

LE CUIRASSEMENT DES SOLS

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

J.J. TRESCASES

Section Géologie
Centre ORSTOM - NOUMEA

Février 1968

LE CUIRASSEMENT DES SOLS

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

J.J. TRESCASES

Section Géologie
Centre ORSTOM Nouméa

Février 1968

S O M M A I R E

Résumé	page 1
Abstract	2
I. Définitions - Généralités	3
II. Nature de la cuirasse -	
A - Constituants	4
B - Caractéristiques	4
1 - Induration	
2 - Structure	
3 - Couleur	
4 - Densité	
III. Le phénomène de cuirassement. Essai d'interprétation	6
A - Altération	6
B - Migration	7
1 - Réduction	
2 - Formation de complexes	
3 - Abaissement du pH	
4 - Bicarbonatation	
5 - Adsorption des hydroxydes ferriques sur les argiles	
C - Immobilisation	9
1 - Causes.....	
a) Oxydation	
b) Disparition de la matière organique	
c) Augmentation du pH	
d) Accumulation d'argiles	
2 - Modes d'accumulation	
3 - Induration	
D - Décapage de l'horizon superficiel	10
E - Evolution de la cuirasse	10
IV. Influence des facteurs du milieu	14
A - Climat	
B - Végétation - faune	
C - Roche	
D - Topographie	
1 - formes favorables	
2 - évolution du relief	
V. Bibliographie	

RESUME

Les cuirasses, niveaux pédologiques indurés constitués essentiellement de sesquioxides, peuvent se rencontrer dans des contextes très variés.

On trouve dans les cuirasses des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, des quartz néoformés, de la kaolinite, des débris de roches ou d'anciennes cuirasses. L'induration augmente avec la teneur en fer, le degré de vieillissement et de compaction. La structure peut être meuble, cohérente ou ordonnée. La couleur varie du blanc (aluminium) au rouge-brun-noir (fer). La densité, toujours élevée, augmente avec la teneur en fer.

Le cuirassement nécessite une source de sesquioxides dans le bassin versant, roche avec minéraux ferromagnésiens, ou cuirasse en cours de démantèlement. L'altération libère les bases et la silice qui sont entraînées par les eaux météoriques. Un horizon humifère s'installe alors sur cette zone de départ.

Parmi les éléments résiduels, l'aluminium paraît relativement stable, le fer pouvant migrer verticalement, et surtout latéralement vers les zones topographiquement basses. Les causes fondamentales de ce départ sont la réduction, la formation de complexes, l'abaissement du pH, l'adsorption sur les argiles.

L'immobilisation a lieu dans une zone plus basse. Elle est causée par l'oxydation, le manque de matière organique, l'accumulation des argiles, l'augmentation de la saturation en bases, la dessiccation. Les hydroxydes imprègnent les cavités de circulation, précipitent en concrétions sur des germes et cimentent les particules. Ces accumulations se produisent à l'intérieur des profils. L'induration est provoquée par la dessiccation et le vieillissement.

L'induration dans le profil provoque l'érosion des horizons superficiels. Avec la mise à nu de la cuirasse commence son démantèlement. Les horizons sous-jacents, plus tendres, sont entraînés par les eaux d'infiltration. Des grottes apparaissent sous la cuirasse, des effondrements se produisent, la circulation de l'eau est souterraine, avec résurgences. L'érosion de la cuirasse donne des gravillons qui vont alimenter la formation de nouvelles cuirasses, topographiquement plus basses.

Le rôle des facteurs du milieu n'est pas négligeable = Un climat trop humide empêche l'induration, trop sec il gêne l'altération. Une pente trop forte provoque une érosion trop importante. La présence de forêt favorise la migration des sesquioxides, et gêne le cuirassement. La roche sous-jacente a une importance moins grande, l'élément entrant en ligne de compte étant le paysage tout entier.

ABSTRACT

FORMATION OF IRONCRUSTS IN SOILS

Ironcrusts, indurated pedological layers consisting essentially of R_2O_3 oxides, can be encountered in highly variable environments.

In ironcrust one can find oxides of iron and aluminum, precipitated silica, kaolinite and debris of rocks and reworked pre-existing ironcrusts. Induration increases with iron content, age and compaction. The structure of the crust can be friable, or coherent and massive, or well ordered. Color varies from white (aluminum) to reddish brown or reddish black (iron). Density always higher than the rest of the soil, increases with iron content.

The formation of iron crust requires a sources of R_2O_3 oxides in the drainage system either rocks with ferromagnesian minerals or else ironcrusts actively being dissected. Weathering liberates bases and silica which dissolved in meteoric water, infiltrate down into cracks and fissures in the rock and because of a higher pH accelerate decomposition of the weathered rock. A humiferous layer forms on the C zone of weathered rock.

Among the residual elements, aluminum is relatively stable ; iron is very mobile and can migrate vertically and especially laterally toward topographic lows. The principal reasons for iron mobility are reduction of Fe^3 to Fe^2 , formation of complexes (organic and silicic) lowering of pH and adsorption on clays.

Precipitation of iron takes place in a topographic low and can be caused by oxidation (due to a variation in soil texture or drainage), lack of organic material, accumulation of clays, increased content of bases which in turn increase pH and dessication. The precipitated hydroxides can impregnate circulation cavities, can be deposited as concretionary layers around nuclei soil particles and can act as a cement for soil particles within the soil profile. Induration of the deposit is promoted by dessication and age

This indurated layer within the soil profile augments erosion of the overlying soil layers. As soon as the ironcrust forms an outcrop its erosion begins. The less resistant subjacent soil layers are carried away by infiltrating water. Caves form under the hard ironcrust ; collapse of the crust can occur above these caves ; water circulation can be largely subterranean with occasional resurgences of rivers to the surface. Erosion of the ironcrust yields a gravel of ironcrust which can accumulate in topographic lows and become centers for formation there of new ironcrusts.

The role of immediate environment is not negligible = a climate too humid inhibits induration ; too dry reduces weathering and thereby, liberation of iron. Too steep a slope causes rapid erosion. A forest favors complexing and migrating R_2O_3 oxides and inhibits ironcrust formation. The immediately subjacent rocks do not play such an important role, because the chemical elements necessary for ironcrust can be transported to the soil from elsewhere in the drainage basin.

I. - DEFINITIONS - GENERALITES

Une cuirasse est un niveau induré constitué essentiellement d'oxydes et d'hydroxydes de fer, d'aluminium et quelquefois de manganèse. Ceci correspond à la définition de la latérite de BUCHANAN (1807).

Une concrétion est un noyau induré formé "in situ", de forme généralement arrondie. Un gravillon est un matériau induré, arrondi et remanié soit résiduel, soit détritique.

On rencontre des cuirasses dans des contextes très divers : leurs limites géographiques sont très larges, et des niveaux indurés existent sous des climats allant depuis la zone équatoriale jusqu'aux régions arides. L'altitude des gisements est variée. Le cuirassement n'est pas associé à un type de sol = on l'observe en milieu ferrallitique, mais aussi sur des sols ferrugineux tropicaux, hydromorphes ou même sub-arides. Les cuirasses peuvent affleurer, ou être enfouies, souvent en plusieurs strates, quelquefois très profondes. Leurs épaisseurs, leurs formes, leurs couleurs, leurs structures sont extrêmement variées.

Néanmoins certaines conditions sont plus fréquemment remplies = source de fer ou d'alumine, topographie sub-horizontale, limite savane-forêt et latitude comprise entre 7° et 15°. Ailleurs la cuirasse ne semble pas être totalement en équilibre.

II. - NATURE DE LA CUIRASSE.

A/ CONSTITUANTS.

L'alumine se présente sous différentes formes. La gibbsite γ Al(OH)₃ est la plus courante. La boehmite γ AlO(OH) est moins fréquente. Le diaspor α AlO(OH) est rare. Des gels ou agrégats microcristallins (cliachite, allophane ...) ont été observés (Segalen, 1965).

Le fer, constituant majeur de la plupart des cuirasses, est essentiellement sous forme de goethite α FeO(OH) et d'hématite α Fe₂O₃. La magnétite γ Fe₃O₄ est un oxyde résiduel. Les gels ferriques, ou agrégats cryptocristallins, sont courants (Segalen 1964)

La silice est le plus souvent sous forme de quartz, résiduel ou secondaire; la silice combinée est fréquente = c'est essentiellement de la kaolinite $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$.

On trouve enfin dans les cuirasses de nombreux débris de roches ou d'anciennes cuirasses démantelées.

B/ CARACTERISTIQUES.

1/ Induration : La dureté augmente avec la teneur en fer, et surtout avec le degré de cristallisation, la continuité de la phase cristalline et la compaction de l'assemblage. Le vieillissement, qui favorise la cristallisation, augmente l'induration.

MAIGNIEN (1958) distingue quatre degrés de dureté de cuirasse = faiblement indurée quand elle se casse à la main ; moyennement indurée quand elle se façonne à la bêche ; bien indurée quand elle se brise au marteau ; fortement indurée lorsque le marteau rebondit.

2/ Structures : Elles sont très variées, et peuvent se grouper en :

- structures hétérogènes.

• mauble : concrétions ou nodules dans un matériau terreux
• cohérente et conglomératique (bréchoïde, poudinguiforme).
vacuolaire, les cavités du squelette renfermant des matériaux non indurés.

- structures homogènes : c'est le cas de roches épigénisées par des sesquioxydes.
- structures ordonnées : lamellaire, pisolithique ou oolithique. (Alexander et al. 1956 ; Alexander et Cady 1962, du Preez 1952 ; Frei 1964 ; Hamilton 1964 ; Schmidt-Lorenz 1964 ; Waegemans 1952)

3/ Couleur : la pigmentation dépend surtout des oxydes de fer plus ou moins hydratés : elle peut aller du brun-rouge au brun noir en passant par toutes les gammes de rouge. Le manganèse donne une teinte violette. L'alumine et la kaolinite, blanches à l'état pur, sont en général imprégnées d'hydroxydes de fer, et prennent des couleurs rouges ou bariolées de rose (D'Hoore et al. 1954 ; Castagnol et Shàn-Giè-Tu 1940)

4/ Densité : La densité apparente est en général élevée, et augmente avec la compaction de l'assemblage et le degré de vieillissement. La densité réelle augmente avec la teneur en fer. Elle atteint 3,8 en Nouvelle Calédonie.

III. - LE PHENOMENE DE CUIRASSEMENT - ESSAI D'INTERPRETATION.

Le phénomène de cuirassement, c'est à dire de l'individualisation d'un horizon induré, résulte de la concentration et de l'induration de différents oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium.

Ce processus est donc lié à la migration différentielle de matériaux constitutifs du sol ou de la roche.

L'accumulation peut se réaliser suivant deux schémas : accumulation relative, les produits les plus mobiles étant exportés et accumulation absolue par importation de sesquioxides mobilisés (D'Hoore 1949 et 1954).

Tous les processus de migration sont conditionnés par le drainage. Le drainage est vertical, à travers le profil, mais surtout oblique = les reliefs élevés sont lessivés et subissent un enrichissement relatif pendant que les zones inférieures reçoivent, de façon absolue, argile et sesquioxides.

La formation de l'horizon cuirassé nécessite plusieurs phases que nous allons examiner successivement.

A/ ALTERATION

Une source de sesquioxides est indispensable dans le paysage. Cette source n'est pas constituée nécessairement par la roche-mère, mais peut être une cuirasse fossile en cours de démantèlement . Le cuirassement n'est pas spécifique du milieu ferrallitique mais implique toutefois une altération intense des minéraux primaires des roches avec individualisation des éléments constitutifs.

Le mécanisme d'altération de ces minéraux primaires est une hydrolyse : les cations les plus solubles, c'est à dire les alcalins et alcalino terreux sont entraînés par les eaux de drainage et ce, d'autant plus facilement que la structure du cristal est plus lâche. Les nésosilicates, à tétraèdres isolés, sont ainsi les plus altérables.

Le lessivage des bases est accompagné du lessivage de la silice. Les eaux chargées en base voient leur pH augmenter, ce qui accélère les dissolutions ultérieures. Les eaux s'infiltront dans les diaclases et le processus se poursuivant la zone de départ descend. Un horizon humifère s'installe au sommet du profil. Les produits subsistants au-dessus de la zone de départ, enrichis relativement en sesquioxydes par le lessivage, et qui ont en général conservé la structure initiale de la roche, continuent à s'altérer et vont souvent donner lieu à des migrations. Dans le cas contraire l'évolution aboutit aux faciès de cuirasses d'accumulation relative.

Ces phénomènes d'altération et de lessivage ont été décrits par de nombreux auteurs : Lacroix (1913 et 1934), Harrassowitz (1926 et 1930), Harrisson (1933), Bonnet (1939), Bonifas et Millot (1955 et 1956), Bonifas (1959), Sharpenseel et al. (1963), Schellmann (1963), Craig et Loughnan (1964), Beater et Frankel (1965) etc ...

B/ MIGRATION.

Les possibilités de migration des sesquioxydes sont fonction de leurs caractères géochimiques. Les facteurs les plus importants sont les conditions de pH, de Eh, la formation de complexes et les liaisons hydroxydes-argiles. Le vecteur des migration est l'eau d'infiltration, qui draine non seulement le profil, mais surtout le paysage tout entier. Verticalement les migrations se font sur une ou deux dizaines de mètres, latéralement les distances peuvent être très importantes, l'ordre de grandeur étant de plusieurs centaines de mètres (Maignien 1956). Notons que les remontées capillaires invoquées autrefois sont très faibles et n'existent que dans les zones où les hydroxydes sont immobilisés.

1/ Réduction : Les pH de précipitation des hydroxydes sont de 3,4 pour le fer ferrique et de 7,8 pour le fer ferreux ; l'aluminium précipite vers pH 4,5 mais donne $Al(OH)_4^-$ soluble à pH supérieur à 10. Dans les conditions habituelles d'acidité des sols seul le fer ferreux peut donc subsister à l'état dissous. L'aluminium hydroxylé est soluble dans certains milieux très alcalins.

Le milieu réducteur est essentiellement induit par l'hydromorphie. La matière organique favorise les réactions de réduction en consommant l'oxygène du milieu. En l'absence d'oxygène ce processus s'accroît d'ailleurs, de nombreuses bactéries réduisant le fer ferrique en fer ferreux.

2/ Formation de complexes : Ils sont de deux types : complexes organiques ou complexes siliciques. En présence de matière organique le fer et l'aluminium forment des ions complexes et des chélates, solubles dans les conditions normales de précipitation des hydroxydes. (Atrinson et Wright 1957 ; Lossaint 1958 et 1959).

La formation de composés ferrisiliciques solubles est plus discutée. Elle a été mise en évidence expérimentalement par Bastisse (1946-1949) et 1967) et Demolon (1938 et 1944). Son existence dans le milieu naturel n'est pas absolument certaine.

3/ Abaissement du pH : Le milieu évolue vers une acidité plus grande du fait du lessivage intense des bases, et du fait de la libération d'acides par décomposition de la matière organique.

4/ Bicarbonatation : La migration du fer peut également avoir lieu sous forme de bicarbonate mais cela semble plus rare.

5/ Adsorption des hydroxydes ferriques sur les argiles : A un pH inférieur à 7,5 (point isoélectrique) l'hydroxyde ferrique est chargé positivement et peut donc se fixer sur les feuilletts argileux. Le lessivage des argiles entraîne le fer, la fraction fine étant maintenue en dispersion par l'absence de bases.

En résumé on peut conclure que les phénomènes de migration intéressent beaucoup plus le fer que l'alumine. On voit donc déjà se dessiner la distinction fondamentale entre les cuirasses d'accumulation relative, plus alumineuses, topographiquement élevées, et les cuirasses d'accumulation absolues, essentiellement ferrugineuses, topographiquement plus basses.

C/ IMMOBILISATION

Tant que les conditions qui ont présidé à leur mobilisation subsisteront, les hydroxydes de fer vont continuer leur migration sur les versants, en solution dans les eaux d'infiltration.

1/ Causes de l'immobilisation : l'immobilisation a lieu suivant un processus inverse de celui de la mise en solution. Elle a lieu en profondeur dans la plupart des cas.

a) Oxydation : elle peut être réalisée par des microorganismes. La cause la plus fréquente est une augmentation de l'aération. Celle-ci est réalisée soit par une variation de la texture, qui devient plus grossière, soit par une modification du drainage vers une circulation rapide de l'eau, par exemple autour des racines, ou dans les cavités laissées par les racines pourries, cavités qui se fossilisent en goethite.

L'oxydation redonne du fer ferrique et détruit les complexes. Mais cette distinction peut être réalisée par d'autres modifications du milieu physico-chimique.

b) Disparition de la matière organique : elle est provoquée par une régression de la forêt, un débroussement, ou par l'érosion des horizons humifères (le second phénomène étant souvent la conséquence du premier).

Le manque de matière organique va supprimer la possibilité de complexes ou de chélates, mais aussi un effet indirect d'oxydation : le milieu ne consommant plus d'oxygène pour la destruction de la matière organique voit son Eh augmenter, ainsi d'ailleurs que son pH.

c) Augmentation du pH : Outre la disparition de la matière organique, la cause principale d'élévation du pH est l'augmentation de la saturation en bases. Les solutions qui drainaient les pentes vont s'accumuler dans les zones planes. Les bases se concentrent dans la nappe, ainsi créée. Dans les zones de battement de la nappe (en saison sèche)

l'oxydation se déclenche immobilisant les hydroxydes ferriques.

Le rôle de niveau de base peut être rempli par un seuil rocheux sur une pente, ou un niveau argileux. La topographie s'aplanit alors et se conserve, accélérant le phénomène.

d) Accumulation d'argiles : c'est encore une conséquence d'un aplanissement de la morphologie. Les argiles s'accumulent, et avec elles les hydroxydes adsorbés sur leur surface. Là encore l'hydromorphie apparaît, et, comme dans le paragraphe précédent, dans les zones de battement de la nappe le fer lié aux argiles s'individualise en concrétions. La texture devenant plus grossière l'aération augmente, donc le Eh ce qui accélère encore le processus d'immobilisation.

On remarque chaque fois la convergence des phénomènes : toute modification des conditions physico-chimiques du milieu provoque un déplacement complet de l'équilibre, et une réaction en chaîne s'installe immobilisant rapidement les hydroxydes dans la zone en voie de cuirassement. C'est ainsi qu'une région déjà cuirassée est un milieu éminemment favorable à l'accumulation et à l'immobilisation d'importantes quantités d'hydroxydes.

La position privilégiée des cuirasses sur les rebords de plateau ou, plus généralement, dans les zones bien drainées s'explique également par les conditions aérées qui règnent dans ces milieux.

2/ Modes d'accumulation

Pour une accumulation relative, la structure de la roche est conservée, les cristaux étant pseudomorphosés en un squelette aéré fossilisant leurs clivages.

Accumulation absolue, elle peut prendre plusieurs facies :

- Dans un milieu hétérogène, elle se traduit par la concentration de particules grossières (sables, graviers, débris de roches ou de cuirasse). Il peut y avoir aussi imprégnation d'un matériau à texture assez fine, selon un réseau, souvent par épigénie. Enfin une forme courante d'accumulation est le concrétionnement : nous avons vu comment les hydroxydes de fer liés aux argiles pouvaient évoluer en concrétions. Mais on rencontre de véritables pisolithes

formés de cortex concentriques et réguliers. Ces concrétions résultent de la précipitation de films d'hydroxydes sur un nucléus (quartz, débris de roches, débris ferrugineux). Ces concentrations sont à leur tour cimentées. De nombreux micromorphologues ont étudié ces processus : Fridland (1961), Hohos et Alias (1956).

La morphologie de l'accumulation est fonction du processus qui l'a élaborée : l'accumulation relative conduit à une structure scoriacée parfois tassée. Les structures des accumulations absolues sont en relation avec la physico-chimie du milieu de formation : la saturation en cations bivalents tend à favoriser la formation de concrétions arrondies, un milieu acide à structure aérée verra prédominer les imprégnations diffuses. Les faciès sont d'autant plus concentrées que le phénomène d'immobilisation est brutal (Maignien 1966 a)

3/ Induration : La simple concentration des hydroxydes ne suffit pas pour former un horizon induré. A l'intérieur d'un profil de sol ferrallitique on n'observe souvent pas de différences minéralogiques et chimiques entre les horizons meubles et la cuirasse. C'est l'assemblage des constituants qui développe l'induration.

Celle-ci augmente avec le degré de cristallisation et la continuité de la phase cristalline. En général l'induration n'intéresse qu'une faible proportion du fer présent dans l'horizon. Il y a avant tout réorganisation des constituants vers une cristallisation des agrégats microcristallins en une trame continue de goethite.

La propriété d'adsorption des hydroxydes par la kaolinite, qui a favorisé l'immobilisation, va limiter l'induration en laissant des poches d'argile dans la trame de goethite cristallisée, diminuant ainsi la compaction et l'homogénéité de l'assemblage.

L'induration étant une recristallisation est favorisée par la dessiccation et le vieillissement. La mise à nu de l'horizon d'accumulation est cause fréquente du cuirassement. Ce décapage est progressif et constitue encore une réaction en chaîne : l'induration commençante démarre l'érosion des

horizons superficiels ce qui va accélérer l'induration (Maignien 1966 b)

D/ DECAPAGE DE L'HORIZON SUPERFICIEL.

Tous les auteurs s'accordent aujourd'hui pour considérer que les cuirasses affleurantes sont des parties de profils tranqués.

La première cause de l'érosion est l'apparition en profondeur de l'horizon durci qui, en modifiant le drainage, va favoriser l'ablation des parties meubles superficielles. L'intervention humaine, qui détruit la forêt ou même la totalité de la végétation va également dans ce sens.

L'érosion commence par une érosion en nappe, puis se poursuit par une érosion en rigoles, qui s'approfondissent jusqu'à l'horizon induré.

E/ EVOLUTION DE LA CUIRASSE.

A ce stade la cuirasse affleure, mais son évolution va continuer, l'horizon induré se comportant comme une roche-mère.

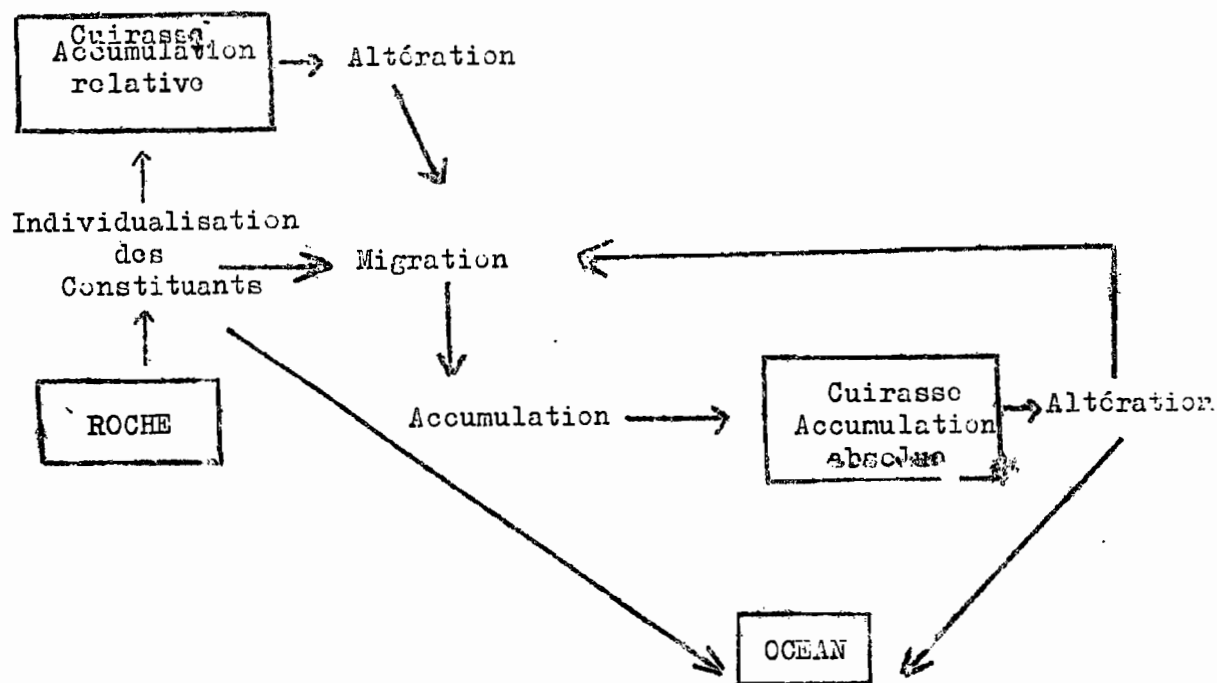
Dans un premier stade l'évolution est lente, la cuirasse s'assombrit par un enrichissement secondaire en fer et par polissage.

L'altération proprement dite commence ensuite, et avec elle la destruction de la cuirasse : les matériaux meubles situés dans le squelette sont déblayés, les ciments dissous, et les concrétions, remaniées et érodées, deviennent des gravillons. Un véritable sol se développe au sommet de la cuirasse, caractérisé d'abord par une couche superficielle de gravillons

La présence de la cuirasse protège néanmoins et retarde un peu l'érosion, les horizons sous-jacents, plus tendres, étant entraînés les premiers. L'eau en s'infiltrant chasse violemment les éléments fins des niveaux inférieurs, et il apparaît une sorte de karst, avec des circulations souterraines, des résurgences, des grottes, la cuirasse étant assez cohérente pour former le plafond de ces grottes. Les plafonds s'effondrent ensuite, et de véritables dolines parsèment la région cuirassée. Sur les pentes de grands morceaux de cuirasses peuvent glisser, l'érosion creusant alors de profonds ravins à l'emplacement dénudé, ce sont les lavakas bien connus des géomorphologues, et décrits à Madagascar, au Brésil, à Hong-Kong (Tricart et Cailloux, 1965). Ce sont typiquement ces formes de relief que l'on observe en Nouvelle Calédonie.

Les gravillons libérés vont alimenter la formation de nouvelles cuirasses, topographiquement plus basses, et l'on rejoint ainsi la notion fondamentale de catena, et de source de sesquioxydes dans le paysage.

On peut regrouper l'ensemble de ces phénomènes sur le cycle suivant :



Les publications relatives à l'évolution des cuirasses, leur érosion, et la genèse de nouveaux horizons indurés par apports allochtones sont très nombreuses, pédologues et géomorphologues ayant étudié simultanément ces phénomènes. On peut citer Aubert (1948-1949-1950), Aubroville (1947), Erhart (1966), Fournier (1953), Lamotte et Rougerie (1953-1956-1962).

IV. INFLUENCE DES FACTEURS DU MILIEU

A/ CLIMAT.

Il agit par deux variables, la pluviométrie et la température. Une température moyenne élevée favorise le cuirassement, ce dernier pouvant affecter les roches basiques à des températures relativement basses de l'ordre de 15°C.

Les données sur la pluviométrie sont plus caractéristiques. Si le climat est trop humide, les phénomènes de dissolution prédominent, la forêt provoque la formation de grande quantité de complexes, l'humidité gêne l'induration : en milieu ferrallitique seule les cuirasses aluminieuses, relatives, sont favorisées. Si le climat est trop sec il n'y a pas assez de végétation ni d'altération pour une libération suffisante des hydroxydes. Le climat le plus favorable implique une alternance de saisons bien marquées, la période de pluie coïncidant avec la saison chaude. Les pluies de moussons sont ainsi plus actives que les pluies d'alizés.

B/ VEGETATION - FAUNE.

La forêt gêne le cuirassement, ou l'oriente vers la formation de cuirasse alumineuse. Les niveaux cuirassés sont en général associés à des zones de savane (Humbert 1948). Les essais de reboisement sur cuirasse ont d'ordinaire conduit à des échecs.

Le rôle des termites a été souvent discuté (Erhart 1951).

C/ ROCHE

Les roches basiques se cuirassent plus facilement que les roches acides. La roche a aussi un rôle par son action sur le drainage. Mais il faut surtout considérer que c'est le paysage tout entier, en particulier la toposéquence, et non la roche sous-jacente, qui fournit les hydroxydes de fer.

D/ TOPOGRAPHIE

La morphologie est le facteur primordial du cuirassement.

1/ Formes favorables : une pente trop forte, supérieure à 8 % provoque une érosion et un lessivage trop grand.

Les pentes faibles, mais bien drainées, sont favorables au cuirassement. Il peut s'agir de surfaces structurales sub-horizontales, de terrasses anciennes, de pénéplaines et surtout des rebords de plateaux, des ruptures de pentes.

Les différences de résistance à l'érosion provoquent sur les pentes la formation de replats qui se cuirassent et sont donc protégés de l'érosion.

Les formations de piedmont dominées par des reliefs cuirassés, se cuirassent en général avec facilité.

2/ Evolution du relief : Le cuirassement peut affecter profondément le modelé d'une région. L'installation des niveaux indurés provoque l'apparition de formes convexes, de collines à coiffe ferrugineuse protectrice.

La résistance des cuirasses à l'érosion finit par provoquer des inversions de relief, les zones basses, protégées se retrouvent en hauteur sur des buttes témoins. C'est pour la même raison qu'en zone tropicale la morphologie peut être inverse de celle des régions tempérées, les roches les plus altérables, c'est-à-dire les plus riches en minéraux ferro-magnésiens, étant cuirassées, forment les plus hauts reliefs.

Cette liaison entre le cuirassement et la géomorphologie est étudiée par de très nombreux auteurs : Bonnault (1938), Castanheira et al. (1966), Hervieu (1963), Mulcahy (1961), Rougerie (1959 et 1960), Tricart et Michel (1965), Vogt (1959).

Nous pouvons conclure en définissant les conditions optimales de cuirassement : une zone tropicale, topographiquement plane, à végétation dégradée, en bordure de zone de drainage (piedmont, éboulis, décrochement de pente), et située à proximité de reliefs cuirassés, ou dans un bassin versant de roche basique ou ultrabasique.

Notons pour terminer que la formation d'une cuirasse est un phénomène rapide : Maignien (1958) estime que dans un bassin versant de 1 km², une cuirasse de 1000 m² et de 1 m d'épaisseur se met en place en un siècle.

-:-:-:-

B I B L I O G R A P H I E

La bibliographie concernant les cuirasses est immense, aussi n'avons nous cité dans le texte que les ouvrages récents.

- ALEXANDER L.T., CADY J.G., WHITTIG L.D., DEVER R.F. - 1956 - : Mineralogical and chemical changes in the hardening of laterite.
C.R. 6e Congr. Inter. Sc. Sol. Paris, vol. B, p. 67
- ALEXANDER L.T. & CADY J.G. - 1962 - : Genesis and hardening of lateritic in soils.
U.S.D.A. Techn. Bull. 1282, 90 p.
- ATRINSON H.J., WRIGHT J.R. - 1957 - : Chelation and vertical movement of soil constituents.
Soil Sci. 84, 1, p. 1-11
- AUBERT G. - 1948 - : Sur le rôle de la cuirasse ferrugineuse comme roche-mère de nouveaux sols.
Comm. Conf. Sols trop. Rothamsted.
- AUBERT G. - 1949 - : Observation sur le rôle de l'érosion dans la formation de la cuirasse latéritique.
Bull. Agr. Congo Belge, 2, p. 1383-1386.
- AUBERT G. - 1950 - : Observations sur la dégradation des sols et la formation de la cuirasse latéritique dans le Nord-Ouest du Dahomey.
C.R. 4e Congr. Inter. Sc. Sol. Amsterdam. III, p. 123-128
- AUBERT G. - 1954 - : Les sols latéritiques. : C.R. 5e Congrès Inter. Sol Léopoldville, I, p. 103-118
- AUBERT G. - 1963 - : Soil with ferruginous or ferrallitic crusts of tropical regions.
Soil Sci., 95, n° 4, p. 235-42
- AUBREVILLE A. - 1947 - : Erosion et bowaliation en Afrique Noire française.
Agr. Trop. Nogent, 7-8, p. 339-357
- BASTISSE E.M. - 1946 - : Rôle vecteur de divers anions.
Ann. Agron., n° 1, p. 30-56 ; n° 4, p. 434-456
- BASTISSE E.M. - 1949 - : Essai sur le rôle des complexes colloïdaux en pédologie et en physiologie végétale. (Thèse - Paris)
- BASTISSE E.M. - 1967 - : Dispersion du fer sous l'action de la silice agissant comme vecteur.
C.R. Ac. Sci. D. 264, n° 7, p. 894-6

- BEATER B.E. & FRANKEL E. - 1965 - : Altération in chemical composition during the progressive weathering of dwyka tillite and dolerite in Natal.
Proc. Annu. Congr. S. afr. Sugar Technologists, Ass. 1965, 39-250-3
- BONIFAS M. & MILLOT G. - 1955 - : Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latéritisation et auxitisation.
Bull. Serv. Carte Géol. Alsace et Lorraine, 1955, t. 8, fasc. 1, p. 3-20
- BONIFAS M. & MILLOT G. - 1956 - : Bilan géochimique dans l'altération de quelques roches de Guinée (A.O.F.)
C.R. 6e Congr. Inter. Sc. Sol. Paris, Comm. V.
- BONIFAS M. - 1959 - : Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique (thèse).
Mém. Carte géologique d'Alsace-Lorraine, 1959, n° 17
- BONNAULT - 1938 - : Le rôle de la latérite dans les formes du relief des environs de Boudoukou (Côte d'Ivoire)
Bull. Serv. Mines - A.O.F. - Dakar, n° 2, p. 51-52
- BONNET J.A. - 1939 - : The nature of lateritization as revealed by chemical physical and mineralogical studies of a lateritic soil from Puerto-Rico
Soil. Sc. Vol. 48, p. 25-40
- BUCHANAN F. - 1807 - : A journey from Madras through the countries of Mysore, Canara and Malabar.
London, t. II, p. 441
- CASTAGNOL E.M. - SHAN-GIA-TU - 1940 - : Etude des principaux types de latérites d'Indochine.
Bull. Econ., Indochine - Fasc. 2, 35 p.
- CASTANHEIRA DINIZ A. & BARROS AGUIAR F.Q. de - 1966 - : Geomorfologia, solos e ruralismo da região central angolana.
Nova Lisboa, Inst. Investig., agron. Angola.
- CHEVALIER A. - 1948 - : Les cuirasses latéritiques.
R.B.A., p. 49-66
- CRAIG D.C. & LOUGHNAN F.C. - 1964 : Chemical and mineralogical transformations accompanying the weathering of basic volcanic rocks from New South Wales.
Austr. J. Soil. Research (Melbourne) 1964, 2.2., p. 218-234.
- DEMOLON A. & BASTISSE E.M. - 1938 - : Sur quelques complexes colloïdaux du fer et de l'aluminium.
Ann. Agr. n° 1, p. 6-33, 1942 : C.R. Acad. Sc. T. CCXV, p. 188

- DEMOLON A. & BASTISSE E.M. - 1944 - : Rôle vecteur de la silice,
Ann. Agr. n° 4, p. 265-96
- D'HOORE J. - 1949 - : Les composés du fer dans le sol. Quelques notes concernant leur composition, leur rôle, leur étude, leur importance.
lère conf. afric. Sol. Bull. Agric. Congo Belge, n° 1, p. 66-85
- D'HOORE J. - 1954 - : The accumulation of free sesquioxides in tropical soils.
Publ. Inst. Nat. Agr. Congo Belge, Sér. Sci., n° 62
- D'HOORE J., FRIPIAT J.J. & GASTUCHE M.C. - 1954 - : Quelques remarques sur les oxydes de fer fixés sur les argiles tropicales.
Léopoldville, conf. int. Afric. Sols, n° 13
- DU PREEZ J.W. - 1952 - : Notes on the occurrence of oolites and pisolites in Nigerian laterites.
Cong. Géol. Inter. XIX, Alger
- ERHART H. - 1951 - a : Sur le rôle des cuirasses termitiques dans la géographie des régions tropicales.
C.R. Ac. Sc. Paris 233, p. 966
- ERHART H. - 1951 - b : Sur l'importance des phénomènes biologiques dans la formation des cuirasses ferrugineuses en zone tropicale.
C.R. Ac. Sc. Paris, t. 233, p. 804
- ERHART H. - 1966 - : Bio-rhexistasie, biostasies évolutives, heterostasie ; importance de ces notions en géologie minière exogène.
C.R. Ac. Sci. Paris 17, Oct. 1966, t. 263, sér. D
- FOURNIER F. - 1953 - : Influence des facteurs climatiques sur l'érosion du sol. Estimation des transports solides effectués en suspension par les cours d'eau.
Assoc. Int. Hydrologie, n° 38, t. III, 283-8,
- FREI, E. - 1964 - : Eisenoxydkonkretionen und Schlierenbildung in einigen, Tropenböden Ecuadors.
2nd internation. Working-Meeting Soil Micromorphol. Arnhem, Netherl. 1964
- FRIDLAND V.M. - 1961 - : (En russe) Les deux voies de formation des concrétions constitutives des latérites.
C.R. Acad. Sci. URSS, vol. 137, (5)
- GERASIMOV J.P. - ROMASHKEVICH A.I. - 1964 - : (En russe) : le profil génétique de la latérite actuelle d'après les recherches effectuées en Guinée.
Moskva, Izdat. Nauka, 1964
- GERASSIMOV J.P. - 1962 - : (En russe) Latérites actuelles et sols latéritiques.
Bull. Inform. Acad. Sci. URSS, sér. Géogr. n° 2

- HAMILTON R. - 1962 - : Laterites in West Africa
Internation. Soc. Soil Sci. Trans. Joint. Meetg Commiss. IV & V,
Palmerston North, N.Zeal.
- HAMILTON R. - 1964 - a : A short note on droplet formation in ironcrusts
Soil Micromorphol Proc. 2nd internation. Working Meetg Arnhem, Netherl.
1964, Elsevier Publish
- HAMILTON R. - 1964 - b : Microscopic studies on laterites formation.
2nd. Internation. Working-Meetg Soil Micromorphol. Arnhem, Netherl.
- HARRASSOWITZ H. - 1926 - : Lateritmaterial - Forsch. Géol. Paléont. Berlin 4,
p. 253-565
- HARRASSOWITZ, H. - 1930 - : Böden der tropischen Region - Laterit und
Allitischer (Lateritischer) Rotlehm.
E. Blanck's Handbuck der Bodenlehre. Berlin. Vol. III, p. 387-436
- HARRISON J.B. - 1933 - : Katamorphism of igneous rocks under humid tropical
conditions.
Imp. Bur. Soil Sc. Harpenden - Rothamsted, Exp. Sta, 1954
- HERVIEU J. - 1963 - : Les plaines de la Zomandao et de Ranotsara (recherches
sur l'aménagement du relief et l'évolution des sols à Madagascar dans
le cadre d'unités géomorphologiques)
Cah. ORSTOM. Pédol. Fr. n° 3, p. 73-114.
- HOYOS A. & ALIAS L. - 1956 - : Contribution à l'étude des concrétions latéri-
tiques - la Guinée continentale espagnole.
C.R. 6e Congr. Int. Sc. Sol. Paris, vol. F, V, p. 62
- HUMBERT R.P. - 1948 - : The genesis of laterite - Soil Sc. vol. 65, p.281-90
- LACROIX A. - 1913 - : Les latérites de la Guinée et les produits d'altération
qui leur sont associés.
Nouv. Arch. Mus. 5, Paris, p. 255-358
- LACROIX A. - 1934 - : Les phénomènes d'altération superficielle des roches
alumino-silicatées des pays tropicaux.
Bur. Etud. Géol. et Min. Paris.
- LAMOTTE M. & ROUGERIE G. - 1953 - : Les cuirasses ferrugineuses allochtones ;
signification paléoclimatique et rapports avec la végétation.
Ve congrès int. Afr. Ouest - Résumé dans C.R. IFAN, Abidjan, p. 89-90

- LAMOTTE M. & ROUGERIE G. - 1956 - : Genèse de certaines cuirasses ferrugineuses en Afrique Occidentale.
Congr. int. Géogr. Rio de Janeiro - Inédit.
- LAMOTTE M. & ROUGERIE G. - 1962 - : Les apports allochtones dans la genèse des cuirasses ferrugineuses.
Rev. Geom. Dyn. 13, n° 10-11-12, p. 145-60
- LAPLANTE A. & BACHELIER R. - 1954 - : Un processus pédologique de la formation de cuirasse latéritiques dans l'Adamaoua.
Rev. Géom. Dyn. 5, p. 214-219
- LOSSAINT P. - 1958 - : Sur le pouvoir complexant vis-à-vis du fer ferrique et du fer ferreux des extraits de quelques litières forestières fraîches et décomposées.
C.R. Ac. Sc. Paris, t. 247, p. 106-109
- LOSSAINT P. - 1959 - : Etude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence de litières forestières.
Ann. Agron. p. 369-414, et 493-542.
- MAIGNIEN R. & D'HOORE J. - 1954 - : Accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux.
INEAC - sér. Sc. n° 62
- MAIGNIEN R. - 1954 - a : Cuirassement en sols de plaine-Ballay (Guinée Franc)
5e Congr. Int. Sc. Sol. Léopoldville, VII, p. 19
- MAIGNIEN R. - 1954 - b : Formation de cuirasses de plateaux, région de Labé, Guinée française.
5e congr. Int. Sc. Sol. Léopoldville, VI, p. 13
- MAIGNIEN R. - 1954 - c : Différents processus de cuirassement en A.O.F.
IIe conf. Afric. Sols - Léopoldville, n° 116, p. 1468-86
- MAIGNIEN R. - 1956 - : De l'importance du lessivage oblique dans le cuirassement des sols en A.O.F.
6e congr. Int. Sc. Sol., Paris V, 76, p. 463
- MAIGNIEN R. - 1958 - : Le cuirassement des sols en Guinée (thèse)
Mém. serv. Carte géol. Als. Lorr., n° 16
- MAIGNIEN R. - 1965 - : Compte-rendu du colloque sur les latérites (UNESCO)
Tananarive 21-29, sept. 1964
ORSTOM Bull. Bibliogr. Pédol. T. XV, fasc. I, p. 34-36
- MAIGNIEN R. - 1966 - : Compte-rendu des recherches sur les latérites.
In "Recherches sur les ressources naturelles". UNESCO, Paris 1966, vol. IV, 156 p.

- MAIGNIEN R. - 1966 - b : Induration des horizons des sols ferrallitiques.
Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. IV, n° 4, 1966, p. 29
- MORRISSON C.G.T. - 1949 : The catena concept and the classification of tropical soils.
Bur. Soil Sc. Tech. Comm. n° 46, p. 124-128
- MULCAHY M.J. - 1961 - : Soil distribution in relation to landscape development
Annals of Geomorphology, vol. 5, p. 211-225
- ROUGERIE G. - 1959 - : Latéritisation et pédogenèse intertropicales.
Inform. Géogr. 5, p. 199-205
- ROUGERIE G. - 1960 - : Le façonnement actuel des modelés en Côte-d'Ivoire forestière. - Mém. IFAN, 58, Dakar, 542 p.
- ROZANOV B.G. - 1963 - : (En russe) Sur la latérite et la latéritisation.
Nauchn. Dokl, Vyssh, shk. biol, Nauki, SSSR, n° 3, p. 205-10
- SCAETTA H. - 1938 - : Sur la genèse et l'évolution des cuirasses latéritiques
C.R. Soc. Biogéog. t. 15, n° 125, p. 14-18
- SCHARPENSEEL H.W. BECKMANN H. & KERPEN W. - 1963 - : Untersuchungen lateritischer Boden. 1 - Chemische und physikalische untersuchungen.
Pédologie-Gand 1963, vol. 13, n° 2, p. 415-428
- SCHELLMANN W. - 1963 - + : Chemische und mineralogische Vorgänge bei der lateritischen Verwitterung.
In : " 41 Jahrestag dtsh. Mineral. Gesellsch. u. 5 - Jahrestag österr mineral Gesellsch WIEN 1963"
- SCHMIDT-LORENZ R. - 1964 - : Zur Mikromorphologie der Eisen und Aluminium oxyd anreicherung beim Tommineralabbau in lateriten Keralas un Ceylons.
Soil Micromorphologie (Amsterdam) 1964, p. 279-289
- SEGALEN P. - 1956 - : Etude des sols dérivés des roches volcaniques basiques à Madagascar (Thèse Paris)
Publ. Mém. Inst. Sc. Madagascar, sér. D, t.VIII,
- SEGALEN P. - 1964 - : Le fer dans les sols. - ORSTOM Paris - " Initiation - Documentations techniques".
- SEGALEN P. - 1965 - : Les produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide.
Cah. ORSTOM, sér. Pédologie, vol. III, fasc. 2 et 3, p. 149-206

- SOARES DE CARVALHO G. - 1964 - : Latérites e couracas ; Rochas de origem intertropical.
Garcia de Orta Portug. 12, n° 3, p. 527-47
- TEIXEIRA C. - 1965 - : Les latérites de Goa et le problème de leur genèse.
Garcia de Orta, Lisbonne, vol. 13, n° 1, p. 69-86
- TRICART J. & CAILLEUX A. - 1965 : Traité de géomorphologie T. V. = Le modelé des régions chaudes (forêts et savanes) - Paris - Sedes - Edit.
- TRICART J. & MICHEL P. - 1965 - : Morphogenèse et pédogenèse II. Rapports entre le modelé et la pédogenèse : exemple d'Afrique Occidentale.
Sci. du Sol, n° 2, p. 149-171
- TRICART J. - 1965 - : Rapport de la Mission de reconnaissance géomorphologique de la Vallée Moyenne du Niger (1957)
Mém. Inst. Ft. Afrique Noire, n° 72, **Dakar**.
- VAN SCHULLENBORGH J. - 1965 - : The formation of sesquioxides in soils
Experimental Pedology, Butterworth, p. 113-125
- VOGT J. - 1959 - : Aspects de l'évolution morphologique récente de l'Ouest Africain. - Ann. Géogr., 367, p. 193-206
- WAEGEMANS G. - 1952 - : Latérites pisolithiques et scoriacées.
Bull. Agr. Congo Belge, 3, p. 735-750