ANALYSE A LA MICROSONDE ÉLECTRONIQUE DE L'ALTÉRATION D'UN PLAGIOCLASE EN KAOLINITE PAR L'INTERMÉDIAIRE D'UNE PHASE AMORPHE

J. DELVIGNE et H. MARTIN

Section de Géologie du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé

Maitre de Conférences à l'Université de Louvain,
6, St-Michielstraat, 3 000-Louvain, Belgique.

RÉSUMÉ

L'étude d'un profil d'altération de diorite situé en bas de pente dans un paysage accidenté du Sud-Est de la Côte d'Ivoire (climat tropical humide) montre que les plagioclases de la roche s'altèrent en kaolinite par l'intermédiaire d'une phase amorphe.

L'analyse de la phase amorphe, à l'aide de la microsonde électronique, montre que dès le début de l'altération du feldspath le lessivage des bases est total, celui de la silice très important et celui de l'alumine relativement faible.

Dans les gels peu évolués, en début d'altération, la valeur du rapport pondéral SiO₂/Al₂O₃, égale à 2,15 dans le feldspath, tombe à 1,50 environ dans le gel.

Dans les gels plus évolués, où apparaissent les premières cristallisations de kaolinite, la valeur de ce rapport descend à 1,26, valeur très proche de celle de la kaolinite (1,18).

Durant l'évolution de la phase amorphe, les valeurs de ce rapport ne descendent jamais en dessous de la valeur de la kaolinite, et ce n'est que dans les gels très évolués qu'apparaissent les premiers cristaux de kaolinite.

ABSTRACT

The study of a diorite weathering profile located at the bottom of the slope in a hilly area of the Southeastern region of Ivory Coast (wet tropical climate) has shown that the rock plagioclases are weathered into kaolinite by the intermediary of an amorphous phase.

The analysis of the amorphous phase with an electronic microprobe has shown that, from the beginning of feldspar weathering, the leaching of the salts is complete, that of the silica very extensive and that of the alumina relatively small.

In little evolved gels, at the beginning of weathering, the value of the ratio by weight SiO_2/Al_2O_3 equals 2,15 in the feldspar and is lowered to about 1.5 in the gel.

In more evolved gels, where the first kaolinite crystallization appears, the value of this ratio falls to 1.26, which is very close to that of the kaolinite (1.18).

During the evolution of the amorphous phase, the values of this ratio never fall below the kaolinite value. It is only in highly evolved gels that the first kaolinite crystals appear.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchung eines Verwitterungsprofils von Diorit, der in einer reliefreichen Landschaft der süd-östlichen Côte d'Ivoire (feuchtes Tropenklima) am Fusse eines Hanges ansteht, zeigt, dass sich die Plagioklasen des Gesteines über eine amorphe Zwischenphase in Kaolinit umwandeln.

Aus der Analyse der amorphen Phase mit Hilfe der elektronischen Mikrosonde geht hervor, dass schon bei Beginn der Verwitterung des Feldspats die Basen einer völligen, die Kieselsäure einer starken und das Aluminiumoxyd dagegen einer relativ schwachen Auslaugung unterliegen.

In schwach fortgeschrittenen Gelen, bei Beginn der Verwitterung, fällt das Gewichtsverhältnis SiO₂/Al₂O₃ vom ursprünglichen Wert im Feldspat gleich 2,15 auf etwa 1,50 im Gel.

In weiter fortgeschrittenen Gelen, in denen die Kristallisierung des Kaolinits erstmalig einsetzt, sinkt das Verhältnis auf 1.26, einem dem des Kaolinits sehr nahestehenden Wert.

Während der Evolution der amorphen Phase sinken die Werte dieses Quotientes nie tiefer als der des Kaolinits, und nur in sehr fortgeschrittenen Gelen treten die ersten Kaolinitkristalle auf.

РЕЗЮМЕ

Изучение профиля преобразования, состоящего из диорита и находящегося у подошвы склона, в пересеченном ландшафте юго-восточной части Берега Слоновой Кости (тропический, влажный климат), показало что плагиоклазы превращаются в каолинит посредством аморфной фазы.

Анализ аморфной фазы, при помощи электронного микробура, показывает, что с самого начала преобразования полевого шпата, основания выщелачиваются полностью, кремнезём — в весьма значительной мере, а глинозём — сравнительно слабо.

В мало развитых гелях, в начале преобразования, значение весового отношения SiO_2/Al_2O_3 , равное 2,15 в полевом шпате, снижается до примерно 1,50 в гелях.

В более развитых гелях, где появляются первые кристаллизации каолинита, происходит понижение этого отношения до 1,26 — значение весьма близкое к таковому-же у каолинита (1,18).

B течение развития аморфной фазы, значения этого отношения никогда не падагот ниже чем y каолинита, и лишь в очень развитых гелях появляются первые каолинитовые кристаллы.

INTRODUCTION

Sous climat tropical humide, soumis à un processus d'altération du type ferrallitique, les plagioclases des roches basiques se transforment en gibbsite ou en kaolinite. Le sens de l'évolution est déterminé par la qualité du drainage interne des profils d'altération et, en conséquence, par la position topographique de ces profils dans le paysage. Sur les sommets des paysages accidentés, là où le drainage et l'exportation des bases et de la silice sont rapides, le plagioclase des roches basiques s'altère en gibbsite, sans phase intermédiaire discernable au microscope. Dans les parties hautes des pentes, là où un drainage moins efficace ne permet qu'un lessivage plus lent de la silice, la transformation en gibbsite se fait par l'intermédiaire d'une phase amorphe très éphémère, le gel n'apparaissant, sous le microscope polarisant, que sous forme d'un fin liseré ourlant les plages de feldspath encore inaltéré et limité par celui-ci et par les amas de cristaux de gibbsite.

Dans les profils d'altération situés dans les parties basses des paysages l'évolution se fait dans le sens de la formation de kaolinite par l'intermédiaire d'une phase amorphe beaucoup plus importante que dans le cas précédent. Le lessivage des bases et de la silice est plus progressif et la cristallisation des minéraux secondaires au sein des gels n'apparaît que tardivement.

Dans une étude précédente (Delvigne, 1965, 1967), la détermination des séquences d'altération a été établie en se basant sur l'étude minéralogique et pétrographique des échantillons de roches fraîches et altérées. La composition chimique des gels a été déduite des analyses chimiques totales et des bilans géochimiques établis à partir du raisonnement isovolumétrique. Ces bilans ont été effectués sur des échantillons de roches dans lesquels seule la phase feldspathique a subi un début d'altération et dont les minéraux ferro-magnésiens et les minéraux accessoires apparaissent encore inaltérés.

Toutefois, il nous a semblé nécessaire de vérifier et de confirmer certaines des déductions obtenues par cette méthode classique en présentant sous la microsonde électronique quelques stades d'altération des plagioclases.

Le pouvoir de résolution de la microsonde électronique étant de quelques microns, le choix des échantillons à analyser par cette méthode s'est porté sur la séquence d'altération en kaolinite, parce que la phase amorphe rencontrée dans cette séquence est beaucoup plus importante et se présente plus fréquemment en plages plus larges que dans la séquence d'altération en gibbsite.

DESCRIPTION DU PROFIL

Situation

Le profil d'altération AYA 4 est situé sur la rive gauche de la Bia, à hauteur du barrage d'Ayamé II, dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire. La pluviosité moyenne annuelle est actuellement proche de 2 000 mm. La végétation est du type forestier hygrophile (MANGENOT, 1955, MIEGE, 1955), caractéristique des régions où la pluviosité dépasse 1 700 mm. C'est le domaine des sols ferrallitiques (DABIN, LENEUF, RIOU, 1960).

Situé dans un massif dioritique, à une dizaine de mètres de la rivière, ce profil se localise en bas de pente d'une colline d'environ cinquante mètres d'altitude relative; la base de ce profil épais de 3,20 m, est à environ 3 m au-dessus du niveau des basses eaux de la Bia (avant la construction du barrage).

Description macroscopique

- AYA 48 0,50 m Couleur rouge vif, fissuration intense. Structure primaire entièrement disloquée mais encore identifiable malgré les mouvements internes causés par la pénétration des racines et la microfaune du sol.
- AYA 47 1,20 m Altération complète de la roche. Couleur rouge vif. Fissuration intense. Structure primaire disloquée mais identifiable.
- AYA 46 1,40 m Altération avancée des amphiboles. Couleur brun-rouge. Structure primaire conservée.
- AYA 45 1,70 m Début d'altération des amphiboles. Couleur brun-rouge à brun, relativement homogène. Structure primaire conservée.

- AYA 44 2,00 m L'altération gagne le centre des blocs de roche tout en conservant la structure. Couleur brune (feldspaths altérés et fissures) et verte (amphiboles microfissurées).
- AYA 43 2,50 m La roche est largement fissurée et le réseau de fissures se colore par envahissement de solutions ferrugineuses, délimitant ainsi des blocs de roche altérée dont le noyau (AYA 43a) est pulvérulent gris-vert clair et le cortex (AYA 43b) est entièrement bruni.
- AYA 42 3,00 m La roche subit un début d'altération. Sa couleur s'éclaircit et sa dureté diminue.
- AYA 41 3,20 m Diorite à amphibole, mésocrate, à grain fin ; composée de 67 % d'amphibole, 31 % de plagioclase et 2 % de quartz et minéraux opaques. Niveau de la roche saine.

Analyses minéralogiques

Analyses thermiques différentielles

Le pic endothermique principal de la kaolinite se développe progressivement de bas en haut du profil. On voit se dessiner sur la courbe de l'échantillon 43 a, particulièrement riche en gels et dans lequel apparaît le début de la cristallisation de la kaolinite (voir plus loin), un second pic endothermique à 405 °C et un second pic exothermique à 845 °C qui précèdent respectivement les pics normaux de la kaolinite à 560 et 950 °C.

Le pic endothermique de la gibbsite (300 °C) n'apparaît à aucun des niveaux des horizons d'altération. La gibbsite, probablement allochtone, n'apparaît qu'en faible quantité dans les horizons superficiels.

Analyses thermopondérales

TABLEAU I

Analyses thermopondérales : résultats exprimés en % pondéraux

	Kaolinite	Goethite	Gibbsite
AYA 48	62 61	12 12	3 1
AYA 45 AYA 44	40 33	3	
AYA 43b	34 30	_	_
AYA 42	21	_	

Les résultats qui figurent dans le tableau I sont exprimés en pourcentages pondéraux sur un échantillon total, n'ayant subi d'autre traitement qu'un broyage à 100 microns et un chauffage à 105 °C. Les valeurs sont obtenues en multipliant les pertes d'eau en poids (1 g d'échantillon) par un facteur qui est 2,88 pour la gibbsite, 9,90 pour la goethite et 7,16 pour la kaolinite. La gamme des températures explorées pour ces mesures est comprise entre 200 et 300 °C pour la gibbsite, 300 à 400 °C pour la goethite et 400 à 650 °C pour la kaolinite.

Les résultats obtenus par cette méthode vont dans le même sens que les résultats de l'analyse thermique différentielle : apparition de la kaolinite dès les premiers stades d'altération, pénétration des hydroxydes de fer dans les fissures de la roche des horizons moyens et supérieurs, présence d'un peu de gibbsite dans les horizons superficiels.

Analyses par diffraction de rayons X

Tableau II

Analyses minéralogiques par diffraction de rayons X

	Quartz	Plagioclase	Amphibole	Kaolinite	Gibbsite	Goethite	Hématite
AYA 48	37	_	2	23	3	2	8
AYA 47	20	_	14	27	2	2	7
AYA 46	14	6	35	22		2	7
AYA 45	26	3	70	12		—	_
AYA 43b	10	4	> 100	7	2	_	<u> </u>
AYA 43a	15	17	> 100	7	4	_	_
AYA 42	23	19	> 100	7	_		
AYA 41	15	36	> 100	6		_	

Dans ce tableau, les chiffres expriment la longueur de chaque raie principale des minéraux déterminés, longueur au-dessus du fond continu d'émission. Ils ne représentent donc pas les pourcentages de minéraux contenus dans les échantillons. L'unité de longueur est le dixième de pouce correspondant à la graduation des papiers d'enregistrement Philips. Les raies ainsi mesurées sont : Quartz 3,35 Å; Plagioclase 3,19 Å; Amphibole 8,42 Å; Kaolinite 7,15 Å; Gibbsite 4,83 Å; Goethite 4,15 Å; et Hématite 2,68 Å.

La dégradation des plagioclases s'observe dès le premier stade d'altération de la roche tandis que celle de l'amphibole ne commence que dans la partie moyenne du profil. Le quartz varie peu d'un horizon à l'autre.

La proportion de kaolinite varie en fonction inverse de celle des feldspaths. La gœthite et l'hématite n'apparaissent nettement que dans la partie supérieure du profil, là où les amphiboles sont altérées, au moins partiellement. Cependant une partie de ces oxydes et hydroxydes est importée dans le profil par le réseau de fissures et de pédotubules. La gibbsite n'apparaît que sporadiquement au milieu du profil (gibbsite autochtone d'altération ?) et dans les horizons superficiels (gibbsite détritique allochtone ?).

Analyses chimiques

Résultats d'analyses exprimés en pourcentage pondéral

TABLEAU III

	H ₂ O	Ins.	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Total
AYA 47	10,07 6,24 5,86	0,47 0,51 0,55	49,30	23,40 21,80 17,40 14,40 19,10	1,10 1,34 1,10 1,28 1,34	22,10 20,23 19,07 18,10 15,36	0,03 0,03 0,02 0,01 0,01	0,43 1,47 2,47 5,65 6,07	0,72 1,22 2,83 4,79 4,16	0,18 0,18 0,18 0,20 0,28	0,14 0,55 0,80 0,38 1,24	100,97 100,79 99,70 100,52 100,55

Résultats recalculés suivant le raisonnement isovolumétrique (MILLOT et BONIFAS, 1955)

TABLEAU IV

	Densité	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
AYA 47	1,33 1,39 1,63 1,85 2,46	-55,30 -49,70 -33,33 -23,99	-30,94 -28,11 -39,65 -43,31	-21,17 -23,76 -17,76 -11,41	-96,18 -81,65 -71,47 -30,01	-90,62 -78,01 -54,94 -13,39	-65,22 -63,77 -57,97 -46,38	-93,98 -85,70 -82,38 -77,05

Bilans géochimiques

Un quart de la silice est exporté dès les premiers stades de l'altération dans les horizons profonds. Le départ de la silice est dû à peu près uniquement à l'altération des feldspaths parce que, dans ces niveaux, l'altération des autres minéraux est encore insignifiante. Dans la partie supérieure du profil, les 45 % de silice maintenus représentent la silice retenue comme quartz, combinée dans la kaolinite ou maintenue dans quelques amphiboles encore inaltérées. Le lessivage de la silice des horizons inférieurs est beaucoup moins complet que dans les profils situés sur les sommets où d'autres analyses (Delvigne, 1965) montrent une exportation de 80 et 90 % de silice.

Le lessivage de l'alumine est progressif et se fait également aux dépens des plagioclases. Dans le niveau 47, proche de la surface, on remarque une légère augmentation relative de l'alumine correspondant à l'importation de gibbsite détritique colluvionnée du sommet de la colline. Comparé avec les profils situés en amont, le lessivage de l'alumine, contrairement à celui de la silice, est plus important dans les profils de bas de pente : 20 % au lieu de 10 % en moyenne.

Le lessivage des bases est également progressif mais, sauf pour le potassium, il atteint plus de 90 % dans les horizons superficiels. Le départ de la soude, liée principalement à la phase feldspathique, est plus brutal que celui des autres éléments : une partie du calcium et la totalité du magnésium ne pouvant s'éliminer du profil qu'avec la dégradation des amphiboles plus résistantes que les feldspaths.

Le bilan géochimique du fer est positif dans les horizons moyens et supérieurs puisque le pourcentage de lessivage passe de -43 à -28 au sommet des niveaux d'altération. Cette importation de fer se remarque déjà dans la description macroscopique du profil et, ainsi que nous le verrons plus loin, elle apparaît très nettement en plaque mince.

Analyses pétrographiques

Tous les niveaux du profil ont été examinés en plaques minces après imprégnation et consolidation par le Stratyl A 116. Pour ne pas sortir du cadre de l'étude de la phase amorphe, née de la dégradation des feldspaths et conduisant à la formation de kaolinite, seuls les premiers stades d'altération seront décrits.

AYA 41

Le plagioclase est bien maclé et pauvre en minéraux de métamorphisme. Sa composition correspond à celle d'une andésine à 46 % An. On rencontre quelques plages légèrement saussuritisées avec zoïzite et pistachite et, dans ce cas, la composition du feldspath se déplace dans le sens de l'albite, l'angle d'extinction diminuant de 9°.

L'ouralite —actinote très colorée, contient des inclusions de quartz en grains arrondis et à extinction non simultanée ainsi que des agrégats de minerais opaques.

AYA 42

Les minéraux ferro-magnésiens, les quartz et les minéraux opaques sont inaltérés.

Les plagioclases, en revanche, sont partiellement transformés en substances amorphes : ils sont parcourus par des bandes (photo 1), ou des taches de gels généralement concentrées au centre des cristaux (photo 2). Ces taches s'étendent progressivement vers la périphérie du cristal par un certain nombre de digitations irrégulières, rayonnantes et anastomosées, qui isolent des fragments de felspath de plus en plus petits au fur et à mesure que progresse l'altération. Les fragments d'un même grain de feldspath ainsi isolés au sein des gels, conservent une extinction simultanée : ils sont restés emprisonnés dans la masse de leurs produits de décomposition.

Dans ce premier stade d'altération, dans lequel les portions de felspaths inaltérés sont encore abondantes, les gels isotropes sont incolores le plus souvent, parfois légèrement teintés de jaune-brunâtre à proximité des fissures qui parcourent la roche et qui y apportent le fer responsable de la coloration des gels. Aucun minéral secondaire cristallisé n'apparaît au sein de la phase amorphe.

AYA 43

Les amphiboles, les quartz et les minéraux opaques sont inaltérés.

Les plages de gels ont envahi la plus grande partie des feldspaths. Leur progression se faisant à partir du centre, les fragments de feldspath frais ne se rencontrent plus qu'en périphérie, au contact des amphiboles. Certaines plages sont moins altérées et se trouvent à un stade comparable à celui du niveau 42 alors que d'autres, situées le plus souvent à proximité de fissures plus larges, présentent déjà un stade d'altération plus avancé que nous rencontrerons dans le niveau 44. A proximité des fissures, la coloration due à la présence d'un pigment ferrugineux s'accentue.

Dans les plages où les fragments de feldspath sont réduits et peu nombreux, on voit apparaître, le plus souvent au centre de la phase amorphe, des amas de cristallites dont chaque élément ne dépasse pas la taille de un ou deux microns. Comme tels, ils ne sont pas identifiables par les méthodes optiques (photos 3 et 4). Ces amas se présentent en nuages diffus de 200 à 300 microns de longueur.

AYA 44

Le quartz et les minéraux opaques sont inaltérés. Les amphiboles sont au stade de la microfissuration : leurs clivages deviennent très apparents et sont souvent soulignés par des dépôts d'hydroxydes de fer. Les fissures parcourant la roche sont plus nombreuses et plus larges, souvent anastomosées et enduites de dépôts ferrugineux brun rouge.

Les feldspaths sont en voie de disparition, les gels envahissent la totalité des plages « feldspathiques » C'est à ce stade que l'on voit apparaître les premiers cristaux bien formés de kaolinite. Ils se présentent sous forme de petits empilements de feuillets, larges de 5 à 40 microns et de longueur variable atteignant parfois 50 microns. A proximité des plus larges fissures, les cristaux de kaolinite sont sensiblement plus grands et la longueur de leurs feuillets peut atteindre 125 microns (photos 5, 6, 7 et 8).

MÉTHODE D'ÉTUDE A LA MICROSONDE ÉLECTRONIQUE

En vue de l'étude sous la microsonde électronique à rayons X (appareil AMX de la firme ARL) plusieurs pastilles ont été polies. L'une d'entre elles a été choisie et métallisée au carbone ; soumise à la microsonde il a été possible d'en prendre des images par balayage en électrons rétrodiffusés (E) et en rayons X (Si, Al, Ca et Fe). On l'a ensuite étudiée par traversées électroniques et mécaniques et par analyses ponctuelles.

Cette étude a été complétée par l'analyse d'une plaque mince qui a été placée directement sous la sonde sans polissage supplémentaire.

Le travail a été conduit à courant de sonde constant, sous 20 kV de tension, avec des courants échantillon de $3 \cdot 10^{-8}$ A et avec un cristal de LiF pour les dosages de Fe et Ca, de ADP pour les dosages de Si et Al et de KAP pour le dosage du Na.

Les traversées mécaniques ont été effectuées en déplaçant l'échantillon par pas successifs de 6 microns au moyen d'un moteur « step scan ».

Pour les analyses ponctuelles, les éléments Si, Al, Ca, Fe et Na ont été comptés pendant 10 secondes. Les comptages ont été effectués à courant de sonde constant, digitalisé pendant les temps de comptage. Cette méthode particulière de comptage qui permet de tenir compte de l'instabilité du faisceau d'électrons (variations instantanées, dérive du courant de sonde) fera l'objet d'une publication séparée (MARTIN et WAUTIER, en préparation). Aucune correction pour le «temps mort» et la fluorescence n'a été faite. Les valeurs de comptage ont été corrigées pour l'absorption, on a utilisé les coefficients de K.J.F. HEINRICH (1966) et les tables de I. ADLER et J. GOLDSTEIN (1965).

RÉSULTATS ANALYTIQUES

Après examen approfondi au microscope optique des sections polies taillées dans les divers niveaux d'altération du profil, il est apparu que le niveau 43a était celui qui se prêtait le mieux à la microanalyse ponctuelle en raison du grand nombre de plages de feldspath partiellement transformé en gels, la surface occupée par les gels dépassant le plus souvent le pouvoir de résolution du faisceau électronique. La plaque mince correspondant à cette section polie se prête également à l'examen électronique.

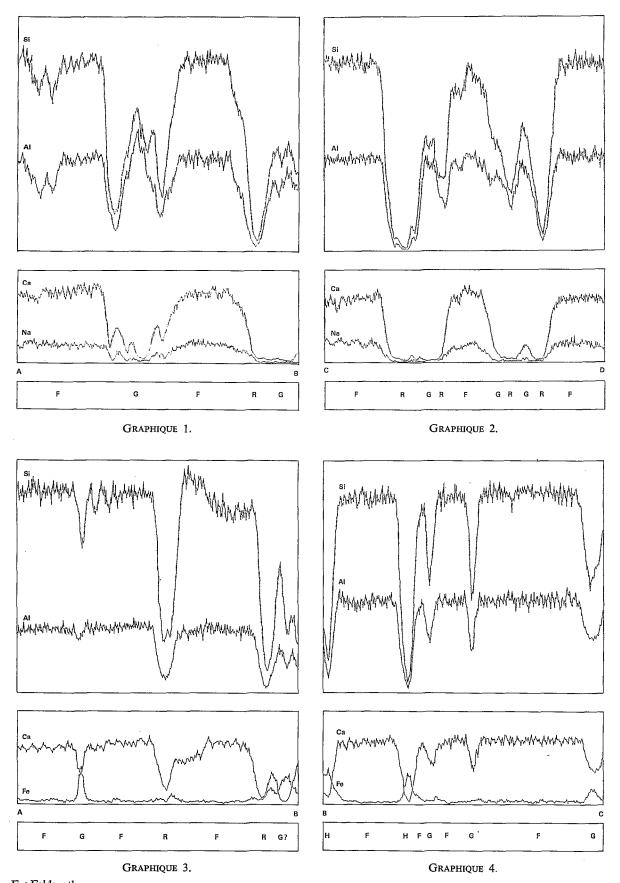
Exploration

Sur les dix plages sélectionnées au microscope optique et testées à la microsonde électronique, quatre ont été retenues pour être analysées complètement et dans le détail (plages 1, 2, 3 et 4) et trois autres pour des analyses partielles (plages 5, 6 et 7).

Plage 1 (photo 9)

Les images obtenues par balayage sur une plage carrée de 200 microns de côtés (photos 10, 11, 12 et 13) montrent la répartition des éléments Si, Al, Ca et Fe. La surface balayée comprend des plages de feldspath frais qui apparaissent nettement sur l'image de la répartition du calcium et des plages de gels, qui, elles, apparaissent plus clairement sur l'image de la répartition du fer. Les images Si et Al sont peu contrastées et ceci est dû au fait que les deux phases minérales en présence contiennent ces deux éléments, le gel étant moins riche que le feldspath en silice. L'aluminium étant en proportions comparables dans les deux phases, l'image de sa répartition est peu démonstrative. Cependant, elle permet, dans une certaine mesure, d'identifier les défauts de la préparation, trous, fentes de retrait, fissures, minéraux accessoires non-alumineux, etc.

Deux profils de la concentration des éléments Si, Al, Ca, Fe, Na recouvrent la plage balayée (graphiques 1 et 2). Ces profils montrent que dans les plages de feldspath, les teneurs en Si et Al sont constantes durant toute la traversée du grain, que les teneurs en Ca et surtout en Na ont tendance à diminuer vers la périphérie de ces grains, principalement en ce qui concerne les petits grains isolés au sein des gels ; dans les plages de gels, on distingue des zones occupées par la résine d'imprégnation et qui correspondent à des fissures de retrait provoquées sans doute lors du séchage de l'échantillon avant son imprégnation (teneurs proches de zéro en Si, Al, Fe et Ca) et des zones occupées par les gels. Celles-ci sont caractérisées par rapport au feldspath par une diminution sensible de la teneur en Si, par une légère diminution de la



F: Feldspath
G: Gel
R: Résine
H: Hornblende
E: Epidote

teneur en Al, par la disparition du calcium et un accroissement en fer. Cette dernière modification avait déjà été observée au microscope optique, le fer présent dans les gels leur conférant une teinte jaunâtre différente de la teinte limpide des feldspaths inaltérés.

Plage 2 (photos 14 et 15)

Les images de la répartition du Ca et du Fe obtenues par balayage dans une plage rectangulaire de 200×375 microns, montrent l'élimination du Ca des digitations amorphes qui parcourent le feldspath. La distribution du fer est moins nette, le fer se concentrant principalement dans les plages amorphes les plus larges (photos 16 et 17).

Les trois profils effectués en travers de cette plage (graphiques 3, 4 et 5) montrent, à part quelques fentes de retrait occupées par la résine, que le Si et le Ca diminuent brusquement au passage des fines digitations amorphes, que Al suit ces variations, mais de façon très amortie, alors que les teneurs en Fe y augmentent régulièrement.

Plage 3 (photo 18)

Deux profils recoupent un grain de felspath altéré en son centre en une plage amorphe se prolongeant vers la périphérie du grain par de nombreuses digitations très fines. Un premier profil (graphique 6) recoupe ces digitations qui alternent avec des fragments de feldspath sain, le second (graphique 7) traverse la plage amorphe dans le sens de sa plus grande longueur et ne rencontre que de rares fragments de feldspath.

Dans les deux cas, on remarque très bien la constance des teneurs en Si, Al et Ca à la traversée des feldspaths. L'allure des courbes est plus irrégulière à la traversée des gels : la composition de ceux-ci n'est pas constante et les variations des courbes à l'aplomb des fines digitations ne reflètent pas les teneurs exactes car la largeur de ces digitations est inférieure au pouvoir de résolution de la microsonde (la teneur enregistrée correspond à la somme des teneurs de la digitation et de ses deux épontes) ; on y remarque encore des grains d'amphibole caractérisée par la présence simultanée des quatre éléments Si, Al, Ca et Fe. En certains endroits, la teneur en Al augmente et dépasse même la teneur initiale du feldspath.

Plage 4 (photo 19)

Plage de feldspath altéré présentant un double faciès.

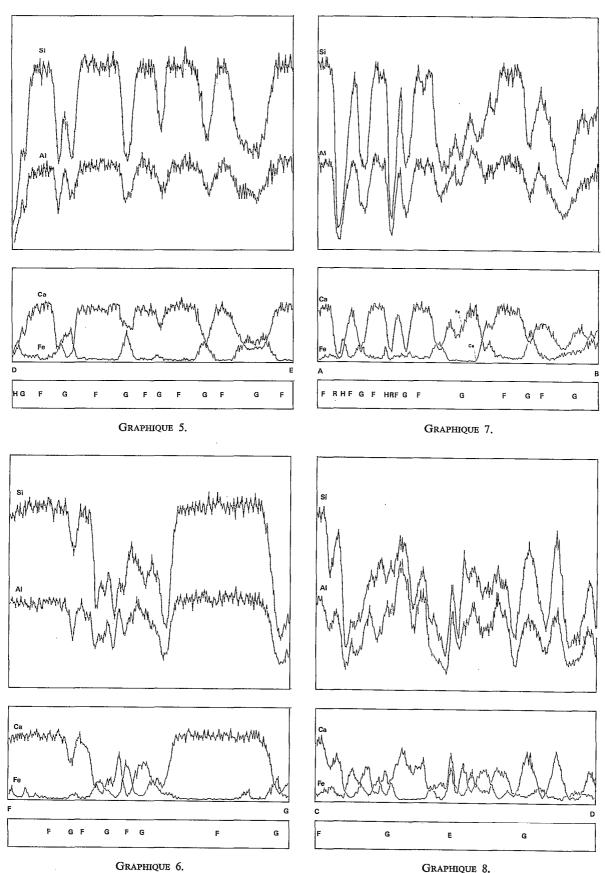
D'une part (secteur a) le grain de feldspath disloqué est parcouru de larges fissures qui, d'après les profils effectués dans ce secteur (non repris sur graphique) ne sont que des fentes de retrait remplies en grande partie par la résine. En effet, si l'image de la répartition du Ca correspond bien à l'image du feldspath, la répartition en fer montre que les gels sont très irrégulièrement répartis dans le réseau de fissures (photos 20 et 21). Les profils y indiquent des teneurs en Si, Al, Ca et Fe proches de zéro sur la plus grande partie de leur traversée.

D'autre part (secteur b), un faciès moins contrasté, où tout le centre du grain est altéré en gels ; l'image de la répartition du fer montre que cet élément se concentre principalement dans la portion centrale de la plage amorphe (photo 22 et 23). Une analyse quantitative de ce gel a été effectuée au point P4 (voir plus loin).

Analyses ponctuelles

Les plagioclases

Quatre plages de felspath, sélectionnées d'après leur grandeur et leur état de fraîcheur, ont été analysées ponctuellement à la microsonde. Les résultats de ces analyses figurent dans le tableau V. Les corrections, rendues nécessaires pour corriger l'effet de matrice provoqué par les éléments les uns par rapport aux autres, ont été effectuées sur la moyenne de ces quatre analyses ainsi que le calcul de la formule de structure.



GRAPHIQUE 8.

La comparaison de cette formule avec celles d'analyses standard (DEER, HOWIE, ZUSSMAN, 1963) montre que cette formule correspond à celle d'un plagioclase à 41 % An. C'est une andésine dont la composition est proche de celle du labrador. Les témoins utilisés pour ces analyses sont l'albite (Si, Al, Na), un verre (Ca) et la biotite(Fe). Le rapport SiO₂/Al₂O₃ de ce feldspath est 2,15.

I ABLEAU	V

		Vale	urs non corr	rigées		Moyenne	Formule de
	P 4	P 5	P 6	P 7	Moyenne	corrigée	structure*
SiO ₂	55,73 27,17 6,70 8,60 0,17	55,91 27,17 6,90 8,48 0,10	55,27 27,39 6,50 8,92 0,20	55,00 27,77 6,30 9,02 0,17	55,48 27,37 6,60 8,75 0,16	57,29 26,63 6,80 8,60 0,16	Si 10,324 Al 5,643 Na 2,378 Ca 1,665 Fe 0,022
Total	98,37	98,56	98,28	98,26	98,36	99,48	X = 16 $Z = 4$ 41 % An

^{*} Formule de structure établie sur la base de 32 (0).

Les gels

Quatre plages de gels sélectionnées d'après leur homogénéité et leurs dimensions ont été analysées ponctuellement à la microsonde. Les résultats de ces analyses figurent dans le tableau VI.

TABLEAU VI

	Valeurs	corrigées		
	P 6	P 5	P 4	P 1
SiO ₂	52,7	44,6	50,2	45,2
Al ₂ O ₃	33,5	28,7	35,5	33,6
Na ₂ O	_	_	_	_
CaO	0,3	0,1	0,2	0,2
Fe ₂ O ₃	4,0	2,7	3,7	3,9
Total	90,5	76,1	89,6	82,9
(H ₂ O)	(9,5)	(23,9)	(10,4)	(17,1)
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ *	1,57	1,55	1,41	1,35

^{*} Ce rapport est le rapport pondéral SiO₂/Al₂O₃.

La différence entre la somme des pourcentages des éléments analysés et 100 % a été attribuée à la présence d'eau, non dosable par cette méthode. Il est évident que cette différence représente, outre l'eau, les éléments non dosés (certainement en proportions très faibles comme l'a montré un spectre complet effectué sur une plage voisine) et la résine qui a pu imprégner les substances amorphes et leurs microfissures indiscernables au microscope.

Le rapport SiO₂/Al₂O₃ présente une valeur sensiblement plus faible dans ces gels (1,35 à 1,57) que dans le feldspath (2,15) mais plus élevé que dans la kaolinite (1,18). Cette valeur est assez variable d'un gel à l'autre. Les témoins utilisés sont le verre (Si, Al, Ca) et la biotite (Fe).

Analyses pas à pas (« Steps Scan »)

Les gels homogènes : première étape de l'altération

La photo 24 montre une large plage de gels optiquement homogènes et l'image de la répartition des éléments Ca et Fe (photos 25 et 26) indiquent une longue zone suivant l'axe de laquelle les teneurs de ces deux éléments restent relativement constantes : nulles pour le Ca, moyennes pour le Fe. C'est suivant cet axe qu'ont été effectuées les analyses pas à pas suivant une progression de 6 en 6 microns. Des profils rapides effectués parallèlement à cet axe confirment l'homogénéité de la plage sur la plus grande partie du parcours : absence de trous et de granules de feldspath.

Les résultats après corrections des effets de matrice et élimination des points correspondant à des irrégularités de surface, sont repris dans le tableau VII. La différence entre le total partiel des éléments dosés et 100 % est attribuée à l'eau, avec toutes les restrictions que cette opération impose (voir plus haut).

Dans le tableau VIII, les pourcentages d'alumine sont combinés à la silice et à l'eau nécessaires à la formation de la kaolinite.

Nulle part n'apparaît un déficit de silice. En moyenne, sur l'ensemble des points, et sur la portion la plus homogène du centre, l'excès de silice dépasse 10 %. En revanche, les teneurs en eau sont parfois insuffisantes pour permettre la cristallisation de kaolinite à partir de toute l'alumine disponible. A ce sujet, il peut être admis que les gels ont pu subir une certaine déshydratation durant le séchage de l'échantillon avant son imprégnation par le stratyl, ainsi qu'en témoignent les nombreuses fentes de retrait colmatées par la résine, déshydratation poursuivie encore durant les opérations ultérieures effectuées sous vide (métallisation de la section polie et examen prolongé sous la microsonde).

Le rapport SiO₂/Al₂O₃ présente des valeurs déjà très éloignées de celles qui correspondent au feldspath (2,15) et situées environ à mi-chemin des valeurs théoriques de la kaolinite (1,18).

7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 SiO₂ 40,2 44,6 52,3 57,8 44,9 47,0 44,6 51,5 50,3 50,2 50,1 50,7 Al₂O₃ 25,9 28,7 26,2 29,1 33,3 32,9 30,9 33,5 30,2 31,9 36,0 36,3 0,6 0,2 0,6 0,8 0,4 0,4 0,5 0,4 0,4 0,2 0,2 CaO 0,4 2,5 4,7 7,9 5,8 70 4,2 4,9 3,3 3,7 Fe₂O₃ 10,8 5,4 4,8 89,6 90,9 69,2 78,2 89,7 95,4 84,8 87,3 80,1 90,9 85,7 87,4 10,4 9,1 (H_2O) 30,8 21,8 10,3 4,6 15,2 12,7 19,9 9,1 14,3 12,6 32 19 20 21 22 24 25 26 28 29 30 31 49,8 50,4 46,9 39,9 49,0 49,6 49,9 SiO₂ 51,8 49,7 52.4 54,4 37,7 35,4 35,8 31.2 34,7 35,4 32,8 34,4 32,6 33,5 21,7 27,7 35,5 Al₂O₃ CaO 0,2 0,2 0,2 0,2 0,8 0,6 0,4 0,2 0,2 0,1 0,2 0,2 3,7 4,7 3,7 Fe₂O₃ 3,7 3,3 4,3 3,7 4,0 4,2 8,4 5,5 4,3 91,3 91,6 88,9 88,9 89,6 Total..... 84,9 91,4 88,6 87,7 85,0 70,2 71,1 (H_2O) 15,1 8,6 11,4 12,3 8,7 15,0 29,8 28,9 11,1 11,1 10,4

TABLEAU VII
Résultats analytiques

D'après les chiffres affichés au tableau VII, on voit que la zone centrale des points 14 à 24, est plus homogène que les portions latérales. Les calculs effectués sur la moyenne de cette zone indiquent que le rapport SiO₂/Al₂O₃ est égal à 1,51 et que la combinaison des éléments nécessaires à la formation de la kaolinite (cf. tableau VIII), si elle épuise toute la quantité d'alumine disponible, laisse encore un excès de 10,2 % de silice. Le déficit en eau est très faible (0,71 %) et pratiquement négligeable si l'on tient compte des remarques et réserves formulées plus haut à ce sujet. Ce déficit s'étend à de plus larges portions de gels après les calculs relatifs à la combinaison des éléments nécessaires à la formation de la gœthite mais ce déficit n'excède cependant pas 4,1 %.

TABLEAU VIII

Calculs des cristallisations potentielles de kaolinite

	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,55	1,55	2,00	1,99	1,35	1,43	1,44	1,54
Al ₂ O ₃	25,9 30,5 9,1 + 9,7 +21,7	28,7 33,8 10,1 +10,8 +11,7	26,2 30,8 9,2 +21,5 + 1,1	29,1 34,2 10,3 +23,6 - 5,7	33,3 39,2 11,7 + 5,7 + 3,5	32,9 38,7 11,6 + 8,3 + 1,1	30,9 36,3 10,9 + 8,3 + 9,0	33,5 38,4 11,8 +13,1 - 2,7
	15	16	17	18	19	20	21	22
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,67	1,57	1,39	1,40	1,60	1,49	1,40	1,54
$\begin{array}{c} \text{Al}_2\text{O}_3 \\ \text{SiO}_2 \\ \text{H}_2\text{O} \\ \neq \text{SiO}_2 \\ \neq \text{H}_2\text{O} \end{array}$	30,2 35,5 10,7 +14 8 + 3,6	31,9 37,5 11,3 +12,7 + 1,3	36,0 42,3 12,7 + 7,8 - 2,3	36,3 42,7 12,8 + 8,0 - 3,7	31,2 36,7 11,0 +13,1 + 4,1	34,7 40,8 12,2 +11,0 - 3,6	35,4 41,6 12,5 + 8,1 - 1,1	32,8 38,6 11,6 +11,8 + 0,7
	24	25	26	28	29	30	31	32
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,52	1,67	1,40	1,84	1,36	1,38	1,40	1,39
$\begin{array}{c} Al_2O_3 \\ SiO_2 \\ H_2O \\ \neq SiO_2 \\ \neq H_2O \end{array}$		32,6 38,3 11,5 +16,1 - 3,1	33,5 39,4 11,8 + 7,5 + 3,2	21,7 25,5 7,7 +14,4 +22,1	27,7 32,6 9,8 + 5,1 +19,1	35,5 41,8 12,5 + 7,2 - 1,4	35,4 41,6 12,5 + 8,0 - 1,4	35,8 42,1 12,6 + 7,8 - 2,2

La cristallisation des gels

La photo 27 montre une plage de gels telle qu'elle apparaît au microscope polarisant : avec la progression de l'altération, les fragments de feldspath sain deviennent rares et les gels s'étendent sur toute la surface primitivement occupée par le feldspath. Au centre de la plage apparaissent les deux étapes ultérieures de l'évolution des matériaux amorphes : la formation d'amas de cristallites secondaires, non identifiables au microscope, et la formation de cristaux de kaolinite. Cette préparation, taillée en plaque mince, a été analysée à la microsonde. Les analyses pas à pas sont groupées en deux séries, une première traversant les portions de gels dans lesquelles apparaissent les cristallites, une seconde traversant les cristaux de kaolinite. Il faut remarquer que, n'étant pas polie, la préparation ne se prête pas à des mesures aussi précises.

Les images de la répartition du Ca et du Fe montrent une surface très homogène (photos 28 - 29). De petits fragments de feldspath (petites taches claires sur l'image de la répartition du Ca et taches noires sur celle de la répartition du Fe) sont groupés à la périphérie du gel près des amphiboles (taches claires sur les images des répartitions du Ca et du Fe). Toute la surface occupée par le matériel amorphe présente une grande uniformité du Fe et rien ne laisse supposer la présence des cristallites et des cristaux de kaolinite. Les teneurs en Ca sont très faibles sur toute l'étendue des gels.

Plages de gels et cristallites : deuxième étape de l'altération

Des profils rapides des teneurs en Al, Si et Fe effectués parallèlement à l'axe parcouru par les analyses pas à pas montrent que, à part quelques imperfections de surface facilement repérées, les teneurs de ces trois éléments sont relativement constantes sur tout le parcours et que le passage au travers des amas de cristallites ne modifie en rien le tracé de la courbe.

L'axe suivi par les analyses pas à pas recoupe deux fois des amas de cristallites, le reste du parcours étant situé dans les gels optiquement homogènes. La progression est régulièrement de 6 microns sur tout le tracé et 40 analyses ponctuelles ont été effectuées sur une distance de 234 microns.

Les résultats analytiques, après correction des effets de matrice et élimination des points correspondant à des irrégularités de surface, ces irrégularités détectées par les profils parallèles précédents, figurent dans le tableau IX. La différence entre le total des teneurs dosées et 100 % est attribuée à l'eau comme dans le tableau VII.

TABLEAU IX
Résultats analytiques

	6	8	9	10	11	12	13	16	17	18
SiO ₂	43,1	45,1	47,4	44,9	48,2	46,2	42,5	48,1	48,7	44,6
	37,4	38,9	36,2	37,5	34,3	38,8	35,8	35,4	33,5	36,8
	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	1,8	2,0	2,0	2,0	2,1	2,2	2,1	2,3	2,8	2,8
Total	82,4	86,1	85,7	84,7	84,7	87,3	80,5	85,9	85,1	84,3
	17,6	13,9	14,3	15,3	15,3	12,7	19,5	14,1	14,9	15,7
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
SiO ₂	48,7 36,7 0,1 2,6 88,1 11,9	50,9 34,5 0,1 2,6 88,1 11,9	48,5 37,3 0,1 2,9 88,8 11,2	44,1 40,3 0,1 2,0 86,5 13,5	44,3 38,6 0,1 2,5 85,5 14,5	48,7 35,8 0,2 2,5 87,2 12,8	46,2 35,8 0,2 2,5 84,7 15,3	48,6 38,4 0,1 2,5 	47,6 34,6 0,1 2,6 	42,1 37,3 0,2 2,4 82,0 18,0
	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39
SiO ₂	47,3	47,4	44,6	45,3	47,8	49,0	47,4	46,9	45,5	42,1
	38,5	35,9	39,5	37,0	38,4	36,3	35,9	36,4	37,2	37,2
	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,3	0,6
	2,4	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,3	2,0	2,0	1,7
Total(H ₂ O)	88,4	85,9	86,8	85,0	88,9	88,3	85,7	85,4	85,0	81,6
	11,6	14,1	13 2	15,0	11,1	11,7	14,3	14,6	15,0	18,4

Dans le tableau X, les pourcentages d'Al₂O₃ sont combinés à la silice et à l'eau nécessaires à la formation de la kaolinite.

Dans sept cas sur trente apparaît un léger déficit de silice, sans que ce déficit puisse être relié à la présence des cristallites. Le déficit le plus important n'excède pas 3,3 % et la moyenne établie sur l'ensemble des points, après soustraction de la silice nécessaire à la formation de la kaolinite, montre encore un excédent de silice de 3 %.

TABLEAU X

Calculs des cristallisations potentielles de kaolinite

	6	8	9	10	11	12	13	16	17	18
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,15	1,16	1,31	1,19	1,41	1,19	1,19	1,36	1,45	1,21
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	37,4 44,0 13,2 - 0,9 + 4,4	38,9 45,8 13,7 - 0,7 + 0,2	36,2 42,6 12,8 + 4,8 + 1,5	37,5 44,1 13,2 + 0,7 + 2,1	34,3 40,4 12,1 + 7,8 + 3,2	38,8 45,6 13,7 + 0,6 - 1,0	35,8 42,1 12,6 + 0,4 + 6,9	35,4 41,6 12,5 + 6,5 + 1,6	33,5 39,4 13,9 + 9,3 + 1,0	36,8 43,3 13,0 + 1,3 + 2,7
	19	20	23	22	23	24	25	26	27	28
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,33	1,48	1,30	1,09	1,15	1,36	1,29	1,27	1,38	1,13
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	36,7 43,2 13,0 + 5,5 - 1,1	34,5 40,6 12,2 +10,3 - 0,3	37,3 43,9 13,2 + 4,6 + 2,0	40,3 47,4 14,2 - 3,3 - 0,7	38,6 45,4 13,6 - 1,1 + 0,9	35,8 42,1 12,6 + 6,6 + 0,2	35,8 42,1 12,6 + 4,1 + 2,7	38,4 45,2 13,6 + 3,4 - 3,2	34,6 40,7 12,2 + 6,9 + 2,9	37,3 43,9 13,2 - 1,8 + 4,8
	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,23	1,32	1,13	1,22	1,24	1,35	1,32	1,29	1,22	1,13
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	38,5 45,9 13,6 + 2,0 - 2,0	35,9 42,2 12,7 + 5,2 + 1,4	39,5 46,5 13,9 - 1,9 - 0,7	37,0 43,5 13,1 + 1,8 + 1,9	38,4 45,2 13,6 + 2,6 - 2,5	36,3 42,7 12,8 + 6,3 - 1,1	35,9 42,2 12,7 + 5,2 + 1,6	36,4 42,8 12,8 + 4,1 + 1,8	37,2 43,8 13,1 + 1,7 + 1,9	37,2 43,8 13,1 - 1,7 + 5,3

Le déficit en eau du même ordre que celui de la silice (maximum 3,2 %) apparaît dans 9 cas sur 30 et la position des points déficitaires ne peut pas être reliée à la localisation des cristallites. La moyenne calculée après soustraction de l'eau nécessaire à la kaolinite donne un exécent d'eau de 1,2 %.

Les rapports SiO₂/Al₂O₃ sont souvent très proches du rapport théorique de la kaolinite qui égale 1,18. En admettant une variation normale de 0,05 autour de cette valeur, 13 points sur 30 tombent dans cette marge de variations. En élargissant encore cette marge, 16 points sur 30 figurent entre les limites 1,08 et 1,28.

Plages de gels et kaolinite : troisième étape de l'altération

Les teneurs en Al, Si et Fe ont été profilées suivant plusieurs axes parallèles au tracé choisi pour l'analyse pas à pas. De ces profils il ressort que les teneurs en Si et Al sont relativement constantes sur

tout le parcours, que l'on traverse ou non des cristaux de kaolinite. Par contre, les teneurs en Fe, estimées d'après le nombre de coups enregistrés, varient sensiblement d'un point à un autre et ces valeurs sont un peu plus élevées au passage sur les cristaux de kaolinite. Sur l'image de la répartition du Fe (photo 29) on remarque en effet une petite zone plus claire, aux limites imprécises, à l'endroit qui correspond sur la photo de la plaque mince, à un gros cristal de kaolinite.

Les résultats analytiques corrigés figurent dans le tableau XI et comme dans les tableaux précédents la différence des totaux est attribuée à l'eau le calcul de la composition virtuelle en kaolinite figure dans le tableau XII.

Des 25 points équidistants de 6 microns sur un parcours de 144 microns, 22 ont été retenus. Dans 4 points apparaît un déficit de silice qui n'excède pas 3,5 % et un déficit en eau atteignant parfois 7 %. Cependant la moyenne effectuée sur l'ensemble des points fait apparaître un excès de silice de 3 %, comme dans la plage où se forment les cristallites, et un excès d'eau de 2,7 % soit un peu plus que dans les cristallites.

TABLEAU XI
Résultats analytiques

	2	3	5	6	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	44,1	49,7	45,6	41,7	42,4	41,4	46,6	46,7	45,8	45,6	48,6
	39,7	40,1	41,6	33,5	33,4	31,5	34,2	33,5	35,7	35,2	35,1
	0,2	0,1	0,1	0,2	0,8	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
	2,5	2,4	2,1	2,7	3,7	5,5	3,4	3,9	4,1	3,4	3,5
Total	86,5 13,5	92,3	89,4 10,6	78,1 21,9	80,3 19,7	78,8 21,2	84,4 15,6	84,2 15,8	85,7 14,3	84,3 15,7	87,3 12,7
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SiO ₂	39,4	42,6	44,4	49,8	48,4	47,1	44,5	45,6	43,9	45,2	48,5
	36,5	35,0	35,7	40,4	34,9	32,3	38,2	37,2	36,0	35,2	36,6
	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
	2,9	3,2	3,0	1,9	3,1	3,0	2,9	2,9	3,1	2,4	1,8
Total(H ₂ O)	79,0	81,0	83,2	92,2	86,5	82,6	85,7	85,8	83,1	83,0	87,0
	21,0	19,0	16,8	7,8	13,5	17,4	14,3	14,2	16,9	17,0	13,0

La valeur du rapport pondéral SiO_2/Al_2O_3 est également très proche de celle de la kaolinite : 1,26 au lieu de 1,18. En admettant 0,05 de marge en dessous et au-dessus de cette valeur théorique, on retrouve 5 points sur 22 s'inscrivant entre ces limites et 14 points si on admet des limites élargies à \pm 0,10. La valeur moyenne du rapport SiO_2/Al_2O_3 est, dans les plages à kaolinite comme dans les plages à cristallites, égale à 1,26.

DISCUSSION

Le raisonnement isovolumétrique est difficilement applicable au cas de l'altération du feldspath, la densité des gels n'étant pas connue et sa mesure directe impossible à cause des dimensions trop petites des plages de gels, à cause de leur mélange avec des fragments de feldspaths frais et de cristallisations

secondaires et à cause de la présence possible de microfissures. D'autre part, le séchage préalable des échantillons modifie la teneur en eau des gels et par là leur densité.

TABLEAU XII

Calculs des cristallisations potentielles de kaolinite

	2	3	5	6	8	9	10	11
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,11	1,24	1,10	1,24	1,27	1,31	1,36	1,39
	39,7 46,7 14,0 -2,6 -0,5	40,1 47,2 14,2 +2,5 -7,1	41,6 48,9 14,7 -3,3 -4,1	33,5 39,4 11,8 +2,3 +10,1	33,4 39,3 11,8 +3,1 +7,9	31,5 37,1 11,1 +4,3 +10,1	34,2 40,2 12,1 +6,4 +3,5	33,5 39,4 11,8 +7,3 +4,0
	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,28	1,30	1,38	1,10	1,22	1,24	1,23	1,39
	35,7 42,0 12,6 +3,8 +1,7	35,2 41,4 12,4 +4,2 +3,3	35,1 41,3 12,4 +7,3 +0,3	36,5 42,9 12,9 -3,5 +8,1	35,0 41,2 12,3 +1,4 +6,7	35,7 42,0 12,6 +2,2 +4,2	40,4 47,5 14,3 +2,3 -6,5	34,9 41,1 12,3 +7,3 +1,2
	20	21	22	23	24	25		
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,46	1,16	1,23	1,22	1,28	1,33		
$\begin{array}{c} Al_2O_3 \\ SiO_2 \\ H_2O \\ \neq SiO_2 \\ \neq H_2O \end{array}$	32,3 38,0 11,4 +9,1 +6,0	38,2 44,9 13,5 -0,4 +0,8	37,2 43,8 13,1 +1,8 +1,1	36,0 42,4 12,7 +1,5 +4,2	35,2 41,4 12,4 +3,8 +4,6	36,6 43,1 12,9 +5,4 +0,1		

Les profils de teneurs des éléments effectués dans les fragments de feldspath et dans les plages de gels voisines indiquent, en se basant sur l'allure des courbes d'enregistrement, un appauvrissement en alumine dans les plages de gels comparativement aux plages de feldspath. Cet appauvrissement est cependant moindre que celui qu'on enregistre pour la silice et pour les bases. Le raisonnement isovolumétrique établi d'après les résultats d'analyses chimiques totales des roches fraîches et altérées (voir tableaux 3 et 4) montre que le lessivage de l'alumine atteint 11,5 % dans le niveau 43 b. Le lessivage de l'alumine doit être attribué à l'altération du plagioclase puisque, à ce niveau d'altération, les autres phases minérales sont encore inaltérées.

Un comptage par points des proportions des divers minéraux dans le niveau 43 a été effectué au microscope optique. Ce comptage donne : amphibole 66,6 %, plagioclase 14,7 %, gels 15,9 %, minéraux opaques 1,4 %, quartz 0,3 %, fissures ouvertes 1,1 %. La proportion initiale de feldspath peut donc être estimée à 30,6 % en volume.

Les densités de ces minéraux sont : amphibole 3,10, feldspath 2,66, minéraux opaques 3,7, quartz 2,65, trous et fissures 0,0. La densité moyenne d'une roche de cette composition minéralogique est, dans les niveaux non altérés, de 2,94.

TABLEAU XIII

Compositions pondérales comparées des feldspaths et des gels

	F	Go	Gp	Gc	Gk	
	Р	SS	Р	SS	SS	
SiO ₂	57,29 26,63	50,7 34,7	49,4 34,2	46,4 36,9	45,3 36,0	
Na ₂ O CaO Fe ₂ O ₃ (H ₂ O)	6,80 8,60 0,16	0,4 5,1 9,1	0,2 3,9 12,3	0,1 2,4 14,2	0,2 3,1 15,4	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	2,15	1,59	1,44	1,26	1,26	

F = Feldspath analysé au tableau V (moyenne de quatre analyses).

Go = Gel, moyenne des analyses du tableau VIII.

Gp = Gel, moyenne des gels P 6, P 4 et P 1 (tableau VI).

Gc = Gel avec cristallites, moyenne du tableau IX.

Gk = Gel avec kaolinite, moyenne du tableau XI.

P = Analyse chimique ponctuelle.

SS = Analyse chimique par « steps scan ».

Les proportions de feldspath et de gels étant, en volume, pratiquement égales, la perte totale de 11.5% d'alumine est due au lessivage d'une quantité double lors de la formation du gel, soit 22% environ. Le lessivage de la silice (-24%) dans la roche totale passe approximativement à -48% dans le gel. La densité du feldspath étant égale à 2.66, 1 cm^3 de feldspath contient 1.52 g de 8 siO_2 et 8 cm_2 de $8 \text{$

TABLEAU XIV

Calculs de densités

	F	Go	Gp	Gc	Gk	Go	Gp	Gc	Gk	Go	Gp	Gc	Gk
ļ	d = 2,66	d = 1,6				d = 2,0			d = 2,1				
SiO ₂	152,39 70,84 22,88 0,43	81,1 55,5 0,6 8,2 14,6	79,0 54,7 0,3 6,2 19,7	74,2 59,0 0,2 3,8 22,7	72,5 57,6 0,3 5,0 24,6	101,4 69,4 0,8 10,2 18,2	98,8 68,4 0,4 7 8 24,6	92,8 73,8 0,2 4,8 28,4	90,6 72,0 0,4 6,2 30,8	106,5 72,9 0,8 10,7 19,1	103,7 71,8 0,4 8,2 25,8	97,4 77,5 0,2 5,0 29,8	95,1 75,6 0,4 6,5 32,3

En basant le raisonnement, non plus sur la conservation des volumes, mais sur celle de l'alumine, la densité du gel serait estimée à 2,05 environ (un gel de densité intermédiaire entre 2,0 et 2,1 (voir tableau XIV) dans lequel les teneurs en SiO₂ et Al₂O₃ sont respectivement de 98,8 - 68,4 et 103,7 - 71,8).

Le calcul basé sur le raisonnement isovolumétrique et l'allure des courbes des profils de teneurs indiquent que les proportions d'alumine ne sont pas constantes, témoignant de la possibilité pour l'alumine d'être partiellement lessivée. En conséquence, le raisonnement iso-alumine est à écarter dans l'étude de cette séquence d'altération et la densité 1,6 des gels est sans doute la plus proche de la réalité.

L'estimation de la densité des gels ne peut être qu'assez grossière car dans un même niveau d'altération, les plages de gels ne sont pas toutes parvenues à un même degré d'évolution : certaines n'en sont qu'au début de leur formation alors que d'autres contiennent déjà des cristallites secondaires. Les calculs précédents ont été établis en considérant que tout le gel est arrivé à un stade d'évolution moyen avec un rapport SiO₂/Al₂O₃ intermédiaire. Le gel Gp nous a semblé le plus indiqué et c'est sur sa composition chimique qu'ont été effectués les calculs et estimée sa densité.

Un centimètre cube de plagioclase (dont la composition chimique correspondrait à celle qui a été déterminée dans l'échantillon analysé) de densité égale à 2,66 contiendrait 1,52 g de SiO₂ et 0,71 g de Al₂O₃. Cette quantité d'alumine combinée à 0,83 g de silice et à 0,25 g d'eau donnerait la quantité de kaolinite qui pourrait être formée à partir de 1 cm³ de feldspath, soit 1,79 g de kaolinite. La quantité réellement formée est moindre dans le cas que nous étudions puisque, dès le départ, près de 20 % d'alumine sont lessivés.

La densité de kaolinite étant égale à 2,61, le volume occupé par 1,79 g de kaolinite ne représente que 68,7 % du volume initialement occupé par le feldspath : 31,3 % du volume pourrait être occupé par d'autres minéraux secondaires sans créer de foisonnement.

C'est effectivement ce que l'on observe dans les horizons moyens du profil où les vides ménagés entre les cristaux de kaolinite se remplissent progressivement de dépôts ferrugineux rouges venant de l'éluviation des horizons supérieurs et des profils situés en amont.

La roche analysée contenant 30,6 % de plagioclase, les vides créés par la transformation du feldspath en kaolinite occuperaient un volume de 10 %. Dans le gel Gp on dose 3,9 % de Fe₂O₃, ce qui se traduit par 4,3 % de goethite. La goethite ayant une densité de 4,3, ce minéral occupe 1 % du volume du gel. Après la formation de kaolinite, il pourrait en occuper trente fois plus.

Une roche de ce type, complètement altérée suivant un processus ferrallitique, située sur le parcours de solutions ferrugineuses et évoluant ainsi suivant un processus conduisant au cuirassement, contiendrait en volume plus de 75 % de goethite. En effet, les minéraux ferro-magnésiens, sous des conditions ferrallitiques, ne forment que des hydroxydes de fer. Comme ils occupent, en volume plus de 66 % de la roche et que le volume des vides engendré par la dégradation des plagioclases est de 10 %, on retrouverait dans cette cuirasse 76 % de goethite, 1,5 % de minéraux opaques, 0,3 % de quartz et 22 % seulement de kaolinite. La structure de la roche initiale ne serait sans doute plus reconnaissable ; pourtant toutes les transformations y seraient iso-volumétriques.

CONCLUSIONS

Les variations progressives et continues de la composition chimique et du rapport pondéral SiO₂/-Al₂O₃ des gels en suivant la séquence d'altération montrent que l'évolution, se fait dans le sens de la formation de kaolinite.

En effet, durant la première étape de l'altération du feldspath, la perte de silice, calculée d'après les résultats de l'analyse chimique pondérale est relativement importante et augmente progressivement jusqu'à l'apparition des premiers cristallites et des cristaux de kaolinite. Les bases sont rapidement éliminées dès la première étape de la dégradation du feldspath, principalement le sodium dont la teneur tombe en dessous de la limite de détection. Le départ de la silice et des bases se traduit par un enrichissement relatif en alumine.

Le rapport pondéral SiO₂/Al₂O₃ présente des valeurs décroissant rapidement au début de l'altération : la valeur du rapport passe de 2,15 dans le feldspath à 1,59 et 1,44 dans les gels peu évolués ; dans les gels plus évolués où apparaissent les premières cristallisations de kaolinite, la valeur de ce rapport tombe à 1,26, alors qu'elle est de 1,18 dans la kaolinite. Les plages analysées dans les gels évolués n'étant pas entièrement cristallisées, les valeurs calculées correspondent à celles d'un mélange de gels évolués et de kaolinite.

La composition et la nature des cristallites n'ont pu être déterminées. Les analyses effectuées pas à pas à travers des plages de gels qui les contiennent, n'ont pas montré de différences significatives entre les résultats obtenus sur le gel d'une part et sur les cristallites d'autre part. Les deux phases minérales semblent être de compositions voisines, seules leurs structures sont différentes, l'une amorphe, l'autre cristallisée.

Il en est de même pour les cristaux de kaolinite, les analyses ponctuelles ne révélant pas de différence de composition entre les gels et la kaolinite. Il semble donc vraisemblable d'assimiler les cristallites à de petits cristaux de kaolinite encore mal formés et trop petits pour en distinguer clairement l'habitus par les méthodes optiques. Durant les dernières étapes de l'évolution du processus d'altération du feld-spath, le gel atteindrait une composition chimique très voisine de celle de la kaolinite et ce n'est qu'à ce stade que serait rendue possible la cristallisation des éléments contenus dans le gel. On assiste donc à la genèse de minéraux argileux par soustraction (MILLOT, 1964, p. 409). En outre, les études sur le milieu naturel semblent confirmer les résultats expérimentaux obtenus en laboratoire par d'autres auteurs (Cloos, Herbillon, Echeverria, 1968) (Cloos, Léonard, Moreau, Herbillon, Fripiat, 1969).

On n'observe de cristallisations que dans les plages de gels dans lesquelles les restes de feldspath ont pratiquement disparu. Le transit des éléments dissous du feldspath (bases, silice) vers une fissure d'évacuation se faisant normalement par migration à travers le gel semble ainsi retarder l'évolution des gels et leur cristallisation. Une fois le feldspath entièrement altéré, la diffusion des bases cesse, la composition du gel se modifie progressivement jusqu'à atteindre un certain état d'équilibre correspondant à la composition de la kaolinite et permettre la cristallisation des amas de cristallites d'abord, des plus grands feuillets de kaolinite ensuite.

BIBLIOGRAPHIE

- ADLER (I.), GOLDSTEIN (J.), 1965. Absorption tables for electron-probe micro-analysis. NASA Technical Note T.N. D-2984, National Aeronautics and Space Administration, Washington D.C.
- Cloos (P.), Herbillon (A.), Echeverria (J.), 1968. Allophane-like synthetic silico-aluminas. Phosphate adsorption and availability. 9th Intern. Congress of Soil Science Trans., vol II, paper 76, pp. 533-743.
- Cloos (P.), Léonard (A.), Moreau (J.P.), Herbillon (A.), Fripiat (J.J.,) 1969. Structural organization in amorphous silico-aluminas. Clays and clay Minerals, vol 17, pp. 279-287.
- Dabin (B.), Leneuf (N.), Riou (G.), 1960. Carte pédologique de la République de Côte d'Ivoire, à 1/2 000 000, notice explicative, Secrétariat d'état à l'agriculture. Direction des sols, Abidjan, 32 p., cartes dépl., h.t., ORSTOM, Adiopodoumé (C.I.).
- DEER (W.A.), HOWIE (R.A.), ZUSSMAN (J.), 1966. An Introduction to the rock-forming minerals. London, Longmans.
- Delvigne (J.), 1965. Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. Mém. ORSTOM, nº 13, Paris, Dunod, 177 p.
- Delvigne (J.), 1967. Bilans géochimiques de l'altération des roches basiques en Côte d'Ivoire ferrallitique. Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn., vol. 9, 4, pp. 311-320.
- Heinrich (K.), 1966. X-ray absorption uncertainty. In «The electron microprobe» (McKinley T.D., Heinrich K.F.J., Wittry D.B.), John Wiley and Sons, Inc. New York, pp. 296-377.
- MANGENOT (G.), 1955. Etudes sur les forêts des plaines et plateaux de la Côte d'Ivoire. IFAN Etudes éburnéennes, IV, pp. 5-61.

MIEGE (J.), 1955. — Les savanes et forêts claires de Côte d'Ivoire. IFAN, Etudes éburnéennes, IV, pp. 62-81.

MILLOT (G.), BONIFAS (M.), 1955. — Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latéritisation et bauxitisation. Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lor., 12, 2, pp. 3-15.

MILLOT (G.), 1964. — Géologie des argiles. Masson, Paris, 499 p.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Monsieur le Professeur P. de Béthune de l'Institut de Géologie de l'Université de Louvain de l'intérêt qu'il a manifesté et du soin qu'il a apporté dans la préparation du programme de recherches, dans le déroulement des analyses à la micro-sonde et dans la discussion des résultats. Les auteurs remercient également Monsieur le Professeur G. Millot, Directeur de l'Institut de Géologie de l'Université de Strasbourg, du soin et de l'attention avec lesquels il a bien voulu lire et corriger le manuscrit de cette note. Ils sont également reconnaissants à Monsieur Herbillon, chargé de cours à l'Université de Louvain qui a bien voulu discuter leurs problèmes. Leurs remerciements vont encore à Monsieur Laduron, assistant, et à Monsieur Wautier, Ingénieur électronicien, à l'Université de Louvain, pour les nombreux calculs de correction qu'ils ont effectués et pour toute l'aide matérielle qu'ils ont apportée à la réalisation de ce travail.



Plaque mince, nicols croisés, champ photographié: 0,95 mm × 1,43 mm.

Feldspath à un stade d'altération peu avancé. Remarquez les bandes de gels qui le traversent et qui sont anastomosées entre elles.

Photo 2

Plaque mince, nicols croisés, champ photographié: 0,95 mm × 1,43 mm.

Plagioclases dont le centre est altéré en gels. Remarquez les digitations amorphes qui gagnent la périphérie des cristaux de feldspath.

Photo 3

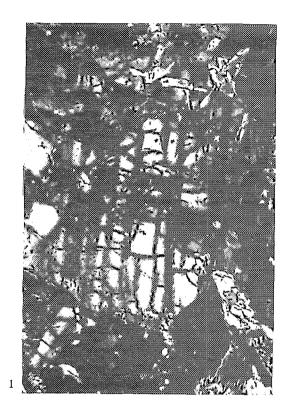
Plaque mince, nicols croisés, champ photographié: 0,95 mm × 1,43 mm.

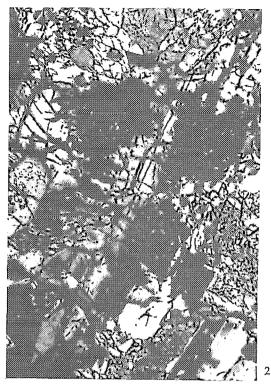
Plage de feldspath largement décomposé en gels. Remarquez les petits fragments de feldspath en bordure de la plage et l'apparition des nuages de cristallites près du centre de la zone amorphe.

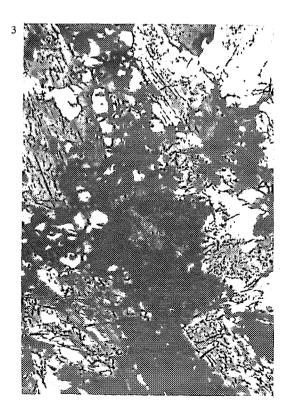
Photo 4

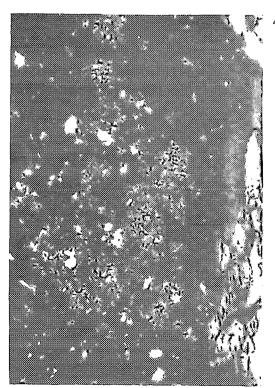
Plaque mince, nicols croisés, champ photographié: 0,38 mm × 0,56 mm.

Détail à plus fort grossissement d'un amas de cristallites au sein d'une plage amorphe. Ces cristallites, aux formes imprécises, n'ont que quelques microns de diamètre.









Plaque mince, nicols croisés, champ photographié: 0,29 mm × 0,44 mm.

Plage de feldspath entièrement transformé en gels au sein desquels apparaissent des amas de cristallites et des cristaux plus gros de kaolinite en début de formation. Les plages claires le long des bords de la photo sont des amphiboles. C'est précisément en suivant une ligne traversant ces cristaux et amas qu'ont été effectuées les analyses pas à pas des tableaux 9 et 11.

Photo 6

Plaque mince, nicols croisés, champ photographié: 0,29 mm × 0,44 mm.

Détail de cristaux de kaolinite mieux développés au milieu d'une plage amorphe.

Photo 7

Plaque mince, nicols croisés, champ photographié: 0,95 mm × 1,43 mm.

Stade final de l'évolution des gels : les cristaux de kaolinite, plus nombreux, envahissent toute la plage de gels ménageant entre eux des espaces vides qui, plus haut dans le profil, seront remplies de dépôts ferrugineux allochtones.

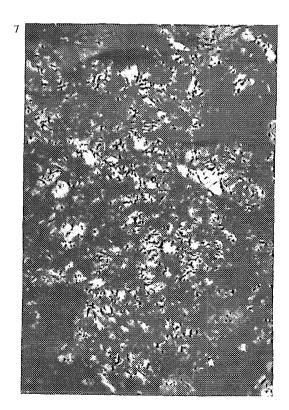
Photo 8

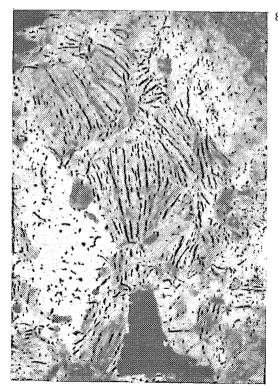
Plaque mince, nicols parallèles, champ photographié: 0,29 mm × 0,44 mm.

Gros cristaux de kaolinite bien développés groupés à proximité d'une fissure parcourant la roche altérée.









Section polie, champ photographié : environ 0,50 mm \times 0,75 mm.

Plagioclase (surface polie) altéré en gels (surfaces grenues). Des profils de répartition des éléments Si, Al, Ca, Fe et Na ont été effectués suivant les tracés AB (graphique 1) et CD (graphique 2). Le carré inscrit à l'intérieur de la photo, de 200 microns de côté environ, est la surface balayée donnant les quatre photos suivantes. Au point P 1 a été effectuée une analyse ponctuelle de gel.

Photo 10

Répartition du silicium : la présence de silicium dans la phase feldspathique et dans la phase amorphe rend cette photo peu contrastée.

Photo 11

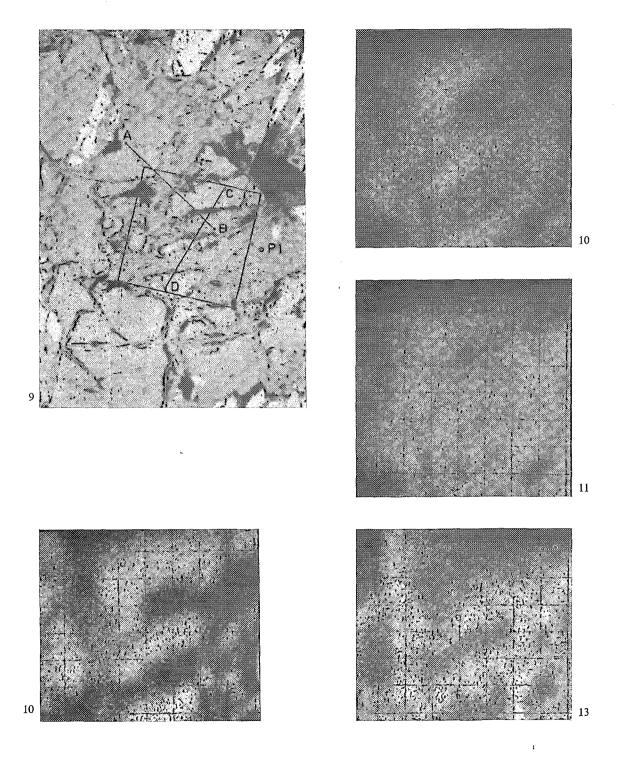
Répartition de l'aluminium : les proportions d'aluminium dans les deux phases minérales sont peu différentes : l'image est très peu contrastée.

Photo 12

Répartition du calcium : le feldspath inaltéré a conservé le calcium, les plages feldspathiques apparaissent claires ; les gels ne contiennent plus de calcium, ils apparaissent noirs.

Photo 13

Répartition du fer : le feldspath inaltéré ne contient pas de fer, il apparaît noir ; un peu de fer a diffusé dans le gel lors de la décomposition du feldspath : les gels apparaissent clairs.



Section polie, grandeur du champ : 0,95 mm × 1,43 mm.

Un plagioclase de forme allongée est altéré en son centre en gels disposés en « arête de poisson ». Le rectangle inscrit sur la photo correspond à la surface couverte par le balayage et reproduite sur les photos 16 et 17. Des profils de répartition des éléments Si, Al, Ca et Fe ont été effectués suivant les tracés AB et BC (graphiques 3 et 4), DE (graphique 5) et FG (graphique 6).

Photo 15

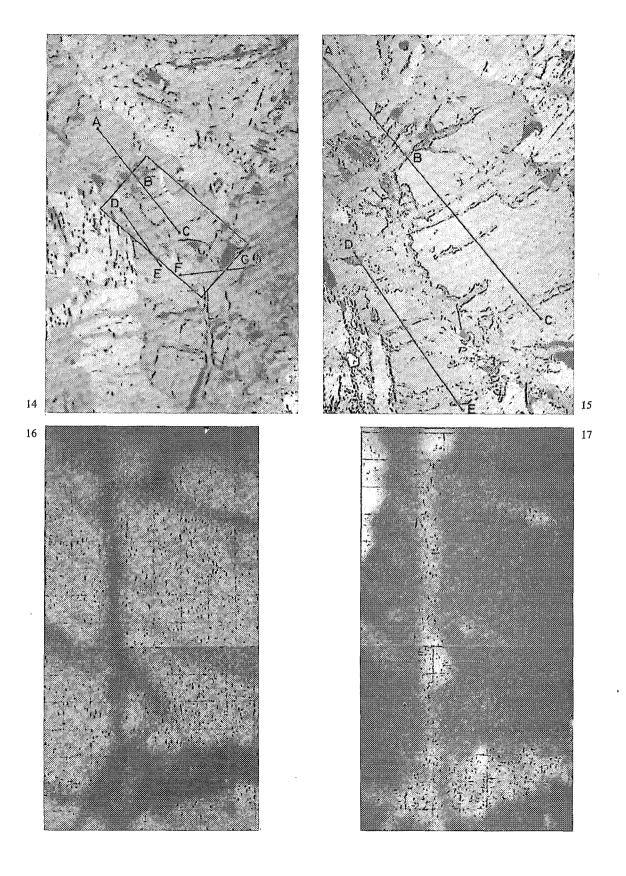
Section polie, grandeur du champ : $0,29~\text{mm}\times0,44~\text{mm}$. Détail de la photo précédente.

Photo 16

Répartition du calcium dans la surface du rectangle inscrit sur la photo 14. On reconnaît les portions feldspathiques claires (présence de calcium) et les bandes noires de gels (pas de calcium).

Photo 17

Répartition du fer, même surface que précédemment. Le fer diffuse dans les plus petites taches de gel mais sa répartition n'est pas uniforme au sein de la phase amorphe (taches plus claires par endroits).



Section polie, grandeur du champ : 0,29 mm \times 0,44 mm.

Deux profils AB et CD (graphique 7 et 8) recoupent un grain de feldspath altéré en son centre en une plage amorphe se prolongeant vers la périphérie du grain par de nombreuses digitations très fines.

Photo 19

Section polie, grandeur du champ: 0,50 mm × 0,75 mm environ.

Dans le secteur a, le contraste est fort entre le feldspath (plages lisses) et le gel (fissures grises et noires à surfaces grenues). Deux profils ont été effectués (non figurés dans les graphiques). Il s'agit en réalité de fissures de retrait partiellement colmatées par la résine et les fractions de gels sont réparties très irrégulièrement le long de ces fissures. Dans le secteur b la plage grenue grise est entièrement occupée par un gel non fissuré. Un profil a été effectué et au point P 4 a été effectuée une analyse ponctuelle du gel.

Photos 20 et 21

Répartition du calcium (photo 20) et du fer (photo 21) dans le secteur a.

On remarque la répartition irrégulière du gel au sein de ces fissures, gels matérialisés par la présence de fer (taches claires).

Photos 22 et 23

Répartition du calcium (photo 22) et du fer (photo 23) dans le secteur b.

Le fer est réparti de façon plus régulière au sein de la plage amorphe. Les taches claires dans les angles supérieurs et inférieurs droits correspondent à des plages d'amphibole (voir photo 19, les plages très claires).

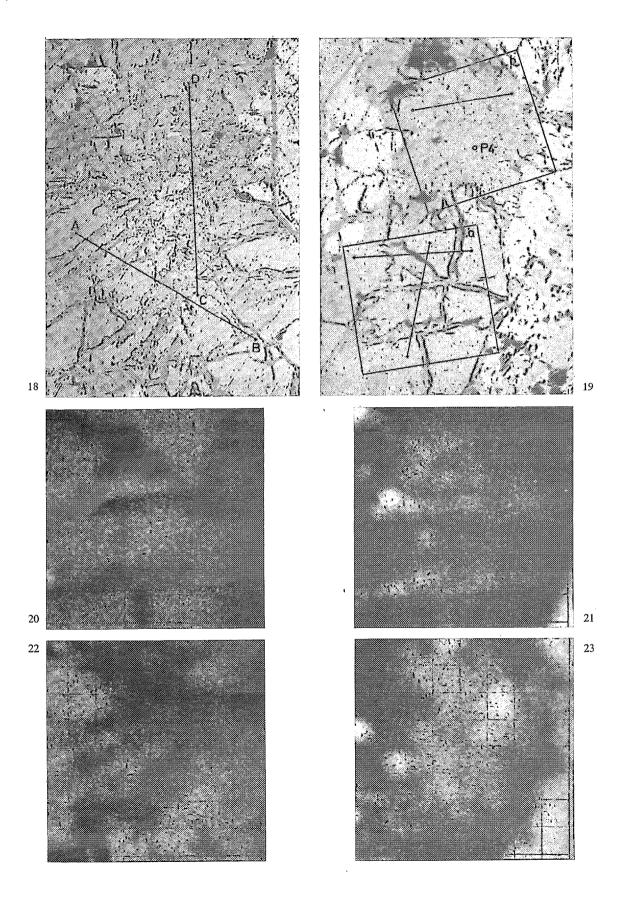
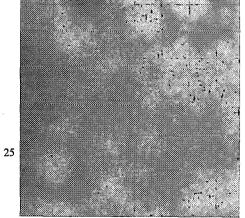


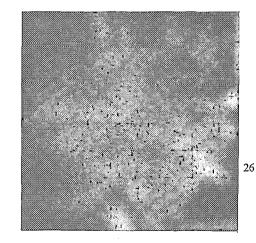
Photo 24 — Section polie, grandeur du champ: 0,95 mm × 1,43 mm.

Le carré de 200 microns de côté environ représente la surface balayée pour l'obtention des images de la répartition des éléments Ca et Fe (photos 25 et 26). Trente-deux analyses pas à pas (tableau 7) ont été effectuées le long du tracé rectiligne dessiné sur la photo.

Photos 25 et 26 — Répartitions des éléments Ca (photos 25) et Fe (photo 26) à l'intérieur de ce secteur carré.







Plaque mince, nicols croisés, grandeur du champ: 0,29 mm × 0,62 mm environ.

Plage de gels dans laquelle apparaissent des amas de cristallites (à droite) et des cristaux de kaolinite (à gauche). C'est au travers de cette plage qu'ont été effectuées deux séries d'analyses pas à pas, l'une au travers des amas de cristallites (tableau 9), l'autre au travers des cristaux de kaolinite (tableau 11), les deux séries se succédant sur une même droite parcourant la photo de droite à gauche, horizontalement, à mi-hauteur de la photo.

Photos 28 et 29

Images de la répartition du Fe (photo 28) et du Ca (photo 29) dans cette même plage. Le fer est réparti de façon assez uniforme dans toute la plage de gels et la présence des cristallites et des cristaux de kaolinite ne modifie pas cette répartition. Le calcium a disparu de l'ensemble de la plage amorphe.

