

E.N.S.A. de RENNES

Département : Productions Végétales

N° D'ORDRE : 79/5

SÉRIE : D

N° DE SÉRIE : 2

T H T H
UNIVERSITÉ DE I A 2

Section Agronomie

KAG

THÈSE

présentée devant :



L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE AGRONOMIQUE DE RENNES
(EN ASSOCIATION AVEC L'UNIVERSITÉ DE RENNES I)

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES

Spécialité : Science du sol - Hydrologie et Géochimie de la surface

par

Pierre CURMI

ALTÉRATION ET DIFFÉRENCIATION PÉDOLOGIQUE
SUR GRANITE EN BRETAGNE

ETUDE D'UNE TOPOSÉQUENCE

Préparée dans le Laboratoire de Sciences du Sol de l'ENSA-INRA - RENNES

Soutenue le 2 Octobre 1979 devant le Jury :

MM.	A. RUELLAN	PRESIDENT DU JURY
	G. BOCQUIER	RAPPORTEUR
	G. CHEVASSU	EXAMINATEURS :
	Cl. CHEVERRY	
	J. ESTEOULE-CHOUX	
	G. PEDRO	

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE : LE CADRE DE L'ETUDE.

- I - Le milieu.
- II - Revue sur les travaux antérieurs.
- III - Conclusions : L'objet étudié, la démarche et les méthodes mises en oeuvre.

DEUXIEME PARTIE : L'ARENE GRANITIQUE.

- I - Etude macroscopique : définition et position des ensembles différenciés dans l'arène.
- II - Ensemble I : arène à structure conservée.
- III - Transition entre l'arène à structure conservée et l'arène à structure détruite : la naissance du fauchage.
- IV - Ensemble II : arène à structure détruite.
- V - Les raies brun rougeâtre.
- VI - Conclusions à l'étude de l'arène.

TROISIEME PARTIE : LES HORIZONS SABLO-LIMONEUX A LIMONEUX.

- I - Etude macroscopique.
- II - Données analytiques.
- III - Etude au microscope optique.

CONCLUSIONS GENERALES.

INTRODUCTION

Cette thèse est une contribution à l'étude des arènes granitiques et des sols qui leurs sont associés, dans le Massif Armoricaïn. Cette étude concerne en effet, l'analyse d'une arène formée par l'altération des minéraux primaires et la perte de la structure⁽¹⁾ originelle du granite. Puis l'analyse des sols eux-mêmes, et de leur variation le long d'une pente.

L'accent sera mis sur la description détaillée des structures, qui seront observées à des niveaux croissants de complexité, depuis l'assemblage élémentaire des constituants, jusqu'à la répartition des sols dans les bassins versants. L'interprétation génétique de ces structures permettra ensuite d'approcher la dynamique du sol passée et actuelle.

Cette étude a été réalisée à partir d'une toposéquence correspondant à un front de carrière. Ceci a permis de ne pas privilégier un axe d'observation vertical et de prendre en compte toutes les variations qui peuvent exister aux différents niveaux d'organisation de l'altérite et des sols.

Le choix du granite comme roche mère est justifié par son importance notable dans le Massif Armoricaïn (*fig.1*) et par la simplicité de sa structure et de sa composition minéralogique.

Cette étude se situe dans le Massif de Pontivy en Bretagne centrale. Elle s'est inscrite au départ, dans le cadre de l'action concertée " Bocages de l'Ouest " menée par l'INRA avec l'aide de l'Université de Rennes⁽²⁾; elle complète les travaux consacrés par CARNET (1978) et MEROT (1978) au régime hydrique et au comportement hydrologique des sols de paysages bocagers et non bocagers. L'analyse fine des structures pédologiques et notamment de la géométrie de l'espace poral, permettraient, en effet, de mieux cerner les modalités de circulation des eaux dans les sols (ANDERSON & BOUMA, 1977; BOUMA & DEKKER, 1978).

Dans une première partie, je présenterai le cadre de l'étude : le milieu et les travaux antérieurs; une seconde partie sera consacrée à un examen détaillé de l'arène; enfin, l'étude de la séquence de sols fera l'objet de la troisième partie de ce travail.

(1) " Structure " en Pédologie signifie assemblage des constituants et correspond en Pétrographie à la " texture ".

(2) Les comptes-rendus des travaux font l'objet d'un ouvrage : " Les bocages " (1976).

PREMIERE PARTIE :

LE CADRE DE L'ETUDE

I - LE MILIEU

Il s'agit d'un massif granitique situé en Bretagne centrale à l'Ouest de Pontivy.

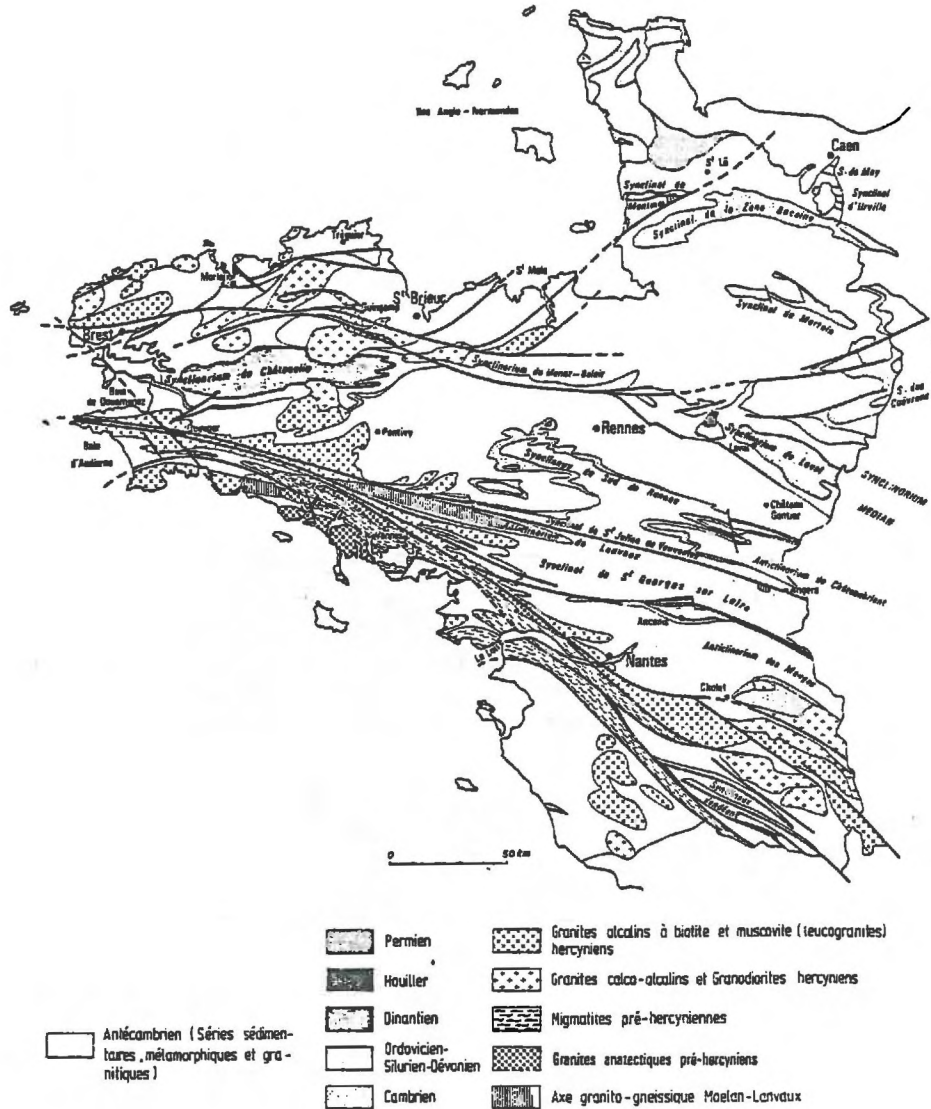


FIGURE 1 - Le Massif Armoricain : Structure et granites hercyniens.

(D'après COGNE in DEBELMAS - 1974)

A - PRESENTATION GEOLOGIQUE

1. Mise en place

Le granite de Pontivy s'est mis en place au cours des plissements hercyniens (pendant et après le plissement principal) (COGNE, 1974). La partie méridionale de ce massif (*fig. 2*), au contact avec l'anticlinal de Cornouaille, a un caractère syntectonique net, tandis que la bordure septentrionale, de forme lobée et recoupant les schistes encaissants, présente un caractère de gisement batholitique (HAMEURT, 1961).

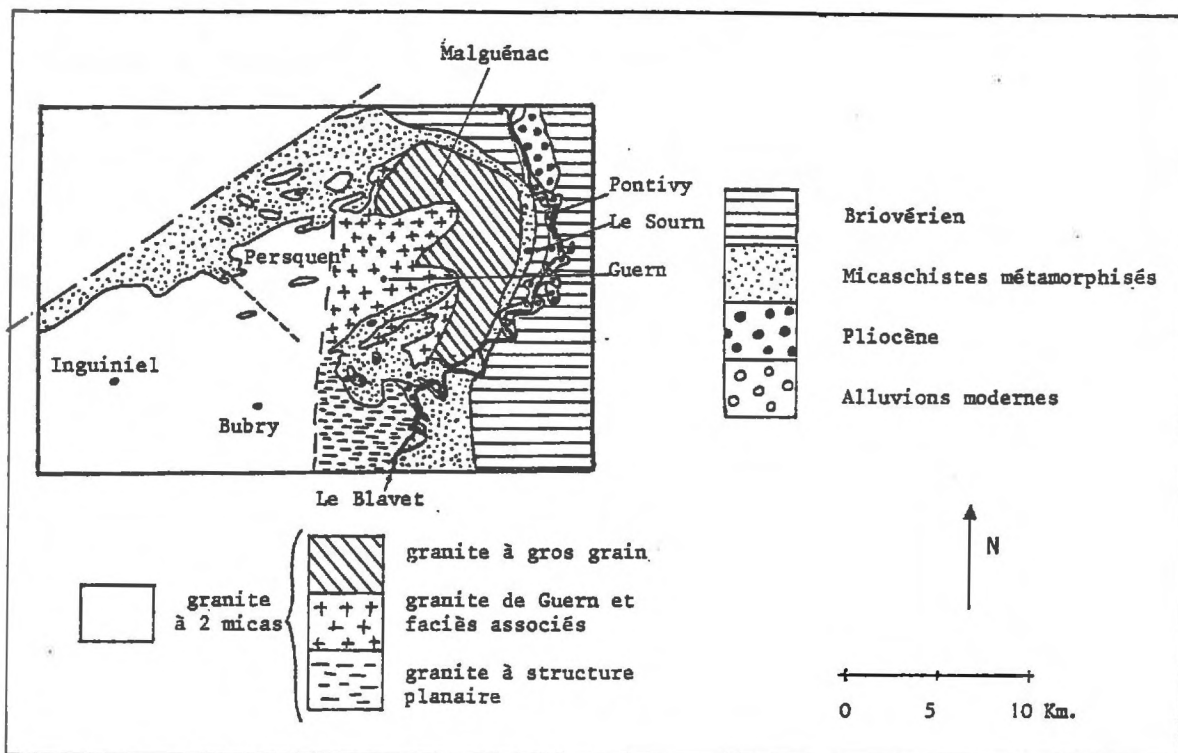


FIGURE 2 - Carte géologique de la partie orientale du massif granitique de PONTIVY.

(D'après les cartes géologiques au 1/320 000ème de Lorient-Brest et Rennes - Cherbourg, et HAMEURT, 1961).

2 . Pétrographie et caractères chimiques

HAMEURT (1961) distingue, dans la partie orientale du massif granitique de Pontivy , trois faciès principaux (fig.2) qu'il relie à l'origine des gisements :

- le granite à gros grains formant une couronne à l'Ouest du massif, correspond au gisement à caractère batholitique;
- le granite hétérogène à grains moyens (granite de Guern) et le granite hololeucocrate à grains fins, dans la partie centrale, représentent des granites d'anatexie cadomiens;
- enfin, le granite à structure planaire, au Sud, correspond à la partie du massif à caractère syntectonique.

Ces différents faciès présentent une composition chimique homogène (tab.1). Leur composition minéralogique reste très proche du "granite à grains grossiers" . Celui-ci présente des grains dont la taille varie entre 2 et 5 mm; les principaux minéraux: quartz, microcline, plagioclases, biotites, muscovites, ont les caractéristiques suivantes .

- Le quartz est polycristallin.
- Le microcline, qui représente le feldspath potassique, l'orthose étant absente, est le plus souvent mâclé Carlsbad, perthitique, et riche en inclusions diverses : plagioclases, biotites, quartz.
- Les plagioclases, essentiellement albite-oligoclase, sont souvent zonés et présentent dans leur coeur une pigmentation de séricite.
- Les biotites, en tablettes épaisses, peuvent être associées à la muscovite. Elles sont criblées d'auréoles pléochroïques qui entourent des inclusions microscopiques. Elles peuvent être transformées localement en chlorites.
- Les muscovites se présentent en très belles cristallisations, recoupant tous les minéraux, et peuvent apparaître en petites aiguilles disposées en épis s'insinuant dans les autres minéraux.

La roche a été soumise, dans son ensemble, à des tensions, d'où l'existence d'une extinction roulante pour tous les minéraux et la présence d'une déformation des phyllites.

En conclusion, le granite de Pontivy est, du point de vue chimique, franchement alcalin : abondance des feldspaths par rapport au quartz; .pauvreté en calcium : absence de plagioclases calciques; et hyperalumineux : abondance de la muscovite.

TABLEAU 1 - Analyses chimiques totales d'échantillons de granite
de PONTIVY
(in HAMEURT 1961)

faciès	granite à grain grossier		granite de Guern	granite holo-leucocrate à grain fin
Réf. échant.	PSA	PSB	-	JH 100
SiO ₂	71,00	70,20	69,24	69,57
Al ₂ O ₃	15,57	15,19	17,16	17,54
Fe ₂ O ₃	0,18	0,90	0,93	0,89
FeO	1,50	1,57	1,43	0,93
MnO	0,01	0,02	0,01	-
MgO	0,69	0,59	0,90	1,14
CaO	0,40	0,50	0,10	0,08
Na ₂ O	2,61	3,17	2,28	2,41
K ₂ O	4,86	4,56	4,68	4,32
TiO ₂	0,21	0,23	0,14	0,23
P ₂ O ₅	0,36	0,35	0,68	0,12
P F	0,85	1,15	1,06	1,45
Totaux :	98,24	98,43	98,61	98,68

B - APPROCHE GEOMORPHOLOGIQUE

Les altitudes sont faibles, comprises entre 220 m. et 120 m. Ce massif est entaillé par de nombreux talwegs, qui déterminent un modelé présentant des versants courts et des interfluves séparés par des distances de 500 à 1 000m.

Quatre types de paysages peuvent être distingués. Ils seront désignés dans la suite de ce travail par les sigles P1, P2, P3, P4, chacun de ces types présentant une couverture pédologique caractéristique.

- Deux occupent des positions hautes, il s'agit de :

- . un plateau, entaillé profondément par des talwegs étroits dont les versants ont des pentes fortes supérieures à 10%, et convexes (P1).
- . un paysage composé de versants dont les pentes sont moyennes, comprises entre 5% et 10%, convexo-concaves; et de talwegs étroites (P2).

- Deux autres, des positions basses, soit :

- . un paysage composé de versants longs, rectilignes, dont la pente est d'environ 5% et de talwegs larges (P3).
- . un paysage composé de versants dont les pentes sont faibles, inférieures à 5% et de talwegs larges (P4).

C - CARACTERES CLIMATIQUES

Cette région de Pontivy a un climat de type océanique marqué par la faiblesse des amplitudes thermiques, une forte humidité relative de l'air et des précipitations très fréquentes mais peu abondantes.

La température moyenne annuelle (1930-1960) est de 11°C à Pontivy. L'écart des moyennes entre le mois le plus chaud (Juillet, 16°C) et le mois le plus froid (Décembre, 4°C) est faible.

La carte des isohyètes (LARIVIERE & VERDOU, 1969) montre que le massif granitique de Pontivy reçoit entre 800 et 1100 mm de pluie par an. Les maxima se situent en hiver, les minima en été (tab.2). Le nombre de jours de pluies supérieures à 0,1 mm est important : 208 à Brest, 168 à Rennes. Le nombre de jours d'orages est faible : 15 à 20 jours par an.

TABLEAU 2 - Hauteur mensuelle des précipitations
Bubry (1964-1976)

Mois	Janv.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Année
Moy mm.	129.0	95.0	77.0	63.8	82.0	57.9	49.3	47.0	99.3	80.0	110.5	108.4	1043.5

L'ETP a été calculée selon la formule de TURC pour différentes stations de Bretagne (GUYOT et al, 1976) (tab.3). Le bilan hydrique P - ETP fait apparaître un excédent important en hiver et un déficit estival qui peut atteindre 300 mm (fig.3).

TABLEAU 3 - Composantes du bilan hydrique en Bretagne (ETP : évapotranspiration potentielle - Méthode TURC
P : pluie)

		Oct.	Nov.	Dec.	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Année
Brest	ETP	40	21	15	15	22	41	63	85	96	97	89	64	643
	P	110	150	140	130	100	80	85	80	55	70	70	80	1150
	ETP-P	-70	-129	-125	-115	-78	-39	-22	5	41	27	19	-16	-502
Rennes	ETP	39	20	12	13	21	44	67	90	108	109	95	68	686
	P	69	74	68	72	50	48	53	54	43	53	49	51	684
	ETP-P	-30	-54	-56	-59	-29	-4	14	36	65	56	46	17	2

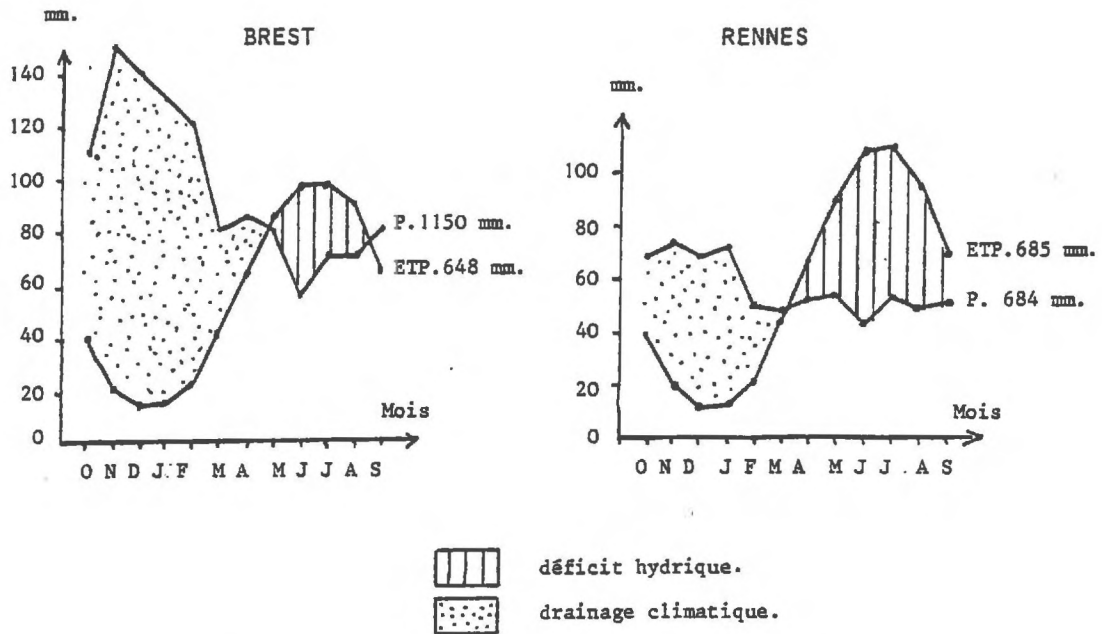


FIGURE 3 - Bilan hydrique - Stations de BREST et RENNES.

D - OCCUPATION DES SOLS

Le recensement général de l'agriculture (1971) montre que dans le Morbihan:

. 71 % de la surface totale du département est cultivée

. 9 % est boisée

. 20 % est représentée par des terres agricoles abandonnées, gagnées par la lande.

Dans le massif granitique de Pontivy, seuls les versants à pentes fortes, supérieures à 10% sont boisées ou envahies par la lande; le reste de la surface est cultivée.

II - REVUE SUR LES TRAVAUX ANTERIEURS

Cette revue concernera successivement les arènes, la couverture limoneuse et enfin la différenciation pédologique.

A - LES ARENES

1 . Altération du granite

a . *En région tempérée*

De nombreux auteurs ont étudiés l'altération des granites en région tempérée, aussi bien dans le milieu naturel que par voie expérimentale. DEJOU et al. (1977)⁽¹⁾ ont présenté une synthèse de ces travaux. L'altération forme des arènes, caractérisées par une désagrégation physique intense et une évolution chimique modérée; l'arène dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs mètres, est un matériau à texture sableuse; la fraction fine (diamètre < 2µm), peu abondante, contient de la vermiculite, de la kaolinite et dans certains cas de la gibbsite. Ces auteurs pensent que le rôle des contraintes physiques (le gal, l'action des sels...) a été surestimé dans l'explication des processus d'arénisation. Ils considèrent que la nature pétrographique de la roche joue un rôle déterminant. Les granites sont en effet constitués de différents minéraux de tailles comparables, présentant une résistance différente à l'altération. Ainsi toute action, même faible, sur les minéraux les plus fragiles entraîne une désagrégation de l'ensemble. Cette action peut être d'origine physique ou chimique, l'ordre d'intervention des processus variant. L'action chimique peut précéder l'action physique : par exemple, le départ du potassium interfoliaire des biotites entraîne l'écartement des feuillets de 10 Å vers 14 Å (ROBERT, 1970); ou inversement, la désagrégation physique des plagioclases favorise leur hydrolyse. Il convient donc dans une étude de l'altération, d'analyser conjointement les transformations structurales et les transformations minéralogiques, comme l'a fait BISDOM (1967) sur un granite d'Espagne.

Ce type d'altération n'atteint pas uniformément l'ensemble de la roche. On pourra observer la juxtaposition de compartiments de granite complètement arénisés sur de grandes épaisseurs et de compartiments simplement diaclasés et non arénisés. Ces variations de comportement pourraient être dues à des variations pétrographiques de la roche, ou à des axes de circulation préférentiels des eaux.

b . *Dans le Massif Armoricaïn*

TARDY (1969) et ESTEOULE-CHOUX (1970) ont étudiés les argiles issues de différentes arènes granitiques du Massif Armoricaïn. On y trouve : la kaolinite en quantité importante, la gibbsite, la vermiculite, les interstratifiés et la montmorillonite. FLAGEOLLET (1977) a caractérisé et cartographié les différents types morphologiques d'arènes que l'on rencontre en Vendée : arène à structure conservée, arène litée et formation à blocs. Enfin, MEUNIER (1977), dans le massif granitique de Parthenay (Deux-Sèvres), a suivi les premiers stades de l'altération de deux arènes à structure conservée. Il distingue trois milieux géochimiques différents :

- Des " microsystèmes de contact " : Au contact entre les micas et les feldspaths potassiques se développent des micas réactionnels, dans les tous premiers stades de l'altération.
- Un " système plasmique ", qui est constitué par la déstabilisation interne des différents

(1) Pour une bibliographie détaillée sur l'altération des granites en région tempérée, cf. DEJOU et al. (1977).

minéraux. La nature des produits secondaires varie en fonction des minéraux parentaux et de la solution qui percole.

- Enfin, un " système fissural " où dominant la kaolinite et les oxydes de fer.

Par rapport à ce dernier travail, l'arène étudiée ici constitue un stade plus avancé de l'altération et présente des modifications structurales importantes que l'on étudiera tout particulièrement.

2 . Distribution des arènes dans le paysage

En Bretagne, la présence et la variation d'épaisseur des arènes dans un paysage granitique semble relativement aléatoire, comme le suggère CHEVASSU (1976) par l'observation de talus de routes et de coupes sismiques. Ainsi, sur les plateaux, l'épaisseur de l'altération peut être très variable sans qu'aucun indice morphologique superficiel n'en témoigne. Des observations analogues ont été faites par AUROUSSEAU (1976) en Morvan granitique.

Il semble cependant qu'une relation entre le modelé et l'importance de l'arénisation puisse exister pour les versants, dans le massif de Pontivy ⁽¹⁾ :

- les pentes très fortes, supérieures à 10 %, ont en général un amont armé par le granite diaclasé et un versant arénisé;
- les pentes plus faibles sont en général plus complètement arénisées.

A l'échelle d'un versant, on a constaté d'autre part que les arènes pouvaient présenter d'autres types que celui dans lequel la structure du granite est conservée. Ces types résulteraient de la déformation de l'arène à structure conservée par déplacement vers l'aval (LEGROS, 1976; AUROUSSEAU, 1976; FLAGEOLLET, 1977). Ce sont : l' "arène fauchée", l' "arène litée" et les "formations à blocs ".

Leur distribution est la suivante, en fonction de la pente (fig.4) : on observe, de la base au sommet des coupes, la succession - " arène à structure conservée " - "arène fauchée " - "arène litée " - cette dernière s'affirmant vers l'aval des versants. Les versants dont l'amont est armé par le granite diaclasé (pente supérieure à 10 %), présentent au-dessus des faciès précédents une " formation à blocs ".

Ces différents types sont surmontés par une formation superficielle à texture plus limoneuse.

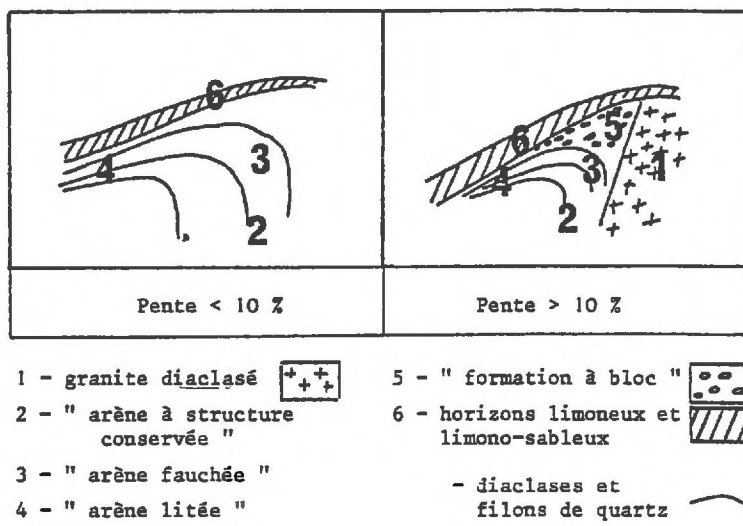


FIGURE 4 - Distribution des différents types d'arènes en fonction de la pente.

(1) Les arènes et les sols du massif granitique de Pontivy ont fait l'objet, depuis 4 ans, d'études détaillées au Laboratoire de Science du Sol de Rennes (JOLY, SEBERT - 1976; CUGNY, RASCLE - 1977; CARNET, 1978; LE CALVEZ, 1979 ; et les observations de RUELLAN, AUROUSSEAU, RIVIERE, DOSSO, CURMI).

B - LA COUVERTURE LIMONEUSE

Les arènes, matériaux à texture sableuse, sont le plus souvent surmontées d'un matériau à texture limoneuse dont l'épaisseur est variable, de quelques dizaines de centimètres à un ou deux mètres. La transition entre ces deux ensembles et leur répartition dans le paysage feront l'objet, dans ce travail, d'une étude détaillée. L'origine de ces matériaux limoneux est discutée, récemment, par LE CALVEZ (1979). Trois hypothèses ont été envisagées : une autochtonie stricte, une allochtonie stricte ou bien un mélange.

Cependant, l'incertitude qui demeure concernant l'origine d'une partie de ces matériaux, ne doit pas empêcher de considérer le sol, jusqu'à la roche saine sous-jacente, comme un ensemble différencié en horizons dont les caractéristiques seront définies et dont on étudiera les relations et la répartition spatiale; mais elle invite à la plus grande prudence lors de l'interprétation génétique de ces horizons. L'horizon est alors simplement défini comme un volume qui présente des caractères dont la variabilité intravolume est inférieure à la variabilité inter-volumes.

C - LA DIFFERENCIATION PEDOLOGIQUE

La différenciation pédologique présentée ici intéresse les un ou deux premiers mètres de la couverture pédologique qui peuvent être prospectés de façon systématique à la tarière. Cela n'exclut pas qu'il puisse exister une différenciation pédologique plus profonde au sein de l'arène, comme la seconde partie de ce travail le montrera.

1 . Principaux types de sols

Les principaux types de sols observés sont les suivants⁽¹⁾ :

- des sols peu épais (20-30 cm), limono-sableux, parfois caillouteux quand le granite diaclasé est proche, très riches en matières organiques, de type rankers;
- des sols peu épais (50 cm), limono-sableux, très riches en matières organiques sur toute l'épaisseur du profil, définis comme "bruns humifères" par J.M. RIVIERE (communication orale);
- des sols moyennement épais (60-80 cm), limono-sableux à limoneux, de type brun acide, fréquemment observés sur granite en région tempérée (SOUCHIER, 1971; AUROUSSEAU, 1976);
- des sols épais (60-120 cm), limoneux, s'apparentant à des sols bruns faiblement lessivés;
- des sols très épais (120-230 cm), limoneux, s'apparentant à des sols bruns faiblement lessivés présentant à leur base un horizon à caractère fragile et de dégradation;
- des sols hydromorphes, à pseudo-gley et à gley, limono-sableux;
- des tourbes

2 . Distribution des sols dans le paysage

Une cartographie au 1/250.000° (*fig. 5*), réalisée en 1978 par CURMI, RIVIERE & RUELLAN, a permis de préciser la composition de la couverture pédologique des quatre types de paysages, précédemment définis (§ I B). Cette cartographie au 1/250.000° est intervenue après la réalisation d'études et de cartographies plus détaillées de zones "test", dans chacun de ces paysages.

(1) La classification de référence est celle établie (provisoirement) par la CPCS (1967).

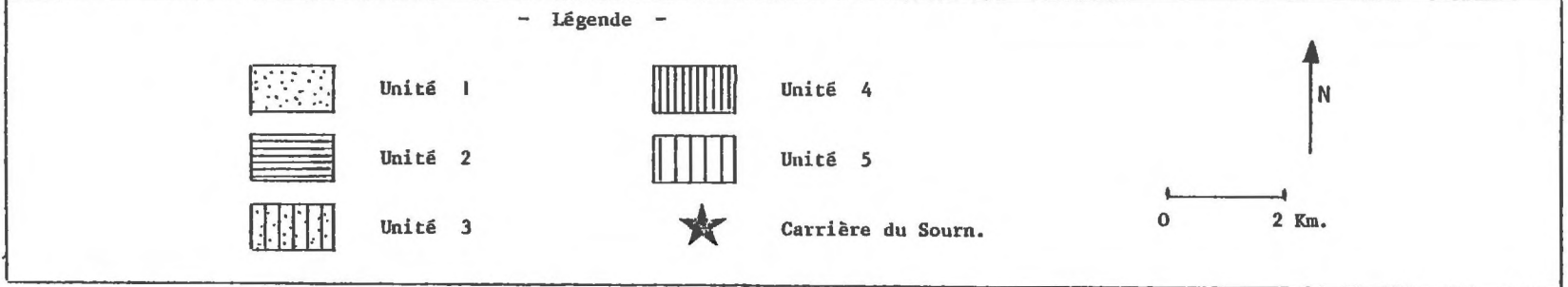
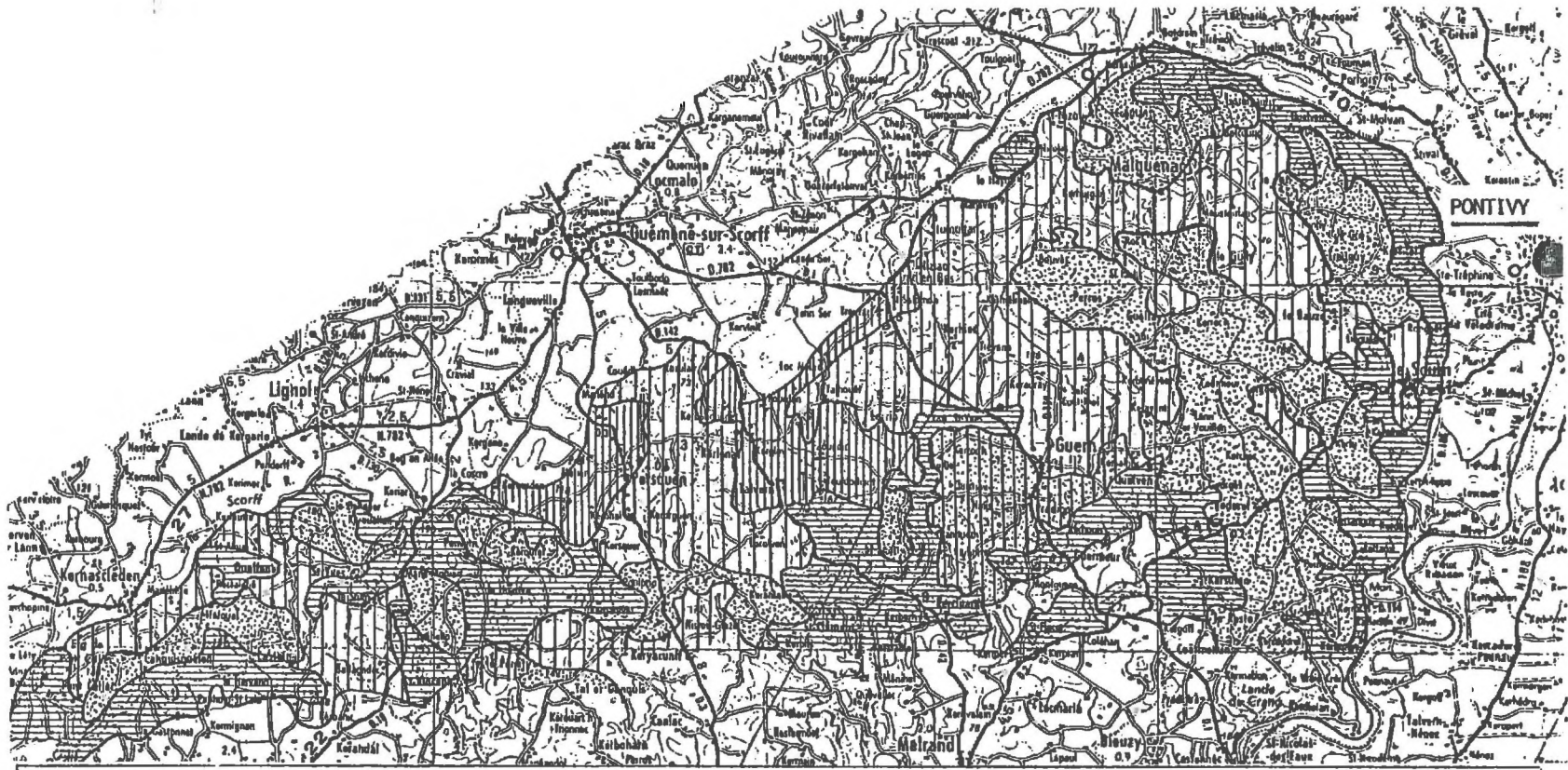


FIGURE 5 - Carte pédologique du Nord-Ouest du massif granitique de PONTIVY (précision 1/250 000ème).
(CURMI, RIVIERE, RUELLAN).

- Paysage P1

- . Sur les plateaux, dominent les sols bruns faiblement lessivés, pouvant présenter localement des signes d'hydromorphie et de dégradation. Ils passent en bordure du plateau à des sols bruns acides.
- . Sur les versants, à pentes supérieures à 10%, se localisent des rankers à l'amont, sur le granite diaclasé, et des sols bruns acides, puis des sols bruns humifères sur les versants arénisés.
- . Les talwegs sont étroits et hydromorphes.

L'échelle de la carte permet de représenter deux unités :

- + UNITE 1 (fig.6) : les sols des plateaux
- + UNITE 2 (fig.7) : les sols des versants à pentes fortes et des talwegs

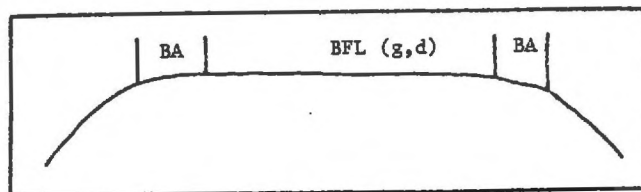


Figure 6 - Séquence de sols de l'unité 1

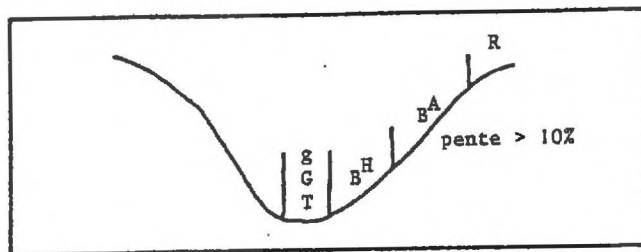


Figure 7 - Séquence de sols de l'unité 2

- Paysage P3

Les sols bruns lessivés dominent sur les pentes longues et régulières; ils passent progressivement aux sols hydromorphes dans les talwegs qui sont larges. Des sols bruns acides sont localisés au sommet des pentes et parfois en bordure des talwegs. Ces différents sols constituent l'UNITE 3 (fig.8).

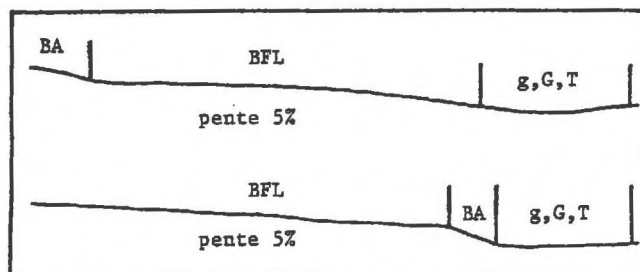


Figure 8 - Séquence de sols de l'unité 3

Légende des figures 7 à 10 :

- R Rankers
- BA sol brun acide
- BH sol brun humifère
- BFL sol brun faiblement lessivé
- g,G,T sols à pseudo-gley, à gley et tourbe
- d caractères de dégradation
- X fragipan

- Paysage P4

Les sols sont peu épais de type brun humifère, puis brun acide. Les talwegs sont larges et hydromorphes. Ces sols composent l'UNITE 4 (fig. 9).

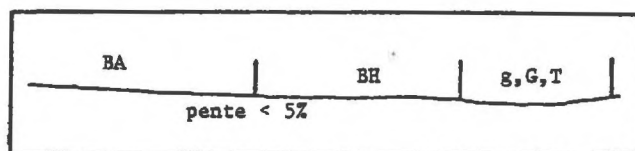


Figure 9 - Séquence de sols de l'unité 4

- Paysage P2

+ Les versants présentent de légères dépressions qui remontent très haut dans les paysages et rejoignent à l'aval le talweg principal; on n'y observe pas d'écoulement superficiel d'eau. Ces dépressions sont appelées "pseudo-talwegs".

- . sur les versants eux-mêmes, les sols sont de type brun acide à l'amont et brun faiblement lessivé épais (60-120 cm) vers l'aval; les proportions relatives de ces deux types de sols sont variables suivant les versants. Localement, le sol brun acide peut apparaître autour du talweg principal.
- . dans les pseudo-talwegs, les sols sont de type brun faiblement lessivé et présentent des caractères fragiques et de dégradation à leur base; ces caractères s'accroissent vers l'aval.

+ Dans les talwegs principaux, les sols sont hydromorphes à pseudogley et à gley et éventuellement tourbeux.

Ces sols forment l'UNITE 5 (fig.10).

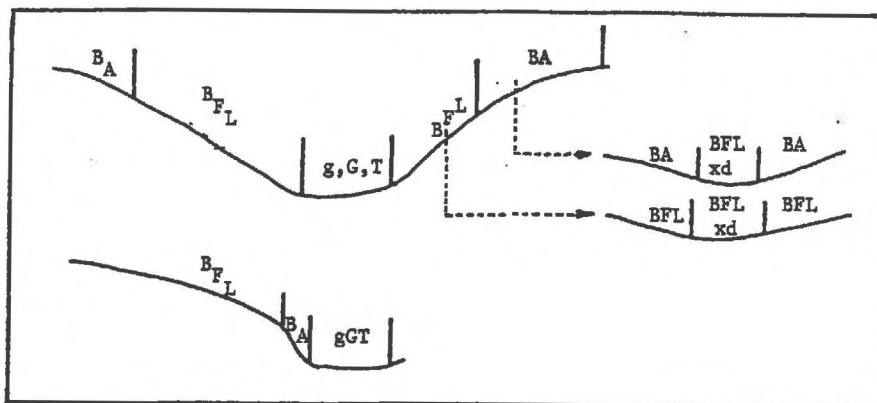


Figure 10 - Séquence de sols de l'unité 5

Une carte à grande échelle du bassin versant élémentaire de PENETY (fig.11) réalisée en 1975 par CARNET, CURMI & DOSSO montre l'extension des différents types de sols et leur distribution. Il faut remarquer la variation très rapide de l'épaisseur et du type de sol: le passage du sol brun acide peu épais au sol brun lessivé à fragipan très épais s'effectue sur moins de 50 mètres de distance. On note aussi la variation de l'épaisseur du sol autour des haies perpendiculaires à la pente (I).

La séquence de sol, qui sera étudiée dans ce travail appartient à l'UNITE 5.

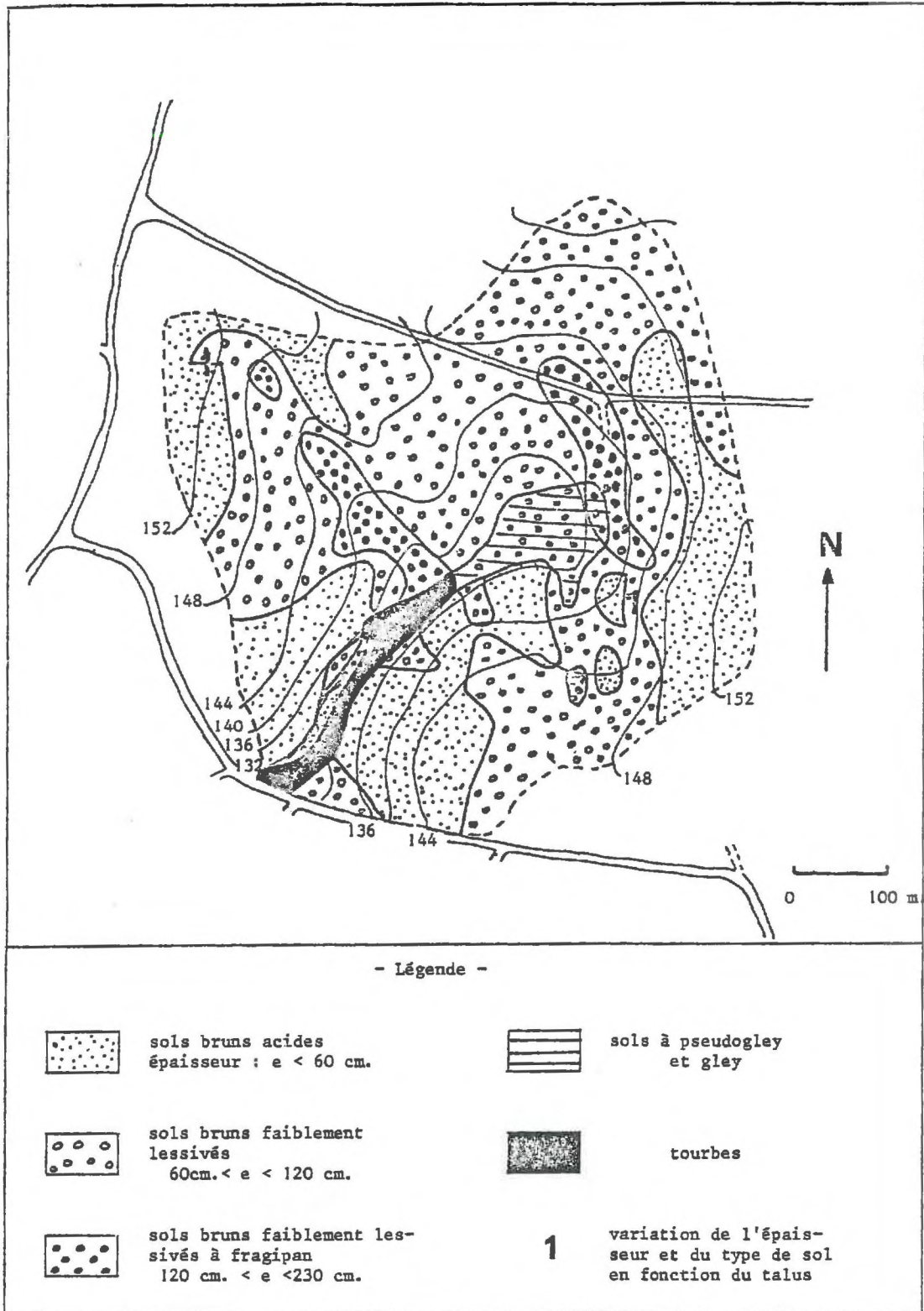


FIGURE 11 - Carte pédologique du bassin versant élémentaire de PENETY.
(CARNET, CURMI, DOSSO).

III - CONCLUSIONS : L'OBJET ETUDIE, LA DEMARCHE ET LES METHODES MISES EN OEUVRE

A - OBJET ETUDIE.

L'objet naturel étudié est une toposéquence représentative d'une partie des sols de la région, et correspondant à l'unité 5 qui vient d'être définie sur les versants à pentes moyennes, avec " pseudo-talwegs ". Cette toposéquence est visible à la carrière du Sourn. Le front de cette carrière est perpendiculaire à l'axe d'une colline, en position relativement amont (fig.12). Il permet d'observer trois situations topographiques différentes :

- une situation amont autour de la ligne de crête,
- une situation de versant,
- une situation aval, coupant un pseudo-talweg en sa partie moyenne.

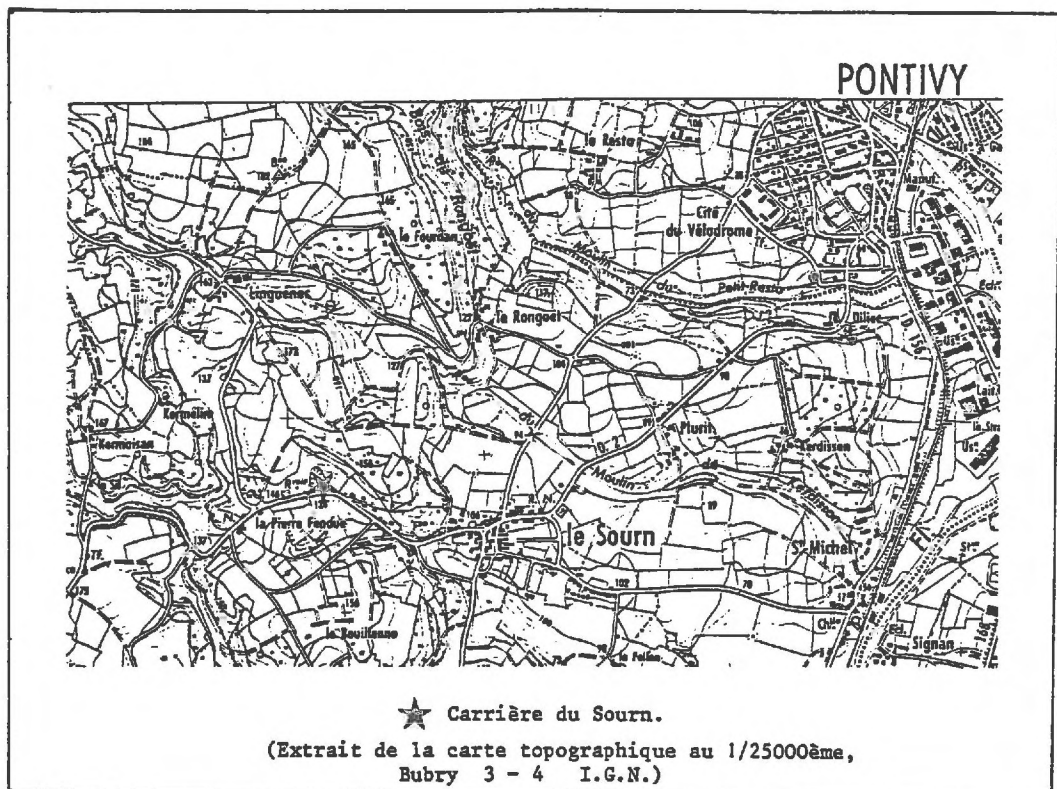


FIGURE 12 - Schéma de situation de la carrière du Sourn.

Cette coupe présente en profondeur une arénisation continue, et en surface une couverture limono-sableuse à limoneuse : on y observe le passage du sol brun acide à l'amont au sol brun lessivé à fragipan à l'aval, dans le pseudo-talweg. L'étude de cette séquence est faite " en continu " sur le front de carrière, afin d'observer les transitions verticales et latérales entre horizons. Ainsi, sont systématiquement relevées et analysées les relations existant entre les divers ensembles différenciés dans cette toposéquence.

B - DEMARCHE.

La démarche adoptée dans ce travail repose essentiellement sur l'analyse pédologique (BREWER, 1964). Le sol peut en effet, être défini par :

- la nature de ses constituants, c'est-à-dire leur composition minéralogique et chimique, leur dimension, leur forme ;
- l'abondance relative des différents constituants;
- l'arrangement des constituants solides, c'est-à-dire les structures.

C - METHODES D'ETUDE.

Les méthodes d'étude mises en oeuvre au cours de cette étude sont le moins destructives possible, afin de conserver l'arrangement des constituants. Il s'agit de :

- la caractérisation macroscopique de coupes sur le terrain,
- l'analyse microscopique d'échantillons non remaniés (la fabrication de lames minces de grandes dimensions a facilité la correspondance des observations aux différentes échelles,
- les déterminations minéralogiques et physico-chimiques classiques sur des échantillons prélevés en fonction des structures,
- l'observation et l'analyse au microscope électronique à balayage et à la microsonde.

Il reste maintenant à envisager le détail des observations et interprétations relatives tout d'abord à l'arène (IIème partie), puis aux sols (IIIème partie).

I - ETUDE MACROSCOPIQUE : DÉFINITION ET POSITIONNEMENT DES ENSEMBLES DIFFÉRENCIÉS DANS L'ARÈNE

Au sein de la carrière du Sourn, l'arène est observable sur toute l'épaisseur de la coupe, soit plus de dix mètres. Il s'agit d'une formation sableuse meuble, de couleur grise, renfermant encore, à l'amont de la coupe, quelques blocs de granite cohérent. Cette arène est parcourue par des filons de quartz et des diaclases dont les bords sont ferruginisés. L'infléchissement vers l'aval de la partie supérieure des diaclases et des filons conduit à distinguer deux ensembles principaux (fig.13).

- à la base, un ensemble I, où l'architecture de la roche est conservée;
- au-dessus, un ensemble II, où l'architecture de la roche est détruite. Cet ensemble II est généralement interprété en régions tempérées froides comme une "arène fauchée" ayant subi un déplacement vers l'aval sur de courtes distances (AUROUSSEAU, 1976; FLAGEOLLET, 1977). Il présente en outre dans sa partie supérieure, une série de raies brun rougeâtre qui se détachent sur le fond gris.

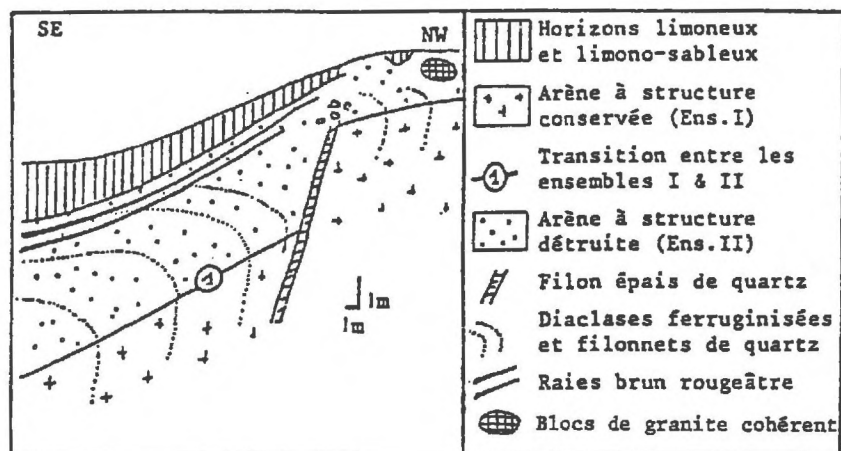


FIGURE 13 - Les principaux ensembles différenciés dans l'arène.

Ensemble I ou Arène à structure conservée.

L'ensemble I a une cohésion moyenne; les minéraux plus ou moins altérés sont jointifs. Une fissuration sub-horizontale est visible, avec un "pas " décimétrique à la base et centimétrique au sommet; cette fissuration s'observe déjà sur les affleurements de granite non arénisés. On n'observe pas de variation latérale.

Transition entre l'ensemble I et l'ensemble II: la naissance du fauchage.

La transition entre l'ensemble I et l'ensemble II s'effectue graduelle-

ment sur un mètre d'épaisseur. Le déplacement vers l'aval de l'arène, souligné par l'infléchissement des diaclases et des filons, est très faible à la base; il s'amplifie quand on monte vers la surface. Il peut alors atteindre quelques mètres.

Ensemble II ou Arène à structure détruite.

L'ensemble II a une cohésion faible, une structure particulière, une porosité importante et intergranulaire. Cet ensemble a 1 à 2 mètres d'épaisseur à l'amont et peut atteindre 4 mètres à l'aval. La variation d'épaisseur n'est pas régulière; elle augmente brusquement après un épais filon de quartz.

Les raies brun rougeâtre.

Les raies brun rougeâtre⁽¹⁾ sont plus ou moins anastomosées, subhorizontales, riches en revêtements argileux qui donnent la couleur à ces raies. Elles sont peu abondantes et d'épaisseur faible, millimétrique à l'amont; elles deviennent plus nombreuses et plus épaisses, centimétriques, vers l'aval. Les limites supérieures et inférieures entre la raie et l'arène environnante sont très nettes. L'organisation des éléments grossiers paraît être la même autour et au sein de la raie : macroscopiquement, celle-ci ne semble pas souligner une structure différente.

A quel type d'arène l'ensemble II et les raies brun rougeâtre s'apparentent-ils ? Sous le terme " d'arène litée ", des choses différentes ont été désignées :

- une alternance de lits à texture grossière, de granulométrie et composition minéralogique différentes;
- une alternance de lits se distinguant par la richesse en argile granulométrique.

Les raies brun rougeâtre appartiennent à ce second type d'arène litée.

L'ensemble II, quant à lui, est une " arène fauchée " qui constitue la transition entre l'arène à structure conservée et l'arène litée du premier type. Certaines coupes, en effet, dans le massif de Pontivy, en Morvan et en Limousin (AUROUSSEAU, 1976; FLAGEOLLET, 1977) montrent que l'on passe de manière continue de l'arène à structure conservée à l'arène fauchée présentant un infléchissement vers l'aval des diaclases et des filons, puis à l'arène litée présentant une stratification horizontale.

(1) Les couleurs ont été déterminées et dénommées à l'aide du Code MUNSELL.

II - ENSEMBLE I, ARÈNE A STRUCTURE CONSERVÉE

A - ETUDE GLOBALE AU MICROSCOPE OPTIQUE

1. Description

Une série de lames minces a été exécutée à partir d'échantillons prélevés depuis la base de la coupe, vers 10 m. de profondeur, jusqu'au sommet de l'ensemble I, soit vers 3m. de profondeur à l'amont. La structure est conservée : les minéraux gardent la disposition qu'ils avaient entre eux dans le granite sain. On constate une variation progressive de la porosité et de l'état d'altération des minéraux (*ph. 1 & 2, pl. 1*).

- Porosité

A la fissuration sub-horizontale, visible macroscopiquement, s'ajoutent :

. un réseau de fissures non orientées qui parcourent la roche. Ce réseau est relativement lâche à la base (maille du réseau 2 à 3 mm); les fissures sont de faible largeur (0,2mm) et apparaissent, aux grossissements utilisés, exemptes de dépôts. Au sommet, le réseau est plus dense, les fissures sont plus largement ouvertes; on y observe localement des dépôts non orientés de particules limoneuses ("squelettane" de BREWER, 1964), de nature variée, fragments de minéraux primaires et produits secondaires, et des concentrations d'oxydes ou d'hydroxydes métalliques isotropes, brun foncé à noir en L.N.⁽¹⁾.

. une microfissuration interne des minéraux, plus ou moins importante suivant les constituants.

- Quartz et Orthoclases

Quartz et orthoclases sont fréquemment traversés par des fissures, dont les bords s'ajustent (BREWER, 1964). Il s'agit donc d'une fissuration uniquement mécanique, qui se développe de la base vers le sommet de l'arène, et modifie ainsi sa granulométrie qui passe de la taille des graviers à celle des sables.

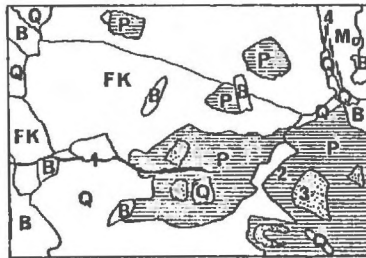
- Plagioclases

Les plagioclases présentent un réseau dense de fissures orthogonales. Ces fissures sont emplies d'un voile microcristallin : les cristallites, inférieurs à 5 µm, sont transparents en L.N. et polarisent dans les gris du premier ordre; ils ne sont pas orientés, le plasma est asépique. Vers 10 mètres de profondeur, ce voile est localisé au coeur du plagioclase (*ph. 1, pl. 1*), tandis qu'au sommet de cet ensemble, il couvre la quasi totalité de l'emplacement du plagioclase (*ph. 2, pl. 1*). Il ne reste de ce dernier que quelques fragments périphériques; ceux-ci présentent cependant une extinction simultanée: on peut donc considérer qu'ils sont en place.

(1) L.N. = " lumière naturelle " ou lumière polarisée non analysée;
L.P. = " lumière polarisée " ou lumière polarisée analysée.

PLANCHE 1 - ARÈNE A STRUCTURE CONSERVÉE (ENSEMBLE 1)

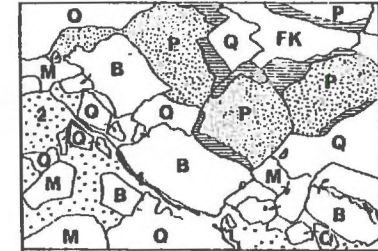
PHOTO 1 - Base de l'arène à structure conservée.
(vers 10 m. de profondeur) (L.P.)



Q : Quartz
FK : Feldspaths
potassiques
B : Biotite
M : Muscovite

- 1 - Fissure traversant tous les minéraux.
- 2 - Micro-fissures orthogonales dans les plagioclases.
- 3 - Voile microcristallin localisé au coeur des plagioclases.
- 4 - Baisse de la biréfringence et exfoliations en bordure des micas.

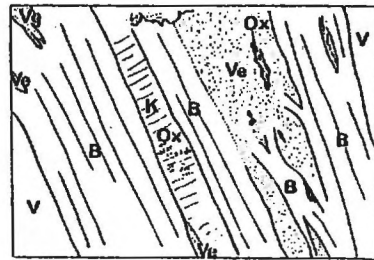
PHOTO 2 - Sommet de l'arène à structure conservée.
(vers 3 m. de profondeur) (L.N.)



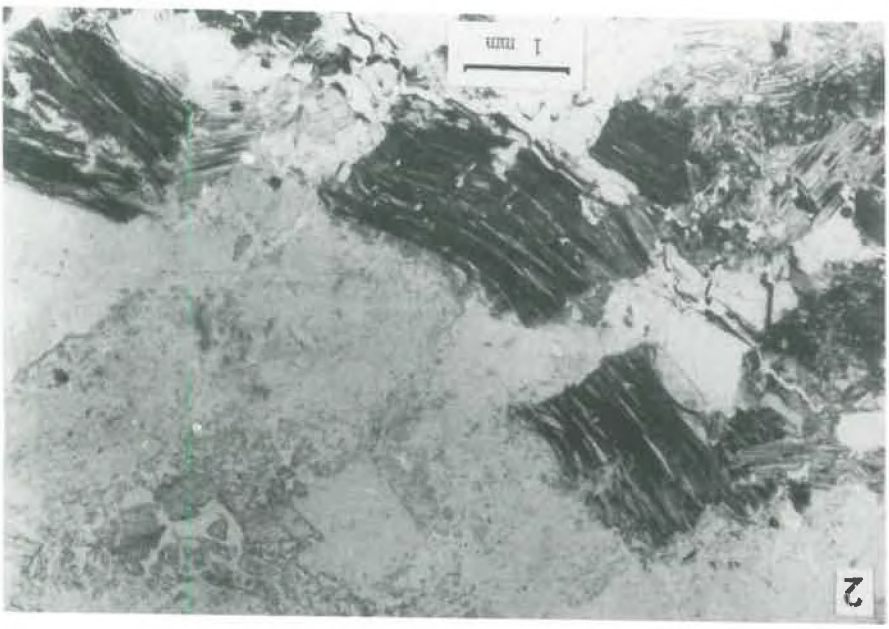
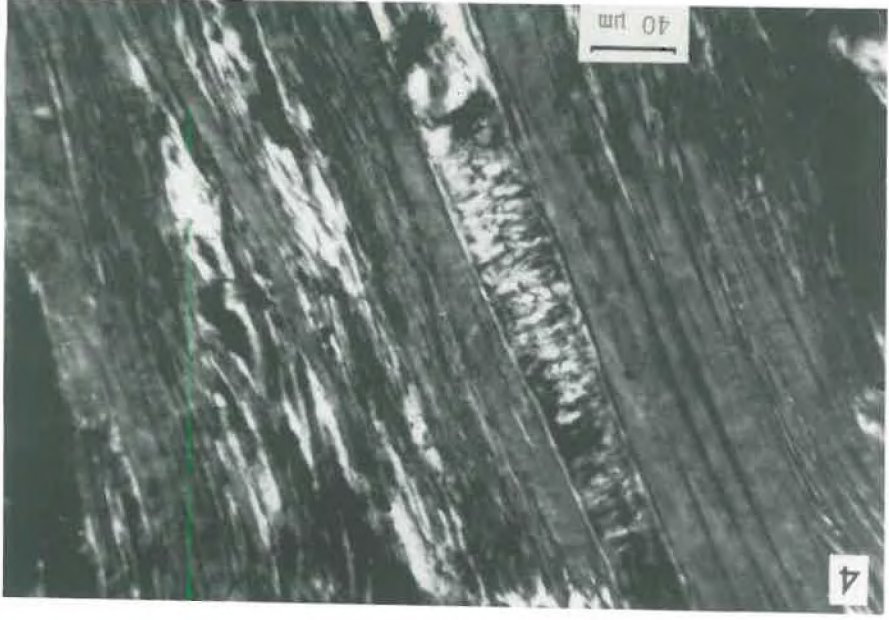
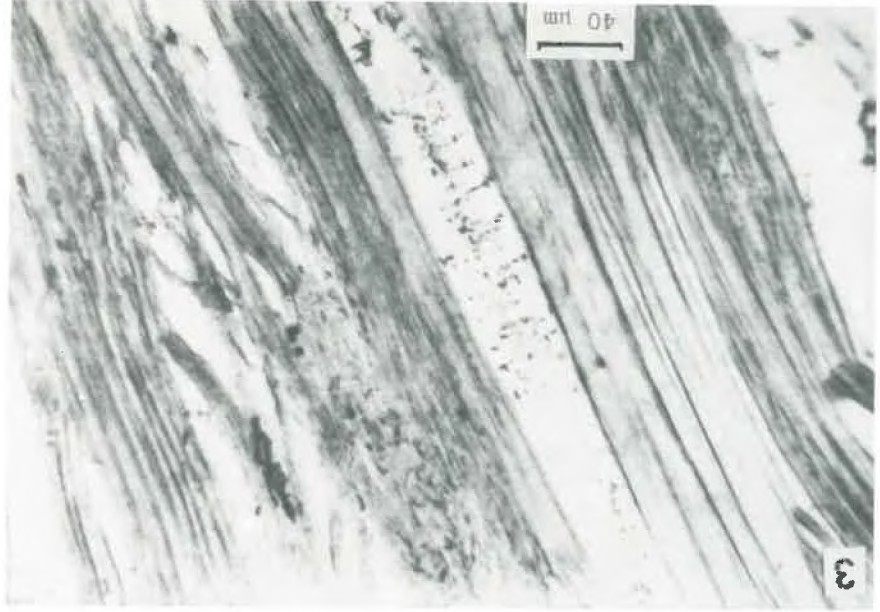
P : Plagioclases
Produits secondaires
Partie saine

- Porosité fissurale importante présentant localement des revêtements opaques (1).
- Plagioclases presque complètement altérés.
- Exfoliation importante des lamelles de biotites.
- Coloration brune du fond matriciel à l'entour des biotites (2).

PHOTO 3 (L.N.) et 4 (L.P.) - Biotite.



V - Vide
B - Biotite saine
K - Minéraux orientés perpendiculairement aux lamelles de biotite (Kaolinite).
Ve - Exfoliation des lamelles de biotite (altération en vermiculite).
Ox - Oxydes ou hydroxydes métalliques cristallisant en aiguilles ou en ponctuations (Fer et/ou Titane).



- *Muscovites*

Les muscovites présentent, sur leur bordure, une baisse de la biréfringence. Celle-ci peut se produire sans déformation du minéral, formant ainsi un liseré blanc en L.P. autour du mica; ou bien, elle accompagne une exfoliation en éventail de l'extrémité des lamelles. Ces caractères apparaissent dès la base de l'ensemble I et conservent la même importance lorsqu'on se rapproche de la surface.

- *Séricites*

Dans les feldspaths on observe des paillettes de 15 à 50 μm . de séricite. Elles sont peu abondantes et s'altèrent comme les muscovites, mais plus complètement : elles s'exfolient et leur biréfringence baisse, constituant des domaines orientés polarisant dans les blancs du 1er ordre. Ces domaines se distinguent du voile microcristallin des plagioclases par la taille plus grande des particules et par leur biréfringence un peu plus forte.

- *Biotites*

Les biotites présentent sur leurs bords une exfoliation en éventail, une perte de la coloration et une baisse de la biréfringence; ces domaines altérés montrent alors des teintes de polarisation dans les blancs du 1er ordre et une extinction simultanée à celle de la biotite, (localement certaines zones exfoliées et décolorées présentent une biréfringence forte : teintes de polarisation dans les bleus du 3ème ordre, ces zones apparaissent en continuité avec les lamelles de biotites, il s'agit vraisemblablement de biotites décolorées).

L'extension des domaines exfoliés est semblable à celle de la muscovite à la base de la coupe. Elle augmente fortement vers le sommet de l'ensemble I; les lamelles s'écartent largement et les domaines exfoliés sont beaucoup plus nombreux (ph. 3 & 4, pl. 1).

Dans ces domaines, on observe des oxydes ou hydroxydes métalliques opaques, cristallisant en aiguilles ou en ponctuations. Autour des biotites, on constate une légère coloration brune du fond matriciel. Cette coloration affecte également les muscovites selon leurs plans de clivage, les produits d'altération des feldspaths, et elle diffuse plus largement lorsqu'on se rapproche du sommet de l'ensemble I.

Enfin, entre certaines lamelles dont les bords sont nets apparaissent des minéraux incolores en lumière naturelle, polarisant dans les gris du 1er ordre et dont l'axe d'allongement est perpendiculaire au plan (001) des biotites. Cette orientation est soulignée par des ponctuations d'oxydes ou hydroxydes métalliques (ph. 3 & 4, pl. 1). Ces minéraux se distinguent de ceux des domaines d'exfoliation par leur biréfringence plus faible et leur extinction indépendante de celle de la biotite. On peut aussi observer ces figures, mais plus rarement, en bordure de la biotite, au contact avec un autre minéral, ou entre des lamelles de muscovite.

2 . Conclusion

L'ensemble I présente les figures d'altération généralement décrites sur granite en pays tempéré (BISDOM, 1967; MEUNIER, 1977). Cependant on n'observe pas les réactions de croissance en bordure des minéraux primaires, décrites par MEUNIER. Celles-ci se produisent en effet dans les tous premiers stades de l'altération, c'est-à-dire avant l'altération interne des différents minéraux; tandis que nos observations concernent un stade de l'altération plus avancé, dans l'arène.

En résumé et conclusion, l'analyse microscopique montre, dans une arène qui conserve la structure originelle du granite, l'évolution suivante des minéraux primaires :

- Quartz et orthoclases sont l'objet d'une fragmentation physique; leurs dimensions passent de la taille des graviers à celle des sables de la base au sommet de l'ensemble I.
- Les plagioclases sont microfissurés et plus ou moins remplacés par un voile microcristallin que l'on peut distinguer des produits d'altération des séricites par la taille, l'orientation et la biréfringence différente des minéraux secondaires constituant ce voile. La formation de ce voile débute au coeur de ces plagioclases zonés, c'est-à-dire dans la zone la plus sodique, et elle gagne la périphérie. Au sommet de l'ensemble I de l'arène, les plagioclases ont ainsi presque totalement disparus.
- Les différents micas, biotite et muscovite s'altèrent simultanément, dès la base de l'arène, comme l'a observé MEUNIER (1977); mais on constate ensuite que la biotite évolue beaucoup plus rapidement. Cette altération se traduit, pour les muscovites, par une baisse de la biréfringence, seule ou accompagnée d'une exfoliation, en bordure du minéral; pour la biotite, par une décoloration, une baisse de la biréfringence et une exfoliation en bordure des lamelles.

De plus, on observe :

- des concentrations de produits bruns ou opaques
 - . colorant le fond matriciel autour des biotites
 - . recouvrant les parois de certains vides
 - . cristallisant en aiguilles et en ponctuations dans les domaines altérés des biotites.
- la présence de minéraux incolores en L.N. et à faible biréfringence, orthogonaux aux surfaces " saines " des biotites.
- dans certaines fissures au sommet de l'ensemble I, la présence de dépôts non orientés constitués de particules limoneuses.

Ainsi cette analyse microscopique a permis de localiser les produits secondaires de l'altération et de préciser leur position intra ou inter-cristalline. Par contre, elle n'a pas permis, étant donné les dimensions très fines de ces constituants secondaires, de déterminer leur nature minéralogique et, à cet effet, d'autres techniques analytiques ont été mises en oeuvre afin de préciser la nature :

- du voile microcristallin des plagioclases,
- des minéraux présents dans les domaines d'exfoliation des micas,
- des concentrations de produits bruns ou opaques,
- des minéraux cristallisés perpendiculairement aux surfaces des biotites.

B - OBSERVATIONS ET ANALYSES A L'ECHELLE DU MINERAL (+)

1. Choix des techniques

Différentes techniques ont été utilisées pour caractériser les constituants. Ce sont :

- des déterminations minéralogiques de la structure des minéraux par *diffraction des Rayons X*, portant soit sur la fraction inférieure à 2 μm ., soit sur des échantillons triés de muscovites et de biotites;
- des données cristallochimiques obtenues sur la fraction inférieure à 2 μm . soit par *analyse thermique différentielle (A.T.D.)* soit par *spectroscopie Infra-Rouge (I.R.)*.
- *des microanalyses chimiques par sonde électronique*. Cette analyse a été effectuée avec un appareil CAMEBAX type MBI muni d'un spectromètre à cristaux, dispersif en longueur d'onde (W.D.S.) et d'un spectromètre dispersif en énergie (E.D.S.) à diode Si (Li), sur des lames minces métallisées au carbone. Dans chacun des principaux types de minéraux primaires, on a procédé systématiquement à l'analyse comparée de plages saines et de plages altérées voisines. Sur chaque plage, les opérations suivantes ont été effectuées :
 - + une analyse qualitative ponctuelle (le volume analysé est de quelques microncubes): on identifie ainsi rapidement, par leurs émissions X caractéristiques, les éléments présents dans le volume analysé (*Spectre*);
 - + pour les éléments majeurs :
 - . une *image X* de distribution d'un élément sur une surface de 100 μm . de côté.
 - . une *traversée* qui permet d'observer les variations relatives des éléments sur un transect d'une centaine de microns de largeur.
 - + une *analyse quantitative ponctuelle* effectuée avec un détecteur E.D.S. muni d'une diode Si (Li), la méthode de correction employée est celle de BENCE & ALBEE (1968). Cette analyse permet d'établir des rapports moléculaires ou atomiques, ainsi qu'une approximation de la formule structurale du minéral analysé.
- Enfin, *la morphologie* de ces minéraux primaires et secondaires peut être observée à des grossissements très variables en *Microscopie Electronique à Balayage (M.E.B.)*, et dans certains cas favorables, leurs relations chronologiques peuvent être déterminées à l'échelle des minéraux.

Ces différentes techniques analytiques qui, par leur association constituent l'analyse pédographique, ont déjà été utilisées en altération et pédologie par de nombreux auteurs (BREWER, 1964; DELVIGNE & MARTIN, 1970; BOCQUIER & NALOVIC, 1972; SEDDOH & ROBERT, 1972; BRESSON, 1974; SEDDOH & PEDRO, 1975; BISDOM & al., 1976; MEUNIER, 1977).

2. Altération des plagioclases

L'examen au microscope optique de l'arène à structure conservée (ensemble I) a montré que la plus grande part des produits secondaires d'altération (fraction < 2 μm .) provenait des plagioclases, mais ces produits n'ont pu être identifiés en microscopie.

(+) Cette étude a été réalisée en collaboration avec M. FAYOLLE, au laboratoire de Pédologie de l'Université de PARIS VII (G. BOCQUIER).

α - Détermination minéralogique de la fraction inférieure à 2 μm .

- Diffraction des Rayons X

La détermination minéralogique de la fraction inférieure à 2 μm , effectuée par diffractométrie des RX, indique la présence essentiellement de kaolinite et d'une très faible quantité d'argiles micacées et de traces de minéraux à 14 Å (*fig.14*). Le diagramme X d'agrégats orientés, saturé Mg, montre les réflexions (001) à 7,33 Å et (002) à 3,59 Å de la kaolinite, étroits et de très forte intensité. On observe enfin, une bande allant de 4,48 Å à 4,13 Å, abrupte vers les petits angles et décroissant progressivement vers les grands angles : cette bande correspond à la réflexion (020) de la kaolinite. Les différents traitements (ROBERT, 1970), KCl, chauffage à 350°C et 450°C n'apportent aucune modification au diagramme; les raies sont fortement affaiblies par chauffage à 550°C.

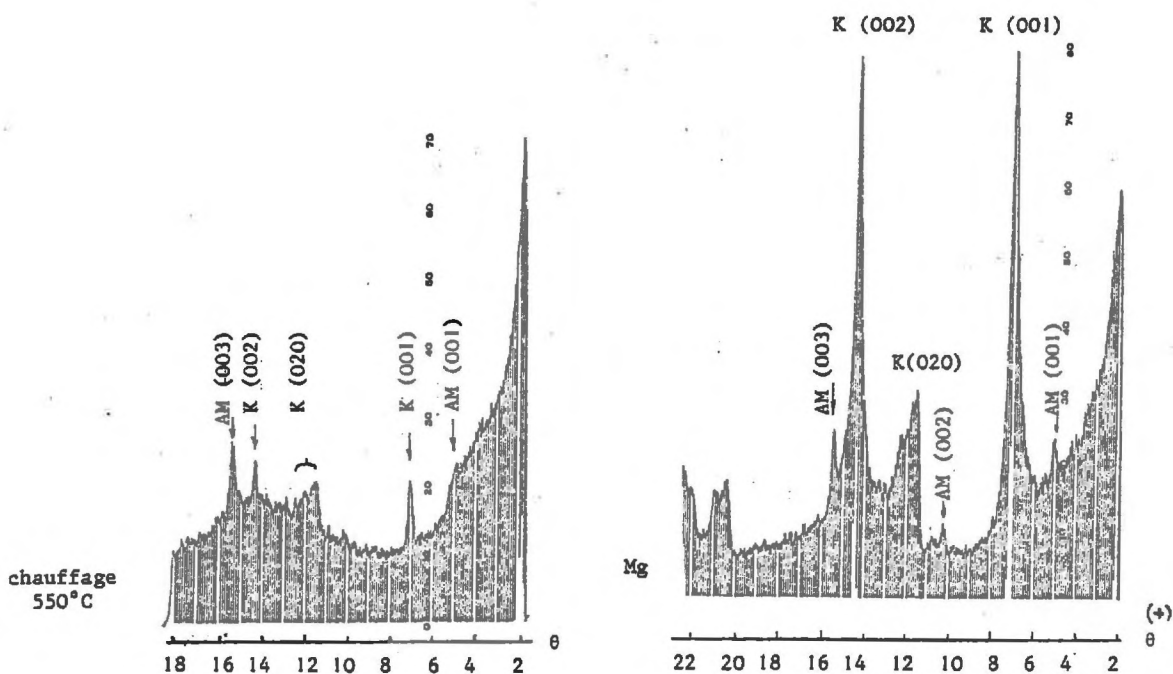


FIGURE 14 - Arène à structure conservée (ensemble I), fraction < 2 μm .
- diagramme Rayons X d'argile orientée -

Un diagramme de poudre (*fig.15*) effectué sur cet échantillon permet de distinguer les différentes kaolinites (SIEFFERMAN, 1973); Ce diagramme présente une allure intermédiaire entre la kaolinite bien cristallisée et la kaolinite désordonnée. En effet, en diagrammes de poudres, la kaolinite bien cristallisée présente trois pics distincts à 4,43 Å, 4,35 Å et 4,15 Å inférieurs à 7,15 Å et 3,56 Å, et la kaolinite désordonnée montre une bande entre 4,43 Å et 4,12 Å, dont l'intensité peut atteindre celle des raies (001) et (002); l'échantillon étudié présente une bande entre 4,5 Å et 4 Å, d'intensité inférieure aux raies (001) et (002) mais dans laquelle ne se dégage aucun pic. On est donc peut-être en présence d'un mélange de kaolinite désordonnée et de kaolinite bien cristallisée.

Cette bande (020) de la kaolinite caractérise toutes les arènes analysées dans le massif de Pontivy ; elle disparaît, par contre, dès la base des horizons de l'ensemble limono-sableux et limoneux.

(+) Appareil C.G.R., Diffractomètre 20 avec cristallobloc type 10 - utilisation d'une anticathode au Cobalt.

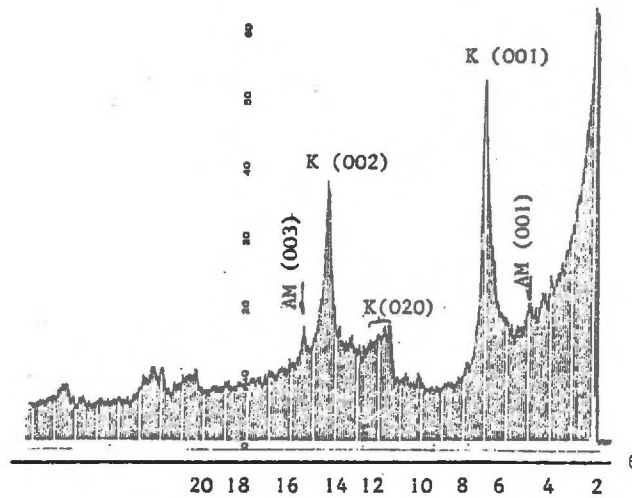


FIGURE 15 - Arène à structure conservée (ensemble I), fraction < 2µm.
- diagramme Rayons X de poudres -

- Analyse thermique différentielle (A.T.D.)

La courbe d'A.T.D. de la fraction inférieure à 2 µm. (fig.16), fait apparaître les accidents thermiques caractéristiques des minéraux du groupe de la kaolinite: pic endothermique à 595°C et pic exothermique à 950°C. On note l'absence de pic entre 290°C et 310°C qui caractériserait la gibbsite et la présence d'un pic endothermique à 150°C qui serait dû aux minéraux à 14 Å.

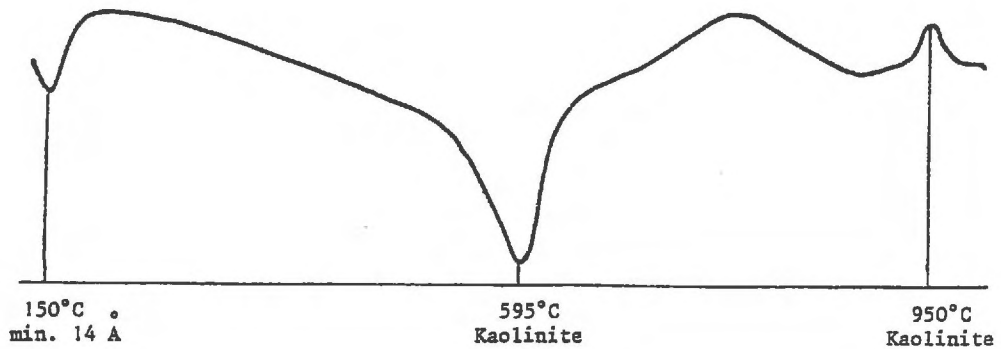


FIGURE 16 - Arène à structure conservée - fraction inférieure à 2 µm.
Analyse Thermique Différentielle.

- Spectroscopie Infra-Rouge (I.R.)

La Figure 17 montre les bandes d'absorption d'une kaolinite assez bien cristallisée (FARMER, 1974; BARRIOS & al.1977).

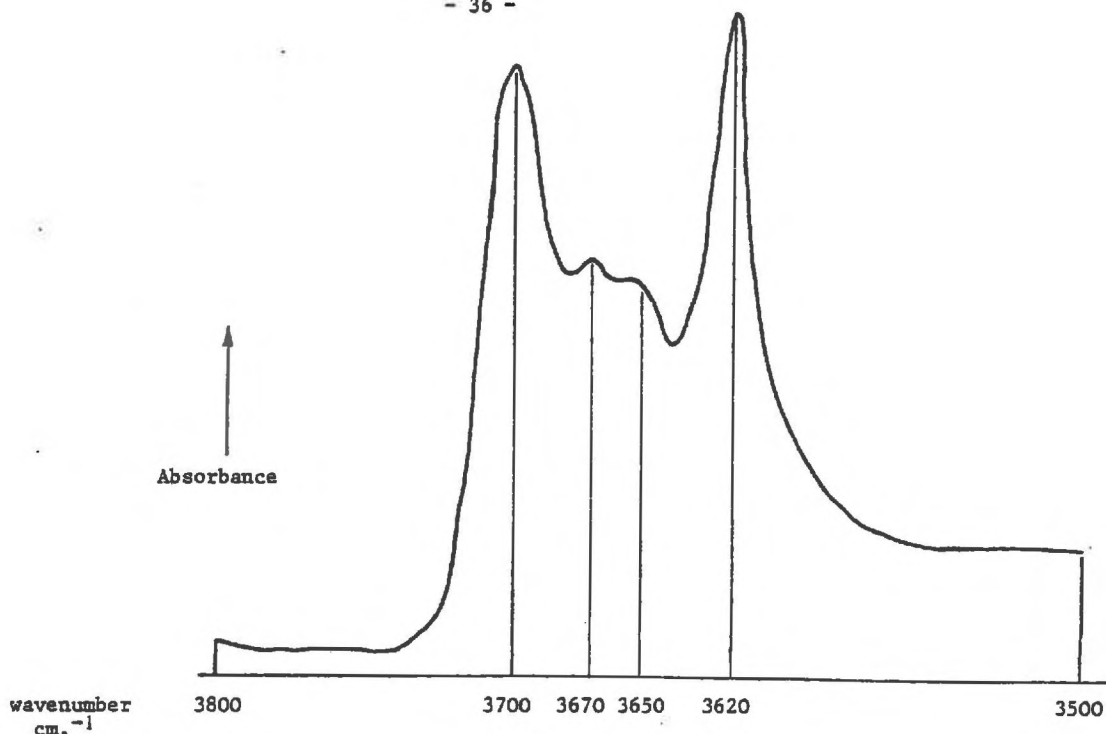


FIGURE 17 - Arène à structure conservée - fraction inférieure à 2 μm . -
Spectre infra-rouge (bande de vibration des OH).

La fraction inférieure à 2 μm . est donc constituée principalement d'une kaolinite assez bien cristallisée avec peut-être un peu de kaolinite désordonnée, accompagnées d'une faible quantité d'argiles micacées et de traces de minéraux à 14 Å. Ce sont là des résultats équivalents à ceux obtenus par TARDY (1969) dans les arènes de ce massif de Pontivy, mais on note l'absence de la métahalloysite et de la gibbsite.

β - Microanalyses à la sonde électronique

Des couples de plages voisines, l'une du plagioclase sain, l'autre du "voile microcristallin" d'altération ont été analysées à la sonde électronique sur cinq plagioclases différents. Les résultats obtenus spectres (*fig. 18*), cartes de répartition (*ph. 2, pl. 2*) et analyses quantitatives ponctuelles (*tab. 4*) montrent que ce voile ne correspond pas à une simple microdivision du plagioclase (COLLIER, 1951; MILLOT, 1949; DEJOU, 1959), mais à un minéral secondaire où le calcium et le magnésium ne sont plus décelables et dont le rapport moléculaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ tend vers 2. Ce rapport varie entre 1,90 et 2,06 pour les plages analysées. Il correspond à celui de la kaolinite, que l'on a déterminé par diffraction des Rayons X. Le dépouillement de traversées comme celles données dans la *planche 2 (ph. 3)* peut montrer la présence de vides entre les deux phases minérales. De tels vides peuvent correspondre au départ de certains éléments constituant le plagioclase (bases et silice), et à la néoformation sur place de la kaolinite qui compose le voile microcristallin. Ce vide est marqué sur les diagrammes, soit par la chute très rapide des teneurs en éléments, soit par leur variation progressive, mais dans un même rapport, les proportions relatives des différents éléments restant les mêmes; il s'agit alors de la bordure en biseau du minéral. On note par ailleurs, dans le tableau d'analyses (*tab. 4*), la présence d'un peu de fer et de potassium issus probablement de l'altération des micas environnants.

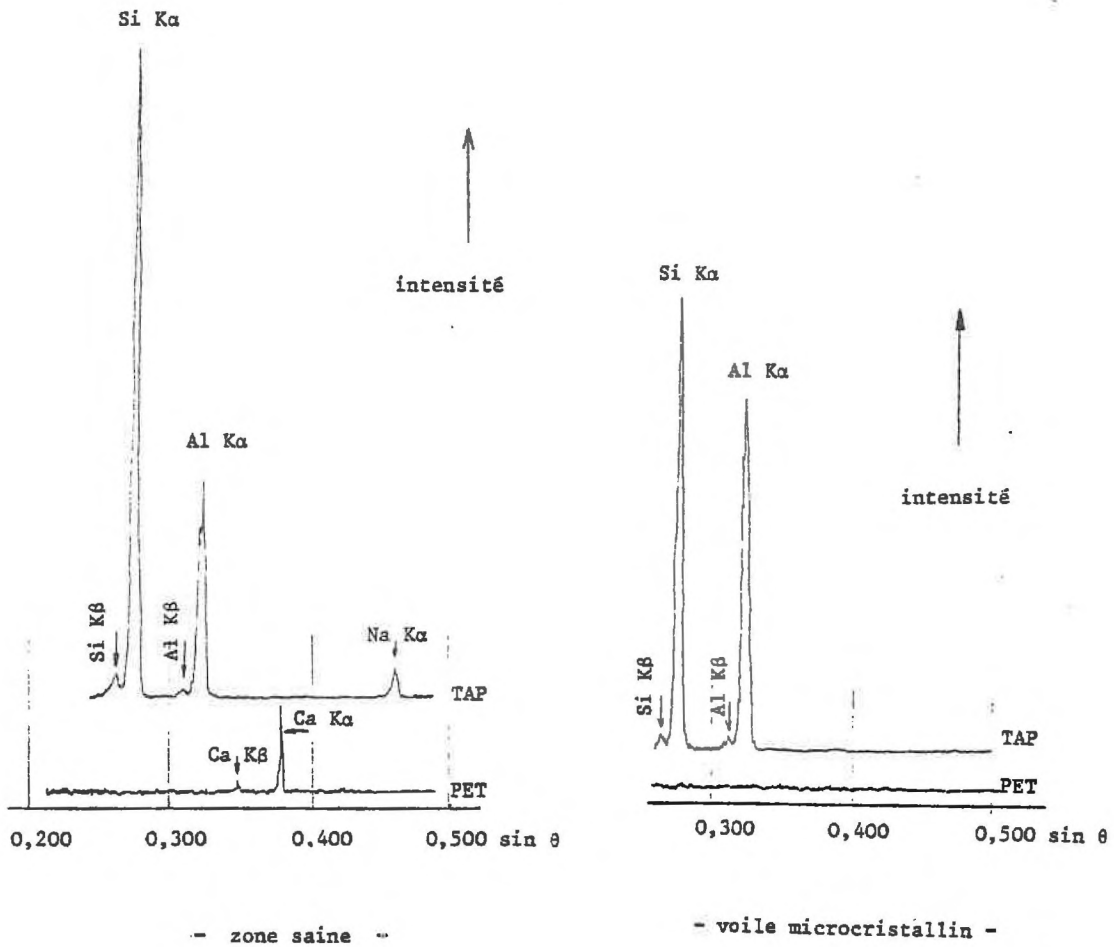


FIGURE 18 - Spectre X d'une zone " saine " du plagioclase et du voile microcristallin.

Dans les spectromètres à dispersion de longueur d'onde, les cristaux monochromateurs réfléchissent sélectivement le rayonnement X émis par la cible suivant la formule de BRAGG :

$$2 d \sin \theta = k \lambda$$

λ = longueur d'onde du rayonnement

θ = angle d'incidence du faisceau

d = distance interréticulaire du cristal monochromateur

Les caractéristiques des cristaux utilisés sont les suivantes :

Cristal	Formule	(hkl)	$2 d$ (Å)	Domaine d'analyse en Å
LIF	LiF	200	4,0267	0,84 - 3,30
PET	$C_5 H_{12} O_4$	002	8,74	1,82 - 7,16
TAP	$C_8 H_5 O_4 Tl$	$10\bar{1}1$	25,75	5,36 - 21,10

(d'après MAURICE & al., 1979)

PLANCHE 2 - ALTÉRATION DES PLAGIOCLASES.

PHOTO 1 - Microscope optique. (L.P.).

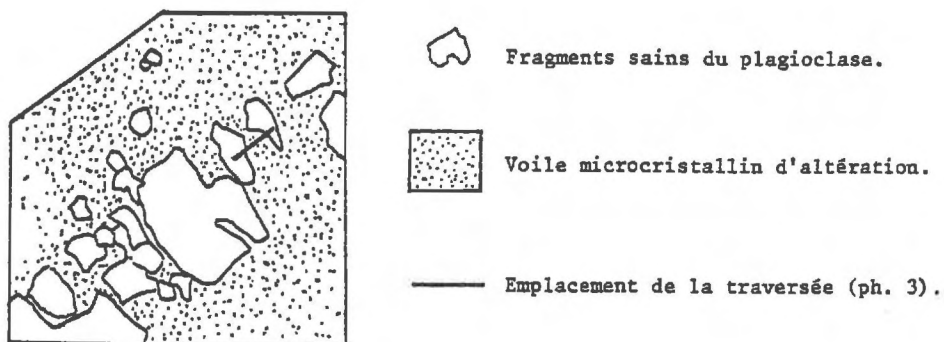


PHOTO 2 - Image X de répartition du Calcium.

PHOTO 3 - Traversée - (W.D.S.).

Distribution relative de 4 éléments (Si, Al, Ca, Na), selon une ligne recoupant des fragments non altérés du plagioclase et le voile microcristallin.

PLAG. - Plagioclase
V - Vide
KAOL. - Kaolinite

PHOTOS 4 & 5 - Clichés au microscope électronique à balayage.

- PHOTO 4 - Plagioclase non lavé : les cavités de dissolution sont comblées de particules fines approximativement hexagonales de kaolinite.
- PHOTO 5 - Plagioclase lavé montrant de belles cavités de dissolution.

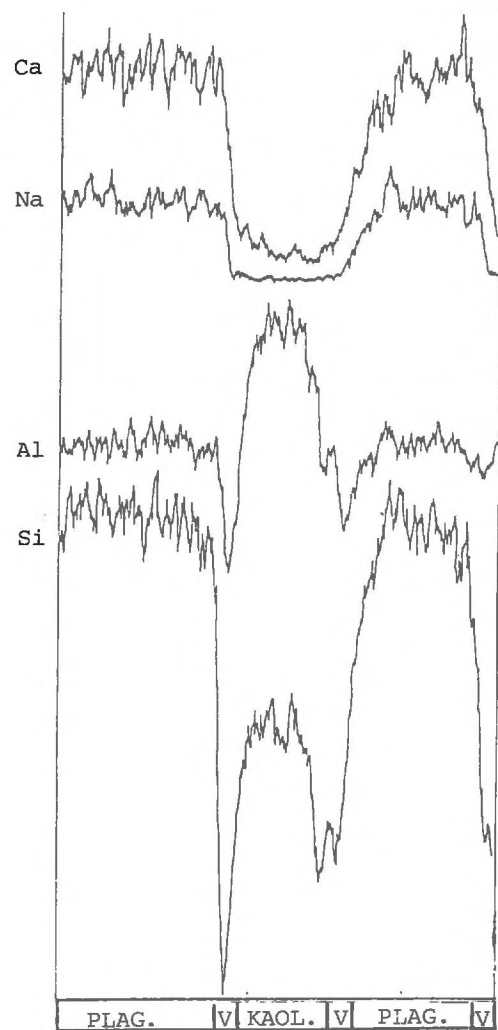
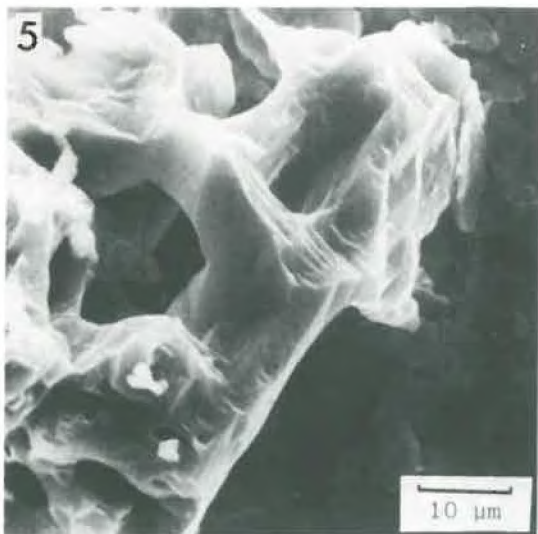
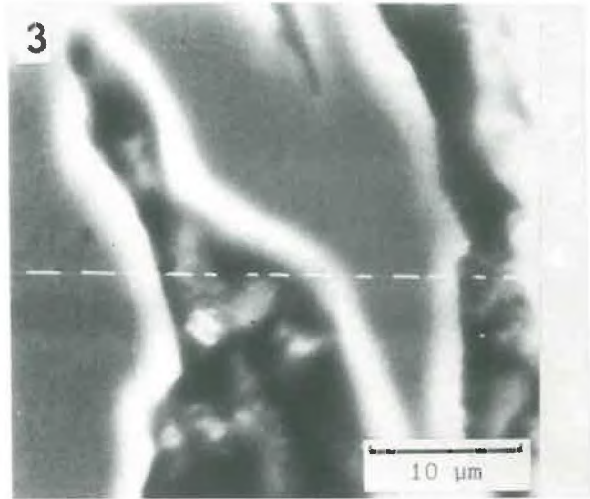
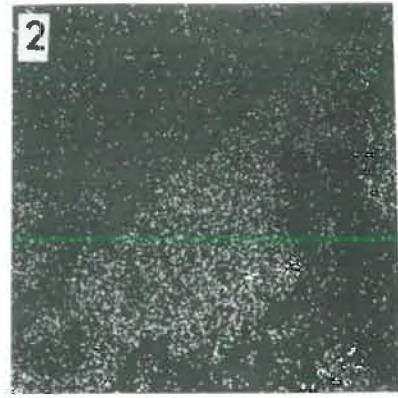
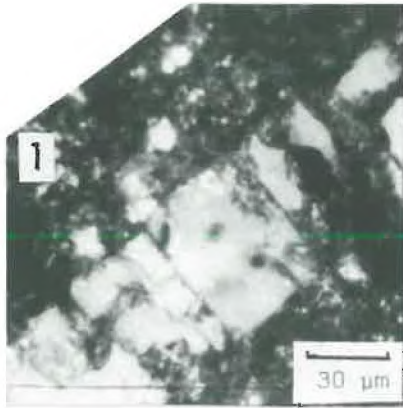


TABLEAU 4 - Analyses quantitatives ponctuelles à la sonde électronique de plages "saines" et altérées voisines de 5 plagioclases (E.D.S. - détecteur Si(Li)).

- PS : plagioclase sain ; PA : plagioclase domaine altéré -

% oxydes pondéraux	PLAGIO 1		PLAGIO 2		PLAGIO 3		PLAGIO 4		PLAGIO 5	
	PS 1	PA 1	PS 2	PA 2	PS 3	PA 3	PS 4	PA 4	PS 5	PA 5
SiO ₂	62.39	37.78	65.15	32.81	63.34	37.67	62.66	42.67	62.89	39.81
Al ₂ O ₃	19.04	33.79	18.27	28.33	19.23	32.81	19.51	35.14	19.25	33.37
TiO ₂										
FeO (total)		0.60		0.55		0.45		0.77		0.88
MgO										
K ₂ O				0.92		0.47		0.39		
CaO	3.24		2.02		2.84		3.57		3.06	
Na ₂ O	11.33		12.47		11.68		11.36		11.39	
TOTAL :	96.00	72.17	97.91	62.61	97.10	71.40	97.09	78.97	96.59	74.07
Rapport moléculaire SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.56	1.90	6.06	1.97	5.59	1.95	5.45	2.06	5.55	2.03

γ - Observations morphologiques au microscope électronique à balayage (M.E.B.).

Les images obtenues au M.E.B. montrent l'existence de nombreuses cavités de dissolution au sein des plagioclases (p.h. 5, pl. 2). A ces grossissements, la surface du plagioclase est nette et non revêtue de produits résiduels amorphes, comme l'a montré BERNER & al. (1977). Ces cavités sont occupées par de fins cristaux non jointifs, approximativement hexagonaux (p.h. 4, pl. 2), de kaolinite.

Par rapport aux travaux de DELVIGNE & MARTIN (1970) sur l'altération d'un plagioclase en kaolinite, dans des diorites en climat tropical humide, il faut noter dans cette arène granitique, l'absence d'une phase amorphe et l'apparition de cristallites de kaolinite dès les premiers stades de l'altération alors que le plagioclase commence seulement à s'altérer. Cette apparition rapide de la kaolinite pourrait s'expliquer en fonction des conditions de milieu, de la manière suivante : pour DELVIGNE, la libération importante du silicium du plagioclase bloque l'évolution du gel, dont le rapport moléculaire SiO₂/Al₂O₃ est supérieur à 2, vers la kaolinite. Ce n'est que lorsque le silicium est suffisamment exporté, et que le plagioclase est complètement altéré, que la kaolinite se forme. En milieu tempéré, la libération du silicium est moins rapide et la kaolinite se formerait dans les cavités intracristallines alors que l'altération du plagioclase est encore incomplète. La formation de grands cristaux de kaolinite au sein des amas de cristallites, décrite par ces auteurs, apparaît de manière très discrète au microscope polarisant dans certains minéraux complètement altérés.

En conclusion, il faut noter que l'altération des plagioclases s'effectue dans cette arène granitique de manière discontinue, par cavités, et que la porosité importante ainsi créée n'est occupée que partiellement par la kaolinite néoformée.

3 - Altération des muscovites

α - Données diffractométriques

Des muscovites ont été triées manuellement puis traitées aux ultrasons. La fraction fine ainsi séparée est analysée par diffractométrie aux Rayons X. Le diagramme X obtenu (*fig.19*) présente les pics du *mica* à 10 Å, 4,95 Å et 3,33 Å; ceux de la *kaolinite* à 7,16 Å et 3,57 Å et une légère bosse entre 15,20 et 17 Å. La kaolinite pourrait provenir de l'altération des minéraux primaires voisins, l'échantillon n'ayant pas été préalablement lavé. La présence d'une légère bosse entre 15 Å et 17 Å laisse présager l'existence d'une phase à 14 Å, de type vermiculite. Cependant, la préparation de ces échantillons apparaît insuffisante pour aboutir à des déterminations précises. Il conviendrait en effet, de traiter une quantité beaucoup plus importante d'échantillon aux ultrasons, puis d'effectuer une séparation granulométrique sur la fraction séparée aux ultrasons, afin de l'enrichir en produits secondaires (MEUNIER, 1977).

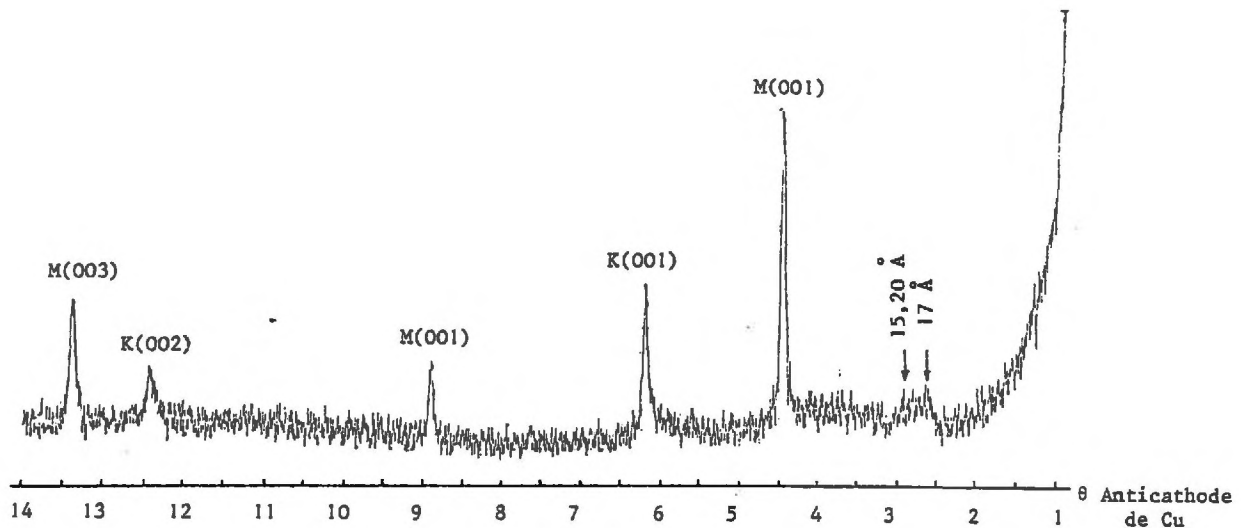


FIGURE 19 - Muscovite, fractions fines séparées aux ultra-sons - diagramme Rayons X -

β - Microanalyse à la sonde électronique

Seules les zones exfoliées, en bordure des lamelles ont été étudiées. Ces zones sont appauvries en potassium par rapport aux zones saines, comme le montrent les spectres X (*fig.20*) et la carte de répartition du Potassium (*ph.2,pl.3*). Sur la traversée (*ph.3,pl.3*), on observe une diminution progressive de la teneur relative en potassium en bordure des zones saines, et une augmentation relative de l'aluminium dans les zones exfoliées. Cette diminution du potassium suggère une évolution par transformation du mica, mais elle pourrait aussi être due à l'alternance (interstratification) de deux phyllites.

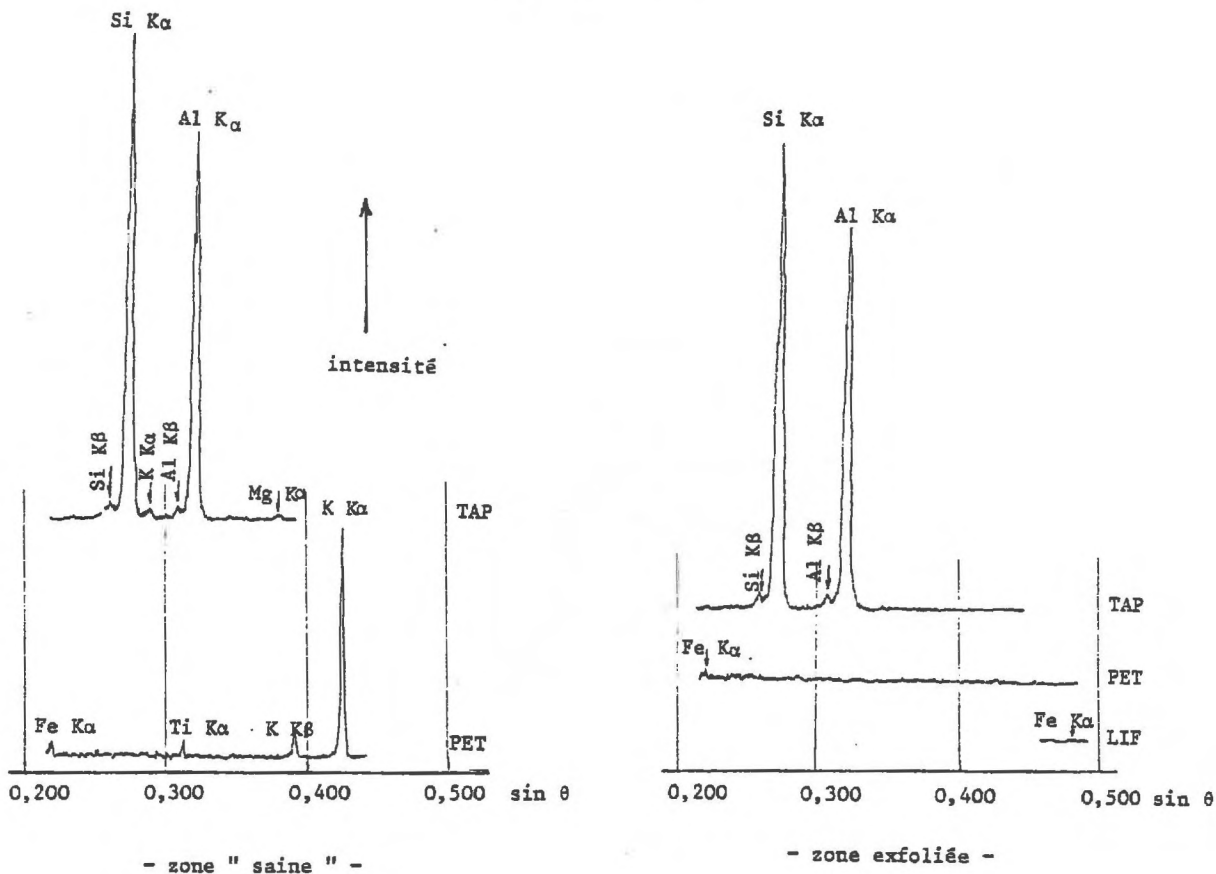


FIGURE 20 - Spectre X d'une zone "saine" et d'une zone exfoliée de muscovite.

Des analyses quantitatives ponctuelles, effectuées sur 4 muscovites différentes, respectivement dans des zones saines et exfoliées, sont présentées dans le *Tableau 5*.

L'évolution des rapports moléculaires de la zone saine à la zone exfoliée montre, en prenant Al_2O_3 comme référence :

- une élimination très importante du potassium interfoliaire, le rapport Al_2O_3/K_2O est 17 à 79 fois plus élevé dans la zone saine que dans la zone exfoliée;

- un départ plus discret des cations octaédriques (Fe, Ti, Mg), le rapport $Al_2O_3/R_1^{(+)}$ est deux fois plus élevé dans la zone saine que dans la zone exfoliée, mais ces cations sont très peu abondants, dès l'origine, au sein de la muscovite saine.

- une légère évacuation de la silice, le rapport SiO_2/Al_2O_3 passe de 2,5 dans la zone saine à 2,2 dans la zone exfoliée.

Ce rapport moléculaire $SiO_2/Al_2O_3 = 2,2$ déterminé dans la zone exfoliée paraît trop élevé pour correspondre à celui de la kaolinite. D'autre part, la teneur en potassium est elle-même trop faible pour qu'on puisse envisager l'individualisation d'un interstratifié mica-kaolinite. On est donc vraisemblablement en présence d'une vermiculite comme le suggéraient les diagrammes de Rayons X réalisés sur échantillons triés.

(+) $R_1 = FeO$ (fer total) + MgO + TiO_2
 $R_2 = K_2O$ + CaO + Na_2O

PLANCHE 3 - ALTÉRATION DES MUSCOVITES.

PHOTO 1 - Microscope optique (L.P.) -

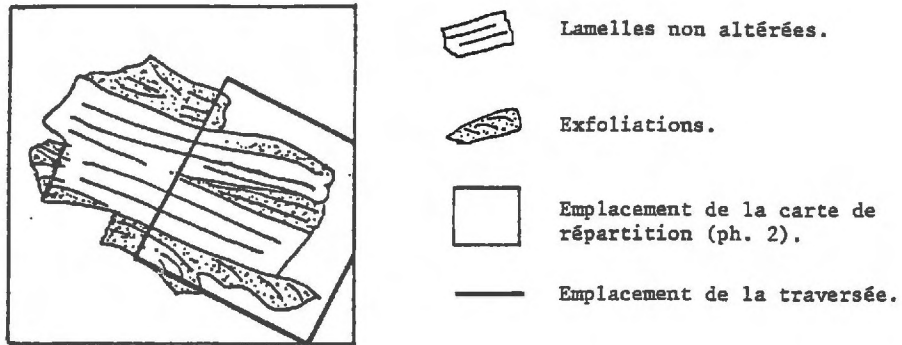


PHOTO 2 - Image X de la répartition du potassium.

PHOTO 3 - Traversée (W.D.S.) -

Distribution relative de 3 éléments (Si, Al, K) selon une ligne recoupant des lamelles saines et des exfoliations.

M - lamelle saine

EX - exfoliations

PHOTO 4, 5 & 6 - Clichés au microscope électronique à balayage -

PHOTO 4 : Apparition d'écailles à la surface des lamelles.

PHOTOS 5 & 6 - Aspect microdivisé du bord des lamelles.

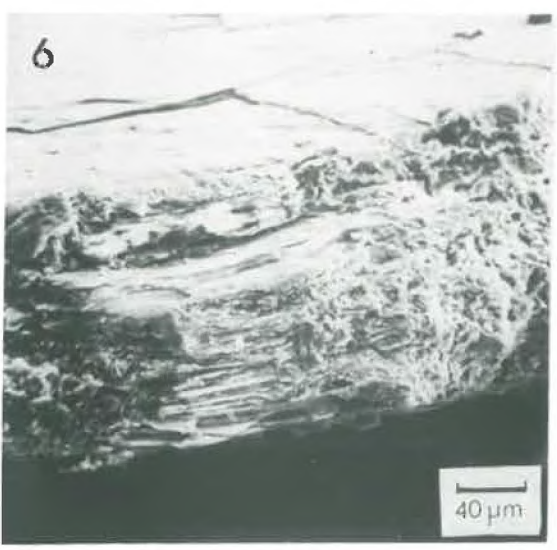
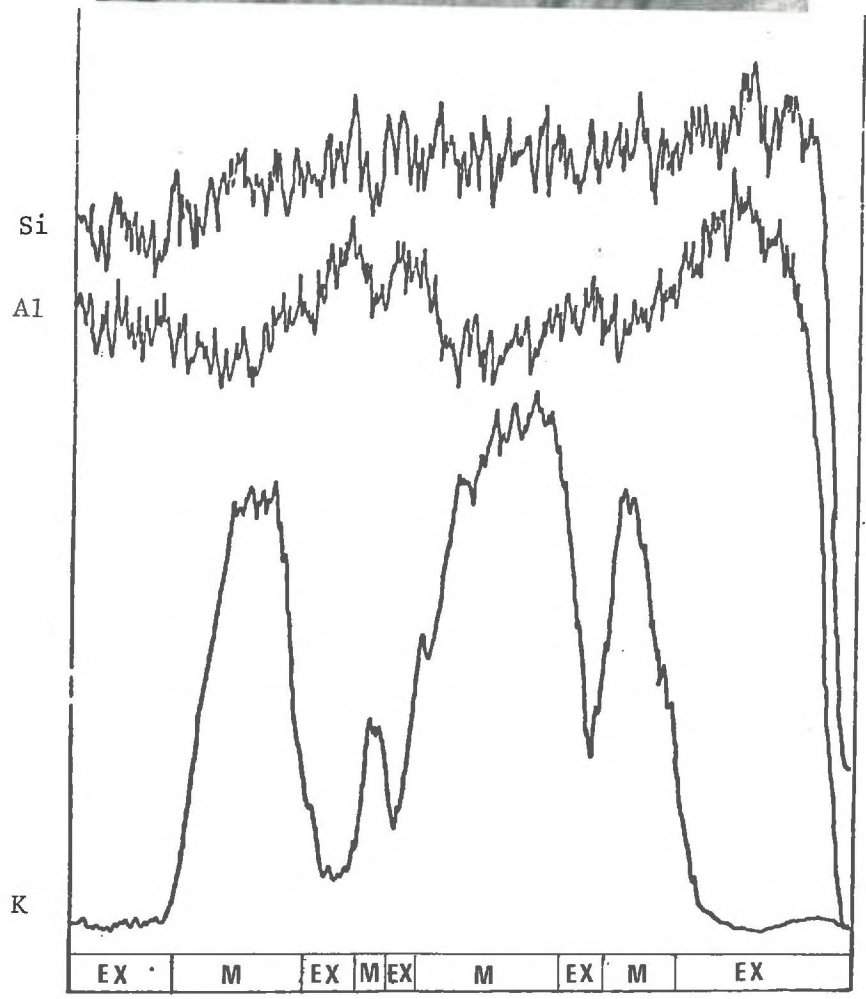
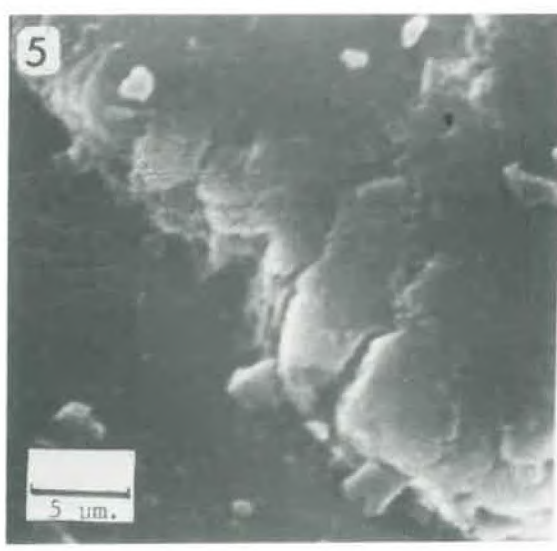
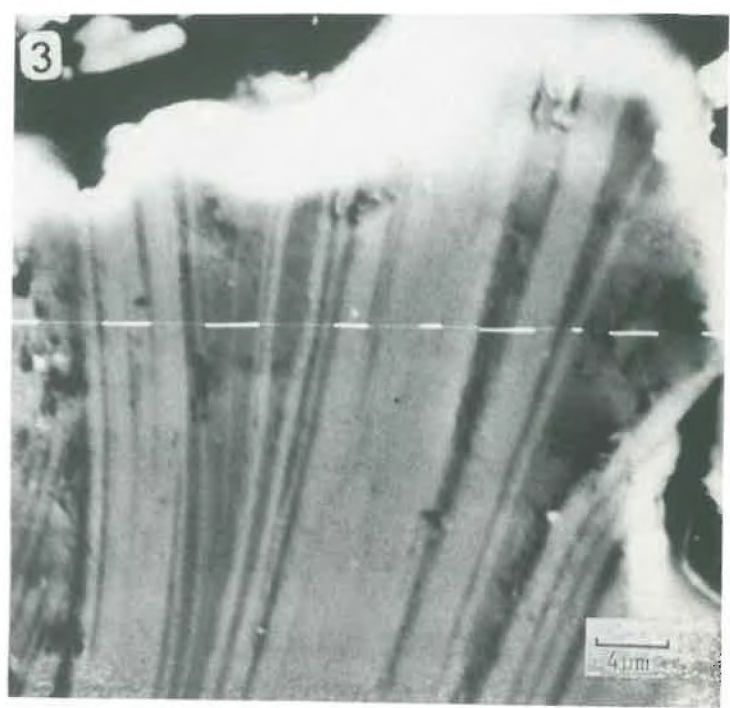
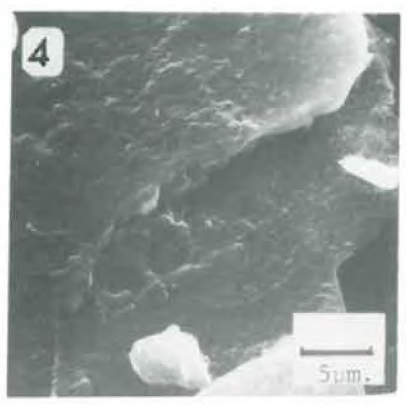
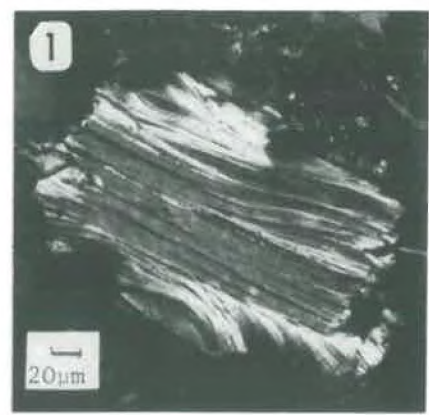
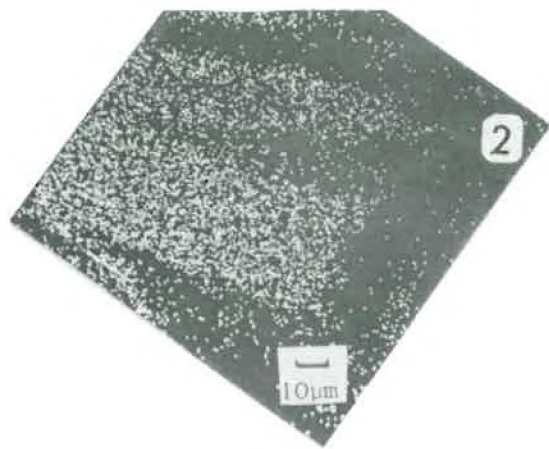


TABLEAU 5 - Analyses quantitatives ponctuelles à la sonde électronique de lamelles voisines "saines" et exfoliées en bordure de 4 muscovites (E.D.S. - détecteur Si(Li)).

- MS : lamelle "saine" ; MA : exfoliation -

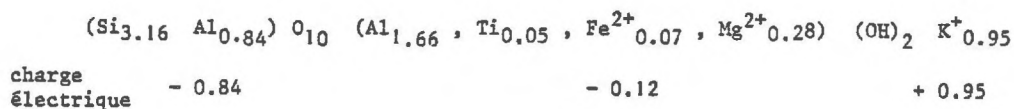
%	MUSCOVITE 1		MUSCOVITE 2		MUSCOVITE 3		MUSCOVITE 4	
	MS 1	MA 1	MS 2	MA 2	MS 3	MA 3	MS 4	MA 4
SiO ₂	45.17	44.36	46.01	43.59	46.12	44.46	46.35	43.60
Al ₂ O ₃	30.28	34.12	31.16	33.90	31.08	34.02	31.03	33.83
TiO ₂	0.93	0.07	0.65		0.95		0.80	0.01
FeO (total)	1.23	0.68	1.24	0.32	1.14	0.29	1.22	0.52
MgO	2.68	1.99	2.73	1.94	2.83	2.04	2.86	1.94
K ₂ O	10.68	0.71	10.93	0.15	10.88	0.18	10.95	0.15
TOTAL :	91.00	81.92	92.73	79.89	93.00	80.99	93.21	80.05
Rapports moléculaires			Augm. MS→MA		Augm. MS→MA		Augm. MS→MA	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	2.53	2.21		2.51	2.18		2.52	2.22
SiO ₂ /R1	7.87	13.37	1.7	8.87	13.78	1.55	7.84	13.56
SiO ₂ /R2	6.63	98.48	14.8	6.60	443.6	67.2	6.65	389.6
Al ₂ O ₃ /R1	3.11	5.60	1.8	3.54	6.32	1.78	3.10	6.11
Al ₂ O ₃ /R2	2.62	44.6	17.0	2.63	207.7	79.0	2.64	175.5
Nb. de cations pour 11 ox.			(*)					
Si ⁴⁺	3.163	3.188	3.164	3.177	3.190		3.157	3.209
Al ³⁺	2.500	2.887	2.866	2.534	2.921		2.506	2.891
Ti ⁴⁺	0.049	0.003	0.003	0.006			0.049	
(+) Fe ²⁺	0.073	0.041	0.041	0.072	0.020		0.065	0.017
Mg ²⁺	0.280	0.213	0.212	0.280	0.211		0.288	0.219
K ⁺	0.954	0.064	0.064	0.962	0.014		0.950	0.016

(+) Tout le fer est estimé en Fe²⁺
 (*) Tout le fer est estimé en Fe³⁺

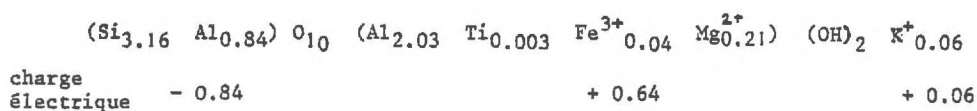
R1 = Fe + Mg + Ti
 R2 = K + Ca + Na

A l'aide des données analytiques obtenues, on peut également tenter de calculer les formules structurales de ces minéraux, afin de suivre leurs transformations cristallographiques. Ces calculs sont approchés, car les résultats obtenus ne correspondent pas assurément à l'existence d'une seule phase minérale dans le volume analysé par la sonde. On obtient néanmoins :

- Pour la muscovite non altérée (°)



Vermiculite



(°) On admettra que tout le fer est sous forme Fe²⁺ dans la muscovite saine et sous forme Fe³⁺ dans la vermiculite

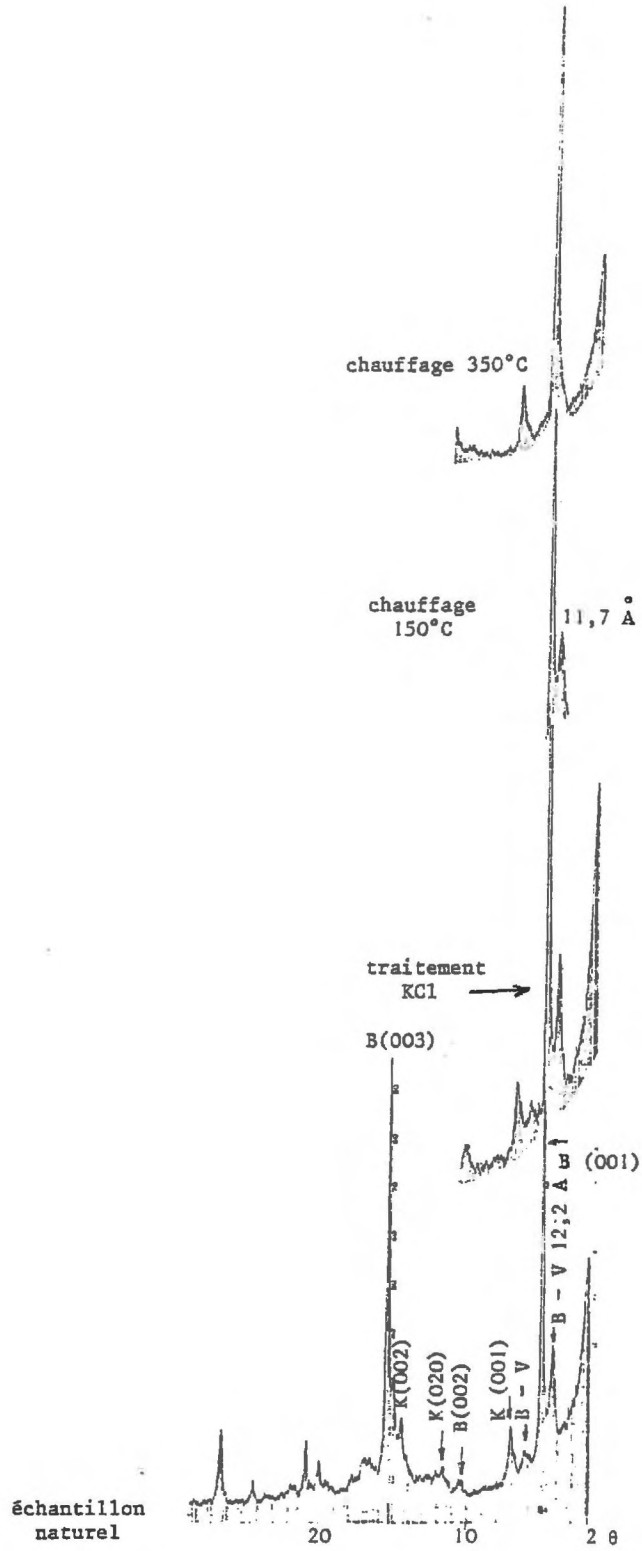


FIGURE 21 - Biotite, sommet de l'arène à structure conservée.
- diagramme Rayons X de poudres -

β - Microanalyses à la sonde électronique

Les domaines exfoliés en bordure des biotites et les minéraux cristallisés perpendiculairement aux surfaces des biotites ont été analysés.

- Les domaines exfoliés

Le spectre de la zone saine de la biotite (*fig.22*), indique la présence de Si, Al, Fe, K, Ti et Mg, tandis que le spectre des domaines ouverts en éventail ne présente que les pics de Si et Al et des traces de Fe, K et Mg. Le spectre des oxydes ou hydroxydes métalliques cristallisés en aiguilles au sein des domaines exfoliés montre qu'il s'agit de composés de fer et de titane.

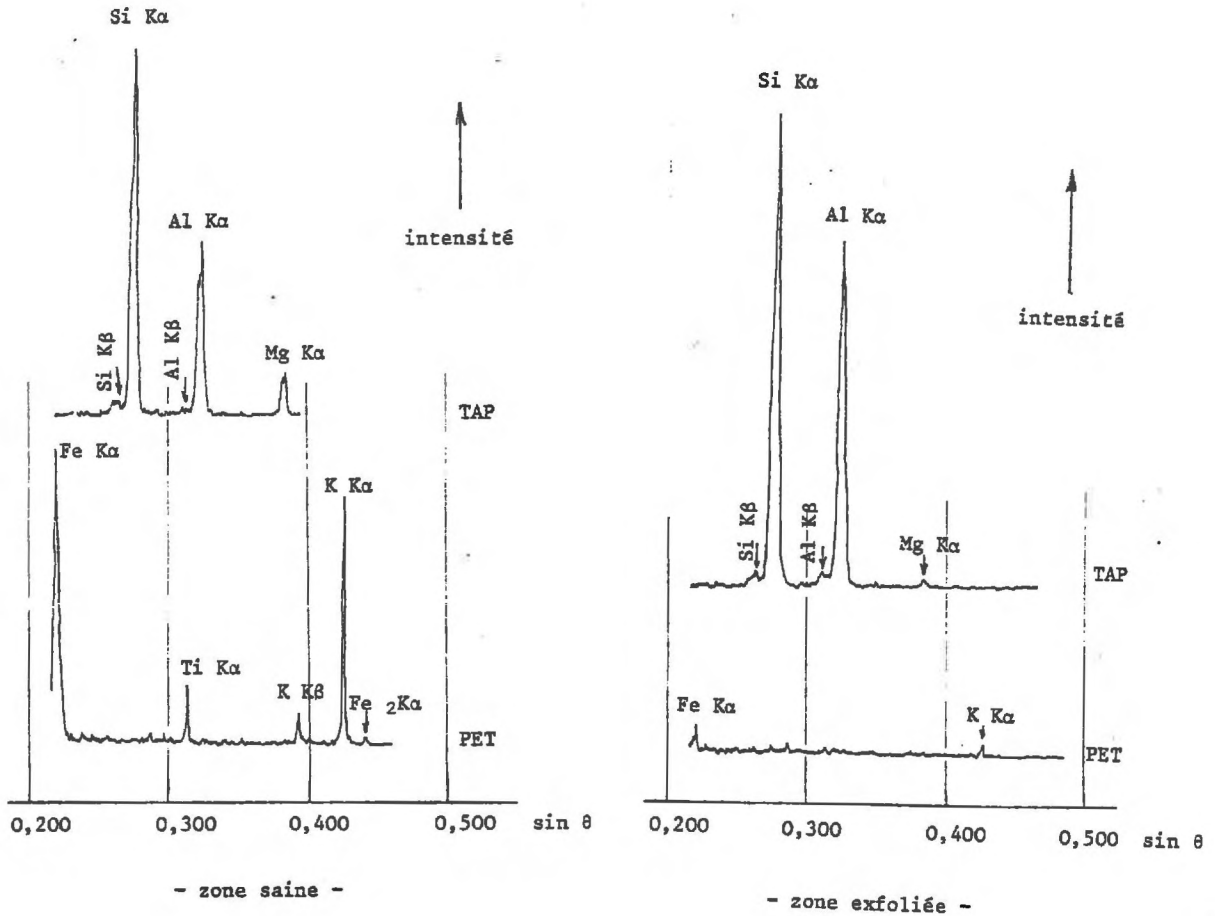


FIGURE 22 - Spectre X d'une zone " saine " et d'une zone exfoliée de biotite.

Les cartes de répartition (ph.2 & 3, pl.4), confirment cette distribution des éléments : les zones exfoliées sont appauvries notamment en Fe et K. Ces premières données montrent que ces domaines ne subissent pas une simple exfoliation mécanique mais aussi une altération chimique.

La traversée (ph.4, pl.4) permet de distinguer :

- les domaines (B) où la biotite est saine, riche en Fe et K,
- le domaine (V) très pauvre en Fe et K,
- des zones de transition de 6 µm. de largeur (l'impact de la sonde étant < 3 µm, ces domaines ne peuvent être imputables au simple effet de lissage dû au volume analysé par la sonde) présentant une diminution relative des teneurs en Fe et K et une augmentation relative de la teneur en Al. L'existence de ces zones de transition en bordure des lamelles de biotite saine suggère une transformation des feuilletts de la biotite, qui s'appauvriraient progressivement en cations.

Des analyses quantitatives ponctuelles, effectuées sur 5 biotites différentes, respectivement dans des zones saines et exfoliées, sont présentées dans le *tableau 6*.

L'évolution des rapports moléculaires de la zone saine à la zone exfoliée montre, en prenant Al_2O_3 comme référence, que :

- la silice est partiellement évacuée, le rapport SiO_2/Al_2O_3 passe de 4 à 2.3
- les autres cations, Fe, Mg, Ti et K sont fortement évacués : les rapports Al_2O_3/R_1 et Al_2O_3/R_2 sont 15 fois plus élevés dans la zone altérée que dans la zone saine. La garniture octaédrique apparaît légèrement plus appauvrie que la garniture interfoliaire :

$$\begin{array}{ccc} \text{augmentation} & \frac{Al_2O_3}{R_1} & < & \text{augmentation} & \frac{Al_2O_3}{R_2} \\ Bs \rightarrow Ba & & & Bs \rightarrow Ba & \end{array}$$
$$\begin{array}{l} R_1 = Fe + Mg + Ti \\ R_2 = K + Ca + Na \end{array}$$

La comparaison des données cristallographiques (diffractométrie X) et analytiques, des deux domaines conduit aux interprétations et conclusions suivantes :

- la forte diminution du fer et du magnésium dans le domaine altéré conduit à exclure l'hypothèse Biotite-Chlorite pour l'interstratifié régulier, déterminé par diffractométrie;
- le domaine altéré analysé ne peut pas correspondre non plus à un interstratifié régulier biotite - vermiculite, car il est en effet trop pauvre en fer et potassium; mais cet interstratifié pourrait par contre correspondre aux zones de transition, observées sur les traversées entre les domaines sains et altérés;
- le domaine altéré ne peut pas non plus correspondre à la kaolinite, car il présente en effet un rapport moléculaire SiO_2/Al_2O_3 trop élevé.

PLANCHE 4 - ALTÉRATION DES BIOTITES.

PHOTO 1 - Microscope optique (L.N.) -

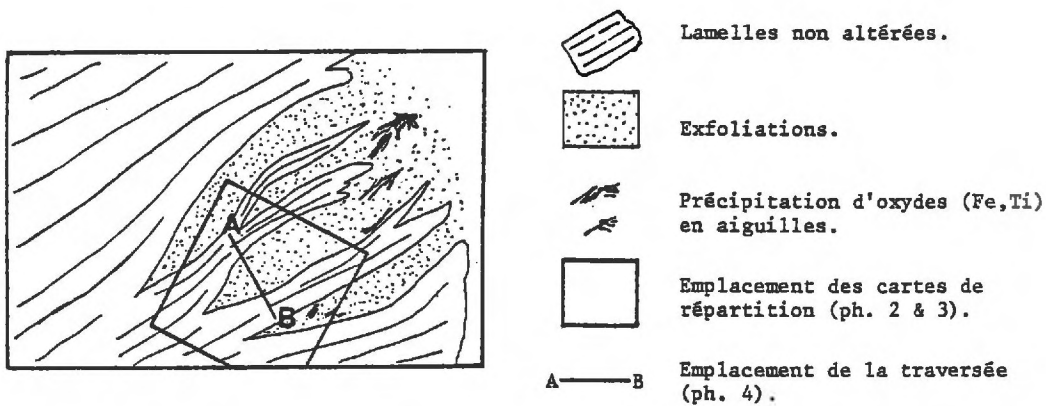


PHOTO 2 - Image X de répartition du potassium.

PHOTO 3 - Image X de répartition du fer.

PHOTO 4 - Traversée (W.D.S.) -

Distribution relative de 4 éléments (Si, Al, Fe, K) selon une ligne A - B recoupant des lamelles saines et des exfoliations.

- B - Biotite saine.
- BA - Biotite altérée.
- V - Exfoliations (vermiculite).

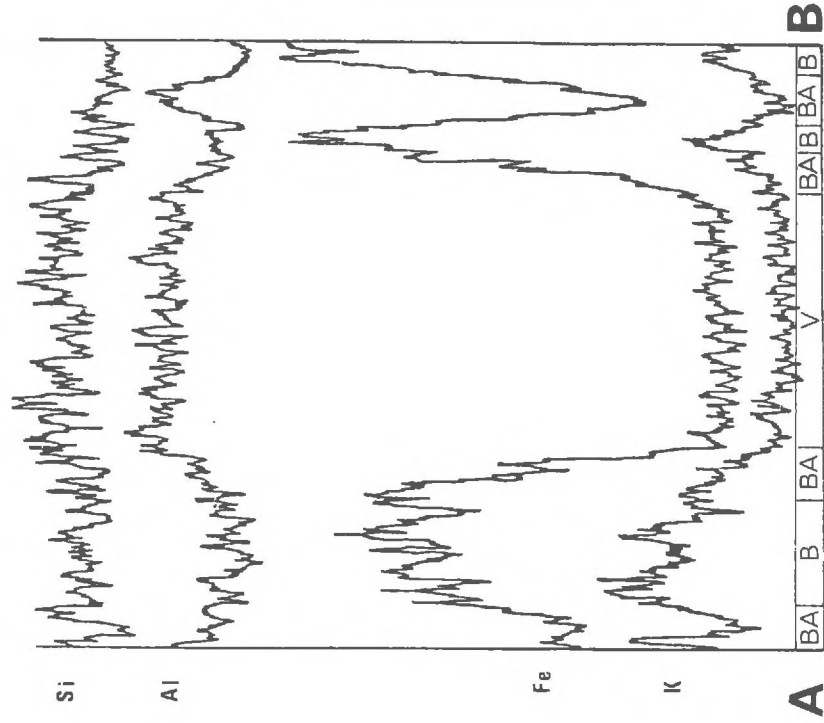
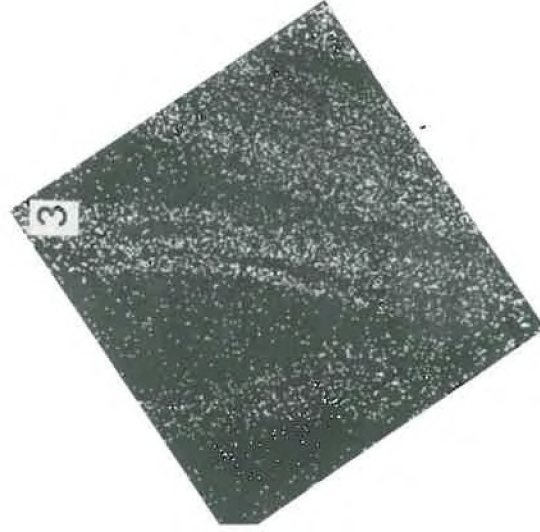
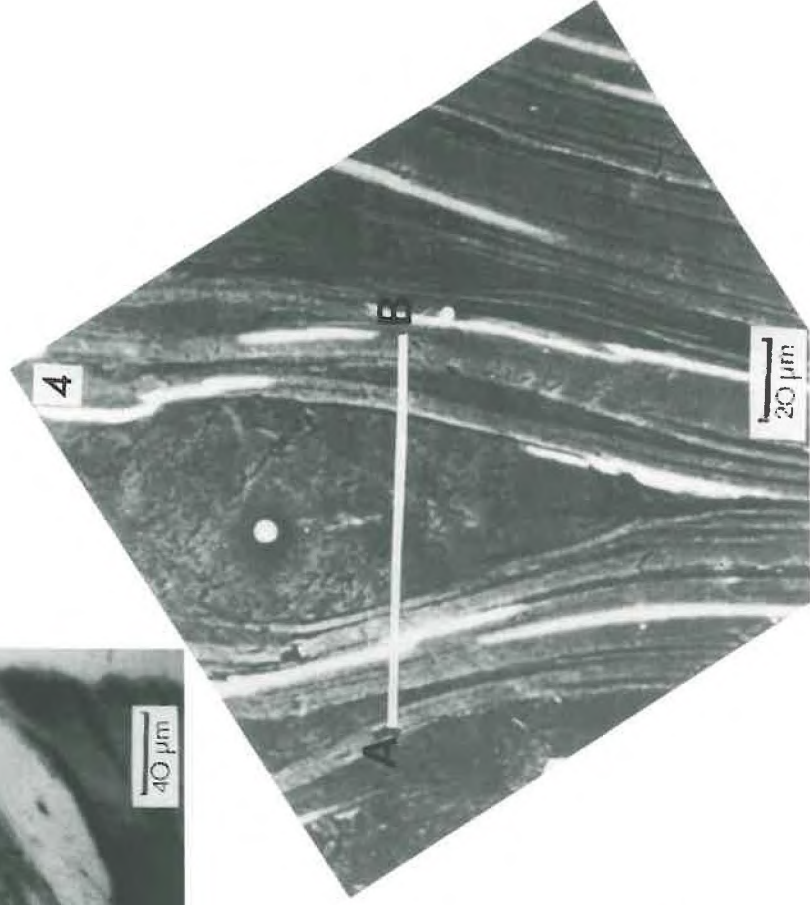


TABLEAU 6 - Analyses quantitatives ponctuelles à la sonde électronique de lamelles voisines "saines" et exfoliées de 5 biotites (E.D.S. - détecteur Si(Li)).
- BS : lamelle saine; BA : exfoliation -

	BIOTITE 6			BIOTITE 7			BIOTITE 8			BIOTITE 9			BIOTITE 10		
	BS 6	BA 6		BS 7	BA 7		BS 8	BA 8		BS 9	BA 9		BS 10	BA 10	
X oxydes pondéraux															
SiO ₂	37.92	44.67		36.81	43.95		37.29	44.02		39.46	42.92		39.15	45.24	
Al ₂ O ₃	16.66	32.34		15.43	34.26		16.00	33.37		16.77	31.14		16.53	33.24	
TiO ₂	2.92			3.05			2.86			3.43	0.09		3.21		
FeO (total)	21.91	1.93		23.07	0.95		22.33	1.26		23.85	0.18		24.50	1.47	
MgO	6.85	2.81		6.98	2.81		7.10	2.48		7.38	2.72		7.69	2.93	
K ₂ O	8.60	1.42		10.31	1.48		10.15	1.00		10.59	1.30		11.10	1.49	
TOTAL :	94.87	83.17		95.66	83.44		95.92	82.13		101.48	78.35		102.19	84.36	
Rapports moléculaires			Augm. BS→BA			Augm. BS→BA			Augm. BS→BA			Augm. BS→BA			Augm. BS→BA
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.87	2.35		4.05	2.18		3.96	2.24		4.00	2.35		4.01	2.31	
SiO ₂ /R1	1.23	7.70	6.26	1.15	8.82	7.67	1.18	9.28	7.86	1.18	10.05	8.53	1.14	8.08	7.09
SiO ₂ /R2	6.92	49.26	7.12	5.60	46.59	8.32	5.76	69.14	12.00	5.84	51.78	8.86	5.53	47.67	8.62
Al ₂ O ₃ /R1	0.32	3.28	10.25	0.28	4.05	14.46	0.30	4.14	13.80	0.29	4.29	14.55	0.28	3.50	12.50
Al ₂ O ₃ /R2	1.79	21.00	11.73	1.38	21.39	15.50	1.46	30.87	21.14	1.46	22.11	15.11	1.38	20.63	14.95
Nb de cations pour 11 ox.			(*)									(*)			
Si ⁴⁺	2.904	3.208	3.191	2.857	3.132		2.867	3.178		2.867	3.233	3.228	2.844	3.195	
Al ³⁺	1.502	2.735	2.720	1.411	2.876		1.449	2.837		1.435	2.762	2.757	1.419	2.765	
Ti ⁴⁺	0.168			0.178			0.165			0.187	0.005	0.005	0.175		
(*) Fe ²⁺	1.402	0.116	0.115	1.497	0.056		1.449	0.076		1.448	0.011	0.011	1.488	0.087	
Mg ²⁺	0.781	0.300	0.299	0.807	0.298		0.813	0.267		0.798	0.305	0.304	0.832	0.308	
K ⁺	0.840	0.130	0.130	1.020	0.134		0.995	0.092		0.981	0.125	0.125	1.028	0.134	

(*) Tout le fer est estimé en Fe²⁺
(**) Tout le fer est estimé en Fe³⁺

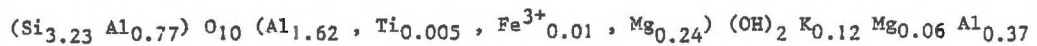
R1 = Fe + Mg + Ti
R2 = K + Ca + Na

La composition chimique obtenue à la sonde, dans la partie centrale du domaine altéré, en admettant qu'elle corresponde à une seule phase minérale, conduit à écrire une formule structurale de vermiculite sous la forme suivante :



charge électrique -0.77 + 0.62 + 0.12
(en considérant que tout le fer est sous forme Fe³⁺)

Cette formule présente une charge octaédrique beaucoup trop forte, en même temps qu'une charge interfoliaire beaucoup trop faible. Il est donc probable qu'une partie de l'aluminium et du magnésium soient en positions interfoliaires. On serait donc en présence d'une *vermiculite hydroxyalumineuse* du type :



charge électrique - 0.77 0 + 0.74

En comparant l'occupation tétraédrique obtenue avec celle de la biotite saine (Si_{2,86}Al_{1,14}) on constate une évolution importante des tétraèdres qui semble traduire un transfert de l'aluminium des tétraèdres vers les octaèdres (MILLOT, 1964; MILLOT & al., 1965).

Cette tentative d'analyse directe des transformations minéralogiques demeure très imparfaite dans la mesure où le volume analysé à la sonde est très important par rapport à la dimension des feuillets. La comparaison des résultats obtenus avec les données de diffractométrie est elle même délicate, puisque la diffractométrie est réalisée sur des échantillons globaux et qu'il est particulièrement difficile d'isoler sinon d'enrichir au préalable les phases secondaires d'altération (MEUNIER, 1977).

Pour poursuivre ces recherches, il conviendrait donc de pouvoir réaliser en place et à très fort grossissement (Microscope électronique à transmission : M.E.T.), des déterminations en microdiffraction sur différentes parties d'un même minéral micacé. Deux techniques pourraient être utilisées comme celles de :

- la fabrication de coupes minces à l'ultra microtome perpendiculairement au plan des feuillets (EBERHART & TRIKI, 1972). Ces coupes permettraient d'observer l'interstratification à l'échelle du cristal par la mesure des espaces réticulaires et la microdiffraction électronique.
- l'amincissement des lames minces pétrographiques par bombardement ionique (BRESSON, 1978) Les lames ultraminces obtenues peuvent alors être observées au M.E.T. Cette dernière technique présente l'avantage de conserver l'arrangement des constituants ; tandis que l'utilisation de la microdiffraction électronique serait plus délicate.

- *Les minéraux secondaires cristallisés perpendiculairement aux surfaces des biotites*

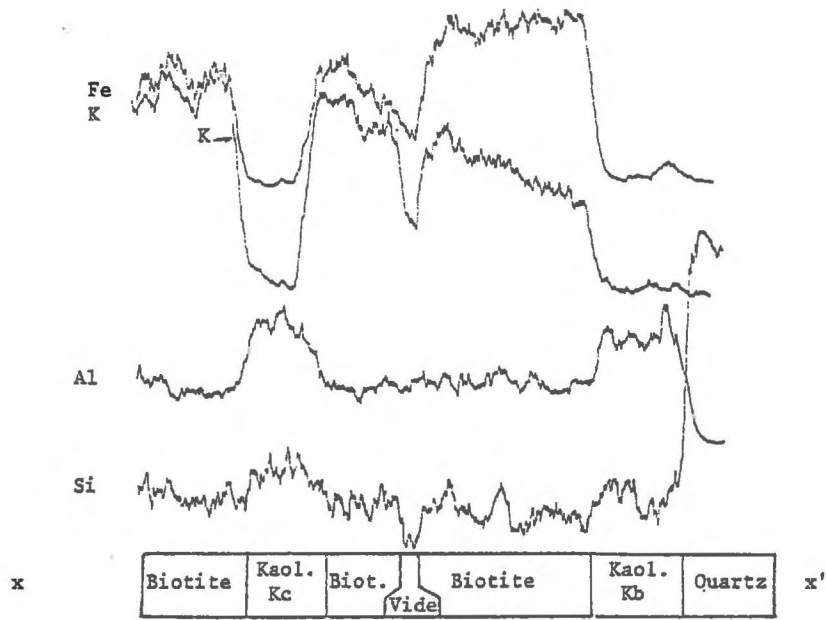
Des traversées (*fig. 23*) et des analyses quantitatives ponctuelles (*Tab. 7*) ont été réalisées sur une biotite présentant à la fois des minéraux cristallisant perpendiculairement au plan (001) des biotites et des exfoliations (*ph. 1, pl. 5*).

Sur les traversées, on constate que les minéraux orientés perpendiculairement aux surfaces des biotites, sont très pauvres en Fe et K et enrichis relativement en Al et Si. Par comparaison avec la traversée qui recoupe les exfoliations, on remarque que la variation des teneurs est plus rapide dans le premier cas.

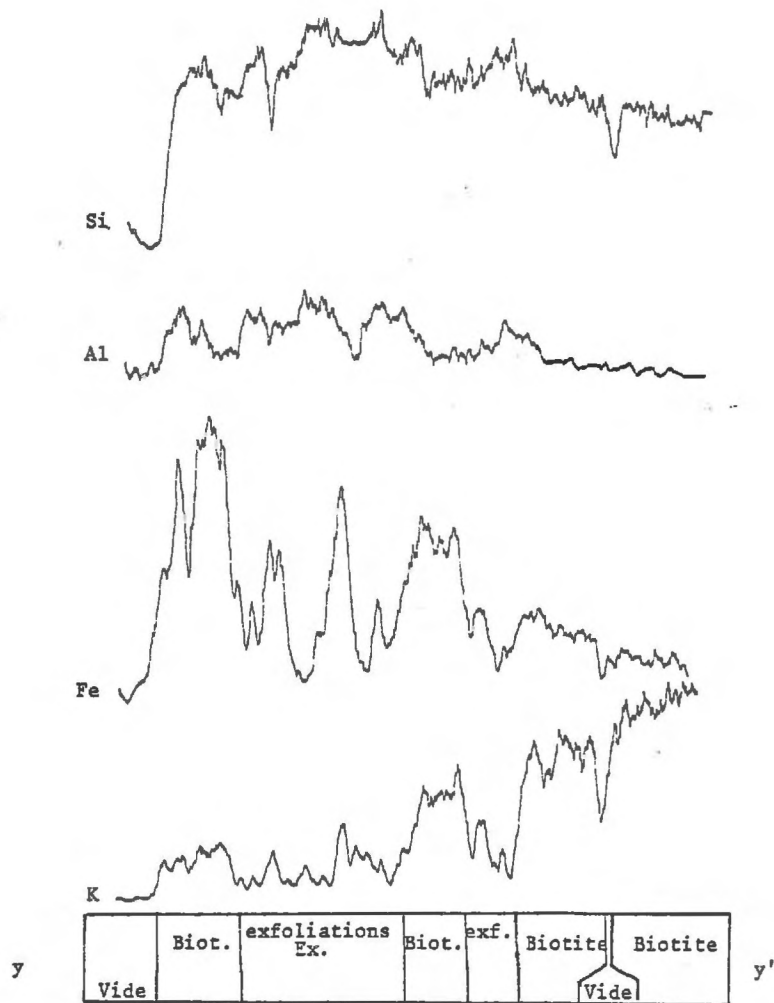
Les rapports moléculaires $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, établis à partir des analyses quantitatives ponctuelles ont une valeur voisine de 3 pour la biotite, voisine de 2,3 pour les exfoliations et très voisines de 2 pour les minéraux orientés perpendiculairement à la biotite. Ces derniers minéraux sont donc vraisemblablement de la *kaolinite*, tandis que les exfoliations correspondent à la vermiculite hydroxyalumineuse.

Notons enfin les faits suivants :

- Lors de l'analyse à la sonde électronique, l'oxygène n'est pas dosé, on est conduit à *estimer* la teneur en eau de l'échantillon par différence à 100. On inclut donc, dans cette estimation, la porosité de l'échantillon. Ainsi, la teneur en eau très forte des analyses de kaolinites conduisent à penser qu'il y a une porosité importante entre les différents cristaux.
- Enfin, cette kaolinite apparaît, non seulement entre les lamelles de biotite mais aussi au contact avec d'autres minéraux, ici au contact biotite - quartz.



- Traversée 1 - Biotite avec kaolinite cristallisée perpendiculairement aux lamelles.



- Traversée 2 - Biotite avec exfoliations.

FIGURE 23 - Comparaison des traversées : Biotite - Kaolinite et Biotite - Vermiculite.

TABLEAU 7 - Analyses quantitatives ponctuelles à la sonde électronique des exfoliations et des minéraux cristallisés perpendiculairement aux lamelles de biotite. (E.D.S. - Détecteur Si(Li)).

Z d'oxydes pondéraux	KAOLINITE			BIOTITE							KAOLINITE		
	KB-1	KB-2	KB-3	BS-1	BS-2	BS-3	BS-4	BS-5	BS-6	BS-7	KC-1	KC-2	KC-3
SiO ₂	43,68	39,71	43,03	36,84	35,83	36,05	35,86	36,11	35,58	31,31	41,00	44,53	46,32
Al ₂ O ₃	36,62	34,23	33,25	20,55	20,13	20,49	20,24	20,17	20,03	18,84	34,87	37,13	37,62
TiO ₂	0,01	0,00	0,03	2,98	2,88	2,94	2,92	2,95	3,20	2,92	0,00	0,02	0,05
FeO (total)	1,61	1,74	2,74	20,61	20,63	20,91	21,09	21,38	19,60	18,88	1,89	1,76	1,68
MgO	0,00	0,00	2,19	7,57	7,54	7,34	7,27	7,23	6,44	4,50	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,14	0,13	0,00	7,95	8,01	8,23	8,23	8,08	5,92	5,04	0,12	0,06	0,06
CaO	0,20	0,13	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	1,23	0,00	0,91	0,09	0,06	0,15
Na ₂ O	0,00	0,54	0,00	1,02	1,15	1,15	1,08	0,94	0,20	2,23	0,81	0,00	0,71
Cr ₂ O ₃	0,08	0,08	0,00	0,03	0,03	0,05	0,20	0,05	0,41	0,18	0,12	0,00	0,08
MnO	0,01	0,00	0,02	0,00	0,34	0,26	0,21	0,25	0,34	0,22	0,02	0,18	0,04
NiO	0,19	0,05	0,12	0,00	0,08	0,09	0,04	0,11	0,04	0,02	0,03	0,06	0,00
O	17,45	23,40	18,37	2,44	3,39	2,49	2,86	1,51	8,25	14,96	21,04	16,20	13,27
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ ^(a)	2,03	1,97	2,20	3,04	3,03	2,99	3,01	3,04	3,02	2,82	2,00	2,04	2,09
Si ⁴⁺ ⁽⁺⁾	2,387	2,070	2,349	2,793	2,697	2,751	2,726	2,807	2,466	2,023	2,183	2,459	2,628
Al ³⁺	2,359	2,103	2,140	1,836	1,786	1,843	1,813	1,847	1,637	1,434	2,188	2,416	2,516
Ti ⁴⁺	0,001	0,000	0,001	0,170	0,163	0,169	0,167	0,172	0,167	0,142	0,000	0,001	0,002
Fe ²⁺	0,074	0,076	0,125	1,307	1,299	1,335	1,341	1,390	1,136	1,020	0,084	0,081	0,080
Mg ²⁺	0,000	0,000	0,178	0,855	0,846	0,835	0,824	0,837	0,665	0,434	0,000	0,000	0,000
K ⁺	0,010	0,009	0,000	0,769	0,769	0,801	0,798	0,801	0,524	0,415	0,008	0,004	0,005
Ca ²⁺	0,012	0,007	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,102	0,000	0,063	0,005	0,003	0,009
Na ⁺	0,000	0,054	0,000	0,150	0,167	0,171	0,159	0,141	0,026	0,279	0,083	0,000	0,079
Cr ³⁺	0,003	0,003	0,000	0,002	0,002	0,003	0,012	0,003	0,023	0,009	0,005	0,000	0,004
Mn ²⁺	0,001	0,000	0,001	0,000	0,022	0,017	0,013	0,016	0,020	0,012	0,001	0,008	0,002
Ni ²⁺	0,008	0,002	0,005	0,000	0,005	0,005	0,003	0,007	0,002	0,001	0,001	0,003	0,000
TOTAL :	4,855	4,325	4,814	7,882	7,756	7,930	7,856	8,125	6,666	5,832	4,559	4,976	5,324

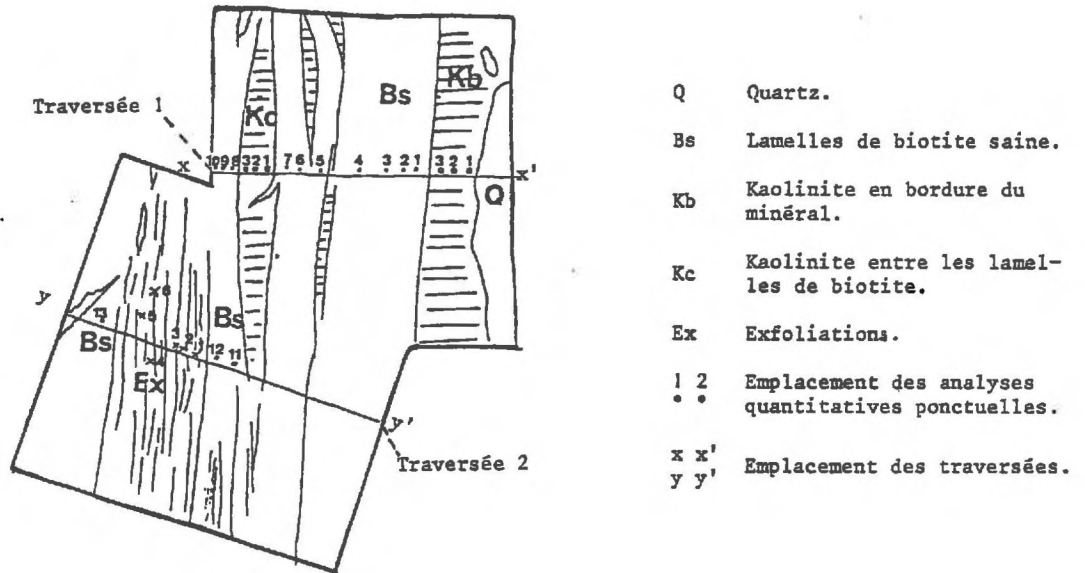
Z d'oxydes pondéraux	BIOTITE					EXFOLIATIONS						BIOT.
	BS-8	BS-9	BS-10	BS-11	BS-12	EX-1	EX-2	EX-3	EX-4	EX-5	EX-6	BS-13
SiO ₂	37,33	36,90	37,35	36,33	36,16	44,47	37,77	46,94	46,67	46,72	47,20	33,30
Al ₂ O ₃	20,61	21,29	21,28	20,37	19,99	32,51	27,11	33,65	34,57	34,76	34,89	19,56
TiO ₂	3,25	3,19	3,16	3,01	2,99	1,08	1,38	0,81	0,10	0,25	0,29	2,73
FeO (total)	21,04	19,37	20,71	21,48	20,83	8,46	14,56	5,89	2,40	2,51	2,15	18,07
MgO	7,66	6,66	7,18	7,49	7,38	3,35	5,48	3,09	2,00	1,83	2,06	5,70
K ₂ O	7,92	4,93	6,79	8,03	8,21	2,22	1,79	2,33	1,92	1,94	2,06	4,36
CaO	0,00	0,00	1,07	1,27	0,00	0,52	0,33	0,00	0,00	0,33	0,00	0,78
Na ₂ O	1,07	0,91	0,00	1,11	0,97	0,78	0,00	0,90	0,71	0,00	0,77	0,80
Cr ₂ O ₃	0,08	0,05	0,02	0,17	0,03	0,05	0,06	0,13	0,03	0,09	0,11	0,02
MnO	0,33	0,14	0,39	0,23	0,28	0,09	0,21	0,10	0,13	0,02	0,03	0,26
NiO	0,06	0,09	0,07	0,06	0,04	0,00	0,05	0,05	0,08	0,12	0,10	0,08
O	0,66	6,46	1,98	0,46	3,13	6,46	11,26	6,13	11,39	11,38	10,34	14,35
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ ^(*)	3,08	2,94	2,98	3,02	3,07	2,33	2,34	2,37	2,30	2,28	2,30	2,89
Si ⁴⁺ ⁽⁺⁾	2,910	2,591	2,829	2,867	2,732	2,850	2,386	2,969	2,739	2,739	2,797	2,132
Al ³⁺	1,893	1,762	1,900	1,895	1,780	2,455	2,018	2,508	2,391	2,402	2,437	1,475
Ti ⁴⁺	0,190	0,168	0,180	0,179	0,170	0,052	0,066	0,039	0,005	0,011	0,013	0,131
Fe ²⁺	1,371	1,137	1,312	1,418	1,316	0,454	0,769	0,312	0,118	0,123	0,106	0,967
Mg ²⁺	0,890	0,697	0,811	0,881	0,831	0,320	0,516	0,291	0,175	0,160	0,182	0,543
K ⁺	0,788	0,442	0,657	0,808	0,791	0,182	0,144	0,188	0,144	0,145	0,156	0,356
Ca ²⁺	0,000	0,000	0,087	0,107	0,000	0,035	0,023	0,000	0,000	0,021	0,000	0,054
Na ⁺	0,161	0,124	0,000	0,170	0,142	0,097	0,000	0,110	0,081	0,000	0,089	0,099
Cr ³⁺	0,005	0,003	0,001	0,011	0,002	0,003	0,003	0,006	0,002	0,004	0,005	0,001
Mn ²⁺	0,022	0,008	0,025	0,015	0,018	0,005	0,011	0,005	0,007	0,001	0,001	0,014
Ni ²⁺	0,004	0,005	0,004	0,004	0,002	0,000	0,003	0,002	0,004	0,008	0,005	0,004
TOTAL :	8,234	6,937	7,806	8,354	7,784	6,453	5,939	6,430	5,664	5,614	5,790	5,777

(*) - Rapports moléculaires.

(+) - Nombre de cations pour 12 oxygènes.

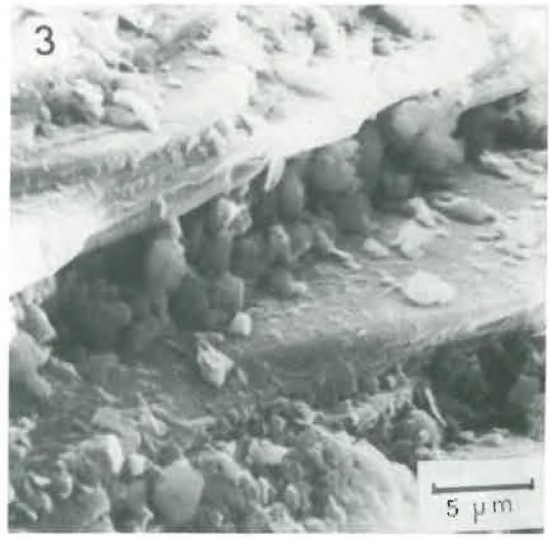
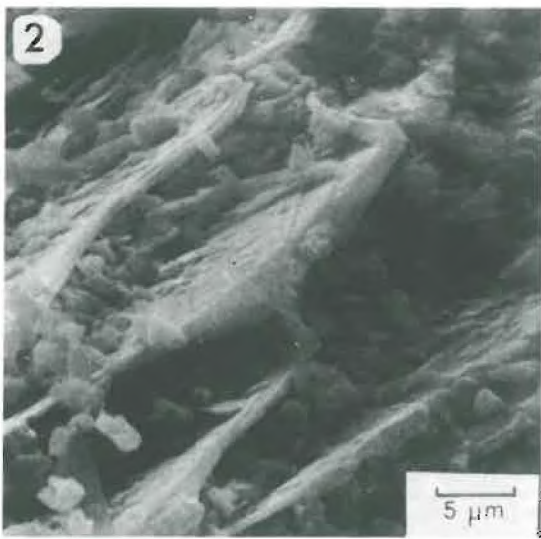
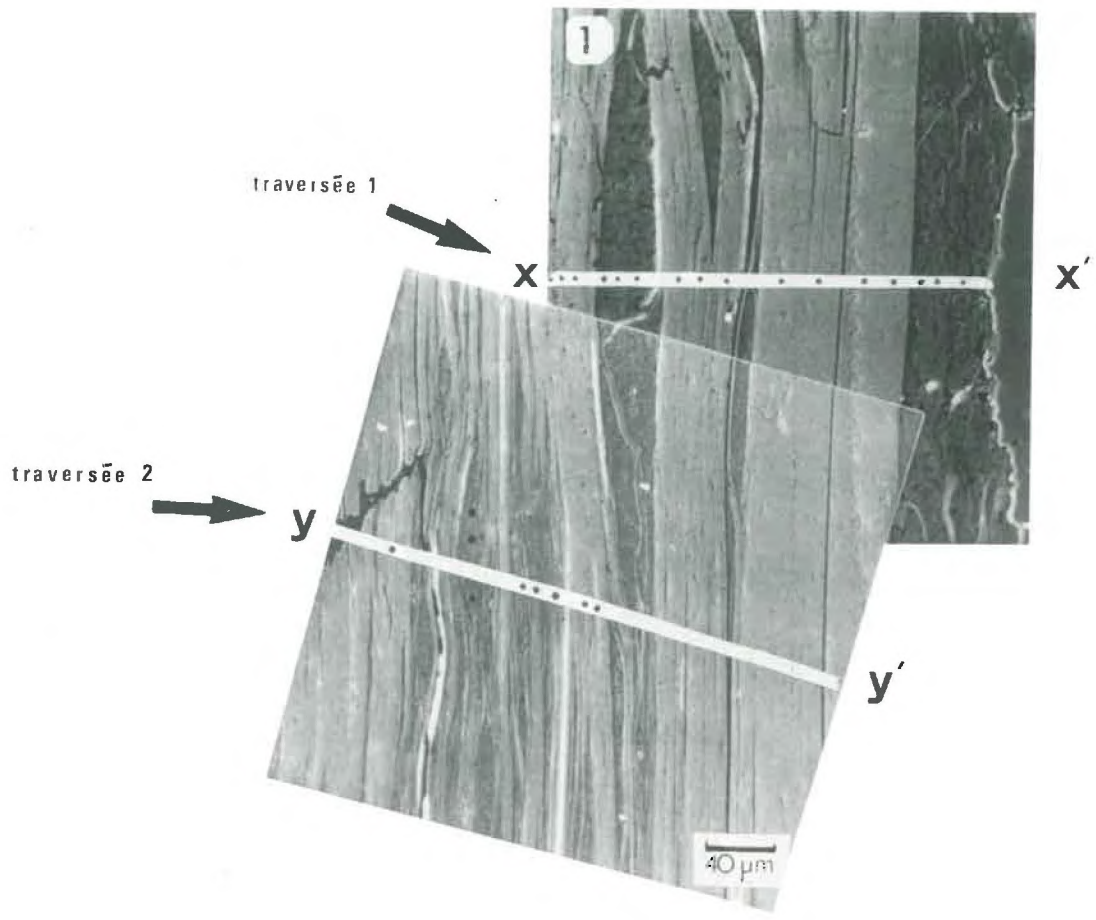
PLANCHE 5 - ALTÉRATION DES BIOTITES.

PHOTO 1 - Image e^- secondaires d'une biotite présentant des exfoliations et de la kaolinite orientée perpendiculairement aux lamelles.



PHOTOS 2 et 3 - Biotites de la fraction 360 - 240 μm . - Clichés au microscope électronique à balayage.

Des cristaux d'environ 2 μm . de diamètre apparaissent orientés perpendiculairement aux lamelles de biotite; ces dernières présentent un bord net (Ph. 2, coin supérieur gauche).



γ - Observations morphologiques au microscope électronique à balayage

L'examen au M.E.B. de biotites isolées, dans la fraction 360-240 μm., montre la présence, entre des lamelles dont les bords sont nets (ph. 2, pl. 5), la distance entre ces dernières étant de 5 à 10 μm., de cristaux approximativement hexagonaux de 1 à 2 μm. de diamètre, orthogonaux au plan (001) de la biotite (ph. 3, pl. 5). Ces cristallisations correspondent aux minéraux observés en microscopie optique avec une orientation perpendiculaire à la surface des biotites et déterminés en microanalyse comme étant de la kaolinite. Il faut noter l'importance des vides existant entre ces cristaux de kaolinite et l'absence de transition avec les lamelles de biotite. Cette cristallisation de la kaolinite perpendiculairement aux lamelles de biotites a déjà été observée par SEDDOH et ROBERT (1972) dans les arènes granitiques du Morvan. Par contre, on n'observe pas les faciès caractéristiques de l'altération en vermiculite décrits par ces auteurs : la bordure des lamelles de biotite apparaît nette, sans microdivision ni faciès fondu. Ceci pourrait provenir de la taille et du mode triage des particules observées ; en effet, les biotites de l'arène à structure conservée ont des longueurs variant entre 1 et 2 mm., tandis que les particules observées, correspondent à la fraction 360-240 μm., triée au séparateur magnétique FRANTZ. Ce sont donc les *fragments* les plus riches en fer, donc les plus *sains* qui ont été observés.

En conclusion, les biotites s'altèrent en vermiculite hydroxyalumineuse. Cette altération est localisée aux bordures des lamelles qui s'exfolient tandis que la partie centrale des lamelles est encore saine. D'autre part, de la kaolinite cristallise dans certains vides, perpendiculairement aux lamelles saines de biotite .

5 - Concentrations opaques

Un spectre a été effectué sur une concentration opaque et isotrope, située en bordure de vide (fig. 24). Celui-ci fait apparaître, dans un ordre d'abondance décroissant, la présence des éléments suivants :



Cette simple détermination, montre avec quelle prudence il faut interpréter ce type de concentration que, sur le terrain, on attribue habituellement à la présence de fer et de manganèse. Si la manganèse est ici dominant, on note la présence d'une quantité importante de phosphore qui n'aurait pu être soupçonnée, et au contraire une faible quantité de fer. Le phosphore pourrait provenir de l'altération de cristaux d'apatite $[\text{Ca}_5(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})(\text{PO}_4)_3]$ qui existent dans le granite.

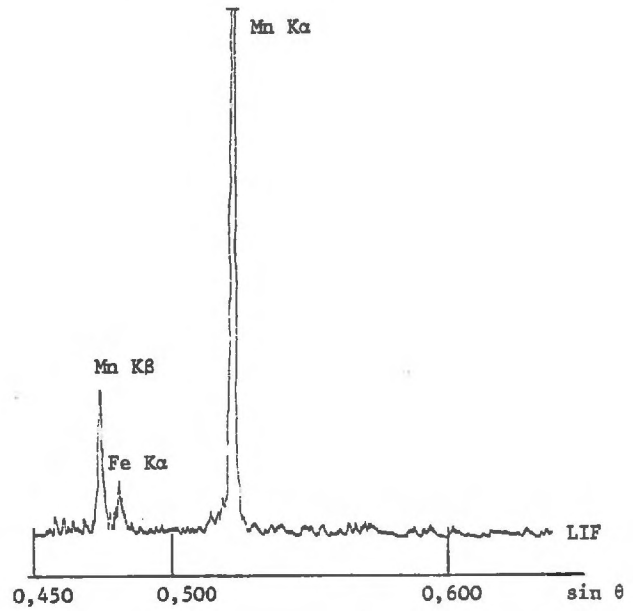
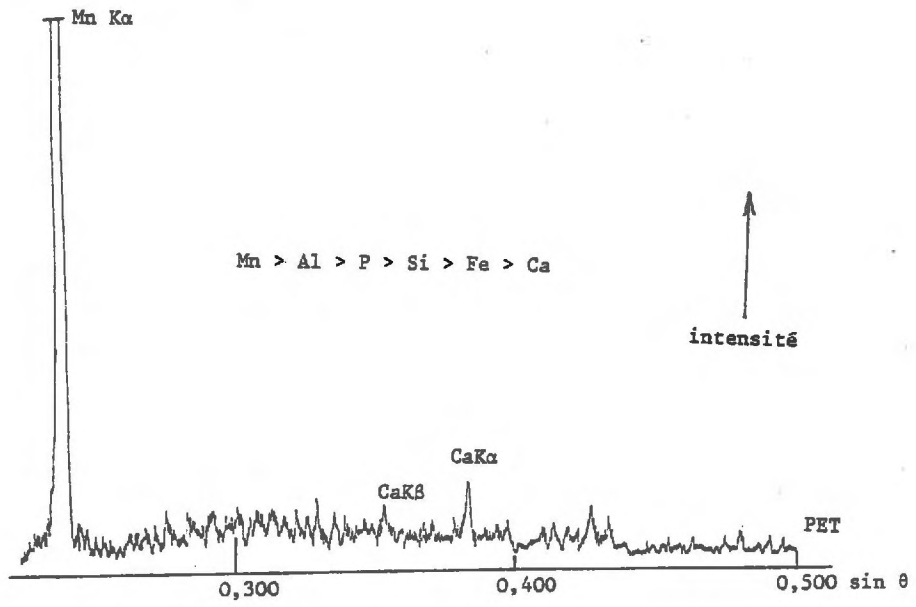
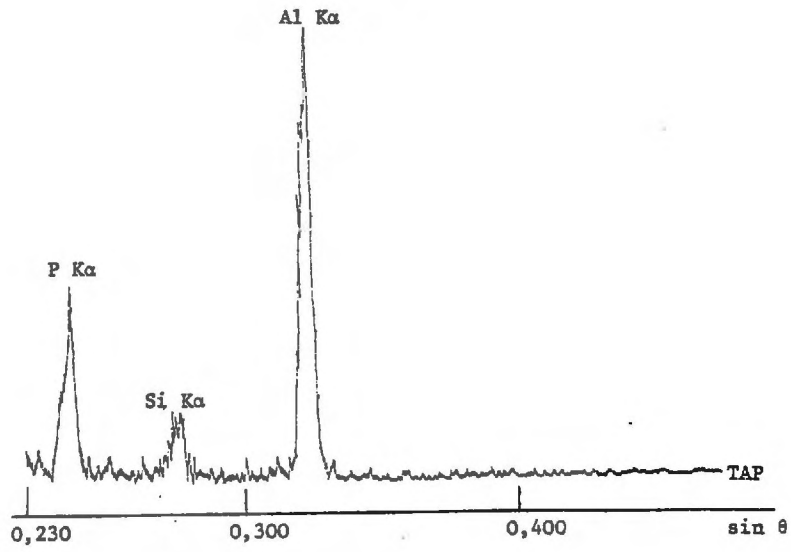


FIGURE 24 - Spectre X d'une concentration opaque en bordure d'un vide.

6 - Conclusion

L'arène à structure conservée est donc le siège d'une fragmentation importante par microfissuration de tous les minéraux, et d'une altération chimique différentielle des micas et des plagioclases.

Les micas se transforment en vermiculite hydroxyalumineuse par départ d'éléments (K, Fe, Mg, Ti, Ca, Na, Si). Cette altération s'effectue très rapidement, dès la base de l'arène; et de manière localisée à l'échelle du minéral : les bords des lamelles exfoliées sont très altérés tandis que la partie centrale des lamelles est saine. Biotites et muscovites s'altèrent toutes les deux, l'altération des muscovites se limitant à la bordure des cristaux tandis que celle des biotites se généralise lorsqu'on se rapproche de la surface.

Certains éléments libérés par l'hydrolyse de ces phyllites micacées se déplacent sur de courtes distances; ils précipitent rapidement sous forme cristallisée ou amorphe. Ainsi le fer et le titane cristallisent sous forme d'aiguilles ou d'amas au sein des plages transformées en vermiculite; par ailleurs, le fer peut s'associer aux kaolinites environnantes en se fixant à leur surface.

D'autre part, de la kaolinite cristallisée perpendiculairement aux bords des vides apparaît dans certains vides, principalement entre des lamelles de biotite mais aussi au contact biotite - quartz ou entre des lamelles de muscovite. Ces supports apparaissent sains, sans figure de corrosion. Les éléments constitutifs de la kaolinite proviennent donc de la solution extracristalline et ne reflètent pas le degré d'altération du minéral mais plutôt la composition de la solution extracristalline.

L'altération des plagioclases se réalise par le développement de cavités de dissolution, avec départ total de Na et Ca et partiel de Si, suivi d'une néoformation de kaolinite. C'est cette kaolinite qui représente la phase secondaire la plus importante dans cette partie de l'arène où la structure de la roche est conservée.

III - TRANSITION ENTRE L'ARÈNE À STRUCTURE CONSERVÉE ET L'ARÈNE À STRUCTURE DÉTRUITE ; LA NAISSANCE DU FAUCHAGE.

Le passage vertical de l'arène à structure conservée à l'arène à structure détruite s'effectue de manière graduelle sur un mètre d'épaisseur. L'examen au microscope optique d'une série de lames minces de grandes dimensions (16 cm. x 9 cm.) prélevées selon une verticale, a permis de suivre en continu la disparition de la structure pétrographique depuis la base (partie inférieure) jusqu'au sommet (partie supérieure) de cette transition.

A. PARTIE INFÉRIEURE DE LA TRANSITION

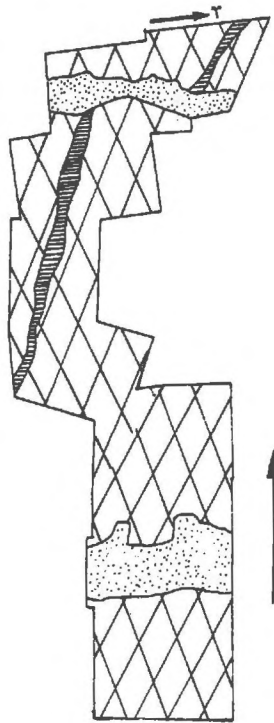
A la base, on observe une alternance de domaines horizontaux. Les uns d'épaisseur centimétrique, conservent une structure pétrographique; les autres, d'épaisseur millimétrique, ont une structure particulière (Pl. 6)

De part et d'autre des domaines à structure particulière, les structures pétrographiques se correspondent en effectuant une légère translation vers l'aval. On observe, par exemple, le décrochement d'une diacase dont les lèvres sont tapissées de petits cristaux de quartz et dont la lumière est occupée par des particules limoneuses de 2 à 5 μ m de diamètre (ph. 1, pl. 7). Ainsi cette alternance de domaines subhorizontaux (considérés parfois comme des "lits"), et le léger décalage de ces domaines vers l'aval marquent-ils le début du " fauchage " de l'arène. L'ordre de grandeur du déplacement latéral est donné par l'amplitude de la translation qui est, à cette profondeur, d'environ 1 mm. par cm. de hauteur.





- Les domaines à structure pétrographique conservée

Les domaines à structure pétrographique conservée présentent le même état d'altération que le sommet de l'ensemble I. Les plagioclases, notamment, sont presque totalement altérés. On observe de plus :

+ au sein du voile microcristallin qui occupe l'emplacement des plagioclases, l'apparition de grandes particules de kaolinite de 90 μ m de longueur, disposées en éventail (ph. 2, pl. 7), incolores en L.N. et à teinte de biréfringence faible, dans les gris du 1er ordre. Ces particules se distinguent des produits d'altération des séricites par leur dimension plus grande, leur teinte de biréfringence un peu plus faible, et la géométrie plus régulière de leur assemblage. Ces vermicules ou éventails ont été décrits par de nombreux auteurs, ils pourraient correspondre à une seconde génération (néoformation) de kaolinite, à partir des solutions extra-cristallines, tout comme la kaolinite cristallisée perpendiculairement aux lamelles de biotites.



5 MM

-  Domaine à structure pétrographique
-  Domaine à structure particulière
-  Diaclase comblée de particules limoneuses
-  Sens de la translation

L.N.

PLANCHE 6 TRANSITION ENTRE LES ENSEMBLES I ET II DE L'ARENE