



HAL
open science

ALTÉRATION ET DIFFÉRENCIATION PÉDOLOGIQUE SUR GRANITE EN BRETAGNE. ETUDE D'UNE TOPOSÉQUENCE

Pierre Curmi

► **To cite this version:**

Pierre Curmi. ALTÉRATION ET DIFFÉRENCIATION PÉDOLOGIQUE SUR GRANITE EN BRETAGNE. ETUDE D'UNE TOPOSÉQUENCE. Géochimie. Université de Rennes 1 [UR1]; ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE AGRONOMIQUE DE RENNES, 1976. Français. NNT : . tel-01576590

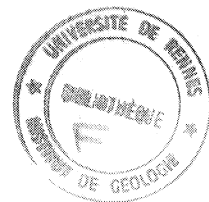
HAL Id: tel-01576590

<https://insu.hal.science/tel-01576590>

Submitted on 23 Aug 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**ALTERATION
ET DIFFERENCIATION PEDOLOGIQUE
SUR GRANITE EN BRETAGNE
ETUDE D'UNE TOPOSEQUENCE**

1979

P. CURMI

ERRATA

p. 13	ligne 7	lire	<i>ont étudié</i>	au lieu de	<i>ont étudiés</i>
p. 13	ligne 31	lire	<i>ont étudié</i>	au lieu de	<i>ont étudiés</i>
p. 32	ligne 9	lire	<i>calcique</i>	au lieu de	<i>sodique</i>
p. 32	ligne 10	lire	<i>disparu</i>	au lieu de	<i>disparus</i>
p. 36	ligne 12	lire	<i>sodium</i>	au lieu de	<i>magnésium</i>
p. 149	ligne 32	lire	<i>apparaît</i>	au lieu de	<i>appârait</i>
p. 154	ligne 17	lire	<i>et l'autre partie</i>	au lieu de	<i>est l'autre partie</i>

E.N.S.A. de RENNES

Département : Productions Végétales

N° D'ORDRE : 79/5

SÉRIE : D

N° DE SÉRIE : 2

INSTITUT de GÉOLOGIE de RENNES	
Numero d'inventaire Bibliothèque	1623 THÈSE



UNIVERSITÉ DE RENNES

Section Agronomie

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	

Que tous ceux qui ont permis

la réalisation de ce travail

soient ici remerciés.

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'altération 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.

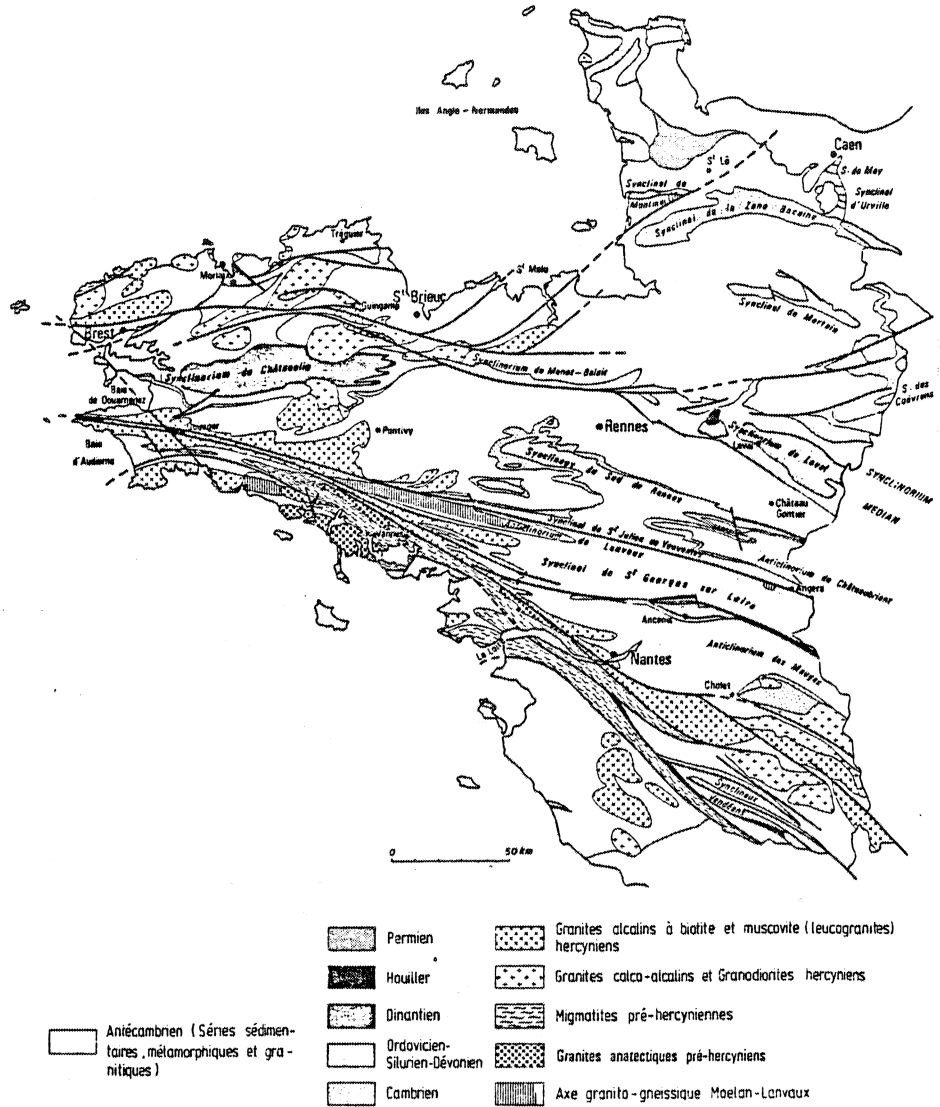


FIGURE 1 - Le Massif Armoricain : Structure et granites hercyniens.

(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).

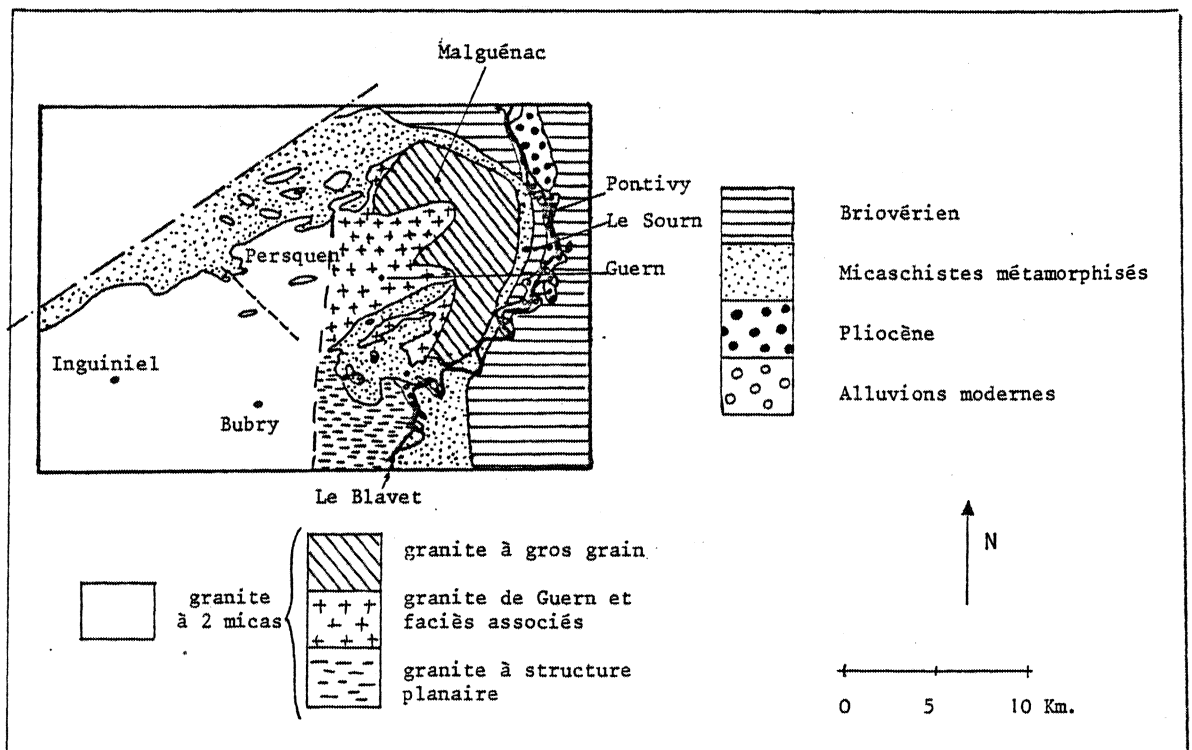


FIGURE 2 - Carte géologique de la partie orientale du massif granitique de PONTIVY.

(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 I - 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 étroits (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 (LARIVIÈRE & 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	649
	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

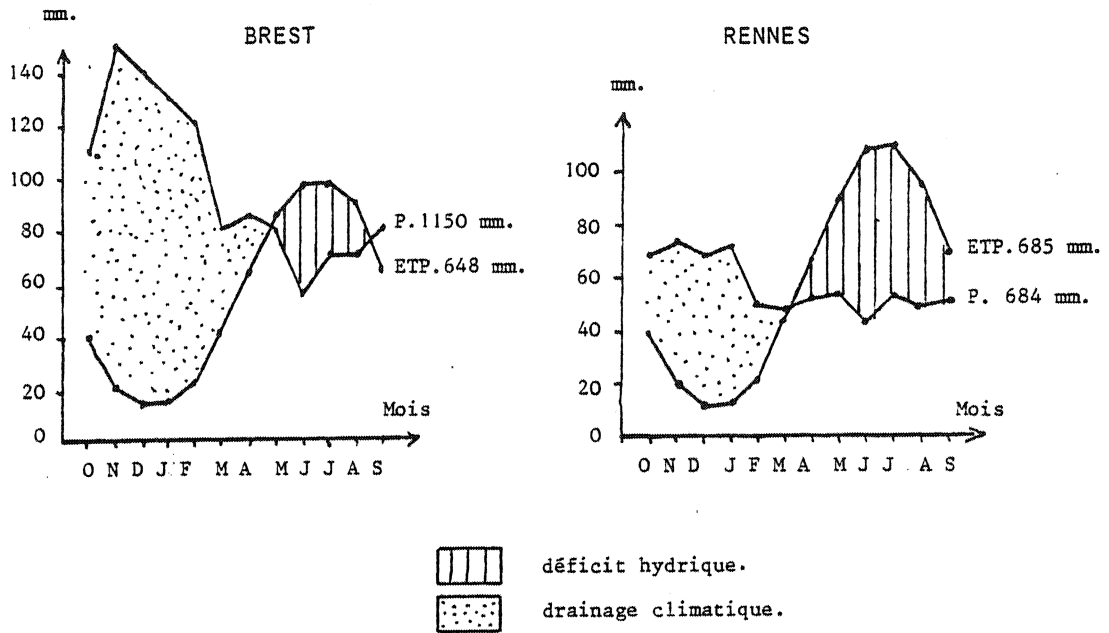


FIGURE 3 - Bilan hydrique - Stations de BREST et RENNES.

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 gel, 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 BILDOM (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 ESTEOLLE-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.

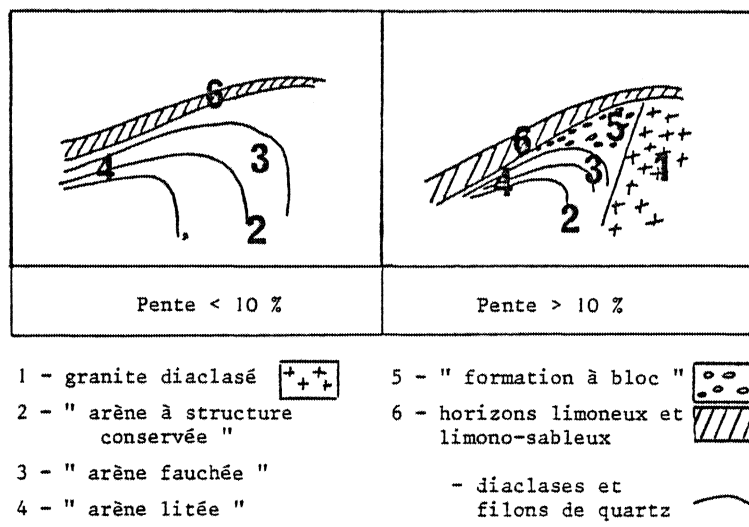


FIGURE 4 - Distribution des différents types d'arènes en fonction de la pente.

(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 fragique 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).

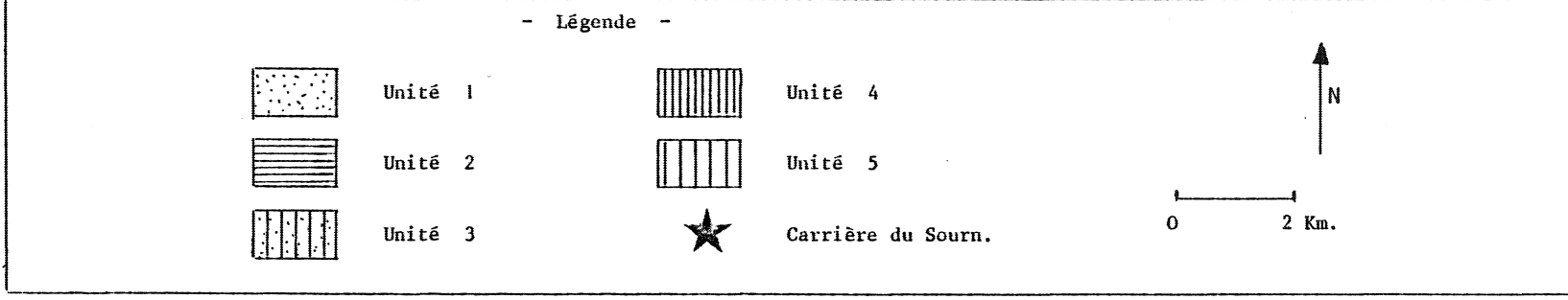
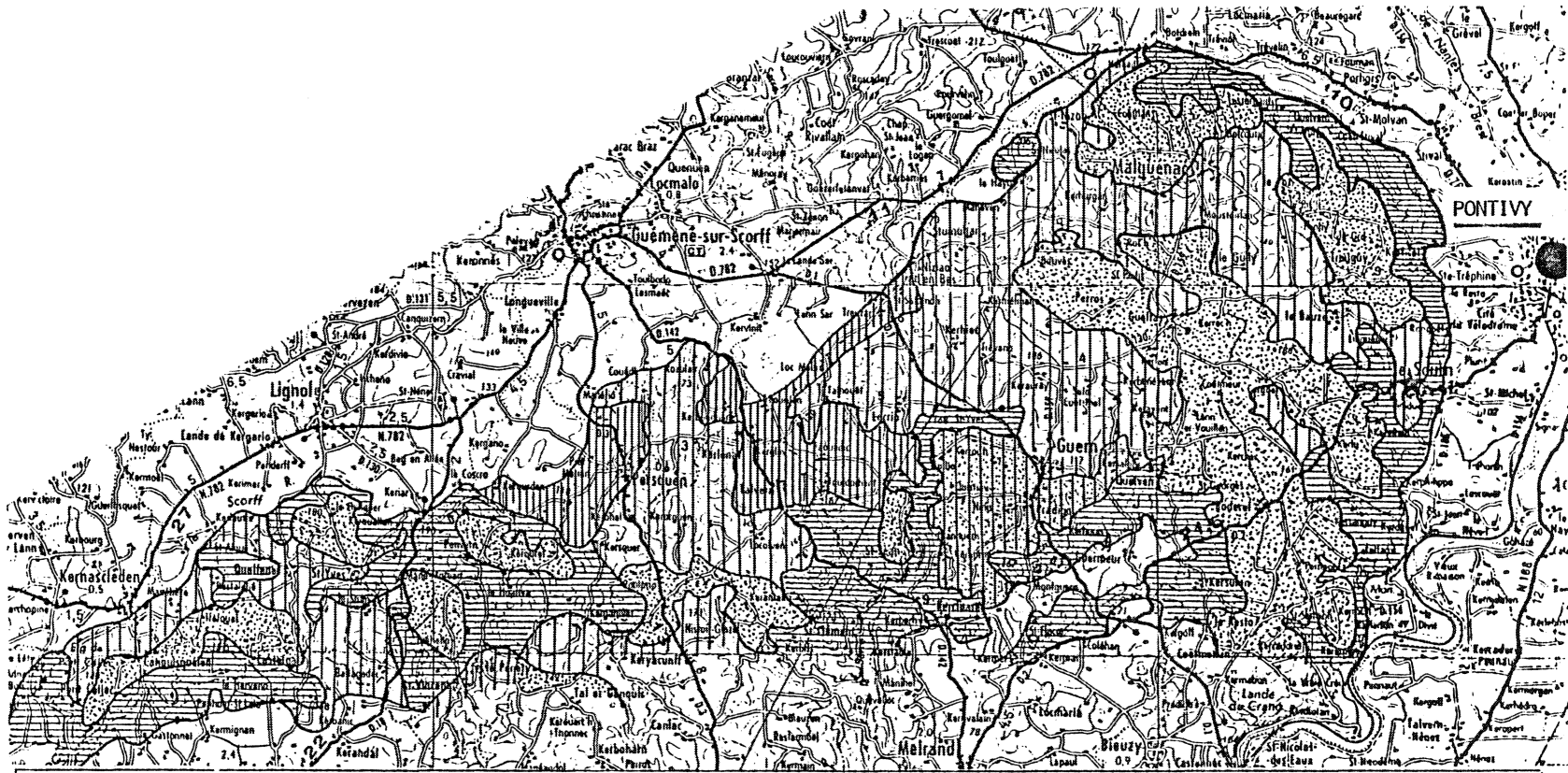


FIGURE 5 - Carte pédologique du Nord-Ouest du massif granitique de PONTIVY (précision 1/250 000ème).
(CURMI, RIVIERE, RUELLAN).

- Paysage P1

- . Sur les plateaux, dominant 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

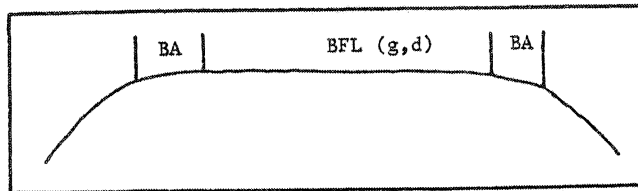


Figure 6 - Séquence de sols de l'unité 1

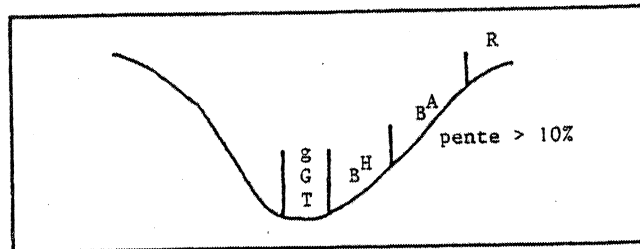


Figure 7 - Séquence de sols de l'unité 2

- 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).

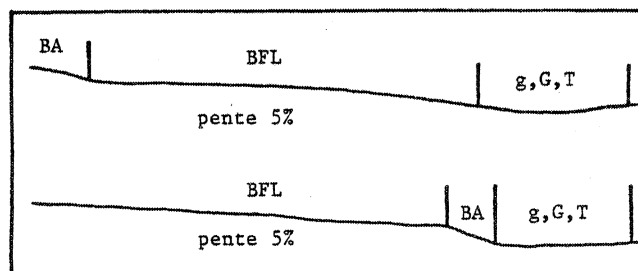


Figure 8 - Séquence de sols de l'unité 3

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*).

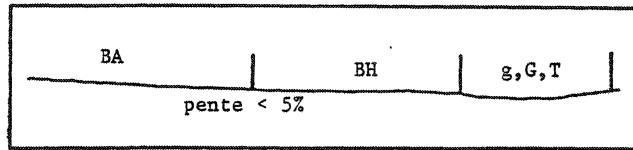


Figure 9 - Séquence de sols de l'unité 4

- 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*).

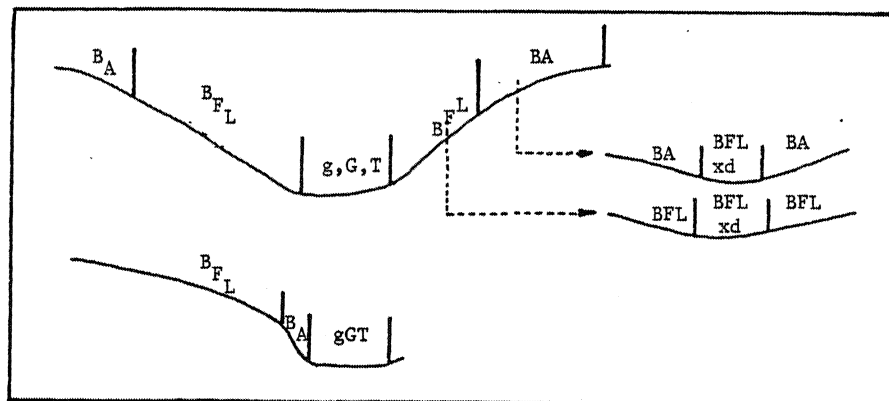


Figure 10 - Séquence de sols de l'unité 5

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.

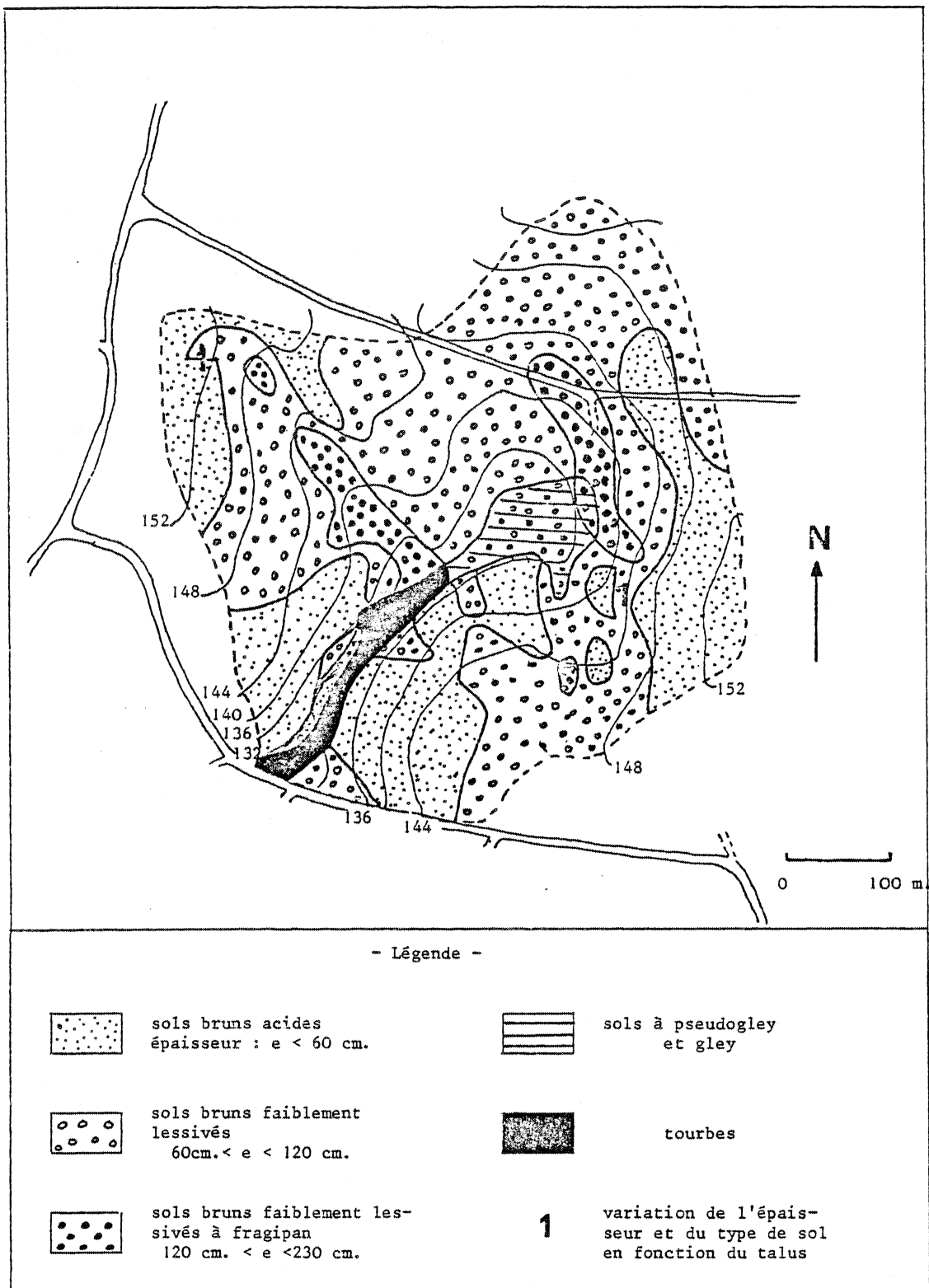


FIGURE 11 - Carte pédologique du bassin versant élémentaire de PENETY.
(CARNET, CURMI, DOSSO).

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.

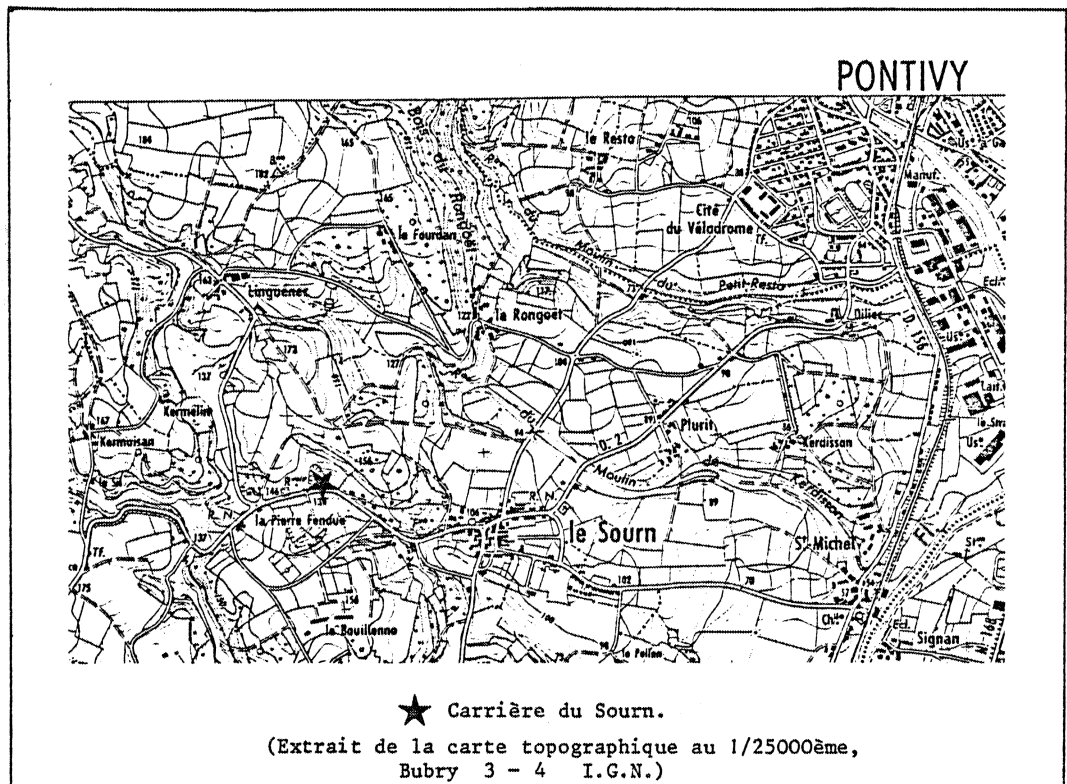


FIGURE 12 - Schéma de situation de la carrière du Sourn.

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 pédographique (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).



DEUXIEME PARTIE :

L'ARENE GRANITIQUE

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.

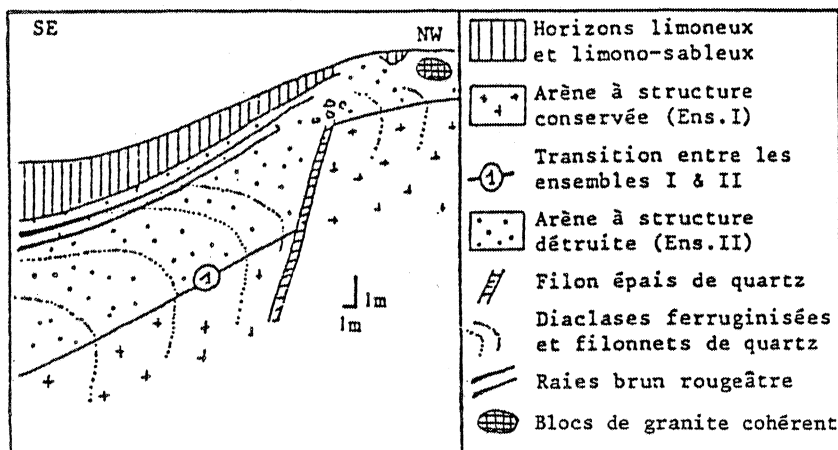


FIGURE 13 - Les principaux ensembles différenciés dans l'arène.

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 MUNSSELL.

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

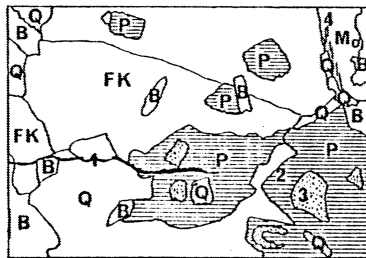
Les plagioclases présentent un réseau dense de fissures orthogonales. Ces fissures sont emplies d'un voile microcristallin : les cristallites, inférieurs à 5 µm, sont transparents en L.N. et polarisent dans les gris du premier ordre; ils ne sont pas orientés, le plasma est asépique. Vers 10 mètres de profondeur, ce voile est localisé au cœur 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)

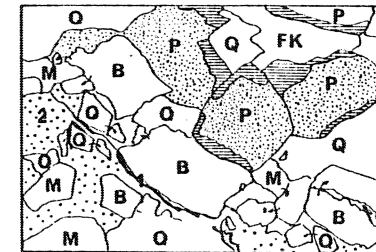
PHOTO 1 - Base de l'arène à structure conservée.
(vers 10 m. de profondeur) (L.P.)



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.

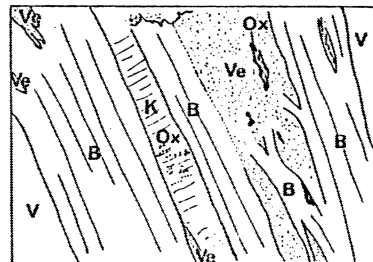
PHOTO 2 - Sommet de l'arène à structure conservée.
(vers 3 m. de profondeur) (L.N.)



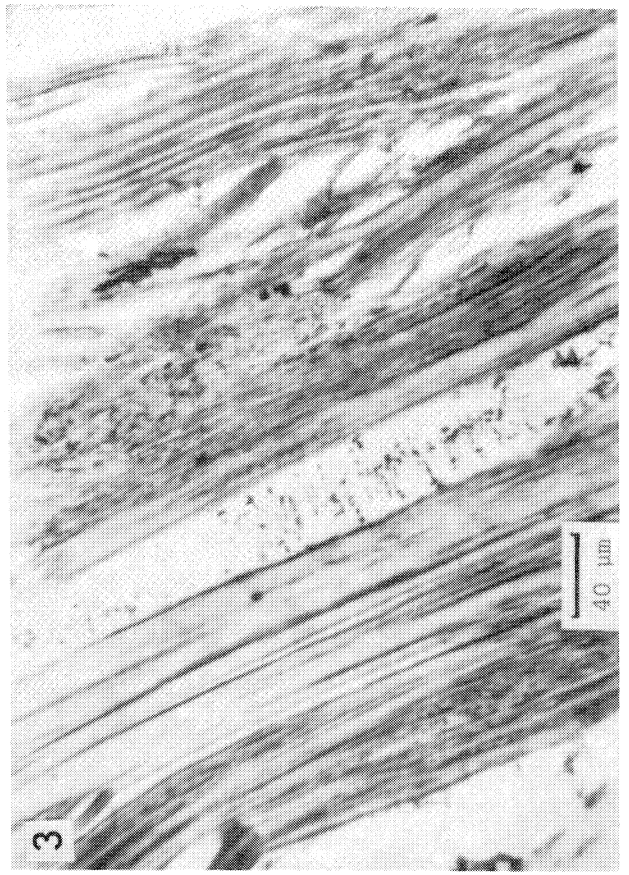
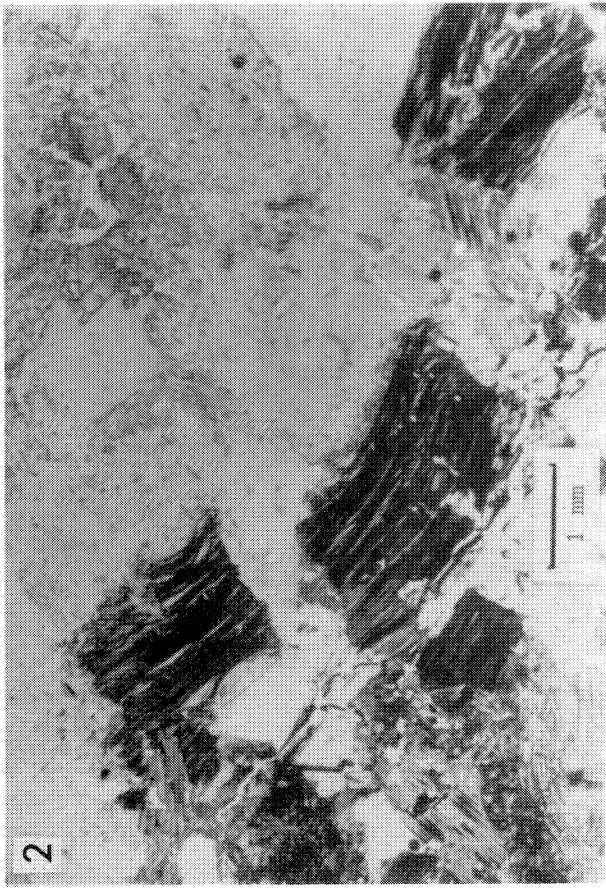
P : Plagioclases
Produits secondaires
Partie saine

- 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 cristallographiques 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 MB1 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; BISSOM & 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.

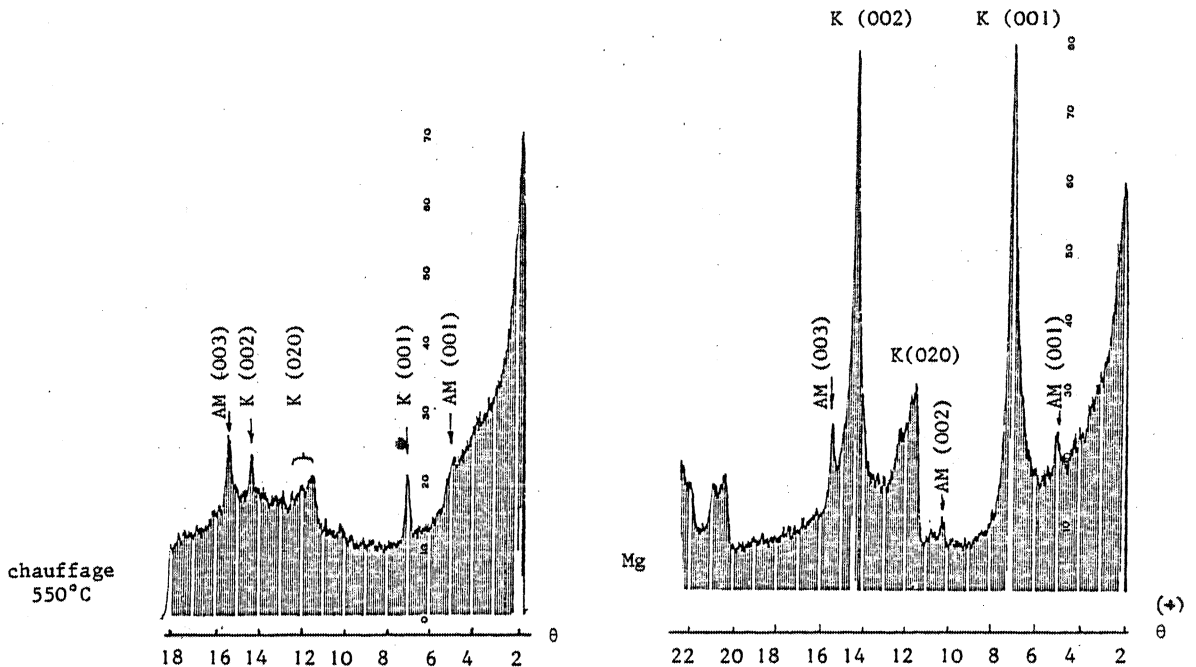


FIGURE 14 - Arène à structure conservée (ensemble I), fraction < 2 μm .
- diagramme Rayons X d'argile orientée -

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.

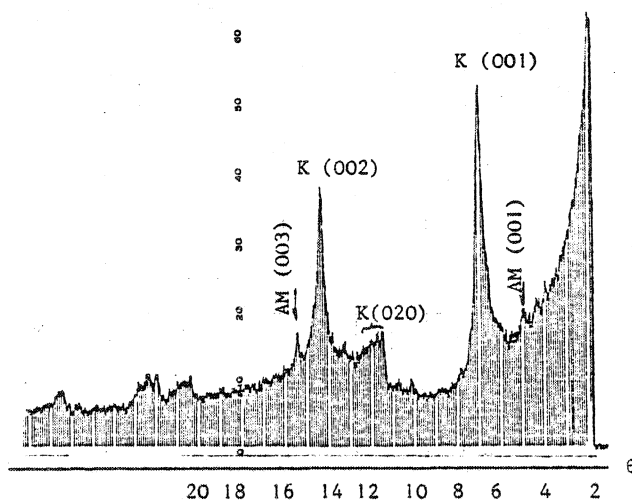


FIGURE 15 - Arène à structure conservée (ensemble I), fraction < 2µm.
- diagramme Rayons X de poudres -

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

La courbe d'A.T.D. de la fraction inférieure à 2 µm. (fig.16), fait apparaitre 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.

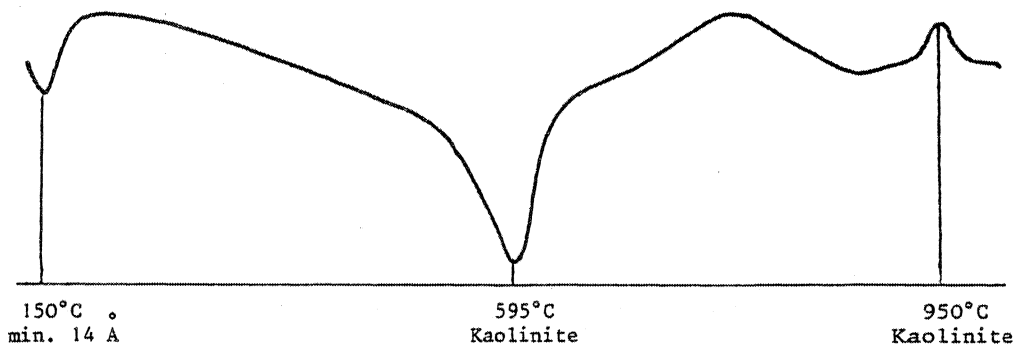


FIGURE 16 - Arène à structure conservée - fraction inférieure à 2 µm.
Analyse Thermique Différentielle.

- Spectroscopie Infra-Rouge (I.R.)

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

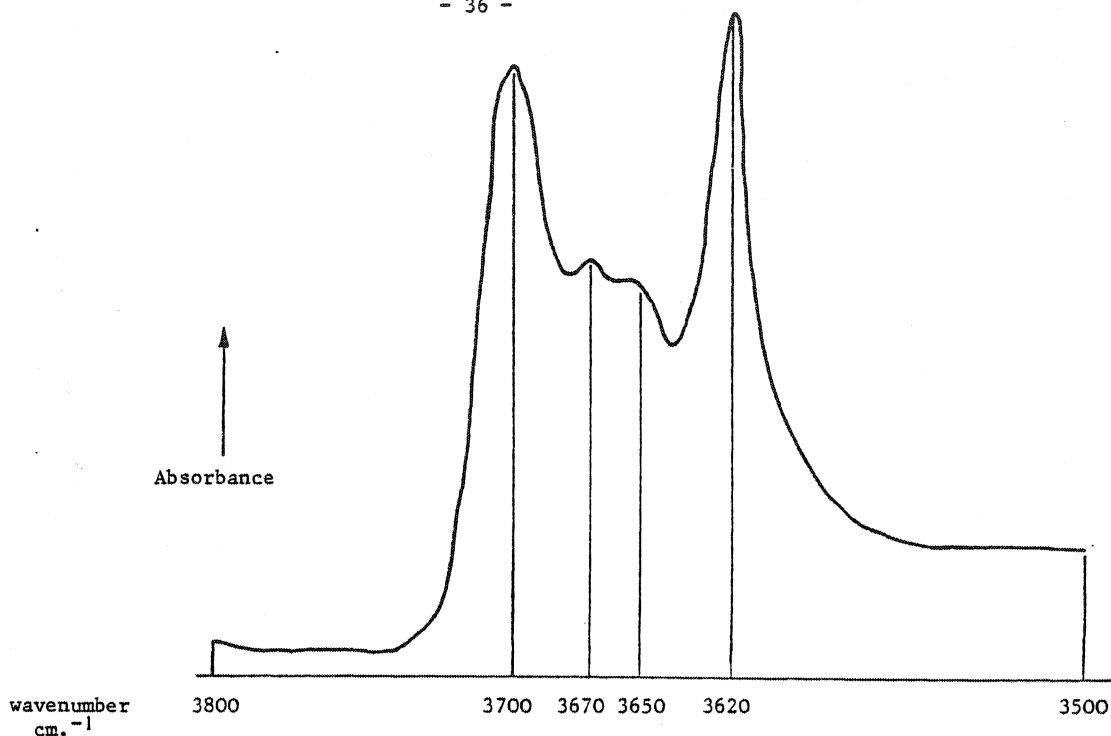


FIGURE 17 - Arène à structure conservée - fraction inférieure à 2 μ m. -
Spectre infra-rouge (bande de vibration des OH).

La fraction inférieure à 2 μ m. 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 analysés 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 restent 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.

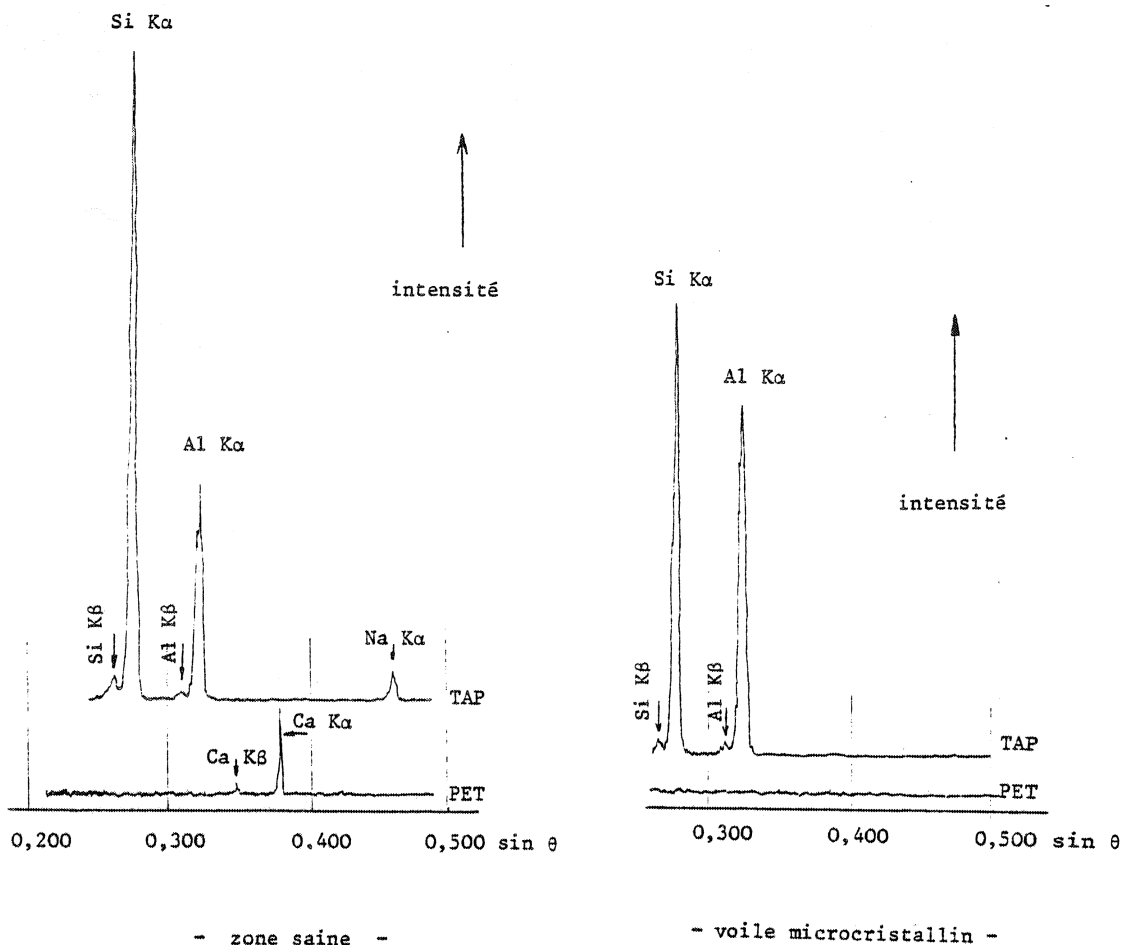


FIGURE 18 - Spectre X d'une zone " saine " du plagioclase et du voile microcristallin.

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

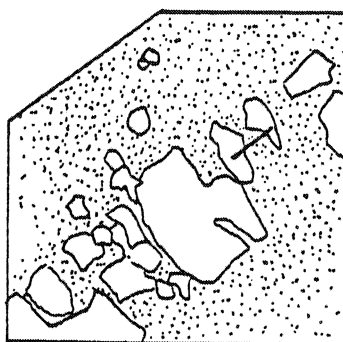
Les caractéristiques des cristaux utilisés sont les suivantes :

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.).






-  Fragments sains du plagioclase.
-  Voile microcristallin d'altération.
-  Emplacement de la traversée (ph. 3).

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.

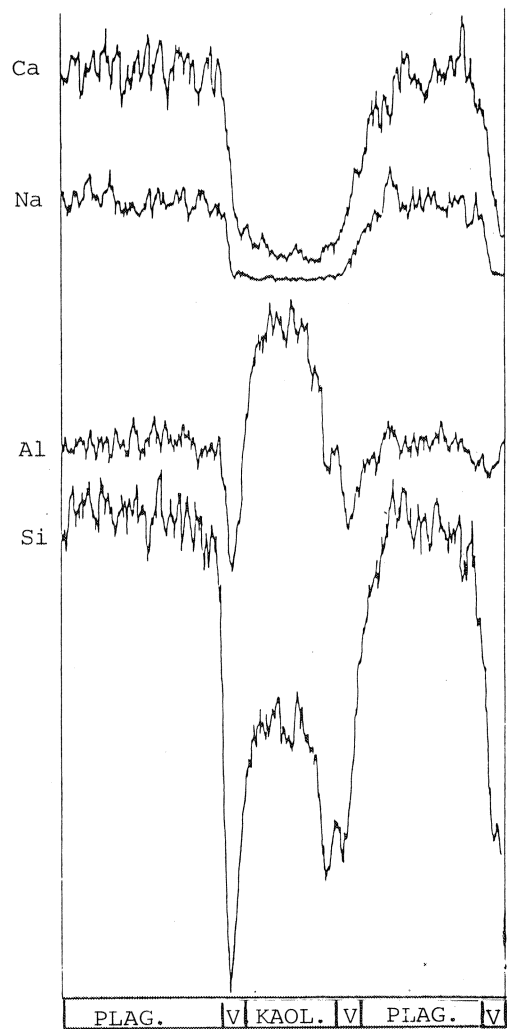
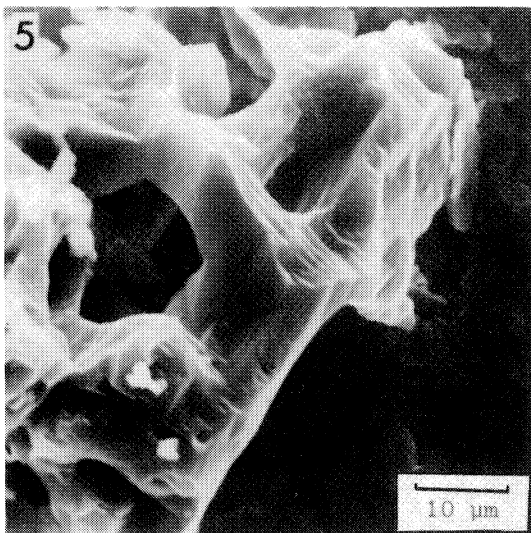
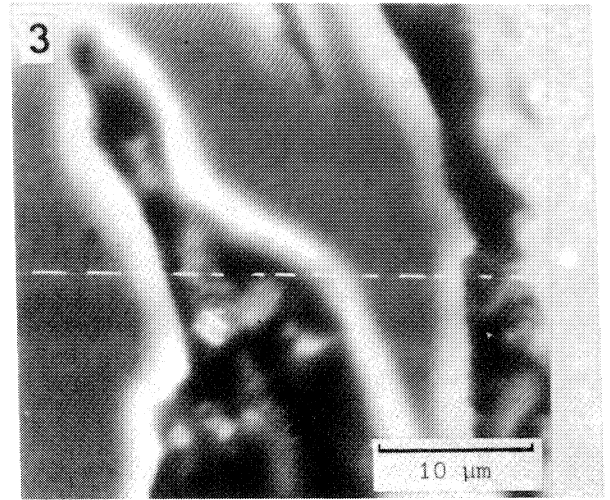
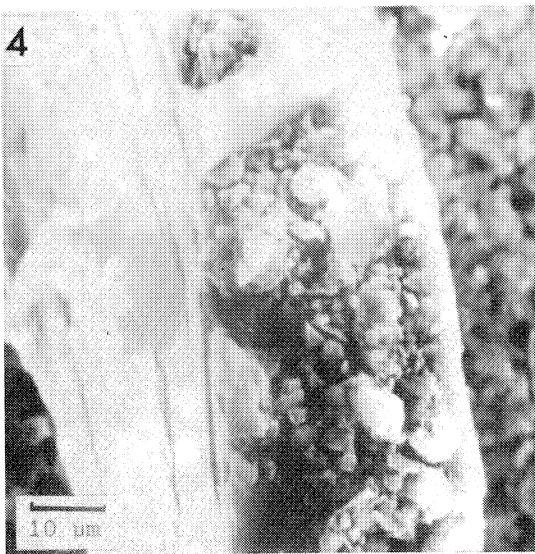
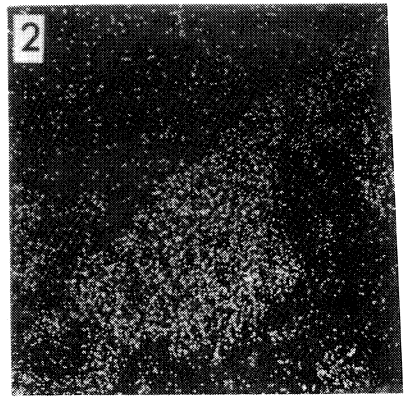
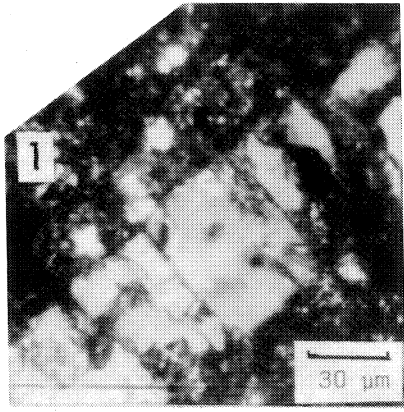




TABLEAU 4 - Analyses quantitatives ponctuelles à la sonde électronique de plages "saines" et altérées voisines de 5 plagioclases (E.D.S. - détecteur Si(Li)).

- 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	5.56	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, p_l.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, p_l.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).

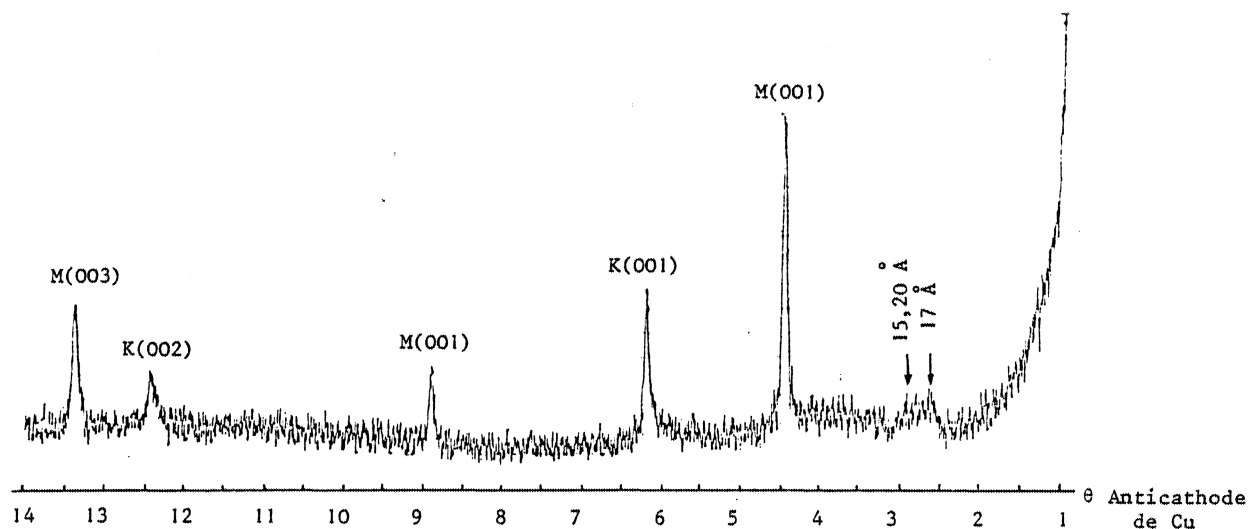


FIGURE 19 - Muscovite, fractions fines séparées aux ultra-sons - diagramme Rayons X -

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.

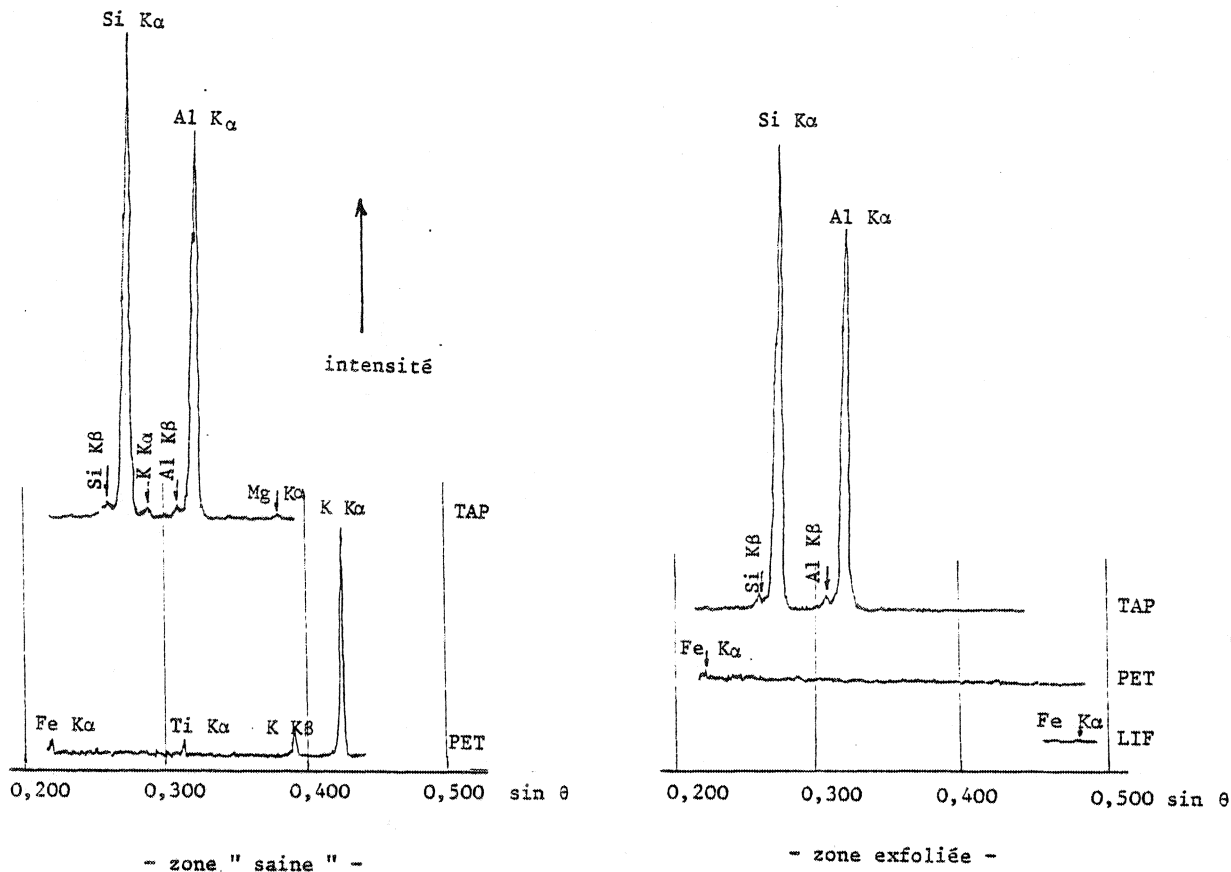


FIGURE 20 - Spectre X d'une zone "saine" et d'une zone exfoliée de muscovite.

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.) -

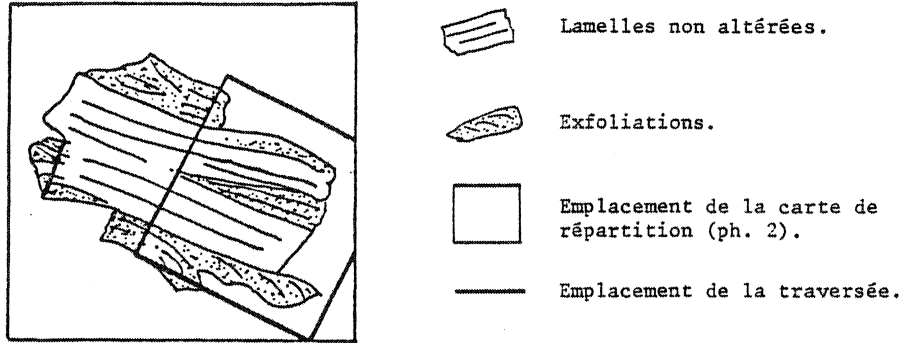


PHOTO 2 - Image X de la répartition du potassium.

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.

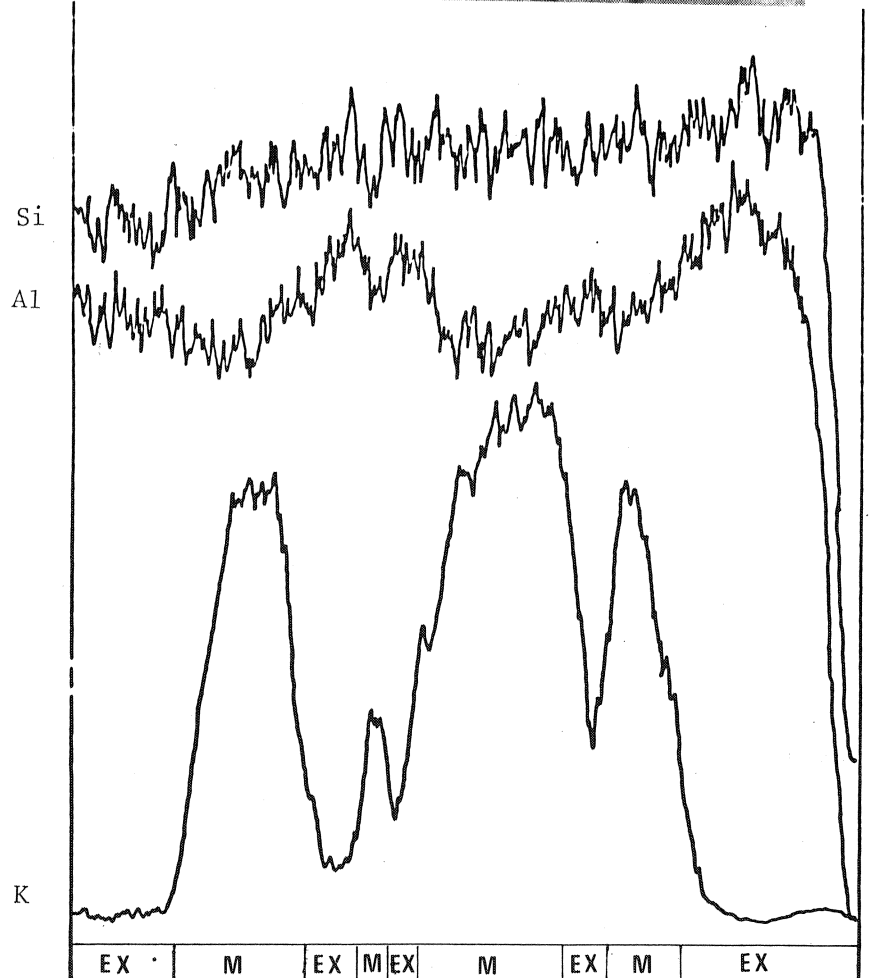
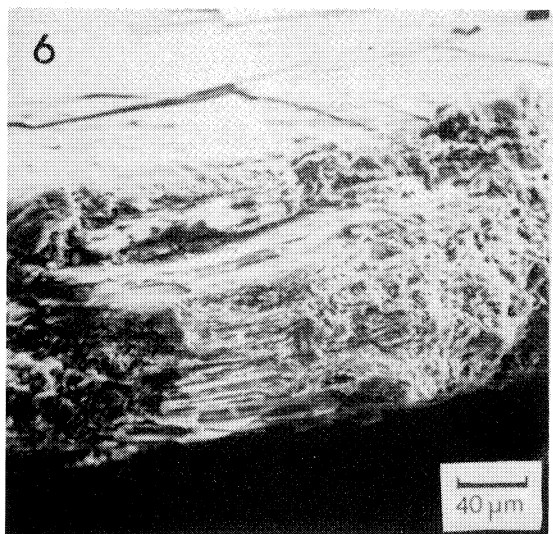
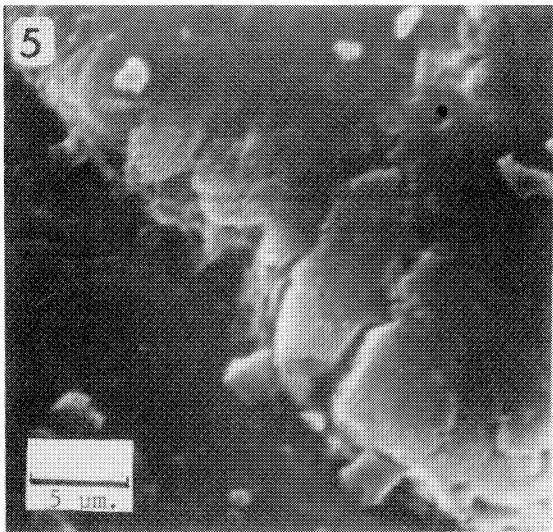
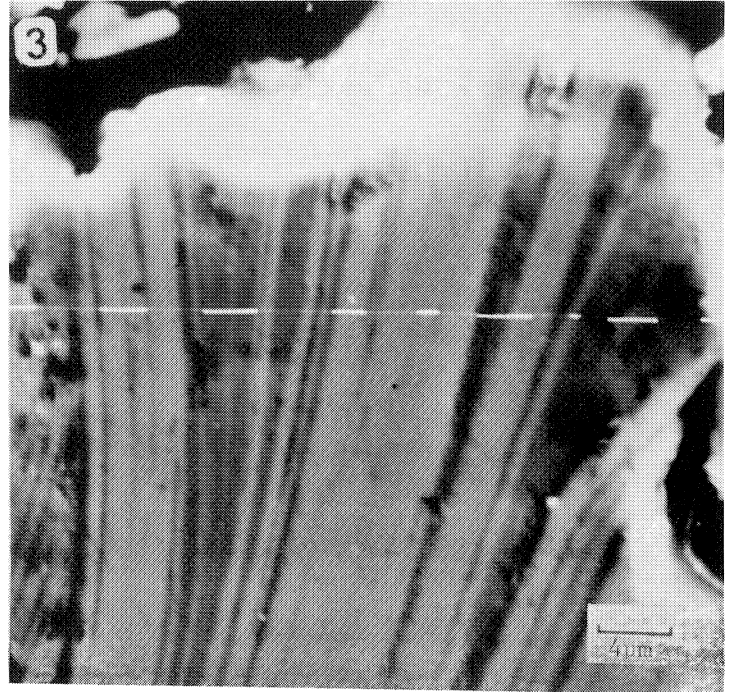
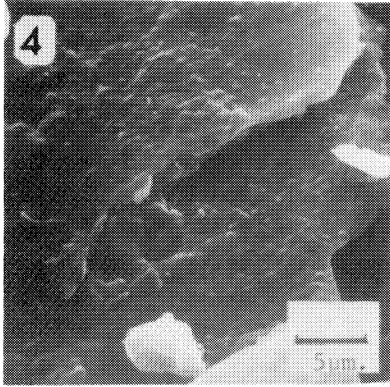
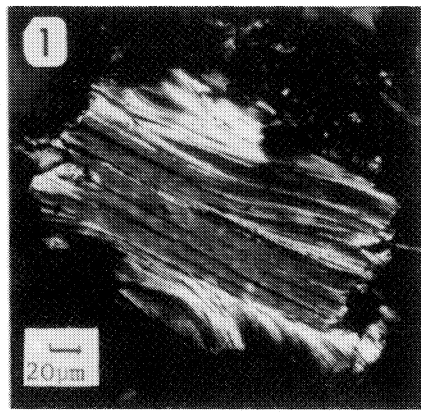
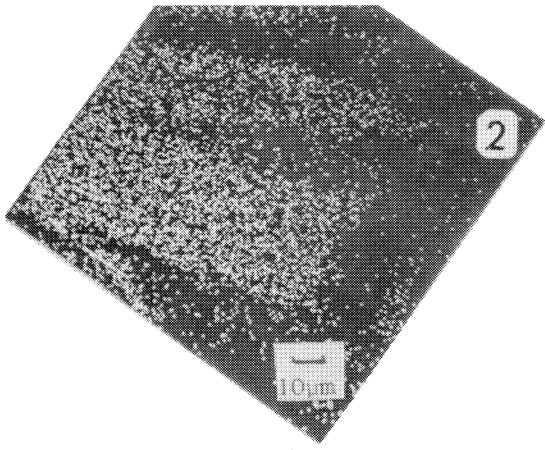


TABLEAU 5 - Analyses quantitatives ponctuelles à la sonde électronique de lamelles voisines "saines" et exfoliées en bordure de 4 muscovites (E.D.S. - détecteur Si(Li)).

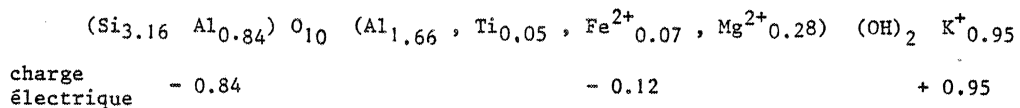
- MS : lamelle "saine" ; MA : exfoliation -

Z oxydes pondéraux	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)	1.25	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		Augm. MS→MA			
$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	2.53	2.21		2.51	2.18		2.52	2.22		2.54	2.19	
$\frac{SiO_2}{R1}$	7.87	13.37	1.7	8.87	13.78	1.55	7.84	13.56	1.73	7.88	13.10	1.66
$\frac{SiO_2}{R2}$	6.63	98.48	14.8	6.60	443.6	67.2	6.65	389.6	58.6	6.64	453.7	68.3
$\frac{Al_2O_3}{R1}$	3.11	5.60	1.8	3.54	6.32	1.78	3.10	6.11	1.97	3.11	5.99	1.93
$\frac{Al_2O_3}{R2}$	2.62	44.6	17.0	2.63	207.7	79.0	2.64	175.5	66.5	2.62	207.3	79.12
Nb. de cations pour 11 ox.			(*)									
Si ⁴⁺	3.163	3.188	3.164	3.177	3.190		3.157	3.209		3.167	3.189	
Al ³⁺	2.500	2.887	2.866	2.534	2.921		2.506	2.891		2.497	2.914	
Ti ⁴⁺	0.049	0.003	0.003	0.006			0.049			0.041		
(+) Fe ²⁺	0.073	0.041	0.041	0.072	0.020		0.065	0.017		0.070	0.031	
Mg ²⁺	0.280	0.213	0.212	0.280	0.211		0.288	0.219		0.290	0.211	
K ⁺	0.954	0.064	0.064	0.962	0.014		0.950	0.016		0.954	0.014	

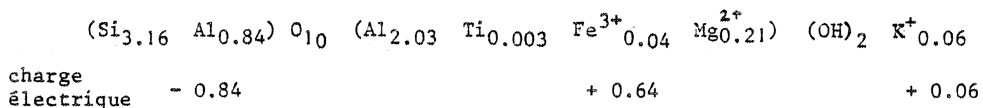
(+) Tout le fer est estimé en Fe²⁺ R1 = Fe + Mg + Ti
 (*) Tout le fer est estimé en Fe³⁺ R2 = K + Ca + Na

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 (3)

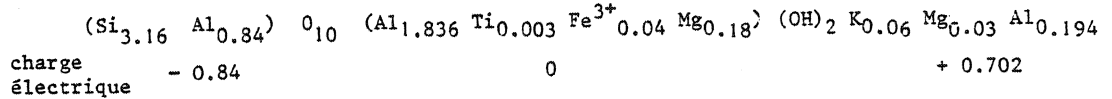


Vermiculite



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

Cette dernière formule accuse une charge octaédrique trop élevée. On peut donc penser qu'une partie de l'aluminium se trouve en position interfoliaire. En supposant une charge octaédrique nulle, on pourrait écrire la formule suivante qui correspondrait à une vermiculite hydroxyalumineuse :



Cette vermiculite hydroxyalumineuse apparaît cependant, très pauvre en Fe et K par rapport à celles analysées par SEDDOH (1973) et MEUNIER (1977)

γ - Observations morphologiques au microscope électronique à balayage (MEB).

Des muscovites de taille comprise entre 1 et 2 mm. ont été observées au MEB. On a pu distinguer :

- sur la surface des cristallites, une légère desquamation en écaille de 2 μm . de diamètre (*ph. 4, pl. 3*) et sur les bords des cristallites une microdivision (*ph. 5 & 6, pl. 3*). Ce dernier aspect se rapproche de celui des vermiculites décrites par SEDDOH et ROBERT (1972).

En conclusion, les zones exfoliées en bordure des muscovites n'ont pas subi seulement une évolution mécanique, mais elles sont également chimiquement appauvries en potassium et transformées en vermiculites hydroxyalumineuses.

4 - Altération des biotites

α - Diffractométrie des Rayons X

Les biotites du sommet de l'arène à structure conservée ont été triées dans la fraction 360-240 μm . à l'aide d'un séparateur magnétique FRANTZ. Un diagramme de poudre RX a été effectué sur ces biotites, après broyage. Celui-ci montre (*fig. 21*) à côté des raies de la biotite, les réflexions d'un interstratifié régulier à 12,2 \AA et 8,4 \AA et les raies de la kaolinite à 7,3 \AA et 3,6 \AA . Les raies à 12,2 \AA et 8,4 \AA ne sont pas modifiées après traitement au KCl; elles ferment à 10 \AA après chauffage à 350°C. Il s'agit donc d'un interstratifié régulier, biotite-vermiculite hydroxyalumineuse ou biotite-chlorite.

On observe donc, en plus de la kaolinite, la présence d'un interstratifié qui accompagne la biotite et qui n'était pas apparu à la seule analyse de la fraction inférieure à 2 μm .

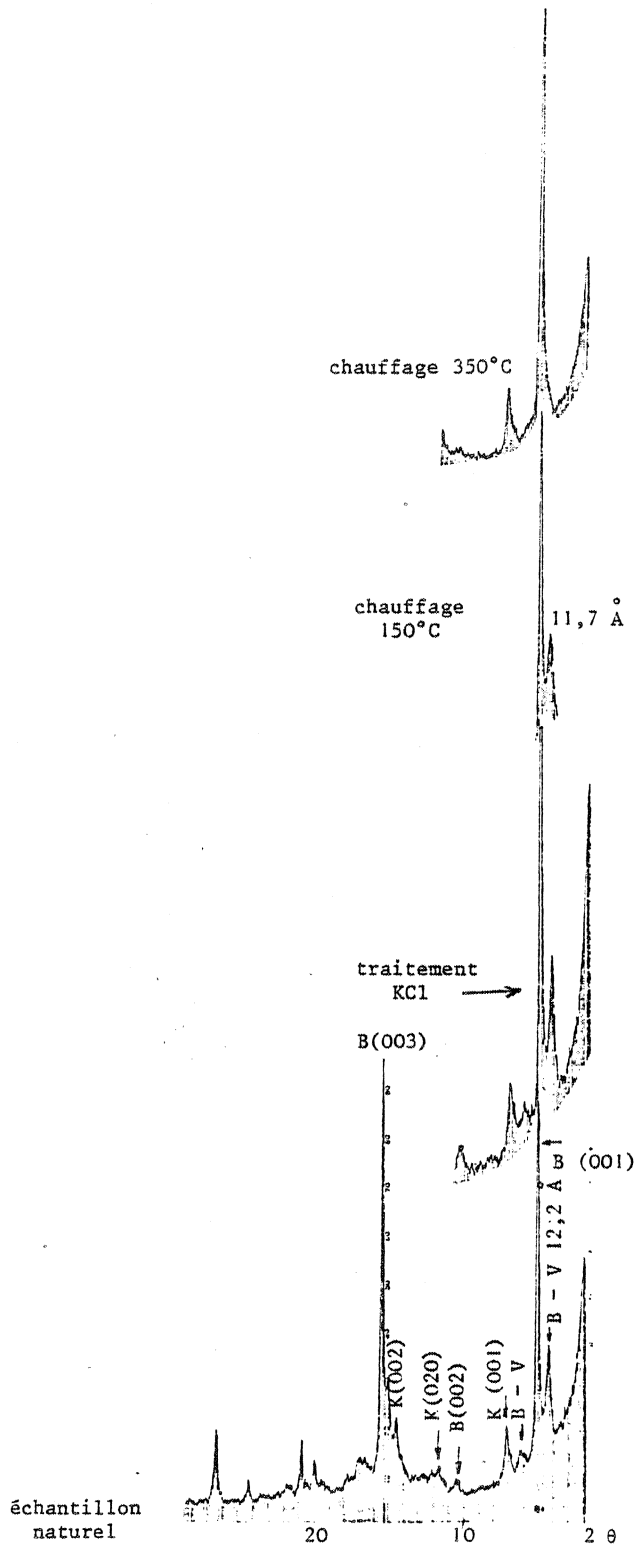


FIGURE 21 - Biotite, sommet de l'arène à structure conservée.
- diagramme Rayons X de poudres -

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.

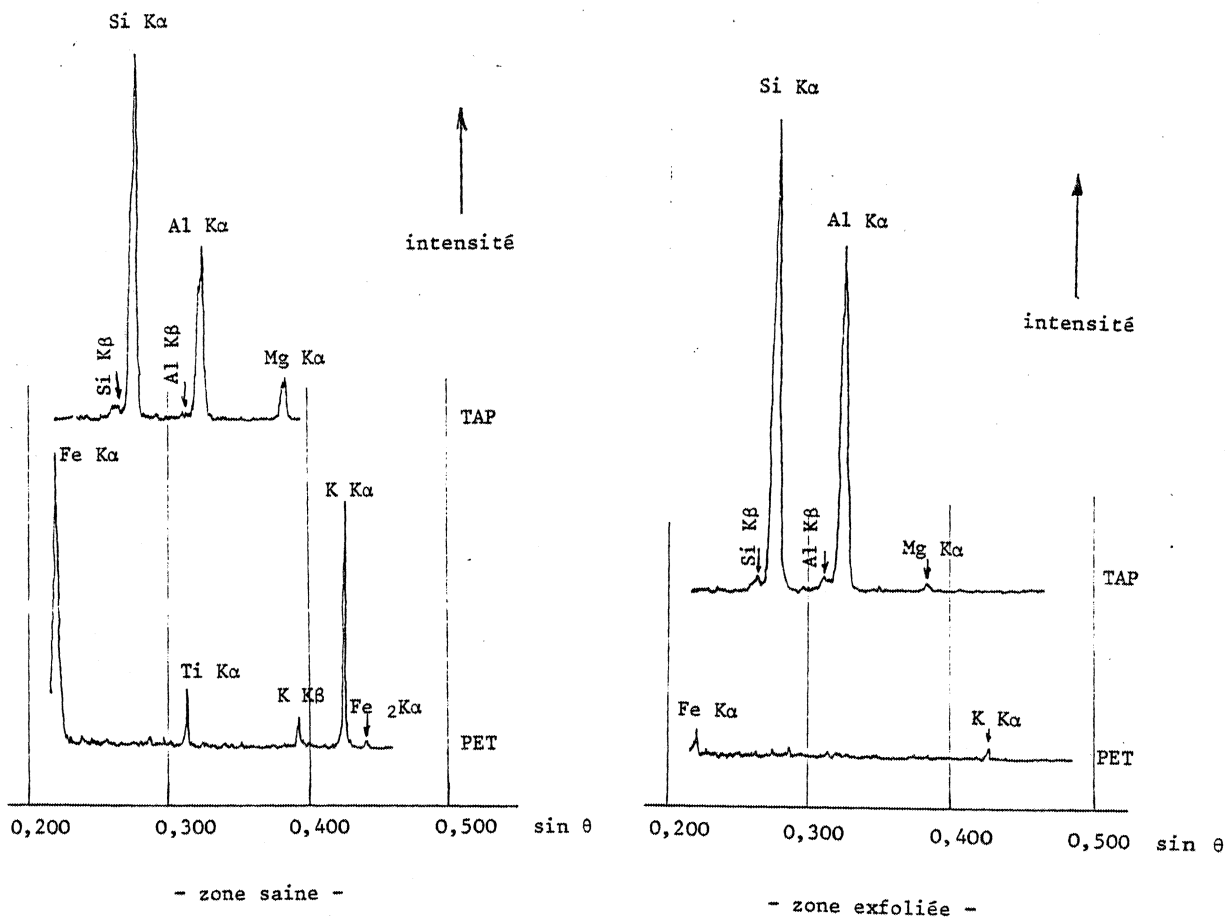


FIGURE 22 - Spectre X d'une zone " saine " et d'une zone exfoliée de biotite.

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 $< 3 \mu\text{m}$, 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 feuillets 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 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ passe de 4 à 2.3
- les autres cations, Fe, Mg, Ti et K sont fortement évacués : les rapports $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{R}_1$ et $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{R}_2$ 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 :

$$\begin{array}{ccc} \text{augmentation} & \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{R}_1} & < & \text{augmentation} & \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{R}_2} \\ \text{Bs} \rightarrow \text{Ba} & & & \text{Bs} \rightarrow \text{Ba} & \end{array}$$

$\text{R}_1 = \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ti}$
 $\text{R}_2 = \text{K} + \text{Ca} + \text{Na}$

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 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ trop élevé.

PLANCHE 4 - ALTÉRATION DES BIOTITES.

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

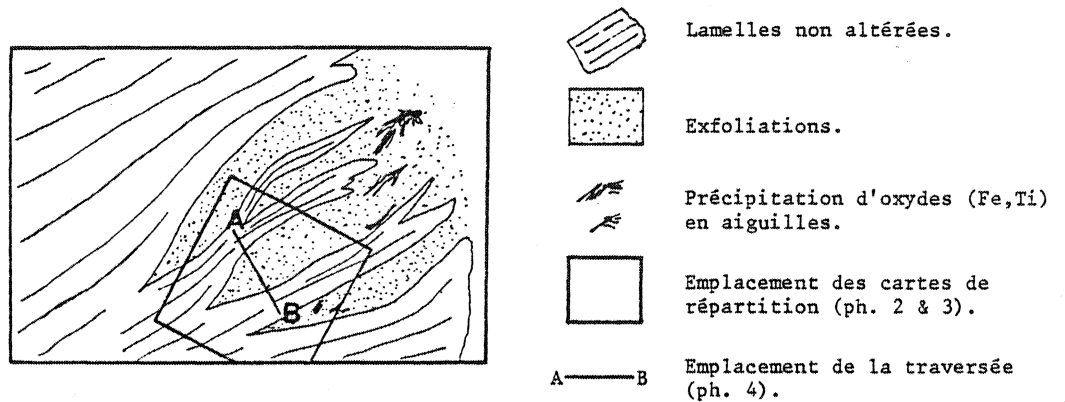


PHOTO 2 - Image X de répartition du potassium.

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).

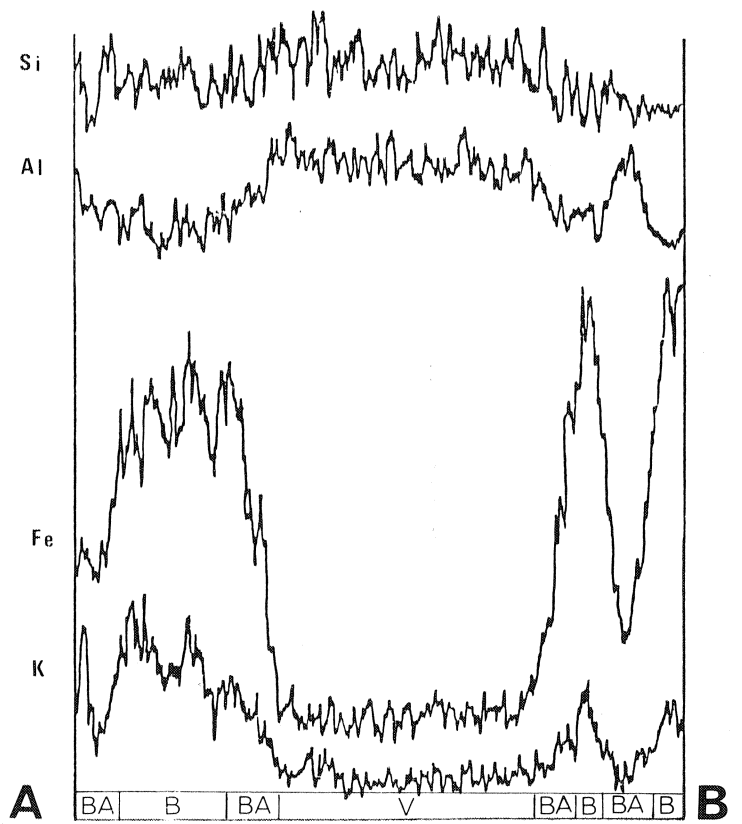
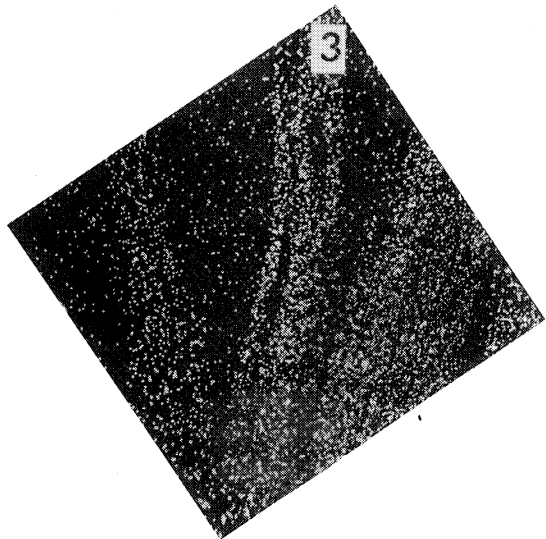
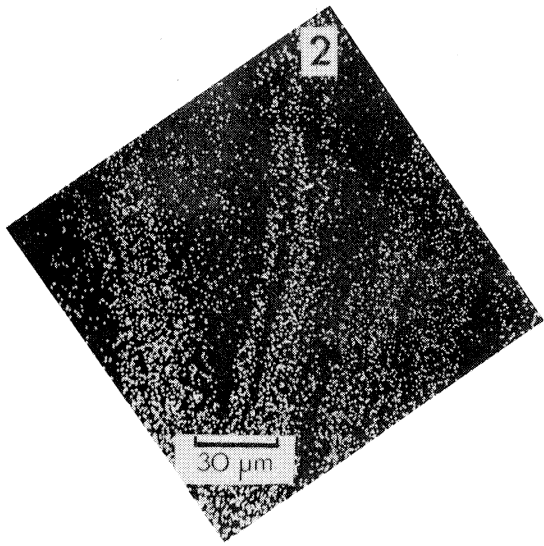
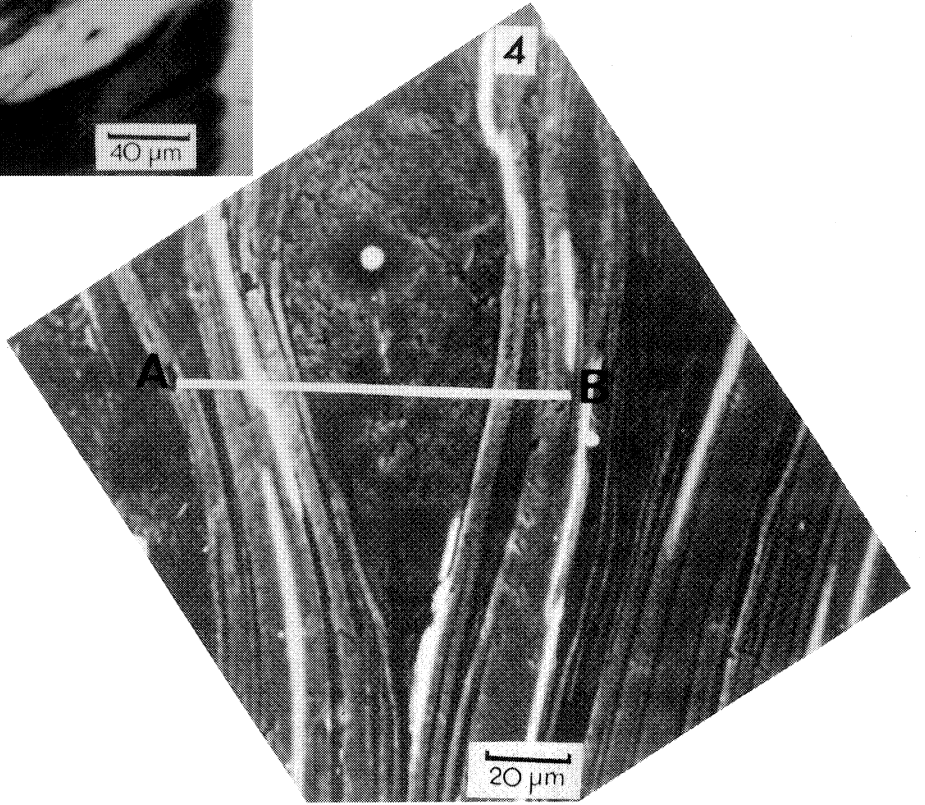
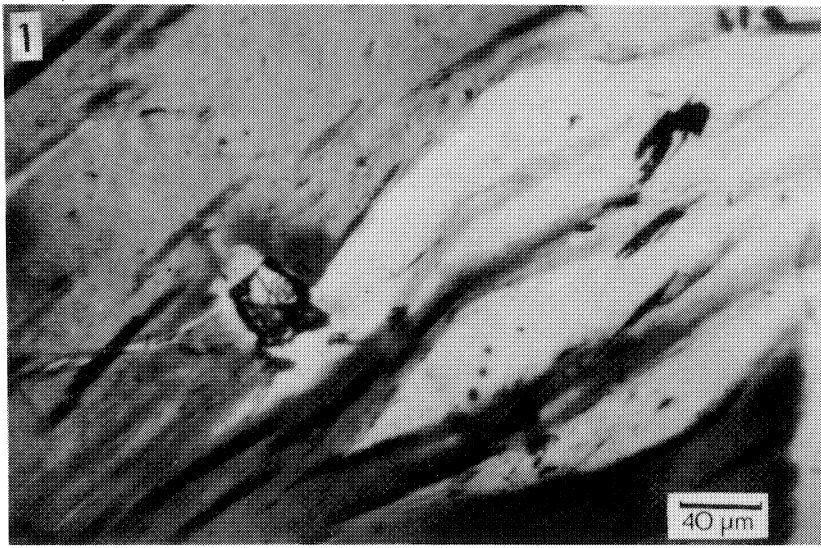


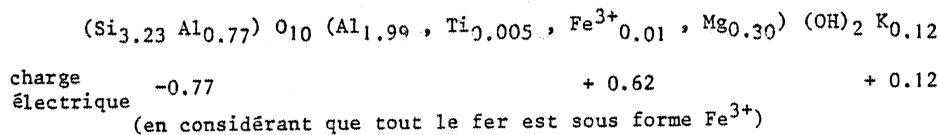
TABLEAU 6 - Analyses quantitatives ponctuelles à la sonde électronique de lamelles voisines "saines" et exfoliées de 5 biotites (E.D.S. - détecteur Si(Li)).
- BS : lamelle saine; BA : exfoliation -

% oxydes pondéraux	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
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	22.55	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	95.94	82.13	101.48	78.35	102.19	84.36
Rapports moléculaires			Augm. BS→BA		Augm. BS→BA		Augm. BS→BA		Augm. BS→BA	
$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	3.87	2.35		4.05	2.18		3.96	2.24	4.00	2.35
$\frac{SiO_2}{R1}$	1.23	7.70	6.26	1.15	8.82	7.67	1.18	9.28	7.86	1.18
$\frac{SiO_2}{R2}$	6.92	49.26	7.12	5.60	46.59	8.32	5.76	69.14	12.00	5.84
$\frac{Al_2O_3}{R1}$	0.32	3.28	10.25	0.28	4.05	14.46	0.30	4.14	13.80	0.29
$\frac{Al_2O_3}{R2}$	1.79	21.00	11.73	1.38	21.39	15.50	1.46	30.87	21.14	1.46
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
Al ³⁺	1.502	2.735	2.720	1.411	2.876		1.449	2.837	1.435	2.762
Ti ⁴⁺	0.168			0.178			0.165		0.187	0.005
(*) Fe ²⁺	1.402	0.116	0.115	1.497	0.056		1.449	0.076	1.448	0.011
Mg ²⁺	0.781	0.300	0.299	0.807	0.298		0.813	0.267	0.798	0.305
K ⁺	0.840	0.130	0.130	1.020	0.134		0.995	0.092	0.981	0.125

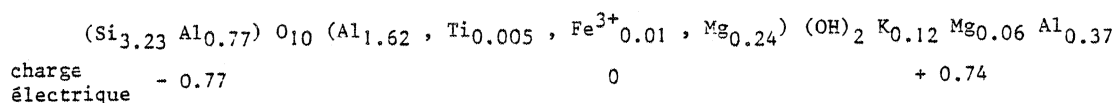
(*) Tout le fer est estimé en Fe²⁺
(**) Tout le fer est estimé en Fe³⁺

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 :



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 :



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*

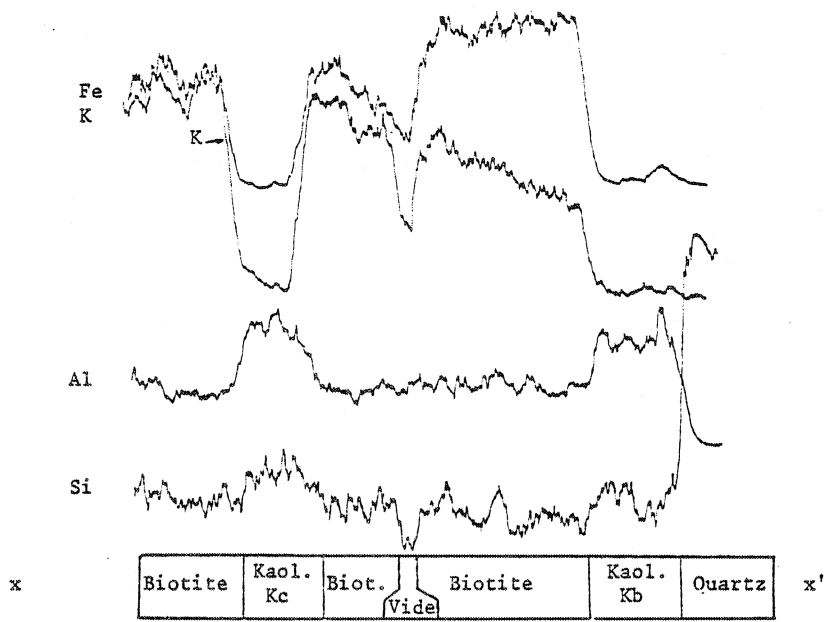
Des traversées (*fig. 23*) et des analyses quantitatives ponctuelles (*Tab. 7*) ont été réalisées sur une biotite présentant à la fois des minéraux cristallisant perpendiculairement au plan (001) des biotites et des exfoliations (*ph. 1, pl. 5*).

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.

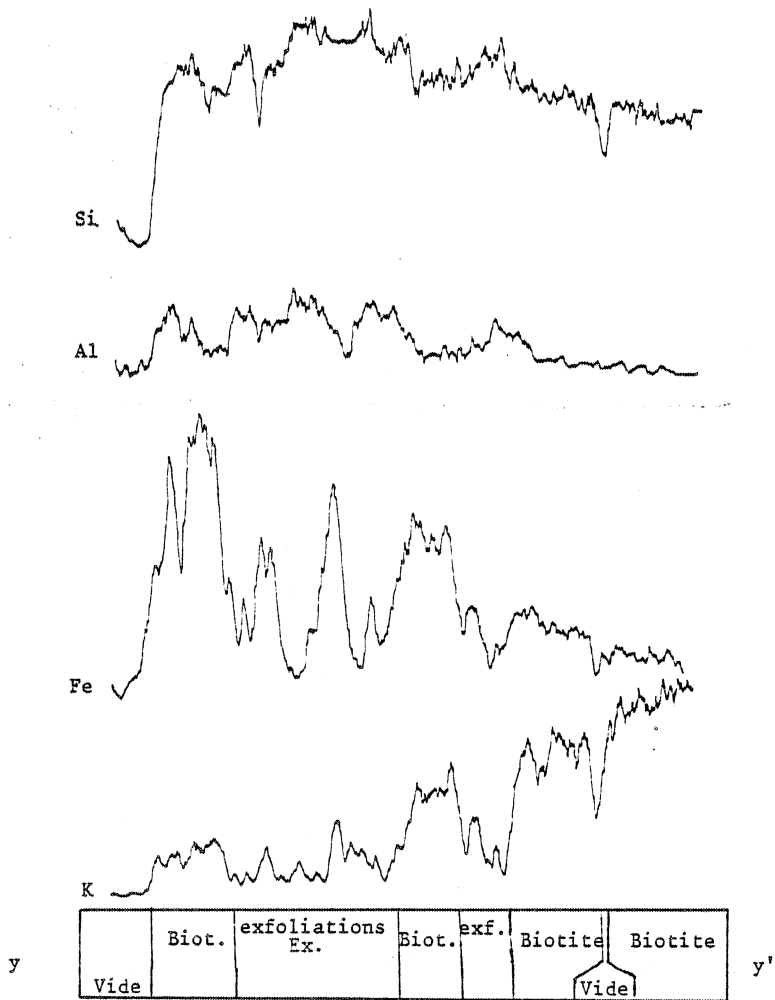
Les rapports moléculaires $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, établis à partir des analyses quantitatives ponctuelles ont une valeur voisine de 3 pour la biotite, voisine de 2,3 pour les exfoliations et très voisines de 2 pour les minéraux orientés perpendiculairement à la biotite. Ces derniers minéraux 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 conduit 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)).

	KAOLINITE			BIOTITE							KAOLINITE		
% d'oxydes pondéraux	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

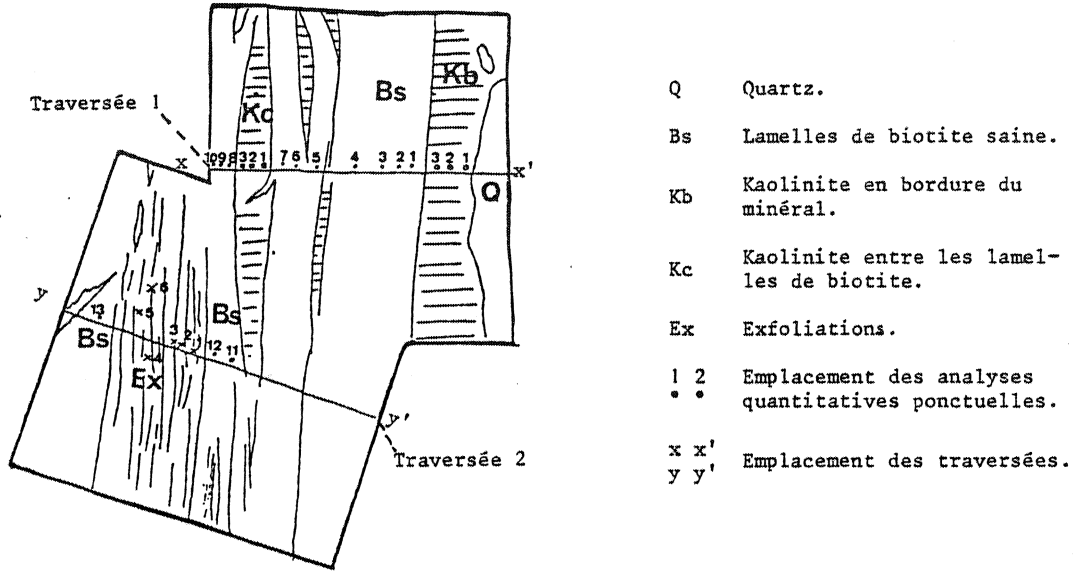
Z d'oxydes pondéraux	BIOTITE					EXFOLIATIONS						BIOT.
	BS-8	BS-9	BS-10	BS-11	BS-12	EX-1	EX-2	EX-3	EX-4	EX-5	EX-6	BS-13
SiO ₂	37,33	36,90	37,35	36,33	36,16	44,47	37,77	46,94	46,67	46,72	47,20	33,30
Al ₂ O ₃	20,61	21,29	21,28	20,37	19,99	32,51	27,11	33,65	34,57	34,76	34,89	19,56
TiO ₂	3,25	3,19	3,16	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.

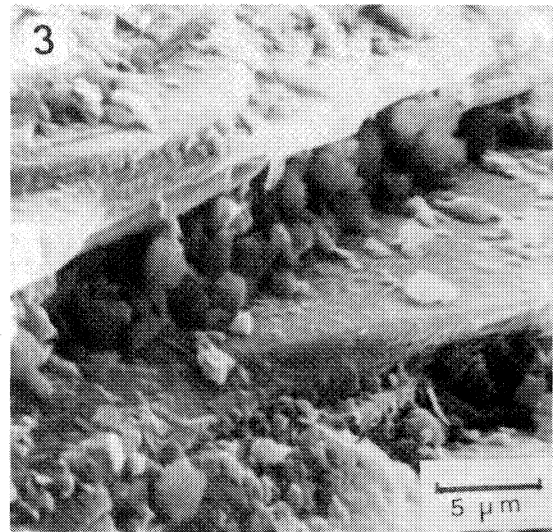
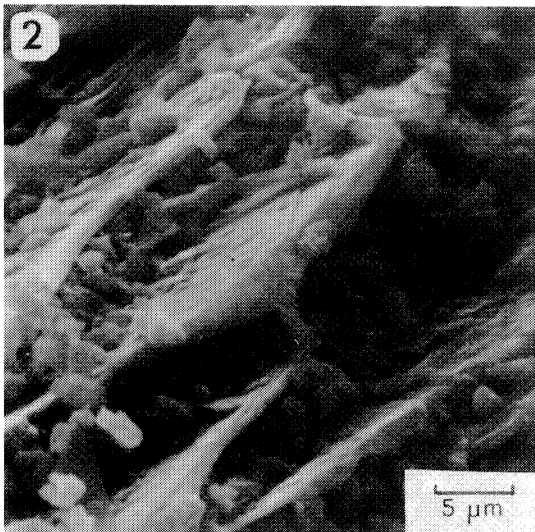
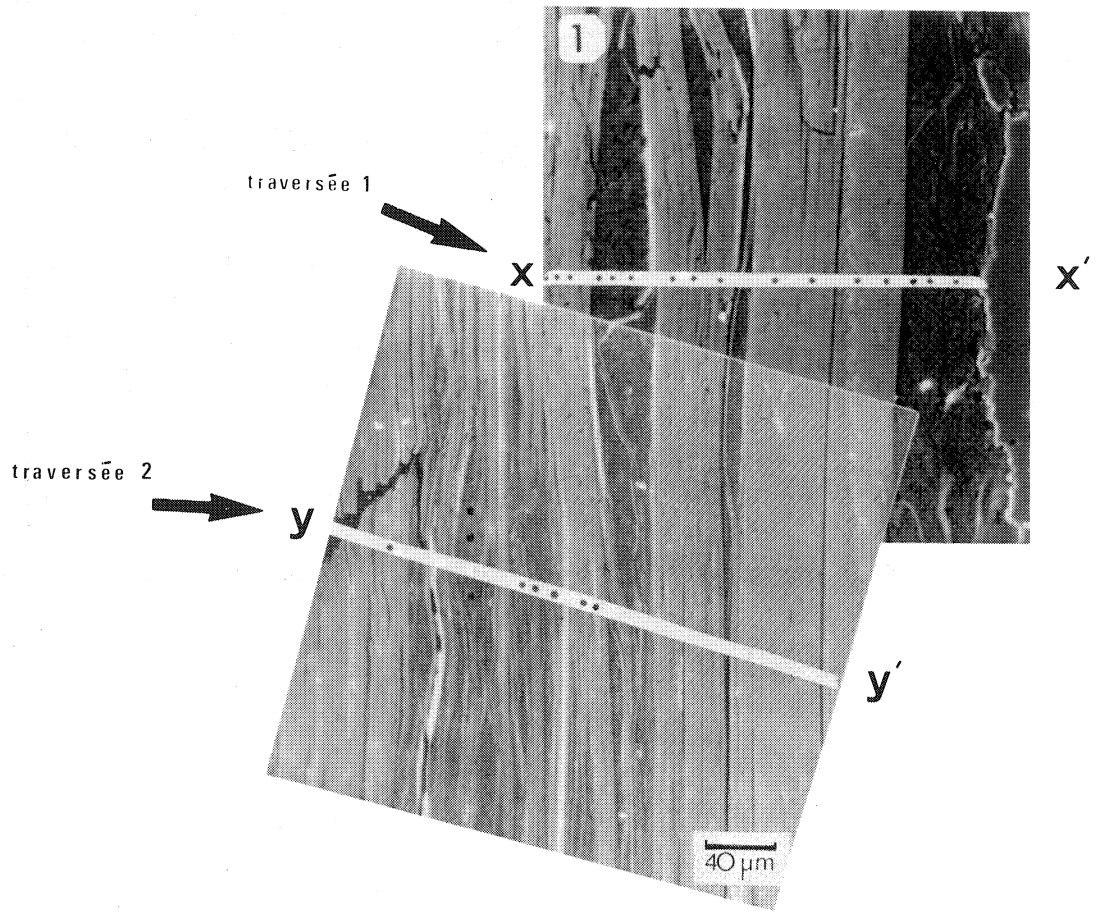
PLANCHE 5 - ALTÉRATION DES BIOTITES.

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 :

Mn > Al > P > Si > Fe > Ca

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 pû être soupçonnée, et au contraire une faible quantité de fer. Le phosphore pourrait provenir de l'altération de cristaux d'apatite $[Ca_5(F, Cl, OH)(PO_4)_3]$ qui existent dans le granite.

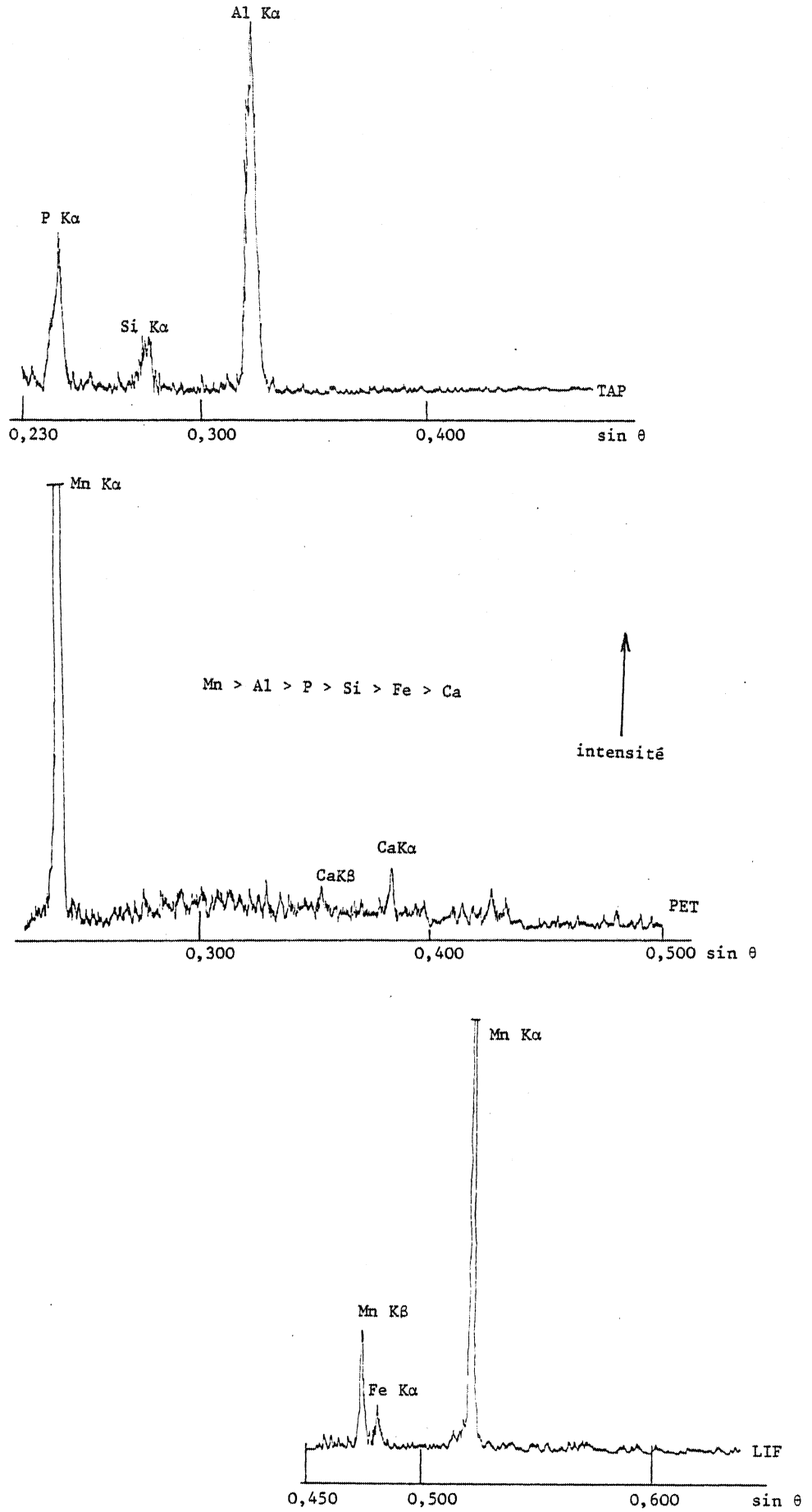


FIGURE 24 - Spectre X d'une concentration opaque en bordure d'un vide.

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 exfoliés 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

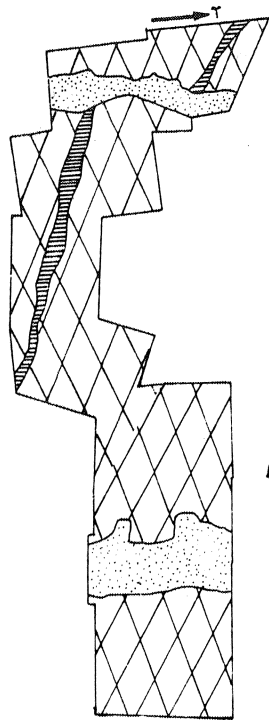
A la base, on observe une alternance de domaines horizontaux. Les uns d'épaisseur centimétrique, conservent une structure pétrographique; les autres, d'épaisseur millimétrique, ont une structure particulière (Pl. 6)

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 diaclase dont les lèvres sont tapissées de petits cristaux de quartz et dont la lumière est occupée par des particules limoneuses de 2 à 5 µm 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 µm 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
-  Diaclyse comblée de particules limoneuses
-  Sens de la translation

L.M.



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



+ comblant une partie des fissures et des diaclases, des particules limoneuses de 2 à 5 μm ., grossièrement isodiamétriques, non orientées (ph. 1, Pl.7). Celles-ci sont composées en majeure partie, par les produits d'altération des plagioclases et, en plus petite partie, par des fragments d'autres minéraux : quartz, feldspaths potassiques et micas. Cette présence de particules dans les fissures et les diaclases montre qu'elles ne sont pas en place, mais résultent d'une redistribution; celle-ci s'est faite sous forme figurée du fait de la présence de différents minéraux en mélange. L'absence d'orientation du dépôt pourrait être due à la forme des particules qui sont isodiamétriques et à leur taille relativement grossière. Cette accumulation de particules limoneuses ne résulte pas d'une redistribution interne à ce domaine. On n'y observe pas, en effet, de cavités qui correspondraient à des zones d'alimentation, en particulier à l'emplacement des plagioclases. C'est donc une *accumulation absolue* au sein de ces domaines à structure conservée. Ces figures d'accumulation sont recoupées par les domaines à structure particulière (pl.8). L'accumulation limoneuse est donc antérieure à la formation de ces domaines à structure particulière, c'est-à-dire antérieure au fauchage de l'arène.

- Les domaines à structure particulière (ph. 3, pl.7)

Les domaines à structure particulière sont composés d'éléments de plus petite taille : sables fins et limons. Ils présentent un gradient granulométrique : les particules les plus fines sont à la base et les plus grosses au sommet du domaine. Les minéraux sont les mêmes que dans les domaines à structure pétrographique; la biotite, notamment, est présente dans les différentes fractions et à tous les niveaux. Les micas des fractions sableuses s'orientent suivant l'horizontale. La porosité intersticielle croît de la base au sommet du domaine; elle est plus importante que dans les domaines à structure pétrographique.

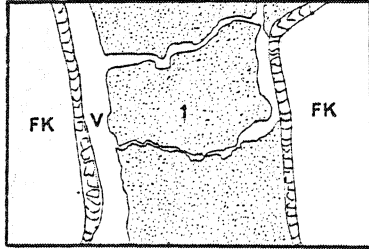
Ces domaines ne sont pas le siège d'une altération préférentielle. En effet, leur composition minéralogique est la même que celle des domaines à structure pétrographique; la biotite, notamment, facilement altérable, est toujours présente. Ces domaines doivent donc correspondre à la seule microdivision des minéraux, *d'origine mécanique* (forces de frottement lors du décrochement et du déplacement vers l'aval; forces mises en jeu lors d'alternances gel-dégel ...).

Ces domaines à structure particulière seraient ensuite le siège d'un appauvrissement en particules les plus fines à leur sommet et d'une accumulation partielle de ces mêmes particules à leur base, ce qui expliquerait le gradient granulométrique et la porosité sommitale importante. Ces domaines appauvris ne peuvent pas être à l'origine de l'accumulation observée dans les domaines à structure pétrographique, puisqu'ils en recourent les figures. Ils ont donc pu plutôt contribuer à enrichir des niveaux plus profonds ou plus en aval.

Cette alternance de domaines à structure conservée et détruite, avec décalage progressif vers l'aval, apparaît dès que les plagioclases ont subi leur altération maximale. C'est ainsi qu'à l'aval d'un filon de quartz où l'altération des plagioclases est plus profonde, le fauchage apparaît à une plus grande profondeur.

PLANCHE 7 - TRANSITION ENTRE LES ENSEMBLES I ET II DE L'ARÈNE.

PHOTO 1 - Particules limono-argileuses comblant une diaclase. (L.P.)-





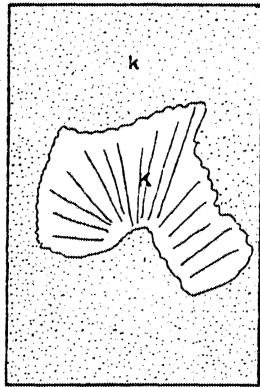
- FK Feldspaths potassiques.
-  Cristaux de quartz bordant les lèvres de la diaclase.
-  Particules limono-argileuses comblant la diaclase.
- V Vides.

PHOTO 2 - Kaolinite en éventail. (L.P.) -





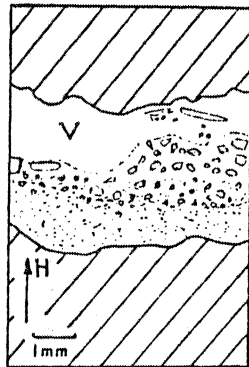


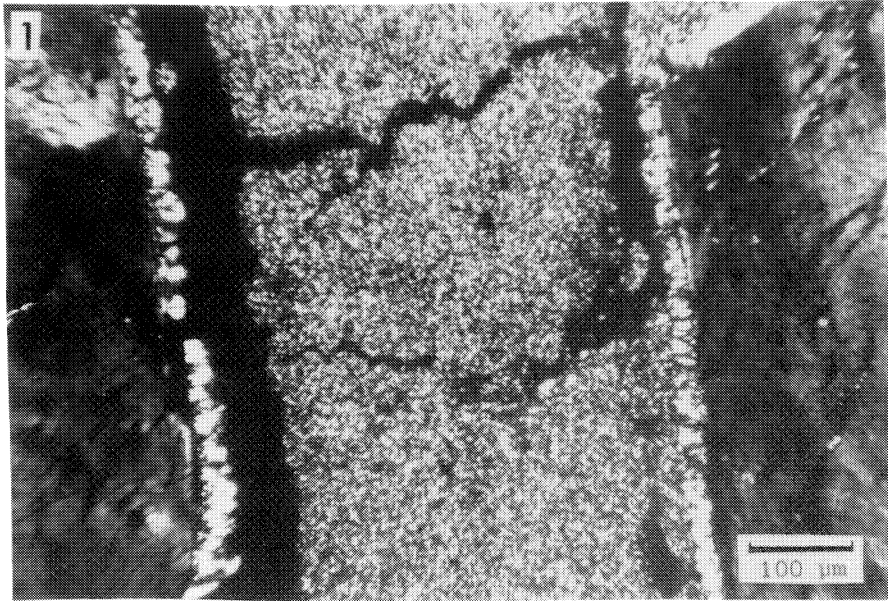
-  Eventail de kaolinite.
-  Cristallites de kaolinite composant le " voile microcristallin " d'altération du plagioclase.

PHOTO 3 - Domaine à structure particulière. (L.N.) -



-  Domaine à structure pétrographique conservée.
- V Vides.
-  Particules présentant un gradient granulométrique croissant vers le haut.



- Conclusion : la chronologie relative dans cette zone de transition

Les relations établies entre les constituants et les différents domaines subhorizontaux, permettent de préciser une chronologie relative de cette différenciation de l'arène :

- Le premier stade correspondrait à l'accumulation de particules limono-argileuses dans les fissures et les diaclases du sommet de l'arène à structure conservée.

- Au second stade se produit un léger glissement vers l'aval, les uns sur les autres de volumes lamellaires ("lits") qui conservent la structure du granite. Ce glissement est accompagné par une microdivision des minéraux sur les surfaces de contact. Ainsi, commencent à se différencier des domaines à structure particulaire, dont la localisation doit correspondre à la fissuration subhorizontale observée dans le granite et encore perceptible dans l'arène à structure conservée.

- Enfin, ces domaines à structure particulaire s'appauvrissent et se différencient granulométriquement.

La naissance du fauchage correspond à l'altération maximale des plagioclases en argile, ce qui prépare les modifications de structure.

Ce processus complexe du " fauchage de l'arène " crée donc, au moins à son début, une alternance de "lits " à granulométries différentes. On montre ainsi, qu'à partir d'un matériau homogène (équivalent) ayant une distribution granulométrique donnée, on peut progressivement passer dans cette zone de transition à un matériau apparemment stratifié, et dont les "lits " différenciés présentent deux distributions granulométriques distinctes. Une telle transformation structurale avait été interprétée comme résultant d'une succession de dépôts granulométriquement différents par de nombreux auteurs. Et si certains auteurs avaient envisagé une origine autochtone de ces formations litées (AUROUSSEAU, 1976; LEGROS, 1976; LAUTRIDOU, 1975; FLAGEOLLET, 1977) le mécanisme de formation proposé ici n' avait pas encore - à notre connaissance - été présenté.

B - PARTIE SUPERIEURE DE LA TRANSITION.

Dans la partie supérieure de la transition, la structure pétrographique disparaît complètement; la division des minéraux est importante.

Les particules sableuses (quartz et feldspaths potassiques), et les produits d'altération des plagioclases qui restent encore assemblés, en constituant des amas (millimétriques) à bords arrondis, sont entourés par un fond matriciel composé de particules limoneuses, dont la nature minéralogique est variée: quartz, feldspaths potassiques, micas et minéraux secondaires (*Ph.1 et 2, pl.8*). Le plasma argileux de ce fond matriciel d'altération ne présente pas d'orientations particulières : il est asépique. La porosité est fissurale et de cavités; elle détermine une structure polyédrique partielle (les fissures n'étant pas sécantes). Cette porosité paraît plus importante que celle de la partie inférieure prise dans son ensemble. Localement, on peut observer des reliques de l'organisation sous-jacente: petits domaines à structure conservée présentant une fissure comblée par des particules limoneuses accompagnés de domaines à structure particulaire et granulométrie plus fine présentant une orientation des particules micacées.

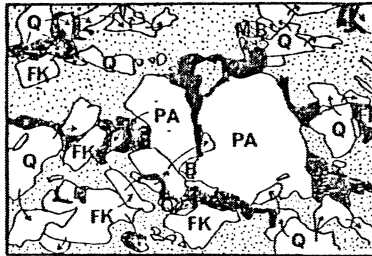
Ce niveau résulte donc de la destruction des structures originelles sous-jacentes, par la poursuite de la microdivision des minéraux primaires et la formation d'un fond matriciel d'altération.



PLANCHE 8 -

- SOMMET DE LA TRANSITION ENTRE LES ENSEMBLES I ET II DE L'ARÈNE.
- ARÈNE A STRUCTURE DÉTRUITE (ENSEMBLE II).




PHOTO 1 (L.N.) et 2 (L.P.) - Sommet de la transition entre les ensembles I et II de l'arène.

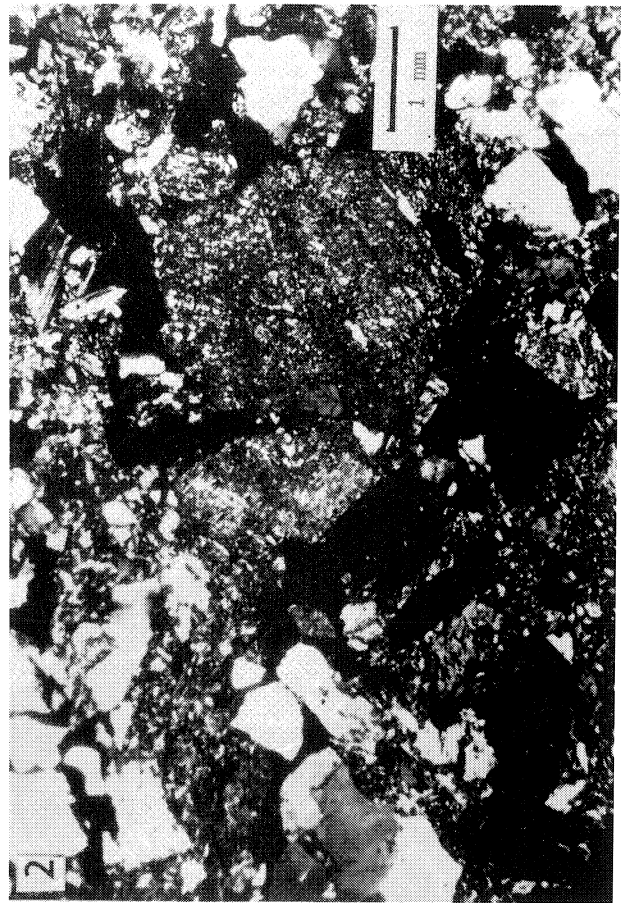
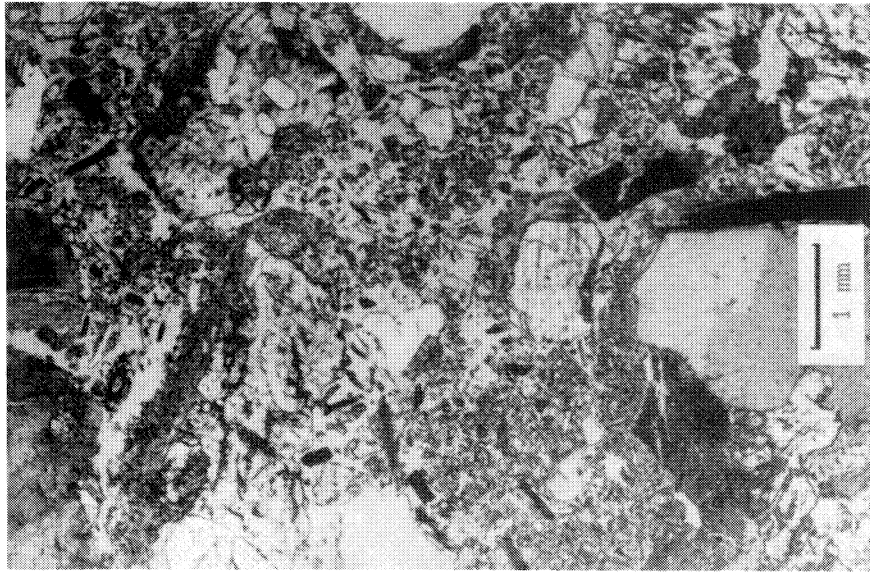
PHOTO 3 - Arène à structure détruite. (L.N.)



- Q Quartz
- FK Feldspaths potassiques.
- M Muscovite.
- B Biotite.
- PA Voile microcristallin d'altération des plagioclases.
-  Fond matriciel.
-  Vides.



-  Particules grossières
-  Coiffes d'éléments fins au-dessus des éléments grossiers.
-  Amas lâche de particules fines à assemblage intertextique.





IV - ENSEMBLE II : ARÈNE À STRUCTURE DÉTRUITE.

A - ETUDE AU MICROSCOPE OPTIQUE

- Structure

La structure est particulière à très faiblement agrégée. On distingue par ordre d'abondance décroissant (ph. 3, pl. 3):

- des particules mono- ou polycristallines de la taille des sables et des graviers (1 à 5 mm)
- des amas lâches de 0.1 à 0.5 mm de diamètre de particules limoneuses et argileuses; leur assemblage est intertextique;
- des coiffes limonoargileuses au-dessus des éléments grossiers; elles peuvent avoir jusqu'à 0.5 mm d'épaisseur. Dans ces coiffes, on observe un gradient granulométrique: les particules les plus fines sont localisées à la base et les plus grosses au sommet de la coiffe.

- Porosité

La porosité est interparticulaire, de type ortho; c'est une porosité d'entassement. Elle représente 30 à 40 % de la surface de la lame; le diamètre moyen des vides est de 0.5 mm.

- Distribution granulométrique et nature minéralogique des particules

Les éléments grossiers, sables et graviers, représentent 40 % de la lame; les éléments fins, limons et argiles, 20 à 30 %; les vides 30 à 40 %.

+ Les éléments grossiers :

. Les quartz et orthoclases, aux bords anguleux, sont prépondérants dans les fractions sables grossiers et graviers; quelques amas constitués par les produits d'altération des plagioclases subsistent dans ces fractions;

. Les micas sont fortement divisés et correspondent aux fractions sables fins et limons.

+ Les éléments fins :

La répartition granulométrique des éléments fins est régulière; on n'observe pas la prépondérance d'une classe granulométrique particulière. Tous les minéraux primaires sont présents : quartz, orthoclases, micas; ainsi que les minéraux argileux secondaires. Le plasma a une coloration jaune, très pâle en L.N. et polarise dans les gris et blancs du Ier ordre. On n'y observe pas d'orientations préférentielles : le plasma est asépique. Par rapport au sommet de l'ensemble I et à la zone de transition, la teneur en éléments fins est plus faible.

- Traits pédologiques

En plus des coiffes d'éléments fins recouvrant les éléments grossiers, on observe localement quelques revêtements argileux jaune orangé en L.N., à forte biréfringence, bien orientés. Ils sont identiques à ceux que l'on retrouvera abondants dans les raies brun rougeâtre.

B - DONNEES DIFFRACTOMETRIQUES

Des diagrammes de diffraction de R.X. ont été effectués sur la fraction inférieure à 2 μ m de l'ensemble II. La composition minéralogique de cette fraction est analogue à celle de l'ensemble I, c'est-à-dire essentiellement de la kaolinite, augmentée ici d'une faible quantité de quartz et d'argiles micacées.

C - CONCLUSION

Cet ensemble II présente incontestablement des caractères d'appauvrissement que l'on décèle par :

- la diminution de la teneur en éléments fins par rapport aux niveaux sous-jacents.
- la structure particulière et la porosité importante
- la redistribution des éléments résiduels en coiffes d'éléments fins au-dessus des éléments grossiers.

Cet appauvrissement (ou éluviation) de l'ensemble II peut être relié aux accumulations (ou illuviation) de particules limonoargileuses observées dans les fissures et les diaclases de la zone de transition entre l'ensemble I et l'ensemble II et au sommet de l'ensemble I. Cette accumulation n'est pas visible immédiatement sur le terrain, car sa couleur est la même que celle du fond matriciel environnant, c'est-à-dire blanchâtre. On peut penser que ces transferts de particules limono-argileuses sont favorisés par la porosité grossière de l'arène qui est maintenue par le squelette sablo-graveleux de particules résistantes de quartz et feldspaths potassiques (PEDRO, CHAUVEL, 1973). Ces transferts de particules limono-argileuses n'excluent pas un appauvrissement de l'ensemble II par lixiviation, c'est-à-dire par des départs en solution.

V - LES RAIES BRUN ROUGEÂTRE

A - ETUDE AU MICROSCOPE OPTIQUE

L'arrangement des constituants dans les raies est celui de l'ensemble II, enrichi de revêtements d'argile qui sont microlités, très bien orientés, à forte biréfringence, jaune orangé en L.N. et L.P. Ces revêtements recouvrent toute la porosité à certains niveaux, sans la combler (*ph. 1, pl. 2*); ils recouvrent les coiffes le cas échéant (*ph. 2, pl. 2*). Ces revêtements présentent une polarité verticale : leur partie inférieure est plus épaisse que leur partie supérieure. On n'observe aucune intégration au fond matriciel : la limite entre le revêtement et le fond matriciel est très nette. Localement, on peut observer des revêtements présentant des intercalations limoneuses (*ph. 3 & 4, pl. 2*); la composition minéralogique de ces lits grossiers reflète celle du fond matriciel environnant : minéraux secondaires accompagnés d'un peu de quartz, feldspaths potassiques et micas. Ces revêtements s'installent dans la porosité de l'arène, l'arrangement des éléments formant le fond matriciel étant le même au-dessous, au-dessus et au sein de la raie. Ces raies vont en s'épaississant vers l'aval; il n'y a pas de différence entre une raie fine et une raie épaisse si ce n'est la plus grande épaisseur d'arène enrichie en revêtements argileux.

B - DETERMINATION MINERALOGIQUE DE LA FRACTION INFÉRIEURE A 2 μm

- Données diffractométriques

Etant donné le faible volume des revêtements argileux, il n'a pu être effectué de prélèvements sélectifs; seule l'analyse de la fraction inférieure à 2 μm d'une raie brune épaisse a été réalisée. Le diagramme de R.X. (*fig. 25*) montre, outre la kaolinite dont la raie(020) disparaît, le quartz et l'argile micacée, la présence de vermiculites au sens strict (légère fermeture à 10 Å après traitement au KCl) et hydroxyalumineuse (fermeture à 10 Å après chauffage à 350°C) et d'interstratifiés 10-14 Å. Par comparaison avec l'arène, on note un enrichissement en vermiculite et en interstratifiés, enrichissement que l'on attribue à l'illuviation d'argile provenant des horizons supérieurs.

- Analyse élémentaire à la sonde électronique

Une analyse élémentaire qualitative effectuée sur un revêtement argileux montre la présence de : Si, Al, Fe, Ti, Mg et K (*fig. 26*). On remarque dans ces revêtements l'abondance de Fe, Ti, Mg et K, alors que ces éléments sont absents dans les argiles d'altération observées dans l'arène: kaolinite et vermiculite hydroxyalumineuse composées essentiellement de Si et Al. Ceci est un argument supplémentaire en faveur de la présence de vermiculite s.s. dans les revêtements.

PLANCHE 9 - RAIES BRUN ROUGEÂTRE.

PHOTO 1 - Raie brun rougeâtre. (L.N.) -







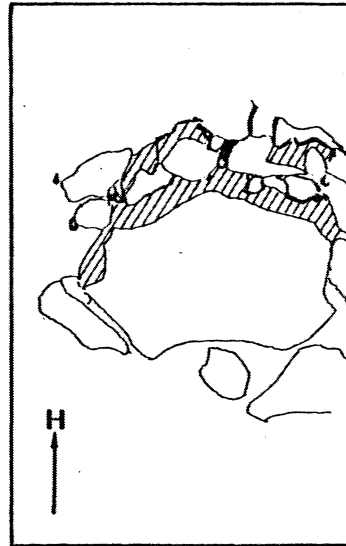
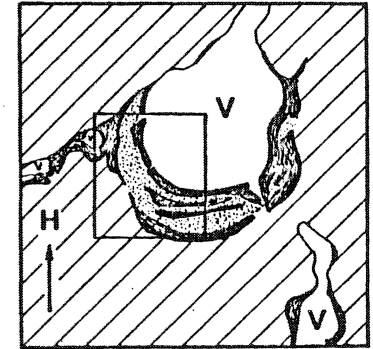



-  - Revêtements argileux.
-  - Particules grossières
-  - Coiffes d'éléments fins au-dessus des éléments grossiers.
-  - Amas lâche de particules fines à assemblage intertextique.

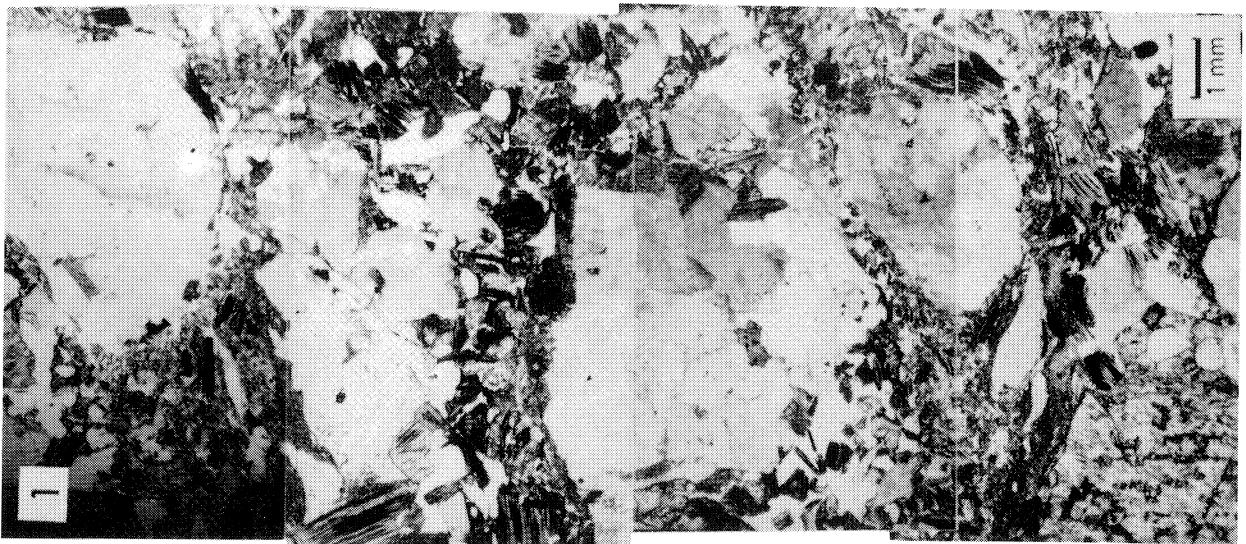
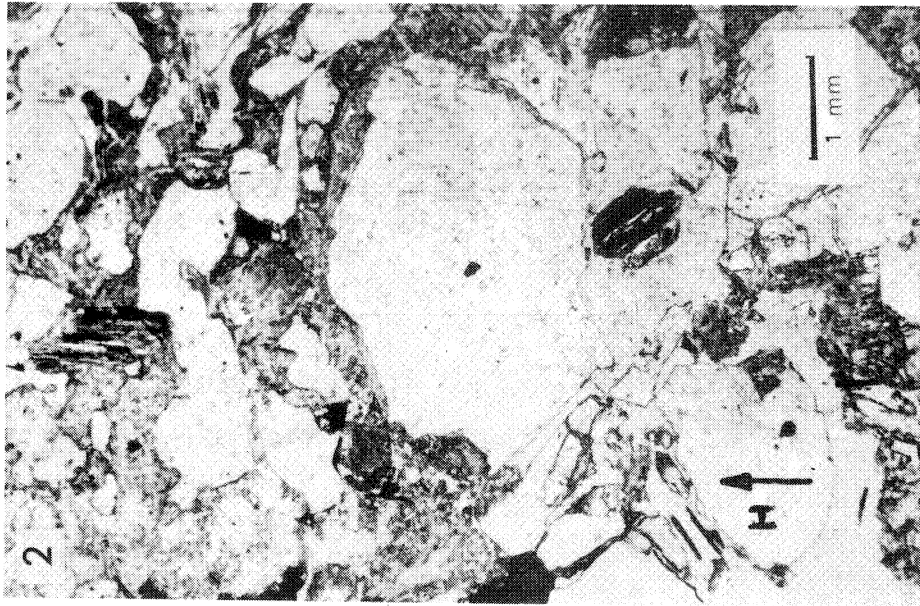
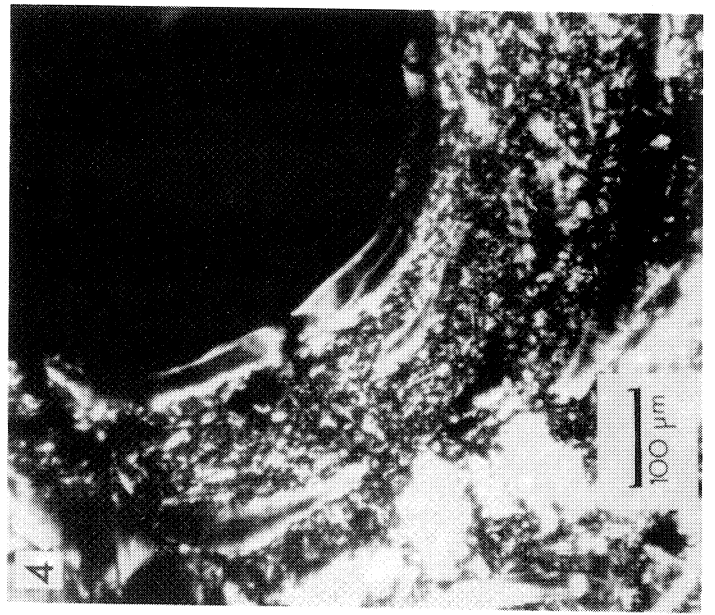
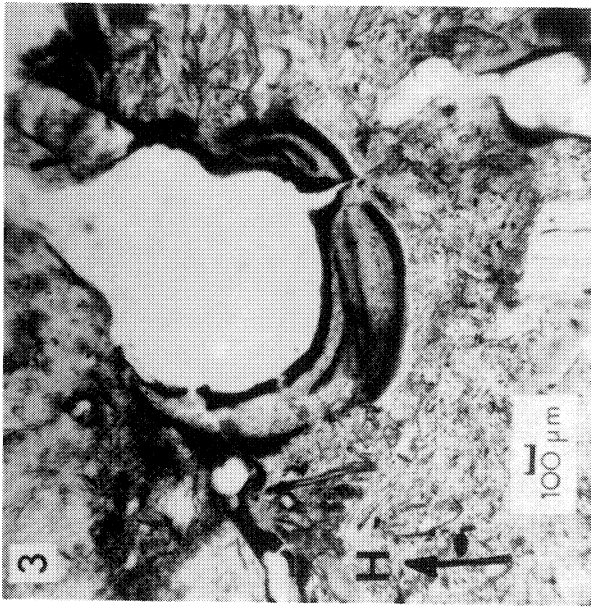
PHOTO 2 - Revêtements argileux recouvrant une coiffe. (L.N.) -



PHOTOS 3 (L.N.) & 4 (L.P.) - Revêtement présentant un lit limoneux.



-  - lit argileux
-  - lit limoneux; particules de même nature que celles du fond matriciel environnant
-  - Emplacement de la photo 4.



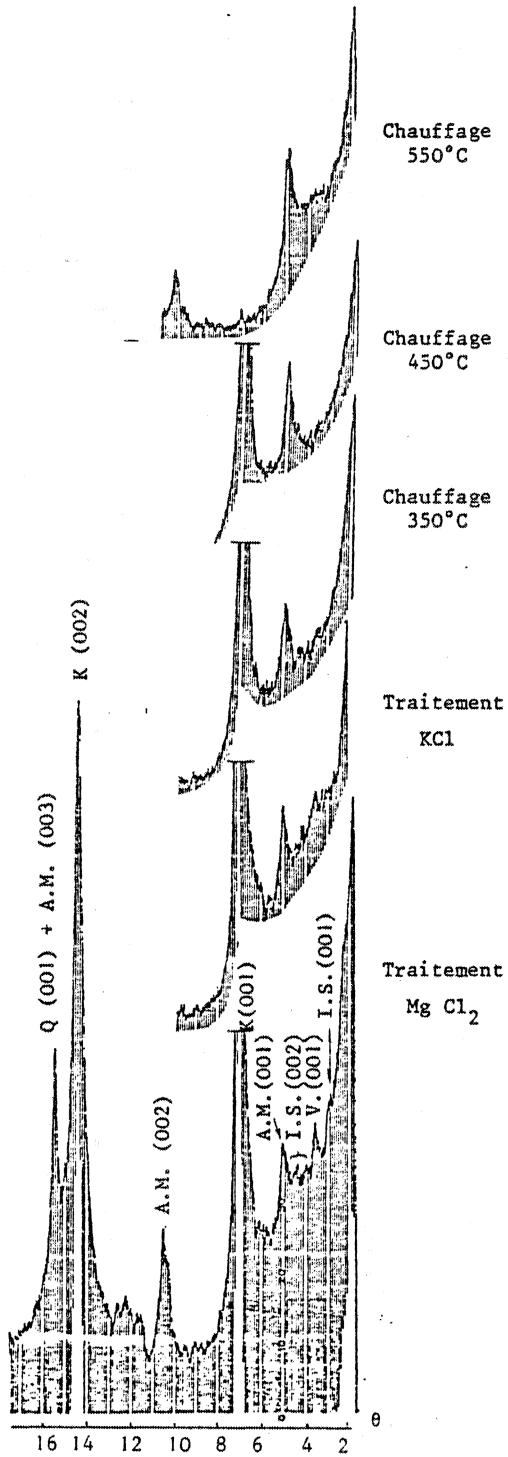


FIGURE 25 - Raie brun rougeâtre, fraction < 2 μ m. diagramme Rayons X d'argile orientée.

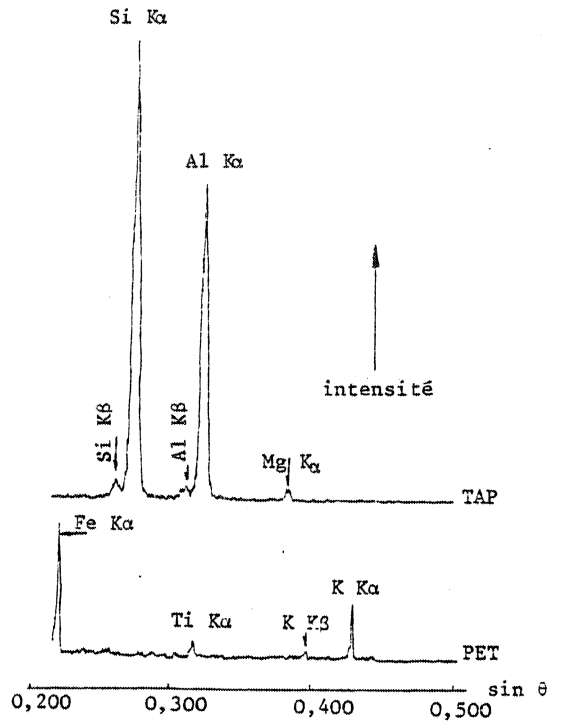


FIGURE 26 - Raie brun rougeâtre, spectre X d'un revêtement argileux.

C - CONCLUSIONS.

Les revêtements argileux caractérisant les raies brun rougeâtre résultent d'une accumulation sous forme particulière comme en témoignent les microlitages et leur alternance occasionnelle avec des passées limoneuses. La composition élémentaire et la nature minéralogique de l'argile constituant les revêtements sont différents de celles des argiles présentes dans l'arène; cette argile illuviale proviendrait donc des horizons supérieurs.

Ces revêtements se surimposent aux structures de l'ensemble II, y compris les "coiffes". L'accumulation d'argile constituant les raies est donc postérieure à l'appauvrissement de l'arène hôte; la présence discrète de revêtements interstratifiés de limons issus de l'arène environnante montre que ces particules limoneuses sont encore mobiles, donc que l'arène entourant la raie continue à s'appauvrir.

L'absence de papules et d'intégration de ces revêtements au fond matriciel laisserait supposer que les structures sont stables au niveau de la raie.

Ces revêtements existent de manière discrète dans toute l'arène; leur abondance à certains niveaux, amenant la constitution de raies subhorizontales, aux limites inférieures et supérieures très nettes, reste inexplicée dans la présente étude. Ces raies ne correspondent pas à des structures d'accueil particulières à l'échelle de nos observations.

L'épaississement des raies vers l'aval pourrait s'expliquer de deux façons :

- par une migration et une accumulation latérale de l'argile; LEGROS (1975) en a observé de semblables dans les arènes granitiques du Massif Central;
- par des quantités d'argile différentes fournies par les horizons sus-jacents; à l'amont, le lessivage du sol brun acide alimenterait les raies fines; à l'aval, le lessivage plus intense du sol brun lessivé entraînerait l'épaississement des raies.

VI - CONCLUSION A L'ÉTUDE DE L'ARÈNE.

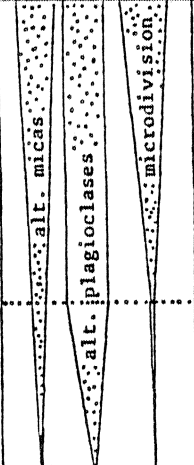
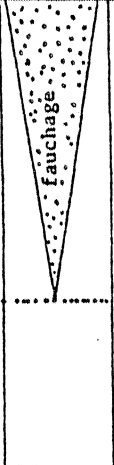
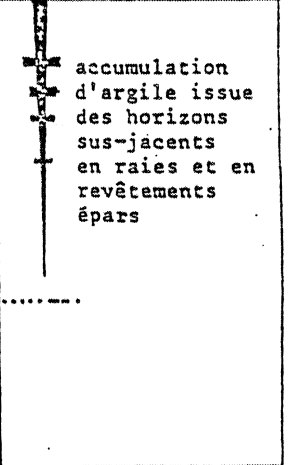
On peut tenter de relier dans un tableau récapitulatif (tab.8), les principaux caractères des arènes, aux processus qui seraient - d'après cette étude - à l'origine de la différenciation de celles-ci.

Dans l'arène à structure conservée (ensemble I), les transformations sont minéralogiques. L'altération consiste en une hydrolyse partielle des micas qui les transforme en vermiculite hydroxyalumineuse, et totale des plagioclases; la kaolinite et des oxyhydroxydes cristallisés ou amorphes précipitent; l'aluminium est conservé, le silicium est partiellement lixivié, K, Mg, Ca, Na sont lixiviés.

On distingue ensuite un couple d'horizons appauvris et enrichis en particules limono-argileuses : l'ensemble II à structure particulaire et présentant des coiffes, est appauvri; la base de la transition avec l'ensemble I et le sommet de l'ensemble I sont enrichis en particules limono-argileuses. Le fauchage apparaît dès que l'altération des plagioclases en argile est totale et postérieurement à l'accumulation qu'il recoupe. Dans les bandes microdivisées par le fauchage, le lessivage s'installe.

Enfin, une argile, issue des horizons sus-jacents à l'arène, se dépose sur les structures du sommet de l'arène.

TABEAU 8 - Tableau récapitulatif des caractères et des processus majeurs affectant les différents ensembles de l'arène.

<p>Ensemble II Arène à structure détruite.</p> <p>sommet transition base</p> <p>Ensemble I Arène à structure conservée.</p>	<p>structure particulaire et "coiffes"</p> <p>apparition du fond matriciel</p> <p>désorganisation par lit</p> <p>structure pétrographique</p>	 <p>alt. micas</p> <p>alt. plagioclases</p> <p>microdivision</p>	<p>appauvrissement en particules limono-argileuses</p> <p>appauvrissement</p> <p>accumulation de particules limono-argileuses</p>	 <p>fauchage</p>	 <p>accumulation d'argile issue des horizons sus-jacents en raies et en revêtements épars</p>
---	---	---	---	---	--

TROISIEME PARTIE :

**LES HORIZONS SABLO-LIMONEUX
A LIMONEUX**

INTRODUCTION

La séquence étudiée ici est différenciée au sein de matériaux sablo-limoneux à limoneux qui sont situés au-dessus de l'arène sableuse. Elle va du sol brun acide à l'amont, au sol brun faiblement lessivé à fragipan, situé à l'aval dans le pseudotalweg, (voir coupe A de la fig.10).

L'étude des horizons qui composent la séquence a consisté en :

- une analyse macroscopique
- des déterminations physico-chimiques classiques : granulométrie, pH, complexe adsorbant, détermination minéralogique de la fraction inférieure à 2µm
- une analyse au microscope optique

A partir de ces données, la caractérisation des processus pédologiques majeurs qui déterminent l'évolution de cette séquence, sera tentée.

I - ETUDE MACROSCOPIQUE

A - INTRODUCTION

Pour rendre compte de la répartition verticale et latérale des divers horizons sablo-limoneux à limoneux, trois domaines ont été distingués en fonction de la topographie (fig.34, p.102)

- un domaine amont (AM) où les horizons limoneux sont discontinus, formant des poches dans un horizon sablo-limoneux;
- un domaine de versant (VE) où les horizons limoneux sont continus, d'épaisseur inférieure à 120 cm, et présentent entre eux des transitions verticales et latérales graduelles;
- un domaine aval (AV) dans le pseudotalweg, où les horizons limoneux sont plus épais (>120cm) et ont des caractères et des transitions plus contrastés.

Le domaine amont correspond au sol brun acide, le domaine aval au sol brun faiblement lessivé et le domaine de versant à la transition entre ces deux types de sols. Cette présentation synthétique de la séquence étant ainsi faite, il ne sera plus utilisé, dans la suite du texte, de dénomination génétique. Les horizons ont, à cet effet, été désignés par les modalités de certaines des variables qui les caractérisent (couleur, texture en particulier) et par un sigle indiquant le domaine auquel ils appartiennent (AM, VE, AV) pour ne pas préjuger de leur genèse.

Cependant, les taches claires et ocre, classiquement attribuées à l'hydromorphie, seront désignées comme telles dans la description macroscopique. L'observation microscopique ultérieure permettra de savoir s'il y a d'autres processus qui entrent en jeu dans leur formation.

Par ailleurs, les variables caractérisant la Matière Organique et l'activité biologique n'ont pas été prises en compte, du fait de la mise en culture et de l'observation d'un front de carrière. L'horizon labouré présente sur l'ensemble de la séquence, les caractéristiques suivantes⁽¹⁾: une couleur brun foncé 10 YR 3/3, une texture limoneuse, une structure peu nette polyédrique moyenne à sous-structure polyédrique fine; les pores intraagrégats ne sont pas visibles à l'oeil nu; l'horizon est cohérent; il s'épaissit fortement de l'amont vers l'aval, passant de 15 à 30 cm. La limite qui sépare cet horizon labouré de l'horizon sous-jacent est très nette : cette limite correspond à la base du labour; cependant dans l'horizon sous-jacent, on observe systématiquement sur 10 à 20 cm d'épaisseur, des taches plus ou moins foncées (10 YR 4/3.5 - 10 YR 5/4) qui sont probablement dues à une pénétration, localement plus profonde, de l'activité biologique végétale ou animale.

B - LE DOMAINE AMONT

Le domaine amont est composé de trois types de profils qui se distinguent par la présence, simultanée ou non, de trois horizons : l'arène sablo-limoneuse AM3, l'horizon limoneux AM1 et l'horizon limoneux AM2 ; leur agencement vertical est figuré dans le tableau 9.

TABLEAU 9 - Profils du domaine amont.

Profils	I	II	III
Horizons		Horizon labouré	
	Arène	horizon limoneux AM1	
	sablo-limoneuse AM3	h. limoneux AM2	
	Arène à structure détruite		
	Arène à structure conservée		

1. Caractérisation des différents horizons

"L'arène sablo-limoneuse : AM3"

Elle présente une couleur brun jaunâtre. De texture sableuse à la base, elle s'enrichit progressivement en limons lorsqu'on monte vers la surface. La structure est massive à l'état humide et particulaire à l'état sec. Les fractions limoneuses, lorsqu'elles deviennent plus abondantes, peuvent s'assembler en agrégats microgrumeleux⁽²⁾. La couleur brun jaunâtre est donnée par ces fractions limoneuses. La porosité est très importante; les pores sont très fins, interparticulaires. Cet horizon est meuble.

(1) Vocabulaire : Glossaire de Pédologie (1969) - Couleurs prises à l'état humide : charte Munsell.

(2) Structure microgrumeleuse = structure floconneuse, structure "fluffy" des anglo-saxons.

"L'horizon limoneux : AM1"

De couleur brun jaunâtre (10 YR 5/3), sa texture est limoneuse. Sa structure est polyédrique grossière très peu nette à sous-structure microgrumeleuse. La porosité est très importante; les pores sont très fins, très abondants, interagrégats. Cet horizon est meuble.

"L'horizon limoneux : AM2"

De couleur brun jaunâtre (10 YR 5/8), il a une texture limoneuse un peu plus argileuse que celle de l'horizon précédent et il est plus riche en éléments grossiers (graviers). Sa structure est polyédrique grossière peu nette à sous-structure polyédrique très fine associée à une structure microgrumeleuse. Cet horizon présente une porosité très fine et fine importante pénétrant les agrégats et interagrégats. Il est plus cohérent que le précédent.

La comparaison des caractères des différents horizons (tab. 10) permet d'opposer deux groupes d'horizons à partir de la texture et de la structure :

- les horizons limoneux AM1 et AM2, à texture limoneuse et à structure polyédrique et microgrumeleuse. Ces horizons présentent entre eux une limite distincte, qui correspond principalement à une variation de la sous-structure : polyédrique très fine associée à microgrumeleuse dans l'horizon limoneux AM2 et microgrumeleuse dans l'horizon limoneux AM1.
- les arènes (ensemble II et arène sablo-limoneuse AM3) dans lesquelles la texture est à dominante sableuse et la structure massive ou particulaire. Ces horizons présentent entre eux une limite graduelle qui correspond principalement à une variation texturale : l'arène sablo-limoneuse AM3 est plus riche en limons que l'arène ensemble II.

Ces deux groupes d'horizons sont séparés entre eux par des limites nettes.

TABLEAU 10 - Domaine amont, tableau récapitulatif.

HORIZON	COULEUR	TEXTURE	STRUCTURE	POROSITE	COHESION	TRANSITION
Labour	10YR 3/3	limoneuse	struct.poly.moy. peu nette à sous-struct. poly. fine	Pas de pores intra-agrégats visibles à l'œil nu	cohérent	
hz. limoneux AM1	10YR 5/6	limoneuse	struct.poly. grossière très peu nette à sous-st.microgrumeleuse	très fine, très importante inter-agrégats	meuble	
hz. limoneux AM2	10YR 5/8	limoneuse légèr. plus argil. et graveleuse	struct.poly.grossière peu nette à sous-struct. poly.très fine associée à st.microgrumeleuse	très fine et fine, importante intra-agrégats et pénétrant les agrégats	légèrement plus cohérent	
arène sablo-limoneuse AM3	10YR 5/6	sablo-limoneuse	massive ou particulaire, localement microgrumeleuse.	très fine, très importante, inter-particulaire	meuble	
arène à structure détruite	grisâtre	gravelo-sableuse	"	fine, très importante interparticulaire	meuble	

2. Distribution dans l'espace de ces horizons

L'arène sablo-limoneuse AM3 est située au-dessus de l'ensemble II. Les horizons limoneux (AM1 et AM2) apparaissent discontinus au sommet des arènes (*fig. 27*). L'examen de deux coupes orthogonales montre qu'il s'agit de poches et non de bandes, l'arène sablo-limoneuse (AM3) étant continue autour des poches.

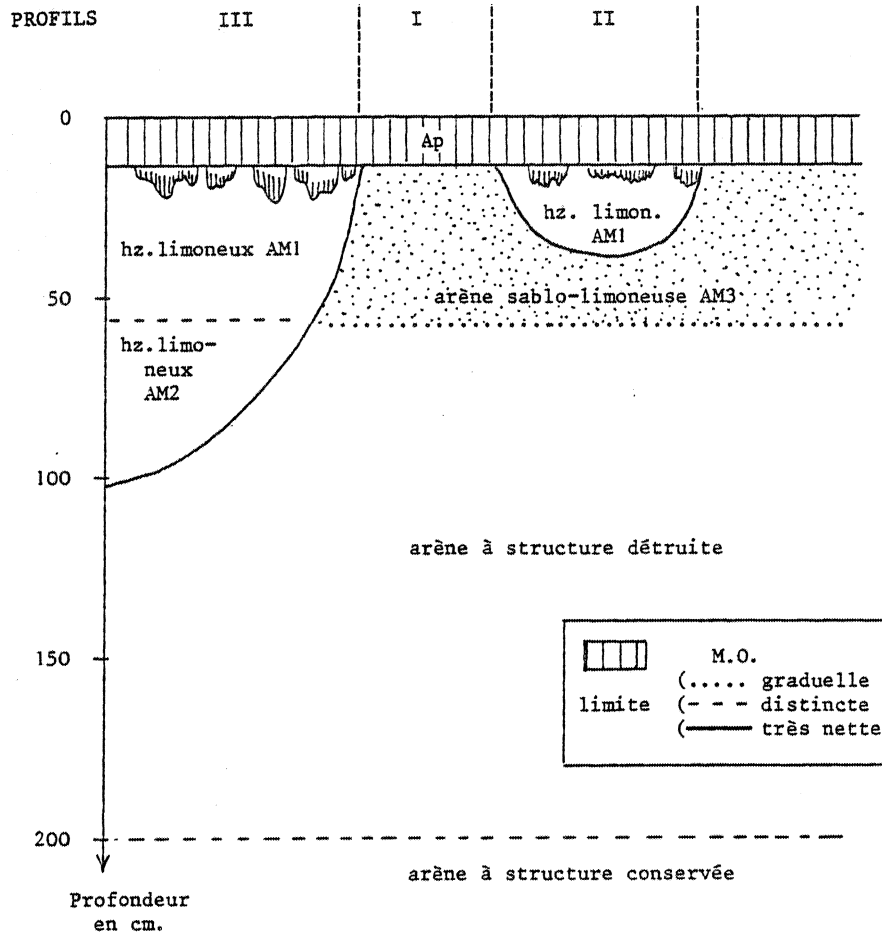


FIGURE 27 - Les différents profils du domaine amont.

Lorsque les horizons limoneux sont absents, le profil est du type I : horizon labouré - arène sablo-limoneuse AM3 - arène à structure détruite puis conservée. L'unité cartographique I qui les représente (*fig. 28*), forme un fond cartographique continu.

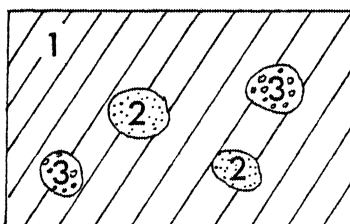


FIGURE 28 - Représentation cartographique schématique des sols du domaine amont.

Lorsque les horizons limoneux apparaissent, on distingue suivant la profondeur de la poche, deux profils différents :

- + dans les poches peu profondes, le profil II, caractérisant l'unité cartographique 2 est composé par l'horizon labouré - l'horizon limoneux AM1 - l'arène sablo-limoneuse AM3 et les arènes à structure détruite puis conservée.
- + dans les poches profondes, le profil III, caractérisant l'unité cartographique 3 est constitué par l'horizon labouré - l'horizon limoneux AM1 - l'horizon limoneux AM2 - et les arènes à structure détruite puis conservée.

La représentation cartographique montre que les unités 2 et 3 forment une mosaïque avec l'unité 1.

En conclusion, les sols du domaine amont sont caractérisés par :

- une variation granulométrique, verticale et latérale, très rapide, des limons aux sables; cette variation suit une limite irrégulière, individualisant des poches limoneuses;
- la sous-structure microgrumeleuse des horizons limoneux;
- la structure particulière des horizons sableux.

C - LE DOMAINE DE VERSANT

1. Répartition verticale et caractérisation des différents horizons

La figure 29 représente schématiquement le profil de versant.

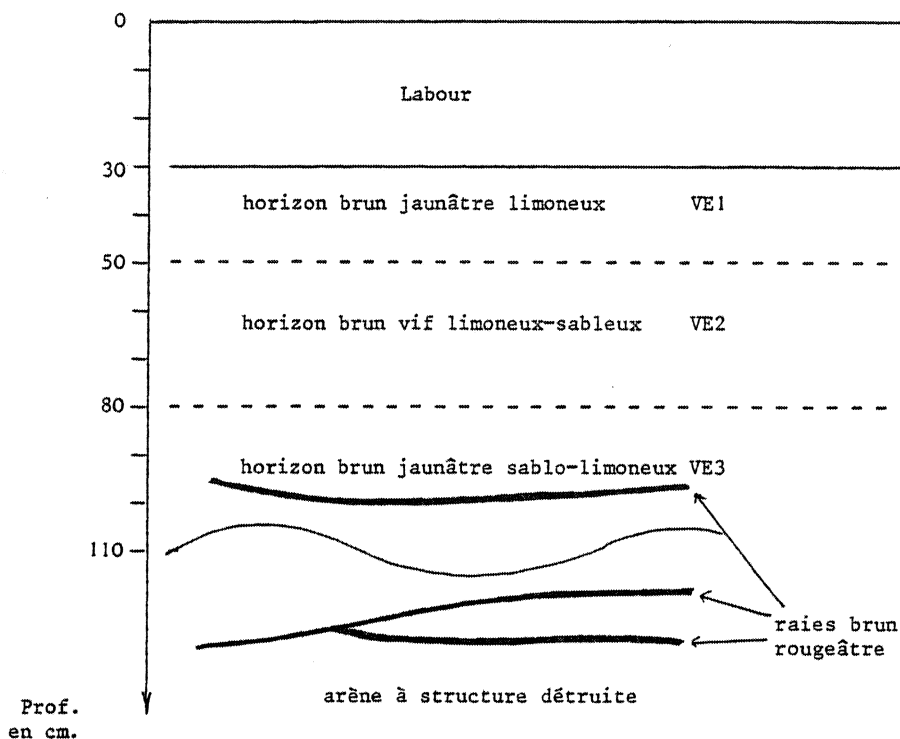


FIGURE 29 - Schéma du profil de versant.

D'après ce schéma, on observe donc, de la profondeur vers la surface :

- " L'arène à structure détruite " précédemment décrite qui présente une transition nette et ondulée avec l'horizon sus-jacent.

- "L'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux"VE3 (110 à 80 cm)

De couleur 10 YR 5/6, sa texture est sablo-limoneuse, sa structure massive ou particulaire suivant l'état d'humidité. Il présente une porosité interparticulaire importante. On observe quelques raies sub-horizontales de couleur un peu plus rouge (10 YR 5/8) riches en revêtements argileux, et quelques taches peu contrastées, plus grises que la matrice et entourées d'un liséré rouille; ces taches témoignent d'une légère hydromorphie, localisée. Cet horizon est meuble. La transition est graduelle avec l'horizon sus-jacent.

- "L'horizon brun vif limono-sableux"VE2 (80-50 cm)

De couleur 7.5 YR 5/6, sa texture est limono-sableuse légèrement plus riche en argile que les autres horizons du profil. Sa structure est polyédrique moyenne, nette. Sa porosité est très fine inter- et intra-agrégats et importante. Cet horizon est cohérent. La transition est graduelle avec l'horizon sus-jacent.

- "L'horizon brun jaunâtre limoneux" VE1 (50 - 30 cm)

De couleur 10 YR 5/6, sa texture est limoneuse. Sa structure est polyédrique moyenne peu nette à sous-structure micro-grumeleuse; la porosité est très fine, inter-agrégats, très importante. Cet horizon est meuble.

Le sommet de cet horizon, fortement taché par la Matière Organique, présente, sur l'ensemble de la séquence, une structure à tendance massive et une porosité plus faible : c'est la semelle de labour. La transition avec l'horizon labouré (0 - 30 cm) est très nette et régulière.

En résumé, on note que :

- les caractéristiques de couleur, texture, structure et porosité de ces sols présentent des variations très progressives. Les horizons définis ont donc entre eux des transitions graduelles, contrairement aux sols de l'amont. D'autre part, ces horizons présentent maintenant une continuité dans l'espace.
- la succession verticale des horizons peut être ainsi simplifiée :
 - + un horizon inférieur, proche de l'arène par sa texture et sa structure, "l'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE3". Il présente des raies riches en revêtements argileux, comme au sommet de l'arène à structure détruite; ces raies sont plus discrètes que dans l'arène, le contraste de couleur étant beaucoup moins fort. Quelques rares taches, peu contrastées, indiquent une légère hydromorphie dans cet horizon.
 - + deux horizons riches en éléments fins, se différencient par la couleur et la structure:
 - . "l'horizon brun vif limono-sableux" VE2 à structure polyédrique
 - . "l'horizon brun jaunâtre limoneux" VE1 à sous-structure micro-grumeleuse.
- la proportion des particules de taille inférieure à 50 µm croît graduellement de l'arène aux horizons superficiels (Ap non compris).

2 - Variation latérale de ces horizons

A l'amont

Le passage des sols à horizons limoneux discontinus de l'amont, aux sols à horizons limoneux continus du versant, se fait au niveau d'un épais filon de quartz. La différenciation en trois horizons se réalise très rapidement en quelques mètres, l'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE3 apparaissant le dernier.

Vers l'aval

- . Les horizons s'épaississent progressivement.
- . L'horizon de la base du profil, brun jaunâtre, sablo-limoneux, VE3, devient massif et très cohérent (aspect fragile⁽¹⁾)
- . L'hydromorphie se marque plus nettement dans l'horizon inférieur, le contraste des taches augmentant; et elle apparaît même discrètement dans les horizons supérieurs.

(1) J'appelle fragile l'association des caractères "massif" et "très cohérent".

3 - Comparaison du domaine amont et du domaine de versant

Un schéma (fig.30) permet de rapprocher les horizons déjà décrits dans ces deux domaines. Il apparaît que l'horizon "brun jaunâtre limoneux" VE1 du domaine de versant peut être rapproché des horizons du domaine amont, de par sa couleur et sa structure microgrumeleuse; les deux autres horizons s'en distinguent nettement.

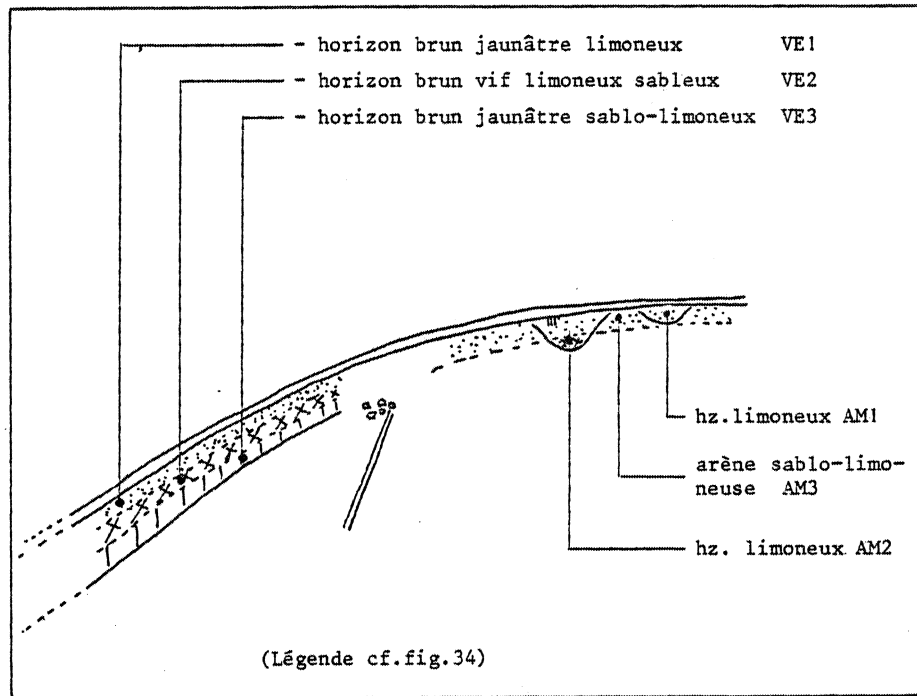


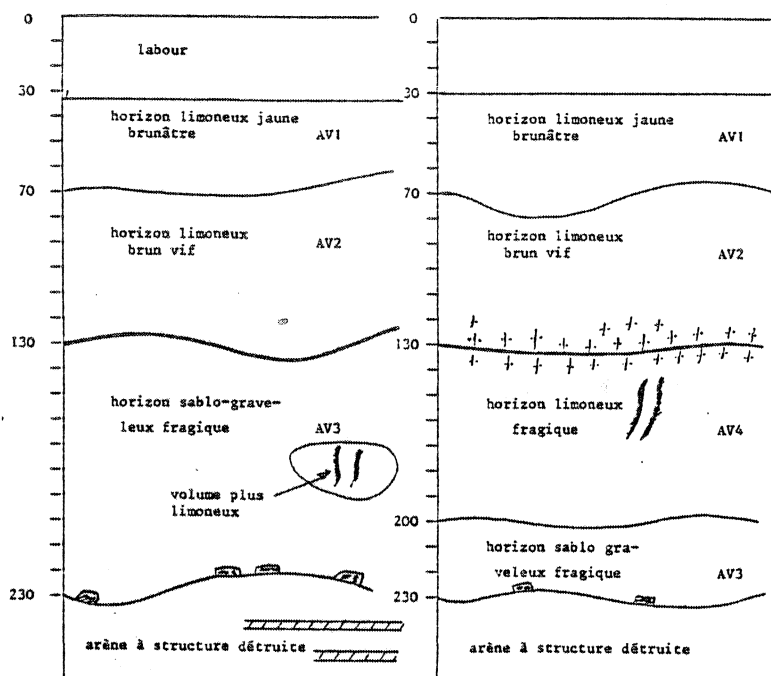
FIGURE 30 - Représentation schématique des sols de l'amont et du versant.

En conclusion, les sols du versant sont caractérisés :

- par une variation graduelle des caractères granulométriques et structuraux. Ainsi, de la base au sommet du profil, on passe progressivement d'une texture sableuse à une texture limoneuse; et on observe la succession des structures suivante : d'abord massive, puis polyédrique nette et enfin polyédrique à sous-structure micro-grumeleuse.
- par un couple d'horizons apparemment appauvris et enrichis en argile :
 - . VE1 plus clair et plus pauvre en argile
 - . VE2 plus rouge et plus riche en argile
- par l'existence de revêtements argileux en raies subhorizontales à la base du profil (VE3).

1. Répartition verticale et caractérisation des horizons

Dans la région étudiée, les sols des pseudotalwegs présentent deux types de succession d'horizons, l'un ou l'autre dominant suivant les talwegs; ils sont schématisés sur la figure 31.



- Fig. 31 a -

- Fig. 31 b -

- ⊥ hydromorphie en taches
- ☐ cailloux de quartz
- ▨ raies brun rougeâtre
- ∥ hydromorphie en bandes verticales grise à liseré rouille.

FIGURE 31 - Schéma des profils du pseudotalweg.

a. Le premier type de profil (fig. 31 a)

Ce profil domine à l'aval de la carrière du Sourn. Ces différents horizons sont, de la base au sommet :

- L'arène à structure détruite (> 230 cm) présente au niveau du pseudo-talweg des raies sub-horizontales brun rougeâtre d'un centimètre d'épaisseur. Ces raies peuvent se poursuivre dans l'horizon supérieur. La transition avec l'horizon sus-jacent est distincte et ondulée; elle est soulignée par la présence de cailloux de quartz anguleux d'origine filonienne.

- L'horizon sablo-graveleux fragique AV3 (de 230 à 130 cm)

Il présente une couleur brunâtre, donnée par la fraction limoneuse. Sa texture globale est sableuse, mais la distribution des éléments est hétérogène. On observe des volumes très riches en graviers et sables, d'autres plus riches en limons :

- . de 230 à 190 cm, ces volumes sont répartis en bandes horizontales
- . de 190 à 130 cm, ils ont une répartition apparemment aléatoire.

L'hydromorphie, non visible dans les zones graveleuses, se traduit dans les zones limoneuses par des bandes verticales grises de 3 cm de largeur, à liséré rouille (5mm) très contrastées. La cohésion de la zone grise est inférieure à celle du fond matriciel environnant. La structure est massive et nette. Dans les plages sablo-graveleuses, la porosité est très importante, fine et moyenne; elle est faible et fine dans les plages plus limoneuses. On observe des revêtements argileux minces brun-rougeâtre dans toute la porosité fine et moyenne des zones sablo-graveleuses et sur quelques fissures verticales. A la base de l'horizon, il existe des revêtements argileux en bandes sub-horizontales. Cet horizon présente une cohésion forte à l'état sec de 230 à 190 cm et très forte de 190 à 130 cm. La transition est très nette et ondulée avec l'horizon sus-jacent.

- L'horizon limoneux brun vif (130 - 70 cm) AV2

De couleur brun vif (7.5 YR 5/6) , il présente quelques taches plus claires (10 YR 7/4) d'hydromorphie. Sa texture est limoneuse; on observe cependant quelques zones plus riches en graviers. Sa structure est polyédrique, nette, moyenne et grossière. La porosité est fine et importante, mais de répartition hétérogène; on observe en effet des zones à très faible porosité. L'horizon est cohérent, les zones à très faible porosité présentant une cohésion plus forte. La transition est distincte et ondulée avec l'horizon sus-jacent.

- L'horizon limoneux jaune brunâtre (de 70 à 33 cm) AV1

Dans cet horizon, de couleur 10 YR 6/6, il apparaît quelques taches plus claires d'hydromorphie, liées aux zones à faible porosité, de 1 à 2 cm de diamètre. La texture est limoneuse. La structure est polyédrique, moyenne et grossière, nette. La porosité est très fine et fine, importante, pénétrant les agrégats; il existe quelques zones à très faible porosité, moins étendues et moins abondantes que dans l'horizon sous-jacent. Le passage à l'horizon labouré a été décrit précédemment.

Ce premier type de profil est composé de deux ensembles d'horizons à texture et structure différentes, séparés par une limite très nette : l'horizon fragique sablo-graveleux AV3 d'une part et les horizons limoneux brun vif AV2 et jaune brunâtre AV1 d'autre part.

Les horizons à texture limoneuse ont une structure fragmentaire. Ils se différencient entre eux par la couleur et la porosité. L'horizon jaune brunâtre AV1 est plus poreux, une partie de sa porosité est plus fine que celle de l'horizon brun vif AV2; de plus, les zones non poreuses et plus cohérentes sont peu nombreuses et marquées par l'hydromorphie dans l'horizon supérieur jaune brunâtre AV1, plus nombreuses et non hydromorphes dans l'horizon inférieur brun vif AV2.

L'horizon fragique sablo-graveleux AV3 est massif et très cohérent. Il apparaît comme étant constitué par un mélange comprenant des zones proches de l'arène du point de vue textural et d'autres plus limoneuses. C'est dans cet horizon que les revêtements argileux se marquent le mieux sur le terrain.

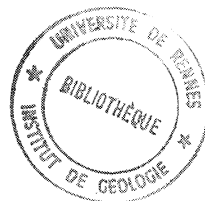
b . Le deuxième type de profil (31 b)

Ce deuxième type de profil est, à l'aval de la carrière du Sourn, moins fréquent que le premier type. Il se compose des mêmes horizons que le premier type, avec toutefois une épaisseur et des caractères liés à l'hydromorphie modifiés ; il s'ajoute en plus, un horizon fragique limoneux.

- L'arène à structure détruite (> 230 cm) présente les mêmes caractères que dans le premier type de profil.
- L'horizon sablo-graveleux, fragique AV3 (230 - 200 cm) devient ici beaucoup moins épais. La transition est très nette et ondulée avec l'horizon sus-jacent.
- L'horizon limoneux fragique AV4 (200 - 130 cm). De couleur 7.5 YR 5/6 , il présente une texture limoneuse. Il apparaît des taches d'hydromorphie :
 - . en bandes verticales grises, à liséré rouille, au sein de l'horizon. Ces bandes sont identiques à celles de l'horizon AV3
 - . en taches claires au sommet de l'horizon; celles-ci sont nombreuses.Sa structure est massive, localement lamellaire très grossière, très nette. La porosité est très faible. Cet horizon est très cohérent. La transition est distincte avec l'horizon sus-jacent.
- L'horizon limoneux brun vif AV2 (130 - 70 cm). Cet horizon présente de très nombreuses taches claires d'hydromorphie, surtout vers sa base. Les autres caractères sont ceux de son homologue du premier type de profil.
- L'horizon limoneux jaune brunâtre AV1 (70 - 30 cm). Cet horizon est équivalent à son homologue du premier type de profil.

c . Les différences essentielles entre les deux types de profils

Le second type de profil présente aussi des variations texturales et structurales très importantes; cependant ces variations ne sont pas simultanées comme dans le premier type de profil (fig. 32) ; cela conduit à l'individualisation d'un horizon limoneux, massif et très cohérent, dont la porosité est très faible. Cette faible porosité induit une hydromorphie en bandes verticales au sein de l'horizon et en taches à son sommet et à la base de l'horizon sus-jacent.



	nomenclature	texture	structure	hydromorphie
1er type de profil	jaune brunâtre limoneux AV1	LIMONEUSE	POLYEDRIQUE	en taches claires peu abondantes
	brun vif limoneux AV2			
2ème type de profil	fragique sablo-graveleux AV3	SABLO GRAVELEUSE	MASSIVE	en bandes verticales localisées dans les volumes limoneux
	jaune brunâtre limoneux AV1			en taches claires peu abondantes
	brun vif limoneux AV2			en taches claires très abondantes
	fragique limoneux AV4	sablo- graveleuse	MASSIVE	en bandes ver- ticales tra- versant tout l'horizon
fragique sablo graveleux AV3				

FIGURE 32 - Variation des caractères principaux des profils du pseudotalweg.

2 - Variation et répartition latérale de ces horizons

Le passage d'un type de profil à l'autre s'effectue sur quelques mètres. Il correspond à une réduction de l'épaisseur de l'horizon sablo-graveleux AV3 (fig.33). La limite entre l'horizon fragique limoneux AV4 et l'horizon fragique sablo-graveleux AV3 est très nette.

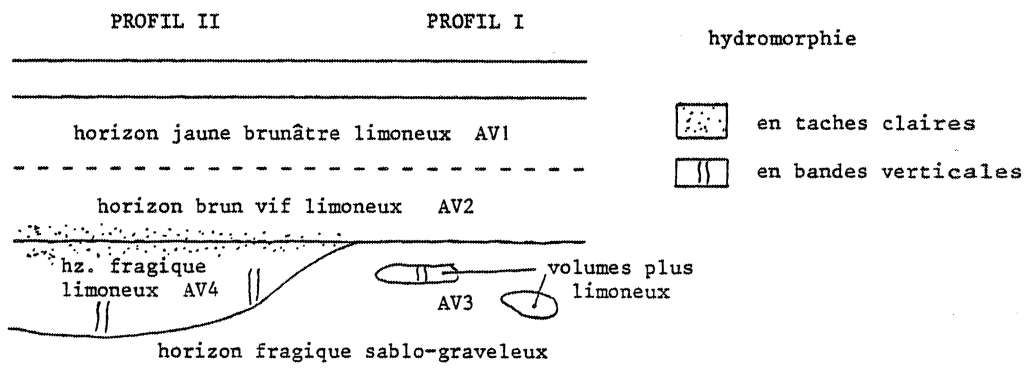


FIGURE 33 - Schéma du passage du Profil I au Profil II dans le pseudotalweg.

Les règles de la distribution spatiale de ces deux types de profils n'ont pu être déterminées. Cependant, l'existence dans la même position d'horizons à caractère fragique de textures différentes, limoneux et sablo-graveleux, prouve que ce caractère est indépendant de la texture du matériau. Lorsque le caractère fragique affecte un horizon limoneux, la porosité est alors très faible et une hydromorphie importante est induite dans l'horizon supérieur. Au contraire, lorsqu'il affecte un horizon sablo-graveleux, la porosité reste très importante et il n'y a pas d'hydromorphie induite.

La transition avec les sols du domaine de versant est la suivante : l'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE3 du versant apparaissait vers l'aval, massif et très cohérent; ces caractères, en s'affirmant, donnent l'horizon fragique sablo-graveleux AV3. Au fur et à mesure que le caractère fragique s'accroît, le contraste granulométrique entre les horizons supérieurs à texture fine et l'horizon inférieur à texture plus grossière s'accroît; l'horizon brun vif limono-sableux VE2 du versant apparaît en continuité avec l'horizon brun vif limoneux AV2 de l'aval.

En conclusion, les sols du domaine aval sont constitués de deux horizons limoneux à structure polyédrique, qui se différencient principalement par la couleur. Ces horizons surmontent un fragipan limoneux et/ou sablo-graveleux; une hydromorphie induite par le fragipan se marque dans les matériaux limoneux. C'est dans ces sols, enfin, que les revêtements argileux sont les plus nets.





E - CONCLUSION A L'ETUDE MACROSCOPIQUE

Les variables observées ont permis de distinguer différents horizons que l'on peut regrouper en fonction de leur ressemblance, de la manière suivante (tab.11) d'après leur caractères structuraux et indépendamment de leur granulométrie.

- TABLEAU 11 - Nomenclature des horizons sablo-limoneux à limoneux.

AVAL	VERSANT	AMONT
jaune brunâtre limoneux AV1	brun jaunâtre limoneux VE1	limoneux AM1
brun vif limoneux AV2	brun vif limo- no-sableux VE2	limoneux AM2
sablo-graveleux fragique AV3	brun jaunâtre sablo-limoneux VE3	arène sablo- limoneuse AM3
limoneux fragique AV4		

- Légende -

	ens. α		ens. γ
	ens. β		ens. δ

- un ensemble α d'horizons caractérisés par une couleur brun jaunâtre et une sous-structure micro-grumeleuse, qui comprend :

- . l'horizon limoneux AM1
 - . l'arène sablo-limoneuse AM3
 - . l'horizon limoneux AM2
 - . l'horizon brun jaunâtre limoneux VE1 (domaine de versant)
- } (domaine amont)

La structure microgrumeleuse ayant une importance décroissante du premier au dernier horizon cité.

- un ensemble β possédant une couleur jaune brunâtre et une structure polyédrique, il comprend l'horizon jaune brunâtre limoneux (domaine aval) AV1.

- un ensemble γ caractérisé par une couleur brun vif et une structure polyédrique; il est constitué par :

- . l'horizon brun vif limoneux-sableux VE2 (domaine de versant)
- . l'horizon brun vif limoneux AV2 (domaine aval).

La structure s'affirmant de l'amont vers l'aval.

- un ensemble δ marqué par une structure massive et une cohésion forte, comprenant :

- . l'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE3 (domaine de versant)
- . l'horizon sablo-graveleux fragique AV3 (domaine aval)
- . l'horizon limoneux fragique AV4 (domaine aval)

Le caractère massif et la cohésion croissent de l'amont vers l'aval.

La figure 34 établit les relations géométriques existant entre ces différents horizons.

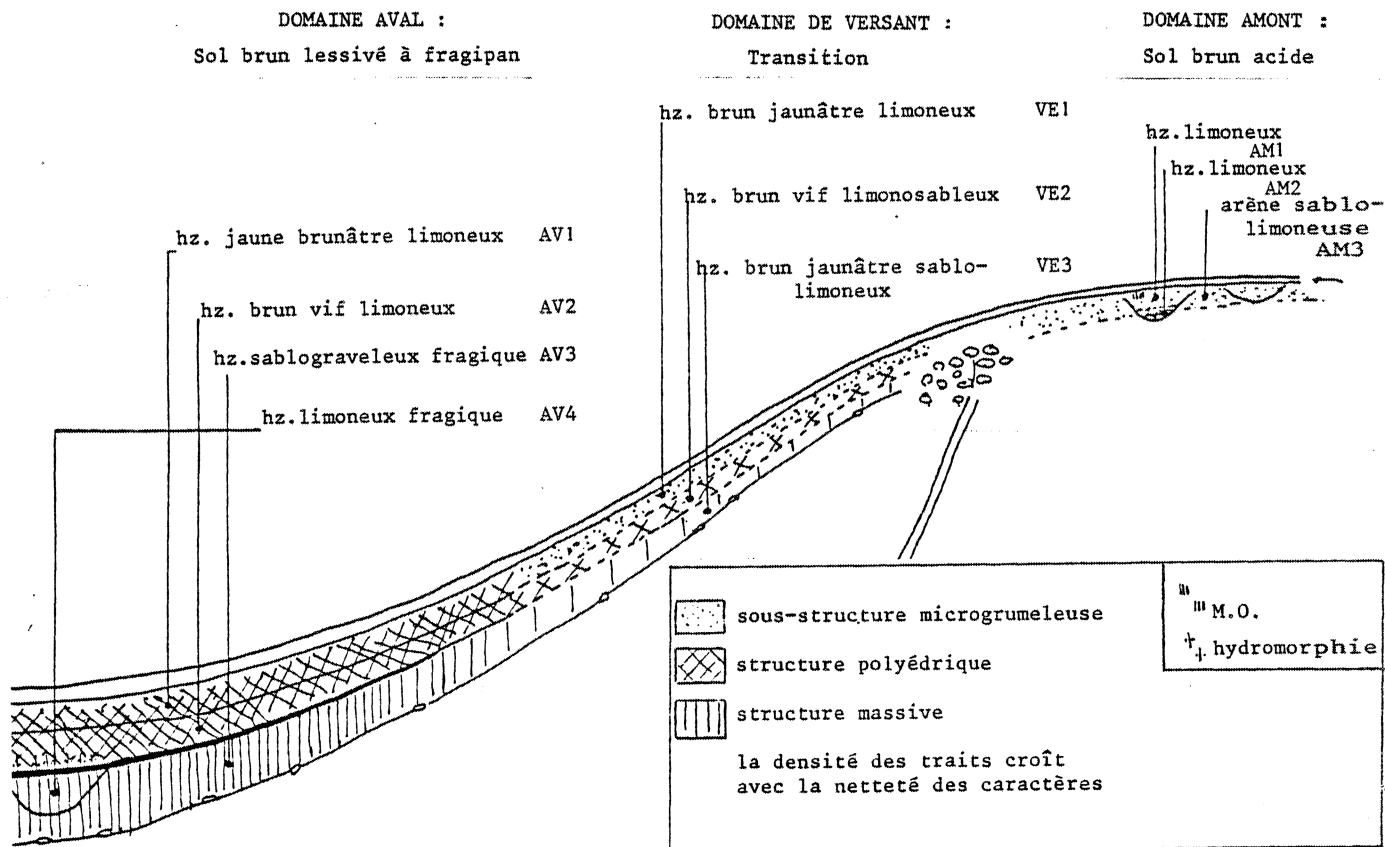


FIGURE 34 - Représentation schématique de la séquence.

II - DONNÉES ANALYTIQUES

A - GRANULOMETRIE (1)

Pour tenir compte des éléments grossiers, de la taille des graviers, qui présentent de fortes variations le long de la séquence, les analyses granulométriques sont présentées en pour cent de la terre entière. En opérant un découpage en 4 classes granulométriques (A = 0 - 2 μ m ; L = 2 - 50 μ m ; S = 50 - 2000 μ m ; G = 2 - 20 mm) et en représentant ces classes sur des histogrammes, on constate que tous les échantillons peuvent se regrouper en 3 types d'histogrammes différents (fig. 35).

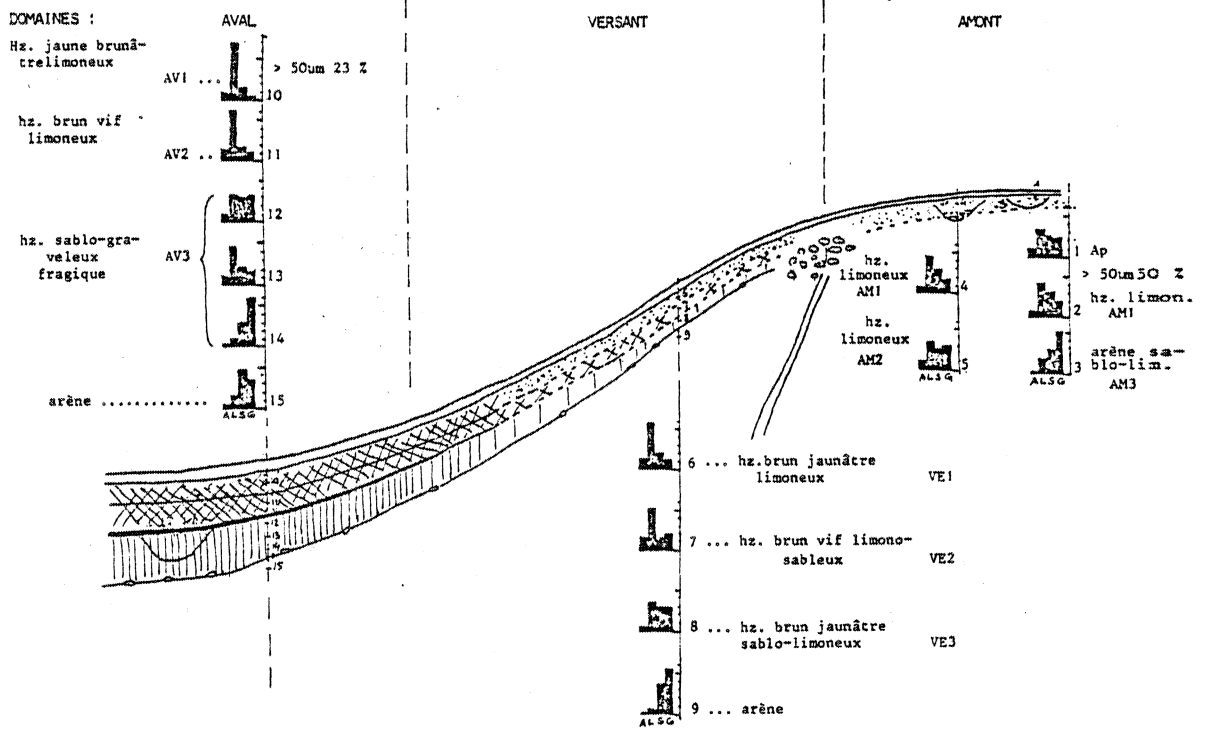


FIGURE 35 - La distribution granulométrique.

(1) Les analyses granulométriques (8 fractions) sont présentées en annexe.

1 - Les trois types d'histogrammes

Les différents horizons se regroupent de la façon suivante :

- Type I $L < S < G$

- . arène à structure détruite
- . arène sablo-limoneuse AM3
- . volumes sableux de l'horizon sablo-graveleux fragique AV3

- Type II $L = S = G$

- . horizon limoneux AM2
- . horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE2
- . horizon sablo-graveleux fragique AV3

- Type III $L > S > G$

- . horizon limoneux AM1
- . horizon brun jaunâtre limoneux VE1
- . horizon brun vif limono-sableux VE2
- . horizon jaune brunâtre limoneux AV1
- . horizon brun vif limoneux AV2
- . volumes limoneux de l'horizon sablo-graveleux fragique AV3
- . horizon limoneux fragique AV4

2 - Les relations entre ces trois types; leurs positions respectives dans la séquence.

Les observations morphologiques nous permettent de préciser les relations entre ces trois types d'histogrammes en fonction de la position topographique.

- Sur le versant

On observe la succession des trois types en remontant dans le profil :

- . Type I : l'arène à structure détruite
- . Type II : l'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE3
- . Type III : l'horizon brun vif limono-sableux VE2 et l'horizon brun jaunâtre limoneux VE1.

Morphologiquement, nous avons vu que les variations texturales étaient progressives : on passe graduellement d'une distribution à éléments grossiers dominants à une distribution à éléments limoneux dominants. De la base au sommet du profil, le sol s'enrichit progressivement en limons et s'appauvrit en sables et graviers.

- A l'amont

. dans les poches peu profondes, on passe directement du type I (arène sablo-limoneuse AM3) au type III (horizon limoneux AM1). Morphologiquement, la limite est très nette. Notons, cependant, que l'horizon "limoneux" est encore riche en éléments grossiers : 50 % d'éléments de taille supérieure à 50 μ m.

. Dans les poches plus profondes, l'horizon limoneux AM2, qui se développe entre l'arène et l'horizon limoneux AM1, présente une distribution de type II. La limite morphologique avec l'arène est nette.

Dans les sols de l'amont, on constate donc que le passage des distributions à graviers dominants aux autres distributions est rapide. La distribution intermédiaire peut ne pas exister.

- A l'aval

Les sols des pseudotalwegs présentent entre l'arène à texture sableuse et les horizons plus superficiels à texture limoneuse, un horizon : l'horizon sablo-graveleux fragique AV3, où l'on observe les trois types de distribution de manière indépendante de la profondeur, mais en fonction des volumes de textures différentes observés morphologiquement. On passe ensuite très rapidement à des horizons de type III à texture limoneuse.

3 - Les horizons à éléments limoneux dominants

Si l'on suit latéralement l'horizon le plus riche en limon le long de la séquence, on observe un net accroissement des éléments fins vers l'aval :

%⁽⁺⁾ de particules < 50 μm dans l'horizon le plus limoneux des différents profils

amont AM1 = 50 % versant VE1 = 69 % pseudotalweg AV1 = 77%

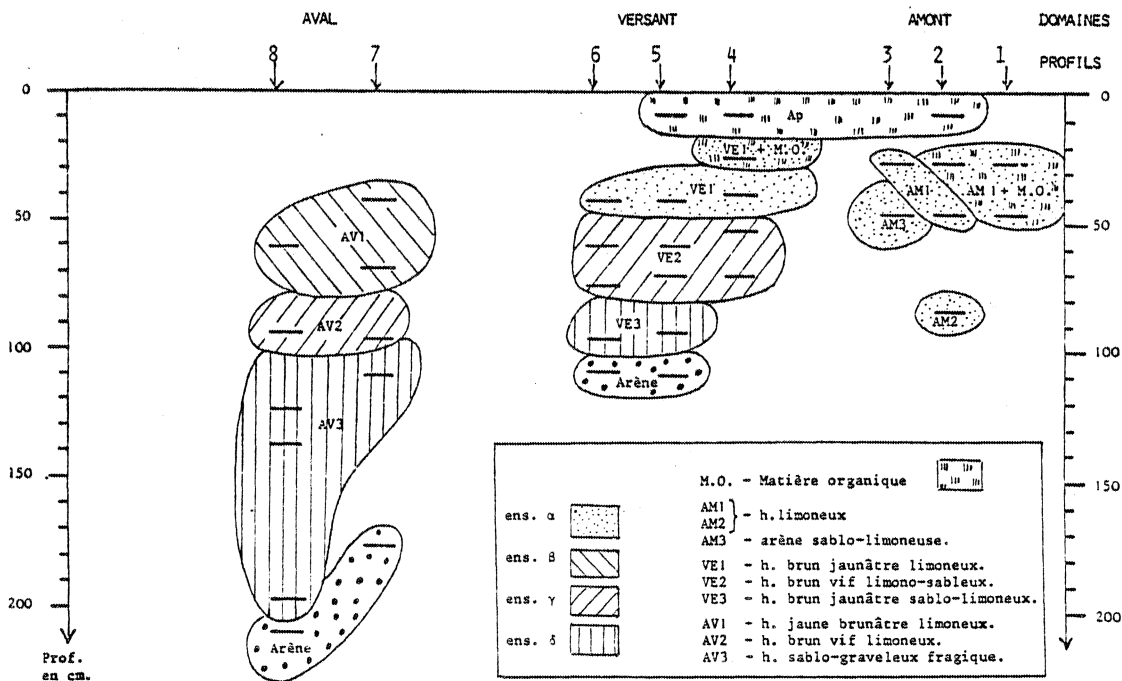
Cet accroissement est dû à l'augmentation de la teneur en limons (tab. 12 & 13).

amont	aval
L = 40 %	L = 70 %

et plus particulièrement de la teneur en L.G. (tab. 14).

amont	pseudotalweg
LF = LG \pm LF/LG = 1	LF = 0,7 LG \pm LF/LG = 0.7

TABLEAU 12 - Nomenclature des horizons sablo-limoneux à limoneux.



(+): teneur en % de la terre entière

TABLEAU 13 - LF + LG en % de la terre entière.

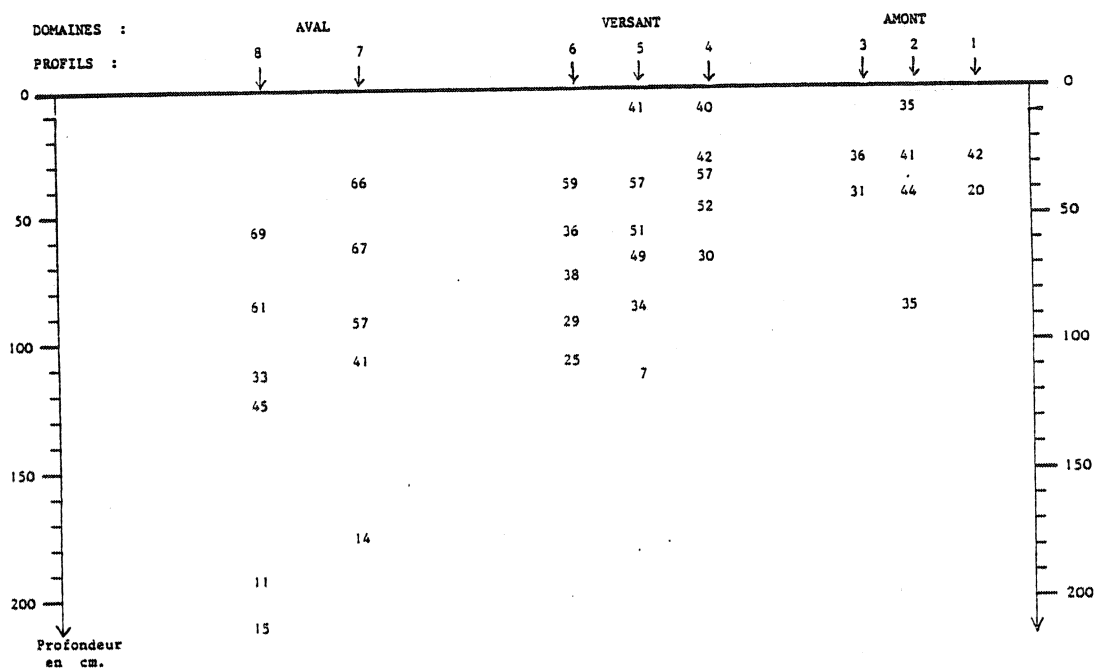
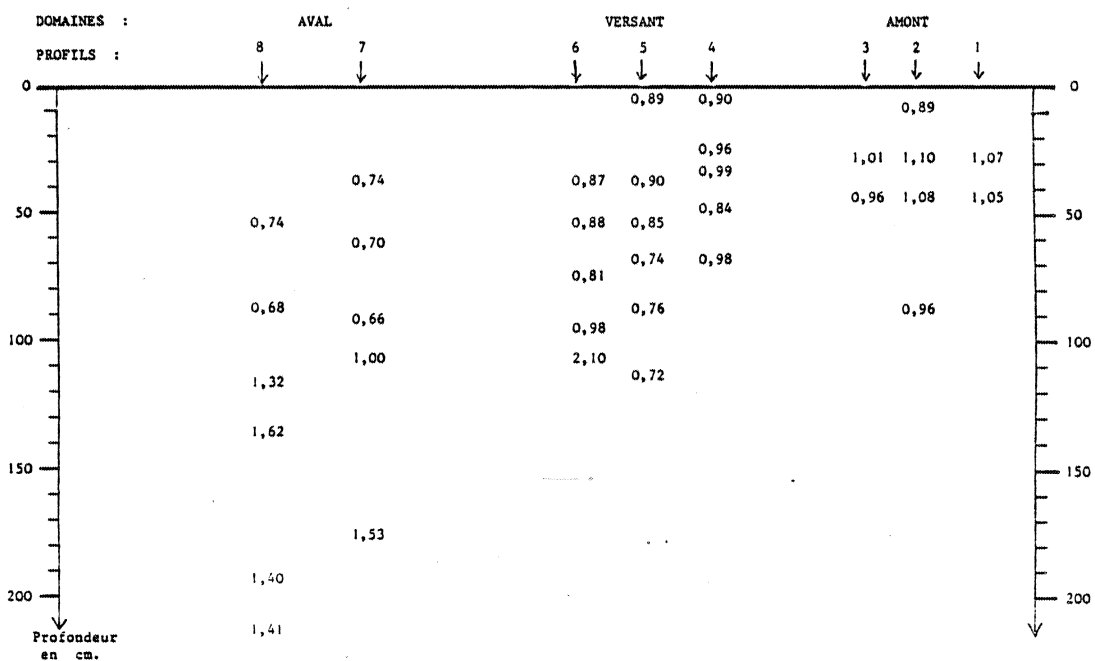


TABLEAU 14 - Rapport LF/LG.



4 - L'argile granulométrique

La teneur en argile granulométrique de l'arène est très faible : 2 - 5 % ; celle de l'ensemble sablo-limoneux à limoneux varie entre 10 et 20 % (fig.36) . Les sols les plus nettement différenciés en argile sont les sols de versant avec un "indice d'entraînement" de l'argile de 2, alors que les sols d'amont et d'aval ont un indice d'entraînement < 1.5.

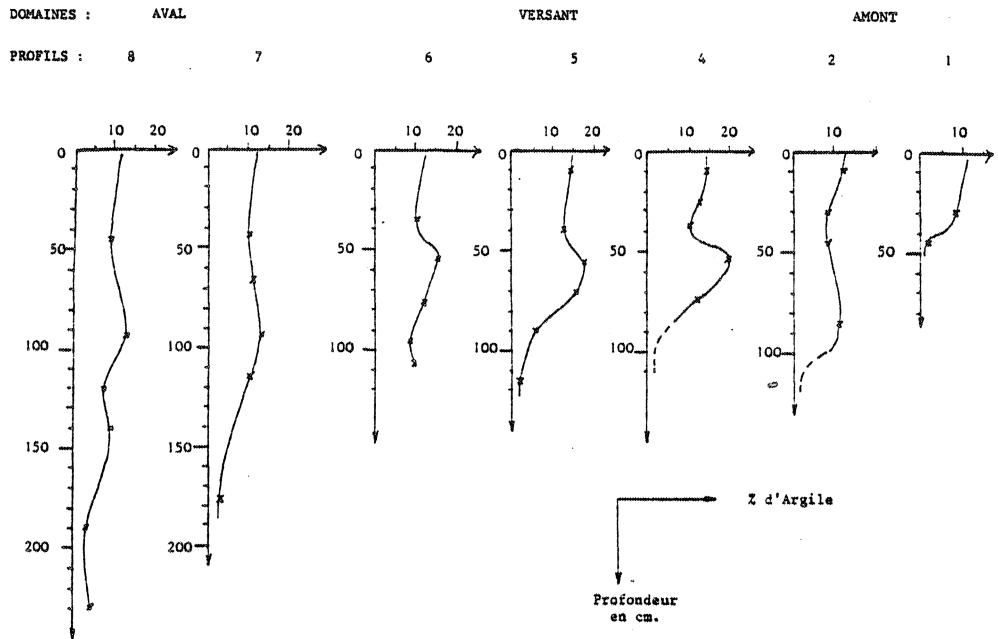


FIGURE 36 - Profils verticaux d'argile granulométrique en % de la terre entière.

5 - Conclusion à l'étude granulométrique.

A partir de cette étude, il est possible d'observer les quelques points suivants :

- un accroissement de la teneur en argile, de l'arène à l'ensemble sablo-limoneux à limoneux. Dans ce dernier ensemble, le profil de l'argile granulométrique s'apparente à celui du sol brun faiblement lessivé pour les sols du versant et du pseudotalweg.
- sur le versant, un accroissement progressif de la teneur en limons, de l'arène à l'horizon sous cultural, tandis qu'à l'amont et à l'aval, les variations sont plus rapides.
- dans les horizons AM1 , VE1 et AV1 , un accroissement de la teneur en limons, essentiellement en LG de l'amont vers l'aval.

LE CALVEZ (1979) a montré que ces différentes distributions granulométriques étaient compatibles avec un modèle de mélange de deux matériaux. Chaque échantillon M est, dans ces conditions, une combinaison linéaire de deux pôles A et S :

$$M = xA + (1 - x) S$$

x étant le pourcentage du matériau A dans l'échantillon M.

Il détermine ainsi la composition granulométrique des deux pôles A et S qui sont respectivement limoneux (A) et sableux (S) (tab. 15).

TABLEAU 15 - Composition granulométrique des pôles sableux et limoneux.
(in LE CALVEZ - 1979)

%	Pôle sableux	Pôle limoneux
A	13.5	13.5
LF	20	33.5
LG	13.5	49
S ₁	7	3.5
S ₂	7	
S ₃	14.5	
S ₄	13	
S ₅	12	
Σ	100	100

et établit le long de la séquence les courbes d'isovaleurs de x (fig.37) qui délimitent les volumes dont la composition granulométrique correspond à un même pourcentage de mélange.

D'autres types de données : morphologiques, minéralogiques, analytiques et cartographiques sur ce substrat granitique et sur d'autres roches lui permettent d'attribuer le pôle limoneux A à un apport éolien et le pôle sableux S au substrat local.

Ainsi les limites de l'étude microscopique qui va suivre, apparaissent dès maintenant. On ne pourra, en effet, établir de filiation génétique entre les fonds matriciels de deux horizons quelconques de la séquence, ni y suivre l'altération des minéraux. Par contre, cela sera possible pour des horizons présentant le même pourcentage de mélange, donc la même roche-mère ou pour différents domaines d'un même horizon. Les traits pédologiques (revêtements, concentrations plasmiq...), eux, se développant dans le fond matriciel postérieurement au mélange, seront un outil efficace pour décrypter l'histoire de ces sols.

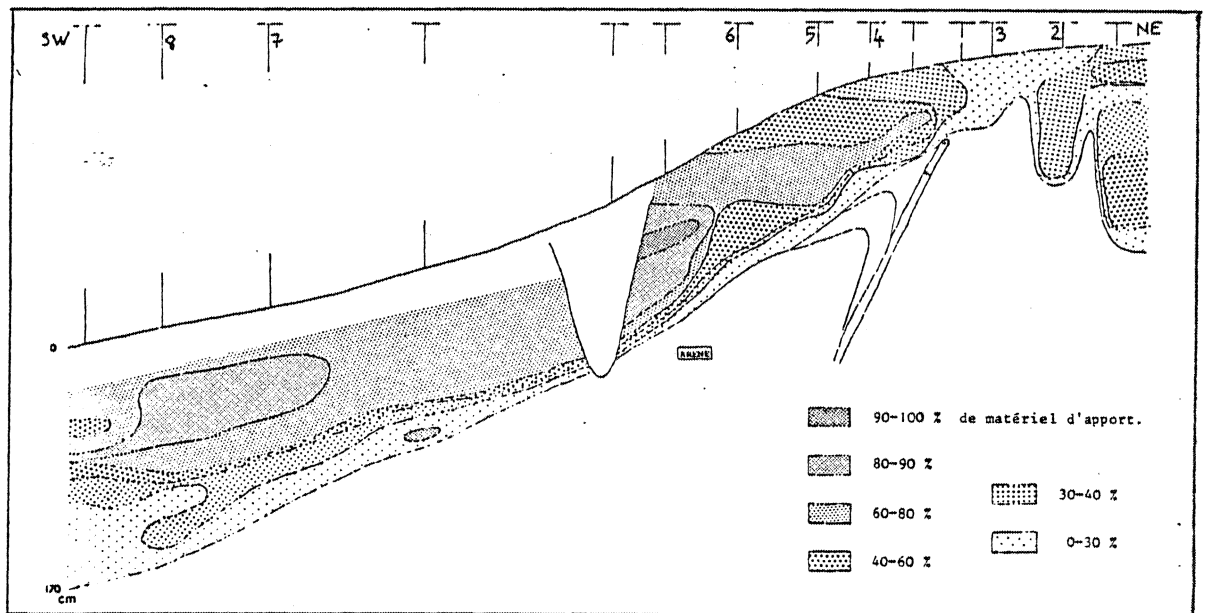


FIGURE 37 - Courbes d'isovaleurs de x : pourcentage de matériaux d'apport (d'après LE CALVEZ, 1979; p.158).

B - DONNEES CHIMIQUES

Etant donné que la séquence se trouve en milieu cultivé, les caractères intrinsèques du sol sont masqués par suite de la fertilisation; il en résulte que les données obtenues renseigneront peu sur le milieu pédologique naturel.

1 - pH

Il s'agit des mesures suivantes : pH eau, KCl et NaF.

- Le pH eau (tab. 16) varie entre 4.8 et 5.6. Les variations au sein d'un même horizon sont du même ordre que les variations entre horizons. Ainsi, si on effectue un découpage en trois classes en fonction de la fréquence des différents pH :

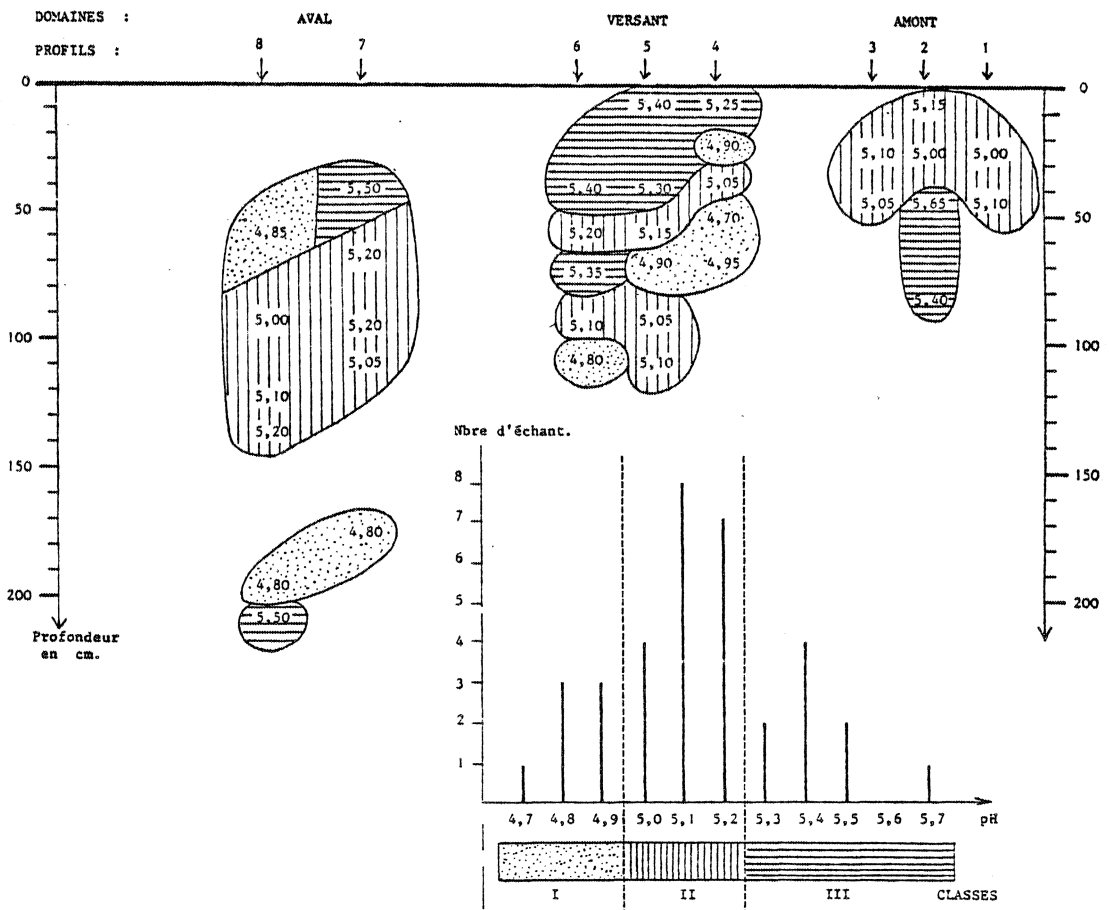
classe I : $4.7 \leq \text{pH} \leq 4.9$

classe II : $5.0 \leq \text{pH} \leq 5.2$

classe III : $5.3 \leq \text{pH} \leq 5.7$

on constate que les domaines définis ne correspondent pas aux horizons; un même horizon peut contenir les trois classes. (Exemple : l'horizon jaune brunâtre limoneux AV1) et une même classe peut contenir plusieurs horizons. On peut simplement dire que ce sont des sols acides où des ions aluminium sont susceptibles d'apparaître sur le complexe adsorbant.

TABLEAU 16 - pH eau.

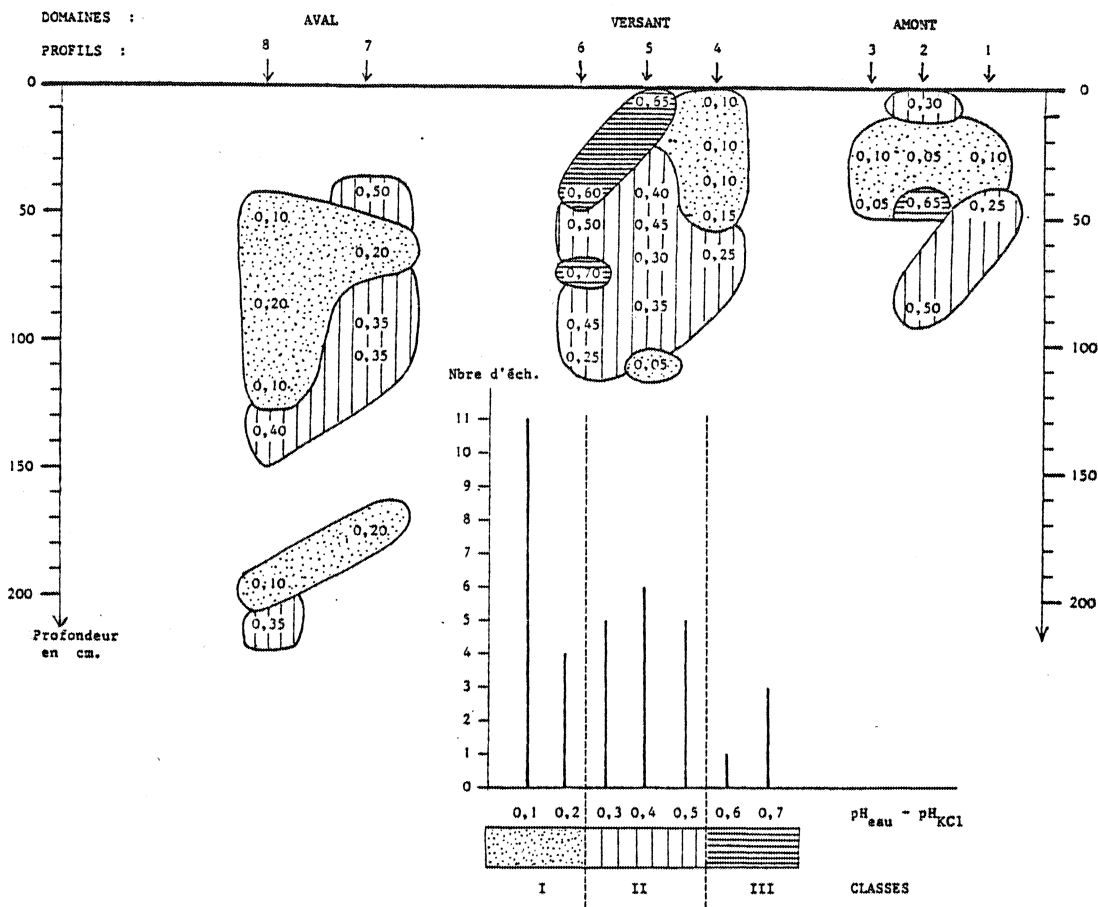


- Le pH KCl (tab. 17) . Ces sols présentent une faible acidité d'échange : la différence pH eau - pH KCl est peu élevée, inférieure à 0.7. De la même manière, en effectuant un découpage en 3 classes pour la différence pH eau - pH KCl :

- classe I : $0.1 \leq \Delta pH \leq 0.2$
- classe II : $0.3 \leq \Delta pH \leq 0.5$
- classe III : $0.6 \leq \Delta pH \leq 0.7$

les domaines définis ne correspondent à aucun des domaines précédents; on ne peut donc donner un sens à ces variations.

TABLEAU 17 - pH eau - pH KCl.



- Le pH NaF (tab. 18) varie entre 9.6 et 11.3; ces variations sont ordonnées le long de la séquence. La partie supérieure des profils et l'amont de la séquence présentent les pH les plus élevés, le fragipan sablo-graveleux AV3 à l'aval est caractérisé par les pH les plus bas. Ces valeurs de pH indiquent la présence de constituants amorphes dans la partie supérieure des profils et à l'amont de la séquence ($10.7 \leq pH \leq 11.3$).

2 - Complexe adsorbant (tab. 19 & 20)

La capacité totale d'échange T varie de 12 à 15.6 meq/100g pour les horizons enrichis en matière organique, de 10.6 à 3.7 pour les autres. Le taux de saturation S/T varie de 9 à 37 %. Ce sont donc des sols à faible capacité d'échange et fortement désaturés. Le complexe montre des quantités de potassium importantes : K = 2 Mg, ce qui est une conséquence de la fertilisation. Le taux de saturation est donc plus élevé qu'en milieu naturel.

TABLEAU 18 - pH NaF.

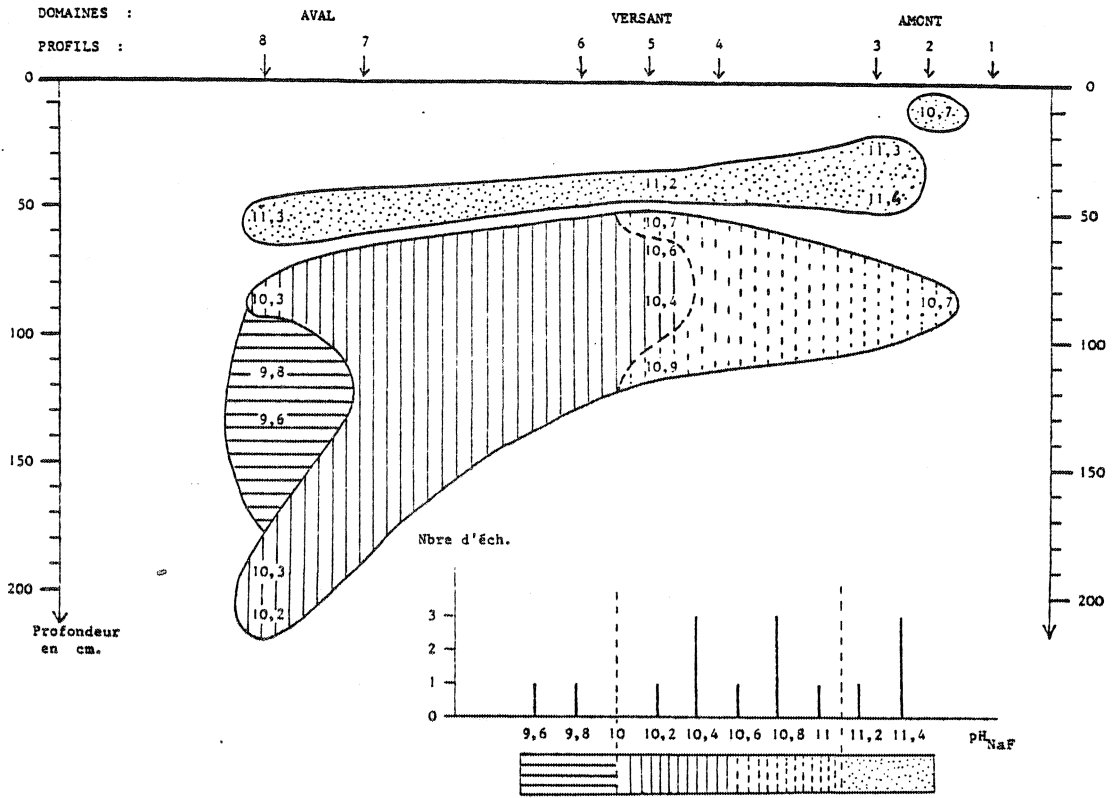


TABLEAU 19 - Complexe adsorbant.

AVAL			VERSANT						AMONT			DOMAINES			PROFILS
8	7		6	5	4	3	2	1							
S	T	S/T	S	T	S/T	S	T	S/T	S	T	S/T	S	T	S/T	
															0
						4,27	14,6	29	4,39	15,4	28				10
									1,43	12,0	11				20
			1,49	4,5	33	1,29	10,6	12	0,97	10,5	9	1,32	9,50	13	30
						1,29	9,5	13				1,28	12,1	10	40
									1,51	8,9	16	1,17	8,10	14	50
1,34	8,1	16				2,18	7,7	28	1,57	9,3	16				60
			1,25	6,7	18				1,67	9,7	17	1,44	4,6	31	70
						1,92	5,6	34							80
2,71	8,1	33							2,24	8,5	26				90
			3,07	8,2	37	1,98	6,7	29				1,47	7,7	19	100
															110
			2,64	10	26	1,61	8,5	18	0,80	3,7	21				120
1,91	7,7	24													130
2,22	9,10	24													140
															150
			2,21	7,3	30										160
															170
1,57	6,1	25													180
															190
1,76	6,9	25													200
															210
															220

S : somme des cations échangeables) en méq.pour 100 g.
 T : capacité d'échange) de terre fine.
 S/T : taux de saturation du complexe adsorbant.

Prof. en cm

TABLEAU 20 - Cations échangeables.

DOMAINES :		AVAL								VERSANT								AMONT																			
PROFILS :		8		7		6		5		4		3		2		1																					
		Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na																
0																						0															
10									3,71	0,27	0,11	0,18	3,63	0,17	0,41	0,18		3,52	0,27	0,23	0,10	10															
20																						20															
30														1,04	0,13	0,20	0,06	1,00	0,13	0,13	0,06	0,90	0,14	0,19	0,05	0,90	0,13	0,19	0,06	30							
40						0,98	0,17	0,28	0,06	0,84	0,13	0,24	0,08	0,94	0,16	0,05	0,14	0,64	0,10	0,18	0,05									40							
50																							0,90	0,13	0,06	0,08	0,80	0,14	0,25	0,06	0,72	0,13	0,14	0,06	50		
60		0,88	0,13	0,23	0,10					1,44	0,24	0,42	0,08	1,16	0,17	0,12	0,12																	60			
70						0,88	0,13	0,18	0,06	1,34	0,19	0,34	0,05	1,26	0,17	0,12	0,10	1,04	0,17	0,15	0,08													70			
80																																			80		
90		2,08	0,36	0,19	0,08									1,74	0,30	0,10	0,10					1,00	0,14	0,28	0,05									90			
100						2,38	0,35	0,22	0,12	1,34	0,22	0,34	0,08																						100		
110						1,98	0,26	0,30	0,10	1,20	0,19	0,14	0,08	0,64	0,10	-	0,06																		110		
120		1,50	0,23	0,04	0,14																															120	
130																																				130	
140		1,60	0,45	0,05	0,12																															140	
150																																				150	
160																																					160
170																																					170
180						1,68	0,25	0,12	0,16																												180
190																																					190
200		1,20	0,22	0,01	0,14																																200
210																																					210
220		1,28	0,26	0,10	0,12																																220

C - MINERALOGIE DES ARGILES

Les déterminations ont été effectuées par diffractométrie des RX sur agrégats orientés, associée aux traitements préconisés par ROBERT (1975).

Les espèces minérales observées sont (tab. 21)

- . la kaolinite K
- . le quartz Q
- . les argiles micacées AM
- . la vermiculite hydroxyalumineuse V (14 Å à Mg, K, EG fermeture à 350°C et 450°C)
- . des interstratifiés IS (10 - 14 Å) d'argiles micacées et de vermiculite hydroxyalumineuse: (12 - 13 Å) à Mg, K et EG ; fermeture à 350°C et 450°C).

Dans l'arène, la kaolinite est dominante associée au quartz et aux argiles micacées : K > Q > AM . Dans l'ensemble des horizons plus limoneux, les argiles micacées ont la même importance que dans l'arène; la vermiculite hydroxyalumineuse et les interstratifiés deviennent plus abondants, la quantité maximum apparaissant dans les horizons brun vif VE2 et AV2 ; quartz et kaolinite présentent un rapport qui s'inverse de la base au sommet des profils : à la base K > Q ; au sommet K < Q.

La prépondérance du quartz dans les horizons superficiels peut être due :

- à une accumulation relative, par altération et départ des argiles;
- et/ou à une accumulation absolue, par microdivision des quartz de la taille des limons.
- et/ou à une composition différente, plus riche en quartz de la fraction argileuse du matériau d'apport.

TABLEAU 21 - Composition minéralogique de la fraction argileuse.

DOMAINES :	AVAL					VERSANT					AMONT				
	K	Q	AM	V	IS	K	Q	AM	V	IS	K	Q	AM	V	IS
0															
50						35	40	10	15						
100															
150															
200															
Profondeur en cm.															

Q - Quartz
K - Kaolinite
AM - Argiles micacées
V - Vermiculite hydroxy-alumineuse
IS - Interstratifié 10 - 14 Å
* - Présence du pic (020) de la kaolinite
- Une estimation semi-quantitative est effectuée en se basant sur la hauteur relative des pics.

D - CONCLUSIONS

Les horizons caractérisés morphologiquement se différencient dans un matériau présentant de fortes variations granulométriques. *Ces variations ne correspondent pas au découpage des horizons*; différents horizons peuvent avoir en effet la même distribution granulométrique; par exemple, les horizons jaune brunâtre limoneux AV1, brun vif limoneux AV2 et fragique limoneux AV4. Cette différenciation texturale peut être interprétée comme le résultat d'un mélange de deux matériaux (LE CALVEZ, 1979).

Ces horizons sont peu différenciés du point de vue physico-chimique. La fertilisation du milieu a pu masquer certaines différences. Ils présentent un pH acide compris entre 4.5 et 5.5 et un complexe désaturé.

La fraction argileuse de ces horizons est composée des mêmes espèces minéralogiques, dont les proportions varient suivant les horizons. La kaolinite domine dans l'arène; le quartz domine à la partie supérieure des profils; quant aux argiles micacées, vermiculite hydroxyalumineuse et interstratifiés 10-14 Å, ils sont présents à peu près partout.

III - ETUDE AU MICROSCOPE OPTIQUE

PREAMBULE

Dans ce chapitre, le niveau de caractérisation des horizons n'est pas le même que celui adopté pour l'étude de l'arène. On s'attachera ici, principalement, aux structures et aux traits pédologiques, la caractérisation de l'état d'altération des minéraux étant abordé plus rapidement : j'emploierai des termes comme peu altéré, moyennement altéré ... étant conscient de leur imprécision.

Pour des raisons de facilité de présentation et parce que c'est dans ce domaine que la transition entre l'arène et les horizons sablo-limoneux et limoneux du sol est la plus progressive, je présenterai d'abord les horizons du domaine de versant. Ces horizons seront ensuite comparés à ceux de l'amont et de l'aval.

Les descriptions se feront de la base au sommet des profils. Pour se référer dans la nomenclature des horizons, il faut se référer à la figure 34.

A - LE DOMAINE DE VERSANT

1 - L'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE3

a - Description

α - Fond matriciel

- Structure , porosité

Cet horizon présente deux domaines que l'on différencie essentiellement par la structure et par la porosité :

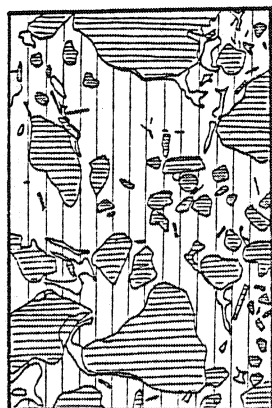
- . un domaine majeur (70 à 80 % de la surface totale:s.t.) à structure massive et à porosité constituée de cavités, chambres et chenaux de 0.4 à 1 mm de diamètre (*ph.1, pl.10*). Cette porosité couvre 10 à 15 % du domaine.
- . un domaine peu étendu (20 à 30 % de la s.t.) à structure grumelleuse et microgrumelleuse, les agrégats étant nettement disjoints ou plus ou moins accolés. La porosité de ce domaine est interagrégats et en chenaux de 0.5 à 0.8 mm de diamètre; elle couvre 30 % du domaine.

- Granulométrie , altération

Les éléments grossiers, sables et graviers, représentent 20 % de la surface totale; la fraction fine, limons et argiles, 60 à 70 %; les 10 à 20 % restant étant la porosité.

PLANCHE 10 - DOMAINE DE VERSANT.

PHOTO 1 - Horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE3 - domaine massif-(L.N.) -









-  Fond matriciel limono-sableux.
-  Éléments grossiers.
-  Porosité de chenaux.

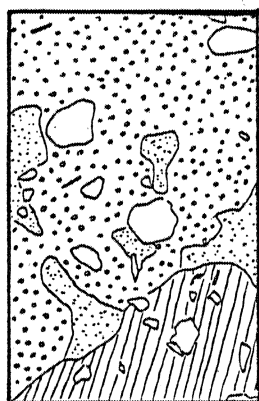
PHOTO 2 - Horizon brun vif limono-sableux VE2.(L.N.) -



-  Fond matriciel limoneux.
-  Éléments grossiers.
-  Porosité fissurale de chenaux et cavités.

PHOTOS 3 et 4 - Horizon brun jaunâtre limoneux VE1.

PHOTO 3 - Structure -(L.N.)-







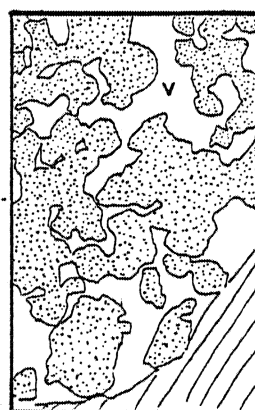



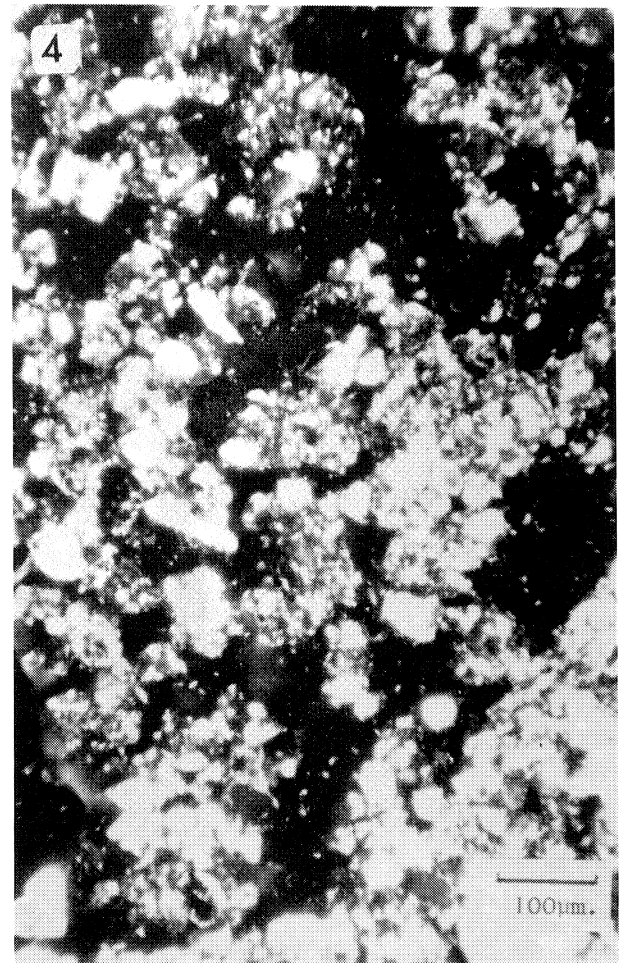
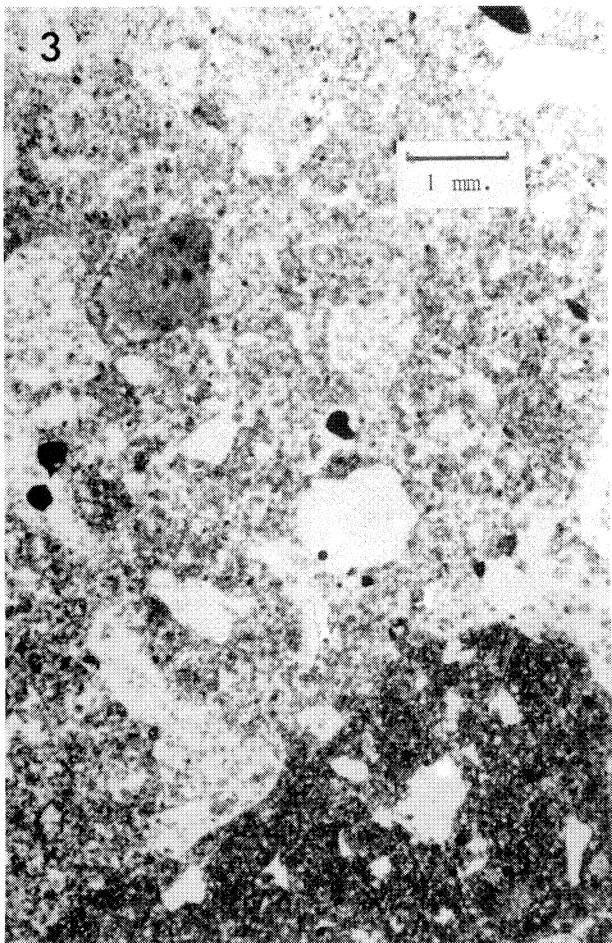
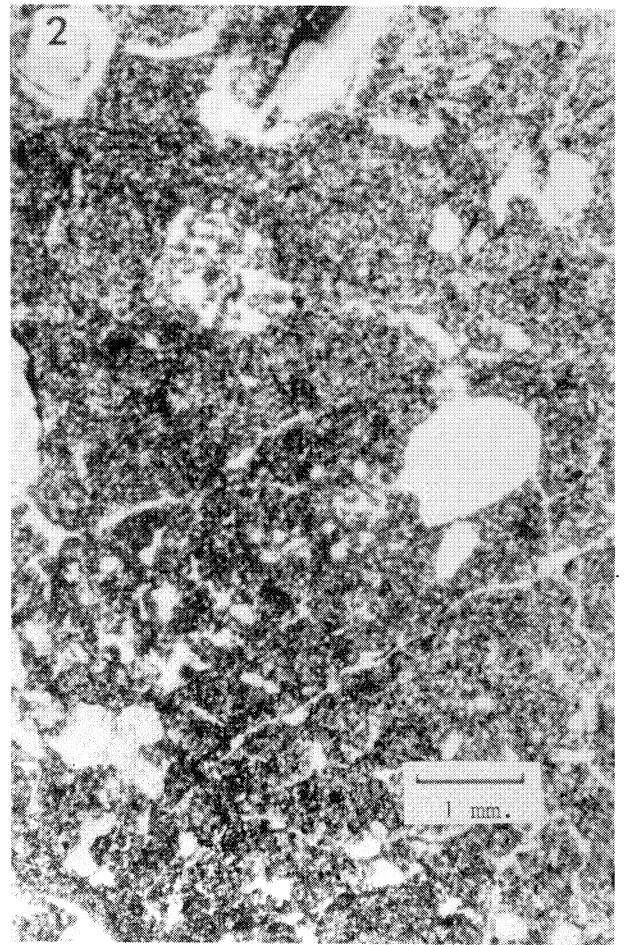
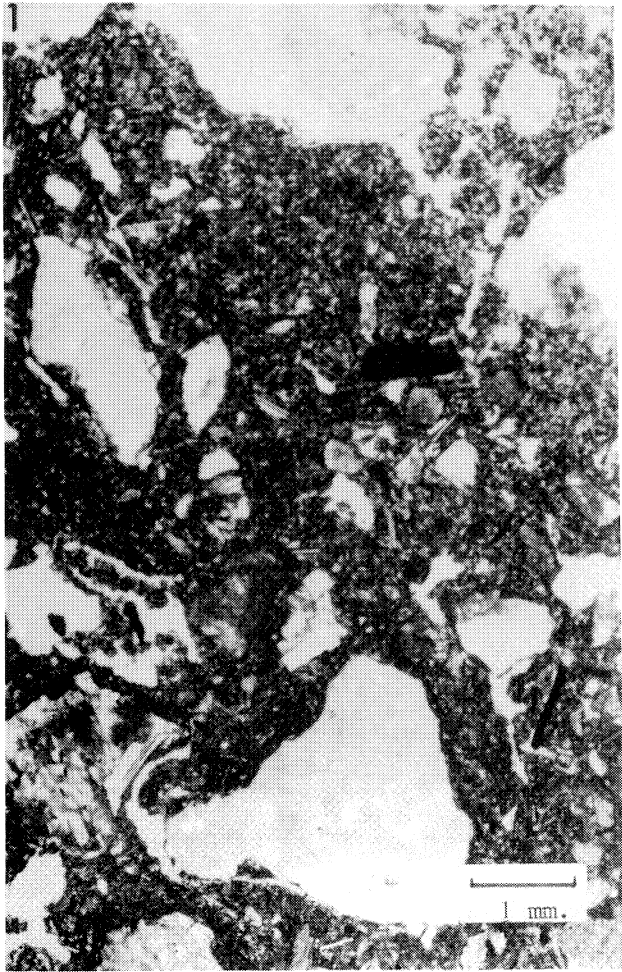
- Domaine microgrumeleux :
-  agrégats disjoints.
 -  agrégats + jointifs.
 -  Domaine polyédrique.
 -  Éléments grossiers.

PHOTO 4 - Agrégats microgrumeleux. (L.P.) -



-  Agrégats microgrumeleux.
-  Agrégats polyédriques.
-  Vides.



- . Les éléments grossiers sont constitués par une majorité de quartz. Ces quartz sont à bords anguleux, faiblement altérés. Certains d'entre eux sont fortement microdivisés en éléments de la taille des limons grossiers; cette microdivision n'est cependant qu'un artefact dû au sciage de l'échantillon : le quartz, élément le plus dur, est fracturé lors du sciage(1). Les orthoclases et les micas sont présents en plus faible quantité, faiblement altérés. Il n'y a pas de plagioclases.
- . La fraction fine est composée de quartz, feldspaths et micas; il n'y a pas prépondérance d'une classe granulométrique particulière. La matrice est nettement colorée en jaune.

- *Orientations plasmiques*

L'assemblage plasmique est squelinsépique peu net; les domaines biréfringents sont peu abondants.

β - Traits pédologiques

- *Revêtements*

On distingue deux types de revêtements :

- . des revêtements comparables à ceux présents dans les raies brun rougeâtre de l'arène. Ils couvrent une partie de la porosité du domaine massif. Ils sont composés d'argile jaune orangé en LN et LP, à biréfringence forte à moyenne; ils sont microlités. Ils présentent quelques inclusions limoneuses de quartz. La limite du revêtement et du fond matriciel est généralement nette; quelquefois, on observe une indentation de cette limite dans le fond matriciel.
- . des revêtements très peu épais, jaune pâle en LN et jaune gris en LP, à biréfringence faible et discontinue couvrant des cavités de grande taille. Ce type est peu abondant.

- *Papules*

Quelques papules correspondant aux revêtements du 1er type apparaissent dans la matrice.

- *Autre trait*

On observe, autour de certains éléments grossiers, une gangue squelsépique qui arrondit la forme de l'élément. Cette gangue est discordante avec la matrice environnante; elle présente une granulométrie plus fine et une plus grande abondance de micas par rapport à celui-ci.

γ - Transition arène ensemble II et horizon brun jaunâtre sablo-limoneux(VE3)

La transition entre l'ensemble II de l'arène et l'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux s'effectue très rapidement (sur quelques millimètres); elle consiste en l'apparition de la fraction fine colorée en jaune et en la disparition des structures de l'arène, des coiffes en particulier.

b - Conclusions

En comparant cet horizon aux horizons sous-jacents, on constate :

(1) Cet artefact disparaît en meulant la face sciée sur une épaisseur suffisante.

- une augmentation considérable de la fraction fine (limon + argile) qui présente une coloration jaune produite vraisemblablement par l'extraction du fer du réseau des biotites. Il y a en même temps passage à une structure massive, l'organisation particulière et en coiffes de l'arène disparaissant. Dans les différentes fractions granulométriques, les éléments de différentes natures : quartz, feldspaths potassiques, micas, sont présents, hormis les plagioclases.
- la présence de revêtements argileux jaune orangé, comparables à ceux qui caractérisent les raies brun rougeâtre.

De plus, trois observations plus ponctuelles demandent à être commentées :

- Les domaines à forte porosité et à structure grumeleuse sont vraisemblablement d'origine biologique, étant donné la structure grumeleuse. La présence de domaines à porosité différente confirme la variabilité de celle-ci à l'échelle même de l'horizon et souligne l'importance de la taille de l'échantillon lorsque l'on désire la quantifier sur lames minces (MURPHY et BANFIELD, 1979).
- Les revêtements pâles, mal orientés, peu épais, dans la porosité large peuvent s'interpréter de deux façons différentes : impliquent-ils un dépôt dans un milieu acide et réducteur (FEDOROFF, 1973) ou bien sont-ils plus grossiers et mal orientés parce qu'ils sont situés dans la porosité large et pâles parce que les minéraux primaires constitutifs ne sont pas totalement altérés et conservent du fer dans leur réseau cristallin. Un élément de réponse pourrait être apporté par le dosage à la microsonde du fer total dans ces deux types de revêtements.
- Enfin la gangue squelsépique autour des éléments grossiers n'a pas d'explication évidente. Les différences de granulométrie et de nature minéralogique entre la gangue et le fond matriciel environnant conduisent à lui accorder un caractère relictuel.

2 - L'horizon brun vif limono-sableux VE2

a - Description

α - Fond matriciel

- Structure et porosité (ph. 2, pl. 10).

La structure est fragmentaire, définie par un réseau de fentes non jointives de 2 à 5 mm de long. Il s'agit donc d'une structure polyédrique partielle (incomplètement délimitée) de 2 à 5 mm de côté.

La porosité globale est de 20 %. On peut la classer en :

- . une porosité grossière indépendante de la structure, composée de cavités à bords irréguliers de 1 mm de diamètre et de chenaux de 2 mm de diamètre et 1 cm de long pouvant être comblés par des agrégats en croissant formant alors un striotubule.
- . une porosité fissurale définissant les agrégats
- . une porosité intraagrégats fine (< 0.2 mm de diamètre) de vésicules et de chenaux.

- Granulométrie et altération

Les éléments grossiers, sables et graviers, représentent 10 %, les fractions plus fines 70 % et la porosité 20 % de la surface totale. Les éléments grossiers sont du quartz dominant, associé aux feldspaths et micas, faiblement à moyennement altérés.

Dans les fractions plus fines, le quartz prédomine largement au sein de la fraction limons grossiers; les micas se retrouvent dans la fraction limons fins. Le plasma, de couleur jaune en LN est plus abondant que dans l'horizon sous-jacent.

- *Orientations plasmiques*

L'assemblage plasmique est squelsépique. On observe localement des concentrations plasmiques argileuses présentant aussi un assemblage squelsépique.

β - Traits pédologiques

- *Revêtements*

On observe les deux types de revêtements précédemment décrits :

- . les revêtements jaune orangé sont localisés dans une partie de la porosité fine intragrégats
- . des revêtements pâles et peu épais apparaissent dans la porosité grossière.

- *Papules*

Les papules déjà présentes dans l'horizon VE3, deviennent ici nombreuses; elles correspondent au premier type de revêtement; elles sont soit simplement fragmentées, soit déformées et plus ou moins intégrées au fond matriciel.

b - Conclusions

Dans cet horizon, on observe un affinement de la texture, une structuration et des indices d'illuviation.

α - Affinement de la texture

L'affinement de la texture s'accompagne d'un tri minéralogique : le quartz domine dans les fractions sableuses et limoneuses, les micas sont présents dans la fraction limoneuse fine. On peut envisager par altération un passage dans les fractions les plus fines des feldspaths et des micas, entraînant une accumulation résiduelle du quartz dans les fractions plus grossières. Cependant, le quartz, originaire de l'arène, est de la taille des sables grossiers et on n'observe pas, sauf artefact, de microdivision importante de celui-ci. On est donc conduit à accepter l'hypothèse d'un mélange de deux matériaux (LE CALVEZ, 1979) pour expliquer cette variation granulométrique. Cet horizon présente enfin un plasma argileux plus abondant que l'horizon sous-jacent.

β - Structuration

On distingue deux agents de la structuration :

- + l'activité biologique produisant notamment les striotubules
- + les alternances d'humectation et de dessiccation qui auraient ici un effet plus marqué que dans l'horizon précédent, pour deux raisons :
 - . la proximité de la surface : les contrastes d'humidité sont alors plus forts;
 - . la plus grande abondance de plasma, seul à être susceptible de gonfler. L'assemblage squelsépique de celui-ci pourrait être un témoin de ces contraintes : FIES (1978) a observé l'acquisition de telles orientations au cours des cycles humectation-dessiccation, en conditions expérimentales.

γ - Illuviation

L'illuviation jaune orangé est localisée dans la porosité fine intra agrégats. Elle ne couvre pas les fentes de la structure polyédrique et présente beaucoup d'intégration au fond matriciel. Les concentrations plasmiques argileuses à assemblage squeletique peuvent être interprétées comme des revêtements argileux complètement intégrés au fond matriciel. Il est vraisemblable que cette illuviation ne se produit pas actuellement dans cet horizon étant donné son absence sur les fentes délimitant les agrégats polyédriques.

Le second type de revêtement a été discuté antérieurement.

3 - L'horizon brun jaunâtre limoneux VE1

a - Description

α - Fond matriciel

- Structure (ph.3 , pl.10) (fig. 38)

On observe une association de domaines polyédriques et de domaines microgrumeleux en proportions équivalentes. Les polyèdres ont 2 mm à 2 cm de côté; leurs limites sont très nettes à diffuses. Les agrégats microgrumeleux ont 0.2 à 0.5 mm de diamètre; leurs bords sont irréguliers. Ils sont soit bien individualisés dans la porosité grossière, soit partiellement jointifs.

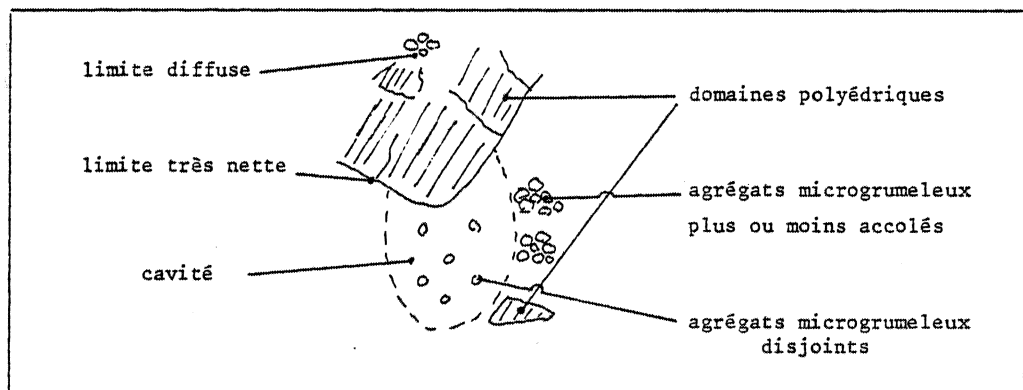


FIGURE 38 - Structure de l'horizon brun jaunâtre limoneux VE1.

- Porosité

La porosité globale est de 30 à 40 %; elle se décompose en :

- + une porosité interagrégats microgrumeleux très fine et très importante
- + de nombreuses fentes irrégulières déterminant la structure polyédrique
- + des chenaux et cavités à bords réguliers, de 1 à 2 mm de diamètre.

- Granulométrie et altération

Les éléments grossiers représentent 10 %, les fractions plus fines 50 à 60 % et la porosité 30 à 40 % de la surface. Les éléments grossiers ont les mêmes caractéristiques que dans l'horizon sous-jacent. Les fractions plus fines sont différentes suivant les domaines :

- les domaines polyédriques sont équivalents à l'horizon sous-jacent; quartz dominant dans la fraction limoneuse, plasma jaune franc, relativement abondant, riche en domaines biréfringents.

- les agrégats microgrumeleux ont une fraction limoneuse essentiellement quartzeuse, un plasma très pâle, poussiéreux, pauvre en domaines biréfringents (ph. 4, pl. 10).

- Orientations plasmiques

Les domaines polyédriques présentent un assemblage squelsépique; les domaines microgrumeleux, un assemblage silasépique.

3 - Traits pédologiques

On n'observe pas d'argilanes dans la porosité. De nombreuses papules jaune orangé, équivalentes aux revêtements décrits dans les horizons sous-jacents, fragmentées et/ou déformées et complètement intégrées au fond matriciel apparaissent dans le domaine polyédrique uniquement.

b - Discussion, conclusions

- α - Structures polyédriques et microgrumeleuses : caractérisation, et liens génétiques.

On observe dans cet horizon l'association de deux domaines à structure et fond matriciel différents :

- Un domaine à structure polyédrique qui présente un plasma jaune franc, abondant, à assemblage squelsépique, riche en papules plus ou moins intégrées au fond matriciel. Ce domaine présente globalement la même organisation que l'horizon sous-jacent; il s'en distingue par l'absence de revêtement dans la porosité intraagrégats et leur intégration au fond matriciel
- Un domaine à structure microgrumeleuse, les agrégats étant disjoints ou plus ou moins jointifs. Ce domaine se caractérise par un plasma peu abondant, pâle, à assemblage silasépique.

L'existence de limites diffuses entre l'agrégat polyédrique et l'agrégat microgrumeleux prouve qu'il existe un lien de parenté entre les deux, mais n'en indique pas le sens. La comparaison des fonds matriciels respectifs montre que l'agrégat microgrumeleux paraît plus pauvre en argile et en fer que l'agrégat polyédrique. Le passage d'une espèce à l'autre implique donc, soit un enrichissement, soit un appauvrissement suivant le sens de la transformation comme le résume le schéma suivant (fig. 39).

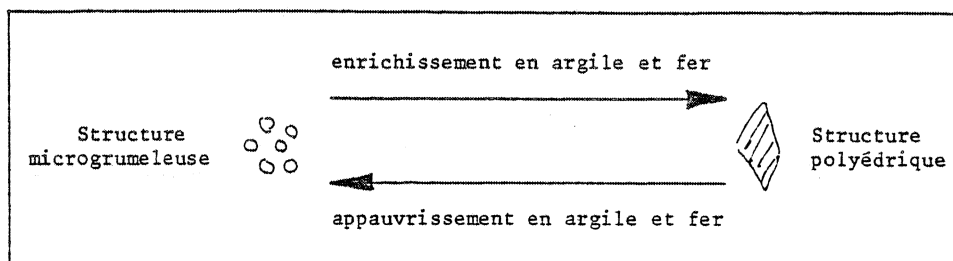


FIGURE 39 - Relations entre les structures microgrumeleuses et polyédriques.

Or, les seules accumulations d'argile observées se situent dans les domaines polyédriques et ne sont pas fonctionnelles. On est donc conduit à penser que dans cet horizon, il y a formation d'agrégats microgrumeleux aux dépens de la structure polyédrique avec un appauvrissement en argile et en fer.

Les agents de l'évolution de la structure vont être brièvement passés en revue : destruction de la structure, microagrégation, appauvrissement et accumulation.

β - Destruction de la structure polyédrique

La destruction de la structure polyédrique peut être due à l'activité biologique et/ou au lessivage. Pour expliquer le fait que l'accumulation d'argile observée dans les domaines polyédriques ne soit pas fonctionnelle, deux hypothèses peuvent être avancées :

- + l'effet du facteur pente ; le rajeunissement des versants par érosion rapproche de la surface des structures qui sont alors en déséquilibre avec les conditions locales de milieu. Cet effet est très probable ici, l'horizon étudié étant très proche de la surface, juste sous le labour et en position haute.
- + l'existence de deux phases pédogénétiques différentes.

γ - Microagrégation

- Formation des agrégats microgrumeleux

Dans la littérature, deux types d'agents sont envisagés : chimique et biologique.

+ Agent chimique

AUROUSSEAU (1976), BOUDOT & BRUCKERT (1978), BRUCKERT & SELINO (1978) attribuent cette structure à la présence, dans ces sols acides, de composés organiques solubles qui forment des complexes organo-minéraux avec l'argile et les hydroxydes de fer et d'aluminium. Les derniers auteurs pensent que cette structure caractérise les horizons B des sols bruns ocreux essentiellement.

+ Agent biologique

Cette structure résulterait de l'action conjuguée de la microfaune et de la microflore. Issus de boulettes fécales de collemboles et d'Enchytreides (BAL, 1973 ; BABEL, 1968), ces agrégats évolueraient sous l'action des bactéries qui minéralisent la matière organique et produisent des polysaccharides liant les particules minérales entre elles (BRUCKERT & SELINO, 1978 ; FEHRMANN & WEAVER, 1978). Pour BRUCKERT et SELINO, la structure microgrumeleuse des sols bruns acides serait d'origine biologique.

Des observations et des analyses en milieu non cultivé seraient nécessaires pour pouvoir choisir entre ces deux voies.

- Étude des domaines microgrumeleux jointifs

Les domaines microgrumeleux plus ou moins jointifs peuvent représenter une étape vers la formation de ces agrégats ou bien une évolution ultérieure de ceux-ci (fig. 40).

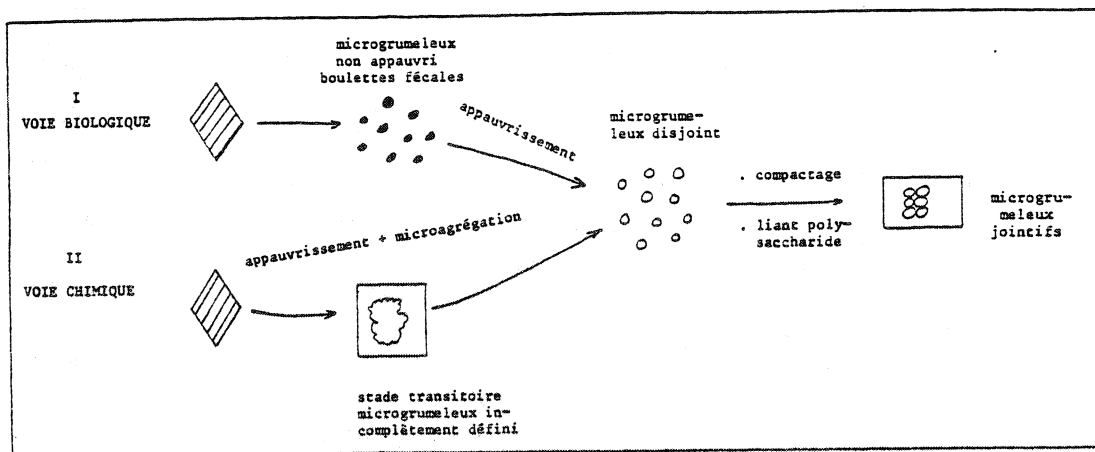


FIGURE 40 - Schéma d'évolution de la structure dans l'horizon brun jaunâtre limoneux VE1.

Lors de la formation des agrégats microgrumeleux, selon la voie biologique ou chimique empruntée, la transition avec l'agrégat polyédrique sera différente :

- par la voie biologique, le passage de la structure polyédrique à la structure microgrumeleuse sera brutal; il n'y aura pas de stade de transition entre les deux types d'agrégats.
- par la voie chimique, l'appauvrissement et la microagrégation seront des phénomènes progressifs et il existera alors un domaine de transition constitué d'agrégats microgrumeleux incomplètement définis.

Après leur formation, les agrégats microgrumeleux peuvent évoluer vers des assemblages plus gros, tendant vers des formes polyédriques. Pour AUROUSSEAU (1976), cette évolution résulte d'un compactage des microagrégats; pour BRUCKERT et SELINO (1978), elle est due à des liens polysaccharidiques entre les agrégats élémentaires.

En suivant la voie biologique, les domaines microgrumeleux jointifs résulteraient seulement de l'évolution ultérieure des agrégats microgrumeleux disjoints. Ils peuvent, par contre, être antérieurs ou postérieurs aux agrégats microgrumeleux disjoints si on suit la voie chimique. La seule observation au microscope optique ne permet pas de trancher la question.

δ - Appauvrissement et accumulation

- Compatibilité entre l'appauvrissement et la microagrégation

Dans le cas d'une structuration d'origine biologique, l'appauvrissement est favorisé par la division mécanique due à l'activité biologique, cette division induisant une augmentation des surfaces de contact, eau - particules solides.

Dans le cas d'une structuration d'origine chimique, le lessivage de l'argile est rendu possible par la destruction à certaines périodes de l'année du lien argile - matière organique. Les composés organiques, responsables de la stabilité des argiles, passent en effet par une phase soluble lorsque le sol est à son maximum de saturation en eau (SOUCHIER, 1971 in AUROUSSEAU, 1976).

- Comparaison du profil d'argile granulométrique et des caractères microscopiques du domaine de versant.

La comparaison des résultats de l'analyse granulométrique et des données microscopiques montre que le profil de l'argile granulométrique, présentant un minimum relatif dans l'horizon brun jaunâtre limoneux VE1 et un maximum absolu dans l'horizon brun vif limono-sableux VE2 ne s'explique pas par un simple transfert d'argile du premier horizon vers le second. En effet, l'observation microscopique (fig. 41) montre que les argilanes les plus abondants se trouvent dans l'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE3 et dans les raies brun rougeâtre de l'arène.

Dans l'horizon brun vif limono-sableux VE2, on note : l'absence de revêtements sur les éléments structuraux, quelques argilanes dans les pores fins et de nombreuses papules(1). Ainsi, l'accumulation maximale dans la porosité actuelle ne correspond pas au maximum d'argile granulométrique mais s'effectue plus bas. L'horizon brun jaunâtre limoneux VE1, enfin, apparaît plus pauvre en plasma. Le minimum de la courbe granulométrique correspond au départ de l'argile. L'argile, issue de cet horizon, va, par contre, enrichir

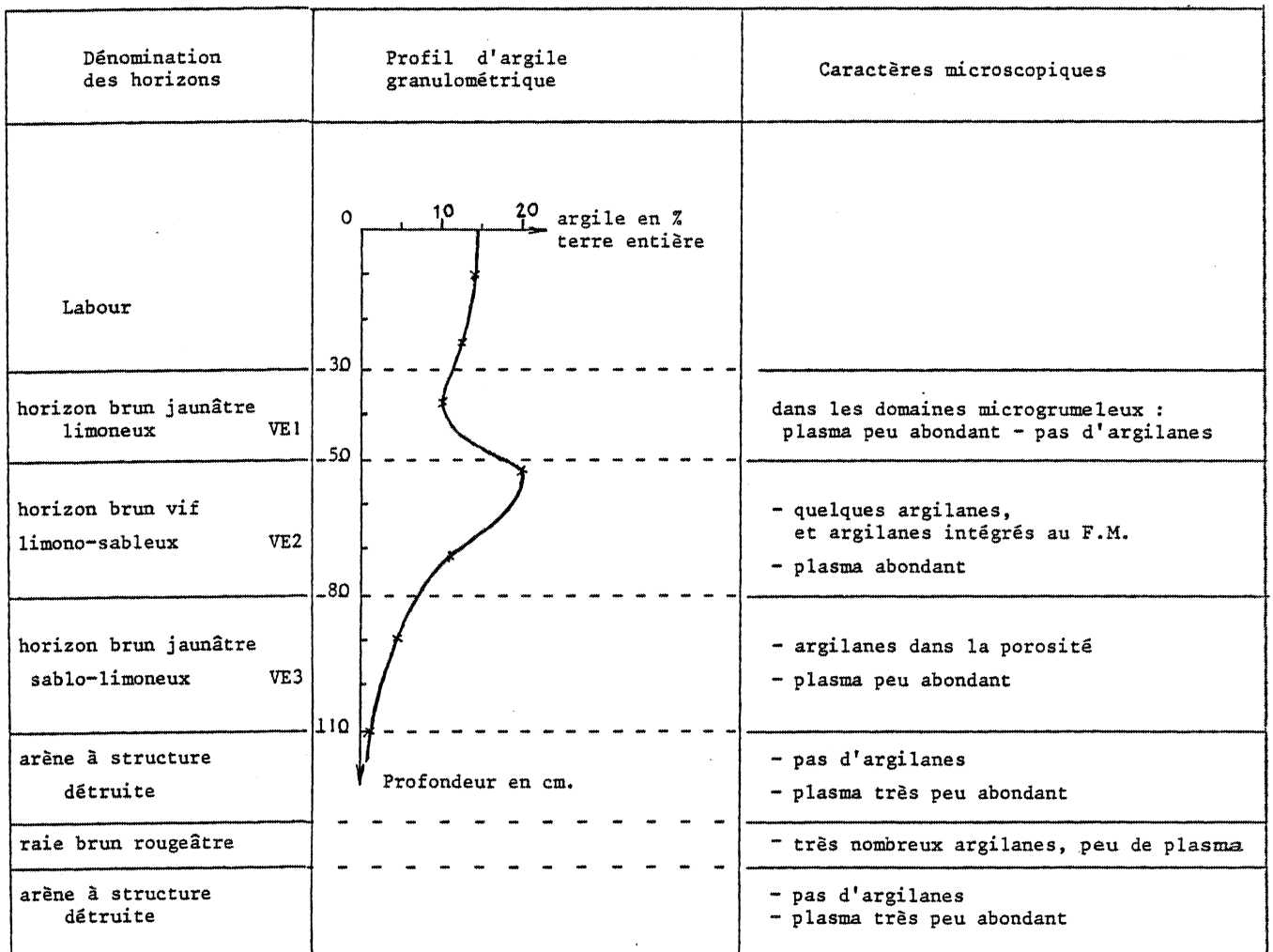


FIGURE 41 - Comparaison du profil d'argile granulométrique et des caractères microscopiques.

(1) Le plasma plus abondant de cet horizon est plus pâle que les revêtements, il ne doit pas être dû à l'intégration des revêtements mais à la composition initiale du mélange et à l'altération.

un volume beaucoup plus important que l'horizon brun vif limono-sableux sous-jacent. Ce fait a déjà été remarqué par FEDOROFF et AUROUSSEAU (1979) dans les sols bruns acides du Morvan granitique. Ces auteurs l'expliquent par l'absence de modifications chimiques importantes qui induiraient l'apparition d'un front de floculation et/ou l'absence d'arrêt ou de ralentissement du front d'humectation du fait d'une porosité et d'un drainage climatique importants. Le profil granulométrique de l'argile fine ($< 0.2 \mu\text{m}$) qui est la fraction de l'argile qui se mobilise dans le sol (JAMAGNE, 1973; DE CONINCK et al., 1976) correspondrait peut-être mieux aux observations microscopiques.

4 - Conclusion à l'étude du domaine de versant

L'observation microscopique permet de préciser les données macroscopiques et analytiques et d'établir la chronologie de certains processus.

L'affinement de la texture s'accompagne d'un tri minéralogique : le quartz domine dans les fractions limoneuses. Ceci est en accord avec les résultats de LE CALVEZ (1979) qui observe dans les analyses chimiques totales une augmentation forte de SiO_2 et une baisse de Al_2O_3 .

Le profil d'argile granulométrique qui s'apparenterait à un sol brun lessivé témoigne, en fait, plus de l'appauvrissement de l'horizon brun jaunâtre limoneux VE1 que d'un enrichissement des horizons sous-jacents.

La transformation des structures et son sens sont établis. La structure massive de l'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux est primitive; elle ne résulte pas d'une compaction : il n'y a pas d'intégration de revêtements, de papules, ni d'orientations plasmiques importantes. La structure polyédrique apparaît ensuite, du fait de la composition différente de l'horizon brun vif limono-sableux VE2 qui est plus riche en plasma et de sa position plus proche de la surface. Enfin, la structure microgrumeleuse se développe aux dépens de la structure polyédrique.

Enfin, lors de la description sur le terrain, la variation des différents caractères apparaissait graduelle, tandis que l'observation microscopique montre qu'elle correspond à des organisations différentes pouvant présenter entre elles des limites très nettes; l'apparence graduelle semble due au fait que ces organisations sont étroitement imbriquées sur une certaine épaisseur.

B - LE DOMAINE AMONT

1 - L'arène sablo-limoneuse AM3

a - Description

α - Fond matriciel

- Structure , porosité

La structure est particulière pour les éléments grossiers et microgrumeleuse pour les fractions plus fines limoneuses et argileuses.

La porosité est très importante, interparticulaire et interagrégats microgrumeleux.

- *Granulométrie, altération*

Les éléments grossiers sont très abondants, identiques à ceux de l'arène à structure détruite. On note cependant l'absence d'amas constitués par les produits d'altération des plagioclases (cf. 2ème partie, IV, A).

Les fractions plus fines, limoneuses et argileuses sont plus abondantes que dans l'arène. Le plasma présente une coloration jaune pâle en LN plus intense que dans cette dernière et un assemblage asépique.

β - Traits pédologiques

On n'observe pas de traits pédologiques

b - Conclusion

Cet horizon, du fait de sa proximité de la surface, est soumis à une altération et une pédoturbation plus accentuées que l'arène à structure détruite sous-jacente. Cela se traduit par :

- des fractions limoneuses et argileuses plus importantes et dont la coloration est plus intense
- l'absence des coiffes et des amas de produits d'altération des plagioclases.

Les fractions limoneuses et argileuses présentent de plus une micro-agrégation comparable à celle de l'horizon brun jaunâtre limoneux du versant VE1.

2 - Les "poches limoneuses"

a - Description

à - L'horizon limoneux AM2 (situé à la base des poches profondes)

- Fond matriciel

- *Structure*

On observe l'association d'une structure polyédrique partielle, très peu nette, très fine (1 - 5 mm) couvrant 70 % de la surface et d'une structure micro-grumeleuse occupant 30 % de la surface, localisée dans la porosité grossière.

- *Porosité*

La porosité globale est importante, 30 - 40 %; elle est composée de cavités et chenaux à bords réguliers de 1 - 2 mm de diamètre souvent encombrés d'agrégats microgrumeleux et de fentes.

- *Granulométrie et altération*

Cet horizon présente les mêmes caractères que "l'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux" VE3 du versant.

- Orientations plasmiques

L'assemblage plasmique est squelinsépique peu net dans le domaine polyédrique; il est silasépique dans les domaines microgrumeleux.

- Traits pédologiques

On observe très localement des revêtements jaune orangé dans les domaines polyédriques.

β - L'horizon limoneux AM1

L'horizon limoneux AM1 est équivalent au domaine microgrumeleux de "l'horizon brun jaunâtre limoneux" VE1 du versant avec une plus grande abondance des agrégats microgrumeleux disjoints par rapport aux agrégats microgrumeleux plus ou moins jointifs et quelques agrégats polyédriques de l'horizon sous-jacent.

Dans les zones enrichies en matière organique, on constate que les agrégats microgrumeleux sont plus nets, plus colorés en brun rouge et plus abondants.

b - Conclusions

L'horizon limoneux AM2 présente :

- les caractères granulométriques de la base du profil de versant, c'est-à-dire une texture riche en sables.
- les caractères structuraux de la partie supérieure de ce profil, c'est-à-dire l'association des domaines microgrumeleux appauvris en argile et de domaines polyédriques plus riches en argile.

L'horizon limoneux AM1 présente une structure microgrumeleuse généralisée. Dans les zones enrichies en matière organique, les agrégats microgrumeleux sont très proches de ceux décrits par AUROUSSEAU (1976) dans le A3 des sols bruns acides du Morvan granitique.

La microagrégation affecte tous les horizons du domaine amont. La subsistance de domaines polyédriques plus riches en argile à la base des poches montre que là aussi, l'appauvrissement accompagne la microagrégation. Il est vraisemblable que celui-ci sévit aussi dans l'arène sablo-limoneuse bien qu'on ne dispose pas de repère pour quantifier cet appauvrissement.

3 - Conclusion à l'étude du domaine amont

Par rapport aux analyses macroscopique et granulométrique qui séparaient l'arène sablo-limoneuse AM3 et les horizons limoneux AM1 et AM2 du point de vue de la texture, l'observation au microscope optique permet de reconnaître dans l'arène sablo-limoneuse AM3, aussi bien que dans les horizons AM1 et AM2, la présence d'une structure micro-grumeleuse. Cette observation montre que *la structure microgrumeleuse est indépendante de la texture du matériau* et que les mêmes processus d'appauvrissement et de micro-agrégation s'expriment dans les différents horizons du domaine amont. Ces horizons présentent des caractères appauvris et une structure microgrumeleuse plus nette et plus généralisée que dans

le domaine de versant (*fig.42*). On note l'absence d'horizon à structure strictement polyédrique et d'horizon à structure massive.

DOMAINES :		VERSANT	AMONT
<u>Structure</u>			
polyédrique 0 % ↓ 100 %	microgrumeleuse 100 % ↓ 0 %	----- VE1	----- AM1, AM3
		----- VE2	----- AM2

FIGURE 42 - Abondance relative des domaines polyédriques et microgrumeleux dans les horizons de l'amont et du versant.

C - LE DOMAINE AVAL

I - Les horizons fragiques

II - L'horizon sablo-graveleux fragique AV3

III - La matrice

La description qui suit est celle d'une zone à texture intermédiaire (cf. § ID4) (*ph. 1, pl. 11*).

a - Description

α - Fond matriciel

- Structure

La structure est massive

- Porosité

La porosité couvre 10 % de la surface totale; elle est composée d'une majorité de cavités larges de 0.5 à 1.5 mm de diamètre de type méta et de quelques chenaux et fentes.

- Granulométrie, altération

Les éléments grossiers, sables et graviers, représentent 30 %, les fractions plus fines 60 % et la porosité 10 % de la surface totale. L'ensemble est comparable à l'horizon brun-jaunâtre sablo-limoneux VE3 du versant, avec une plus grande abondance des micas dans les fractions grossières et un plasma moins abondant et de répartition hétérogène; on observe même des plages exemptes de plasma.

- Orientations plasmiques

L'assemblage plasmique est squelinsépique dans les domaines où existe un plasma, silasépique dans les autres.

β - Traits pédologiques

- Revêtements

Toute la porosité est tapissée; les revêtements sont épais, simples ou

complexes à polarité verticale nette. On distingue des lits à granulométrie très différente (ph. 2, pl. 11) .

- argileux jaune orangé microlités, à biréfringence forte, bien orientés
- argilo-limoneux jaune pâle, mal orientés, à biréfringence moyenne
- limoneux, les grains étant quartzeux et/ou micacés

On n'observe pas de cycles dans l'alternance des dépôts; le dépôt le plus récent peut être aussi bien grossier que fin.

- *Papules*

De nombreux revêtements des différents types sont complètement inclus dans le fond matriciel. Ils ne présentent pas cependant de fragmentation ni de déformation; ils doivent donc correspondre à des pores totalement comblés.

b - Conclusions

Cet horizon présente, comme l'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE3 sus-jacent à l'arène, une texture grossière, une structure massive, une porosité moyenne de cavités et de chenaux relativement larges et l'absence de témoins de contraintes tels que : la fragmentation des revêtements ou leur déformation et leur inclusion au fond matriciel, et des assemblages plasmiques de type masépique. Il s'en différencie par la présence de domaines pauvres en plasma, à assemblage silasépique et par la quantité importante et la variété des types de revêtements.

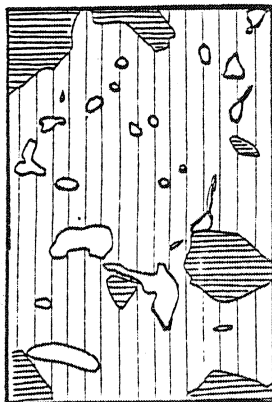
Ces deux derniers caractères sont interprétés ci-dessous, les autres caractères le seront après l'étude de l'ensemble des horizons fragiques. Dans les sols lessivés dégradés, les revêtements complexes argilo-limoneux sont très abondants. Ils y ont été souvent décrits (JAMAGNE, 1973 ; DE CONINCK, 1976 ; EIMBERCK - ROUX, 1977). Les interprétations de ces auteurs sont les suivantes :

- La migration des différents composants s'effectue sous forme particulière. Ceci est évident pour les éléments grossiers; pour les argiles, le microlitage des revêtements en témoigne.
- Les lits grossiers sont interprétés en faisant référence à des concepts sédimentologiques et auraient une signification paléoclimatique. Les accumulations grossières seraient transportées par un fluide plus compétent que les accumulations fines. Elles seraient favorisées par la porosité large. Les alternances fines et grossières témoigneraient de circulations d'eau d'intensités différentes qui traverseraient l'horizon au cours des alternances climatiques saisonnières ou au cours d'épisodes climatiques différents. Dans ce dernier cas, on observe effectivement une hiérarchie des différents types d'accumulation (EIMBERCK - ROUX, 1977); à l'opposé, aucun ordre n'est observé ici.

Dans l'horizon décrit ici, il est possible de faire l'économie de tels raisonnements en raison de l'existence de domaines où le plasma est quasiment absent, laissant les éléments grossiers libres. On peut alors penser que les éléments grossiers tombent simplement par gravité dans les pores, en l'absence d'agent vecteur, après la disparition du plasma qui les lie entre eux. Les accumulations complexes limoneuses et argileuses témoigneraient donc du lessivage d'un horizon dominant amont ou supérieur, pour leurs parties argileuses et de la disparition locale du plasma au sein de l'horizon d'accumulation, pour leurs parties limoneuses. La disparition du plasma peut être due à des phénomènes de lessivage ou de dégradation au sein de cet horizon; processus qui engendrerait les domaines à assemblage silasépique.

PLANCHE 11 - DOMAINE AVAL : HORIZONS FRAGIQUES.

PHOTO 1 - Horizon sablo-graveleux fragique AV3 - (L.P.) -






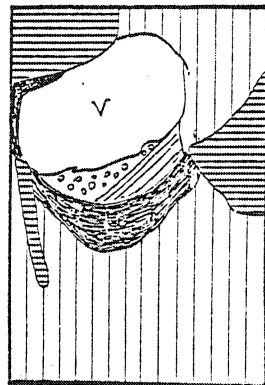





-  Eléments grossiers.
-  Fond matriciel sablo-limoneux.
-  Pores présentant des revêtements argileux et argilo-limoneux.

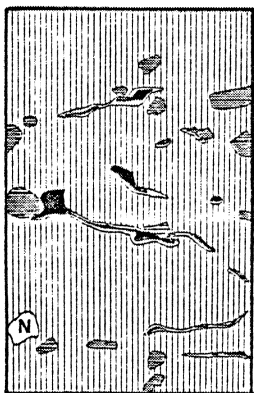
PHOTO 2 - Revêtement complexe (L.P.)-



-  Eléments grossiers.
-  Fond matriciel sablo-limoneux.
-  Lit argileux.
-  Lit argilo-limoneux.
-  Lit limoneux riche en micas.

PHOTOS 3 et 4 - Horizon limoneux fragique AV4.

PHOTO 3 - Domaine non hydromorphe. (L.N.)







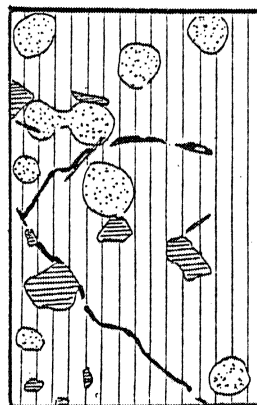




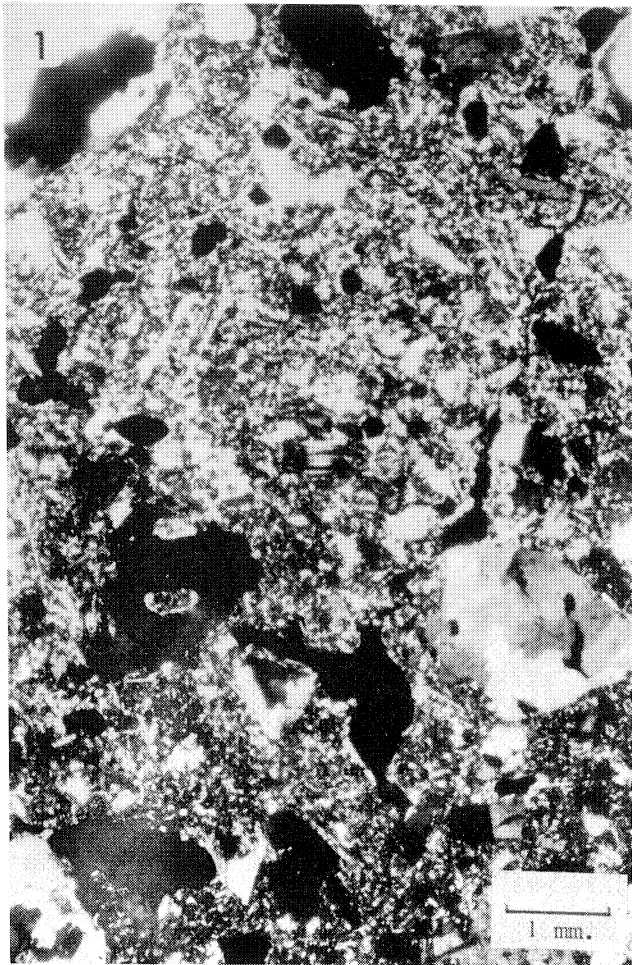
-  Fond matriciel limoneux (quartz).
-  Eléments grossiers.
-  Concentration d'oxydes en nodules.
-  Pores présentant des revêtements argileux.

PHOTO 4 - Domaine hydromorphe. (L.N.).



-  Fond matriciel limoneux (quartz).
-  Eléments grossiers.
-  Concentration d'oxydes en halos glébulaires.
-  Porosité fissurale.



112 - Les bandes verticales grises à liséré rouille

Dans les domaines les plus limoneux de l'horizon précédent apparaissent des bandes verticales grises à liséré rouille

a - Description

Trois zones sont distinguées au microscope (*fig. 43*).

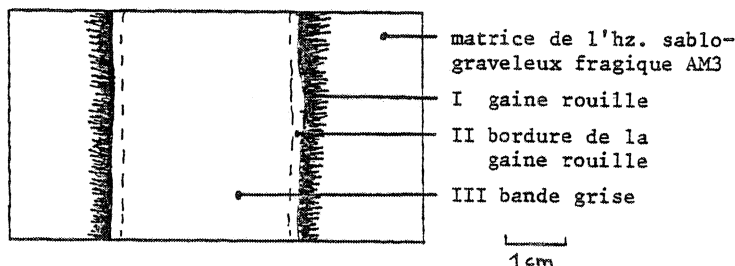


FIGURE 43 - Bande verticale grise à liséré rouille.

I - La gaine rouille

Cette gaine a globalement la même organisation que l'horizon environnant. Elle présente de plus (*ph. 1, pl. 12*) :

- une coloration ocre qui imprègne l'ensemble du fond matriciel et des traits pédologiques. Son intensité est maximum en bordure de la bande grise avec laquelle elle présente une limite très nette, puis elle diminue progressivement lorsqu'on s'éloigne de la bande grise.
- des revêtements d'oxydes opaques d'une vingtaine de microns d'épaisseur qui présentent une limite intérieure dentelée. Ces revêtements apparaissent sur une partie des pores; ils recouvrent les revêtements complexes argilo-limoneux.

II - En bordure de la gaine rouille

On observe des revêtements qui ont les mêmes caractéristiques de localisation, de taille, de forme, de type (alternances argileuses et limoneuses), certains sont même en continuité avec des revêtements situés dans la gaine rouille (*ph. 1, pl. 12*). Ils en diffèrent par leur couleur jaune plus pâle en LN, leur biréfringence plus faible, et leur moins bonne orientation. Le plasma apparaît moins abondant et plus pâle que celui de l'horizon environnant.

III - La bande grise

La bande grise présente le même squelette que celui de l'horizon adjacent, un plasma peu abondant et très pâle, un assemblage silasépique. La porosité, de fentes, est grossière, couvrant 10 à 20 % de la surface. On n'observe pas de revêtements argileux, seulement quelques concentrations limoneuses (*ph. 2 & 3, pl. 12*).

b . Conclusions

La présence en bordure de la bande grise de revêtements qui se déstabilisent (ils se décolorent, perdent leur orientation ...) montre que dans celle-ci, il y a disparition des revêtements argilo-limoneux et appauvrissement en plasma, conduisant à la formation d'un assemblage silasépique.

Ces bandes sont donc le siège non seulement d'une hydromorphie, qui est marquée par une coloration grise et ocre, mais encore d'une dégradation du matériel pédolo-

PHOTO 1 - Déstabilisation d'un revêtement complexe (L.N.).

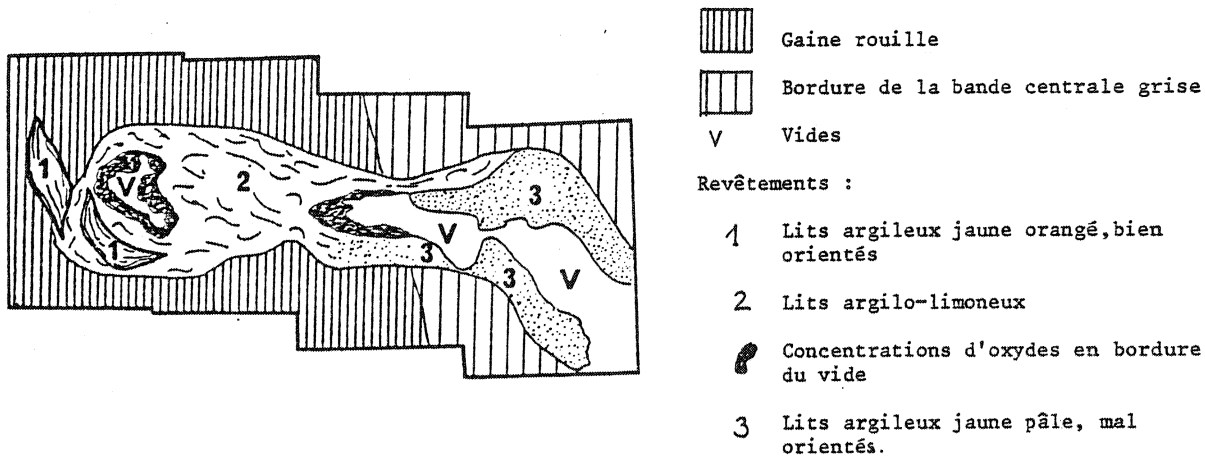


PHOTO 2 - Matrice de l'horizon AV3. (L.N.).

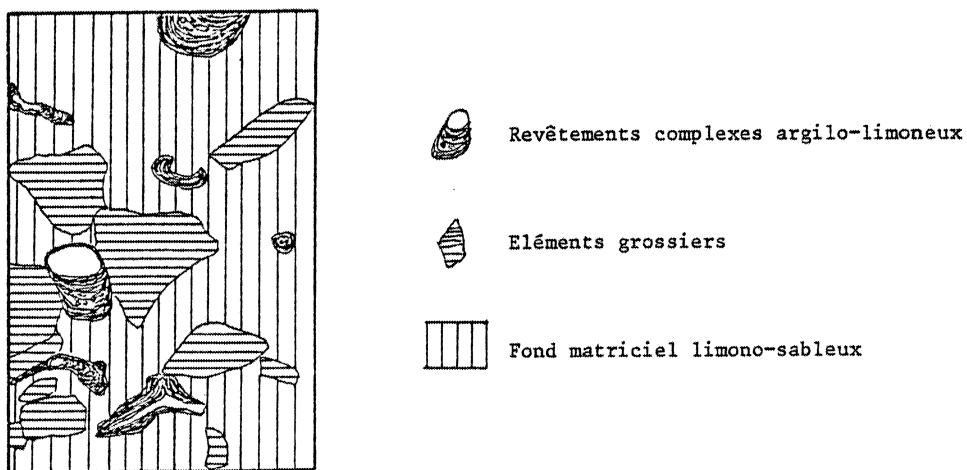
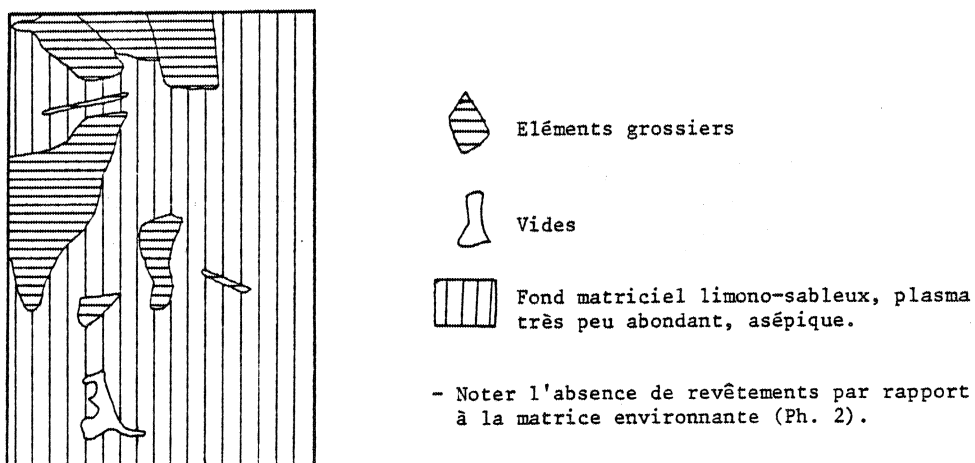
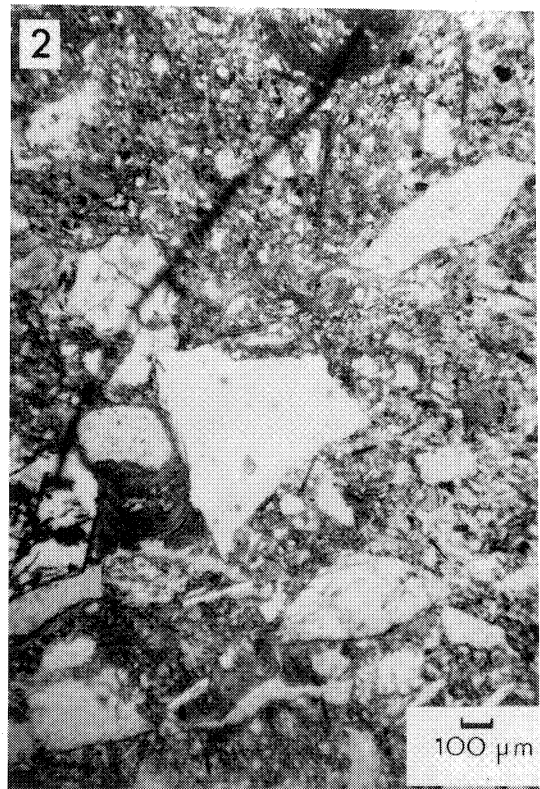
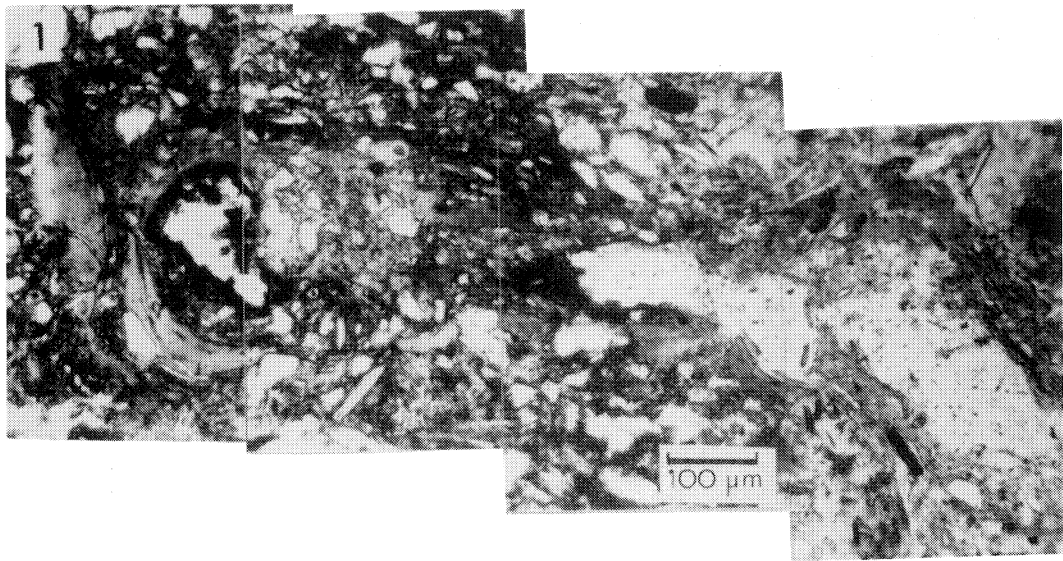


PHOTO 3 - Bande grise. (L.N.).





gique. On ne peut dire à la simple observation au microscope optique s'il s'agit d'une remise en suspension de l'argile après déferrisation (JAMAGNE, 1973) ou d'une destruction des réseaux silicatés (ROBERT et RAZZAGUE KARIMI, 1975). L'analyse in situ, à la sonde électronique de revêtements se déstabilisant, apporterait, par l'observation du comportement des différents éléments Si, Al, Fe, K ..., un début de réponse (BRINKMAN & al., 1973, JAMAGNE & JEANSON, 1978; DUCLOUX, 1978). Sur le terrain, on constate que ces fentes de dégradation n'apparaissent qu'à la base du "sol", dans les domaines limoneux, contrairement à la dégradation classique (JAMAGNE, 1973) qui commence au sommet du B₂t. Elle correspond à ce qu'EIMBERCK - ROUX (1977) a appelé "dégradation hydromorphe". Il faut noter, par rapport à ces auteurs, l'absence dans notre cas d'"illuviation secondaire".

12 - L'horizon limoneux fragile AV4

L'observation macroscopique a permis de distinguer dans cet horizon : un domaine non hydromorphe et des domaines hydromorphes en bandes subverticales grises et rouille et en taches claires au sommet de l'horizon. Le domaine non hydromorphe, puis les taches claires seront successivement décrits.

121 - Description

a - Le domaine non hydromorphe (ph.3, pl.11)

α - Fond matriciel

- Structure

La structure est massive, à tendance lamellaire très grossière (1 cm d'épaisseur).

- Porosité

La porosité est très faible et irrégulièrement répartie :

- . sur 95 % de la surface, elle est de 5 %, en petites cavités (< 1 mm) et en fissures
- . sur 5 % de la surface, elle est plus importante 10 à 20 % et en chenaux et cavités exempts de revêtements

- Granulométrie, altération

Les éléments grossiers représentent 5 %, les fractions plus fines 90 % et la porosité 5 % de la surface totale. La fraction fine est composée d'un limon essentiellement quartzeux et d'un peu de micas; le plasma est très peu abondant, jaune franc.

- Orientations plasmiques

L'assemblage est silasépique à squelsépique. Il est dense; le nombre de quartz par unité de surface est important.

β - Traits pédologiques

- Revêtements

On observe les différents types de revêtements décrits dans l'horizon précédent; les interstratifications grossières sont ici composées essentiellement de limons quartzeux.

- *Papules*

De nombreux revêtements sont complètement inclus au fond matriciel. Quelques-uns sont fragmentés ou déformés.

- *Concentrations d'oxydes*

Des concentrations d'oxydes en nodules apparaissent dans le fond matriciel. Elles sont peu abondantes; couvrant 1 % de la surface totale; elles sont très contrastées : noires en LN et lie de vin en LP; elles présentent des limites progressives ou très nettes avec le fond matriciel.

b - Les taches claires (*ph. 4 , pl. 11*)

α - Fond matriciel

- *Structure, porosité*

Dans ce domaine, deux zones se différencient par la structure et la porosité :

- . une zone majeure, couvrant 80 à 90 % de la surface, à structure massive et porosité très faible (1 à 2 %), fissurale.
- . une zone peu étendue, couvrant 10 à 20 % de la surface, à structure grumeleuse de 1 à 3 mm de diamètre; ce domaine est beaucoup plus poreux (30 % de la surface totale). C'est une porosité d'entassement en cavités et chenaux à bords irréguliers, de 0.5mm de diamètre.

- *Granulométrie, altération*

Les éléments grossiers représentent 10 %, les fractions plus fines 90 % de la surface totale. Ces fractions fines sont essentiellement des limons grossiers quartzeux; le plasma est très peu abondant, très pâle.

- *Orientations plasmiques*

L'assemblage est silasépique, dense.

β - Traits pédologiques

- *Revêtements, papules*

On note l'absence de revêtements argileux ou argilo-limoneux. Seules quelques papules argileuses de petite taille apparaissent dans le fond matriciel.

- *Autres concentrations plasmiques*

On observe quelques concentrations d'éléments limoneux fins, micacés. Des concentrations d'oxydes apparaissent sous forme de halos glébulaires, arrondis, de 1 mm de diamètre, recouvrant 5. % de la surface. Ils sont en continuité avec le fond matriciel et présentent une coloration plus ou moins intense.

122 - Conclusions

L'horizon limoneux fragique AV4 est constitué d'un matériau essentiellement quartzeux, pauvre en plasma. Il présente les mêmes types d'accumulations que l'horizon sablo-graveleux fragique AV3 peut-être moins abondantes.

Les taches claires ne sont pas seulement le siège d'une hydromorphie qui se marque par la ségrégation des oxydes en halos glébulaires, mais encore d'une dégradation. En effet, on note par rapport au domaine non hydromorphe, la disparition des revê-

tements argileux et l'appauvrissement en argile du fond matriciel qui induit l'assemblage plasmique silasépique. La porosité de ces taches claires est encore plus faible que celle de la zone non hydromorphe.

Localement, dans ces horizons très peu poreux, apparaissent de petits domaines très poreux, vraisemblablement d'origine biologique. Ces domaines sont secondaires à la structure massive qu'ils détruisent; on n'observe pas en effet, de témoins de tassement, ni de vides résiduels polyconcaves dans cet horizon. On est donc là en présence d'un mécanisme de destruction de ces structures massives, qui doit être à l'origine de leur disparition sous haies dans le bocage (CARNET, 1978).

13 - Conclusion à l'étude des horizons fragiques

Ces horizons, outre leur caractère fragique (structure massive et cohésion forte) sont marqués par des variations granulométriques importantes, par différents types d'accumulations texturales, par des phénomènes d'hydromorphie et de dégradation.

- Les analyses macro- et microscopiques n'ont pas permis de déterminer le ou les processus responsables du caractère fragique, ni de lui attribuer des traits microscopiques spécifiques. Cependant, certains faits sont acquis. Ainsi, par l'observation macroscopique, la distribution spatiale du fragipan à la base des profils et à l'aval des séquences et l'indépendance des caractères fragiques et granulométriques ont été montrées. L'analyse microscopique permet de définir la chronologie de ces deux caractères. En effet, la nature minéralogique et la composition granulométrique des deux horizons dans lesquels ils s'expriment, sont très différentes : quartz, feldspaths et micas dans l'horizon sablo-graveleux; quartz essentiellement dans l'horizon limoneux. Le passage de l'un à l'autre, que ce soit par un mélange de deux matériaux ou par altération (disparition des feldspaths et des micas, microdivision des quartz) suppose des modifications structurales très importantes qui sont incompatibles avec l'absence de figures de tassement (vides polyconcaves) et de témoins de compression (assemblages plasmiques masépiques) observée. L'acquisition du caractère fragique est donc postérieure à la différenciation granulométrique.
- Les différents types d'accumulations texturales argileuses et limoneuses couvrent principalement les pores actuels ou les comblent complètement; mais ils sont très rarement fragmentés ou déformés et inclus au fond matriciel. Cela souligne la stabilité, l'absence de contrainte appliquée à ces horizons depuis le dépôt de ces revêtements.
- L'hydromorphie est, dans ces horizons, toujours accompagnée par la dégradation. En effet, lorsque l'on observe des redistributions d'oxydes, les plages appauvries en oxydes le sont aussi en argile. La dégradation présente plusieurs faciès :
 - + Discrète et généralisée, dans la masse de l'horizon, elle serait responsable des accumulations texturales grossières et des domaines à assemblages silasépiques. Elle est alors contemporaine de l'accumulation argileuse, leurs produits étant interstratifiés.
 - + Bien exprimée et localisée, en bandes verticales et en taches claires, elle est alors sous la dépendance des caractères limoneux et fragiques, la conjonction de ces deux caractères induisant une faible perméabilité (CARNET, 1978). Dans ce cas, elle est postérieure à l'accumulation argileuse qu'elle détruit.

2 - L'horizon brun vif limoneux AV2

a - Description (ph. 1, pl. 13)

α - Fond matriciel

- Structure

La structure est polyédrique partielle peu nette, moyenne (2 cm), à sous-structure polyédrique partielle fine (1 mm) peu nette.

- Porosité

La porosité couvre 15 % de la surface totale; elle est de type méta. On distingue : des cavités grossières (1 - 2 mm de diamètre) et fines (0.5 mm de diamètre), des chenaux et chambres de 0.5 à 1 mm de diamètre et des fentes délimitant les polyèdres.

- Granulométrie, altération

Les éléments grossiers représentent 5 à 10 %, les fractions plus fines 70 à 75 % et la porosité 15 % de la surface totale. La nature des éléments, leur taille et leur état d'altération, sont comparables à ceux de l'horizon brun vif limono-sableux VE2 du versant.

- Orientations plasmiques

L'assemblage plasmique est squelinsépique

β - Traits pédologiques

Cet horizon présente de nombreux revêtements argileux jaune orangé, micro-lités, bien orientés, recouvrant 50 % de la porosité, notamment les fentes, à l'exclusion des cavités grossières. Ils peuvent présenter localement des inclusions ou des lits de quartz (ph. 2, pl. 13). On observe une intégration notable de ces revêtements allant jusqu'à former des concentrations argileuses.

b - Conclusions

Cet horizon est caractérisé par la relative abondance et la position des revêtements argileux. Ces revêtements argileux apparaissent sur les fentes délimitant la structure polyédrique; ils sont donc postérieurs à cette structuration. Ils sont plus abondants que dans l'horizon brun vif limono-sableux VE2 du versant, recouvrant la majeure partie de la porosité. La présence de revêtements argileux dans la porosité et sur les fentes, leur intégration notable au fond matriciel, l'assemblage plasmique squelinsépique sont les caractères typiques de l'horizon B des sols bruns lessivés (JAMAGNE, 1973).

3 - L'horizon jaune brunâtre limoneux AV1

a - Description

α - Fond matriciel

- Structure (ph. 3, pl. 13)

On observe deux domaines d'égale extension :

- un domaine grumeleux; les agrégats de 0.5 à 1 mm de diamètre y sont plus ou moins jointifs
- un domaine à structure polyédrique partielle peu nette de 1 à 2 cm de côté.

- Porosité

La porosité globale est de 30 à 40 %; elle est du même type que celle de l'"horizon brun jaunâtre limoneux" VE1 du versant : interagrégats grumeleux, chenaux et cavités, fentes.

- Granulométrie, altération

Les éléments grossiers représentent 5 à 10 %, les fractions plus fines 50 à 65 % et la porosité 30 à 40 % de la surface totale. Par rapport à l'horizon brun jaunâtre limoneux du versant VE1, le quartz devient encore plus nettement prépondérant dans les fractions limoneuses et le plasma, pâle, moins abondant.

- Orientations plasmiques

L'assemblage plasmique est silasépique; on observe une distribution hétérogène du squelette et du plasma, due à des concentrations de limons quartzeux en flots dans le fond matriciel.

β - Traits pédologiques

- Domaine polyédrique

- Revêtements

On distingue :

- + des accumulations limoneuses de quartz dans la porosité grossière
- + quelques revêtements argilo-limoneux jaune orangé identiques à ceux de l'horizon sous-jacent

- Papules, concentrations d'oxydes

On observe :

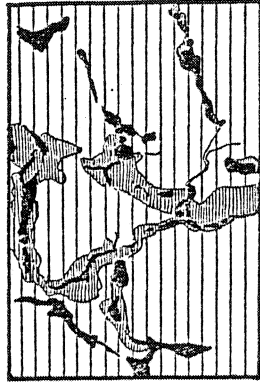
- + des papules argilo-limoneuses plus ou moins fracturées et déformées;
- + des concentrations d'oxydes en halos glébulaires millimétriques qui recouvrent, le cas échéant, les revêtements argilo-limoneux.

- Domaine grumeleux

Dans le domaine grumeleux, on remarque quelques papules argilo-limoneuses et des concentrations d'oxydes en halos glébulaires.

PLANCHE 13 - DOMAINE AVAL : HORIZONS LIMONEUX NON FRAGIQUES.

PHOTO 1 - Horizon brun vif limoneux AV2. (L.N.) -






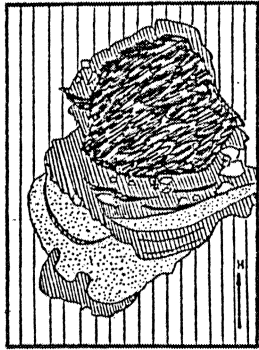
-  Vides
-  Fond matriciel limoneux (quartz).
-  Revêtements argileux présentant une légère intégration au fond matriciel.

PHOTO 2 - Revêtement avec interstratification limoneuse de quartz. (L.N.) -







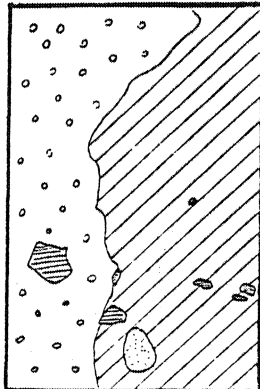




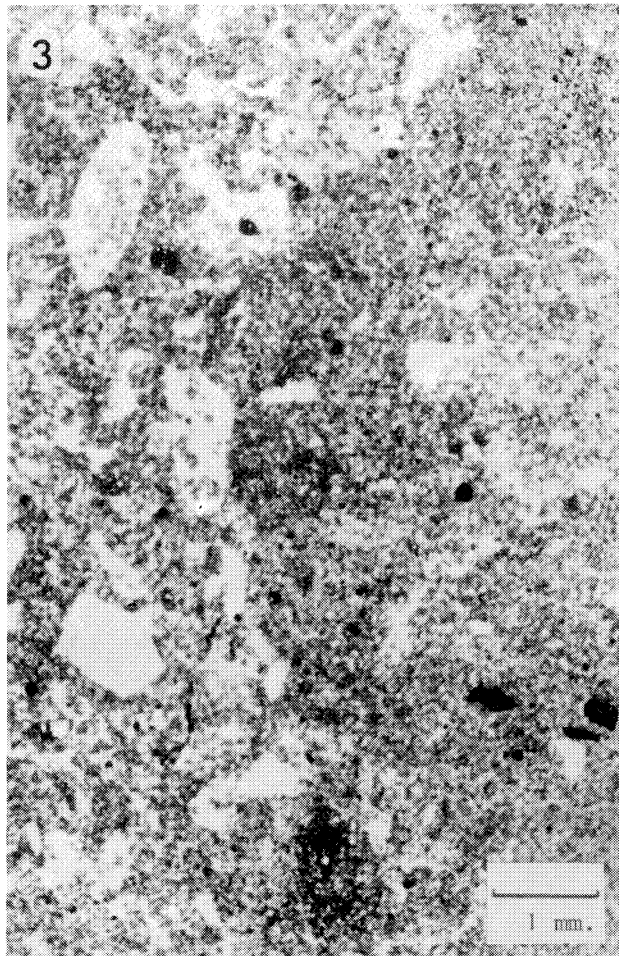
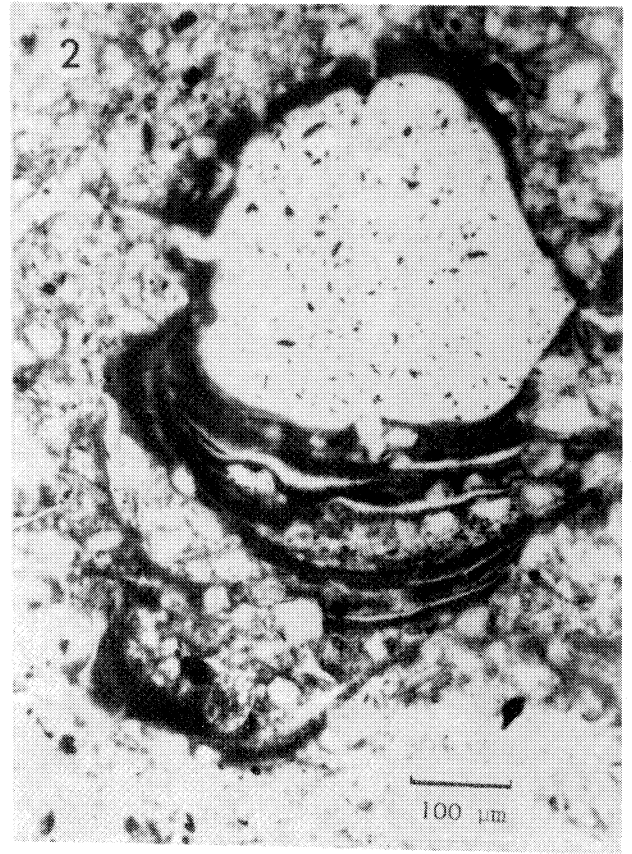
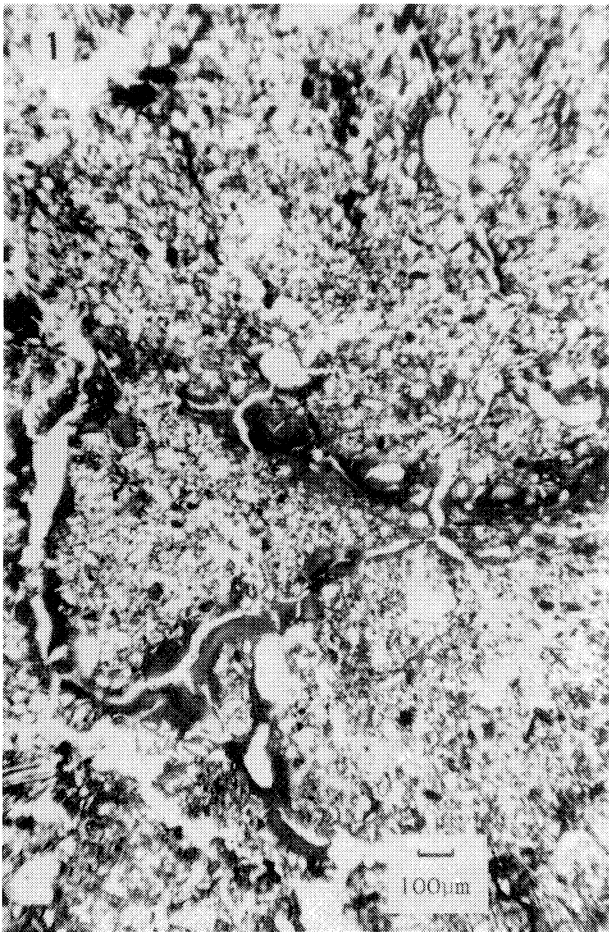
-  Fond matriciel.
-  Lit argileux avec quelques inclusions de limons quartzeux.
-  Lit limoneux essentiellement quartzeux.
-  Vides.

PHOTO 3 - Horizon jaune-brunâtre limoneux. (L.N.) -



-  Domaine grumeleux.
-  Domaine polyédrique.
-  Concentration d'oxydes en halos glébulaires.
-  Eléments grossiers.





b - Discussion, conclusions

α - Appauvrissement et hydromorphie

Cet horizon est nettement appauvri et très légèrement hydromorphe, dans son ensemble.

L'appauvrissement est marqué par la présence :

- + du plasma pâle, peu abondant et de l'assemblage silasépique;
- + des accumulations grossières dans la porosité et des concentrations grossières dans le fond matriciel, qui entraînent une distribution hétérogène du squelette et du plasma. Cette distribution caractérise l'horizon A₂ des sols lessivés (JAMAGNE, 1973).

Les revêtements argilo-limoneux, peu nombreux, et les papules partiellement fossilisées par les concentrations d'oxydes ne caractérisent vraisemblablement pas une accumulation actuelle dans cet horizon, mais témoignent plutôt de son approfondissement aux dépens de l'horizon d'accumulation sous-jacent.

Cet horizon est plus fortement appauvri que l'horizon brun jaunâtre limoneux VE1 du versant; sa couleur, sa pauvreté en plasma en témoignent. Il est d'autre part plus épais que son homologue du versant VE1. Ces observations permettent de conclure que les accumulations d'argile observées dans l'horizon brun vif limoneux AV2 et les horizons fragiques AV3 sont principalement d'origine verticale.

L'hydromorphie temporaire est indiquée par les ségrégations d'oxydes en halos glébulaires et imprégnations cutanes. La limite diffuse des glébules souligne l'autochtonie des glébules et l'actualité du phénomène.

β - Relation entre les agrégats grumeleux et polyédriques

Les agrégats polyédriques ne peuvent résulter d'un tassement des agrégats grumeleux. Il existe en effet dans les agrégats polyédriques des accumulations argilo-limoneuses de taille supérieure aux agrégats grumeleux; accumulations dont nous venons de voir qu'elles ne sont pas fonctionnelles dans cet horizon. Les agrégats grumeleux se développent donc aux dépens des agrégats polyédriques. Etant donné leur taille grossière et leur forme arrondie, ces agrégats sont vraisemblablement d'origine biologique.

γ - Relations entre les structures microgrumeleuses, grumeleuses et polyédriques au niveau de la séquence.

Au niveau de la séquence, on observe les variations structurales suivantes dans les ensembles α et β définis macroscopiquement (*fig. 44*). (AV1; VE1; AM 1,2 & 3).

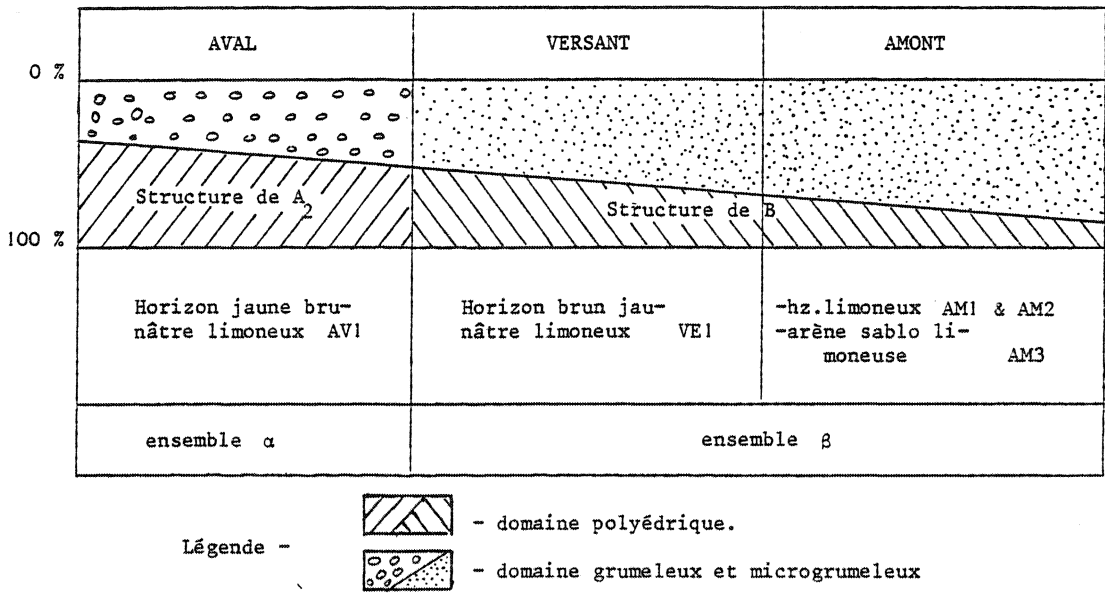


FIGURE 44 - Variations structurales dans les ensembles α et β .

- A l'amont, dans l'horizon limoneux AM1, les agrégats microgrumeleux couvrent la majeure partie de l'horizon.

- Dans le versant (VE1), les agrégats microgrumeleux couvrent 50 % de l'horizon. Ils se développent aux dépens de domaines polyédriques plus riches en argile et il s'ensuit un appauvrissement.

- A l'aval (AV1), les agrégats sont plus grossiers, grumeleux. Ils couvrent 50 % de l'horizon et se développent aux dépens de domaines déjà fortement appauvris.

Ainsi, à l'amont et dans le versant, les domaines microgrumeleux se développent aux dépens de domaines plus argileux qu'ils appauvrissent, tandis qu'à l'aval, les domaines grumeleux se développent aux dépens de domaines déjà fortement appauvris. Les différentes hypothèses sur l'origine des structures microgrumeleuses et grumeleuses conduisent aux deux cas de figures suivants :

- 1) L'origine de l'agrégation est biologique dans les deux ensembles. Cela implique l'existence d'espèces différentes, localisées dans l'espace; l'activité biologique serait plus forte à l'amont. Est-ce que les conditions de milieu sont suffisamment différentes pour entraîner de telles variations d'espèces et de peuplement ? Une réponse négative à cette question permettrait de rejeter l'origine biologique à l'amont.
- 2) L'origine de l'agrégation est physico-chimique à l'amont et biologique à l'aval.

4 - Conclusion à l'étude du domaine aval

Dans le domaine aval, les manifestations du transfert de l'argile sont les plus importantes microscopiquement. L'horizon jaune brunâtre limoneux AV1 est plus nettement appauvri et plus épais que l'horizon brun jaunâtre limoneux VE 1. Les horizons brun vif limoneux et fragiques AV2 et 3 sont plus nettement enrichis en argile que leurs homologues du versant VE 2 et 3, présentant respectivement des organisations argilliques et accumuliques (FEDOROFF, 1973). On peut donc admettre que l'essentiel des transferts est vertical. On constate enfin que le profil d'argile granulométrique n'est pas aussi nettement contrasté; des profils d'argile fine ($< 0.2 \mu\text{m}$) seraient vraisemblablement plus conformes aux données microscopiques.

La présence de revêtements complexes dans des horizons de composition granulométrique et de nature minéralogique différentes permet d'apporter la preuve de l'origine locale, interne à l'horizon, des lits grossiers dans les revêtements complexes. En effet, la fraction limoneuse du revêtement reflète la nature du fond matriciel environnant : elle est riche en kaolinite dans les raies brun rougeâtre de l'arène, riche en micas dans l'horizon sablo-graveleux fragique, essentiellement quartzreuse dans les horizons limoneux fragique et brun vif limoneux. Ainsi, dans un revêtement complexe, les différents lits ont-ils des provenances différentes. Cette constatation explique pourquoi, quelle que soit l'abondance des interstratifications limoneuses, on n'observera pas de modification des courbes granulométriques comme certains auteurs ont pu le remarquer (DE CONINCK et al., 1976). Plus généralement, on peut penser que les trois traits pédologiques suivants :

- . accumulations limoneuses dans la porosité des horizons lessivés;
- . lits grossiers dans les revêtements complexes;
- . coiffes d'éléments fins au-dessus des éléments grossiers;

ont la même signification. Il s'agit, dans les trois cas, de redistributions, sous l'effet de la gravité, d'éléments du squelette à la suite de la disparition du plasma. Disparition qui, elle, peut avoir plusieurs origines : lessivage, lixiviation, dégradation.

L'hydromorphie apparaît discrètement dans l'horizon jaune brunâtre limoneux sous forme de halos glébulaires. Elle est accompagnée par la dégradation dans les horizons fragiques et présente différentes formes : en bandes verticales, en taches claires, et dispersée dans la masse de l'horizon sous forme de lits limoneux dans les revêtements complexes. La dégradation en bandes verticales ne dépend pas du contact A_2 Bt, mais apparaît à la base du profil.

Enfin, si l'origine du caractère fragique n'est pas déterminée, sa place dans la chronologie des processus est acquise : *après* la différenciation granulométrique en sables et limons et *avant* l'accumulation d'argile.

D - CONCLUSION A L'ETUDE AU MICROSCOPE OPTIQUE

L'analyse microscopique a permis de caractériser des processus et d'établir des chronologies. Ce sont principalement : la structuration, l'accumulation, l'hydromorphie, la dégradation et le caractère fragique.

La structuration

Les structures microgrumeleuses à l'amont de la séquence et les structures fragiques à l'aval, apparaissent aussi bien dans des horizons sableux ou limoneux et postérieurement à cette différenciation texturale. On observe donc l'indépendance, pour ce type de matériau pauvre en argile et à cette échelle, des caractères texturaux et structuraux. La chronologie des structures a été établie dans le versant. La structure massive est primitive, la structure polyédrique apparaît ensuite et enfin la structure microgrumeleuse détruit la structure polyédrique et l'horizon s'appauvrit.

L'accumulation

Différents types d'accumulation ont été observés :

- Une accumulation argileuse en revêtements jaune orangé identiques à ceux caractérisant les raies brun rougeâtre. Dans le versant, la plupart de ces revêtements ne sont plus fonctionnels; à l'aval, par contre, ils recouvrent les faces structurales et caractérisent un horizon B_{2t}.
- Des accumulations limoneuses, absolues dans les pores, seules ou intercalées de lits argileux; ou résiduelles, dans le fond matriciel. Ces accumulations résultent de la disparition du plasma.

L'hydromorphie et la dégradation

L'analyse microscopique a permis d'affirmer, dans certains cas, qu'il y avait dégradation, c'est-à-dire disparition des revêtements et élimination du plasma, alors que macroscopiquement on ne peut indiquer que l'hydromorphie. On ne peut cependant, par la seule analyse microscopique, savoir s'il y a remise en suspension ou destruction de l'argile.

Le caractère fragique

Le caractère fragique apparaît à l'aval des séquences et à la base des profils. Il est postérieur à l'acquisition des caractéristiques granulométriques de l'horizon au sein duquel il s'exprime, et antérieur à l'accumulation d'argile qui s'y effectue.

CONCLUSIONS GENERALES



Une arène granitique et sa couverture sablo-limoneuse sus-jacente ont fait l'objet, dans ce travail, d'une *analyse pédographique*. Cette analyse, qui consiste en l'association de différentes techniques d'observation et d'analyse *en place* des constituants et des structures, a permis de localiser les constituants secondaires, de caractériser certains processus d'altération, de transfert et d'organisation, et d'établir leur chronologie relative.

- DANS L'ARÈNE -

On observe d'abord, dans une arène à structure conservée, une fragmentation importante de tous les minéraux et une *altération différentielle des micas et des plagioclases* :

- les micas s'exfolient et se transforment en vermiculite hydroxyalumineuse. Cette altération, qui implique un départ important d'éléments (K , Fe , Mg , Ti , Ca , Na , Si), est *localisée à la bordure exfoliée* des lamelles, tandis que la partie centrale de ces lamelles reste saine. Cette altération, qui reste discrète pour la muscovite, se généralise pour la biotite lorsqu'on se rapproche de la surface.

- les plagioclases font l'objet d'une hydrolyse totale qui progresse selon un front discontinu, en créant des *cavités*. Ces dernières sont partiellement occupées par la kaolinite néoformée : il apparaît ainsi une porosité importante.

- enfin, certains éléments libérés par ces hydrolyses se déplacent sur de courtes distances et participent à des néoformations :

. aiguilles d'oxydes de fer et de titane au sein des plages altérées en vermiculite ou ponctuations sur la kaolinite.

. kaolinite *crystallisant perpendiculairement aux parois de certains vides*, le plus souvent entre des lamelles de biotites et, plus rarement, entre des lamelles de muscovites ou au contact d'autres minéraux.

D'importantes *modifications structurales* apparaissent ensuite dans l'arène :

- un *transfert de particules limono-argileuses* conduit, d'une part, à la différenciation d'une "arène à structure détruite", appauvrie, présentant des *coiffes* et, d'autre part, à l'apparition de figures d'accumulation dans les fissures et les diaclases du sommet de l'arène à structure conservée. Ce transfert doit être favorisé par la porosité grossière

de l'arène maintenue par le squelette de sables grossiers quartzeux et feldspathiques.

- un *fauchage* de la partie supérieure de l'arène se développe ensuite. Il prend naissance au sommet de l'arène à structure conservée et consiste en un glissement, les uns sur les autres, de volumes lamellaires ("lits") qui conservent la structure du granite. Ce glissement est accompagné par une microdivision des minéraux sur les surfaces de contact. Ainsi est créée une *alternance de lits* à structure et granulométrie différentes à partir d'un matériau homogène. Ce fauchage apparaît postérieurement à l'accumulation de particules limono-argileuses dont il recoupe les figures.

- enfin, une argile s'accumule de manière localisée dans l'arène à structure détruite formant des *rates subhorizontales brun rougeâtre*. Cette argile provient de la couverture superficielle et se dépose postérieurement à l'appauvrissement de l'arène hôte puisque les revêtements argileux recouvrent des coiffes.

Il est ainsi démontré que la différenciation pédologique descend profondément dans l'arène.

- DANS LA COUVERTURE SABLO-LIMONEUSE À LIMONEUSE -

La couverture superficielle est constituée d'un matériau composite dont une partie limoneuse est d'origine éolienne est l'autre partie, plus sableuse, est issue de l'arène; LE CALVEZ (1979) a pu déterminer en chaque point de la séquence la composition du mélange. La différenciation pédologique affecte ensuite ce matériau indépendamment de sa composition sableuse ou limoneuse : c'est ce que j'ai plus particulièrement étudié, montrant que le matériau, primitivement massif, se structure en polyèdres tandis que le lessivage s'installe; *le sol brun lessivé est ensuite remplacé, à partir de l'amont, par un sol brun acide* à structure microgrumeleuse:

+ la structure massive subsiste à la base des profils et à l'aval de la séquence. Une accumulation d'argile vient couvrir toute la porosité et l'horizon acquiert un caractère fragique. L'absence d'intégration au fond matriciel de cette illuviation montre que le versant est stable depuis cette illuviation. Dans cet horizon profond, apparaissent ensuite des caractères de dégradation de types différents :

- bien exprimés et localisés en bandes subverticales aux couleurs contrastées, gris et rouille.

- discrets et généralisés dans l'ensemble de l'horizon. Cette dégradation entraîne la disparition du plasma, créant des domaines limono-sableux où le plasma est absent et induisant la formation de lits limoneux dans des revêtements complexes argilo-limoneux. On a pu montrer, en effet, l'origine locale, interne à l'horizon des lits grossiers dans les revêtements complexes argileux et limoneux.

+ on observe, par ailleurs, deux cycles successifs dans le lessivage. Le premier cycle correspond au sol brun lessivé de l'aval qui présente un couple d'horizons A₂ et Bt fonctionnel. Le second cycle correspond au développement du sol brun acide, à l'amont, aux dépens d'un horizon B de sol brun lessivé. L'accumulation d'argile correspondant à ce second cycle ne constitue pas un horizon Bt mais enrichit un volume plus important à la base du sol et dans l'arène.

- INTÉRÊT CARTOGRAPHIQUE -

Cette étude a permis de situer dans le temps les pédogenèses brun lessivé et brun acide. Il serait important d'intégrer cette notion historique dans la représentation cartographique. C'est la tentative effectuée par BOULET (1978) en Guyane qu'il conviendrait alors d'appliquer. Une cartographie à grande échelle de bassins versants élémentaires permettrait de caractériser *leurs différents stades d'évolution*. Ces stades seraient ensuite, à des échelles plus petites, les unités élémentaires cartographiées.



BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

- ANDERSON, J.L. & BOUMA, J. (1977). - Water movement through pedal soils II. Unsaturated flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41 (2) : 419 - 423.
- AUROUSSEAU, P. (1976). - Morphologie et genèse des sols sur granite du Morvan. *Thèse Ing.-Doct., Univ. Rennes*, multigr. 177 p.
- BAL, L. (1973). - Micromorphological analysis of soils. Lower levels in the organization of organic soil materials. *Thèse, Univ. Utrecht* : 174 p.
- BABEL, U. (1968). - Enchytraeen Lösungsgefüge in Löss. *Geoderma*, 2 : 57 - 63.
- BARRIOS, J. PLANCON, A. CRUZ, M.I. & TCHOUBAR, C. (1977). - Qualitative and quantitative study of stacking faults in a hydrazine treated kaolinite - Relationship with the infrared spectra. *Clays and Clay Minerals*, 25 : 422 - 429.
- BENCE, A.E. & ALBEE, A.L. (1968). - Empirical correction factors for the electron microanalysis of silicates and oxydes. *J. Geol.*, 76 : 382 - 403.
- BERNER, R.A. HOLDREN, G.R. (1977). - Mechanism of feldspar weathering; some observational evidence. *Geology (Boulder) (U.S.A.)*, 5 (6) : 369 - 372.
- BISDOM, E.B.A. (1967). - Micromorphology of a weathered granite near the Ria de Arosa (N.W. Spain). *Over druk UIT. Leidse geologische mededelingen* 37 : 33 - 67.
- BISDOM, E.B.A. HENSTRA, S. HORNSVELD, E.M. JONGERIUS, A. & LETSCH, A.C. (1976). - Wavelength and energy dispersive X-Ray microanalysis with EMA and SEM - EDXRA on thin sections of soils. *Neth. J. Agric. Sci.*, 24 : 209 - 222.
- BOCQUIER, G. (1971). - Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux au Tchad. Interprétation biogéodynamique. *Thèse Strasbourg* : 363 p.
- BOCQUIER, G. & NALOVIC, L. (1972). - Utilisation de la microscopie électronique en pédologie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 10(4) : 411 - 434.
- BOUDOT, J.P. & BRUCKERT, S. (1978). - Complexes organométalliques et structures microagrégées des sols sur matériaux chloriteux du système schisto-grauwackeux vosgien. *Bull. Ass. Fr. Et. Sol*, 1 : 31 - 40.
- BOULET, R. FRITSCH, E. & HUMBEL, F.X. (1978). - Méthode d'étude et de représentation des ouvertures pédologiques de Guyane Française. *ORSTOM, Centre de Cayenne*, 177 : multigr. 24 p.
- BOUMA, J. & DEKKER, L.W. (1978). - A case study on infiltration into dry clay soil. I. Micromorphological observations. *Geoderma* 20 (1) : 27 - 40.
- BRESSON, L.M. (1974). - Rubéfaction récente des sols sous climat tempéré humide. Séquence évolutive sur pluvio-glaciaire calcaire dans le Jura méridional. Etude de microscopie intégrée. *Thèse, Univ. Paris VII* : 197 p.
- BRESSON, L.M. (1978). - Nouvelles perspectives en microscopie intégrée : les lames ultra-minces et la microanalyse laser. In *Micromorfologia de suelos*, Proceedings of the fifth International Working Meeting on Soil Micromorphology. Grenade, Espagne, (1) : 19 - 32.
- BREWER, R. (1964). - Fabric and mineral analysis of soils. *John Wiley ed., New York* : 470 p.
- BRINKMAN, R. JONGMANS, A.G. MIEDEMA, R. & MARSKANT, P. (1973). - Clay decomposition in seasonally wet, acid soils : micromorphological, chemical and mineralogical evidence from individual argillans. *Geoderma*, 10 : 259 - 270.
- BRUCKERT, S. & SELINO, D. (1978). - Mise en évidence de l'origine biologique ou chimique des structures microagrégées foisonnantes des sols bruns ocreux. *Pédologie* 28 (1) : 46 - 59.

- CARNET, Ch. (1978). - Etude des sols et de leur régime hydrique en région granitique de Bretagne : une approche du rôle du bocage. *Thèse, Univ. Rennes* : 235 p.
- CHEVASSU, G. (1976). - Les roches granitiques et leur altération. Reconnaissance géotechnique de tracés en Bretagne. *Lab. Ponts Chaussées. Rapp. Rech. Fr.* 61 : 1 - 134.
- COGNE, J. (1974). - Le Massif Armoricaïn. In DEBELMAS - *Géologie de la France*. - Doïn Ed. Paris, 1 : 105 - 161.
- COLLIER, D. (1961). - Mise au point sur les processus de l'altération des granites en pays tempéré. *Ann. Agron.* 12 (3) : 273 - 331.
- CON-INCK de, F. FAVROT, J.C. TAVERNIER, R. & JAMAGNE, M. (1976). - Dégénération dans les sols lessivés hydromorphes sur matériaux argilo-sableux. Exemple des sols de la nappe détritique bourbonnaise (France). *Pédologie* 26 (2) : 105 - 151.
- C.P.C.S. (1967). - Classification des sols. *Multigr.*, 87 p.
- CUGNY, M.Th. & RASCLE, S. (1977). - Etude et cartographie des sols sur les granites de Pontivy (Morbihan). *Mém. DEA, ENSA - Univ. Rennes, S.D.S.* 93 : *Multigr.*, 92 p.
- CURMI, P. (1979). - Genèse d'une structure litée à granulométrie hétérogène dans une arène granitique. *C.R.Acad. Sci., Paris, sér. D.* 288 : 731 - 733.
- CURMI, P. (1979). - Différenciation pédologique dans une arène granitique bretonne. *Bull. Ass. Fr. Et. Sol.*, 1 : 1 - 15.
- DEJOU, J. (1967). - L'altération des granites à deux micas du massif de La Pierre qui vire. *Ann. Agron.* 18 (2) : 145 - 201.
- DEJOU, J. GUYOT, J. & ROBERT, M. (1977). - Evolution superficielle des roches cristallines et crétallophylliennes dans les régions tempérées. *INRA* 439 p.
- DELVIGNE, J. & MARTIN, H. (1970). - Analyse à la microsonde électronique de l'altération d'un plagioclase en kaolinite par l'intermédiaire d'une phase amorphe. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.* II : 259 - 295.
- DUCLoux, J. (1978). - Contribution à l'étude des sols lessivés sous climat atlantique. *Thèse, Univ. Poitiers*: 151 p.
- EBERHART, J.P. & TRIKI, R. (1972). - Essai d'identification de minéraux argileux par microdiffraction électronique en utilisant les réflexions basales (001). *Gr. Franç. Argiles*, 24 : 3 - 14.
- EIMBERCK - ROUX, M. (1977). - Les sols lessivés glossiques de l'Argonne méridionale. Caractérisation micromorphologique et minéralogique. *Bull. Ass. Fr. Et. Sol.*, 2 : 81 - 94.
- ESTEouLE-CHOUX, J. (1970). - Contribution à l'étude des argiles du Massif Armoricaïn. *Mém. Soc. Géol. Minéral. Bretagne*, 14: 319 p.
- FARMER, V.C. (1974). - Infrared Spectra of Minerals. *Mineralogical Society, London* : 341 p.
- FEDOROFF, N. (1973). - Classification of translocated particles. In *Soil microscopy*, Proceedings of the fourth International Working Meeting on Soil Microscopy. Ed. by Rutherford, *The limestone Press. Kingston, Ontario.* 695 - 715.
- FEDOROFF, N. & AUROUSSEAU, P. - Micromorphologie des sols bruns acides sur matériaux granitiques (à paraître).
- FEHRMANN, R.C. & WEAVER, R.W. (1978). - Scanning electron microscopy of Rhizobium spp. Adhering to fine silt particles. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42 : 279 - 283.
- FIES, J.C. (1978). - Porosité du sol : étude de son origine texturale. *Thèse, Univ. L. Pasteur Strasbourg.* 139 p.
- FLAGEOLLET, J.C. (1977). - Origine des reliefs, altérations et formations superficielles : contribution à l'étude géomorphologique des massifs anciens cristallins. L'exemple du Limousin et de la Vendée du Nord-Ouest. *Sci. de la terre, Nancy.* 35 : 461 p.

- GUYOT, G. MALET, P. & VERBRUGGHE, M. (1976). - Climat et aménagement en pays de bocage. *INRA - DARS*.
- HAMEURT, J.M. (1961). - Etude géologique et pétrographique du massif granitique de Pontivy. *Thèse 3ème cycle, Nancy*. 104 p.
- JAMAGNE, M. (1973). - Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France. *Thèse Fac. Gembloux (Belgique)* : 445 p.
- JAMAGNE, M. & JEANSON, C. (1978). - Illuviation primaire et secondaire dans les sols lessivés sur matériaux limoneux. Micromorphologie et microanalyse élémentaire. *In Micromorfologia de suelos, Proceedings of the fifth International Working Meeting on Soil Micromorphology. Grenade, Espagne, (2)* : 935 - 965.
- JOLY, A. & SEBERT, Ch. (1975). - Contribution à la connaissance du profil cultural. *Mém. DEA, ENSEA - INRA - Univ. Rennes, S.D.S. 25 : Multigr.* 83 p.
- LARIVIERE, G. & VERDOU, J.P. (1969). - Contribution à l'étude du climat de la Bretagne. *Monog. Météorol. Nat.* 73.
- LAUTRIDOU, J.P. (1975). - Les arènes litées des massifs de Vire et d'Avranches : âge et genèse, *in symposium : Modelés d'origine froide et roches cristallines, Paris, Ed. Raynal, Univ. Pasteur, Strasbourg* : 141 - 146.
- LE CALVEZ, L. (1979). - Genèse des formations limoneuses de Bretagne Centrale : essai de modélisation. *Thèse, Univ. Rennes* : 213 p.
- LEGROS, J.P. (1975) - Origine et évolution des accumulations litées argileuses dans les arènes cristallines des régions tempérées humides. Cas du Mont Pilat. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 281 : 1817 - 1820.
- LEGROS, J.P. (1976). - Migrations latérales et accumulations litées dans les arènes du massif cristallin et cristallophyllien du Pilat (Ardèche, Loire, Haute-Loire). *Bull. Ass. Fr. Et. Sol*, 3 : 205 - 220.
- MAURICE, F. MENY, L. & TIXIER, R. (1979). - Microanalyse et microscopie électronique à balayage. *Ed. de Physique, Orsay, France* : 532 p.
- MEROT, Ph. (1978). - Le bocage en Bretagne granitique : une approche de la circulation des eaux. *Thèse, Univ. Rennes* : 195 p.
- MEUNIER, A. (1977). - Les mécanismes de l'altération des granites et le rôle des microsystemes. Etude des arènes du massif granitique de Parthenay (Deux Sèvres). *Thèse, Univ. Poitiers*. 248 p.
- MILLOT, G. (1964). - Géologie des argiles. *Masson Ed., Paris* : 499 p.
- MILLOT, G. LUCAS, J. & PAQUET, H. (1965). - Evolution géochimique par dégradation et aggradation des minéraux argileux dans l'hydrosphère. *Géol. Rundsch.*, 55 : 1 - 20.
- MURPHY, C.P. & BANFIELD, C.F. (1978). - Pore space variability in a subsurface horizon of two soils. *J. Soil Sci.* 29 : 156 - 166.
- PEDRO, G. & CHAUVEL, A. (1973). - Sur la nature et l'importance relative des principaux mécanismes intervenant dans le processus de lessivage pédologique. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 277 : 1133 - 1136.
- PEDRO, G. JAMAGNE, M. & BEGON, J.C. (1978). - Two routes in genesis of strongly differenciated acid soils under humid, cool - temperate conditions. *Geoderma* 20 : 173 - 189.
- ROBERT, M. (1970). - Etude expérimentale de la désagrégation du granite et de l'évolution des micas. *Thèse, Fac. Sci., Paris*. 194 p.
- ROBERT, M. (1975). - Principe de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des Rayons X. *Ann. Agron.*, 26 (4) : 363 - 399.

- ROBERT, M. & RAZZAGHE-KARIMI, M. (1975). - Mise en évidence de deux types d'évolution minéralogique des micas trioctaédriques en présence d'acides organiques hydrosolubles. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 280 : 2175 - 2178.
- SEDDOH, F. (1973). - Altération des roches cristallines du Morvan. Etude minéralogique, géochimique et micromorphologique. *Thèse, Univ. Dijon*. 341 p.
- SEDDOH, F. & PEDRO, G. (1975). - Aspects microgéochimiques de l'altération superficielle. Application à l'étude de l'évolution des minéraux dans les arènes granitiques. *Can. ORSTOM, sér. Pédol.*, 13 (1) : 7-25.
- SEDDOH, F. & ROBERT, M. (1972). - Intérêt de l'utilisation du microscope électronique à balayage pour l'étude des micas et de leur évolution. *Bull. Soc. Fr. Min. Crist.*, 95 : 75 - 83.
- SIEFFERMANN, G. (1973). - Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun: variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical. *Mem. ORSTOM*, 66. 183 p.
- SOUCHIER, B. (1971). - Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges). *Mém. Serv. Carte Géol. Als.Lorr.*, 23 : 134 p.
- TARDY, Y. (1969). - Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., Strasbourg*, 31 : 199 p.
- VICENTE, M.A. RAZZAGHE-KARIMI, M. & ROBERT, M. (1977). - Formation of Aluminium hydroxyvermiculite (Intergrade) and smectite from mica under acidic conditions. *Clay Minerals*, 12 : 101 -112.
- Les Bocages - (1976). - Histoire, Ecologie, Economie - Table Ronde CNRS : Aspects physiques, biologiques et humains des écosystèmes bocagers des régions tempérées humides. *INRA - CNRS - Univ. Rennes* : 586 p.
- Glossaire de Pédologie - Description des horizons en vue du traitement informatique. *ORSTOM Bondy - Initiations, Doc. Techn. n° 13* (1969) : 82 p.

- ANNEXE : Données granulométriques.

Domaine	AMONT							
	1		2				3	
Profil								
Horizon	AM1	AM1	Ap	AM1	AM1	AM2	AM1	AM3
Profondeur en cm.	24-34	40-48	8-16	24-34	40-50	82-92	28-35	40-48
Eléments < 2 mm. en % de terre entière	75	70	74	77	83	70	82	52
En % d'éléments 2 mm.								
A 0 - 2 µm.	12,3	12,7	16,4	10,3	10,0	15,2	9,7	5,4
LF 2 - 20 µm.	24,0	21,6	22,5	28,1	27,8	24,3	26,5	19,3
LG 20 - 50 µm.	23,8	22,5	24,2	25,5	25,7	25,3	24,8	18,3
S1 50 - 100 µm.	5,6	6,1	5,9	6,1	5,9	5,7	6,0	9,9
S2 100 - 200 µm.	4,5	4,5	3,9	3,6	4,5	4,2	4,0	7,0
S3 200 - 500 µm.	10,0	10,4	8,0	8,0	10,2	9,2	9,6	17,4
S4 500 - 1000 µm.	9,8	11,1	8,5	8,2	9,7	7,6	9,4	13,5
S5 1 - 2 mm.	10,0	11,1	10,6	10,2	6,2	8,5	10,0	9,2

- ANNEXE : Données granulométriques.

Domaine	VERSANT															
	4					5						6				
Profil																
Horizon	Ap	VE1	VE1	VE2	VE2	Ap	VE1	VE2	VE2	VE3	Arène	VE1	VE2	VE2	VE3	Arène
Profondeur en cm.	5-15	21-30	35-38	48-56	65-73	5-15	36-45	52-62	67-75	86-96	110-120	35-45	50-60	70-80	90-100	110-120
Eléments < 2 mm. en % de terre entière	79	79	91	88	68	79	87	82	80	70	44	86	69	71	68	77
En % d'éléments 2 mm.																
A 0 - 2 µm.	17,4	16,5	11,2	21,4	17,0	17,6	13,1	20,1	18,5	7,1	3,9	11,3	21,7	16,2	11,2	11,7
LF 2 - 20 µm.	24,0	25,8	31,3	27,0	21,9	24,7	31,3	28,6	25,9	21,1	7,0	31,9	24,5	24,0	21,0	21,6
LG 20 - 50 µm.	26,8	26,9	31,6	32,0	22,4	27,2	34,6	33,8	35,1	27,2	9,7	36,5	27,8	29,5	21,5	10,3
S1 50 - 100 µm.	5,3	5,3	5,4	4,5	5,9	5,0	4,9	4,4	4,4	6,5	14,0	4,7	4,5	5,6	6,5	9,0
S2 100 - 200 µm.	3,8	3,5	2,7	2,4	4,9	3,6	2,5	2,2	2,1	5,3	14,0	2,5	3,4	4,0	6,1	6,9
S3 200 - 500 µm.	8,7	7,9	6,2	5,3	10,9	7,7	4,9	3,7	4,8	11,9	26,6	5,3	6,7	8,9	12,7	14,3
S4 500 - 1000 µm.	8,0	6,6	5,7	4,2	9,1	6,9	4,6	3,4	4,8	11,8	16,1	3,9	5,6	7,1	10,9	13,8
S5 1 - 2 mm.	6,0	7,5	5,9	3,2	7,9	7,3	4,1	3,8	4,4	9,1	8,7	3,9	5,8	4,7	10,1	12,4

- ANNEXE : Données granulométriques.

Domaine	AVAL										
	7					8					
Profil											
Horizon	AV1	AV1	AV2	AV3	Arène	AV1	AV2	AV3	AV3	AV3	Arène
Profondeur en cm.	38-48	59-69	87-97	102-117	170-180	38-48	88-98	113-133	133-153	188-203	240-250
Éléments < 2 mm. en % de terre entière	90	93	86	82	59	94	89	68	83	43	66
En % d'éléments 2 mm.											
A 0 - 2 µm.	11,4	12,3	15,3	12,5	5,8	9,8	14,8	10,5	11,2	6,9	6,0
LF 2 - 20 µm.	31,0	29,8	26,2	25,2	14,4	31,1	27,7	27,2	33,2	15,5	13,0
LG 20 - 50 µm.	42,1	42,3	39,9	25,3	9,4	42,3	40,7	20,6	21,1	11,1	9,2
S1 50 - 100 µm.	5,0	4,6	4,3	6,3	10,2	4,0	3,8	6,1	7,1	6,2	10,5
S2 100 - 200 µm.	1,4	1,5	1,9	5,5	10,1	1,6	1,6	5,0	4,3	6,9	7,3
S3 200 - 500 µm.	3,0	3,0	4,4	9,8	20,6	3,4	3,7	9,5	8,4	19,9	18,5
S4 500 - 1000 µm.	3,0	3,1	4,0	7,4	16,6	3,2	3,4	9,4	8,1	17,2	21,5
S5 1 - 2 mm.	3,1	3,4	4,0	8,0	12,3	4,6	4,3	11,7	6,6	16,3	14,0

LISTE DES FIGURES

1	-	Le massif Armoricaïn : Structure et granites hercyniens	7
2	-	Carte géologique de la partie orientale du massif granitique de Pontivy	8
3	-	Bilan hydrique : stations de Brest et Rennes	12
4	-	Distribution des différents types d'arène en fonction de la pente	14
5	-	Carte pédologique du Nord Ouest du massif granitique de Pontivy	16
6	-	Séquences de sols de l'unité 1	17
7	-	" " l'unité 2	17
8	-	" " l'unité 3	17
9	-	" " l'unité 4	18
10	-	" " l'unité 5	18
11	-	Carte pédologique du bassin versant élémentaire de Penety	19
12	-	Schéma de situation de la carrière du Sourn	20
13	-	Les principaux ensembles différenciés dans l'arène	25
14	-	Arène à structure conservée (ensemble I) fraction < 2 µm - diagramme RX d'argile orientée	34
15	-	" " " " " " - diagramme RX de poudres	35
16	-	" " " " " " - analyse thermique différentielle	35
17	-	" " " " " " - spectre infra-rouge	36
18	-	Spectre X d'une zone saine du plagioclase et du voile microcristallin	37
19	-	Muscovite, fractions fines séparées aux ultrasons - diagramme RX	42
20	-	Spectre X d'une zone saine et d'une zone exfoliée de muscovite	43
21	-	Biotite, sommet de l'arène à structure conservée - diagramme RX de poudres	49
22	-	Spectre X d'une zone saine et d'une zone exfoliée de biotite	50
23	-	Comparaison des traversées biotite-kaolinite et biotite-vermiculite	57
24	-	Spectre X d'une concentration opaque en bordure d'un vide	64
25	-	Raie brun rougeâtre, fraction < 2 µm - diagramme RX d'argile orientée	83
26	-	Raie brun rougeâtre, spectre X d'un revêtement argileux	83
27	-	Les différents profils du domaine amont	92
28	-	Représentation cartographique schématique des sols du domaine amont	92
29	-	Schéma du profil de versant	94
30	-	Représentation schématique des sols de l'amont et du versant	96
31	-	Schéma des profils du pseudo-talweg	97
32	-	Variation des caractères principaux des profils du pseudo-talweg	100
33	-	Schéma du passage du profil I au profil II dans le pseudo-talweg	100
34	-	Représentation schématique de la séquence	102
35	-	La distribution granulométrique	103
36	-	Profils verticaux de l'argile granulométrique en % de la terre entière	107
37	-	Courbes d'isovaleurs de x : pourcentage de matériaux d'apports	108
38	-	Structure de l'horizon brun jaunâtre limoneux VE1	122
39	-	Relations entre les structures microgrumeleuses et polyédriques	123
40	-	Schéma d'évolution de la structure dans l'horizon brun jaunâtre limoneux VE1	125
41	-	Comparaison du profil d'argile granulométrique et des caractères microscopiques	126
42	-	Abondance relative des domaines polyédriques et microgrumeleux dans les horizons de l'amont et du versant	130
43	-	Bande verticale grise à liseré rouille	135
44	-	Variations structurales dans les ensembles α et β	148

LISTE DES TABLEAUX

1 - Analyses chimiques totales d'échantillons de granite de Pontivy.....	10
2 - Hauteur mensuelle des précipitations - Bubry 1964 - 1976	11
3 - Composants du bilan hydrique en Bretagne : ETP, P.	11
4 - Analyses quantitatives ponctuelles à la sonde électronique de plages " saines " et altérées voisines de 5 plagioclases	41
5 - Analyses quantitatives ponctuelles à la sonde électronique de lamelles voisines " saines " et exfoliées en bordure de 4 muscovites	47
6 - Analyses quantitatives ponctuelles à la sonde électronique de lamelles voisines " saines " et exfoliées de 5 biotites	55
7 - Analyses quantitatives ponctuelles à la sonde électronique des exfolia- tions et des minéraux cristallisés perpendiculairement aux lamelles d' une biotite	58
8 - Tableau récapitulatif des caractères et des processus majeurs affectant les différents ensembles de l'arène	85
9 - Profils du domaine amont	90
10 - Domaine amont, tableau récapitulatif	91
11 - Nomenclature des horizons sablo-limoneux à limoneux	101
12 - Nomenclature des horizons sablo-limoneux à limoneux	105
13 - LF + LG en % de la terre entière	106
14 - Rapport LF/LG	106
15 - Composition granulométrique des pôles sableux et limoneux (in LE CALVEZ, 1979).	108
16 - pH eau	109
17 - pH eau - pH KCl	110
18 - pH NaF	111
19 - Complexe adsorbant	111
20 - Cations échangeables	112
21 - Composition minéralogique de la fraction argileuse	113



LISTE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

Planche 1	: Ensemble I : arène à structure conservée	29
	Ph. 1 - Base de l'arène à structure conservée	
	Ph. 2 - Sommet de l'arène à structure conservée	
	Ph. 3 & 4 - biotite	
Planche 2	: Altération des Plagioclases	39
	Ph. 1 - microscope optique	
	Ph. 2 - image X de répartition du Calcium	
	Ph. 3 - traversée	
	Ph. 4 & 5 - observations au M.E.B.	
Planche 3	: Altération des Muscovites	45
	Ph. 1 - microscope optique	
	Ph. 2 - image X de répartition du potassium	
	Ph. 3 - traversée	
	Ph. 4,5,6 - observations au M.E.B.	
Planche 4	: Altération des Biotites	53
	Ph. 1 - microscope optique	
	Ph. 2 - image X de répartition du potassium	
	Ph. 3 - image X de répartition du fer	
	Ph. 4 - traversée	
Planche 5	: Altération des Biotites	61
	Ph. 1 - image e ⁻ secondaires d'une biotite présentant des exfoliations et de la kaolinite orientée perpendiculairement aux lamelles.	
	Ph. 2 & 3 - observations au M.E.B. : biotite de la fraction 360 - 240 µm .	
Planche 6	: Transition entre les ensembles I et II de l'arène : montage	67
Planche 7	: Transition entre les ensembles I et II de l'arène	71
	Ph. 1 - particules limono-argileuses comblant une diaclase	
	Ph. 2 - kaolinite en éventail	
	Ph. 3 - Domaine à structure particulière	
Planche 8	: Sommet de la transition entre les ensembles I et II de l'arène - Arène à structure détruite -	75
	Ph. 1 & 2 - Sommet de la transition entre les ensembles I et II de l'arène	
	Ph. 3 - Arène à structure détruite	
Planche 9	: Raies brun rougeâtre	81
	Ph. 1 - Raie brun rougeâtre	
	Ph. 2 - revêtements argileux recouvrant une coiffe	
	Ph. 3 & 4 - revêtement présentant un lit limoneux	

Planche 10	: Domaine de versant	117
Ph. 1	- horizon brun jaunâtre sablo limoneux VE3	
Ph. 2	- horizon brun vif limono-sableux VE2	
Ph. 3	- horizon brun jaunâtre limoneux VE1 : structure	
Ph. 4	- horizon brun jaunâtre limoneux VE1 : agrégats microgrumeleux	
Planche 11	: Domaine aval, horizons fragiques	133
Ph. 1	- horizon sablo-graveleux fragique AV3	
Ph. 2	- Revêtement complexe	
Ph. 3	- horizon limoneux fragique AV4 , domaine non hydromorphe	
Ph. 4	- horizon limoneux fragique AV4 , domaine hydromorphe	
Planche 12	: Domaine aval, bande verticale grise à liséré rouille	137
Ph. 1	- Déstabilisation d'un revêtement complexe	
Ph. 2	- matrice AV3	
Ph. 3	- bande grise	
Planche 13	: Domaine aval, horizons limoneux non fragiques	145
Ph. 1	- horizon brun vif limoneux AV2	
Ph. 2	- Revêtement avec interstratification limoneuse de quartz	
Ph. 3	- horizon jaune brunâtre limoneux AV1	

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : Le cadre de l'étude	5
I - Le milieu	7
A - Présentation géologique	8
1 - Mise en place	8
2 - Pétrographie et caractères chimiques	9
B - Approche géomorphologique	10
C - Caractères climatiques	11
D - Occupation des sols	12
II - Revue sur les travaux antérieurs	13
A - Les arènes	13
1 - Altération du granite	13
a - En région tempérée	13
b - Dans le massif Armoricaïn	13
2 - Distribution des arènes dans le paysage	14
B - La couverture limoneuse	15
C - La différenciation pédologique	15
1 - Principaux types de sols	15
2 - Distribution des sols dans le paysage	15
III - Conclusions : L'objet étudié, la démarche et les méthodes mises en oeuvre	20
A - Objet étudié	20
B - Démarche	21
C - Méthodes d'étude	21
DEUXIEME PARTIE : L'arène granitique	23
I - Etude macroscopique : définition et positionnement des ensembles différenciés dans l'arène	25
- Ensemble I ou Arène à structure conservée	25
- Transition entre l'ensemble I et l'ensemble II : la naissance du fauchage ...	25
- Ensemble II ou Arène à structure détruite	26
- Raies brun rougeâtre	26
II - Ensemble I : arène à structure conservée	27
A - Etude globale au microscope optique	27
1 - Description	27
2 - Conclusions	31
B - Observations et analyses à l'échelle du minéral	33
1 - Choix des techniques	33
2 - Altération des plagioclases	33
α - Détermination minéralogique de la fraction inférieure à 2 μm	34
β - Microanalyses à la sonde électronique	36
γ - Observations morphologiques au microscope électronique à balayage ...	41

3 - Altération des muscovites	42
α - Données diffractométriques	42
β - Microanalyses à la sonde électronique	42
γ - Observations morphologiques au microscope électronique à balayage ...	48
4 - Altération des biotites	48
α - Diffractométrie des Rayons X	48
β - Microanalyses à la sonde électronique	50
- les domaines exfoliés	50
- les minéraux secondaires cristallisés perpendiculairement aux surfaces des biotites	56
γ - Observations morphologiques au microscope électronique à balayage ...	63
5 - Concentrations opaques	63
6 - Conclusions	65
III - Transition entre l'arène à structure conservée et l'arène à structure détruite: la naissance du fauchage	66
A - Partie inférieure de la transition	66
- Les domaines à structure pétrographique conservée	66
- Les domaines à structure particulaire	69
- Conclusion : la chronologie relative dans cette zone de transition	73
B - Partie supérieure de la transition	73
IV - Ensemble II : arène à structure détruite	77
A - Etude au microscope optique	77
B - Données diffractométriques	78
C - Conclusions	78
V - Les raies brun rougeâtre	79
A - Etude au microscope optique	79
B - Détermination minéralogique de la fraction < 2 μm	79
C - Conclusions	84
VI - Conclusions à l'étude de l'arène	35
TROISIEME PARTIE : Les horizons sablo-limoneux à limoneux	87
Introduction	89
I - Etude macroscopique	89
A - Introduction	89
B - Le domaine amont	90
1 - Caractérisation des différents horizons	90
- L'arène sablo-limoneuse AM3	90
- L'horizon limoneux AM1	91
- L'horizon limoneux AM2	91
2 - Distribution dans l'espace de ces horizons	92
C - Le domaine de versant	94
1 - Répartition verticale et caractérisation des différents horizons	94
- L'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE3	94
- L'horizon brun vif limono-sableux VE2	94
- L'horizon brun jaunâtre limoneux VE1	95
2 - Variation latérale de ces horizons	95
3 - Comparaison du domaine amont et du domaine de versant	96

D - Le domaine aval	97
1 - Répartition verticale et caractérisation des différents horizons	97
a - Le premier type de profil	97
- L'horizon sablo-graveleux fragique AV3	98
- L'horizon limoneux brun vif AV2	98
- L'horizon limoneux jaune brunâtre AV1	98
b - Le deuxième type de profil	99
- L'horizon fragique limoneux AV4	99
c - Les différences essentielles entre les deux types de profils.	99
2 - Variations et répartition latérale de ces horizons	100
E - Conclusion à l'étude macroscopique	101
II - Données analytiques	103
A - Granulométrie	103
1 - Les trois types d'histogrammes	104
2 - Les relations entre ces trois types, leurs positions respectives dans la séquence	104
3 - Les horizons à éléments limoneux dominants	105
4 - L'argile granulométrique	107
5 - Conclusion à l'étude granulométrique	107
B - Données chimiques	109
1 - pH	109
2 - Complexe adsorbant	110
C - Minéralogie des argiles	113
D - Conclusions	114
III - Etude au microscope optique	115
Préambule	115
A - Le domaine de versant	115
1 - L'horizon brun jaunâtre sablo-limoneux VE3	115
a - Description	115
b - Conclusions	119
2 - L'horizon brun vif limono-sableux VE2	120
a - Description	120
b - Conclusions	121
α - Affinement de la texture	121
β - Structuration	121
γ - Illuviation	122
3 - L'horizon brun jaunâtre limoneux VE1	122
a - Description	122
b - Discussion, conclusions	123
α - Structures polyédriques et microgrumeleuses : caractérisation, liens génétiques	123
β - Destruction de la structure polyédrique	124
γ - Microagrégation	124
δ - Appauvrissement et accumulation	125
4 - Conclusion à l'étude du domaine de versant	127
B - Le domaine amont	127
1 - L'arène sablo-limoneuse AM3	127
a - Description	127
b - Conclusions	128

2 - Les poches limoneuses	128
a - Description	128
α - L'horizon limoneux AM2	128
β - L'horizon limoneux AM1	129
b - Conclusions	129
3 - Conclusion à l'étude du domaine amont	129
C - Le domaine aval	130
1 - Les horizons fragiques	130
11 - L'horizon sablo-graveleux fragique AV3	130
111 - Matrice	130
a - Description	130
b - Conclusions	131
112 - Bandes subverticales grises à liseré rouille	135
a - Description	135
b - Conclusions	135
12 - L'horizon limoneux fragique AV4	139
121 - Description	139
a - Le domaine non hydromorphe	139
b - Les taches claires	140
122 - Conclusions	140
13 - Conclusion à l'étude des horizons fragiques	141
2 - L'horizon brun vif limoneux AV2	142
a - Description	142
b - Conclusions	142
3 - L'horizon jaune brunâtre limoneux AV1	143
a - Description	143
b - Discussion, conclusions	147
α - Appauvrissement et hydromorphie	147
β - Relation entre les agrégats grumeleux et polyédriques	147
γ - Relations entre les structures microgrumeleuses, grumeleuses et polyédriques au niveau de la séquence	147
4 - Conclusion à l'étude du domaine aval	149
D - Conclusion à l'étude au microscope optique	150
Conclusions générales	151
Bibliographie	157
Annexe	163
Liste des figures	167
Liste des tableaux	169
Liste des planches photographiques	171
Table des matières	173

