

**PREMIER BILAN DES ÉTUDES GÉOLOGIQUES ET PÉDOLOGIQUES
D'UN CORPS ULTRABASIQUE ET DE SON CONTEXTE :
KOUSSANE AU SÉNÉGAL-ORIENTAL**

A. BLOT, M. CARN, J.-C. LEPRUN, J.-C. PION
Centre O.R.S.T.O.M. de Dakar (Sénégal)

AVANT-PROPOS

Le site de Koussane a été mis en évidence par prospection géochimique régionale en 1969 (AGASSIZ, PETKOVIC) dans le cadre des projets de recherches minières au Sénégal-Oriental.

Des travaux plus détaillés sont effectués après 1970, faisant intervenir la géochimie (PETKOVIC 1971, ZWIZEN 1972, MIKHAILOFF 1973) ; la cartographie (DEHANDSCHUTTER 1973) ; la géophysique (CGG 1973).

Dans le même temps, des travaux superficiels par puits manuels de type orpailleur (LASFARGUES 1973) sont effectués.

En 1973 et 1974, un travail en équipe sur les lignes de puits complétées en deux toposéquences réunit A. BLOT, M. CARN et J. C. PION géologues du Centre de Dakar et J. C. LEPRUN pédologue.

La synthèse de ces travaux est présentée ici sous la forme d'un triptyque. La première partie traite des formations superficielles et du milieu (J. C. LEPRUN). La seconde étudie l'évolution et la répartition séquentielles des argiles (J. C. PION).

Dans la dernière sont abordés les problèmes de concentration supergène de quelques éléments (A. BLOT).

Outre les travaux de géophysique appliquée sur le terrain, toutes les déterminations diffractométriques sont dues à M. CARN.

La faible superficie des affleurements des roches ultrabasiques au Sénégal et en Afrique de l'Ouest, la particularité de leur constitution chimique, et l'originalité de leurs altérations ont motivé les travaux qui suivent.

FOREWORD

The Koussane site was revealed during geochemical prospecting in the region in 1969 (Agassiz, Petkovic), in the course of mining explorations in eastern Senegal. More detailed work was carried out after 1970, including geochemical (Petkovic 1971, Zwizen 1972, Mikhailoff 1973), cartographical (Dehandschutter 1973) and geophysical (CGG 1973) investigations. At the same time, surface work was carried out in hand-dug pits similar to those made in gold-digging (Lasfargues 1973). In 1973 and 1974, work was carried out along the completed lines of pits, in two topo-sequences, by a team consisting of A. Blot, M. Carn and J. C. Pion, geologists at the Dakar Centre, and J. C. Leprun, soil scientist. This present paper presents a synthesis of all this work, in three parts. The first part deals with the surface formations and the surroundings (J.-C. Leprun). The second studies the evolution and the sequence of distribution of the clays (J.-C. Pion). The third tackles the problems of supergene concentration of some elements (A. Blot). Apart from the geophysical work carried out in the field, all the diffraction determinations were done by M. Carn.

It was the small surface area of the outcrops of ultra-basic rocks in Senegal and West-Africa, their particular chemical constitution, and the original features of their weathering which stimulated the work reported below.

ПЕРВЫЙ ИТОГ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ПОЧВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УЛЬТРАОСНОВНОГО ТЕЛА С ЕГО ОКРУЖЕНИЕМ : КУССАН, В ВОСТОЧНОМ СЕНЕГАЛЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Местность Куссан была выявлена местной геохимической разведкой в 1969 (AGASSIZ, РЕТКОВИЧ) в рамках проекта по изысканию руд в восточном Сенегале.

Более детальные работы были проведены после 1970, с применением геохимических (РЕТКОВИЧ 1971, ZWIZEN 1972, МИКНАЦОГГ 1973), картографических (DENANDSCHUTTER 1973), геофизических (CGG, 1973) методов.

В то же время проводятся поверхностные работы при помощи ручных шурфов золотоискательного типа (LASFARGUES 1973).

В 1973 и 1974, коллективная работа на шурфовых линиях дополненных в двух топосериях соединила геологов Дакарского Центра А. ВЛОТ, М. САРН, Ж.-С. ПИОН, и почвоведом Ж.-С. ЛЕПРУН.

Синтез этих работ представлен здесь в виде триптиха. Первая часть касается поверхностных образований и среды (Ж.-С. ЛЕПРУН). Во второй изучаются серийное развитие и распределение глин (Ж.-С. ПИОН).

В последней рассматриваются проблемы гипергенной концентрации некоторых элементов (А. ВЛОТ).

Кроме прикладных полевых геофизических работ, все дифрактометрические определения выполнены М. САРН.

Поводом к следующим работам послужили : небольшая площадь выходов на поверхность ультраосновных пород в Сенегале и западной Африке, особенность их химического состава и своеобразие их изменений.

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE DU MILIEU, DES SOLS, DES ALTÉRATIONS
ET DES SÉDIMENTS.*Cadre physique de l'étude.*

Situation : La zone d'étude se situe au Sénégal-Oriental (Cordonnées 14°09'30" N-12°23'15" W), à l'E du village de Koussane, à une cinquantaine de kilomètres de Kidira, sur la frontière du Mali (fig. 1 et 2).

Climat : Le climat, sahélo-soudanien, est caractérisé par une saison des pluies estivale de 5 mois alternant avec une saison sèche stricte. Les précipitations sont de l'ordre de 850 mm/an, la température moyenne annuelle est de 28°. Ces éléments climatiques rendent possibles un drainage de 150 mm et une érosion forte pouvant atteindre 2000 T/km²/an.

Géomorphologie : L'interfluve des toposéquences situé à une altitude de 80 m est dominé d'environ 40 m par une vigoureuse cuesta cuirassée grossièrement orientée N-S. Cette cuesta forme la ligne de partage des eaux de deux bassins : celui de la Falémé par l'intermédiaire de son affluent la Denndji, à l'E, celui de la Gambie par son tributaire le Niéri-Ko à l'O. Les axes de drainage des toposéquences drainent vers l'E, en un réseau hydrographique à chevelu très dense et ramifié, qui fait opposition vers l'O au réseau lache sur Continental terminal.

Le modelé environnant les toposéquences est ondulé, convexe, à incisions d'axe de drainage étroits et aigus. Les pentes moyennes des interfluves sont de l'ordre de 4 à 5 %, leur amplitude de 300 à 400 m. Les lambeaux de cuirasse ferrugineuse apparaissent en chapeau au sommet de l'interfluve ou/et en bas de pente.

Si on considère que c'est l'ablation des reliefs anciens du socle à l'E de la cuesta qui a fourni le matériel du Continental terminal s'étendant vers Koussane, nous sommes devant un remarquable exemple d'inversion de relief (LEPRUN 1967).

Végétation : C'est une savane arborée de densité variable, constituée de *Terminalia laxiflora*, *Combretum glutinosum*, *Acacia dudgeoni* et *Anogeissus leiocarpus*.

Dans les talwegs, la densité est forte et les deux dernières espèces citées dominant. Elles dominent également une savane lache recouvrant tous les sols

bruns eutrophes. Les zones cuirassées ou à sols peu évolués ferrugineux possèdent une strate arbustive plus fournie constituée d'un mélange de *Combretum* et de *Terminalia*.

Le tapis graminéen comprend toujours *Andropogon gayanus*. Sur les sols issus des serpentinites se mêlent quelques *Schoenfeldia gracilis* qui se développent considérablement sur le replat du profil 29 sur altération vertique.

Pédologie : La carte pédologique à 1/200 000^e levée par S. PEREIRA-BARRETO (1965) indique pour la zone étudiée, une association comprenant des lithosols sur cuirasse, des vertisols lithomorphes sur matériau argileux gonflant plus ou moins gravillonnaire, des sols bruns eutrophes vertiques sur matériau argilo-gravillonnaire et des sols halomorphes à alcalis non lessivés.

Les trois premiers termes de cette association représentent effectivement à l'échelle considérée, les sols dominants des séquences. Le quatrième terme apparaît en bordure de la Falémé. Ces sols, à réserve minérale élevée, s'opposent aux sols ferrugineux, hydromorphes et peu évolués sur grès du Continental terminal proches.

Géologie : Elle est assez simple dans ses grands traits. La ligne méridienne passant par Koussane marque la limite des formations grés-argileuses fini-Tertiaire du Continental terminal à l'Ouest et les formations sédimentaires métamorphisées paléozoïques ou cristallines précambriennes à l'Est (fig. 2).

Dans le détail, les choses se compliquent. BOIS (1961) place la zone d'étude dans les grès du Boundou qui feraient partie du système volcano-sédimentaire « falémien » et seraient donc paléozoïques (Cambrien pour certains, Cambro-ordovicien pour d'autres). Les travaux synthétiques de BASSOT (1963) et la carte du B.R.G.M. (1963) de Bakel à 1/200.000^e, considèrent le secteur comme étant du cambrien indifférencié et des grès feldspathiques argileux cambriens, l'ensemble ayant subi un léger métamorphisme. La carte de Bakel indique entre le Cambrien et le Continental terminal, des formations de grès et de grès glauconieux supposées dater de l'Eocène moyen, surmontant un conglomérat du même âge (fig. 2).

Aucune autre information n'est fournie en dehors de la légende, la notice explicative ne mentionnant pas ces formations !

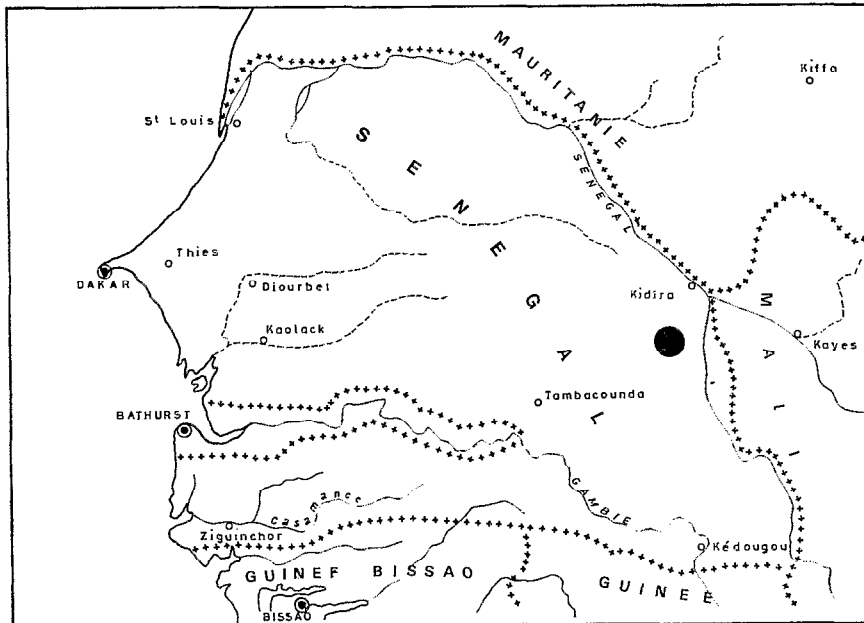
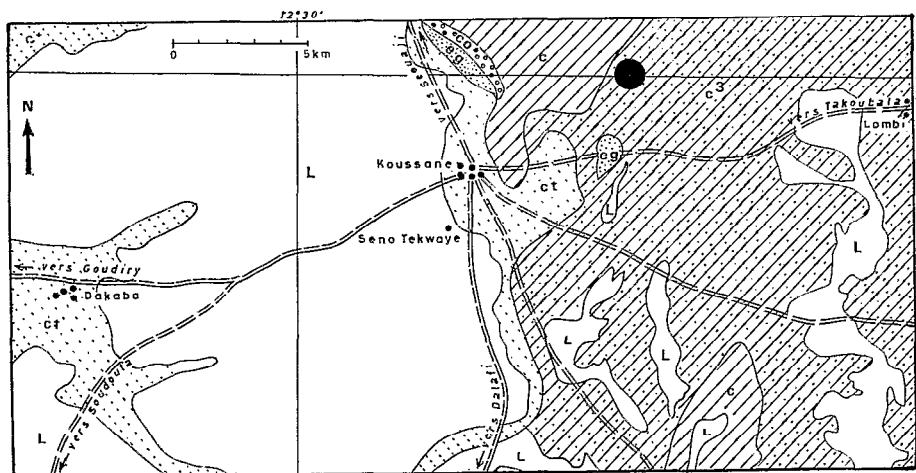


Fig. 1. — Situation de l'Étude dans le Sénégal



● situation de l'étude

L. cuirasse latéritique ct. continental terminal eg. grès de Birfal (éocène moyen)
 co. conglomérat c3. grès feldspathiques argileux (cambrien) c. cambrien indifférencié

Fig. 2. — Extrait de la carte géologique 1/200 000 — feuille Bakel

De 1969 à 1973, des travaux miniers permettent de découvrir un complexe ultrabasique près de Koussane.

Ce sont les puits de prospection de ces campagnes, disposés en chaînes, que nous avons repris, approfondis et complétés, qui constituent nos toposéquences.

La connaissance fragmentaire et discutée de la géologie régionale, nous fait considérer les formations recoupées par les puits comme celles d'un corps

ultrabasique dans un contexte volcano-sédimentaire métamorphisé ancien d'âge non précisé.

Les principales unités lithologiques des toposéquences ont été définies ainsi :

(a) Une roche rencontrée en sondage et constituée principalement des minéraux des serpentines : antigorite lamellaire et chrysotile fibreux. Ces minéraux respectent la forme de cristaux antérieurs (bastite : pseudomorphose des pyroxènes orthorhom-

biques). La transformation de la roche en serpentine étant totale, on peut la dénommer serpentinite (JUNG 1958).

(b) Roche finement schisteuse composée de talc en lamelles blanchâtres et verdâtres. Le talc peut se présenter en amas massifs ou en filons de l'ordre du centimètre. Les minéraux accessoires visibles sont la chlorite et le quartz. C'est un talcschiste (RINNE *et al.* 1949).

(c) Roche à schistosité peu marquée, composée principalement de feldspath (albite). Les minéraux

accessoires sont la chlorite, la séricite et de rares quartz. Nous l'appellerons « albitophyres » entre guillemets, l'altération étant trop avancée pour reconnaître la roche volcanique originelle.

(d) Roche siliceuse détritique qui est un sable cimenté par de l'argile et du fer, à stratifications obliques en haut et à conglomérat bréchique en bas : ce sont des grès s.l.

Voici un exemple de la composition chimique de trois roches définies ci-dessous :

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	H ₂ O
Serpentinite (KOU 21-600).....	39,4	4,1	26,5	0,64	8,4	tr.	0,03	0,02	0,22	18,2
Talcschistes (KOU 24-550).....	52,9	2,2	12,2	0,09	26,7	tr.	0,06	Tr.	0,07	6,7
« Albitophyres » (KOU 03-850).....	53,4	17,2	9,5	0,16	4,56	4,8	4,03	0,47	1,97	7,5

Descriptions sommaires des puits (fig. 3).

Puits KOU 21 : Bordures d'axe de drainage juste en amont et à 3 m d'un rebord cuirassé en dalles. En surface, blocs de cuirasse à patine chocolat foncé (2,5 YR 2,5/2), à aspect chagriné et faussement conglomératique, car cassé, le bloc est massif à très faiblement tubulaire, de couleurs anastomosées brun rouge, ocre, violet bleuté avec des revêtements noirs.

La couleur d'ensemble est proche du 2,5 YR 3,5/6. Le faciès est très fin, sans aucun quartz visible à l'œil. Certaines tubulures contiennent des argiles brun rouge ou ocre blanc. Les blocs sont durs, mais au choc, se brisent en éléments polyédriques de 2-3 cm. Localement, sur les dalles en aval, on trouve des blocs plats d'un grès grossier ferruginisé très dur.

0 - 40 cm : brun chocolat (2,5 YR 3/5) à très nombreux nodules ferruginisés de 2 cm \varnothing , plus ou moins anguleux, qui, cassés présentent un centre noir. Terre fine argileuse, à structure polyédrique très fine, bien développée, en assemblage polyédrique à cubique de 1-2 cm, fragile. Limite progressive ondulée.

40 - 150 cm : vers le haut, sur une face, débris de grès ferruginisés de 5-10 cm et silex de même taille de type « meulière ». Ailleurs blocs de cuirasse brune à violette, à structure fine, se réduisant en débris centimétriques noduleux à centre noir fréquent. 20 % de terre fine à structure polyédrique 2-3 cm en assemblage cohérent,

à sous-structure polyédrique. Limite distincte à tranchée.

150 - 300 cm : matériau argileux marron (2,5 YR 3/3) à plages blanches à ocre avec petites taches noires et « plomb de chasse » ferro-manganésifères. Faces de décollement luisantes. Structure prismatique en haut, devenant un débit lamellaire oblique à faces lissées vers la base. A partir de 240 cm et vers le bas, filonnets de minéraux fibreux blancs, ramifiés.

300 à 420 cm : matériau d'altération à structure de roche reconnaissable par l'organisation et l'altération des minéraux en fines baguettes et plages ocres, vertes, blanches, marron, grises. Le blanc gris-vert domine. Débit par diaclases séparant des îlots de 20-30 cm. Les filonnets précédents disparaissent sous 350 cm. Passage très graduel à

420 - 600 cm : matériau d'altération vert clair à gris (5 Y 7/4) à structure reconnaissable de roche grenue. Faces des diaclases souvent noires. Débit à faces anguleuses parallélépipédiques. Argilification faible en passées étroites, à toucher savonneux. Passage graduel

au-dessous de 600 cm : roche grenue vert sombre, à contours de minéraux altérés visibles. Mêmes passées savonneuses mais dures, massives, argileuses uniquement sur les bordures.

Ce profil peut se résumer ainsi :

0 - 150 cm : sol brun eutrophe tropical ferruginisé constitué à partir de l'altération d'une roche verte à faciès fin et de blocs de cuirasse démantelée.

150 - 300 cm : matériau d'altération à forte proportion d'argiles gonflantes.

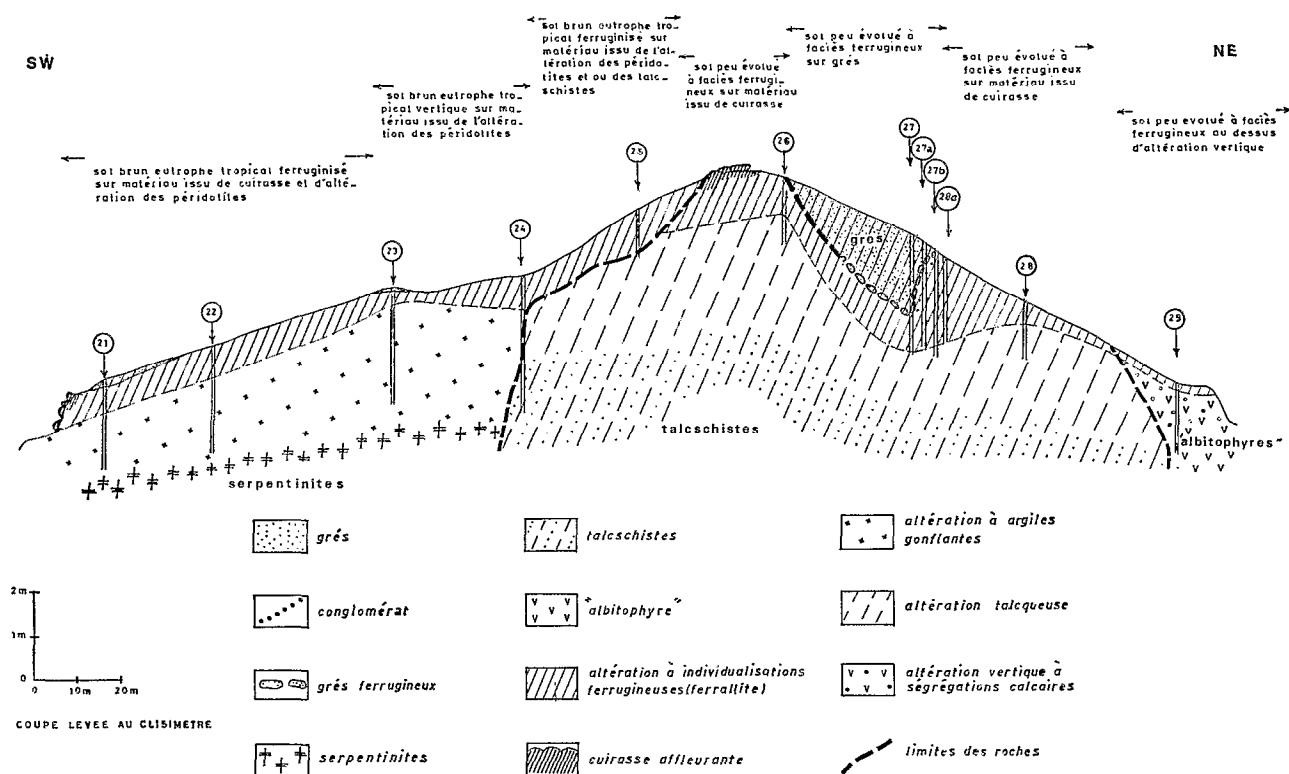


Fig. 3. — Toposéquence de Koussane : coupe schématique descriptive

300 - 600 cm : matériau d'altération constitué d'argiles gonflantes à structure de roche verte reconnaissable.

600 cm : saprolite grossière peu argilifiée de la même roche.

Puits KOU 26 : Situé à 24 m en aval d'un affleurement de cuirasse qui marque la ligne de crête de l'interfluve.

0 - 25 cm : brun rouge (2,5 YR 4/5), graveleux grossier à plus de 75 %. Débris de cuirasse de 0,5 à 2 cm, anguleux et aplatis. Cassés ils sont ocres, safran, violets et présentent une texture finement schisteuse. Débris de quartz rubanné en plaquettes, cariés en surface et de silix de type « meulière ». Terre fine grumeleuse, limono-sableuse à argileuse en assemblage polyédrique moyen, très peu cohérent. Passage sur 10 cm très ondulé à

25 - 70 cm : gros débris de cuirasse ou carapace violet-bleu à matrice ocre-jaune et rouge, se réduisant en surface ou dans la masse à des éléments anguleux aplatis centimétriques. Terre fine identique à l'horizon au-dessus.

70 - 160 cm : succession de bandes horizontales limono-argileuses de couleur ocre, blanc, violet, rouge, à débit en plaquettes anguleuses.

Farineux, tache les doigts. Cohésion moyenne. Langues de l'horizon du dessus pénétrant profondément ce matériau.

160 - 290 cm : mêmes bandes stratifiées finement litées de couleurs moins vives, la couleur dominante étant ocre-blanc (7,5 YR 6/5) finement bariolé. Cohésion plus forte, toucher talqueux, tachant les doigts. Débit identique à plus haut. Quelques bancs de talc massifs, à toucher savonneux, de 4-5 cm de large, obliques.

Résumé interprétatif de ce profil :

0 - 10 cm : sol peu évolué à faciès ferruginisé sur matériau gravillonnaire issu de démantèlement de cuirasse.

70 - 29 cm : matériau d'altération d'un schiste talqueux. L'altération diminue vers le bas.

Puits KOU 27 : Situation en 3/4 sup. de pente de l'interfluve, à 140 m de l'axe de drainage.

0 - 30 cm : horizon humifère gris-rose (5 YR 5/2) graveleux et sablo-argileux. 75 % de débris grossiers de 3-4 cm de grès roses plus ou moins ferruginisés, de grès friables, de quelques quartz et de nodules ferrugineux. Terre fine grumeleuse. Limite distincte ondulée.

- 30 - 50 cm : grès roses lités, lapidifiés, se débitant en parallélépipèdes de 10-20 cm de long, par des diaclases obliques et verticales. Terre fine sablo-argileuse remplissant les tubulures et les diaclases. Cohésion forte de l'ensemble, faible des remplissages. Limite progressive.
- 50 - 190 cm : grès roses lités, consolidés, à stratifications obliques 25-30° NE. Vers la base la pente des strates diminue. Ciment argilo-limoneux. Chaque strate présente un granoclassement : 2-3 cm de grès grossiers à quartz ronds, puis 5-10 cm de quartz arrondis plus fins. Passées biologiques de 10-15 cm \varnothing à bords indurés par les films de fer concentriques. Les joints de stratification sont quelquefois imprégnés de fer. Passage distinct et planaire à
- 190 - 240 cm : niveau sablo-argileux peu cohésif, à sables grossiers ocre et safran à passées violettes, et blanches. Certaines passées sont indurées par des oxydes de fer rouges.
- 240 - 340 cm : grès argileux fins, bariolés, à gros nodules lie de vin ferruginisés. Matrice sablo-argileuse à sables fins alternativement violets, ocre, jaune safran, roses, localement indurée par des oxydes de fer (à 300 cm).
- 340 - 380 cm : grès ferrugineux mauves, durs, en éléments de dalle légèrement arrondis de 5-10 cm de long, surmontant un grès conglomératique brechique lie de vin foncé, à grains de quartz blancs et graviers de quartz émoussés de 0,5 à 2 cm de \varnothing . Ce conglomérat est penté de 10° NE. Contact brutal en discontinuité avec
- 380 - 500 cm : altération argileuse tendre, finement schisteuse, à bandes stratifiées gris, blanc et surtout ocre-blanc (7,5 YR 7/5). Toucher talqueux, tachant les doigts. Le taux d'argile diminue vers 500 cm et la cohésion augmente. La structure de la roche devient alors localement apparente.

Résumé interprétatif de ce profil :

- 0 - 30 cm : sol peu évolué à faciès ferrugineux sur matériau gréseux.
- 30 - 190 cm : grès roses lités et granoclassés à stratifications obliques.
- 190 - 340 cm : grès argileux fins, altérés, à individualisations d'oxydes de fer.
- 340 - 380 cm : grès conglomératiques en discontinuité sur
- 380 - 500 cm : matériau d'altération d'un schiste talqueux dont la structure est apparente à partir de 500 cm.

Profil KOU 29 : En bordure du décrochement du lit majeur de l'axe de drainage.

- 0 - 20 cm : brun sombre à noir (5 YR 3,5/2), graveleux à plus de 75 %. Terre fine limono-argileuse.

Structure grumeleuse moyenne à polyédrique. Éléments grossiers comprenant des débris de cuirasse de structure fine, bariolée de safran, violet, et ocre de 5 cm de \varnothing et moins, aplatis ou émoussés, et des débris de quartz laiteux. Passage graduel à

- 20 - 40 cm : même horizon mais à terre fine rare, débris de cuirasse et concentration de petits quartz formant une sorte de stone-line à contact net et ondulé avec
- 40 - 300 cm : altération vert olive pâle (5 Y 8/4) et ocre (7,5 YR 7/6) à structure feuilletée ponctuée de noir et passées argileuses grises (2,5 Y 6/2) à structure polyédrique fine en assemblage cubique de 2 cm, moyennement cohérent. L'ensemble à une structure prismatique large avec faces lissées obliques et fentes de 2 cm d'ouverture. Les punctuations noires passent souvent à des petits nodules noirs, très ronds, de 0,2 à 0,5 cm de \varnothing , rappelant des plombs de chasse. Filons de quartz de 3-5 cm de large, ondulés, horizontaux. Vers le bas la structure prismatique disparaît et seules les diaclases et la structure feuilletée de l'altération subsistent. Apparaissent alors vers 170 cm, des amas friables blancs faisant effervescence à HCl 1/2, qui localement durcissent et passent à des nodules calcaires. La base a une couleur olive clair, les ocres n'apparaissant que le long des filons de quartz et des diaclases. Celles-ci sont revêtues d'argile savonneuse pistache de 2-3 mm d'épaisseur. Ce profil peut se résumer ainsi :
- 0 - 40 cm : petit sol peu évolué sur matériau gravillonnaire et graveleux complexe.
- 40 - 350 cm : altération en grande partie verticale d'une roche dénommée « albitophyre ».

Descriptions succinctes des puits intermédiaires (fig. 3).

Puits KOU 22 : succession des horizons pédologiques et d'altération identique à celle du puits 21, cependant vers 400 cm apparaît des « boules » de roche verte à structure très fine au sein de la serpentinite plus grossière qui est celle du puits 21.

Puits KOU 23 : mêmes remarques. Les débris ferrugineux de surface sont rares et indiquent la présence d'un grès ferrugineux granoclassé. L'horizon profond du sol (90-140 cm), très argileux, présente des faces de glissement striées : il est vertical.

Puits KOU 24 : même sol brun vertical que précédemment. Entre 250 et 300 cm, les faciès de roche verte à structure fine et plus grossière en « boules », alternent avec des poches de roche claire talqueuse très altérée. La roche claire monte sur la face amont du puits, la roche verte grenue domine sur la face sud. Le puits recoupe donc le contact oblique des deux roches.

Puits KOU 25 : le sol brun eutrophe est ferruginisé : il est riche en nodules et débris ferrugineux et ne possède pas d'horizon vertique profond. Sous 200 cm les « boules » de roche verte peu altérée passent à des bancs d'argiles talqueuses, le contact lithologique est sub-horizontale.

Puits 27a-27b-28a : cette série de puits permet de suivre les variations de niveau des grès, du conglomérat et de la ferrallite des talcschistes sous-jacents. Tous les puits atteignent et reconnaissent ces talcschistes.

La répartition des sols et des altérations.

Les descriptions précédentes des puits et le schéma qu'elles permettent d'établir (fig. 3) indiquent une répartition verticale et latérale des horizons des sols et des altérations le long d'un interfluve, de deux toposéquences, sur quatre types de roches différentes.

Les sols :

Sur serpentinites se développe un seul groupe de sol : le sol brun eutrophe tropical. Ce sont des sols caractérisés par une couleur brun rouge, un profil de type A (B) C, et une structure fine bien développée devenant plus grossière en profondeur (AUBERT 1965-CPCS 1967).

Parmi ces sols bruns eutrophes, deux sous-groupes se distinguent cependant sur le versant :

— sur les pentes de 2 à 4 %, s'individualisent les sols ferruginisés caractérisés par de très nombreux nodules de fer provenant en grande partie des débris d'une cuirasse préexistante démantelée, dont persistent de gros blocs reconnaissables et des débris de grès ferruginisés.

Ces sols sont également en partie issus à moyenne profondeur du matériau d'altération des serpentinites.

— sur les replats (profils 23 et 24) les sols bruns eutrophes deviennent vertiques, c'est-à-dire acquièrent en profondeur, à la suite d'un drainage déficient, un horizon argileux à structure large possédant des fentes de retrait et des faces lissées.

Sur les talcschistes (profils 26-28a-28) et sur les grès (profils 27, 27a, 27b) les sols sont de type peu évolué à faciès ferrugineux. Le sol est peu épais, ne comporte que deux horizons, et est fortement graveleux. L'essentiel des éléments grossiers provient des débris de cuirasse de type « meulière ».

Enfin les « albitophyres » supportent un sol peu évolué de même type que précédemment, mais les éléments du sol sont en grande partie rapportés. La proximité du lit mineur de l'axe de drainage, la discontinuité et l'opposition entre le sol de surface et la nature de l'altération sous-jacente, suggèrent un apport.

En résumé, deux grands groupes de sols recouvrent les versants : les sols bruns eutrophes et les sols peu évolués à faciès ferrugineux. La pédogenèse est donc fortement marquée par la ferruginisation. Ce caractère oblitérant permet tout de même deux différenciations de sols bruns eutrophes au-dessus des serpentinites, selon le modelé.

Les altérations :

Tout le long des deux toposéquences, un manteau d'altération superficielle d'une épaisseur supérieure à celle des sols décrits, peut être distingué morphologiquement. Il s'agit d'une altération moyennement argileuse, à individualisation du fer, à toucher non gras, farineux, sans grande cohésion, qui, avec l'expérience des altérations de ces régions indique des argiles à dominance de kaolinite. Les ségrégations et l'expression des oxydes et hydroxydes de fer croissent vers le haut des profils et atteignent localement le stade nodules puis cuirasse.

Les niveaux cuirassés, fortement démantelés, ne subsistent qu'en deux points, le sommet et l'extrémité aval d'un des versants. Outre les nodules et les cuirasses, le fer s'exprime de manière diffuse dans tous les sommets de profil.

L'association kaolinite et fer exprimé indique une altération de type latéritique ou ferrallitique.

Cette enveloppe d'altération est grossièrement parallèle à la topographie de surface. Son épaisseur est assez constante sur les serpentinites, s'accroît et fluctue sur les talcschistes, est très mince sur les « albitophyres ». Les fluctuations de cette altération sur les talcschistes ont une limite supérieure qui épouse, en un endroit, la limite des grès. L'amincissement au niveau du profil 28 peut de ce fait, s'interpréter comme une troncature de la ferrallite par l'incision de l'axe de drainage.

La répartition des altérations profondes peut être présentée de manière simple comme constituée :

— d'une prééminence centrale à altération fine, talqueuse, provenant des talcschistes ;

— de part et d'autre de cette partie centrale des altérations à argiles gonflantes exprimant du fer sur les serpentinites, du calcaire sur les « albitophyres ».

En résumé, sous une enveloppe continue de type morphologique kaolinique et ferrugineuse recouvrant toutes les formations géologiques, se différencient en profondeur deux altérations argileuses : l'une au milieu, talqueuse ; l'autre de part et d'autre, gonflante.

absorbant sont très élevées sur « albitophyes ». Elles sont du même ordre ou supérieures à celles sur serpentines. Les teneurs en calcium sont exceptionnelles.

Certains caractères sont communs à tous les puits :

— le pH est faiblement acide dans les niveaux supérieurs et devient franchement basique quand les argiles gonflantes sont atteintes ;

— les rapports S/T sont inférieurs à 100 dans les horizons supérieurs. La saturation est atteinte en profondeur (excepté sur talcschistes) ;

— les teneurs en fer sont les plus élevées en sommet de profils.

Les caractères chimiques communs renforcent les observations morphologiques précédentes et mettent en évidence un manteau d'altération latéritique kaolinique désaturé et acide sur des altérations profondes saturées et basiques.

Étude des sédiments.

Nous n'étudierons sous ce terme que les grès et le conglomérat comblant la poche dans les talcschistes.

Structure et stratigraphie : La description du puits 27 fournit la succession suivante de bas en haut que nous répétons :

- jusqu'à 380 cm : matériau d'altération des talcschistes ;
- 380-340 cm : grès conglomératiques ;
- 340-190 cm : grès argileux fins, altérés, à individualisations du fer ;
- 190-0 cm : grès roses lités à stratifications obliques.

La variation et la disparition de ces niveaux dans les puits 27a-27b-28a permettent le schéma de la fig. 3.

La structure est celle d'une gouttière fermée, notamment en ce qui concerne les grès roses de la partie supérieure. En effet, sous 200 cm, les grès fins ne possèdent pas de stratifications, ou celles-ci n'ont pas été conservées.

Les grès roses présentent des stratifications obliques. Chaque feuillet oblique, de 2 à 5 cm d'épaisseur est granoclassé. Les grains sont grossiers (0,3 à 0,4 mm) à la partie supérieure du feuillet, puis fins (0,16 mm) à la base. Ce classement se répète dans chaque feuillet. L'assemblage divergent des faisceaux de feuillets obliques et leur juxtaposition conduisent à une stratification entrecroisée.

Les dimensions de la gouttière sont les suivantes : 200 à 300 m de long, 75 m de large, 3 mètres d'épaisseur. L'orientation des grands axes est S.S.O. (240 gr.).

L'angle d'inclinaison de chaque feuillet avec l'horizontale est de 25 à 30°. Le pendage maximum approche 35°. Le pendage diminue vers la base où il n'est que de 10°. La gouttière est fortement

dissymétrique comme le montre la coupe transversale de la fig. 3.

D'après différents auteurs (Groupe des Études Sédimentaires 1966) les conditions de formation d'une telle structure seraient : dépôts par des courants constructeurs aquatiques ou éoliens dans un matériel détritique terrigène. La forme du relief sur lequel se fait le dépôt conditionne le mode de répartition. ALLEN (1963) classe les stratifications obliques en fonction de leur origine. Ceux du puits 27 seraient des faisceaux isolés de grande taille remplissant des creux en forme de cuiller ou d'auge, probablement liés au remplissage de chenaux ou de fosses.

Étude des sables :

(1) *Granulométrie* : Tous les niveaux de prélèvements du puits 27, dont un prélèvement tous les 25 cm dans les grès roses, ont été soumis à une analyse granulométrique des sables à l'aide de tamis AFNOR à maille de progression géométrique $\sqrt{10}$. A partir des résultats, deux courbes sont dressées : la courbe cumulative en ordonnées arithmétiques et la courbe cumulative en ordonnées de probabilités. La courbe des fréquences réelles est déduite des pentes des tangentes menées à cette dernière. Dans tous les cas, l'échelle des abscisses est en unités α , diamètres logarithmiques des mailles des tamis.

Les courbes des fréquences obtenues représentées sur la fig. 4. Pour éclaircir le schéma, seuls quelques niveaux sont figurés. Des courbes et des calculs des paramètres usuels (coefficient de triage S_o , d'assymétrie A_s , valeurs de la médiane M_d , des quartiles...) on peut tirer les renseignements suivants :

— le matériau est très homogène dans chaque niveau : les courbes des fréquences des échantillons de chaque niveau se superposent et possèdent les mêmes modes : entre 4 et 5 α pour les grès supérieurs, 4 α pour les grès fins, 7 α pour les grès conglomératiques, 7 et 11 α pour les talcschistes altérés. Les valeurs des médianes sont également semblables dans chaque niveau ;

— toutes les courbes des fréquences sont monomodales excepté celle des talcschistes à 480 cm ;

— les grès supérieurs sont très bien classés, les grès suivants et les talcschistes bien classés ;

— les matériaux sont relativement homométriques. En effet, les valeurs de la médiane et du mode sont très proches (tabl. sur fig. 4) ;

— les courbes des grès sont très symétriques celles des niveaux profonds sont assymétriques vers les fins ;

— les deux niveaux de grès supérieurs (0 à 340 cm) ont des caractères communs qui les différencient des matériaux plus profonds.

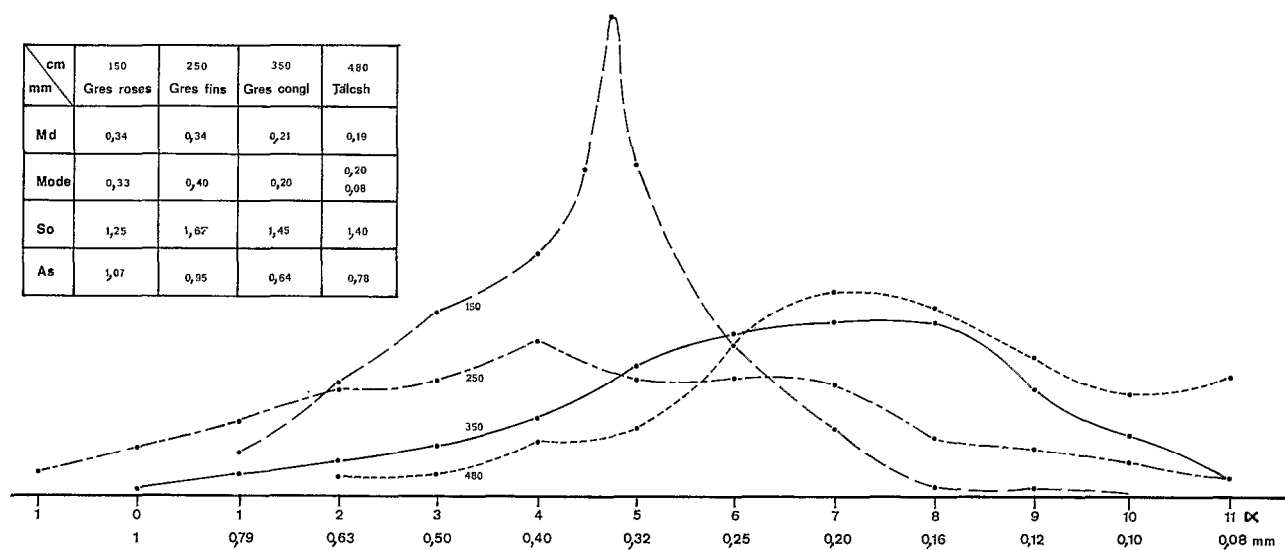


Fig. 4. — Granulométrie des sables : courbes des fréquences (profil 27)

En résumé, les différents niveaux de sédiments présentent des caractères granulométriques qui permettent de les distinguer entre eux, mais possèdent à l'intérieur de chacun d'eux des caractères d'homogénéité. Les sédiments gréseux sont bien triés et le tri augmente vers les niveaux supérieurs en même temps qu'augmente la taille des grains.

(2) *Morphoscopie* : L'examen et le comptage des grains fournissent les résultats suivants :

— grès roses supérieurs (0-190 cm) : dominance de grains arrondis (45 %) et de picoti-luisants (50 % en moyenne) ;

— grès fins argileux (190-340 cm) : dominance de grains coins arrondis et non usés picoti-luisants (60 %) ;

— grès conglomératiques (340-380 cm) : grande majorité de grains non usés mat chimique (70 %) et quelques arrondis luisants ;

— talcschistes altérés (sous 380 cm). 80 % de grains non usés présentant soit un aspect mat chimique (45 %) soit un éclat naturel (55 %). De très nombreux quartz sont bipyramidés.

L'étude des sables permet d'avancer pour les différents sédiments, des origines probables :

— le très bon tri et l'aspect des grains des grès roses indiquent une origine fluviale et une mise en place par l'eau. L'arrondi poussé de certains grains

peut être l'indice de la reprise d'un ancien matériel éolien par l'eau ;

— les grès fins argileux ont des caractères typiques de matériel mis en place par l'eau : bon tri, faible émoussé et aspect picoti-luisant ;

— les grès conglomératiques présentent les caractères d'une arène altérée faiblement reprise par l'eau ;

— les sables des talcschistes sont ceux d'une arène altérée sur place.

Étude des minéraux lourds :

Les minéraux lourds ont été déterminés sur l'ensemble des échantillons du puits 27 de 0 à 500 cm (tabl. II).

Un fond commun de minéraux comprenant tourmaline, zircon et accessoirement anatase, tous minéraux très résistants à l'altération apparaît sur l'ensemble des niveaux excepté le 480 cm.

Les grès roses et argileux fins possèdent en outre des minéraux communs qui sont : disthène, staurotide, rutile, minéraux assez résistants à l'altération. De plus, les grès roses contiennent deux minéraux très facilement altérables : la hornblende et l'épidote.

Les talcschistes altérés sont divisés en trois niveaux : le niveau supérieur comprend uniquement

TABLEAU II
Minéraux lourds du puits 27

Niveaux (cm)	Minéraux lourds		
0 cm } 50 cm } grès roses 100 cm } 150 cm }	Tourmaline Zircon Anatase	Disthène Staurotide Rutile	Hornblende Epidote
200 cm } 250 cm } grès argileux fins 300 cm }	Tourmaline Zircon Anatase	Disthène Rutile	
350 cm grès conglomérat	Tourmaline Zircon	Disthène	
400 cm Talcschistes altérés 480 cm Talcschistes altérés 500 cm Talcschistes altérés	Tourmaline Zircon Tourmaline Zircon-Anatase	 Disthène Rutile	

des minéraux très résistants, le niveau 480 cm ne comprend aucun des minéraux lourds précédents mais une quantité importante de minéraux opaques (4,5 % pondéral contre 0,18 % en moyenne ailleurs).

Enfin, dans le niveau profond (500 cm) les minéraux résistants des niveaux de grès font de nouveau leur apparition.

L'interprétation des faits précédents peut s'envisager logiquement ainsi : l'ensemble des matériaux possède une bonne partie des minéraux hérités des talcschistes.

L'intensité de l'altération est croissante de la surface jusqu'au niveau 480 cm. Les grès roses ont subi une altération peu poussée puisqu'ils contiennent des minéraux très facilement altérables. Les autres grès sont plus altérés.

Recherche des pollens :

La recherche systématique des spectres polléniques sur tous les échantillons n'a rien donné : les grès sont azoïques.

Place des grès dans la stratigraphie :

Dans l'étude du milieu, l'accent a été mis sur le caractère complexe de la géologie et sur l'aspect fragmentaire des connaissances dans le secteur étudié.

Seule la carte à 1/200.000^e du B.R.G.M. de 1963 figure, entre le paléozoïque et le Continental terminal, un conglomérat et des grès dits de Birfal. Ces formations apparaissent sur la carte sous forme de lentilles le long du contact primaire-fini-tertiaire

et les limites paraissent avoir été empruntées à DIENG (1965). En effet, ces formations ne figurent sur aucune des autres cartes à 1/200.000^e voisines, la notice ne les mentionne pas, et la puissance des niveaux et les surfaces d'affleurements sont nettement surestimées. Au moins en ce qui concerne les affleurements situés au S de la route Goudiry-Kidira.

L'étude pétrographique et stratigraphique des grès de Birfal est due à DIENG (1965) qui leur attribue un âge éocène moyen. La succession des formations et les corrélations avec la Mauritanie (travaux d'ÉLOUARD 1959) sont données dans le tableau III ci-dessous :

TABLEAU III
Corrélations stratigraphiques

Âge	Sénégal	Mauritanie
C. t. supérieur	Grès de Goudiry	Grès de Kaédi
C. t. inférieur ou éocène moyen	Grès de Birfal Grès glauconieux	Grès du Gorgol
	Conglomérat	Conglomérat

Les grès de Birfal sont divisés en grès roses inférieurs et grès rouges supérieurs. Leurs caractéristiques granulométriques, morphoscopiques et leur association de minéraux lourds les rapprochent de nos grès roses étudiés précédemment.

Les grès glauconieux reconnus à Birfal, au N de Koussane manquent dans nos puits. Cela pourrait s'expliquer par l'absence de dépôts marins dans cette zone. Les grès fins à individualisations ferrugineuses pourraient également constituer, autre possibilité, le résultat d'une altération poussée qui aurait fait disparaître la glauconie.

DIENG ne signale pas de grès ferrugineux violets en plaquettes surmontant et englobant le conglomérat. Ces grès peu épais (20 à 40 cm) très durs, ont été observés en de nombreux endroits à la limite et sous le Continental terminal. Avec le conglomérat bréchique, ils forment un niveau repère stratigraphique précieux (travaux en cours).

L'âge de ces formations gréseuses azoïques pose des problèmes. Sa détermination daterait le début du Continental terminal, placé au Sénégal au Pliocène par TESSIER (1952), à l'Oligomio-pliocène par ELOUARD (ouvr. cité), et d'âge variable suivant les régions entre les dépôts marins de l'Éocène et la latérite du quaternaire par DIENG (ouvr. cité).

La base du Continental terminal, constituée du conglomérat et des grès de Birfal aurait donc un âge qui varierait selon les auteurs entre 45 et 5 M.A.

Plusieurs particularités des grès des puits 27 et des suivants apportent des éléments intéressants à ce problème.

La lapidification des grès roses supérieurs est réelle sans être excessive, celle du conglomérat est poussée. Les caractères de compacité et de dureté d'une roche sédimentaire détritique sont souvent liés à son âge.

Le degré de lapidification des grès roses, non cuirassés, les distingue des formations sableuses quaternaires meubles du Sénégal (dépôts alluviaux, éoliens, fluviaux) et leur confère un âge plus ancien.

D'autre part la présence de minéraux lourds très facilement altérables indique une faible durée de présence sous climat tropical. Les grès seraient donc soit récents, soit anciens mais exposés à l'altération depuis peu, après érosion et troncature des niveaux supérieurs par exemple.

En résumé, les grès à stratifications obliques, les grès fins, et le conglomérat forment une structure en gouttière. Cette structure, la granulométrie et la morphoscopie des sables indiquent une mise en place par l'eau à partir d'un matériau d'arène altérée.

L'intensité de l'altération croît vers la profondeur. Ces grès azoïques situés stratigraphiquement entre le socle précambrien et paléozoïque et le Continental terminal, peuvent constituer la base de ce dernier.

Les manifestations siliceuses.

Descriptions le long des toposequences :

Un certain nombre d'éléments figurés siliceux ont été observés (voir descriptions des puits) :

— sur les serpentinites, la surface et les sols portent des débris de 4 à 5 cm de long, grossièrement parallélépipédiques, de quartz. Ce quartz peut être carié en surface, l'intérieur étant blanc saumon à éclat gras, ou entièrement carié sous forme de meulière caverneuse, fibreuse, ocre-chocolat et blanc ;

— au contact entre les serpentinites et les talcschistes, d'épais filons constitués de silice, d'opale et de calcédoine, rubanés ou veinés de noir pointent en surface ;

— les puits sur talcschistes montrent également des éléments de type meulière mais de plus grande taille. Dans certains puits (27b-28a) il semble que les filons de talc massifs du bas passent vers le haut à des débris filoniens de quartz de type meulière. Les filons étant subverticaux, les puits ne permettent pas de saisir ce passage sur le même filon, mais il est important de constater que la base des puits sur talcschistes ne montre que des filons de talc massif et le haut uniquement des débris alignés filoniens de quartz à aspect de meulière.

— l'examen des sables à la loupe binoculaire permet de mettre en évidence du puits 26 au puits 28, la présence de quartz bipyramidés hyalins, très bien cristallisés, de taille variant entre 0,1 et 0,5 mm. Ces quartz sont quelquefois réunis à leur base pour former des éléments de géode.

Dans les puits sur grès 27-27a-27b et 28a, le niveau à quartz pyramidés est situé dans les talcschistes altérés, sous les grès conglomératiques, successivement à 480-300-200 et 150 cm.

Ce niveau remonte donc avec le conglomérat et les grès, et ourle la limite inférieure de ceux-ci.

La base des puits 24-25-26-28 sur talcschistes ne possède pas ces cristallisations siliceuses.

On peut donc en déduire que les quartz pyramidés hyalins sont toujours situés :

- (1) dans l'altération supérieure des talcschistes ;
- (2) sous les grès.

Le niveau de concentration maximum des quartz cristallisés se trouve au fond du puits 27 à 480 cm. Or nous avons vu précédemment que ce niveau correspondait à l'altération la plus intense. Les formations gréseuses ne présentent aucune manifestation siliceuse observable à l'œil ou au binoculaire.

Par contre aux niveaux 360 cm du puits 27a et 150 cm au puits 27b, des passées de silicifications

en peigne, à quartz pyramidés engrenés de taille 0,3 cm apparaissent dans l'altération poudreuse violette des talcschistes. La passée silicifiée fait 1 cm d'épaisseur et se suit sur quelques décimètres. L'orientation est subverticale et recoupe la stratification des talcschistes. Les quartz pyramidés sont bordés par des lamelles fines, blanches, écailleuses. Ces lamelles imprègnent les argiles de l'altération située de part et d'autre de la passée. Décollées elles présentent au contact avec la silice cristallisée, une structure oolithique (0,1-0,2 mm de \varnothing) en plaques, et localement, des lentilles vidées à structure de meulière.

Interprétation et hypothèses :

Les faits précédents militent en faveur d'une explication de l'origine des manifestations siliceuses à partir de l'altération météorique.

La disparition des quartz pyramidés vers la base des profils, leur situation sous les grès à un niveau qui suit le front d'altération des talcschistes, la présence de géodes dans les altérites sans rapport avec la structure schisteuse, la parfaite limpidité et cristallinité des quartz au sein de matériaux très altérés, en sont des preuves.

Les faits suivants sont à mettre en relief :

- les filons de talc profonds semblent donner des quartz cariés à la surface ;
- ces quartz, les filons de contact serpentinite-talcschistes, les géodes des altérites se dégradent pour donner des « meulières » ;
- les cristallisations de quartz pyramidés sont des néoformations secondaires.

On sait depuis MAX BAUER (1898), que la latéritisation élimine un certain nombre d'éléments chimiques, dont la silice. Or l'altération qui s'est manifestée sur tous les profils des toposéquences et qui a conduit dans certains cas jusqu'à la différenciation d'une cuirasse au sommet, est une altération latéritique. Les études précédentes et celles des parties suivantes le confirment.

Sur les roches ultrabasiqes, l'altération latéritique fournit dans d'autres régions tropicales, des manifestations siliceuses (ZEISSINK 1969) — (TRESCASES 1974).

Notre interprétation est la suivante : les roches ultrabasiqes contiennent peu d'aluminium (3 à 7 % en moyenne à la base des puits sur serpentinites). Or, l'altération conduit à l'élaboration d'argiles dont le réseau demande une forte quantité d'aluminium.

Deux possibilités peuvent être envisagées :

- l'excès de silice libéré par l'altération latéritique permet la néogénèse de silice en géodes dans des sites privilégiés ;

— l'excès de silice est éliminé des profils. Une altération secondaire des grès libère de la silice qui migre et va se piéger dans des structures favorables, ici dans les talcschistes altérés au fond de la gouttière fermée.

Ce cas est conforme au schéma envisagé par MILLOT et FAUCK (1971).

Dans les deux cas, postérieurement à ces altérations, les géodes et les autres formes siliceuses se dégradent pour donner des « meulières ». Le climat actuel serait donc favorable à une attaque du quartz.

Ainsi, parmi toutes les roches cristallines dont les altérations ont été observées dans ces régions, seules les altérations des roches ultrabasiqes livrent des néogénèses de quartz. Ces néogénèses peuvent être, soit contemporaines d'une altération latéritique ancienne, soit plus récente et due à la pédogénèse des grès de couverture. Le climat actuel serait agressif aux diverses formes du quartz.

Conclusions des études du milieu, des sols, des altérations et des sédiments.

Sur deux toposéquences composant un interfluve constitué de quatre types de roches différentes, sous climat sahélo-soudanien, les sols et les altérations se développent dans un matériau en place et sont spécifiques des roches sous-jacentes.

Les altérations sont de deux types : kaoliniques, désaturées, acides et ferruginisées vers le haut ; montmorillonitiques ou talqueuses, basiques, saturées, calcomagnésiennes en profondeur.

L'altération de surface peut être appelée latéritique. Elle conduit localement à un cuirassement ferrugineux en continuité verticale avec les horizons sous-jacents.

Cette altération supergène qui concentre le fer, évacue la silice dont les néogénèses sont remarquables.

Ces néogénèses se localisent sous des formations gréseuses stratifiées et conglomératiques azoïques en forme de gouttière fermée à altération croissante vers la base qui seraient les grès de Birfal supposés éocènes. Ces grès pourraient être en partie responsables des néogénèses siliceuses.

REMERCIEMENTS :

Nous remercions vivement M^{me} DELAUNE du laboratoire de géologie de l'O.R.S.T.O.M., à Bondy pour ses déterminations de minéraux lourds et M. MEDUS palynologue à la Faculté des Sciences de Marseille, Saint-Jérôme pour ses recherches de spores sur nos échantillons.

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE MINÉRALOGIQUE DES ALTÉRATIONS ET DES SOLS.

Les roches ultrabasiqes ont des compositions minéralogiques et chimiques extrêmes par rapport aux autres roches cristallines ; en particulier le taux de silice est faible, le taux d'aluminium très faible à nul, le taux de magnésium élevé. L'étude de la genèse et de l'évolution des silicates d'alumine argileux sur de telles roches à partir de l'altération météorique est intéressante à plus d'un titre :

— Ces études sont rares dans le domaine climatique tropical à saisons contrastées d'Afrique de l'Ouest : LACROIX (1923), BONIFAS (1959) ;

— Elles sont nombreuses et détaillées sous les climats tropicaux des antipodes : SCHELLMANN (1964) et ESWARAN (1972) en Indonésie, ZEISSINK (1969) en Australie, TRESCASES (1973) en Nouvelle-Calédonie ;

— Les altérations des roches ultrabasiqes sont souvent à l'origine de concentrations présentant un intérêt minier important par exemple : les minerais latéritiques de Fer et de Nickel, SCHELLMANN (1971), TRESCASES (1973) ;

— L'étude de l'évolution minéralogique des argiles sur de telles roches peut s'avérer fructueuse pour la compréhension des phénomènes sur les autres roches cristallines acides ou basiques.

Dans le cas qui nous intéresse, c'est-à-dire le complexe ultra-basique de KOUSSANE, nous avons étudié des péridotites métamorphisées en serpentinites et talcschistes. Mais, nous n'avons aucune donnée sur l'évolution minéralogique au cours du phénomène de « serpentinitisation » décrit par différents auteurs H. JAHNS (1967), RIMSAY (1972). Notre étude porte sur l'altération météorique d'une série transformée antérieurement.

Description et résultats minéralogiques.

Nous avons distingué en se référant à la première partie, quatre grandes unités lithologiques différentes dans cette toposéquence de 12 puits :

- 1° Les serpentinites.
- 2° Les talcschistes.
- 3° Les « albitophyres ».
- 4° Les grès azoïques.

Chaque puits a donné lieu à une étude minéralogique par diffraction des RX sur les fractions

argiles (inférieur à 2 microns) et limons (de 2 à 40 microns). Les argiles ont été saturées en magnésium. Les diagrammes ont été réalisés à Dakar, sur un diffractomètre Rigaku, Geigerflex 2031.

Nous examinerons chaque unité à travers l'évolution d'un seul puits pris comme référence et décrit dans la première partie.

Les serpentinites :

Les puits 21, 22, 23 se situent sur serpentinites, nous étudierons le puits 21, auquel on peut rattacher la cuirasse avale.

(a) *Description de la roche saine en sondage.* La serpentinite fraîche a été recoupée par les sondages miniers. En lame mince on distingue.

KOU 2/73 - 63 m

- Serpentine : — maillage d'antigorite légèrement colorée
 - fibres de chrysotile allongées
 - pâte microcristalline d'antigorite dessinant des fantômes de minéraux fracturés
- minéraux opaques alignés recoupant l'antigorite (chromite et magnétite)
- calcite en grands cristaux

KOU 3/73 - 58,7 m

- Serpentine : — « Bastite » fantôme de pyroxène remplacé par des lamelles d'antigorite alignées selon le clivage 010
 - fibre longue de chrysotile
 - maillage d'antigorite
- Les minéraux opaques sont alignés et certains sont cubiques.

Aux rayons X, les diagrammes montrent le mélange d'antigorite et de chrysotile (fig. 6. KOU 2/73-63) la calcite est présente et on distingue de la maghémite. Les échantillons les moins altérés à la base des puits montrent en outre une grande quantité de talc (fig. 6. KOU 22-680).

(b) Évolution du puits :

Serpentine : Elle disparaît brutalement à 200 cm de profondeur ; le haut du profil n'en présente jamais, mais contient uniquement de la kaolinite et des smectites.

Talc : Il est présent dans tous les niveaux du profil et se trouve encore en trace dans la cuirasse et les niveaux gravillonnaires superficiels. On ne peut distinguer le talc massif en assez gros filons du talc interstitiel.

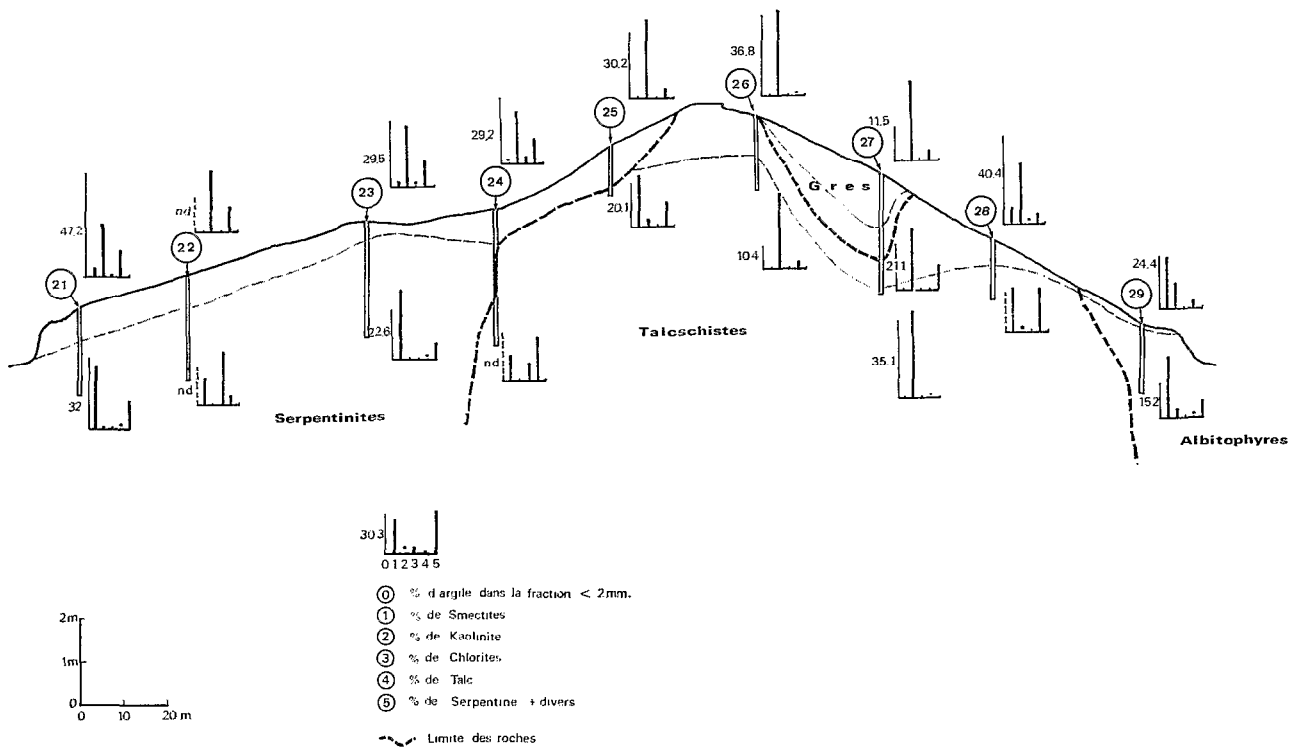


Fig. 5. — Toposéquence de Koussane : répartition des argiles dans les profils. Les teneurs des différents constituants minéraux sont estimées visuellement à partir des diffractogrammes. L'exemple de la légende indique : — 30,3 % d'argile dans la fraction fine — Smectites : 4 ; Kaolinite : tr. ; Chlorites : 1 ; Serpentes : 5.

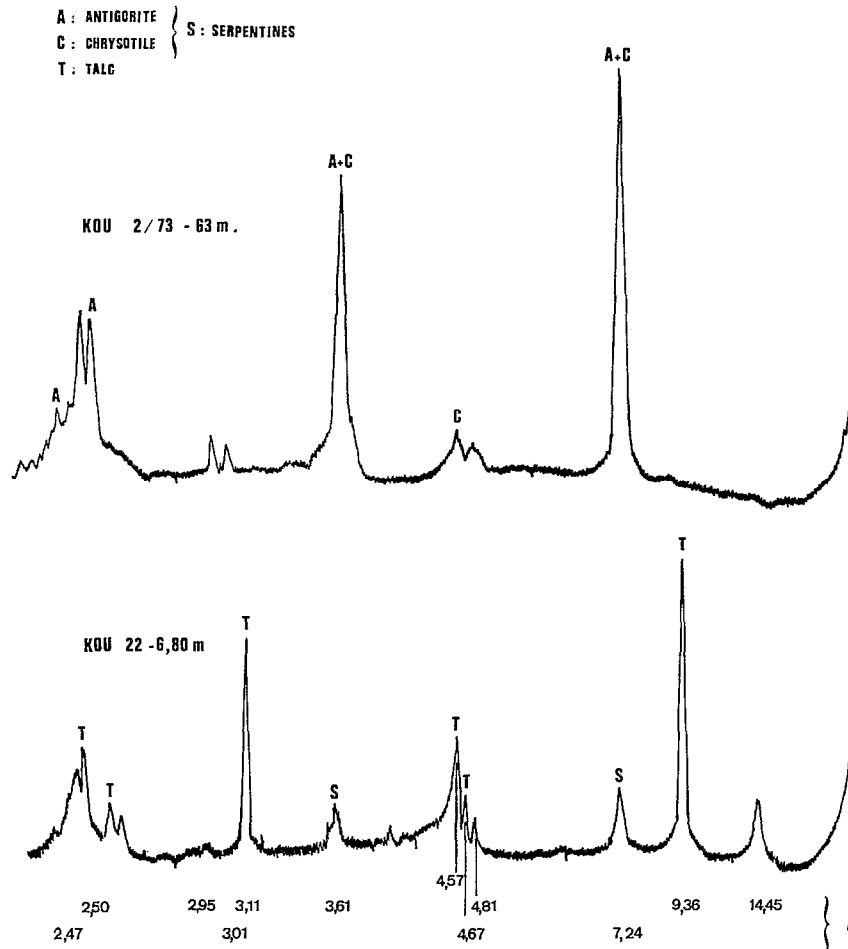


Fig. 6. — Diffractogrammes de serpentinites

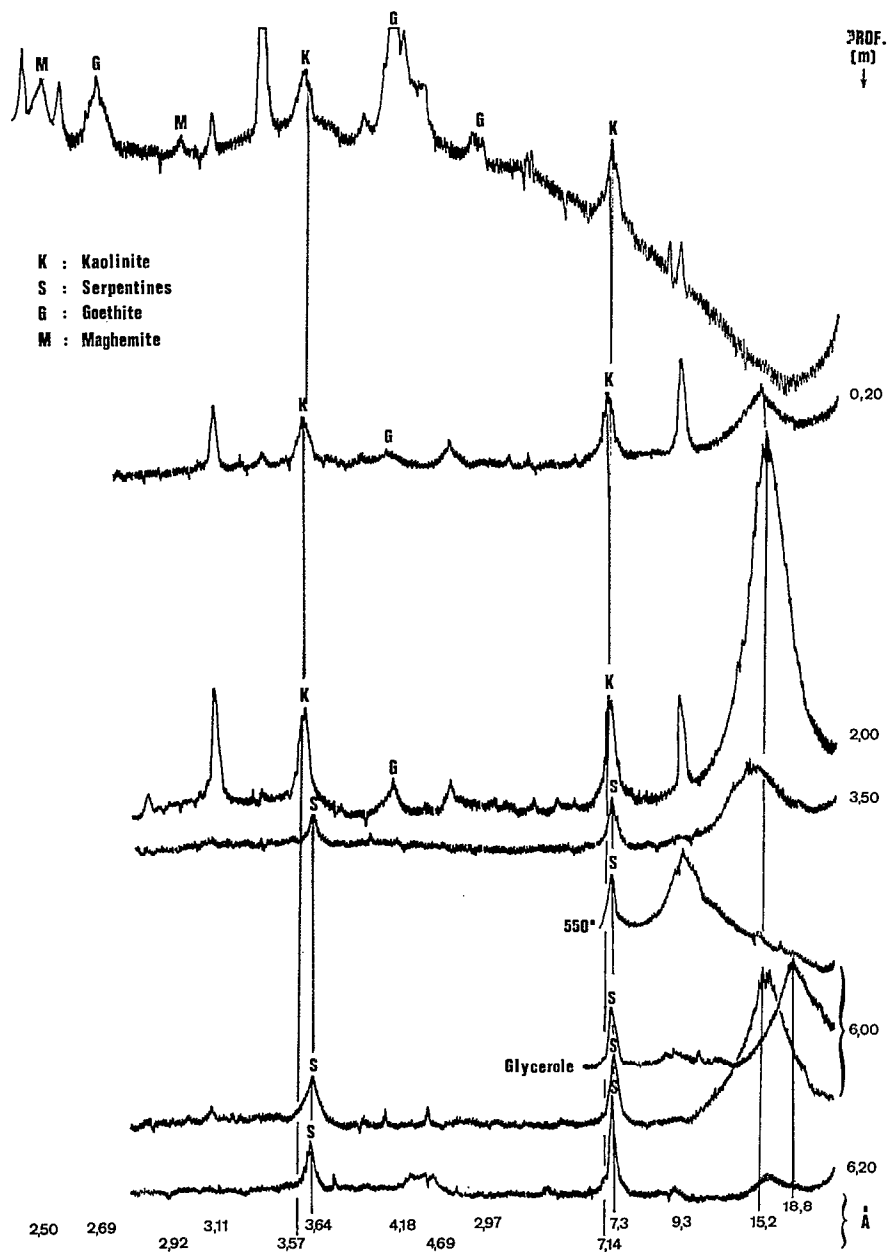


Fig. 7. — Diffractogrammes des argiles du profil 21

Smectites : Très importantes à la base du profil, elles diminuent progressivement et n'existent plus dans les horizons de surface où on ne trouve que la kaolinite.

Oxydes et Hydroxydes de fer : Très abondants dans les niveaux superficiels et la cuirasse. La goethite est le minéral prédominant hématite et maghémite sont moins abondants. A la surface du sol (0 à 20 cm), la goethite semble moins bien cristallisée ou détruite et donne du fer amorphe.

Les puits 22 et 23 présentent les mêmes successions minéralogiques. Dans le puits 22, on doit noter la

présence de chlorite qui correspond aux faciès à grain fin des descriptions morphologiques de la 1^{re} partie. Dans le puits 23, nous notons la disparition de la serpentine vers 200 cm et l'apparition de la kaolinite au-dessus de ce niveau. Des traces de chlorite sont visibles dans les niveaux superficiels.

Les talcschistes :

Ils sont représentés par les puits 24, 25, 26, 28. Nous les étudierons en prenant comme référence le puits 26 et la roche sera celle du puits 24 plus profond.

Puits KOU 24 ; 5,50 m.

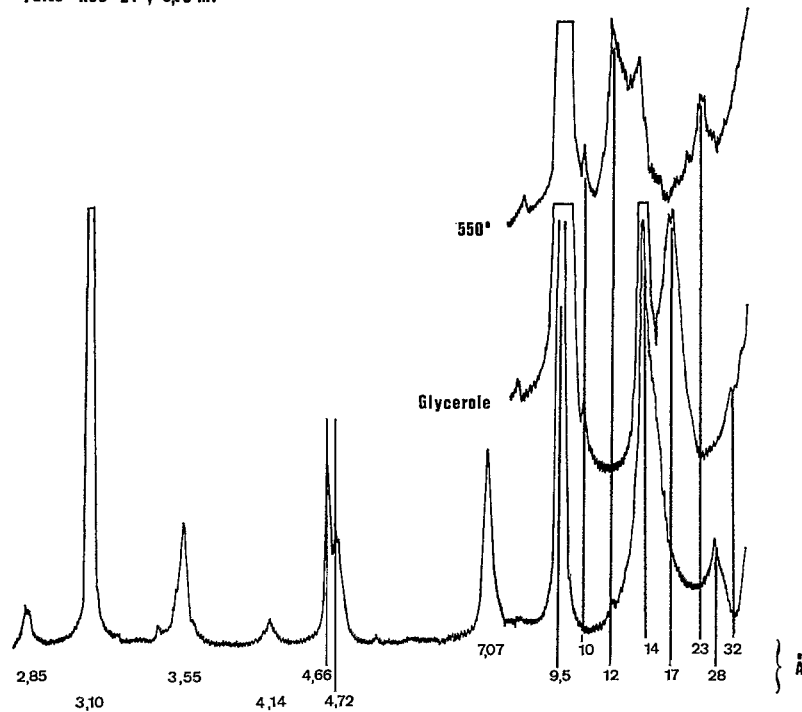


Fig. 8. — Diffractogrammes des interstratifiés 14c - 14m (profil 24)

(a) *La roche*. Il s'agit d'un talcschiste contenant du talc, de la chlorite, des filonnets de quartz et des smectites.

Dans les niveaux profonds on trouve un interstratifié (14c-14m) présentant tous les caractères de la corrensite BROWN (1961), LUCAS (1962), GAILLERES et HENIN (1963).

(b) *Évolution du puits* :

- Talc : comme pour les serpentinites, on le retrouve à tous les niveaux du puits et il existe dans les niveaux superficiels très altérés à l'état de traces.
- Chlorite : on la rencontre dans les niveaux profonds, soit seule, soit avec un interstratifié (14c - 14m). Il en subsiste des traces très haut dans le profil.
- Smectites : elles disparaissent vers 1,50 cm et on ne les trouve pas dans les horizons de surface.

En surface, il ne reste que la kaolinite, le quartz et des traces de talc. C'est dans ces puits sur talcschistes que l'on trouve d'après les diagrammes des niveaux supérieurs, la plus grande abondance de quartz. Ces faits sont à relier à la présence de silicifications secondaires décrites dans la première partie par J.-C. LEPRUN.

Les autres puits sur talcschistes présentent

sensiblement les mêmes constituants minéralogiques. On peut noter dans le puits 24 la présence des smectites et de la chlorite jusqu'en surface. Le puits 25 ne contient pas de chlorite, mais une passade à interstratifiés (14c-14m) entre 150 cm et 200 cm. Le puits 28 présente un seul niveau à interstratifiés (14c-14m) à 200 cm ; ensuite on rencontre de la chlorite jusqu'en surface en trace.

Les « Albitophyres » :

Ils sont représentés par le puits 29.

(a) *La roche*. La roche saine n'a pas été trouvée ; il semble qu'en profondeur dans d'autres puits la schistosité peu marquée disparaisse et que nous passions à une roche massive. On distingue dans cette roche un feldspath qui est l'albite, une chlorite altérée, du quartz et un peu de micas ou illites. Un test au citrate de sodium (TAMURA, 1958) nous permet de dire qu'il s'agit d'une chlorite alumineuse.

(b) *Évolution du puits*. Dans le puits 29, le niveau le plus profond est constitué de smectites et de vermiculites et d'un peu de talc qui est présent dans tout le profil en trace.

Smectites : très importantes en profondeur, elles restent prédominantes dans tout le profil.

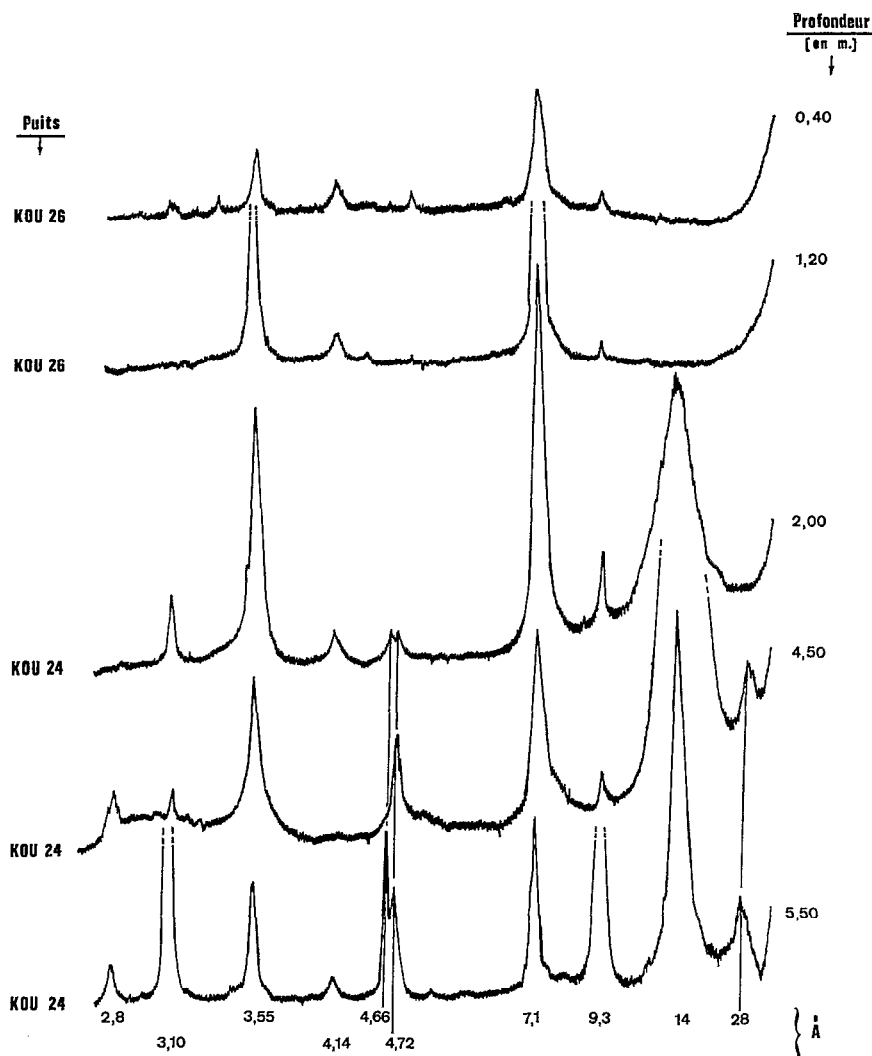


Fig. 9. — Diffractogrammes des argiles des profils 24 et 26

Un test au chlorure de lithium (GREENE-KELLY 1953) effectué sur ces smectites nous permet de dire qu'il s'agit d'un minéral 2/1 de la famille des beidellites, probablement la *nontronite*.

Vermiculite : très importante au fond du puits, elle diminue vers 100 cm de profondeur, au-dessus nous trouvons un interstratifié (14° - 14V) et des smectites.

Kaolinite : elle augmente vers la surface en restant en très faible quantité.

Les quartz et l'illite sont en nette diminution par rapport à la roche de départ. La calcite n'apparaît pas dans le niveau 150 cm du vertisol à nodule calcaire (voir description première partie), mais apparaît en trace vers 100 cm.

Les grès azoïques :

Ils sont représentés par le puits 27 et les puits 28a,

28b, 28c et se situent au-dessus des talcschistes comme une vaste poche de remplissage.

(a) *Le contact grès-talcschistes*. Les talcschistes au fond du puits font apparaître les mêmes caractères minéralogiques que le sommet du puits 26. On trouve la kaolinite, du quartz et des traces de talc. Au-dessus, entre 400 cm et 340 cm, le conglomérat et les grès associés présentent de la kaolinite dominante et des oxydes et hydroxydes de fer ; goethite et hématite. Parfois des traces de talc, mais pas à tous les niveaux. Le quartz est présent en faible quantité dans les fractions argiles.

(b) *Les grès à individualisation d'oxyde de fer*. Dans les grès ferruginisés, entre 340 cm et 190 cm, on retrouve la kaolinite moins abondante, le quartz

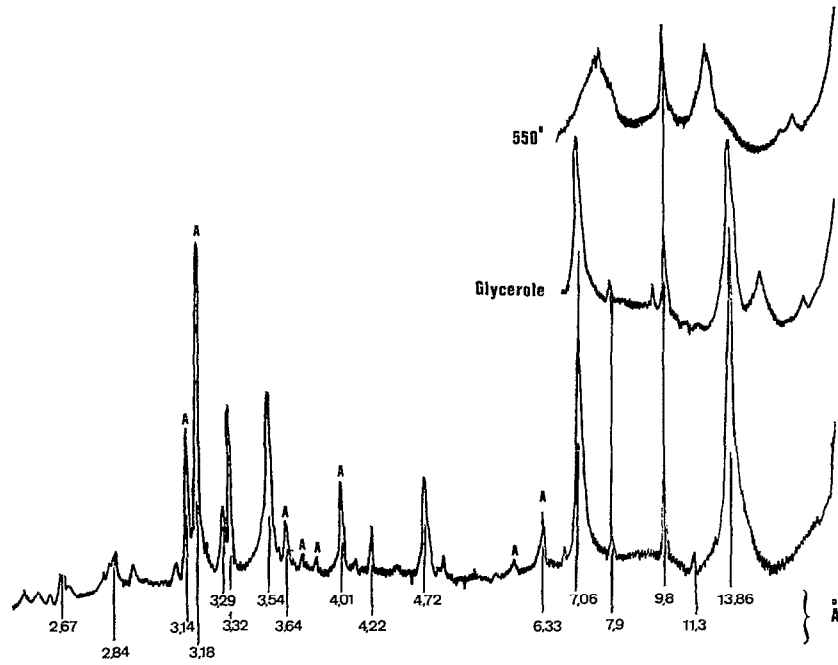


Fig. 10. — Diffractogrammes d'albitophyre

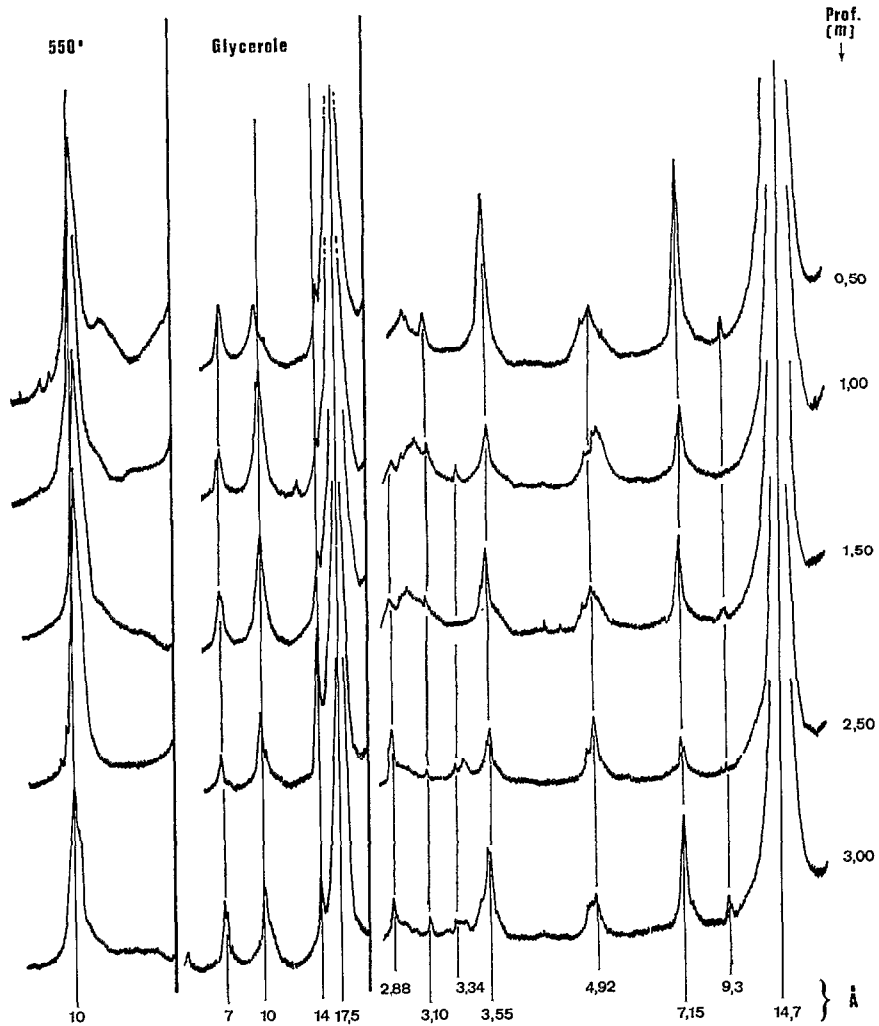


Fig. 11. — Diffractogrammes des argiles du profil 29

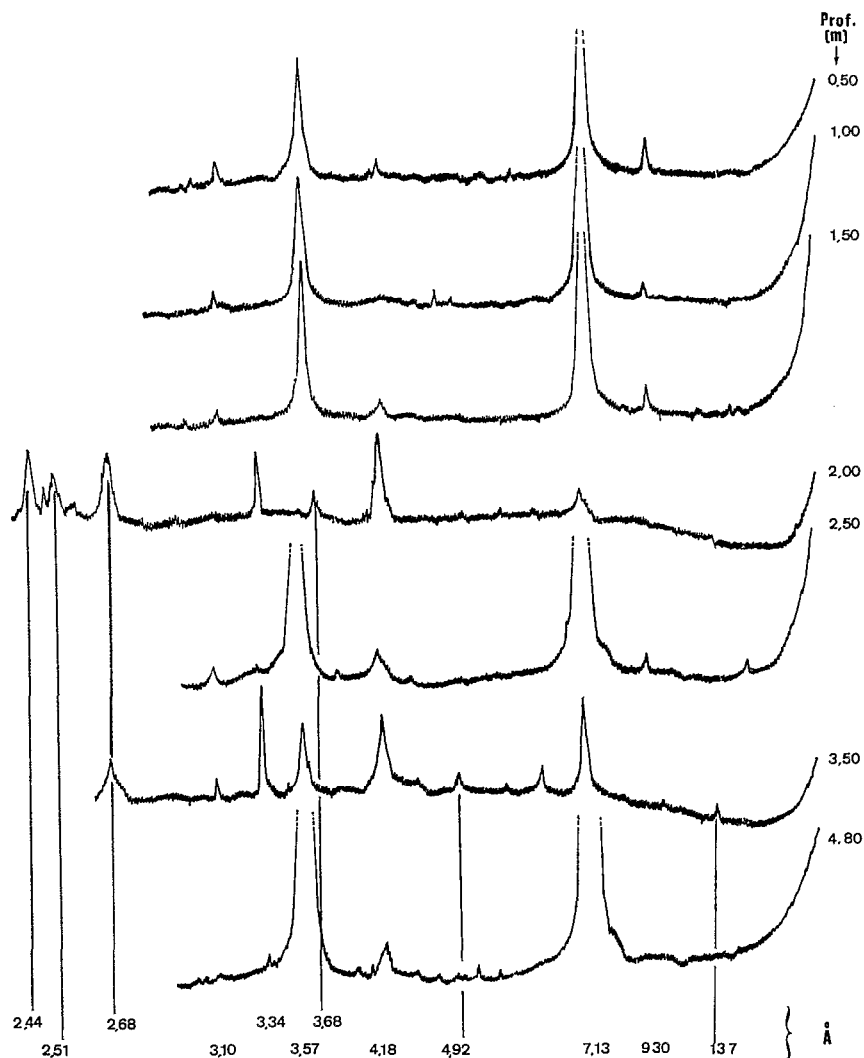


Fig. 12. — Diffractogrammes des argiles du profil 27

et surtout les oxydes et hydroxydes de fer ; goethite et hématite. Quelques traces de talc dans certains niveaux.

(c) *Les grès roses*. Au-dessus de 190 cm on est encore en présence d'un cortège minéralogique très constant : kaolinite dominante et talc à tous les niveaux jusqu'en surface, quartz en petite quantité uniquement dans la fraction limon. Il n'y a pas d'oxydes et hydroxydes de fer dans ces grès roses.

Interprétation des résultats.

La série de Koussane soumise à l'altération météorique développe des caractères particuliers du fait de l'existence de minéraux spécifiques aux roches ultrabasiques : serpentine, talc, chlorite, etc. Certains

de ces minéraux présentent une bonne résistance à l'altération et peuvent donc servir d'indicateurs d'évolution verticale.

— Dans les puits sur serpentine, nous avons une altération à argiles gonflantes en profondeur relayée à partir du niveau 200 cm par une altération à argile kaolinique. La serpentine disparaît totalement à ce niveau. La smectite reste très haut dans le profil, y compris dans le sol brun eutrophe ferruginisé. Le talc est présent jusqu'en surface ainsi que la maghémite (cuirasse proche du puits 21). La chlorite qui existe dans les faciès de serpentine à grain fin résiste mieux à l'altération que la serpentine, on la trouve dans tout le puits 22 et en surface dans le puits 23.

— Dans les puits sur talcschistes, nous voyons

une altération à chlorite, interstratifié 14_C-14_M et smectite en profondeur passant en surface à une altération de type ferrallitique à kaolinite seule et quartz. Les interstratifiés 14_C-14_M disparaissent en premier. C'est un minéral de transition assez fugace entre chlorite et smectite. La smectite et surtout la chlorite peuvent résister et se trouver plus haut dans le profil. Le talc est présent jusqu'en surface ; il résiste très bien à l'altération météorique et persiste même dans les profils ferrallitiques. Le quartz est toujours présent, surtout dans les niveaux superficiels. Le puits 24 semble tronqué et ne possède que les niveaux d'altération profonds sans kaolinite.

— Dans le puits sur « Albitophyres », nous trouvons en profondeur une altération à vermiculite et nontronite qui se maintient, avec un interstratifié $14C-14V$ dans les niveaux d'altérations superficiels. La faible épaisseur des débris ferrugineux en surface, peut-être apportés, et la troncature probable des altérations superficielles par l'incision du marigot proche (voir description 1^{re} partie) expliquent cette omniprésence des smectites.

— Dans le puits 27, nous n'avons pas une différenciation aussi marquée entre la surface et la profondeur. Cependant, toute la partie talcschistes et grès ferruginisés présente les traces d'une altération latéritique importante avec individualisation d'oxydes et hydroxydes de fer. Les grès roses au-dessus semblent postérieurs à cette altération ferrallitique, car ils conservent des minéraux altérables provenant des talcschistes environnants.

Discussions.

La Serpentine :

La disparition de la serpentine à un niveau bien précis des puits 21 et 23 (environ 200 cm) va de pair avec l'apparition de l'argile kaolinique. En effet, la kaolinite ne se trouve pas dans ce niveau et n'apparaît que lorsque la serpentine a totalement disparu. Par contre, les argiles gonflantes sont importantes de part et d'autre de cette limite.

Deux hypothèses peuvent être formulées :

(a) La serpentine s'altère en kaolinite et talc. La smectite qui existe au-dessus de 200 cm proviendrait de l'altération postérieure du talc en argile gonflante.

(b) La serpentine s'altère en montmorillonite et talc. Postérieurement l'argile gonflante serait altérée à son tour pour donner la kaolinite.

Dans le premier cas nous avons une altération ferrallitisante suivie d'une altération génératrice de smectites. Dans le second cas, l'altération ferrallitisante serait postérieure à la formation des argiles gonflantes. Or, le climat soudanien actuel est

générateur de montmorillonite (PAQUET 1970). Nous avons donc un certain nombre de raisons d'opter pour la première hypothèse. La kaolinite sur les serpentinites de Koussane serait donc antérieure aux argiles gonflantes. La limite de son apparition marque la base d'un profil ferrallitique, peut-être ancien. Actuellement, l'altération est génératrice d'argiles gonflantes soit en profondeur à partir des minéraux primaires (serpentine), soit dans l'ancienne ferrallite à partir des minéraux résiduels (talc).

Le talc :

Il est difficile, sinon impossible, dans une simple étude minéralogique de différencier le talc primaire en filons et lentilles qui existe en profondeur dans ce cortège ultrabasique, d'un talc provenant de l'altération météorique des serpentines. Cependant, le fait que le talc semble augmenter à certains niveaux des profils, nous fait penser qu'il peut exister un talc secondaire. D'autre part, les analyses chimiques montrent que le talc massif ne contient pas de nickel ou très peu, alors que le talc des horizons superficiels en contient de 0,3 à 1 %.

Nous n'avons pu mettre en évidence aux Rayons X les garnierites types (antigorite nickelifère et talc nickelifère) (TRESQUES 1973).

Dans les horizons superficiels latéritiques des puits 26 et 27, les gros filons de talc semblent s'altérer en laissant uniquement une trame de silice (description de la première partie). Une partie du quartz de ces niveaux pourrait provenir de la destruction du talc. Dans les horizons à argile gonflante, le talc résiste beaucoup mieux à l'altération, il est responsable des très fortes teneurs en magnésium de tous les sols bruns.

Les smectites :

Nous n'avons pas effectué de détermination précise de toutes les argiles gonflantes de la toposéquence. D'après les quelques tests effectués et analyses chimiques, il semble qu'il s'agit en grande majorité de montmorillonite au sens large, de la famille des beidellites.

— Dans le puits 29, nous avons isolé une argile de la famille des beidellites. La *nontronite*.

— Dans le puits 23, nous avons isolé une smectite différente qui pourrait être la *pimelite* (montmorillonite nickelifère) (BROWN 1961), (FAUST 1966).

La chlorite et les interstratifiés ($14c-14M$) :

La chlorite est assez fréquente dans le cortège ultrabasique de Koussane ; elle se rencontre dans les serpentinites (faciès fin du puits 22) et dans les talcschistes (puits 24 et 25). Son altération donne un interstratifié régulier ($14c-14M$) : la corrensité

Puits KOU 23 - 3,00 m .

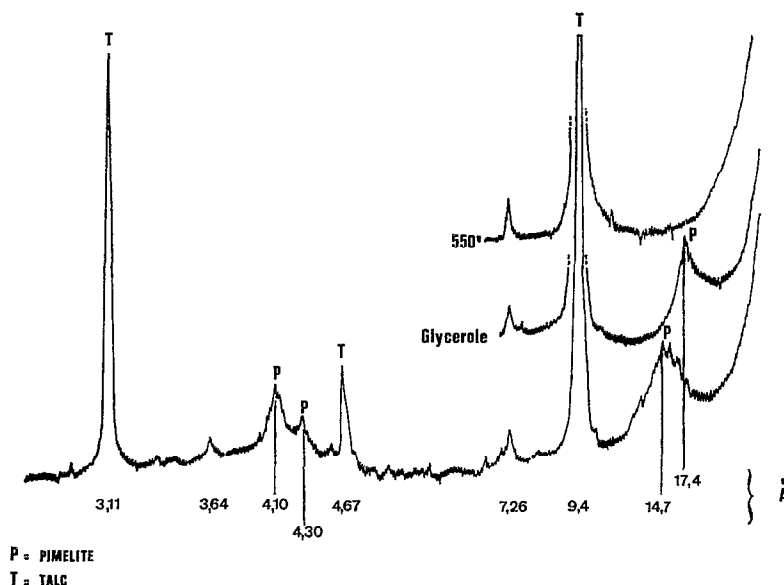


Fig. 13. — Diffractogrammes de pimelite

qui semble être une étape transitoire entre chlorite et smectite. En effet, dans le puits 22 et 28, nous avons de la chlorite et de la smectite sans minéral intermédiaire. Par contre, dans le puits 24 et 25, nous rencontrons un interstratifié 14c-14M entre la chlorite et la smectite. Des traces de chlorite peuvent subsister, non transformées au-dessus de ces interstratifiés dans le profil. Un test à l'hydrazine, (WADA et YAMADA, 1968) permet de dire que cette chlorite des niveaux superficiels peut coexister avec la kaolinite du profil ferrallitique.

Dans tous les profils contenant de la chlorite, nous voyons le pic à 7 Å s'écraser après chauffage à 550° ; il s'agit donc de chlorites altérées, (LUCAS, 1962).

La vermiculite et les interstratifiés (14c-14V) :

La vermiculite est un minéral typique des « albitophyres » du puits 29. Elle provient d'une chlorite alumineuse ou vermiculite alumineuse, (TAMURA, 1958), (TARDY et GAC, 1968), que l'on reconnaît sur le diagramme de la fig. 10. En effet, dans tous les puits des toposéquences de Koussane, les micas ou illites sont très rares sinon inexistantes. Nous en avons trouvé des traces uniquement dans les puits 28, 25 et 29. Il est probable que si il existait des micas dans les roches originelles, ils ont été chloritisés au cours du léger métamorphisme régional ayant repris les séries. Les interstratifiés 14c-14V se trouvent dans les niveaux superficiels du puits 29,

en particulier dans le sol à éléments rapportés qui recouvre le vertisol à nodules calcaires. Ils sont mal cristallisés et peu abondants.

Nous pensons donc qu'il s'agit d'une forme de dégradation de sub-surface de la vermiculite, peut-être avec un apport de chlorite altérée. En effet, deux hypothèses peuvent être formulées :

(a) Les interstratifiés 14c-14V proviennent principalement de la vermiculite sous-jacente ; ce serait dans ce cas des intergrades à dominante de vermiculite alumineuse formés sur place.

(b) Les interstratifiés 14c-14V proviennent de l'altération de chlorites altérées, apportés dans un milieu riche en vermiculite ; ce serait dans ce cas des intergrades à dominante de chlorite alumineuse allochtone.

La qualité des diagrammes et les faibles quantités d'interstratifié ne nous permettent pas de trancher entre les deux hypothèses.

La maghémite, la chromite et les oxydes et hydroxydes de fer :

Nous avons pu classer les séries lithologiques de Koussane en deux grands groupes :

Un groupe qui ne contient que hématite et goéthite et qui comprend les talcschistes, les albitophyres et les grès et un groupe qui contient hématite,

goethite et *maghémite* et qui ne comprend que les serpentinites.

La maghémite ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) spécifique des serpentinites est une forme habituelle de l'altération supergène de la magnetite, (MASON, 1943), (DEER, HOWIE, ZUSSMAN, 1962).

Nous n'avons pas pu déterminer dans les niveaux profonds sur serpentinites de magnetite, ni de chromite après séparation de la fraction magnétique au séparateur Isodynamic Frantz. Nous pouvons donc affirmer que la transformation des spinelles chromifères et de la magnétite est contemporaine du métamorphisme des séries et antérieure à l'altération météorique. Différents auteurs ont déjà décrit de telles transformations : TEX (1955) montre une altération secondaire de chromite en un mélange de maghémite, spinelle chromifère et chlorite amésitique ; MILLER (1953) décrit une altération de chromite en chlorite chromifère et maghémite.

La maghémite pourrait donc avoir deux origines possibles, soit l'oxydation de la magnetite, soit l'altération de la chromite. Les dosages chimiques réalisés sur les extraits très magnétiques nous donnent des valeurs de l'ordre de 0,1 à 0,5 % de chrome, alors que la teneur en chrome du même échantillon brut peut aller de 1 à 1,5 %. Une grande partie du chrome n'est donc pas inclus dans la maghémite, mais peut se trouver dans les autres minéraux en particulier les silicates.

La goethite et l'hématite sont les constituants habituels des cuirasses et des concrétions ferrugineuses des niveaux superficiels à individualisations de fer. Ils sont bien représentés dans les grès ferruginisés, mais aussi sur serpentinite. La maghémite $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ passe facilement mais lentement à l'hématite $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ sous l'action de l'altération (MASON 1943).

Les constituants amorphes :

Les horizons de surface (0 à 50 cm) des sols sur matériel ferrugineux présentent des diffractogrammes de mauvaises qualités indiquant la présence de matière amorphe. La présence d'un bombement autour de 4,18 Å et d'un fond continu très important, ainsi que les teneurs élevées de Fer total de ces horizons (puits 21 = 36,0 %, puits 26 = 51,0 %) indique que la goethite se détruit pour donner du fer amorphe ou tout au moins mal cristallisé.

Il est à noter que la présence de matière organique peut interférer avec le fer amorphe pour donner un fond continu très important sur les diagrammes. De même les minéraux des niveaux supérieurs ferrallitiques : kaolinite, talc, quartz, présentent des signes de mauvaises cristallinités. Les pics s'aplatissent, s'étalent ; il se forme des bandes larges de

diffraction, indiquant une destruction des réseaux cristallins.

Comparaison des évolutions minéralogiques.

Le tableau IV, qui résume les résultats obtenus par différents auteurs dans des conditions géographiques, climatiques et pétrographiques différentes, nous permet de montrer l'originalité de l'évolution minéralogique à Koussane.

— Dans les niveaux profonds d'altération, tous les auteurs observent la formation de *smectites*, excepté en Guinée et sur les plateaux de Nouvelle-Calédonie. Cependant en Guinée dans la zone de départ de l'altération, la montmorillonite se forme, mais elle est fugace et se détruirait rapidement pour donner la gibbsite (BONIFAS, 1959) ; sur les plateaux de Nouvelle-Calédonie, il se forme des amorphes et de la goethite. Ces deux exemples concernent des profils très épais sous des climats très pluvieux. L'hydrolyse et le lessivage sont tellement intenses qu'ils interdiraient la genèse des smectites ou la rendrait éphémère. Dans ces niveaux profonds, la formation de talc est courante ainsi que la genèse de quartz ou opale. La goethite commence à s'individualiser.

— Dans les niveaux superficiels le minéral prépondérant est la goethite avec formation de cuirasse ou non. L'argile associé est dans certains cas la gibbsite, dans d'autres cas la kaolinite. A Koussane avec des teneurs en Al_2O_3 de 4 % au départ et une pluviométrie faible, nous n'observons que la kaolinite. Par contre en Guinée, avec des teneurs en Al_2O_3 plus faible (1,60 %) n'apparaît que la gibbsite ; en Indonésie on observe la gibbsite et un peu de kaolinite, ESWARAN (1972) explique la formation de cette kaolinite par une résilicification de la gibbsite, la source de silice étant la décomposition de la matière organique. Ces deux exemples sont situés sous des climats beaucoup plus humides que les nôtres. En Nouvelle-Calédonie et en Australie, il n'y a aucune genèse de minéraux argileux dans les niveaux superficiels d'altération, uniquement la goethite et des minéraux résiduels. Il est vrai que les teneurs en Al_2O_3 de la roche de départ sont très faibles (1 % ou moins). ZEISSINK (1969) pense que tout l'aluminium est retenu dans le réseau de la goethite.

— Dans ces niveaux superficiels, certains minéraux résistent bien à l'altération. Le talc et la chlorite (Sénégal, Australie), la maghémite (Sénégal, Guinée), la chromite (Nouvelle-Calédonie).

— Dans toutes ces études, nous voyons que des accidents siliceux se manifestent. Les néogénèses de silice, pratiquement inconnues sur les autres roches

TABLEAU IV

Comparaison des évolutions minéralogiques sur roches ultrabasiques

	Sénégal	Guinée BONIFAS (1959)	Nouvelle- Calédonie Plateaux TRESCASES 1973)	Nouvelle- Calédonie Versant TRESCASES (1973)	Australie ZEISSINK (1969)	Indonésie ESWARAN (1972)
Pluviométrie.....	850 mm	4000 mm	1700 mm (1000 à 4000)	1700 mm		
Climat.....	Sahélo- Soudanien	Guinéen	Sud- Méditerranéen	Sud- Méditerranéen	Tropical	Tropical Humide
Profondeur.....	8 m	80 m	25 m	1 m		7 m
Roche.....	Serpentinite	Dunite	Peridotite Harzburgite	Harzburgite	Serpentinite	Serpentinite
Minéraux Profondeur	<i>Smectites</i> Talc Maghémite	<i>Gibbsite</i> montmorillonite (Trace)	<i>Amorphes</i> Goethite Talc-opale	<i>Smectites</i> Talc-opale Quartz	<i>Smectites</i> Quartz	<i>Smectites</i> Amorphes Goethite
Minéraux Surface	<i>Kaolinite</i> <i>Goethite</i> Talc Maghémite	<i>Gibbsite</i> <i>Goethite</i> Hematite Maghémite	<i>Goethite</i> Chromite asbolane	<i>Goethite</i> Chromite	<i>Goethite</i> Talc chlorite	<i>Goethite</i> Gibbsite Kaolinite
Cuirasse.....	Oui éventuelle	Oui très épaisse	Oui éventuelle	Non	Oui	Non
Accidents Siliceux	Oui quartz-Meuilière	Oui Calcedonite	Oui quartz-opale	Oui quartz-opale	Oui Calcedoine	Oui Silice amorphe
SiO ₂	39,4	33,9	39,3	39,8	43,5	
Al ₂ O ₃	4,09	1,60	0,80	0,38	1,15	
Fe ₂ O ₃	26,5	8,5	4,8	8,0	8,5	
MgO.....	8,40	36,7	38,9	43,7	28,3	

crystallines, sont donc spécifiques de l'altération des roches ultrabasiques.

Conclusions.

— Les toposéquences de Koussane mettent en œuvre deux altérations différentes. Une altération à argiles gonflantes (montmorillonites, vermiculites, interstratifiés) dans les niveaux profonds; une altération à argile kaolinique dans les niveaux superficiels. En bas de pente et en général dans toutes les zones où il reste des minéraux altérables, nous voyons se développer une altération à argile gonflante qui est la forme actuelle de l'altération sous climat tropical soudanien. Les profils à kaolinite sont des profils hérités d'une ancienne période climatique plus humide et plus lessivante.

— Chacune des unités lithologiques évolue pour son propre compte sous les conditions de l'altération météorique et présente un exemple de lithodépendance par rapport au substratum. Certains minéraux

spécifiques servent d'indicateurs de l'évolution verticale : maghémite et serpentine des serpentinites, talc des talcschistes, vermiculite des albitophyres.

— Les différents minéraux du cortège ultrabasique de Koussane s'altèrent plus ou moins rapidement. La serpentine disparaît en premier, puis la chlorite, le talc résiste très bien à l'altération ainsi que la maghémite. Les minéraux de néogénèse formés sont la goethite et la kaolinite en surface et les smectites en profondeur.

L'originalité de Koussane par rapport à d'autres études réside dans la présence de cette kaolinite dans la partie supérieure des profils cuirassés ou non, la plupart des auteurs trouvant la gibbsite dans cette position ou la goethite. L'explication de ce phénomène peut-être purement climatique; il y aurait insuffisance de l'évacuation de la silice à Koussane ce qui permet la néogénèse de la kaolinite avec l'aluminium résiduel. Dans les autres études en climat plus humide, nous irions jusqu'au terme ultime du lessivage, l'aluminium reste seul (gibbsite) ou associé au fer (goethite).

TROISIÈME PARTIE

ÉTUDE DES ANOMALIES GÉOCHIMIQUES EN CU ET NI
RELATIONS AVEC L'ALTÉRATION SUPERGÈNE.*La place de l'indice de Koussane dans les recherches minières régionales.*

Les recherches minières par méthode géochimique ont pris une grande importance depuis une quinzaine d'années au Sénégal Oriental. Le petit gisement de Gabou, essentiellement cuprifère est un succès du point de vue de l'utilisation de la prospection géochimique sur prise de sol. L'extension régionale de cette méthode de recherche appliquée au cuivre a permis de mettre en évidence quelques anomalies statistiques significatives, dont Koussane (AGASSIZ 1969, PETKOVIC 1969). Pour PETKOVIC (1971), ces différents indices et gisements sont les témoins de l'existence d'une province géochimique cuprifère s'étendant à l'ouest du craton africain selon la chaîne des Mauritanides définie par SOUGY (1969).

Sur la base de la connaissance de Gabou, AGASSIZ et PETKOVIC ont fait porter la prospection régionale sur les éléments Cu, Zn et Cr indicateurs d'une minéralisation cuprifère liée géographiquement à des serpentinites plus ou moins chromifères. PETKOVIC (1971) interprète Gabou comme une minéralisation enrichie secondairement par des phénomènes d'origine profonde (hydrothermalisme) à partir d'un gisement pyriteux stratiforme très pauvre en cuivre.

Les anomalies géochimiques caractérisant Koussane concernent, comme à Gabou, les trois éléments prospectés. La pétrographie y est tout à fait comparable avec un corps siliceux (jaspilite) encaissé dans une formation schisteuse à chlorite, albite et quartz. L'ensemble de ces formations est redressé.

La cartographie réalisée par DEHANDSCHUTER (1973) a montré la grande complexité de la structure géologique de la zone de Koussane, dont on a une vue partielle dans le secteur restreint des puits. Cet auteur a mis en évidence des unités de charriage et une tectonique cassante.

Les puits étudiés en détail dans les deux premières parties de ce travail avaient pour objectif de préciser

la nature des anomalies cuprifères de la prospection géochimique.

Ils ont surtout permis de montrer une altération très poussée des serpentinites avec une minéralisation silicatée de nickel et l'altération des « schistes » encaissants.

Avec les résultats obtenus sur les sondages de reconnaissance, les analyses effectuées* sur les échantillons des puits autorisent à proposer une interprétation des prospections géochimiques pour le cuivre. Pour le nickel, l'analyse est effectuée à l'échelle des puits et l'interprétation à l'échelle locale ou régionale est faite avec le chrome dont le comportement est voisin.

Cette étude sera comparée aux recherches sur les minéralisations nickelifères supergènes effectuées précédemment dans la région par GRAVESTELJN (1962), sur des corps ultrabasiques de la série birrimienne de Mako à environ 150 km au sud de Koussane.

Définition géochimique des unités lithologiques.

C'est à partir des sondages destinés à trouver un gisement éventuel de cuivre que sont définies les caractéristiques en éléments utiles des roches. Ces sondages ont été implantés à différents stades des recherches, d'après les anomalies géochimiques cuprifères (fig. 14).

Les « albitophyes » :

	clarke régional	anomalie lithologique
cuivre	65 ppm	76 ppm
zinc	132 ppm	150 ppm

Deux sondages préalables aux prospections détaillées ont reconnu l'encaissant du complexe ultrabasique à l'Ouest et à l'Est de la zone des puits. Mal implantés pour préciser les anomalies cuprifères, leur stérilité permet de bien caractériser la formation (MEZENCEV *et al.* 1964).

Le clarke représente ici la valeur médiane de la population et l'anomalie lithologique est définie par l'écart type (LEPELTIER, 1969 ; MIKHAILOFF, 1973).

* Les analyses ont été effectuées au laboratoire de la Direction des mines du Sénégal sous la direction de M. CUPER pour le PNUD et pour nos recherches grâce à l'obligeance de M. DELAFOSSE, Directeur du BRGM à Dakar.

Le resserrement des caractéristiques Cu et Zn de la formation est assez remarquable et toute anomalie vraie se marquera nettement, quelle que soit la méthode de calcul utilisée ($M+2\sigma^-$ ou $M+3\sigma^-$).

Les serpentinites :

Trois sondages ont reconnu les serpentinites dans l'exploration des anomalies « cuivre » ; ils ont été de plus analysés pour le nickel à la suite de nos travaux.

	clarke régional	anomalie lithologique
cuivre	37 ppm	160 ppm
nickel	1900 ppm	2200 ppm

Les caractéristiques en nickel sont très resserrées, définissant la formation ultrabasique. Le cuivre est beaucoup plus étalé avec un fond assez élevé pour ce genre de roche.

Les autres formations :

Les autres formations n'ont pas été analysées systématiquement en dehors des puits où les talcschistes montrent par exemple des teneurs tantôt proches de celles des serpentinites, tantôt voisines de celles des « albitophyres ».

Les silicifications syngénétiques auxquelles on rattache le plus volontiers la minéralisation cuprifère (DEHANDSCHUTTER 1973, MIKHAILOFF 1973) n'ont pas été échantillonnées : elles contiennent des fantômes de sulfures et il existe une certaine concordance entre les anomalies superficielles et les bancs siliceux (jaspilites).

Comparaison des deux unités lithologiques principales rencontrées dans les puits :

Afin de faciliter la comparaison de données fragmentaires, nous donnons ici les caractéristiques moyennes le plus souvent attribuées aux schistes et aux ultrabasites (tableau ci-dessous).

Il faut souligner ici l'ampleur du contraste entre les deux formations pour les éléments Ni, Co et Cr.

Roche	Élément				
	Cu	Zn	Ni	Co	Cr
UB.....	10 (35)	50	2000 (1900)	150	2000
Schistes.....	50 (65)	100 (130)	70	30	100

D'après TAYLOR (in LEVINSON). Les chiffres entre parenthèse représentent les caractéristiques spécifiques des formations de Koussane.

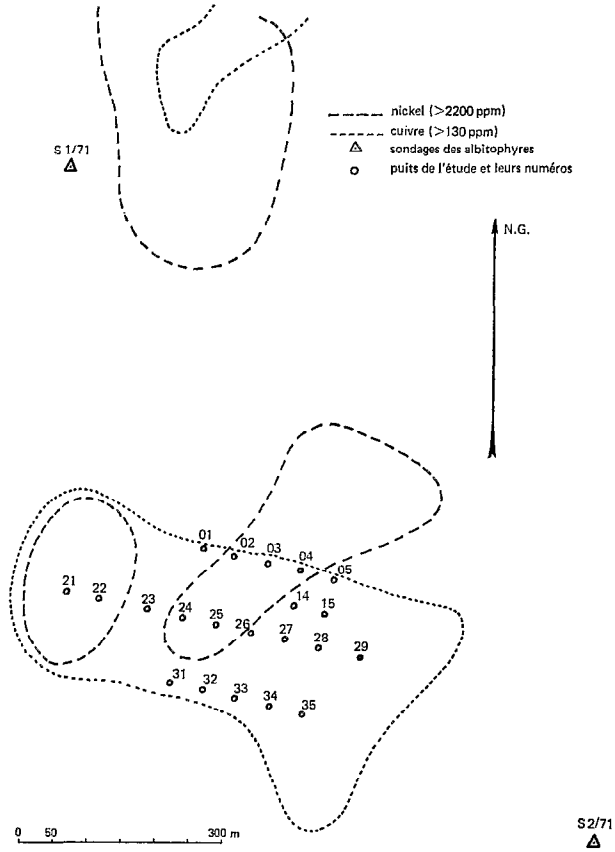


Fig. 14. — Plan des travaux miniers par rapport à l'anomalie géochimique

L'évolution supergène des éléments.

Les résultats des prospections géochimiques :

La prospection effectuée sur prise de sol à 30 cm de profondeur intègre tous les phénomènes superficiels : altérations, pédogénèses, remaniements... La lithologie en est donc une des composantes, dont l'influence peut être appréciée dans la prospection par l'importance des surfaces d'un faciès par rapport à la zone prospectée.

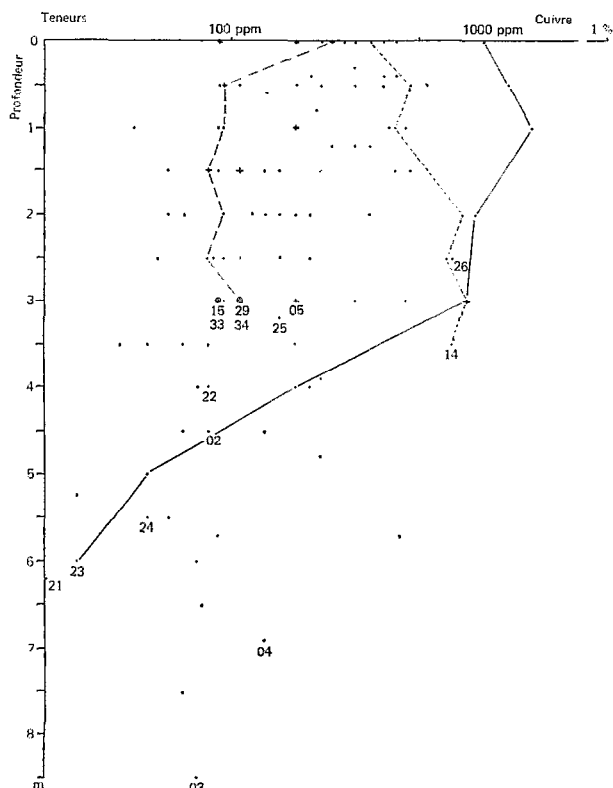


Fig. 15. — Teneurs en cuivre des profils

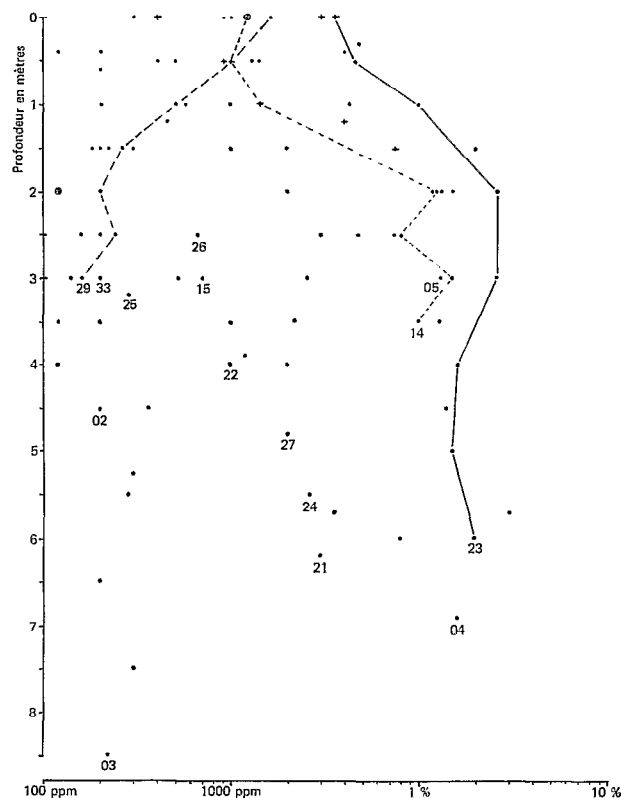


Fig. 16. — Teneurs en nickel des profils

A l'échelle 1/200 000^e (maille 200 × 500), le facteur lithologique dominant est l'importance prise par les sols issus de la série de la Falémé, pélitique, particulièrement pauvre en éléments traces. AGASSIZ (1970) estime le clarke régional dans ce genre de prospections à 10-15 ppm pour le cuivre, 15-20 ppm pour le zinc et 15-25 ppm pour le chrome ; dans ces conditions les anomalies cuprifères sont de l'ordre de 60-80 ppm.

Pour le secteur Gabou, à l'échelle 1/50 000^e (maille 400 × 200), le fond est de 28 ppm de cuivre et l'anomalie lithologique de 82 ppm (PETKOVIC 1969). La lithologie est ici plus dominée par les schistes chloriteux ou sériciteux.

Dans le secteur de Koussane, la maille est plus serrée (200 × 100) et les caractéristiques ressemblent à celles de Gabou. MIKHAILOFF (1973) en utilisant la méthode graphique de LEPELTIER donne les caractéristiques suivantes :

	Clarke	anomalie lithologique	anomalie vraie
Cu	22	55	130
Zn	47	95	180
Ni	75	500	2200
Cr	100	500	3200

Des comparaisons pourraient être tentées avec les teneurs des roches, car les contrastes sont très importants ; mais les horizons supérieurs des puits s'y prêtent mieux du fait que les matériaux sont plus voisins des échantillons de prospection géochimique.

• *L'échantillonnage des puits :*

Les 21 puits, creusés au cours des recherches minières sur le cuivre (fig. 14), dans un secteur très anormal en cuivre et nickel, montrent les altérations et les sols décrits précédemment sur la ligne de puits principale.

Quelques-uns de ces puits ont été analysés pour Cu et Ni au cours des recherches minières et après approfondissement pour Cu, Ni, Co lors de notre étude.

Les résultats de ces analyses sont reportés sur les figures 15, 16 et 17 en indiquant la profondeur de l'échantillonnage. Afin d'illustrer le comportement des altérations spécifiques des roches, deux profils sur chaque unité sont précisées : altération de serpentinites des puits 23 et 14, altération des albitophyres des puits 03 et 29.

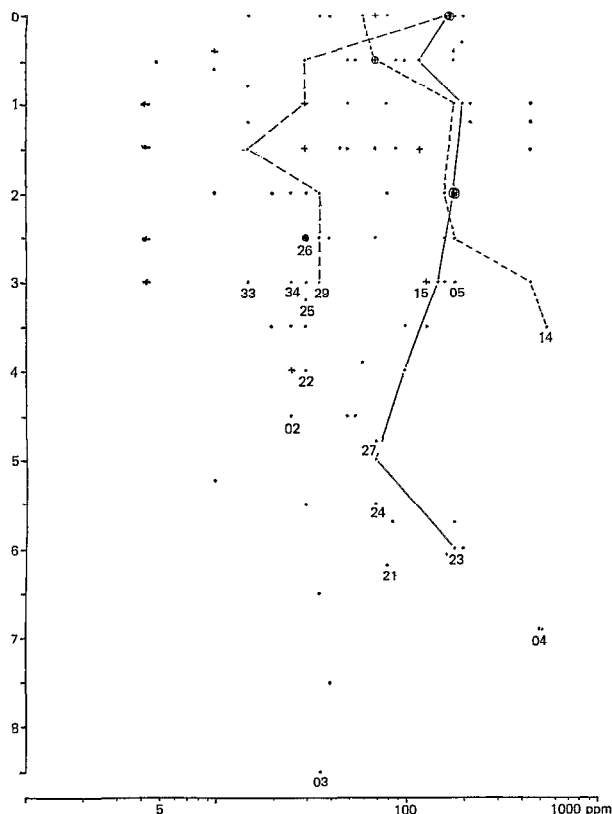


Fig. 17. — Teneurs en cobalt des profils

Le cuivre présente incontestablement un enrichissement superficiel par rapport aux définitions lithologiques. C'est d'abord une anomalie vraie qui affecte essentiellement la zone des altérations superficielles des serpentinites. En dehors de cette « minéralisation », il reste cependant un enrichissement supergène net qui atteint les définitions anomales de la prospection (puits 34, 33, 25, 22, 21, 15). L'anomalie vraie des altérations sur serpentinites se ferme verticalement (puits 23) et latéralement, elle semble donc lenticulaire.

Par rapport aux données de la prospection, les teneurs en nickel sont très anomales sur toute la puissance des profils d'ultrabasites. Elles restent très anomales à partir des définitions de la roche atteignant un enrichissement de 5 à 15 fois le clarke donnant un véritable minéral économique dans les niveaux d'altération*. Sur les « albitophyes », l'enrichissement superficiel atteint plus difficilement une telle ampleur et ne se traduit jamais par un minéral. L'anomalie vraie de la prospection (> 2200 ppm)

se superpose à l'ensemble des horizons d'altération et des sols sur roche ultrabasique.

Le comportement un peu particulier des niveaux supérieurs des puits (les sols) mérite qu'on s'y attarde à la lumière d'une esquisse topographique du secteur. *Grosso modo* les roches ultrabasiques sont en relief positif sur les albitophyes formant une espèce de dôme et on constate un tassement de surface des teneurs en Cu et Ni sur les serpentinites en même temps qu'un gain d'enrichissement dans l'encaissant. Le rôle de la topographie est sensible à défaut de précision sur le mécanisme : transfert physique ou chimique.

Les corrélations entre éléments :

La prospection géochimique a permis de montrer une corrélation significative entre le cuivre et le zinc, caractérisant probablement la paragenèse chalcopyrite-blende recherchée, par analogie avec les travaux antérieurs de Gabou. Avec l'étude des puits et les interprétations au niveau de la prospection, la paragenèse caractéristique des roches ultrabasiques se compose du nickel, du chrome et du cobalt, éléments corrélés entre eux, permettant une comparaison entre les différentes échelles de la prospection.

Les relations entre ces deux associations sont complexes la prospection ayant montré, soit une superposition, soit une juxtaposition, soit une indépendance des anomalies représentatives des deux groupes. La figure 18 illustre les corrélations entre le cuivre et le nickel dans les puits et nous y avons représenté les points analysés d'après la nature des matériaux. Les deux constellations, celle des schistes albitiques et celle des roches ultrabasiques se distinguent nettement des caractéristiques initiales des formations sans corrélations significatives entre les éléments.

La bonne corrélation positive entre le cuivre et le nickel pour les niveaux superficiels (profondeur de prélèvement ≤ 1 m), quel que soit le substratum, implique une continuité dans les teneurs entre les deux formations principales. Et, alors que les anomalies en nickel sont strictement dépendantes d'un substrat ultrabasique, les valeurs anomales en cuivre s'étendent en plus sur les albitophyes.

Exotisme et autochtonie des éléments :

La corrélation tout à fait superficielle entre le nickel et le cuivre ne peut se comprendre ici qu'en admettant une certaine mobilité de surface de ces éléments à l'échelle de l'étude des puits, avec un

* Pour MIKHAILOFF, le clarke = médiane, l'anomalie lithologique est définie par un écart type et l'anomalie vraie par deux écarts type.

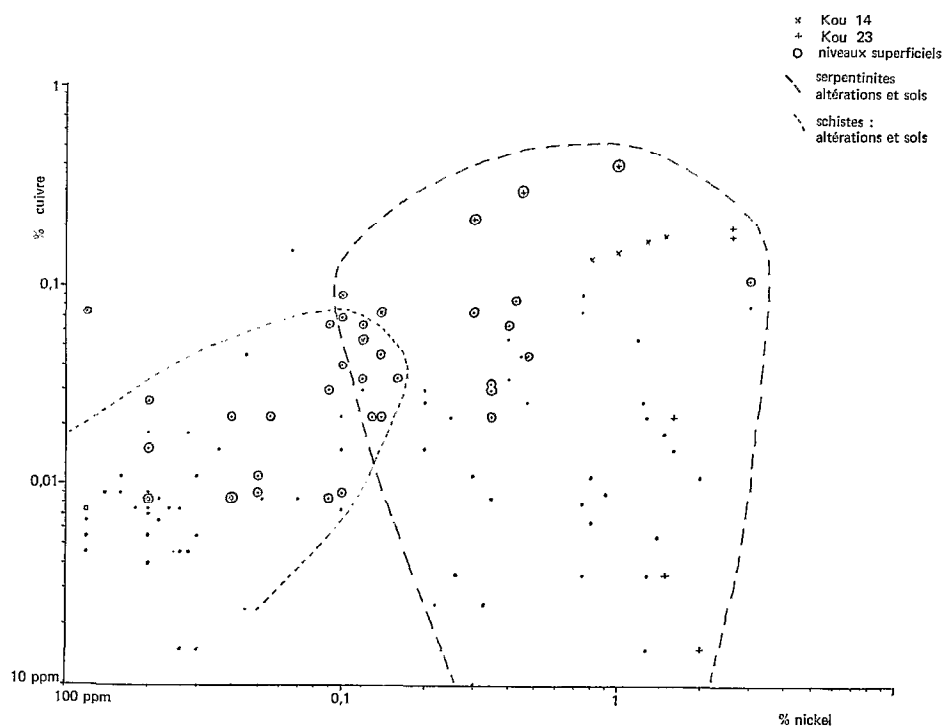


Fig. 18. — Corrélations cuivre-nickel dans les profils

amont topographique riche en nickel et en cuivre. Ceci induit une auréole de dispersion d'origine mécanique ou géochimique qui revêt une certaine importance dans les résultats des recherches minières prospection géochimique de surface.

Pour le nickel, l'interprétation de la prospection géochimique superficielle est assez simple. Avec un clarke de 75 ppm, la population analysée par MIKHAILOFF est principalement située dans une zone « sèche » (grès du Continental Terminal, grès paléozoïque, schistes de la Falémé...). L'anomalie lithologique recouvre l'auréole secondaire. L'anomalie vraie est limitée aux seuls niveaux superficiels du corps ultrabasique, et, du fait des processus d'enrichissement supergène en nickel, l'anomalie d'ordre 3 indique nettement une minéralisation affleurante.

Pour le cuivre, en l'absence d'un support lithologique précis, l'interprétation doit être plus nuancée. L'ensemble du secteur des puits est anormalique pour la prospection, intégrant une lithologie à clarke plus élevé que le fond régional (albitophyres 65 ppm par exemple), une anomalie vraie et son auréole de dispersion.

Le cobalt et le chrome sont les accompagnateurs du nickel dont ils semblent épouser le comportement. D'ailleurs, au cours de la prospection géochimique régionale, les anomalies vraies du chrome calquent les anomalies nickel de la prospection locale.

Le nickel.

Cet élément est exemplaire, car son origine est liée étroitement à l'unité ultrabasique. Les teneurs en nickel des serpentinites de Koussane, nous l'avons vu plus haut, sont tout à fait comparables à toutes les roches ultrabasiques.

L'altération superficielle, facteur de concentration :

Les descriptions des profils issus de serpentinites, les associations minéralogiques de ces profils montrent une altération puissante essentiellement soustractive qui a transformé complètement la roche pour donner un matériau léger, dont la filiation est prouvée. Corrélativement les teneurs en nickel sont très enrichies, atteignant de 1 à 3 % dans les puits sur serpentinite, alors que les caractéristiques de la roche tournent autour de 1900-2200 ppm. Cet enrichissement superficiel est d'une ampleur et d'un type tout à fait comparables à ceux des gisements latéritiques de Nickel type Nouvelle-Calédonie (ROUTHIER, 1963-TRESCASES, 1973).

Par contre, l'encaissant « albitophyres » tout en montrant un enrichissement supergène ne permet pas, de par ses teneurs de fond et par son altération moins évoluée (smectite-vermiculite), l'expression d'une minéralisation nickelifère.

La forme du nickel dans les altérations et les sols de Koussane :

Les recherches effectuées sur les échantillons d'altération les plus riches en nickel ont conclu à des teneurs en soufre compris entre 0 et 1,3 pour mille, ce qui exclut la possibilité de conservation d'éventuels minéraux sulfurés nickelifères dans la zone d'oxydation.

D'autre part en utilisant une méthode magnétique, nous avons séparé une fraction hydroxy-oxydée, d'une fraction silicatée montrant une répartition à part égale du nickel. Ceci montre que le nickel est ici lié, d'une part à des oxydes-hydroxydes de fer (goethite, hématite et maghémite), d'autre part à une phase silicatée (argiles de néoformation).

Tous les niveaux argileux sont susceptibles d'être des « pièges » à nickel : serpentines, talc, smectites, chlorites, vermiculites. Les recherches dans ce domaine n'ont pas été systématiques et ont fait apparaître les points suivants : le talc massif est stérile, alors que le talc des horizons superficiels est minéralisé ; un des échantillons minéralisés contient une smectite présentant les caractéristiques cristallines de la pimélite nickelifère.

Le chrome présente aussi plusieurs modes de gisement, dont la répartition montre une prédominance des minéraux silicatés sur les minéraux oxy-hydroxydes de fer.

Il faut donc retenir que le nickel de type gisement latéritique se distribue entre une partie liée au oxy-hydroxydes de fer et une autre liée aux silicates néogénétiques.

Comparaison de Koussane avec les travaux « nickel » réalisés antérieurement dans la région :

Des recherches sur le nickel lié à l'altération des roches ultrabasiques ont été effectuées principalement en 1961-1962 par GRAVESTIJN dans les séries birrimiennes de la série de Mako à 200 km au sud de Koussane (Dioudiou Konko) et à l'ouest de Kanéméré.

Les roches sont des péridotites serpentinisées. Les lames minces mettent en évidence de l'olivine en cristaux, de la serpentine en plages et dans les craquelures des minéraux opaques. Il y a de la trémolite, du talc et de minces filonnets de chrysotile.

Les recherches minières montrent un enrichissement supergène incontestable en nickel, chrome, cobalt, atteignant localement 0,85, 2,7 et 0,3 % mais le plus souvent beaucoup moins (en moyenne environ 0,25 % à Kanéméré et 0,35 % à Dioudiou Konko pour le nickel).

Pour GRAVESTIJN, cette quasi-absence de miné-

ralisation nickelifère supergène est due à la jeunesse des altérations non situées sous les glacis anciens. Actuellement, il est difficile de retenir cette argumentation, car l'absence de cuirassement généralisée à Koussane aurait pu induire une conclusion identique.

L'originalité de Koussane par rapport à Kanéméré et Dioudiou Konko est de se situer sur un corps ultrabasique plus jeune, mais complètement serpentinisé, tectonisé que DEHANDSCHUTTER situe dans un charriage. Cette tectonique peut avoir créé des conditions permettant une meilleure circulation de l'eau de surface en augmentant considérablement les facteurs de l'altération météorique, malgré une pluviométrie moindre que celle du sud du Sénégal Oriental. On atteint ici une évolution aussi poussée que dans les gisements calédoniens, malgré un facteur climatique moins favorable.

Conclusions.

A Koussane, nous avons décrit un indice latéritique de nickel, mis en évidence lors de recherche de cuivre. Cet indice ne présente aucun intérêt économique mais il permet de tirer quelques enseignements, étant donné le contexte des recherches minières effectuées dans la région.

Le cuivre :

Le cuivre à Koussane apparaît lié comme à Gabou et Diaguili, à un ensemble comprenant des schistes chloriteux et albitiques, des jaspilites et des serpentinites.

Les anomalies géochimiques se fermant verticalement et latéralement, leurs formes semblent lenticulaires ou en chapelet.

Les mécanismes de l'altération superficielle induisent dans les deux unités lithologiques une augmentation relative des teneurs dans les profils, qui reste mineure par rapport à l'importance des anomalies vraies. Celles-ci sont indépendantes de la nature de la roche et de ses altérations ; elles apparaissent comme des corps de petites tailles fermés verticalement et latéralement à l'image de lentilles ou de chapelets.

Le nickel :

Les mécanismes de l'altération superficielle entraînent une accumulation relative de nickel qui, sur l'étroite zone de serpentinite, se traduit par une minéralisation nickelifère.

La forme primaire du nickel n'a pas été précisée, mais sa forme résiduelle dans les altérations est double : à la fois liée aux oxydes et hydroxydes de fer et aux silicates argileux impliquant une redistribution.

L'ampleur de l'accumulation relative de nickel est tout à fait comparable aux grands gisements latéritiques. Cette différence avec les indices connus dans la région peut tenir au fait que le corps ultrabasique de Koussane est complètement serpentinitisé et fortement tectonisé.

Les enseignements de Koussane :

Koussane se caractérise par une association Cu-Ni-Co-Cr-Zn où les anomalies des groupes Cu-Zn et Ni-Co-Cr sont juxtaposées ou superposées (MIKHAILOFF).

L'association Ni-Co-Cr forme la paragenèse typique des ultrabasites et elle se trouve confortée ici par un enrichissement supergène de type latéritique.

Le contraste entre les serpentinites et leur

encaissant est conservé et amplifié dans les niveaux d'altération.

En surface, un tassement des contrastes attribués sommairement à la topographie induit une auréole secondaire sans enracinement qui, à l'égard de la dimension du corps ultrabasique, prend une grande importance dans la conduite et la réussite des objectifs d'une prospection géochimique.

Fondamentalement, il y a une permanence des indicateurs géochimiques de la lithologie au cours de l'altération du corps ultrabasique permettant directement ou indirectement, grâce aux auréoles secondaires de dispersion, une diagnose du substratum.

*Manuscrits déposés au S.C.D. de l'O.R.S.T.O.M.
le 11 octobre 1976.*

BIBLIOGRAPHIE

- AGASSIZ (J. F.), 1969. — Recherches minières au Sénégal. — Rapport final *PNUD* Dakar.
- ALLEN (J. R. C.), 1963. — The classification of cross stratified units with notes on their origin. — *Sedimentology, Netherl.* vol. II, n° 2 : 93-114.
- AUBERT (G.), 1965. — Classification des sols, tableaux des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes utilisés par la section de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M. — *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, Fr. vol. III, n° 3 : 97-112.
- BASSOT (J. P.), 1963. — Étude géologique du Sénégal oriental et de ses confins Guinéo-maliens. Thèse Sciences Clermont-Ferrand. *Mém. Bur. Rech. géol. minières Fr.*, n° 40 et *Bull. Dir. Mines Géol. Sénégal*, n° 1 (1966), 322 p.
- BAUER (M.), 1898. — Beiträge zur Geologie der Seychellen insbesondere zur Kenntnis des Laterits — *Neues Jb. Mineral. Monatsh. Dtsch.*, vol. II : 163-219.
- BOIS (J.), 1961. — Mission Sud Bakel. Campagne 1960-1961 — Rapp. Bur. Rech. Géol. minières, Dakar, 40 p. *multi*gr.
- BONIFAS (M.), 1959. — Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique — *Mém. Serv. Carte géol. Alsace-Lorraine*, n° 17, 159 p.
- BROWN (G.), 1961. — The x-ray identification and crystal structures of clay minerals — Mineralogical Society édit. London, 544 p.
- CAILLÈRE (S.), HENIN (S.), 1963. — Minéralogie des argiles — Masson édit. Paris, 355 p.
- G.P.C.S., 1967. — Classification des sols — Édition 1967. — Commission de Pédologie et de Cartographie des sols. — Labor. de Géol. Pédol. E.N.S.A. Grignon, 87 p. *multi*gr.
- DEER (W. A.), HOWIE (R. A.), ZUSSMAN (J.), 1962. — Rocks forming minerals — Longmans édit. London, vol. V, 77 p.
- DIENG (M.), 1965. — Contribution à l'étude géologique du Continental terminal du Sénégal (Travaux effectués de 1962 à 1965). Rapp. Bur. Rech. Géol. minières, Dakar 65-A27, t. 1, 181 p. *multi*gr.
- DEHANDSCHUTTER, 1973. — Étude géologique de la zone de Koussane — *PNUD* Dakar, *multi*gr.
- ELOUARD (P.), 1959. — Étude géologique et hydrogéologique des formations sédimentaires du Guelbla mauritanien et de la vallée du Sénégal. — Thèse Sciences Paris *Mém. Bur. Rech. Géol. minières Fr.*, n° 7 (1962), 274 p.
- ESWARAN (H.), SYS (G.), 1972. — Clay mineralogy of soils on ultrabasic rocks from Sabah, Bornéo. — *Internat. Clay Conference, Madrid*, vol. I : 125-225.
- FAUST (G. T.), 1966. — The hydrous nickel Magnesium silicate. The ganierite group. *Amer. Mineralogist*, vol. 51, 279-298.
- GREENE-KELLY (R.), 1953. — Identifications of Montmorillonoids. — *J. Soil Sci., G.B.E.* 4 : 233-237.
- GRUPE DES ÉTUDES SÉDIMENTAIRES, 1966. — Essai de nomenclature et caractérisation des principales structures sédimentaires. — Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, Éd. Technip, Paris, 291 p.
- JAHS (H.), 1967. — Serpentinities of the Roxbury district, Vermont In Ultramafic and related rocks, John Wiley and sons édit. New York : 137-160.
- JUNG (J.), 1958. — Précis de Pétrographie — Masson Éd. Paris, 314 p., 160 fig.
- LASFARGUES (A. D.), 1971. — Rapport final *PNUD* Dakar, *multi*gr.
- LASFARGUES (A. D.), 1973. — Projet d'exploration minière au Sénégal oriental. — Rapport final. — *PNUD*. Projet SEN 71-517, 80 p. *multi*gr.

- LEPELTIER (C.), 1969. — A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Economic Geol. USA*, vol. 64 : 533-550.
- LEPRUN (J. C.), 1967. — Les sols de la région de Goudiry (Sénégal oriental). — Rapp. O.R.S.T.O.M., Dakar, 138 p. *multigr.*
- LUCAS (J.), 1962. — La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Études sur les argiles du Trias. — *Mém. Serv. carte géol. Alsace-Lorraine*, n° 23, Strasbourg, 202 p.
- MEZENCEV (O. K.), RATNIKOV (V. M.), SKOROSPEL'KIN (S. A.), 1964. — Traitement statistique des données des recherches géochimiques. *Raznedka Okhr. Nedr. S.S.S.R.*, t. 30, n° 10, p. 10-15. Trad. BRGM, n° 4791.
- MIKHAILOFF (N.), 1973. — Rapport sur les campagnes de prospection géochimique de la région de Koussane. *PNUD* Dakar, *multigr.*
- MILLER (R.), 1953. — The Webster-Addie ultramafic ring, Jackson Country, North Carolina, and secondary alteration of its chromite. *Amer. Mineralogist*, vol. 38 : 1134-1147.
- MILLOT (G.), FAUCK (R.), 1971. — Sur l'origine de la silice des silifications climatiques et des diatomites quaternaires du Sahara. — *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 272 : 4-7.
- PAQUET (H.), 1970. — Évolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées. — Thèse sciences, Strasbourg (1969), *Mém. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine*, n° 30, 210 p.
- PEREIRA-BARRETO (S.), 1965. — Notice explicative. Carte pédologique du Sénégal au 1/200.000 — feuilles Tambacounda et Bakel. Sud. — Rapp. O.R.S.T.O.M., Dakar, 53 p. *multigr.*
- PETKOVIC (M.), 1969. — Rapport sur la prospection du cuivre au Sénégal Oriental 1968-69. Annexe n° 16 Rapport final *PNUD* Dakar, *multigr.*
- PETKOVIC (M.), 1971. — Rapport sur la recherche du cuivre à Gabou, département de Bakel 1970-71. Annexe n° 22, Rapport final *PNUD* Dakar, *multigr.*
- RINNE (E.), BERTRAND (L.), ORCEL (J.), 1949. — La science des roches, Lamarre édit. Paris, 696 p.
- RIMSALTE (J.), 1972. — Genesis of chlorite, vermiculite, serpentine, talc, and secondary oxides in ultrabasic rocks *Internat. clay Conf. Madrid*, vol. I : 353-364.
- ROUTHIER (P.), 1963. — Les gisements métallifères (2 tomes). Masson édit. Paris.
- SCHHELLMANN (W.), 1964. — Zur lateritischen Verwitterung von Serpentin *Geol. Jhb. Dtsch* 81 : 645-678.
- SCHHELLMANN (W.), 1971. — Über Beziehungen lateritischer Eisen, Nickel, Aluminium und Manganerze zu ihren Ausgangsgesteinen. *Mineralium Deposita*, Berlin, vol. VI, n° 4 : 275-291.
- SOUGY (J.), 1969. — Grandes lignes structurales de la chaîne des Mauritanides et de son avant pays (socle précambrien et sa couverture infracambrienne et paléozoïque), Afrique de l'Ouest — *Bull. Soc. géol. Fr.*, Paris, sér. 7, XI, 2 : 133-149.
- TAMURA (T.), 1958. — Identification of clay minerals from acid soils *J. Soil Sci. G.B.* t. 9 : 141-147.
- TARDY (Y.), GAG (J. Y.), 1968. — Les minéraux argileux dans quelques sols et arènes des Vosges cristallines. Présence de vermiculite. Al. Hypothèse de la néoformation des vermiculites et montmorillonites. — *Bull. Serv. Carte géol. Alsace-Lorraine*, 21, 4 : 285-304.
- TESSIER (F.), 1953. — Contribution à la stratigraphie et à la paléontologie de la partie ouest du Sénégal. Thèse science Marseille (1950). *Bull. Dir. Min. Afr. occ. fr., Dakar*, n° 14, t. 1, 267 p.
- TEX (E.) DEN, 1955. — Secondary alteration of chromite. — *Amer. Mineralogist*, vol. 40 : 353-355.
- TRESCASES (J. J.), 1973. — L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formation des gisements nickelifères de Nouvelle-Calédonie. Thèse science Strasbourg. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, n° 78, 259 p.
- WADA (K.), YAMADA (H.), 1968. — Hydrazine intercalation. Intersalation for differentiation of kaolin minerals from chlorites, *Amer. Mineralogist*, vol. 53 : 334-339.
- ZEISSINK (H. E.), 1969. — The mineralogy and geochemistry of a Nickeliferous laterite profile (Greenwale, Queensland Australia). *Mineralium Deposita*, vol. 4, n° 2 : 132-152.
- ZWIZEN (W.), 1973. — Rapport sur la région de Koussane *PNUD* Dakar, *multigr.*