

Aspects microgéochimiques de l'altération superficielle Application à l'étude de l'évolution des minéraux dans les arènes granitiques

Francisco K. SEDDOH

*Université du Bénin B.P. 1515, LOME (Togo)
et Laboratoire associé au CNRS, n° 157, 21000 DIJON*

Georges PEDRO

*Station de Science du Sol INRA
Route de Saint-Cyr - 78000 VERSAILLES*

RÉSUMÉ

L'utilisation de la microsonde de Castaing pour l'étude de l'altération superficielle des minéraux des roches granitiques (micas trioctaédriques, quartz, plagioclases) permet de proposer un bilan d'évolution microgéochimique basé sur des modifications visibles à l'échelle du minéral et d'en déduire un certain nombre de conséquences cristalochimiques. L'évolution est essentiellement soustractive dans le cas des micas trioctaédriques et du quartz ; elle est, en revanche, simultanément soustractive et additive dans l'altération des plagioclases.

ABSTRACT

Weathering of granitic rock minerals (trioctahedral micas, quartz, plagioclases) was studied by use of microprobe of Castaing and leads to a microgeochemical evolution. This based on modifications which are visible at the mineral scale and crystallochemical consequences can be deduced. Evolution is mainly subtractive for trioctahedral micas and quartz, but is both subtractive and additive for plagioclases.

INTRODUCTION ET MÉTHODE D'ÉTUDE

La connaissance de l'altération des roches plutoniques et de leurs constituants essentiels a fait des progrès très importants au cours des dernières décades. Sans rappeler ici tous les travaux et publications qui ont apporté leur contribution dans ce

domaine et dont la liste risquerait d'être fort longue, nous pouvons mettre l'accent sur l'évolution intervenue dans la conception même du travail. Les études ont quitté le stade de l'estimation minéralogique et chimique effectuées à partir d'analyses globales (J. Dejou, 1958 ; D. Collier, 1961...), pour s'orienter de plus en plus vers l'interprétation de données découlant de l'évolution des différents minéraux

pris isolément (J. Dejoux, 1966 ; Y. Tardy, 1969 ; M. Robert, 1970-1971 ; G. Tsawlassou, 1974...). De cette façon, il est devenu tout à fait possible, aussi bien dans les altérations expérimentales que dans les arènes naturelles, d'établir une filiation directe entre les différents minéraux primaires et les constituants secondaires qui en dérivent. Les résultats obtenus sont déjà relativement précis, tant dans la définition de la nature des modifications chimiques qui guident la transformation des cristaux, que dans la caractérisation des différents minéraux secondaires de néogène. Cependant cette méthode ne peut s'appliquer qu'à des « lots » de minéraux extraits ; aussi, ne conduit-elle qu'à une caractérisation *moyenne* d'un ensemble de cristaux.

En permettant d'analyser qualitativement et quantitativement des plages de quelques microns, bien repérées au microscope polarisant, la microsonde de Castaing offre un moyen supplémentaire pour affiner nos connaissances sur les problèmes d'altération des minéraux. Les modifications, préalablement caractérisées à l'aide de méthodes analytiques globales, peuvent ainsi être étudiées à l'échelle du cristal ; en outre, leur évolution suivie au fur et à mesure de la progression de l'altération doit permettre d'établir un bilan microgéochimique valable pour *chaque* minéral considéré.

TRAVAUX ANTÉRIEURS

La méthode analytique basée sur l'utilisation de la microsonde de Castaing bien qu'elle ait déjà connu un grand développement en pétrographie, minéralogie et métallogénie (D. Métais *et al.*, 1962 ; D. Lemaitre *et al.*, 1966 ; J. Goni, 1966 ; J. Lameyre, 1966 ; G. Sabourdy et Fernandes, 1970), n'a été que peu et très tardivement utilisée dans l'étude de l'altération superficielle des minéraux. Les rares travaux réalisés portent sur l'évolution des plagioclases. Citons à ce sujet l'individualisation d'une phase de gel prékaolinique par J. Delvigne *et al.*, 1970 et la description par A. Meilhac, 1970 des deux types de séricite observables au sein de plagioclases en voie d'altération : les grandes séricites primaires d'origine rétrodiagénétique et la séricite secondaire probablement néoformée au cours de l'évolution superficielle.

L'étude réalisée ici a porté en revanche sur *tous* les constituants essentiels extraits des roches et arènes granitiques du Morvan, c'est-à-dire aussi bien sur les minéraux les plus vulnérables, tels les micas trioctaédriques et les plagioclases, que sur ceux qui sont beaucoup plus stables en zone tempérée : les

feldspaths potassiques, la muscovite et le quartz (F.K. Seddoh, 1973). Dans cette deuxième catégorie de minéraux, seul l'exemple du quartz sera envisagé au cours de cet article.

PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Les méthodes adoptées pour la préparation des échantillons sont simples. Les minéraux des roches saines, choisis comme terme de référence, sont étudiés à partir de lames pétrographiques classiques montées au baume du Canada et non recouvertes de lamelles couvre-objet. Il en est de même d'ailleurs pour les grains de quartz et de plagioclase extraits des arènes granitiques. Ces derniers sont préalablement consolidés par imprégnation dans un mélange de lakeside et d'alcool avant de procéder à la confection des lames minces. Quant aux micas issus des profils d'arène, leur préparation nécessite un enrobage préalable au sein de pastilles en araldite.

Tous les échantillons ainsi préparés subissent une phase de métallisation au nickel avant le passage à l'analyse où ils sont soumis aux diverses études effectuées habituellement à la microsonde (1) :

- réalisation d'images de répartition semi quantitative des principaux éléments majeurs ;
- traversées sur des plages de 100 μ à 300 μ de côté ;
- estimations quantitatives moyennes pour certains composants à partir de comptages réalisés en dix points différents des zones retenues pour analyse et préalablement étudiées au microscope polarisant.

I. ÉVOLUTION MICROGÉOCHIMIQUE DES MICAS TRIOCTAÉDRIQUES

Etude de la répartition des principaux composants à l'échelle du cristal

Les résultats présentés ici sont tirés d'analyses à la microsonde effectuées, soit sur des micas sains, soit sur les différents stades d'altération tels qu'ils ont été définis antérieurement lors de l'étude des arènes granitiques du Morvan (F.K. Seddoh, 1973 ;

(1) Les analyses ont été réalisées au BRGM d'Orléans sur crédits CNRS.

F.K. Seddoh et G. Pedro, 1974), c'est-à-dire allant des biotites apparemment intactes (parabiotites) jusqu'aux stades les plus évolués comportant de la kaolinite.

1. ANALYSE DE BIOTITES DE GRANITES SAINS

a. Répartition des composants

L'établissement des cartes de répartition dans les paillettes de biotites conduit à distinguer deux types de micas au sein des granites sains :

— un premier dans lequel tous les composants considérés (Si, Al, Ti, Fe, Mg, K) sont répartis de façon homogène sur toute la surface du cristal. Seuls les points centrés sur des lignes de fissures révèlent une légère hétérogénéité consistant en un enrichissement local en fer. Dans le cas de ce premier type, nous pouvons parler de *biotite saine au sens strict* (photo 1 et 2) ;

— un second dans lequel certains éléments, notamment K, Mg et Ti, sont répartis de façon très hétérogène. Nous voyons apparaître, au sein des paillettes, des plages nettement appauvries en K et Mg et enrichies en Ti, alors qu'aucune trace de chloritisation n'est décelée au cours de l'étude diffractométrique (photos 3 et 4, pl. I).

Les plages riches en Ti présentent une allure granulaire rappelant les grains d'exsudations de rutile correspondant au faciès sagenite (photo 4, pl. I). Ces grains paraissent d'ailleurs véritablement plaqués sur les paillettes et ne semblent plus faire partie de la structure du mica.

Pour ce deuxième type de paillettes issues de granites apparemment sains, nous parlerons dorénavant de *biotite rétromorphosée*, car il s'agit en fait de minéraux ayant subi des phénomènes de rétromorphose.

b. Résultat des traversées

La réalisation de traversées dans les biotites saines s.s. (pl. IIIA) révèle une différence de comportement entre le cœur et la périphérie des cristaux. Alors que dans les cœurs de biotite saine (s.s.), l'homogénéité de composition visible sur les cartes de répartition se maintient, nous voyons apparaître sur les bords des cristaux, une légère hétérogénéité affectant tous les composants majeurs (Si, Al, Ti, Mg, Fe, K). Cette anisotropie de répartition ne semble pas se superposer à celle décelée au sein des micas rétromor-

phosés (les grains de rutile exsudés étant inexistants). Elle ne s'apparente pas non plus à la zonation, telle qu'elle a été décrite par exemple dans les phlogopites de lamprophyres par D. Métais *et al.* en 1962. Le fait qu'elle gagne progressivement l'ensemble de la paillette comme le montreront plus loin les analyses de micas extraits des arènes granitiques, conduit plutôt à penser qu'il peut s'agir déjà d'un début d'altération à l'extrême périphérie des paillettes.

2. ETUDE DES BIOTITES EXTRAITES D'ARÈNES GRANITIQUES

a. Répartition des composants

L'examen des images de répartition obtenues dans des micas appartenant à différents stades d'altération, permet de classer les éléments majeurs des biotites de la façon suivante :

— *Silicium, aluminium et fer.* Ces éléments peuvent être considérés comme relativement constants dans les cristaux où ils subsistent toujours en forte proportion, ce qui rend leurs mouvements à l'échelle des paillettes difficiles à détecter à partir des seules cartes de répartition (photos 1, 5, 6, pl. II). On peut cependant signaler une nette tendance du fer à se concentrer le long des plans de clivage ou de microfissuration. La concentration du fer est d'autant mieux réalisée que le mica a atteint un stade de dégradation avancé. Les analyses montrent très nettement par exemple que c'est dans les paillettes altérées en kaolinite qu'elle est la plus accusée (photo 6, pl. II). Il semble donc exister une certaine relation entre la redistribution du fer à l'échelle du cristal et le taux d'oxydation de Fe^{2+} en Fe^{3+} évalué d'après les analyses chimiques globales. Nous pouvons en déduire que c'est le long des zones de grande circulation de l'eau que l'oxydation est la plus intense et qu'elle provoque ainsi une précipitation immédiate du fer.

— *Magnésium et potassium.* Au vu des images de répartition, ces composants présentent un comportement inverse de ceux envisagés précédemment. Toutes les analyses indiquent un appauvrissement régulier au sein des paillettes. Ce lessivage de K et Mg est d'autant plus accentué que le mica a subi une dégradation poussée (photos 2 et 4, pl. II). L'évacuation du potassium et du magnésium est guidée par les plans de clivage et les zones de microfissuration.

— *Titane.* Cet élément est considéré ici séparé-

ment parce qu'il se révèle comme étant à cheval sur les deux groupes précédents. En effet, les grains de TiO_2 formant des taches au sein des micas rétro-morphosés restent stables et paraissent indifférents aux agents d'altération (photo 3, pl. II) ; en revanche, le comportement du titane localisé dans le réseau propre de la biotite semble plutôt conduire à un appauvrissement. Contrairement à Mg et K, nous pensons toutefois qu'il s'agit d'une simple redistribution à l'intérieur de la paillette.

Le tableau I permet de résumer le comportement des composants majeurs des micas, tel que nous pouvons le déduire à la suite de l'examen des images de répartition.

TABLEAU I

Comportement différentiel des éléments majeurs des biotites au cours de leur altération

Comportement des éléments au sein des paillettes	Eléments majeurs du réseau	Zone de mobilité privilégiée dans les cristaux	Type de mobilité et de redistribution
Concentration généralisée	Si, Al	—	—
Concentration localisée (redistribution au sein des paillettes)	Ti (*)	Plan des clivages	Redistribution intraminérale dominante
	Fe	Microfissures	Redistribution intraminérale dominante
Appauvrissement	K	Plan des clivages	Lessivage extraminéral dominant
	Mg	Plan des clivages et microfissures	

(*) A l'exclusion des grains de rutile.

b. Résultats des traversées

Les traversées réalisées dans les micas appartenant aux différents stades d'altération montrent que l'hétérogénéité de répartition s'accroît avec la progression de l'évolution. Aux stades biotite et parabiote, celle-ci est limitée à la bordure des cristaux ; elle gagne en revanche, l'ensemble de la paillette dès l'apparition des stades correspondant aux édifices interstratifiés mica-vermiculite et vermiculite (pl. IIIB).

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XIII, n° 1, 1975 : 7-25.

c. Estimation quantitative

Dans le but de compléter les données chimiques globales et de caractériser les différentes plages décelables au microscope dans les biotites en voie d'évolution, des analyses quantitatives ont été réalisées en différents points des biotites altérées : plages saines, plages décolorées, zones microfissurées montrant une coloration brun-noirâtre plus ou moins accentuée.

Nous présentons dans le tableau II, à titre d'exemple, quelques-uns des résultats analytiques obtenus.

TABLEAU II

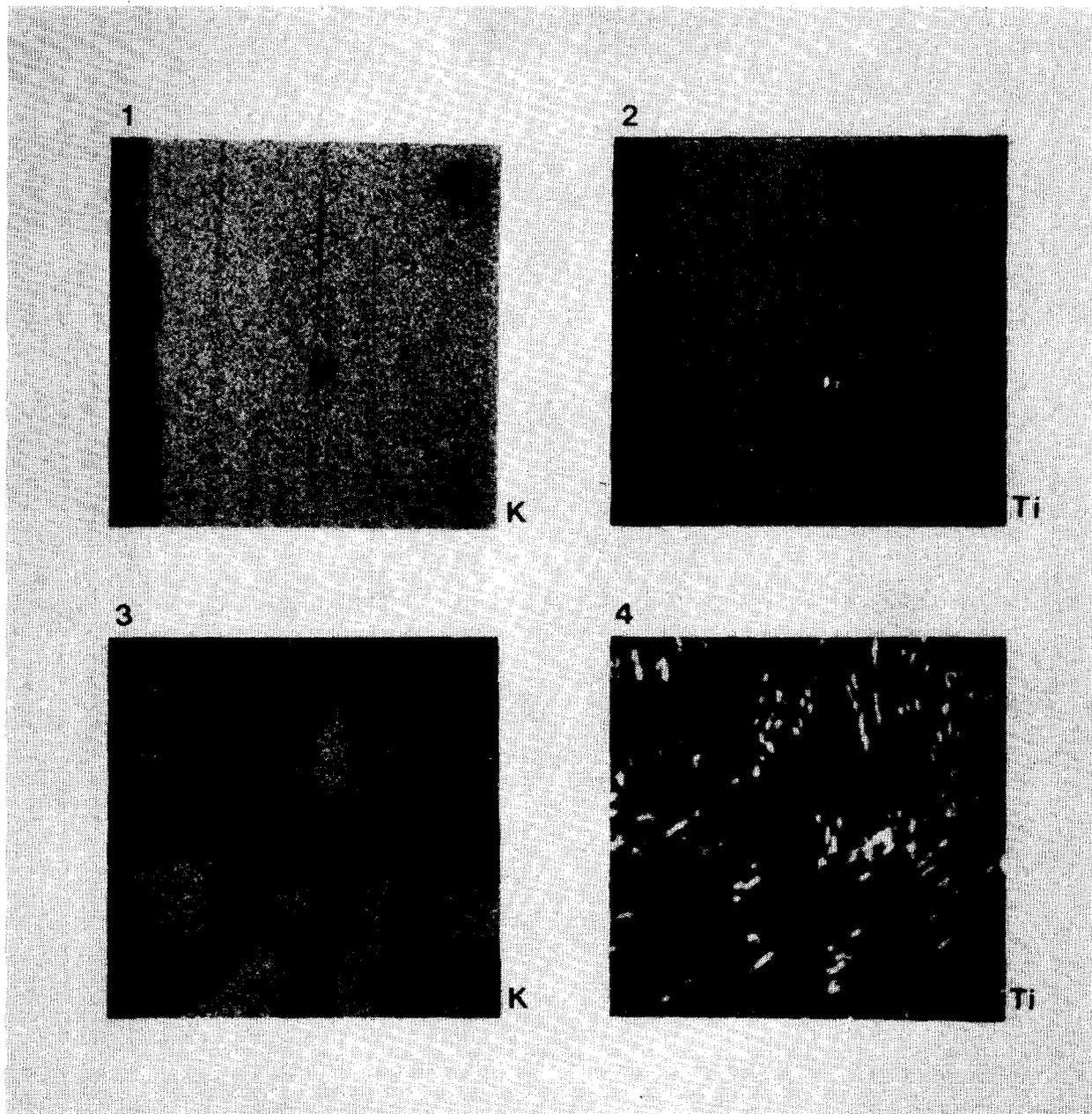
Analyses quantitatives de diverses plages d'altération rencontrées dans les biotites (%)

Echantillon	Stade d'altération	Si	Al	Ti	Fe	Mg	Ca	K
Biotite Saint-André	Biotite saine (témoin)	14,7	10,1	2,6	15,7	6,2	1,2	5,5
Plage décolorée dans une biotite de Tazilly-arène (2,5 m de profondeur)	Evolution type Intergrade alumineux	19,2	14,2	0,5	9,4	4,0	0,1	0,2
Plage brun-foncé dans biotite de Tazilly-arène (4 m de profondeur)	Zone microfissurée au sein d'un intergrade (microfissure argilisée)	17	8,7	0,2	4,6	1,7	0,1	tr.
	Zone microfissurée au sein d'un intergrade (microfissure vide)	2,8	0,2	0,1	13,1	1,2	—	—

Il ressort de ces données quantitatives que par rapport à la biotite de départ, les plages décolorées transformées en intergrade se sont appauvries en Mg, K, Ti et même Fe, alors qu'on note une concentration relative en Si et Al. La perte en fer est importante ; elle est conforme aux études faites au microscope polarisant, mais elle n'était prévisible, ni d'après l'examen des seules cartes de répartition, ni à partir des données chimiques totales.

La décoloration globale de la biotite apparaît ainsi comme un phénomène complexe, qui va de pair avec une forte élimination de Mg, Fe, K et Ti.

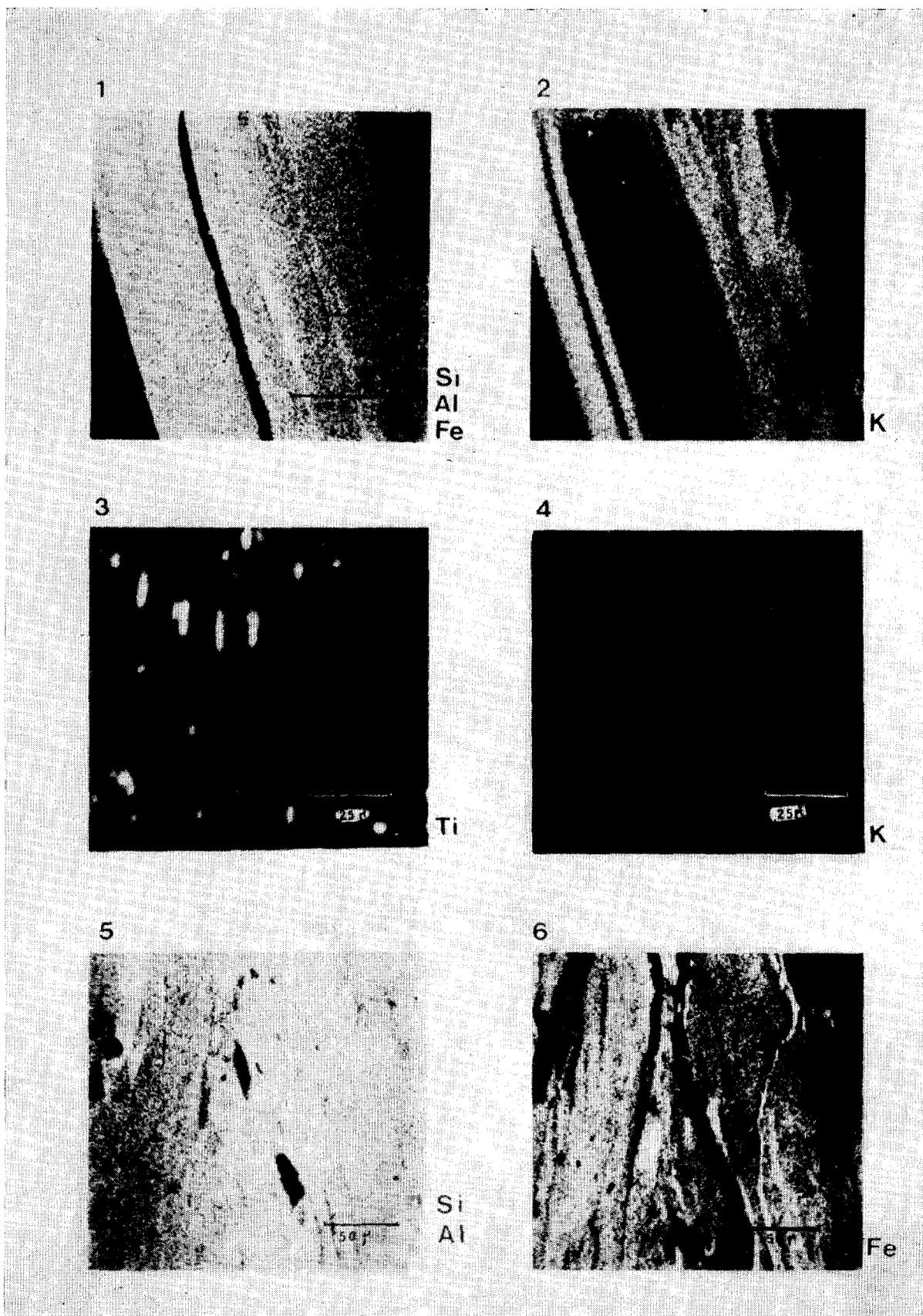
En ce qui concerne le matériel occupant les microfissures de couleur brun-foncé, les données quantitatives permettent d'en distinguer de deux sortes :



Pl. I

Photos 1 et 2. — Répartition du potassium et du titane dans une biotite saine s;s (granite de Luzy-St-André).

Photos 3 et 4. — Image du potassium et du titane dans une biotite rétomorphosée extraite du granite sain (Issy-l'Évêque).



PL. II

Photos 1 et 2. — Cartes de Si, Al, Fe et K dans une biotite altérée en vermiculite et interstratifié régulier mica-vermiculite (profil de Mont-Palais).

Photos 3 et 4. — Répartition du titane et du potassium dans une biotite altérée en intergrade (profil de Tazilly).

Photos 5 et 6. — Cartes de Si, Al et Fe dans une biotite altérée en kaolinite (profil de Terres-Rouges).

— une première dans laquelle le fer est le seul élément fortement représenté ; les autres éléments n'existant dans les microfissures qu'à l'état de traces ;

— une deuxième dans laquelle un taux de fer relativement faible est associé à des proportions plus importantes d'autres éléments, notamment Si et Al.

Si dans le premier cas, la coloration brun-foncé peut être attribuée à un dépôt d'oxydes de fer au sein de microfissures vides, nous pensons que dans le second, elle est plutôt due au dépôt d'une pellicule ferrugineuse sur un support argileux de remplissage.

On remarque d'ailleurs, au vu de l'ensemble des résultats, que la quantité de fer rencontrée dans le deuxième type de plage est inférieure à celle existant dans les paillettes décolorées et, d'un autre côté, que dans les zones microfissurées un taux de fer relativement faible suffit pour faire apparaître la coloration. *Le critère de la décoloration, lorsqu'il est considéré isolément, se révèle donc comme étant très délicat à utiliser pour caractériser une intensité d'altération.*

II. ÉVOLUTION MICROGÉOCHIMIQUE DES PLAGIOCLASES

Dans le cas des plagioclases, les analyses à la microsonde de Castaing ont permis d'étudier plus en détail les quelques problèmes suivants :

— apparition et développement du brunissement dans les cristaux ;

— genèse des principaux minéraux secondaires (séricite, kaolinite, gibbsite) au cours de l'altération.

A. Etude du phénomène de brunissement dans les plagioclases

Si la coloration rose-brun est généralement observée dans les feldspaths potassiques de certains granites (J. Didier et J. Lameyre, 1972), elle peut caractériser aussi, soit des plagioclases de roches saines, soit encore des plagioclases extraits d'arènes granitiques. C'est dans les roches saines que l'étude du brunissement des feldspaths a été le plus souvent abordée par les pétrographes (Rosenquist, 1951 ; Boone, 1963). Nous ferons donc au cours de ce travail, la différence entre cette coloration primaire et le brunissement secondaire visible dès le tout début de l'altération superficielle des plagioclases.

1. BRUNISSEMENT PRIMAIRE DES PLAGIOCLASES

Les travaux pétrographiques lient l'apparition de cette coloration brune, soit à la présence d'inclusions microscopiques d'hématite au sein des cristaux, soit encore à l'existence d'une substitution de Al par Fe^{3+} qui se produirait à l'intérieur du réseau feldspathique, au cours de la cristallisation (J. Didier et J. Lameyre, 1972).

a. Carte de répartition d'éléments dans les plagioclases brun-rose

Les images de répartition d'éléments obtenues dans les plages brunes des plagioclases extraits de granites sains confirment le rôle prépondérant du fer dans l'apparition de cette coloration. En effet, toutes les plages analysées font apparaître des points microscopiques enrichis en fer (photo 1, pl. IV). La répartition de cet élément étant très anarchique, il est tout à fait vraisemblable de penser qu'il peut s'agir de fines inclusions d'hématite.

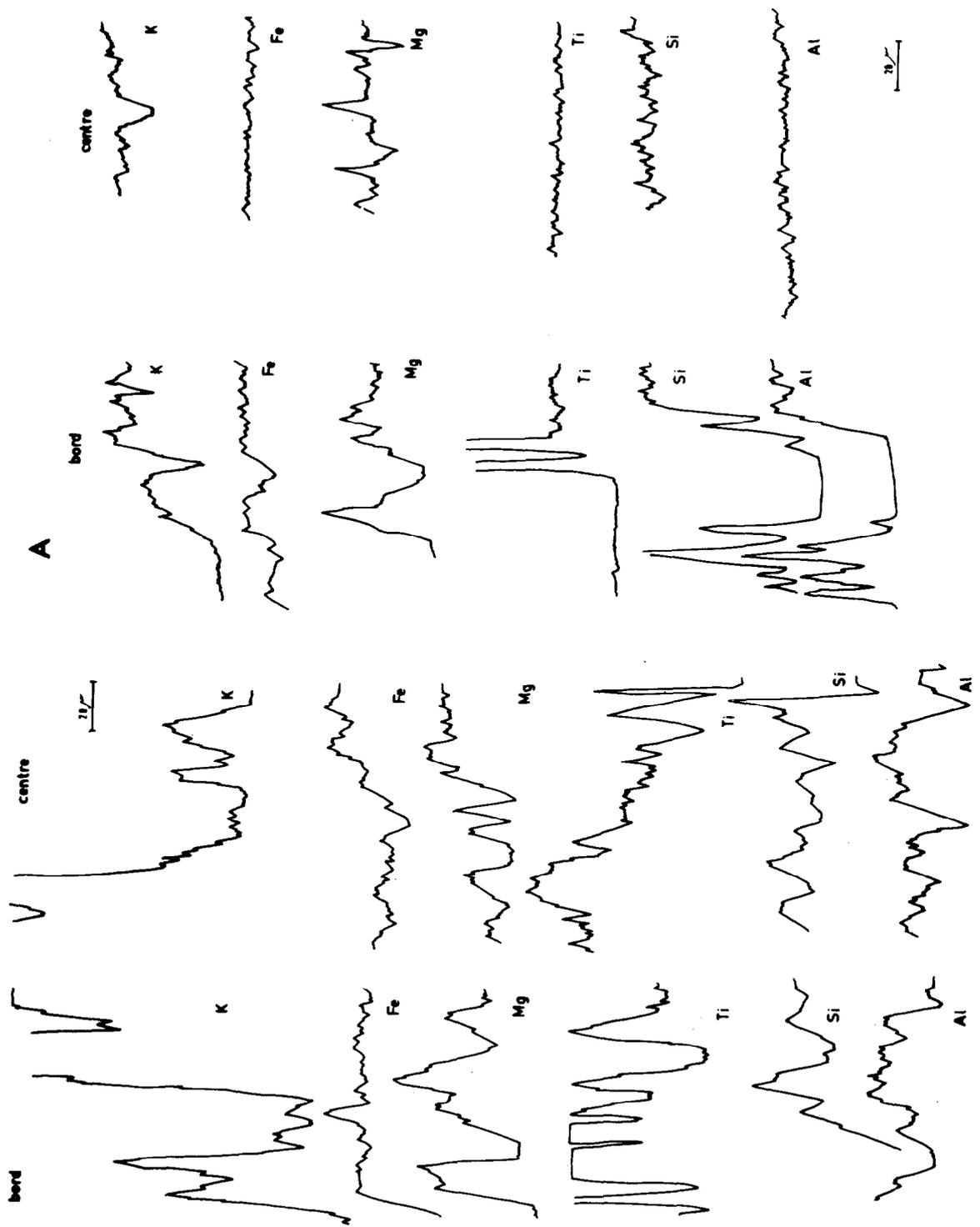
À côté des plages normales où le fer est dispersé dans le plagioclase, existent des zones plus larges, localisées à proximité des plans de fissures (photos 1 et 3, pl. IV). Ces zones, qui sont dépourvues de Na et Ca (photo 4, pl. IV), révèlent toujours la présence de Mg et de K en association avec Fe (photos 4 et 5, pl. IV). Cette absence de Na et Ca et d'un autre côté l'existence concomitante de Mg, Fe et K qui ne peuvent provenir que des biotites voisines, suggère que, même dans les granites sains, le brunissement doit déjà correspondre à un début d'altération du plagioclase.

Ce point de vue était déjà celui de Boone (1963). En effet, cet auteur considère la présence d'hématite au sein des feldspaths comme liée à des phases d'actions deutériques, entraînant par ailleurs des phénomènes d'albitisation et de chloritisation au sein de la roche.

b. Données quantitatives

Des dosages de Fe et Mg réalisés dans les zones de brunissement confirment le rôle primordial joué par la teneur en fer dans l'intensification de la coloration ; c'est ce qui apparaît en particulier avec les résultats obtenus dans des plagioclases du granite rose de Issy-l'Évêque (tabl. III).

Ces résultats mettent en évidence d'un autre côté qu'une très faible quantité de fer suffit à faire apparaître un début de coloration rose.



B

PL. III

A. — Traversée du centre et sur le bord d'une biotite saine (granite de Saint-André près de Luzy).
 B. — Traversée au centre et sur le bord d'une biotite altérée en intergrade (profil de Tazilly).

TABLEAU III
Dosage de Fe et Mg dans les plagioclases « sains »
de Issy-l'Évêque (%)

Zones brun-rose analysées	Fe	Mg	
Zone claire	0,2	0,1	
Zone foncée {	maximum	24,4	0,2
	minimum	8,1	id.

2. BRUNISSEMENT DES PLAGIOCLASES DANS LES PROFILS D'ARÈNES

a. Cartes de répartition des composants

On constate que les plages brunes renferment toujours du fer et que les zones de concentration en cet élément sont localisées dans des plages appauvries en Na-Ca (photos 3 et 4, pl. IV). En outre, les plus intenses ferruginisations s'observent le long des plans de fissure. Tout autour de ces zones, nous assistons à une sorte de diffusion du fer dans la masse du plagioclase (photo 4, pl. V), cependant que les zones ferruginisées conservent des taux élevés de Si et Al (photos 1 et 2, pl. V). Notons toutefois que le fait que ces deux derniers éléments subsistent seuls dans certaines zones fissurales en présence de Fe et Mg suggère que les éléments ferro-magnésiens aient pu être adsorbés sur une phase kaolinique issue de l'altération des feldspaths.

TABLEAU IV
Analyse de plagioclase en voie de brunissement (Les Loges)
(%)

Zones analysées	Fe	Mg	
Plage brun-foncé microfissurée	17	6	
Plage brun-clair { ou incolore {	maximum	0,6	1,6
	minimum	0,1	0,1

b. Analyses quantitatives

Un exemple de données quantitatives recueillies sur les plagioclases brunifiés du profil des Loges, permet d'illustrer les variations de Fe et Mg que l'on peut rencontrer au sein des plagioclases en voie de coloration (tabl. IV).

B. Genèse et type de cristallisation des minéraux secondaires dans les plagioclases

Nous présentons dans le tableau V, une récapitulation des principales phases, rencontrées lors de l'étude minéralogique de l'altération des plagioclases et que nous étudierons successivement.

TABLEAU V
Minéraux secondaires néoformés au sein des plagioclases au cours
de leur altération

Minéral de départ	Minéraux secondaires dominants	Types de paragenèses (*)
Plagioclase	Séricite	Kaolinite - Séricite - Montmorillonite
	Kaolinite	Kaolinite - Séricite
	Gibbsite	Gibbsite - Kaolinite

(*) A ces associations s'ajoute la phase de gel non mise en évidence aux rayons X.

1. INDIVIDUALISATION DE LA SÉRICITE

a. Les deux types de séricite

— *Cartes de répartition.* L'existence de plages potassiques à l'intérieur des plagioclases sains ou altérés peut être attribuée dans les granites du Morvan (qui sont en général non antiperthitiques) à la genèse de phyllites de type séricite. Cette séricitisation nécessite donc un apport de K ; elle se localise dans des zones renfermant Si et Al, mais dépourvues de cations compensateurs de type Ca-Na (photos 3, 4, 5, 6, pl. IV et photo 3, pl. V).

En ce qui concerne les plagioclases issus des profils d'arènes, l'examen des cartes de répartition obtenues à la lumière des observations effectuées au microscope polarisant, suggère que si les grandes paillettes micacées peuvent être considérées comme primaires (G. Millot et F. Lelong, 1966), celles plus fines, de couleur verdâtre ou brunâtre, représentent en grande partie de la séricite secondaire formée au cours de l'altération du feldspath. Sur ce point, nos résultats rejoignent ceux obtenus par A. Meilhac et Y. Tardy (1970).

— *Données quantitatives.* Quelques résultats analytiques obtenus sur les différents types de paillettes de séricite : grands cristaux incolores à biré-

fringence élevée (teintes du 2^e ordre) et fines lamelles verdâtres ou brunâtres à biréfringence faible (teintes du 1^{er} ordre) sont présentés dans le tableau VI.

TABLEAU VI

Analyse de différents types de paillettes de séricite (%)

Echantillon		Si	Al	Fe	Mg	Ca	K	Na
Grande séricite	Plagioclase sain Issy-l'Evêque	22,6	20,5	—	—	0,6	6,1	2
	Plagioclase extrait de l'arène Mont-Palais	19,4	14	0,3	0,1	0,3	5,4	—
Petite séricite	Plagioclase extrait de l'arène Mont-Palais	16,5	12,5	2,4	0,4	0,2	tr.	—
	Plagioclase extrait de l'arène Mont-Palais	16,2	12,5	2,2	0,3	0,2	2,4	1,5

Nous constatons d'après ces analyses que ces deux types de paillettes ne sont pas de même composition chimique. Les grandes séricites sont fortement potassiques et chimiquement proches des muscovites. Les paillettes plus fines sont en revanche moins riches en potassium et relativement plus ferro-magnésiennes. Signalons en outre que tous les cristaux étudiés aux rayons X ne présentent qu'une seule réflexion à 10 Å.

b. Etude des plagioclases altérés en montmorillonite, séricite et kaolinite - Problème de la séricitisation

Par suite du mélange très intime de la phase montmorillonitique avec les autres constituants secondaires (séricite et kaolinite), il est très difficile de caractériser avec précision les smectites néoformées à l'intérieur des feldspaths. Le fait que ces smectites soient chimiquement peu différentes des constituants de type séricite secondaire accroît encore la difficulté de leur étude. Nous présentons cependant, dans le tableau VII, quelques résultats obtenus sur des plages d'altération de feldspath renfermant de la montmorillonite, à côté d'autres minéraux tels séricite et kaolinite.

Il ressort des résultats analytiques que toutes les plages analysées, même celles qui n'étaient pas optiquement déterminables, renferment du potassium.

TABLEAU VII

Analyse de plages altérées en montmorillonite, séricite et kaolinite dans les plagioclases de Mont-Palais (%)

Zone analysée	Si	Al	Fe	Mg	Ca	K	Na
Plage brunâtre non phylliteuse (plagioclase arène Mont-Palais Haut)	20,6	9,6	1,6	tr.	0,3	4,7	0,02

On peut donc penser que, du fait de la richesse des arènes en potassium libéré lors de l'altération des micas biotites, nous assistons progressivement à une séricitisation plus ou moins accentuée des phases montmorillonitiques néoformées au sein des plagioclases, qui deviennent ainsi difficiles à individualiser.

2. NÉOFORMATION DE KAOLINITE DANS LES PLAGIOCLASES

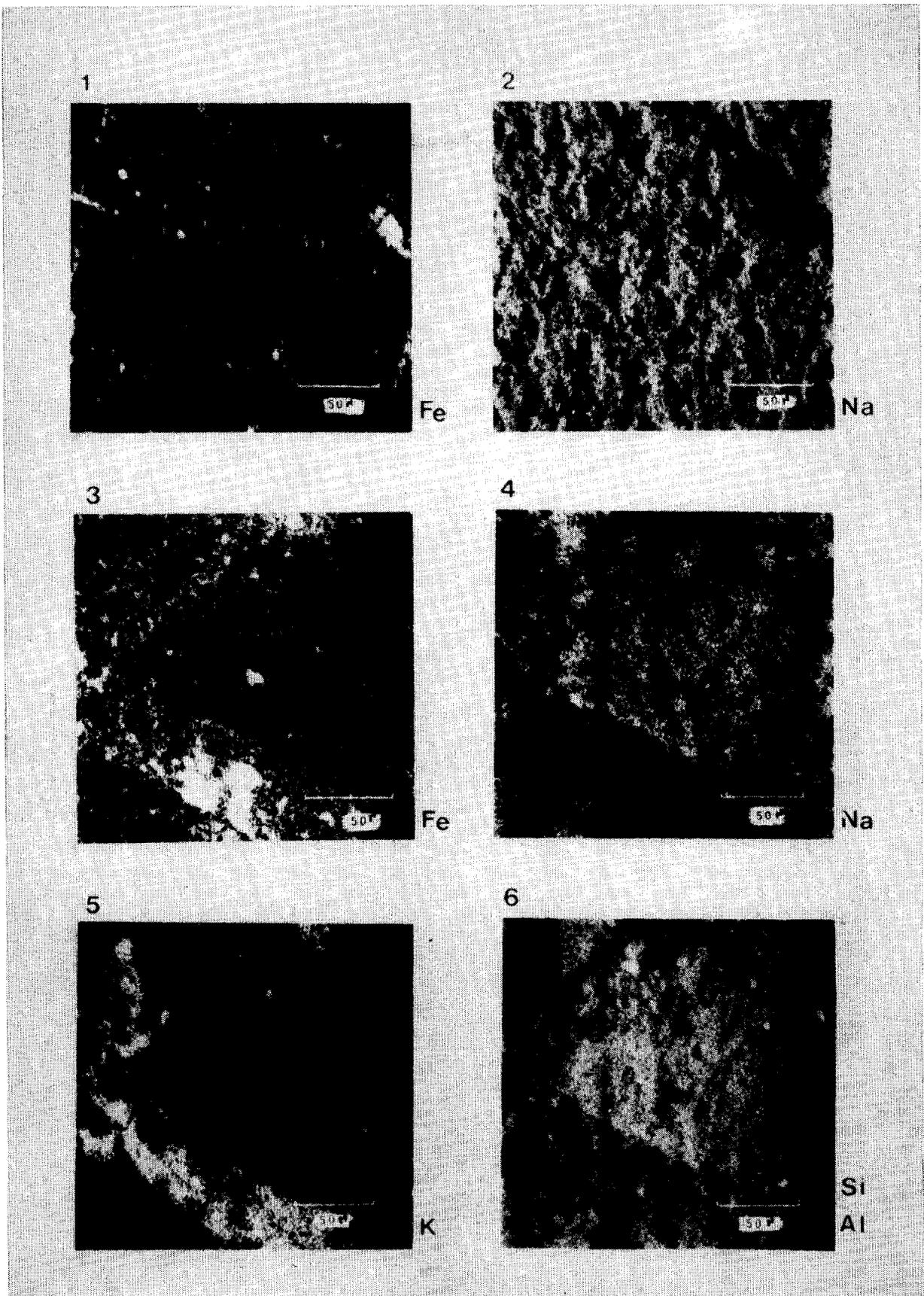
a. Cartes de répartition et traversées

Les plages correspondant au développement de la kaolinite sont dépourvues de tous les cations compensateurs et enrichies en Si et Al. Au cours des premiers stades d'altération, les zones kaoliniques sont ponctuelles. Il s'agit de kaolinite naissante au sein des cristaux de plagioclases. Dans les stades d'altération plus avancés, des zones de concentration en kaolinite apparaissent localisées principalement suivant les plans de microfissuration. Ces plages kaoliniques sont bordées de composés ferrifères (photos 1, 2, 3, 4, pl. V). Cette concentration de la kaolinite semble découler de l'existence d'une hydrolyse beaucoup plus intense le long des plans de grande circulation d'eau. A cette kaolinite autochtone, peut venir s'ajouter toutefois de la kaolinite provenant d'autres points du plagioclase et qui se déposerait ainsi le long de certains plans à grande circulation.

b. Analyses quantitatives

Quelques analyses de plagioclases kaolinisés et séricitisés sont présentées dans le tableau VIII, en même temps que celles correspondant à des plagioclases sains.

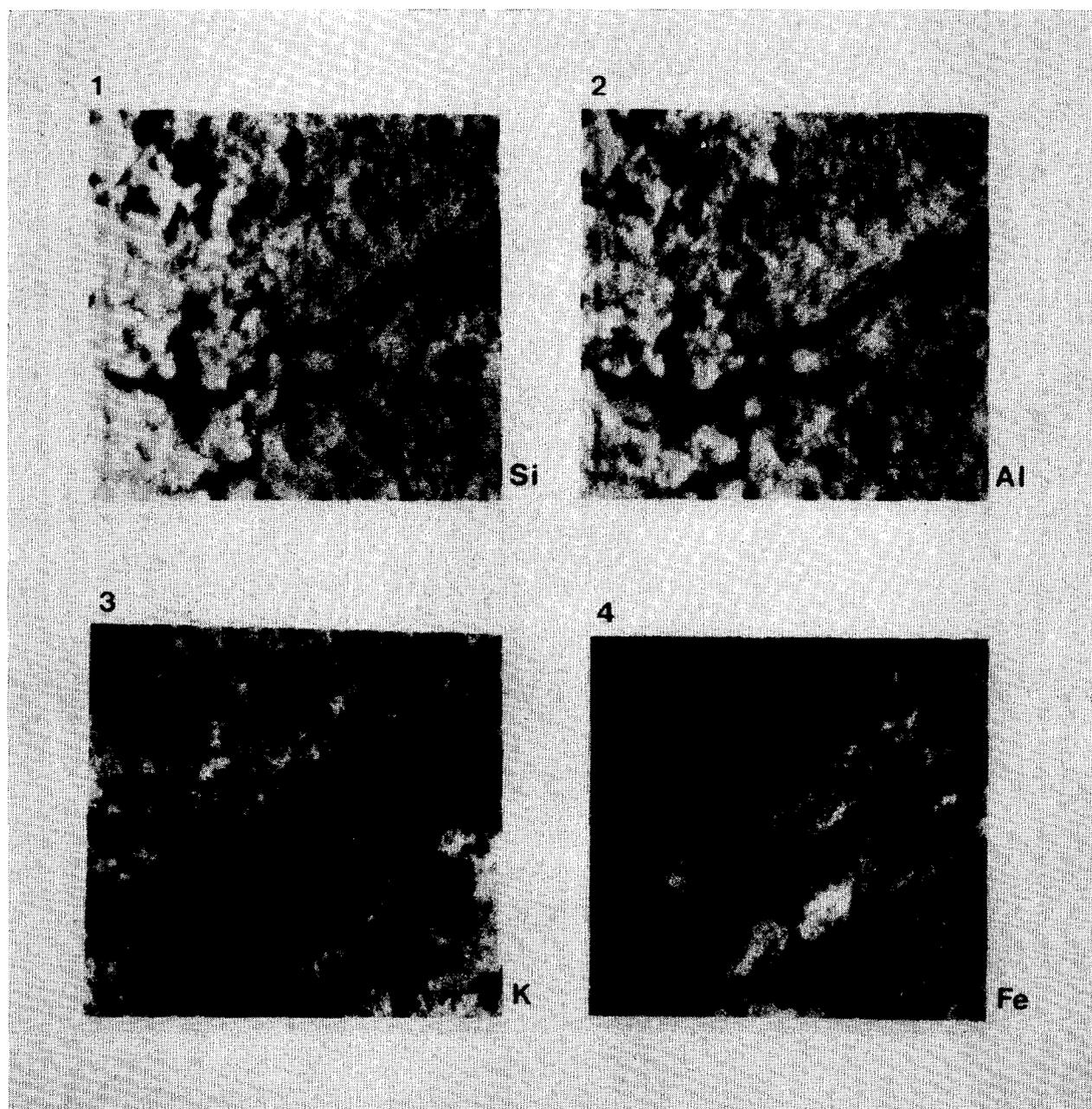
Nous remarquons que les plages kaolinisées, par rapport aux cristaux de plagioclases sains, sont caractérisées par une forte désilicification et par un enrichissement secondaire en Al, dans des zones entièrement dépourvues de cations Na et Ca. La



PL. IV

Photos 1 et 2. — Répartition du fer et du sodium dans un plagioclase rose extrait de granite sain (Les Loges).

Photos 3, 4, 5 et 6. — Cartes de Fe, Na, K et Si, Al dans un plagioclase rose en voie de brunissement, granite sain de Lormes (Les Loges) Le fer accompagne les plages altérées en séricite et kaolinite.



PL. V

Photos 1, 2, 3 et 4. — Image de la répartition de Si, Al, K et Fe dans un cristal de plagioclase en voie de kaolinisation et de ferruginisation (Arène de profil de Mont-Palais).

TABLEAU VIII
Analyses des plagioclases kaolinisés par comparaison au plagioclase de granite sain (%)

Echantillons	Taux en % de kaolinite dans le plagioclase	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ moléculaire
Plagioclase de granite sain Issy-l'Evêque	0	26	11	—	—	3,1	5,2	—	4,4
Plagioclase extrait de l'arène (2,5 m de profondeur) Mont-Palais	29	12,5	16,5	2,4	0,4	0,2	tr.	—	1,3
Plagioclase extrait de l'arène (3 m de profondeur) Terres-Rouges	61	15,1	24,4	0,6	0,2	0,5	0,2	2,5	1,2

kaolinite est presque toujours intimement mélangée avec des paillettes de séricite ; d'où la présence de potassium révélée par certaines analyses. Nous constatons en outre, que les rapports SiO₂/Al₂O₃ dans les plages kaolinisées sont inférieures à 2 alors qu'on ne décèle pas de gibbsite. Ce résultat permet de penser qu'une fraction alumineuse amorphe pourrait exister dans ces zones kaolinisées. Cette phase amorphe est d'ailleurs d'autant plus importante que le taux de kaolinisation du plagioclase est élevé.

3. ALTÉRATION DES PLAGIOCLASES EN GIBBSITE

L'individualisation de la gibbsite suit un processus très analogue à celui de la kaolinisation. D'ailleurs, ces deux constituants secondaires sont souvent très intimement associés au sein du plagioclase.

a. Répartition des principaux composants

D'après l'analyse des cartes de répartition d'éléments nous retrouvons, au sujet de la gibbsite, les deux stades d'évolution déjà mis en évidence lors de l'altération en kaolinite : - *stade de gibbsite naissante* visible dans des zones ponctuelles du plagioclase en voie d'évolution (photos 1, 2, pl. VI) ; dans ce cas, l'individualisation de la gibbsite ne peut être mise en évidence qu'en comparant point par point les cartes de répartition des principaux éléments, surtout celles correspondant à Si et Al ; - *stade de concentration de gibbsite* le long des zones fissurées à grande circulation d'eau dans les cristaux extraits de profils d'arène plus évolués (photos 3, 4, 5, 6, pl. VI). Les zones gibbsitiques sont alors bordées d'une zone présentant une forte concentration en fer.

TABLEAU IX
Analyse de plagioclase altéré en gibbsite, kaolinite et séricite (%)

Echantillon	Si	Al	Fe	Mg	Ca	K	Na	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ moléculaire
Zone à gibbsite naissante. Plagioclase extrait de l'arène de Nataloup	16,2	12,5	2,1	0,2	0,3	2,4	0,3	2,5
Zone concentrée en gibbsite-Plagioclase extrait de l'arène de Nataloup	Al mini	13	12,3	3,2	—	5	0,3	2,0
	Al maxi	13,6	25,4	5,5	0,1	—	0,2	1,0

b. Analyses quantitatives

Les données quantitatives obtenues sur les plages gibbsitiques, généralement identifiées à l'aide des cartes de répartition (tabl. IX), indiquent le même sens d'évolution qu'au cours de la kaolinisation. Ceci n'est d'ailleurs pas surprenant puisque kaolinite et gibbsite sont toujours parfaitement associées au sein des plagioclases. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est relativement élevé dans les plages caractérisées par de la gibbsite naissante (valeurs supérieures à 2) ; il descend à des valeurs très faibles, voisines de 1, dans les zones de concentration en gibbsite.

Comme dans le cas de la kaolinite, la concentration en gibbsite peut être attribuée à plusieurs mécanismes : hydrolyse plus intense le long des plans de microfissuration, ou bien migration de l'aluminium et précipitation de gibbsite, ou encore accumulation de gibbsite particulière en provenance des autres plages du plagioclase ou même du complexe d'altération.

III. LE QUARTZ DES PROFILS D'ARÈNES EXAMINÉ A LA MICROSONDE DE CASTAING

L'étude de grains de quartz au microscope électronique à balayage nous a permis de mettre en évidence les phénomènes de corrosion et de dissolution des particules au sein des profils d'arènes. On a pu ainsi montrer que les cristaux se comportent, *même en région tempérée, en fournisseurs de Si* au système d'altération (F.K. Seddoh, 1973). D'un autre côté, il était nécessaire par le biais des analyses à la microsonde de Castaing, d'examiner comment réagissent les grains de quartz vis-à-vis des autres constituants de l'arène. C'est dans ce but que des analyses (cartes de répartition et estimations quantitatives) ont été réalisées ; nous nous sommes limités aux zones de dissolution et de fissuration, qui sont seules susceptibles de piéger les éléments en provenance du complexe d'altération ou libérés par les minéraux voisins.

1. CARTES DE RÉPARTITION DES CONSTITUANTS

L'étude de la répartition des éléments montre que nous retrouvons, dans les fissures du quartz, *tous* les éléments majeurs du granite.

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XIII, n° 1, 1975 : 7-25.

Certaines fissures sont remplies uniquement de fer, à l'exclusion de tous les autres éléments ; il s'agit dans ce cas de fissures ouvertes secondairement ferruginisées. D'autres plans révèlent des associations de type Si, Al, K, Fe, Mg ou Si, Al. Il s'agit alors probablement de constituants kaoliniques ou sériciteux piégés dans les plans de fissures des grains de quartz (photos 4, 5, 6, pl. VII). Enfin, dans les profils à gibbsite, certaines fissures de quartz ne font apparaître que de l'aluminium (photos 1, 2, pl. VII). La gibbsite issue du complexe d'altération pourrait ainsi être piégée, au même titre que les autres constituants secondaires, dans les fissures ouvertes traversant les grains de quartz.

2. ANALYSES QUANTITATIVES

Un exemple d'estimation quantitative réalisée en différents points d'un remplissage fissural, montre assez nettement l'hétérogénéité de composition le long des fissures.

TABLEAU X

Analyse de remplissage de fissure dans le quartz (%)

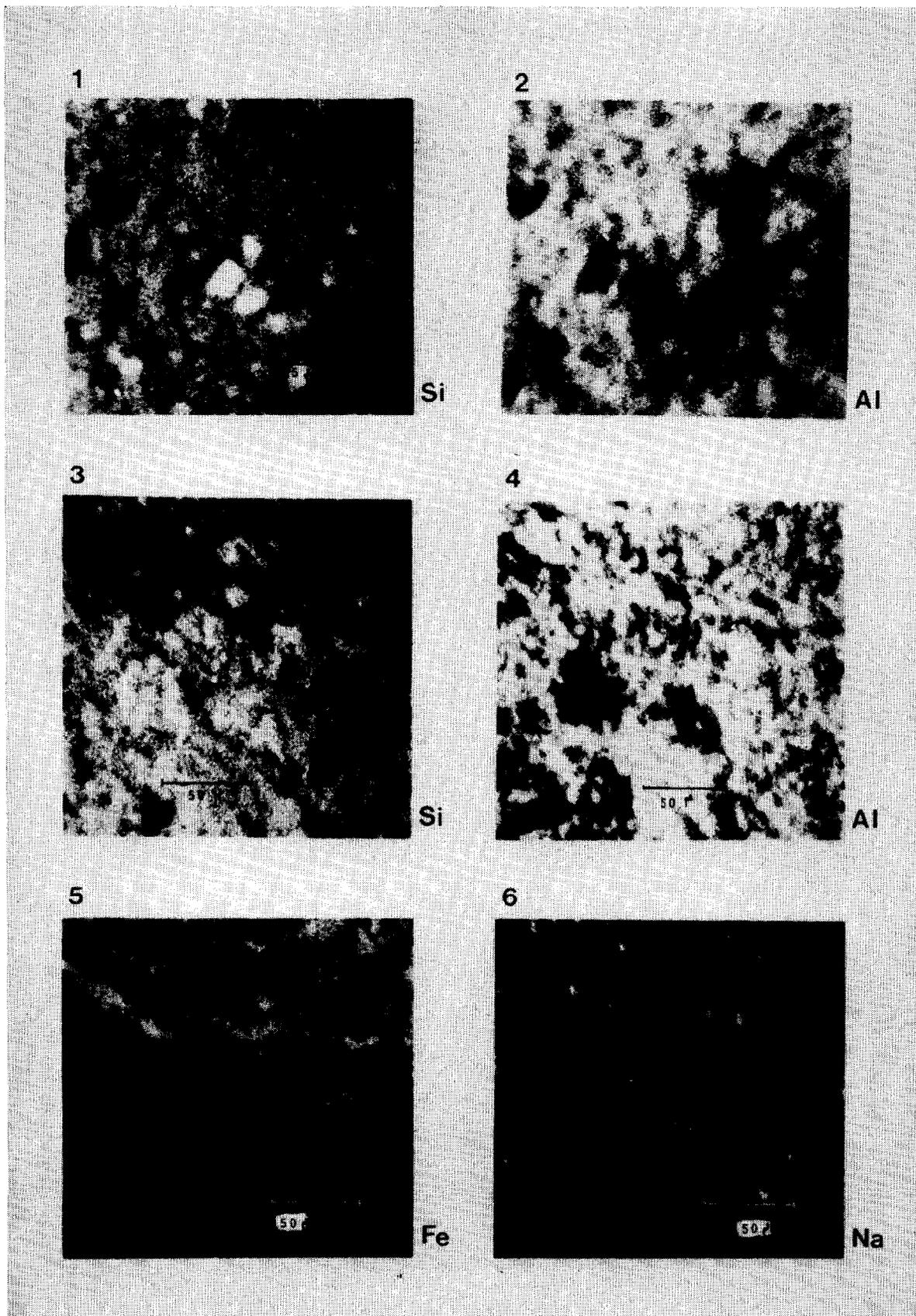
Plage analysée	Si	Al	Fe	Ca	K	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ moléculaire
Remplissage fissural	7	1	20,7	0,05	—	1,3
	25,3	10	40,3	0,2	0,8	4,6
Zone non fissurale (référence)	51,4	—	0,05	—	—	—

IV. CONCLUSIONS

Il apparaît, à travers l'ensemble des résultats présentés dans cette étude, que la microsonde de Castaing se révèle être un outil précieux dans l'étude de l'altération des minéraux et des roches, et ce à différents points de vues :

1. pour préciser certains aspects de détail caractérisant les minéraux des roches : par exemple, la coloration des plagioclases ou encore les phénomènes de rétro-morphoses les plus discrètes au sein des biotites ;

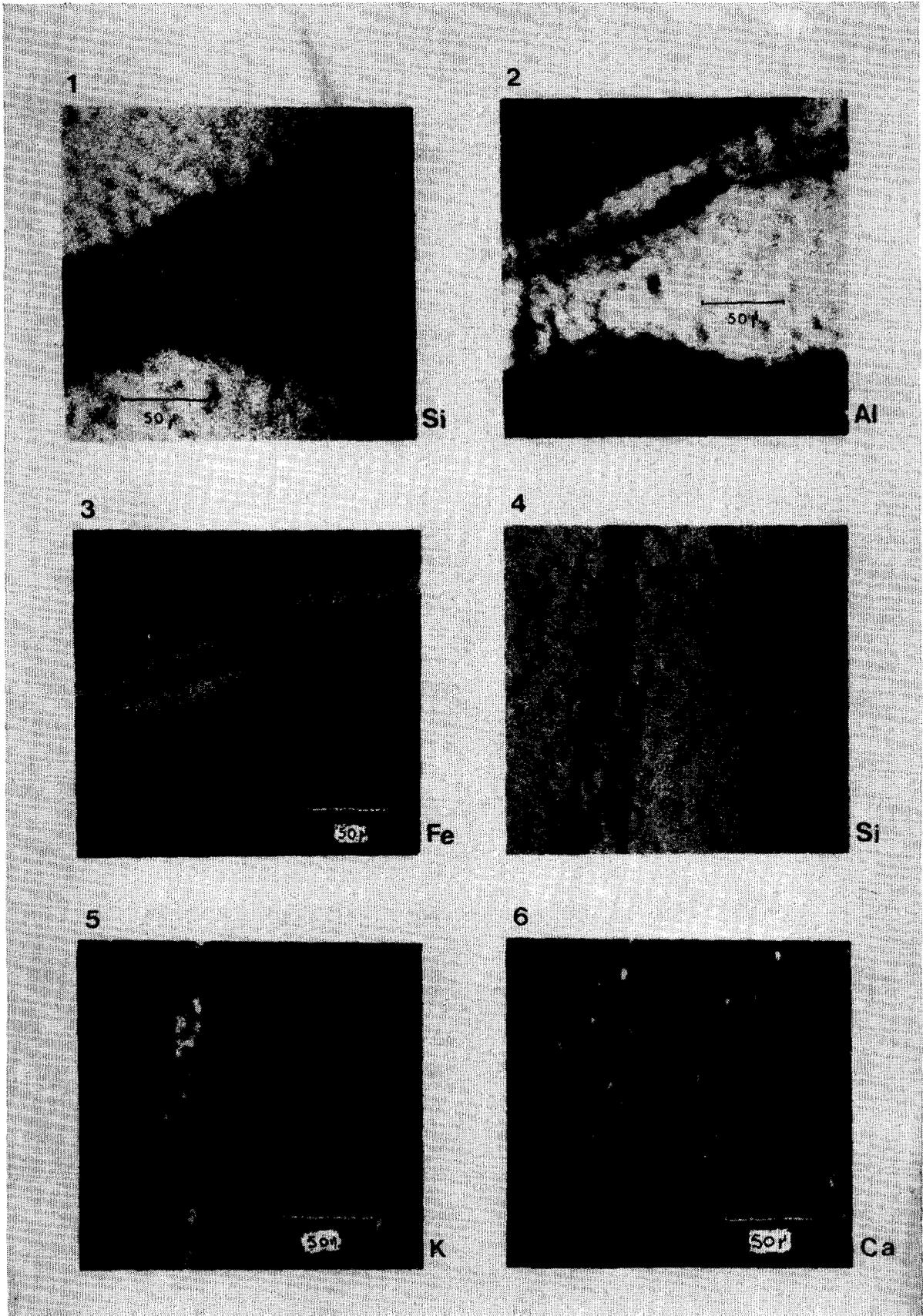
2. pour établir un bilan microgéochimique de l'altération ;



PL. VI

Photos 1 et 2. — Cartes de répartition de Si et Al dans un cristal de plagioclase renfermant de la kaolinite et de la gibbsite naissante (profil de Nataloup).

Photos 3, 4, 5 et 6. — Répartition de Si, Al, Fe et Na dans un plagioclase altéré en kaolinite et gibbsite. La gibbsite est concentrée dans une zone fissurale et accompagnée d'une auréole d'oxyde de fer (profil de Montsauche).



PL. VII

Photos 1, 2 et 3. — Image de la répartition de Si, Al et Fe dans un grain de quartz extrait de l'arène de Montsauche. La fissure renferme de la gibbsite allochtone.

Photos 4, 5 et 6. — Cartes de Si, K et Ca dans un grain de quartz extrait de l'arène de Marly près d'Issy-l'Evêque. On note une concentration de K et Ca le long du plan fissural.

3. enfin, pour apporter les preuves chimiques de l'existence d'une « polyminéralogenèse » secondaire à partir d'un même minéral primaire.

1. ETUDE DE CERTAINES PARTICULARITÉS DES MINÉRAUX : BIOTITES DE RÉTROMORPHOSE ET COLORATION DES PLAGIOCLASES

Les cartes de répartition et traversées permettent de détecter assez aisément les biotites de rétro-morphose, même dans le cas où celles-ci ne renferment pas de plages chloritisées. En effet, les taux de potassium, de titane et de magnésium de ces micas ont déjà subi des modifications, *avant même* que l'altération superficielle ne soit intervenue. Il devient donc possible aujourd'hui de les distinguer des biotites saines au sens strict du terme, ce qui évite de les utiliser comme minéral de référence. En ce qui concerne le brunissement primaire et secondaire des plagioclases, le rôle prépondérant du fer a pu très nettement être mis en évidence.

2. CONNAISSANCE DU BILAN GLOBAL MICROGÉOCHIMIQUE

Le processus guidant l'altération des différents minéraux peut être caractérisé de la façon suivante :

— *Dans le cas des micas trioctaédriques*, il s'agit d'une altération essentiellement *soustractive*. L'évacuation des composants les plus mobiles et le développement de l'altération au sein des paillettes sont guidées par les plans de clivage. L'évolution des biotites se révèle être ainsi un phénomène continu affectant progressivement l'ensemble du mica.

— L'altération des *plagioclases* se présente, en revanche, comme pouvant être *soustractive* ou à la fois *soustractive* et *additive*.

Le caractère soustractif ressort très nettement des exemples d'analyses des plages altérées en kaolinite et en gibbsite : perte quasi totale des ions compensateurs Ca et Na associée à une désilicification plus ou moins avancée. Certaines plages kaoliniques renferment probablement de l'alumine amorphe, c'est-à-dire non cristallisée en gibbsite.

Dans beaucoup de cas, soustraction et addition interviennent simultanément. C'est ce qui est réalisé assez nettement dans les plages de séricite et les zones brunifiées où un apport, soit de potassium, soit de fer, se manifeste au sein d'aires dépourvues de Ca et Na.

Notons aussi que dans les plagioclases, la répartition des minéraux secondaires semble guidée par les microfissures.

— *Le quartz*, fournisseur de silice par le biais des phénomènes de dissolution et de corrosion (F.K. Seddoh, 1973), joue un rôle de « piège » vis-à-vis des composants libérés par les minéraux voisins et le complexe d'altération. Son évolution géochimique apparaît ainsi comme *soustractive* ; toutefois, un *apport* d'éléments probablement sous forme « particulière » a pu également être mis en évidence grâce aux analyses à la microsonde.

3. CONSÉQUENCES CRISTALLOCHIMIQUES :

Existence d'une « polyminéralogenèse » secondaire au sein d'un même minéral primaire

Les analyses à la microsonde de Castaing apportent la preuve chimique de la coexistence de plusieurs constituants secondaires au sein du même minéral primaire. Ainsi, pouvons-nous déceler, dans les plagioclases par exemple, trois ou quatre minéraux différents : la séricite secondaire, la kaolinite, la gibbsite. En faisant simultanément appel au bilan géochimique et à la provenance des éléments qui entrent dans la genèse des constituants secondaires, nous avons été conduits à recenser les diverses possibilités d'altération et de redistribution pouvant se présenter à l'échelle microgéochimique dans le milieu superficiel (tabl. XI).

TABLEAU XI

Bilan microgéochimique et minéralogique de l'altération des minéraux

Composants intéressés	Signe du bilan	Provenance des composants	Type de phénomène
Éléments	soustractif	—	Autochtonie s.s.
	soustractif et additif	intra-minérale	Autochtonie s.l.
		extra-minérale	
Constituants particuliers	additif	extra-minérale	Allochtonie chimique
		extra-minérale	Allochtonie minéralogique

— *Allochtonie et autochtonie*

Comme l'indiquent les résultats du tableau XI, il devient possible de distinguer dans les minéraux de néogénèse, d'un côté, une phase secondaire autochtone : gibbsite et kaolinite naissantes formées en certains points des plagioclases ; d'un autre, une *phase de minéraux secondaires comportant une part de composants allochtones* et généralement centrée sur les plans de fissures. Il est difficile dans le cas des plagioclases par exemple de faire une distinction entre ce qui est *allochtonie chimique*, sorte de nourrissage lié à un apport d'éléments (Si, Al, Fe), et l'*allochtonie minéralogique* au cours de laquelle une migration ou un piégeage de particules de kaolinite et gibbsite se produit dans les zones de grande circulation d'eau.

Dans l'altération des plagioclases, les analyses ne permettent pas non plus de distinguer nettement entre l'*apport intra-minéral* (redistribution d'ions sur une faible distance à l'intérieur du cristal) et l'*apport extra-minéral* où les éléments piégés viennent de l'extérieur du minéral. Nous avons l'impression cependant que très souvent les deux types de migration coexistent au sein des constituants étudiés.

La résolution de ces problèmes semble plus aisée dans le cas de l'étude des grains de quartz. En effet, tous les minéraux secondaires piégés dans les fissures sont *allochtones et d'origine extra-minérale*. Nous pensons même, qu'il s'agit dans la plupart des cas d'une *allochtonie minéralogique*.

4. RAPPORTS ENTRE LES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS PRIMAIRES

L'étude de l'altération des roches par les seules méthodes globales avait permis de mettre l'accent sur les relations de filiation existant entre les minéraux primaires et les constituants secondaires qui en dérivent. En se plaçant à l'échelle du cristal grâce à la microsonde de Castaing, il est possible, en plus des relations de filiation citées précédemment, d'observer le comportement simultané des différents minéraux primaires. Il apparaît alors que tous ces constituants sont *solidaires* les uns vis-à-vis des autres et forment *un tout* au cours de l'altération. L'exemple le plus démonstratif à cet égard est celui du quartz qui, bien que très stable, se trouve en relation étroite au cours de l'évolution avec les minéraux plus vulnérables de la roche, les plagioclases et les micas trioctaédriques en particulier.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tous ceux qui ont facilité la réalisation de cette étude : la Direction du CNRS, le Professeur P. Rat de l'Institut des Sciences de la Terre de Dijon, et enfin, les Ingénieurs et Techniciens du Service Microsonde de Castaing au BRGM d'Orléans.

Manuscrit reçu au SCD de l'ORSTOM le 16 avril 1975.

BIBLIOGRAPHIE

- BOCQUIER (G.), NALOVIC (L.J.), 1972. — Utilisation de la microsonde électronique en pédologie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. 10, n° 4 : 411-434.
- BOONE (G.M.), 1969. — Origin of clouded red feldspaths; petrologic contrasts in a granitic porphyry intrusion. *Amer. Jour. Sc.*, 267 : 633-668.
- COLLIER (D.), 1961. — Mise au point sur les processus de l'altération des granites en pays tempéré. *Ann. Agron.*, n° 12, 273.
- DEJOU (J.), 1958. — Etude comparative des phénomènes d'altération sur granite porphyroïde de Lormes et sur anatexites à cordérite du Morvan nord et les sols qui en dérivent. *Thèse*, Clermont-Ferrand, 167 p.
- DEJOU (J.), 1967. — L'altération des granites à deux micas du massif de la Pierre-qui-Vire. *Ann. Agron.*, 18, (2) : 145-201.
- DELVIGNE (J.), MARTIN (H.), 1970. — Analyse à la microsonde électronique de l'altération des plagioclases en kaolinite par l'intermédiaire d'une phase amorphe. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. II, n° 2 : 259-295.
- Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XIII, n° 1, 1975 : 7-25.
- DIDIER (J.), LAMEYRE (J.), 1972. — Répartition géologique et signification des granites rouges. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 274 : 1135-1138.
- GAC (J.Y.), 1968. — Les altérations de quelques roches cristallines des Vosges. Etude minéralogique et géochimique. *Thèse 3^e cycle*, Strasbourg, 77 p., 10 fig.
- GONI (J.), 1966. — Contribution à l'étude de la localisation et de la distribution des éléments traces dans les minéraux et les roches granitiques. *Mém. B.R.G.M.*, n° 45, 18 pl., 26 tabl., 68 p.
- LAMEYRE (J.), 1966. — Leucogranites et muscovitisation dans le Massif Central Français. *Thèse* Clermont-Ferrand, n° 29, fasc. 12, 264 p., 12 pl., 42 fig.
- LEMAITRE (D.), BROUSSE (R.), GONI (J.), REMAND (G.), 1966. — Sur l'importance de l'apport de fer dans la transformation de l'olivine en iddingsite. *Bull. Soc. Fr. Miné. Crist.*, 89 : 477-483.

- MEILHAC (A.), TARDY (Y.), 1970. — Genèse et évolution des séricites, vermiculites et montmorillonites au cours de l'altération des plagioclases en pays tempérés. *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, t. 23, fasc. 3-4 : 145-161.
- MÉTAIS (D.), RAVIER (J.), PHANKIEU DOUNG, 1962. — Nature et composition chimique des micas de deux lamprophyres. *Bull. Soc. Fr. Min. Crist.*, 85 : 321-328.
- NOVIKOFF (A.), TSAWLASSOU (G.), GAC (J.Y.), BOURGEAT (F.), TARDY (Y.), 1972. — Altération des biotites dans les arènes des pays tempérés, tropicaux et équatoriaux. *Sc. Géol. Bull.*, 25, 4 : 287-305.
- ROBERT (M.), 1970. — Etude expérimentale de la désagrégation du granite et de l'évolution des micas. *Thèse Sci.*, Paris, 194 p.
- ROSENQUIST (I.Th.), 1951. — Investigations in a crystal chemistry of silicates. The relation haematites-microcline. *Norsk. Geol. Tidsskr.*, 29 : 65-76.
- SEDDOH (F.K.), 1973. — Altération des roches cristallines du Morvan : granites granophyres, rhyolites. Etude minéralogique, géochimique et micromorphologique. *Thèse Sci.*, Dijon, 377 p.
- SEDDOH (F.K.), PEDRO (G.), 1974. — Caractérisation des différents stades de transformation des biotites et biotites chloritisées dans les arènes granitiques du Morvan. *Bull. Groupe Franç. Argiles*, t. 26 : 107-125.
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Etudes des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Thèse Sci.* Strasbourg, 274 p.
- TSAWLASSOU (G.), 1971. — Géochimie de l'altération des roches granitiques et gneissiques en pays tropical et équatorial. Evolution des biotites et des feldspaths. *Thèse 3^e cycle*, Strasbourg, 68 p.