

**MODÈLE ET PARAMÈTRES D'ÉVOLUTION GÉOCHIMIQUE
DES MATÉRIAUX D'ALTÉRATION
ET DES SOLS DÉRIVANT DE ROCHES BASIQUES,
SOUS CLIMAT TROPICAL SEMI-HUMIDE**

J.M. WACKERMANN

*Laboratoire de Géologie du Centre ORSTOM
de Dakar (Sénégal)
et Laboratoire de Géologie des SSC
Bondy (France)*

RÉSUMÉ

L'étude de l'altération météorique des roches basiques, soumises à un climat tropical semi-humide, montre que dans de nombreux profils, les teneurs d'oxydes de magnésium et de sodium suivent une expression exponentielle en fonction du carré de la distance à la roche saine. Un modèle similaire peut être appliqué à un indice d'altération, quotient des sommes de teneurs des oxydes enrichis (oxydes de silicium, fer, manganèse, titane) et des oxydes appauvris au cours du processus (magnésium et sodium). L'indice et l'un des deux paramètres du modèle permettent de caractériser le degré de transformation atteint par chaque niveau et la nature des néogénèses dominantes dans un profil. En outre le logarithme de cet indice présente une relation linéaire avec la teneur en eau libre des différents niveaux.

ABSTRACT

Weathering of mafic rocks, in semi-wet tropical zone, shows that, in most of vertical sections, MgO and Na₂O % follow an exponential pattern versus square of distance from sound rock. A similar pattern

can be applied to an index of weathering (ratio of Al₂O₃+Fe₂O₃+MnO+TiO₂ to MgO+Na₂O, in percentages). The index and one of the two parameters of the model may define the degree of transformation of a level and the main type of secondary minerals formed. Besides the logarithm of this index is linearly related to H₂O⁻ % amount.

ZUSAMMENFASSUNG

Bei halb-trocken tropikalem Klima erscheint in vielen Verwitterungsprofilen, über Basischen Gesteine, eine exponentielle Entwicklung der Hauptkomponenten-Gehalten: die Logarithmen der MgO- und Na₂O- Prozenten sind linearisch mit den Quadraten der Entfernung zum Ausgangsgestein gebunden. Ein symmetrisches Modell ist auf ein Verwitterungszeichnis (Verhältnis Al₂O₃+Fe₂O₃+MnO+TiO₂ zu MgO+Na₂O %) anwendbar. Das Zeichnis und eines der zwei Parametern dieser Kurve ermöglichen den Grad der Verwitterungsumwandlung und das Typus der Sekundärmineralien zu charakterisieren. Ausserdem steht der Logarithmus des Verwitterungszeichnisses mit dem H₂O⁻ %-Inhalt in linearischer Verbindung.

РЕЗЮМЕ

Изучение метеорического выветривания основных пород под тропическим, полувлажным климатом, показывает что во многих профилях содержания магния и натрия связаны экспоненциальной функцией с квадратом расстояния от нефронутной породы. Подобная модель может быть применена к показателю выветривания, являющемуся частным сумм содержанием обогащенных окисей (кремния, железа, марганца, титана) и окисей обедневших в течение процесса (магний и натрий). Показатель и один из параметров модели позволяют установить степень превращения, достигнутую на каждом уровне, и характер преобладающих в профиле неогенезов. Кроме того, логарифм этого показателя находится в линейном отношении с содержанием свободной воды на различных уровнях.

L'étude des processus d'altération météorique des roches basiques du Sénégal Oriental, sous climat tropical semi-humide de type soudano-guinéen à sahélo-sénégalais (pluviosité moyenne annuelle de 1 400 à 600 mm, température moyenne annuelle de 28°, voir WACKERMANN, 1972), permet de déceler des constantes dans le comportement des éléments majeurs.

Ces éléments peuvent être classés en trois groupes :

— les éléments dont les teneurs (*) diminuent systématiquement dans les matériaux altérés en fonction de la distance à la roche saine : magnésium et sodium.

— les éléments dont les teneurs augmentent en fonction de cette distance, ou peuvent demeurer à peu près constantes : aluminium, fer, manganèse et titane.

— les éléments dont les teneurs présentent des variations se référant tantôt à l'un ou tantôt à l'autre des deux groupes précédents, soit à l'intérieur d'un même profil d'altération, soit d'un profil à l'autre : silicium, calcium, potassium.

Cette classification est vérifiée sur l'ensemble des 49 puits ou sondages forés dans des matériaux d'altération issus de roches dioritiques à basiques.

(*) Teneurs exprimées en poids d'oxydes (%).

Six profils permettent d'étudier les variations de teneurs en partant de la roche saine (absence de transformations minéralogiques à l'observation microscopique, teneurs H_2O^- inférieures à 0,10 %) : K-37 (**), G-5 (***) , G-10 (***) , M-2, S-4, S-7. Ils ont notamment permis l'élaboration des modèles qui ont pu être vérifiés, dans un deuxième temps, par extrapolation, sur les profils incomplets. L'homogénéité initiale du matériau peut être contrôlée au moyen des teneurs en potassium et titane : les variations de teneurs de leurs oxydes sont très faibles par rapport aux teneurs initiales, lesquelles reflètent les éventuelles variations brutales de faciès du matériau originel.

COMPORTEMENT DU MAGNÉSIUM ET DU SODIUM

Ces deux éléments voient leurs teneurs diminuer dès les premiers stades de l'altération météorique. Les courbes MgO % et Na_2O % établies en fonction de la distance à la roche saine montrent que l'évolution de la pourcentage d'oxydes s'effectue d'une façon continue. La forme des courbes relative à l'exemple K-37 (fig. 1) se retrouve pour les autres profils cités ci-dessus. Les points s'écartant des courbes lissées se révèlent, sans exception, liés soit à une variation du matériau originel, soit à une hétérogénéité dans les transformations météoriques (variations de faciès, boules, filonnets et géodes d'apports secondaires). A l'appui de cette argumentation nous apportons l'examen microscopique et le contrôle des teneurs en potassium et titane, ce qui lève aisément cette hypothèse. D'ailleurs dans les stades initiaux de l'altération le calcium révèle un comportement analogue au magnésium et au sodium mais les enrichissements ultérieurs, par cristaux disséminés, filonnets, nodules et géodes de carbonates, provoquent la présence de dents de scie sur les courbes correspondantes. Un phénomène analogue peut s'observer à la partie supérieure des profils conduisant à la formation de vertisols, en ce qui concerne le magnésium : cet élément est intégré en grandes quantités dans les phyllites de néogène.

(**) Sondage exécuté en 1970 pour le compte de l'ORSTOM dans le cadre du programme de recherche « Genèse des altérations ».

(***) Carottages de sondages aimablement mis à la disposition du Laboratoire de Géologie du Centre ORSTOM de Dakar par le Directeur du P.N.U.D. au Sénégal (M. AGASSIZ).

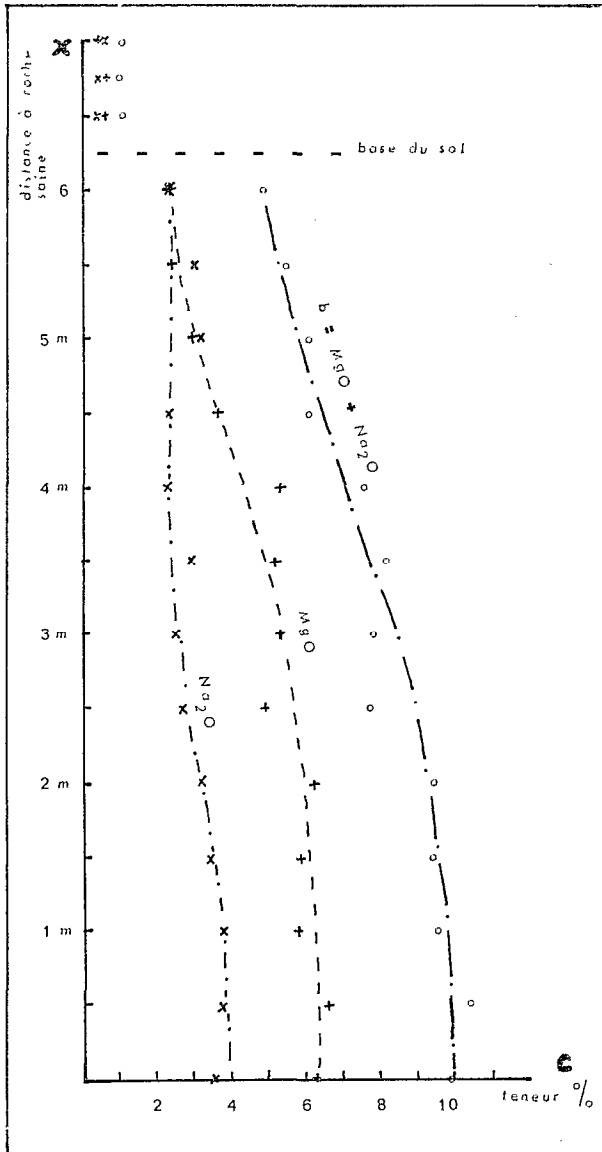


FIG. 1. — Sondage K-37 : variation des pourcentages de MgO , Na_2O et $MgO+Na_2O$ en fonction de la distance à la roche saine.

L'expression mathématique des fonctions MgO % et Na_2O % est obtenue aisément car les courbes portées sur des diagrammes *logarithme des teneurs en oxydes* en fonction du *carré des distances à la roche saine* sont alors représentées par des droites

(fig. 2). Si d est la distance correspondant à une teneur moitié de la teneur initiale c_0 de l'oxyde considéré dans la roche saine, la teneur c pour une distance x à la roche saine s'exprime par la fonction :

$$c = c_0 e^{\frac{\log 0,5}{\log e} \frac{x^2}{d^2}} = c_0 e^{-0,69 \frac{x^2}{d^2}}$$

Il devient ainsi possible de caractériser l'évolution des teneurs de chacun des oxydes de magnésium et sodium par deux valeurs :

c_0 : caractérisant la roche initiale

d : caractérisant le stade auquel est parvenu le processus d'hydrolyse de l'élément.

Ainsi pour K-37 : $c_0^{Mg} = 6,30$ % ; $d_{Mg} = 5,1$ m
 $c_0^{Na} = 3,62$ % ; $d_{Na} = 4,2$ m.

Une constatation complémentaire peut être déduite de l'étude de l'ensemble des profils : la dispersion des points représentatifs sur les diagrammes $\log c/x^2$ est nettement moindre lorsque c représente le total $b = MgO + Na_2O$. Cette propriété semble imputable à deux faits : ce total b présente des variations relatives moindres que chacun des oxydes pris séparément dans la roche initiale, ainsi qu'on peut l'observer à la base non altérée des sondages, et d'un autre côté l'élimination par le processus d'altération des deux oxydes apparaît comme un phénomène global. A une dispersion à droite par rapport à la courbe lissée relative à l'un des oxydes correspond généralement une dispersion à gauche par rapport à la deuxième courbe, et inversement. Le modèle relatif au magnésium et au sodium s'avère applicable à la somme b : les figures 2 et 3 illustrent cette propriété pour les profils complets étudiés. La caractérisation des courbes est obtenue à l'aide des valeurs équivalentes : la valeur b_0 initiale et la distance d_b correspondant à la valeur $0,5 \cdot b_0$.

INDICE GÉOCHIMIQUE D'ALTÉRATION

Nous avons vu que les quatre éléments, aluminium, fer, manganèse et titane voyaient leurs taux d'oxydes croître systématiquement en fonction de la distance à la roche initiale, ou rester grossièrement constants lorsque l'évolution est modérée. Cet accroissement peut correspondre à un enrichissement absolu, par

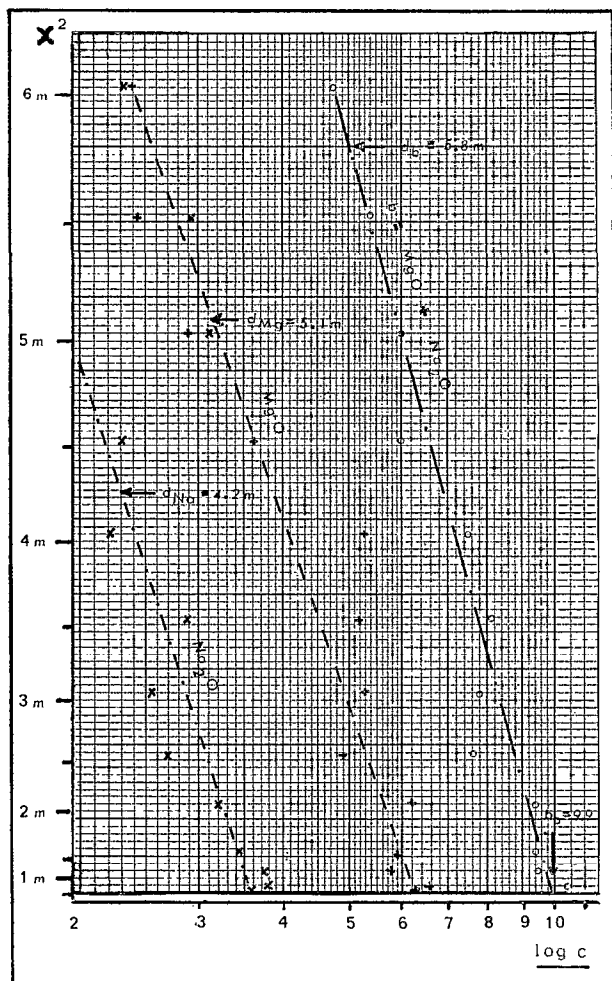


FIG. 2. — Sondage K-37 : variation du logarithme des teneurs en MgO , Na_2O et $MgO+Na_2O$ en fonction du carré de la distance à la roche saine.

apport externe au niveau considéré, ou relatif, par simple effet de bilan sur les pourcentages, lorsque d'autres oxydes sont éliminés. Les deux phénomènes peuvent intervenir conjointement.

Un graphique sur lequel sont portées en abscisses les teneurs d'oxydes et en ordonnées la distance à la roche saine indique une évolution de formes symétriques aux courbes de la figure 1, mais plus redressées. La grande dispersion des points représentatifs rend le recours à un modèle mathématique plus délicat que pour les éléments du premier groupe.

Cette dispersion est là aussi imputable en grande partie aux hétérogénéités initiales et secondaires.

En vue d'éliminer d'une part les variations aléatoires des oxydes de silicium et potassium, d'autre part les imprécisions des dosages relatifs à la perte-au-feu (eau de constitution, anions divers dont l'anhydride carbonique), le recours au quotient des deux premiers groupes d'oxydes s'avère indispensable. On

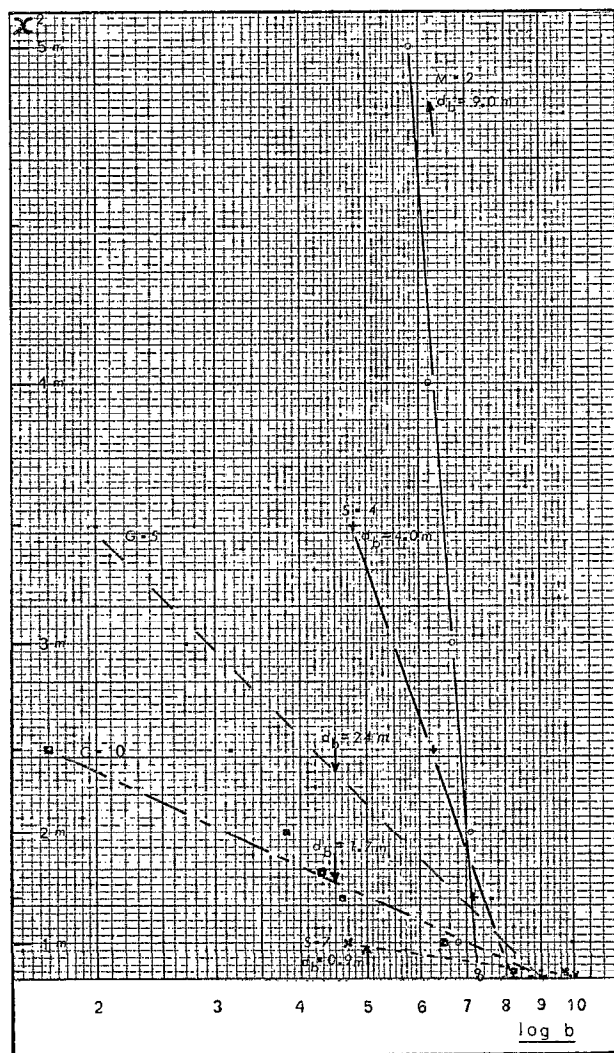


FIG. 3. — Diagrammes $\log(MgO+Na_2O)$ en fonction du carré de la distance à la roche saine. Pour G-5 et G-10 les ordonnées doivent être multipliées par 10.

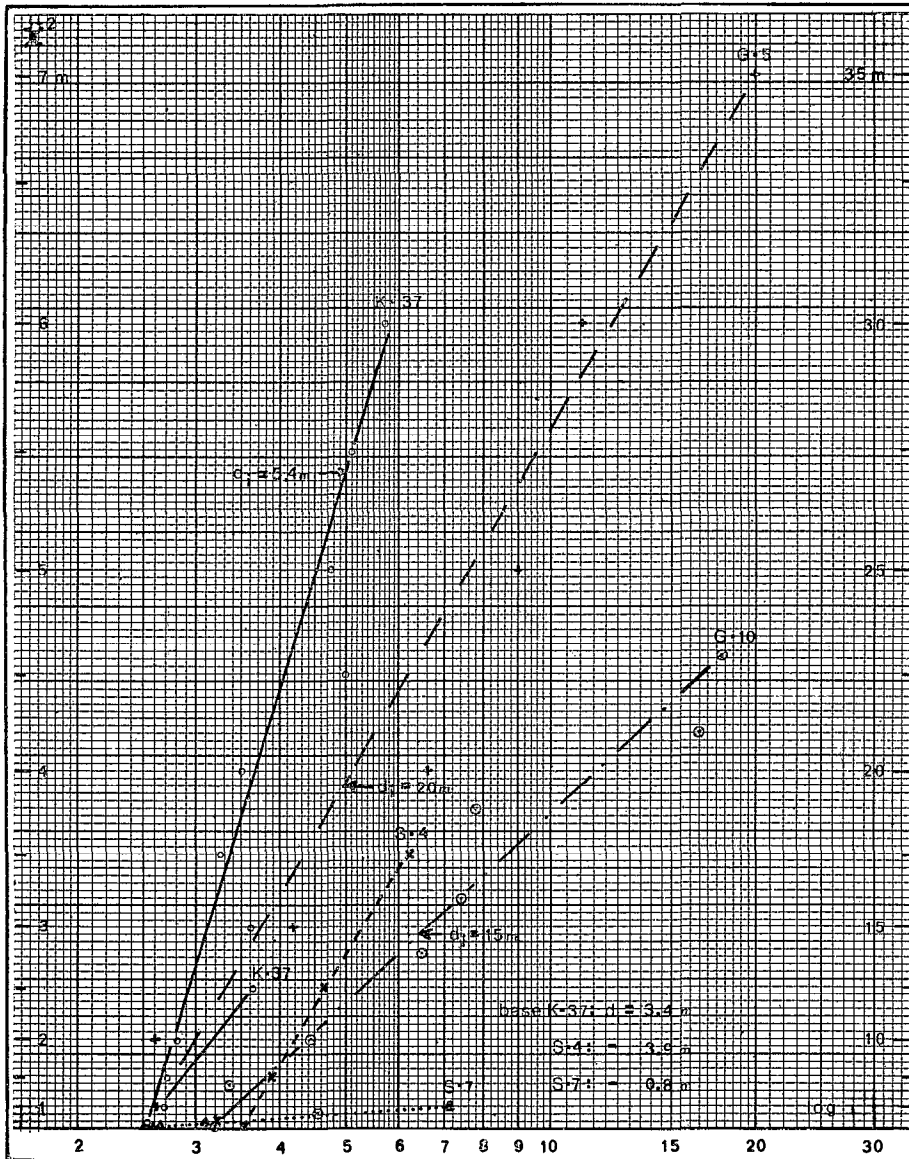


FIG. 4. — Diagramme

$$\log t = \log \frac{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{TiO}_2}{\text{MgO} + \text{Na}_2\text{O}}$$

en fonction du carré de la distance à la roche saine (x^2).
Les valeurs relatives aux sondages G-5 et G-10 correspondent
aux ordonnées de droite.

peut ainsi exprimer le rapport de la somme des oxydes (%) qui sont enrichis au cours des processus d'altération et de la somme des oxydes appauvris systématiquement :

$$i = \frac{a}{b} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{TiO}_2}{\text{MgO} + \text{Na}_2\text{O}} \quad (*)$$

Les valeurs initiales i_0 relatives aux roches saines sont de l'ordre de 0,50 pour les roches ultra-basiques, 1 à 2 pour les roches basiques, 2 à 3 pour la famille dioritique, 3 à 4 pour la famille granitique.

Les valeurs i correspondant aux matériaux altérés et aux sols sus-jacents se révèlent capables de caractériser les stades d'évolution atteints par ces niveaux.

Le rapport i/i_0 constitue ainsi un indice commode de caractérisation :

— stade d'altération avec phyllites de structure 2/1 dominantes : $i/i_0 = 1,0$ à $1,5$

— mélange en proportions comparables de phyllites 2/1 et 1/1 : $i/i_0 = 1,5$ à $3,0$

— stade d'altération avec phyllites de structure 1/1 : $i/i_0 = 3,0$ à 50

— carapaces ferrifères :

$$i/i_0 = 50 \text{ à } 100$$

— cuirasses : > 100

En plus de cette propriété de caractérisation des néogénèses, le quotient i se révèle lié par des fonctions simples à deux grandeurs importantes : la distance du matériau à la roche saine et la teneur en eau liée (H_2O^-).

RELATION AVEC LA DISTANCE A LA ROCHE SAINTE

La forme des courbes $i/\text{distance-roche saine}$ reflète une allure sigmoïdale, symétrique des courbes $b/\text{distance-roche saine}$ illustrées par la figure 1.

L'expression mathématique se révèle également de même nature : le report sur un diagramme $\log i/x^2$

(*) Teneurs exprimées en poids d'oxydes (%).

(fig. 4 et 6) aligne les points représentatifs. La relation s'écrit :

$$i = i_0 e^{\frac{\log 2}{\log e} \frac{x^2}{d_i^2}} = i_0 e^{0,69 \frac{x^2}{d_i^2}}$$

où les paramètres de la fonction sont :

i_0 : caractéristique de la roche saine (pour K-37 : $i_0 = 2,51$)

d_i : caractéristique du stade auquel est parvenu le processus d'altération (pour K-37 : $d_i = 5,4$ m) il est visualisé par la pente de la droite représentative.

Les valeurs du paramètre d_i calculées pour l'ensemble des profils du Sénégal Oriental analysés peuvent être classées en quatre groupes présentant des transitions entre eux :

0 à 4 m : profils caractérisés par des néogénèses de phyllites gonflantes dominantes

4 à 7 m : néogénèses comportant un mélange de smectites et kaolinites en quantités équivalentes

7 à 10 m : phyllites secondaires principalement de type 1/1

> 10 m : profils kaolinitiques épais, liés vraisemblablement à des climats quaternaires anciens ou antérieurs plus humides, à partir desquels se sont individualisés les glacis cuirassés.

Le paramètre d_i permet ainsi de quantifier la notion de *drainage interne* des profils d'altération. La diminution progressive de sa valeur du haut vers le bas des séquences de puits sur pentes illustre cette propriété.

RELATION AVEC LES TENEURS H_2O^-

La relation $i/\text{H}_2\text{O}^-$ dans des matériaux d'altération d'un même profil est représentée par une droite dans un diagramme $\log i/\text{H}_2\text{O}^-$ (fig. 5). Cette propriété s'avère extrêmement utile dans le cas des profils incomplets : la valeur initiale correspondant à la roche saine, non connue par échantillonnage, peut être obtenue par extrapolation pour la valeur $\text{H}_2\text{O}^- = 0,10$ % qui constitue la moyenne des teneurs des échantillons de roches qui ne présentent pas de traces d'altération météorique. Il devient ainsi possible de déterminer les paramètres i_0 et d_i des profils qui

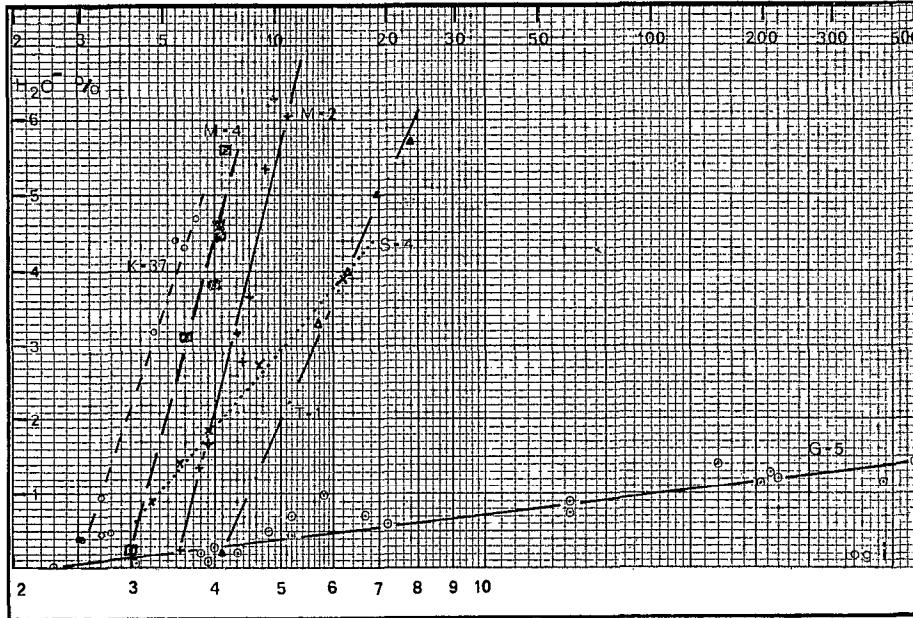


FIG. 5. — Diagramme
 $\log i/H_2O^-$.

Les échantillons du sondage G-5 sont reportés grâce à l'échelle des abscisses du haut.

pour des raisons techniques (nappe d'eau, éboulements, risques d'asphyxie) n'ont pu être foncés jusqu'à la roche saine profonde. Lorsque la profondeur de cette roche saine a pu être mesurée au moyen d'un sondage électrique (ALBOUY *et al.*, 1969 et 1970), l'établissement du diagramme $\log i/x^2$ est alors immédiat : les droites obtenues dans ces conditions confirment et étendent la validité du modèle exponentiel décrit précédemment.

Les valeurs H_2O^- sont également liées linéairement aux logarithmes des teneurs MgO et Na_2O des échantillons correspondants : l'extrapolation pour la valeur 0,10 % de l'eau non liée permet ainsi de connaître les teneurs de ces deux oxydes dans la roche saine lorsqu'elle n'est pas accessible. Cette méthode permet un accès à la connaissance de la composition du substratum recouvert par un manteau d'altération, voire à une classification pétrographique grossière à l'aide des teneurs MgO .

APPLICATION DU MODÈLE ET DES PARAMÈTRES

Le modèle exponentiel de variation de l'indice d'altération en fonction du carré de la distance à la

roche saine a pu être vérifié sur les 19 profils pour lesquels la profondeur de la roche saine est connue par carottage ou sondage électrique.

Ces profils sont originaires de l'ensemble du socle cristallin du Sénégal Oriental.

Le gradient de pluviosité nord-sud actuel et l'existence de paléoprofiles dérivant de conditions climatiques sans doute légèrement plus humides que celles qui règnent actuellement aux latitudes correspondantes (notamment dans le cas des sondages G-5 et G-10 forés dans des buttes-témoins) n'influent pas sur l'expression mathématique du modèle. Pour une famille pétrographique donnée le paramètre d_i constitue la seule variable. Il intègre ainsi les deux notions de *drainage externe*, lié aux conditions climatiques du site, et de *drainage interne*, caractérisant la situation topographique du profil et ses caractéristiques hydrologiques.

L'application du modèle aux profils d'altération du Sénégal Oriental pour lesquels la profondeur de la roche saine n'est pas connue de façon précise paraît ainsi justifiée. A partir de la valeur i_0 , déduite du diagramme $\log i/H_2O^-$, il est possible de procéder par approximations successives, en faisant varier pro-

gressivement la profondeur de la roche saine sur le diagramme $\log i/x^2$, jusqu'à obtention de l'alignement des points figuratifs relatifs aux niveaux supérieurs analysés, ou encore en faisant glisser un papier calque représentant les points analysés $i/\text{profondeur}$

sur des abaques $i/i_0 = e^{-0,69 \frac{x^2}{d^2}}$ jusqu'à obtention d'une interpolation facile entre deux courbes $d = 1, 2, 3, \dots$ mètres. L'avantage de telles abaques d'abscisses i/i_0 consiste dans leur indépendance vis-à-vis de la nature géochimique de la roche originelle : leur origine commune est le point pivot $i/i_0 = 1$. En outre les distances entre les niveaux analysés, donc des points représentatifs $i:i_0/x$ demeurent constantes.

La majeure partie des profils d'altération peuvent ainsi être représentés par le modèle initial, les paramètres i_0 et d_i confirmant les groupes définis ci-dessus en fonction de la nature des phyllites de néogène. Les exceptions regroupent les formations fortement hétérogènes et la partie supérieure des puits conduisant à la formation de vertisols dans lesquels la présence d'une nappe phréatique quasi permanente conduit à un réenrichissement en magnésium et sodium.

Les sols, coiffant les manteaux d'altération, s'individualisent sur les diagrammes $\log i/x^2$ par une brutale rupture de pente de la droite représentative du manteau. Ce phénomène peut être dû à des apports colluviaux, des remaniements sur place par des processus mécaniques (gonflements, tassements, transports biologiques), une variation importante dans la dynamique chimique et minéralogique de l'évolution météorique par suite d'une modification de la porosité, donc de la perméabilité. Ces facteurs qui peuvent intervenir isolément ou concurremment ont principalement pour effet de démolir brutalement, dans l'espace, le fantôme de la structure initiale qui conservait dans le manteau d'altération un type d'échanges chimiques et de modifications minéralogiques à volume sensiblement constant. Ce caractère explique la possibilité d'appliquer un modèle fonction de la distance à la roche saine et se trouve illustré sur le terrain par la rémanence du système de diaclases originel, conforme à celui de la roche saine.

Une autre propriété intéressante de l'application de ce modèle mathématique réside dans la visualisation des hétérogénéités, soit du matériau initial, soit des faciès secondaires, ou encore de la superposition de deux processus météoriques successifs, superposés ou emboîtés. La figure 6 montre deux exemples, relativement fréquents, d'emboîtement de deux processus, l'un à pente (d_i) forte (élimination relativement plus forte des métaux alcalins), à la

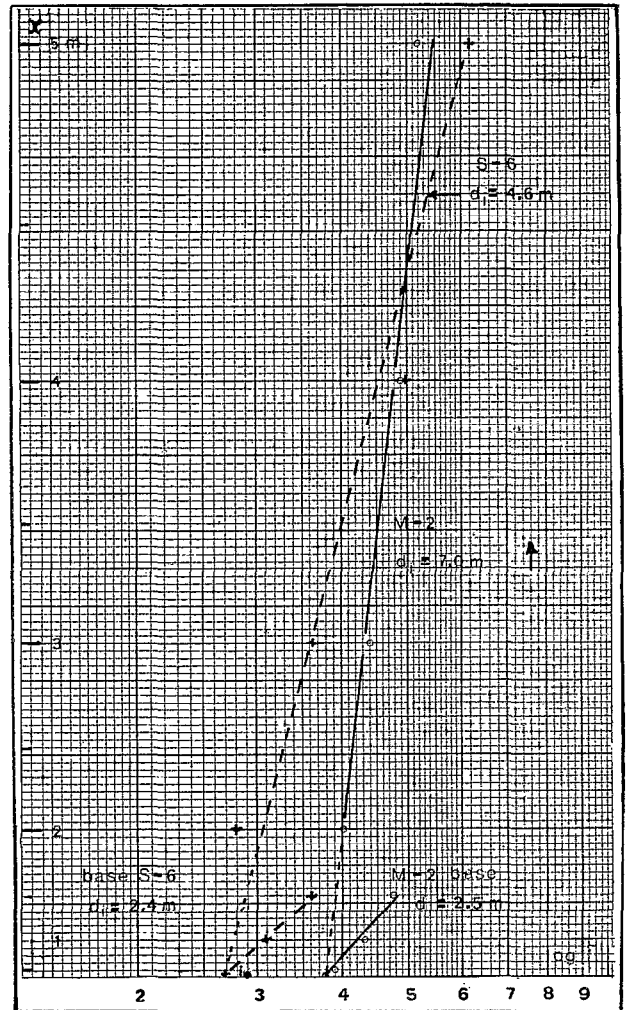


FIG. 6. — Deux exemples de profils présentant une superposition de processus d'altération à paramètres (d_i) différents.

base du profil, l'autre à pente plus faible et correspondant à l'ensemble de la partie supérieure du profil. Les deux droites représentatives s'articulant autour du même point pivot i_0 on peut en conclure qu'un processus météorique postérieur se superpose, à la base, à un processus qui a conduit à la formation de l'ensemble du manteau plus épais. En effet l'homogénéité des teneurs en titane et potassium et une fréquence d'observation de cette disposition tendent à écarter l'hypothèse d'une hétérogénéité basale de la roche originelle. La base du sondage K-37 illustre également ce phénomène (voir fig. 4).

L'étude de l'ensemble des paramètres *i* et *d* relatifs aux 80 profils creusés au Sénégal Oriental fait actuellement l'objet d'une tentative de synthèse. Elle vise à rechercher l'influence des roches originelles, de la situation topographique, des facteurs climatiques, actuels ou antérieurs, sur ces paramètres, et à les relier aux transformations minéralogiques et à l'évolution des teneurs des éléments non intégrés dans le modèle, en particulier les éléments traces. Le présent modèle, élaboré à l'intérieur de limites pétrographiques

(roches dioritiques à basiques) et climatiques (climat tropical semi-humide) strictes n'a vraisemblablement de signification qu'à l'intérieur de ces limites. Cette représentation mathématique pourra être affinée, l'ordre de grandeur des valeurs de *d*, dont une valeur approchée peut être obtenue au moyen de graphiques *teneurs/distances*, restant néanmoins respecté.

Manuscrit reçu visé au S.C.D. le 21 février 1973

DOCUMENTS CITÉS

ALBOUY (Y.), WACKERMANN (J.-M.), 1969. — Application de la prospection électrique par courant continu à l'étude des niveaux d'altération. Rapport Centre Géophys. M'Bour et Centre ORSTOM. Dakar, *multigr.*, 15 p., 7 fig.

ALBOUY (Y.), PION (J.-C.), WACKERMANN (J.-M.), 1970. — Application de la prospection électrique à l'étude des niveaux

d'altération. *Cah. ORSTOM, série Géol.*, vol. II, n° 2, pp. 161-170, 6 fig.

WACKERMANN (J.-M.), 1972. — Corrélations géochimiques entre eaux phréatiques et niveaux aquifères dans les manteaux d'altération du Sénégal Oriental. *Cah. ORSTOM, série Géol.*, vol. IV, n° 1, pp. 75-87, 2 fig.