

Contribution à l'étude du cuirassement : Relations entre les gravillons ferrugineux et leurs matériaux d'emballage

Bokar KALOGA

*Pédologue de l'ORSTOM
Services Scientifiques Centraux,
70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy*

RÉSUMÉ

La présence des gravillons ferrugineux, leur taille, leur abondance ont souvent servi à établir l'allochtonie des matériaux qui les contiennent et parfois à caractériser le cycle de cuirassement. Mais les gravillons ferrugineux sont-ils effectivement des éléments d'apport ?

Sur un certain nombre de matériaux indurés, l'auteur a fait une séparation des trois fractions suivantes : gravillons ferrugineux, « squelette ferrugineux » (masse indurée autre que les gravillons), terre fine (matériaux meuble non induré).

L'étude de l'évolution des matériaux constitutifs de ces trois fractions (caractères morphologiques, micromorphologiques, nature des sesquioxydes, minéralogie des argiles, degré de lessivage des différents éléments chimiques, relations entre ces éléments) montre que les gravillons ont pris naissance dans un milieu très lessivant caractérisé par une forte altération, tandis que les matériaux constitutifs des « squelettes ferrugineux » sont caractérisés par un milieu de genèse moins lessivant et une altération moins forte, bien qu'encore plus que celle qui caractérise les matériaux constitutifs des terres fines.

Les gravillons appartiennent ainsi à une pédogenèse plus ancienne : il y a dans tous les cas au moins allochtonie de genèse ; et selon l'interprétation

que l'on donne des corrélations de rang entre les matériaux constitutifs des « squelettes ferrugineux » et ceux des gravillons pour les teneurs de certains éléments seulement, on peut dire qu'il y a, pour les gravillons :

— allochtonie de genèse et autochtonie de site (les gravillons, témoins d'une pédogenèse ancienne se seraient maintenus sur place) ;

— allochtonie de genèse et allochtonie de site : les gravillons ont été apportés par un mécanisme de transport.

ABSTRACT

The presence of ferruginous grit, their size, and abundance have often been used to ascertain the allochthonous character of the material they are enclosed in and sometimes to distinguish the iron pan cycle. But are ferruginous grit really brought in material?

On a number of indurated materials, the author has separated the three following fractions; ferruginous gravels, ferruginous "skeleton" (indurated mass other than the gravels) fine earth (non indurated loose material).

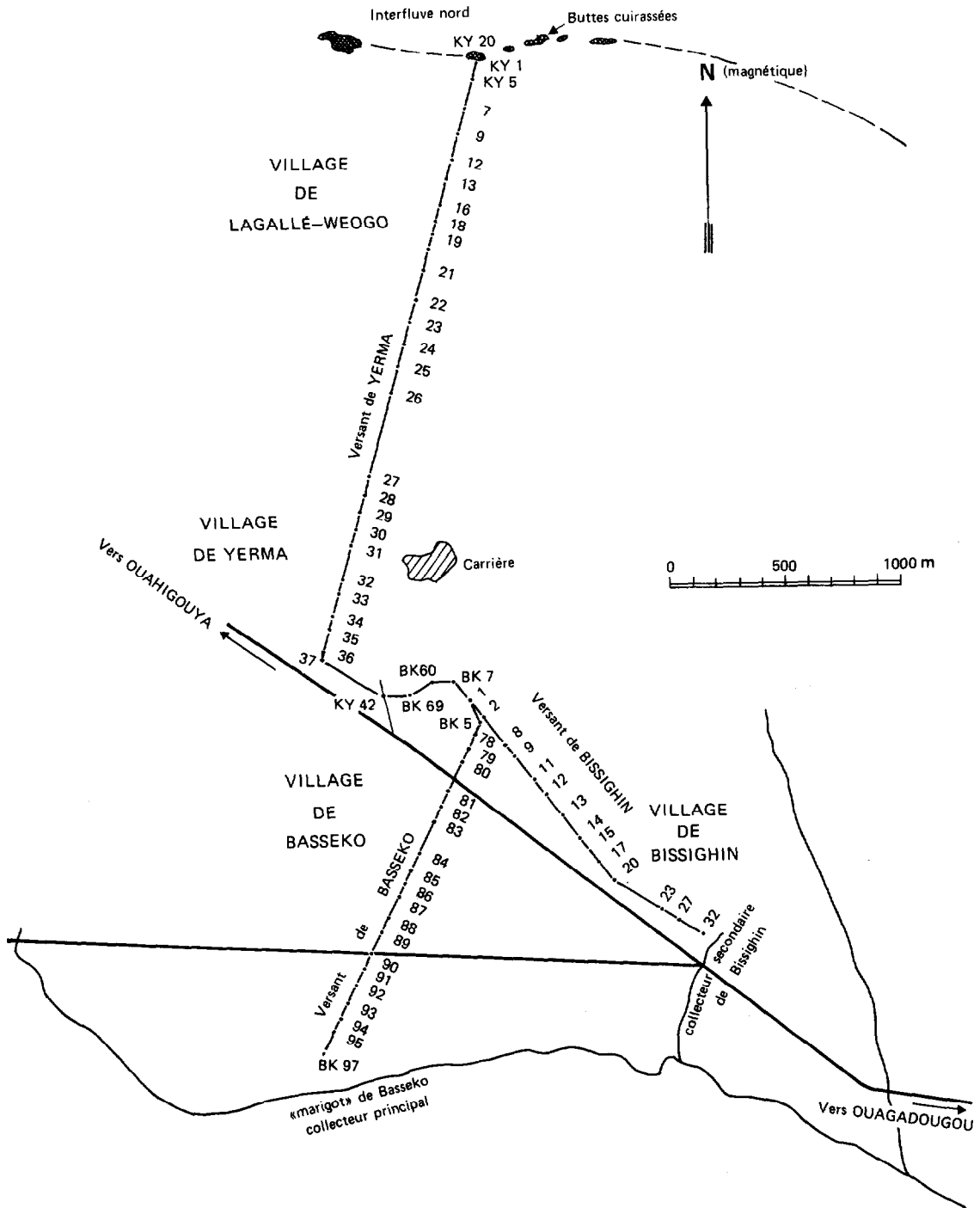


FIG. 1. — Plan de la toposéquence principale

The study of the evolution of the constituents of these three fractions (morphologic and micromorphologic) characteristics, nature of the sesquioxides, clay mineralogy, degree of leaching of various chemical elements, relationships between these elements) shows that the gravels were formed in a very leaching medium where weathering was strong. On the other hand, the materials constituting the ferruginous "skeleton" are conspicuous by a much less leaching medium and a less strong weathering; but a still stronger one than that which is characteristic for the constituents of fine earth.

So the gravels belong to a more ancient pedogenesis: there exists at all events at least genesis allochtony. According to the interpretation given to the rank correlations among the constituents of the ferruginous "skeletons" and those of the gravels for the contents of some elements, it can be said about the gravels that there is:

— *allochtonic genesis and autochtonic site (the gravels were witness of a bygone pedogenesis and stayed where they were);*

— *allochtonic genesis and allochtonic site: the gravels were carried in by some transport mechanism.*

INTRODUCTION

Cette étude a été entreprise à la suite des résultats de l'étude pédologique des bassins versants des Voltas Blanche et Rouge au 1/200 000 (Kaloga, 1964) et de l'étude pédologique du Secteur Centre-Sud de la Haute-Volta au 1/500 000 (Kaloga, 1969).

Ces travaux avaient permis de mettre en évidence le rôle de la Géomorphologie dans la répartition et la différenciation des sols. Une grande importance avait été accordée aux processus de remaniement. Nous avons distingué, à la suite des géomorphologues travaillant en Afrique Occidentale, une succession de cycles de cuirassement du Tertiaire au Quaternaire, chaque cycle empruntant aux précédents des éléments conglomératiques notamment sous forme de gravillons. La présence de ces gravillons, leur abondance, leur taille, ont souvent servi à établir l'allochtonie des matériaux qui les contiennent, et parfois à caractériser le cycle de cuirassement.

Par ailleurs, l'étude du cuirassement par les méthodes chimiques se heurte toujours au problème que soulève la présence d'éventuels éléments conglomératiques. Tant que l'on n'a pas la preuve que les élé-

ments ferrugineux de forme nodulaire, très bien individualisés que l'on trouve dans les cuirasses sont autochtones, l'analyse de ces dernières n'a pas de signification. En effet, les proportions de ces éléments ferrugineux sont très variables dans les différents prélèvements à analyser.

La connaissance des conditions de genèse des gravillons ferrugineux est donc fondamentale. C'est le but que se propose ce travail grâce à l'étude comparée des caractères morphologiques, chimiques et minéralogiques des gravillons et de leurs emballages dans un certain nombre de matériaux indurés.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Nous avons étudié des toposéquences sur des glaciaires représentatifs du secteur Centre-Sud de la Haute-Volta, dans le bassin versant de Zagtoui, à 11 km de Ouagadougou, sur la route de Ouahigouya.

La toposéquence principale (seule étudiée ici) part de l'interfluve Nord du bassin versant souligné par une ligne de buttes cuirassées vers les collecteurs d'eau. Elle comprend trois parties :

— le versant supérieur ou versant de Yerma : orienté grossièrement Nord-Sud, il va d'une butte cuirassée de l'interfluve Nord à un interfluve secondaire situé à l'intérieur du bassin ;

— le versant moyen et inférieur en direction du collecteur secondaire de Bissighin ou versant de Bissighin : il va de l'interfluve secondaire mentionné ci-dessus au « marigot de Bissighin » ;

— le versant moyen inférieur en direction du collecteur principal ou versant de Basseko, part de la partie supérieure du versant de Bissighin vers le « marigot » de Basseko.

La figure 1 donne le plan de cette toposéquence.

Sur un certain nombre de matériaux indurés provenant des sols de ces toposéquences, nous avons effectué une séparation totale des fractions (fig. 2) :

— gravillons : éléments ferrugineux, de forme nodulaire (1), arrondie ou émoussée, à cortex externe

(1) Eléments ferrugineux de forme nodulaire : éléments indurés à structure non concentrique possédant une cohésion supérieure à celle du matériau les englobant (définition selon le Glossaire de Pédologie, ORSTOM, 1969).

patiné bien individualisé, à induration très forte, à cassure brun-rouge foncé tranchant sur celle des matériaux environnants. Ils présentent parfois des faces de cassure plus ou moins planes dont les arêtes ont été émaissées ;

— « squelette » ferrugineux : cuirasse, carapace, ou élément ferrugineux non gravillonnaire (c'est-à-dire ne se distinguant pas de la cuirasse ou de la carapace par l'aspect de sa cassure et par son induration) ;

— terre fine : matériau meuble non induré.

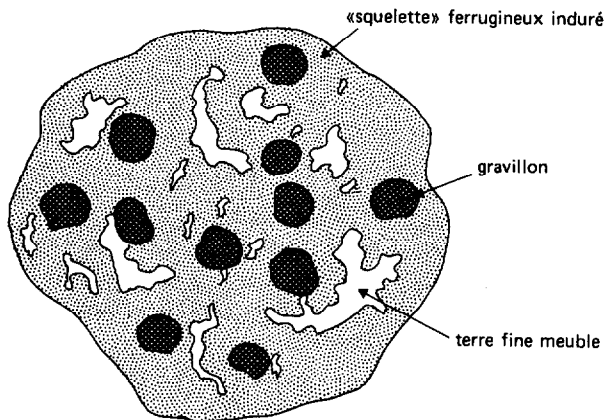


FIG. 2. — Localisation des différentes fractions sur un bloc de cuirasse ou de carapace.

Nous avons cherché à préciser l'évolution pédologique des matériaux constitutifs de ces trois fractions afin de savoir s'ils appartiennent à la même phase pédogénétique, c'est-à-dire à un même matériau pédologique.

Nous avons utilisé pour cela un ensemble de méthodes de caractérisation :

— analyse morphologique des matériaux pédologiques ;

— méthodes chimiques : analyses totales effectuées par le laboratoire de spectrographie des Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM ;

— méthodes physiques : rayons X et analyse thermique différentielle avant déferrification et pour certains échantillons après déferrification par la méthode de De Endredy (1963) ; observations en lames minces.

2. CARACTÉRISATION DES GRAVILLONS ET DE LEURS MATÉRIAUX D'EMBALLAGE

2.1. Caractérisation morphologique

Les gravillons apparaissent comme des éléments ferrugineux très bien individualisés, très durcis, difficilement cassables au piochon, à cassure brun-rouge foncé, ne présentant jamais de taches noires au centre, de formes arrondies ou émaissées. Dans un lot de gravillons, il en existe toujours qui présentent des faces de cassure plus ou moins planes, à arêtes émaissées.

Lorsqu'ils ne sont pas recimentés, ils paraissent simplement enchassés dans la terre fine où leurs alvéoles sont lissés et parfois tachés d'ocre ou de rouille.

Lorsqu'ils sont recimentés par des éléments de forme nodulaire ou par une carapace ou cuirasse, ces matériaux ont généralement une induration plus faible que les gravillons, une couleur moins rouge et moins foncée (5 YR 5/6 par exemple pour 2,5 YR 3/6 dans les gravillons) et surtout comportent de nombreuses taches noires qui font effervescence à l'eau oxygénée, et qui contiennent donc des hydroxydes métalliques facilement réductibles.

Ainsi l'observation morphologique montre que les gravillons ont un squelette ferrugineux apparemment différent de celui des matériaux ferruginisés et indurés qui les emballent.

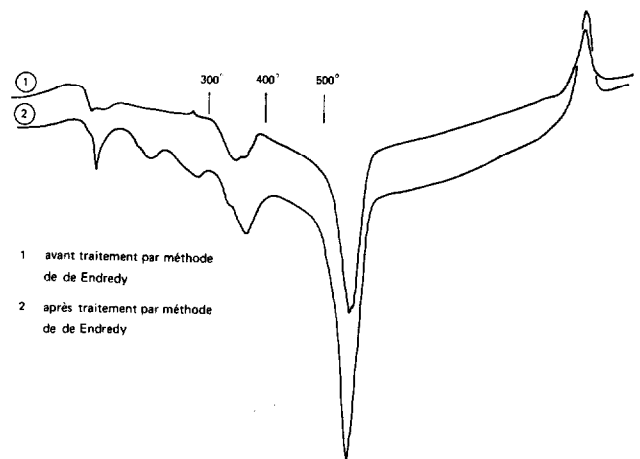


FIG. 3. — Courbes d'analyse thermique différentielle (A.T.D.) de l'échantillon KY 21 1 C.

2.2. Caractérisation des produits ferrugineux

La figure 3 montre l'action de la déferrification par la méthode de de Endredy (1963) sur une goethite qui présente au départ deux pics endothermiques à l'analyse thermique différentielle (respectivement à 350° et 370 °C avec une légère dominance du pic à 350°). Après plusieurs attaques et une forte décoloration du produit (qui fait croire à une déferrification complète), un nouveau passage à l'analyse thermique différentielle montre que le pic à 350° a été très fortement réduit au profit du pic à 370°. On peut donc considérer que la cristallinité de la goethite augmente quand la température de son pic endothermique augmente.

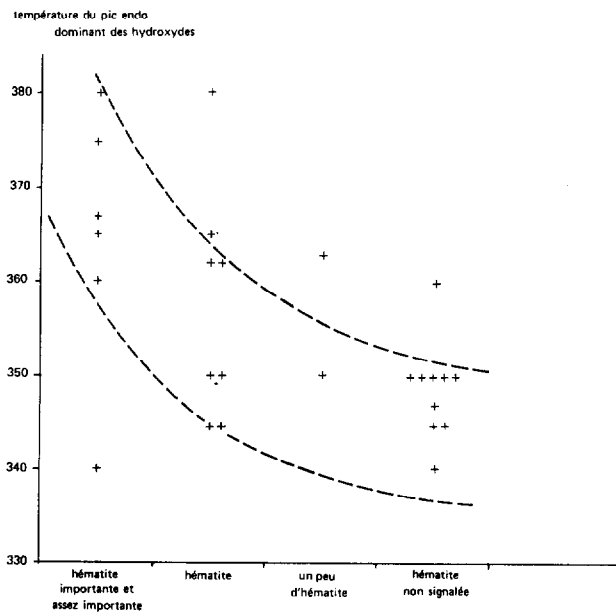


FIG. 4. — Relation entre la température du pic endothermique principal dominant des hydroxydes et la proportion d'hématite.

D'autre part, les figures 4 et 5 montrent que la température du pic endothermique de la goethite des échantillons traités augmente avec la proportion d'hématite du matériau. Ainsi paraît se confirmer l'augmentation de la cristallinité de la goethite quand augmente la température des pics endothermiques qu'elle donne à l'analyse thermique différentielle,

dans la mesure où l'on peut admettre que l'augmentation de la proportion d'hématite, c'est-à-dire l'apparition et le développement de l'hématite — est le résultat d'une meilleure cristallisation de l'ensemble des hydroxydes de fer.

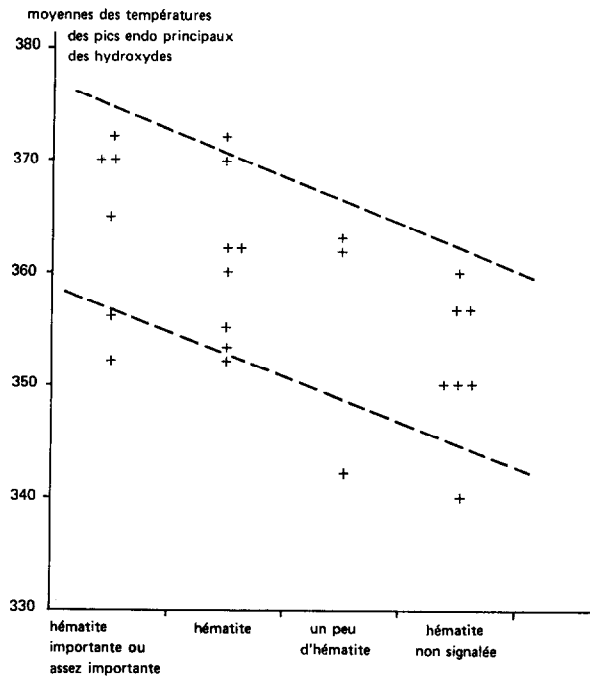


FIG. 5. — Températures moyennes des pics endothermiques principaux des hydroxydes et proportions d'hématite.

Dans le tableau I, on constate que les gravillons ont le plus souvent des pics endothermiques à des températures plus élevées que dans les « squelettes » ferrugineux qui les cimentent : les matériaux constitutifs des gravillons montrent une dominance des pics endothermiques de goethite les plus élevés ici (365° à 380°), alors que les matériaux constitutifs des nodules, carapacés et cuirasses ferrugineuses montrent une dominance des pics endothermiques de goethite à 340° - 350°.

Le tableau II montre que les gravillons sont d'une façon générale, plus riches en hématite que les matériaux indurés qui les cimentent, alors que les terres fines correspondantes ne contiennent généralement que des sesquioxides amorphes. A cet égard si l'on classe les groupes de matériaux d'après leurs teneurs

TABLEAU I

Températures des pics endothermiques des hydroxydes cristallisés

Echantillons	Gravillons	« Squelettes »	Terre fine	Nature de l'échantillon
BK 1.1b	350-364		hyd. amorphes	argilo-sableux gravillonnaire
BK 1.4b	347	347	hyd. non décelables	carapace
BK 5.1b (3)	350-365	350-366	hyd. amorphes	carapace à induration faible
BK 5.3b		340-360	290-345	Horizon à nodules ferrugineux
BK 8.2		345-362	hyd. amorphes	carapace feuilletée
BK 11.2	365*-380	350-370	hyd. amorphes	niveau gravillonnaire
BK 13.2	350-375	340-375		Carapace
BK 13.4	365-380	340-365	hyd. amorphes	carapace
BK 14.4	330-365*-380	365-380	hyd. amorphes	carapace feuilletée
BK 15.4 (1)	350-366	350	hyd. amorphes	niveau gravillonnaire
BK 30.5	355-370		hyd. amorphes	carapace
BK 32.6		338-367	hyd. amorphes	carapace
BK 79 1.1	362-375	343-365	hyd. amorphes	cuirasse
BK 79.5		350-375	hyd. amorphes	argileux à nodules ferrugineux
BK 86.8		325-358	hyd. non décelables	carapace
BK 91.6		362-385	hyd. non décelables	carapace
BK 91.7		350-375	hyd. amorphes	carapace
KY 13.2	350-370	343-367		carapace
KY 20.7		360-380		cuirasse
KY 20.6	342-367	357-370		carapace
KY 22.1	365-380	350-370	hyd. amorphes	niveau gravillonnaire

340 pic très dominant

350 pic dominant

365* pic d'importance proche de celle du pic dominant.

en hématite, on constate que la séquence obtenue est compatible avec une séquence d'âge présumé des groupes de matériaux d'après leur position topographique en séquence morphochronologique (fig. 6).

Ainsi, les matériaux constitutifs des gravillons apparaissent plus évolués et plus anciens que les matériaux indurés qui les cimentent, et ces derniers sont plus évolués que les terres fines qui les accompagnent. D'autre part, les variations de la proportion d'hématite en fonction de la classification morphochronologique des matériaux indurés suggère l'existence de plusieurs cycles de cuirassement.

2.3. Caractérisation des minéraux argileux

Le tableau III montre que :

— Dans la partie supérieure de la pente (échantillons KY 13.2 et KY 22.1), il n'existe pas de diffé-

rence dans la nature des minéraux argileux des différents matériaux constitutifs des niveaux indurés.

— Dans la partie inférieure de la pente par contre, les fractions terre fine se distinguent par des minéraux argileux constitués par un mélange de kaolinite dominante et de minéraux 2/1 (illites, illites et interstratifiés flous ; et plus rarement illites + montmorillonite), alors que les matériaux indurés (gravillons et « squelette ») ne contiennent qu'une kaolinite bien cristallisée et exclusive, avec parfois de la gibbsite dans les matériaux constitutifs des gravillons.

Il faut signaler cependant que l'on observe parfois dans les matériaux constitutifs des fractions « squelettes » un mélange de kaolinite dominante et de minéraux 2/1, avec une kaolinite moins bien cristallisée que dans les matériaux constitutifs des gravillons.

Ainsi les matériaux constitutifs des fractions « terre fine » apparaissent moins évolués que les matériaux indurés et parmi ces derniers, ceux des gravillons sont les plus évolués.

TABLEAU II

Composition minéralogique des matériaux constitutifs des niveaux indurés

(Analyses aux RX effectuées par le Laboratoire de Spectrographie et RX des Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM)

Echantillons	Terre fine	« Squelette ferrugineux »	Gravillons
BK 5.1b (3)	Quartz très important un peu de <i>feldspaths</i> , un peu de kaolinite	Quartz important goethite assez importante, un peu de kaolinite	Goethite importante traces d'hématite, quartz important, un peu de kaolinite
BK 11.2.....	Quartz très important, <i>Feldspaths</i> Un peu de kaolinite, un peu de micas	Quartz Goethite assez importante <i>Hématite</i> <i>Kaolinite</i>	<i>Hématite importante</i> Goethite assez importante Quartz Kaolinite
KB 13.2.....	Quartz important <i>Feldspaths</i> , un peu de kaolinite	Quartz <i>Un peu de Feldspaths</i> Goethite assez importante, un peu d'hématite. Kaolinite	Quartz important Goethite <i>Un peu d'hématite</i> Kaolinite
BK 13.4.....	Quartz très important Un peu de kaolinite	Goethite assez importante <i>Hématite assez importante</i> Quartz Un peu de kaolinite	<i>Hématite importante</i> Goethite importante Quartz. Kaolinite
BK 14.2.....	Quartz important <i>Feldspaths</i> Un peu de kaolinite, un peu de micas	Goethite importante Quartz <i>Un peu de feldspaths</i> Un peu de micas	Goethite importante <i>Hématite importante</i> Quartz Kaolinite, traces de micas
BK 14.4.....	Quartz très important <i>Feldspaths</i> un peu de kaolinite	Quartz Goethite assez importante. <i>Hématite assez importante</i> Un peu de kaolinite	<i>Hématite assez importante</i> Goethite assez importante Quartz Un peu de kaolinite
BK 14.5.....	Quartz très important <i>Feldspaths</i> traces de kaolinite	Quartz Goethite assez importante <i>Hématite</i> Kaolinite	Goethite importante <i>Hématite assez importante</i> Quartz Kaolinite
BK 15.4 (1)	Quartz très important <i>Feldspaths</i>	Quartz important <i>Feldspaths</i> Goethite assez importante un peu de kaolinite	Goethite importante traces d'hématite Quartz important Kaolinite
BK 15.4.....	Quartz <i>Feldspaths</i> Un peu de kaolinite	Quartz <i>Feldspaths</i> Goethite importante un peu de kaolinite	Goethite importante <i>un peu d'hématite</i> Quartz Un peu de kaolinite
BK 79.1.1	Quartz très important <i>Feldspaths</i> Un peu de kaolinite	Quartz important Goethite importante un peu de kaolinite	Goethite importante <i>un peu d'hématite</i> Quartz important Kaolinite
KY 13.2	Quartz assez important Kaolinite traces d'hématite ou de goethite	Kaolinite Goethite <i>Hématite</i> Quartz	Goethite <i>Hématite</i> Kaolinite Quartz
KY 22.1	Quartz très important un peu de kaolinite traces d'hématite	Quartz important Goethite <i>un peu d'hématite</i> kaolinite	Goethite importante <i>Hématite</i> kaolinite Quartz

TABLEAU III

Nature des minéraux argileux et hydroxydes autres que ceux de fer ()*

Echantillons	Terre fine	« Squelette ferrugineux »	Gravillons
BK 1.1b	Kaolinite bien cristallisée et exclusive (100 %). Traces d'illites et d'interstratifiés		Kaolinite bien cristallisée et exclusive
BK 1.4	Kaolinite	Kaolinite	
BK 5.1b (3)	Kaolinite bien cristallisée et exclusive	Kaolinite bien cristallisée et exclusive	Kaolinite cristallisée et exclusive
BK 11.2.....	Kaolinite (80 %) et illites (20 %)	Kaolinite bien cristallisée et quasi exclusive	Kaolinite très bien cristallisée et exclusive
BK 13.2	Kaolinite dominante + minéraux 2/1	Kaolinite bien cristallisée et exclusive	Kaolinite très bien cristallisée et exclusive
BK 13.4.....	Kaolinite dominante + minéraux 2/1	Kaolinite bien cristallisée et exclusive. Gibbsite possible	Kaolinite bien cristallisée et exclusive + gibbsite
BK 14.4.....	Kaolinite dominante (60 %) + illite et interstratifiées flous (40 %)	Kaolinite très bien cristallisée et exclusive	Kaolinite très bien cristallisée exclusive + gibbsite
BK 15.4 (1)	Kaolinite dominante (80 %) + illites et interstratifié flous (20 %)	Kaolinite dominante + minéraux 2/1	Kaolinite très bien cristallisée et exclusive
BK 79.1.1	Kaolinite dominante + minéraux 2/1	Kaolinite très bien cristallisée et exclusive	Kaolinite très bien cristallisée et exclusive + gibbsite possible
BK 79.5.....	Kaolinite dominante + minéraux 2/1	Kaolinite dominante + minéraux 2/1	
BK 38.6.....	Kaolinite + minéraux 2/1		Kaolinite très bien cristallisée et exclusive
BK 30.5.....	Kaolinite dominante + minéraux 2/1		Kaolinite très bien cristallisée et exclusive
KY 13.2.....	Kaolinite très bien cristallisée (100 %) et exclusive. Traces d'illites.	Kaolinite très bien cristallisée et exclusive	Kaolinite très bien cristallisée et exclusive
KY 22.1.....	Kaolinite bien cristallisée et exclusive	Kaolinite très bien cristallisée et exclusive	Kaolinite très bien cristallisée et exclusive

(*) Lorsque les proportions sont données, il s'agit d'analyses aux RX effectuées par le Laboratoire de Géologie et de Paléontologie de l'Université de Strasbourg par H. Paquet, sinon il s'agit d'estimations par analyses thermiques différentielles.

âge décroissant dans la séquence morpho-chronologique de matériaux	+++ +						Gravillons dans matériaux indurés de la butte témoin
	+ +						Gravillons dans matériaux sous cuirasses et carapaces de la surface fonctionnelle
	+	++	+	+			Gravillons dans cuirasses et carapaces de la surface fonctionnelle
		++	+++	+			Carapaces et cuirasses de la butte témoin
		+	+ + +++ +	++	++		Carapaces et cuirasses de la surface fonctionnelle
		+		+	++ +		Carapaces fragiles au-dessus de matériaux plus indurés de la surface fonctionnelle
			+		+ +++ +		Gravillons dans matériaux superficiels meubles de la surface fonctionnelle
					+	+++ +	Nodules ferrugineux de type non gravillonnaire sous carapace de la surface fonctionnelle
						+++	Nodules de type non gravillonnaire au-dessus de cuirasse ou carapaces de la surface fonctionnelle
	hématite très importante	hématite assez importante	hématite	un peu d'hématite	traces d'hématite	hématite non signalée	
	proportions décroissantes d'hématite						

FIG. 6. — Morpho-chronologie des matériaux et proportions d'hématite.

2.4. Caractérisation chimique

2.4.1. RÉPARTITION DES ÉLÉMENTS DANS LES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX

Les éléments réputés stables au cours de l'altération sont l'aluminium, le titane et le fer qui s'accumulent de manière relative dans les arènes (Tardy, 1969) ; Wackermann, 1975). Mais au cours de la pédogenèse, le fer et l'aluminium deviennent parfaitement mobilisables, sont lessivés et s'accumulent. Par contre, le titane, peu sensible à l'altération s'accumule de manière relative. Il servira souvent d'élément de référence.

2.4.1.1. Les teneurs en phosphore et en manganèse

Les teneurs en phosphore

La figure 7a montre que les matériaux constitutifs des gravillons sont beaucoup plus riches en phosphore que ceux des « squelettes » ferrugineux, et ces derniers le sont plus que les terres fines. Il s'agit des teneurs en phosphore par rapport au titane. Si l'on considère les teneurs en phosphore par rapport au fer (P_2O_5/Fe_2O_3), on constate également (fig. 7d) que les matériaux constitutifs des gravillons sont encore plus riches que ceux des « squelettes » ferrugineux malgré la richesse en fer beaucoup plus forte des premiers (fig. 7e) : à teneurs en fer égales, les gravillons sont beaucoup plus riches en phosphore.

Il faut cependant séparer à cet égard les échantillons de la partie supérieure du versant (versant de Yerma) de ceux de la partie moyenne et inférieure (versants de Bissighin et de Basseko). Dans les premiers (qui ne sont pas représentés sur la figure 7d), les proportions de phosphore par rapport au fer sont

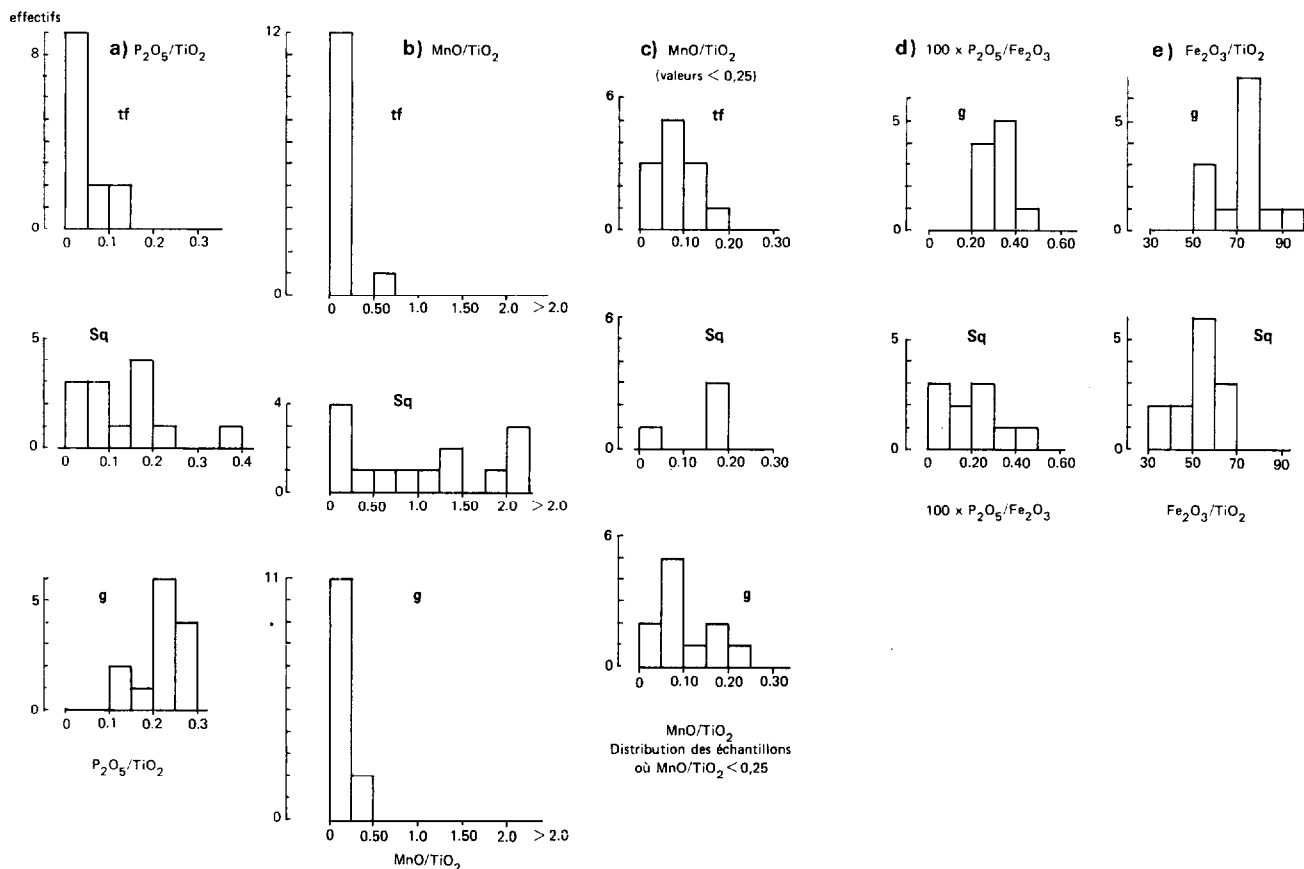


FIG. 7.

plus élevées ou du même ordre dans les matériaux constitutifs des « squelettes » ferrugineux que dans ceux des gravillons.

Or, c'est à mesure que l'altération se poursuit et que l'acidité se développe que le phosphore devient de plus en plus fortement lié au fer et à l'aluminium libérés par l'altération des silicates (Bear, 1955).

Ainsi, dans les matériaux cuirassés de la partie moyenne et inférieure du versant, les gravillons se signalent comme des matériaux plus évolués que ceux des « squelettes » ferrugineux et surtout comme des matériaux formés en milieu plus acide. De même, les cuirasses et carapaces de la partie supérieure du versant apparaissent plus évoluées que celle de la partie moyenne et inférieure.

Les teneurs en manganèse

Les figures 7b et 7c montrent que l'enrichissement en manganèse (teneurs par rapport au titane), est beaucoup plus élevé dans les matériaux constitutifs des « squelettes » ferrugineux que dans ceux des gravillons et des terres fines, ces deux derniers types de matériaux ayant à peu près les mêmes teneurs relatives en manganèse. Or il est admis que le manganèse est beaucoup plus mobile que le fer au cours de l'altération et de la pédogenèse. Sous climat tropical et dans des arènes sur migmatites, Tardy (1969) trouve que le manganèse est lessivé dans des proportions qui rejoignent celles de la silice. Cela est dû au fait que l'affinité du manganèse pour l'oxygène est plus faible que celle du fer. Dans les sédiments

oxydés, le fer est oxydé et précipité pendant que le manganèse reste en solution jusqu'à ce que la totalité du fer soit précipité (Rankama Kalervo et Sahama, 1960). Ainsi dans les conditions oxydantes, il y a une précipitation préférentielle des hydroxydes de fer tandis que le manganèse est exporté au loin. Mais Hem (1963) fait intervenir en plus du potentiel d'oxydo-réduction, les conditions de pH : la limite entre les champs de stabilité des ions divalents en solution et des précipités de manganèse est décalée par rapport à celle du fer vers des pH et des Eh plus élevés. Dans les conditions naturelles, le manganèse est plus difficile à précipiter que le fer. A un Eh donné, il faut un pH plus élevé (voisin de la neutralité pour $Eh = 0,6$). Ainsi, si le pH s'élève, on peut obtenir la précipitation du manganèse même à des potentiels redox faibles.

Les teneurs relatives en manganèse des matériaux constitutifs des squelettes et des gravillons montrent que ces deux types de matériaux ne se sont pas formés dans les mêmes conditions pédogénétiques. Par leur pauvreté marquée en manganèse (ils n'en contiennent pas plus que la terre fine), les matériaux constitutifs des gravillons apparaissent s'être formés dans des conditions oxydantes et acides (bon drainage, milieu de genèse acide) pendant lesquelles le manganèse était exporté au loin, alors que s'accumulaient le fer et le phosphore.

Dans les carapaces et nodules ferrugineux constituant les squelettes, les plages noires faisant effervescence à l'eau oxygénée (plages ferromanganifères) constitue le point de départ de l'accumulation des sesquioxydes : les nodules sont noirs avec un cortex rouge, les feuillettes des carapaces comportent en leur milieu des plages noires. Il y a donc dans ces matériaux une co-précipitation du fer et du manganèse, puis une précipitation du fer seul. Ils apparaissent ainsi s'être formés dans des conditions de pH plus élevés et de potentiels redox plus faibles, conditions qui sont à l'inverse de celles de la formation des gravillons.

Le milieu de genèse des gravillons est favorable à une accumulation fer-phosphore avec une élimination du manganèse, tandis que celui des squelettes est favorable à une accumulation fer-manganèse peu propice à la liaison fer-phosphore. Il existe pour les matériaux constitutifs de ces derniers une corrélation de rang négative entre les teneurs en phosphore et celles en manganèse ($r = -0.6923$ pour $n = 13$, $P < 0.01$), et entre la proportion de phosphore liée au fer (P_2O_5/Fe_2O_3) et la quantité de manganèse

($R = -0.7239$ pour $n = 13$, $P < 0.01$) : l'accumulation de phosphore a lieu dans des conditions qui sont opposées à celles de l'accumulation du manganèse.

Origine du manganèse

Par rapport aux matériaux constitutifs des gravillons et des terres fines, ceux des « squelettes ferrugineux » se signalent comme les seuls à avoir été le siège d'une accumulation de manganèse. Les quantités de cet élément que l'on trouve dans les terres fines et dans les gravillons sont liées aux proportions de magnésium (c'est-à-dire des minéraux ferro-magnésiens peu altérés) et le manganèse n'est pas sous forme libre dans ces matériaux : il existe une corrélation de rang positive et très hautement significative entre les teneurs en MnO et celles en MgO dans les terres fines ($r = 0.8090$ pour $n = 13$, $P < 0.001$) et dans les gravillons ($r = 0.8255$ pour $n = 13$, $P < 0.001$), alors que cette corrélation n'est pas significative dans les matériaux constitutifs des « squelettes » ($r = 0.5357$ pour $n = 13$, $P > 0.05$).

On constate d'autre part que dans les matériaux constitutifs des terres fines, les proportions de MnO augmentent avec celles de Na_2O total (corrélation de rang positive : $r = 0.6263$, $n = 13$, P très proche de 0.02). Dans les matériaux constitutifs des « squelettes », elles augmentent avec celles de Na_2O total (corrélation de rang positive : $r = 0.6524$, $n = 13$, $P < 0.02$) et de K_2O total (corrélation de rang positive : $r = 0.7253$, $n = 13$, $P < 0.01$). Cela implique que les proportions de MnO augmentent :

- dans les terres fines avec celles des plagioclases sodiques,

- dans les « squelettes » avec celles des feldspaths potassiques et dans une moindre mesure avec celles des feldspaths sodiques.

Il s'agit de matériaux plus fortement altérés dont bon nombre ne contiennent que des feldspaths potassiques.

Ainsi les proportions de manganèse augmentent lorsqu'on se rapproche du front de roche saine parce que les conditions de son lessivage deviennent moins favorables (milieu plus basique).

On ne retrouve pas ce phénomène dans les matériaux constitutifs des gravillons où la corrélation de rang positive MnO- K_2O ($r = 0.6085$, $n = 13$, $P < 0.05$) n'est qu'une implication de la corrélation de rang positive K_2O -MgO ($r = 0.6621$, $n = 13$, $P < 0.02$) : le potassium n'est plus fourni principalement par les feldspaths potassiques, mais par la biotite, à moins que biotite et feldspaths potassiques soient tous deux résiduels dans des proportions équivalentes.

En conclusion, les matériaux constitutifs des gravillons se distinguent par une genèse en milieu plus acide et plus lessivant favorisant l'élimination du manganèse et la fixation du phosphore par le fer, tandis que ceux des « squelettes » et des terres fines sont caractérisés par un milieu de genèse plus basique et moins bien drainé défavorable au lessivage du manganèse.

2.4.1.2. Teneurs en bases

Relations entre les bases dans un même type de matériau

Matériaux constitutifs des gravillons

On y observe les corrélations de rang positives :

K_2O-MgO : $r = 0.6621$ $n = 13$ $P < 0.02$

$CaO-MgO$: $r = 0.6187$ $n = 13$ $P < 0.05$

La première, qui caractérise également les arènes fortement altérées, indique que le potassium provient essentiellement des biotites (feldspaths potassiques absents), ou que la biotite a résisté à l'altération de la même façon que les feldspaths potassiques et que leurs teneurs augmentent ensemble. Ce phénomène caractérise des matériaux fortement altérés car, au départ, dans les arènes faiblement altérées, il n'y a pas de corrélation entre K_2O et MgO pour les arènes mésocrates ($r = 0.095$ pour $n = 17$) tandis que dans les arènes leucocrates, c'est au contraire une corrélation de rang négative qui lie K_2O et MgO ($r = -0.7648$, $n = 14$, $P < 0.01$).

La corrélation de rang $CaO-MgO$ signifie que le calcium est résiduel et lié aux ferromagnésiens résiduels (biotites, biotites plus ou moins vermiculitisées).

Matériaux constitutifs des squelettes

On n'y observe aucune corrélation entre les teneurs des différentes bases.

Matériaux constitutifs des terres fines

Il existe dans ces matériaux, les corrélations de rang suivantes :

K_2O-Na_2O : $r = 0.9175$ $n = 13$ $P < 0.001$

K_2O-CaO : $r = 0.8733$ $n = 13$ $P < 0.001$

$CaO-Na_2O$: $r = 0.8434$ $n = 13$ $P < 0.001$

qui indiquent une faible altération : les proportions des feldspaths sodiques et calciques augmentent avec celles des feldspaths potassiques.

Relations entre les teneurs en bases et en titane dans un même type de matériau

Deux corrélations de rang seulement apparaissent :

— dans les gravillons, une corrélation de rang négative entre MgO et TiO_2 ($r = -0.5618$, $n = 13$, $P < 0.05$) qui témoigne d'une altération poussée dans ces matériaux ;

— dans les « squelettes », une corrélation de rang négative entre K_2O et TiO_2 ($r = -0.7431$, $n = 13$, $P < 0.01$). C'est une corrélation que l'on retrouve dans les arènes, qu'elles soient faiblement altérées (plagioclases abondants) ou fortement altérées (plagioclases absents ou rares).

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XIV, n° 4, 1976 : 299-319.

2.4.1.3. Teneurs en alumine, fer et titane

La figure 8 montre que les gravillons sont nettement plus riches en fer que les « squelettes ». Ils sont également un peu plus riches en alumine, mais de manière moins significative. Ainsi la formation des gravillons ne relève pas du seul processus de concentration des hydroxydes et oxydes de fer aux dépens de l'ensemble des autres constituants du matériel de réception : l'accumulation de fer ne se traduit pas par une diminution des teneurs en Al_2O_3 , c'est-à-dire en argile. Elle est donc :

— soit accompagnée d'une accumulation d'argile, ce qui suppose un ralentissement du drainage incompatible avec ce que nous savons déjà du milieu de genèse des gravillons ;

— soit favorisée par un milieu argileux dont l'emballage actuel de terre fine rend mal compte, mais que l'on peut expliquer par les conditions de formation des concrétions en milieu bien drainé dans les zones d'altération de roches acides : les oxydes et hydroxydes de fer se concentrent de préférence dans les parties les plus argileuses qui forment des îlots compacts doués de propriétés adsorbantes ; la texture de ces concrétions sera ainsi plus fine que la texture globale du matériau de départ (D'hoore, 1954). On peut admettre en même temps que le degré d'altération de ces îlots argileux soit plus poussé que celui du matériel environnant.

Les gravillons pourraient donc être les témoins d'une altération des migmatites en milieu bien drainé qui serait caractérisé par un concrétionnement dans la zone d'altération.

On peut également concevoir que les gravillons se soient formés selon le processus décrit par Kubiena (1954) pour les concrétions arrondies des sols ferrallitiques de Guinée Equatoriale, dans un milieu argileux bien drainé et dans des conditions d'humidification constante et homogène : ils seraient alors les témoins d'une vieille altération ferrallitique.

Relation entre alumine, fer et titane dans un matériau donné

Matériaux constitutifs des gravillons et des « squelettes »

Il n'y existe aucune corrélation de rang entre les teneurs en Al_2O_3 , Fe_2O_3 et TiO_2 . Cela indique que ces matériaux ont subi une pédogenèse qui a contribué à une redistribution de ces éléments par rapport aux arènes où ils sont liés deux à deux par des corrélations de rang positives.

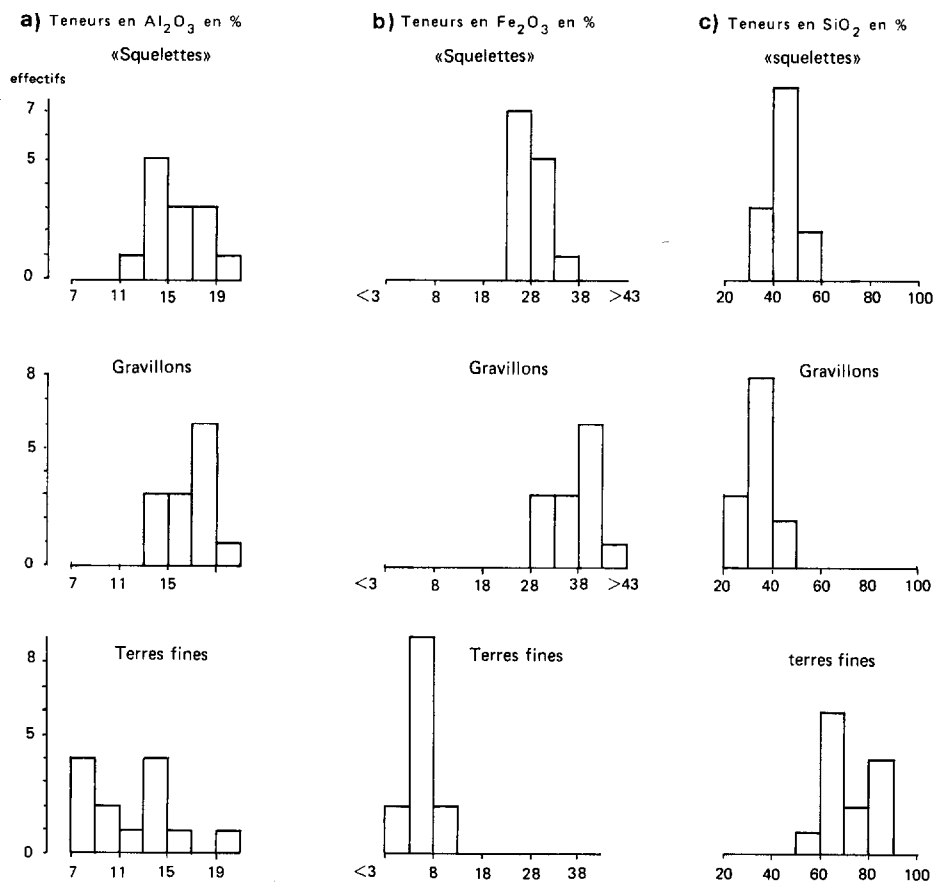


FIG. 8

Matériaux constitutifs des terres fines

On y observe les corrélations de rang positives :
 Fe₂O₃-TiO₂ : r = 0.7981 n = 13 P très proche de 0.001
 Fe₂O₃-Al₂O₃ : r = 0.8022 n = 13 P = 0.001
 Al₂O₃-TiO₂ : r = 0.7101 n = 13 P < 0.001

Ces corrélations sont caractéristiques des arènes où la pédogenèse n'a pas encore provoqué de mobilisation différentielle de ces trois constituants.

2.4.1.4. Conclusions

Parmi les matériaux constitutifs des niveaux indu-rés analysés, ceux des gravillons apparaissent les plus fortement évolués, tandis que ceux des terres fines ont un comportement d'arènes à évolution faible.

2.4.2. RELATIONS ENTRE LES ÉLÉMENTS D'UN TYPE DE MATÉRIAU À L'AUTRE

2.4.2.1. Relations « squelettes » - terres fines

On observe une corrélation de rang positive entre ces deux matériaux seulement pour les teneurs en MgO et K₂O (tabl. IV). Si on considère non plus les teneurs absolues, mais les teneurs par rapport à TiO₂, il existe une corrélation de rang positive entre les terres fines et les « squelettes » pour les teneurs en MgO/TiO₂, Na₂O/TiO₂, MnO/TiO₂ et P₂O₅/TiO₂ (tabl. IV).

TABLEAU IV

Coefficient de corrélation de rang entre les éléments d'un type de matériau à l'autre

	Terres fines « squelettes »	Terres fines gravillons	Squelettes gravillons		Terres fines squelettes	Terres fines gravillons	Squelettes gravillon
MgO	0.6277 P < 0.05	0.5055 -	0.6895 P < 0.01	MgO/TiO ₂	0.9243 P < 0.001	0.6116 P < 0.001	0.6795 P < 0.05
Na ₂ O	0.5206	-0.0961	0.4629	Na ₂ O/TiO ₂	0.6566 P < 0.02	Non significatif	NS
CaO	-0.0247	0.2761	0.6002 P < 0.05	CaO/TiO ₂	NS	NS	0.6318 P < 0.05
K ₂ O	0.8352 P < 0.001	P < 0.001	P < 0.01	K ₂ O/TiO ₂	0.8846 P < 0.001	0.7953 P < 0.01	0.7156 P < 0.01
MnO	0.5495	0.5412	0.8324 P < 0.001	MnO/TiO ₂	0.6209 P < 0.05	NS	0.8613 P < 0.001
P ₂ O ₅	0.4835	0.6772 P < 0.02	0.7129 P < 0.01	P ₂ O ₅ /TiO ₂	0.6454 P < 0.02	0.8250 P < 0.02	0.7659 P < 0.01
Al ₂ O ₃	0.4835	0.5109	0.9396 P < 0.001	Al ₂ O ₃ /TiO ₂	NS	NS	0.7514 P < 0.01
Fe ₂ O ₃	-0.0082	0.1525	0.7514 P < 0.01	Fe ₂ O ₃ /TiO ₂	NS	NS	0.5879 P < 0.05
SiO ₂	0.1618	0.1868	0.6978 P < 0.01				
TiO ₂	0.5302	0.6250 P < 0.05	P < 0.01				
SiO ₂	0.5110	0.5054	0.6758 P < 0.02				

2.4.2.2. Relations terres fines - gravillons

Il existe une corrélation de rang positive entre ces deux matériaux pour les teneurs en K₂O, P₂O₅ et TiO₂.

Il n'apparaît pas d'autres corrélations que les deux premières si l'on considère les teneurs des éléments par rapport au titane (tabl. IV).

2.4.2.3. Relations « squelettes »-gravillons

Que l'on considère les teneurs absolues des éléments ou leurs teneurs par rapport à TiO₂, on observe une corrélation de rang positive entre ces deux matériaux pour tous les éléments analysés sauf Na₂O, et également pour le rapport pondéral SiO₂ totale/Al₂O₃ totale (tabl. IV).

2.4.2.4. Interprétations de ces corrélations

Les corrélations signifient identité d'origine des matériaux.

Si ces corrélations apparaissent normales pour des éléments qui peuvent avoir des comportements identiques dans les deux matériaux comparés, elles semblent anormales pour ceux qui ont des comportements opposés comme :

— Le manganèse parfaitement lessivé des gravillons où il est seulement lié aux ferromagnésiens résiduels ; enrichi dans les « squelettes », et peu lessivé des terres où il est également lié aux ferromagnésiens.

— Le phosphore fortement enrichi dans les gravillons par rapport au squelette et surtout par rapport à la terre fine.

— Le magnésium fortement lessivé des gravillons par rapport aux autres matériaux.

D'autre part toute corrélation pour un élément donné entre deux matériaux de niveaux indurés qui ont des enrichissements en fer différents, suppose que les différences dans les variations des teneurs de l'élément induites par la concentration du fer, sont inférieures aux différences des teneurs de cet élément dans les matériaux originels. Il faudra en outre tenir compte des variations de teneurs dues aux différences d'altération ou à des enrichissements.

Ainsi les corrélations observées entre terres fines et « squelettes » ou terres fines et gravillons sont difficilement interprétables dans le sens d'une identité d'origine entre les matériaux originels. On se demande dans ce cas en effet, pourquoi ces corrélations concerneraient deux ou trois éléments, dont précisément ceux pour lesquels une corrélation est difficile à expliquer (notamment phosphore et potassium pour les relations terres fines - gravillons).

Les corrélations entre gravillons et « squelettes » qui intéressent la presque totalité des éléments semblent bien signifier une identité des matériaux originels. Mais comment expliquer alors la corrélation pour les teneurs en manganèse, celui-ci étant lessivé des gravillons et enrichi dans les « squelettes » par accumulation absolue. Il faudrait admettre que les différences de teneurs d'un matériau induré à l'autre soient supérieures aux quantités lessivées dans les gravillons et enrichies dans les squelettes. Or s'il y avait dans ces derniers prépondérance du manganèse originel, on aurait une corrélation de rang positive entre manganèse et magnésium ou manganèse et titane comme dans les arènes.

La corrélation de rang pour les teneurs en fer pose un problème du même type : gravillons et « squelettes » se sont formés dans deux phases pédogénétiques différentes à partir de fer exogène. En effet, si le fer était principalement hérité du matériau originel, on aurait une corrélation entre les teneurs en fer et celles de titane et d'aluminium. Comment expliquer alors une corrélation de rang entre les intensités de deux accumulations de fer qui se sont produits dans des conditions différentes ? Dans quel autre sens peut-on interpréter ces corrélations ?

Autres significations possibles des corrélations

Une corrélation de rang entre deux matériaux pour leurs teneurs en un élément donné signifie que les accroissements des teneurs des deux matériaux en cet élément ont le même signe. On admet que si un maté-

riau A est un mélange dont le matériau B est l'un des constituants (on a $A = B + X$), il y a une corrélation de rang entre A et B. Dans ce cas la corrélation de rang traduit seulement une autochtonie partielle de A par rapport à B.

2.4.3. SIGNIFICATION DES ACCROISSEMENTS DE TENEURS EN UN ÉLÉMENT DONNÉ D'UN TYPE DE MATÉRIAU À L'AUTRE

2.4.3.1. Comportement du système fer-silice-alumine

Les matériaux analysés forment chacun un mélange de trois constituants essentiels : alumine, fer, silice qui représentent environ 90 % du matériau séché à 105°. Si nous supposons que deux matériaux sont identiques au départ, toute augmentation de la teneur de l'un de ces trois constituants dans un des matériaux doit se traduire par une diminution de la teneur des deux autres.

Le passage des gravillons aux terres fines

Il se traduit par une forte baisse des teneurs en silice totale (fig. 6c). Etant donné que le trait le plus marquant de ce passage est l'enrichissement en fer des gravillons, cette baisse des teneurs en silice devrait se faire d'abord au profit du fer. Or la corrélation de rang entre ΔSiO_2 (perte de silice des gravillons) et $\Delta \text{Fe}_2\text{O}_3$ (gain en fer des gravillons) n'est pas significative : $r = 0.5164$, $n = 13$, $P > 0.05$. Par contre il existe une corrélation de rang positive et hautement significative entre ΔSiO_2 et $\Delta \text{Al}_2\text{O}_3$ (gain en alumine des gravillons) : la perte de silice des gravillons ne s'est pas faite par la concentration des oxydes et hydroxydes de fer, mais par altération. On retrouve les conclusions de l'étude des teneurs en bases, en manganèse et en phosphore, et la confirmation que le fer des gravillons s'est accumulé dans un milieu enrichi en argile.

Le passage des squelettes aux terres fines

Il se traduit également par une forte baisse des teneurs en silice, un enrichissement beaucoup plus important en fer qu'en alumine. On observe une corrélation de rang positive et hautement significative ($P < 0.001$) entre :

- ΔSiO_2 et $\Delta \text{Fe}_2\text{O}_3$: $r = 0.8736$ $n = 13$
- ΔSiO_2 et $\Delta \text{Al}_2\text{O}_3$: $r = 0.8352$ $n = 13$

L'enrichissement en fer est accompagné d'un enrichissement en alumine et ces deux enrichissements se font aux dépens de la silice totale.

Ces enrichissements ne se sont pas faits aux dépens de la terre fine, puisque nous savons que celle-ci n'est pas lessivée en fer et en alumine. Là encore, on constate que gravillons et « squelettes » ne se sont pas formés dans les mêmes conditions pédogénétiques.

Le passage des gravillons aux « squelettes »

Nous avons déjà vu que l'enrichissement en fer des gravillons par rapport aux « squelettes » ne s'accompagne pas de leur appauvrissement en alumine. La perte de silice des gravillons est imputable à une augmentation des teneurs en fer et en alumine. On le vérifie bien par l'existence d'une corrélation de rang positive entre :

$$\Delta\text{SiO}_2 \text{ et } \Delta\text{Fe}_2\text{O}_3 : r = 0.8571 \quad n = 13 \quad P < 0.001$$

$$\Delta\text{SiO}_2 \text{ et } \Delta\text{Al}_2\text{O}_3 : r = 0.5783 \quad n = 13 \quad P < 0.05$$

Etant donné que les différences entre les teneurs en alumine des gravillons et des « squelettes » sont faibles, ce n'est pas l'effet d'accumulation de l'alumine qui joue sur les différences dans les teneurs en silice, mais le fait qu'une faible augmentation de la teneur en alumine correspond à une perte plus forte de silice par le biais d'une altération plus poussée.

2.4.3.2. *Accroissements des teneurs des autres éléments*

Le passage des gravillons aux terres fines

Les corrélations de rang négatives entre :

$$\Delta\text{SiO}_2 \text{ et } \Delta\text{Al}_2\text{O}_3 : r = -0.8406 \quad n = 13 \quad P < 0.001$$

$$\Delta\text{TiO}_2 \text{ et } \Delta\text{SiO}_2 : r = -0.8352 \quad n = 13 \quad P < 0.001$$

$$\Delta\text{SiO}_2 \text{ et } \Delta\text{P}_2\text{O}_5 : r = -0.5563 \quad n = 13 \quad P < 0.05$$

et les corrélations de rang positives :

$$\Delta\text{TiO}_2 - \Delta\text{Al}_2\text{O}_3 : r = 0.6923 \quad n = 13 \quad P = 0.01$$

$$\Delta\text{K}_2\text{O} - \Delta\text{SiO}_2 : r = 0.5934 \quad n = 13 \quad P < 0.05$$

accompagnée des corrélations positives :

$$\Delta\text{K}_2\text{O} - \Delta\text{Na}_2\text{O} : r = 0.7088 \quad n = 13 \quad P < 0.01$$

$$\Delta\text{K}_2\text{O} - \Delta\text{CaO} : r = 0.7321 \quad n = 13 \quad P < 0.01$$

$$\Delta\text{Na}_2\text{O} - \Delta\text{CaO} : r = 0.7404 \quad n = 13 \quad P < 0.01$$

montrent que la perte de silice des gravillons par rapport aux terres fines est due à une altération plus poussée dans les gravillons. L'accroissement de la

teneur en phosphore dans les gravillons est également le résultat d'une altération plus poussée.

L'accroissement des teneurs en potassium des terres fines est accompagné d'un accroissement de leurs teneurs en sodium et calcium : c'est un caractère de faible altération de ces matériaux que nous avons déjà signalé.

Le passage des « squelettes » aux terres fines

La corrélation de rang négative $\Delta\text{SiO}_2 - \Delta\text{TiO}_2$ ($r = -0.5659$, $n = 13$, $P < 0.05$) montre que la perte de silice des « squelettes » est également due en partie à une altération plus poussée de ces derniers.

Les corrélations positives :

$$\Delta\text{K}_2\text{O} - \Delta\text{Na}_2\text{O} : r = 0.7088 \quad n = 13 \quad P < 0.01$$

$$\Delta\text{K}_2\text{O} - \Delta\text{CaO} : r = 0.7596 \quad n = 13 \quad P < 0.01$$

$$\Delta\text{Na}_2\text{O} - \Delta\text{CaO} : r = 0.8612 \quad n = 13 \quad P < 0.001$$

montrent, comme précédemment, que, dans les terres fines, l'accroissement de la teneur en potassium s'accompagne d'un accroissement des teneurs en sodium et calcium : c'est un caractère de faible évolution.

Les corrélations de rang positives $\Delta\text{MgO} - \Delta\text{TiO}_2$ dans les comparaisons terres fines gravillons ($r = 0.7198$, $n = 13$, $P < 0.01$) et terres fines « squelettes » ($r = 0.6497$, $n = 13$, $P < 0.02$) indiquent que, dans les terres fines, l'accroissement de la teneur en magnésium est accompagné d'un accroissement de la teneur en titane.

Quant à la corrélation de rang positive

$$\Delta\text{K}_2\text{O} - \Delta\text{P}_2\text{O}_5 \quad (r = 0.5604, \quad n = 13, \quad P < 0.05),$$

elle indique que l'accroissement des teneurs en potassium des « squelettes » qui peut-être imputable à une altération plus poussée (à laquelle les feldspaths potassiques seraient assez résistants) s'accompagne d'un accroissement des teneurs en phosphore.

Le passage des gravillons aux « squelettes »

Les corrélations de rang négative :

$$\Delta\text{K}_2\text{O} - \Delta\text{TiO}_2 : r = -0.5549 \quad n = 13 \quad P < 0.05$$

$$\Delta\text{Na}_2\text{O} - \Delta\text{TiO}_2 : r = -0.5664 \quad n = 13 \quad P < 0.05$$

montrent que les accroissements des teneurs en potassium et sodium des « squelettes » ne sont pas déter-

minés par les accroissements des teneurs en fer ou en aluminium, mais par ceux des teneurs en TiO_2 imputables soit à une différence d'altération, soit à une différence dans la nature des matériaux originels.

La corrélation de rang négative $\Delta K_2O - \Delta P_2O_5$ ($r = -0.7349$, $n = 13$, $P < 0.01$) indique que l'accroissement des teneurs en phosphore des gravillons s'accompagne d'un accroissement inverse des teneurs en potassium : la concentration du phosphore dans les gravillons est consécutive à une altération poussée à laquelle même les feldspaths potassiques résistent peu.

Les matériaux constitutifs des gravillons apparaissent bien comme les plus fortement évolués.

2.4.4. CONCLUSIONS

La caractérisation chimique aboutit aux mêmes conclusions que les précédentes ; on ne passe pas des terres fines aux gravillons ou aux « squelettes » et des « squelettes » aux gravillons par une simple concentration des oxydes et hydroxydes de fer.

Les matériaux constitutifs des terres fines apparaissent faiblement évolués (feldspaths potassiques et plagioclases sodiques et calciques dans le résidu d'altération), tandis que ceux des gravillons sont les plus fortement évolués (feldspaths potassiques, fortement altérés) et que ceux des « squelettes » se situent entre ces deux pôles extrêmes (feldspaths potassiques résistants à l'altération).

Si l'on peut expliquer la forte évolution des gravillons par rapport aux terres fines et aux « squelettes » en faisant appel à un concrétionnement précoce en milieu lessivant, il est difficile d'expliquer la faible évolution de la terre fine par rapport aux squelettes à moins d'accorder un rôle dans l'altération à l'imprégnation ferrugineuse, selon le processus décrit par Struillou (1965). Mais dans ce cas, ce sont les feldspaths potassiques qui seraient les plus fortement détruits dans les squelettes par rapport aux terres fines et on aurait des corrélations de rang « squelettes »-terres fines plutôt pour les teneurs en calcium et sodium que pour les teneurs en potassium. D'autre part, l'examen en lames minces montre que si les microclines sont fortement altérés dans les gravillons, ils sont assez abondants et beaucoup moins altérés dans les « squelettes ».

On est donc obligé d'admettre que les terres fines sont un mélange de matériaux allochtones par rapport à ceux des « squelettes » et gravillons avec ces derniers.

Quant aux différences d'altération entre gravillons et « squelettes », on ne peut pas les attribuer à une action de l'imprégnation ferrugineuse sur l'altération des minéraux puisqu'il s'agit de matériaux imprégnés d'oxydes et d'hydroxydes de fer dans les deux cas. Il reste à cet égard une influence hypothétique du seul phénomène de nodulation. Mais l'imprégnation ferrugineuse que ce soit par nodulation ou par cuirassement sensu stricto (cuirasse, carapace) est plutôt considérée comme un moyen de fossilisation des minéraux non altérés, en les préservant d'une altération ultérieure.

Alexander et Cady (1962) utilisent cette propriété qu'a le cuirassement de fossiliser un complexe d'altération à un stade donné pour montrer que les pisolithes de nombreuses vieilles latérites pisolithiques fortement évolués (ne contenant pas de minéraux altérables) se sont formés à un stade précoce de l'altération, dans les endroits de la roche les plus altérables, parce qu'ils contiennent des matériaux tels que des cristaux non altérés ou des reliques de feldspaths emplis de gibbsite. Ils en concluent qu'une fois formés, les pisolithes sont très stables et ne subissent plus d'autre évolution que la déshydratation. Ces constatations ont été faites dans les milieux d'altération les plus agressifs.

Dans son étude sur la chronologie des surfaces latéritiques d'Australie du S W, Mulcahy (1960) a établi que les deux plus vieilles surfaces sont la surface de Quailing et celle de Kauring, expressions locales du vieux plateau.

La surface de Quailing occupe les parties les plus hautes tandis que celle de Kauring occupe les dépressions plates dans la première. Les sols de la surface de Quailing comportent un niveau superficiel de sables jaunes, un niveau ferrugineux (cuirasse, carapace...) et un niveau blanchi (pallid zone). Les études minéralogiques (Morgan et Herlihy en collaboration avec l'auteur, 1956) montrent que les sables jaunes du niveau superficiel et les horizons ferrugineux contiennent généralement des quantités appréciables de minéraux facilement altérables qui sont absents des niveaux blanchis sous-jacents bien que présents dans la roche mère. L'auteur en déduit que la ferruginisation a fossilisé de petites plages de roche mère en les protégeant d'une altération ultérieure.

Les sols de la surface de Kauring sont constitués de sables gris déliés au-dessus d'une cuirasse massive. Les minéraux altérables, si caractéristiques de la surface de Quailing, sont presque complètement absents des sables gris ; la surface de Kauring occupe dans

celle de Quailing des entailles qui ont atteint le niveau blanchi. Ainsi, les minéraux altérables caractérisent ici les matériaux de la surface la plus ancienne grâce à leur fossilisation par le cuirassement.

Maignien (1958) signale également que dans les bauxites nodulaires de Friguiabé, les nodules fortement alumineux laissent apparaître dans leur cassure l'ancienne stratification du chiste (la roche mère) où souvent des paillettes de séricite sont conservées.

Dans les mécanismes connus de l'immobilisation du fer (« oxydation, manque de matériau organique, adsorption sur les argiles, dessiccation ») et de l'induration (réorganisation, déshydratation et cristallisation des oxydes et hydroxydes de fer) (Maignien, 1958 ; D'Hoore, 1954 ; Alexander et Cady, 1962), rien ne permet d'attribuer un rôle dans l'altération au processus de cuirassement.

Cependant Alexander et Cady (1962), signalent que le durcissement des latérites est presque toujours accompagné d'une diminution de la proportion de kaolinite par apport de fer exogène d'une part et aussi par destruction de la kaolinite d'autre part, avec apparition de gibbsite libre. Par ailleurs, la kaolinite est souvent moins bien cristallisée dans les parties indurées que dans les parties non indurées d'un même matériau.

Il est certain que l'induration ne peut pas tantôt provoquer la destruction de la kaolinite, tantôt fossiliser les minéraux altérables. Il s'agit ici de matériaux fortement ferrallitiques dans lesquels l'adsorption du fer sur la kaolinite est un obstacle au cuirassement. Dans ces conditions, la destruction de la kaolinite, en diminuant le processus d'adsorption du fer et en augmentant la quantité de fer disponible pour le cuirassement, favorise ce dernier. Ainsi ce n'est pas l'induration qui provoque la destruction de la kaolinite, mais cette destruction qui favorise le cuirassement.

Nous n'imputerons donc pas les différences d'altération entre gravillons et « squelettes » au phénomène de nodulation, mais à des phases pédogénétiques différentes se succédant dans le temps ou dans le temps et dans l'espace.

2.5. Caractérisation microscopique

2.5.1. DESCRIPTION D'UN NIVEAU CUIRASSE

(monolithe BK 79.1.1. : niveau supérieur de la cuirasse dans le profil BK 79).

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XIV, n° 4, 1976 : 299-319.

2.5.1.1. Les gravillons

Ils constituent des nodules arrondis, bien individualisés. A l'intérieur d'un cortex brun constitué de dépôts successifs à biréfringences différentes (exemple : de l'extérieur vers l'intérieur, un liseré jaune-orange sali de brun, liseré brun sombre, liseré brun clair ponctué de jaune orangé), ils sont constitués par une masse brun sombre non différenciée.

Le squelette peu abondant est essentiellement constitué de quartz à grains généralement de l'ordre de $60 \mu - 70 \mu$ à 20μ .

Le quartz est un peu altéré ; fissures élargies incrustées d'hydroxydes de fer, caries plus ou moins développées sur les bords plages brun clair plus ou moins diffuses donnant un aspect sale en lumière naturelle, en lumière polarisée ces plages sont rouges (planche I, photogr. 1).

Le microcline est très fortement altéré et difficilement identifiable : il est envahi par un plasma brun sombre en lumière naturelle, rouge en lumière réfléchie, dans lequel flottent de petits îlots paraissant sains (planche I, photogr. 2).

Le seul minéral primaire identifiable est le quartz.

2.5.1.2. La cuirasse ou carapace

Il y a continuité au point de vue squelette entre la terre fine et la cuirasse ou la carapace. Le squelette est abondant et essentiellement constitué de quartz avec un peu de microcline.

A côté de quartz non altérés, on note encore des grains de quartz tachés à aspect sale avec des incrustations d'hydroxydes de fer dans les fissures. On observe deux types de cristaux de microcline :

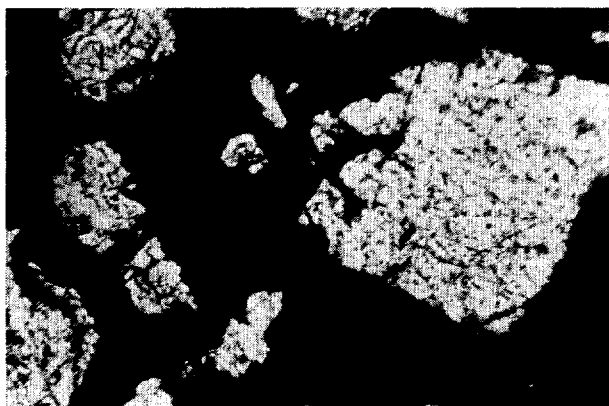
Microcline moyennement altéré — nombreux clivage épaissis brun foncé en lumière naturelle, tendant à s'anastomoser dans un cristal où le quadrillage caractéristique du microclimat est encore apparent, seuls les clivages dans le sens de l'allongement du cristal sont incrustés d'hydroxydes ;

— clivages brun foncé entourés d'un plasma brun clair en lumière naturelle, jaune en lumière réfléchie alors que le plasma environnant le cristal est rouge ;

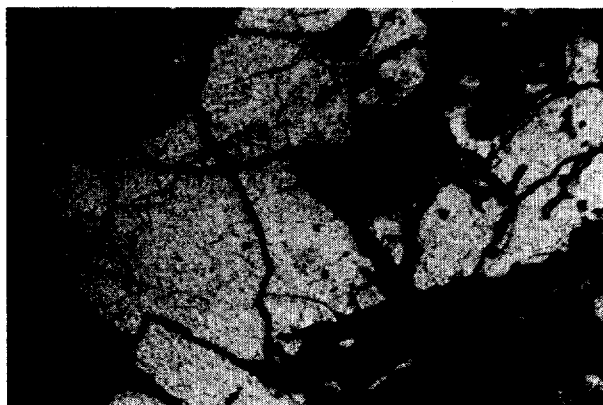
— grandes plages de plasma brun clair en lumière naturelle (planche I, photogr. 3).

Microcline plus altéré, fortement incrusté d'arborescences d'hydroxydes brun sombre en lumière natu-

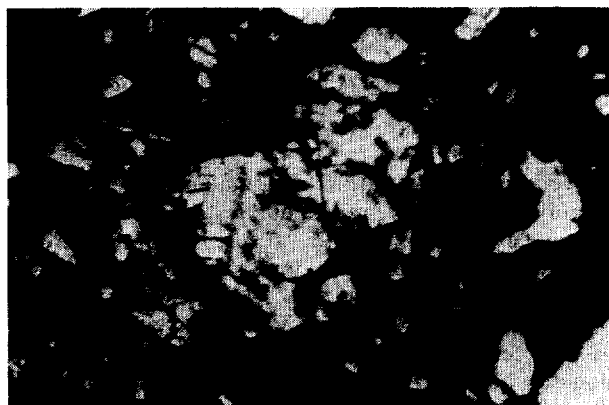
PLANCHE I



1. Niveau cuirassé dans le profil BK 79. Quartz incrusté d'hydroxydes de fer avec caries plus ou moins développées sur les bords dans un gravillon ferrugineux L.N.



2. Niveau cuirassé dans le profil BK 79. Quartz incrusté d'hydroxydes de fer dans les fissures et microcline très fortement altéré (petits îlots sains dans une masse brun sombre) dans un gravillon ferrugineux L.N.



3. Niveau cuirassé dans le profil BK 79. Microcline relativement peu altéré dans la masse indurée de la cuirasse L.N.



4. Niveau cuirassé dans le profil BK 79. Enstatite relativement peu altéré dans la terre fine.

relle, rouge en lumière réfléchie envahissant le cristal en laissant des îlots sains.

Ainsi, contrairement aux gravillons, on a de nombreux microclines moyennement altérés avec un quadrillage caractéristique en lumière polarisée et qui sont peu ou pas incrustés d'hydroxydes dans un environnement qui en est imprégné : l'altération est moins poussée que dans les gravillons (planche I, photogr. 3).

2.5.1.3. La terre fine

Le squelette est abondant, à grains presque jointifs à quartz dominant avec un peu de microcline, d'orthose et quelques pyroxènes (enstatite : planche I, photogr. 4). Les grains appartiennent à deux classes granulométriques très différentes : 0,40 à 0,60 mm et 50 à 100 μ .

On observe comme dans les matériaux précédents, à côté des quartz sains, des quartz à incrustations brun sombre d'hydroxydes de fer dans les fissures et encoches ou plus rarement à plages brunâtres en lumière naturelle.

On observe également deux types de cristaux de microcline :

— *Microcline peu altéré*, à altération sans ferrugineisation, aspect sale, nombreux clivages épaissis, brun clair en lumière naturelle, noirs en lumière polarisée, incolores à légèrement jaunâtres en lumière réfléchie

ou microcline un peu plus altéré à altération sans ferrugineisation, clivages épaissis dans le sens de l'allongement du cristal, nombreuses plages de plasma brun clair en lumière naturelle, gris foncé à noir en lumière polarisée, jaune-rouge en lumière réfléchie, seulement sur les bords du cristal, comme le plasma environnant,

ou microcline peu altéré à clivages et fissures incrusté d'hydroxydes de fer.

— *Microcline altéré incrusté d'hydroxydes de fer* avec des plages de plasma brun foncé en lumière naturelle, rouges en lumière réfléchie comme dans la cuirasse ou la carapace.

On observe aussi quelques beaux cristaux d'enstatite en voie d'altération.

Dans la carapace du profil BK 14 (monolithe BK 14.5) on observe également dans la terre fine :

— *des microclines très peu altérés* avec seulement quelques petites plages brun clair en lumière natu-

relle le long des clivages ou seulement les clivages dans le sens de l'allongement du cristal soulignés par un trait foncé ;

— *des microclines altérés* envahis par des arborisations d'hydroxydes de fer brun sombre groupées par zones dans le cristal. Parfois leur disposition au centre seulement du cristal, alors qu'ailleurs les fissures et les clivages ne contiennent qu'un plasma brun clair identique au plasma environnant, montre qu'il s'agit de traits résiduels d'une altération plus ancienne en milieu ferruginisé : les hydroxydes de fer ont été partiellement remobilisés et remplacés par le plasma brun clair.

2.5.2. CONCLUSIONS

Les matériaux constitutifs des gravillons apparaissent fortement altérés : le microcline est complètement altéré et difficilement identifiable.

Ceux des terres fines se signalent par un stade d'altération encore plus faible caractérisé par des microclines peu ou pas altérés et quelques pyroxènes. Cependant, ils apparaissent comme des mélanges de matériaux peu altérés avec des matériaux hérités des zones indurées.

On retrouve les conclusions de la caractérisation chimique.

3. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'étude de l'évolution des matériaux constitutifs des niveaux indurés montre que les gravillons ont pris naissance dans un milieu très lessivant caractérisé par une forte altération, tandis que les matériaux constitutifs des « squelettes » se sont formés dans un milieu moins lessivant avec altération moins poussée et que ceux des terres fines ont une évolution peu poussée qui se rapproche à bien des égards de celui d'arènes. Ces différences ne sont pas imputables à l'action du fer sur l'altération des feldspaths, ni à une action spécifique de la nodulation ferrugineuse qui se traduirait par une altération plus poussée des minéraux.

Les gravillons appartiennent donc à une pédogénèse plus ancienne et leurs caractéristiques peuvent suggérer les conditions de formation des concrétions en milieu bien drainé dans les zones d'altération de roches acides décrites par D'Hoore (1954).

Mais l'existence de certaines corrélations de rang entre terres fines et « squelettes » terres fines et gravillons, et surtout de nombreuses corrélations de rang entre « squelettes » et gravillons supposent deux éventualités :

On interprète les corrélations de rang dans le sens d'une identité entre les matériaux comparés. Les gravillons sont alors des matériaux résiduels d'une pédogenèse plus ancienne, maintenus sur place. Il y a allochtonie de genèse, mais autochtonie de site. L'autochtonie de site peut comporter deux mécanismes différents :

— Les gravillons s'enfoncent progressivement dans les niveaux sous-jacents à ceux de leur formation par départ des autres éléments. Cette hypothèse est compatible avec un mécanisme de façonnement des glaciais par le seul déplacement des éléments fins comme le pensent certains géomorphologues.

— Les gravillons se sont formés dans les horizons où ils sont actuellement, et ces derniers représentent

la base d'un vieux profil d'altération qui a été ensuite soumis à une autre pédogenèse. Cette hypothèse suppose l'ablation totale de la partie supérieure du vieux profil.

Nous avons vu cependant qu'une interprétation des corrélations de rang dans le sens d'une identité des matériaux comparés pose un certain nombre de problèmes difficiles à résoudre et que dans tous les cas, il faudra admettre une allochtonie partielle de la terre fine.

On interprète les corrélations de rang dans un sens restrictif impliquant seulement une parenté entre les matériaux comparés sans exclure une possibilité de mélange. Alors les gravillons sont des matériaux allochtones mis en place avec un emballage qui s'est mélangé aux matériaux de réception. Cela suppose un mécanisme de fonctionnement des glaciais faisant intervenir des mouvements de masse.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'ORSTOM le 5 janvier 1977

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDER (L.T.) and CADY (J.G.), 1962. — Genesis and hardening of Laterite in soils. U.S. Dept of Agric., *Techn. Bull.* n° 1282, 90 p.
- BEAR (F.E.), 1955. — Chemistry of the soil. Edit. by F.E. Bear, New York, 373 p.
- D'HOORE (J.), 1954. — L'accumulation des sesquioxydes libres dans les sols tropicaux. *Publ. INEAC, Sér. Sc.*, n° 62, 132 p.
- ENDREY (A.S.), 1963. — Estimation of free iron oxides in soils and clays by a photolytic method. *Clay Miner. Bull.* 29, 5 : 209-217.
- HEM (J.D.), 1963. — Chemical equilibria affecting the behaviour of Mn in natural water. *Bull. Assoc. Intern. Hydrologie scientifique*, 8, 3 : 9-63.
- KALOGA (B.), 1964. — Reconnaissance pédologique des bassins versants des Voltas Blanche et Rouge. I. Etudes Pédologiques. ORSTOM, Centre de Dakar-Hann, 1 vol. 133 p. *multigr.*, 1 carte au 1/200 000 en 2 feuilles.
- KALOGA (B.), 1969. — Etude pédologique de la Haute-Volta, Région Centre-Sud. ORSTOM, Centre de Dakar-Hann, 247 p. *multigr.*, 1 carte au 1/500 000.
- KUBIENA (W.), 1954. — Micromorphology of laterite formation in Rio Muni (Spanish Guinea). C.R. 5^e Conf. Intern. Sc. Sol, 4, : 77-84.
- MAIGNIEN (R.), 1958. — Le cuirassement des sols en Guinée (Thèse Dr. Sc.) Mém. Serv. Carte géol. Als Lorraine, n° 16, 239 p.
- MORGAN (K.H.) and HERBILLY (J.H.), 1956. — The geology of the Kauring area. Thesis, Univers. of W. Australia, cité par Nulcahy § 1960).
- MULCAHY (M.J.), 1960. — Laterites and lateritic soils in South-western Australia. *J. Soil Sc.*, 11 : 206-225.
- RANKAMA (K.) and SAHAMA (Th. G.), 1960. — Geochemistry. The University of Chicago Press, 4th edit.
- STRUILLOU (R.), 1965. — Rôle du fer dans l'altération rapide des feldspaths en climat tempéré. C.R. Acad. Sc. (Paris). 261 : 485-488.
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique (Thèse Dr. Sc.) Mém. Serv. carte Géol. Als Lorraine, n° 31, 199 p.
- WACKERMANN (J.M.), 1975. — L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide. Etude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal Oriental. Conséquences pour la cartographie et la prospection. Thèse Dr. Sc. Univ. de Strasbourg. ORSTOM, Paris. 373 p. *multigr.*