale réduite (quelques centaines de mètres) et à amplitude verticale accentuée (une à plusieurs dizaines de mètres). Par enfoncement des axes de drainage, on atteint alors le modelé dit « demi-orange » des pays tropicaux humides qui peut conserver, sur le sommet des coupoles, des restes de cuirasse, et sur les flancs des sols à horizon gravillonnaire résiduel.

CONCLUSIONS

1. Un phénomène pédologique de dégradation interne des cuirasses ferrugineuses est décrit en Haute-Volta. Il est omniprésent en Afrique de l'Ouest, où nous l'avons reconnu, au Sénégal, en Mauritanie du SE, au Mali, au Togo et au Cameroun (MULLER, 1974).

2. Ces dégradations sont un phénomène actuel, ou tout au moins qui se poursuit activement en Afrique tropicale à saisons alternées, dans des régions où le cuirassement ferrugineux est considéré par la communauté scientifique comme un mécanisme contemporain.

3. Non seulement le cuirassement n'est plus actif dans ces régions, mais il est montré que la période actuelle sous ces climats est « décuirassante » dans la partie kaolinique supérieure du manteau d'altération, et en même temps toujours « altérante » dans la partie inférieure, mais cette fois en montmorillonite.

4. Ces dégradations se produisent à la base de la cuirasse et en son sein plus qu'en surface. Elles sont physico-chimiques, liées à la dynamique des eaux météoriques et de même nature que les altérations géochimiques des roches saines. Ici elles aboutissent au décuirassement.

5. La cuirasse soumise à cette altération se désorganise en débris de tailles décroissantes, qui se désagrègent en leurs constituants, pour finalement ne laisser dans et sous la cuirasse que des horizons éluviaux sableux (A₂) et des horizons illuviaux argilo-sableux (B). Les lithoreliques, protégées dans la masse de la cuirasse, sont à leur tour livrées à l'altération.

6. Ce décuirassement géochimique se distingue des dégradations mécaniques de démantèlement de surface lié aux actions pédologiques. Mais il en poursuit les effets initiaux de dislocation et de fissuration. Il se surajoute aux actions pédologiques superficielles et à celle du ruissellement et des racines, qui conduisent, elles aussi, à des nodules ferrugineux.

7. Ce décuirassement correspond à un déséquilibre. BOULET (1974) a montré que le manteau kaolinique non cuirassé est en déséquilibre croissant dans la zone tropicale, aux saisons sèches de plus en plus longues. Il en est de même pour les cuirasses ferrugineuses des manteaux kaoliniques cuirassés.

8. Au total, dans cette zone climatique de déséquilibre de la cuirasse ferrugineuse, celle-ci est dégradée, par son sommet et par son intérieur, par deux familles d'actions pédologiques : les actions pédologiques et mécaniques superficielles d'une part, et les actions pédologiques internes, décrites ici, qui la minent par décuirassement et désagrégation d'autre part.

9. Cette dégradation conduit à la formation de sols nouveaux et à des modelés nouveaux qui mènent insensiblement à la disparition de la cuirasse : vers le Sud, aux modèles convexo-concaves accentués, et vers le Nord, par l'intermédiaire des buttes témoins cuirassées, aux longs glacis à « regs noirs » du désert.

Manuscrit déposé le 28 septembre 1977

Summary

Some profiles holed in the ironcrusts on the crystalline rocks of Haute-Volta permit the author to observe the destruction in situ of these indurated horizons. The evolutive mechanisms are pointed out due to the micromorphologic study and to physico-chemical and mineralogical analyses. This phenomenon of destruction, which is observed under Sudanese climate in the whole Western Africa influences land forms. Northward, this results in the formation of Saharian regs and southward in the marked concavo-convex modelé of the humid tropical forest.

Zusammenfassung

Schürfe durch Eisenpanzer hindurch auf Kristallingesteinen in Ober-Volta ermöglichen es die Zerstörung dieser verhärteten Niveaus an Ort und Stelle zu beobachten. Die sich fortentwickelnden Mechanismen werden anhand von mikromorphologischen Untersuchungen und physiko-chemischen und mineralogischen Analysen verdeutlicht. In ganz West-Afrika hat das Phänomen der Zerstörung der Panzer, das unter dem Klima des Sudan beobachtet wurde, einen Einfluss auf die Formen des Reliefs. Es erstreckt sich nach Norden bis zu den Saharagebieten und nach Süden bis zum tropischen Regenwald, der die Gestaltung von Höhen und Tiefen noch betont.

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDER L.T., LADY J.G., WHITTIG L.D. et DEVER R.F. (1956) — Mineralogical and chemical changes in the hardening of laterite. VIth Internat. Congr. Soil Sci., Paris, V, p. 67 - 72.
 ALEXANDER L.T. (1957) — Special lectures. Agronomy 210, Fall.
 ALEXANDER L.T. et LADY J.G. (1962) — Genesis and hardening of laterite in soils. *U.S. Dept. Agric. Techn. Bull.*,

- Washington, 1282, 90 p.
- AUBERT G. (1949) — Observations sur le rôle de l'érosion dans la formation de la cuirasse latéritique. C.R. Conf. afr. sols, Part. 2. In : *Bull. agr. Congo belge*, 40, p. 1383 - 1386.
- AUBERT G. (1963) — Soil with ferruginous or ferrallitic crusts of tropical regions. *Soil Sci.*, 95, p. 235 - 242.
- BOCQUIER G. (1971) — Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse Sci. Strasbourg et *Mém. ORSTOM*, 62, (1973), 350 p.
- BOULET R. et LEPRUN J.C. (1969) — Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Est. Rapp. ORSTOM, Dakar, multigr., 331 p.
- BOULET R. (1974) — Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibres dynamiques et bioclimats. Thèse Sci. Strasbourg, multigr., 330 p.
- CHETELAT E. de (1938) — Le modelé latéritique de l'Ouest de la Guinée française. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, 11, 1, 119 p.
- D'HOORE J. (1954) — L'accumulation des sesquioxydes libres dans les sols tropicaux. *Publ. Inst. Nat. Et. Agron. Congo*, Sér. Sci., 62, 132 p.
- FOURNIER F. (1956) — Les formes et types d'érosion du sol par l'eau en A.O.F. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 42, p. 215 - 221.
- GREENE H. (1950) — So-called irreversible laterisation. IVth Internat. Congr. Soil Sci., Amsterdam, 2, p. 175 - 1977.
- LAMOTTE M. et ROUGERIE G. (1962) — Les apports allochtones dans la genèse des cuirasses ferrugineuses. *Rev. Géomorph. dyn.*, 13, 10-12, p. 145 - 160.
- LEPRUN J.C. (1971) — Premières observations sur des toposéquences à amont cuirassé en Haute-Volta orientale : rôle de la pédogenèse dans la destruction des cuirasses et le façonnement du modelé. *Bull. liaison ORSTOM*, thème B, 2, p. 39 - 53.
- LEPRUN J.C. (1972) — Cuirasses ferrugineuses autochtones et modelé des bas reliefs des pays cristallins de Haute-Volta orientale. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 275, D, p. 1207 - 1210.
- LEPRUN J.C. (1977) — Rapport de la mission pédologique. Rapp. ORSTOM A.C.C. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan (Haute-Volta), multigr., 19 p.
- MAIGNIEN R. (1958) — Le cuirassement des sols en Guinée. Thèse Sci. Strasbourg et *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 16, 239 p.
- MAIGNIEN R. (1966) — Compte-rendu de recherches sur les latérites. Coll. Recherches sur les ressources naturelles, 4, UNESCO, Paris, 155 p.
- MICHEL P. (1973) — Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Thèse Lettres Strasbourg 1969 et *Mém. ORSTOM*, 63, 752 p.
- MULLER J.P. (1974) — Introduction à l'étude de trois toposéquences situées entre Goyoum et Den-Deng. Rapp. ORSTOM, Yaoundé, multigr., 18 p.
- NAHON D. (1976) — Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie, structures, relais et coexistence. Thèse Sci. Aix-Marseille et *Sci. Géol., Mém.*, 44, 232 p.
- NAHON D., MILLOT G., PAQUET H., RUELLAN A. et TARDY Y. (1977) — Géochimie de la surface et formes du relief. VII. Digestion et effacement des cuirasses ferrugineuses par les encroûtements calcaires en pays aride, Sahara de Mauritanie. *Sci. Géol., Bull.*, 30, 4, p. 289 - 296.
- ROSEVEAR R.D. (1942) — Soil changes in Evrugu plantation. *Farm and Forest*, 5, n° 1.