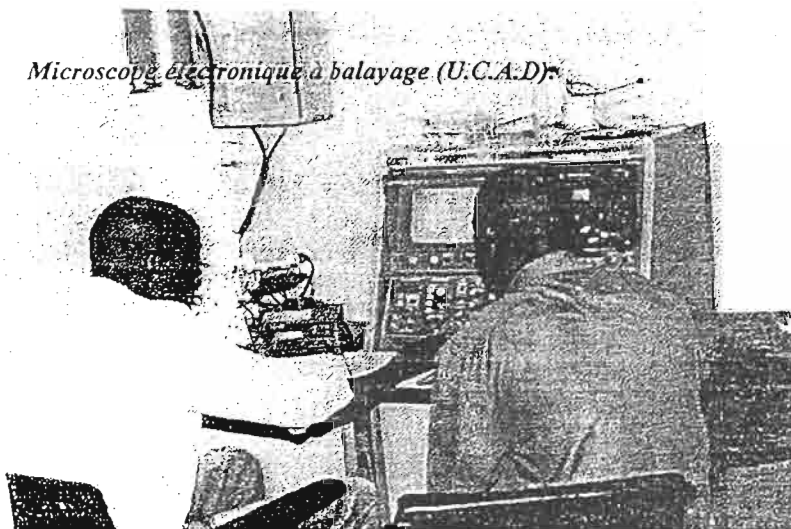


UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR
Faculté des Sciences et Techniques
Département de Géologie



ETUDE D'UN PROFIL LATERITIQUE DE TINKOTO
(SENEGAL ORIENTAL)

Microscopie électronique à balayage (U.C.A.D.)



Mémoire de D.E.A de Géosciences
Option : Environnements Sédimentaires

Présenté par :

LOUIS MANANGA

Soutenu publiquement le 20 décembre 2000

Devant le jury composé de :

MM

SARR R., Maître de conférences

PARISOT J. C., Directeur de recherche

DIOME F., Assistant

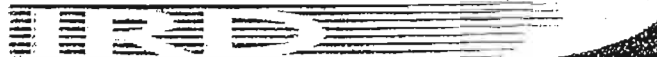
NGOM P. M., Maître de conférences

Président (U.C.A.D)

Rapporteur (IRD)

Rapporteur (I.S. T)

Examineur (U.C.A.D)



Institut du recherche pour le développement

Tables des matières

	Pages
Introduction	1
Chapitre I : Généralités	
I Situation géographique.....	2
1 Localisation.....	2
2 Climat.....	2
3 Hydrographie.....	2
4 Végétation et faune.....	3
II Cadre géologique.....	3
1 Géologie régionale.....	3
2 Géologie locale.....	4
III Cadre géomorphologique.....	6
1 Géomorphologie régionale.....	6
2 Géomorphologie locale.....	6
IV Rappels sur les processus de latéritisation	8
1 L'altération latéritique.....	8
2 Le cuirassement.....	10
3 L'or dans les environnements supergènes	10
Chapitre II : Méthodes d'étude et d'échantillonnage	
I Sur le terrain.....	12
1 Description lithologique.....	12
2 La batée.....	12
II Au laboratoire.....	12
1 Mesures physiques (densités et porosité).....	14
2 Analyses chimiques.....	14
3 Les analyses par diffraction de rayons x	14
3-1 Taux de substitution du fer par l'aluminium dans les goethites.....	15
3-2 Calcul des teneurs relatives des minéraux dans les profils	16
4 Concentré de batée.....	18

Chapitre III . Résultats et discussions

I Résultats.	19
1 Introduction	19
2 Profil TKA	19
2-1 Description lithologique	19
2-1-1 Arène granitique.	19
2-1-2 Horizon gravillonnaire	19
2-1-3 Horizon argileux.	21
2-1-4 Carapace	21
2-1-5 Cuirasse	22
2-1-6 Recouvrement gravillonnaire.	22
2-2 Mesures physiques.	22
2-3 Evolutions géochimiques d'éléments majeurs et en traces du profil TKA.	23
2-3-1 Evolution géochimique d'éléments majeurs	23
2-3-2 Evolutions géochimique d'éléments en traces.	26
2-4 Minéralogie du profil TKA	28
2-4-1 Teneurs relatives des minéraux.	29
2-4-2 Taux de substitution du fer par l'aluminium dans les goethites.	30
2-5 Corrélations.	30
2-6 L'or particulière.	32
2-6-1 Teneurs en or particulière.	32
2-6-2 Evolutions dimensionnelle et morphologique de l'or particulaire.	32
2-6-2-1 Taille	32
2-6-2-2 Contour.	32
2-6-2-3 Surface.	33
2-6-2-4 Marque de déformation	33
2-7 Conclusion	34
3 Profil Tenbr	36
3-1 Description lithologique	36
3-1-1 Carapace.	36
3-1-2 Cuirasse	36

3-1-2-1	Sous-horizon I	36
3-1-2-2	Sous-horizon II	36
3-2	Mesures physiques	37
3-3	Evolutions géochimiques d'éléments majeurs et en traces du profil Tenbr.....	38
3-4	Minéralogie du profil Tenbr.....	41
3-4-1	Teneurs relatives des minéraux	41
3-4-2	Taux de substitution du fer par l'aluminium dans les goethites.....	42
3-5	Corrélations	42
3-6	Conclusion	43
II	Discussions : Origine et évolution des matériaux de moyen glaciaire de Tinkoto.....	44
1	Caractéristiques des horizons indurés (cuirasse et carapace) des profils.....	44
2	Existence de discontinuité dans le profil TKA.....	45
3	Approche sur l'origine et l'évolution des matériaux du profil TKA.....	46
4	Conclusion.....	49
Chapitre IV : Conclusions et recommandations		
1	Conclusions générales.....	51
2	Recommandations	51
	Bibliographie.....	52

Abréviations

Ar : arène
ca : carapace
cu : cuirasse
éch : échantillon
fig. : figure
grav. : gravillonnaire
h.a : horizon argileux
h.g : horizon gravillonnaire
I. S. T. : institut des sciences de la terre
lith. : lithologie
mat. : matériaux
nbre. : nombre
part. : particule
prof. : profondeur
r.g : recouvrement gravillonnaire
subs. : substitution
tab. : tableau
U.C.A.D : Université Cheikh Anta Diop

Dédicaces

"Le laboureur attend le précieux fruit de la terre, prenant patience à son égard, jusqu'à ce qu'il ait reçu les pluies de la première et de l'arrière-saison". Ainsi, pour la réalisation de ce mémoire, fruit de deux années de travail, il m'a fallu de longanimité, des sacrifices, en dépit des conditions de vie les plus précaires (causées par les guerres fratricides de 1997 et de 1998-2000 dont le Congo – Brazzaville est victime), que je n'ai jamais connues, depuis que ma mère m'a mis au monde.

Je dédie ce mémoire à ma mère **Henriette Niombo**, aujourd'hui, certainement cachée dans les grottes de Moukosso afin d'être à l'abri des hordes qui ravagent la région depuis le déclenchement de la guerre de 1998 - 2000. Voilà trois ans que je n'ai pas de ses nouvelles. Le jour viendra où

Je dédie également ce mémoire :

A toute la famille élargie Mouandza Mbessi, ce mémoire est le notre.

A la famille Mananga Ma Mboungou (<<Mukutu kanda>> : le chef de famille de la lignée Mimandou).

A Son Excellence, Professeur **Pascal Lissouba**, Président du Congo de 1992 en 1997 qui m'a épargné du désastre que connaît le pays depuis juin 97, en déplaçant tous les étudiants de la Faculté des Sciences de l'Université Marien Ngouabi de Brazzaville, le 7 février 1995, vers les universités sœurs de Dakar, d'Abidjan et de Ouagadougou par suite du pillage systématique de celle-ci en décembre 1993.

A Mame Astou Diouf, pour sa commisération pendant les deux (2) années de tribulations que j'ai endurées au Sénégal.

A tous mes condisciples.

A toute la génération "Corsair" et à tous mes compatriotes résidant à Dakar, unissons-nous afin de bâtir "la main dans la main" un Congo nouveau et moderne.

Remerciements

Le travail présenté n'a pu être réalisé que grâce à une collaboration avec de nombreux chercheurs de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (U.C.A.D) et l'IRD, que je tiens cordialement à remercier ici.

Je remercie Monsieur Jean Claude Parisot qui m'a accueilli au sein de son équipe du programme "Ressources Minérales" de l'IRD de Dakar. Il a su me transmettre son enthousiasme et sa passion pour la géochimie de surface. Il a également été pour moi un interlocuteur attentif ainsi qu'un correcteur exigeant et méticuleux. Merci pour cette vie de recherche qui s'ouvre devant moi aujourd'hui. Ma gratitude lui est sempiternelle

J'exprime ma gratitude et mon affection à Monsieur Fary Diome, encadreur exigeant. Il a toujours su être un interlocuteur disponible et prodiguant de bons conseils. Il a eu la lourde tâche de corriger ce manuscrit depuis son stade embryonnaire jusqu'à sa maturité. Je lui serai toujours reconnaissant.

Je remercie Mme Isabelle Niang Diop, chef de Département de Géologie de l'U.C.A.D de Dakar, pour son accueil chaleureux lorsque je suis arrivé au département. Je la remercie davantage pour tous ses encouragements moraux durant les deux années sombres, que j'ai passées au Sénégal.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Monsieur Raphaël Sarr, Maître de Conférences, (U.C.A.D), d'avoir bien voulu accepter de présider mon jury, mais aussi d'apporter des corrections pour l'amélioration de la qualité de ce travail. Et à Monsieur Papa Malick Ngom, Maître de Conférences, (U.C.A.D), d'avoir accepté de participer à ce jury.

Je ne saurais oublier l'aide de Gineste Cedrix pour tous les travaux de laboratoire que nous avons effectués ensemble.

Je remercie également Ndao, technicien au laboratoire du Microscope électronique à balayage pour sa disponibilité et son caractère serin à répondre à toutes mes questions pertinentes de manière lucide.

Je remercie les autorités actuelles du Congo - Brazzaville pour les efforts faits dans le paiement des bourses, malgré les difficultés que traverse le pays depuis deux ans. Ce qui m'a permis de payer ma scolarité et de soutenir mon mémoire dans la quiétude.

Enfin, je désire témoigner toute ma gratitude à tous mes collègues du laboratoire : Christian Batsimba, Rufin Safou, Crépin Louhoungou, Eric Mabilia, Haïssatou Nomokho, Awa Touré et les dernier venus Arnel Nkoumbou et Lamine Ndiaye mais aussi à Gislève, pour l'ambiance qui a régné durant le stage

"Que la paix et la grâce de mon Seigneur et Sauveur Jésus Christ soient avec vous." Je le rends infiniment grâce pour la santé, la vie et la protection qu'il m'a accordées pendant toute la durée de l'élaboration de ce document.

Résumé

Tinkoto est localisé au Nord de Kédougou (Sénégal oriental) La géomorphologie est dominée par les glacis cuirassés, notamment le moyen glacis.

L'étude de paramètres physiques, géochimiques, minéralogiques et l'or particulaire, du profil latéritique de moyen glacis (profil TKA) d'une épaisseur d'environ 11m montre une succession d'horizons : l'arène, l'horizon gravillonnaire (1m), l'horizon argileux (3m), la carapace (3m), la cuirasse (2m) et le recouvrement gravillonnaire (0.2m).

Les matériaux de ce profil présentent des discontinuités lithologique, géochimique et minéralogique entre l'arène et l'horizon gravillonnaire.

Le nombre des particules d'or par 100 kg d'échantillon est faible. On compte 4 à 98 particules / 100 kg d'échantillon. Le nombre des particules diminue de bas en haut. Les critères morphologiques d'or tels que : l'émoussé, la dissolution, le bord replié, etc., montrent aussi une évolution verticale croissante de haut en bas. La taille des particules diminue également de haut en bas avec une irrégularité d'augmentation dans l'horizon gravillonnaire. Ce qui met en exergue une discontinuité entre l'arène fine et l'horizon gravillonnaire.

L'existence d'une discontinuité majeure entre l'arène et l'horizon gravillonnaire a permis de montrer que la mise en place des matériaux du moyen glacis de Tinkoto s'est effectuée par étape. Les matériaux sus-jacents à l'arène fine ont subi un transport avant leur mise en place. Il n'y a donc pas relation verticale entre le substratum et les matériaux sus-jacents à l'arène. L'évolution morphologique et exoscopique de l'or et les teneurs de l'or particulaire du profil TKA montrent que l'or a été transporté. Il provient des altérations anciennes de protores minéralisés qui sont vraisemblablement des filons de quartz et des pegmatites signalés dans la zone.

Mots clés : Sénégal oriental, Tinkoto, glacis, profil latéritique, or, altération, granite.

Introduction

Le paysage de l'Afrique occidentale est dominé par la présence de vastes surfaces aplanies recouvertes par d'épais matériaux d'altération. Ces matériaux ne conservent généralement pas les signatures géochimiques et minéralogiques de la roche mère sous-jacente (Tardy *et al.*, 1988). Cela pose d'énormes problèmes à la prospection minière et à la compréhension de l'origine de la mise en place des matériaux d'altération.

Au Sénégal oriental, l'origine et la mise en place des matériaux d'altération sont diversement interprétées et les travaux antérieurs révèlent deux tendances : l'une en faveur de l'autochtonie (Giraudon, 1961 ; Wackermann, 1975 ; Blot *et al.*, 1976 ; Millot *et al.*, 1978) ; et l'autre en faveur de l'allochtonie (Lajoinie, 1964 ; Michel, 1973).

Par ailleurs, des études récentes effectuées conjointement par l'IRD et l'U.C.A.D dans un secteur représentatif, Tinkoto, situé au Nord de Kédougou, ont été faites sur des matériaux prélevés des vieux puits du BRGM. Un nouveau puits (TKA), a été creusé sur le moyen glacis pour de nouvelles études géochimiques, minéralogiques et pour l'étude de la forme et de la distribution de l'or particulaire.

Notre travail, se propose d'expliquer le processus de mise en place des matériaux latéritiques (origine et relation avec le substratum) du moyen glacis de Tinkoto.

Pour atteindre cet objectif nous avons fait une description lithologique des profils d'altération, des mesures des densités, la géochimie des éléments majeurs et en traces, la minéralogie, et l'étude morphologique et exoscopique des particules d'or. L'or est utilisé pour ses capacités (peu altérable, malléable) à conserver à long terme les traces de la mise en place des matériaux supergènes dans lesquels il est associé (Edou-Minko, 1988 ; Freyssinet, 1990 ; Parisot *et al.*, 1995 ; Bamba, 1996).

Le présent mémoire se compose ainsi de quatre (4) chapitres :

- au chapitre I, nous aborderons les généralités ,
- au chapitre II, les méthodes d'études ;
- au chapitre III, les résultats et la discussion ,
- au chapitre IV, les conclusions générales et les recommandations.

Chapitre I : Généralités

I Situation géographique

1- Localisation

Tinkoto (nom malinké, qui signifie " sous le palmier") est un village situé à 70 km environ au Nord de Kédougou. Il est compris entre les parallèles 12°55' et 12°56' Nord et les méridiens 12°07' et 12°08' Ouest (figure 1).

L'altitude moyenne du relief est de 280 mètres.

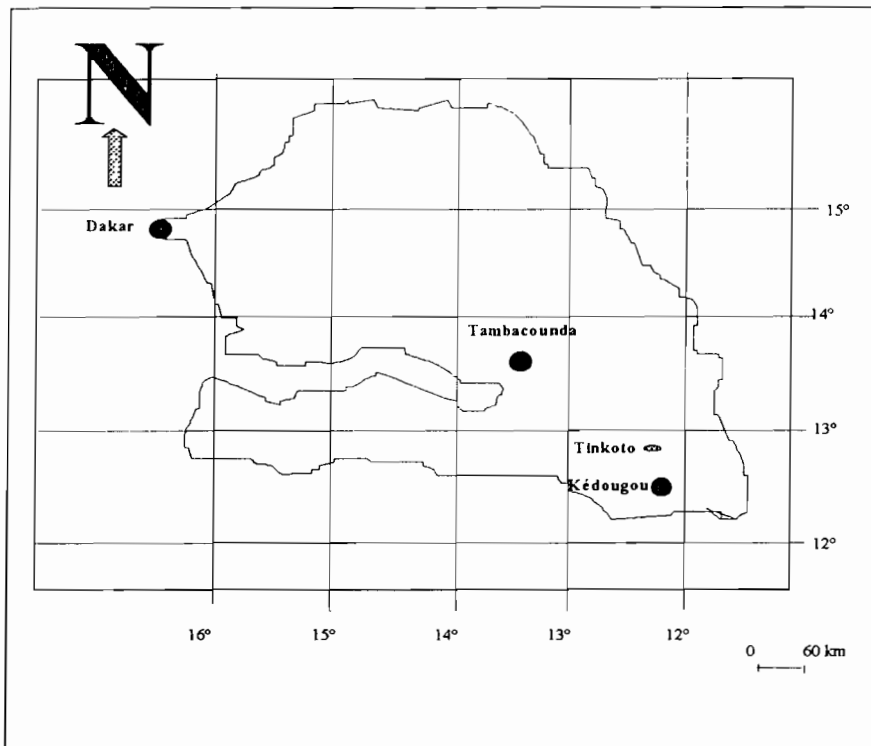


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude (Tinkoto et ses environs).

2- Climat

Le département de Kédougou se trouve en climat soudano-guinéen (Barreto, 1966 ; Leprun, 1979). Il est le plus arrosé des départements du Sénégal oriental avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1400mm et une température moyenne annuelle de 28°C (Chauvel, 1967 ; Leprun, 1979). Kédougou est caractérisé par un climat à saisons contrastées avec une longue saison sèche de 7 mois (de novembre en mai), et une courte saison humide (de juin en octobre). Ces deux dernières années, il a plu dès le mois de mai et les pluies se sont prolongées jusqu'en novembre.

3- Hydrographie

Le réseau hydrographique de Kédougou est dominé par le fleuve Gambie et ses affluents dont le Niokolo-Koba. Tinkoto est soumis principalement au régime du Niokolo-

Koba et de ses affluents (Giraudon, 1961) L'écoulement de Niokolo-Koba est temporaire, il tarit pendant la saison sèche

4- Végétation et faune

La végétation est caractérisée par une savane boisée avec de hautes herbes comportant de nombreuses variétés ligneuses dont *Daniella oliveri*, *Isobarlina*, *Parkia biglobosa* (Leprun, 1979). La faune est riche : on y trouve des carnassiers (lion, panthère, hyène, chacal, civette), des herbivores et omnivores (porc-épic, phacochère, biche, koba, écureuil, etc.).

II- Cadre géologique

1- Géologie régionale

Le craton Ouest africain, est composé de plusieurs unités structurales : la dorsale de Reguibat, la dorsale de Man, la boutonnière de Kédougou-Keniéba. Ces unités sont en certains endroits recouvertes par les formations sédimentaires des bassins de Taoudéni, de Tindouf et de la Volta (Bessoles, 1977) (figure 2).

La boutonnière de Kédougou-Keniéba a été affectée par une série des déformations, le Birimien notamment dans sa phase éburnéenne entre 2045 et 1600 millions d'années. Les formations birimiennes présentent un ensemble plissé et métamorphisé où on distingue des roches volcaniques basiques et neutres et des roches sédimentaires (schistes, cipolins, etc.) (Bessoles, 1977). Ces roches sont affectées par des intrusions granitiques (syntectoniques et post tectoniques). On distingue trois séries dans les formations métamorphiques : la série de Mako, la série de Dialé et la série de Daléma (Bessoles, 1977) (fig.3).

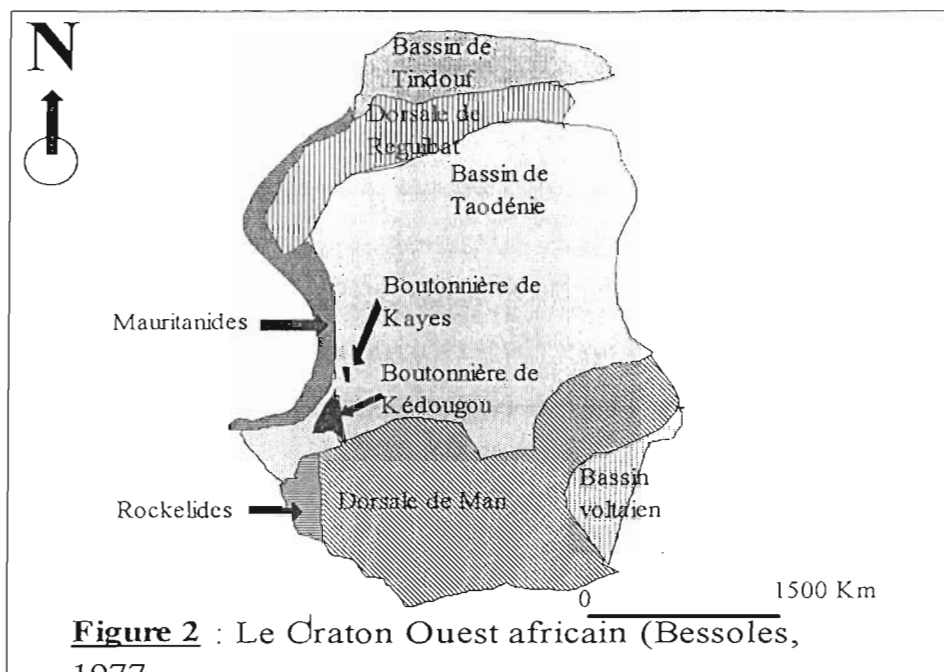


Figure 2 : Le Craton Ouest africain (Bessoles, 1977)

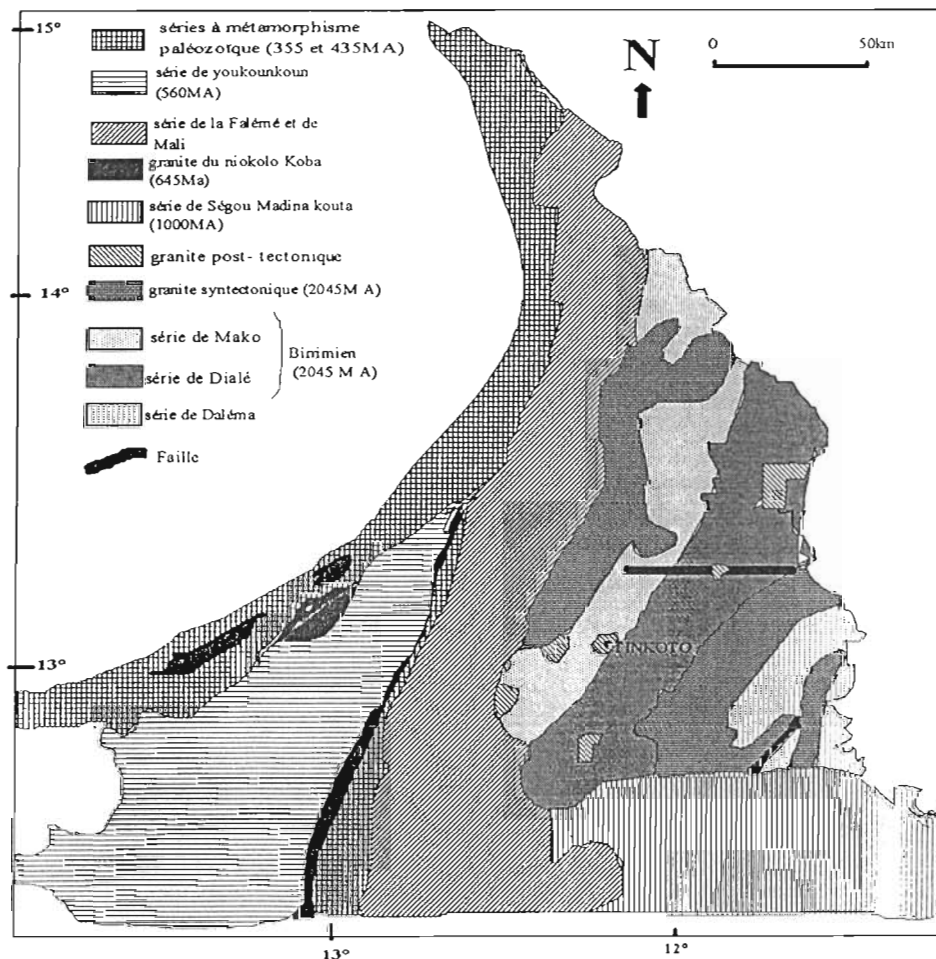


Figure 3 : Les formations de la série birimienne dans le secteur de Kédougou (Bassot, 1966)

2- Géologie locale

La zone d'étude est située dans la série de Mako qui est caractérisée par des coulées de basaltes en pilow, des dolérites, des andésites et des rhyolites associées à des pyroclastites

interstratifiés avec des roches volcano-sédimentaires et sédimentaires (Ngom, 1995). Ces roches sont recoupées par des formations postérieures constituées de sills et de dykes de gabbros, de péridotites, de pegmatites et de filons de quartz.

On trouve également des tufs, des plutons granitiques syn et post tectoniques. Parmi lesquels le granite post tectonique à biotite et à hornblende de Tinkoto (Giraudon, 1961 ; Lajoinie, 1964). Ce granite mis en place sous forme de massif circonscrit est ceinturé par de roches vertes qui ont subi un métamorphisme de faible degré (Giraudon, 1961 ; Lajoinie, 1964) (fig.4). Il est dissimulé en certains endroits par des formations latéritiques cuirassées.

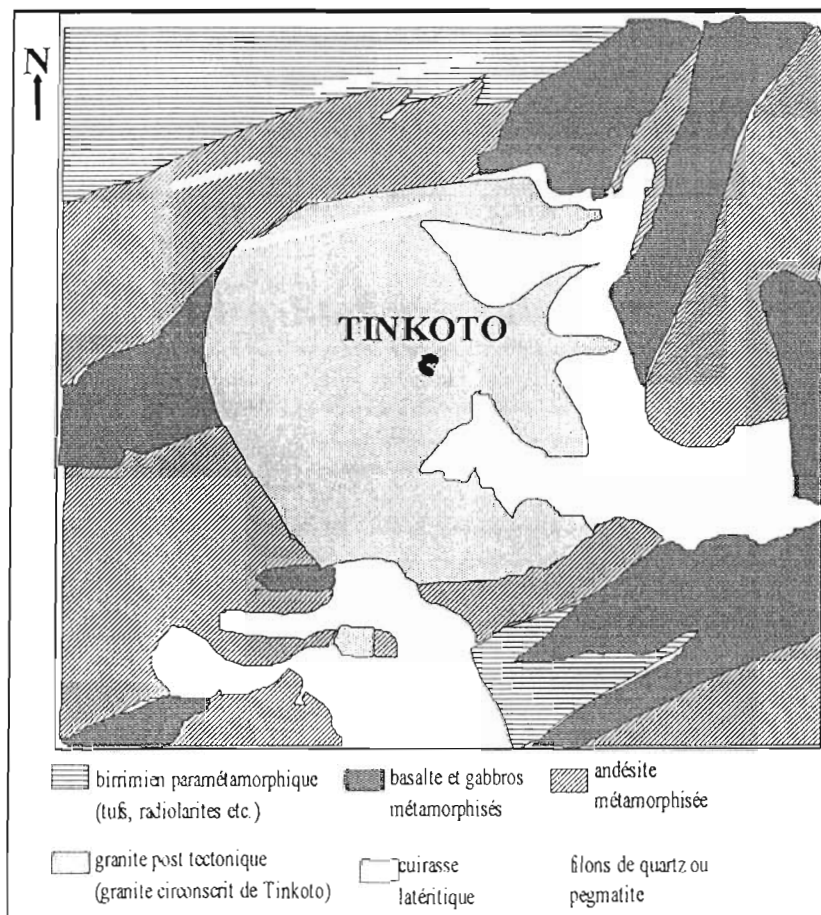


Figure 4 : Géologie de la zone d'étude (Tinkoto et ses environs)
(extrait de la carte géologique du Sénégal au 1 / 200.000).

III- Cadre géomorphologique

1-Géomorphologie régionale

L'Afrique de l'Ouest est caractérisée par la présence de plusieurs générations de surfaces d'aplanissement cuirassées, distinctes les unes des autres par la période de mise en place et la nature chimique de leurs constituants. Ces surfaces peuvent être subdivisées en deux grands groupes

— les surfaces essentiellement alumino-ferrugineuses qui ont été mises en place au Jurassique, au Crétacé et à l'Eocène inférieur. Ce sont respectivement, la première surface encore appelée surface de Labé, reconnue dans le massif du Fouta Djallon où elle ne subsiste que sous forme de lambeaux perchés à 1150m d'altitude ; la deuxième surface ou surface Dongol Sigon, située entre 850 et 1000m d'altitude, subsiste entre le Fouta Djallon et le Plateau Madingue. Et la troisième surface ou surface de Fantofa, située entre 550 et 650m d'altitude. Elle est largement développée dans le Fouta Djallon et mieux conservée dans le Sud-Est du Plateau Madingue (Michel, 1973) (figure 5).

— les surfaces essentiellement ferrugineuses qui sont les glacis mis en place au Quaternaire. Entre ces deux types de surfaces, on a la surface intermédiaire, mise en place au Pliocène. Cette surface intermédiaire est largement représentée dans le Fouta Djallon et dans le Plateau Madingue ; au Sénégal oriental, elle se présente sous forme de surface relique.

Les glacis sont des surfaces planes et peu inclinées (Michel, 1973 ; Viers, 1976) qui se forment dans les régions tropicales à saison sèche (Michel, 1973 ; Grandin, 1976). On distingue les haut, moyen et bas glacis. Les haut et moyen glacis se différencient nettement du bas glacis par le fait qu'ils sont toujours cuirassés. Ainsi, à Kossanto (Sénégal oriental), quelques lambeaux du moyen glacis surmontent les schistes argileux et tuffacés (Michel, 1973).

2- Géomorphologie locale

A Tinkoto, de vastes glacis cuirassés masquent la roche saine et / ou les arènes. Des lambeaux très festonnés du haut glacis s'élèvent au-dessus du moyen glacis. Les deux niveaux se raccordent généralement par des pentes douces.

Le modelé est dominé par des glacis, notamment le moyen glacis qui s'y trouve plus représenté que le haut glacis (fig 6 a) (Beauvais *et al.*, 1999). Ces glacis surmontent l'essentiel du granite circonscrit de Tinkoto. On trouve également des collines isolées des roches vertes affleurantes (fig 6a), des dépressions périphériques les séparent des glacis (fig.6b), et une relique de la surface intermédiaire (Labassala) qui est le point le plus élevé avec une altitude de plus 280 mètres (fig 6).

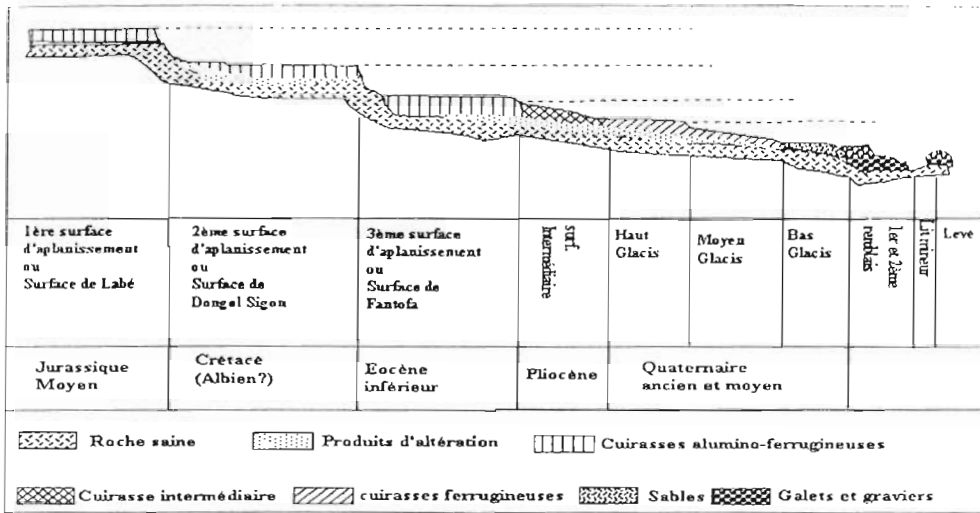


Figure 5 : Différentes surfaces d'aplanissement de l'Afrique de l'Ouest (Michel, 1973)

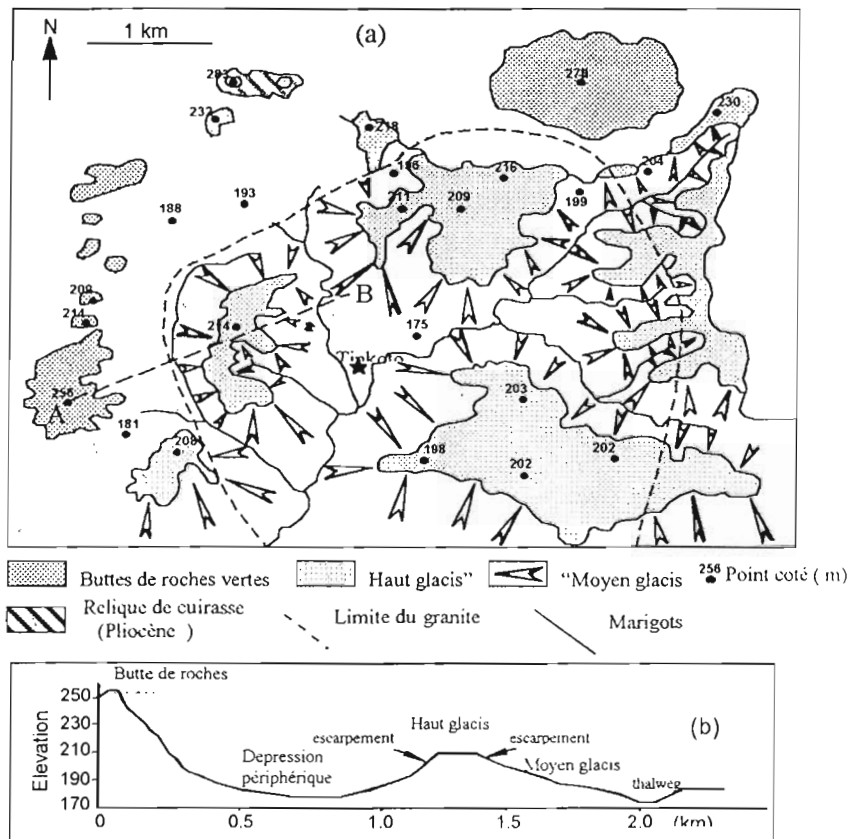


Figure 6 : Géomorphologie de Tinkoto et ses environs (Beauvais *et al.*, 1999)

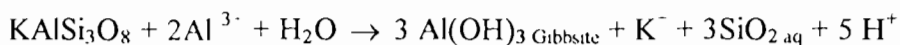
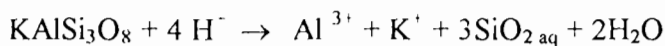
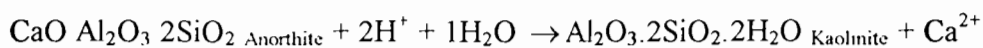
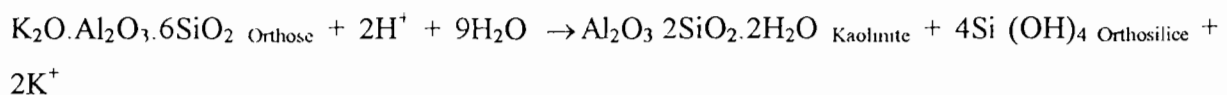
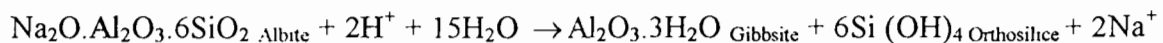
IV- Rappels sur les processus de latéritisation

1- L'altération latéritique

L'altération latéritique dans les régions intertropicales humides se manifeste par une élimination totale précoce des alcalins et alcalino-terreux, et une élimination partielle du silicium, puis par une accumulation relative ou absolue du fer, de l'aluminium et du titane dans les formations résiduelles (Lelong, 1967 ; Delvigne, 1965). L'altération latéritique est aussi fonction de la nature de la roche mère (Duchaufour, 1977 ; Leprun, 1979, Pomérol et Renard, 1989).

Le profil latéritique ou profil d'altération est l'ensemble des faciès qui se succèdent de bas en haut entre la roche mère saine et la surface du sol. Son épaisseur varie selon la région, le climat et la nature de la roche mère. Pour des différentes roches soumises pendant la même durée d'altération, celle-ci évolue plus vite aux dépens des roches basiques (Leprun, 1979 ; Nahon, 1976). Le profil latéritique est plus épais sur roche basique que sur roche acide (Leprun, 1979).

Le principal processus de l'altération latéritique est l'hydrolyse. L'eau agit par ses propres constituants (H_2O , H^+ , OH^-) et par les substances dissoutes qu'elle contient et qui, à des degrés divers, sont susceptibles d'attaquer les roches et de solubiliser leurs minéraux (Bonifas, 1959). Sous l'effet de l'eau et en fonction de la topographie, les minéraux primaires de la roche mère s'altèrent et libèrent les éléments chimiques (Fe, Al, Ti, Na, Mg, Ca, Mn, Si, K, etc.). D'une part, ces éléments se réorganisent pour former des minéraux secondaires transformés ou néoformés : hydrolysats (d'aluminium, de fer, de titane, de manganèse), argiles (kaolinite, illite, smectites, montmorillonite), quartz. D'autre part, ils sont soit évacués hors du profil, soit s'accumulent dans le profil (fig. 7). A titre d'exemple nous présentons les équations de dissolution de feldspaths. Les phénomènes de dissolution et de néoformation varient selon la position topographique des profils (fig. 7). On constate que les alcalins et alcalino-terreux sont éliminés ainsi qu'une partie de Si alors que Al se combine à Si restant pour former de nombreuses phases minérales (kaolinite, gibbsite) (Nahon et Merino, 1996 ; Delvigne, 1998).



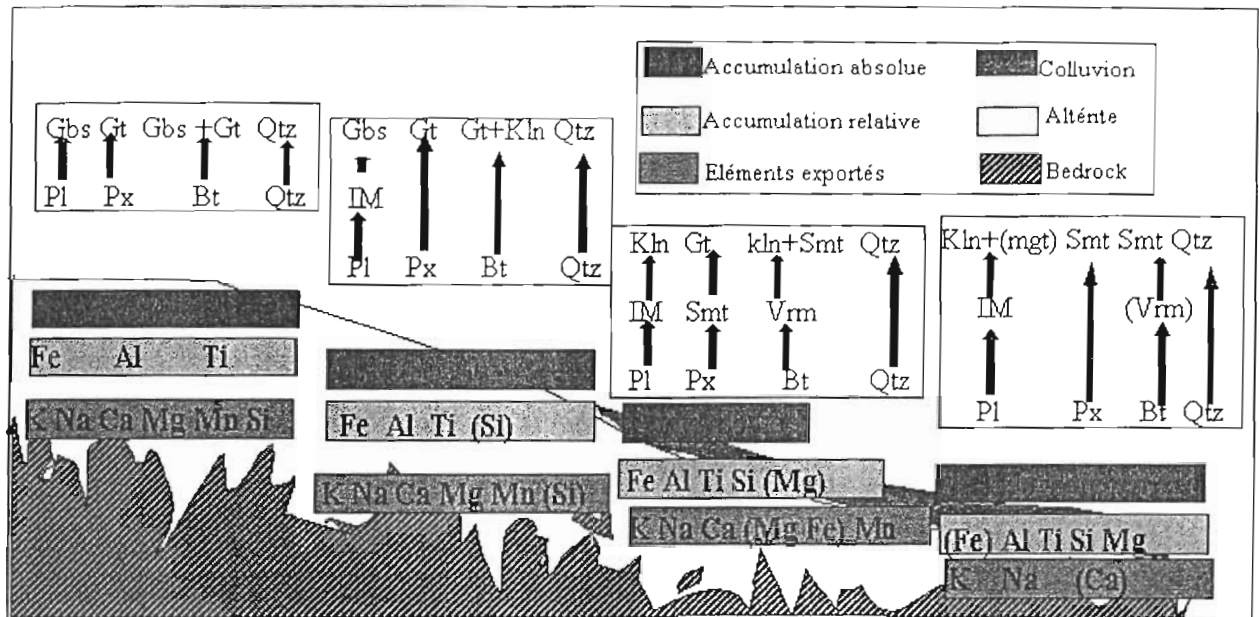


Figure 7 : Distribution des accumulations et des pertes d'éléments dans une toposéquence développée sur un matériau latéritique provenant de l'altération chimique d'une roche mère composée de plagioclase (Pl), de pyroxène (Px), de biotite (Bt), et de quartz (Qtz). Ces minéraux sont remplacés par les produits secondaires : gibbsite (Gbs), goethite (Gt), minéral isotrope (IM), kaolinite (Kln), un minéral du groupe smectite (Smt), magnétite (Mgt) et vermiculite (Vrm) (Delvigne, 1998).

Dans la gamme d'éléments majeurs et traces libérés par l'altération des minéraux, certains éléments se caractérisent par des évolutions géochimiques similaires traduites par des corrélations positives significatives, tels que le fer, le cuivre, le chrome, le vanadium. D'autres par contre, montrent des évolutions géochimiques antinomiques, traduites par des corrélations négatives, le strontium et le fer (Blot *et al.*, 1973 ; Mosser, 1980 ; Ambrosi, 1984 ; Mazaltarim, 1989 ; Parisot, 1989 ; Sanfo, 1994 ; Bamba, 1996).

Au cours de cette altération, les minéraux primaires sont remplacés de bas en haut par les minéraux secondaires qui préservent les contours des grains originaux et / ou les clivages. On parle alors de pseudomorphose. La préservation des textures et structures de la roche mère (schistosité, structure sédimentaire et fossiles) dans la saprolite a été également soulevée par Nahon et Merino (1996) dans les altérites de l'Afrique de l'Ouest et du Brésil. La formation du profil d'altération induit plusieurs phénomènes parmi lesquels, la formation des macrovides et microvides, de nodules et de concrétions ferrugineuses, de cutanes, la corrosion des grains de quartz (Nahon, 1976 ; Tardy, 1989, Delvigne, 1998).

Nahon (1986) et Tardy (1991) montrent que les matériaux latéritiques se caractérisent par une accumulation des oxyhydroxydes de fer (goethite FeOH ; hématite $\cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), de manganèse (pyrolusite $\cdot \text{MnO}_2$), et d'aluminium (boehmite AlO(OH) , gibbsite $\cdot \text{Al(OH)}_3$) dans les horizons indurés en haut des profils, et une accumulation des minéraux siliceux (quartz $\cdot \text{SiO}_2$) ; kaolinite ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$) en bas des profils.

L'altération chimique est également à l'origine des accumulations des métaux (Al, Fe, Ni, Co, Au, Cu Pb, Mn, diamant) sous forme de gisement exploitable, donc d'intérêt économique selon le type de protore.

2- Le cuirassement

Le cuirassement, c'est l'induration par les oxydes et hydroxydes de fer et / ou d'aluminium des roches saines ou déjà altérées. De façon générale, les cuirasses se forment dans un environnement à saisons contrastées (Leprun, 1979 ; Tardy, 1991).

Dans le cas d'une évolution *in situ* des matériaux latéritiques, la cuirasse située au sommet des profils révèlent, d'après ses aspects macromorphologiques (macroporosité, densité, épaisseur), la nature de la roche parentale (Wackermann, 1975 ; Nahon *et al.*, 1979 ; Leprun, 1979 ; Delvigne, 1998).

Une cuirasse formée sur roche acide granitique se caractérise par une macroporosité très développée (présence de tubules millimétriques à centimétriques, vacuoles), une faible densité , une épaisseur d'environ 3 m et par la présence de nombreux grains de quartz de forme irrégulière. Une cuirasse formée sur roche basique se caractérise par une macroporosité marquée surtout par des alvéoles, de forte densité et par une épaisseur supérieure de 3m. Sur une roche sédimentaire, la cuirasse peut conserver les figures sédimentaires.

Les cuirasses diffèrent également du point de vue de la composition chimique et minéralogique selon la nature de la roche originelle. Les cuirasses sur roches granitiques et celles sur schistes sont souvent caractérisées par la présence de quartz accompagné d'un cortège d'éléments traces à fortes teneurs en Si, Ti, Zr et Ce pour le granite et Si, Mg, K, Sr, Ba et Zr pour les schistes. Celles sur roches basiques se caractérisent par des teneurs élevées de Fe, V, Co, Cr, Zn, Cu et Sc. Les cuirasses sur amphibolites sont riches en Fe, Ti, Mn, V, Cu, Sc, et Nb. Celles sur tufs se caractérisent par des teneurs élevées de Mn, Ti, V, Cr, Zn, Cu, Sc et Ce (Millot *et al.* , 1978 ; Mosser, 1980 ; Mazaltarim, 1989)

3- L'or dans les environnements supergènes

L'or, peu altérable et malléable, enregistre dans ses états de surface et la forme de ses grains, une partie de l'histoire des processus physico-chimiques des matériaux supergènes dans lesquels il a évolué L'or des matériaux supergènes renseigne également de façon assez

précise sur son origine et son transport d'une part, et sur les conditions de mise en place (origine, évolution et relations des matériaux supergènes avec le substratum) de matériaux supergènes auxquels il est associé, d'autre part

Toutefois son comportement dans les environnements latéritiques (dispersions mécanique et géochimique, relations avec les oxyhydroxydes de fer et le quartz) est fonction de plusieurs facteurs, notamment de la nature de la minéralisation primaire, des mécanismes d'altération, de la distance à la source, de la proximité à l'océan et des conditions physiques et chimiques qui l'ont préalablement libéré de la gangue des minéraux comme le quartz et les sulfures (Freyssinet, 1990 ; Stoffregen, 1986 et Recoche, 1989 *in* Freyssinet, 1990 ; Colin, Zeegers et Leduc, 1991 *in* Dominique, 1993 ; Bamba, 1996). En effet, les marques de déformation mécaniques et chimiques (émoussé, dissolution, stries, replis, déformation des bords) apparaissent et s'accroissent d'autant plus que la distance du transport à la source augmente. Le bord des particules initialement très irréguliers dans les particules primaires se déforment et deviennent réguliers, les bords anguleux se transformant en bords arrondis. La taille diminue aussi d'autant plus que la distance à la source augmente et l'or se débarrasse des oxyhydroxydes de fer et du quartz au cours du transport (Macharias, 1970 ; Hérail *et al.*, 1999).

L'or, une fois libéré de sa minéralisation primaire, peut être transporté soit chimiquement des colloïdes, complexes chlorurés (AuCl_4 , AuCl_2 , AuClOH) ou complexes bithiosulfatés [$\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$] (Webster et Mann, 1984 et Webster, 1986 *in* Benedetti, 1989) soit mécaniquement sous forme de particules. En milieu acide oxydant riche en chlorures, la mobilité de l'or est contrôlée par le complexe AuCl_4 et en milieu moins riche en chlorure, par les complexes AuCl_2 et AuClOH . Dans un environnement oxydant sulfaté à pH neutre à alcalin, la mobilité chimique de l'or est contrôlée par la stabilité des complexes thiosulfatés [$\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$]. Il est nécessaire de préciser que l'altération géochimique est le premier moteur de la dispersion mécanique de l'or. La dissolution s'effectue d'abord à partir des joints des grains et permet de libérer l'or de la gangue. Les particules plurigranulaires se divisent en particules monogranulaires, micrométriques, ce qui permet aux fluides altérants de les transporter mécaniquement

Différents types morphologiques de particules d'or sont ainsi définis dont la détermination est basée principalement sur la forme des grains, l'allure des contours, l'état des bordures (repliées ou plates), l'état de surface (grumeleuse, présence de puits de dissolution, émoussée, rugueuse (Edou-Minko, 1988 ; Freyssinet, 1990 ; Bowel *et al.*, 1991 *in* Dominique (1993) ; Sanfo (1994) ; Bamba (1996)).

Chapitre II :

Méthodes d'étude et d'échantillonnage

I Sur le terrain

1 Description lithologique et échantillonnage des puits

Avant de décrire la lithologie de chaque puits on a mesuré ses coordonnées géographiques avec un GPS et un altimètre. D'autres matériels tels que le marteau et la loupe ont servis à la description des matériaux. Au niveau du puits TKA, une description des déblais repartis en 23 tas (chaque tas représente un matériau creusé sur une profondeur de 0.5m) a été faite, suivie d'une description des matériaux *in situ*. Au niveau du puits Tenbr, seule la description lithologique *in situ* a été faite.

La subdivision des profils en différents horizons a été faite en considérant deux aspects majeurs : le degré d'induration du matériau (cela a permis de différencier la cuirasse de la carapace) et la structure des matériaux.

Après une description minutieuse des faciès de chaque puits, deux types d'échantillons ont été prélevés dans les différents faciès identifiés : des échantillons de 500g environ (11 dans le puits TKA et 8 dans le puits Tenbr) pour les analyses géochimiques, minéralogiques et physiques et des échantillons de 40kg (9) provenant des faciès représentatifs du puits TKA uniquement pour l'obtention de concentrés de batée.

2- La batée

Le principe de cette méthode est de concentrer par gravimétrie les minéraux lourds qui sont recueillis sous forme de concentré de batée. Pour notre travail, seules les particules d'or sont étudiées.

L'échantillon de 40 kg, prélevé au niveau des tas des déblais du puits TKA (seul ce puits a fait l'objet de la batée), est tamisé. On obtient deux fractions : le passant < 1mm et le refus > 1mm. Ces fractions sont ensuite pesées.

Le passant est débourbé dans une calebasse. L'eau contenant les surnageants est jetée après une suite de mouvements de rotation. L'épreuve est répétée plusieurs fois. Les particules d'or sont recueillies par gravimétrie avec les minéraux lourds : c'est le concentré de batée qu'on met dans un boîtier numéroté destiné pour différents usages en laboratoire. Le refus, après un concassage au mortier en fer subit le même processus que le passant jusqu'à l'obtention du concentré de batée

Les différentes étapes se résument dans la figure 8

II- En laboratoire

Avant tout travail de laboratoire, trois mottes de roche ont été prélevées de chaque échantillon de 500g pour les mesures physiques (densités apparentes et réelles)

Chaque échantillon a été ensuite malaxé et quarté. Le quartage permet de récupérer 100 à 150g d'échantillon qui seront broyés ($<100\mu_m$). C'est sur cet échantillon broyé que seront effectuées les analyses chimiques et minéralogiques (fig.9)

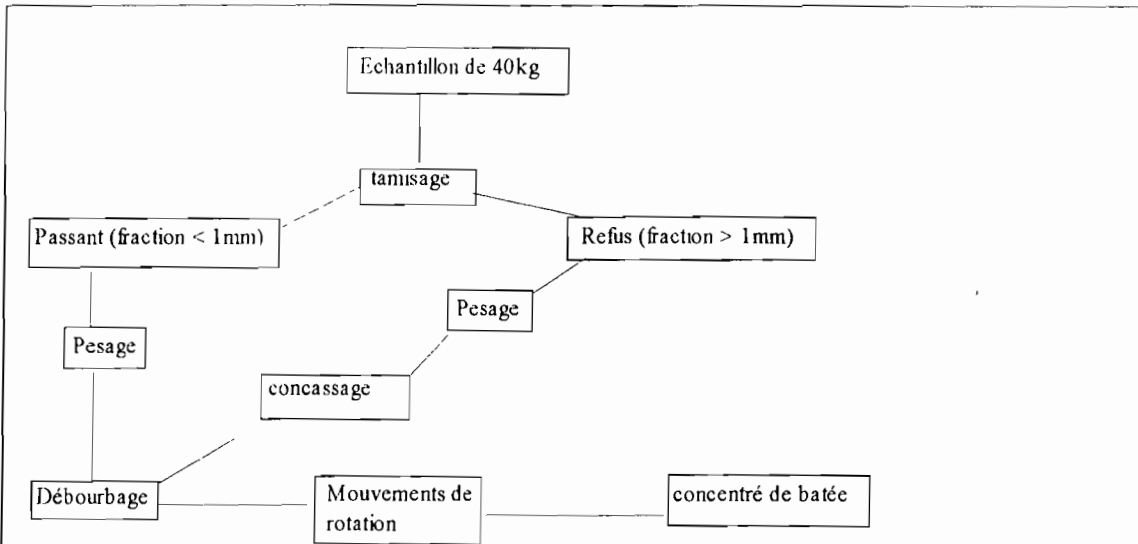


Figure 8 : Procédé de pré - traitement des échantillons destinés à la batée

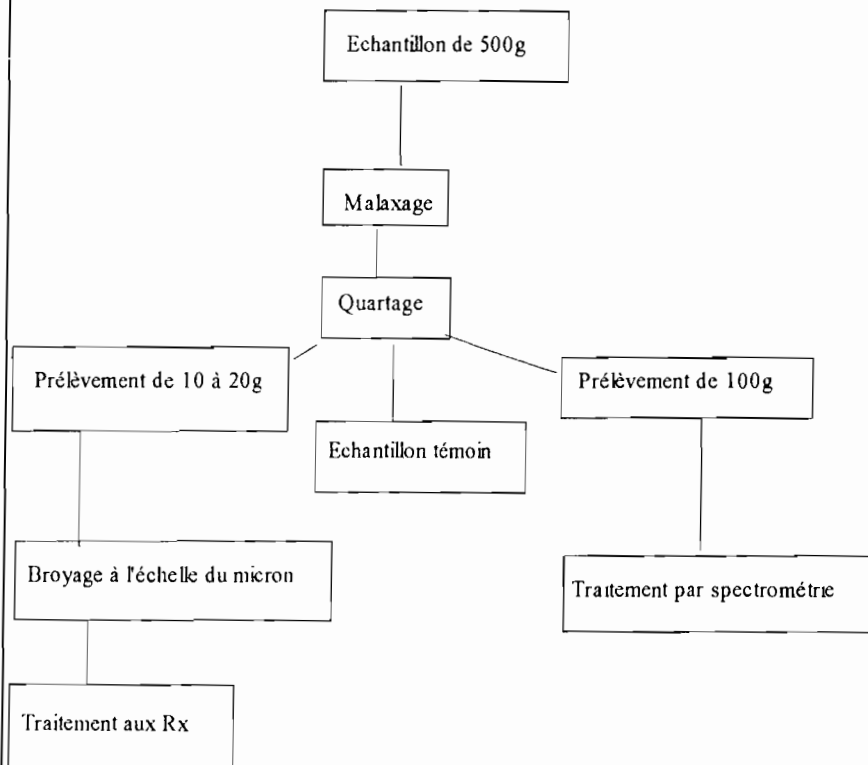


Figure 9 : Procédé de pré - traitement des échantillons destinés aux analyses chimiques et minéralogiques

1- Les mesures physiques

L'arrangement des particules du sol dans les agrégats et l'empilement des agrégats dans le sol laissent obligatoirement une certaine quantité de vides qui constituent la porosité du sol (Chamayou et Legros, 1989). Cette porosité totale du sol ne peut être calculée qu'en connaissant au préalable les densités apparente et réelle. Elle s'exprime par la relation :

$P_t \% = (1 - D_a / D_r) \times 100$; avec D_a = densité apparente ; D_r = densité réelle et P_t = porosité totale.

La mesure de densité revient à mesurer le poids de l'échantillon et son volume. Des pesées ont été effectuées pour déterminer les densités apparentes et réelles.

2- Les analyses chimiques

Les échantillons ont été analysés par diffractométrie de fluorescence aux Rx pour les éléments majeurs, par ICP pour les traces, et pour l'or, par coupellation et dosage par absorption atomique.

3- Les analyses par diffraction de rayons x.

Une analyse minéralogique de l'échantillon total a été effectuée par diffraction aux rayons x.

Le principe de cette méthode est basée sur la relation de Bragg : $n \lambda = 2 d \sin \theta$ avec $n=1$ et λ la longueur d'onde de l'anticathode (source de rayons x) utilisée par le laboratoire des formations superficielles de l'IRD Bondy. Ici, c'est le Cuka ($\lambda = 1.540560 \text{ \AA}$).

Les minéraux sont en effet caractérisés par des d spécifiques, en connaissant l'ensemble des d on peut retrouver le minéral correspondant à une série de pic donné, du diffractogramme. Le diffractogramme est un ensemble de raies obtenues suite à la réflexion de la lumière (Rx) par chacun des minéraux présents dans l'échantillon.

L'échantillon total est balayé entre $3^\circ \leq 2\theta \leq 70^\circ$. A partir de la mesure de l'angle θ de chaque pic de diffraction on peut calculer le d correspondant à chaque pic par la relation de Bragg : $n \lambda = 2 d \sin \theta$

Le dépouillement du diffractogramme consiste à indexer chaque raie (ou pic) par la valeur de d . A l'aide des abaques, on identifie le minéral correspondant en fonction des valeurs de d .

3-1 Taux de substitution du fer par l'aluminium dans la goethite

Le calcul de ce taux de substitution a été possible grâce à l'usage des méthodes de calculs mises au point par Norrish et Taylor (1961), Thiel (1962), Solymar (1970), Karpoff (1975) et Leprun (1979).

Le principe de la méthode consiste à trouver la quantité d'aluminium du diaspore ayant substitué le fer dans la goethite des matériaux latéritiques.

Le diaspore (AlOOH) et la goethite (FeOOH) forment une solution solide en fonction du taux de AlOOH. Ce taux varie linéairement entre la goethite ($d = 4.18 \text{ \AA}$) et le diaspore ($d = 3.99 \text{ \AA}$). On a donc la relation : $\% (\text{AlOOH}) = d \cdot a + b$. Les nombres 3.99 et 4.18 correspondent respectivement à la distance inter-réticulaire (d) réelle de la raie principale de diffraction du plan (110) du diaspore et à celle de la raie principale de diffraction du plan (110) de la goethite.

On détermine les coefficients a et b en résolvant le système de deux équations à deux

$$\text{inconnues : } \begin{cases} 100 = 3.99 \cdot a + b \\ 0 = 4.18 \cdot a + b \end{cases}$$

Les nombres 100 et 0, représentent les pôles de la solution solide AlOOH - FeOOH où nous avons respectivement 100 % et 0 % de AlOOH.

En résolvant le système on obtient $a = (-100/0.19)$ et $b = 2200$.

La formule (1) devient : $\% (\text{AlOOH}) = d \cdot (-100/0.19) + 2200$ ou

$$\% (\text{AlOOH}) = d \cdot (-100/0.19) + 2200 \quad (2).$$

La détermination de la distance inter-réticulaire réelle de la goethite (d_{rG}) implique plusieurs calculs. Pour cela, on utilise un minéral de référence, le quartz, pour corriger la distance inter-réticulaire mesurée de la goethite (d_{mG}) suite au décalage dû à l'appareillage.

Nous avons choisi de travailler avec le d réel du quartz ($d_{rQ} = 4.26 \text{ \AA}$) de la raie de diffraction du plan (100) qui est plus proche du d réel de la goethite ($d_{rG} = 4.18 \text{ \AA}$) (fig. 10).

Le d_{rQ} permet de trouver la valeur de l'angle θ réel du quartz (θ_{rQ}) par la relation de Bragg : $\lambda = 2 d_{rQ} \cdot \sin(\theta_{rQ})$ ou $\theta_{rQ} = \text{ARCSin}(\lambda / 2 d_{rQ})$. De même, l'angle θ mesuré du quartz (θ_{mQ}) est trouvé à partir de d_{mQ} par la relation $\theta_{mQ} = \text{ARCSin}(2 / d_{mQ})$.

Ensuite, on calcule la valeur de l'angle θ mesuré de la goethite (θ_{mG}) à partir de d_{mG} mesuré de la goethite (d_{mG}), c'est à dire celle qui est lue directement sur le diffractogramme (fig 10) par la relation suivante : $\theta_{mG} = \text{ARCSin}(2 / d_{mG})$

Connaissant θ_{mG} , θ_{rQ} et θ_{mQ} , on trouve la valeur de l'angle θ_{rG} par la relation suivante : $\theta_{rG} = \theta_{rQ} + (\theta_{mG} - \theta_{mQ})$.

Le drG est par la suite déduite par la relation $drG = \lambda / [2 \text{Sin} (\theta_{rG})]$.

Connaissant la valeur de drG de chaque échantillon, on calcule le taux de substitution du fer par l'aluminium en appliquant la relation (2) : $\% (\text{AlOOH}) = (drG) * (-100/0.19) + 2200$.

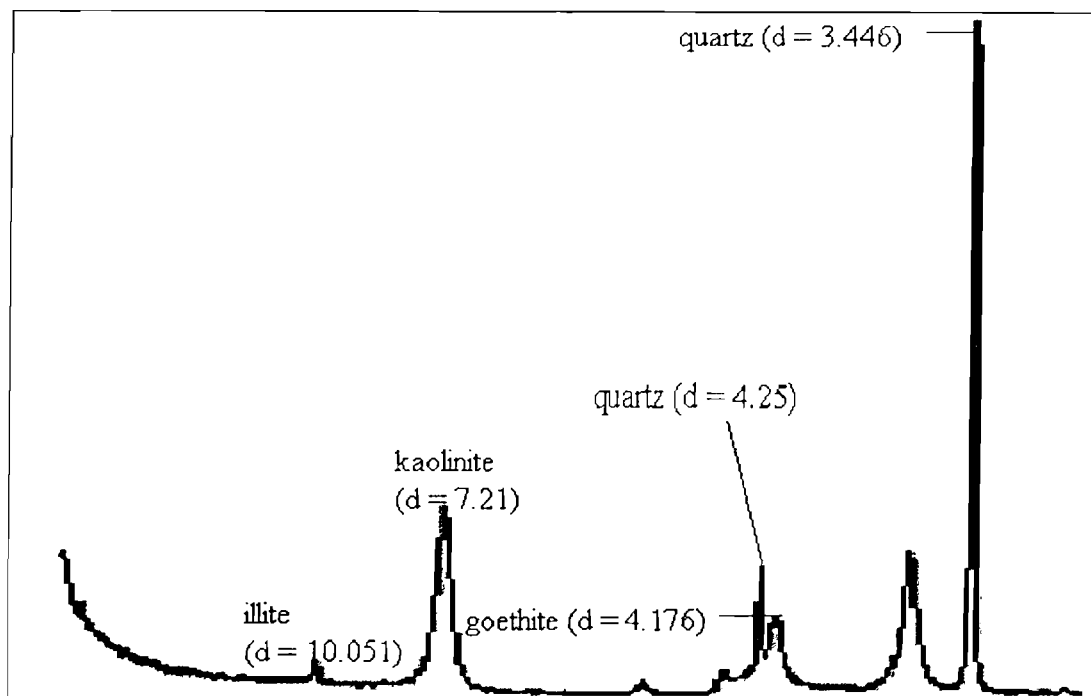


Figure 10 : Diffractogramme de l'échantillon TKA-10 (arène) du profil TKA.

3-2 Calcul des teneurs minéralogiques

Le but de ces calculs est de connaître les teneurs minéralogiques de chaque échantillon.

Pour ce faire la méthode la plus fréquemment utilisée pour les matériaux latéritiques tient compte des résultats obtenus par la diffraction des rayons x qui n'est qu'une analyse qualitative. Mais on ajuste ces résultats à l'aide des données des analyses chimiques (Leprun, 1979 ; Mosser, 1980). Ces analyses donnent les teneurs des différents éléments présents dans l'échantillon. En analysant chaque minéral identifié à la microsonde de Castaing, on détermine les teneurs des différents éléments présents dans le minéral. Dans notre travail, les teneurs des différents éléments dans le minéral ont été obtenues par les données de la littérature notamment des analyses faites par Deer *et al.*, 1961, Deer *et al.*, 1962 et Deer *et al.*, 1963.

Connaissant les teneurs de chaque élément dans l'échantillon et dans le minéral, il est alors possible de calculer le pourcentage (ou teneur) de chacune des phases minérales présentes dans l'échantillon, en formant autant d'équations qu'il y a d'inconnues (c'est à dire de minéraux).

Exemple de calcul des teneurs des minéraux de l'échantillon TKA-10, composé de kaolinite, de quartz, d'illite et de goethite (figure 10).

Les teneurs des minéraux (kaolinite, quartz, goethite et illite) se calculent à l'aide des teneurs en SiO₂, Al₂O₃, K₂O, et Fe₂O₃ dans l'échantillon et dans le minéral. Les teneurs estimées en SiO₂, Al₂O₃, K₂O, et Fe₂O₃ de ces minéraux tirées de Deer *et al.*, 1961 ; Deer *et al.*, 1962 et Deer *et al.*, 1963) sont présentées dans le tableau 1.

minéraux	kaolinite	quartz	goethite	illite
SiO ₂ %	45.46	98.1	-	48.36
Al ₂ O ₃ %	38.70	-	-	27.86
Fe ₂ O ₃ %	-	-	87.70	-
K ₂ O %	-	-	-	7.14

Tableau 1 : Les teneurs d'éléments (Si, Al, Fe, et K) dans les différents minéraux (Deer *al.*, 1961 ; Deer *et al.*, 1962 et Deer *et al.*, 1963).

Les teneurs de TKA-10 en ces éléments sont : 54.21 % de SiO₂ ; 19.85 % de Al₂O₃, 0.64 % de K₂O, et 43.73 % de Fe₂O₃ (tab. I, annexe 2).

Si l'on appelle X, Y, Z, et W les teneurs de kaolinite, de goethite, du quartz et d'illite dans l'échantillon TKA-10, on peut écrire le système d'équations ci-après :

$$\left\{ \begin{array}{l} 45.46X + 98.1Z + 48.36W = 54.21 \\ 38.70X + 27.86W = 19.85 \\ 92.9Y = 13.83 \\ 7.14W = 0.64 \end{array} \right.$$

La résolution de ce système de quatre équations à quatre inconnues donne les valeurs de X, Y, Z et W qui sont respectivement X = kaolinite = 44.81 % , Y = goethite = 14.88 % ; Z = quartz = 30.05 % et W = illite = 9 %

4- Concentré de batée

Chaque concentré de batée a été examiné à la loupe binoculaire pour le tri des particules d'or. Au total 131 particules ont été triées et visualisées au Microscope Electronique à Balayage (M.E.B) de la faculté des sciences et techniques de l'U.C.A.D de Dakar (Sénégal), pour des études morphoscopiques et exoscopiques

A l'ordinateur, le travail a consisté à mesurer la longueur (L) et la largeur (l) des particules pour déterminer l'élongation suivant la relation ($\frac{L}{l}$). La particule est d'autant plus allongée que le rapport ($\frac{L}{l}$) est plus grand que 1. La dimension des particules a été également estimée en calculant la valeur de ($\frac{L+l}{2}$).

Chapitre III : Résultats et Discussions

I Résultats

1 Introduction

Les travaux ont concernés deux puits. Le puits Tenbr, situé sur le haut glacis (fig. 6 et 11) est un ancien puits du BRGM "rafraîchi" jusqu'à 7.7 mètres. Le puits TKA de 11 mètres de profondeur, est situé sur le moyen glacis (fig.6 et 11) Il a été foncé en amont d'une zone d'orpillage. Le creusage du puits TKA a permis l'accès à un matériau frais pour les études géochimiques, minéralogiques et de l'or particulière

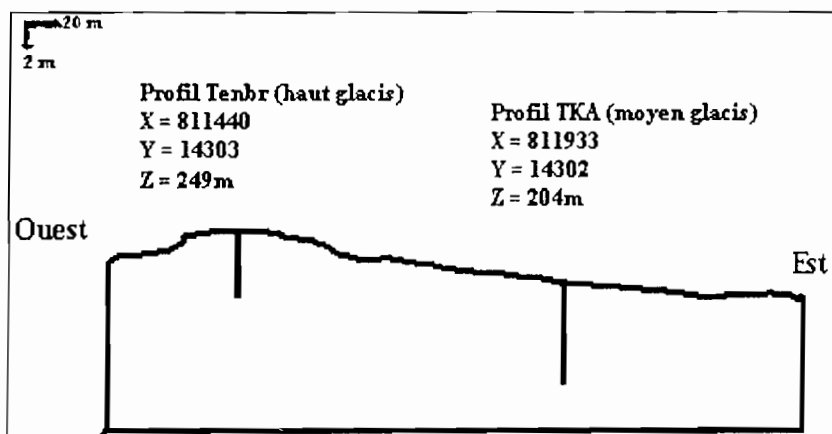


Figure 11 : Positionnement des profils sur la toposéquence.

2 Profil TKA

2-1 Description lithologique

2-1-1 Arène granitique (à partir de 9.30m et plus)

C'est un matériau friable de couleur ocre à blanchâtre composé de grains de quartz très abondants de forme variée (anguleuse, subarrondie), à éclat gras, dont la taille varie du millimètre à l'inframillimètre. Ils sont emballés dans une matrice blanchâtre très fine et argileuse ; leur surface est rugueuse

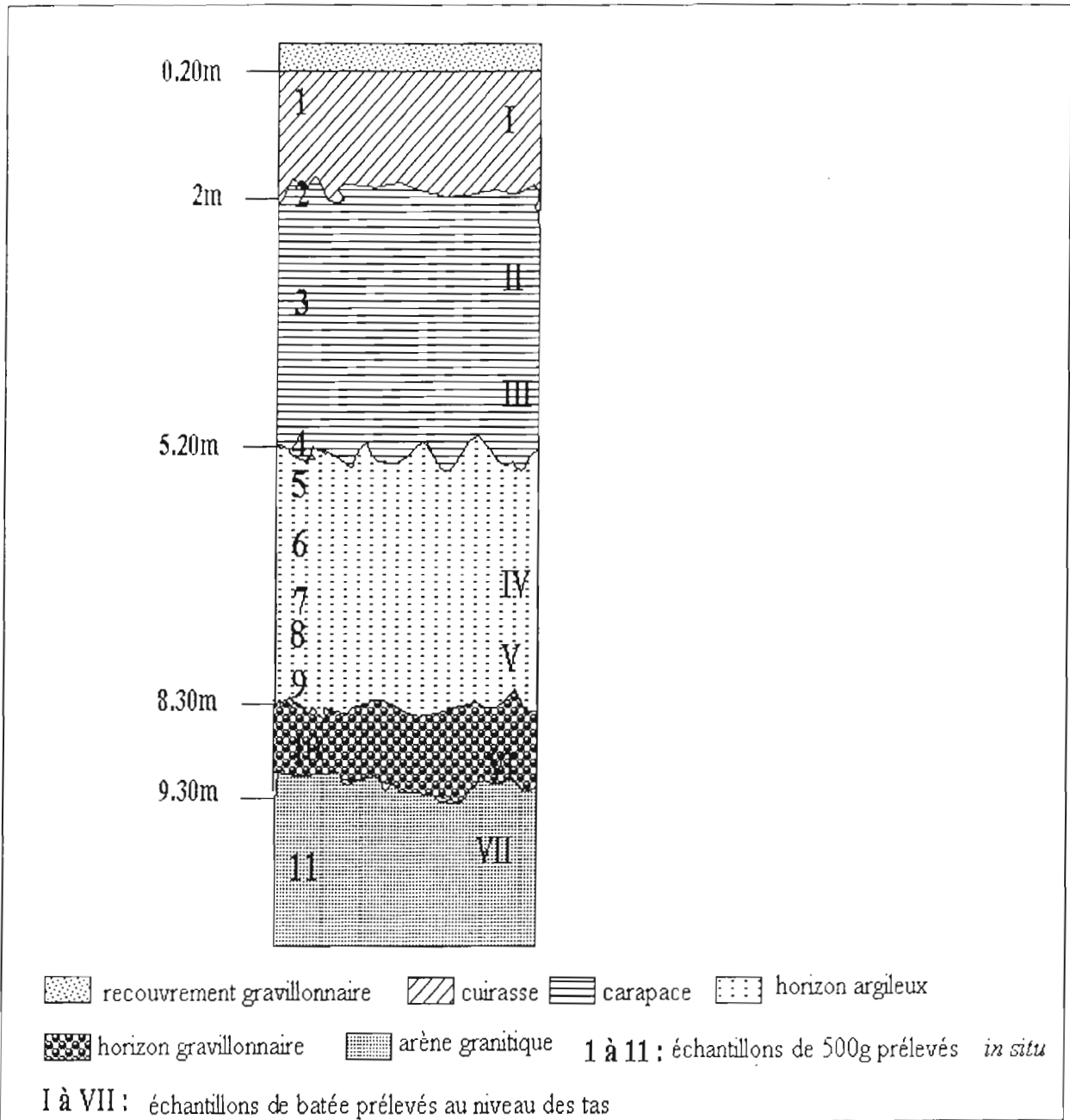
L'arène est également caractérisée par la présence de produits ocres qui entourent les produits blancs vers le sommet. Leurs limites sont diffuses avec le fond matriciel. En plus, il existe des alvéoles et de petites fissures imprégnées des produits rouges et violacés.

La limite entre l'arène et l'horizon gravillonnaire est irrégulière (fig. 12).

2-1-2 Horizon gravillonnaire (de 8.30m à 9.30m)

C'est un horizon caractérisé par des gravillons ferrugineux emballés dans une matrice argileuse de couleur blanche à ocre. Les gravillons sont de formes variées (arrondie, sub-

arrondie, anguleuse avec une surface lisse), de taille millimétrique à centimétrique. La cassure fraîche de ces gravillons montre un cœur brun et parfois jaune. On obtient une poudre rouge



lorsqu'on les écrase ce qui indique la présence de l'hématite. On y trouve également des grains de quartz de taille millimétrique à centimétrique.

Figure 12 : Lithologie du profil TKA

De plus, on trouve des cailloux décimétriques provenant de la cuirasse. Ils sont caractérisés par des vacuoles, des tubules larges de 2 à 3 cm et long de 5 à 7cm qui sont parfois colmatés par des produits blancs, ocre, rouges, et violets ; puis par de cutanes. Ces éléments de cuirasse se démantèlent et libèrent des gravillons ferrugineux. Dans certains cas,

les produits ocres et rouges présents dans leurs cavités s'indurent et s'individualisent en concrétions ferrugineuses bien arrondies.

Les gravillons et cailloux de cuirasse sont mal classés. La limite entre l'horizon gravillonnaire et l'horizon argileux tâcheté est également irrégulière.

2-1-3 Horizon argileux (de 5.20m à 8.30m)

C'est un matériau compact et très cohérent, non induré, de couleur rouge avec des tâches blanches, ocres et rouges. Il est caractérisé par des volumes indurés ocres à bruns, longs de 2 à 7 cm et larges de 1 à 3 cm, de forme irrégulière, à contour net. Le phénomène de concrétionnement est peu marqué. En certains endroits de l'horizon, les volumes ocres à bruns s'individualisent en des rares nodules ferrugineux à cœur brun. Ils sont en forme de fuseau et sont cassables à l'ongle. On y note également de rares cailloux d'éléments de cuirasses à 6.40 et à 7.50m qui ont les mêmes caractéristiques que ceux de l'horizon gravillonnaire. Les grains de quartz fissurés, des cavités remplies de produits rouges, violets, et ocres, de petites fissures remplies des produits rouges. Tous ces éléments sont emballés dans une matrice argileuse compacte et molle de couleur rougeâtre.

La limite avec l'horizon sus-jacent est irrégulière (fig.12). Une zone de transition a été définie entre 5.2m et 5.3m. Elle est caractérisée par un mélange des matériaux induré et mou et par de grandes tâches ocres à brunes indurées. Ces dernières sont longues de 3 à 7 cm et larges de 1 à 3 cm voire plus, de forme irrégulière, à contour net, entourés par des produits blancs qui sont probablement des argiles. Cette zone est considérée comme le niveau supérieur de l'horizon argileux.

2-1-4 Carapace (de 2m à 5.20m)

C'est un matériau compact induré facilement cassable au marteau et parfois à la main. La matrice est argileuse, de couleur ocre-jaune. Cet horizon renferme des éléments figurés : nodules ferrugineux (1 à 2 mm de diamètre), volumes ocres de grande taille (de 7 cm de long et 2 cm de large) et de forme très irrégulière à contour irrégulier et à limite diffuse qui cernent les volumes blancs, grains de quartz fissurés de taille inframillimétrique à millimétrique et anguleux à sub-arrondi bien émoussés.

La carapace est aussi caractérisée par la présence de cutanes, de tubules et d'alvéoles. Les tubules et les alvéoles sont soit remplies (totalement ou partiellement) par des produits tendres, blancs et rouges, soit vides. En certains endroits de l'horizon, les produits d'accumulation secondaire s'indurent et s'individualisent en nodules ferrugineux bien lisses et arrondis

Le passage de la carapace à la cuirasse est irrégulier. Une zone de transition a été également définie entre 2m et 2.20 m. Elle est caractérisée par un mélange de matériaux très indurés et moins indurés. Elle est considérée comme le sommet de la carapace

2-1-5 Cuirasse (de 0.20m à 2m)

C'est un matériau très induré, difficilement cassable au marteau, de couleur grise dans sa partie supérieure, rougeâtre au milieu et ocre dans sa partie inférieure. La matrice argilo-ferrugineuse très indurée cimente des nodules ferrugineux (de 1 à 2 mm de ϕ), des concrétions ferrugineuses (de $\phi < 1$ mm), des grains de quartz bien émoussés et ferruginisés, des produits ocres et blancs tendres moins abondants et des concrétions noires

On a également une macroporosité très importante dominée par les tubules centimétriques au bord desquels se développent de cutanes très épais (1cm environ) et des vacuoles millimétriques.

La cuirasse est nodulaire et vacuolaire. Le passage de la cuirasse au recouvrement gravillonnaire est brutal (figure12).

2-1-6 Recouvrement gravillonnaire (de 0m à 0.20m).

C'est un matériau meuble composé de gravillons ferrugineux de formes variées (arrondie, sub-arrondie, anguleuse) avec une surface lisse et de taille millimétrique à centimétrique et d'une matrice sablonneuse de couleur grise peu abondante.

2-2 Les mesures physiques

La densité apparente augmente de bas en haut avec une diminution dans l'horizon argileux. L'augmentation de l'arène à l'horizon gravillonnaire est brutale (tab. 2).

La densité réelle évolue dans le même sens que la densité apparente (tab. 2).

La porosité diminue de bas en haut avec des augmentations locales dans l'horizon argileux et dans la cuirasse. La diminution de l'arène à l'horizon gravillonnaire est brutale. On passe respectivement de 41,9 % à 34 % (tab. 2).

éch.	prof. (m)	horizons	DA	Dr	Pt (%)
1	0.75	Cuirasse	1.97	3.16	37.6
2	2	Cuirasse	2.04	3.04	32.7
3	3.85	carapace	2.02	2.86	29.4
4	5.2	carapace	1.95	2.89	32.3
5	6.2	h. argileux	1.72	2.79	38.1
6	7.15	h. argileux	1.61	2.62	38.5
7	7.6	h. argileux	1.74	2.63	33.8
8	8.2	h. argileux	1.87	2.79	32.9
9	8.8	h. gravillonnaire	1.86	2.82	34
10	10.2	arène	1.47	2.55	41.9

Tableau 2 : Mesures physiques du profil TKA

Grosso modo, les densités apparente et réelle apparaissent plus importantes dans les horizons indurés (carapace et cuirasse) et dans l'horizon gravillonnaire qui contient des gravillons et cailloux de cuirasse. La porosité apparaît cependant plus importante dans les horizons où la matrice argileuse ou sablo-argileuse est abondante (horizon argileux et arène). Elle augmente de façon brutale dans l'arène. Ce qui permet de distinguer nettement l'arène de l'horizon sus-jacent.

2-3 Évolution géochimique des éléments majeurs et en traces du profil

32 éléments au total ont été analysés (tab. I et II, annexe 2). Les éléments dont les teneurs sont inférieures au seuil de détection ne seront pas discutés ici. Parmi les éléments qui ont leurs teneurs supérieures au seuil de détection, seuls les éléments présentant des évolutions géochimiques significatives pour notre étude seront présentés et discutés.

2-3-1 Evolution géochimique d'éléments majeurs

Le fer augmente de bas en haut. Il présente cependant quelques irrégularités de teneurs caractérisées par des augmentations brutales et importantes dans l'horizon gravillonnaire et dans la partie supérieure de l'horizon argileux (fig. 13). Cet endroit de l'horizon argileux correspond à un faciès gravillonnaire sous forme de poche. L'aluminium augmente de bas en haut mais pas de façon régulière. On a une diminution brutale des teneurs de l'arène à l'horizon gravillonnaire. L'horizon gravillonnaire représente la moitié des teneurs de l'arène. Les valeurs passent de 20 % dans l'arène à 10 % dans l'horizon gravillonnaire (fig. 13 et tab. I, annexe 2). La silice quant à elle diminue de bas en haut.

Les alcalins et alcalino-terreux (K, Na, Ca, Mg) diminuent de bas en haut comme la silice. Mais on observe quelques irrégularités de teneurs dans l'horizon argileux et dans la cuirasse (fig. 13). La diminution des teneurs de l'arène à l'horizon gravillonnaire est brutale

Le diagramme triangulaire (fig. 14) montre que tous les échantillons sont situés au-dessus de la droite Fe₂O₃-kaolinite. Ils se rapprochent du pôle SiO₂. Ces échantillons se

révèlent plus riches en silice (SiO_2) qu'en d'autres oxydes (Al_2O_3 et Fe_2O_3) Seuls les deux échantillons de cuirasse semblent se rapprocher de la droite Fe_2O_3 -kaolinite et du pôle Fe_2O_3 mais ont leurs pourcentages en Fe_2O_3 inférieurs à 50 % (fig 14)

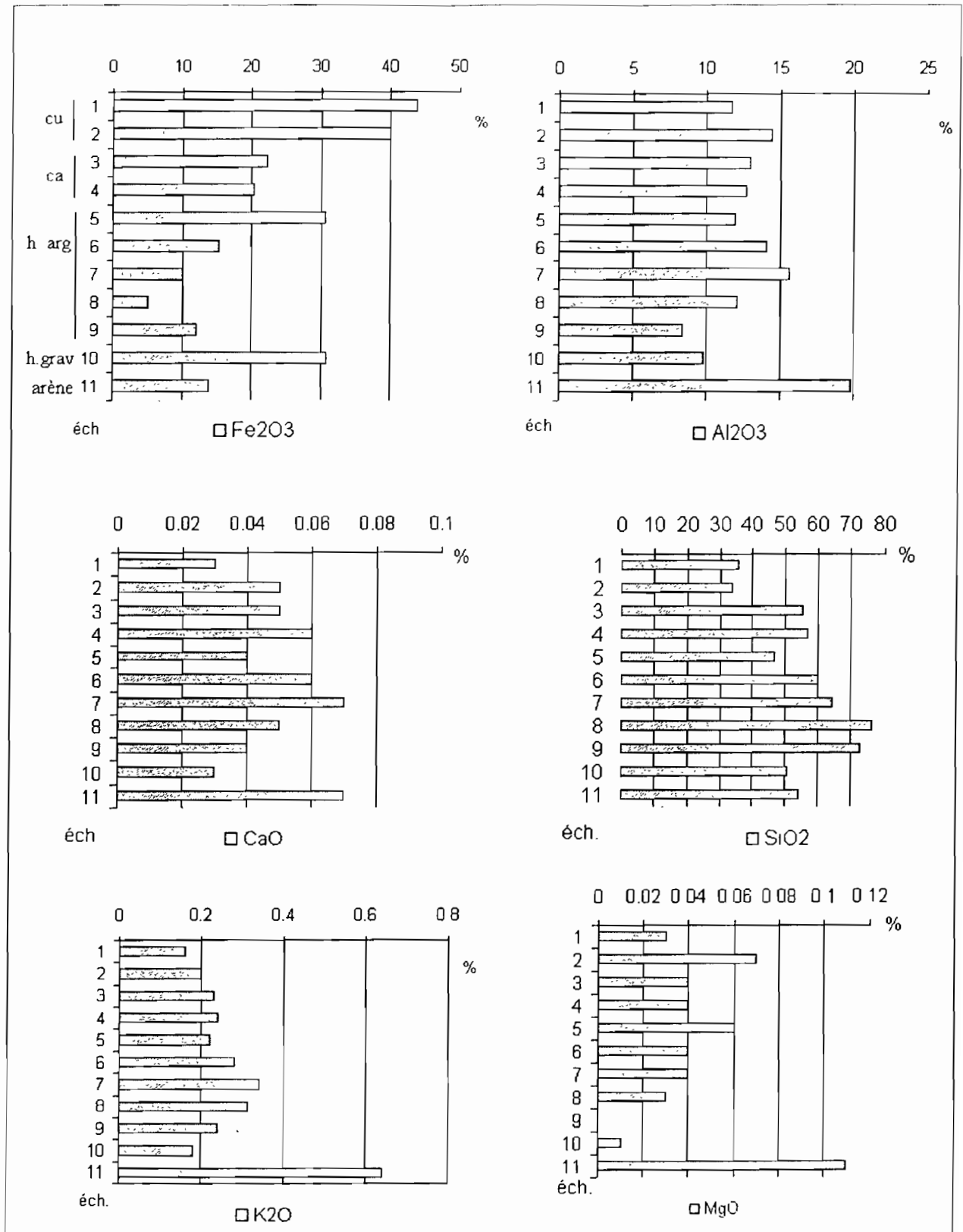
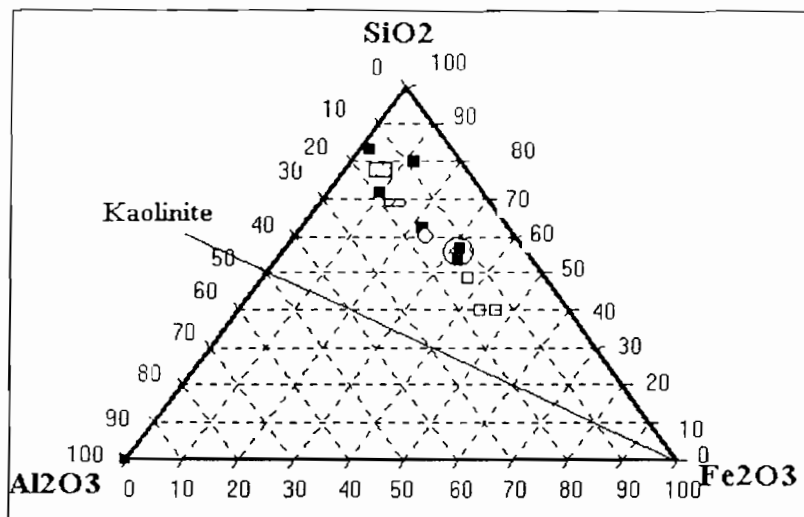


Figure 13 : Evolution géochimique d'éléments majeurs du profil TKA.



□ TKA-1 et TKA-2 (cuirasse), TKA-t (carapace) ■ horizon argileux
 ○ horizon gravillonnaire △ arène ● carapace □ granite sain

Figure 14 : Diagramme triangulaire exprimant la composition chimique d'échantillons du profil TKA

L'évolution géochimique des éléments majeurs montre que les teneurs des alcalins et alcalino-terreux sont plus fortes dans l'arène et faibles dans l'horizon gravillonnaire. Le fer montre une évolution géochimique contraire.

Le contraste très marqué des teneurs en Fe, Mg et en K entre l'arène et l'horizon gravillonnaire met en évidence une discontinuité géochimique majeure entre ces deux horizons.

2-3-2 Evolution géochimique d'éléments en traces

Les teneurs en Au, Cu, V, Cr et As augmentent globalement de bas en haut avec quelques irrégularités notables de teneurs marquées par des augmentations plus importantes dans l'horizon gravillonnaire et dans la partie supérieure de l'horizon argileux. Dans l'horizon gravillonnaire, l'augmentation de teneurs est brutale. Les teneurs en ces éléments chutent dans l'arène (fig 15). Le nickel reste presque constant mais présente ses fortes valeurs dans la cuirasse et dans le faciès gravillonnaire de l'horizon argileux.

La géochimie des éléments en traces met en évidence la discontinuité majeure entre l'horizon gravillonnaire et l'arène, déjà mise en évidence par la géochimie d'éléments majeurs ; et une discontinuité mineure qui serait localisée dans la partie supérieure de l'horizon argileux par l'augmentation brutale et importante de ces éléments.

La géochimie d'éléments majeurs et traces montre deux groupes d'éléments qui évoluent de façon contraire. Le groupe des éléments Fe, V, Cu, Cr et As dont l'augmentation des teneurs correspond aux endroits où ont été localisés les cailloux d'éléments de cuirasse. Le second est celui des alcalins et alcalino-terreux dont les teneurs diminuent en ces endroits.

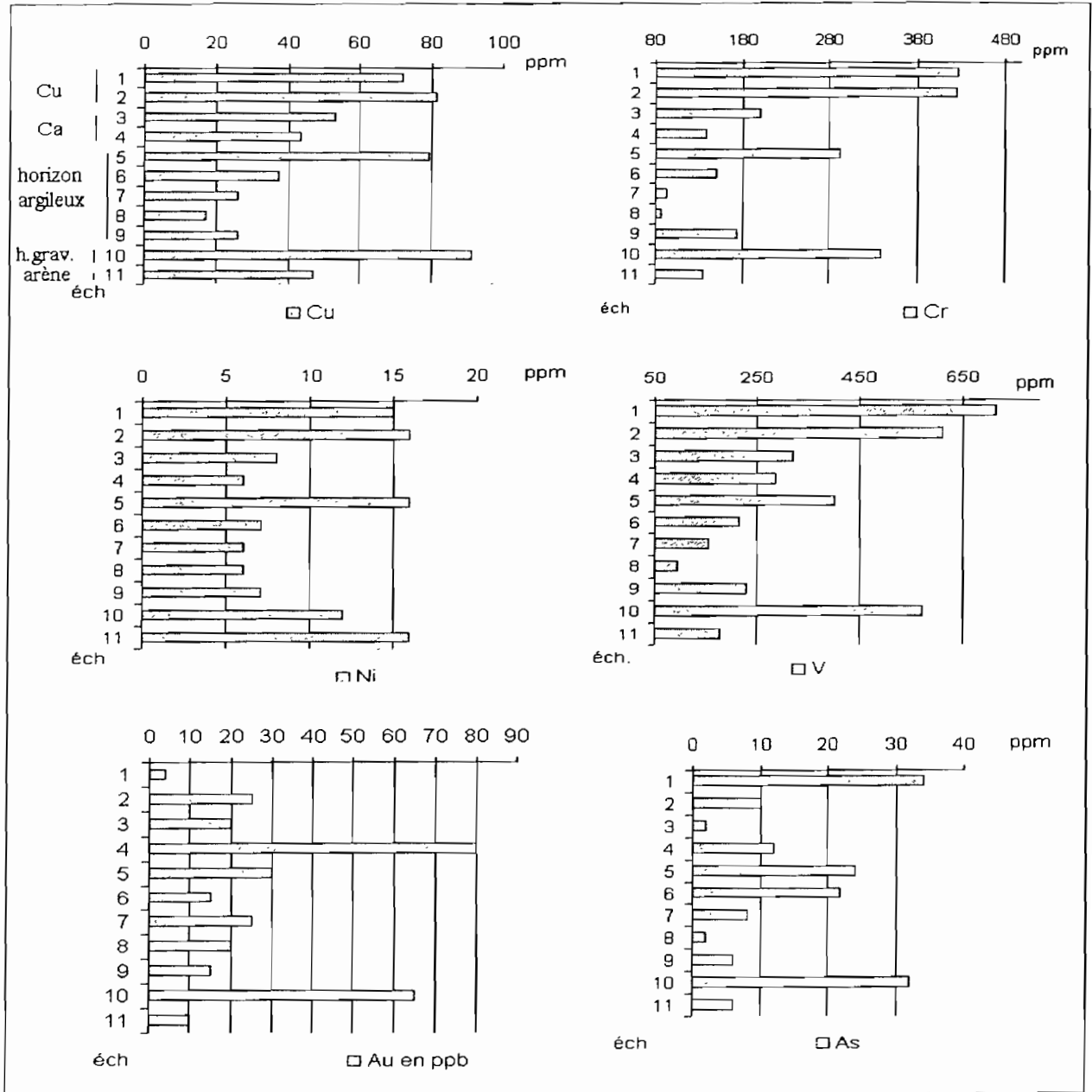


Figure 15 : Evolution géochimique d'éléments en traces du profil TKA

2-4- Minéralogie

En plus des 11 échantillons qui ont fait l'objet des analyses chimiques et physiques, sept (7) autres ont fait uniquement l'objet des analyses minéralogiques en fonction des besoins ressentis par notre travail. Ce sont TKA-11, TKA-12, TKA-13, TKA-13a, TKA-14, TKA-15a, TKA-15b.

Une estimation semi-quantitative des minéraux a été faite à partir de la surface des pics. Elle a pour objectif d'estimer les proportions de la goéthite et de l'hématite dans les échantillons qui contiennent ces deux minéraux (fig. 16) et que la chimie n'a pas pu séparer.

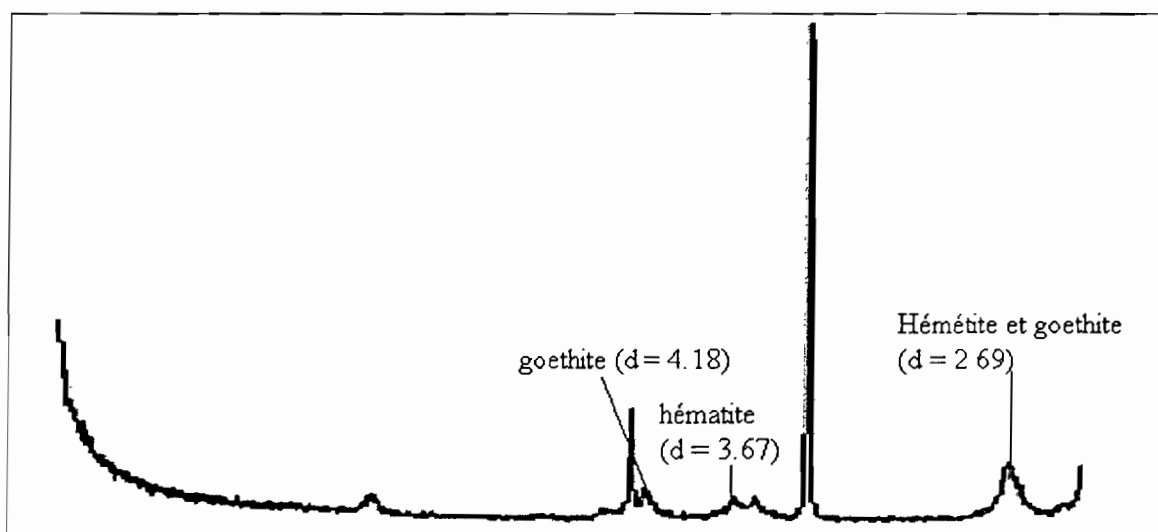


Figure 16 : diffractogramme de l'échantillon TKA-1 (présence simultanée de l'hématite et de la goéthite).

Pour calculer les proportions d'hématite et de goéthite, on mesure les surfaces des pics à $d = 4.18 \text{ \AA}$ et à $d = 3.67 \text{ \AA}$ qui correspondent respectivement aux pics 100 pour la goéthite et 25 pour l'hématite. Connaissant les valeurs des surfaces de ces pics, on calcule les proportions de ces deux minéraux au pic $d = 2.69 \text{ \AA}$ qui représente respectivement le pic 30 pour la goéthite et 25 pour l'hématite (fig. 16). De cette estimation on constate que les proportions sont de l'ordre de 70 % pour l'hématite et 30 % pour la goéthite dans la cuirasse, la partie supérieure de la carapace et dans le faciès gravillonnaire de l'horizon argileux. Dans l'échantillon total de l'horizon gravillonnaire (TKA-9), les deux minéraux ont des proportions voisines (53 % pour la goéthite et 47 % pour l'hématite).

L'estimation a aussi montré que le quartz est le plus abondant des minéraux du profil, suivis de la kaolinite surtout dans la partie basale du profil. Les oxyhydroxydes de fer sont plus importants dans la partie supérieure du profil.

Cette estimation confirme les résultats de la chimie qui montrent une richesse en SiO₂ des échantillons du profil TKA (fig. 14)

2-4-1 Les teneurs des minéraux dans le profil

Les teneurs des minéraux ont été calculées en fonction des données de la diffraction des rayons mais aussi en fonction de celles de la chimie comme nous l'avons annoncé dans le chapitre II.

La kaolinite diminue de bas en haut avec quelques irrégularités marquées par une diminution brutale dans l'horizon gravillonnaire (fig.17). Les oxyhydroxydes de fer augmentent de bas en haut avec les teneurs plus importantes dans l'horizon gravillonnaire, dans la partie supérieure de l'horizon argileux (faciès gravillonnaire) et éventuellement dans les horizons indurés. L'augmentation de ces oxyhydroxydes dans l'horizon gravillonnaire est brutale. Le quartz diminue de bas en haut. L'illite n'apparaît que dans l'arène (fig.17).

Les teneurs minéralogiques au sein de ce profil montrent que les minéraux siliceux (kaolinite et quartz) sont plus importants que les oxyhydroxydes de fer.

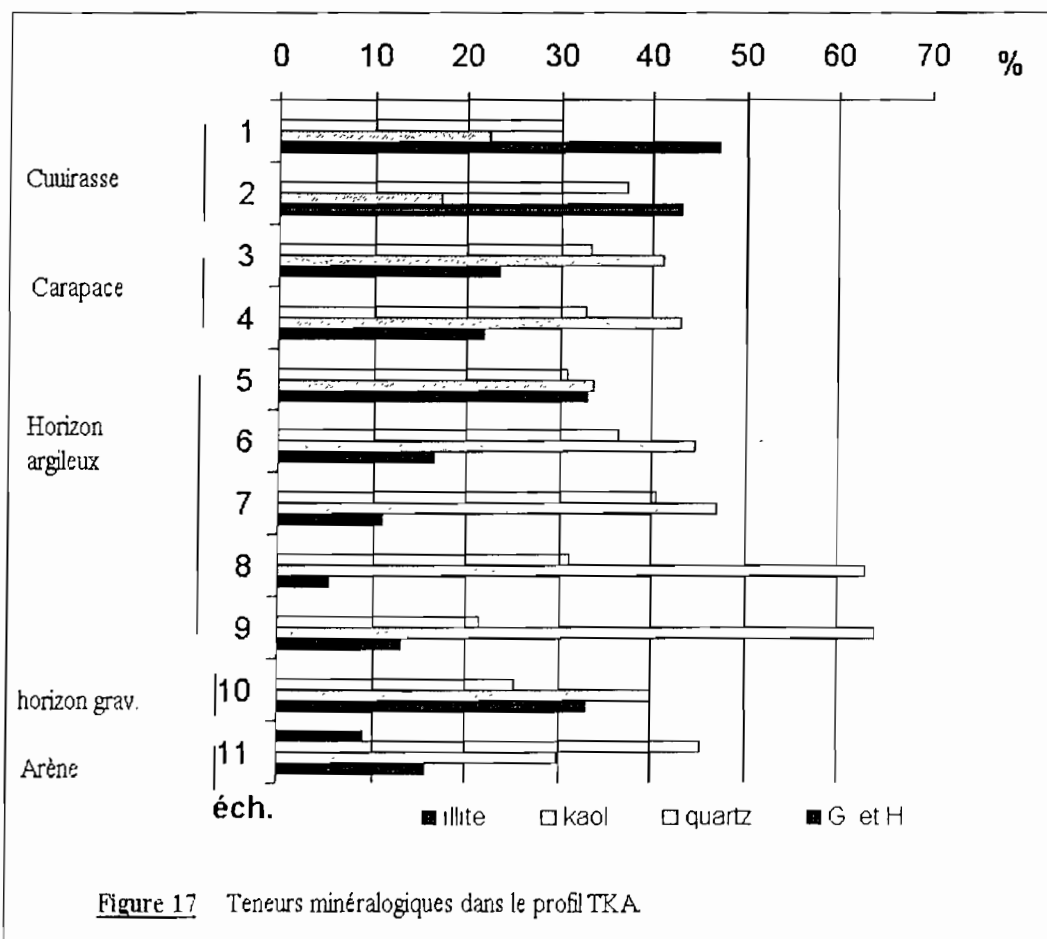


Figure 17 Teneurs minéralogiques dans le profil TKA.

2-4-2 Taux de substitution

Le taux de substitution est inférieur à 10 % Il varie de 0 à 9 % (tab.3) et augmente de bas en haut. Cette augmentation est plus marquée dans les horizons indurés et aux endroits où ont été trouvés les éléments de cuirasse.

Echantillons	Nature de l'échantillon.	Lithologie	Prof. (m)	Taux de subs.(%)
TKA-10	Echantillon total	Arène granitique	10.2	1.10
TKA-9	..... //.....	Horizon gravillonnaire	8.80	1.10
TKA-15a	Gravillons ferrugineux	..... //.....	8.80	2.10
TKA-15b	Matrice	..... //.....	8.80	1.05
TKA-14	Éléments de cuirasse	..... //.....	8.75	0.63
TKA-8	Echantillon total	Base de l'horizon argileux	8.20	1.58
TKA-7	..... //.....	Horizon argileux	7.60	0
TKA-13	..... //.....	..... //.....	7.5	0
TKA-13a	Éléments de cuirasse	..... //.....	7.50	3.31
TKA-6	Echantillon total	..... //.....	7.15	0
TKA-12	..... //.....	..... //.....	6.40	6.36
TKA-5	..... //.....	..... //.....	6.20	9.68
TKA-t	..... //.....	..... //.....	5.85	5.73
TKA-11a	Éléments de cuirasse	..... //.....	5.85	079
TKA-4	Échantillon total	Base de la carapace	5.20	4.73
TKA-3	..... //.....	Carapace	3.85	4.26
TKA-2	..... //.....	cuirasse	2	1.10
TKA-1	..... //.....	..... //.....	0.75	0.04

Tableau 3 : Taux de substitution du fer par l'aluminium dans les goethites du profil TKA.

2-5 Corrélations

La valeur requise pour qu'on ait une corrélation positive significative varie avec le nombre total d'échantillons. Cette valeur correspond au degré de liberté n-2, n étant le nombre total d'échantillons.

Pour n-2 = 9, la corrélation positive est significative lorsqu'elle est supérieure ou égale à 0.6 ($r \geq 0.6$), avec 95 % de réussite pour que cette valeur soit vraie.

Le tableau III (annexe2) montre que la densité apparente et la densité réelle sont corrélées aux oxydes ferriques d'une part, Da (0.62) et Dr (0.81), et d'autre part au quartz, Da (0.61) et Dr (0.81)

D'autres corrélations positives significatives existent entre les éléments (fig. 18 et tab IV, annexe 2). La fig 18 montre des corrélations linéaires où tous les points sont presque situés sur la droite.

Aucune corrélation positive significative n'existe pour l'or.

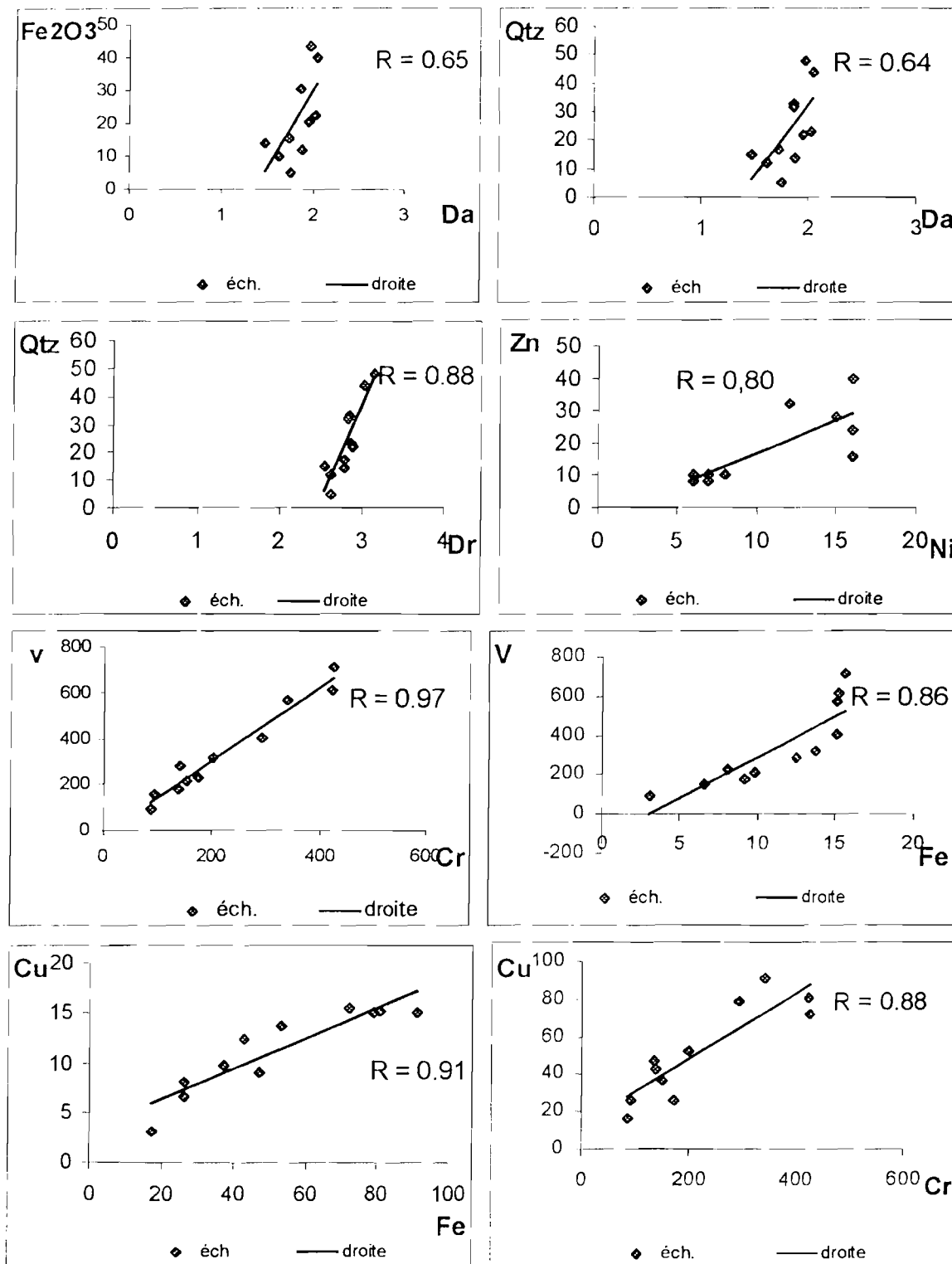


Figure 18 . Corrélations entre les éléments du profil TKA

2-6- L'or particulaire

2-6-1 Teneurs en or particulaire

Les teneurs en or particulaire ont été calculées en ramenant le poids total à 100kg de matériaux. Les résultats, présentés à la figure 19, montrent que l'or particulaire diminue de haut en bas. La cuirasse est l'horizon où l'or particulaire se concentre le plus

L'ensemble du profil montre de très faibles teneurs.

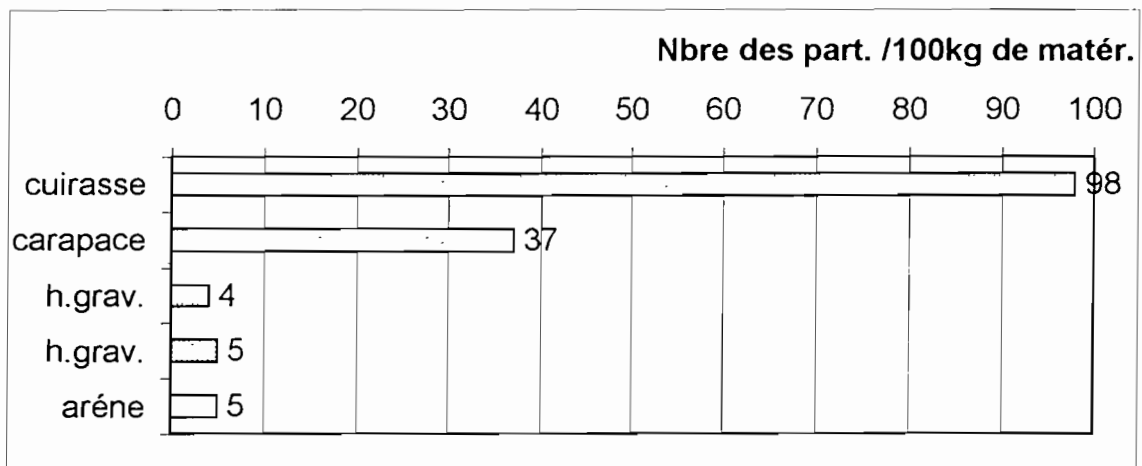


Figure 19 : Nombres des particules pour 100kg d'échantillon du profil TKA.

2-6-2 Evolutions dimensionnelle et morphologique de l'or particulaire

2-6-2-1 Taille

La taille des particules a été estimée en fonction du rapport $\frac{L+l}{2}$, et l'élongation par le rapport $\frac{L}{l}$ (tab. Va, b et c).

En effet, la taille diminue de la cuirasse à l'arène avec une irrégularité d'augmentation dans l'horizon gravillonnaire. L'élongation augmente également avec la profondeur (tab. 4). Les particules s'allongent d'autant plus que la profondeur augmente.

2-6-2-2 Contour

Le profil est caractérisé par la présence des particules à contour et à bord variés. On trouve les particules à contour arrondi (photos B à E, Planche I et photos A à C, planche II), à contour anguleux (photo A, Planche I). Des particules à bord irrégulier (photos F, Planches I et II) et des particules à bord régulier (photos B, C et E, Planche I et photos A à C, planche II). Le pourcentage des particules à bord régulier et à contour arrondi est supérieur à celui des particules à bord irrégulier, dans l'ensemble du profil. Plus de 80 % des particules de chaque horizon montrent un bord régulier et un contour arrondi (fig. 20)

lithologie	échantillons	Nbre. des part.	L/l		(L + l) / 2	
			M	E	M	E
Cuirasse	TKA-2t d< 1 mm	43	M = 2	E = 0.87	M = 34.05	E = 5.55
	TKA-2t d> 1 mm	24	M = 1.76	E = 0.60	M = 40.81	E = 6.84
carapace	TKA-5t d< 1 mm	5	M = 1.92	E = 0.59	M = 21.1	E = 4.37
	TKA-5t d> 1 mm	12	M = 2.15	E = 1.30	M = 21	E = 4.37
	TKA-9t d< 1 mm	2	M = 2.11	E = 0.83	M = 21.25	E = 3.88
h. argileux	TKA-9t d> 1 mm	22	M = 1.74	E = 0.69	M = 23.28	E = 3.10
	TKA- 14t	1	M = 1.21		M = 21	
	TKA- 16t	2	M = 1.39	E = 0.19	M = 21.12	E = 3
h. grav.	TKA- 18t	2	M = 1.81	E = 0.03	M = 25	E = 7.24
arène	TKA- 20t	2	M = 1.46	E = 0.43	M = 24.62	E = 0.53

M = \bar{x} = moyenne arithmétique et E = σ = écart type

Tableau 4 : Les dimensions estimées des particules d'or du profil TKA.

2-6-2-3 Surface

En fonction de l'état de la surface, on distingue deux types de population des particules. Le premier type, regroupe les particules à surface et arrêtes bien émoussées (photo C et E, Planche I ; photo B et C, Planche II). Le second, regroupe les particules à surface grumeleuse très peu émoussée (photos F, Planches I et II). Ce deuxième type est très peu représenté, on compte une vingtaine des particules sur 115 triées, localisées dans la cuirasse, la carapace et l'horizon argileux.

Dans le premier type, on distingue quelque fois les particules qui emballent des éléments bien arrondis (photo D et E, Planche II). Ces éléments seraient probablement des minéraux ferrifères ou du quartz. Ces particules sont très nombreuses dans la cuirasse et la carapace, mais on les retrouve aussi dans l'horizon gravillonnaire. Certaines particules de ce premier type ont des arrêtes anguleuses montrant des reliques de la particule primaire, mais qui reste très peu représentée, elles ne dépassent pas cinq (5) sur 115 particules (photo A, Planche II).

2-6-2-4 Marque de déformation

La seule marque de déformation reconnue est le replis des bords. Les particules repliées qui ne se distinguent pas nettement des particules émoussées à cause des chocs de transport (photo B, Planche II) ne sont pas prises en compte.

On a des particules bien repliées (photo D, Planche I) dans la cuirasse, l'horizon gravillonnaire et l'arène.

Une étude synthétique de l'évolution morphologique des particules d'or est proposée à la figure 20. Le pourcentage de chacun des paramètres a été calculé en considérant le nombre total des particules pour chaque horizon

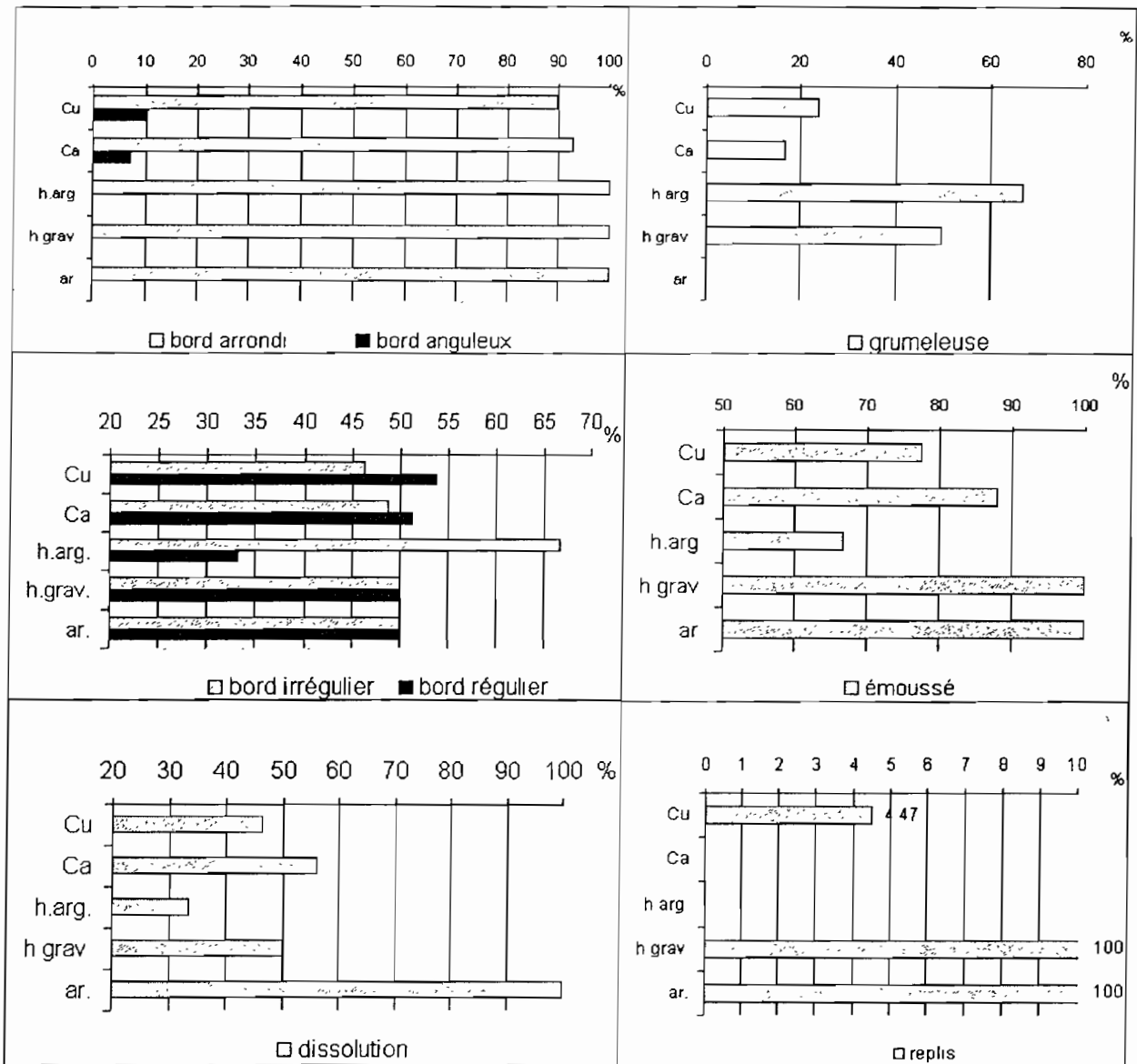


Figure 20 : Evolution verticale des paramètres de l'or particulaire dans le profil TKA.

2-7 Conclusion

La porosité est très variée au sein de ce profil. L'arène est relativement plus poreuse que les matériaux sus-jacents. On a un écart important des valeurs entre l'arène et l'horizon sus-jacent, ce qui permet de les distinguer nettement.

Les différences de teneurs chimiques et minéralogiques entre l'arène et l'horizon gravillonnaire montrent l'existence d'une discontinuité majeure d'ordre géochimique et

minéralogique entre ces deux horizons, marquée surtout par le contraste des valeurs en Fe, K et en Au pour la chimie et par l'apparition spontanée de l'hématite pour la minéralogie.

L'évolution morphologique de l'or particulaire (fig. 20) montre que les paramètres considérés (bord arrondi, bord régulier, dissolution, émoussé et replis) diminuent bas en haut. Les particules à bord irrégulier et anguleux sont plus fréquentes dans la cuirasse. La taille augmente également de bas en haut et l'élongation diminue de bas en haut. On a une évolution morphologique verticale de la cuirasse à l'arène.

Les nombres des particules diminuent de haut en bas. Il existerait une migration verticale de haut en bas.

3 Profil Tenbr

Ce puits (puits P12) de 18 m de profondeur (Lajoinie, 1964 et Michel, 1973). Plus de la moitié est comblée par des matériaux secondaires, seuls les 7 premiers mètres sont épargnés. Le rafraîchissement des bords n'a donc pu être fait que sur ces 7 mètres. Ce puits a été repris à titre comparatif.

3-1- Description lithologique

3-1-1 Carapace (3 à 7.7m)

C'est un matériau moins induré, facilement cassable au marteau et parfois à la main. La structure est compacte. Les nodules ferrugineux sont très nombreux. Ils sont de taille diverse (millimétrique à centimétrique), de forme arrondie à sub-arrondie, à surface bien lisse, de couleur brune et ocre. La cassure fraîche montre une périphérie brune et un cœur ocre. Les grains de quartz sont également très nombreux et propres, de taille millimétrique. Ils sont parfois corrodés. Tous ces éléments précités sont emballés dans une matrice argilo-ferrugineuse de couleur rougeâtre. On a également des volumes blancs plus importants dans la partie inférieure de l'horizon, et des volumes ocres qui sont plus importants dans sa partie supérieure. Des nombreuses cavités de petites dimensions (alvéoles), parfois remplies de produits violets et des fissures remplies de produits rouges y existent également.

3-1-2 Cuirasse (0 à 3m)

La cuirasse est subdivisée en deux sous horizons (figure 21)

3-1-2-1 Sous-horizon I (1m à 3 m).

Il est caractérisé par un matériau très induré, difficilement cassable au marteau, de couleur rougeâtre avec quelques tâches noires et blanches. La structure est très compacte. On note la présence de nodules ferrugineux ayant les mêmes caractéristiques que ceux décrits précédemment dans l'horizon sous-jacent, de grains de quartz corrodés à éclat gras et de cutanes. La macroporosité est dominée par les tubules très longs (plus de 7cm) et très larges (plus de 3cm), les vacuoles et les alvéoles

3-1-2-2 Sous-horizon II (0 à 1m).

Ce sous-horizon a les mêmes aspects macromorphologiques que le précédent. Cependant, il est dépourvu de nodules ferrugineux. On retrouve parfois des racines pourries d'arbres

On a une cuirasse vacuolaire, massive dans sa partie sommitale et nodulaire dans sa partie basale.

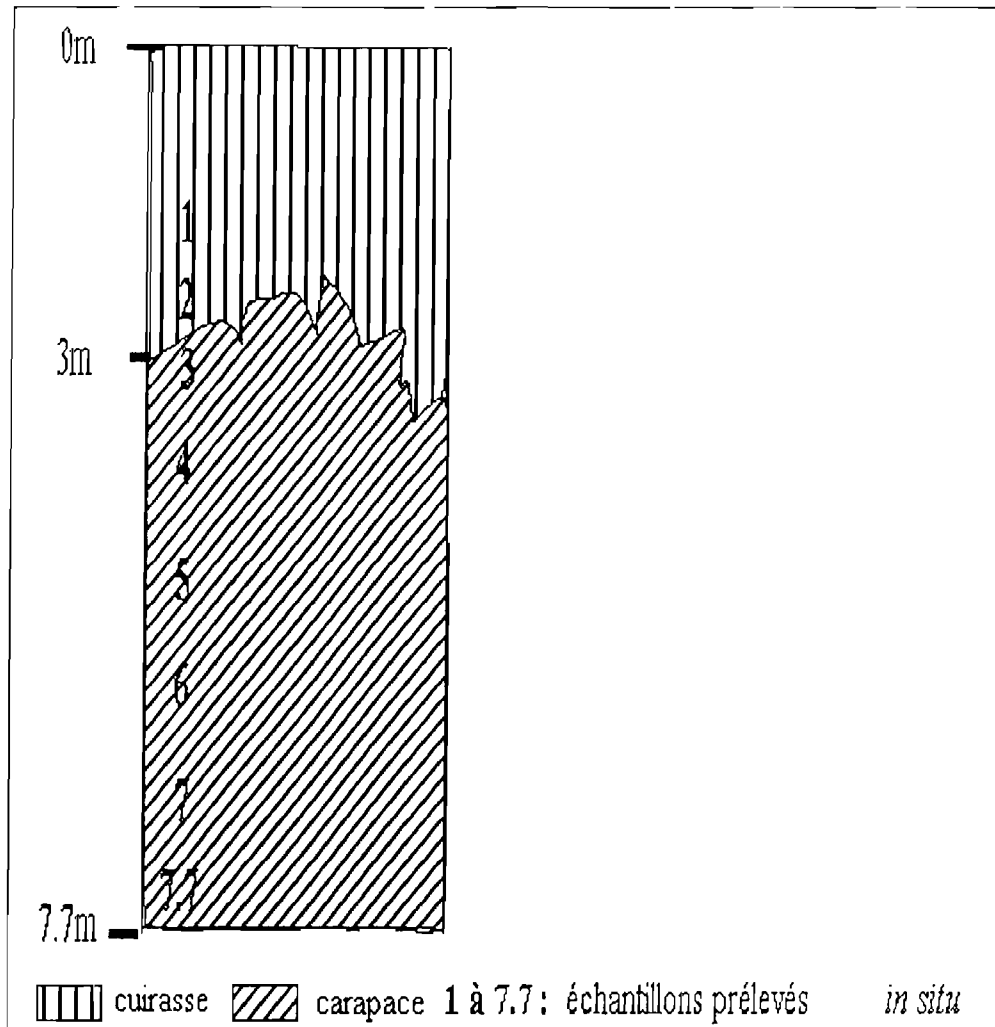


Figure 21 : Lithologie du profil Tenbr

3-2 Mesures physiques

Les densités apparente (D_a) et réelle (D_r) diminuent de la cuirasse à la carapace ; malgré quelques irrégularités localisées dans les deux horizons (tab 5).

La porosité augmente de la cuirasse à la carapace (tab. 5).

Lithologie	prof. (m)	D_a	D_r	Pt (%)
Cuirasse	1.2	2.29	3.29	30.2
..... //	2	2.31	3.28	29.6
..... //	3	2.06	2.98	30.9
Carapace	4	1.83	3.03	39.7
..... //	5	1.96	3.22	39.1
..... //	6	1.85	3.27	43.5
..... //	7	1.96	3.26	39.7
..... //	7.7	2.23	3.12	28.3

Tableau 5 : Mesures physiques (densités et porosité) du profil Tenbr

3-3 La géochimie des éléments majeurs et traces

32 éléments ont été également analysés (tab. VI et VII), mais seuls quelques éléments seront présentés et discutés ici. Cela pour les mêmes raisons évoquées précédemment pour le profil TKA.

Les éléments majeurs évoluent presque de façon constante entre ces deux horizons avec quelques irrégularités de teneurs qui se manifestent par des augmentations en bas du profil notamment pour le fer et le manganèse (fig.22 et tab. VI, annexe 2) Sauf le Mn qui diminue de bas en haut mais pas de façon régulière.

La composition chimique d'échantillons du profil Tenbr, exprimée par le diagramme triangulaire (fig. 23) montre que ces échantillons se rapprochent de la droite Fe_2O_3 -kaolinite. Certains atteignent la droite. Tous les échantillons ont leurs teneurs en Fe_2O_3 supérieures ou égales à 50 %. Cependant leurs teneurs en Al_2O_3 et SiO_2 restent en dessous de 30 %. On a une richesse de ces échantillons en Fe_2O_3 et un appauvrissement en Al_2O_3 et SiO_2 .

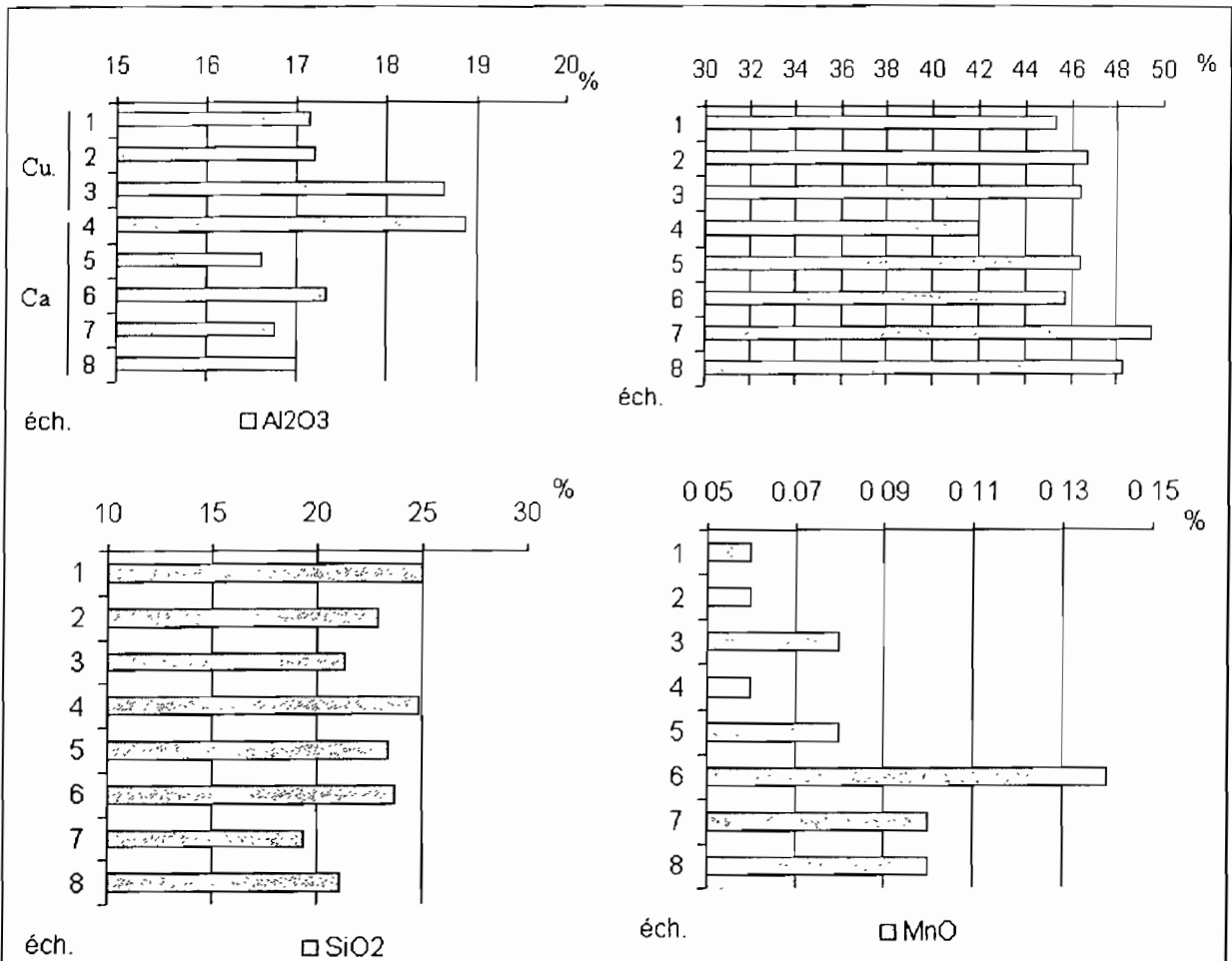


Figure 22 : Evolution géochimique d'éléments majeurs du profil Tenbr

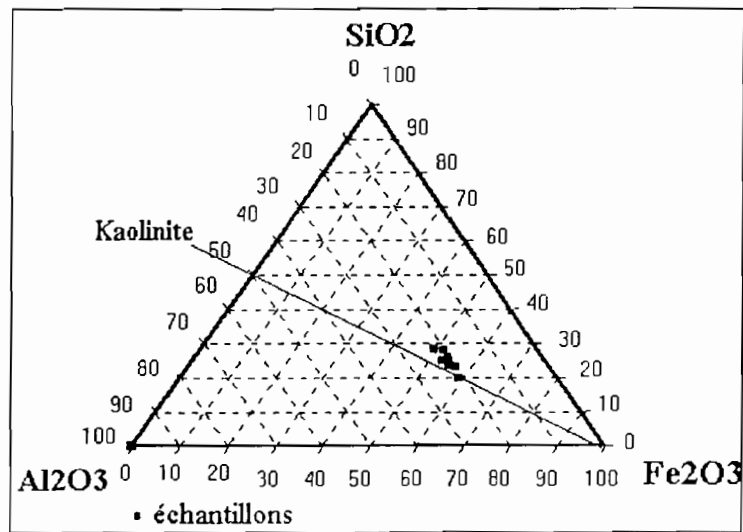


Figure 23 : Diagramme triangulaire exprimant la composition chimique d'échantillons du profil Tenbr

Les éléments en traces évoluent presque de la même manière que les éléments majeurs. Aucune différence majeure n'est à signaler entre la cuirasse et la carapace. Seules les teneurs en Ni (72ppm) dans la carapace (fig. 24 et tab. VII, annexe 2) apparaissent anormales par rapport à celle du granite de Tinkoto (12ppm) (tab. VII, annexe 2).

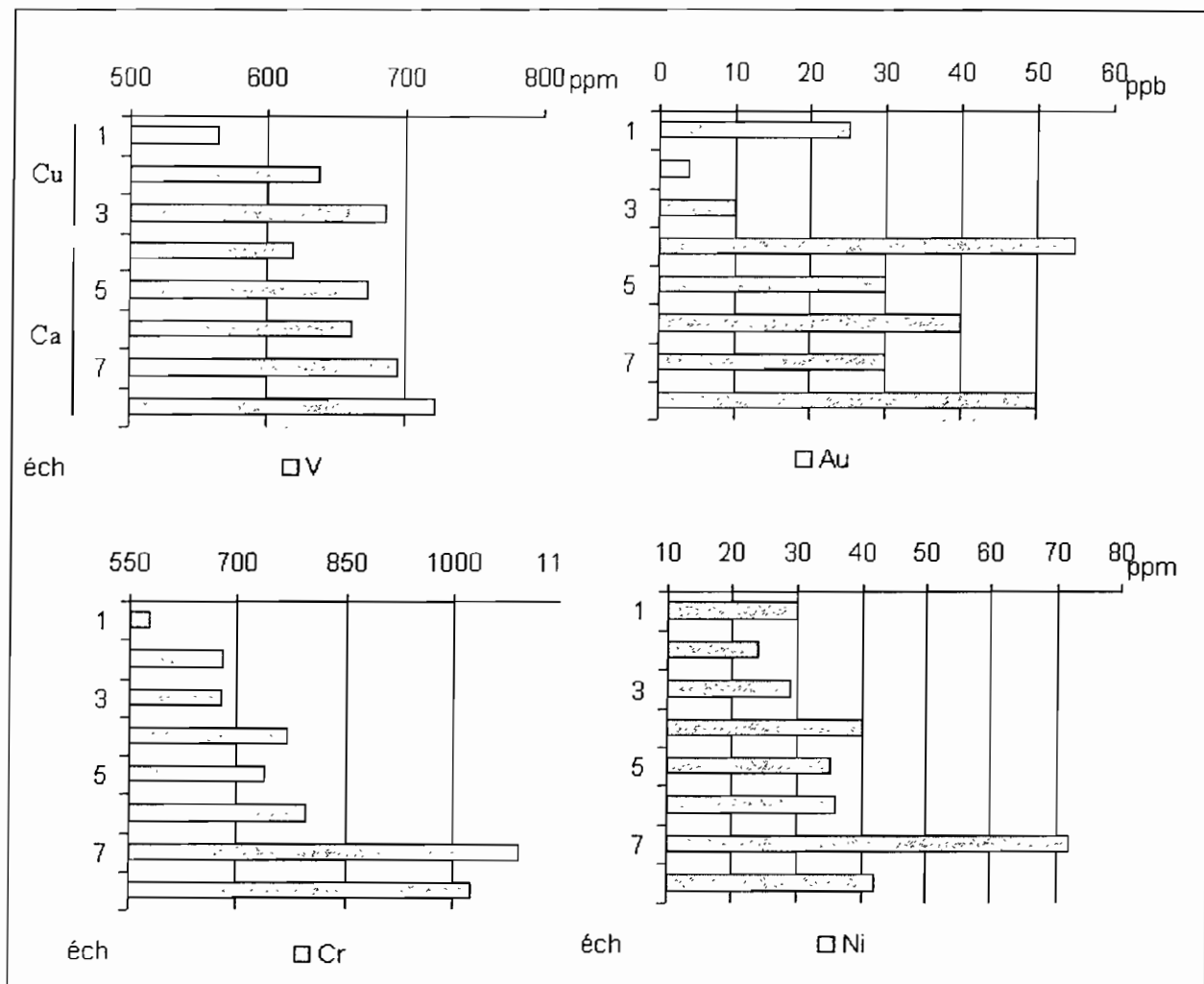


Figure 24 Evolution géochimique d'éléments en traces du profil Tenbr.

3-4 Minéralogie

En plus de 8 échantillons ayant fait l'objet des analyses physiques et chimiques, un autre échantillon a été pris en compte pour la minéralogie en raison des exigences de notre travail. C'est l'échantillon Tenbr 3.85.

Les proportions d'hématite et de goethite ont été estimées à partir de la surface des pics. Elles sont de l'ordre de 23 % pour la goethite et 77 % pour l'hématite dans la cuirasse et de 31 % pour la goethite et 69 % pour l'hématite dans la carapace. Cette estimation a montré que le quartz est moins abondant que les oxyhydroxydes de fer et la kaolinite.

3-4-1 Teneurs minéralogiques

Les minéraux restent constants dans le profil. On a une prédominance des oxyhydroxydes de fer dans les deux horizons, puis suit la kaolinite et enfin le quartz qui est faiblement représenté (fig.25).

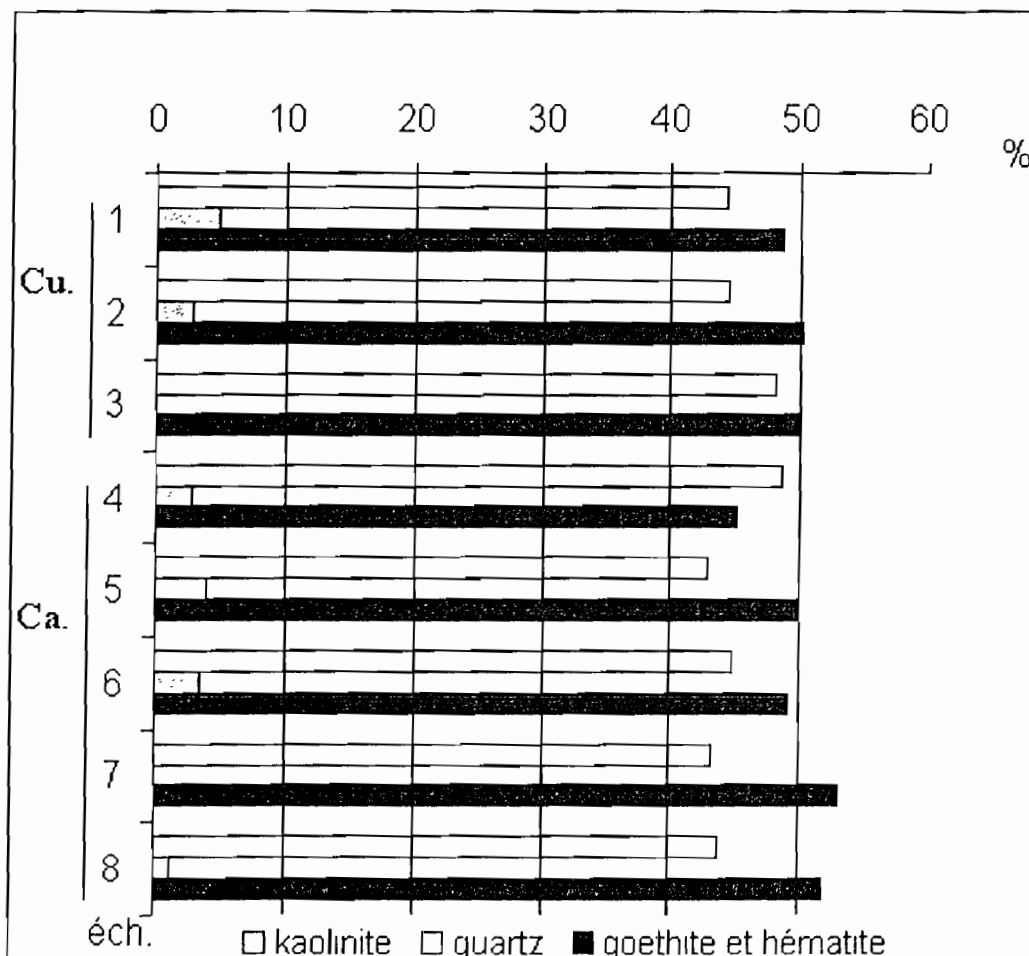


Figure 25 : Teneurs relatives des minéraux dans le profil Tenbr.

3-4-3 Taux de substitution

Le taux de substitution diminue faiblement de haut en bas. Il est inférieur à 10 % (tab. 6).

Echantillons	Nature de l'échantillon	Profondeur (m)	Taux de substitution (%)	Lithologie
Tenbr 1.2	Echantillon total	1.2	7.94	Cuirassee
Tenbr 2	..... / /.....	2	6.36 / /.....
Tenbr 3	..... / /.....	3	5.78	Base de lacuirasse
Tenbr 3.85	..... / /.....	3.85	0.78	Carapace
Tenbr 4	..... / /.....	4	4.78 / /.....
Tenbr 5	..... / /.....	5	2.84 / /.....
Tenbr 6	..... / /.....	6	6.47 / /.....
Tenbr 7	..... / /.....	7	0 / /.....
Tenbr 7.7	..... / /.....	7.7	4.26 / /.....

Tableau 6 : Taux de substitution du fer par l'aluminium dans les goethites du profil Tenbr.

3-5 Corrélation

Le degré de liberté pour ce profil est de $n-2 = 6$. La valeur requise pour que la corrélation positive soit significative avec 95 % de chance doit être supérieure ou égale à 0.829 ($r \geq 0.829$).

Le tableau VIII (annexe 2) ne montre que deux corrélations positives significatives entre les oxydes de fer et la kaolinite et Al_2O_3 . La kaolinite est très négativement corrélée avec la goethite et l'hématite (-0.871) (tab. VIII, annexe 2). Plusieurs éléments sont aussi positivement corrélés les uns aux autres (fig. 26 et tab. IX, annexe 2).

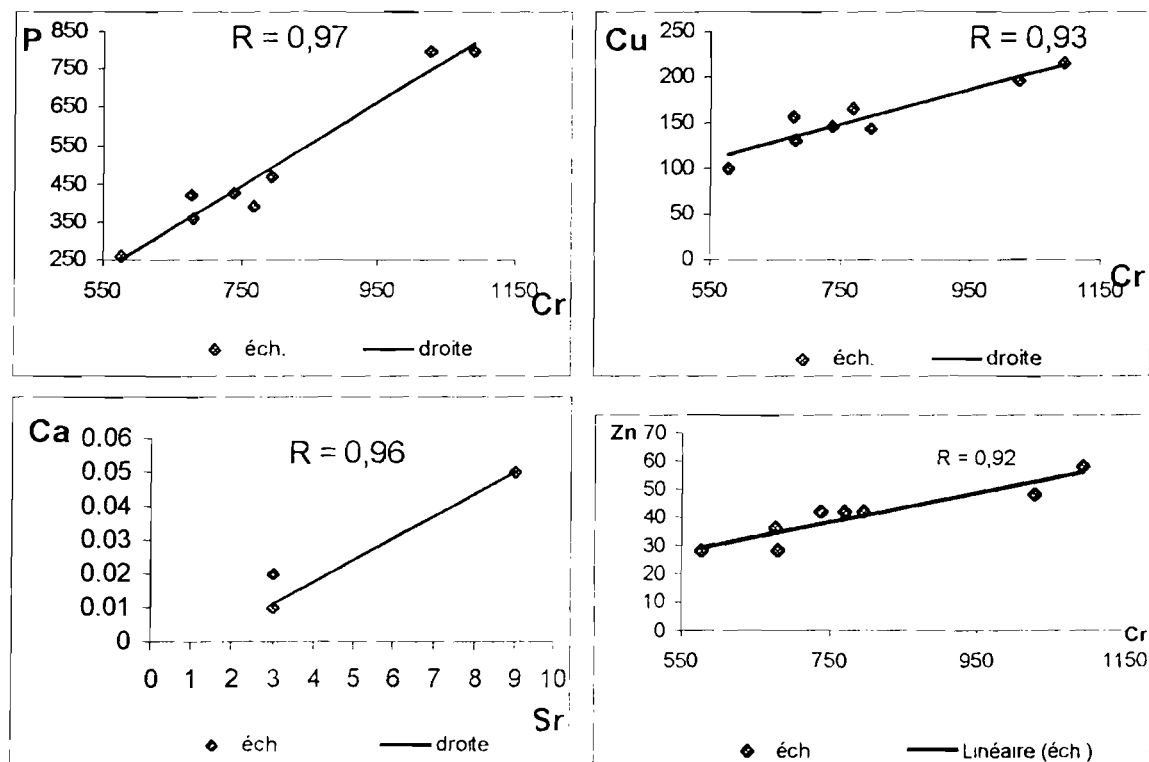


Figure 26 : Corrélations entre les éléments du profil Tenbr.

3-6 Conclusion

La porosité permet de distinguer la cuirasse de la carapace contrairement à la géochimie. On a un très grand contraste entre la cuirasse et la carapace, on passe de 30.9 % à la base de la cuirasse à 39.7 % au sommet de la carapace (tab.5). La carapace est par conséquent plus poreuse que la cuirasse dans ce profil

Les oxyhydroxydes de fer sont plus importants dans les deux horizons que les minéraux siliceux (kaolinite et quartz). L'épaisseur des horizons indurés dépasse 7m.

II Discussions sur l'origine et l'évolution des matériaux de moyen glaciaire.

1 Caractéristiques des horizons indurés (cuirasses et carapaces) des deux profils.

Bien que notre travail soit focalisé sur l'origine et l'évolution des matériaux latéritiques de moyen glaciaire, nous utiliserons aussi les résultats du profil Tenbr de haut glaciaire qui est pris ici à titre comparatif.

Les horizons indurés des profils TKA et Tenbr sont caractérisés par une importante présence des tubules, cavités et des plages blanches.

Les tubules et cavités sont le résultat du lessivage des produits blancs qui sont vraisemblablement de minéraux siliceux (kaolinite et quartz). Le lessivage serait causé par les eaux de percolation. Les produits lessivés laissent par conséquent des vides qui constituent les structures d'accueil pour les accumulations secondaires qui s'indurent et s'individualisent en nodules ferrugineux ou concrétions ferrugineuses (Nahon, 1976 ; Tardy, 1989). On rencontre fréquemment les nodules ferrugineux dans les horizons indurés de ces deux profils. Les nodules se forment également dans la matrice argileuse. Les horizons du profil Tenbr de haut glaciaire sont plus nodulaires que ceux de TKA de moyen glaciaire. Ils sont également plus épais (> 7m) et plus riches en fer (53 % en moyenne de Fe_2O_3) (fig. 23) au niveau de Tenbr qu'au niveau de TKA où leur épaisseur est de 5 m et une moyenne de 40 % de Fe_2O_3 (fig. 14). La composition chimique des cuirasses montre que la cuirasse de haut glaciaire est plus "mature" que celle du moyen glaciaire. La richesse en Fe_2O_3 est l'un des critères utilisés par Boeglin (1981) in Bamba (1996) , Tardy *et al.* (1988) pour montrer la "maturité" des cuirasses ferrugineuses. Plus la cuirasse est riche en Fe_2O_3 , plus elle est mature et plus évoluée.

Les proportions de la goéthite et de l'hématite des horizons indurés sont respectivement de 23 % et 77 % dans le profil Tenbr et de 30 % et 70 % dans le profil TKA. Plus les matériaux vieillissent, plus on a une accumulation relative importante du fer et une élimination progressive de silice (Bonifas, 1959 ; Lelong, 1969 ; Delvigne, 1965 ; Delvigne, 1998). Les horizons indurés de Tenbr sont caractérisés par un faible taux de la silice (inférieur à 30 %) (fig. 23) et de quartz (< à 5 %) (fig. 25). Cette silice serait essentiellement due à la kaolinite qui est fortement représentée avec plus de 40 % (fig. 25).

Le taux de substitution du fer par l'aluminium dans les goéthites de ces deux cuirasses restent inférieurs à 10 % (tab 3 et 6) On a des cuirasses ferrugineuses (Leprun, 1979).

La porosité augmente de la cuirasse à la carapace dans le profil Tenbr. Par contre, elle diminue de la cuirasse à la carapace dans le profil TKA. Nous pensons que la variation de la porosité des horizons indurés est liée à deux aspects majeurs . porosité macromorphologique

(tubules et cavités) et présence de matrice argileuse ou argilo-ferrugineuse. La présence simultanée de la macroporosité importante et de la matrice argileuse ou argilo-ferrugineuse augmente la porosité totale, c'est le cas pour la cuirasse de TKA qui est plus poreuse que la carapace. Par contre, la présence simultanée de la macroporosité importante et de la matrice ferrugineuse diminue la porosité totale, c'est le cas pour la cuirasse de Tenbr qui est moins poreuse que la carapace.

Un autre fait marquant de ces horizons : les fortes teneurs en Ni dans le profil Tenbr qui atteignent 72 ppm (tab. VI). En effet, le Ni et autres éléments en trace comme Cu, Cr, V et Co caractérisent les roches basiques (Millot *et al*, 1978 ; Mosser, 1980 ; Mazaltarim, 1989) et se retrouvent avec des faibles teneurs dans les roches acides. Le granite (sain et altéré) de Tinkoto renferme 10 à 12 ppm de Ni (Lajoinie, 1964 ; tab. II, annexe 2).

Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer les fortes teneurs de Ni dans les horizons indurés de Tenbr situé sur le haut glacis.

D'une part, ces fortes teneurs seraient liées à une accumulation absolue de Ni qui proviendrait soit des roches basiques notamment les tufs qui sont en contact avec le granite et renferment 120 ppm de Ni (tab. II, annexe 2) soit d'éléments de cuirasse de la surface intermédiaire formée sur roche basique (Michel, 1973). Ces éléments de cuirasse ont été trouvés dans les altérites de ce puits par Lajoinie (1964) et Michel (1973). Une contamination de ce granite est patente.

D'autre part, ces fortes teneurs de Ni peuvent être liées aux enclaves de roches basiques présents dans le granite.

2 Existence de discontinuité dans le profil TKA

Dans le profil latéritique TKA, on note la présence de plusieurs horizons (fig. 12). La nature des matériaux est différente d'un horizon à un autre, cela est plus marquée entre l'arène et l'horizon gravillonnaire. L'apparition brutale d'éléments ferrugineux (gravillons ferrugineux et cailloux de cuirasse ancienne) dans l'horizon gravillonnaire et leur absence totale dans l'arène révèle une discontinuité lithologique entre ces deux horizons.

Les porosités de ces deux horizons (tab. 2) sont aussi différentes. On a des valeurs très élevées dans l'arène (41.9 %) contre 34 % dans l'horizon gravillonnaire. L'écart entre ces valeurs est de 7 % environ. C'est le plus grand écart des valeurs entre les différents horizons de ce profil. Cette différence considérable des valeurs constitue également un argument pour étayer la nature différente de ces deux horizons donc l'existence d'une discontinuité physique entre ces deux horizons est patente.

Le caractère discontinu entre l'horizon gravillonnaire et l'arène est mis aussi en exergue d'une part, par la répartition de la plupart d'éléments majeurs et en traces (Fe, K, Mg, As, Au, Cu, Cr, V) En effet, on a une augmentation importante et brutale des teneurs de Fe, Cu, Cr, V, As, et Au entre l'arène et l'horizon gravillonnaire (fig. 13 et 15). Les teneurs de K et Mg montrent plutôt une évolution contraire. Elles sont plus importantes dans l'arène et baissent brutalement dans l'horizon gravillonnaire (fig. 13). D'autre part, par la répartition des minéraux qui est marquée surtout par l'apparition brutale de l'hématite dans l'horizon gravillonnaire où elles constituent avec la goethite le groupe des oxyhydroxydes de fer qui représentent 33 % de tous les minéraux identifiés avec 15.51 % d'hématite et 17.49 % de goethite.

Tous ces faits marquants révèlent l'existence d'une discontinuité majeure entre l'arène et l'horizon gravillonnaire.

Par ailleurs le faciès gravillonnaire localisé dans la partie supérieure de l'horizon argileux sous forme de "poches" se fait ressentir aussi par l'évolution géochimique d'éléments majeurs et en traces notamment le fer et autres éléments qui le sont associés (Cu, Cr, Ni, V). Ces éléments sont positivement corrélés et expriment une affinité pour le fer. On a une augmentation considérable de teneurs en ces éléments. Il existerait une discontinuité mineure en cet endroit.

3 Approche sur l'origine et l'évolution des matériaux du profil TKA : moyen glaciaire

L'écart entre la porosité minimale (29.4 %) et la porosité maximale (41.9 %) illustre l'hétérogénéité des matériaux du profil TKA. L'existence d'une discontinuité majeure entre l'arène et l'horizon gravillonnaire montre aussi que les matériaux qui constituent l'arène n'ont pas la même origine que les matériaux des horizons sus-jacents.

L'horizon argileux montre de nombreuses taches rouges sous forme des halos de dispersion. Elles sont assimilées aux concentrations du fer dues à la mobilité latérale du fer par suite des fluctuations de la nappe d'eau des altérites présente dans la zone au cours des temps.

La cuirasse du moyen glaciaire est en contact direct avec le granite frais (fig. 27).

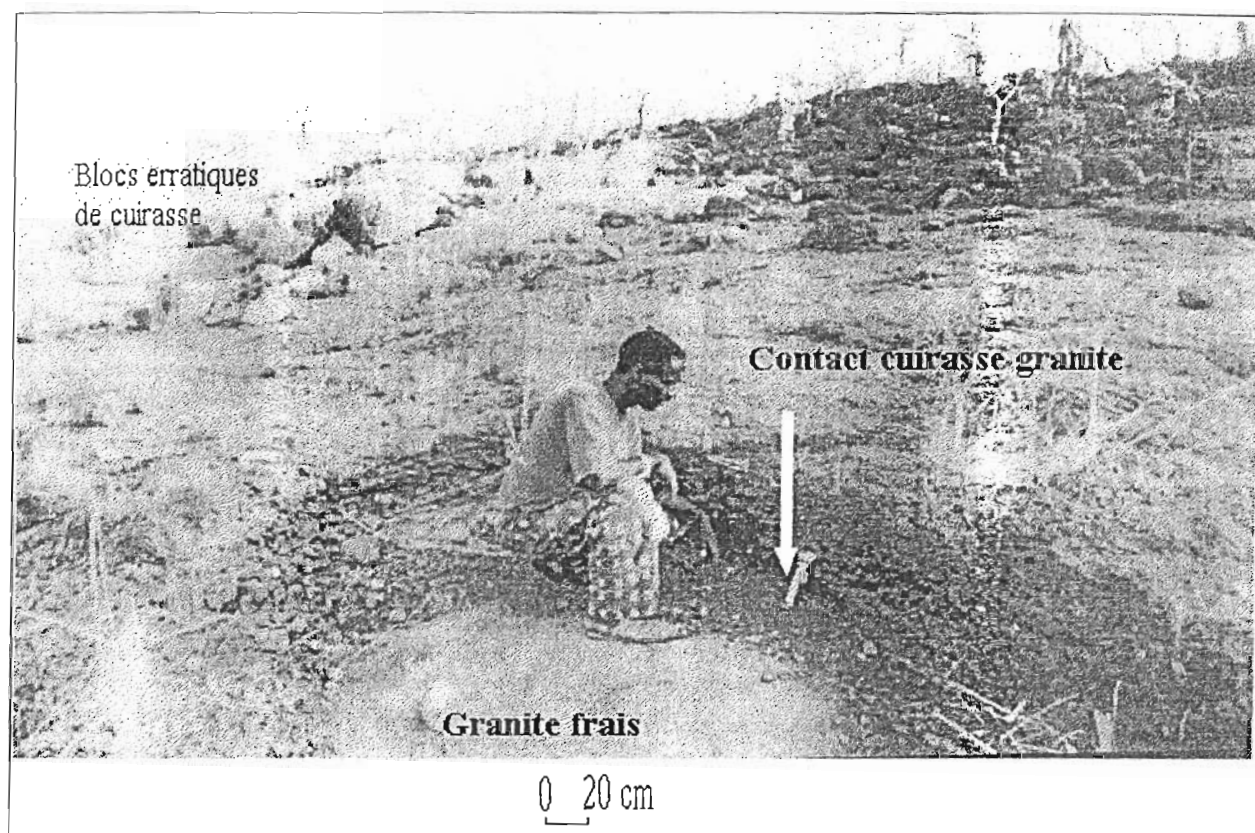


Figure 27 : Cuirasse du moyen glaciaire sur le granite frais

Cette figure montre que cette cuirasse n'est pas le résultat de l'induration *in situ* des altérites du granite. Les oxyhydroxydes de fer de cette cuirasse proviendraient d'ailleurs. Le haut glaciaire serait la source de ces oxyhydroxydes de fer. Car le moyen glaciaire est raccordé au haut glaciaire par un escarpement (Michel, 1973 ; Beauvais *et al.*, 1999). Le fer du haut glaciaire serait donc transporté mécaniquement vers les pentes du moyen glaciaire comme le souligne Maignien (1966).

Par ailleurs, l'évolution géochimique d'éléments majeurs pour un profil en place étudié par : Delvigne (1965) ; Blot *et al.* (1976) ; Boulangé (1984) ; Leprun (1979), indique une élimination progressive des alcalins et alcalino-terreux et une accumulation relative progressive du fer, de l'aluminium et du titane de bas en haut. Dans notre cas, nous avons une évolution totalement différente : K, Mg et Ca diminuent brutalement de l'arène à l'horizon gravillonnaire puis ils augmentent de l'horizon argileux à la cuirasse (fig. 13). C'est également le cas du fer qui augmente brutalement dans l'horizon gravillonnaire et diminue de la base de l'horizon argileux pour augmenter progressivement jusqu'à la cuirasse (fig. 13).

Ces variations de teneurs d'éléments majeurs démontrent l'hétérogénéité des matériaux et caractérisent par-là un apport extérieur de ces éléments. Ils proviendraient de l'environnement immédiat qui est le haut glacis.

Les échantillons du profil Tenbr sont pauvres en SiO₂ (moins de 30 % fig. 23). Cela est lié à un départ de la silice vers les pentes plus en aval de la toposéquence (le moyen glacis) soit à la pauvreté en SiO₂ du matériau originel. L'importance de la silice totale dans le moyen glacis notamment dans le profil TKA (40 à 80 % de SiO₂) (fig. 14) peut s'expliquer par un apport du quartz et de kaolinite qui proviendraient du haut glacis ou du granite environnant. Ces deux minéraux sont les plus abondants dans ce profil (fig. 17). Ils seraient donc transportés mécaniquement. Car une accumulation verticale *in situ* de ces minéraux est totalement exclue par l'existence d'une discontinuité majeure entre l'arène (qui pourrait par exemple fournir le quartz) et l'horizon gravillonnaire. Le quartz présent dans les horizons supérieurs du profil TKA ne peut donc pas provenir de l'altération *in situ* du granite, il vient d'ailleurs. Il peut probablement venir du haut glacis ou d'un matériau transporté ayant intégré des éléments qui contiennent du quartz arraché au granite environnant.

Les teneurs de l'or particulière diminuent de haut en bas. La taille diminue également de la cuirasse à l'arène. L'irrégularité de taille des particules d'or dans l'horizon gravillonnaire (tab. 4) qui se manifeste par une augmentation de taille montre que l'or de cet horizon vient d'ailleurs. Au cours du transport, les particules sont protégées par la gangue ferrugineuse, la fragmentation est donc amoindrie et la taille est par conséquent plus ou moins conservée. Cela constitue un argument en faveur du transport des matériaux de cet horizon sous forme d'éléments figurés et par voie mécanique.

Certaines particules de ce profil (photo B, Planche II) montrent un émoussé mécanique et tendent à être aplaties ; cela montre qu'elles ont été transportées. Les matériaux dans lesquels sont associées ces particules ont par conséquent subi un transport. C'est le cas également des particules à bord bien replié (photo D, *planche I*), localisées dans la cuirasse, l'horizon gravillonnaire et l'arène qui étayent l'éventualité du transport des matériaux dans lesquels sont associées ces particules. Dans ces deux derniers horizons, toutes les particules sont bien repliées (fig. 20). En effet, le bord replié des particules constitue un critère de transport (Parisot *et al.*, 1995 ; Freyssinet, 1990 ; Dominique, 1993 ; Hérail, 1999).

Les particules du second groupe (photos F, Planches I et II) diffèrent des autres par l'aspect de leur surface qui n'est presque pas émoussée. On les retrouve dans la cuirasse, la carapace et l'horizon argileux. Elles n'ont probablement pas subi de transport significatif ou elles ont été transportées emballées dans la gangue qui serait du quartz. En effet, la présence

des filonnets de quartz dans le granite de Tinkoto ont été observés à l'affleurement, bien que ne présentant pas de minéralisation aurifère.

La presque totalité des particules d'or est affectée par la dissolution (fig 20) qui montre que le matériau auquel sont associées ces particules, est issu d'une ancienne altération. Les particules d'or viennent donc des altérations anciennes.

4 Conclusion

L'arène stérile montre la présence de deux particules (tab. 4) qui constituent le résultat d'une migration *per descensum* de l'or qui atteint l'horizon inférieur du profil. L'or présent au sein de ce profil montre des marques de transport (le replis de bord) ; il a été donc transporté. L'hétérogénéité du matériau de ce profil est mise en évidence par la géochimie des éléments majeurs et traces, la porosité et la minéralogie. Les éléments de cuirasse trouvés dans l'horizon argileux et l'horizon gravillonnaire sont assimilés à une cuirasse plus ancienne que celle du profil TKA. Leurs proportions en hématite et goethite les rapprochent de la cuirasse de haut glacis. Ils ont donc été transportés.

De tous ces faits, un schéma explicatif de la mise en place des matériaux du moyen glacis de Tinkoto est proposé à la figure 28. La mise en place des matériaux du moyen glacis s'est effectuée de la manière suivante.

Suite au démantèlement du haut glacis par l'effet des eaux météoriques, les éléments figurés ont été transportés et déposés vers les bas de pente. Les éléments grossiers (gravillons ferrugineux et cailloux de cuirasse) se sont déposés sur le granite non altéré. Cette étape de dépôt a donné l'horizon gravillonnaire (fig. 28 B). Ce mode de mise en place de l'horizon gravillonnaire a été déjà soulevé par Segalen (1968) *in* Novikoff (1974). L'étape suivante est celle qui a déposé les matériaux fins (fig. 28 C) qui représentent l'actuel horizon argileux. Par l'effet de l'induration, l'horizon argileux dans sa partie supérieure se transforme en carapace et la carapace en cuirasse. La cuirasse s'est donc formée aux dépens de la carapace, et la carapace aux dépens de l'horizon argileux. Enfin, la saprolite s'est formée progressivement et continue à se former après le dépôt des matériaux sus-jacents (fig. 28 D).

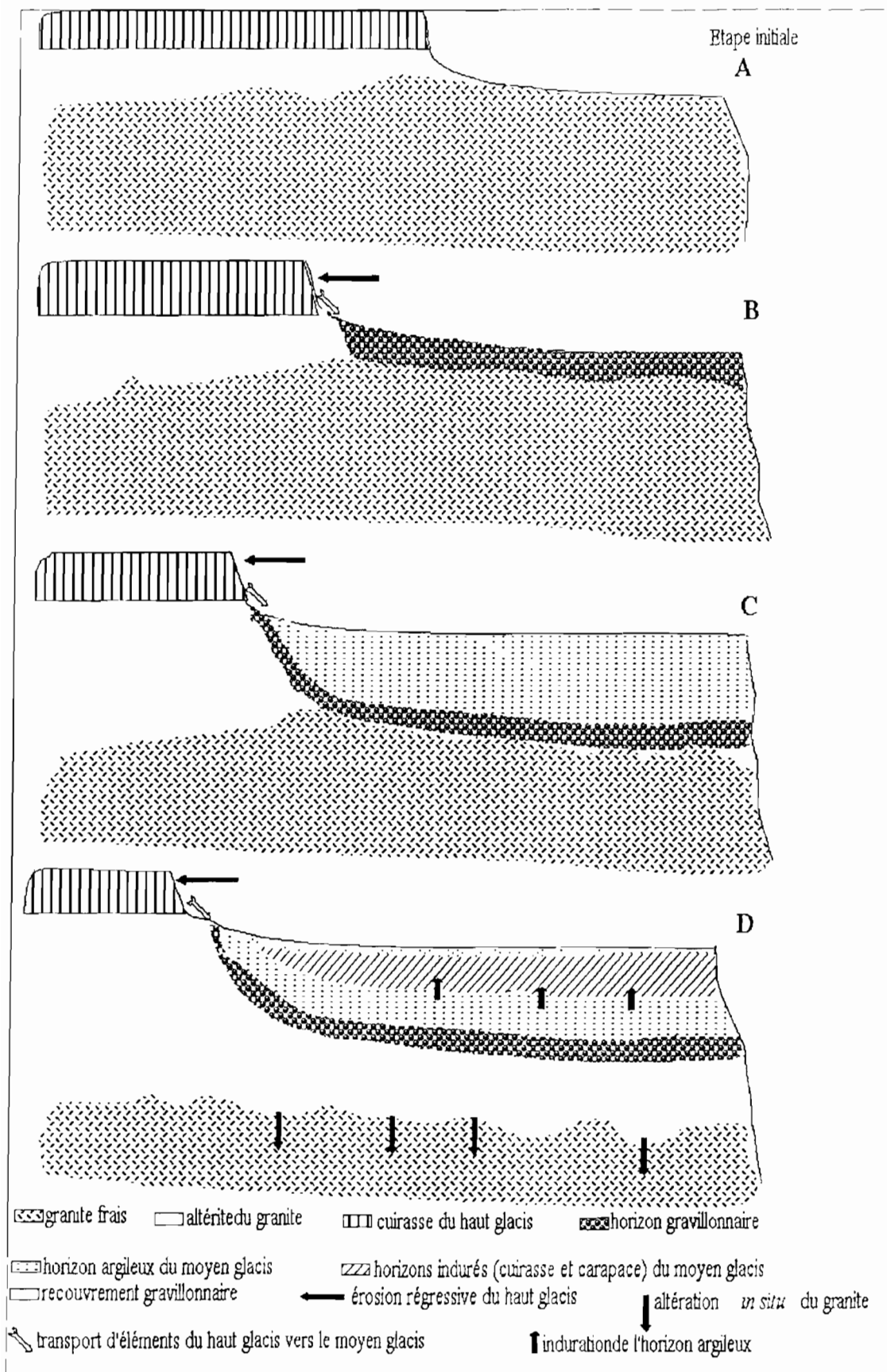


Figure 28 Schéma explicatif de la mise en place des matériaux du moyen glacis de Tinkoto

Chapitre IV :
Conclusions et recommandations

1- Conclusions générales

Après une étude des paramètres physiques (densité apparente et densité réelle), de la lithologie, de la géochimie des éléments majeurs et en traces, de la minéralogie et de l'or particulaire (exclusivement pour le profil TKA) des matériaux latéritiques des profils TKA et Tenbr situés respectivement sur le moyen et le haut glacis, les principales conclusions suivantes sont tirées.

La plupart des particules d'or présentent des puits de dissolution ce qui montre que le matériau auquel sont associées ces particules provient d'une altération ancienne. La présence des particules bien repliées montrent qu'elles ont été transportées. Une discontinuité majeure est mise en évidence entre l'arène et les matériaux sus-jacents

Les matériaux du moyen glacis sont donc hétérogènes . Ils peuvent être repartis en deux grands ensembles : les matériaux en place (matériaux autochtones), constitués par l'arène, produit de l'altération in situ du granite à biotite et à hornblende de Tinkoto. Les matériaux transportés (matériaux allochtones) qui regroupent l'ensemble des matériaux sus-jacents à l'arène : horizon gravillonnaire, horizon argileux, carapace, cuirasse et recouvrement gravillonnaire.

Le moyen glacis est le résultat de l'érosion régressive du haut glacis.

2-Recommandations

Compte tenu de toutes ces conclusions, nous recommandons :

- ▶ De faire une étude pétrographique des matériaux pour voir l'évolution de la structure des minéraux le long du profil, de bas en haut ;
- ▶ D'analyser à la microsonde les différents minéraux de chaque échantillon pour déterminer les teneurs de chacun des éléments constitutifs. Cela permettra d'utiliser les valeurs déterminées dans leur contexte géologique.
- ▶ D'analyser les teneurs de l'eau de la nappe des altérites (Cl, Eh, pH) pour avoir une idée sur la dispersion et la mobilisation de l'or (Mann, 1982 et 1984 *in* Dominique, 1993) ;

* * *

- Ambrosi J. P. (1984).** Pétrologie et géochimie d'une séquence de profils latéritiques cuirassés ferrugineux de la région de Diouga, Burkina Faso. Thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Université de Poitiers : 222p.
- Bamba O. (1996).** L'or disséminé dans les albitites birrimiennes de Larafella (Burkina Faso), évolution dans les altérites et les cuirasses ferrugineuses. Métallogénie-Pétrologie-Géomorphologie. Thèse doctorat d'université, Université d'Aix-Marseille III : 261p.
- Barreto P. S. (1966).** Notice explicative. Cartes pédologiques du Sénégal au 1 / 200.000.
- Bassot J. P. (1966).** Etude géologique du Sénégal oriental et ses confins guinéo-maliens. *Mémoire du B.R.G.M, n° 40* : 310p.
- Beuvais A., Ritz M., Parisot J. C., Dukhan M. et Bantsimba C. (1999).** Analysis of poorly stratified lateritic terrains overlying a granitic bedrock in West Africa, using 2-D electrical resistivity tomography. *Earth and planetary science letters* 173 : pp413-424.
- Benedetti M. (1989).** Géochimie de l'or : mécanismes de transport et de dépôt .Thèse, Paris : 148p.
- Bessoles B. (1977).** Géologie de l'Afrique. Le Craton ouest africain. *Mémoire du B.R.G.M, n°88* : 402p.
- Blot A., Leprun J. C. et Pion J. C. (1976).** Originalité de l'altération et du cuirassement des dykes basiques dans le massif de granite de Saraya (Sénégal oriental), *Bull. Sc. géol. Fr, t. XVIII, n°1* : p 45- 49.
- Blot A., Pion J. C. et Wackermann J. M. (1973).** Un exemple de corrélation de rang en géochimie : les altérations de socle birimien en zone tropicale sèche (Sénégal Oriental et Haute Volta). *Cah. ORSTOM , Sér. Géol. Vol. V n°1*, p25-34. Laboratoire de Géologie du Centre ORSTOM de Dakar (Sénégal).
- Bonifas M. (1959).** Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg : 159p.
- Boulangé B. (1984).** Les formations bauxitiques latéritiques de Côte D'Ivoire. Les faciès, leur transformation, leur distribution et l'évolution du modelé. *Travaux et document de l'ORSTOM n°175* : 341p.
- Boulangé B., Delvigne J. et Eschenbrenner V. (1973).** Descriptions morphologiques, géochimiques et minéralogiques des faciès cuirassés des principaux niveaux géomorphologiques de Cote d'Ivoire. *Cah. Orstom, sér. Géol., vol.V, n°1* : P59-81.
- Chamayou H. et Legros J. P. (1989).** Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol Presses universitaires de France Paris : 593P

- Chauvel A. (1967).** Notice explicative. Carte pédologique du Sénégal au 1 : 200 000 Feuille de Kédougou-Kossanto-Kéniéba
- Deer W. A., Howie R.A., Zussman J. (1961).** Rock - Forming - Minerals. Vol 3 - Scheet silicates. Edit. Longmans . 270p.
- Deer W. A., Howie R.A., Zussman J. (1962).** Rock - Forming - Minerals. Vol : 4. Framework silicates. Edit. Longmans : 435p
- Deer W. A., Howie R.A., Zussman J. (1963).** Rock - Forming - Minerals. Vol : 5. Non-silicates. Edit. Longmans : 371p.
- Delvigne J. (1965).** Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferralitique. *Mémoire ORSTOM, 13* : 177p.
- Delvigne J. E. (1998).** Atlas of micromorphology of mineral alteration and weathering. *The canadian mineralogist. Special publication 3. ORSTOM* : 494p.
- Dominique M. (1993).** Minéralisations aurifères et morphoscopie de l'or natif. Thèse d'état, Université de Lorraine : 249p.
- Duchauffour Ph. (1977).** Pédologie. 1- Pédogenèse et classification. Edit. Masson, Paris : 477p.
- Edou-Minko A. (1988).** Petrologie et géochimie des latérites à "stone line" du gîte d'or d'Ovala. Application à la prospection en zone équatoriale humide (Gabon). Thèse de doctorat d'Université, Université de Poitiers : 141p.
- Foucault A. et Raoult J. F. (1993).** Dictionnaire de géologie. Masson (3^{ème} édition) : 352p.
- Freyssinet P. (1990).** Géochimie et Minéralogie des latérites du Sud Mali. Evolution du paysage et prospection géochimique de l'or. Thèse doctorat d'université, Université Louis Pasteur de Strasbourg : 277p.
- Giraudon R. (1961).** Etude d'indices de Plomb et de Molybdène à Tinkoto (Sud-Est du Sénégal). *Rapport B.R.G.M* : 37p.
- Grandin G. (1976).** Aplissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. *Mémoire ORSTOM n°82* : 275p
- Herail G., Palacios C., Orellana R., Townley B., Lahsen A., et Parada M. (1999).** Morphologic evolution of transported gold nuggets in different climatic terrains. International symposium on Geochemical and Mineralogical tracers in the mountainous supergene environment Applied to Mining Exploration. N°50. V.Maksaev (Editor) : pp33-37.
- Lajoinie J.P. (1964).** Etudes des latérites du secteur de Tinkoto (Sud-Est Sénégal). Premier bilan des travaux de laboratoire DS. 65 A11.

- Lelong F. (1967).** Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française). Thèse de doctorat, Université de Nancy . 187p
- Leprun J. C. (1979).** Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse, transformation, dégradation. Thèse de doctorat, Univ. Strasbourg : 224p
- Macharias G. (1970).** Contribution à l'étude minéralogique et metallogénique de l'or. *Bull. du B R G M. Section II, n° 3*: 72p.
- Maignien R. (1966).** Compte rendu sur les latérites. *Recherches sur les ressources naturelles IV. Unesco* :155p.
- Mazaltarim D. (1989).** Géochimie des cuirasses ferrugineuses et bauxitiques de l'Afrique occidentale et centrale. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg : 263p.
- Michel P. (1973).** Le phénomène de cuirassement dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Tome1. Thèse doctorat ès-lettres, Université. Dakar : 365p.
- Millot G., Blot A., Leprun J. C. et Pion J. C. (1978).** Corrélations géochimiques entre les cuirasses ferrugineuses et les roches du socle cristallin au Sénégal et en Haute Volta. Lithodépendance et héritage géochimique. *C.R. Acad. Sc. Paris, t.286. Série D.* p1331- 1334.
- Mosser C. (1980).** Etude géochimique de quelques éléments traces dans les argiles des altérations et des sédiments. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg : 229p.
- Nahon D. (1976).** Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie, structure, relais et coexistence. *Sci. géol. Mém., vol.44* : 232p.
- Nahon D., (1986).** Evolution of Iron crusts tropical landscapes in rates of chemical weathering of rocks and minerals. Laboratoire de Pétrologie de la surface, Université de Poitiers : P169-191.
- Nahon D. et Bocquier. (1983).** Petrology of mineral transfers in weathering and soil systems. Proc. int. Colloq. Petrol. Weather. *Soils. Sci. Géol., mém. 72* : pp 111 - 120.
- Nahon D., Jannot Ch., Paquet H., Parron C. et Millot G. (1979).** Epigénie du quartz et de la kaolinite dans les accumulations et cuirasses ferrugineuses superficielles. La signification des goethites et hématites alumineuses. *Sci. Géol. Bull, 32, 4* : p165 - 180.
- Nahon D. et Merino E. (1996).** Pseudomorphic replacement versus dilation in laterites : petrographic evidence, mechanisms, and consequences for modelling. *Journal of geochemical exploration 57* : pp 217-225.

- Ngom P. M. (1985).** Caractérisation de la croûte birrimienne dans les parties centrale et méridionale du supergroupe de Mako. Implications géochimiques et pétrogénétiques. Thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Université de Dakar . 243p.
- Novikoff A. (1974).** L'altération de roches dans le massif du Chaillu (République populaire du Congo). Formation et évolution des argiles en zone ferralitique. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg : 298p.
- Parisot J. C. (1989).** L'altération latéritique de protores cuprifères au Brésil. Thèse de doctorat d'Université, Université de Poitiers : 183p.
- Parisot J. C., Ventoses V., Grandin G., Bourges F., Debat P., Tollon F. et Millo L. (1995).** Dynamique de l'or et d'autres minéraux lourds dans un profil d'altération cuirassé du Burkina Faso, Afrique de l'Ouest. Intérêt pour l'interprétation de mise en place des matériaux constituant les cuirasses de haut glaciais. *C. R. Acad. Sci. Paris, t.321, série 11a* ; p295-302.
- Pomerol C. et Renard M. (1989).** Eléments de géologie, 9ème édition, Edition Arman Colin. Collection U : 615p.
- Sanfo Z. (1994).** Histoire des champs latéritiques aurifères de la région d'Arbinda (Nord du Burkina Faso) : application à la prospection en zone sub - sahélienne. Thèse de doctorat d'Université, Université Aix-Marseille III : 187p.
- Tardy Y. (1989).** Titres et travaux scientifiques. *Revue scientifique* : 116p.
- Tardy Y. (1991).** Mineralogical composition and geographical distribution of African and Brazilian periatlantic latérites. The influence of continental and tropical paleoclimats during the past 150 millions years and implication for Indian and Australia. *Journal of African Earth Science, vol. 12, n° 1 / 2* : pp 283-295.
- Tardy Y., Mazaltarim D., Boeglin J. L., Roquin C., Pion J. C., Paquet H. et Millot G. (1988).** Lithodépendance et homogénéisation de la composition minéralogique et chimique des cuirasses ferrugineuses latéritiques. *C. R. Acad. Sci. Paris, t. 307, série II* : p1765-1772.
- Viers G. (1976).** Eléments de géomorphologie. Edition Nathan : 207p.
- Wackermann J.M. (1975).** L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide. Etude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal oriental. Conséquences pour la cartographie et la prospection. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg · 373p.

LISTE DES FIGURES

Figures..	Pages
Figure 1 . Carte de localisation de la zone d'étude (Tinkoto)	2
Figure 2 : Le craton ouest africain.....	4
Figure 3 . Les formations de la série birimienne dans le secteur de Kédougou .	4
Figure 4 : Géologie de la zone d'étude (extrait de la carte géologique du Sénégal au 1/200 000).....	5
Figure 5 : Les différentes surfaces d'aplanissements de l'Afrique de l'Ouest.....	7
Figure 6 : La géomorphologie de la zone d'étude (Beauvais et al., 1999, modifié)....	7
Figure 7 : Distributions des accumulations et des pertes d'éléments dans une toposéquence développée sur un matériau latéritique provenant de l'altération chimique d'une roche mère composée de plagioclases, de pyroxène, de biotite et de quartz (Delvigne, 1998).....	9
Figure 8 : Procédé de pré-traitement d'échantillons destinés à la batée .	13
Figure 9 : Procédé de pré-traitement d'échantillons destinés aux analyses chimiques et minéralogiques.....	13
Figure 10 : Diffractogrammes de TKA-10.....	16
Figure 11 : Localisation des puits sur la toposéquence.....	19
Figure 12 : Lithologie du profil TKA.....	20
Figure 13 : Evolutions géochimiques d'éléments majeurs dans le profil.....	25
Figure 14 : Diagramme triangulaire (SiO_2 , Fe_2O_3 et Al_2O_3) exprimant la composition chimique d'échantillon du profil TKA.....	26
Figure 15 : Evolutions géochimiques d'éléments en traces dans le profil.....	27
Figure 16 : Diffractogramme de l'échantillon TKA-1 (présence simultanée de l'hématite et la goethite).....	28
Figure 17 : Teneurs minéralogiques dans le profil TKA.....	29
Figure 18 : Corrélations entre les différents éléments dans le profil TKA.....	31
Figure 19 : Teneurs de l'or pour 100 kg d'échantillon du profil TKA..	32
Figure 20 : Evolution verticale des paramètres de l'or particulaire dans le profil TKA..	34
Figure 21 : Lithologie du profil Tenbr.....	37
Figure 22 : Evolutions géochimiques d'éléments majeurs dans le profil Tenbr.....	39
Figure 23 : Diagramme triangulaire (SiO_2 , Fe_2O_3 et Al_2O_3) exprimant la composition chimique d'échantillon du profil Tenbr.....	39
Figure 24 : Evolution géochimique d'éléments en traces dans le profil Tenbr	40

Figure 25 : Teneurs relatives des minéraux dans le profil Tenbr..	41
Figure 26 : Corrélations entre les différents éléments dans le profil Tenbr	42
Figure 27 Cuirasse du moyen glacis sur le granite frais.	47
Figure 28 : Schéma explicatif de la mise en place des matériaux du moyen glacis de Tinkoto	50.

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux.....	pages
Tableau 1 : Teneurs d'éléments (Si, Al, Fe et K) dans les différents minéraux (Deer et al, 1961 ; Deer et al, 1962 ; et Deer et al., 1963)	17
Tableau 2 : Mesures physiques du profil TKA.....	23
Tableau 3 : Taux de substitution du fer par Al dans les goethites dans le profil TKA.	30
Tableau 4 : Les dimensions estimées des particules d'or du profil TKA.....	33
Tableau 5 : Mesures physiques du profil Tenbr.....	37
Tableau 6 : Taux de substitution du fer par Al dans les goethites dans le profil Tenbr....	42
Tableau I : Teneurs d'éléments majeurs du profil TKA.....	(annexe 2)
Tableau II : Teneurs d'éléments en traces du profil TKA.....	(annexe 2)
Tableau III : Matrice de corrélations d'éléments majeurs, minéraux densités et porosité dans le profil TKA.....	(annexe 2)
Tableau IV : Matrice de corrélations d'éléments majeurs et traces dans le profil TKA.....	(annexe2)
Tableau Va,b,c Les dimensions estimées des particules d'or dans le profil TKA	(annexe 2)
Tableau VI : Teneurs d'éléments majeurs du profil Tenbr.....	(annexe 2)
Tableau VII : Teneurs d'éléments en traces du profil Tenbr.....	(annexe 2)
Tableau VIII : Matrice de corrélations d'éléments majeurs, minéraux densités et porosité dans le profil Tenbr.....	(annexe 2)
Tableau IX : Matrice de corrélations d'éléments majeurs et traces dans le profil Tenbr.....	(annexe2)

Planches

PLANCHE I

Photo A : Cuirasse (fraction fine). Particule à contour très irrégulier, avec des arrêtes et une surface émoussées.

Photo B : Cuirasse (fraction fine). Particule à contour régulier et arrondi montrant de nombreux puits de dissolution.

Photo C. Cuirasse (fraction fine). Particule en forme de champignon à contour très régulier et très bien arrondi montrant de nombreux puits de dissolution.

Photo D : Horizon gravillonnaire. Particule à bord replié avec contour régulier et bien arrondi. La surface est très émoussée.

Photo E : Cuirasse (fraction fine). Particule sub-arrondie. La surface est très émoussée avec de nombreux puits de dissolution de taille diverse. Le contour est très régulier et bien arrondi.

Photo F : Horizon argileux Particule à contour déchiqueté La surface se présente sous forme d'agrégat de grains.

PLANCHE I

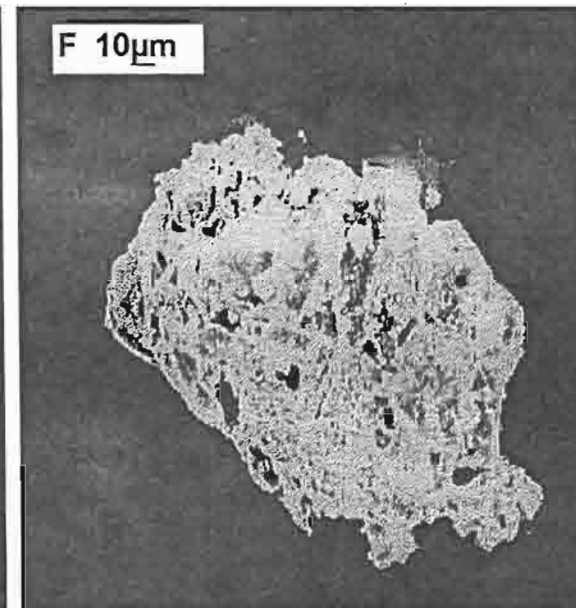
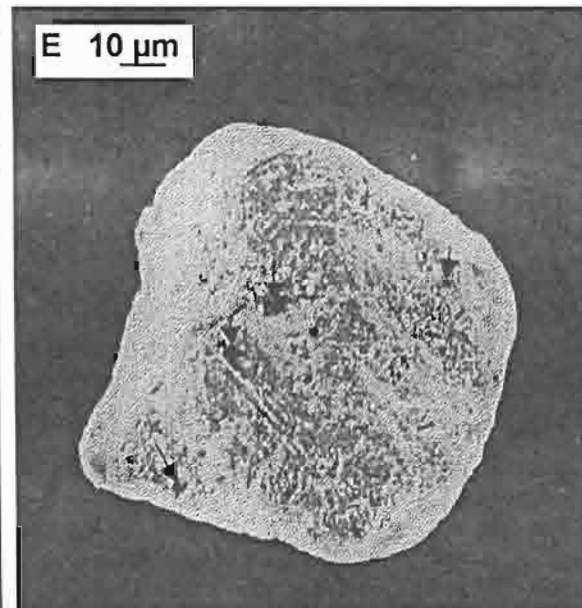
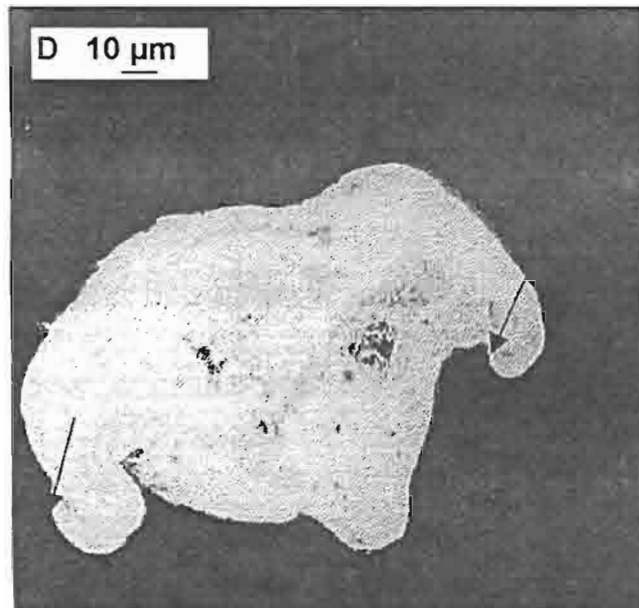
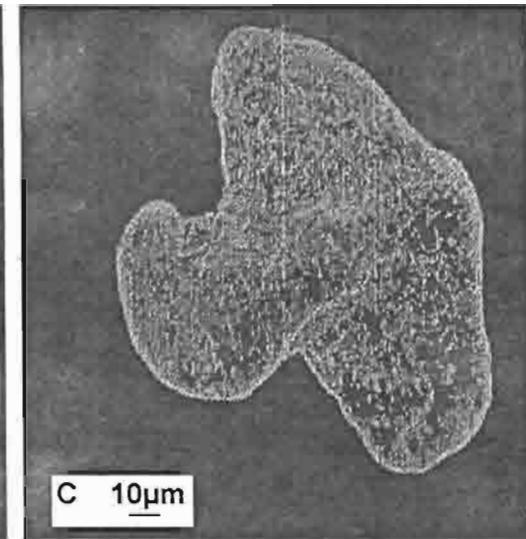
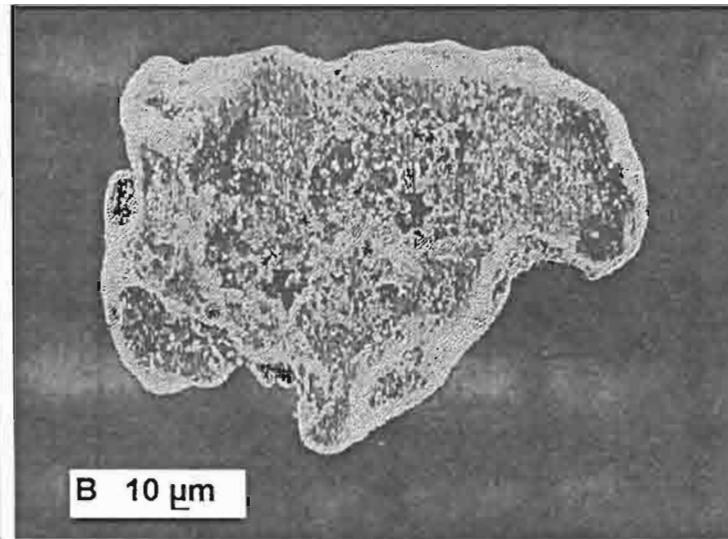
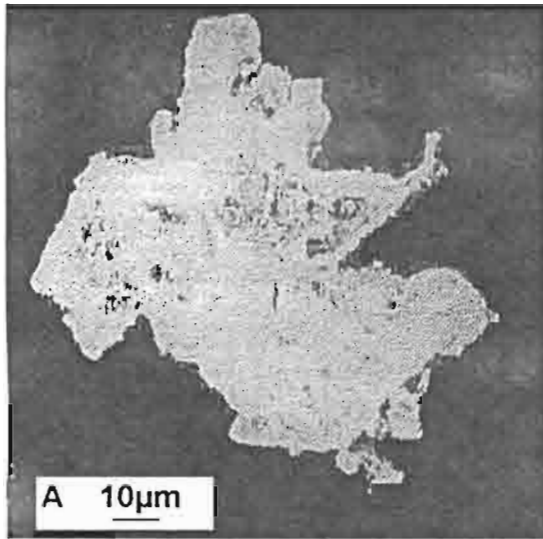


Planche II

Photo A : Cuirasse (fraction fine). Particule avec reliques de la particule primaire. Arrêtes anguleuses (\blacktriangle) peu émoussées. Contour régulier et arrondi.

Photo B : Cuirasse (fraction fine). Particule arrondie en forme de bille. Surface très émoussée avec puits de dissolution. Arrêtes très émoussées et complètement effacées. Contour très régulier et bien arrondi.

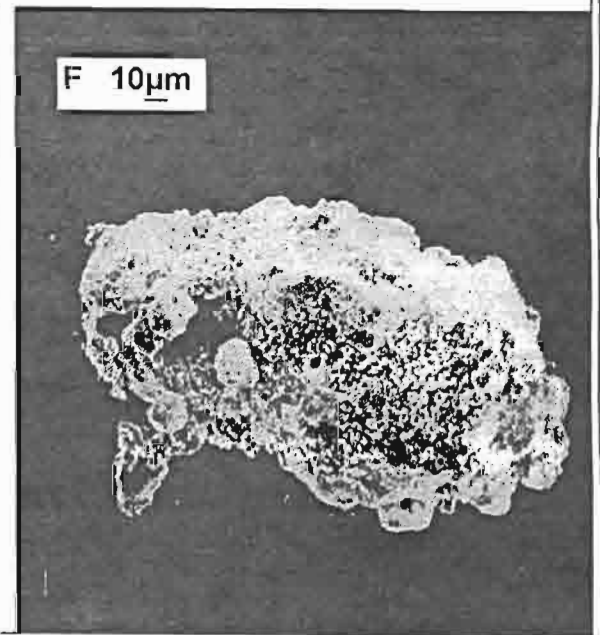
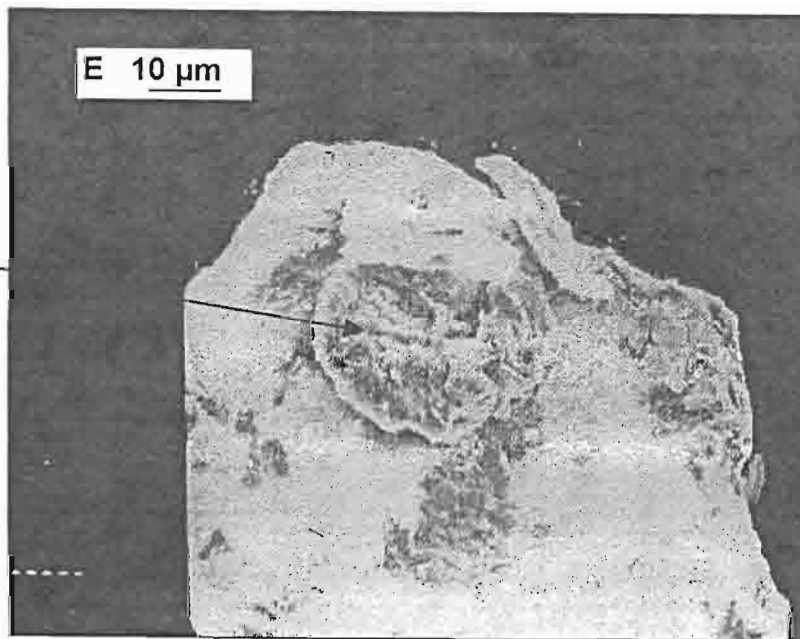
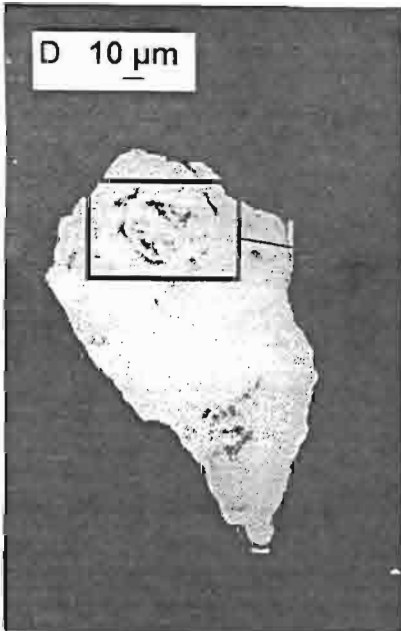
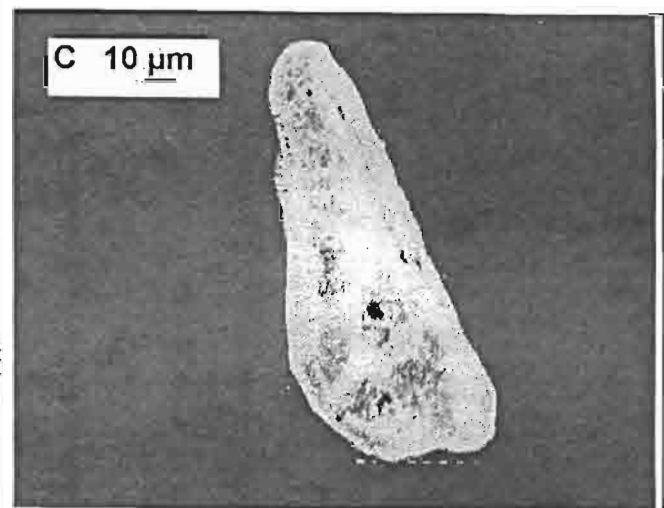
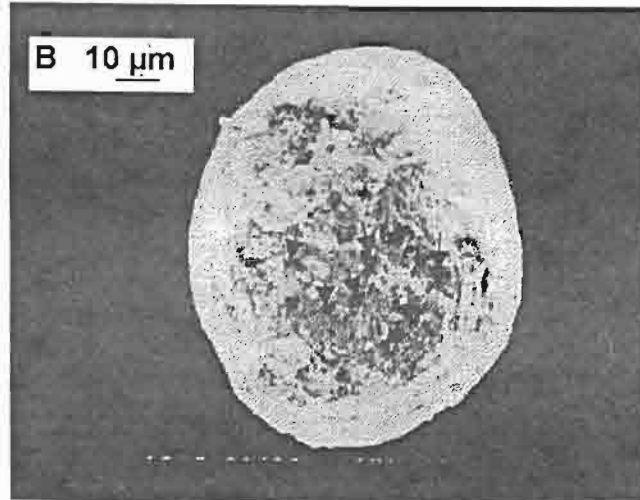
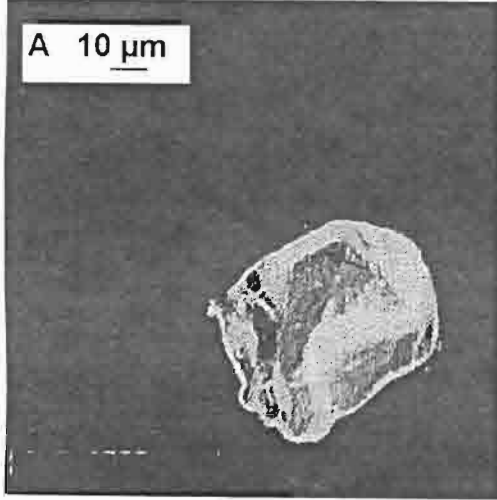
Photo C : Cuirasse (fraction fine). Particule allongée avec une surface très émoussée. Contour très régulier et bien arrondi.

Photo D : Cuirasse (fraction grossière). Particule montrant des éléments emballés.

Photo E : Développement d'une partie de la photo D. Éléments arrondis emballés par l'or.

Photo F : Carapace. Particule à surface grumeleuse peu émoussée. Contour déchiqueté.

PLANCHE II



Annexe 1

Les méthodes d'études

1 Mesures physiques

1-1 Mesure de densité apparente

La mesure de la densité apparente d'une roche poreuse nécessite la mesure de son poids apparent et de son volume (Bonifas, 1959). Nous avons utilisé pour cela la méthode de Mecher. A la place de la paraffine, nous avons utilisé le sac en plastique

1-1-1-Principe

La motte de terre est rendue imperméable par le revêtement du sac en plastique. La détermination du volume se fait par pesée de l'échantillon non revêtu dans l'air à la balance, puis revêtu dans l'eau contenue dans le bêcher.

1-1-2 Matériel nécessaire

Sac en plastique, balance, eau de robinet, bêcher, aspirateur.

1-1-3 Mode opératoire

Le mode opératoire concerne chaque motte de terre. Les mottes sont placées à l'étuve (105°C) pendant 24 heures pour la déshydratation. Retirée de l'étuve, chacune d'elles est pesée et on note le poids sec P . Ensuite la motte est emballée dans un sac en plastique qu'on accroche à un aspirateur pour créer le vide. A l'aide des cales, on immerge le sac contenant la motte dans le bêcher préalablement rempli d'eau jusqu'à une hauteur de 10 cm. Ceci nous donne le volume d'eau déplacée (ou la poussée d'Archimède P'). On calcule ainsi la densité apparente par la formule : $D_a = P / (P' - P_{sac})$

1-2 Mesure de densité réelle

La mesure de la densité réelle d'une roche poreuse nécessite la mesure du poids du sol sec et le poids de la phase solide.

1-2-1 Principe

La motte de terre écrasée est placée dans le pycnomètre. La détermination du poids se fait par pesée de la poudre du sol ensuite celle de la phase solide.

1-2-2 Matériel nécessaire

Pycnomètre, mortiers en fer et en porcelaine, dessiccateur, aspirateur, balance.

1-2-3 Mode opératoire

La motte retirée de l'étuve est écrasée successivement aux mortiers en fer et en porcelaine. La poudre obtenue est placée dans le pycnomètre dont le poids à vide ($P_{pyc\ vide}$) est connu. L'ensemble est pesé à la balance : on note le poids ($P_{pyc + sol}$)

On ajoute ensuite de l'eau jusqu'à la gorge du pycnomètre (après avoir humecté toute la poudre). L'ensemble est placé dans le dessiccateur. On remplit totalement d'eau le pycnomètre

contenant la poudre du sol. L'ensemble est ensuite pesé et on obtient le poids ($P_{\text{pyc} + \text{sol} + \text{eau}}$).
La densité réelle est calculée suivant la relation ci-après :

$$D_r = \frac{(P_{\text{pyc} + \text{sol}} - P_{\text{pyc vide}})}{((P_{\text{pyc} + \text{eau}} - P_{\text{pyc vide}}) - (P_{\text{pyc} + \text{sol} + \text{eau}} - P_{\text{pyc} + \text{sol}}))}$$

Éch.	Prof (m)	Loi %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	Cr ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	K ₂ O %	MgO %	MnO %	Na ₂ O %	P ₂ O ₅ %	SiO ₂ %	TiO ₂ %
TKA1	0.75	0.67	11.65	0.03	0.07	43.73	0.16	0.03	0.06	<0.01	0.47	35.65	0.63
TKA2	2	9.47	14.44	0.05	0.07	40.05	0.2	0.07	0.08	<0.01	0.18	33.9	0.9
TKA3	3.85	7.76	12.92	0.05	0.01	22.26	0.23	0.04	0.03	<0.01	0.04	55.47	1.07
TKA4	5.20	7.4	12.67	0.06	0.04	20.38	0.24	0.04	0.03	<0.01	0.1	57.14	1.02
TKAt	5.85	8.64	11.92	0.04	0.03	30.61	0.22	0.06	0.23	<0.01	0.09	46.92	0.97
TKA5	6.20	7.29	14.06	0.06	0.02	15.36	0.28	0.04	0.03	<0.01	0.14	60.27	1.02
TKA6	7.15	7.33	15.64	0.07	0.01	10.09	0.34	0.04	0.07	<0.01	0.13	64.41	1.2
TKA7	7.60	5.35	12.05	0.05	<0.01	5.02	0.31	0.03	0.02	<0.01	0.1	75.98	1.06
TKA8	8.20	4.54	8.35	0.04	<0.01	12.04	0.24	<0.01	0.03	<0.01	0.1	72.68	0.73
TKA9	8.80	7.49	9.78	0.03	0.06	30.69	0.18	0.01	0.04	<0.01	0.19	50.8	0.51
TKA10	10.2	9.58	19.85	0.07	0.01	13.83	0.64	0.11	0.05	<0.01	0.14	54.21	0.79
Granite		0.62	13.88	2.21	0	3.01	4.26	1.1	0.05	3.51	0.09	69.52	0.33
Tufs		1.54	16.05	5.04	0.02	5.95	0.66	4.51	0.1	4.21	0.15	60.14	0.67

Tableau I : Teneurs d'éléments majeurs du profil TKA.

Éch.	Prof (m)	Au ppb	As ppm	Ba ppm	Co ppm	Cu ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Sc ppm	Sr ppm	V ppm	Zn ppm
TKA1	0.75	<5	34	30	3	72	7	15	14	14	3	712	28
TKA2	2	25	10	30	3	81	5	16	20	20	3	611	24
TKA3	3.85	20	<2	10	<1	53	4	8	14	10	4	318	10
TKA4	5.20	80	12	10	<1	43	4	6	14	9	3	284	8
TKAt	5.85	30	24	260	9	79	1	16	84	13	6	402	16
TKA5	6.20	15	22	10	1	37	3	7	10	11		214	10
TKA6	7.15	25	8	90	5	26	3	6	24	10	6	156	10
TKA7	7.60	20	<2	10	1	17	1	6	6	7	5	94	8
TKA8	8.20	15	6	10	1	26	4	7	14	6	3	230	8
TKA9	8.80	65	32	30	1	91	10	12	26	12	3	571	32
TKA10	10.2	10	6	60	5	47	<1	16	30	11	5	178	40
Granite		10	0	70	6	9	3	12	8	1	19	42	28
Tufs		25	6	10	17	52	3	120	2	1	16	65	48

Tableau II : Teneurs d'éléments en traces du profil TKA

	Al2O3	CaO	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	SiO2	Da	Dr	illite	kaol	G. H.	qtz
Al2O3	1												
CaO	0.84	1											
Fe2O3	-0.13	-0.47	1										
K2O	0.80	0.69	-0.49	1									
MgO	0.89	0.58	0.17	0.69	1								
MnO	0.01	-0.22	0.46	-0.14	0.31	1							
SiO2	-0.26	0.13	-0.93	0.17	-0.51	-0.47	1						
Da	-0.60	-0.58	0.63	-0.84	-0.39	0.05	-0.38	1					
Dr	-0.42	-0.48	0.81	-0.77	-0.18	0.20	-0.63	0.91	1				
illite	0.74	0.48	-0.20	0.93	0.75	-0.06	-0.08	-0.67	-0.56	1			
kaol	0.90	0.84	-0.07	0.53	0.80	0.14	-0.27	-0.36	-0.22	0.41	1		
G. H.	-0.54	-0.13	-0.75	-0.16	-0.74	-0.45	0.94	-0.09	-0.37	-0.39	-0.48	1	
Qtz	-0.11	-0.44	1.00	-0.48	0.18	0.47	-0.93	0.62	0.82	-0.20	-0.06	-0.76	1

Tableau III : Matrice de corrélations d'éléments majeurs, des minéraux et des densités du profil TKA.

	Au	Al	As	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	K	Mg	Mn	Mo	N	P	Pb	Sc	Sr	V	Zn	Ba	Ca	
Au	1																					
Al	-0.22	1																				
As	0.17	0.48	1																			
Co	-0.26	0.40	0.20	1																		
Cr	-0.02	0.79	0.64	0.17	1																	
Cu	0.24	0.74	0.67	0.28	0.88	1																
Fe	0.26	0.79	0.62	0.14	0.83	0.91	1															
Ga	-0.37	0.80	0.28	0.68	0.60	0.56	0.47	1														
K	-0.44	-0.16	-0.29	0.33	-0.47	-0.34	-0.52	0.16	1													
Mg	-0.40	-0.06	-0.37	0.40	-0.49	-0.28	-0.38	0.24	0.88	1												
Mn	-0.04	0.44	0.30	0.90	0.33	0.46	0.37	0.58	-0.05	0.10	1											
Mo	0.38	0.24	0.60	-0.41	0.63	0.56	0.56	-0.16	-0.52	-0.72	-0.26	1										
N	-0.22	0.80	0.43	0.61	0.73	0.77	0.63	0.93	0.13	0.18	0.56	0.08	1									
P	-0.27	0.61	0.71	0.07	0.64	0.42	0.40	0.45	-0.04	-0.27	-0.04	0.54	0.46	1								
Pb	0.07	0.35	0.29	0.86	0.23	0.47	0.37	0.51	0.07	0.22	0.95	-0.26	0.55	-0.13	1							
Sc	-0.06	0.74	0.39	0.34	0.80	0.76	0.69	0.70	-0.30	-0.16	0.40	0.29	0.75	0.41	0.26	1						
Sr	-0.27	-0.14	-0.26	0.69	-0.48	-0.29	-0.43	0.10	0.57	0.66	0.54	-0.71	-0.01	-0.38	0.54	-0.18	1					
V	0.10	0.78	0.70	0.08	0.98	0.87	0.86	0.51	-0.50	-0.55	0.24	0.73	0.65	0.70	0.15	0.75	-0.54	1				
Zn	-0.10	0.53	0.40	0.30	0.51	0.61	0.41	0.65	0.42	0.32	0.11	0.25	0.81	0.53	0.20	0.51	-0.13	0.50	1			
Ba	-0.08	0.31	0.25	0.92	0.14	0.33	0.23	0.48	0.11	0.24	0.97	-0.35	0.46	-0.12	0.97	0.21	0.67	0.06	0.08	1		
Ca	-0.20	-0.44	-0.55	-0.08	-0.78	-0.68	-0.66	-0.41	0.54	0.61	-0.31	-0.52	-0.53	-0.39	-0.30	-0.40	0.57	-0.75	-0.29	-0.17	1	

Tableau IV : Matrice de corrélations d'éléments majeurs et en trace du profil TKA