

BILANS GÉOCHIMIQUES DE L'ALTÉRATION DES ROCHES BASIQUES EN CÔTE-D'IVOIRE FERRALLITIQUE

par Jean DELVIGNE

RESUME. — L'étude de l'altération des roches basiques en Côte-d'Ivoire ferrallitique fait apparaître l'enchaînement et l'étagement de plusieurs niveaux d'accumulation de la silice, de l'alumine et du fer le long des pentes du paysage. La formation de tel ou tel minéral secondaire est en étroite relation avec l'intensité et la qualité du drainage interne des profils, donc avec la position topographique de ceux-ci. L'altération des feldspaths donne naissance généralement à des gels aluminosiliceux. Ces derniers, dans les parties moyennes des caténa, évoluent en gibbsite par lessivage de la silice. Dans les parties basses, l'arrivée de silice monomère dans un milieu riche en gels alumineux ou en gibbsite conduit à la synthèse de kaolinite. Sur les sommets, au contraire, la phase amorphe n'apparaît plus et la transformation du feldspath conduit directement à la gibbsite cristallisée. Les parties hautes du paysage sont des milieux d'accumulation relative de l'alumine et du fer, les parties moyennes des milieux de translation, les parties basses des milieux d'accumulation absolue de la silice, de l'alumine et du fer.

ABSTRACT. — Studying the weathering of basic rocks in the ferrallitic regions of Ivory-Coast, it appears that several silica, alumina and iron accumulation levels are linked together along the slopes. The secondary minerals formation is closely related to the intensity and quality of the internal drainage of profiles and consequently to their topographic position. The felspar weathering generally gives rise to aluminosiliceous gels. The latter, in the middle part of the catenas, are converted into gibbsite by silica leaching. In the lower parts, monomeric silica coming in an environment rich in aluminous gels or in gibbsite leads to the synthesis of kaolinite. On summits, on the contrary, the amorphous phase does not appear and the felspar weathering directly gives rise to crystallized gibbsite. The higher parts of the slopes are relative accumulation environments for alumina and iron, the middle parts are translation environments, the lower parts absolute accumulation environments for silica, alumina and iron.

INTRODUCTION

Les profils d'altération étudiés se concentrent dans les régions où les affleurements de roches basiques sont suffisamment étendus pour permettre la formation d'horizons d'altération homogènes, non contaminés, dans de trop fortes proportions, par des éléments minéraux provenant d'autres types de roches.

Les roches basiques anciennes, d'âge précambrien, portent des traces d'écrasement et de métamorphisme léger : ce sont des roches vertes. Parfois la structure initiale y est partiellement conservée : ce sont des gabbros et des dolérites saussuritisés et ouralitisés ou encore des amphibolites. Ce type de roches basiques métamorphosées se rencontre dans les régions centrales et orientales de la Côte d'Ivoire. Les roches basiques plus récentes,

d'âge probablement primaire, rencontrées dans l'Ouest et le Sud-Ouest du pays, n'ont pas subi de métamorphisme : ce sont des gabbros à structure grenue à labrador, pigeonite et parfois hypersthène, des dolérites à labrador et pigeonite; la chlorite est fréquente ainsi que l'épidote et les minéraux noirs.

Ont été assimilées dans cette étude les charnockites qui forment un grand massif dans la région de Man, à l'Ouest du pays et quelques granodiorites du Sud-Est.

D'après la classification des climats d'Aubreville (1949) le climat de la partie méridionale de la Côte d'Ivoire est du type guinéen forestier : température moyenne annuelle comprise entre 24° 5 et 27° 2, des amplitudes thermiques faibles, un déficit de saturation très faible et une forte pluviosité pouvant dépasser 2 000 mm en moyenne annuelle.

* Chargé de recherches à l'O.R.S.T.O.M., Station d'Adiopodoumé, Abidjan, Côte-d'Ivoire.

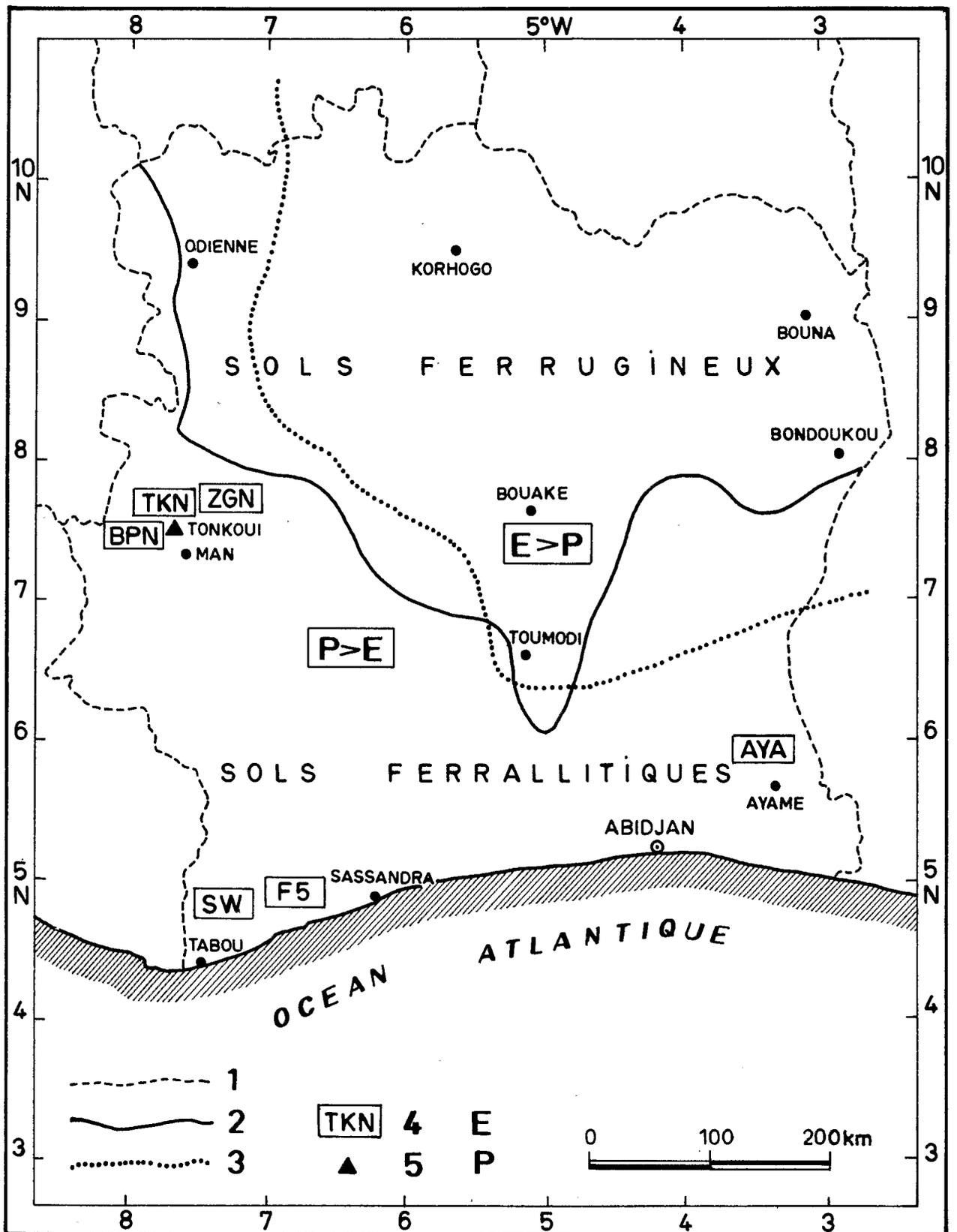


FIGURE 1

Carte de Côte d'Ivoire, localisation des profils, bilan hydrique, limite des sols ferrallitiques et ferrugineux.

- 1 Frontière politique
- 2 Limite des 2 secteurs pédologiques
- 3 Limite des régions au bilan hydrique négatif (Nord) et positif (Sud)
- 4 Lieux de prélèvement des profils
- 5 Indications orographiques
- E Évaporation
- P Pluviosité

En reportant sur une carte (cf fig. 1) les courbes d'évapo-transpiration potentielle, calculées par Kellermann (1960), on s'aperçoit que toute la région N-E du pays reçoit annuellement moins d'eau qu'elle ne pourrait en perdre par évapo-transpiration. Cela se traduit par le fait qu'au moins pendant une partie de l'année le sol superficiel, jusqu'à une certaine profondeur, est parfaitement sec et d'autant plus profondément que le déficit est plus accusé. L'étude du bilan hydrique montre que toute la partie méridionale de la Côte d'Ivoire présente, au contraire, un bilan positif, c'est-à-dire que le volume annuel des précipitations atmosphériques dépasse le volume annuel d'eau exigé par l'évapo-transpiration potentielle. La limite entre les deux secteurs correspond grossièrement à la limite entre les zones d'altérations ferrallitiques et les zones d'altérations ferrugineuses. À la première correspond le domaine forestier, à la seconde le domaine des savanes boisées.

On voit donc se dessiner deux grandes régions, aux caractéristiques bien différentes : fortes pluviosités au Sud avec surplus hydrique constant : c'est le domaine des sols ferrallitiques; précipitations moins importantes et déficit hydrique intermittent au Nord : c'est le domaine des sols ferrugineux.

I. — LES PROCESSUS D'ALTERATION

A) DÉFINITION.

L'altération ferrallitique ne représente qu'un cas particulier de l'altération météorique; elle se distingue des autres processus d'altération par le fait que l'hydrolyse des minéraux primaires conduit à l'individualisation de tous les éléments chimiques de ces minéraux, au lessivage total des alcalins et alcalino-terreux, au lessivage total ou partiel de la silice et au maintien sur place de l'alumine, du fer et du titane sous forme d'oxydes et hydroxydes secondaires. La silice qui n'a pas été éliminée se présente alors sous forme de quartz résiduel ou sous forme de kaolinite de néoformation.

B) LE RÔLE DE L'EAU.

L'élimination totale d'un certain nombre d'éléments exige la présence simultanée de deux facteurs : il faut que le volume des précipitations atmosphériques soit suffisant pour permettre la

solubilisation des minéraux primaires et l'individualisation de leurs éléments; il faut en outre que le drainage interne des profils soit suffisant pour favoriser l'évacuation rapide des éléments dissous.

Tous les profils étudiés sont situés là où les pluies sont abondantes et suffisantes pour favoriser des processus d'altération du type ferrallitique. Le choix de ces profils dans le paysage a été dicté par le souci de pouvoir suivre l'évolution de ces processus à travers des conditions de drainage d'intensité variable. L'intensité et la qualité du drainage dépendant étroitement de la position topographique des profils, ceux-ci ont été choisis le long des pentes principales du paysage et disposés en caténa, la qualité du drainage allant en diminuant du sommet vers le bas de ces caténa.

Les profils étudiés se concentrent dans quatre régions : (cf. fig. 1) : une première caténa comprenant cinq profils se situe dans la région montagneuse occidentale, sur les pentes du massif du Tonkoui. Les profils TKN sont situés sur le sommet et les pentes du massif principal, le profil ZGN à la base de ce massif et le profil BPN quelques kilomètres plus loin dans la plaine ondulée. La seconde caténa se situe dans le coin Sud-Est, dans la région d'Ayamé : les travaux de construction d'un barrage hydro-électrique ont dégagé plusieurs profils d'altération en travers de la vallée de la Bia : ce sont les profils AYA; le premier est situé à mi-pente, le second un peu plus bas et le troisième à quelques mètres de la rivière. De nombreux échantillons de roches altérées ont été recueillis dans le Sud-Ouest et dans la région orientale, près de Bondoukou : ce sont les profils SW, F5 et BDA.

Le rôle de l'eau dans ces processus d'altération est capital puisque c'est par son intermédiaire qu'agissent les facteurs d'altération, que sont apportés les acides et matières organiques et que sont exportés les produits dissous. L'activité de l'eau est commandée par sa concentration en sels dissous, sa température et son acidité. La concentration en sels dissous joue un rôle déterminant dans la vitesse de dissolution des minéraux : il est évident que plus la solution sera concentrée, moins elle pourra dissoudre d'éléments nouveaux. On voit ici le rôle prépondérant joué par le drainage interne des profils. Avec un bon drainage et une importante quantité d'eau traversant les niveaux d'altération, les solutions qui baignent les minéraux ne sont jamais saturées vis-à-vis des cations et anions libérés; l'échange d'ions entre le minéral et l'eau peut se faire normalement; au contraire dans une nappe stagnante ou présentant un débit trop faible, la concentration en sels dissous va augmenter rapidement et ralentir considérablement l'altération des minéraux.

C) LE COMPORTEMENT DES MINÉRAUX PRIMAIRES.

Les ions qui présentent un potentiel d'ionisation élevé passent plus difficilement en solution. Dans un cristal complexe, sont disloqués, en premier, les gros polyèdres centrés sur les atomes K, Na et Ca; sont dissous ensuite les octaèdres centrés sur les atomes de coordinence-6 tels que Al, Fe et Mg; passent finalement en solution les petits tétraèdres centrés sur le silicium ou l'aluminium de coordinence-4.

En bordure d'un cristal ou le long de fissures parcourant un feldspath par exemple, les cations alcalins et alcalins-terreux passent en solution abandonnant un résidu feldspathique désorganisé et incomplet, alumino-siliceux, amorphe (Delvigne, 1965) : c'est un gel. Avec la progression de l'altération, ce sont maintenant les liaisons Si-O-Al qui sont rompues alors que les liaisons Si-O-Si, plus stables, sont maintenues. La silice et l'alumine se séparent. La silice est emportée par le courant d'eau sous forme polymère, débris de chaînes primitivement plus longues et rompues aux endroits des liaisons aluminiques. Un peu d'aluminium encore camouflé dans ces chaînes siliceuses peut être éliminé en même temps que la silice (Pedro, 1964). Durant leur transport, ces polymères de silice vont se dépolymériser lentement grâce à la dilution progressive le long des pentes de la caténa. Finalement la silice se retrouvera en solution vraie, sous forme de $\text{Si}(\text{OH})_4$ dont la concentration peut atteindre, avant saturation, 120 à 140 mg/l d'après Krauskopf (1956-1959). D'après Siffert (1962) de telles concentrations ne sont jamais atteintes dans les eaux naturelles. La forme normale de la silice dans les solutions du sol, à une certaine distance du niveau d'altération, est donc la forme monomère. Rappelons que la dépolymérisation n'est pas achevée au départ du minéral primaire, dans la zone d'altération.

Le pH dans cette zone est alcalin; l'ion aluminium libéré se trouve placé dans son domaine d'insolubilisation : il précipite sur place. Dans les pyroxènes et les amphiboles en voie d'altération, c'est le fer qui est fixé sur place comme hydroxyde insoluble dans cette même gamme de pH. L'aluminium dans le feldspath présente la coordinence-4 puisqu'il se substitue au silicium en position tétraédrique. Le déficit de charge est compensé par la charge apportée par le cation alcalin. D'après Iler (1955) le lessivage des cations et d'après Gastuche et Herbillon (1961) le lessivage des anions favorisent le changement rapide de la coordinence de l'aluminium. L'aluminium dans la gibbsite présente la coordinence-6.

L'ordre de départ des éléments constitutifs d'un minéral primaire est donc sodium-calcium-potassium, suivi de la destruction des liaisons Si-O-Al moins stables que les liaisons Si-O-Si. Avec la progression de l'altération, le gel perd donc ses alcalis, puis sa silice; l'aluminium change progressivement de coordinence et, ainsi que le fer, précipite sur place comme hydroxyde.

II. — L'ACCUMULATION DES ELEMENTS DANS LE PROFIL ET DANS LE PAYSAGE

A) DÉFINITIONS.

D'Hoore (1954) étudiant l'accumulation des sesquioxydes dans les sols tropicaux, répartit les formes d'accumulation de ces oxydes en deux catégories :

— *L'accumulation relative* ne demande aucun transport des éléments qui s'accumulent sur place dès leur libération des minéraux primaires. Les sesquioxydes s'accumulent par suite du départ en totalité ou en fortes proportions des autres éléments plus mobiles.

— *L'accumulation absolue* exige le départ des sesquioxydes de la zone d'accumulation relative, leur transport le long des pentes et leur accumulation dans un matériau de réception présentant d'autres caractéristiques physico-chimiques que les milieux de départ et de cheminement.

L'étude pétrographique des échantillons taillés en plaques minces et le calcul des bilans géochimiques établis d'après les résultats d'analyses chimiques totales (tableau 1) permettent de localiser avec précision les niveaux d'accumulation ou de départ de certains éléments.

B) LES ACCUMULATIONS DANS LE PROFIL.

1°) Profil TKN1 (fig. 2, profil a).

A la base de ce profil, au-dessus du niveau de roches fraîches du type charnockite, se trouve le niveau d'altération, très mince, réduit à quelques millimètres d'épaisseur. C'est la zone de départ de plus de 90 % de la silice-silicate, de 99 % des alcalins et alcalino-terreux, de quelques pour cent d'alumine sous forme d'aluminate ou encore camouflée dans les chaînes de tétraèdres de silice. La silice libérée des réseaux cristallins feldspathiques

ALTÉRATION DES ROCHES BASIQUES EN CÔTE D'IVOIRE

TABLEAU I

Bilans géochimiques des profils principaux, calculés suivant le raisonnement isovolumétrique
(Millot, Bonifas, 1955 et Bonifas, 1959)

Profil étudié	P	D	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Dens. R.F.
TKN15	100	1.20	-94.84	+8.08	-15.50	-98.95	-99.34	-55.79	-91.13	
TKN22	50	1.60	-80.47	-10.26	+6.66	-98.57	-98.78	-40.00	-92.66	3.06
TKN23	90	1.31	-88.30	-26.18	+3.28	-98.62	-99.56	-67.37	-95.71	
TKN24	130	1.60	-88.14	-3.06	+29.72	-98.78	-99.28	-54.74	-95.11	
TKN25	180	1.14	-96.88	-8.39	-6.85	-99.24	-99.01	-74.74	-94.80	
TKN32	40	1.32	-90.39	-13.21	+1.75	-98.26	-99.21	-82.24	-99.81	
TKN34	100	1.52	-88.25	-2.66	+17.28	-98.87	-98.84	-79.84	-98.63	2.60
TKN36	180	1.20	-82.17	-15.49	-5.26	-98.49	-92.87	-52.34	-97.41	
TKN38	200	1.21	-90.06	-16.31	-8.40	-97.00	-90.91	-37.89	-93.58	
BPN12	50	1.29	-61.87	-16.05	-17.39	-92.09	-64.61	-91.26	-98.88	
BPN13	150	1.48	-56.68	+25.69	-7.61	-89.23	-40.00	-93.70	-99.26	2.60
BPN14	180	1.56	-58.45	-13.00	+19.05	-90.33	-56.92	-89.63	-98.64	
BPN15	220	1.59	-53.93	-66.98	+7.26	-89.45	-36.92	-89.23	-98.26	
BPN16	230	1.67	-38.39	-68.96	-16.36	-74.31	-12.31	-83.74	-98.14	
BPN17	250	2.43	-7.27	-6.63	-0.37	-10.55	-11.53	-61.58	-89.22	
AYA29	100	1.72	-57.15	+12.43	+1.89	-99.74	-98.25	-90.07	-98.75	2.97
AYA25	150	1.43	-60.70	-39.43	-0.34	-99.77	-99.74	-88.08	-95.98	
AYA26	250	1.18	-85.51	+17.74	-19.78	-99.77	-99.73	-67.55	-97.51	
AYA24	350	1.23	-86.60	+8.85	-8.46	-99.66	-99.73	-62.25	-96.95	
AYA23	500	1.66	-63.96	-2.05	-1.79	-86.13	-54.33	-45.03	-98.89	
AYA47	120	1.33	-55.30	-30.94	-21.17	-96.18	-90.62	-65.22	-93.98	2.86
AYA46	180	1.39	-49.70	-28.11	-23.76	-81.65	-78.01	-62.77	-85.70	
AYA44	250	1.63	-33.33	-39.65	-17.76	-71.47	-54.94	-57.97	-82.38	
AYA43	320	1.85	-23.99	-43.31	-11.41	-30.01	-13.39	-46.38	-77.05	

P. : profondeur en cm.

D. : densité.

Dens. R.F. : densité de la roche fraîche.

et pyroxéniques s'échappe sous forme de polymères, les alcalins sous forme de cations directement solubles. Tous ces éléments descendent la pente générale du relief en suivant plus ou moins le front d'altération du soubassement de roches fraîches.

Au-dessus de ce niveau se trouve l'horizon de roches altérées composées de gibbsite et d'hydroxydes de fer; il ne contient plus de minéraux altérables. C'est la zone d'accumulation relative du fer et de l'alumine. Il n'y a plus de silice dans cet horizon.

En surface, l'horizon supérieur est sous l'influence des matières organiques qui solubilisent une partie de la gibbsite et de la goethite. L'aluminium et le fer se déplacent sous forme de cations Al^{3+} et Fe^{3+} ou sous forme de complexes organiques de ces

cations. C'est une autre zone de départ de l'aluminium et du fer.

En résumé : le niveau inférieur constitue le milieu de départ en conditions alcalines de la silice polymérisée, des alcalins et alcalino-terreux et d'un peu d'aluminate; l'horizon superficiel constitue une seconde zone de départ, en conditions acides cette fois, des cations Al^{3+} et Fe^{3+} . Ce profil représente le cas le plus simple rencontré dans une caténa normale.

2°) Profil TKN2 (fig. 2, profil b).

Le niveau d'altération du profil TKN2 est semblable à son homologue du profil précédent : altération des plagioclases en gibbsite et des pyroxènes

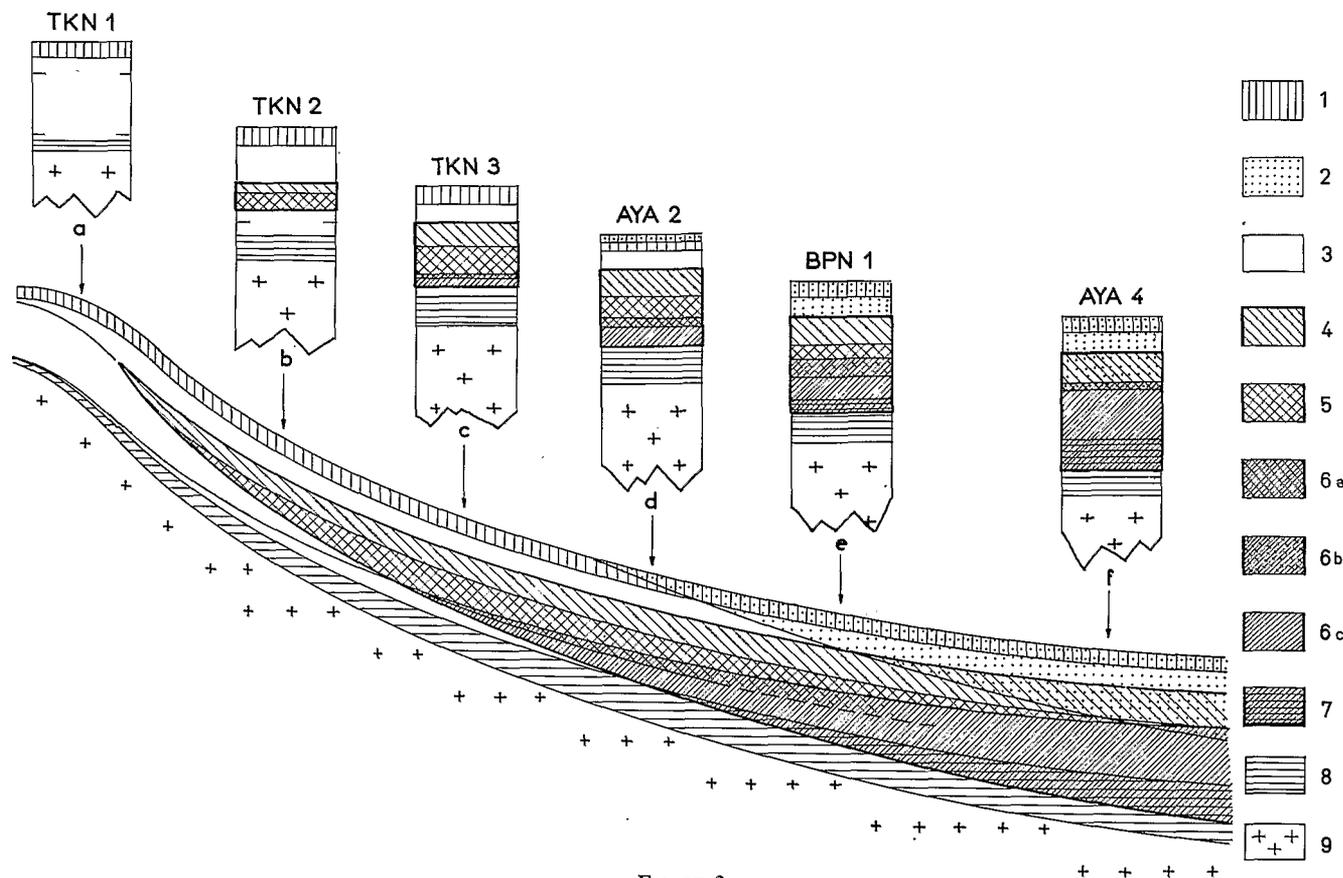


FIGURE 2

Répartition des niveaux d'accumulation le long d'une chaîne de sol.

1 : Zone de départ superficielle des solutions acides de Al^{3+} et Fe^{3+} . — 2 : Colluvions argilo-sableuses. — 3 : Accumulation relative à l'aluminium (gibbsite) et du fer (goëthite). — 4 : Accumulation absolue du fer (goëthite secondaire). — 5 : Accumulation absolue de l'aluminium (gibbsite secondaire). — 6 : Accumulation absolue de silice monomère : formation de kaolinite aux dépens de la gibbsite. — 7 : Accumulation absolue de silice monomère : formation de kaolinite aux dépens des gels alumineux de la zone d'altération. — 8 : Niveau d'altération de la roche : départ des solutions alcalines de silice polymère et d'aluminate. Formation de gels. — 9 : Soubassement de roches fraîches.

Les traits forts figurés autour de certains cartouches, dans les profils et dans la coupe, entourent la zone d'accumulation absolue (Fer, Aluminium, Silice).

en hydroxydes de fer, départ en conditions alcalines de la silice et des cations, départ d'un peu d'aluminate.

Ce niveau d'altération est surmonté, comme dans le profil précédent, du niveau, assez épais, d'accumulation relative de l'alumine et du fer.

Dans ce niveau d'accumulation « relative » se différencient un niveau d'accumulation absolue d'alumine, très net (+ 30 %) et un autre de fer, un peu moins bien dessiné (+ 5 %). Ils se distinguent au microscope par l'apparition de cristallisations secondaires de gibbsite et de goëthite dans les fissures ouvertes et les espaces laissés vides lors de l'altération de la roche : la goëthite apparaît ainsi dans les résidus feldspathiques et la gibbsite dans les squelettes de pyroxènes. La densité apparente

de la roche altérée augmente légèrement. Ces cristallisations secondaires sont fréquemment fibroradiées et d'un tout autre aspect que les cristallisations d'hydroxydes rencontrées dans les niveaux d'altération.

Dans l'horizon de surface : solubilisation partielle, en conditions acides, du fer et de l'alumine.

3°) Profil TKN3 (fig. 2, profil c).

Dans le profil TKN3 la disposition des niveaux est assez semblable à celle qui a été rencontrée dans les deux profils précédents. Il faut cependant mentionner l'apparition de gels « primaires » formés aux dépens des plagioclases et représentant une phase intermédiaire dans la transformation des

feldspaths en gibbsite et l'apparition de gels « secondaires » en remplacement tardif de la gibbsite dans le niveau moyen de l'horizon d'accumulation relative. Ces gels « secondaires » proviennent de la silicification tardive de la gibbsite formée antérieurement et ne représentent, eux, qu'une phase intermédiaire dans la transformation en kaolinite que nous trouverons plus complète dans le profil suivant. La gélification de la gibbsite « primaire » est suivie, un peu plus haut dans le profil, d'un dépôt de gibbsite « secondaire » d'accumulation absolue et ensuite d'hydroxydes de fer, d'accumulation absolue également.

Nous avons donc, dans ce niveau moyen d'accumulation « relative » un étagement de trois niveaux d'accumulation « absolue » (dans le profil précédent nous n'en avons que deux) : la silice avec la gélification de la gibbsite « primaire »; l'alumine produisant un dépôt de gibbsite « secondaire », enfin le fer qui dépose des hydroxydes « secondaires », recouvrant le tout.

En surface nous retrouvons la zone de départ en conditions acides du fer et de l'alumine sous forme de cations trivalents.

4°) Profil AYA 2 (fig. 2, profil d).

Ce profil est caractérisé, ainsi que le profil BPNI, par la présence d'un niveau assez épais kaolinitique qui surmonte le niveau d'accumulation relative gibbsitique.

Dans le profil AYA 2, après un stade éphémère avec gels « primaires » remplaçant les feldspaths, la roche altérée est constituée uniquement de gibbsite, de goethite et d'un peu de quartz; c'est le niveau d'accumulation relative de l'alumine et du fer. La silice est éliminée à 87 %.

Au-dessus se trouve le niveau d'accumulation absolue de silice monomère qui transforme en kaolinite la gibbsite formée précédemment. La silice de la kaolinite est donc d'origine absolue alors que son alumine est d'origine relative. Du point de vue du bilan géochimique de la silice, on passe de — 87 à — 60 % soit un gain absolu de + 27 %. Un peu plus haut dans le profil, on note un léger enrichissement en alumine et, plus près encore de la surface, un net enrichissement absolu de fer.

5°) Profil BPNI (fig. 2, profil e).

En début d'altération les gels présentent un grand développement puisque le profil est situé assez bas dans la caténa. Ces gels, par élimination de silice, évoluent en gibbsite.

Mais bientôt nous voyons apparaître la kaolinite dont la proportion va croissante jusque dans la par-

tie inférieure de l'argile tachetée. Plus haut cette proportion reste relativement constante. Mais nous assistons alors à une nette importation d'alumine (— 16, + 7, + 19 %) qui coïncide avec l'apparition de grandes quantités de gibbsite « secondaire ». La silice disponible dans ce niveau a été employée à la synthèse de la kaolinite et l'excès d'alumine ne peut que cristalliser en gibbsite.

Plus haut l'alumine est réexportée, ou tout au moins ne s'accumule plus (+ 19 à — 7 %); la proportion de gibbsite diminue alors que la proportion de kaolinite reste constante. On note, au contraire, une nette importation de fer (— 13 à + 26 %). Dans les horizons superficiels comme dans les autres profils, on assiste au départ partiel du fer et de l'alumine (+ 26 à — 16 % et — 7 à — 17 % respectivement).

6°) Profil AYA4 (fig. 2, profil f).

Le niveau d'altération est épais et est caractérisé par un important développement de la phase amorphe : le niveau d'altération est assez épais et les plagioclases ne se transforment que lentement en gels alumino-siliceux d'abord, en gels alumineux désaturés ensuite. Comme dans tous les niveaux de départ, la silice s'échappe sous forme polymérisée. Se trouvant en bas de caténa, ces niveaux d'altération sont traversés par des eaux siliceuses provenant des parties hautes de la caténa : départ de silice polymérisée, arrivée de silice monomère et formation de kaolinite par réaction de la silice sur les gels alumineux hexacoordonnés. Le stade gibbsitique n'existe pas ici.

Forte importation d'hydroxydes de fer qui colorent en rouge les horizons moyens et supérieurs. Dans l'horizon superficiel, constitué principalement de colluvions argilo-sableuses, départ des cations Fe^{3+} .

C) LES ACCUMULATIONS DANS LE PAYSAGE.

En rassemblant toutes ces données géochimiques et minéralogiques des profils et en disposant ceux-ci le long de la pente principale du versant, on constate que les caractéristiques des différents milieux traversés varient considérablement d'un point à un autre de la caténa et que ces variations s'inscrivent de façon logique et naturelle.

1°) Les zones de départ.

Toutes les zones d'altération sont caractérisées par le départ en conditions alcalines de tout ou partie de la silice sous forme polymérisée et d'un

peu d'alumine, soit sous forme d'aluminate, soit sous forme camouflée dans les chaînes siliceuses à l'état tétracoordonné. La zone superficielle de tous les profils est caractérisée par le départ, en conditions acides, de l'alumine et du fer.

2°) Les zones d'accumulation.

a) Parties hautes de la caténa. — Dans la partie supérieure de la caténa, les horizons moyens des profils sont des horizons d'accumulation relative de l'alumine et du fer, sous forme de gibbsite et de limonite-goethite. Les parties hautes du relief constituent donc les zones de départ principales des éléments solubles et les zones d'accumulation relative des autres éléments.

b) Parties moyennes de la caténa. — Dans la partie moyenne de la caténa nous retrouvons des horizons d'accumulation absolue d'alumine et de fer sous forme de gibbsite « secondaire » et de limonite-goethite « secondaire ». Les parties moyennes du paysage constituent ainsi la zone de cheminement avec formation temporaire d'horizons d'accumulation absolue d'alumine et de fer. La gibbsite et les hydroxydes de fer sont assez facilement solubilisés par les acides organiques; l'alumine et le fer remis en solution migrent par étapes successives le long des pentes, solubilisés un certain temps pour s'immobiliser à nouveau dès que les conditions d'équilibre des solutions sont rompues. Le jeu alternatif de la solubilisation et de la précipitation ne font qu'enrichir progressivement les niveaux inférieurs d'accumulations absolues aux dépens des niveaux supérieurs d'accumulation relative. Les minéraux « secondaires » formés dans cette zone de translation sont des minéraux relativement instables qui ont tendance à disparaître quand ils sont rejoints par l'abaissement des niveaux superficiels organiques.

c) Parties basses de la caténa. — Dans les parties basses du paysage, les accumulations absolues de silice monomère et d'alumine cationique se traduisent par la formation de couches épaisses essentiellement kaolinitiques. Rappelons que dans cette partie du paysage la kaolinite peut avoir trois origines différentes : réaction de la silice monomère sur la gibbsite, sur les gels alumineux désaturés, ou encore par réaction directe avec les cations Al^{3+} . Les parties basses du paysage constituent donc la zone d'accumulation absolue d'une bonne partie de la silice, de l'aluminium Al^{3+} et du fer Fe^{3+} , du moins dans les horizons moyens des profils. Les minéraux secondaires formés par accumulation de silice et d'alumine sont stables : c'est la kaolinite.

Dans les profils étudiés il n'a été trouvé aucun exemple de dégradation de cette argile, ce qui fait qu'elle peut être amenée dans des conditions de surface après érosion, sans subir de grands dommages comme c'était le cas pour les hydroxydes secondaires; elle est simplement entraînée mécaniquement par le ruissellement sous forme de particules détritiques.

3°) Conséquences géomorphologiques.

La présence de niveaux d'accumulations absolues de fer en bas de pente, niveaux généralement indurés ou tout au moins présentant la possibilité de s'indurer, entraîne nécessairement, avec le temps, une tendance à l'inversion des reliefs lors de l'évolution du paysage. Les profils situés sur les sommets et le haut des pentes sont constitués de matériaux relativement tendres et poreux, n'offrant que peu de résistance à l'érosion. La cote topographique des sommets aura ainsi tendance à s'abaisser alors que l'épaississement de la couche indurée des bas de pente ralentit, au contraire, l'action de l'érosion. Les rivières auront tendance à progresser plus rapidement dans les niveaux non indurés qu'elles pourront éroder plus facilement. L'inversion des reliefs est ainsi amorcée : la kaolinite se trouve ainsi placée en position topographique élevée alors qu'elle avait été formée antérieurement en zone déclive. Avec le démantèlement des cuirasses et la mise à nu des formations kaolinitiques, la kaolinite est emportée par ruissellement et finit par former une couverture continue avant d'être entraînée en suspension par le ruissellement fluvial.

Dans les morphologies anciennes, les niveaux gibbsitiques d'accumulation relative se trouvent rarement en affleurement. Ces niveaux ne se rencontrent qu'aux endroits soumis à une érosion violente qui en abaisse suffisamment l'altitude topographique pour recouper les niveaux d'altération des roches fraîches. Au contraire, dans les paysages géomorphologiquement plus jeunes, les roches altérées en gibbsite et goethite affleurent sur de larges surfaces.

III. — CLASSIFICATION GENETIQUE DES NIVEAUX D'ACCUMULATION

A) LA SILICE.

1°) Accumulation relative :

Silice-silicatée : n'existe pas en région ferrallitique; silice-Quartz : quartz résiduel.

2°) *Accumulation absolue* :

Dans un matériau siliceux ou inerte : quartz secondaire, calcédoine, opale; alumineux avec gibbsite : kaolinite (abs Si + rel Al); alumineux gel : kaolinite (abs Si + rel Al); alumineux avec cations Al^{+3} : kaolinite (abs Si + abs Al).

B) L'ALUMINE.

1°) *Accumulation relative* :

Gibbsite dans les roches altérées éventuellement sous forme de gels temporaires.

2°) *Accumulation absolue* :

Dans un matériau alumineux ou inerte : gibbsite secondaire; gels siliceux : kaolinite (rel Si + abs Al); avec silice monomère : kaolinite (abs Al + abs Si).

C) LE FER.

1°) *Accumulation relative* :

Normalement sous forme d'hydroxydes et oxydes : goethite, limonite, hématite.

Temporairement sous forme de phyllites ferri-fères instables : chlorites, nontronite, iddingsite, etc.

2°) *Accumulation absolue* :

Goethite, hématite, limonite sous forme de grenailles, de revêtements ou de précipités colloïdaux dans un milieu de réception quelconque mais poreux.

CONCLUSIONS

A) LA FORMATION DES MINÉRAUX SECONDAIRES :

1°) *Les gels* :

En quittant le réseau cristallin du plagioclase, les alcalins abandonnent un résidu feldspathique amorphe, partiellement désorganisé, alumino-siliceux. Cette phase résiduelle est nettement identifiable au microscope : c'est un gel. D'abord alumino-siliceux il évolue plus ou moins rapidement en gels alumineux purs après désaturation et départ de

la silice. L'aluminium y change progressivement de coordinence et cristallise ensuite, normalement, en gibbsite.

L'importance des gels alumino-siliceux dans le temps et dans l'espace dépend de la position topographique du profil considéré, donc de la qualité des eaux percolant à travers les niveaux en voie d'altération. Les gels sont d'autant plus abondants que les eaux de circulation sont déjà partiellement chargées en éléments dissous. En bas de pente les gels persisteront donc normalement très longtemps avant de se transformer en produits cristallisés. Sur les sommets, au contraire, l'importance des gels diminue rapidement. En passant à la limite, les deux transformations feldspath-gel et gel-gibbsite sont si rapides que l'étape intermédiaire n'apparaît plus. Il n'est pas douteux cependant que les processus de transformation restent les mêmes sur toute l'étendue de la caténa.

2°) *La gibbsite* :

Dans la partie supérieure de la caténa, la gibbsite se forme directement aux dépens du plagioclase grâce à l'élimination rapide et totale des alcalins et de la silice. L'alumine restée seule change de coordinence et, à pH alcalin, cristallise sur place en gibbsite. Dans les parties moyennes, la transformation est moins brutale, le départ de la silice étant légèrement retardé. Une phase intermédiaire apparaît sous forme de gels amorphes. La gibbsite solubilisée en milieu acide dans les horizons superficiels migre en solution sous forme de cation Al^{3+} ou de complexes organiques et reprécipite plus bas dans le profil et dans le paysage dès que les conditions de milieu redeviennent propices à sa fixation.

3°) *La kaolinite* :

L'apparition de la kaolinite dans la séquence d'altération est plus tardive encore. La formation de ce minéral exige la présence de silice en solution diluée, sous forme monomère et d'aluminium hexacoordonné, soit sous forme de gels alumineux désaturés, soit encore sous forme de gibbsite, soit enfin sous forme de cations en solution. Ces conditions se retrouvent réunies le plus souvent dans les parties basses du paysage.

B) LE COMPORTEMENT DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES :

1°) *Les alcalins et alcalino-terreux* :

Ces éléments sont simplement dissous et entraînés. Ils n'interviennent en aucune façon dans la compo-

sition des minéraux de néoformation, du moins en région ferrallitique.

2°) *La silice* :

La silice est un élément très mobile. Elle est exportée en grande quantité des niveaux d'altération, du moins en ce qui concerne la silice des silicates. La silice-quartz n'est pratiquement pas mise en solution. Au début de sa migration, la silice est emportée sous forme polymère, débris de chaînes primitivement plus longues et rompues aux endroits des liaisons aluminiques. La silice polymérisée ne peut réagir avec l'alumine qui, laissée seule, cristallise en gibbsite. Avec la dilution progressive le long des pentes de la caténa, la silice se dépolymérise lentement et devient ainsi réactionnelle vis-à-vis de l'aluminium hexacoordonné. Il se forme alors de la kaolinite.

3°) *L'alumine* :

L'alumine a tendance à s'accumuler dans les niveaux d'altération : elle forme d'abord des gels mixtes avec la silice, elle cristallise ensuite en gibbsite. Mise en solution dans les horizons supérieurs, elle descend dans le profil et dans le paysage et, suivant l'absence ou la présence de silice monomère, elle cristallise en gibbsite secondaire ou en kaolinite.

4°) *Le fer* :

Le fer présente un comportement très voisin de celui de l'alumine : il s'accumule dans les niveaux d'altération sous forme d'hydroxydes. Remis en solution dans les horizons superficiels, il recristallise plus bas en goethite et en hématite secondaires.

C) LES ACCUMULATIONS SUR LE VERSANT :

1°) *Haut de pente* :

Les parties élevées du relief sont constituées d'horizons d'accumulation relative de l'alumine et du fer, la silice et les cations alcalins et alcalino-terreux en étant totalement exportés.

2°) *Mi-pente* :

Les parties moyennes sont constituées d'horizons d'accumulation relative de gibbsite et d'hydroxydes de fer « primaires » et d'horizons d'accumulation absolue de gibbsite et de goethite « secondaires ». Vers le bas on note un début d'accumulation abso-

lue de silice. Les parties moyennes du paysage sont avant tout un milieu de translation.

3°) *Bas de pente* :

Les parties basses sont principalement des horizons d'accumulation de silice (kaolinite), d'alumine (kaolinite) et de fer (goethite-hématite).

La gibbsite et la goethite constituent donc les minéraux secondaires des niveaux d'accumulation relative principalement et d'accumulation absolue accessoirement tandis que la kaolinite est toujours un minéral d'accumulation absolue de la silice, accumulation accompagnée ou non d'accumulation absolue d'alumine.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBREVILLE, A. (1949). — Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. *Soc. Ed. Géogr. Mar. Col.*, Paris, 351 p.
- BONIFAS, M. (1959). — Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. *Mem. Serv. Carte géol. Als. Lor.*, n° 17, 159 p.
- DELVICNE, J. (1965). — Pédogenèse en zone tropicale; la formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. *Mem. ORSTOM*, n° 13, Dunod, Paris, 177 p.
- D'HOORE, J. (1954). — L'accumulation des sesquioxides libres dans les sols tropicaux. *Publ. INEAC, Sér. Scientif.*, n° 62, 132 p.
- GASTUCHE, M.C., HERBILLON, A. (1962). — Synthèse et genèse de l'hydrargillite C.R. *Acad. Sci.*, Paris, 254, pp. 1105-1107.
- ILER, R. K. (1955). — The colloid chemistry of silica and silicates *Cornell Univ. Press*, N.Y., 324 p.
- KELLERMANN J. (1960). — Problèmes d'hydraulique agricole et pastorale en Côte d'Ivoire. *Rapp. Génie Rural, Gouv. Côte d'Ivoire*, 98 p.
- KRAUSSKOPF, K.B. (1956). — Dissolution and precipitation of silica at low temperature. *Geochim. cosmochim. Acta*, 10, pp. 1-26.
- KRAUSSKOPF, K.B. (1959). — Silica in sediments. A symposium with discussion. *Soc of Econ. Paleontologists and mineralogists*, Sp. P. N7.
- MILLOT, G. BONIFAS, M. (1955). — Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latéritisation et bauxitisation. *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lor.*, 8, fasc. 1, pp. 1-20.
- PEDRO, G. (1964). — Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. *Thèse Fac. Sci. Paris, Inst. Nat. Rech. Agron.*, 344 p.
- SEFFERT, B. (1962). — Quelques réactions de la silice en solution; la formation des argiles. *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lor.*, 21, 86 p.

Manuscrit déposé le 18 mars 1966.

Jean DELVIGNE

**BILANS GÉOCHIMIQUES DE L'ALTÉRATION
DES ROCHES BASIQUES
EN COTE-D'IVOIRE FERRALLITIQUE**

Extrait de la
" REVUE DE GÉOGRAPHIE PHYSIQUE
ET DE
GÉOLOGIE DYNAMIQUE "

Volume IX, fasc. 4 - Juillet-Octobre 1967

B 11859