

ANALYSE DE LA DIFFÉRENCIATION D'UNE COUVERTURE LATÉRITIQUE DE L'EST DU CAMEROUN

J.P. MULLER *

RESUME

La majorité des couvertures latéritiques des régions tropicales humides et forestières présentent trois grands niveaux d'organisation. De bas en haut des profils, on distingue un ensemble meuble d'altération à texture et structure de la roche conservées, surmonté de deux ensembles où ces texture et structure sont - tout ou partie - effacées : l'un présente une induration généralement discontinue sous forme de nodules, l'autre est meuble;

Les matériaux constituant ces ensembles ont des *faciès variés* mais ils sont toujours caractérisés par un assemblage de *kaolinites* et d'*oxydes de fer*. Notre objectif est d'analyser, dans une de ces couvertures situées à l'est du Cameroun, les *mécanismes* qui conduisent à ces différents faciès d'accumulation et les *relations d'ordre historique et génétique* entre les différentes paragenèses à kaolinites et oxydes qui les constituent.

Une analyse fine menée sur le terrain a d'abord permis un inventaire précis des principaux matériaux définis par leur faciès. On a également précisé leur *distribution relative* au sein d'organisations tridimensionnelles définies géométriquement. Les méthodes développées ultérieurement au laboratoire ont permis l'analyse des relations structurales, minéralogiques et géochimiques entre ces matériaux et entre leurs constituants. Il s'agit des méthodes de la pétrographie (microscopie optique, microscopie électronique en balayage, microanalyses chimiques *in situ* à la microsonde) et de la minéralogie (diffraction des rayons X, spectroscopie infra-rouge, résonance paramagnétique électronique, microscopie électronique en transmission).

Cette démarche sera illustrée par l'analyse des filiations entre les matériaux indurés à texture héritée de la roche et les matériaux meubles à " texture de sol ". Plusieurs paragenèses successives à kaolinites et oxydes de fer seront ainsi définies. On resituera ensuite ces paragenèses dans leur contexte pétrographique, aux échelles accessibles sur le terrain. Cela nous permettra de jeter quelques bases de l'histoire de ce type de couverture.

* ORSTOM, UR 605 - Pétrologie de la Surface, 70-74, Route d'Aulnay - 93140 BONDY (FRANCE)

Laboratoire de Minéralogie-Cristallographie, LA CNRS 09
Universités Paris VI et VII, 2 place Jussieu 75251 PARIS CEDEX 05

A. INTRODUCTION

Deux traits majeurs caractérisent en première analyse les couvertures latéritiques des régions tropicales humides et forestières :

(1) Une certaine *complexité* sur le plan des *organisations* : des matrices aux faciès variés s'ordonnent en trois grands ensembles contrastés et superposés (BOCQUIER et al., 1984).

(2) Une relative *uniformité* sur le plan des *constituants* minéraux : toutes ces matrices sont essentiellement des accumulations résiduelles de kaolinite, d'hématite et de goethite (HERBILLON, 1980).

Notre objectif est de comprendre - en prenant comme modèle une couverture latéritique de l'Est du Cameroun - comment ces trois constituants majeurs peuvent réaliser des textures et structures aussi variées, mais toujours ordonnées verticalement comme latéralement. Pour cela il nous faut préciser la nature des paragenèses à kaolinite et oxydes de fer qui constituent ces structures et textures, et analyser les relations d'ordre génétique et historique entre ces dernières.

La démarche adoptée est celle du géologue qui après avoir inventorié sur le terrain des matrices définies par leur faciès, et précisé leur distribution spatiale, analyse les relations entre ces matrices et entre leurs constituants.

Nous nous proposons ici d'illustrer cette démarche en privilégiant l'analyse d'une relation majeure : celle qui associe des matériaux à texture héritée de la roche à des matériaux à "texture de sol".

B. LES PRINCIPAUX FACIES ET LEUR DISTRIBUTION

Une centaine de puits de 6 à 12 m de profondeur ont été foncés sur une toposéquence de 1 km de long. Cela nous a permis d'entreprendre une étude détaillée de la couverture, verticalement comme latéralement, et de faire apparaître deux grands traits de l'organisation aux échelles métriques, particulièrement dans le domaine amont de la toposéquence.

1. Une organisation verticale en trois ensembles morphologiques superposés (fig. 2a) (ROSELLLO et al., 1982).

Comme dans la majorité des zones tropicales humides et forestières les profils présentent un développement ordonné de trois princi-

paux ensembles d'horizons. Du bas vers le haut :

a - *Un ensemble d'altération, meuble, très poreux, à texture et structure héritées de la roche (un gneiss). A sa partie supérieure des volumes disjoints d'altérite, qui s'amenuisent vers le haut des profils, sont isolés dans une matrice meuble, rouge jaunâtre, à texture de sol.*

b - *Un ensemble nodulaire. Les nodules, rouge sombre, présentent deux faciès principaux : des nodules "lithorelictuels", grossiers, irréguliers, à texture héritée de la roche, aux limites souvent diffuses ; et des nodules "argilomorphes", plus petits, arrondis, à texture de sol, aux limites plus fréquemment tranchées. Ces nodules sont emballés dans des matrices-sol non (ou peu) indurées : rouge et compacte, à la périphérie des nodules, de plus en plus jaune et meuble quand on s'en éloigne.*

c - *Un ensemble "sol meuble". Les nodules y deviennent brutalement rares. Mais c'est progressivement que la matrice rouge et compacte précédente disparaît vers le haut. Corrélativement la matrice jaune se développe puis devient exclusive à la partie supérieure des profils.*

2. Une organisation latérale à structures décimétriques emboîtées en forme d'ensellement (ou de lentilles biconvexes) (fig. 1).

La densité des observations a permis une analyse quasi continue des variations latérales des faciès des matrices précédentes, mais également de leurs modes d'assemblage au sein de chaque ensemble pour former des "matériaux". Une analyse de la distribution latérale de ces matériaux fait apparaître : (1) des discontinuités latérales au niveau des ensembles, (2) des structures décimétriques en forme d'enselllements ou de lentilles emboîtées.

En fait, et le plus généralement, on retrouve à l'échelle de ces enselllements des distributions similaires à celles observées sur un profil vertical. Des matériaux encaissants au coeur de ces enselllements on note, comme on l'observe de bas en haut des profils, une diminution : des volumes à texture héritée de la roche, et/ou de la taille et du nombre des nodules, et/ou des matrices rouges au profit des matrices jaunes.

Ces distributions ordonnées verticalement et latéralement, comme la fréquente progressivité des transitions entre matrices ou entre matériaux, paraissent traduire des degrés d'évolution ou des transformations successives. Analysons plus en détail, et par exemple, les transformations qui s'opèrent au sein de l'ensemble nodulaire lors du passage graduel des matrices nodulaires lithorelictuelles (NL) aux matrices nodulaires argilomorphes (NA) puis aux matrices internodulaires rouges (MR) et jaunes (MJ). Cet exemple permet en effet d'analyser simultanément les changements de trois critères déterminants dans l'inventaire des faciès : texture, teinte, état d'induration.

C. ANALYSE DES RELATIONS ENTRE MATRICES AU SEIN DE L'ENSEMBLE NODULAIRE

Ces relations ont été analysées d'un point de vue structural et minéralogique.

1. Les transformations microstructurales.

Les analyses structurales à différentes échelles (macroscopiques, microscopiques et ultramicroscopiques) nous indiquent que la texture et la structure de la roche sont conservées dans les NL. Par exemple une observation au microscope électronique à balayage (MEB) montre : (1) la préservation de la foliation du gneiss originel (fig. 7), (2) une pseudomorphose des micas par de larges particules de kaolinite (fig. 8) - parallèles au clivage originel - typique d'une altération in situ décrite par plusieurs auteurs (BISDOM et al., 1982). Les oxydes de fer ont essentiellement cristallisé en bordure de ces kaolinites (fig. 9).

Du bas vers le haut de l'ensemble nodulaire, et en même temps qu'au faciès lithorelictuel des nodules se substitue un faciès argilomorphe, ces kaolinites *macrocrystallines* font place à des kaolinites de taille plus réduite. On constate d'abord une sorte de microfissuration locale, perpendiculaire aux plans 001, sans modification de la texture phylliteuse héritée du mica (fig. 10). Puis des kaolinites de taille encore plus réduite (0,5 μ m) apparaissent, dont l'orientation est alors plus quelconque (fig. 11).

Le passage sur quelques microns d'un faciès "lithorelictuel" (NL) à un faciès "argilomorphe" (NA) (fig. 12) montre bien la relation entre ces kaolinites *macrocrystallines* et plusieurs générations de kaolinites *microcrystallines*. Ces dernières préservent d'abord la texture phylliteuse héritée des micas puis graduellement présentent une orientation quelconque.

La transition vers les matrices internodulaires (MR puis ML) correspond à la généralisation de ce dernier arrangement. Cependant de nouvelles structures peuvent apparaître dans ces matrices, telles que les structures "micronodulaires" (MULLER, 1977 ; CHAUVEL et al., 1983) (fig. 13).

2. Les transformations minéralogiques.

Des microanalyses géochimiques ont été réalisées in situ, sur lames minces et à la microsonde de Castaing. L'analyse des oxydes de fer a été réalisée par diffraction des rayons X et celle des kaolinites par spectroscopie infra-rouge (IR) et résonance paramagnétique électronique (RPE).

a - *Les paragenèses à oxydes de fer.* L'hématite et la goëthite coexistent dans tous les matériaux. Les microanalyses nous indiquent que la quantité d'oxydes de fer décroît des NL et NA aux MR puis aux MJ (fig. 5). Mais alors que l'hématite domine largement dans les NL et NA, la goëthite qui devient progressivement dominante dans les MR est quasi exclusive dans les MJ.

La position, le rapport des intensités et des largeurs à mi-hauteur des raies (104) et (110) de l'hématite (PERINET et LAFONT, 1972b ; SCHWERTMANN et al., 1977) attestent que la cristallinité des hématites diminue des NL aux NA puis aux MR (fig. 3). On montre, par un calcul des paramètres de maille (PERINET et LAFONT, 1972a) que le taux de substitution en Al de ces hématites augmente corrélativement dans le même sens : 0 à 3 % dans les NL, 6 à 9 % dans les MR.

Une détermination du degré de substitution des goethites d'après la position relative des raies (110) et/ou (111) (SCHULZE, 1984) nous indique que ces goethites sont, parallèlement, de plus en plus substituées en Al : 7-15 % dans les NL, à 10-20 % dans les NA et MR, puis 15-28 % dans les MJ.

b - *Les paragenèses à kaolinites.* Les variations de deux paramètres ont été quantifiées : celles relatives à la cristallinité et aux substitutions en fer.

- *La cristallinité :* La régularité du réseau cristallin des kaolinites peut être appréciée en spectroscopie infra-rouge (FARMER, 1964). Les intensités relatives des bandes de vibrations des groupements OH varient en effet avec l'état d'ordre ou de désordre de ces kaolinites (BARIOS et al., 1977). On peut quantifier cette cristallinité par un indice $IC = I(3649) / I(3669)$ qui croît avec le désordre cristallin (CASES et al., 1982). On constate ainsi que la cristallinité des kaolinites décroît des NL (0.9 - 1.0) aux NA (1.0 - 1.1) puis aux MR (1.1 - 1.2) et aux MJ (1.2 - 1.4) (fig. 6).

- *Les substitutions en fer :* Il est bien connu maintenant que les kaolinites naturelles et particulièrement celles des latérites sont ferrifères (HERBILLON et al., 1980 ; CANTINOLLE et al., 1984). Ce fer, substitué à l'aluminium dans les feuillettes octaédriques, est détecté en résonance paramagnétique électronique (HALL, 1980). Un signal à deux composantes (fig. 4) témoigne de l'existence de deux sites de substitution. Plus particulièrement la composante I est liée au fer localisé dans des domaines à organisation cristalline imparfaite (MESTDAGH et al., 1980).

L'augmentation relative de l'intensité de cette composante des NL aux NA puis aux MR et aux MJ est significative d'un accroissement de la substitution en fer des kaolinites dans le même sens.

3. Conclusion : une suite évolutive minérale et structurale.

La succession ordonnée des faciès, mise en évidence sur le terrain (NL - NA - MR - MJ) correspond donc à une suite évolutive minérale et structurale qui associe :

- des matrices dans lesquelles des macrocristallites de kaolinite ordonnée et faiblement substituée en fer préservent la texture originelle du gneiss. Ces cristallites sont associés à plus de 40 % d'hématite peu ou non substituée en Al.

- à des matrices dans lesquelles des microcristallites de kaolinite désordonnée et plus fortement substituée en fer ont une distribution quelconque en regard de la foliation originelle du gneiss ("pedoplasma", FLACH et al., 1968). Ces cristallites sont associés à 10 % environ de goethite très substituée en Al (30 % d'Al environ).

D. DIFFERENCIATIONS AUX ECHELLES MACROSCOPIQUES

Les enchainements minéraux et structuraux analysés ci-dessus aux échelles microscopiques se réalisent en fait à tous les niveaux de l'organisation. Des suites évolutives comparables peuvent être mises en évidence entre les différentes matrices de chacun des autres ensembles, comme entre ces ensembles à l'échelle d'un profil.

A titre d'exemple, nous analyserons les variations de la cristallinité et des substitutions en fer des kaolinites à ces échelles macroscopiques. Ces deux caractéristiques cristallographiques peuvent être quantifiées respectivement par l'indice IC (en IR) et la surface S (I) du signal I (en RPE) (MESTDAGH et al., 1980). Outre que l'on constate que cristallinité et substitutions en fer sont deux caractéristiques étroitement corrélées, on montre clairement (fig. 2a et 2b) que la cristallinité des kaolinites diminue en même temps qu'augmente leur substitution en fer : (1) à l'échelle de chaque ensemble, des matrices lithorelictuelles aux matrices sol et/ou des matrices les plus indurées (ou compactes) et les plus rouges (à hématite) aux matrices les plus meubles et jaunes (à goéthite). (2) à l'échelle du profil (et globalement), de l'ensemble d'altération à l'ensemble sol meuble.

Une démonstration similaire pourrait être effectuée en ce qui concerne les autres caractéristiques de ces matrices, telles que la minéralogie et la cristallographie des oxydes de fer.

Enfin, et toujours aux échelles macroscopiques, ce sont ces mêmes suites minérales et structurales que l'on met en évidence latéralement des structures encaissantes au coeur des ensembles précédents.

E. LE SENS DES EVOLUTIONS : UNE ALTERNATIVE

La réalité de ces suites minérales et structurales ne nous instruit pas en fait sur le sens d'une évolution. Les données précédentes peuvent être en effet interprétées de manière contradictoire.

En ce qui concerne par exemple les relations entre les matrices de l'ensemble nodulaire (cf. C et MULLER et BOCQUIER, 1985 b), deux hypothèses peuvent être avancées :

(1) L'association entre les kaolinites macrocristallines et l'hématite dans les matériaux lithorelictuels constitue un stade initial. Le passage progressif aux matrices meubles et jaunes correspond alors à une succession de dissolutions et de reprécipitations in situ de nouvelles générations de kaolinites et d'oxydes de fer (MULLER et BOCQUIER, 1985 a) - aux caractéristiques cristallographiques différentes à chaque stade - et à une élimination progressive du fer.

(2) Un changement graduel des conditions géochimiques de l'altération est intervenu au cours de la progression d'un front de transformation aux dépens des matériaux à texture héritée de la roche (voire de la roche elle-même). Les minéraux de chaque matrice auraient alors cristallisé dans des conditions géochimiques particulières ; les filiations génétiques précédentes ne sont plus alors assurées, et les matrices lithorelictuelles (NL) apparaissent comme les plus récentes.

Ce problème de filiations génétiques se pose dans les mêmes termes aux échelles macroscopiques, verticalement à l'échelle des profils comme latéralement à l'échelle des ensembles. On peut se demander notamment si l'ensemble d'altération analysé, où les kaolinites sont macrocristallines, évoluera vers un ensemble nodulaire où les matrices à kaolinites macrocristallines (nodules lithorelictuels) sont isolées au sein de matrices à kaolinites microcristallines ; puis si ce dernier se transformera en un ensemble "sol meuble" où les kaolinites sont exclusivement microcristallines.

Cette alternative quant au sens de l'évolution des matériaux, qui se présente donc à tous les niveaux de l'organisation nous oblige alors à rechercher d'autres caractéristiques cristallographiques et géochimiques, qui :

- dans l'hypothèse (1) seraient susceptibles d'être conservées ("mémoires") tout au long d'une "lignée" génétique.
- dans l'hypothèse (2) seraient significatives de changements successifs des conditions géochimiques de l'altération.

RÉFÉRENCES

- BARIOS, J., PLANCON, A., CRUZ, M.J. and TCHOUBAR, C. (1977). *Clays and Clay Miner.*, 25, 422-429.
- BISDOM, E.B.A., STOOPS, G., DELVIGNE, J., CURMI, P. et ALTEMULLER, H.J., (1982). *Pédologie*, 32, 225-252.
- BOCQUIER, G., MULLER, J.P. et BOULANGE, B. (1984). *Livre Jubilaire Cinquantenaire A.F.E.S.*, Paris, 123-138.
- CANTINOLLE, P., DIDIER, P., MEUNIER, J.D., PARRON, C., GUENDON, J.L., BOCQUIER, G. and NAHON, D. (1984). *Clay Miner.*, 19, 125-135.
- CASES, J.M., LIETARD, O., YVON, J. and DELON, J.L. (1982). *Ill. Minéralogie*, 105, 439-455.
- CHAUVEL, A., SOUBIES, F. et MELFI, A. (1983). *Sciences Géol.*, 72, 37-46.
- FARMER, V.C. (1964). *Science*, 145, 1189-1190.
- FLACH, W., CADY, J.G. and NETTLETON, W.D. (1968) in : *Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci.*, 4, 343-351.
- HALL, P.L. (1980). *Clay Miner.*, 15, 321-335.
- HERBILLON, A. (1980). In : *Soils with Variable Charge*, B.K.G. Theng Ed., N.Z. Soc. Soil Sci., 109-126.
- HERBILLON, A.J., MESTDAGH, M.M., VIELVOYE, L. and DEROUANE, E.G. (1976) *Clay Miner.*, 11, 201-220.
- MESTDAGH, M.M., VIELVOYE, L. and HERBILLON, A.J. (1980). *Clay Miner.*, 15, 1-14.
- MULLER, J.P. (1977). *Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie*, 15, 25-44.
- MULLER, J.P. et BOCQUIER G. (1985 a). *Geoderma*, à paraître.
- MULLER, J.P. et BOCQUIER G. (1985 b). *Int. Clay Conf., Denver*, à paraître.
- PERINET, G. et LAFONT, R. (1972 a). *C.R. Acad. Sci., Paris*, 275, 1021-1024.
- PERINET, G. et LAFONT, R. (1972 b). *C.R. Acad. Sci., Paris*, 274, 272-274.
- ROSELLO, V., MULLER, J.P., ILDEFONSE, Ph. et BOCQUIER, G. (1982). *Annales Fac. Sci., Cameroun*, 4, 7-34.
- SCHULZE, D.G. (1984). *Clays and Clay Miner.*, 32, 36-44.
- SCHWERTMANN, U., FITZPATRICK, R.W. and LE ROUX, J. (1977). *Clays and Clay Miner.*, 25, 373-374.

LÉGENDES FIGURES

- Fig. 1 - Représentation schématique d'une partie de la toposéquence. Noter l'emboîtement des structures décimétriques en forme d'ensellements ou de lentilles biconvexes. Les matrices (1) à (6) sont définies à la fig. 2.
- Fig. 2 - a. Représentation schématique d'un profil. I = ensemble d'altération, II = ensemble nodulaire, III = ensemble "sol meuble". (1) altérite à texture héritée de la roche, (2) nodules lithorelictuels (NL), (3) nodules argilomorphes (NA), (4) matrice rouge compacte (MR), (6) matrice jaune compacte, (7) accumulation organique.
b. Variations de l'Indice de cristallinité (IR) des différentes matrices en fonction de la profondeur.
c. Variations de la surface de la composante I du signal RPE des différentes matrices en fonction de la profondeur.
- Fig. 3 - Diagramme de diffraction X des matrices 2, 3, 6, entre 38 et 44°2 θ . (111) = indices de Miller. K = kaolinite, H = hématisite, G = goethite, Q = quartz, M = muscovite 2 M 1.
- Fig. 4 - Partie de spectre RPE montrant la progression de la substitution en fer des kaolinites (intensité de I) des matrices 1 à 6.
- Fig. 5 - Composition chimique dans le système Si-Al-Fe³⁺ des matrices 2 à 6. Microanalyses in-situ à la microsonde de Castaing.
- Fig. 6 - Partie de spectre IR montrant une augmentation du désordre cristallin des kaolinites des matrices 1 à 6.
- Fig. 7 - MEB. matrice lithorelictuelle : Préservation de la foliation du gneiss, pseudomorphose des micas par de larges particules de kaolinite.
- Fig. 8 - MEB. Détail. Pseudomorphose d'un mica par une kaolinite macrocristalline.
- Fig. 9 - MEB. Les oxydes de fer cristallisent en bordure des kaolinites.
- Fig. 10 - MEB. Détail d'une kaolinite macrocristalline "microfissurée" perpendiculairement aux plans 001. La texture phylliteuse du mica originel est conservée.
- Fig. 11 - MEB. Kaolinites microcristallines à orientation quelconque au coeur d'un macrocristallite de kaolinite.
- Fig. 12 - MEB. Transition entre une matrice "lithorelictuelle" (à macrokaolinites) et une matrice "argilomorphe" (à microkaolinites).
- Fig. 13 - MEB. Structures micronodulaires concentriques au sein d'une matrice internodulaire à microkaolinites.

Fig. 1

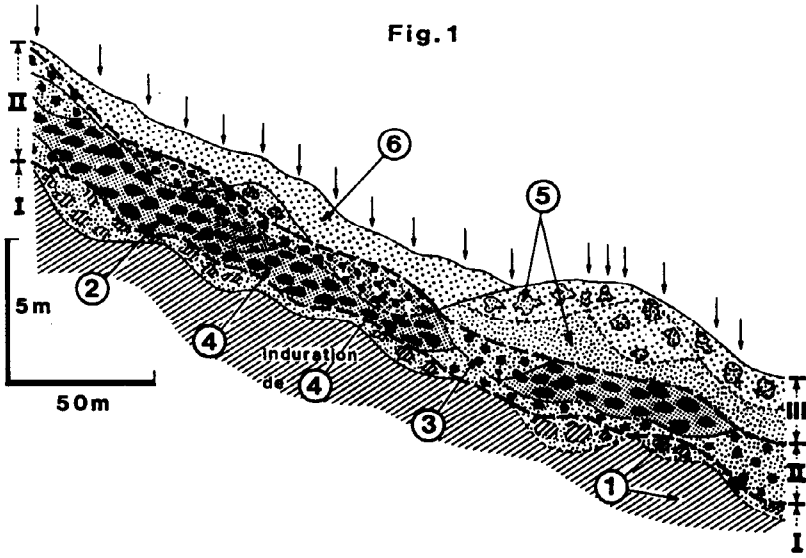
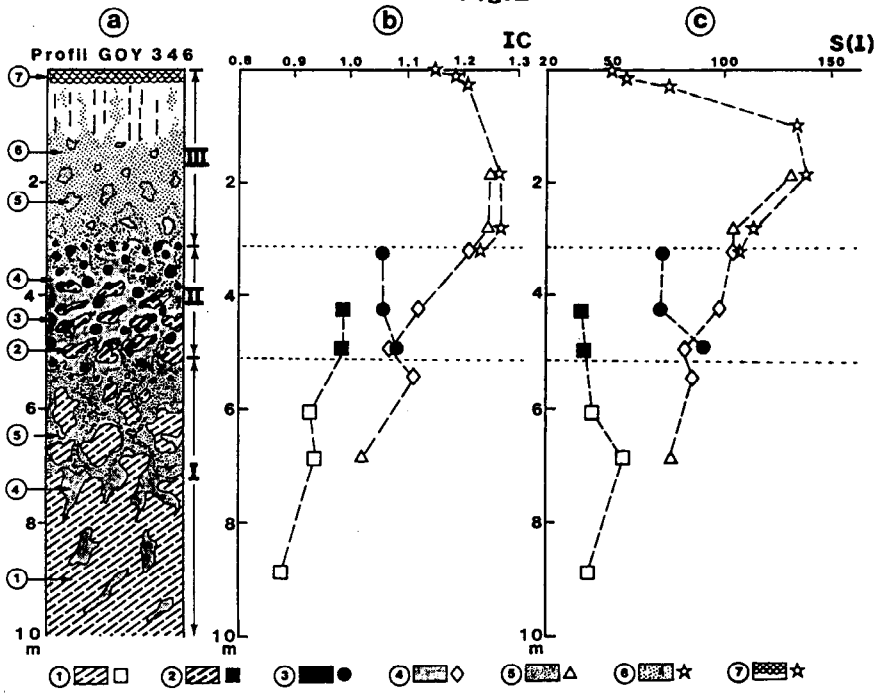


Fig. 2



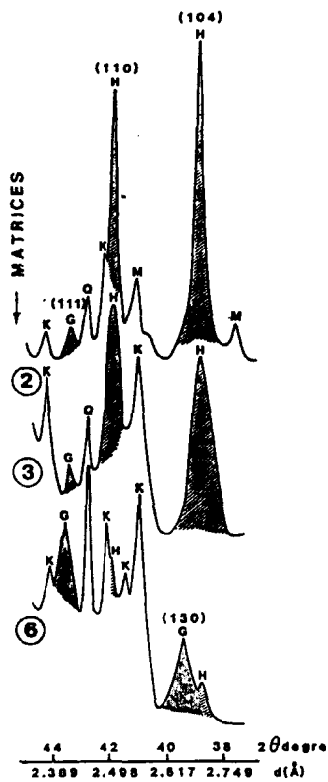


Fig.3

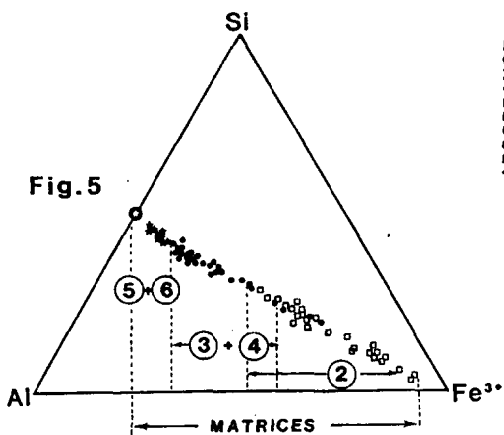


Fig.5

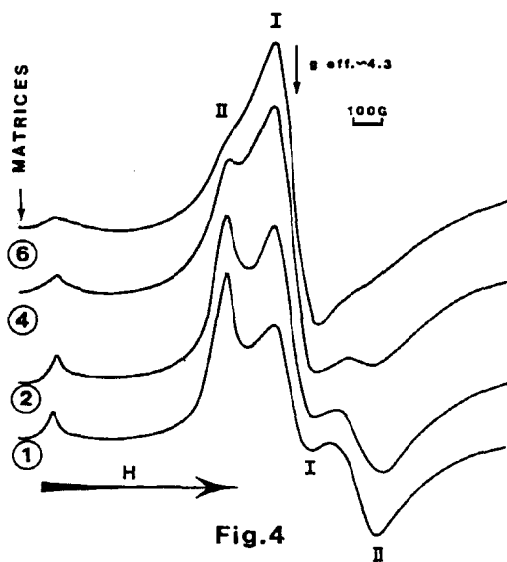


Fig.4

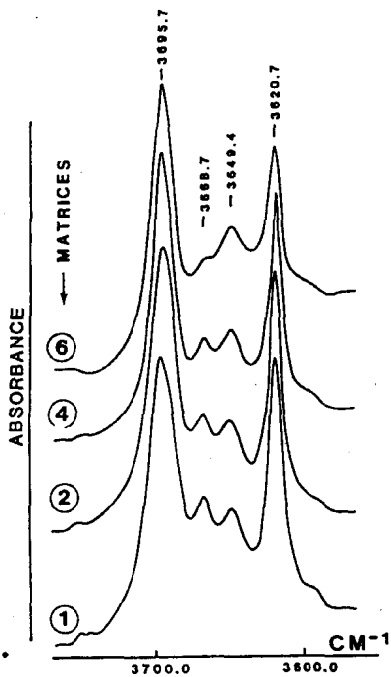


Fig.6

