

ÉVOLUTION GÉOCHIMIQUE DES FORMATIONS LATÉRITIQUES DANS L'ÉCOSYSTÈME PÉRIFORESTIER DU SUD-EST CAMEROUN : LE SITE DE KANDARA.

Véronique KAMGANG KABEYENE BEYALA¹, Georges Emmanuel EKODECK², NJILAH Isaac KONFOR³

¹Université de Yaoundé I, ENS BP 47 Yaoundé – Cameroun.

²Université de Yaoundé II, B. P. 4930 Yaoundé – Cameroun.

³Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences B.P. 812 Yaoundé – Cameroun.

RÉSUMÉ: *Kandara est représentatif de l'écosystème périforestier du Sud-Est du Cameroun, caractérisé par une mosaïque d'unités forestières qui s'imbriquent avec des îlots de savane. Une épaisse couverture pédologique latéritique, entité complexe où s'harmonisent des ensembles lithiques indurés et meubles, sert de support à cette végétation. Le décryptage des formations latéritiques de Kandara révèle les caractéristiques pétrologiques des ensembles, leurs relations mutuelles et leurs évolutions géochimiques. Il pourrait permettre de définir les étapes de la genèse et de l'évolution de ces formations superficielles, de même que leur influence sur la dynamique forestière et la distribution phytogéographique.*

ABSTRACT: *Kandara is representative of the ecosystem of the forest borderline of South-East Cameroon. It is characterized by a mosaic of small forest units mingled in the savanna. A thick and complex lateritic cover made of indurated and clayey lithic groups which serve as the substratum for the vegetation. The analysis of the laterites in Kandara reveal their petrologic characteristics, their interrelations and geochemical changes. The genesis and evolution of these superficial formations could thus be defined, as well as the forest dynamics and the phytogeography.*

INTRODUCTION

Au Sud-Est Cameroun, la région périforestière est une zone de contact forêt/savane dans laquelle règne un climat tropical humide. Il s'agit d'une bande d'une centaine de kilomètres de large suivant globalement le parallèle 4°20'N. Elle est le siège d'une dynamique de végétation marquée par la transgression de la forêt sur la savane. Ce phénomène semble dépendre non seulement du climat, mais surtout des facteurs morphopédologiques. Les roches de cette zone périforestière sont constituées de migmatites et de granites panafricains (Bessoles et Trompette, 1980) dont la profonde altération a conduit au développement d'une importante couverture pédologique latéritique, avec une large extension de cuirasses ferrugineuses. Sur le plan morphologique, ces formations représentent une grande surface d'aplanissement découpée, par un réseau hydrographique dense, en plateaux d'altitude équivalente (650 m). Des études menées dans d'autres régions d'Afrique (Kaloga, 1976 ; Leprun, 1977, 1979 ; Boulangé, 1984 ; Beauvais, 1991 ; Tardy et al., 1991 ; Hénocque, 1999) ont montré que, partant d'une analyse des séquences d'altérations et des sols, il est

possible de déterminer la genèse et l'évolution des formations superficielles. Des études morphostructurales, minéralogiques et géochimiques, ainsi que celles des différents mécanismes de transformation et d'évolution de la couverture pédologique latéritique, entreprises sur le site de Kandara, se proposent de préciser la genèse et l'évolution des formations latéritiques d'une part, et d'établir d'autre part les relations possibles entre les variations de la couverture pédologique et la distribution de la végétation.

MATERIELS ET METHODES

La caractérisation du climat a été réalisée par l'exploitation des données de la météorologie nationale, station de Bertoua (métropole administrative du Sud-Est Cameroun). L'étude de la morphologie et de la couverture latéritique a nécessité le recours aux travaux de terrain et de laboratoire. Sur le terrain, un levé topographique à grande échelle (1/10 000) ayant conduit à la confection d'une carte topographique, a permis d'implanter avec précision une série de layons (ou transects), le long desquels ont été faits les descriptions des plantes et les relevés botaniques,

puis, par sondage à la tarière, les prospections pédologiques. Le long de certains transects, des fosses pédologiques ont permis de préciser la distribution latérale et verticale des formations latéritiques. En laboratoire, les échantillons ont été soumis aux analyses classiques de la pétrologie. Les unes, préservant les structures des matériaux, concernent la caractérisation minéralogique, micromorphologique, au microscope optique et à la microsonde électronique (type CAMECA SX 50). Les autres, faites à partir des poudres totales obtenues après broyage fin (<30 µm) sont destinées à l'analyse par diffraction des rayons X pour la détermination des paragenèses minérales et aux analyses chimiques par spectrométrie d'émission ou par absorption atomique, en vue de l'identification du cortège d'éléments majeurs, d'éléments traces et des terres rares.

RESULTATS

Morphologie

Le site de Kandara (4°20'N, 13°43'E) est un plateau de 640 m d'altitude moyenne (Fig.1), situé à 45 km de Bertoua, dans la province de l'Est Cameroun. Il est soumis à un climat tropical humide à quatre saisons avec une température moyenne annuelle de 24°C et une pluviométrie de 1500 à 1700mm/an. Il est couvert par deux grandes structures de végétation que sont la savane et la forêt. Le centre du plateau s'intègre au milieu savanicole, tandis que les versants demeurent le lieu privilégié du développement de la forêt. Cette végétation est divisée en unités texturales. Ainsi, le domaine savanicole se compose d'unités de savane herbacée à *Imperata cylindrica*, de savane herbacée et arbustive, de savane arborée à

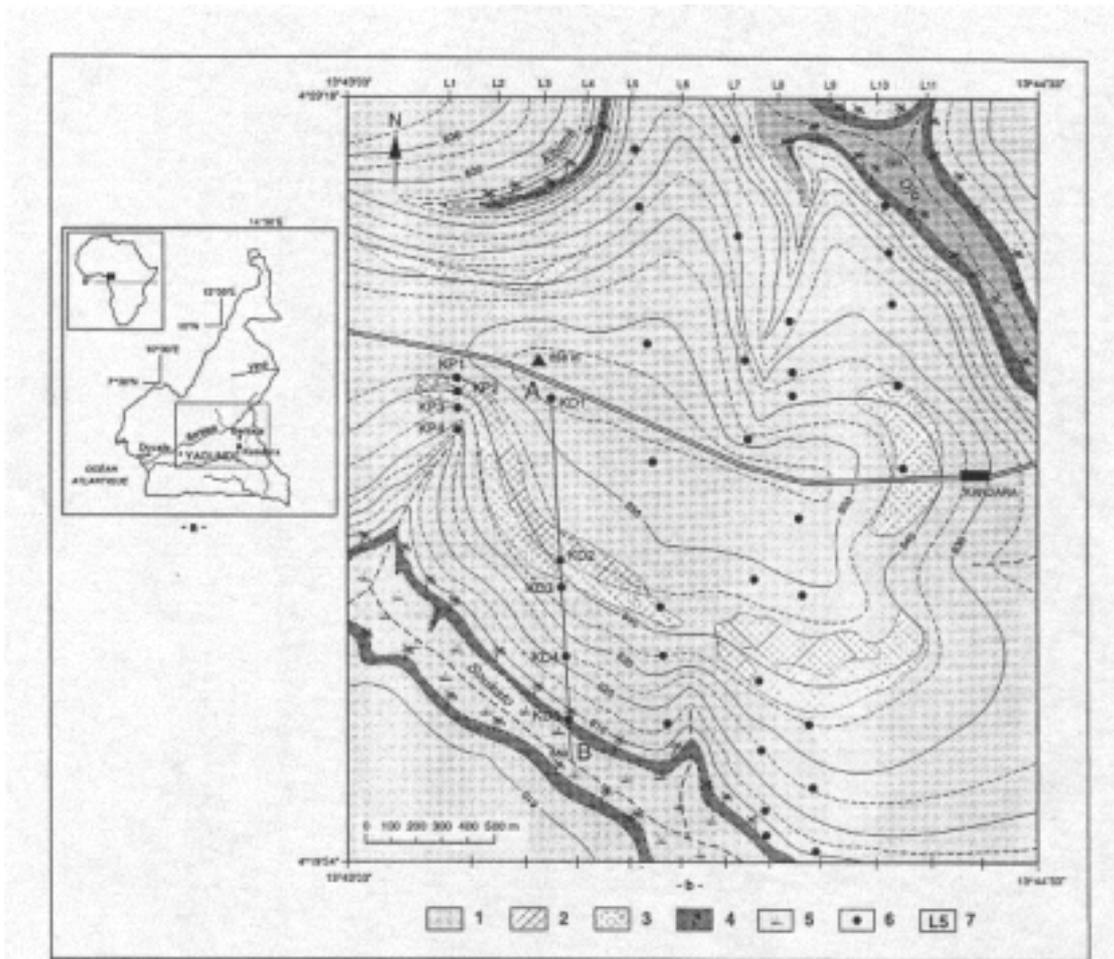


Figure 1: Le plateau de Kandara. a) Situation. b) Organisation de la couverture latéritique : 1 - ensembles meubles ; 2 - cuirasse ferrugineuse massive ; 3 - cuirasse ferrugineuse fragmentée ; 4 - forêt marécageuse ; 5 - prairie marécageuse ; 6 - puits pédologiques ; 7 - layons.

Imperata cylindrica et *Albizia sp.* Par sa structure, la forêt semi-caducifoliée à Sterculiaceae et Ulmaceae présente un faciès de transition (forêt de recrû) près de la savane, et un faciès mature (forêt ancienne) en bas de versant, à proximité des cours d'eau. Ces deux faciès marquent ainsi une gradation de la végétation de la savane vers les thalwegs. Les plaines alluviales sont couvertes de forêts à *Raphia* et de prairies marécageuses.

Ce plateau culminant à 656 m, est sur la ligne de partage des eaux de deux petits bassins versants : la *Kibimé* au Nord et la *Soukato* au Sud. De part et d'autre du point culminant, le plateau s'incline en pente douce vers le Sud (1.5 à 2%) sur une distance atteignant 800 à 1500 m, et en pente légèrement plus redressée (4 à 5%) vers le Nord sur une distance de 400 à 1000 m. La limite du plateau suit à peu près la courbe 640 m. Ses bordures sont soulignées soit par la cuirasse affleurante, principalement sur la bordure sud, soit par des fragments de cuirasse marquant les ruptures de pente au Sud comme au Nord.

La vallée de la *Soukato*, très plate, mesure par endroits 300 m de large. Cette rivière coule d'Ouest en Est, entre les courbes de niveau 605 et 600 m, en émettant des ravines dont les têtes viennent buter sur les bords du plateau. Dans cette vallée, la présence de seuils rocheux empêche l'enfoncement de la rivière. Le fond de vallée est marécageux, à cause d'un écoulement lent des eaux. L'épaisseur des sédiments et des altérites n'excède pas deux mètres au-dessus de la roche-mère. La rivière coule en méandres et l'érosion mécanique vers les versants est faible.

Au Nord du secteur, la *Kibimé* coule dans une vallée plus étroite à une altitude avoisinant la courbe 590 m. La différence de niveau de base avec la *Soukato*, liée ici à un enfoncement, non barré par un seuil rocheux, fait que l'érosion mécanique est intense. En effet, les ravines très profondes entaillent fortement les ensembles meubles couvrant la partie inférieure des versants et pénètrent dans les altérites entraînant une accentuation des pentes. C'est pourquoi, au Nord, les versants sont abrupts.

Il ressort de ce qui précède que l'altération différentielle au niveau du bassin versant de la *Kibimé* et du *Soukato* conduit à une érosion mécanique différentielle plus marquée au Nord qu'au Sud du site Kandara. Ainsi, la dissymétrie du réseau hydrographique mise en évidence va influencer sur l'organisation spatiale de la couverture latéritique. Celle-ci provient de l'altération des roches sous-jacentes : granites calco-alkalins, porphyroïdes, à biotites et amphiboles, qui sur le plan structural sont marquées par des enclaves ferromagnésiennes, des linéations

minéralogiques, des filons pegmatitiques, et des fractures dont la direction principale est N120-145, avec des pendages orientés vers l'Est. Cette couverture latéritique, dans laquelle s'imbriquent des ensembles indurés et meubles, est complexe. Elle comprend:

- un ensemble meuble de plateau,
- un ensemble cuirassé de plateau,
- un ensemble meuble de versant,
- un ensemble altéritique

En dehors de ces ensembles, il existe dans le bas fond marécageux à hydromorphie permanente, un sol hydromorphe.

Pétrologie des ensembles latéritiques

L'ensemble meuble de plateau

Cet ensemble argileux, rouge, homogène, recouvre la partie haute du plateau et repose sur la cuirasse ferrugineuse massive (Fig. 2). Il comprend un horizon humifère de 25 cm d'épaisseur, et un horizon argileux d'une épaisseur moyenne de 6 m s'amenuisant progressivement jusqu'à disparaître totalement en bordure de plateau là où la cuirasse sous-jacente affleure. De petits nodules noirs, ferrugineux, de taille millimétrique, sont disséminés dans l'argile et plus abondants à la partie inférieure. Le matériau est très homogène en raison de l'activité des termites dont les galeries pénètrent jusqu'à la cuirasse sous-jacente. En saison des pluies, une nappe d'eau temporaire s'installe à la base et génère des écoulements d'eau sur la cuirasse affleurante.

Au microscope optique le fond matriciel apparaît constitué d'un squelette quartzes (5 %), avec quelques cristaux d'anatase (2 %) et de rares zircons, enrobé dans une matrice argileuse. Les quartz ne présentent aucune figure de dissolution récente, cependant les plus gros cristaux sont parfois parcourus de fissures emplies d'hématite, sans prolongement hors du quartz dans la matrice. Les nodules ferrugineux, compacts, sont constitués d'hématite et de gibbsite. La matrice argileuse a une structure en agrégats, de taille inférieure à 50 µm, souvent coalescents, et présentant à leur bordure des réorganisations plasmiqes conférant au matériau une structure lattisépique. A la base, quelques, taches jaunes résultant de l'hydromorphie, témoignent de la présence d'une nappe d'eau temporaire.

Les moyennes des densités apparente et réelle sont respectivement de 1.44 et 2.56. Cet ensemble meuble est donc doté d'une forte porosité (44 %) avec des pores fins inter agrégats, des fissures de dessiccation, et des chenaux

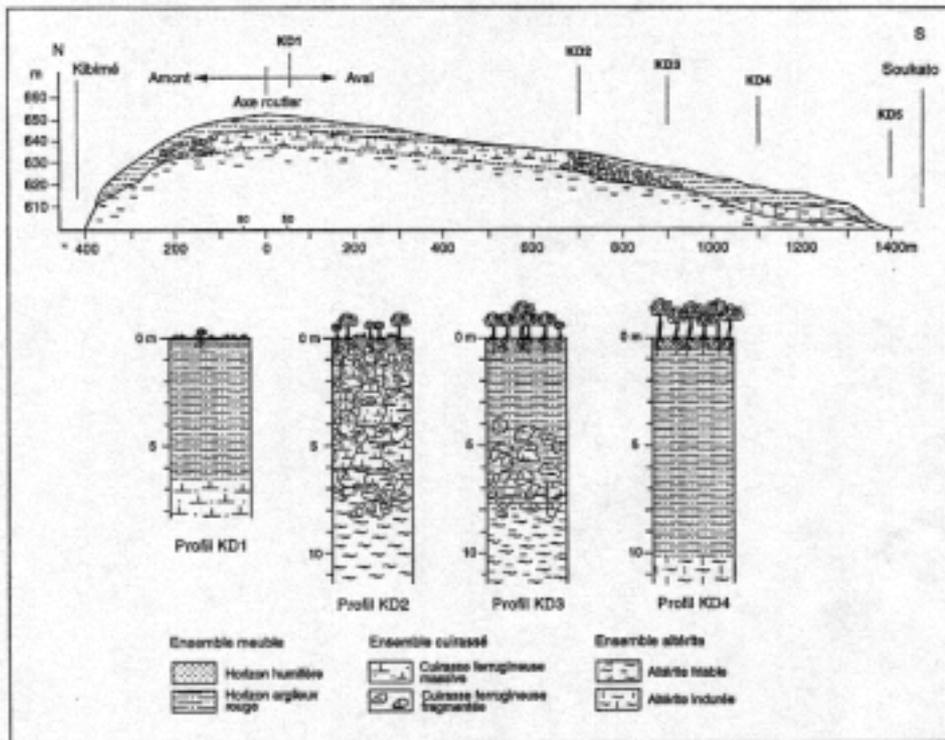


Figure 2 : Le plateau de Kandara. Organisation latérale et verticale de la couverture latéritique.

de circulation des termites.

Les analyses chimiques globales (Tableau 1) et la diffraction des rayons X permettent de confirmer la grande homogénéité de ce matériau constitué de quartz (5 %), silice amorphe (25 %), kaolinite (50 %), gibbsite (8 %), hématite (8 %), goëthite (2 %), anatase (2 %), et zircon.

L'ensemble cuirassé de plateau

Cet ensemble est constitué par une cuirasse ferrugineuse, affleurante ou enfouie, massive rouge-brun, très indurée, nodulaire, poreuse et vacuolaire. Son épaisseur moyenne est estimée à 5-8 m. Sur le plateau, la cuirasse massive se localise sous l'ensemble meuble. Elle affleure principalement en bordure sud, sur une bande de plus de 1 km de long et sur une largeur de plus de 100 m. En tête de versant, la cuirasse fragmentée toujours affleurante marque la rupture de pente, et s'amenuise vers l'aval où elle se prolonge par un horizon fragmentaire et nodulaire enfoui sous le recouvrement meuble de versant (Fig. 2). Dans la partie nord du plateau, la cuirasse massive affleurante est quasiment absente, et la cuirasse fragmentée n'est représentée que par des fragments et des nodules épars

enrobés dans une matrice argileuse.

Cet ensemble cuirassé comprend un *faciès supérieur* alvéolo-nodulaire, brun-rouge, et un *faciès inférieur* alvéolaire, jaune violacé.

Le *faciès supérieur* est observé sur les affleurements de cuirasse massive du plateau et à la partie supérieure des profils creusés dans la cuirasse fragmentée. Les valeurs moyennes de densités apparente et réelle sont respectivement de 2.33, 2.94 ; la porosité est donc faible (21 %).

Cette cuirasse renferme des fragments et des nodules ferrugineux, sombres, enrobés dans une matrice ferrugineuse rubanée brun rouge; des fissures coupent l'ensemble et sont emplies d'argile rouge à jaune.

- Les nodules ferrugineux, noirs, comprennent un squelette riche en quartz, de taille millimétrique; des fissures emplies d'hématite, formant aussi la matrice ferrugineuse intra-nodulaire. Ces nodules apparaissent relictuels, mais on n'y reconnaît aucune structure initiale.

Tableau 1 : Analyses chimiques globales moyennes des ensembles latéritiques
Tableau 1 : Mean of global chemical analysis of lateritic horizons

ENSEMBLES	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	H ₂ O	Total
Recouvrement meuble						
- de plateau	47,35	25,18	9,81	1,95	12,75	97,07
- de versant	44,05	26,23	11,26	1,98	15,24	98,76
Cuirasse						
FACIES - fragments, nodules	28,90	21,64	32,12	1,12	13,25	97,03
SUPERIEUR - matrice	41,41	24,55	13,51	1,53	14,34	95,34
FACIES - fragments, nodules	17,71	14,73	49,70	1,53	13,69	97,36
INFERIEUR - matrice	35,75	25,08	21,62	1,73	14,93	98,11
Altérite						
- altérite friable	52,97	19,90	9,96	1,84	14,22	98,89
- altérite indurée	41,69	21,27	21,00	1,24	12,20	97,40

La matrice ferrugineuse rubanée brun rouge comporte un squelette de petits quartz, disloqués dont les bords sont marqués par des figures de dissolution, des micronodules noirs hématitiques, et une matrice rubanée goéthitique, présentant de petits pores (<50 mm) emplis de gibbsite.

Les fissures, d'une largeur d'environ 500 µm sont emplies d'un fond matriciel argileux rouge-jaune à

rouge, très poreux, micro-agrégé, à petits cristaux de quartz abondants. Les pores inter-agrégats sont emplis ou non de gibbsite.

Les analyses à la microsonde réalisées sur ces trois types de fonds matriciels montrent une déferrugineuse progressive et une tendance d'évolution vers le pôle alumineux (Tableau 2).

Tableau 2 : Moyennes des analyses à la microsonde de fonds matriciels des faciès cuirassés

Tableau 2 : Mean of microprobe analysis of S-matrices of the iron crust facies

CUIRASSE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Total
FACIES SUPERIEUR						
- nodules ferrugineux	12,41	13,58	71,45	0,65	0,90	98,96
- matrice ferrugineuse rubanée	22,88	25,01	39,62	0,85	1,08	89,47
- matrice argileuse fissurale	19,13	51,36	9,36	1,38	0,08	81,31
FACIES INFERIEUR						
- altéroléiques	33,82	32,58	18,41	0	1,02	85,84
- nodules ferrugineux	2,56	9,55	72,40	0,30	2,08	86,94
- matrice ferrugineuse rubanée	25,48	26,75	34,21	0,75	1,24	88,48
- matrice argileuse fissurale	33,18	30,61	9,67	1,62	0,16	75,28

Ainsi, il apparaît bien que cette cuirasse soit marquée par une succession d'épisodes correspondant à une première ferruginisation intense formant le fond relictuel de nodules noirs à hématite. La dégradation de cette ancienne cuirasse a nourri un nouveau fond matriciel, lui-même enrichi du fer issu du recouvrement meuble et donnant naissance à la matrice ferrugineuse rubanée à goëthite. Le stade ultime est un remplissage des fissures par des produits argileux provenant du recouvrement meuble.

Le faciès inférieur a été observé sous la cuirasse supérieure fragmentée, à la base des profils creusés en tête de versant. Il est constitué de fragments décimétriques et de nodules ferrugineux jaune brun violacés inclus dans une matrice argileuse blanc jaunâtre. La densité apparente des fragments de cuirasse est de 2.20, la densité réelle de 2.88 ; la porosité (24%) est légèrement plus élevée que dans la cuirasse supérieure (21 %).

Au microscope, ce faciès apparaît constitué de trois types de fonds matriciels : des altéreliques, des nodules ferrugineux, des remplissages ultimes.

- Les altéreliques : bien que ce fond matriciel soit riche en fer (25 à 45 %), il présente des fantômes structuraux de minéraux primaires (biotite, feldspaths), riches en goëthite. En bordure de ces plages on peut observer l'effacement des structures et un passage continu vers les nodules ferrugineux.
- Les nodules ferrugineux à hématite sont semblables à ceux décrits dans le faciès supérieur.
- La matrice ferrugineuse rubanée, ici jaune violacée, est en continuité avec les nodules ou avec les altéreliques.
- Les remplissages des pores et fissures, aux limites nets avec les nodules et les altéreliques, sont constitués par un matériau essentiellement argileux, à structure micro-agrégée.

Le faciès inférieur apparaît formé directement au contact des altérites dont quelques plages ont subi une forte ferruginisation. Les uns et les autres ont donné naissance à la matrice rubanée qui assure l'induration de l'ensemble. Comme pour le faciès supérieur, on observe un transfert ultime de matériau argileux dans les pores et fissures.

Les analyses chimiques globales montrent (Tableau 1) des taux de fer plus élevés dans le faciès inférieur que dans le faciès supérieur. Par contre, silice et alumine y sont de moindre importance. Dans les deux cas, le titane se maintient dans les mêmes proportions. Ces caractéristiques sont aussi bien valables dans la cuirasse massive que dans la cuirasse fragmentée.

Dans la cuirasse fragmentée, les fragments de cuirasse supérieure sont enrobés dans une matrice argileuse qui présente les caractéristiques de l'ensemble meuble de plateau, alors que les fragments de cuirasse inférieure sont enrobés dans une matrice argileuse dont les caractéristiques sont voisines des altérites sous-jacentes.

L'ensemble meuble de versant.

Cet ensemble s'étend largement sur le versant sud à pente douce (Fig. 2). D'une épaisseur de quatre à neuf mètres, cet ensemble est limité à sa base par un lit de fragments et nodules de cuirasses (puits KD3) qui s'amenuise jusqu'à disparaître à mi-versant. Il présente les mêmes caractéristiques que l'ensemble meuble de plateau. Il s'agit d'un matériau argileux, rouge, micro-agrégé, homogène, poreux (42 %), d'une densité apparente de 1.48 et d'une densité réelle de 2.58. Matrice et nodules ont la même composition chimico-minéralogique que ceux de son homologue du plateau, avec des teneurs globales en fer et en alumine légèrement plus élevées (Tableau 1).

Sur la partie inférieure du versant, nodules et fragments de cuirasses sont absents, et la transition est progressive avec les altérites, formant ici une carapace ferrugineuse.

L'ensemble altéritique.

L'altérite atteinte au fond des puits en bas de versant (KD4 et KD5), est visible à l'affleurement en tête des entailles. Le sol est en continuité avec ces altérites. Cet ensemble présente un *faciès induré* alvéolo-nodulaire ou carapace, sous le recouvrement meuble de versant surmontant un *faciès friable* argilo-sableux.

L'altérite friable a un fond matriciel jaune à rouge avec un squelette riche en quartz présentant aussi quelques cristaux de leucoxène, zircon et magnétite. La matrice argileuse est constituée de fantômes et pseudomorphoses de minéraux primaires, feldspaths et micas, altérés en kaolinite. Localement certaines plages sont ferruginisées. Avec des valeurs moyennes de densité apparente de 1.74 et de densité réelle de 2.58, la porosité est élevée (32 %). C'est une porosité ouverte qui permet une large circulation de la nappe permanente.

L'altérite indurée ou carapace ferrugineuse rouge-jaune violacée, a une structure alvéolaire. Elle est formée de plages ferrugineuses rouge violacée et de plages jaunes argileuses. Les plages argileuses jaunes proviennent directement de l'altération du granite sous-jacents, et les structures des minéraux primaires y sont reconnaissables.

Leur fond matriciel est constitué d'un squelette essentiellement quartzeux, et d'une matrice argileuse à kaolinite. Imprégnée de fer, ces plages argileuses vont former les nodules ferrugineux, rouge violacé, irréguliers, allongés (centimétriques), coalescents.

La densité apparente est de 1.99, la densité réelle de 2.63, et la porosité de 24 %. Sur le plan minéralogique et géochimique, l'altérite friable et l'altérite indurée sont voisines.

Les compositions chimiques (Tableau 1) montrent que les échantillons d'altérites indurées sont les plus riches en fer. Ces altérites contiennent 20 à 40 % de quartz, 45 à 50 % de kaolinite et 10 à 25 % de goethite.

La roche-mère

Toute la région de Kandara est développée sur granite. Cette roche affleure principalement dans la rivière Soukato. Elle est traversée par des filons de pegmatites et quelques enclaves ferromagnésiennes. De couleur grise, ce granite

aux minéraux orientés est constitué essentiellement de feldspaths, biotites, amphiboles, pyroxènes, quartz, minéraux accessoires (zircon, apatite). Les feldspaths sous forme de grands cristaux confèrent à l'ensemble une structure porphyrique. En moyenne, le granite de Kandara est caractérisé par une densité apparente de 2.60 et une densité réelle de 2.68 (soit une porosité de 3 %). Sa composition chimique est 58.67 % SiO₂, 14.39% Al₂O₃, 4.64 % FeO, 1.63 % Fe₂O₃, 0.11 % MgO, 5.41 % CaO, 3.04 % Na₂O, 5.15 % K₂O, 1.13 % TiO₂, 0.55 % P₂O₅, 0.29 % H₂O+, 0.03 % H₂O-. La roche ainsi décrite est un granite calco-alcalin orienté, porphyroïde à biotite et amphiboles.

Relations et évolutions géochimiques des ensembles

La comparaison des teneurs en certains éléments majeurs, traces et en terres rares nous permettra de confirmer l'homogénéité de ces ensembles latéritiques et de préciser les variations géochimiques intervenant au cours des transformations successives qui font passer d'un ensemble à un autre. Les résultats d'analyses chimiques globales ont été portés dans un diagramme ternaire SiO₂ – Al₂O₃ – Fe₂O₃ (Fig. 3). Ainsi, les analyses de chaque ensemble se groupent de manière homogène entre un pôle

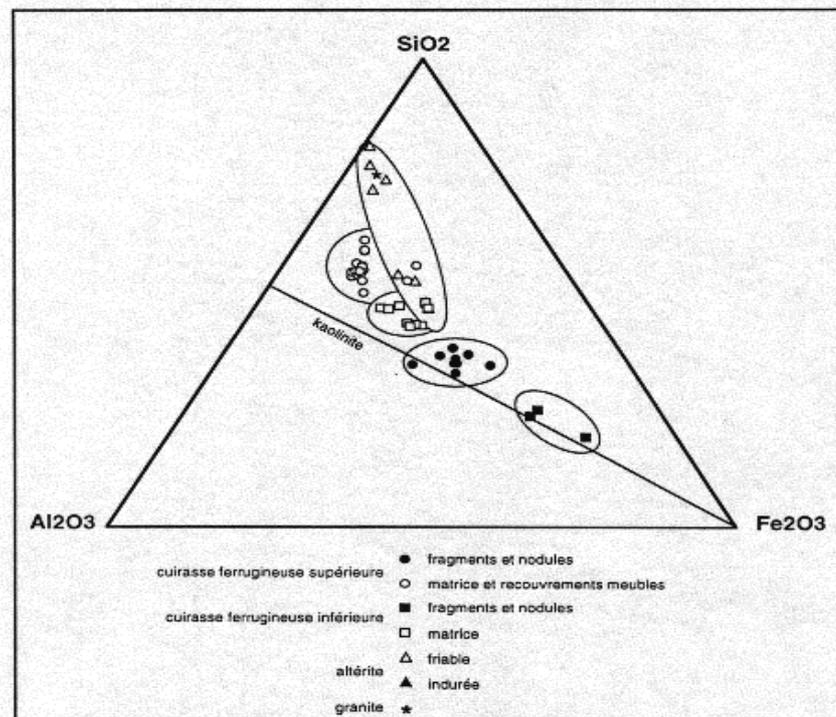


Figure 3 : Variations géochimiques des ensembles dans le diagramme ternaire SiO₂ - Al₂O₃ - Fe₂O₃.
Figure 3 : Geochemical variations of horizons in the SiO₂ - Al₂O₃ - Fe₂O₃ diagram.

silico-alumineux et un pôle ferrugineux.

Bien distincts, les deux faciès de cuirasse présentent une composition proche du pôle ferrugineux pour les nodules, et une composition proche du pôle silico-alumineux pour leurs matrices argileuses. Nodules et matrices du faciès inférieur sont plus ferrugineux que ceux du faciès supérieur. Les altérites varient d'un pôle siliceux pour les altérites friables vers un pôle silico-alumineux, légèrement plus ferrugineux pour la carapace latéritique. Cette carapace a une composition qui se rapproche de la matrice argileuse

de la cuirasse inférieure. De fait, cette matrice argileuse conserve des structures pseudomorphiques de minéraux de la roche mère. Ce faciès de cuirasse et la carapace de nappe dérivent donc bien de processus de formation identiques qui sont des ferruginisations des altérites.

Les recouvrements meubles de plateau et de versant sont de même composition chimique, très homogène, et liée au pôle silico-alumineux. Ceci confirme leur similitude déjà observée sur le terrain et au microscope.

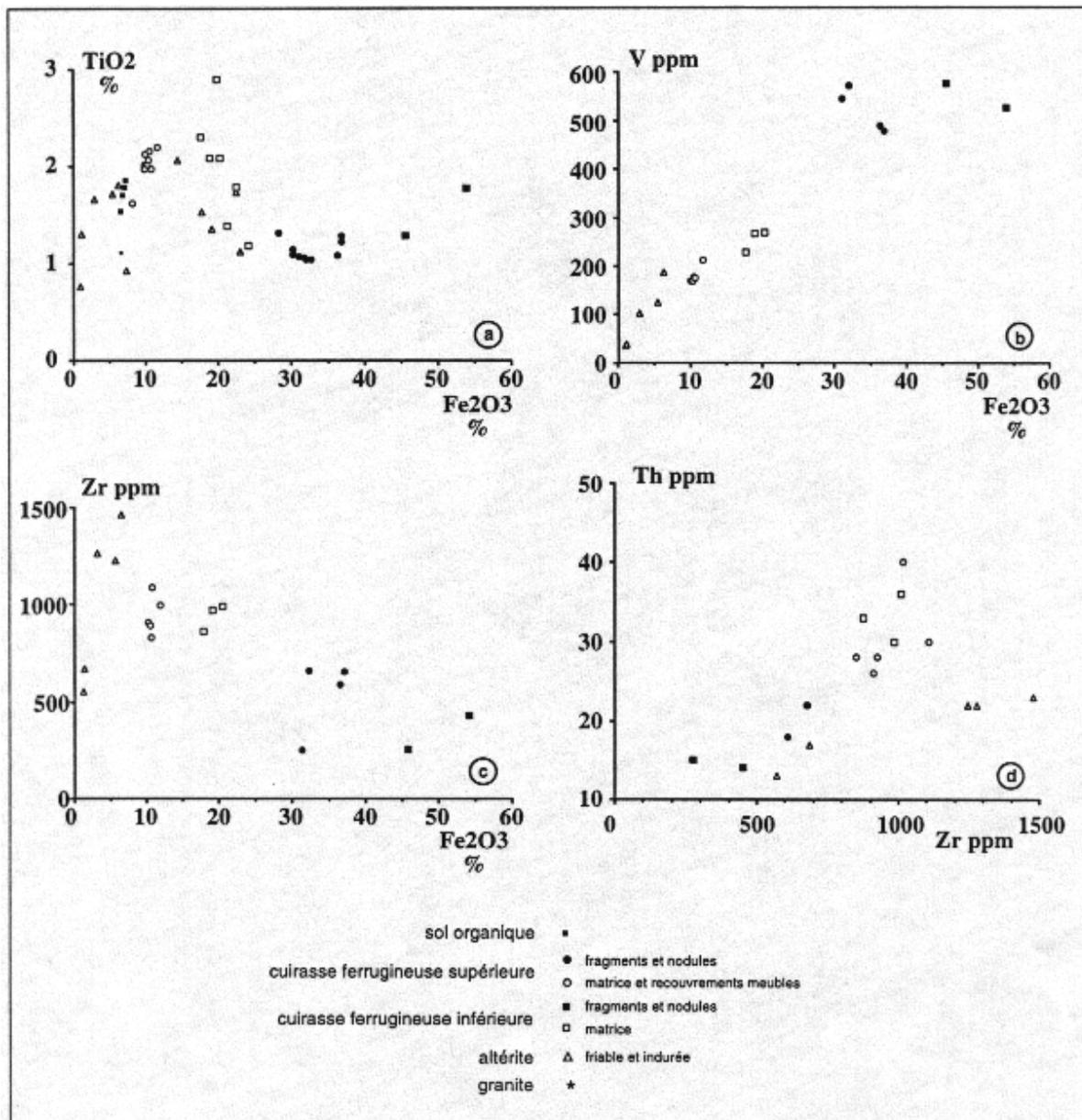


Figure 4 : Variations géochimiques des ensembles dans les diagrammes binaires a) Fe₂O₃-TiO₂, b) Fe₂O₃-V, c) Fe₂O₃-Zr, d) Zr-Th.
Figure 4 : Geochemical variations of horizons in the binary diagrams : a) Fe₂O₃- TiO₂, b) Fe₂O₃-V, c) Fe₂O₃-Zr, d) Zr-Th.

Les variations des teneurs en TiO_2 en fonction du Fe_2O_3 (Fig. 4a) montrent que les faciès de dégradation, matrices argileuses et recouvrements meubles, sont toujours plus riches en titane que les faciès cuirassés dont ils proviennent. Cet enrichissement en titane, montré pour les bauxites, (Boulangé *et al.*, 1990) accompagne la déferrugineisation. Le titane, fixé sous forme d'anatase, reste dans le matériau résiduel argileux et se concentre par simple réduction de volume. Il apparaît également que les altérites ont des teneurs en titane beaucoup moins homogènes que les recouvrements meubles et la matrice argileuse de la cuirasse ferrugineuse supérieure. Cette hétérogénéité est liée au degré moindre d'évolution (ou de pédoturbation) des altérites qui conservent ainsi une mémoire géochimique plus ponctuelle de l'hétérogénéité de la roche mère.

Le zirconium (Zr) (Fig. 4c) et le thorium (Th) (Fig. 4d) ont, comme le titane, un comportement résiduel lié à l'inaltérabilité des zircons. Les teneurs diminuent légèrement des altérites aux cuirasses en raison de l'augmentation des teneurs en fer. Par contre, les teneurs augmentent dans les matériaux de dégradation, car les déferrugineisations entraînent l'effondrement des structures et une compaction du profil avec réduction de volume. On observe aussi que les altérites blanches sous-jacentes à la carapace sont plus riches en Zr et Th, donc fortement compactées.

Le vanadium (V), et dans une moindre proportion le chrome (Cr), présentent une bonne corrélation positive avec le fer. La relation V/Fe_2O_3 (Fig. 4b) révèle une bonne discrimination des différents ensembles. Plus encore, elle montre que les cuirasses sont liées, en milieu oxydant, à une accumulation absolue de fer qu'accompagne le vanadium. Dans les étapes de déferrugineisation, en milieu réducteur, qui font passer des cuirasses aux matrices et aux recouvrements meubles, le vanadium est à nouveau mobilisé avec le fer.

Le baryum (Ba) et le strontium (Sr) ont une bonne corrélation. Leurs teneurs sont plus élevées (400 ppm pour le Ba et 200 ppm pour le Sr) dans les altérites, que dans la cuirasse sommitale et le recouvrement meuble (100–200 ppm pour le Ba, 100 ppm pour le Sr). Ainsi, plus les matériaux sont anciens, plus les teneurs en Ba et Sr sont faibles.

Les spectres des terres rares normalisés aux chondrites (Fig. 5) montrent une distribution similaire pour les altérites, la cuirasse ferrugineuse inférieure et sa matrice. Les spectres des terres rares de la cuirasse supérieure et des faciès de dégradation de cette cuirasse, matrices et recouvrements meubles de plateau ou de versant, présentent des anomalies

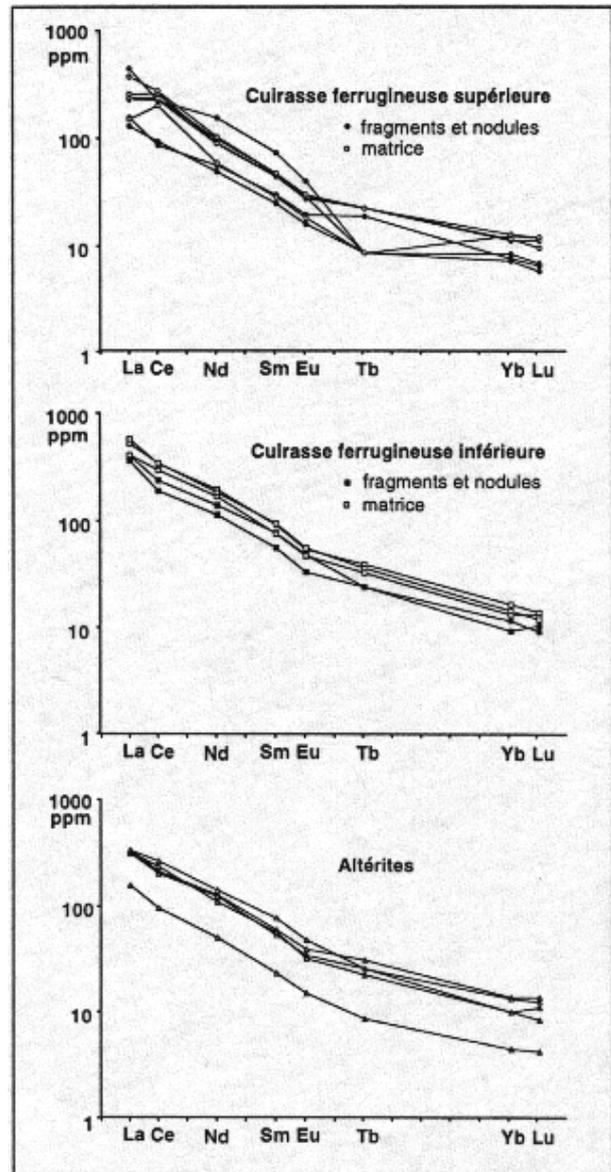


Figure 5 : Spectres des terres rares des altérites, cuirasses et matrices associées, normalisés aux chondrites.

Figure 5 : Rare earth elements spectra of the alterites, iron crust and associated clayey material, normalized with chondrites.

par rapport aux spectres précédents. Sans entrer dans les détails du comportement des terres rares, on constate que les teneurs et la distribution de ces éléments confirment les distributions déjà mises en évidence entre les divers ensembles et leurs faciès. Cette brève analyse des terres rares confirme non seulement la filiation directe des altérites et de la cuirasse inférieure, mais aussi les relations existantes entre la cuirasse supérieure et les recouvrements meubles de plateau comme de versant.

DISCUSSION

Distribution des formations superficielles latéritiques

Les formations superficielles de Kandara sont constituées de plusieurs ensembles qui sont donc : un ensemble meuble de surface comprenant: un recouvrement meuble de plateau, et un recouvrement meuble de versant ; un ensemble cuirassé, représenté par une cuirasse supérieure à hématite, gibbsite, kaolinite, massive sur le plateau et fragmentée en tête de versants, et une cuirasse inférieure à goëthite et kaolinite sous-jacente à la première avec des reliques d'altération à structure de roche conservée ; un ensemble d'altération constituée par une altérite supérieure localement indurée et une altérite inférieure friable à structure conservée.

La distribution spatiale de ces ensembles est différente au nord et au sud du plateau. Ainsi au Sud du plateau, sur des versants à pente douce, les diverses unités de ces ensembles sont largement étalées, et on observe le passage graduel de la cuirasse massive de plateau à la cuirasse fragmentée affleurante, puis enfouie sous un recouvrement meuble de versant. En bas de versant, les altérites affleurent à la faveur d'entailles peu profondes. Au Nord du plateau, les versants sont abrupts, la cuirasse massive est inexistante, le recouvrement meuble est confondu avec les sols développés directement sur les altérites. Celles-ci affleurent à la faveur de profondes entailles. Cette distribution n'est pas fortuite et peut se rattacher à l'histoire géologique de la région. En effet des seuils rocheux barrent la rivière *Soukato* avant sa confluence avec la Doumé, et empêchent donc son enfoncement. De tels seuils n'existent pas au Nord, et la rivière reçoit ses petits affluents qui provoqueront de profondes entailles dans les bords du plateau.

L'organisation de ces ensembles et la position au Nord et au Sud des niveaux de base, vont régir aussi la dynamique des eaux de la région. Ainsi une nappe d'eau temporaire se développe sous le recouvrement meuble, au toit de la cuirasse de plateau. Cette nappe ne fonctionnera qu'en saison des pluies et pourra s'assécher complètement en saison sèche, ou ne pas exister les années très sèches. Une nappe profonde permanente est installée dans les altérites, et son écoulement se produit vraisemblablement toute l'année, suivant une ligne de sources située à la base des versants.

Genèse et évolution de la couverture latéritique.

La présence de silice amorphe dans l'ensemble meuble serait en relation directe avec la végétation actuelle et le cycle supérogène de la silice. En effet, il existe un cycle

biogéochimique du silicium qui favorise le trajet sol-plante-sol de la silice. Il s'y effectue une absorption racinaire de silicium dissous et des dépôts cellulaires d'opale sous forme de phytolithes (Alexandre et al., 1994) qui participent à l'enrichissement des horizons de surface des sols en silice (Loverin, 1959). Ainsi, il apparaît une absorption de silicium par les plantes et une accumulation de silice biogénique dans les sols (Lucas *et al.*, 1993) *via* les restitutions de litières et leur décomposition.

Dans cet ensemble meuble, la présence de nodules à hématite et de quartz aux fissures emplies de produits ferrugineux également hématitique, est l'indication d'un cuirassement ancien dont la dégradation engendre le fond matriciel argileux. La cuirasse ferrugineuse sous-jacente est probablement une conséquence de cette évolution. Les orientations plasmiques rendent compte des alternances saisonnières sèches et humides (Chauvel, 1977). L'installation d'une nappe d'eau temporaire laisse à la partie inférieure des traces d'hydromorphie.

L'étude pétrologique des différents ensembles a permis de préciser leurs relations mutuelles. Ainsi le recouvrement meuble de plateau, de même que les matrices argileuses de la cuirasse supérieure, en dépit des discontinuités structurales présentent, avec la cuirasse supérieure, une continuité qui se traduit dans la présence de nodules à hématite et gibbsite, et dans la distribution des terres rares. Ce recouvrement meuble proviendrait donc de la dégradation par déferruginisation d'une cuirasse ancienne. Un tel mécanisme de dégradation de la partie supérieure d'un profil, et de réinduration de la partie inférieure permet un enfoncement géochimique de la cuirasse (Nahon *et al.*, 1977) et un épaissement du profil (Boulangé *et al.*, 1997). Les ferruginisations secondaires affectent d'abord la cuirasse supérieure, puis le toit des altérites. Ainsi, il apparaît une certaine continuité structurale entre les deux faciès de cuirasse, présentant des matrices ferrugineuses à goëthite et kaolinite. Mais ces faciès ont cependant des compositions chimiques très différentes tant pour les éléments majeurs que pour les éléments en traces et les terres rares.

Le recouvrement meuble de versant, identique pétrologiquement au recouvrement meuble de plateau est en discontinuité avec les fragments de cuirasse, et les altérites sous-jacentes. Il apparaît comme résultant d'un transfert de matière du plateau vers le versant. L'ensemble altéritique et la cuirasse inférieure sont en continuité et représentent donc les étapes de l'évolution actuelle de ces formations.

La succession verticale actuelle résulte donc d'un

enfoncement géochimique du profil. Au cours de celui-ci le fer sans cesse libéré à la partie supérieure se fixe dans un horizon d'accumulation sous-jacent. La dégradation à la partie supérieure de la cuirasse et l'induration à la base progressent au cours du temps. La nature de la cuirasse formée, dépendante des conditions de drainage, a varié : d'abord de nature bauxitique à hématite et gibbsite, elle est maintenant de nature argilo-ferrugineuse à goethite et kaolinite.

La formation de la couverture latéritique a nécessité la permanence d'une longue période tropicale humide, ce qui n'exclut pas les contrastes de sécheresse favorisant l'induration. L'épaississement des profils s'est poursuivi à cause de l'enfoncement des rivières dégageant un plateau à versants convexes. Lorsque l'approfondissement de ce réseau hydrographique s'arrête, la vitesse d'écoulement de la nappe ralentit. La base de la cuirasse et les bas de versants sont ainsi placés en conditions de dégradation. En effet, oxydant et à forte activité de l'eau (au départ), le milieu devient réducteur et à faible activité de l'eau. La cuirasse, localement, c'est-à-dire à sa base et au bas des versants, est placée en conditions de dégradation. Par déferrugineuse, elle subit une fragmentation, une nodulation.

Après cette longue période humide, l'installation d'un climat aride modifie le paysage. La disparition de la végétation favorise alors l'érosion mécanique et les transferts de matières. Les versants sont entaillés par l'érosion. La cuirasse dégradée nodulaire et le recouvrement meuble sont entraînés sur la pente. L'érosion régressive vient buter sur l'épaisse cuirasse fragmentée. Cet épisode façonne des versants à pente douce, peu étendus. Comparativement aux régions sahéliennes, la période aride est en effet beaucoup plus courte. Le retour à une période humide est marqué par un nouvel enfoncement du réseau hydrographique. Si ce dernier est empêché par l'existence de seuils rocheux, les versants à pente douce conservent leur forme. S'il peut progresser, les versants à pente douce sont effacés et les versants reprennent leur aspect initial convexe et abrupt. Cette dissymétrie peut être observée sur plusieurs plateaux de la région de Bertoua, et particulièrement entre les parties sud et nord du site de Kandara.

La morphologie est donc héritée d'une longue histoire géologique. La surface des plateaux serait associée à la grande surface africaine (Lamotte et Rougerie, 1961 ; Segalen, 1967) d'âge Crétacé-Eocène et la cuirasse ferrugineuse contemporaine des hauts-glacis décrits par ailleurs en Afrique (Michel, 1978 ; Grandin, 1976 ; Beauvais,

1991). Le façonnement des versants serait intervenu au Quaternaire ancien durant un épisode aride équivalent au moyen glaciaire. Si des périodes arides ont pu intervenir au cours du Quaternaire récent, aucune de celles-ci n'a été suffisamment longue, pour s'inscrire dans la morphologie du paysage.

Ainsi, l'histoire géologique, climatologique, géomorphologique ancienne de la région génère la distribution actuelle des formations superficielles. Elle fixe des limites morphopédologiques, dont l'évolution est relativement lente au moins à l'échelle du Quaternaire, qui vont influencer la distribution phytogéographique.

Influence de la distribution des formations latéritiques sur la distribution phytogéographique.

La succession dans l'espace des unités phytogéographiques est en relation directe avec les formations superficielles et avec la dynamique de l'eau caractéristique de chaque ensemble. Ainsi sur le plateau, la présence d'une cuirasse massive sous le recouvrement meuble empêche la percolation de l'eau et favorise la formation saisonnière d'une nappe temporaire. C'est le domaine de la savane qui peut se développer jusqu'au stade arbustif et arboré en fonction de l'état de cette nappe. A la rupture de pente, sur la cuirasse fragmentée, les eaux de la nappe temporaire s'écoulent directement vers la nappe profonde dans les altérites. Mais, dans les fissures persiste suffisamment d'humidité pour permettre l'installation d'un jeune recru forestier, qui reste cependant fragile lors des saisons ou des années plus sèches.

Sur les versants à pente douce, les fragments et les nodules de cuirasse, de même que le recouvrement meuble argilo-sableux conservent une forte porosité. Cette zone de versant est le domaine de la forêt de recru.

Sur les versants abrupts et en bas de versants à pente douce, les débris de cuirasse et le recouvrement meuble sont supprimés par l'enfoncement du réseau hydrographique. Un sol argileux se développe directement à partir des altérites, et donc en relation avec la nappe phréatique permanente. C'est le domaine de la forêt tropicale semi-décidue mature.

L'organisation des formations superficielles, et la dynamique des eaux qui leur est attachée, contrôlent donc la distribution des unités phytogéographiques.

Les résultats obtenus montrent que l'écosystème périforestier du Sud-Est Cameroun est constitué par un ensemble de plateaux de même altitude. Sur chacun d'eux et leurs versants, une épaisse couverture latéritique s'est développé par altération et pédogenèse. Cette couverture comprend plusieurs ensembles dont la distribution spatiale

détermine des limites morphopédologiques marquées aussi par un changement d'unités de végétation. Ainsi, le sommet de plateau, occupé par une cuirasse ferrugineuse affleurante ou enfouie sous un recouvrement argileux meuble, est le domaine de la savane. Les versants avec cuirasse fragmentée et nodulaire, et recouvrement meuble sont le domaine de la forêt de recru ou forêt jeune de transition. Les bas de versants aux sols formés directement sur altérites sont le domaine de la forêt mature. Les vallées, à sols à hydromorphie permanente, sont le domaine des Raphia et des prairies marécageuses.

L'étude du site de Kandara apporte quelques données clés. Ainsi,

- les caractéristiques pétrologiques de la couverture latéritique montrent la filiation minéralogique et géochimique, et l'interdépendance des divers ensembles décrits ;
- la distribution spatiale de ces ensembles fixe des limites morphopédologiques agissant sur la dynamique forestière ;
- ces limites résultent d'une longue histoire géologique, et ne varient que très lentement ;
- dans les conditions climatiques actuelles, les limites des unités de végétation correspondent à ces limites morphopédologiques.

Il convient cependant de souligner que les limites de la végétation ne dépendent pas des seuls facteurs géologiques et pédogénétiques, mais que le facteur climatique, qui régit les différents processus pédogénétiques et érosifs, est très important.

REFERENCES

- Alexandre, A., Colin, F. et Meunier, J.D. 1994. Les phytolithes, indicateurs du cycle biogéochimique du silicium en forêt équatoriale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **319**, II, 53-458.
- Beauvais, A. 1991. Paléoclimats et dynamique d'un paysage cuirassé de Centrafrique : morphologie, pétrologie et géochimie. *Th. Doct.* 294 p. Université de Poitiers, France.
- Bessoles, B. et Trompette, R. 1980. Géologie de l'Afrique. La chaîne panafricaine, «zone mobile d'Afrique Centrale (partie sud) et zone mobile soudanaise». *Mémoire Bureau Recherches Géologiques et Minières France* **92**, 396 p.
- Boulangé, B. 1984. Les formations bauxitiques latéritiques de Côte d'Ivoire. Les faciès, leur transformation, leur distribution et l'évolution du modelé. *Travaux et Documents ORSTOM, Paris* **175**, 362 p.
- Boulangé, B., Carvalho, A. and Melfi, A. 1990. Geochemical characteristics of African and Brazilian bauxites deposits : SiO₂ - Al₂O₃ - Fe₂O₃ system and Ti, Cr, V and Fe₂O₃ relations. In : Intern. Symp. *Geochemistry of the earth's surface and of mineral formation, Aix en Provence, Chem. Geol.*, **84**, 1-4 : 30-32.
- Boulangé, B., Carvalho, A., Varajão, C.A.C. and Varajão, A.F. 1997. The bauxites of the Quadrilátero Ferrífero. in *Brazilian bauxites*, Eds. A. Carvalho et al., USP-FAPESP-ORSTOM, São Paulo: 165-194
- Chauvel, A. 1977. Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. *Travaux et Documents ORSTOM, Paris* **62**, 532 p.
- Grandin, G. 1976. Aplanissements cuirassés et enrichissements des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. *Mémoire ORSTOM, Paris* **82**, 275 p.
- Henocque, O. 1999. Dynamique de l'altération supergène du craton Ouest-Africain. Pétrologie et datation des latérites manganésifères de Tambao (Burkina-Faso). *Th. Doct.* 160 p. Université Aix-Marseille III, France.
- Kaloga, B. 1976. Contribution à l'étude du cuirassement : relation entre les gravillons ferrugineux et leurs matériaux d'emballage. *Cahier ORSTOM, série pédologie, Paris* **XIV**, 4, 299-319.
- Lamotte, M. et Rougerie, G. 1980. Les niveaux d'érosion intérieure dans l'Ouest Africain. *Recherches Africaines, Conakry* **4**, 51-70.
- Leprun, J. C. 1977. Géochimie de la surface et forme du relief IV. La dégradation des cuirasses ferrugineuses. Etude et importance du phénomène pédologique en Afrique de l'Ouest. *Bulletin Sciences Géologiques, Strasbourg* **30**, 4, 265-273.
- Leprun, J. C. 1979. Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche. Genèse, transformation, dégradations. *Mémoire Sciences Géologiques, Strasbourg* **58**, 224 p.
- Loverin, 1959. Significance of accumulator plants in rocks weathering. *Society of American Bulletin* **70**, 781-800

- Lucas, Y., Luizao, F. J., Rouiller, J. and Nahon, D. 1993. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. *Science* **260**, 521-523.
- Michel, P. 1978. Cuirasses bauxitiques et ferrugineuses d'Afrique Occidentale. Aperçu chronologique. In : *Travaux et Documents, Géographie Tropicale* CEGET, Bordeaux 33, 11-32
- Nahon, D. et Millot, G. 1977. Géochimie de la surface et formes du relief V. Enfoncement géochimique des cuirasses ferrugineuses par épigénie du manteau d'altération des roches mères gréseuses. Influence sur le paysage. *Bulletin Sciences Géologiques*, Strasbourg **30, 4**, 275-282.
- Segalen, P. 1967. Les sols et la géomorphologie du Cameroun. *Cahier ORSTOM, série pédologie*, Paris **V, 2**, 137-187.
- Tardy, Y., Kobilsek, B. et Paquet, H. 1991. Minerological composition and geographical distribution of African and Brazilian peratlantic laterites. The influence of continental drift and tropical paleoclimates during the past 150 million years and implications for India and Australia. *Journal of African Earth Sciences* **12, 1-2**, 283-295.
- Remerciements : La réalisation de ce travail a été possible grâce au concours financier du programme ECOFIT (IRD-CNRS-CEA).