GENESE DES FORMATIONS LIMONEUSES DE BRETAGNE CENTRALE: ESSAI DE MODELISATION

Laurent Le Calvez

▶ **To cite this version:**

Laurent Le Calvez. GENESE DES FORMATIONS LIMONEUSES DE BRETAGNE CENTRALE: ESSAI DE MODELISATION. Sciences de la Terre. Université de Rennes, 1979. Français. NNT : . tel-01576494

HAL Id: tel-01576494

https://insu.hal.science/tel-01576494

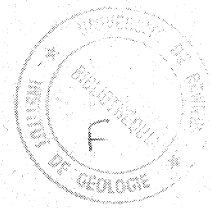
Submitted on 23 Aug 2017

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.

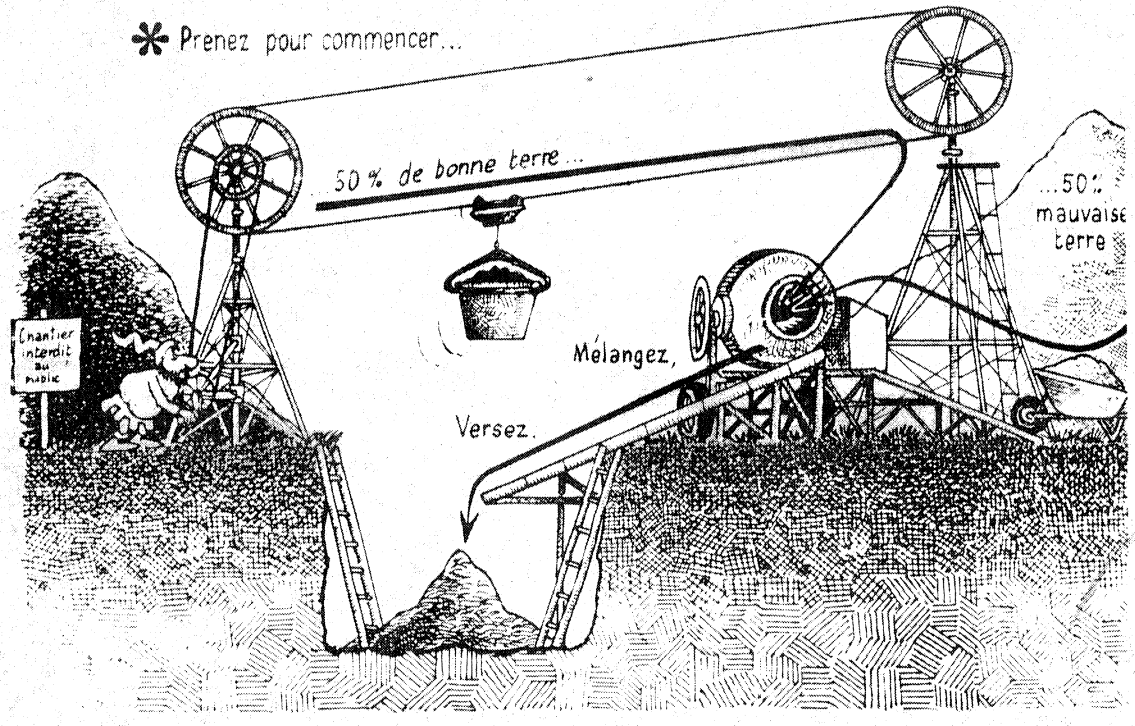
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Laurent LE CALVEZ

29 JAN. 1980



GENESE DES FORMATIONS LIMONEUSES DE BRETAGNE CENTRALE : ESSAI DE MODELISATION



UNIVERSITE DE RENNES
I.N.R.A. E.N.S.A.

1979

E R R A T A

Page	alinéa	ligne	
27	2	2	: lire séparées et non séparée
29	3	1	: lire ceux-ci et non ceux
31	3	6	: lire glissé et non glisser
31	6	3	: lire masquer et non masqués
39	1	4	: lire issus et non issu
39	3	3	: lire 10 et non 14 - lire 9 et non 13
39	5	6	: lire sus-jacents et non sous-jacents
45	2	4	: lire actuels ou subactuels et non actuel ou subactuel
46	6	3	: lire exclut et non exclue
47	5	1	: lire 60 et non 95
51	2	3	: lire présente et non présentent
57	7	2	: lire s'explique et non s'expliquent
61	8	1	: lire renferment et non renferme
61	10	1	: lire toutes et non tous
62	2	4	: lire Montfort et non Guignen
62	2	5	: lire Guignen et non Montfort
62	3	5	: lire γ et non α
62	8	3	: lire supérieures et non supérieure
63	1	3	: lire celles et non celle
74			: figure 23 : inverser A et B
102	11	2	: lire bornerai et non bornerais
111	5	1	: lire existe et non existent
139	5	1	: lire fournie et non fourni
149			: figure 57 : lire T_i et non N_i
159	3	9	: lire 166 et non 170
161	5	3	: lire différenciation et non différencition
178	1	5	: lire échantillon et non échantillons
178	1	6	: lire prélevé et non prélevés
181	2	3	: lire (fig.77)et non fig.76)

29 JAN. 1980

SERIE : C
N° d'Ordre : 558
N° de Série : 203

INSTITUT de GÉOLOGIE
de RENNES
Numero d'inventaire Bibliothèque 1624

THESE

présentée

DEVANT L'UNIVERSITE DE RENNES

U.E.R. DES SCIENCES BIOLOGIQUES

pour obtenir

le titre de DOCTEUR EN TROISIEME CYCLE

Spécialité : Agronomie

par Laurent LE CALVEZ

Sujet de la Thèse : LA GENESE DES FORMATIONS LIMONEUSES DE BRETAGNE CENTRALE. ESSAI DE MODELISATION

Soutenue le 23 Mai 1979 devant la Commission d'Examen

Mlle	S. DURAND	Président
M.	A. RUELLAN	Rapporteur
Mme	J. ESTEOULE-CHOUX	
M.	P. AUROUSSEAU	
M.	M. JAMAGNE	Examinateurs
M.	J.P. LAUTRIDOU	
M.	J. PAGES	

Que tous ceux qui ont rendu possible
la réalisation de ce travail
soient ici chaleureusement remerciés.

Etude réalisée dans le cadre du laboratoire de recherche de Science du Sol de l'INRA de Rennes et du laboratoire de Géologie des Formations de Couverture de l'Ouest de l'Université de Rennes

S O M M A I R E

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE ET METHODES D'ETUDE

A - Quelques définitions

B - Analyse des travaux antérieurs

C - Conclusion : la démarche d'étude

DEUXIEME PARTIE : APPROCHE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DES MATERIAUX CONSTITUTIFS DES SOLS DE LA REGION DE MUR DE BRETAGNE

A - Cadre de l'étude

B - Approche des principaux problèmes

C - Les formations limoneuses dans le paysage

D - Etude pédologique d'un profil type : les Granges

E - Les données analytiques

F - Conclusion à l'approche morphologique et analytique

TROISIEME PARTIE : APPROCHE QUANTITATIVE DES MATERIAUX CONSTITUTIFS DES SOLS DE LA REGION DE MUR DE BRETAGNE

Introduction

A - Le mélange de matériaux

B - Présentation des séquences et dépouillement préliminaire

C - Etude détaillée des séquences par le modèle de mélange (A.C.P.)

D - Origine et mise en place des matériaux

E - Conclusion à l'essai de modélisation

QUATRIEME PARTIE : CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE - ANNEXES

Couverture d'après"La hulotte des Ardennes" n°35

INTRODUCTION

Le Massif Armoricain est constitué de roches variées : schistes, grès, granites, roches métamorphiques, très localement des calcaires. De très nombreux filons, en particulier de dolérite, recoupent le substratum.

Les sols qui se développent au-dessus de ces roches sont presque toujours fortement limoneux : la fraction comprise entre 2 et 50 microns y est largement dominante.

L'origine des matériaux limoneux a déjà fait l'objet de nombreux travaux. La plupart des auteurs ont conclu qu'une partie au moins des limons provenait d'un apport mais l'agent de transport et la province d'alimentation varient d'une publication à l'autre.

Le but de ce mémoire est l'étude des formations limoneuses de la Bretagne centrale. Celles-ci ont été considérées comme provenant uniquement de l'altération des roches sous-jacentes (COPPENET et RAMPON 1967). Après avoir défini leurs caractères, j'essaierai de préciser s'il y a eu ou non, des apports et, si oui, d'évaluer la part de ce qui a été apporté. Parallèlement, j'essaierai de mettre en évidence l'importance de l'altération et des actions pédogénétiques dans la genèse et sur l'aspect actuel de ces formations.

La première partie de ce mémoire sera consacrée à l'étude critique des travaux antérieurs. Cette étude conduit à proposer de nouvelles méthodes de travail. Dans la seconde partie, j'étudierai les relations existant entre les différents substrats et les matériaux constitutifs des sols de la région de Mûr de Bretagne. Dans la troisième partie, un modèle de mélange à deux constituants sera exposé, à partir d'un exemple, puis appliqué à trois séquences mettant ainsi en évidence les parts relatives des différents matériaux et des processus mis en jeu. Enfin, la quatrième partie sera une synthèse des différentes observations et un bilan méthodologique.

PREMIERE PARTIE

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE ET METHODES D'ETUDE

A) QUELQUES DÉFINITIONS

Lors du Colloque sur les limons du Bassin de Paris, en 1969, les définitions suivantes ont été adoptées pour le terme limon :

Définition granulométrique : "fraction granulométrique de matériaux dont les dimensions sont comprises entre 2 et 50 microns".

Définition géologique : "formation superficielle continentale meuble, où domine la fraction inférieure à 50 microns et où les éléments plus grossiers ne prennent qu'une place accessoire ou accidentelle".

LAUTRIDOU (1969) a défini le loess de la façon suivante : "Le loess est une formation limoneuse, d'origine éolienne qui s'inscrit en France dans un cycle morphogénétique de climat froid et aride et dont les modalités varient en fonction des conditions climatiques régionales".

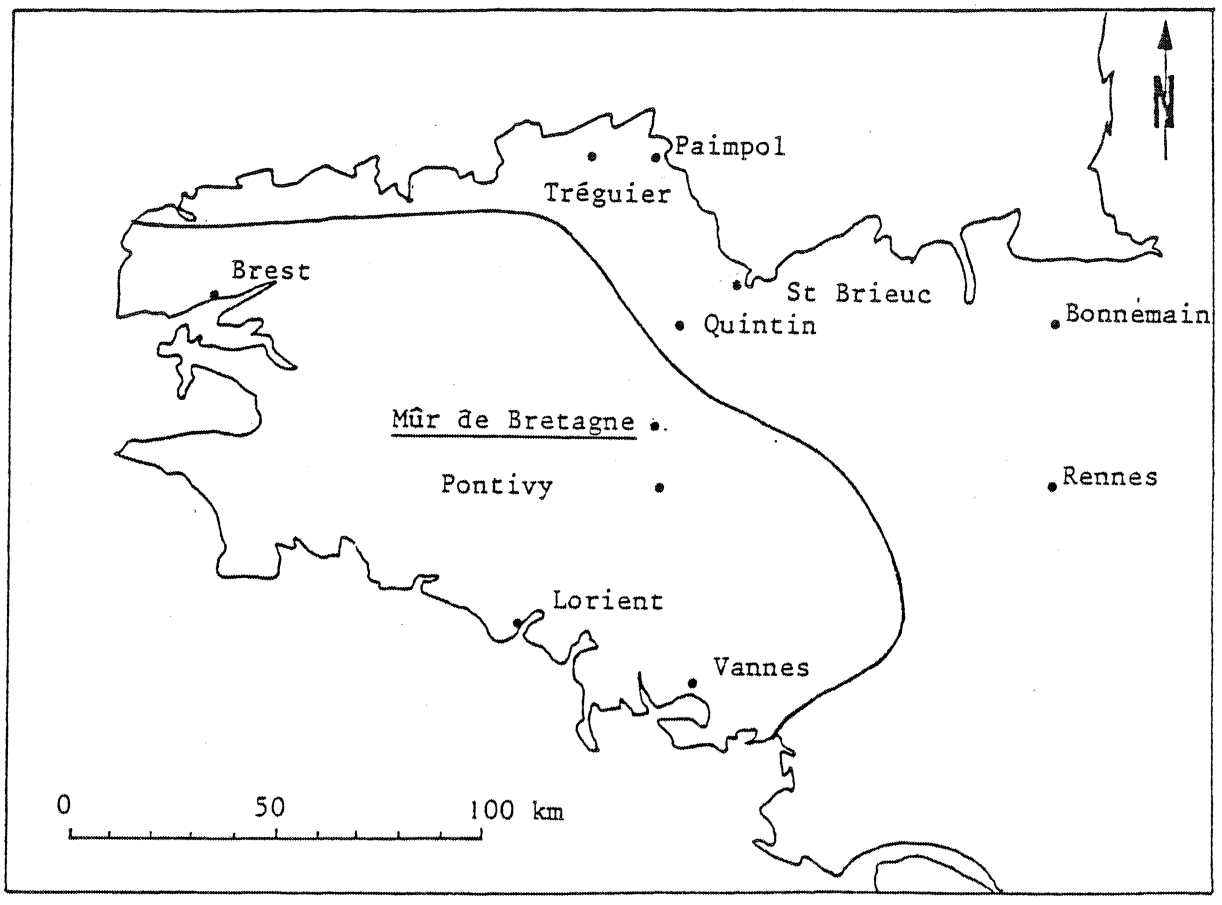
Dans ce mémoire l'expression "formation limoneuse" se rapportera à la définition géologique du terme (en excluant toutefois les altérites de schistes), l'expression "particule limoneuse" à sa définition granulométrique.

Dans le Massif Armoricain il convient de distinguer :

- d'une part les formations limoneuses dont l'histoire a été partiellement reconstituée grâce aux découvertes paléontologiques et sédimentologiques. Ces formations , épaisses d'une dizaine de mètres, sont constituées de couches de puissances variables (de la dizaine de centimètres à quelques mètres); des niveaux de loess y ont été mis en évidence. Ces formations se rencontrent essentiellement sur la côte Nord.
- d'autre part les formations limoneuses ne contenant pas de repères stratigraphiques. Ces formations couvrent de façon discontinue la moitié Nord au moins du Massif Armoricain. Leur classement granulométrique est généralement moins bon que celui des loess de la côte Nord. Leur épaisseur varie de quelques dizaines de centimètres à cinq - six mètres, la moyenne s'établissant entre un et deux mètres. Elles sont affectées par une différenciation pédologique et ont, de ce fait, été appelées "sols limoneux". Ce sont ces formations qui font plus particulièrement l'objet de ce mémoire.

Cependant les analogies existant entre ces deux types de formations ont conduit la majorité des auteurs à établir des liens génétiques étroits entre eux.

FIGURE 1 : CARTE DE SITUATION DES DIVERSES ÉTUDES.



: limite méridionale des limons selon BARROIS (1897)

• Mûr de Bretagne : région d'étude

B) ANALYSES DES TRAVAUX ANTÉRIEURS.

I - REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Dès 1848 REYNAUD décrit des formations limoneuses dans la région de Paimpol et les considère comme des formations d'eau douce. BARROIS (1897) fait une synthèse sur les limons de Bretagne dont il donne une carte de situation (fig. 1).

Il étudie leur composition lithologique grâce à des lames minces taillées dans les poupées de loess. Il note p. 38 que "des petits éclats de quartz, très petits, anguleux, à angles vifs, extrêmement aigus, forment en volume plus de la moitié de la roche. ..... ces éclats.....si caractéristiques du limon ne sont connus à cet état dans aucune roche préexistante de la région ; leur structure est en relation avec le mode même de formation du limon". Il attribue cette formation à l'action des eaux courantes qui briseraient les grains des roches mères. Il voit ces limons comme provenant d'un brassage des matériaux à l'échelle régionale, p. 42 "l'origine locale des éléments constituants prouve qu'ils n'ont pas subi de transport notable ; ils sont demeurés près de leur lieu d'origine. Ce transport a seulement été suffisant pour dénuder le centre de la Bretagne et entraîner les produits du ruissellement dans la zone littorale".

Par ailleurs il remarque p. 40 que "les poupées calcaires ne se rencontrent dans le limon du N. de Bretagne, qu'à proximité des massifs de diabase et de porphyrite, contenant des feldspaths à base de chaux". COLLIN(1913) attribue aux transgressions marines les limons de la côte Nord. Pour la première fois en 1928 MILON et DANGEARD voient dans les limons et cailloux associés le résultat de phénomènes périglaciaires, et en 1933 BAULIG propose une mise en place sous l'action du vent. CAILLEUX (1938) confirme ce mode de transport par la morphoscopie des sables et cailloux associés. BERTHOIS et MILON (1932) puis BERTHOIS (1937) mettent en évidence une origine locale et sublocale pour les limons du Trégor et de la région de Saint-Brieuc. Ces derniers sont considérés comme des formations mixtes dont les éléments empruntés aux roches qu'elles recouvrent ont pour origine des coulées de solifluxion dont certaines ont pu être remaniées par le vent. De 1948 à 1955 les études publiées dans les annales de l'Ecole Nationale d'Agriculture de Rennes, principalement sous la signature de BERTHOIS, montrent que le matériel constitutif de nombreux sols de Bretagne est limoneux. Malheureusement une étude synthétique de ce problème n'est pas abordée.

Les études récentes, à l'exception de celles concernant la Bretagne centrale, sont consacrées aux problèmes de l'origine de la fraction apportée et des corrélations entre les différentes formations limoneuses. Pour GUILCHER, GIOT et al (1969) les limons de la côte Nord sont des matériaux éoliens qui ont été collectés sur les fonds exondés de la Manche. MONNIER (1973) confirme ces hypothèses et précise que les vents ont dû souffler du Nord ou du Nord-Ouest. Il interprète la présence de matériaux issus du substrat par des phénomènes de versant et propose une stratigraphie fine de ces formations. Par contre ESTEOULE et al (1972) caractérisent ainsi les limons (p. 97) : "quel que soit le substratum sur lequel ils reposent.... Ces limons présentent du point de vue minéralogique un ensemble de traits caractéristiques qui leurs sont propres : complexe à 14 Å, présence de hornblende verte. Néanmoins l'assemblage des minéraux argileux et le cortège des minéraux lourds portent la marque du substratum. L'ensemble de ces limons a donc une origine locale

et a évolué sous des climats froids". Et PLIHON (1974) étudiant les formations meubles sur les granites de Bonnemain et Quintin explique ainsi leur génèse : (p. 128) "Les produits éoliens déposés sur des surfaces d'érosion ont ensuite été abondamment mélangés aux formations sous-jacentes (et notamment aux arènes) par des phénomènes périglaciaires auxquels s'est parfois superposé un ruissellement... . Les matériaux ainsi remaniés, dont l'origine est double, allochtone et autochtone, constituent les formations observables aujourd'hui". PLIHON constate que les sables grossiers proviennent uniquement du substrat sous-jacent, il propose également une stratigraphie des différentes venues limoneuses. Les études sur les formations du Sud de la Bretagne (MELOU 1968, GUILLAUME-BRUNO 1972) proposent des conclusions comparables ; l'étude morphoscopique des grains de sable conduit à conclure à un transport de courte distance pour ces formations.

En ce qui concerne la Bretagne centrale les premiers travaux sont ceux de COPPENET et RAMPON (1967-1969) qui montrent que, statistiquement, les caractères texturaux des matériaux limoneux sur granites et sur schistes diffèrent. Ils concluent ainsi à l'autochtonie de ces matériaux. DENOY et al (1976) mettent en évidence la dépendance étroite qui lie les sols et les roches dans la région de Mûr-de-Bretagne. Cependant LE CALVEZ et MARHIC (1976) concluent que ces mêmes sols "se développent dans un matériel où l'on distingue :

- un niveau de base d'origine sublocale remanié
- un matériel limoneux allochtone" (p. 77).

Le matériel allochtone présente des caractères comparables aux limons des autres régions du Massif Armoricain. Pour LE CALVEZ-LE BARS (1977) le matériel limoneux recouvrant les quartzites ordoviciens de la région de Mûr-de-Bretagne semble "être le résultat du mélange entre le produit d'altération des quartzites et un matériel d'apport limité à la fraction limoneuse et aux sables fins" (p. 83).

De cette revue bibliographique il se dégage deux grandes hypothèses concernant la génèse des limons bretons :

- l'une envisage une origine entièrement autochtone du matériel limoneux. Elle ne concerne que les formations limoneuses de la Bretagne Centrale (COPPENET et RAMPON, 1967).
- l'autre fait une place relativement importante à un apport de matériel, l'origine et le mode de transport de celui-ci restant discutés, la part relative de l'apport et des produits issus du substrat n'étant jamais évaluée.

II - DISCUSSION DE CES TRAVAUX.

Deux problèmes peuvent être distingués :

1° La composition des formations limoneuses : existe-t-il apport de matériel ? Si oui, quelle est son importance ?

2° L'origine de l'apport.

II - 1 La composition du matériel.

COPPENET et RAMPON (1967 - 1969), qui concluent à une origine autochtone , ont une approche statistique concernant uniquement la granulométrie des couvertures. Ils mettent ainsi en évidence que les caractéristiques texturales des formations limoneuses varient en fonction de la nature du substrat sous-jacent (granite ou schiste). Ceci ne pouvant s'interpréter que comme l'influence du substrat sur la composition des formations limoneuses, ils en déduisent l'autochtonie de celles-ci.

Les autres auteurs, qui concluent à un apport relativement important, abordent le problème par l'analyse détaillée de profils et de toposéquences dans leur cadre régional. Cette analyse leur permet d'observer, en plus de l'influence du substrat local, la présence de caractères étrangers à ce substrat. Aussi doivent-ils conclure à l'existence d'une fraction apportée et ils en déduisent que la richesse en limons des matériaux étudiés est principalement due à cet apport.

Il apparaît donc nécessaire d'aborder l'étude de ces formations par une analyse détaillée de profils et de toposéquences situés sur différents substrats. Seule cette démarche permet de mettre en évidence à la fois les caractères spécifiques dus au substrat et les caractères antagoniques existant entre celui-ci et les formations limoneuses.

Je vais maintenant analyser quels sont les éléments qui, dans les études détaillées de profils et de toposéquences, permettent la mise en évidence d'un apport de matériel.

Les éléments principaux ont été fournis par les études :

- des minéraux lourds
- de la fraction fine
- des grains du squelette

II - 1.1. Les minéraux lourds.

Les études de minéraux lourds en divers points de Bretagne ont montré que les limons renferment certaines espèces qui sont absentes des roches sous-jacentes. Parmi celles-ci il faut citer la hornblende verte. Ce minéral fragile n'existe que dans certaines roches (dolérite, quelques roches métamorphiques et intrusives) mais est présent dans l'ensemble des limons (ESTEOULE et al, 1972). Cependant, l'étude de formations d'altération (LE CALVEZ -LE BARS, 1977) qui, par l'allure de leurs courbes granulométriques, semblent surtout autochtones, a montré qu'elles renferment aussi quelques minéraux n'existant pas dans les roches sous-jacentes. Faut-il, dans les limons, associer la présence de minéraux étrangers au substrat à l'allochtonie du matériel limoneux ? Si la présence de tels minéraux était liée à une augmentation de la teneur en limon des matériaux, ces deux éléments devraient, dans chaque coupe se corréler étroitement.L'analyse de cette corrélation n'a pas été faite

dans les études sur le Massif Armoricain. Les quelques données que j'ai recueillies semblent indiquer que cette corrélation est significative ; mais l'échantillonnage est trop faible pour considérer comme probant ce résultat (tableau I).

MASSIF DE LA BOINDERIE

	% hornblende verte	% limon
Bo_7	9	39,3
Bo_5	4	66
Bo_3	2	40,7
Bo_2	0,7	17,6
Bo_{01}	0,1	12,6

MASSIF DE QUINTIN

	% hornblende verte	% limon
COUPE 1000		
1006	40	56
1007	0	18
1008	20	62,5
COUPE 1200		
1218	38	65,1
1216	34	61,2
1217	0	26
1209	18	51,6
1208	6	38,9
1207	0	<10
1204	0	9,5
1202	3	22

TABLEAU I : COMPARAISON DES POURCENTAGES DE LIMONS ET DE HORNBLENDE VERTE DANS LES FORMATIONS DE QUINTIN ET DE LA BOINDERIE
(d'après PLIHON, 1974).

II - 1.2. La fraction fine

L'étude de la fraction fine aux rayons X met en évidence un certain nombre de caractères propres aux limons, en particulier la présence d'un complexe à 14 Å dans tous les limons (ESTEOULE et al, 1972). Ce complexe à 14 Å peut être considéré soit comme un produit de la pédogénèse sous climat tempéré (CAMEZ et al 1960, CAMEZ 1962, BARSHAD 1966), soit comme un héritage quaternaire (CAMEZ et al 1960), soit éventuellement comme un apport des pollutions atmosphériques actuelles (JACKSON et al 1973, LENISCHIG et FIEDLER 1966 in YAALON et GANOR 1973).

Dans une même formation des minéraux de ces trois origines peuvent d'ailleurs coexister.

II - 1.3. Les grains du squelette

L'aspect particulier des grains constitutifs des formations limoneuses a très tôt retenu l'attention des auteurs (BARROIS 1897). Ce sont principalement des grains de quartz isodiamétriques, anguleux, de 10 à 40 microns de diamètre moyen. Les grains des schistes sont amygdaloïdes et leur petite dimension souvent n'excède pas 10 microns (MARHIC, LE CALVEZ, 1976). Par conséquent sur schistes l'étude des grains de quartz du sol permet une appréciation quantitative précise des deux types de grains et de leur origine.

La taille des grains du granite et du grès est, au contraire, supérieure à celle des limons. Une division des grains de ces roches pourrait être à l'origine des limons. L'intérêt de cette méthode reste donc limité.

II - 1.4. Conclusion

Les minéraux lourds et les grains du squelette conduisent, dans certains cas, à mettre en évidence la présence de matériel étranger au substrat et celle de matériel issu du substrat, mais aucune de ces méthodes ne permet d'évaluer les proportions des produits issus de l'altération et de ceux provenant d'un apport dans la genèse des formations limoneuses.

II - 2 Origine de la fraction apportée

Tous les auteurs qui émettent l'hypothèse d'un apport constatent cependant l'influence du substrat. Les uns en déduisent l'origine sublocale des matériaux limoneux (ESTEOULE et al 1972). Les autres pensent que l'influence du substrat est uniquement due à des phénomènes de versant (MONNIER, 1973). En s'appuyant sur l'épaisseur des limons en baie de Saint-Brieuc, et sur leurs caractères minéralogiques ils proposent les fonds exondés de la Manche comme province d'alimentation de ces limons.

Il semble nécessaire pour confirmer ou infirmer ces hypothèses de préciser, en chaque lieu, les caractéristiques de la fraction apportée :
- si ces caractéristiques sont différentes d'une zone à l'autre l'hypothèse d'une origine sublocale peut être retenue.
- si ces caractéristiques s'ordonnent à l'échelle d'une vaste région d'autres hypothèses doivent être envisagées (SCHMIDT 1942 in KRUMBEIN et SLOSS 1956, VON ENGELHARDT 1977).

C) CONCLUSION : LA DÉMARCHE D'ÉTUDE

Les études détaillées de toposéquences et de profils ont permis la mise en évidence, dans les formations limoneuses, de matériel étranger au substrat ; mais elles n'ont pas apporté la preuve qu'il existe un lien génétique entre l'apport mis en évidence et la texture de ces matériaux.

Le problème qui reste posé est donc le suivant :

- la texture de ces matériaux résulte-t-elle de l'altération du substrat, d'un dépôt ou d'une origine mixte ; dans ce cas qu'elle est la part respective de chacun des processus ?

Pour essayer de résoudre ce problème, s'appuyer, comme dans la plupart des études antérieures, sur l'analyse de toposéquences et de profils dans leur cadre régional apparaît le plus rigoureux. Dans les études concernant les formations limoneuses du Massif Armoricain les rapports existant entre ces formations et les différenciations pédologiques ont été peu détaillés. Cependant de nombreux travaux concernant d'autres régions ont mis en évidence l'importance de l'approche pédologique pour la compréhension de la genèse et de l'aspect actuel des formations limoneuses.

Aussi m'efforcerai-je de préciser, à toutes les échelles, les concordances existant ou non entre les différenciations pédologiques et les formations limoneuses.

L'étude micromorphologique sera détaillée car elle permet l'observation directe des constituants des diverses formations et de leurs rapports entre eux.

Des analyses chimiques totales ont été effectuées afin de mieux prendre en considération l'influence de l'altération dans la génèse de ces matériaux.

Une relation étroite existe entre les éléments traces contenus dans les roches et ceux contenus dans la fraction fine de leur manteau d'altération (MOSSER, 1978). Pour cette raison les éléments traces ont été recherchés dans les roches et dans la fraction fine des limons qui les surmontent. Les analyses ont été effectuées à Strasbourg par MOSSER.

Enfin, il s'est avéré nécessaire de tester l'hypothèse d'un mélange de matériaux. L'utilisation d'un modèle mathématique de mélange à deux constituants a alors été définie, ceci afin de vérifier les hypothèses nées en cours d'étude et de préciser les caractères des matériaux constitutifs des sols et les proportions relatives de ces matériaux. Le test, effectué sur un nombre restreint d'échantillons, semblant positif, il fut alors procédé à un grand nombre d'analyses granulométriques et à un complément d'analyses chimiques sur trois toposéquences développées sur les trois principaux types de roches de la région. Les analyses non quantitatives (R.X. A.T.D.) ont, à ce stade, été abandonnées.

Un second problème n'est pas résolu : l'origine de l'apport. Définir ponctuellement cet apport, ce qui nécessite en général l'utilisation du modèle mathématique de mélange, et intégrer ces résultats dans leur cadre régional semble la voie la plus rigoureuse pour aborder cette question.

DEUXIEME PARTIE

APPROCHE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DES MATERIAUX CONSTITUTIFS DES SOLS DE LA REGION DE MUR DE BRETAGNE

INTRODUCTION

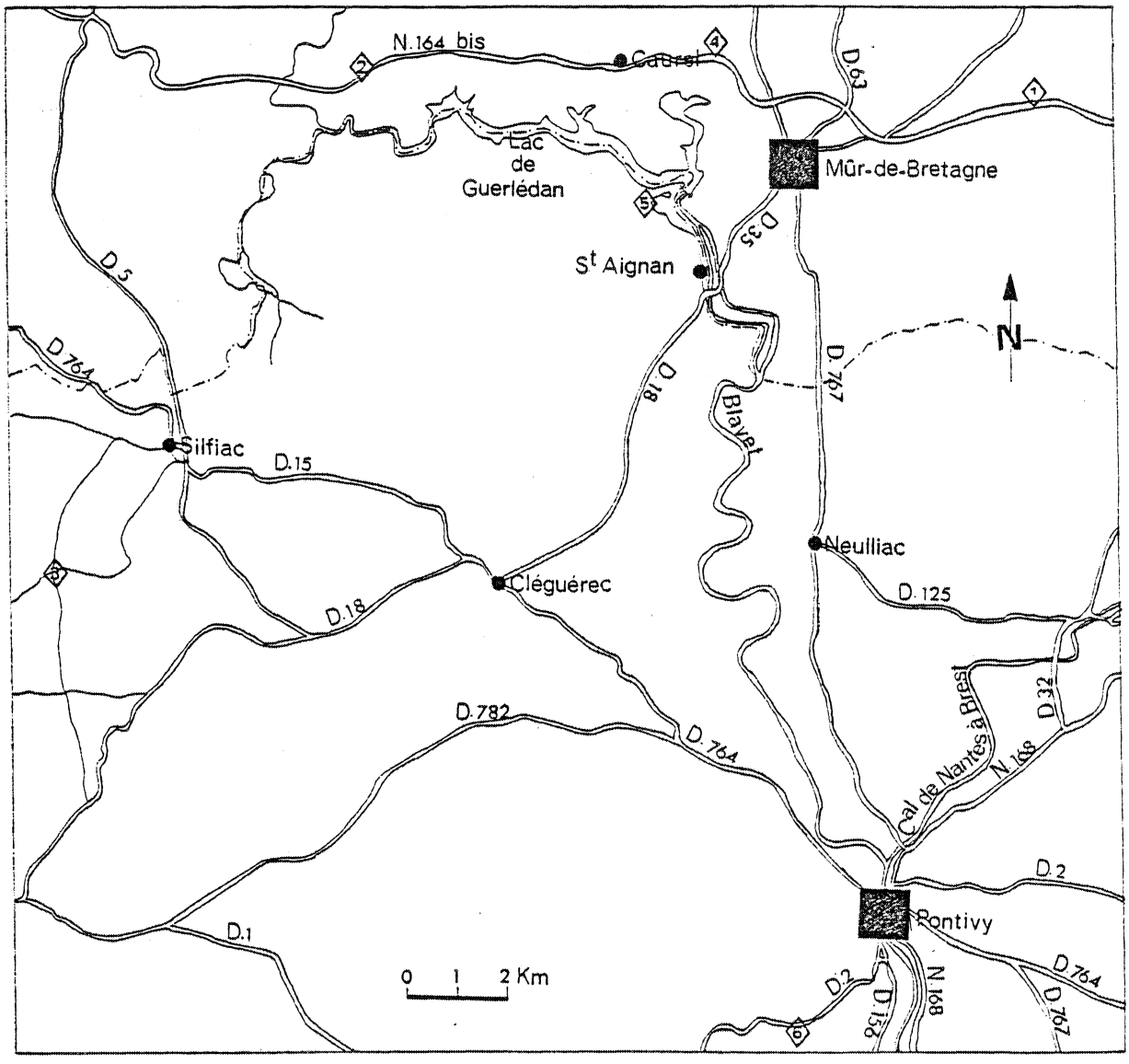
La région de Mûr-de-Bretagne constitue une zone de relief liée au Paléozoïque antécarbonifère, "un mur" séparant deux bassins : le bassin briovérien, à l'Est - Sud-Est, le bassin carbonifère de Châteaulin, à l'Ouest - Nord-Ouest (GUILCHER, 1948). La présence, dans la région Sud-Ouest de la zone d'étude, du granite de Pontivy et de ses auréoles métamorphiques complète ce schéma. Le climat est de type tempéré océanique. Les pluies, abondantes, dépassent 1000 mm/an (in DENOY et al 1976). Trois raisons principales ont conduit à retenir cette région pour servir de cadre à ce travail :

- des formations limoneuses présentant certains caractères semblables aux formations de la région de Rennes et à celles de la côte Nord-Est de la Bretagne y ont récemment été mises en évidence (LE CALVEZ et MARHIC, 1976).
- le laboratoire de Science du sol de l'E.N.S.A. - I.N.R.A. de Rennes effectue de nombreux travaux dans cette région. Ainsi la carte pédologique au 1/25.000ème, dont une partie a été levée par DENOY et al (1976) couvre actuellement plusieurs milliers d'hectares. L'étude détaillée de séquences podzoliques a été entreprise (LE CALVEZ.- LE BARS, 1977). Certains sols lessivés ont également fait l'objet d'une caractérisation détaillée (MARHIC, LE CALVEZ, 1976). La cartographie et l'étude de la génèse des sols sur granite sont en cours (CURMI, à paraître).

Ces travaux font suite à ceux de COPPENET et RAMPON (1967-1969) concernant en particulier le matériel constitutif des sols situés aux limites Nord (schistes carbonifères) et Sud (granite de Pontivy) de la zone étudiée.

La géologie de cette région est relativement bien connue. En particulier les terrains primaires ont été récemment réétudiés par SAGON (1976). C'est à ce travail, sauf indications contraires, que je ferai référence pour toute la partie géologique.

FIGURE 2 : LOCALISATION DES PROFILS ET SÉQUENCES ÉTUDIÉS (D'APRÈS LES CARTES SAINT-BRIEUC - MORLAIX ET LORIENT - VANNES AU *1/100.000 de l'Institut Géographique National*).



① Saint-Elouan

② Les Granges

③ La Croix du Roz

④ Botminy

⑤ Sainte-Tréphine

⑥ Le Sourn

—·—·—·— Limite départementale

A) CADRE DE L'ÉTUDE

I - CADRE GEOLOGIQUE

I - 1. Le substrat

I - 1.1. Les principaux faciès

a) Le Briovérien

Trois unités majeures sont généralement distinguées. Le Briovérien inférieur et le Briovérien supérieur sont essentiellement constitués de schistes gris foncé à gris clair, se débitant en petits fragments ; les rares bancs de quartzites interstratifiés sont peu épais. Ils sont séparés l'un de l'autre par des formations de conglomérats, concordants avec les autres termes de la série. Ces conglomérats sont probablement à rattacher au terme des poudingues de Gourin. Le détail de ce socle antécambrien est rendu complexe par la diversité des faciès schisteux, et la présence de très nombreux filons d'âge et de nature divers.

b) Le Paléozoïque antécarbonifère

Les terrains paléozoïques de direction structurale Est-Ouest, pendent vers le Nord, reposent en discordance sur ce socle briovérien.

- Le Cambro-trémadocien :

Le paléozoïque débute par des séries rapportées au Cambro-trémadocien. Il s'agit de quartzites phylliteux et de schistes gris vert ou lie de vin. Il existe parfois, à la base, un niveau de conglomérat. Cette formation schisteuse particulièrement puissante le long du lac de Guerlédan, dans la forêt de Quenécan (500 mètres environ) disparaît aux environs de Mûr-de-Bretagne par suite d'un contact anormal.

- l'Ordovicien :

En concordance, l'Arenigien (Ordovicien inférieur) est représenté par une épaisse (500 mètres) série de quartzites épimétamorphiques blancs, appelée "Grès Armoricain".

Les bancs épais de quartzites, qui constituent la partie inférieure de cette série, s'affinent progressivement et à la partie supérieure de la série de nombreux lits de pélites phylliteuses schistosées s'intercalent entre les bancs de quartzites (sur 150 mètres environ). Il faut noter dans cette région l'absence des "schistes intermédiaires".

Des schistes gris bleus, souvent ardoisiers, surmontent ces quartzites. Cette formation puissante de 350 mètres, d'âge Llandvirnien- Llandeillien, a été appelée "schistes d'Angers, schistes à Calymènes".

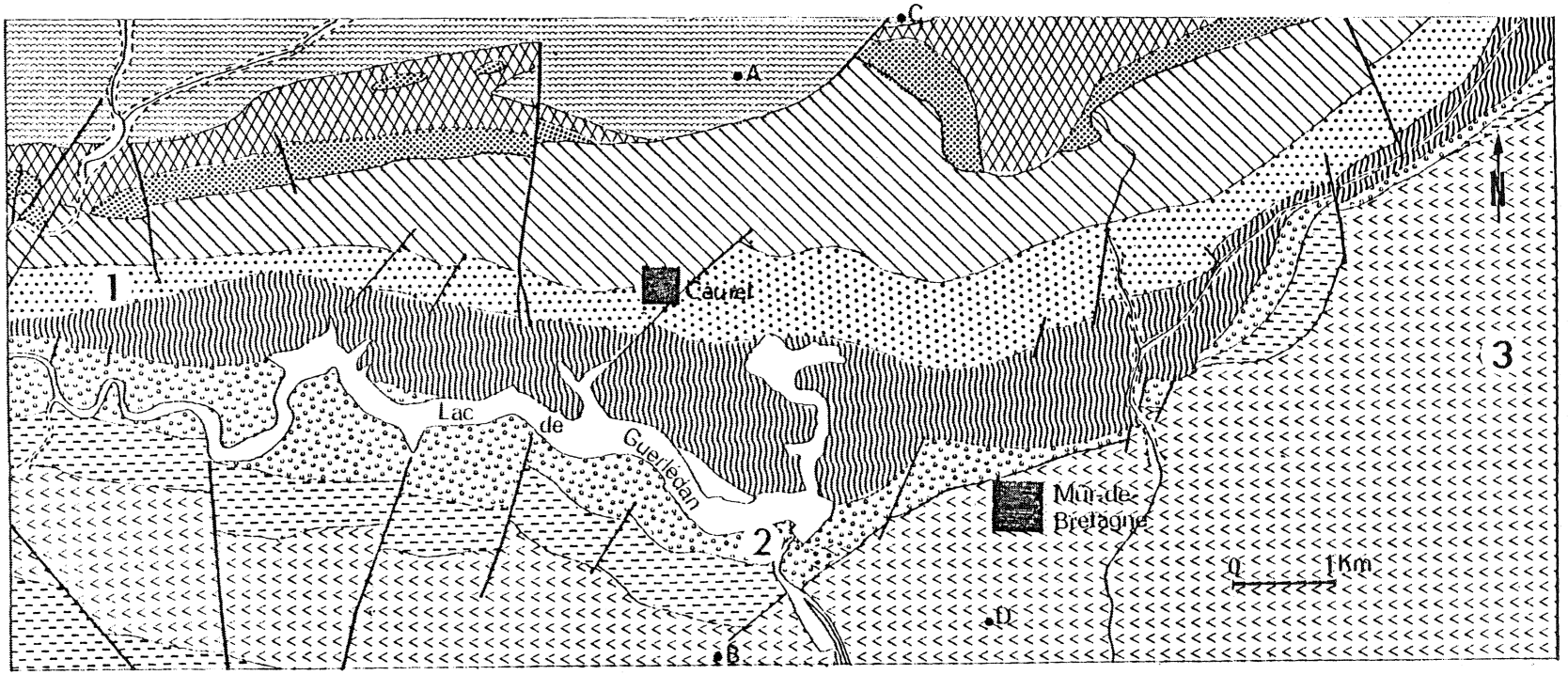
Ces schistes sont eux-mêmes surmontés d'une alternance schisto-gréseuse épaisse de 200 mètres environ et qui constitue l'Ordovicien supérieur.

- Le Silurien :

Les formations siluriennes ne sont épaisses que de trois cents mètres. Elles représentent la succession suivante :

- à la base le Valentien est représenté par une bande discontinue de quartzites gris clairs dont l'épaisseur varie de 40 à 80 mètres.
- au-dessus le Wenlockien est constitué de schistes noirs graphiteux avec de rares intercalations de quartzites, ces niveaux de 150 mètres d'épaisseur représentent l'essentiel du

FIGURE 3 : LOCALISATION GÉOLOGIQUE DES PROFILS ET SÉQUENCES SITUÉS SUR TERRAINS SÉDIMENTAIRES (D'APRÈS LA CARTE AU *1/50.000, feuille de Pontivy, SAGON 1976*).



Dinantien : schistes parfois ardoisiers

Siegénien moyen et supérieur . schistes et quartzites

Siegenien inférieur : Quartzites et grès à Orthis Monnieri

Cédinnien : schistes durs et quartzites

Silurien : schistes graphiteux et quartzites

Ordovicien moyen et supérieur ; schistes parfois ardoisiers

Ordovicien inférieur : Arenigien : Quartzites

Cambro-Trémadocien : schistes gris-vert ou lie de vin

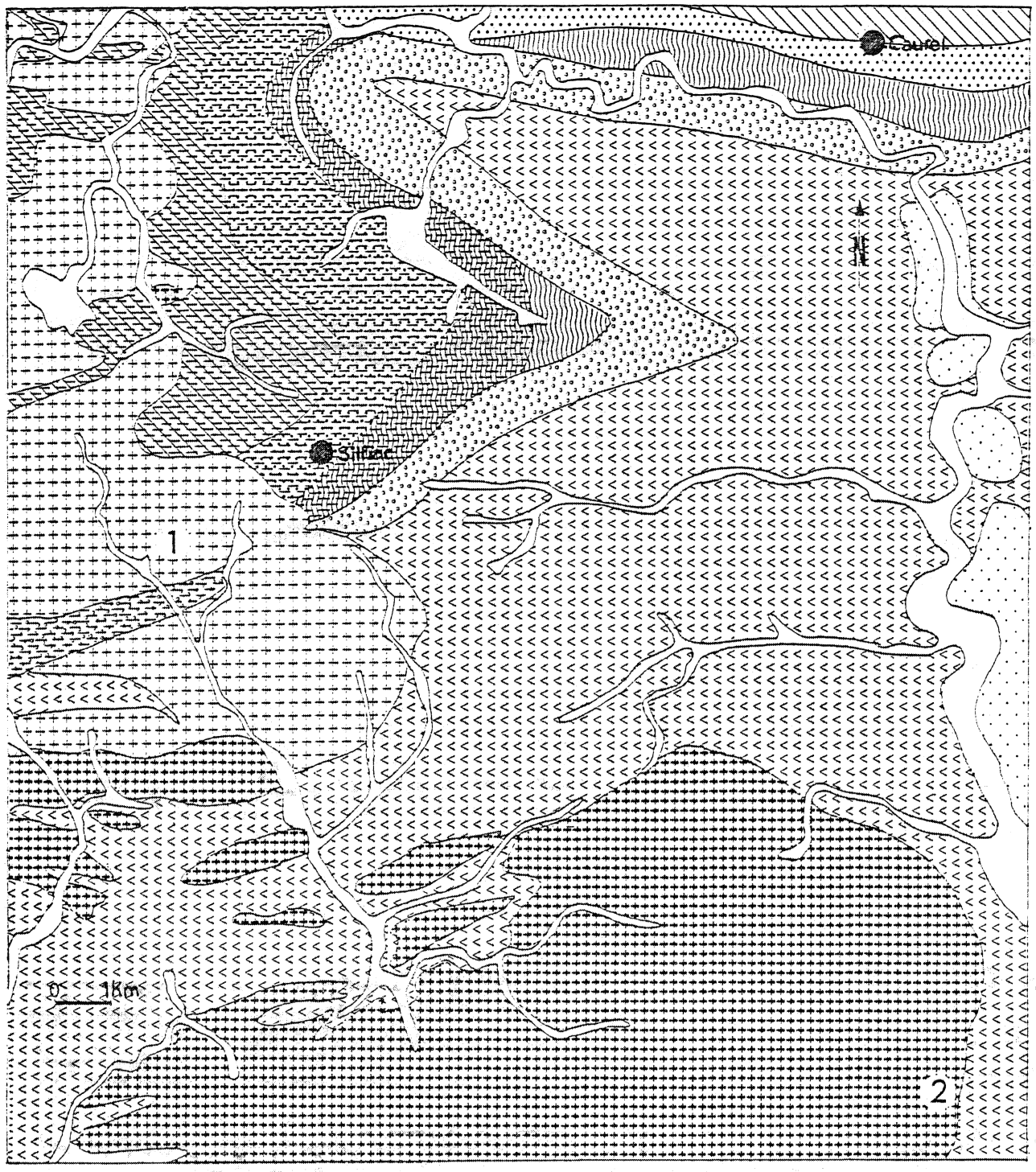
Briovérien

1 LES GRANGES

2 SAINTE-TREPHINE

3 SAINT-ELOUAN

Figure 4 : LOCALISATION GÉOLOGIQUE DES SÉQUENCES ET PROFILS SITUÉS SUR GRANITE *(d'après la feuille de PONTIVY de la carte géologique de la France au 1/80.000).*



Alluvions modernes

Sables et galets

Gedinnien : Schistes durs et quartzites

Silurien : Schistes graphiteux et quartzites

Ordovicien moyen et supérieur : Schistes parfois ardoisiers

Ordovicien inférieur (quartzites) et Cambro-Trémadocien (Schistes) indifférenciés

Briovérien

1 La Croix du Roz

2 Le Sourn

Gedinnien
Silurien
Ordovicien moyen et supérieur
} affectés par le métamorphisme de contact

granite à 2 micas

granite porphyroide

Silurien.

- au sommet une alternance de schistes et de quartzites très fins constitue le passage aux formations sus-jacentes. Cette alternance est datée du Lludlovien.

- Le Dévonien :

Le Dévonien comprend également trois termes :

- Le Gédinnien constitué de schistes et quartzites gris à gris vert, en bancs puissants, est le plus épais de ces trois termes (650 mètres). Ce terme est également appelé "schistes et quartzites de Plougastel".
- Le Siégénien inférieur constitué de quartzites et de grès ferrugineux a 200 mètres de puissance. Des carrières y ont autrefois été ouvertes pour l'exploitation du fer. Ce terme est encore appelé "Grès de Landevennec ou Grès à Platyorthis monnieri".
- au-dessus, sur 400 mètres d'épaisseur, l'alternance de schistes et quartzites correspond au Siégénien supérieur, peut-être à l'Emsien (phyllade de Villeneuve).

c) Le Carbonifère

La phase bretonne est reponsable de l'absence du Dévonien supérieur et de la discordance du Dinantien sur les formations sous-jacentes. Le Dinantien comprend trois termes :

- un complexe volcanique de base
- une série inférieure qui débute par des poudingues et se poursuit par des schistes bleus noirs où s'intercalent des roches volcaniques, des jaspes et des calcaires localement silicifiés.
- une série sédimentaire supérieure constituée de schistes et grauwacke renfermant des niveaux à plantes flottées.

L'ensemble des formations décrites a été affecté par une phase tectonique majeure comportant de nombreux épisodes : la phase Sudète. Cette phase se traduit par les plis droits, synschisteux, d'axe Est-Ouest et est accompagnée d'un métamorphisme général de moyenne pression. Il apparaît en général le sous faciès quartz, albite, muscovite, chlorite du greenschist faciès et, localement, le sous faciès quartz, albite, épidote, biotite. Cette phase a été suivie par un épisode de fracturation responsable des failles directionnelles qui s'observent principalement au contact Briovérien - Paléozoïque.

d) Le granite

Postérieurement des granites comme ceux de Rostrenen et de Pontivy se sont mis en place entraînant une métamorphisation des terrains situés à leur contact.

Le granite de Pontivy est un granite à deux micas, dont le grain est variable (in HAMEURT, 1961). Dans la zone d'étude seuls affleurent les granites à grains grossiers et moyens : les grains de la taille des sables sont toujours bien visibles, à l'oeil nu.

I - 1.2. Les minéraux lourds

L'étude de la génèse d'un matériel meuble nécessite de comparer le cortège des minéraux lourds de ce matériel et celui du substrat sous-jacent. Le tableau II synthétise les renseignements fournis par la thèse de SAGON (1976) :

- La hornblende, minéral caractéristique des limons bretons (ESTEOULE et al, 1972) a été

NIVEAU STRATIGRAPHIQUE / MINÉRAUX LOURDS	BRIOVÉRIEN	CAMBRO - TRÉMADOCIEN	ORDOVICIEN INFÉRIEUR	ORDOVICIEN MOYEN ET SUPÉRIEUR	SILURIEN	DÉVONIEN	DINANTIEN	VOLCANISME DINANTIEN	FILONS DE DIABASE À GRAINS MOYENS	MÉTAMORPHISME DE CONTACT DU GRANITE DE ROSTRENEN			
										ORDOVICIEN	GÉDINNIEN	COBLENCIEN	DINANTIEN
Zircon	●	●	●	●	●	●	●	■					
Rutile	●	● ■	● ■	● ■	● ■	● ■	● ■						
Anatase					●	●							
Sphène								■					
Tourmaline	● ■	● ■	●	●	● ■	●	● ■				■		
Grenat										■	■	■	
Augite													
Staurotide								■				■	
Andalousite										■	■	■	■
Sillimanite										■	■	■	
Disthène													
Epidote				●	●	●		■	■				
Hornblende verte									■				
Hyperasthène													
Glaucophane													
Apatite							●	■	■				
Brookite					●								
Actinote								■					
Trémolite								■					
Ilménite								■					
Cordiérite													

● *Minéraux détritiques* ■ *Minéraux néoformés*

TABLEAU II : TABLEAU DE RÉPARTITION DES PRINCIPAUX MINÉRAUX LOURDS
DANS LES ROCHES DE LA RÉGION DE MÛR-DE-BRETAGNE *(d'après J. P. SAGON, 1976).*

observée dans une zone de l'auréole de contact du granite de Rostrenen et dans des filons de diabase à grain moyen.
- Le zircon existe surtout à l'état de grains détritiques. Des zircons automorphes ne se rencontrent que dans le volcanisme dinantien (Nord de la zone d'étude).
- Le glaucophane n'a été observé dans aucune roche.

I - 2. Quelques critères de reconnaissance des formations d'altération

Dans les formations meubles qui recouvrent les roches il faut distinguer, d'une part les formations pour lesquelles il est relativement facile de préciser les liens de parentés avec les substrats sous-jacents (arène, altérite), d'autre part celles dont les liens de parentés avec les substrats sont plus difficiles à définir.

Le rappel des principales caractéristiques des premières est nécessaire, afin d'éviter toute répétition dans la discussion sur l'origine des formations limoneuses et limono-sableuses.

I - 2. 1. L'arène granitique

L'arène granitique (Le Sourn - La Croix du Roz), de couleur grise, localement rouille, présente une texture sableuse et, par endroit, la structure du granite est conservée. Généralement les sables grossiers prédominent, des grains de quartz laiteux ou translucides, résistants, des feldspaths blanchâtres et farineux et des plages de biotites plus ou moins friables en constituent les principaux éléments ; tous ces minéraux sont visibles à l'oeil nu. Les graviers sont constitués de fragments de granite et de quartz. Des filons, principalement de quartz, de quelques centimètres à une ou deux dizaines de centimètres d'épaisseur parcourent cette arène. La maille de ces filons est variable.

L'aspect concave de la courbe granulométrique cumulative des fractions inférieures à deux millimètres est particulièrement caractéristique. Le grain moyen se situe toujours dans les sables ; pour les échantillons analysés il est supérieur à 200 microns.

I - 2.2. L'altération des quartzites et grès

Contrairement au granite les quartzites constituent rarement des ensembles homogènes. Il s'agit généralement d'une alternance de niveaux de quartzites et de niveaux schisteux.

a) Les quartzites ordoviciens

L'altération des bancs peut se suivre dans les carrières de Sainte-Tréphine et surtout de Trévéjean. Les bancs de quartzites se désagrègent et le matériel d'altération se présente comme une masse blanchâtre, de texture sableuse assez fine, essentiellement constituée de grains de quartz. Le matériel issu des joints et des bancs schisteux se mélange rapidement à celui issu des bancs de quartzites. Ceci explique en partie la richesse relative de ces formations en matériel inférieur à 20 microns (de 20 à 25% du matériel total).

D'autre part, les grains de quartz, denticulés dans les quartzites sains, sont plus émoussés dans les niveaux altérés ; aussi est-il raisonnable de penser que ces petites

"dents" fournissent également une partie des particules fines du produit d'altération.

Comme pour l'arène granitique la courbe granulométrique cumulative présente un aspect concave caractéristique : le grain moyen est de l'ordre de 100 microns.

b) Les quartzites et grès ferrugineux du Siegenien inférieur (grès à Platyorthis monnieri)

De nombreuses coupes existent, en particulier quelques anciennes carrières de fer non comblées. L'altération de ces roches donne un matériau sableux de teinte ocre jaune à ocre rouge, parfois blanche, souvent bariolée, qui pourrait éventuellement, être confondus avec les sables pliocènes.

c) Les schistes et quartzites du Dévonien (schistes et quartzites de Plougastel)

Ces schistes et quartzites constituent une zone de relief. Je n'ai jamais pu établir de critère de reconnaissance de terrain d'une formation d'altération qui puisse, sans doute raisonnable, leur être attribuée. Ceci me semble en partie lié au fait que les grains de ces quartzites sont comparables à celui des formations limoneuses.

I - 2.3. Les schistes

a) Caractères généraux

Les schistes sont principalement constitués de grains de quartz allongés dans le sens de la schistosité et de micas blancs. Ces grains sont de petites tailles. Les produits d'altération présentent des caractéristiques diverses en fonction de l'intensité de l'altération.

- Les faciès peu évolués :

Dans les stades peu évolués, les fragments de schistes sont très nombreux. Sur le terrain il est difficile de différencier, par la texture, le matériel fin entre ces fragments de celui des formations limoneuses. Aussi en l'absence d'arguments d'ordre architectural (passage progressif entre le schiste et le produit d'altération, structure de la roche conservée) ou de couleur (ces formations sont lithochromes ou la couleur est fortement marquée par les différents oxydes) il ne sera pas émis d'hypothèses sur leur origine lors de l'étude de terrain.

La courbe granulométrique est soit rectiligne soit convexe pour les éléments inférieurs à 100 microns puis concave pour les éléments compris entre 100 et 200 microns.

- Les faciès évolués :

Dans les stades d'altération poussés les fragments de schistes sont rares (moins de 5% du volume de la formation). La texture du matériel est très fine ; les fractions inférieures à 20 microns constituent souvent plus de 50% de la formation. Ceci confère un toucher gras, talqueux particulièrement caractéristique. Les fractions sableuses sont essentiellement constituées de fragments de schistes, les grains de quartz isolés y sont rares voire absents.

La courbe granulométrique cumulative est hyperbolique, le grain moyen de 10 - 15 microns. Les analyses chimiques, effectuées la fois dans les schistes sains et dans les

formations d'altération, ne font apparaître aucune évolution sensible des proportions des différents éléments entre-eux (sur les chiffres bruts). Ceci est conforme à ce qui a été observé ailleurs (DEJOU et al. 1970).

b) Caractères particuliers

Le matériel d'altération des schistes briovériens est, en général, de couleur claire, gris à gris-bleu, à l'opposé de celui des schistes siluriens et carbonifères dont les couleurs sont foncées. Sur le bord de la Nationale 164 bis au lieu-dit "Les Granges" les schistes et quartzites siluriens altérés, à structure conservée, présentent des couleurs vives, blanches, rouges, violettes. Ceci rappelle les faciès des altérations schisteuses tertiaires décrits dans différents lieux de Bretagne.

Notons que, à l'affleurement, les schistes ardoisiers de l'Ordovicien apparaissent toujours sains.

II - QUELQUES ASPECTS DE LA GEOMORPHOLOGIE

La géomorphologie est différente dans les quatres zones précédemment définies. Dans les bassins schisteux (Briovérien et Carbonifère) comme sur granite, les variations fines de faciès du substrat sont difficilement cartographiables ; aussi est-il délicat d'établir les relations existant entre la géomorphologie et la nature du substrat dans ces zones. Dans la zone du Primaire antécarbonifère, au contraire, ces relations apparaissent plus clairement. Pour cette raison l'étude de cette dernière région sera plus détaillée.

II - 1. La zone du Primaire antécarbonifère (fig. 5)

Dans la région du Primaire antécarbonifère l'ossature du passage est donnée par deux lignes de crêtes de direction Est-Ouest, séparée par une vallée. A ceci il faut associer les pentes qui relient ces lignes de crêtes au Briovérien au Sud et au Carbonifère au Nord.

La vallée principale correspond à l'alternance schisto-gréseuse de l'Ordovicien supérieur et aux schistes siluriens.

Au Nord de cette vallée la ligne de crête constituée des "schistes et quartzites de Plougastel" est très escarpée ; la roche affleure localement. Le flanc septentrional reliant cette ligne de crête au bassin carbonifère pend régulièrement d'environ un à cinq pour cent sur un à trois kilomètres. Le flanc méridional formé de schistes siluriens est plus court, marqué par une forte rupture de pente voire un abrupt, à la limite entre les schistes siluriens et les quartzites gédinniens. Pour les plus forts dénivellés l'altitude passe sur moins d'un kilomètre, de 300 à 120 mètres.

Dans la zone Sud il convient de distinguer les bords du lac de Guerlédan du reste du paysage. Au bord du lac les pentes associées aux quartzites ordoviciens et aux schistes et quartzites cambro-trémadociens sont fortes à très fortes, localement la roche affleure. Ailleurs les schistes et quartzites cambro-trémadociens sont absents, les reliefs sont peu accentués, les pentes inférieures à cinq pour cent.

Le schéma est modifié par les nombreux talwegs de direction Nord-Sud. Ces talwegs sont dans l'ensemble liés aux failles de même direction. Les pentes, parfois fortes (par exemple les gorges du Daoulas), de ces talwegs sont généralement convexes. Les têtes de talwegs sont souvent en "spatules". Lorsque les talwegs du versant Sud et du versant Nord s'anastomosent ils forment une sorte de "selle de cheval".

II - 2. Les autres zones

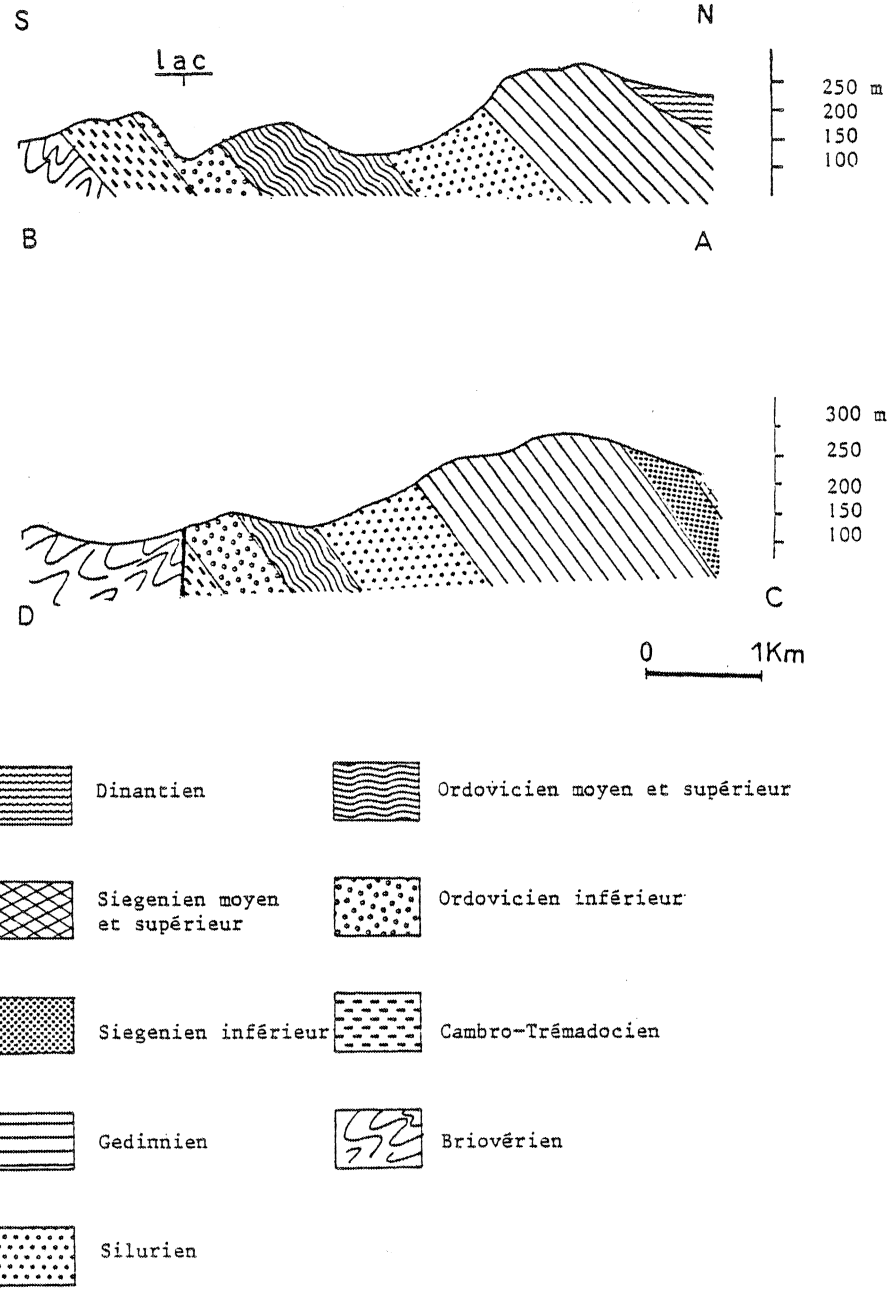
Dans les autres zones les reliefs sont beaucoup moins accentués que sur le Primaire.

Dans les bassins schisteux les pentes sont relativement douces et longues. Les très larges vallées constituent les axes du paysage au contraire de la zone primaire où ce sont les deux lignes de crêtes qui constituent l'ossature du paysage. Quelques buttes se détachent ; elles correspondent à des pointements du paléozoïque antécarbonifère dans le bassin carbonifère, à des grès ou des poudingues de Gourin dans le bassin briovérien.

Les terrains granitiques apparaissent, quant à eux comme une série de "plateaux" rognés par de nombreux talwegs. La maille de ces talwegs est variable. Cette variation

entraîne le contraste entre des zones à prédominance de "plateaux" et des zones à prédominance de pentes. Le système de ces pentes est complexe ; aucune orientation privilégiée ne se dégage ; leur longueur et leur inclinaison sont variables. Le seul trait commun qui peut être retenu est leur allure générale : convexes dans leur partie amont, elles deviennent concaves vers l'aval.

Figure 5 : DEUX COUPES REPRÉSENTATIVES DE LA ZONE SÉDIMENTAIRE
(voir localisation figure 3).



III - LES GRANDS ENSEMBLES PEDOLOGIQUES

Quatre ensembles de sols peuvent être distingués :

- les sols peu évolués
- les sols à développement de surface non podzolique
- les sols à développement de surface podzolique
- les sols hydromorphes

✪ Les sols peu évolués :

Ces sols, peu épais, (moins de quarante centimètres), de type ranker, se localisent dans les hauts de pente et les zones escarpées. Parfois un horizon (B), très mince (dix centimètres), tend à se développer entre l'horizon A_1 et la roche.

✪ Les sols à développement de surface non podzolique :ceux correspondent à l'ensemble des sols cultivés de la région. Sous l'horizon labouré, un ou deux horizons principaux se développent. Le matériel constitutif de ces sols est à dominante limoneuse.

Sol brun : sous l'horizon A_p il n'existe qu'un seul horizon, de couleur jaunâtre (10 à 7,5 Y R 5/6), dont la structure subpolyédrique est peu nette : horizon structural (B).

Sol brun acide : l'horizon diagnostique est plus orangé que le précédent (10 Y R 5 ou 6/8) et sa structure est grumeleuse très très fine dite soufflée ou fluffy (AUROUSSEAU, 1976). Le pH FNa est supérieur à 10 parfois à 11. Après avoir été appelé A_3 (AUROUSSEAU, 1976, DENOY et al 1976, LE CALVEZ - LE BARS, 1977) il est maintenant dénommé ALE car présentant à la fois des caractères d'aluminisation et d'éluviation (AUROUSSEAU et al, 1978).

Sol brun faiblement lessivé et sols bruns lessivés : sous l'horizon cultivé il existe un couple d'horizons caractéristique :

- un horizon jaune (10 Y R 6/6) dont la structure peu nette est subpolyédrique, localement massive ; en lame mince les éléments du squelette sont à bords nets, ont un aspect lavé. Cet horizon peut être appelé A_2 ou E. Notons qu'en position équivalente peut s'observer l'horizon ALE.

- En dessous un horizon caractérisé par la présence de revêtements argilo-ferrugineux et d'une structure assez nette, de type polyédrique. Souvent les caractères de tassement sont importants et une structure lamellaire existe. L'intensité du tassement n'apparaît pas liée à celle de l'accumulation. Il s'agit d'un horizon Bxt ou XT. A l'échelle de la séquence, les caractères d'éluviation et d'illuviation se développent progressivement de l'amont vers l'aval. L'indice d'entraînement de l'argile est compris entre 1 et 1,7 ; il n'atteint que très rarement 2 ; ceci correspond à une migration absolue d'environ 5% d'argile entre l'horizon éluvial et l'horizon illuvial.

Des phénomènes d'hydromorphie et de dégradation peuvent intervenir soit à la limite entre l'horizon éluvial et illuvial soit à la base du profil lorsque le substrat est relativement imperméable.

✪ Les sols à développement de surface podzolique : Une séquence de ce type de sol à fait l'objet d'une étude détaillée (LE CALVEZ -LE BARS, 1977) . Ces sols ne se développent que sur les quartzites ordoviciens et les schistes et quartzites cambro-trémadociens. Sous

l'horizon B_S deux horizons principaux existent : un horizon à caractère d'éluviation et d'aluminisation (A L E), le caractère d'aluminisation diminuant progressivement en s'éloignant du B_S ; un horizon à caractère de tassement et d'accumulation d'argile (XT). Vers l'aval, en s'éloignant des quartzites ordoviciens, l'épaisseur des horizons podzoliques diminue rapidement, leurs caractères se transforment, et, à la limite des horizons ALE et XT les caractères éluviaux deviennent plus marqués. Ces deux derniers horizons se développent dans la partie avale, dans un matériel limoneux.

Les horizons de surface (podzol) sont appelés épipédon, les horizons de profondeur hypopédon.

Comme dans l'ensemble précédent des phénomènes d'hydromorphie peuvent perturber cette séquence.

- Les sols hydromorphes

Ces sols sont développés dans les talwegs et les vastes fonds de vallées de la zone carbonifère. L'origine du matériel constitutif de ces sols apparaît particulièrement complexe. Il existe probablement à la fois des colluvions provenant des deux versants qui bordent le talweg, et des alluvions comme en témoigne la nature des éléments grossiers et la morphologie, généralement plane, de ces vallées.

— Seuls les matériaux constitutifs des sols des trois premiers ensembles vont être étudiés.

Remarque : Pour mieux saisir la répartition de ces différentes unités de sols le lecteur a intérêt à se reporter aux figures qui illustrent les études détaillées (p.32, 34 et 35).

B) APPROCHE DES PROBLÈMES PRINCIPAUX

I - INTRODUCTION

Quelle que soit la nature des substrats et l'orientation des versants, on observe :

- l'absence ou la présence sporadique, en poches, des formations limoneuses sur les pentes fortes ou convexes, sur les sommets de butte et les lignes de crêtes
- la présence de formations limoneuses dont l'épaisseur, assez constante sur les plateaux (de l'ordre du mètre), croît régulièrement de l'amont (quelques dizaines de centimètres) vers l'aval (deux mètres au maximum) sur les pentes douces et moyennes.

Deux séquences ont fait l'objet d'une étude pédologique détaillée. L'une se situe au Sourn sur granite (CURMI, thèse en cours), l'autre à Sainte-Tréphine sur quartzites ordoviciens (LE CALVEZ-LE BARS 1977). La présentation d'une partie des résultats de ces études, complétée de quelques observations, va permettre de dégager les principaux problèmes posés. Ceux-ci seront ensuite abordés un par un.

II - LES SEQUENCES ETUDIEES.

II - 1. La séquence du Sourn (fig. 6)

Cette séquence étudiée dans une petite carrière qui se situe à la sortie du bourg "Le Sourn" (56), au bas de la D. 2 et entame le flanc d'une "colline" constituée par le granite de Pontivy. La pente, orientée N.E. - S.O., est régulière, de 5° environ. Une petite dépression d'axe 170° nait à quelques mètres au N. O. de la carrière et la recoupe entièrement. L'arène est épaisse et le granite sain n'est visible que dans la zone amont de la séquence. La partie supérieure de l'arène à glisser le long de la pente comme l'atteste le fauchage important des raies et diaclases.

L'ensemble arène-granite est recouvert par un matériel limoneux à limono-sableux qui constitue "la formation limoneuse".

Dans la partie amont, cette formation est localisée dans des poches dont la profondeur peut atteindre 1,70 m. Dans celles-ci, sous l'horizon labouré, il a été décrit un horizon ALE surmontant en horizon tassé XT alors qu'entre ces poches, seul l'horizon ALE a été observé (CURMI). Quelques cailloux légèrement émoussés soulignent parfois la base des poches.

Vers l'aval, la formation limoneuse devient continue et s'épaissit jusqu'à atteindre 2 m ; les caractères éluviaux et illuviaux deviennent importants et, les phénomènes d'hydromorphie et de dégradation marquent fortement le profil, sans toutefois masqués les autres caractères.

Pour compléter cet aperçu, notons dans une carrière située de l'autre côté de la route, la présence, en haut de pente, sous l'horizon Ap, des horizons suivants :

- un horizon ALE dont le matériel constitutif est limoneux

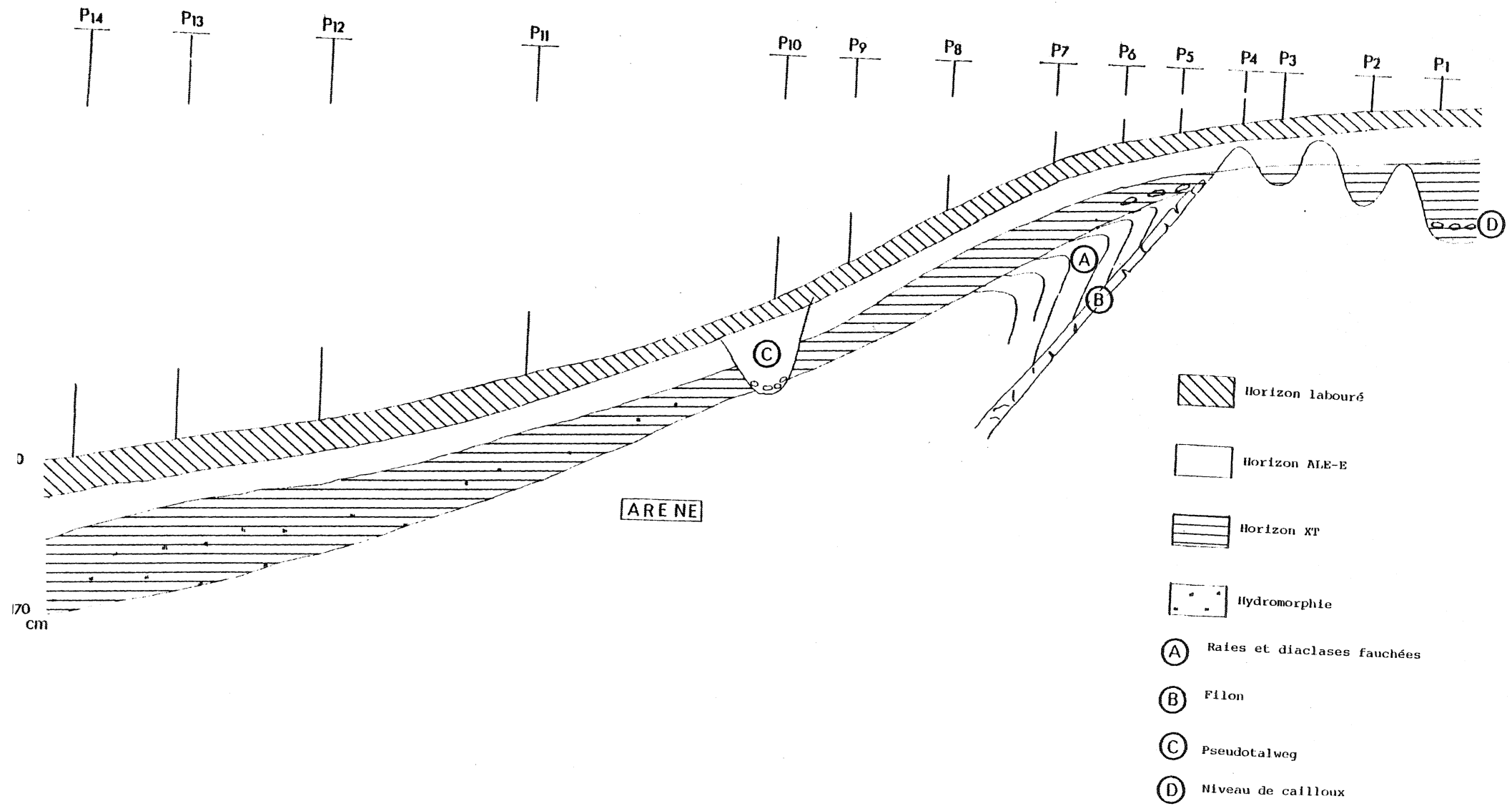


FIGURE 6: LE SOURN: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA SEQUENCE

LOCALISATIONS DES PROFILS

- un horizon rouge, riche en revêtements, dont la texture est proche de celle de l'arène sous-jacente mais qui s'en distingue par sa structure massive à éclats anguleux et son aspect tassé : XT .

II - 2. La séquence de Sainte-Trévhine (fig. 7 et 8)

L'étude pédologique de cette séquence a été effectuée dans deux petites carrières situées à proximité du barrage de Guerlédan (LE CALVEZ-LE BARS, 1977).

La plus grande de ces carrières est ouverte à la base de la formation des quartzites ordoviciens (grès armoricain). La roche en place n'est visible que dans la partie Nord de la carrière principale, dans la partie Sud, elle est masquée par un matériel hétérogène tantôt limoneux, tantôt sableux. Dans la seconde carrière, cette roche est masquée par une épaisse formation limoneuse à blocs de quartzites.

Dans la carrière principale, sous un épipédon podzolique, deux horizons majeurs se développent :

- un horizon ALE
- un horizon tassé, présentant des caractères accumuliques : XT

Les caractères d'éluviation et d'illuviation semblent croître de l'amont vers l'aval. La présence d'un niveau tassé hydromorphe rend plus complexe ce schéma.

Dans la seconde carrière les horizons podzoliques disparaissent progressivement. Les rapports entre les matériaux limoneux et les matériaux sableux, directement issus de l'altération des quartzites sont résumés dans la figure 8. La comparaison de ce schéma et de la coupe pédologique (fig. 7) nous montre que si la podzolisation paraît liée à une certaine richesse en sables, les horizons ALE et XT se développent quelle que soit la granulométrie du matériel.

Cette étude présente également un profil situé à l'Anse de Sordan à quelques kilomètres à l'Ouest de cette séquence. Dans ce profil sous l'horizon cultivé se développent un horizon ALE puis deux horizons XT et l'horizon C. La texture du matériel constitutif des trois premiers horizons est à dominante limoneuse ; ils constituent donc la formation limoneuse. La texture du matériel constitutif du second horizon XT et de l'horizon C sous-jacent est sablo-limoneuse

II - 3. La séquence de Saint-Elouan

a) Présentation et rappel (LE CALVEZ et MARHIC, 1976)

Cette séquence, dont une partie a été dégagée par des travaux routiers, est située au bord Nord de la R. N. 164 bis. Elle est établie selon une direction Est-Ouest sur une butte qui atteint l'altitude de 183 mètres à 500 mètres au Nord-Est, et présente la succession d'une pente douce et d'une pente convexe.

Le substrat est constitué de schistes briovériens de faciès et de degré d'altération variables avec, à l'extrémité Est de la tranchée de la route, des interstratifications de bancs de poudingues et de micropoudingues. Des filons de quartz sont injectés dans la schistosité, ils représentent au maximum 10% du volume de la roche. Quelques

S N

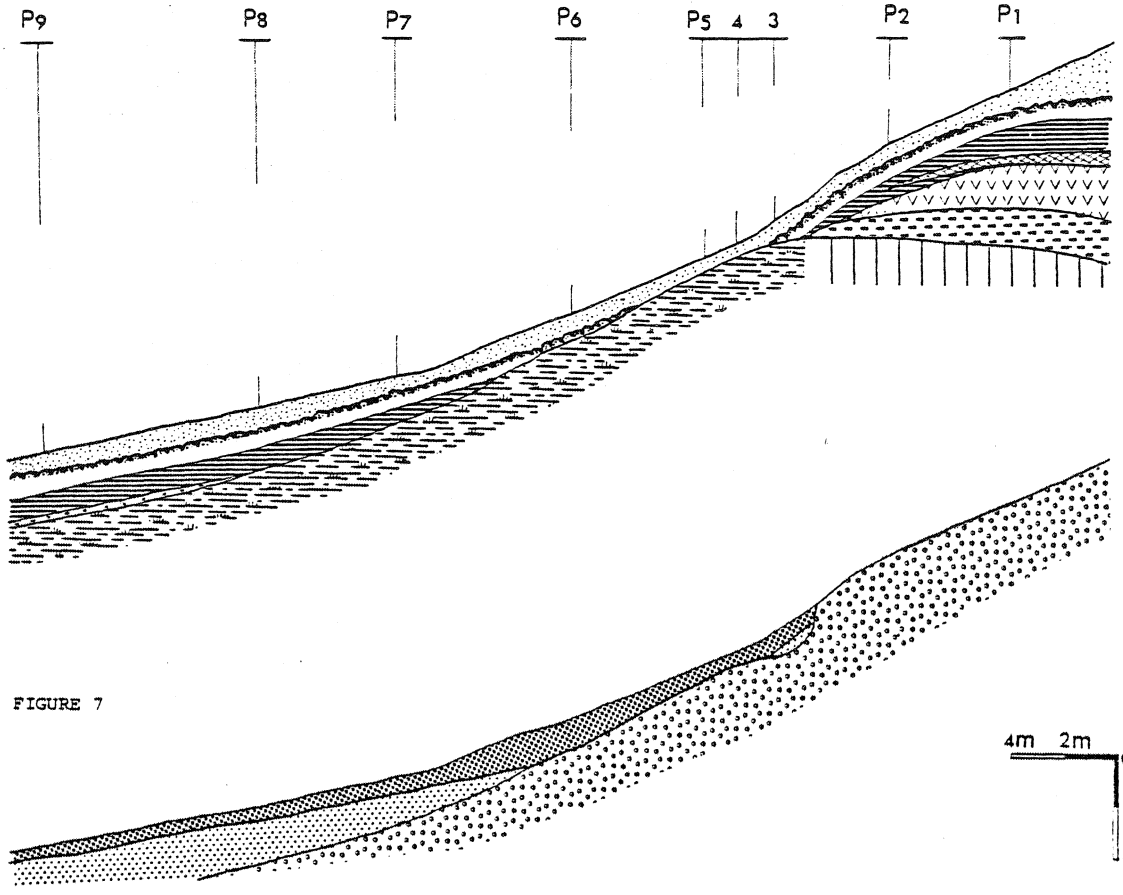


FIGURE 7

FIGURE 8

Podzol
A L E
X T
X G
Cg
Banc de schistes altérés
Banc de quartzite altéré
Banc de quartzite altéré
R.
$1,5 < \frac{L}{S} < 2,5$
$\frac{L}{S} > 2,5$
$0,5 < \frac{L}{S} < 1,5$

FIGURES 7 ET 8 : SAINTE-TRÉPHINE : COMPARAISON DE LA NATURE ET DE LA TEXTURE DES HORIZONS PÉDOLOGIQUES.

(D'après LE CALVEZ- LE BARS Y. 1977)

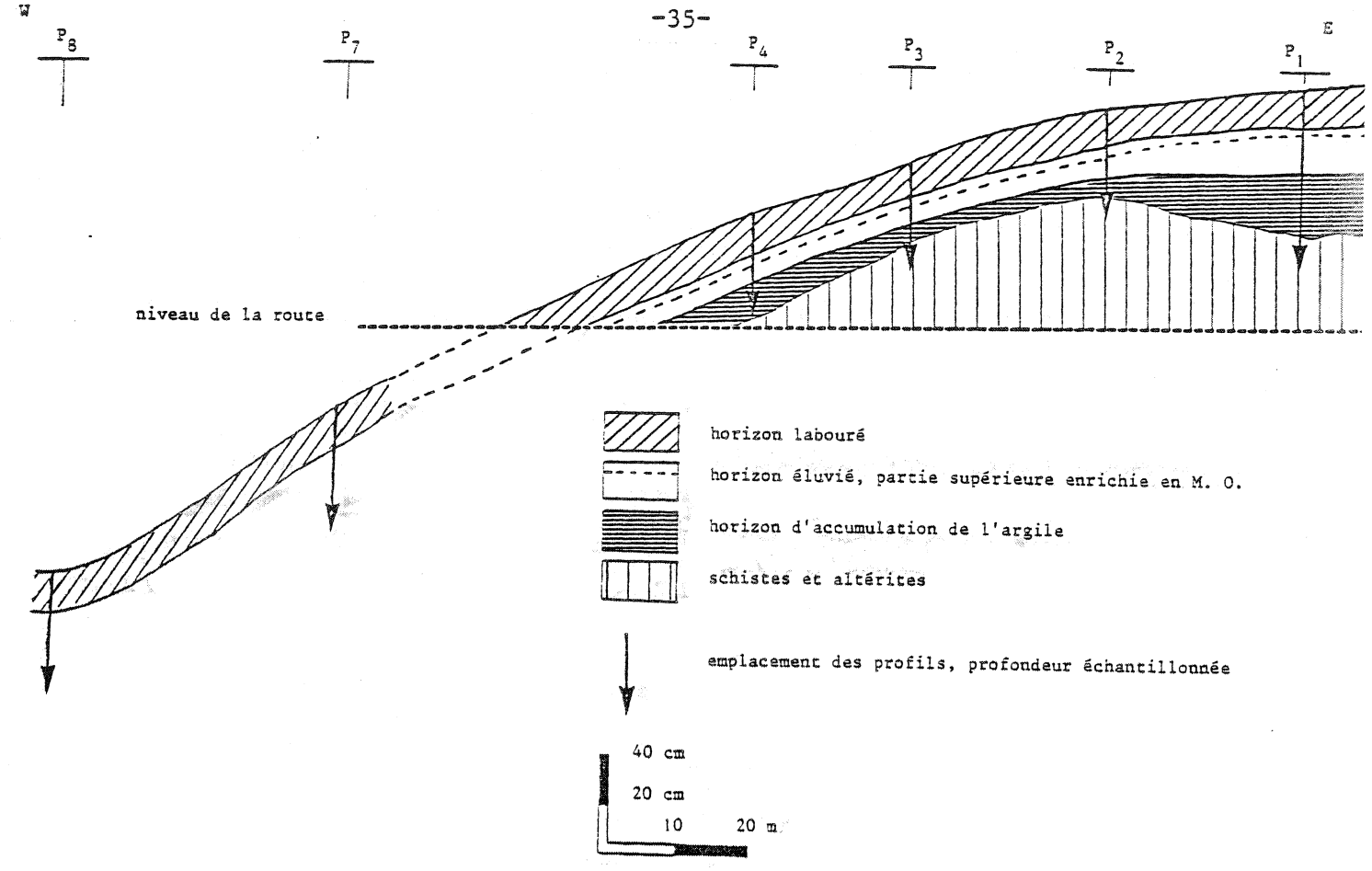


FIGURE 9: SAINT-ELOUAN : COUPE PÉDOLOGIQUE, EMPLACEMENT DES PROFILS.

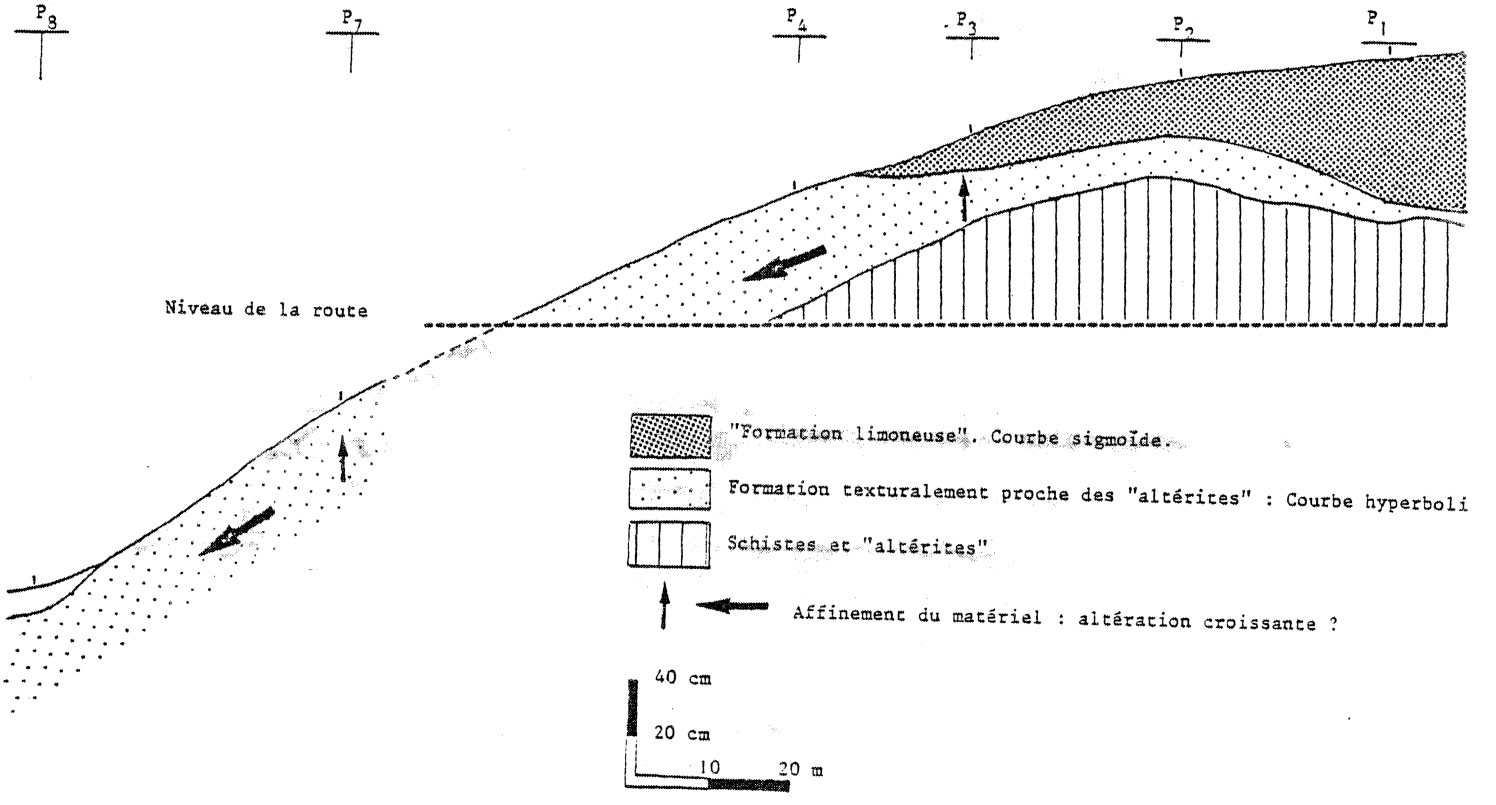


FIGURE 10: SAINT-ELOUAN : RÉPARTITION DES MATÉRIAUX (INTERPRÉTATION).

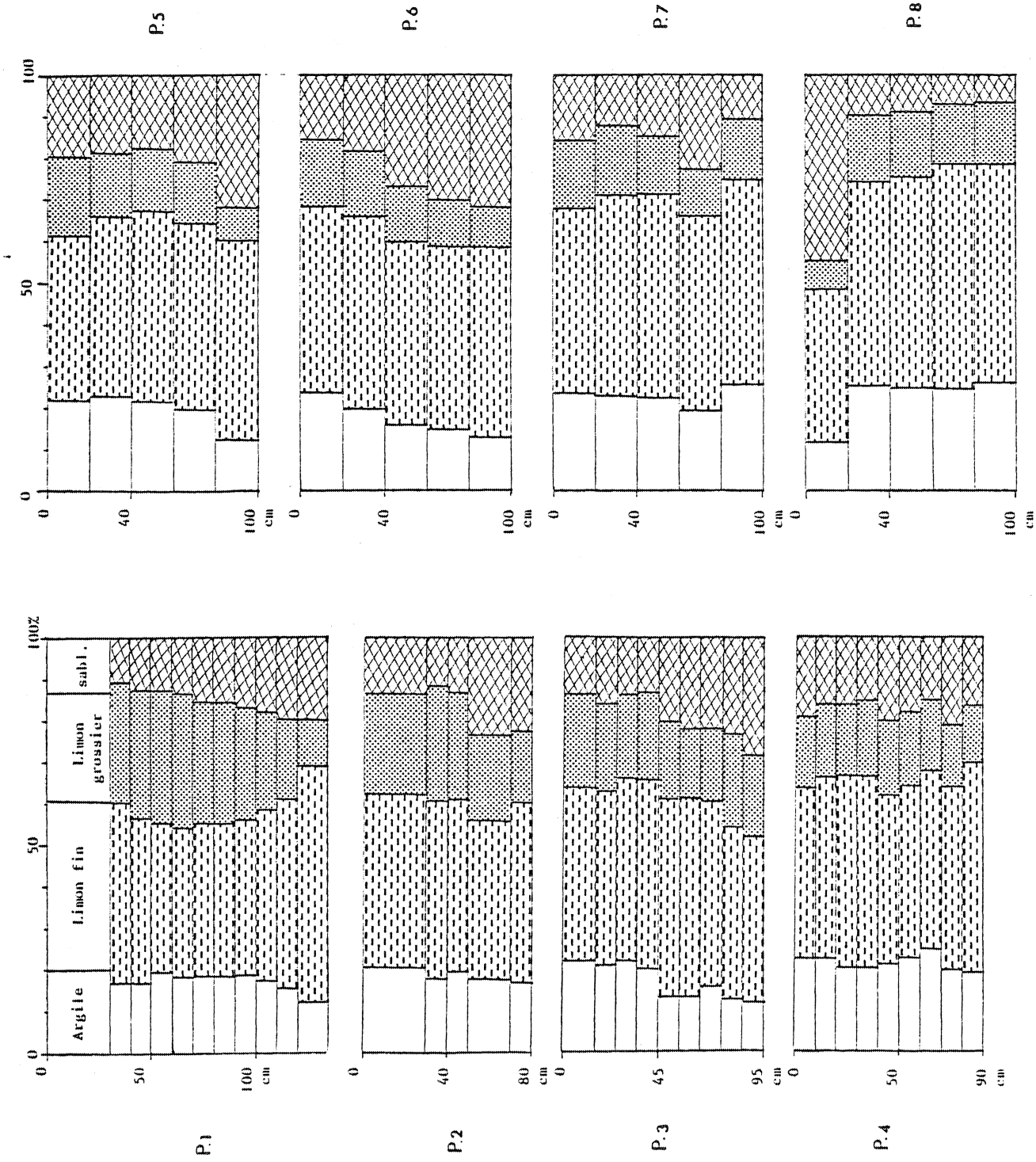


FIGURE 11: SAINT-FLOUR. ÉVOLUTION DES TEXTURES.

filons de roches basiques recoupent ces structures.

L'étude pédologique et l'analyse détaillée du matériel constitutif de certains profils ont été présentés antérieurement (LE CALVEZ et MARHIC 1976). Les principaux traits de ces profils peuvent être ainsi résumés :

1° On observe sous l'horizon labouré la succession de deux horizons éluviés dont l'un est enrichi en matière organique et d'un horizon d'accumulation d'argile. Des traces d'hydromorphie peuvent exister à la base des sols. Cette succession caractérise d'ailleurs l'ensemble de cette séquence.

2° Ces horizons sont à dominante limoneuse (formation limoneuse) à l'exception de la partie inférieure des horizons d'accumulation qui apparaît texturalement très proche des niveaux d'altération des roches ; dans un des profils (Saint-Elouan β) où le toit de la roche "saine" est légèrement encaissé la limite entre ces deux niveaux est soulignée par quelques cailloux de quartz légèrement émoussés.

J'ai complété cette étude par l'analyse détaillée de la partie Ouest de cette séquence à la limite de la pente douce et de la pente convexe (fig. 9).

Les quatre derniers profils équidistants de 40 mètres, ont été prélevés à la tarrière et seule la limite de l'horizon labouré a pu être identifiée. Une différenciation entre un horizon éluvié et un horizon d'accumulation n'a pu être repérée ni au niveau de la couleur, ni au niveau de l'appréciation du taux d'argile. Le profil 8, situé le plus à l'aval au coeur d'un petit talweg est légèrement marqué par l'hydromorphie.

b) Quelques données analytiques (fig. 11 et 12)

Les courbes granulométriques cumulatives peuvent être réparties en deux groupes :

- Dans le premier, l'allure des courbes est sigmoïde et le point d'inflexion se situe entre 20 et 50 microns. Ces courbes représentent les matériaux du profil 1 à l'exception de la base du sol (110-120 cm) et de l'altérite (120-135 cm) et les niveaux supérieurs des profils 2 et 3. Elles correspondent aux formations limoneuses proprement dites.
- Dans le second groupe l'allure des courbes est à tendance hyperbolique; notamment pour les fractions inférieures à 50 microns. Ces courbes correspondent aux altérites de schistes, aux niveaux inférieurs des sols situés sur la pente douce et aux profils situés le long de la pente convexe. Dans l'ensemble de ce groupe le matériel s'affine de l'amont vers l'aval.
- De plus il faut noter la richesse en sables des 20 premiers centimètres du profil 8 (qui se situe au coeur du talweg). Cette richesse confère un aspect très particulier à la courbe cumulative correspondante.

Les analyses chimiques permettent également de dégager ces deux grands groupes :

- Dans le premier les variations chimiques d'un échantillon à l'autre sont très importantes et au fur et à mesure de l'enrichissement en limons grossiers les teneurs en SiO_2 augmentent tandis que les teneurs en Al_2O_3 diminuent.
- Dans le second quelle que soit la granulométrie de l'échantillon, on n'observe pas de variation chimique notable.

FIGURE 12: SAINT-ELOUAN : QUELQUES COURBES GRANULOMÉTRIQUES CUMULATIVES CARACTÉRISTIQUES.

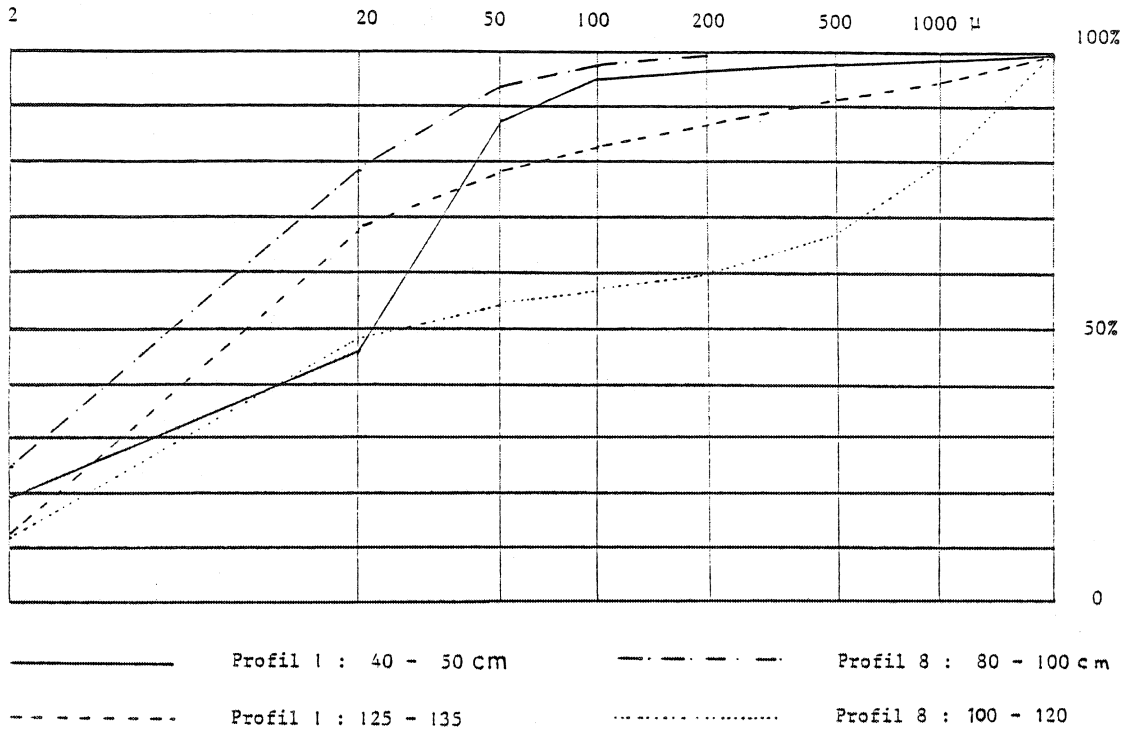
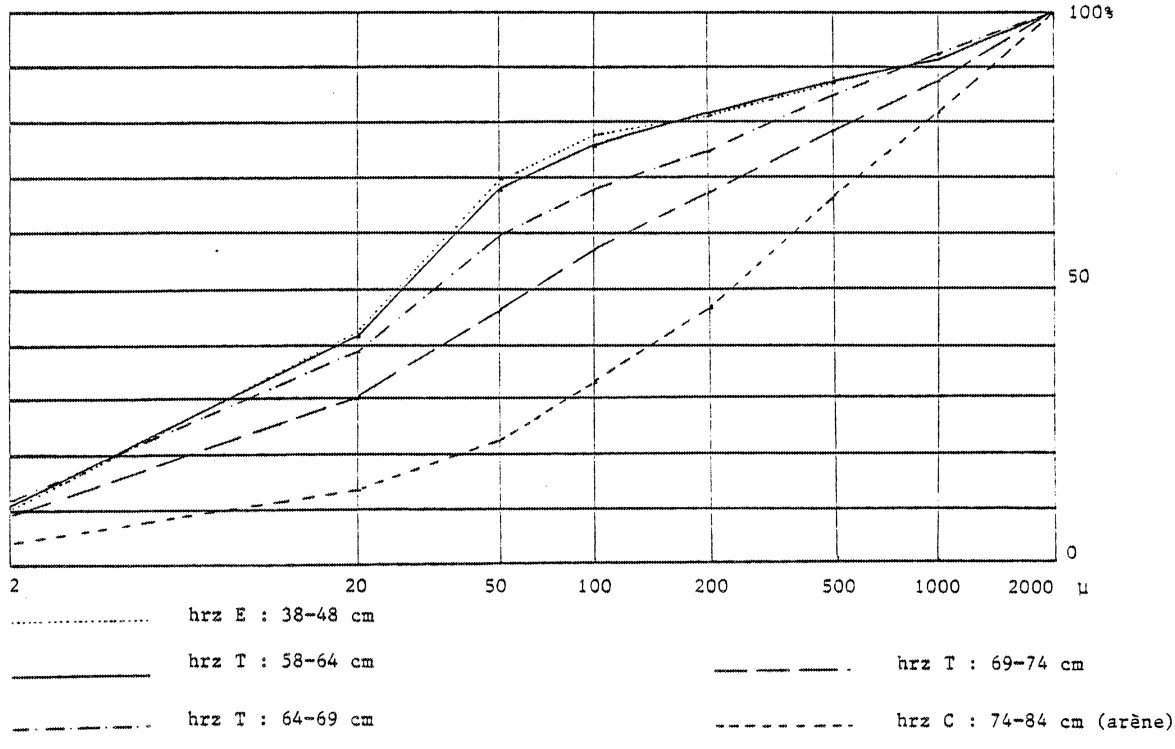


FIGURE 13: LA CROIX DU ROZ : COURBES GRANULOMÉTRIQUES CUMULATIVES MONTRANT LE PASSAGE PROGRESSIF ARÈNE-FORMATION LIMONEUSE.



- Les niveaux de base des sols de la pente douce ainsi que les sols de la pente convexe présentent des caractéristiques granulométriques et chimiques qui les apparentent aux altérites sous-jacentes. Il est donc logique de les interpréter dès maintenant comme essentiellement issu des schistes. L'absence de variation chimique importante au cours de l'affinement du matériel correspond d'ailleurs à ce qui a pu être observé dans d'autres régions (DEJOU et al 1970).
- Les rapports entre les matériaux du premier groupe (formations limoneuses) et les schistes apparaissent plus complexes, ils seront étudiés au § E : les données analytiques.

N. B. :
- En séparant ces deux groupes de matériaux et en associant dans le second l'affinement du matériel à un degré croissant d'altération on obtient le schéma interprétatif symbolisé par la figure 14. La comparaison de celle-ci et de la figure 13 montre que quelles que soient les caractéristiques texturales et chimiques des matériaux il est possible d'observer des horizons présentant des traits pédologiques comparables.

II- 4. Le profil de la Croix du Roz

Le profil de la Croix du Roz se situe sur granite, près du sommet d'un versant de pente moyenne. Le développement de la formation limoneuse s'effectue en poches. C'est l'une de ces poches qui a été étudiée.

En-dessous de l'horizon cultivé (teinte "brune") on distingue, un horizon ALE (teinte "jaune") de 28 à 57 cm, un horizon accumulique (teinte "rouge"), très riche en revêtements, non tassé, de 57 à 74 cm, l'arène granitique au-delà de 74 cm. Les analyses granulométriques mettent en évidence la stabilité du squelette du sol entre 28 et 64 cm. Par contre la texture du matériel constitutif de la base de l'horizon accumulique est intermédiaire entre la texture des niveaux sous-jacents (formation limoneuse) et la texture de l'arène sous-jacente. Du point de vue textural le passage entre l'arène et la formation limoneuse est rapide, 10 cm environ, mais progressif, aucune coupure, aucun lit de cailloux n'est visible (fig. 13)

III - DISCUSSION : LES PROBLEMES POSES.

L'ensemble des observations concernant les sols de la région montre que les horizons présentant des caractères d'éluviation et d'aluminisation, de même que les horizons présentant des caractères d'accumulation et de tassement s'observent quelle que soit la texture du matériel. Les différences de texture existent à l'échelle de la séquence comme à l'échelle du profil.

La différenciation de ces horizons étant discordante par rapport à la texture des matériaux, on peut en déduire que les mécanismes de génèse de ces horizons ne sont pas à l'origine des différences texturales.

La question principale à résoudre est donc celle de l'origine du caractère textural de ces formations et, notamment, l'origine des fortes teneurs en limons. Cette question ne pourra être sérieusement abordée que lors du dépouillement des données analytiques (§E) .

Cette même discordance, (entre les caractères morphologiques - niveau jaune ALE et nouveau rouge XT - et texturaux - teneurs en limons -), permet de penser que la différenciation entre "le limon jaune" et "le limon rouge" ne peut s'expliquer par des apports successifs, contrairement à ce qui a été proposé antérieurement (PLIHON, 1974).

Il faut donc préciser cet aspect par l'étude détaillée d'un profil ; ceci fera l'objet du §D.

Le passage entre les substrats et les formations limoneuses peut être progressif (Le Sourn, La Croix du Roz), mais également rapide, voire discontinu (Sordan) et même souligné par un niveau de cailloux émoussés (Saint-Elouan β). Or ce niveau de cailloux a parfois été interprété comme le témoin d'une phase d'érosion (PLIHON, 1974).

L'interprétation de ces différents termes de passage nécessite des observations détaillées des formations limoneuses dans le paysage, qui vont maintenant être présentées (§C).

C) LES FORMATIONS LIMONEUSES DANS LE PAYSAGE

I - INTRODUCTION

Il semble à priori évident que la nature et l'importance des déplacements de matériaux le long des versants conditionnent, dans une certaine mesure au moins, la nature des contacts entre les substrats et les formations limoneuses. Il est par conséquent nécessaire d'évaluer, tout d'abord, l'importance de ces phénomènes.

II - LES PHENOMENES DE VERSANTS

Sur le terrain ceci est possible lorsque les substrats des parties amont et aval sont suffisamment différents pour que l'on puisse préciser à cette échelle l'origine des éléments grossiers observés dans les formations limoneuses.

Cette contrainte limite les observations à la région du Primaire anté-carbonifère et plus exactement aux versants qui recoupent les structures géologiques :

- les deux versants reliant la ligne de crête constituée par les schistes et quartzites de Plougastel à la zone carbonifère au Nord et à la vallée creusée dans les schistes siluriens au Sud.
- les deux versants reliant la ligne de crête constituée par les quartzites ordoviciens à la vallée creusée dans les schistes siluriens au Nord et à la zone briovérienne au Sud. (fig. 3et 5 p. 20 et 28).

II - 1. Les faits

Sur le versant Nord du premier ensemble, des fragments de quartzites, principalement des cailloux, exceptionnellement des blocs, se retrouvent jusqu'à quelques centaines de mètres de la formation des schistes et quartzites de Plougastel. En s'éloignant de ceux-ci leur nombre diminue progressivement et ils se limitent au niveau le plus superficiel (les trente premiers centimètres) de la formation limoneuse.

Sur la totalité du versant Sud de ce premier ensemble, des cailloux et blocs de quartzites s'observent dans toute l'épaisseur de la formation limoneuse qui peut, dans la partie avale, reposer de manière brutale sur le substrat.

Au bord de la départementale 767, à quelques mètres du sommet, des coupes montrent le fauchage intense mais progressif des bancs de schistes et quartzites, fauchage qui entraîne une dislocation de ces bancs. Vers l'aval, l'importance du matériel meuble à texture limoneuse, entre les blocs, croît peu à peu ; parallèlement celle des fragments de schistes et des blocs de quartzites diminue. Cependant la taille des blocs de quartzites contenus dans la formation limoneuse reste constante tout le long du versant.

Dans un chemin vicinal du lieu-dit "la Source captée", ce sont les bancs de schistes et quartzites siluriens qui sont intensément fauchés et tendent à devenir parallèles à la pente ; localement ils reposent ainsi en "discordance" sur les schistes non fauchés. Ces phénomènes expliquent aisément que les coupes perpendiculaires à la pente

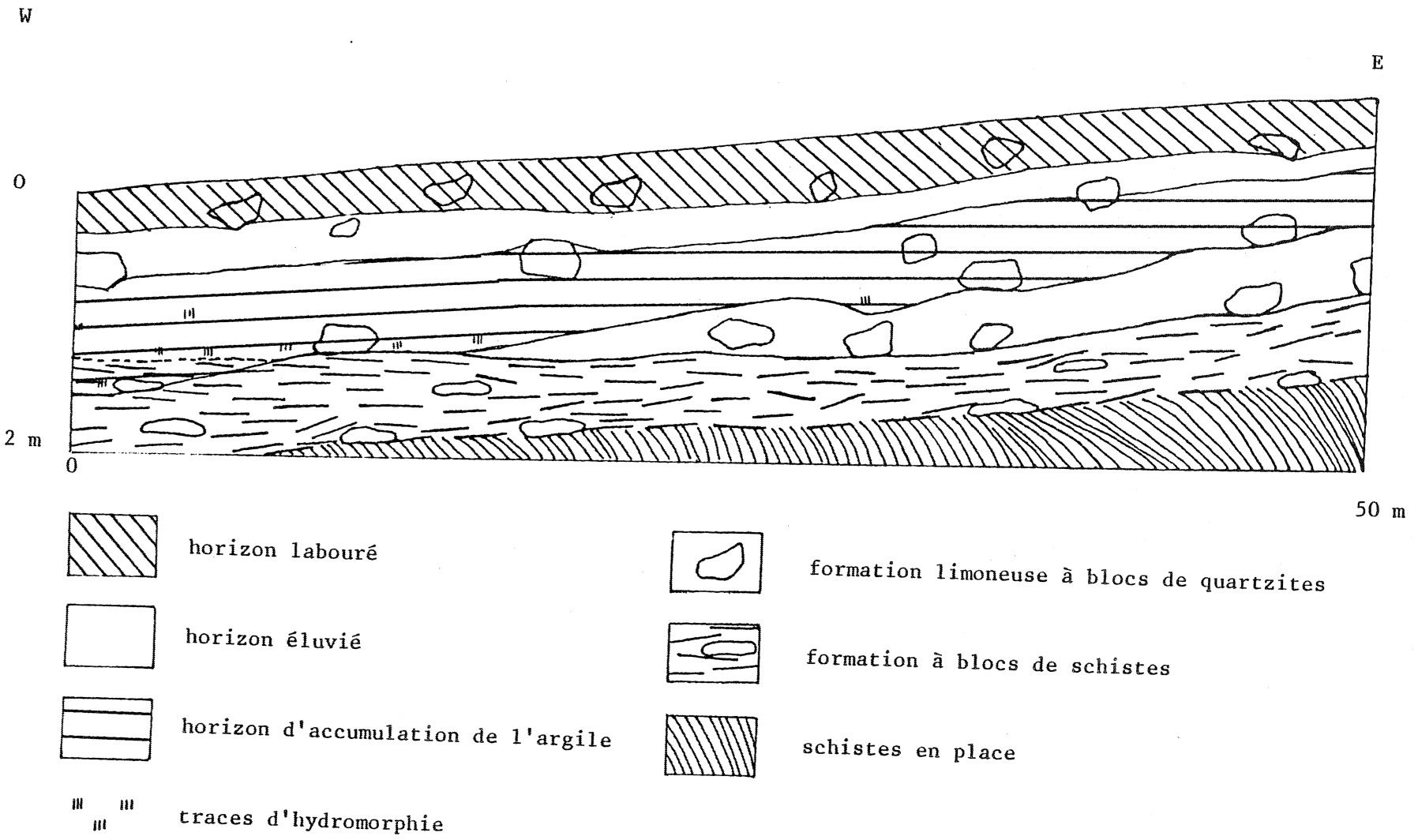


FIGURE 14 : BOTMINY : ORGANISATIONS PÉDOLOGIQUES ET FORMATIONS.

présentent une succession de niveaux plus ou moins "discordants" les uns par rapport aux autres. Ainsi, à Botminy, la formation meuble emballant des fragments de schistes et quartzites siluriens repose en "discordance" sur les schistes siluriens et est elle même recouverte par la formation limoneuse à blocs de quartzites. Le sol se développe soit dans la formation limoneuse à blocs et dans une partie de la formation contenant les schistes et quartzites siluriens, soit exclusivement dans la formation limoneuse à blocs (fig. 14)

Sur le versant Nord du second ensemble la répartition des éléments est comparable à celle du versant Nord du premier. Dès la limite entre les schistes ardoisiers et les quartzites ordoviciens des fragments de schistes apparaissent dans les formations limoneuses mais des cailloux de quartzites s'observent encore "en pierres volantes" très loin vers l'aval.

Sur le versant Sud de cet ensemble, les observations s'apparentent à celles du versant Nord, à l'exception toutefois du bord du lac de Guerlédan où des formations limoneuses à blocs puissantes de 5 à 6 mètres existent. Celles-ci sont surmontées de formations limoneuses de 1 à 2 mètres d'épaisseur renfermant peu d'éléments grossiers. Aucune coupe ne permet d'observer, depuis la roche saine, l'architecture complète de ces formations limoneuses.

A l'Anse de Sordan, la morphologie à l'amont des épaisses formations limoneuses à blocs est particulière, dite en "loupe de glissement" (RIVIERE communication personnelle). Ceci indiquerait que ces matériaux ont subi un déplacement assez important.

Pour compléter cet aperçu des phénomènes gravitaires le long des versants, il faut rappeler le fauchage des raies et des diaclases dans les arènes granitiques (Le Sourn). Ceci traduit des déplacements de matériaux de l'ordre de la dizaine de mètres.

II - 2. Discussion

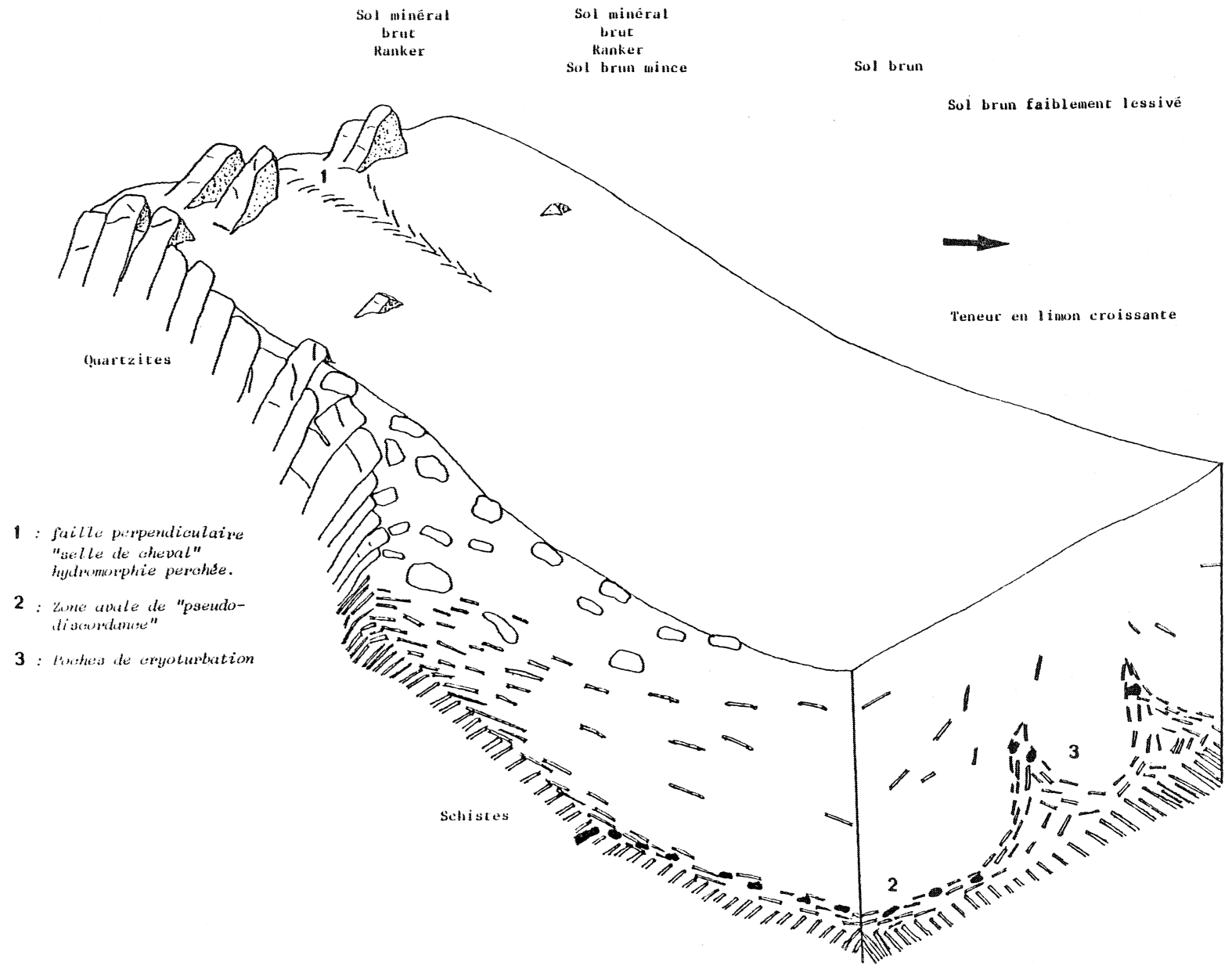
Toutes ces observations montrent l'importance des déplacements de matériaux le long des versants dans cette région. Deux questions se posent :
- Ces déplacements s'observent surtout sur les éléments grossiers : peut-on en déduire qu'ils affectent aussi, et dans la même importance les éléments fins ?
- Ces déplacements constituent-ils la marque d'un climat périglaciaire ?

Deux cas doivent être distingués : celui des épaisses formations limoneuses à blocs d'une part, celui des épandages superficiels le long des versants d'autre part.

- Les épaisses formations limoneuses à blocs, si l'on se réfère aux principaux ouvrages de géomorphologie (DERRUAU, 1972 ; CAILLEUX et TAYLOR, 1954) se seraient mises en place en climat périglaciaire. Les blocs et le matériel fin se seraient déplacés en même temps.

- Il a été montré que, en Bretagne, il y a départ de matériel fin à l'aval des talus et accumulation à l'amont (CARNET, 1978). Ceci met en évidence le caractère actuel ou sub-actuel des déplacements le long des versants et permet d'interpréter ceux des éléments grossiers comme actuel ou sub-actuel. Il est possible que ces éléments grossiers aient subi

FIGURE 15 : BLOC-DIAGRAMME REPRÉSENTANT LES RELATIONS ENTRE LES DIFFÉRENTES FORMATIONS LE LONG D'UN VERSANT.



un déplacement plus important que la masse des formations limoneuses. En effet, il est courant d'observer qu'un caillou, mis en mouvement par une cause externe, roule sur le sol sans entraîner un déplacement notable de matériel fin. Les bases physiques de ce phénomène sont d'ailleurs connues (cf. BAGNOLD, 1960, p. 86-93 en particulier le paragraphe "Immobility of settled dust and loess").

II - 3. Conclusion

L'observation des éléments grossiers nous montrent que les déplacements des matériaux le long des versants sont généralisés. Si certains de ces déplacements sont probablement la marque des actions périglaciaires, les autres peuvent s'interpréter comme actuel ou sub-actuel.

Il apparaît toutefois imprudent de déduire de façon trop systématique l'importance des déplacements concernant les matériaux meubles de la seule observation des éléments grossiers qu'ils renferment.

Notons que dans aucun cas il n'a été observé dans la masse des formations limoneuses, d'éléments grossiers qui ne proviennent pas du versant.

III - LES PASSAGES ENTRE LES SUBSTRATS ET LES FORMATIONS LIMONEUSES

III - 1. Les faits (fig. 14 et 15)

Dans les zones amont les passages verticaux entre les substrats et les formations limoneuses sont généralement, comme à la Croix du Roz, progressifs. Dès la mi-pente, et dans les zones aval ils sont le plus souvent brutaux. La formation limoneuse peut alors reposer directement sur la roche en place. Parfois même quelques cailloux émoussés de quartz ou de roches, provenant soit de l'amont soit directement de la roche sous-jacente, soulignent la limite de base de la formation limoneuse. Notons qu'un profil situé sur schistes ardoisiers en bas de pente, à Rossuliet au bord de la R. N. 164 bis, renferme à sa base quelques cailloux de grès ordoviciens ou briovériens dont la présence implique un transport d'au moins un kilomètre (LE CALVEZ et MARHIC, 1976).

Dans les cas où j'ai observé cette ligne de cailloux en position topographique relativement haute elle se situait dans des petites dépressions. Par exemple dans la coupe de Saint-Elouan ce niveau de cailloux existe uniquement à Saint-Elouan β . Le profil de Saint-Elouan β se développe sur une roche filonienne. Le niveau supérieur de la roche filonienne saine se situe une trentaine de centimètres en-dessous de celui des schistes encaissants.

Enfin, notons que , en trois endroits au moins, dans le profil type des Granges, dans la coupe de Saint-Elouan et sur schistes ardoisiers près de la ferme de Rossuliet la limite entre la formation limoneuse et l'altérite de schistes est marquée de nombreux festons. Les petites plaquettes de schistes peuvent épouser la forme des festons et des concentrations de cailloux voire de blocs existent aux sommets de ces festons. De telles figures sont généralement appelées "poches de cryoturbation".

III - 2. Discussion

Une première question se pose : le niveau de cailloux légèrement émoussés qui s'observe, parfois, à la base des formations limoneuses est-il une preuve, d'un apport de matériel ? Dans ce cas, ce niveau de cailloux correspondrait à une discontinuité lithologique.

Nous avons déjà vu l'importance des phénomènes de déplacements des matériaux le long des versants, déplacements qui expliquent, notamment, les passages discontinus d'un terme à l'autre dans la zone avale.

Il apparaît donc logique de penser que ces mêmes mécanismes fauchent les filons de quartz dans les zones amont, disloquent ainsi ces filons et concentrent les produits de cette dislocation, plus à l'aval, à la base des formations meubles en mouvement. Les concentrations de cailloux dans les petites dépressions peuvent s'expliquer de même.

Il a d'ailleurs été déjà argumenté que, dans les cas de lents déplacements de matériaux une limite originelle peu nette peut progressivemnt "prendre l'aspect d'une discontinuité lithologique avec concentrations de cailloux et "pseudo-ravinements" (RUELLAN, 1970).

Compte tenu des nombreuses actions anthropiques, le cas, isolé, du profil de Rossuliet ne doit s'interpréter qu'avec prudence.

La seconde question qui se pose concerne la formation des "poches de cryoturbation" qui ne semble pouvoir s'effectuer que sous climat périglaciaire. En effet, le caractère vertical des figures exclue de les interpréter comme consécutives à de simples phénomènes de versants mais nécessite de faire appel à des augmentations temporaires du volume des matériaux. Ces augmentations de volume sont provoquées par le gel. On observe d'ailleurs actuellement, dans les zones périglaciaires, la formation de ces poches. Les concentrations de blocs et de cailloux y sont connues (cf. DERRUAU, 1972).

IV - CONCLUSION

La répartition des formations meubles dans le paysage, et en particulier les discontinuités qui s'observent souvent dans les zones aval s'expliquent, en grande partie, par les mouvements de matériaux le long des versants.

Certains de ces mouvements se sont probablement produits sous climat périglaciaire, d'autres sont actuels ou sub-actuels.

La figure 15 synthétise la répartition des différentes formations le long du versant.

D) ÉTUDE PÉDOLOGIQUE D'UN PROFIL TYPE : LES GRANGES

I - LES FAITS (fig. 16)

Ce profil a été dégagé par les travaux de rectification de la Nationale 164 bis. Il est mis en culture. Il se développe au-dessus d'une altérite des schistes et quartzites très fins du Silurien supérieur. Dans cette altérite la structure de la roche est en partie conservée. Quelques dizaines de mètres en amont les schistes et quartzites de Plougastel affleurent.

- *Horizon 1 ; 0 - 24 cm* : Les éléments grossiers, graviers et cailloux de quartz , fragments de quartzites de la formation des schistes et quartzites de Plougastel , occupent 5 à 10% du volume de cet horizon de couleur brun foncé, 10 Y R 4/3 (selon le système MUNSELL). Ces éléments grossiers sont régulièrement répartis dans la masse de l'horizon. La matière organique n'est pas directement décelable. La structure grumeleuse très grossière laisse entre les agrégats des vides assez importants. Cet horizon correspond au niveau labouré.

La transition avec l'horizon sous-jacent est nette et régulière.

- *Horizon 2 ; 24 - 37 cm* : Cet horizon de couleur brun franc 7,5 Y R 5/6 présente des taches irrégulières de même couleur que l'horizon précédent. La limite de ces taches est peu nette et elles sont moins cohérentes que le reste de l'horizon. Les éléments grossiers présentent les mêmes caractères que dans l'horizon supérieur. La structure grumeleuse fine est nette et généralisée. La transition avec l'horizon sous-jacent est distincte et régulière.

- *Horizon 3 ; 37 - 60 cm* : Cet horizon, brun jaunâtre 10 Y R 6/6 a une structure peu nette. Cette structure est grumeleuse moyenne et fine au sommet de l'horizon et localement massive à sa base. Il n'est pas possible d'associer une différence de couleur (éclaircissement) à cette différence de structure.

La transition avec l'horizon sous-jacent se fait de manière distincte et régulière.

- *Horizon 4 ; 95 - 110 cm* : La limite supérieure de cet horizon brun jaune rougeâtre, 6,25 Y R 5/6, est marquée par l'apparition de revêtements luisants, de couleur 5 Y R 4/8, sur les faces d'agrégats polyédriques. Des langues de dégradation traversent l'ensemble de cet horizon et se poursuit dans l'horizon sous-jacent. La transition avec celui-ci se fait en moins d'un centimètre. Cette limite est marquée de nombreux festons aux sommets desquels existent des concentrations de cailloux et de blocs de quartz. Ce type de figure est généralement attribué aux phénomènes cryostatiques et appelé "poche de cryoturbation".

Ces quatres horizons constituent la formation limoneuse.

- *Horizon 5 ; > 110 cm* : La couleur de cet horizon est variable (violet, rouge...), la teinte blanche étant dominante. A la base des festons, la structure de la roche est conservée. Le passage entre la zone où cette structure est conservée et celle où elle ne l'est pas est progressif.

Cet horizon, contrairement aux horizons sus-jacents, ne renferme pas de fragments de schistes et quartzites de Plougastel.

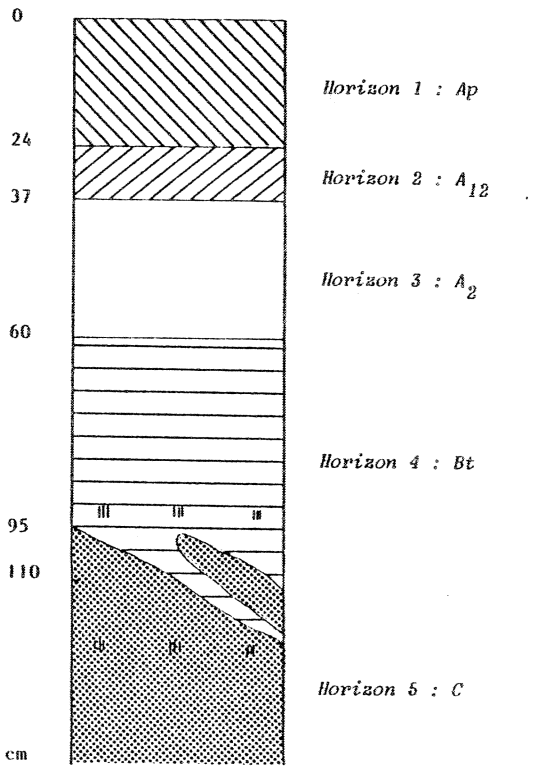


FIGURE 16: PROFIL DES GRANGES : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE.

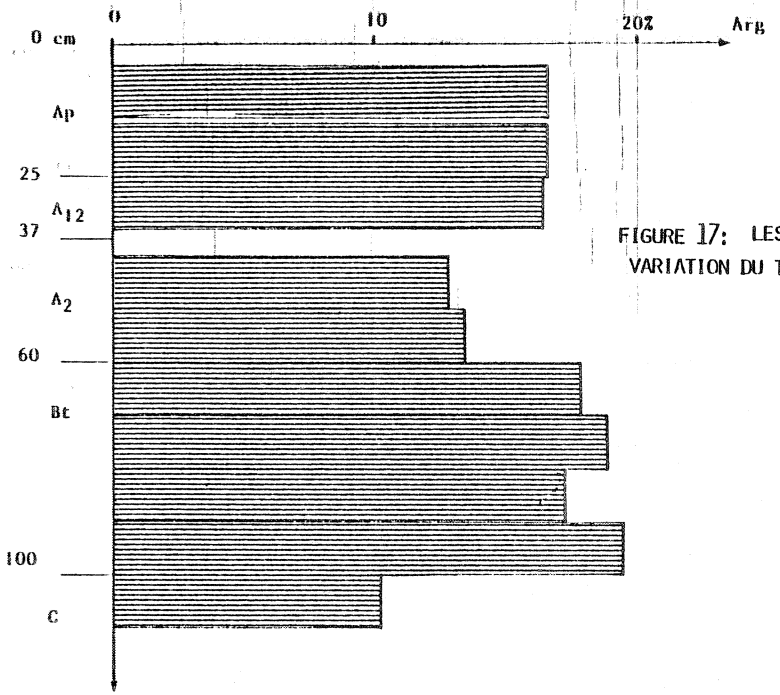


FIGURE 17: LES GRANGES
VARIATION DU TAUX D'ARGILE.

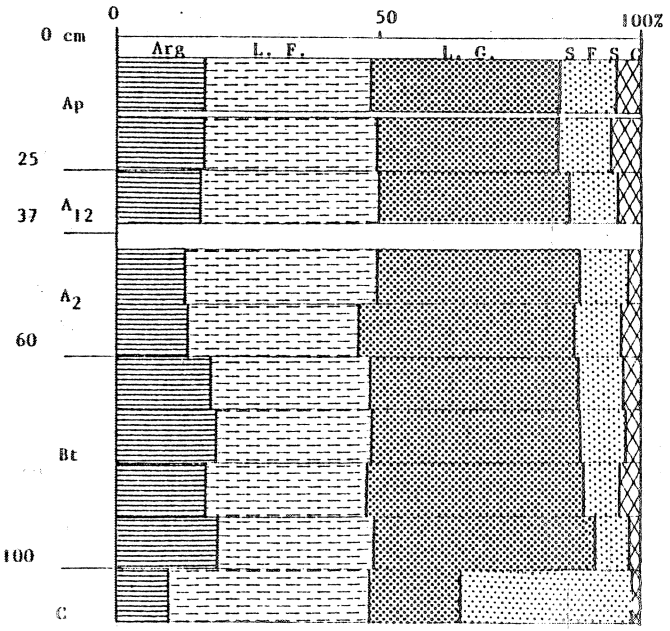
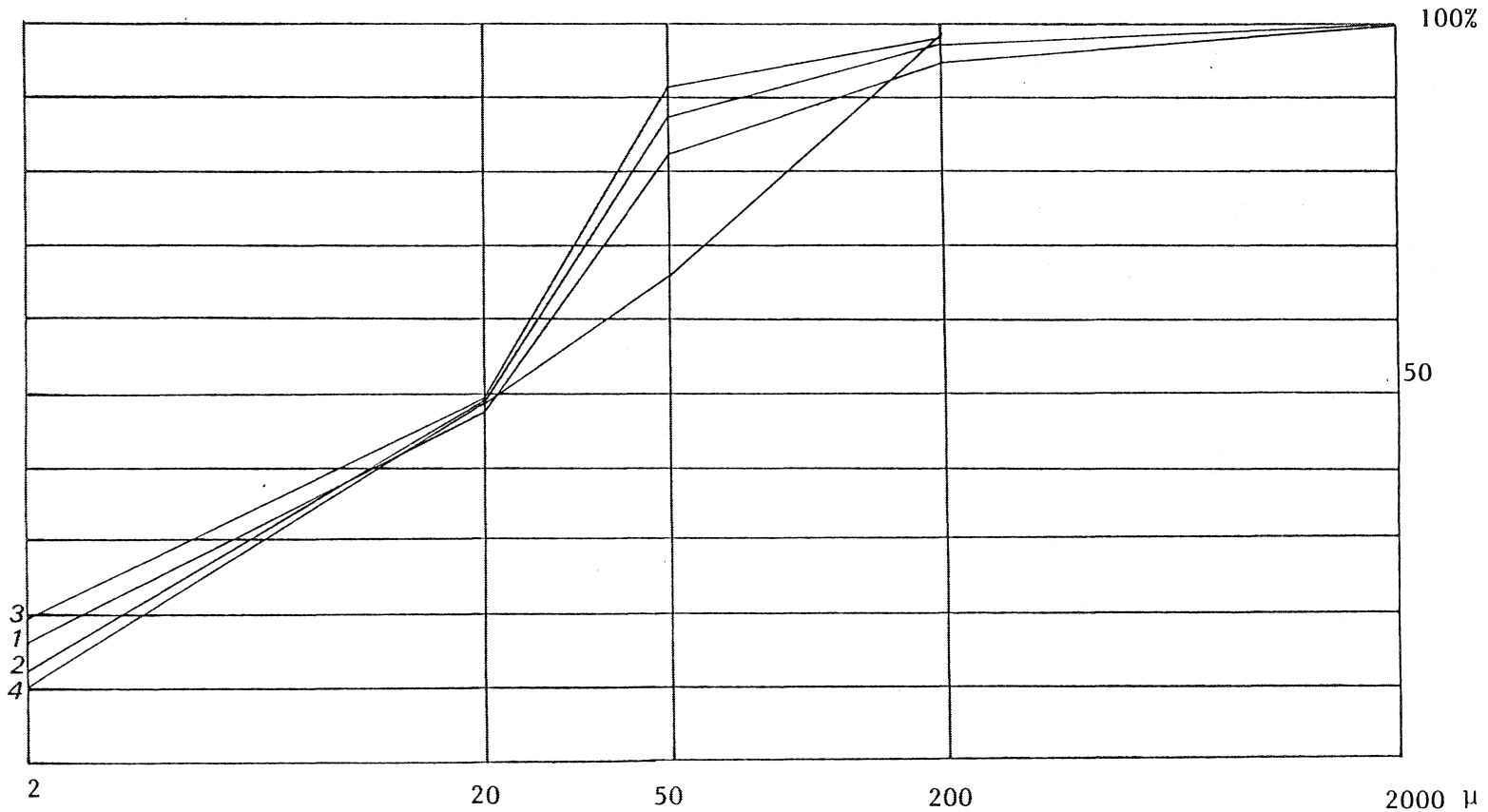


FIGURE 18: LES GRANGES
VARIATION DE LA TEXTURE.

HORIZON	GRANULOMETRIE					MATIERE ORGANIQUE			
	A	L. F.	L. G.	S. F.	S. G.	C	M. O.	N	C/N
Ap 4 - 14 cm	16,6	31,9	35,8	10,3	5,4	2,77	4,77	0,238	11,64
Ap 15 - 25 cm	16,6	33,0	34,3	10,4	5,7	2,21	3,80	0,232	9,53
A_{12} 25 - 35 cm	16,4	33,3	36,8	9,0	4,5	1,20	2,06	0,134	8,95
A_2 40 - 50 cm	12,8	35,9	39,9	8,8	2,6				
A_2 50 - 60 cm	13,5	32,7	41,4	8,8	3,6	0,37	0,63	0,056	6,61
Bt 60 - 70 cm	17,8	30,5	39,7	8,7	3,3				
Bt 70 - 80 cm	18,8	29,7	39,9	8,4	3,2				
Bt 80 - 90 cm	17,3	30,6	41,1	8,1	9,9	0,16	0,28	0,047	3,40
Bt 90 - 100 cm	19,5	30,0	41,9	6,7	1,9				
C 100 - 110 cm	10,2	38,4	17,4	32,4	1,6				

HORIZON	pH		COMPLEXE ADSORBANT EN MEQ. POUR 100 GR.						
	eau	Kcl N	Ca	Mg	K	Na	S	T	S/T
Ap 4 - 14 cm	5,10	4,15	2,5	0,22	0,114	0,107	2,941	9,1	32,3
Ap 15 - 25 cm	4,95	4,05	1,6	0,11	0,075	0,090	1,875	8,1	23,1
A_{12} 25 - 35 cm	5,00	4,10	0,9	0,07	0,072	0,101	1,143	6,3	18,1
A_2 40 - 50 cm	5,05	4,40							
A_2 50 - 60 cm	4,95	4,40	0,5	0,06	0,063	0,075	0,698	4,2	16,6
Bt 60 - 70 cm	4,90	4,35							
Bt 70 - 80 cm	4,85	4,30							
Bt 80 - 90 cm	4,75	4,30	0,8	0,13	0,095	0,060	1,085	5,8	18,7
Bt 90 - 100 cm	4,85	4,20							
C 100 - 110 cm	4,80	4,10							

TABLEAU III : PROFIL DES GRANGES. DONNÉES ANALYTIQUES.



1 : 4 - 14 cm (Ap)

2 : 40 - 50 cm (A_2)

3 : 90 - 100 cm (Bt)

4 : 100 - 110 cm (C)

FIGURE 19 : PROFIL DES GRANGES. COURBES GRANULOMÉTRIQUES CUMULATIVES.

L'étude microscopique montre que dans tout le profil, à l'exception de l'horizon 5, des grains de quartz compris entre 10 et 50 microns constituent l'essentiel du squelette ; les paillettes de micas de très petite taille sont nombreuses. Les éléments grossiers, fragments de quartz et quartzites, sont peu nombreux et n'ont pas d'orientation préférentielle.

L'horizon 3 est caractérisé par la netteté des bords des grains de quartz du squelette et l'absence, ou la rareté, des traits pédologiques. Le plasma, très clair, qui relie entre eux ces éléments ne présentent pas d'orientation préférentielle.

Dans l'horizon 4, les petites paillettes de micas tendent à s'orienter autour des vides et des grains du squelette. Les traits pédologiques prennent une grande importance sous la forme de revêtements jaunes à rouges généralement lités, parfois épais, et constitués d'argiles et de limons fins (argilane et ferriargilane). Les bords internes et externes de ces revêtements sont nets.

Les courbes granulométriques cumulatives des différents horizons de la formation limoneuse sont de type sigmoïde ; le grain moyen est de 20 microns environ. Elles ne se différencient entre elles qu'au niveau de la fraction inférieure à deux microns : entre l'horizon 3 et l'horizon 4, l'enrichissement absolu est de 6,7%, l'indice d'entraînement étant de 1,52. La courbe granulométrique cumulative de l'horizon 5 a le même grain moyen mais contient beaucoup moins de limon grossier et beaucoup plus de sable (fig. 17, 18, 19).

Du point de vue des analyses de matière organique d'azote et de pH l'horizon 2 s'apparente à l'horizon labouré. Notons que les pH sont relativement bas dans tout le sol : 4,90 dans l'horizon 4 ce qui est un trait très répandu dans la région (tableau III).

II - INTERPRETATION

Les deux horizons supérieurs sont caractérisés par leur forte teneur en matière organique, ce qui explique la couleur brunâtre de ces horizons. Ce sont deux horizons A_1, le premier cultivé, est appelé Ap.

Les deux autres horizons de la formation limoneuse sont moins riches en matière organique. Ils se distinguent l'un de l'autre par leur couleur, l'organisation de leurs éléments constitutifs, leur teneur en argile. Le premier de ces horizons présente en morphologie et micromorphologie des caractères de départ d'éléments fins : structure localement massive, aspect lavé des grains du squelette.

Les nombreuses cutanes à bords nets, revêtant les agrégats et les bords des vides, que possède le second de ces horizons montre qu'il fonctionne comme un horizon d'accumulation de l'argile.

Les différences qui existent entre ces horizons apparaissent donc liées à la redistribution des particules fines entre ces horizons. Ce phénomène de lessivage et d'accumulation des éléments les plus fins explique en particulier, la teinte claire de l'horizon 3 et la teinte plus rouge, liée aux revêtements de l'horizon 4.

Ces deux horizons correspondent à un horizon d'éluviation et à un horizon d'accumulation d'argile, ils sont appelés A_2 (ou E) et Bt. La présence de langues de dégradation conduit à indexer l'horizon d'accumulation de la lettre g ; Bt (g).

Notons que dans l'ensemble de la formation limoneuse les variations texturales

au niveau du squelette sont très minimes (micromorphologie et courbes granulométriques).

L'horizon 5 où la structure de la roche est localement conservée et qui est comme l'horizon Bt (g) parcouru de langues de dégradation sera appelé Cg.

Ce profil présente la succession Ap, A_{1-2}, A_2, Bt (g), C (g), l'indice d'entraînement de l'argile est de 1,52, l'horizon A_2 est peu net. Il s'agit donc d'un sol brun lessivé, présentant des traces d'hydromorphie.

III - CONCLUSION

Ce profil, très représentatif des formations limoneuses de la région, présente la succession de 2 horizons bruns, d'un horizon jaune pauvre en argile, d'un horizon ocre-rouge riche en argile. Le squelette est relativement constant et les aations pédogénétiques permettent, à elles seules, d'expliquer cette succession d'horizon. Ceci confirme l'interprétation proposée pour la discordance entre les caractères morphologiques et texturaux (p. 40).

Le passage entre la formation limoneuse et l'altérite sous-jacente est très rapide (< 2 cm). Il correspond à des changements importants, notamment au niveau de la texture : il faut donc se demander si les actions pédogénétiques suffisent, à elles seules, pour expliquer ces changements brutaux. Ceci va être l'objet du & suivant (§ E) consacré aux données analytiques.

E) LES DONNÉES ANALYTIQUES

I - ETUDE GRANULOMETRIQUE

I - 1. Les faits

La déviation arithmétique des quartiles, le coefficient de Trask et l'asymétrie de l'histogramme ont été déterminés pour les principaux types de courbes (tableau IV, fig. 20).

Ces indices montrent le bon classement des formations limoneuses et permettent de les distinguer des arènes granitiques et des formations d'altérations du grès. Par contre, ils s'avèrent moins significatifs pour distinguer ces formations limoneuses des altérites de schistes et ceci malgré l'allure très différente de leurs courbes cumulatives.

De même la définition géologique des limons adoptée lors du colloque sur les limons du Bassin de Paris en 1969 : "Formation superficielle continentale meuble, où domine la fraction inférieure à 50 microns et où les éléments plus grossiers ne prennent qu'une place accessoire ou accidentelle" englobe ces deux types de formation. Pour distinguer ces formations l'une de l'autre il convient donc d'adopter d'autres indices.

La caractérisation de ces courbes par les indices de FOLK, WARD et INNMANN (in FOLK, 1968) qui représentent les indices les plus utilisés par les auteurs anglo-saxons permet de les différencier au niveau de la dissymétrie graphique (graphic Skewness). Par contre le coefficient de dissymétrie des quartiles (Phiquartil skewness), l'hétérométrie et les moyennes graphiques (graphic means) sont sensiblement les mêmes pour ces deux courbes. Ce qu'il faut retenir c'est donc que quelle que soit la nature du substrat il est possible d'observer au-dessus de ce substratum, des formations limoneuses aux caractéristiques sensiblement identiques (fig. 20). Les courbes de ces matériaux sont sigmoïdes et le grain moyen est compris entre 20 et 25 microns, 75% du matériel est inférieur à 40 microns et 25% est inférieur à 10 microns. Mais sur chaque substrat, des matériaux aux caractères intermédiaires entre les "produits d'altération types" de ces roches (arènes, altérites...) et les matériaux limoneux bien classés, existent également. Ces formations à caractères intermédiaires, se situent à la base des formations limoneuses, et dans les parties amont de séquence.

Pour interpréter ceci deux hypothèses peuvent être avancées :

- Soit celle du mélange entre un matériel d'apport essentiellement limoneux et les différents produits d'altération des roches.
- Soit celle d'une altération progressive des différents substrats conduisant à des produits sensiblement semblables d'une roche à l'autre.

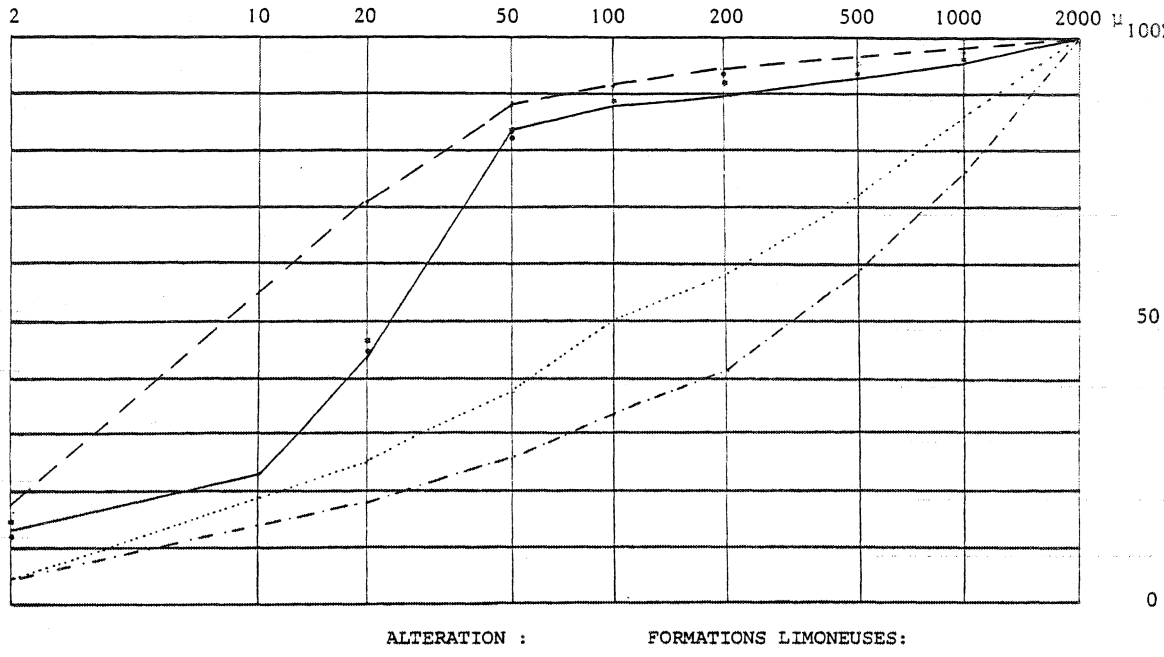
L'argument fondamental en faveur de la première hypothèse est :

- l'homogénéité de la couverture limoneuse, et son excellent classement quel que soit le substrat.

Deux arguments principaux ont été avancés en faveur de la seconde hypothèse (RAMPON 1971, RAMPON et COPPENET, 1969).

"Dans bien des sols la partie fine suit le comportement et l'évolution de la partie grossière, signe d'une évolution du sol en place".

Figure 20 : QUELQUES COURBES GRANULOMÉTRIQUES CUMULATIVES DES "ALTÉRATIONS TYPES DES ROCHES" ET DES FORMATIONS LIMONEUSES.



Schistes briovériens: Coët Drien (in Denoy et al. 1976): P.1 60-80 cm – – – – P.2 30-60 cm •

Quartzites ordoviciens: Ste Tréphine : P.1 2,6-2,8 m ····· P.8 80-100 cm ———— (densimétrie)

Granite : Le Sourn : Arène 3m —·—·— P.14 40-50 cm *

		LIMONS	SCHISTES ALTERES	ARENE	QUARZITES ALTERES
Q 16	en µ	2.1	1.9	14	7.4
	Φ	8.9	9	6.1	7.1
Q 1= Q 25	en µ	11	2.7	44	20
	Φ	6.5	8.5	4.5	5.6
Q 2= Q 50	en µ	22	8	2155	100
	Φ	5.5	7.0	2.2	3.3
Q 3= Q 75	en µ	40	24	940	580
	Φ	4.6	5.4	0.09	0.78
Q 84	en µ	50	40	1250	910
	Φ	4.3	4.6	-0.3	0.13
Déviation arithmétique $\frac{Q3-Q1}{2}$	en µ	14.5	10.6	448	280
Classement $\sqrt{\frac{Q3}{Q1}}$		1.9	2.9	4.6	5.4
Assymétrie $\frac{Q3.Q1}{(Q2)^2}$		0.9	1	0.9	1.2
Hétérométrie $\frac{\Phi84-\Phi16}{2}$		-2.3	-2.2	-3.2	-3.5
Assymétrie des quartiles $\frac{\Phi25+\Phi75-2(\Phi50)}{2}$		0.05	0.05	0.09	-0.11
Assymétrie graphique $\frac{\Phi16+\Phi84-2\Phi50}{\Phi84-\Phi16}$		-0.48	0.09	-0.22	-0.09
Moyenne graphique $\frac{\Phi16+\Phi50+\Phi84}{3}$		6.2	6.9	2.7	3.5

TABLEAU IV: LES INDICES GRANULOMETRIQUES.

- l'établissement de moyenne par classe granulométrique marque la différence entre les sols sur schistes et sur granites.

Cependant ces faits sont également vérifiés dans l'hypothèse d'un mélange de matériaux (fig. 21). Ils ne peuvent donc servir d'arguments en ce qui concerne l'origine des formations limoneuses. Les profils étudiés dans ce travail montrent qu'il faut distinguer deux cas principaux. D'une part, les granites et les quartzites dont le grain de la roche est grossier ; un affinement du grain lors de l'altération peut donc expliquer la richesse en limon du matériel constitutif des sols. D'autre part, les schistes où deux situations existent :

- ou les "limons" reposent sur un matériel altéré (cas 1), très riche en limons fins, il faudrait alors faire intervenir un départ important de ces particules pour expliquer la texture de la couverture limoneuse
- ou les "limons" reposent sur un matériel schisteux moins évolué (cas 2), caractérisé par un aspect assez rectiligne de la courbe granulométrique cumulative. Il est alors possible d'imaginer qu'une division des sables entraîne un accroissement de la teneur en limons grossiers et explique l'allure de la courbe.

Les analyses minéralogiques et chimiques vont permettre de préciser la valeur de ces hypothèses.

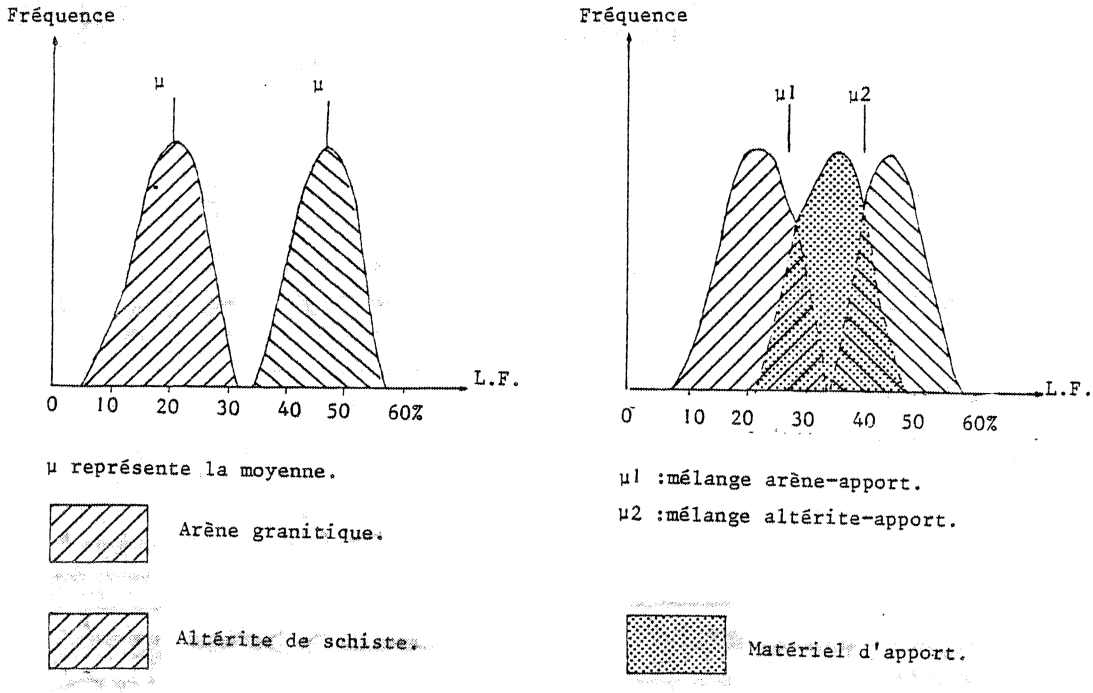


FIGURE 21 : COMPARAISON DES MOYENNES GRANULOMETRIQUES DE PRODUITS DE MELANGE ET DE PRODUITS D'ALTERATION (Les chiffres ne sont pas significatifs.)

II - ETUDE MINERALOGIQUE

II - 1. Les principaux éléments du squelette

II - 1. 1. Les faits

L'étude à la loupe binoculaire des fractions sableuses des "altérites" de schistes et des "limons" qui les recouvrent montre qu'elles sont essentiellement constituées de petits fragments de schistes.

Sur granite, à la Croix du Roz, les mêmes minéraux sont présents dans les fractions sableuses moyennes et grossières de l'arène granitique et du sol, (formations limoneuses et formations intermédiaires), mais le quartz semble légèrement plus abondant dans ce dernier.

Les lames minces de roches et de sols m'ont permis d'examiner les grains qui les constituent. Les formations limoneuses sont principalement formées de grains de quartz isodiamétriques, massifs et anguleux qui sont dispersés autour de 35 microns, l'écart type est de 14 microns, soit environ les trois quarts des grains compris entre 10 et 60 microns.

Les grains de quartz des schistes briovériens, ordoviciens, siluriens et carbonifères sont de forme amygdaloïde . Leur petite dimension n'excède jamais 20 microns et est généralement comprise entre 5 et 10 microns. Le rapport entre leurs deux dimensions varie de 3 à 10.

Les autres roches sont plus hétérogènes et dans l'ensemble les grains sont plus grossiers que ceux des sols. Cependant il faut noter le caractère particulier des quartzites de Plougastel dont les grains de quartz présentent des analogies de forme et de taille avec ceux des formations limoneuses ; néanmoins ils apparaissent moins bien classés.

En sus de ces grains de quartz, les formations limoneuses sont constituées de nombreux micas blancs de petite taille et de quelques rares grains de plagioclases et d'éléments grossiers qui, nous l'avons vu par ailleurs, reflètent le substrat local.

A la Croix du Roz, en sommet de butte, le passage entre l'arène et la formation limoneuse est graduel. Malgré cela je n'ai pu observer de faits qui permettent de penser à une fragmentation des quartz de l'arène. Parallèlement à l'augmentation de la teneur en limons le nombre des biotites et des feldspaths issus de l'arène décroît, mais leur état d'altération varie peu.

Pour les profils présentant à la base un niveau de cailloux et de graviers, aucune fracturation intense de ces éléments n'est visible dans les échantillons qui ont pu être prélevés.

II - 1. 2. Discussion

⊕ Les fractions sableuses moyennes et grossières

Le fait que les éléments supérieurs à cent microns soient sur schistes, uniquement des fragments de schistes et sur granite, des minéraux contenus dans l'arène, met en évidence que ces éléments sont autochtones. Sur granite il serait certes possible d'invoquer un apport pour expliquer les teneurs légèrement plus forte en quartz des formations limoneuses

par rapport aux arènes. Mais ceci ne serait pas cohérent avec les observations sur schistes, ni, nous le verrons plus loin, avec les minéraux lourds.

Cette teneur légèrement plus forte en quartz doit donc s'interpréter comme étant le résultat d'une altération plus poussée dans la formation limoneuse que dans l'arène. Toutefois la présence, encore importante, de minéraux relativement fragiles issus de l'arène indique que cette altération n'est que légèrement plus poussée.

- Les grains de quartz constitutifs des schistes et de leurs altérites sont amygdaloïdes et leur petite dimension n'excède pas vingt microns. Ils ne peuvent donc être à l'origine de la fraction dominante des couvertures limoneuses.

En particulier, l'étude des courbes granulométriques nous permet de penser que, lorsque les formations limoneuses surmontent un matériel d'altération de schistes, riche en sables, une microdivision de ces sables peut être à l'origine des caractéristiques granulométriques des formations limoneuses. Mais les éléments de la fraction sableuse étant uniquement de petits fragments de schistes, leur division ne peut donner naissance aux grains de quartz caractéristiques des formations limoneuses.

- Contrairement à certaines hypothèses (BOULBIN , 1977), une intense fracturation des éléments du niveau caillouteux de base n'apparaît pas ici à l'origine des formations limoneuses. La localisation topographique particulière de ce niveau, uniquement dans les zones aval et les dépressions, est d'ailleurs peu compatible avec cette hypothèse.

- Sur granite, pour envisager le développement in situ des formations limoneuses il faut supposer une fragmentation très poussée des grains de l'arène. Ceci apparaît contradictoire avec les observations des fractions sableuses moyennes et grossières qui mettent en évidence que ces fractions ne sont, dans les formations limoneuses, que très légèrement plus altérées que dans les arènes. De plus, dans une zone où le passage entre l'arène et la formation limoneuse est graduel, aucune évolution progressive des minéraux allant dans ce sens n'est observable.

- En faisant appel à un apport de particules limoneuses, l'ensemble des observations, tant sur schistes que sur granite, s'expliquent aisément.

Remarques :

- Sur quartzites aucun élément repère n'existe c'est pourquoi aucune discussion n'est présentée.

- La granulométrie des grains de quartz des schistes primaires "du segment hercynien de la Bretagne centrale" (région Sud de Rennes) a été étudiée par LE CORRE (1978).

Les grains de quartz étant généralement ellipsoïdaux c'est le diamètre du cercle de surface équivalente soit $d = \sqrt{x\ y}$ qui a été pris en considération, avec x dimension du grand axe et y dimension du petit axe.

"Ainsi le grain moyen est de l'ordre de 50 µ dans la formation de Pont-Réan, de 10 à 20 µ dans les schistes d'Angers et de 10 à 30 µ dans la formation du Riadan"
(LE CORRE, 1978).

PROFILS / MINÉRAUX LOURDS	Rossuliet		St Elouan α		St Elouan β		Ste Tréphine P. 1 *				Ste Tréphine P. 8 *			
							ALE		C		ALE		C	
	XT	R	ALE	R	XT	R	< 175µ	<64µ	<175µ	<64µ	<175µ	<64µ	<175µ	<64µ
Zircon	59(40)	1	122(95)	1	10(5)	5(3)	7(5)	64(58)		9	17(14)	169140		240
Rutile	2							5		3	2	16		20
Anatase			1											
Sphène			1					1						
Tourmaline	6		13		3	13	3	6		2		26		7
Grenat			1							2	7	8		
Augite	1													
Staurotide	3		5											
Andalousite	22	8	8	2	1	13		1				18		2
Sillimanite								3						
Disthène	1													
Epidote	4		2		2							13		
Hornblende verte	1		14		2		5				2	8		
Hypersthène			1											
Glaucophane			2									6		
Apatite			2											
Brookite	1													
Actinote				-										

TABLEAU V: QUELQUES EXEMPLES DE CORTÈGES DE MINÉRAUX LOURDS

Pour le zircon les chiffres entre parenthèses représentent les minéraux automorphes

* D'après les lames de Le Calvez-Le Bars .

La dimension du diamètre du cercle de surface équivalente pouvant raisonnablement être considérée comme deux à trois fois plus importante que celle du petit axe des grains, les résultats apparaissent donc très comparable à ceux de la région de Mûr de Bretagne.

La conséquence de ceci est la possibilité de généraliser les conclusions émises ici, sur les rapports entre les formations limoneuses et les schistes à d'autres régions.

II - 2. Les minéraux lourds

Les cortèges des minéraux lourds des différents substrats de la région ont été présentés dans le "cadre géologique" de ce mémoire (p. 23).

En chaque point, les formations limoneuses (tableau V) renferment de nombreuses espèces absentes du substrat. Soulignons notamment l'abondance des zircons automorphes, la présence de hornblendes vertes et brunes, et, dans la fraction inférieure à 60 microns lorsqu'elle a été étudiée, de glaucophanes. La taille de ces minéraux n'excède pas une centaine de microns.

A Sainte-Tréphine, des formations peu limoneuses, qui du point de vue granulométriques apparaissent essentiellement issues de l'altération des "quartzites ordoviciens", renferment également ces espèces minérales, mais en moindre quantité que les formations limoneuses et uniquement dans la fraction inférieure à 60 microns (LE CALVEZ-LE BARS, 1977).

La présence dans ces formations meubles d'espèces absentes du substrat apporte la preuve irréfragable d'un apport de matériel et, dans le cas des glaucophanes, compte tenu de la géologie régionale, d'un apport relativement lointain.

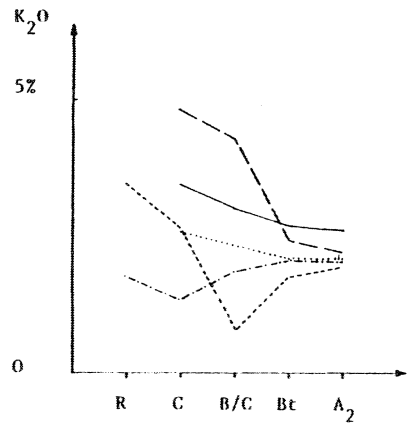
La taille de ces minéraux et leur abondance dans les formations limoneuses conduisent à penser que leur présence est, pour une part, liée à la texture de ces formations.

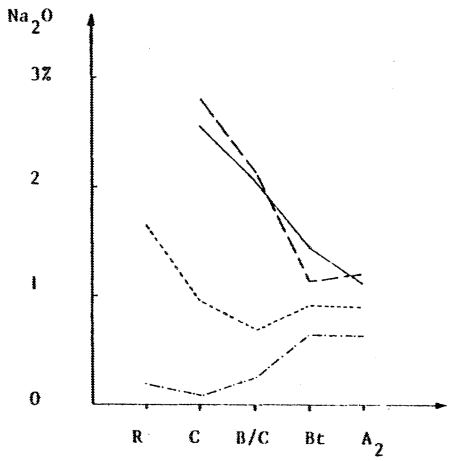
Parmi les minéraux apportés il se trouve à la fois des espèces résistantes (Zircon) et des espèces fragiles (hornblende, glaucophane) ; celles-ci indiquent que l'action de l'altération a été modérée depuis leur mise en place.

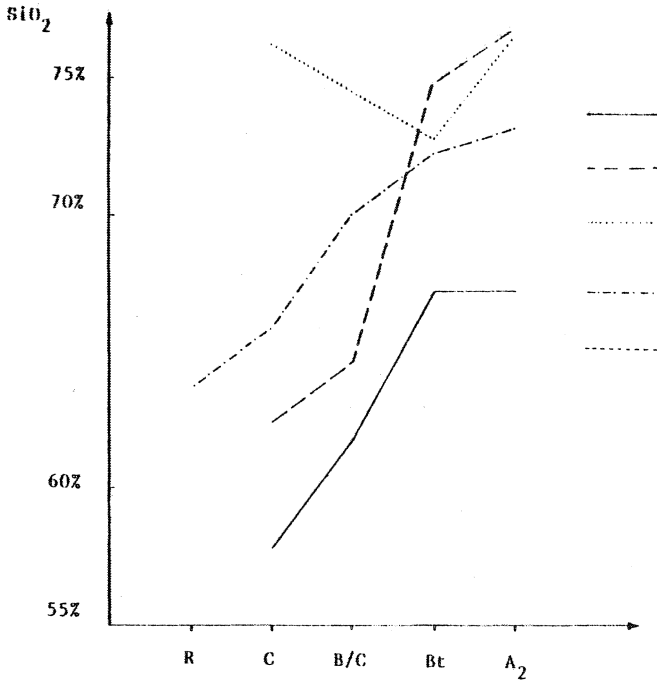
La connaissance du stock originel de ces minéraux devrait d'ailleurs permettre, selon DUCLOUX et NIJS (1974) de dater, dans une certaine mesure, l'apport, en se basant sur les proportions relatives des espèces fragiles et résistantes.

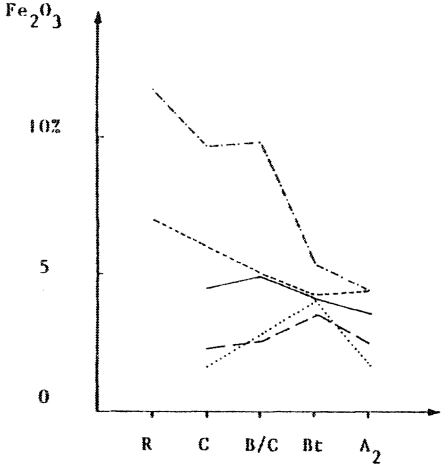
La taille de ces minéraux infirme l'hypothèse d'un apport par les pollutions atmosphériques actuelles mais est compatible avec celle d'un apport éolien quaternaire, en effet :

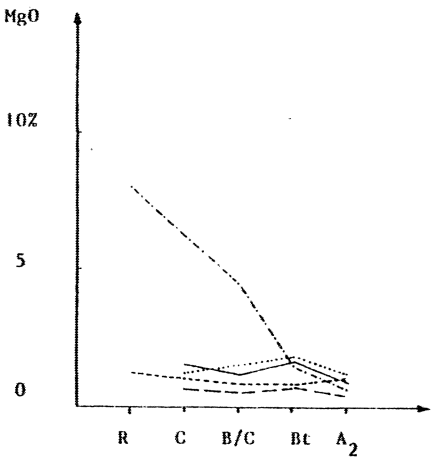
"The size range of the aerosolic dust is 1 to 10μ with mode at 4μ (JACKSON et al 1971, WALKER and COSTINE, 1971), quite distinct from the donimantly 10 to 7μ particle size distribution of loesses associated with the Pleistocene (RUHE, 1969 : JACKSON et al 1971)" (In JACKSON et al 1973, p. 137).











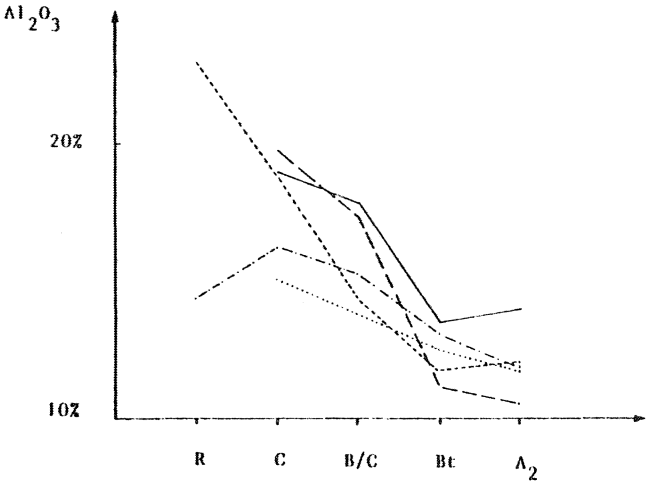


PLANCHE I : ÉVOLUTION DES ÉLÉMENTS MAJEURS.

III - LES ANALYSES CHIMIQUES

III - 1. Les éléments majeurs (cf. Planche I)

Les résultats sont présentés sur des graphiques montrant l'évolution de chaque élément en fonction de sa position dans le profil. Cinq niveaux ont été choisis :

Niveau 1 : L'horizon R (roche saine)

Niveau 2 : L'horizon C (roche altérée)

Niveau 3 : Le niveau de base des sols. Il correspond à la base de l'horizon d'accumulation et présente, du point de vue granulométrique, notamment, des caractères intermédiaires entre les formations limoneuses et "les altérations types" des roches (arène, altérite). Par commodité je le désignerai par B/C.

Niveau 4 : La partie supérieure de l'horizon d'accumulation d'argile (XT, T)

Niveau 5 : L'horizon éluvial (ALE, E).

Ces deux derniers niveaux appartiennent à la formation limoneuse. Les faits essentiels sont les suivants :

Pour chaque élément les courbes, très divergentes au niveau des roches et de leur manteau d'altération, sont convergentes au niveau des sols. Ceci traduit l'homogénéité des formations limoneuses face à la diversité des substrats.

Dans les deux profils sur granite (La Croix du Roz et le Sourn) la teneur en SiO_2 augmente des arènes aux sols tandis que la teneur en Al_2O_3 diminue fortement. Ceci est exactement l'inverse de ce qui a été mis en évidence dans les études de l'évolution géochimique des arènes (DEJOU, 1958 ; TARDY, 1969 ; SEDDOH, 1973).

Dans les profils sur schistes les variations des éléments sont très importantes. Ceci, non plus, ne correspond pas à ce qui a été décrit (DEJOU et al 1969).

Lorsque la roche est particulièrement riche en un élément, le sol qui le surmonte renferme légèrement plus de cet élément que les autres sols. De même lorsque la teneur d'un élément est particulièrement faible dans une roche, le sol sus-jacent est également déficitaire en cet élément.

On retiendra de ces faits que la couverture limoneuse est relativement homogène à l'échelle de cette région et qu'elle possède à la fois des caractères incompatibles avec les divers substrats qu'elle recouvre et des caractères montrant l'influence de ce substrat.

Notons que, dans l'ensemble, les horizons d'accumulation renferme plus de fer que les horizons éluviés. Ceci traduit la mobilité de cet élément.

III - 2. Les éléments traces (cf. planches II et III)

III - 2. 1. Introduction

L'évolution géochimique des éléments traces au cours de l'altération a fait l'objet de relativement peu de travaux (RAMBAUD et PINTA, 1970 ; MOSSER, 1978...).

Aussi certaines hypothèses restent encore très discutées, mais, tous s'accordent déjà sur le fait que : "Les teneurs de l'ensemble des éléments traces des fractions inférieures à 2 microns (des produits d'altération) oscillent autour de celles des roches mères" (MOSSER, 1978). C'est dans ce cadre que vont être discutés les résultats.

Deux groupes de profils ont été analysés. Le premier groupe est constitué de trois profils situés dans la région de Rennes. Ces profils sont distants les uns des autres d'une quinzaine de kilomètres.

Le second groupe est formé par trois profils de la région de Mûr-de-Bretagne (22) à environ 120 kilomètres de là. Les trois profils appartiennent à la même toposéquence. Cette toposéquence dite de Saint-Elouan a déjà été présentée (LE CALVEZ et MARHIC, 1976). RIVIERE a échantillonné les trois profils de la région rennaise. Le premier d'entre eux se situe à Guignen sur des quartzites ordoviciens (grès armoricain), le second à Montfort sur des schistes cambro-trémadociens (schistes rouges), le dernier à Vezin-le-Coquet sur schistes briovériens.

J'ai prélevé les trois profils de la séquence de Saint-Elouan. Le profil de Saint-Elouan α se développe sur des schistes briovériens peu altérés ; sa base est marquée d'un niveau de cailloux de quartz et de plaquettes de schistes. Le profil de Saint-Elouan β se situe sur un filon basique ; on observe un lit de cailloux de quartz à une dizaine de centimètres au-dessus de la base du sol. Le profil de Saint-Elouan α se développe au-dessus de schistes altérés.

Dans chaque profil ont été analysés trois échantillons de roches, et les fractions inférieures à 2 microns de l'horizon d'accumulation dans la couverture limoneuse proprement dite d'une part, dans le niveau de base du sol d'autre part.

Les analyses de ces échantillons ont été effectués à Strasbourg par Ch. MOSSER, les résultats ont été interprétés avec son aide. SiO_2, Al_2O_3, MgO, CaO, Fe_2O_3, Mn_3O_4, TiO_2, Sr, V, Ni, Co, Cr, B, Zn, Ga, Ca, Pb, Sn, ont été dosés par spectrométrie à lecture directe, Na_2O et K_2O par spectrométrie de flamme.

Les raisonnements, comme les graphes qui les soutiennent, se font suivant deux approches :
- en comparant par élément l'ensemble des formations limoneuses et l'ensemble des substrats
- en suivant, par profil, l'évolution des divers éléments.

III - 2. 2. Les faits : présentation et discussion

a) Les formations limoneuses

Les fractions inférieures à 2 microns des formations limoneuses présentent des courbes quasiment plates ce qui traduit des teneurs en éléments traces équivalentes pour ces fractions dans les 6 profils. Au contraire, les teneurs en éléments traces des roches sous-jacentes sont très différentes d'un profil à l'autre. Ceci met en évidence l'homogénéité du matériel argileux des formations limoneuses opposé à l'hétérogénéité des roches sous-jacentes.

A Saint-Elouan β les teneurs en Ni, Co, Cr, sont très élevées dans la roche ; parallèlement, dans la fraction inférieure à 2 microns de la formation limoneuse, les teneurs en ces éléments apparaissent légèrement supérieure à la moyenne des autres formations limoneuses. Le substrat exerce donc une certaine influence sur la composition chimique de ces dernières.

Les courbes établies par profil conduisent à distinguer les profils sur schistes

briovériens des autres profils. Pour les premiers, les courbes de teneur en éléments traces de la fraction inférieure à 2 microns des formations limoneuses tendent à se paralléliser à celle des roches sous-jacentes, avec toutefois une certaine restriction en ce qui concerne les teneurs en Ni à Saint-Elouan. Pour les seconds les courbes des teneurs en éléments traces ne s'ajustent pas entre elles.

Le matériel des formations limoneuses présenterait donc des affinités géochimiques avec celui des schistes briovériens et, au contraire, n'aurait pas de lien génétique avec les autres roches.

A Saint-Elouan, ces faits pourraient s'interpréter comme résultant d'une simple homogénéisation des matériaux au niveau du versant, mais cette interprétation est en opposition avec certaines observations en particulier le cortège des minéraux lourds et la nature des grains du squelette (cf. § II.)

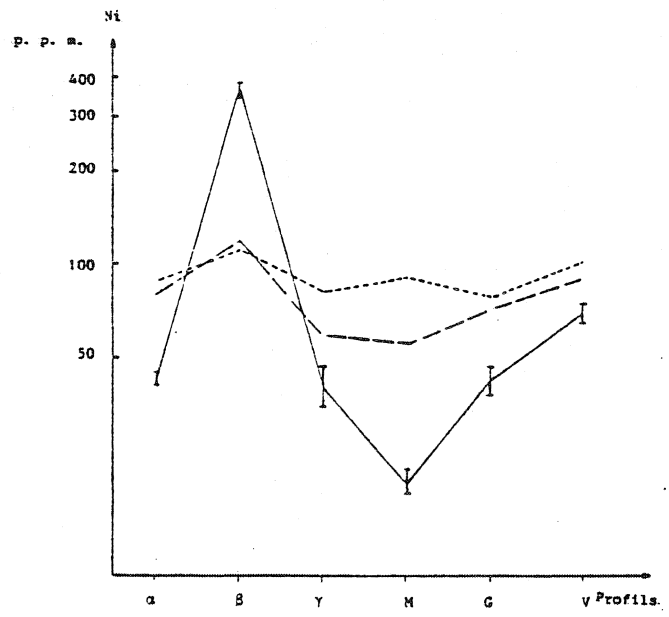
Dans la région de Rennes ces faits vont dans le sens de l'origine allochtone d'une partie importante des formations limoneuses en ce qui concerne les profils sur quartzites et schistes rouges. Les ressemblances que font apparaître les éléments traces entre les schistes briovériens et les formations limoneuses ne peuvent s'interpréter comme la preuve d'un lien génétique étroit entre ces deux matériaux (grains du squelette, granulométrie, minéraux lourds) mais mettent en évidence les affinités géochimiques entre ces matériaux. Ceci est en accord avec les observations microscopiques qui montrent que le quartz et la muscovite constituent les minéraux cardinaux des schistes et des limons.

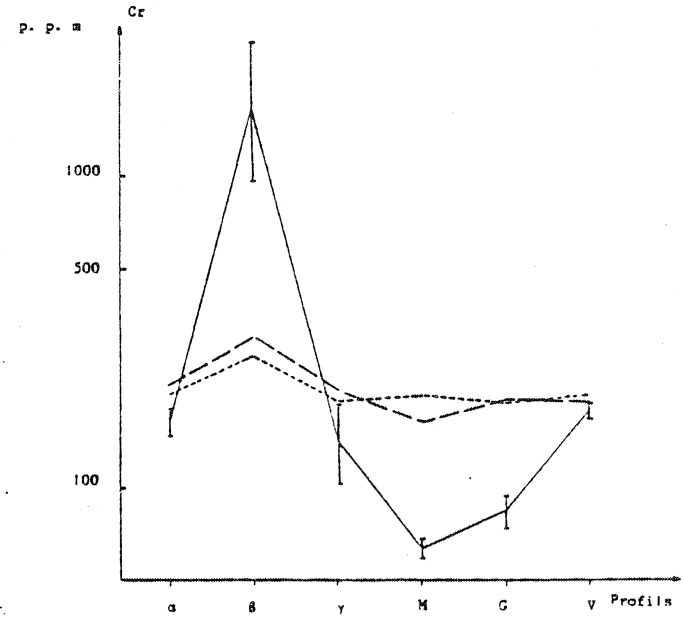
Il faut noter le comportement particulier du Cu. Les courbes de teneurs en cet élément dans les formations limoneuses tendent à se paralléliser à celles des roches sous-jacentes ; néanmoins la dispersion des teneurs reste beaucoup plus faible dans ces formations limoneuses (25%) que dans les roches (75%). Ceci peut s'interpréter soit comme caractérisant un comportement particulier du Cu qui apparaîtrait ici comme un élément mobile capable de s'homogénéiser rapidement, soit comme résultant de l'influence du substrat sur les formations limoneuses ; en effet à un fort déficit dans deux roches (grès et schistes rouges) correspond un léger déficit dans les formations limoneuses sus-jacentes. Ces deux interprétations ne sont d'ailleurs pas contradictoires, la mobilité du Cu accentuant l'influence du substrat.

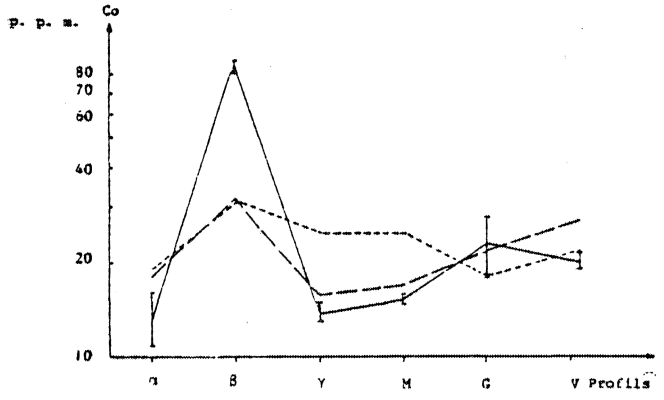
b) Le niveau de base des sols

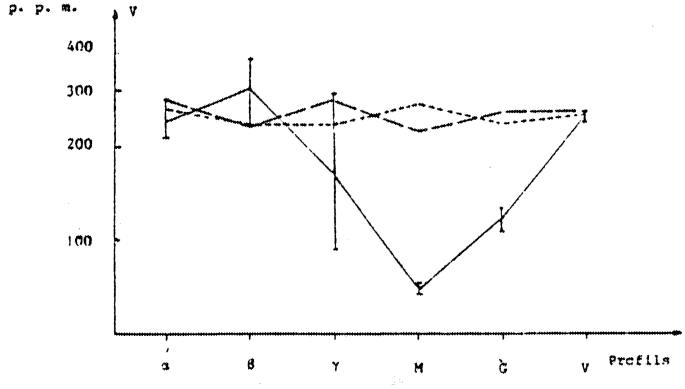
Les courbes du matériel de base des sols suivent de manière estompée les variations des courbes des roches. Cette variation simultanée traduit l'influence assez importante des substrats sur la composition du niveau de base des sols. La platitude relative des courbes de ce groupe de matériaux ainsi que leurs caractéristiques intermédiaires entre les courbes des roches et celles des formations limoneuses indiquent l'influence de celles-ci sur la fraction fine du matériel de base des sols. L'analyse des éléments traces fait donc apparaître l'origine mixte de ce niveau et confirme l'interprétation précédemment avancée (LE CALVEZ et MARHIC, 1976).

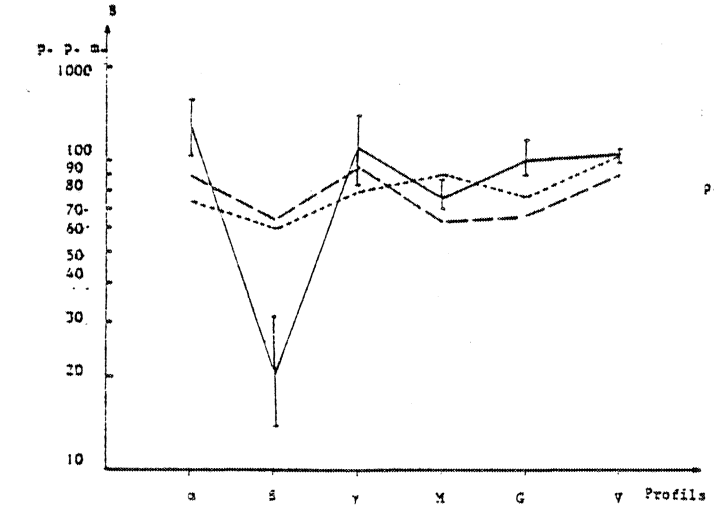
La marque des formations limoneuses sur le niveau de base des sols apparaît relativement importante, mais, les analyses portant sur la fraction fine, il convient d'être prudent ; en effet :











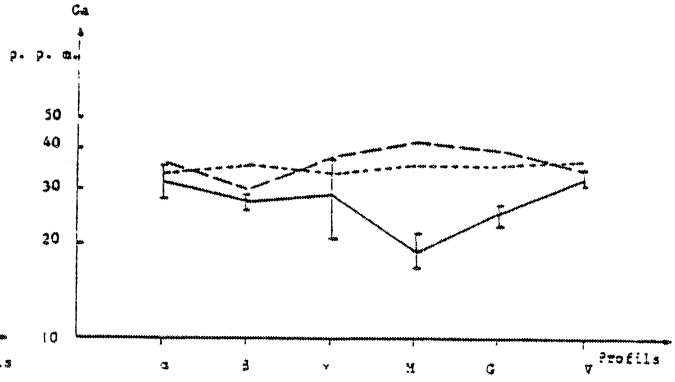
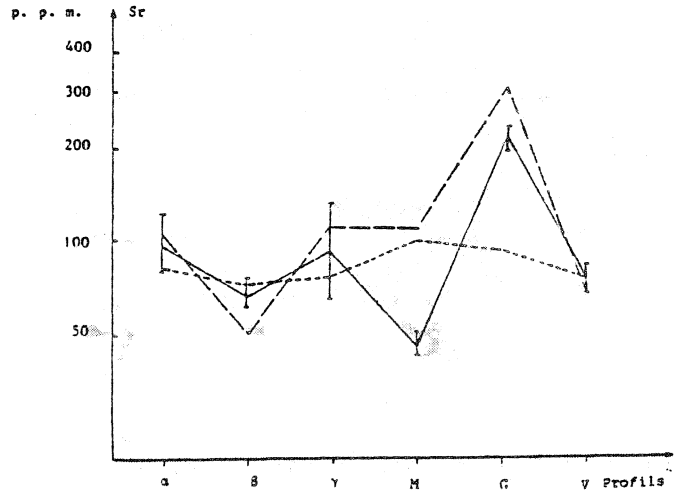
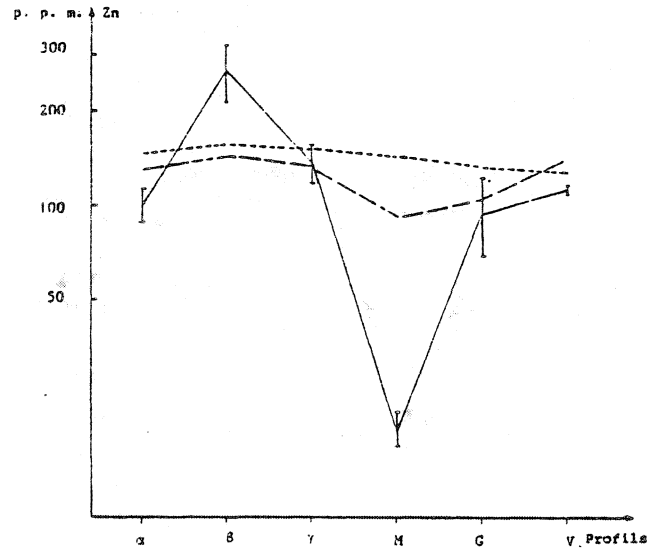
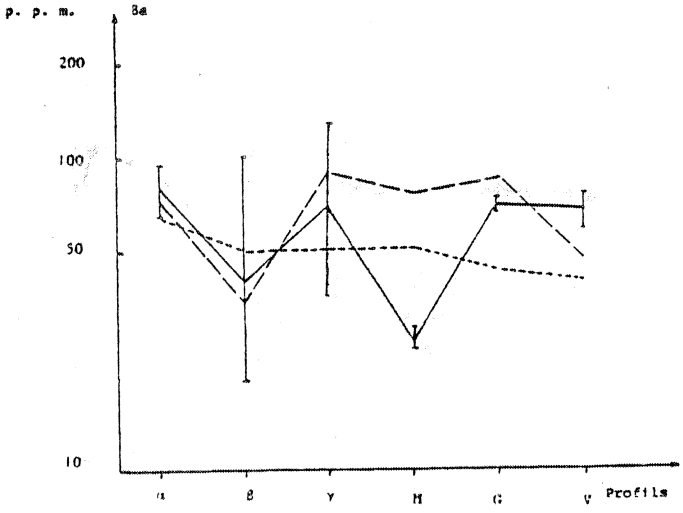
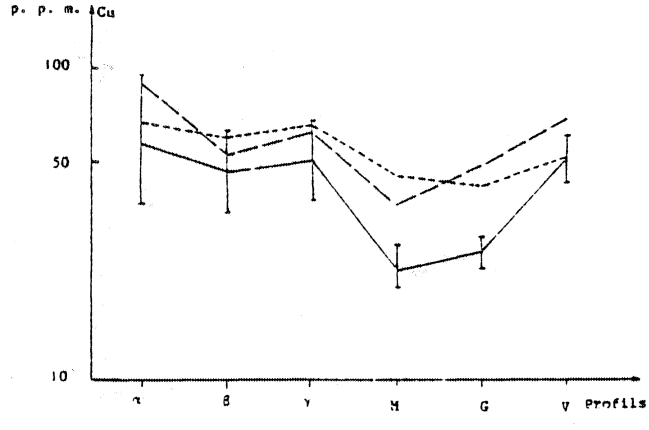


PLANCHE II : LES ELEMENTS TRACES:









------- Horizon XT

— — — Horizon B/C

——— Substrat

COMPARAISON DES PROFILS

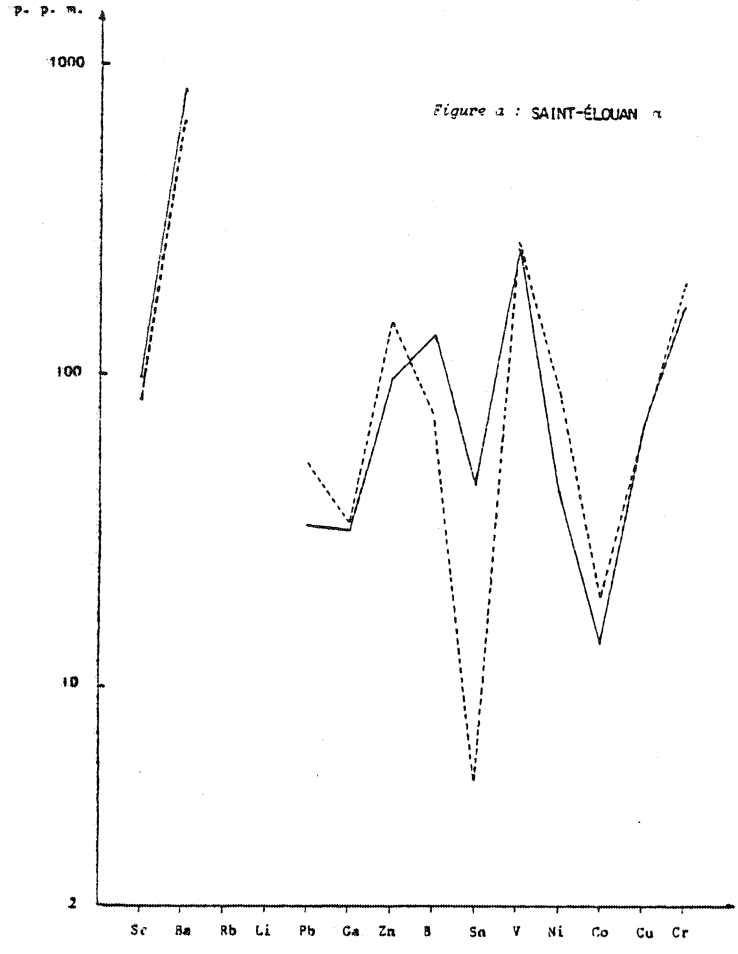


Figure a : SAINT-ÉLOUAN α

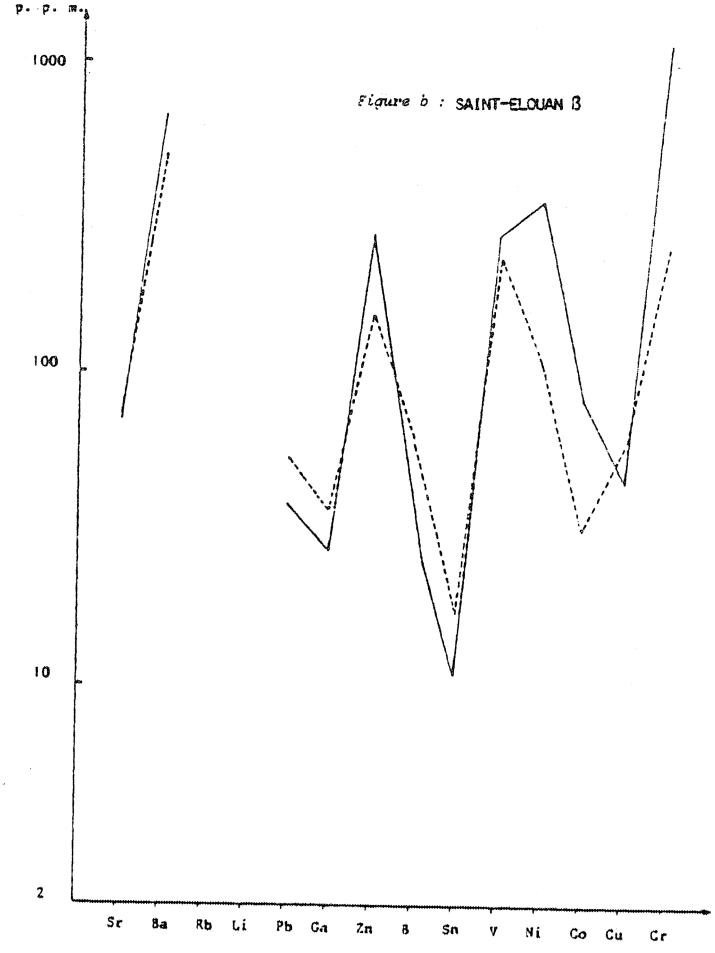


Figure b : SAINT-ELOUAN β

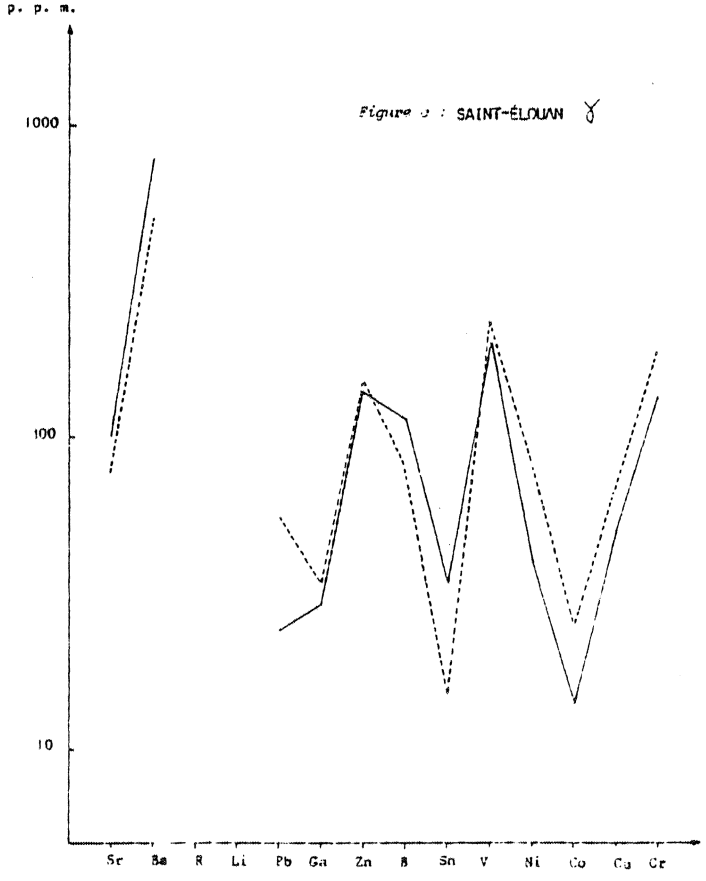


Figure c : SAINT-ÉLOUAN γ

PLANCHE III : LES ELEMENTS TRACES:

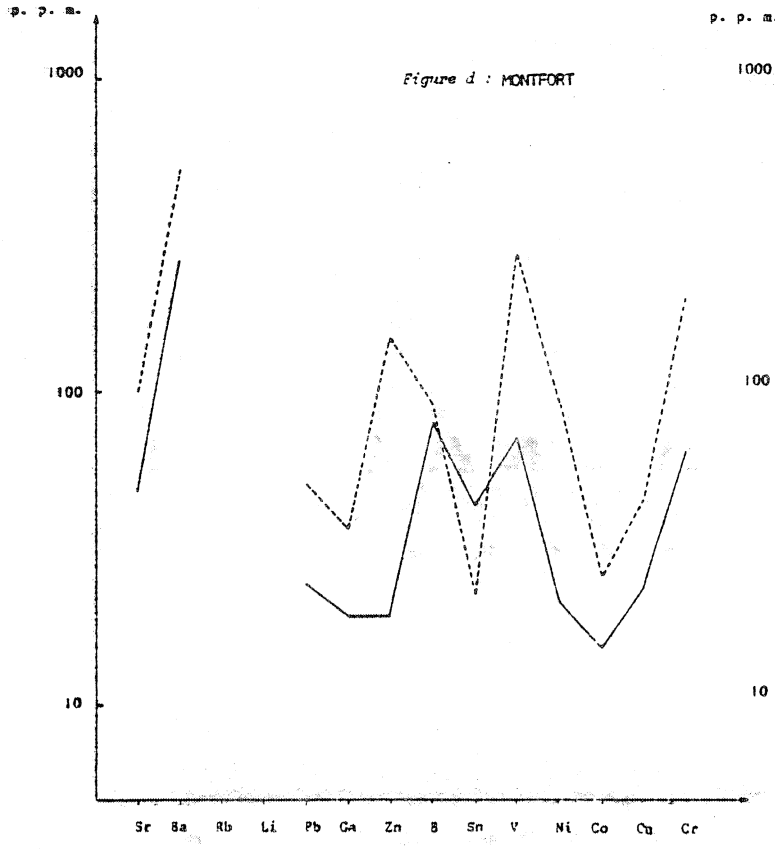


Figure d : MONTFORT

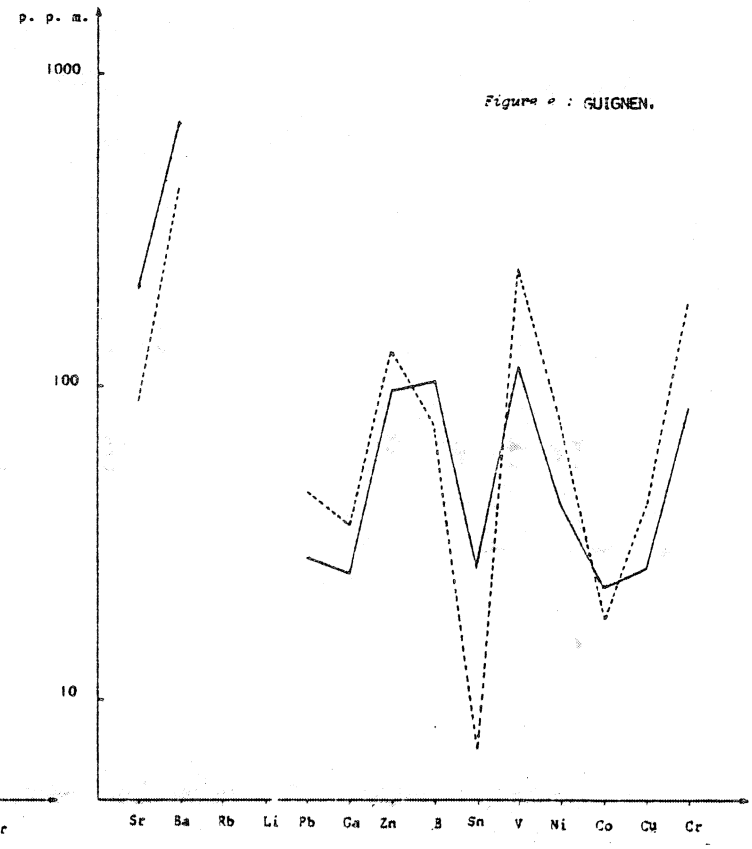


Figure e : GUIGNEN.

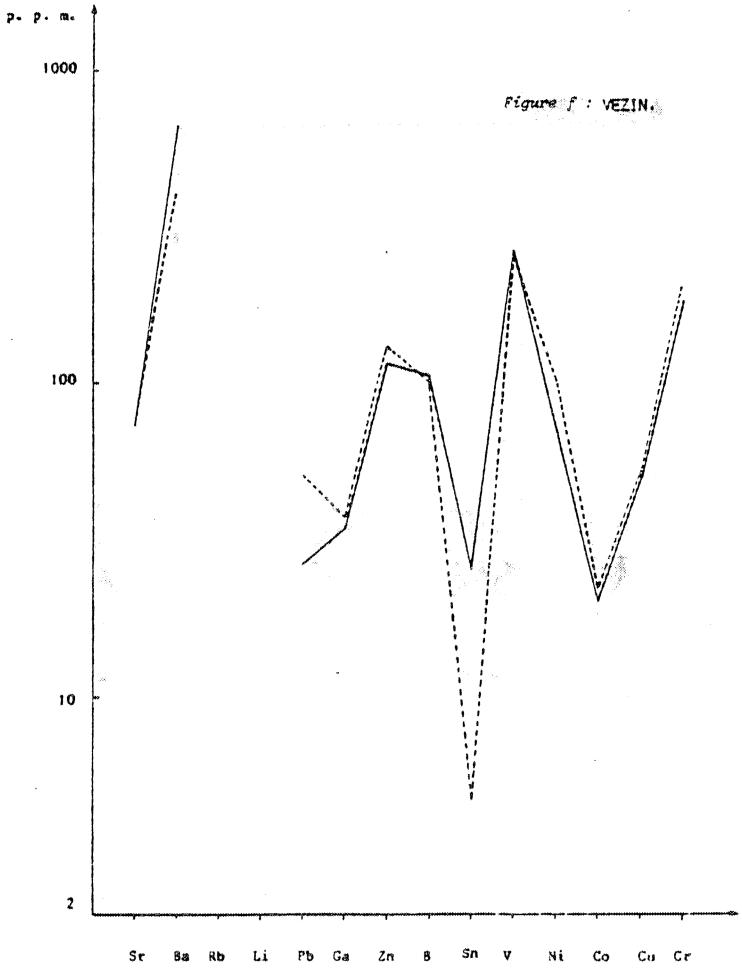


Figure f : VEZIN.

Substrat

Formation limoneuse (XT)

EVOLUTION PAR PROFIL

- d'une part, d'un point de vue global le niveau de base des sols présente des caractères intermédiaires entre la roche et la formation limoneuse, l'influence de la roche étant très largement dominante (LE CALVEZ et MARHIC, 1976).
- d'autre part, le lessivage a enrichi ce niveau de base des sols en particules inférieures à 2 microns, particules qui proviennent essentiellement de la formation limoneuse sus-jacente, c'est-à-dire que, au niveau de la fraction fine l'influence de la formation limoneuse sur le niveau de base des sols est fortement accrue.

III - 2. 3. Conclusion

Les formations limoneuses étudiées semblent, d'après l'analyse des éléments traces, constituées du mélange entre un matériel allochtone, qui imprime une physionomie plate aux courbes par éléments, et les matériaux issus des substrats ce qui se marque par certaines variations dans les courbes par éléments.

Les roches qui ont donné naissance au matériel allochtone apparaissent avoir une composition chimique comparable à celles des schistes briovériens ou de granite de façon plus générale.

Les matériaux de base des sols présentent des caractères intermédiaires entre les formations limoneuses proprement dite et les roches sous-jacentes.

IV - CONCLUSION

Les données minéralogiques, tant l'observation de l'ensemble des constituants que celle des seuls minéraux lourds, mettent en évidence que les fractions supérieures à 100 microns des formations limoneuses sont autochtones.

Les grains de quartz des schistes étant de taille inférieure à ceux des formations limoneuses ils ne peuvent être à l'origine de ces derniers.

Sur granite pour expliquer l'origine in situ des formations limoneuses il faut envisager une altération ou une fragmentation très poussée. Ceci semble contradictoire avec l'étude des fractions sableuses qui ne fait apparaître qu'une altération modérée entre les arènes et les formations limoneuses. Pour expliquer le caractères de ces dernières, il convient donc de faire appel à un apport de matériel dans les fractions inférieures à 100 microns. Les minéraux lourds confirment l'existence d'un tel apport et la présence d'espèces fragiles (hornblende verte, glaucophane) montre que depuis, l'action de l'altération est restée modérée.

Du point de vue chimique la présence de cet apport explique l'homogénéité des formations limoneuses et les incompatibilités qui existent, entre ces formations et les substrats qu'elles recouvrent. Les différences observées entre les formations en fonction des roches sous-jacentes, indiquent l'influence, plus modeste, du substrat.

F) CONCLUSION À L'APPROCHE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE.

I - LES ACQUIS

Les actions pédogénétiques, doublées des phénomènes de déplacement de matériaux le long des versants, suffisent à expliquer l'aspect actuel des formations limoneuses, notamment, parmi les discontinuités qui s'y observent :
- la succession d'un niveau clair pauvre en argile et d'un niveau rouge riche en argile
- la présence, sporadique, à la base des formations limoneuses d'un niveau de cailloux légèrement émoussés.

Les discordances qui existent entre la texture des matériaux et la nature des principaux horizons pédologiques (E, ALE, XT, T), d'une part mettent en évidence que les mécanismes de génèse de ces horizons ne peuvent être à l'origine des caractéristiques granulométriques des formations limoneuses ; d'autre part confirment que ce sont les actions pédologiques qui sont responsables des caractères morphologiques des formations limoneuses.

Les données analytiques montrent que dans les formations limoneuses à un certain apport s'ajoute une participation, plus modeste, du substrat. Cet apport se limite aux particules de taille inférieure à 100 microns. Ses caractéristiques le rapprochent de ce qui a été décrit dans d'autres régions du Massif Armoricain(ESTEOULE et al, 1972 ; MONNIER, 1973 ; PLIHON, 1974) et de manière plus générale des loess pleistocènes (JACKSON et al, 1973). Les traces de l'influence d'un climat périglaciaire s'observent d'ailleurs dans la région.

La présence de glaucophane plaide en faveur d'une province d'alimentation relativement lointaine pour les matériaux allochtones.

II - LES PROBLEMES POSES

L'approche morphologique et analytique a permis de résoudre un certain nombre de questions. Néanmoins de nombreux problèmes restent en suspens. Je diviserai ceux-ci en deux groupes. D'une part les problèmes directement étudiés dans ce mémoire et qui concernent l'origine du matériel constitutif des sols de la région. D'autre part, les problèmes, qui ont été soulevés dans de nombreuses études, et m'apparaissent tributaires de la nature même des matériaux constitutifs des sols : il s'agit en particulier des phénomènes de lessivage.

Dans le premier groupe il convient notamment de souligner que :
- les parts respectives de ce qui provient de l'apport et de ce qui est issu du substrat n'ont pas été évaluées de façon précise
- en ce qui concerne l'apport aucune composition détaillée, ni granulométrique, ni chimique n'a été avancée
- le glaucophane indique que l'apport est relativement lointain ; toutefois aucune province d'alimentation n'a été proposée.

En ce qui concerne le second groupe la question peut être ainsi présentée : Quelle est la signification des indices d'entraînement dans un profil où, verticalement, la texture du squelette varie de façon importante ? (cf. La Croix du Roz...). Autrement

dit, comment, dans ces profils établir la part des variations propres aux actions pédogénétiques ?

TROISIEME PARTIE

APPROCHE QUANTITATIVE DES MATERIAUX CONSTITUTIFS DES SOLS DE LA REGION DE MUR DE BRETAGNE

INTRODUCTION

Les données morphologiques et analytiques font apparaître le matériel constitutif des sols comme le résultat du mélange entre un apport et les produits issus du substrat. Aussi, il m'a semblé intéressant de se fonder sur les propriétés mathématiques du mélange entre deux matériaux pour essayer :

1° de définir les caractéristiques des deux constituants initiaux du mélange afin de déterminer leur origine

2° d'évaluer les proportions relatives de ces constituants dans chaque échantillon

3° de préciser les influences respectives du mélange et des autres processus (actions pédogénétiques, altération...) sur la composition des divers échantillons.

Avant de présenter les aspects théoriques du mélange de deux matériaux et leurs applications aux sols, je vais aborder, sur un exemple concret, les deux questions qui se posent :

- quelles sont les propriétés d'un mélange à deux constituants ?
- quelles sont les conséquences de la théorie des mélanges pour les sols ?

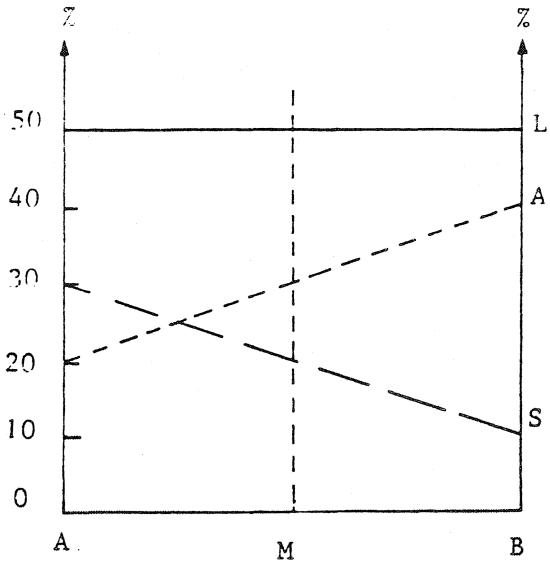
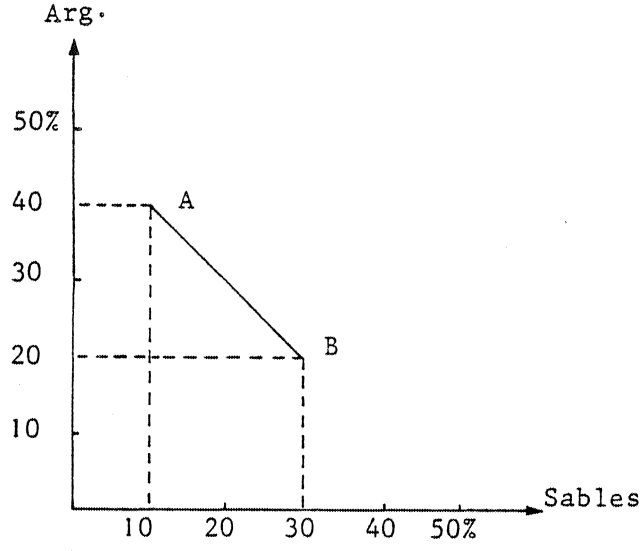


FIGURE 22 : DIAGRAMME PROPORTION DE MÉLANGE, CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES.

FIGURE 23 : RELATION ENTRE DEUX CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES.



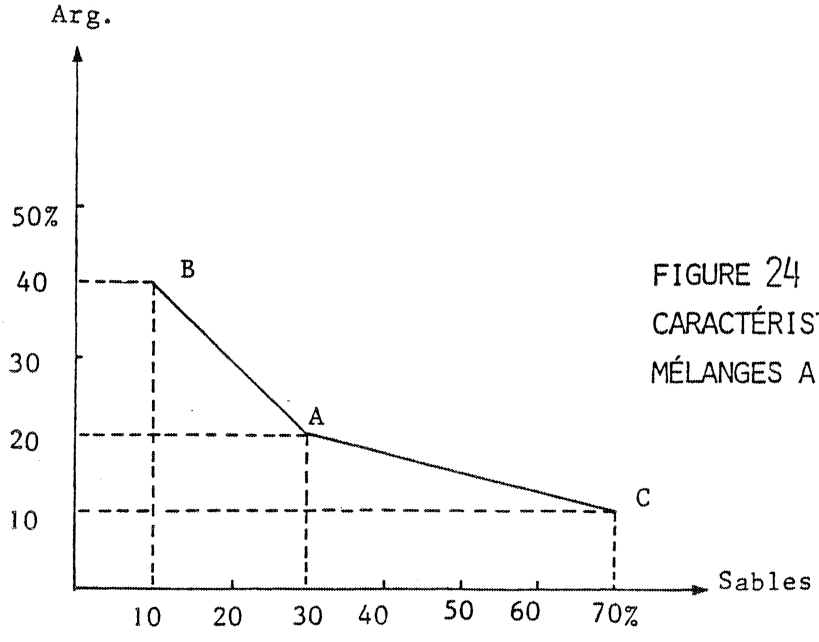


FIGURE 24 : RELATIONS ENTRE DEUX CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES, MÉLANGES A, B ET A, C INDÉPENDANTS.

A) LE MÉLANGE DE MATÉRIAUX

I - UN EXEMPLE CONCRET ; LES PROBLEMES POSES.

I - 1. Introduction

Soient un matériel A, qui contient 20% d'argile, 50% de limon, 30% de sable et un matériel B, qui renferme 40% d'argile, 50% de limon et 10% de sable.

Effectuons plusieurs mélanges en proportions variées. A chacun d'eux correspond, en fonction des proportions relatives de A et de B, une texture donnée. Elle est intermédiaire entre celle de A et celle de B.

Lorsque dans la composition du mélange il entre x % de A, il entre (100 - x) % de B. Appelons M un matériel de mélange quelconque. Les caractéristiques du matériel M, constitué à part égale de A et de B, sont données par la relation :

$$M = \frac{1}{2} A + \frac{1}{2} B$$

La texture de M est donc de 30% d'argile, 50% de limon et 20% de sable ; la somme des caractéristiques granulométriques vaut, bien entendu, 100%. De la même manière il est possible de calculer les caractéristiques des matériaux de mélange pour toutes les proportions relatives de A et de B ; ce calcul est représenté sur la figure 22.
Remarquons que :
- la relation qui lie chaque caractéristique des matériaux aux proportions de mélange est linéaire.
- les caractéristiques des matériaux initiaux du mélange (A et B) constituent les bornes de chaque segment de droite.
- lorsque les caractéristiques des matériaux initiaux du mélange sont identiques, cas du limon, aucune variation n'existe en fonction des proportions de mélange.

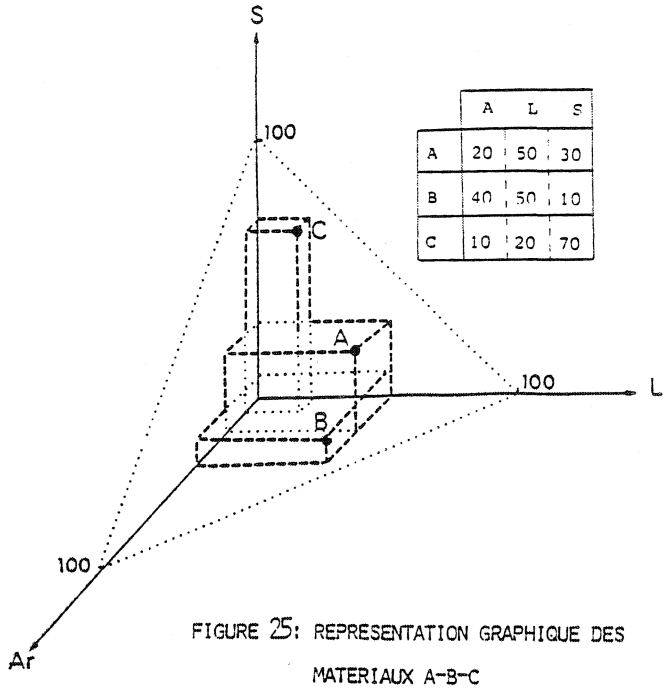
Dans le cas des sols les matériaux A et B (et par conséquent leur proportion respective dans chaque échantillon) sont inconnus. Le problème ne peut donc pas être étudié ainsi. Il est seulement possible d'analyser les variations des caractéristiques d'un échantillon à l'autre.

Je vais d'abord étudier les variations de ces caractéristiques prises deux à deux puis les variations simultanées de l'ensemble des caractéristiques.

I - 2. Etude des variables prises deux à deux

I - 2. 1. Etude d'un mélange

Considérons l'exemple de la variation de la teneur en argile par rapport à la teneur en sable. Le matériel A renferme 20% d'argile pour 30% de sable et le matériel B 40% d'argile pour 10% de sable ; un matériel M constitué du mélange à part égale de A et B



	A	L	S
A	20	50	30
B	40	50	10
C	10	20	70

FIGURE 25: REPRESENTATION GRAPHIQUE DES MATERIAUX A-B-C

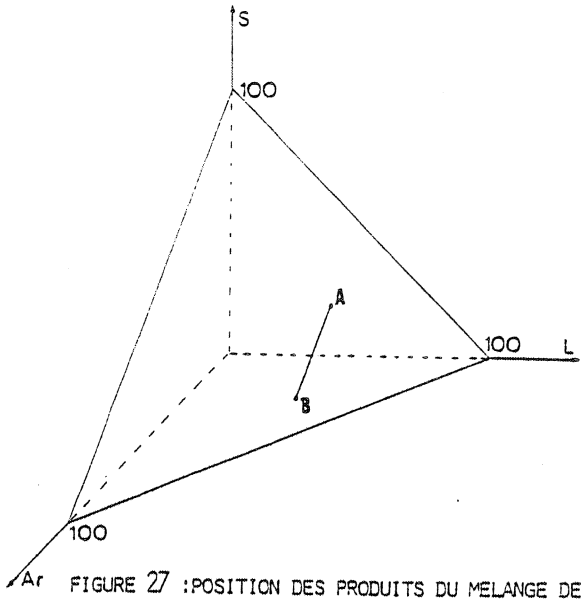


FIGURE 27 :POSITION DES PRODUITS DU MELANGE DE A ET B

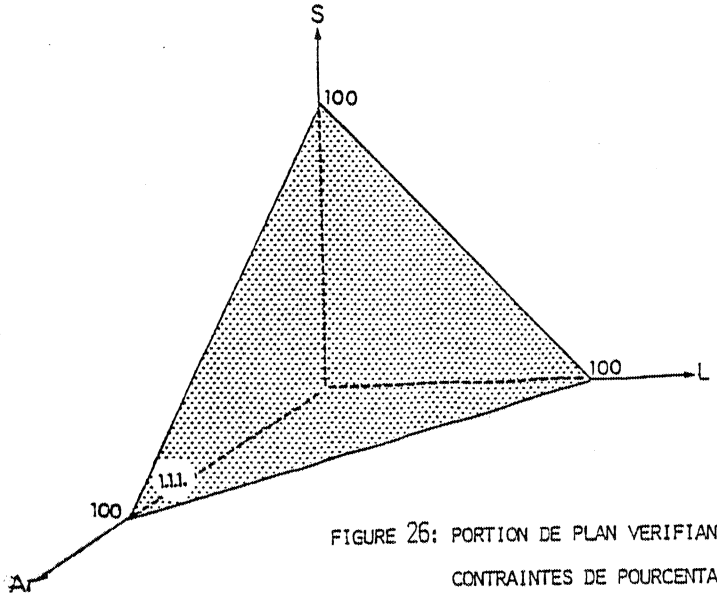


FIGURE 26: PORTION DE PLAN VERIFIANT LES CONTRAINTES DE POURCENTAGE

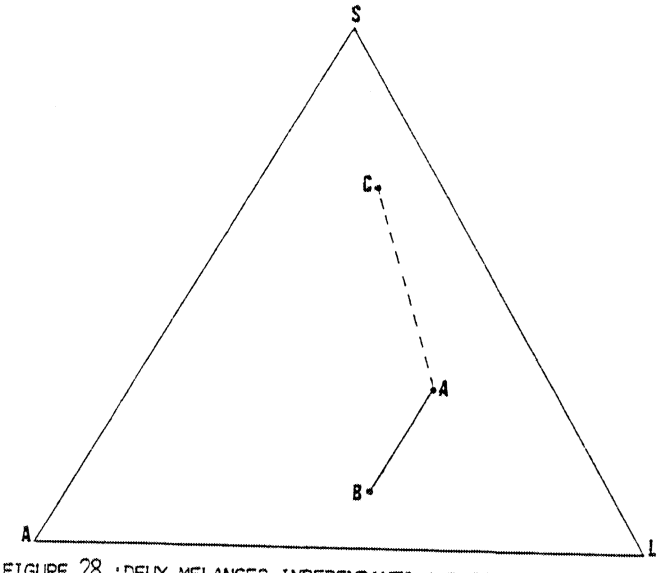
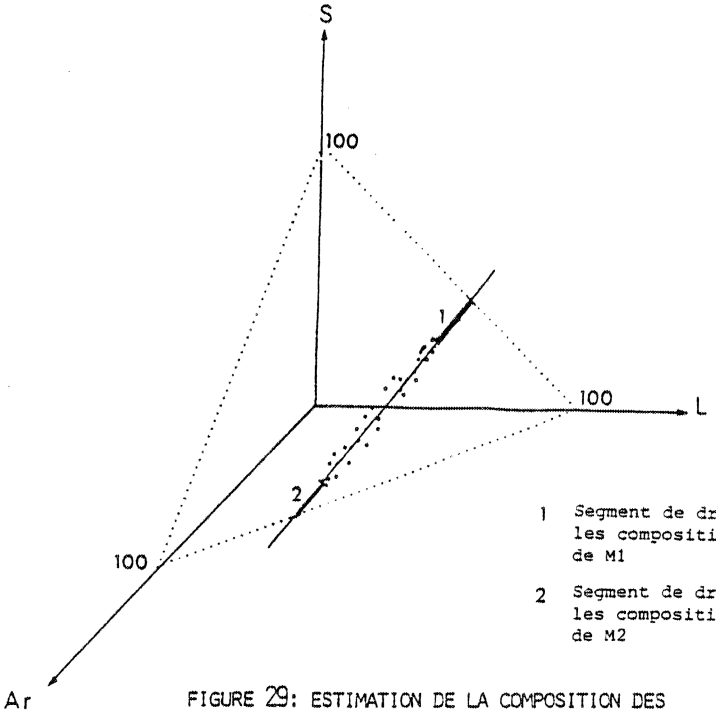


FIGURE 28 :DEUX MELANGES INDEPENDANTS A-B ET A-C :POSITION DES PRODUITS DE MELANGE DANS LE TRIANGLE DE TEXTURE



1 Segment de droite définissant les compositions possibles de M1

2 Segment de droite définissant les compositions possibles de M2

FIGURE 29: ESTIMATION DE LA COMPOSITION DES POLES DU MELANGE

contiendra 30% d'argile pour 20% de sable. Sur un graphe, l'ensemble des valeurs, qu'il est ainsi possible de définir, constitue un segment de droite dont les bornes sont les points A et B (fig. 23).

Si l'hypothèse de mélange est juste, quelles que soient les deux variables considérées (argile - limon ; limon - sable... etc...), les points représentant les divers échantillons du mélange doivent être alignés. Le coefficient de corrélation permet de tester l'existence ou non de ces relations linéaires. Lorsque le coefficient est significatif les variations observées peuvent s'expliquer par le mélange de deux matériaux.

I - 2. 2. Etude de plusieurs mélanges ayant un matériel commun

Considérons un nouveau matériel appelé C, qui contient 10% d'argile, 20% de limon et 70% de sable. Effectuons le mélange de ce matériel C avec le matériel A. Nous sommes en présence de 2 mélanges indépendants (A-B et A-C) avec un matériel commun (A). Les variations de deux caractéristiques quelconques, par exemple celles des teneurs en argile par rapport aux teneurs en sable, correspondent à deux segments de droites qui ont un point commun en A. Il constitue l'une des bornes de chaque segment de droites (fig. 24).

Ce dernier graphe illustre le problème tel qu'il a été posé : en effet les deux hypothèses suivantes ont été admises :

1° sur un substrat donné, les sols sont constitués par le mélange d'un apport et des produits issus du substrat. Ce sont les différences de proportions entre ces deux constituants qui expliquent, en grande partie, les variations qui s'observent dans les matériaux des sols (à l'exclusion des variations des teneurs en argile).

2° pour toute la région il n'existe qu'un seul apport alors que les caractéristiques des produits issus des substrats sont différentes.

Si ces hypothèses sont justes il suffit d'appeler, dans le dernier graphe (fig. 24), A le matériel d'apport, B le matériel issu de l'altération d'une roche b, C le matériel issu de l'altération d'une roche c.

Dans chaque séquence il faut donc, après avoir vérifié l'hypothèse de mélange définir les deux constituants initiaux de ce mélange. L'étude simultanée de l'ensemble des variables permet cette caractérisation d'une manière rapide et logique.

I - 3. Etude simultanée de l'ensemble des variables

I - 3. 1. Représentation graphique

Reprenons les exemples précédents. Chaque matériel est défini par trois variables : ses teneurs en argile, limon et sable. Il est donc possible de le représenter par un point dans un graphique à trois dimensions (*) (fig. 25). Aucune de ces variables ne peut être négative et leur somme vaut 100%, par conséquent les points représentatifs des échantillons de sols seront tous situés sur la portion de plan limitée par les segments de droite qui joignent les extrémités des vecteurs unitaires (fig. 26). Cette portion de plan

* *Remarquons que la projection des différents points dans les plans définis par deux des axes (limons - sables ou sables - argiles ou argiles - limons) correspond au problème tel qu'il a été posé précédemment.*

correspond en fait au triangle de texture. Appelons la, "plan 1.1.1." par référence aux indices de MILLER.

I - 3. 2. Interprétation géométrique du mélange

Les matériaux A, B et C sont des points du"plan 1.1.1." Tout produit du mélange de A et B est à son tour représenté par un point du"plan 1.1.1."situé entre A et B, d'autant plus proche de A que la proportion de celui-ci est grande. L'ensemble des matériaux de mélange est donc représenté par une série de points alignés entre A et B (fig. 27).

Les transformations qui ont nécessairement eu lieu depuis le mélange et les erreurs de mesure font que les points représentant les échantillons de sols ne sont pas parfaitement alignés mais constituent un nuage allongé entre les deux pôles du mélange.

Dans le cas général où il y a plus de 3 caractéristiques le principe de la représentation reste le même, mais sa réalisation pratique est impossible. Il est alors nécessaire de passer par l'intermédiaire d'une analyse en composantes principales (A.C.P.) dont l'objectif est précisément de rechercher les directions principales d'allongement d'un nuage de points évoluant dans un espace multidimensionnel. Si l'hypothèse de mélange est vraie, l'analyse fournira une direction principale prépondérante.

Il est évident que cette démarche ne fournit pas en soi une preuve de la validité de l'hypothèse de mélange mais, permet de dire si les données sont compatibles ou non avec celle-ci.*

I - 3. 3. Estimation de la composition des pôles du mélange

Les points représentant les deux matériaux initiaux les plus compatibles avec l'ensemble des échantillons sont situés sur les segments de droite prolongeant le nuage (fig. 29). Pour chacun des deux matériaux la fourchette des compositions possibles est déterminée par les extrémités du nuage de points (une proportion devant être comprise entre 0 et 1) et par les limites du "plan 1.1.1." (une variable est comprise entre 0 et 100%).

Cette méthode fournit les estimations des deux composants initiaux du mélange mais, n'indique pas leur origine.

Cette discussion constitue la partie essentielle du travail ; dans le cadre des hypothèses émises précédemment il faut notamment :

1° mettre en évidence que l'un des deux matériaux provient du substrat ; si possible préciser l'évolution qu'il a subie

2° démontrer que l'autre matériel :

a) ne peut être issu du substrat

b) peut provenir d'un apport, en particulier que sa composition granulométrique est compatible avec celle d'un matériel transporté.

---

* *Remarque : Les mélanges indépendants de A et B puis de A et C sont représentés dans le plan 1.1.1. par deux segments de droites ayant un point commun : la borne A (fig. 28).*

I - 4. Quelques aspects pratiques

Par rapport à la présentation simplifiée qui précède des problèmes supplémentaires se posent.

I - 4. 1. Existence de plusieurs populations

Sur chaque substrat il existe diverses "familles de matériaux" (arène, sol limoneux, matériaux de talweg) qui ne peuvent être traités simultanément par le modèle de mélange.

Il faut les individualiser et préciser les rapports qui existent entre elles. Pour ceci la démarche suivante a été adoptée, dans la mesure du possible :

Sur chaque substrat des échantillons sont prélevés dans les diverses "familles de matériaux" ; notamment dans les sols limoneux et dans les horizons d'altération des roches. Les coefficients de corrélation linéaire ont d'abord été calculés de façon séparée pour chaque "famille de matériaux". Ensuite les points représentatifs de l'ensemble des échantillons ont été portés sur les mêmes graphes afin de définir les limites entre ces "familles".

Ce stade de l'étude est appelé "dépouillement préliminaire". Il convient de souligner son importance : il permet de déterminer si, d'un point de vue statistique, les échantillons présumés de mélange se différencient des autres (arènes, altérites...).

Seuls les matériaux des sols seront ensuite étudiés en détail par l'analyse en composantes principales.

I - 4. 2. Estimation de la composition des pôles du mélange

Dans le modèle proposé, les contraintes qui interviennent sur les estimations des deux constituants initiaux du mélange sont :

- une proportion est comprise entre 0 et 1
- une variable est comprise entre 0 et 100%

Nous verrons qu'en ce qui concerne "l'apport" ces deux contraintes conduisent à des fourchettes relativement étroites. Par contre pour les produits d'altération la fourchette ainsi établie est relativement large. Elle a été minimisée en tenant compte de la composition des matériaux d'altération observés sur le terrain. Par exemple sur quartzites le pourcentage d'argile estimé était compris entre 0 et 4,5%. Or le banc de grès le moins altéré en contient 3%, aussi les nouvelles estimations ont-elles été prises entre 3 et 4,5% .

Pour chaque échantillon, le choix de tel ou tel point de la fourchette dans le calcul des pôles change les proportions relatives d'apport et de substrat, mais ne modifie pas sa composition estimée : celle-ci est déterminée par sa position sur l'axe prédominant de l'analyse en composantes principales.

Remarque : Pour construire le plan 1.1.1. les analyses doivent boucler à 100% ce qui est le cas pour la granulométrie. Par contre les analyses chimiques bouclent entre 98 et 101% et la perte au feu (non liée au mélange présumé) varie sensiblement d'un échantillon à l'autre ; aussi ai-je été contraint de les ramener à 100 % .

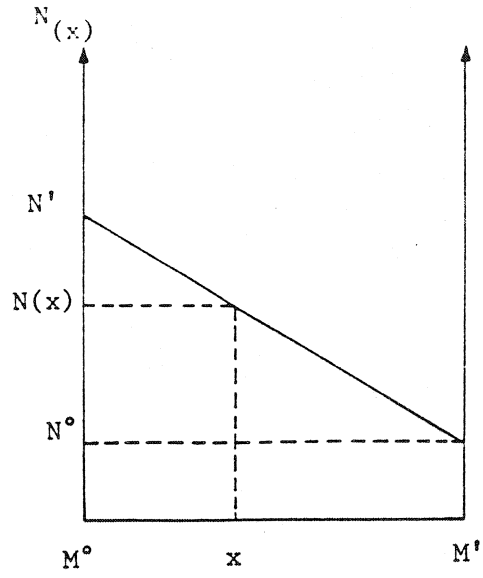
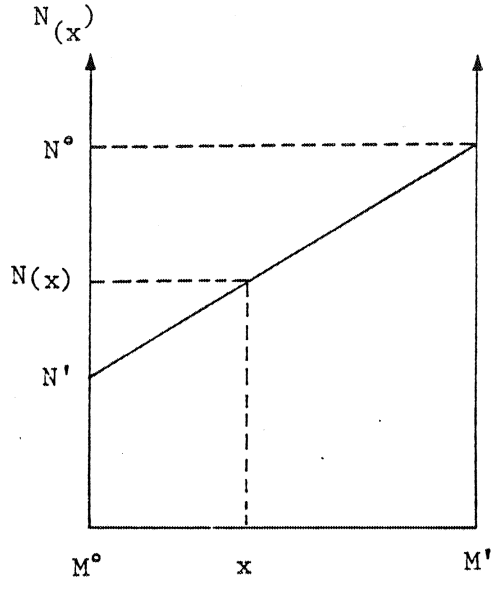


FIGURE 30: DIAGRAMME DE L'ÉQUATION 2 $N' > N^\circ$, LA PENTE DE LA DROITE EST NÉGATIVE.

FIGURE 31: DIAGRAMME DE L'ÉQUATION 2 $N^\circ > N'$, LA PENTE DE LA DROITE EST POSITIVE.



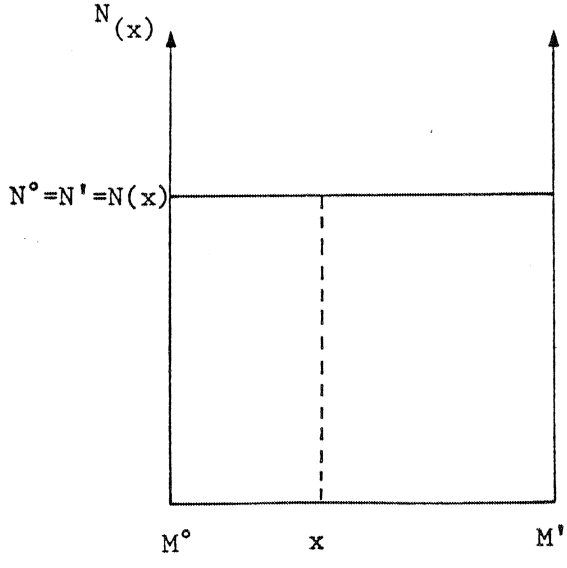


FIGURE 32 : DIAGRAMME DE L'ÉQUATION 2 $N^\circ = N' = N\,x$, LA PENTE DE LA DROITE EST NULLE.

II - ETUDE DES VARIABLES DEUX A DEUX

II - 1. Généralités

II - 1. 1. Relation entre une caractéristique et les proportions de mélange

Un matériel issu du mélange de deux matériaux quelconques sera constitué d'une proportion x du premier et d'une proportion y de l'autre. Soit une caractéristique N quelconque :

$$\boxed{N_{(x)} = x\,N^\circ + y\,N'} \qquad \text{équation 1}$$

Par définition :

$$x + y = 1 \quad \text{d'où } y = 1 - x \qquad \text{et } x \in [0,1]$$

d'où

$$N_{(x)} = x\,N^\circ + (1 - x)\,N'$$

$$N_{(x)} = x\,N^\circ + N' - x\,N'$$

Soit $$N_{(x)} = (N^\circ - N')\,x + N'$$

avec N° : valeur de la caractéristique N du matériel M°

N' : valeur de la caractéristique N du matériel M'

$N_{(x)}$: valeur de la caractéristique N dans le nouveau matériel $M_{(x)}$

x : proportion de N° dans le nouveau matériel $M_{(x)}$

$y = 1 - x$: proportion de N' dans le nouveau matériel $M_{(x)}$

Lors du mélange de deux matériaux, la relation qui lie les valeurs d'une caractéristique quelconque des matériaux obtenus par ce mélange, aux proportions de mélange est linéaire.

C'est-à-dire, que, en portant sur un graphe en abscisse, les valeurs de x et en ordonnée, celles de $N_{(x)}$, les points définis appartiennent à une droite dont l'équation est :

$$\boxed{N_{(x)} = (N^\circ - N')\,x + N'} \qquad \text{équation 2}$$

Lorsque $x = 0$ $\qquad N_0 = N'$

Lorsque $x = 1$ $\qquad N_1 = N^\circ$

Comme x appartient à l'intervalle fermé $[0,1]$, les différents points définis par les couples $(x, N_{(x)})$ appartiennent à un segment de droite dont les bornes sont (0, N') et (1, N°)

$$x \in [0,1] \implies N_{(x)} \in [N', N^\circ]$$

La pente de la droite est définie par $N^\circ - N'$, elle est :

- négative si $N' > N^\circ$ (fig. 30)
- positive si $N' < N^\circ$ (fig. 31)
- nulle si $N^\circ = N' \Leftrightarrow N^\circ = N' = N_{(x)}$ = constante (fig. 32).

II - 1. 2. Relation entre deux caractéristiques

Les proportions des différents matériaux constitutifs des sols ne sont pas con-

nues. Il faut donc étudier la relation qui lie deux caractéristiques quelconques (N et K par exemple) entre elles.

D'après l'équation 2 :

$$N_{(x)} = (N^\circ - N')\ x + N' \Longrightarrow x = \frac{N_{(x)} - N'}{N^\circ - N'} \quad (a)$$

et

$$K_{(x)} = (K^\circ - K')\ x + K' \Longrightarrow x = \frac{K_{(x)} - K'}{K^\circ - K'} \quad (b)$$

Ces équations (a) et (b) existent si, et seulement si,

$K^\circ - K' \neq 0$ et $N^\circ - N' \neq 0$,

Ces équations entraînent que :

$$\frac{K_{(x)} - K}{K^\circ - K'} = \frac{N_{(x)} - N'}{N^\circ - N'}$$

Soit :

$$K_{(x)} - K' = \frac{(K^\circ - K')\ (N_{(x)} - N')}{N^\circ - N'} = \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'}\ N_{(x)} - \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'}\ N'$$

$$\boxed{K_{(x)} = \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'}\ N_{(x)} - \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'}\ N' + K'} \qquad \text{Equation 3}$$

Soit :

$$\boxed{K_{(x)} = \alpha\ N_{(x)} + \beta} \qquad \text{Equation 4}$$

Cette équation est l'équation d'une droite $K_{(x)} = f\ (N_{(x)})$ où la pente α est égale à $\frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'}$ et l'ordonnée à l'origine β est égale à $K' \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'}\ N'$.

II - 1. 3. Conclusion

Lors du mélange de deux matériaux, la relation entre les valeurs de deux caractéristiques quelconques est linéaire. C'est-à-dire que sur un graphe les différents points définis par les couples des valeurs de deux caractéristiques $(K_{(x)}, N_{(x)})$ appartiennent à une droite dont l'équation est :

$$\boxed{K_{(x)} = \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'}\ N_{(x)} + K' - \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'}\ N'} \qquad \text{Equation 3}$$

avec K° et N° valeurs des caractéristiques K et N dans le matériel M°

K' et N' valeurs des caractéristiques K et N dans le matériel M'

$K_{(x)}$ et $N_{(x)}$ valeurs des caractéristiques K et N dans les matériaux issus du mélange.

$K_{(x)}$ appartenant à l'intervalle $[K^\circ, K']$ et $N_{(x)}$ à l'intervalle $[N^\circ, N']$ (cf. paragraphe II - 1. 1.), les couples $(K_{(x)}, N_{(x)})$ appartiennent à un segment de droite dont les bornes sont : (K°, N°) et (K', N').

La première étape de l'étude est donc de vérifier si la relation qui lie les valeurs des caractéristiques deux à deux est linéaire. C'est-à-dire si les valeurs observées sont compatibles avec un mélange de deux matériaux.

II - 2. Quelques remarques

II - 2. 1. Signification de la pente

$$K_{(x)} = \alpha N_{(x)} + \beta \qquad \text{Equation 4}$$

Soient deux valeurs de x, x_1 et x_2

$$K_{(x_1)} = \alpha N_{(x_1)} + \beta$$

$$K_{(x_2)} = \alpha N_{(x_2)} + \beta$$

$$K_{(x_1)} - K_{(x_2)} = \alpha (N_{(x_1)} - N_{(x_2)})$$

$$\alpha = \frac{K_{(x_1)} - K_{(x_2)}}{N_{(x_1)} - N_{(x_2)}}$$

A partir de deux points quelconques d'une droite il est possible de définir la penta de cette droite. Lorsque α est défini par $\frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'}$ ce n'est qu'un cas particulier. Ce cas est intéressant lorsque les matériaux M° et M' sont connus, mais son intérêt reste minime lorsqu'ils sont inconnus.

II - 2. 2. Signification de l'ordonnée à l'origine

L'ordonnée à l'origine est la valeur de $K_{(x)}$ quand $N_{(x)}$ est nul. Dans le cas général N° et N' sont différents de zéro (donc supérieurs à zéro) ; cette valeur est en dehors du segment de droite défini et n'a donc aucune signification concrète. L'ordonnée à l'origine n'a de signification concrète que lorsque l'une des bornes est nulle.

Son expression mathématique est :

$$K_{(x)} = \alpha N_{(x)} + \beta \quad \text{d'où} \quad \beta = K_{(x)} - \alpha N_{(x)}$$

L'expression sous la forme $\beta = K' - \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'}$ ne représente qu'un cas particulier.

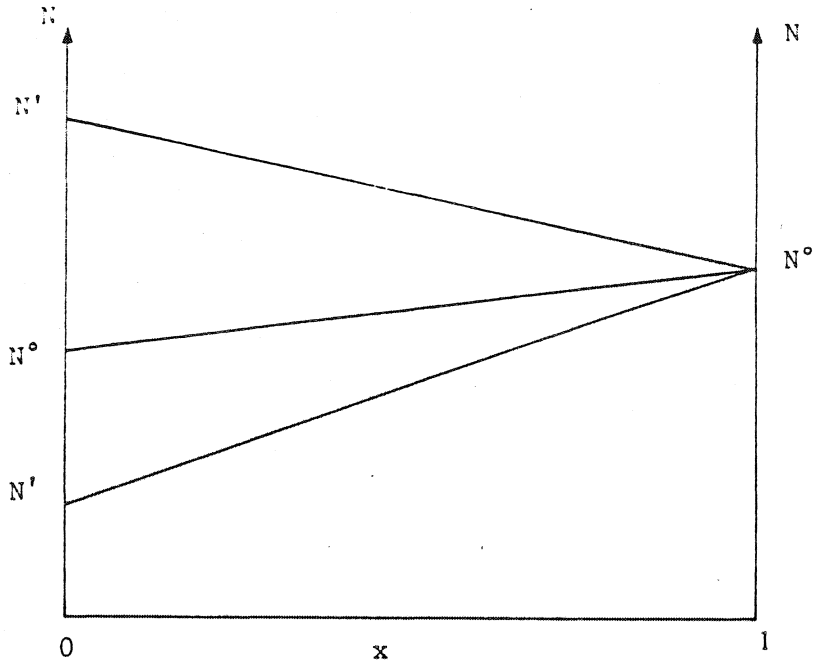


FIGURE 33 a : COMPOSITION DES MATÉRIAUX EN FONCTION DES PROPORTIONS DE MÉLANGE. CAS DE TROIS MÉLANGES INDÉPENDANTS, 1 MATÉRIEL COMMUN.

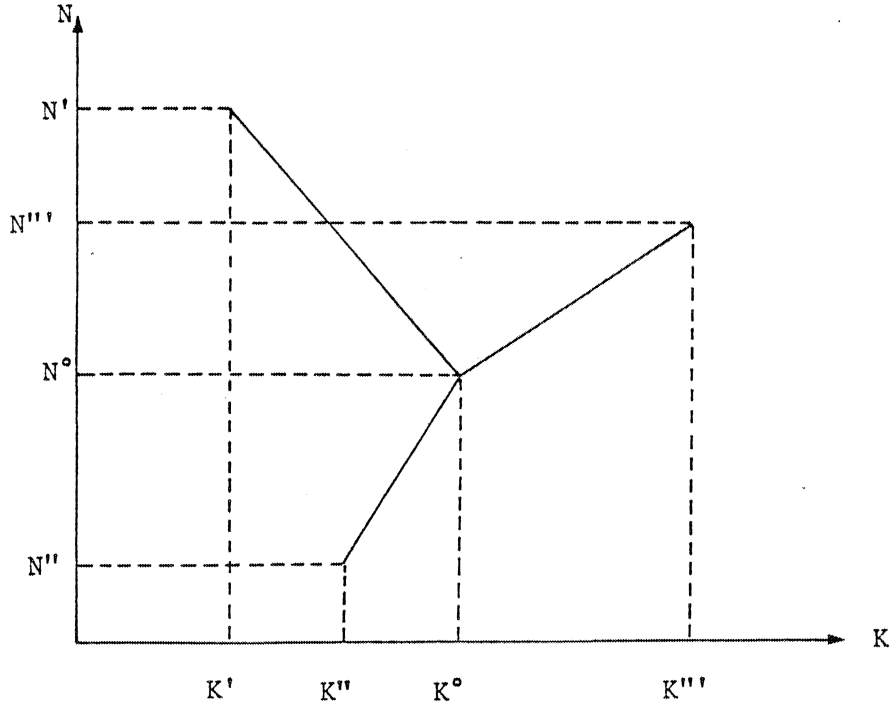


FIGURE 33 b : ÉVOLUTION DE DEUX CARACTÉRISTIQUES LORS DU MÉLANGE DE MATÉRIAUX. CAS DE TROIS MÉLANGES INDÉPENDANTS, 1 MATÉRIEL COMMUN (M°).

II - 2. 3. La droite de régression passe par l'origine

a) Généralités

Lorsque la droite de régression passe par l'origine cela signifie que l'ordonnée à l'origine est nulle.

$$\beta = K' - \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'} N' = 0 \Longrightarrow K' = \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'} N'$$

$$K' (N^\circ - N') = (K^\circ - K') N' \Longrightarrow \boxed{K' N^\circ = K^\circ N'} \Leftrightarrow \frac{K^\circ}{N^\circ} = \frac{K'}{N'}$$

Hypohtèse 1 : Si K°, K', N°, N' sont différents de zéro les proportions des caractéristiques K et N sont les mêmes dans les matériaux M° et M' .

Hypothèse 2 : L'une des caractéristiques est nulle. Exemple si $N^\circ = 0$, $K' N^\circ = K^\circ N'$ ceci entraîne que $K^\circ N' = 0$, ce qui implique : $K' = 0$ ou $N' = 0$.

b) Application

L'observation du matériel permet de vérifier que dans le matériel autochtone (appelons le M'), ces caractéristiques K et N ne sont pas nulles. Dans ce cas il y a deux hypothèses :

Hypothèse 1 : $K^\circ = N^\circ = 0$

Hypothèse 2 : $\frac{K'}{N'} = \frac{K^\circ}{N^\circ}$

L'incertitude entre ces deux hypothèses peut être levée d'une part par l'observation du matériel à l'échelle d'un profil, cette observation permet d'acquérir la certitude que certaines caractéristiques de l'apport sont nulles ; et, d'autre part par la comparaison de profils situés sur des roches différentes.

II - 3. Détermination de l'apport

II - 3. 1. A partir de l'étude d'un ensemble de profils sur des roches différentes (fig. 33 a et b)

a) Introduction

Soit le mélange d'un matériel d'apport M°, avec des matériaux d'altération de différentes roches, M', M'', M'''. D'après l'équation 2 les relations entre un caractère quelconque et les proportions de mélange sont linéaires ; de même d'après l'équation 3 les relations entre deux caractères quelconques sont linéaires. Les bornes des segments de droites sont les valeurs des caractéristiques dans les matériaux originaux.

S'il existe un matériel d'apport et un seul, les droites de régression ont, pour chaque couple de caractéristiques, un seul point de rencontre. Ces points de rencontre déterminent les valeurs des caractéristiques du matériel d'apport.

La présence d'un seul point de rencontre par couple de caractéristiques est donc une condition nécessaire pour conclure à l'existence d'un matériel d'apport et d'un seul. Est-ce une condition suffisante ?

b) Discussion

Soient plusieurs droites dont les équations sont :

$K_1 = \alpha_1 N_1 + \beta_1$

$K_2 = \alpha_2 N_2 + \beta_2$

$Ki = \alpha i\ Ni + \beta i$

Au point de rencontre :

$K_1 = K_2 = K_3 = \ldots\ldots = Ki$

et $N_1 = N_2 = N_3 = \ldots\ldots = Ni$

Ceci entraîne entre les droites 1 et 2

$$\alpha_1 N_1 + \beta_1 = \alpha_2 N_2 + \beta_2 \Longrightarrow N = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\alpha_1 - \alpha_2}$$

De même entre les droites 1 et 3, $N = \dfrac{\beta_3 - \beta_1}{\alpha_1 - \alpha_3}$

ou entre les droites 2 et 3 $N = \dfrac{\beta_3 - \beta_2}{\alpha_2 - \alpha_3}$

Soit dans un cas quelconque : $\dfrac{\beta i - \beta j}{\alpha i - \alpha j} = - N$

Plusieurs droites ont un seul point de rencontre si et seulement si, le rapport des différences des ordonnées à l'origine sur les différences de pentes est constant. La valeur de cette constante est l'opposé de l'abscisse du point de rencontre.

Dans un cas quelconque la probabilité pour que trois droites aient un seul point de rencontre est minime. De plus, la nécessité d'un seul point de rencontre par couples de caractéristiques rend cette probabilité quasi nulle.

Le doute qui subsiste est levé si certaines observations portent sur des matériaux d'apport suffisamment purs et si le point de rencontre se situe sur l'un des axes ; la valeur d'une caractéristique ne pouvant être négative.

c) Appendice : Expression mathématique du rapport des différences des ordonnées à l'origine sur les différences de pente dans le cas d'un seul matériel d'apport

Soient deux séquences quelconques, 1 et 2 ; K°, N°, valeurs caractéristiques dans le matériel d'apport ; K', N', valeurs des caractéristiques dans le matériel d'altération de la séquence 1 et K '', N'', valeur des caractéristiques dans le matériel d'altération de la séquence 2.

α_1 et β_1 : pente et ordonnée à l'origine de la droite de régression reliant les caractères K et N dans la séquence 1.

α_2 et β_2 : pente et ordonnée à l'origine de la droite de régression reliant les caractères K et N dans la séquence 2.

$$\frac{\beta_2 - \beta_1}{\alpha_1 - \alpha_2} = \frac{K'' - \alpha_2 N'' - K' + \alpha_1 N'}{\alpha_1 - \alpha_2}$$

$$\alpha_1 = \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'} \qquad \alpha_2 = \frac{K^\circ - K''}{N^\circ - N''}$$

$$\frac{\beta_2 - \beta_1}{\alpha_1 - \alpha_2} = \frac{K'' - K' - \alpha_2 N'' + \alpha_1 N'}{\frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'} - \frac{K^\circ - K''}{N^\circ - N''}}$$

$$\frac{\beta_2 - \beta_1}{\alpha_1 - \alpha_2} = \frac{K'' N^\circ (N^\circ - N') + K' N^\circ (N'' - N^\circ) + K^\circ N^\circ (N' - N'')}{K'' (N^\circ - N') + K' (N'' - N^\circ) + K^\circ (N' - N'')}$$

Soit $$\frac{\beta_2 - \beta_1}{\alpha_2 - \alpha_1} = - N^\circ$$

II - 3. 2. Sur une seule roche

Considérons n caractéristiques (A, B... K...N) dont la somme vaut cent pour cent (exemple : composition granulométrique, composition chimique....) dans le matériel d'apport et dans le matériel du substrat.

D'après l'équation 3 :

$$A_{(x)} = \alpha_a \cdot N_{(x)} + \beta_a$$
$$B_{(x)} = \alpha_b \cdot N_{(x)} + \beta_b$$
$$K_{(x)} = \alpha_k \cdot N_{(x)} + \beta_k$$
$$M_{(x)} = \alpha_m \cdot N_{(x)} + \beta_m$$

$$A_{(x)} + \ldots + K_{(x)} + \ldots + M_{(x)} = (\alpha_a + \ldots + \alpha_h + \ldots \alpha_n) N_x + (\beta_a + \ldots + \beta_k \ldots + \beta_n) \text{ d'où}$$

$$\sum_{k=A}^{M} K_{(x)} = \sum_{k=A}^{M} \alpha_k \cdot N_{(x)} + \sum_{k=A}^{M} \beta_k$$

Avec $\alpha_k = \dfrac{K' - K''}{N' - N''}$

$$\beta_k = K'' - \frac{K' - K''}{N' - N''}$$

a) valeur de la pente

$$\sum_{k=A}^{M} \alpha_k = \frac{A' - A'' + B' - B'' + ... + K' - K'' + ... + M' - M''}{N' - N''}$$

$$\sum_{k=A}^{M} \alpha_k = \frac{\sum_{k=A}^{M} (K' - K'')}{N' - N''}$$

or

$$\sum_{k=A}^{N} K' = 100 \quad \text{et} \quad \sum_{k=A}^{N} K'' = 100$$

$$\sum_{k=A}^{M} K' + N' = 100 \quad \text{et} \quad \sum_{k=A}^{M} K'' + N'' = 100$$

d'où

$$\sum_{k=A}^{M} \alpha_k = \frac{(100 - N') - (100 - N'')}{N' - N''} = -\frac{N' - N''}{N' - N''}$$

Equation 5 $\boxed{\sum_{k=A}^{M} \alpha_k = -1}$ La somme des pentes vaut - 1.

b) valeur de l'ordonnée à l'origine

$$\sum_{k=A}^{M} \beta_k = A'' - \alpha_a \cdot N'' + ... + M'' - \alpha_m . N''$$

$$\sum_{k=A}^{M} \beta_k = \sum_{k=A}^{M} K'' - \sum_{k=A}^{M} \alpha_k \cdot N''$$

or $\sum_{k=A}^{M} \alpha_k = -1$; $\sum_{k=A}^{M} \beta_k = \sum_{k=A}^{M} K'' - N''$

d'où $\boxed{\sum_{k=A}^{M} \beta_k = 100}$ Equation 6

La somme des ordonnées à l'origine vaut 100.

c) Valeur des caractéristiques

Les deux relations précédentes montrent que dans un matériel quelconque la somme des caractéristiques est égale à cent pour cent.
En effet :

$$\sum_{k=A}^{M} K_{(x)} = \sum_{k=A}^{M} \alpha N_{(x)} + \sum_{k=A}^{M} \beta$$

$$\sum_{k=A}^{M} K_{(x)} = - N_{(x)} + 100 \Longrightarrow \sum_{k=A}^{M} K_{(x)} + N_{(x)} = 100$$

$$\boxed{\sum_{k=A}^{N} K_{(x)} = 100} \qquad \text{Equation 7}$$

d) Conclusion

Il existe donc un système de n-1 équations à n inconnues. La connaissance d'une caractéristique quelconque pour une valeur particulière des proportions de mélange est une condition nécessaire et suffisante pour calculer l'ensemble des caractéristiques pour cette valeur.

En particulier la connaissance d'une caractéristique quelconque de l'apport permet de calculer l'ensemble de ses caractéristiques.

II - 4. Détermination des proportions de mélange

Soient un matériel d'apport M° et un matériel issu de l'altération du substrat M'.

D'après l'équation 1 $N_{(x)} = (N^\circ - N') \; x \; N'$

D'où le pourcentage d'apport $x = \dfrac{N_{(x)} - N'}{N^\circ - N'}$

avec x : pourcentage d'apport
N° : valeur de la caractéristique N dans le matériel d'apport
N' : valeur de la caractéristique N dans le matériel issu de l'altération du substrat
$N_{(x)}$: valeur de la caractéristique dans un matériel contenant x pour cent d'apport.

Le pourcentage d'apport ainsi calculé doit être le même pour toutes les caractéristiques d'un même échantillon. S'il était différent il serait impossible de poser

$$x = \frac{K_{(x)} - K'}{K^\circ - K'} = \frac{N_{(x)} - N'}{N^\circ - N'}$$

Il n'existerait pas de relation linéaire entre les caractéristiques. Un modèle

de mélange serait donc incompatible avec les résultats d'analyse.

Le problème des proportions de mélange réside dans la discussion de M° et M'. C'est-à-dire dans la discussion des caractéristiques du matériel d'apport et du matériel issu du substrat.

Cette discussion doit se faire pour chaque cas particulier.

*

* *

Liste des équations :

$$N_{(x)} = x \cdot N^\circ + y \cdot N' \qquad \text{Equation 1}$$

$$N_{(x)} = (N^\circ - N')\, x + N' \qquad \text{Equation 2}$$

$$K_{(x)} = \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'} \cdot N_{(x)} - \frac{K^\circ - K'}{N^\circ - N'} \cdot N' + K' \qquad \text{Equation 3}$$

$$K_{(x)} = \alpha \cdot N_{(x)} + \beta \qquad \text{Equation 4}$$

$$\sum_{k=A}^{M} \alpha_k = -1 \qquad \text{Equation 5}$$

$$\sum_{k=A}^{M} \beta_k = 100 \qquad \text{Equation 6}$$

$$\sum_{k=A}^{N} K_{(x)} = 100 \qquad \text{Equation 7}$$

III - ETUDE SIMULTANEE DE L'ENSEMBLE DES VARIABLES : LE MODELE DE MELANGE.

III - 1. Le modèle de mélange

III - 1. 1. Notations

Soient :

- Xij la mesure de la variable j pour le prélèvement i (par exemple le pourcentage d'argile du prélèvement i).
- $\bar{I}$ le nombre de prélèvements, $i \in (1, \bar{I})$
- $\bar{J}$ le nombre de classes, $j \in (1, \bar{J})$;
- Xi_J : l'ensemble des mesures pour le prélèvement i :
  $Xi_J = \{Xij / j = 1, \bar{J}\}$
- X_{IJ} : l'ensemble des mesures pour tous les prélèvements :
  $X_{IJ} = \{Xij / i = 1, \bar{I} ; j = 1, \bar{J}\}$

Ces notations peuvent être représentées par le schéma qui suit :

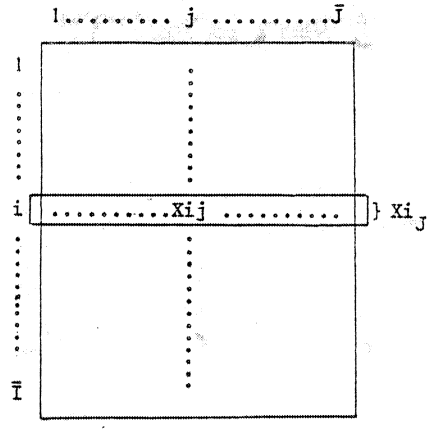


FIGURE 34 : RECAPITULATION DES NOTATIONS

III - 1. 2. Le modèle de mélange

Si la formation limoneuse est issue du mélange entre deux matériaux, alors, la composition granulométrique des prélèvements que l'on y fait doit présenter une certaine structure. Nous appelons cette structure "modèle de mélange".

Ce modèle est composé de deux propositions :

M1 Il existe deux constituants initiaux Y et Z dont les compositions granulométriques seront notées respectivement $Y_J = \{Y_j / j = 1, \bar{J}\}$ et $Z_J = \{Z_j / j = 1, \bar{J}\}$.

Y_j est la teneur en élément appartenant à la classe de taille j pour le constituant Y (c'est-à-dire si j représente l'argile, la teneur en argile de Y).

De même Zj est la teneur en élément appartenant à la classe de taille j pour le

constituant Z.

M2: Chaque prélèvement i observé est un mélange des composants Y et Z ; soit en appelant Pi la proportion de Y :

$$\forall\, i \in 1, \bar{I}\ ;\ j \in 1, \bar{J} \text{ on a : } \boxed{Xij = Pi\ Yj + (1 - Pi)\ Zj}$$

En réalité ce modèle ne sera jamais vérifié exactement, pour deux raisons principales :

- les Xij sont des mesures et donc sujettes à erreurs
- il s'est écoulé un certain temps entre la réalisation du mélange et l'observation de ces résultats. Ainsi les matériaux issus du mélange ont nécessairement subit une transformation (altération, lessivage, tri granulométrique éventuel par l'érosion...). Et c'est le résultat du mélange *et de sa transformation* que l'on observe.

Ceci conduit à proposer comme modèle :

$$\forall\, i \in 1, \bar{I}\ ;\ j \in 1, \bar{J} \text{ on a : } \boxed{Xij = Pi\ Yj + (1 - Pi)\ Zj + Ai\ j}$$

où Aij est une variable aléatoire qui représente à la fois les erreurs de mesure et la transformation postérieure au mélange.

Dans ce modèle Xij est une variable aléatoire , Pi, Yj, Zj, sont des paramètres. Pour estimer ces paramètres , quelle que soit la méthode utilisée, il est nécessaire de lui adjoindre une hypothèse:

Hypothèse H : $E[Aij] = 0 \quad (i \in 1,\bar{I}\ ;\ j \in 1,\bar{J})$

Cette hypothèse implique notamment que, pour chaque échantillon et quelle que soit la variable considérée, Aij peut être indifféremment positif ou négatif. Mais les transformations postérieures au mélange font que cette hypothèse est partiellement fausse. La La différenciation pédologique, et notamment le lessivage de l'argile, est apparu comme la transformation la plus importante.(cf. 2ième partie de ce mémoire) Nous pouvons donc, nous attendre, pour l'argile à des Aij liés à la nature des horizons pédologiques, donc à la profondeur du prélèvement (fig. 35)

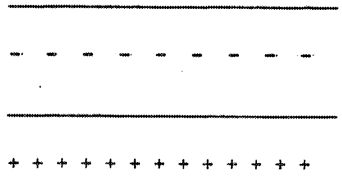


Figure 35 : DISTRIBUTION ATTENDUE DES Aij DANS LE CAS DE L'ARGILE.

Toutefois cet exemple n'est pas généralisable et il est raisonnable de penser que, pour les autres variables, on ne s'écarte pas trop de l'hypothèse H. Nous proposerons donc une méthode d'estimation des paramètres du modèle qui suppose l'hypothèse H vérifiée. Il conviendra d'examiner la robustesse de cette méthode vis à vis de l'hypothèse H.

III - 1. 3. Formulation des questions posées en terme de modèle de mélange

Soit :

- $\hat{P}i$, $\hat{Y}j$, $\hat{Z}j$ des estimations de Pi, Yj, Zj
- $\hat{X}ij = \hat{P}i\ \hat{Y}j + (1 - \hat{P}i)\ Zj$, l'estimation de Xij
- $\hat{P}_I = \{\hat{P}i \mid i \in 1, \bar{I}\}$
- $\hat{Y}j = \{Yj \mid j \in 1, \bar{I}\}$
- $\hat{Z}j = \{Zj \mid j \in 1, \bar{J}\}$
- $\hat{X}_{IJ} = \{\hat{X}ij \mid i \in 1, \bar{I}, j \in 1, \bar{J}\}$

Les données seront compatibles avec le modèle de mélange si l'on peut trouver $\hat{P}i$, $\hat{Y}j$, $\hat{Z}j$ tels que $\hat{X}_{IJ}$ ne soit pas trop différent de Xij. Or il est naturel de mesurer l'écart entre $\hat{X}_{IJ}$ et X_{IJ} par $Q = \sum_i \sum_j (\hat{X}ij - Xij)^2$

Le problème revient donc à estimer $\hat{P}_I$, $\hat{Y}_J$, $\hat{Z}_J$, en minimisant Q : Le test de l'hypothèse de mélange consistera donc à vérifier que les estimations de Y_J et Z_J qui minimisent Q sont cohérentes

III - 2. Estimation des paramètres du modèle

III - 2. 1. Remarque générale

Les données sont des pourcentages et leur somme vaut 100. On a donc un système de $\bar{I} \times \bar{J}$ équations du type : $Xij = \hat{P}i\ \hat{Y}j + (1 - \hat{P}i)\ \hat{Z}j + \hat{A}ij$ avec $I + 2J$ inconnues.

Par ailleurs il existe des contraintes sur les paramètres à estimer :

C 1 : $0 \leq \hat{P}i \leq 1 \quad i \in 1, \bar{I}$

C 2 : $0 \leq \hat{Y}j \leq 100 \quad j \in 1, \bar{J}$

C 3 : $0 \leq \hat{Z}j \leq 100 \quad j \in 1, \bar{J}$

C 4 : $\sum_j \hat{Y}j = 100$; $\sum_j \hat{Z}j = 100$

Le problème peut s'interpréter comme une régression non linéaire sous contraintes, avec $\bar{I} + 2\bar{J}$ paramètres et $\bar{I} \times \bar{J}$ équations. De ce point de vue la résolution du problème est extrêmement complexe. En fait nous verrons plus loin une solution plus naturelle et beaucoup plus simple.

III - 2. 2. Interprétation géométrique

On peut considérer chaque Xi_J comme un élément de l'espace $\mathbb{R}^J$. Supposons trouvées les estimations $\hat{P}_I$, $\hat{Y}_J$, $\hat{Z}_J$. On remarquera que $\hat{Y}_J$ et $\hat{Z}_J$ appartiennent à $\mathbb{R}^J$ et $\hat{X}ij = \{\hat{X}ij = \hat{P}i\ \hat{Y}j + (1 - Pi)\ \hat{Z}j \mid j \in 1, \bar{J}\}$ appartient au segment qui relie $\hat{Y}_J$ et $\hat{Z}_J$.

Notons que Q représente la distance usuelle entre $\hat{X}i_J$ et Xi_J.

Soit $X'i_J$ la projection de Xi_J sur le segment qui relie $\hat{Y}_J$ et $\hat{Z}_J$. Alors $\hat{X}i_j$ et $\hat{X}'i_j$ sont confondus, car $X'i_J$ est le point du segment $\hat{Y}_J - \hat{Z}_J$ le plus proche de Xi_J (fig. 36).

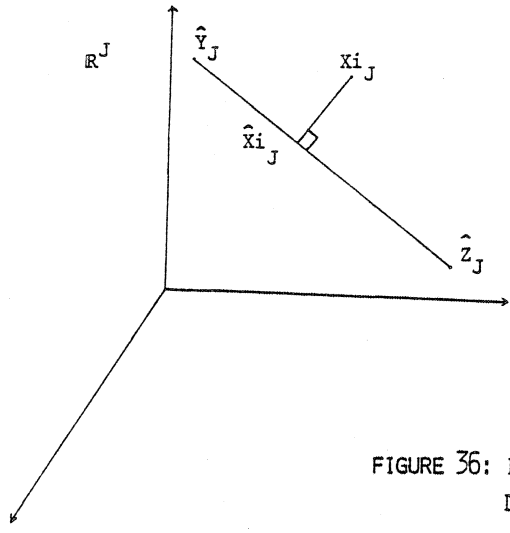


FIGURE 36: INTERPRÉTATION GÉOMÉTRIQUE DU MODÈLE DE MÉLANGE

D'où une nouvelle formulation du problème : Recherche des 2 points $\hat{Z}_J$ et $\hat{Y}_J$ de $\mathbb{R}_J$ tels que l'inertie des points Xi_j par rapport à l'axe reliant $\hat{Z}_J$ et $\hat{Y}_J$ soit minimale

D'après cette interprétation il apparaît que si $\hat{Y}_J$ et $\hat{Z}_J$ sont trouvés, on peut construire d'autres points $\hat{Y}'_J$ et $\hat{Z}'_J$ qui conduisent à la même valeur du critère d'inertie : ce sont les points qui appartiennent à la droite joignant $\hat{Y}_J$ et $\hat{X}_J$. Il existe donc une double infinité de solutions. En réalité, tous les points de cette droite ne conviennent pas : on ne conservera que ceux qui satisfont les contraintes C 1, C 2, C 3.

On remarquera que la contrainte C 4 est automatiquement vérifié. En effet, tous les Xi_j vérifient $\sum_j X\,i\,j = 100$. Le problème se situe donc dans l'hyperplan de $\mathbb{R}^J$ contenant les points dont la somme des composants vaut 100.

III - 3. La Méthode proposée

Nous travaillerons en trois temps :

A) Détermination de la droite passant par les $\hat{Z}_J$ et les $\hat{Y}_J$

B) Détermination des segments de cette droite qui contiennent les $\hat{Z}_J$ et les $\hat{Y}_J$ satisfaisant les contraintes

C) Détermination de $\hat{P}_I$ compte tenu de l'incertitude sur $\hat{Z}_J$ et $\hat{Y}_J$.

III- 3. 1. Détermination de l'axe Δ

Le problème est celui de la recherche d'un axe affinéΔtel que l'inertie du nuage N_I des points Xi_J soit minimum par rapport à cet axe. D'après le théorème de HU - GHENS, cet axe passe par le centre de gravité de N_I. Le problème revient donc à réaliser une analyse en composantes principales non normée du tableau X_{IJ}. L'axeΔcherché est le premier fourni par cette analyse.

Le long de l'axe les prélèvements s'étagent en fonction de leur proportion des deux constituants initiaux. De même les variables s'étagent selon qu'elles sont plus ou moins caractéristiques de l'un ou l'autre des constituants initiaux. Ainsi on doit trouver :

- d'un côté : les classes de taille caractérisant l'apport et les prélèvements qui sont les plus riches en apport.
- de l'autre : les classes de taille caractérisent le substrat et les prélèvements les plus riches en substrat.

Aussi,le pourcentage d'inertie associé à l'axe Δ n'est pas directement un indicateur de la validité de l'hypothèse de mélange mais, un indicateur de l'influence de l'origine des prélèvements sur leur composition actuelle.

III - 3. 2. Détermination de $\hat{Z}_J$ et de $\hat{Y}_J$

Le segment de l'axe tel que les contraintes C 2 et C 3 soient vérifiées est d'abord déterminé : segment S_c.

Ensuite on projette sur l'axe l'ensemble des points Xi_J du nuage N_I, le segment ainsi défini représente le domaine des projections sur l'axe : segment S_e.

Le complément de ce segment S_e dans S_c est constitué de 2 segments :

- l'un est l'ensemble des $\hat{Z}_J$: segment S_z
- l'autre est l'ensemble des $\hat{Y}_J$: segment S_y.

Soit :

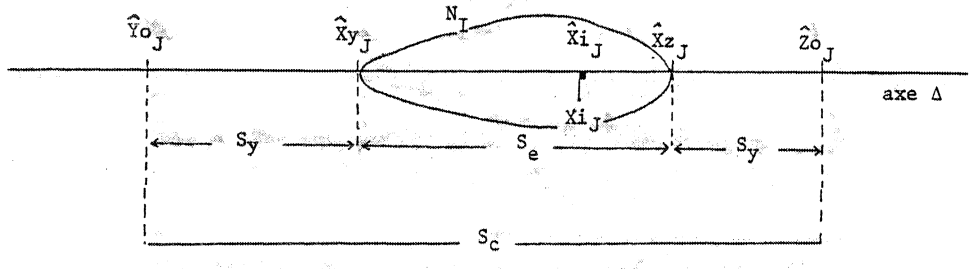


FIGURE 37: DÉTERMINATION DES $\hat{Z}_J$ ET DES $\hat{Y}_J$.

avec :

Yo_J et Zo_J déterminés par les contraintes. Au-delà de ces bornes, au moins l'une des contraintes comprises dans C 2 et C 3 n'est plus vérifiée.

$\hat{X}_{zJ} = \min \{\hat{Xi}_J \mid i \in 1, \bar{I}\}$

$\hat{X}_{yJ} = \max \{\hat{Xi}_j \mid i \in 1, \bar{I}\}$

Ainsi n'importe quel point de S_z peut convenir pour $\hat{Z}_J$ et n'importe quel point S_y peut convenir pour $\hat{Y}_J$.

III- 3. 3. Détermination de $\hat{P}_I$

La valeur de $\hat{P}_I$ dépend de celles de $\hat{Y}_J$ et $\hat{Z}_J$ .Comme ces dernières ne sont pas uniques, on pourra proposer plusieurs valeurs de $\hat{P}_I$

Toutefois, les différentes estimations $\hat{P}_I$ ont en commun l'ordre de leurs composantes. Il est donc impossible de classer les prélèvements selon leur richesse estimée en apport par exemple : ce classement correspond à celui des $\hat{Xi}_J$ sur l'axe factoriel.

Si le classement est insuffisant, on pourra calculer les valeurs limites de $\hat{P}_I$: elles seront obtenues en prenant comme couple $(\hat{Y}_J, \hat{Z}_J)$ d'abord $(\hat{Yo}_J, \hat{Xz}_J)$ puis $(\hat{Xy}_J, \hat{Zo}_J)$

La phase 1 est constituée d'une A.C.P. non normée (programme standard) sur le tableau X_{IJ} . Les résultats de cette A.C.P. sont d'une part imprimés et d'autre part stockés en fichier permanent.

Les phases 2 et 3 font l'objet d'un programme complémentaire qui a été écrit spécialement par Pagès; ce programme est dit"programme de mélange". Dans celui-ci les fichiers de l'A.C.P. sont introduits en entrée. Ce programme édite $\hat{Yo}_J$, $\hat{Xy}_J$, $\hat{Xz}_J$, $\hat{Zo}_J$,ainsi que les différentes valeurs de $\hat{P}_I$ et $\hat{X}_{IJ}$.

III - 4. Discussion sur la méthode

Avant d'appliquer la méthode quelques points méritent d'être discutés.

III - 4. 1. Les différences de niveau entre les variables

Les variables étudiées sont des classes auxquelles appartiennent les constituants des prélèvements : classes de taille pour les analyses granulométriques, classes de nature chimique pour les analyses chimiques. Toutes ces classes ne sont pas également

représentées: leurs effectifs moyens varient de moins de 1% (TiO_2 par exemple) à plus de 65% (SiO_2 par exemple). Dans ces conditions, l'A.C.P. risque d'être biaisée. Elle accorde à chaque variable un poids proportionnel à sa variance. Ainsi une classe mal représentée en moyenne, présentant pourtant une différence relative importante entre le substrat et l'apport, jouera à priori un rôle très faible.

Pour pallier cet inconvénient, on peut se demander s'il n'y a pas lieu d'effectuer une transformation des données, en l'occurence de les réduire.

A. Dans le cas d'une réduction des données :

1° le modèle reste le même

En effet : $Xi_j = Pi\ Y_j + (1 - Pi)\ Z_j + Ai_j$

devient : $\frac{Xi}{S}_j = Pi \frac{Y}{S}_j + (1 - Pi) \frac{Z}{S}_j + \frac{Ai}{S}_j$

avec : $S_j^2 = \frac{1}{n} \sum_i \left[Xi_j - \frac{Xi}{I}_j \right]^2$

2° la quantité à minimiser n'est plus la même ; on est conduit à des $\hat{P}_r$, $\hat{Y}_j$, $\hat{Z}_j$ différents, et $\sum_{ij} (Ai_j)^2$ devient $\sum_{ij} \left[\frac{Ai_j}{S_j} \right]^2$

On réévalue donc les variables ayant un S_j faible. L'intérêt de la réduction dépend donc du sens de S_j. Il faut donc étudier la signification de S_j.

Soient : $\bar{P}_I = \frac{\sum_i P_i}{\bar{I}}$; $\bar{A}_{ij} = \frac{\sum_i A_{ij}}{\bar{I}}$

$$IS_j^2 = \sum_i \left[\left[Pi\ (Y_j - Z_j) + Z_j + Ai_j \right] - \left[\left[(Y_j - Z_j)\ P_I + Z_j + A_{Ij} \right] \right]^2$$

$$= \underbrace{(Y_j - Z_j)^2 \sum_i (Pi - P_I)^2}_{A} + \underbrace{\sum_i (Ai_j - A_{Ij})^2}_{B} + \underbrace{2(Y_j - Z_j) \sum_i (Pi - P_I)\ (Ai_j - Ai_j)}_{C}$$

Le terme A représente l'écart Apport - Substrat pour la variable j.

Le terme B représente la variabilité due à l'erreur sur j et à la transformation des éléments de la classe j (altération, pédogénèse...).

Le terme C représente la variation entre Ai_j et Pi : le problème est alors de savoir si les modifications postérieures au mélange jouent différemment ou non suivant le Pi, c'est-à-dire en fonction des proportions apport - substrat.

Il en ressort que la quantité Sj est complexe et peu aisément manipulable

(notons que la réduction suppose que la précision de la mesure est la même pour toutes les variables).

B_ Néanmoins dans la zone où l'imprécision sur les mesures ne jouent pas, $Y_j - Z_j$ sera quasi-nécessairement plus grand si j est une classe fortement présente ; on est donc tenté de diviser les termes du mélange par $\bar{X}_{Ij}$.

Soit :

$$\frac{Xi_j}{\bar{X}_{Ij}} = Pi \frac{Y_j}{\bar{X}_{Ij}} + (1 - Pi) \frac{Z_j}{\bar{X}_{Ij}} + \frac{Ai_j}{\bar{X}_{Ij}}$$

On minimisera : $\sum_{ij} \left(\frac{Ai_j}{X_{Ij}} \right)^2$ ce qui revient à revaloriser les variables de faible niveau.

Ceci ne vaut que si l'imprécision des mesures est suffisamment faible pour rester négligeable même pour les classes faiblement représentées. Cette situation ne semble pas s'appliquer aux mesures granulométriques mais peut, dans certains cas, s'appliquer aux analyses chimiques.

III - 4. 2. Les estimations des composants initiaux

Il a été précédemment indiqué que les $\hat{Z}_j$ et les $\hat{Y}_j$ ne sont pas uniques : tous les points d'un segment de droite conviennent. Ainsi, en pratique $\hat{Z}_{oj}$ et $\hat{X}_{zj}$ seront calculés pour estimer $\hat{Z}_j$ (de même pour $\hat{Y}_j$). Il convient de remarquer que ces bornes ne constituent pas un intervalle de confiance : chaque borne est une estimation ponctuelle, le modèle ne contient aucune hypothèse probabiliste.

La longueur des deux segments $(\hat{Z}_{oj}, \hat{X}_{zj})$ et $(\hat{X}_{yj}, \hat{Y}_{oj})$ dépend de la présence ou non de prélèvements qui sont proches des limites des contraintes $0 < Xi_j < 100$. Ceci est illustré par les figures 38 et 39 à partir d'un exemple très simplifié où seules deux classes interviennent : la situation de la figure 38 conduit à des intervalles de longueurs beaucoup plus réduits que ceux de la figure 39, et ceci indépendamment de la qualité de l'ajustement.

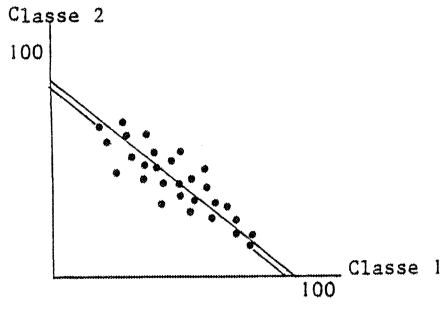


FIGURE 38

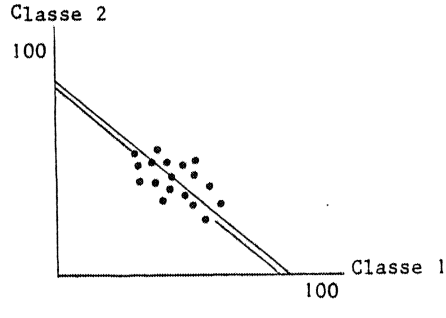


FIGURE 39

UNIVERSITE DE RENNES
BIBLIOTHEQUE
INSTITUT DE GEOLOGIE

Pour avoir des invervalles de longueurs étroits il faudrait :

1° que la composition de certains prélèvements soit très proche de celle des composants initiaux. Pour réaliser cette condition on choisira une gamme d'échantillon allant des niveaux les moins limoneux aux plus limoneux.

2° que les composants initiaux soient tels que certaines contraintes soient saturées, en particulier que certaines variables soient nulles. Ceci devrait être vérifié pour l'apport puisqu'il ne contient pas de faction supérieure à 100 microns. Dans le cas des matériaux issus des substrats il sera nécessaire de modifier les contraintes C_2 et C_3 (cf. p. 93) en fonction des connaissances sur l'altération.

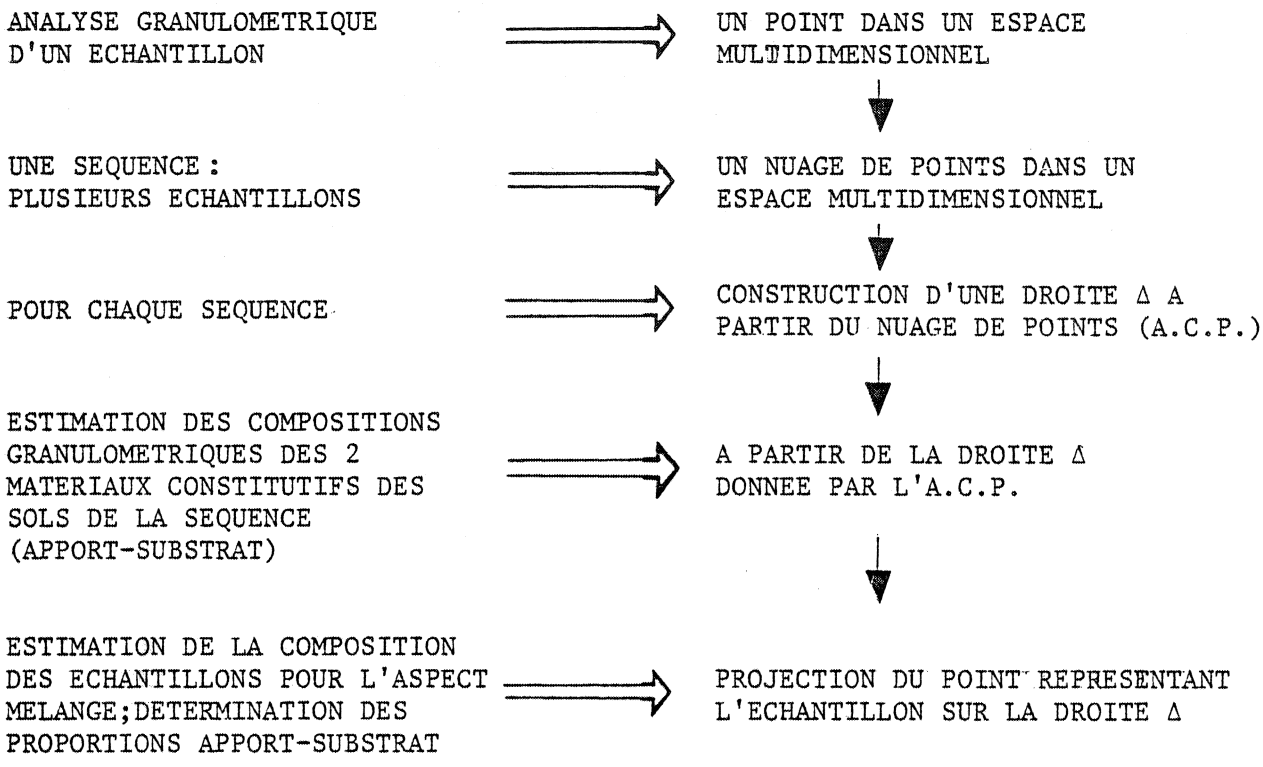


FIGURE 40: ORGANIGRAMME REPRESENTANT LA DEMARCHE "MODELE DE MELANGE"

B) PRÉSENTATION DES SÉQUENCES ET DÉPOUILLEMENT PRÉLIMINAIRE.

Avant d'appliquer le modèle de mélange aux formations limoneuses, il convient :
- d'une part de vérifier, pour celles-ci, l'hypothèse de mélange, c'est-à-dire mettre en évidence l'existence de relations linéaires entre l'ensemble des caractéristiques.
- d'autre part de contrôler que les produits des altérations en place (arène, altérite) ne peuvent s'interpréter comme le mélange de deux matériaux ; c'est-à-dire vérifier l'absence de relations linéaires entre l'ensemble des caractéristiques de ces matériaux.

Ces deux points sont l'objet du "dépouillement préliminaire" des données des séquences étudiées. Toutefois, avant de l'aborder, les conditions d'échantillonnages dans les formations limoneuses doivent être précisées ; celles-ci déterminent, en effet, le choix des séquences. D'autre part, afin de fixer les limites du modèle proposé, il est souhaitable de rappeler quelques généralités sur l'altération.

I - CONDITIONS PRELIMINAIRES ET CHOIX DES SEQUENCES.

I - 1. Les formations limoneuses : conditions d'échantillonnage

La vérification de l'hypothèse de mélange dans les formations limoneuses suppose qu'un certain nombre de conditions d'échantillonnage soit réalisé :

a) un premier ensemble de conditions doit être satisfait pour tester, sur chaque substrat, l'hypothèse de mélange ; notamment il est souhaitable :

1° d'analyser une suite continue allant du cas extrême où le matériel est entièrement autochtone à celui où il est totalement allochtone. Dans la pratique la toposéquence semble l'unité de prélèvements la plus satisfaisante.

2° Que le matériel issu du substrat soit homogène. Cette contrainte exclut la quasi-totalité de la zone du Primaire antécarbonifère où le substrat est hétérogène à l'échelle du versant. Dans cette zone le mélange présumé s'effectue entre un matériel d'apport et plusieurs matériaux issus des différentes roches (quartzites, schistes...).

La séquence idéale qui se dégage de ces conditions se situe sur granite.

b) un second type d'échantillonnage doit être réalisé afin de vérifier l'homogénéité de l'apport à l'échelle de la région : il faut étudier les formations superficielles en diverses stations situées sur les différents substrats. Cette condition conduit à retenir des séquences qui ne satisfont que partiellement les premières conditions citées.

Trois séquences ont été choisies : Le Sourn, Sainte-Tréphine et Saint-Elouan. Elles se développent respectivement sur granite, quartzites ordoviciens et schistes briovériens et recouvrent donc les principaux types de substrats. De plus, elles présentent des types de pentes différentes :

- une pente régulière, recoupant le flanc d'une butte aux formes molles, sur granite (direction S.O - N.E., pendage S.O)

- la succession d'une pente forte et d'une pente moyenne sur quartzites (direction N - S, pendage S.)

- une pente assez douce suivie d'une pente courte, légèrement convexe sur schistes (direction E - O, pendage O).

Une séquence située sur substrat basique n'a pu être étudiée parce que ces roches se présentent sous forme de filons étroits.

Compte tenu des conditions énoncées, la séquence située sur granite sert de référence.

I - 2. Les altérations en place et le mélange de matériaux

Vis-à-vis du problème "mélange à 2 constituants" la question, pour les altérations en place, peut être posée de la façon suivante :
- Existe-t-il, d'un point de vue théorique, des relations linéaires entre l'ensemble des données chimiques et granulométriques dans les altérations ?

- Si oui : une altération en place peut être confondue avec un mélange à deux constituants, et, l'existence d'un mélange ne peut pas être mis en évidence par la méthode proposée.

- Si non : n'est-il pas possible, néanmoins, d'approcher les variations observées par des lois linéaires ? Une réponse négative à cette nouvelle question signifie que les produits de l'altération ne peuvent être confondus avec ceux d'un mélange à 2 constituants.

Une revue exhaustive des travaux sur l'altération serait nécessaire pour y répondre. Cette revue sort du cadre de ce mémoire et, je me bornerais à quelques remarques. Comme une séquence située sur granite va servir de référence à l'étude du mélange dans les formations limoneuses j'insisterai, plus particulièrement, sur les travaux portant sur les roches granitiques.

Sur ce type de substrat, il semble - si l'on se réfère à quelques unes des principales publications (DEJOU, 1958 ; COLLIER, 1961 ; MILLOT, 1964 ; PEDRO, 1964 ; TARDY, 1969 ; SEDDOH, 1973) - qu'il n'existe pas de relations linéaires entre l'ensemble des données chimiques et granulométriques ; néanmoins certains constituants chimiques peuvent varier linéairement les uns par rapport aux autres (ex. SiO_2 - Al_2O_3).

Pour vérifier, dans la zone d'étude, cette absence de relations linéaires entre l'ensemble des variables j'ai retenu les données chimiques et granulométriques correspondant aux arènes du Sourn et les données granulométriques des altérites schisteuses à Saint-Elouan.

II - DESCRIPTION DES SEQUENCES ET DEPOUILLEMENT PRELIMINAIRE.

Comme les trois séquences retenues pour l'analyse statistique ont déjà été présentées dans la seconde partie de ce mémoire, je vais uniquement insister sur les aspects qu'il est indispensable de connaître pour comprendre le "dépouillement préliminaire".

II - 1. La séquence du Sourn

II - 1. 1. Présentation

Les grandes lignes de cette séquence ont été présentées dans le seconde partie de ce mémoire (p.31). Il faut noter que :

1 - Dans la partie Sud de cette carrière une petite dépression, orientée N 170°, permet d'observer deux coupes présentant une succession de lentilles sablo-graveleuses et limoneuses qui font penser à un dépôt alluvial ; un ruisseau coule d'ailleurs dans le prolongement de cette dépression de l'autre côté de la route bordant la carrière.

2 - Les observations que j'ai faites, par ailleurs, sur les fractions sableuses d'un profil sur granite à la Croix-du-Roz, montrent que le matériel provenant du substrat et inclus au sol est légèrement plus altéré que l'arène : de ce point de vue il y a donc une "coupure" entre l'arène et le sol.

Je m'attacherai, en plus des problèmes de mélange, aux deux questions suivantes :

1 - Existe-t-il une "coupure" entre l'arène et le sol ? qu'elle en est son importance ?

Dans l'affirmative, les points représentant les échantillons d'arène ne doivent pas être dans le prolongement du nuage de points correspondant aux échantillons de sols.

2 - Les deux coupes du talweg s'individualisent-elles, du point de vue granulométrique, par rapport aux matériaux constitutifs des sols ?

L'identification de ces trois types de matériaux :

- sols
- arènes
- matériaux du talweg

correspond au dépouillement préliminaire. Seuls les premiers seront ensuite étudiés en détail.

Une première série de profils avait été prélevée par CURMI (profils 2, 3, 4, 6, 7, 8, 12, 13) à raison, en général, d'un échantillon par horizon. J'ai complété cette série par un échantillonnage systématique, tous les 10 à 20 centimètres, de profils régulièrement répartis le long de la pente (profils 1, 5, 9, 10, 11, 14, 15).

Leur localisation est représentée par la figure 6 p.32 et le tableau VI.

II - 1. 2. Dépouillement préliminaire

II - 1. 2. 1. Les données granulométriques

Les échantillons prélevés à la limite sol-arène ont été exclus du calcul des corrélations. Ainsi, 59 prélèvements sont intervenus dans le calcul qui concerne les sols

Profil	N° Ech.	Prof. (cm.)	Horizon
1	121	0-10	Ap
	122	10-25	"
	123	25-40	ALE
	124	40-60	"
	125	60-80	XT
	126	80-100	"
	127	100-120	"
	128	120-133	Cailloux
	129	133-138	XT
	130	140-160	C
2	1S1	8-16	Ap
	1S2	24-34	ALE +MO
	1S3	40-50	ALE
	1S4	82- 92	"
3	1S7	24-34	ALE
	1S8	40-48	XT
4	1S9	28-35	
	1S10	40-48	
5	201	0-20	Ap
	202	30-45	ALE
	203	45-55	XT
	204	55-65	"
	205	65-85	C
6	21S1	5-15	Ap
	21S2	36-45	ALE
	21S3	35-38	"
	21S4	48-56	XT
	21S5	65-73	"
7	22S1	5-15	Ap
	22S2	36-45	ALE
	22S3	52-62	XT
	22S4	65-75	"
	22S5	86-96	"
	22S6	100-120	C
8	23S1	35-45	ALE
	23S2	50-60	XT
	23S3	70-80	"
	23S4	90-100	"
	23S5	100-120	C
9	241	0-20	Ap
	242	20-40	ALE
	243	40-50	"
	244	50-65	"
	245	65-85	XT
	246	85-95	C

Profil	N° Ech.	Prof.(cm.)	Horizon
10		0-15	Talweg
		25-45	"
		80-100	"
		100-120	C
11	301	40-60	ALE-E
	302	60-80	XT(G)
	303	80-90	"
	304	90-100	"
	305	100-110	"
	306	110-120	"
	307	120-130	C
	308	130-140	"
12	31S1	38-48	E-ALE
	31S2	59- 69	"
	31S3	87-97	XTG
	31S4	102-117	"
	31S5	170-180	C
13	32S1	38-48	E-ALE
	32S2	88-98	XTG
	32S3	113-133	"
	32S4	133-153	"
	32S5	188-203	C
14	331	40-50	E-ALE
	332	50-60	"
	333	60-70	"
	334	70-80	"
	335	80-90	XT
	336	90-110	"
	337	110-120	"
	338	120-130	"
	339	130-150	"
	3310	150-160	"
	3311	160-170	"
	3312	170-190	C
15		20-30	Ap
		30-40	Talweg
		40-50	
		50-60	
		60-70	
		70-80	
		80-90	
		90-100	
		100-110	
		110-120	
		120-130	
		130-140	
		140-150	
		150-160	C

TABLEAU VI: LE SOURN: PRÉLÈVEMENTS:PROFONDEUR ET IDENTIFICATION

et 14 dans celui concernant les arènes.

a) Un exemple de calcul

Considérons l'exemple des limons fins par rapport à S_4 (planche IV A). Dans ce diagramme chaque prélèvement est représenté par un point dont la position est déterminée par ses teneurs en S_4 et en limons fins. A l'ensemble des échantillons correspond donc un nuage de points. Dans l'exemple cité il est très allongé, ce qui indique une bonne relation linéaire entre les deux variables. Le calcul du coefficient de corrélation (r) permet de la confirmer. En effet, dans cet exemple qui porte sur 59 échantillons (soit 57 degrés de liberté) r vaut - 0,76. Or, pour 50 degrés de liberté un coefficient égal ou supérieur, en valeur absolue, à 0,35 peut être considéré comme significatif aux erreurs de première espèce de 0,01 près.

De plus afin de mieux illustrer cette relation linéaire une droite a été ajustée selon la méthode des moindres carrés.

La distance "d" (planche IV) représente pour un échantillon l'écart entre sa teneur réelle en limons fins et sa teneur estimée ; cet écart a été minimisé lors du calcul de la droite de régression. Pour l'exemple choisi l'équation de la droite est :

$$L.\ F. = -\ 1{,}02\ S_4 + 34{,}7$$

b) Les données des sols

Les représentations graphiques de la planche IV mettent en évidence l'existence de corrélations linéaires entre les diverses variables des sols. Celles-ci sont confirmées par le calcul des coefficients de corrélation. En effet, pour 50 degrés de liberté un coefficient de corrélation linéaire égal ou supérieur en valeur absolue à 0,35 peut être considéré comme significatif aux erreurs de première espèce de 0,01 près. Or, les calculs portent sur 59 individus, soit 57 degrés de liberté et les coefficients valent respectivement :

L. F. - S_4 : - 0,76	S_2 - S_4 : 0,93
L. G. - S_4 : - 0,92	S_3 - S_4 : 0,95
S_1 - S_4 : 0,76	S_4 - S_5 : 0,87

Les équations des droites de régression correspondantes sont les suivantes :

L. F. = - 1,02 S_4 + 34,7	S_2 = 0,56 S_4 - 0,3
L. G. = - 2,92 S_4 + 49,3	S_3 = 1,13 S_4 - 0,7
S_1 = 0,30 S_4 + 3,5	S_5 = 2,02 S_4 - 0,6

On peut noter que l'ensemble des sables varie proportionnellement alors que les limons varient inversement proportionnellement à S_4.

c) Les données des arènes

Les représentations graphiques (planche IV bis) illustrent clairement l'absence totale de relations linéaires entre les diverses caractéristiques granulométriques des arènes.

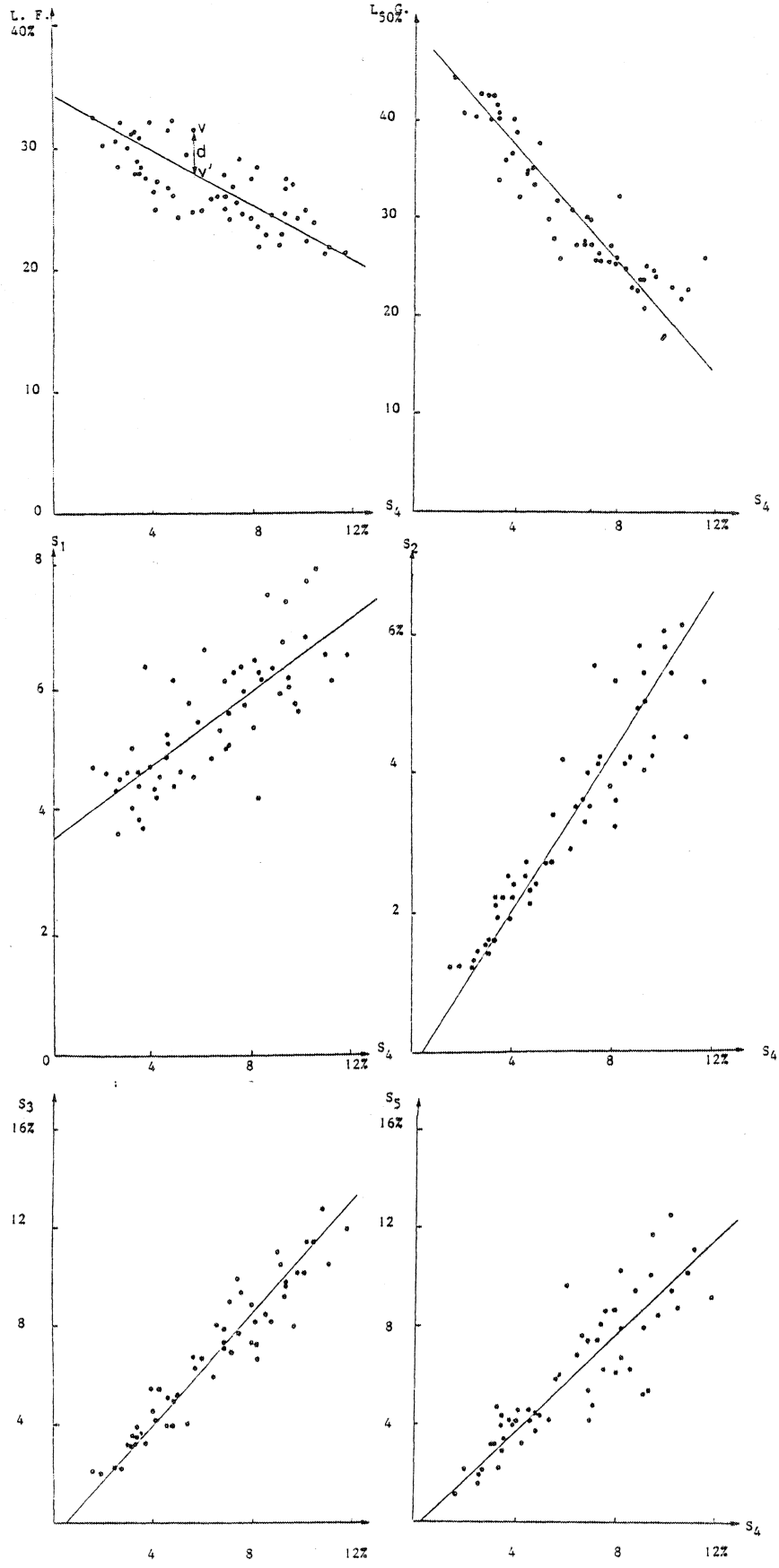
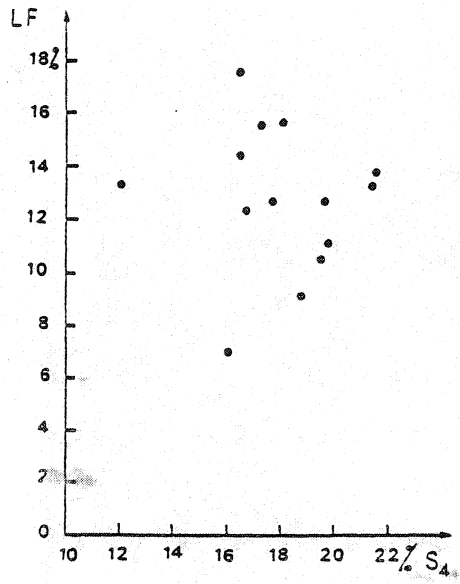
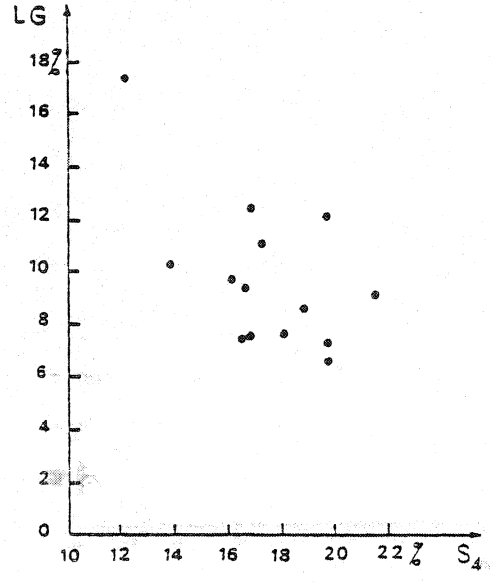
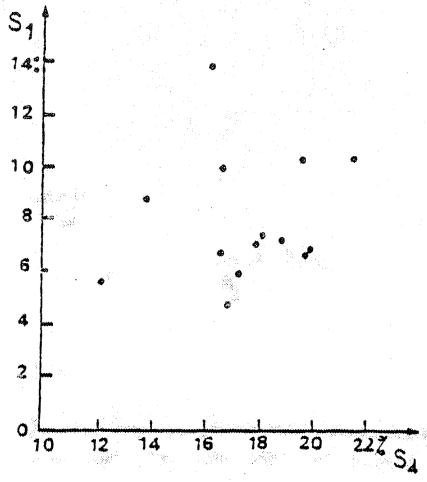
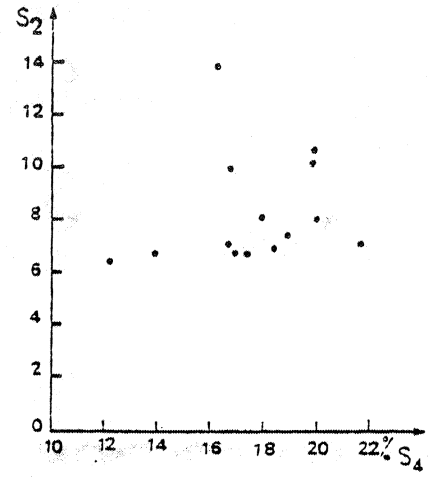


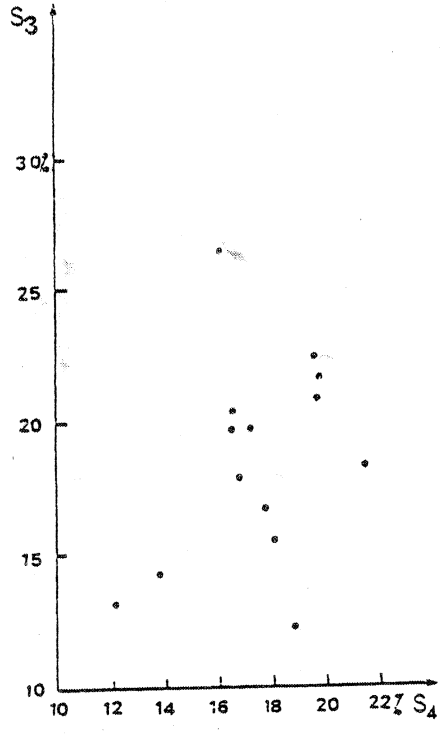
PLANCHE IV : LE SOURN : RELATIONS ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES DANS LES SOLS.











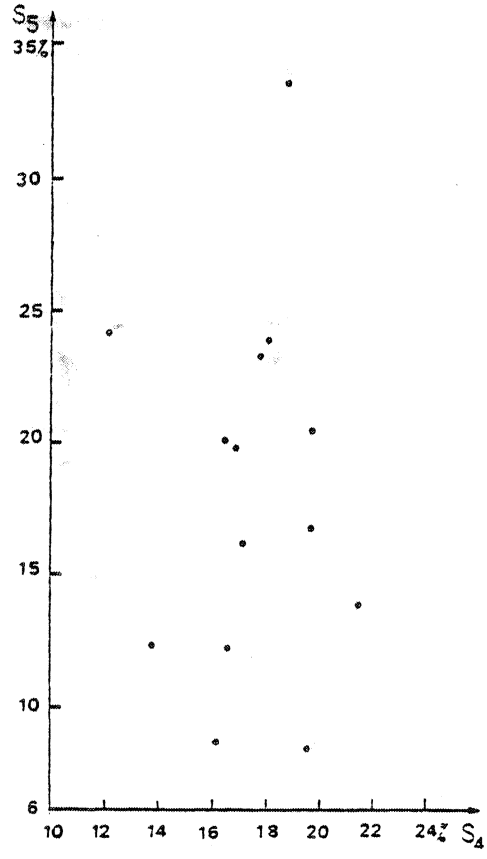


PLANCHE IV BIS : LE SOURN : GRANULOMÉTRIE DES ARÈNES.

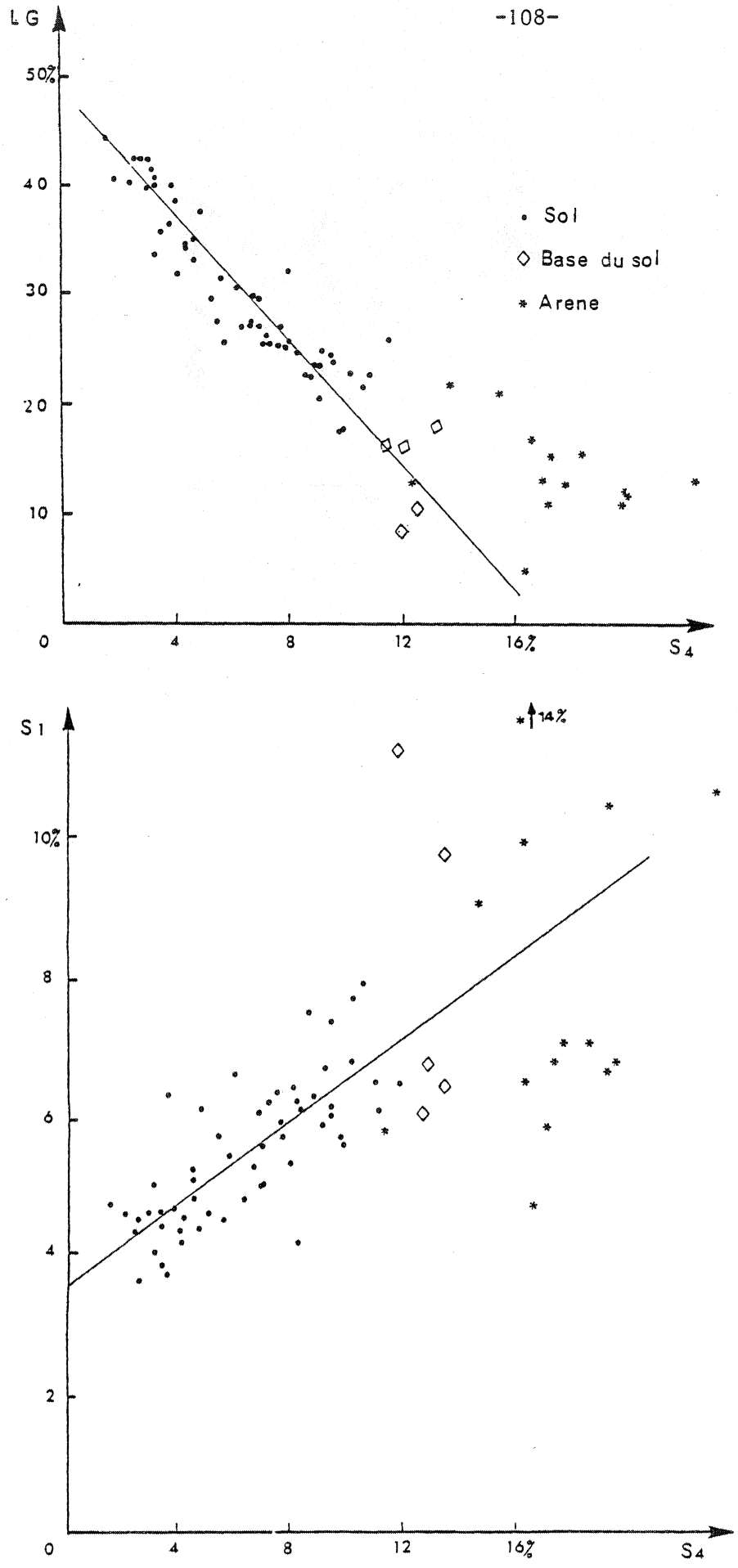
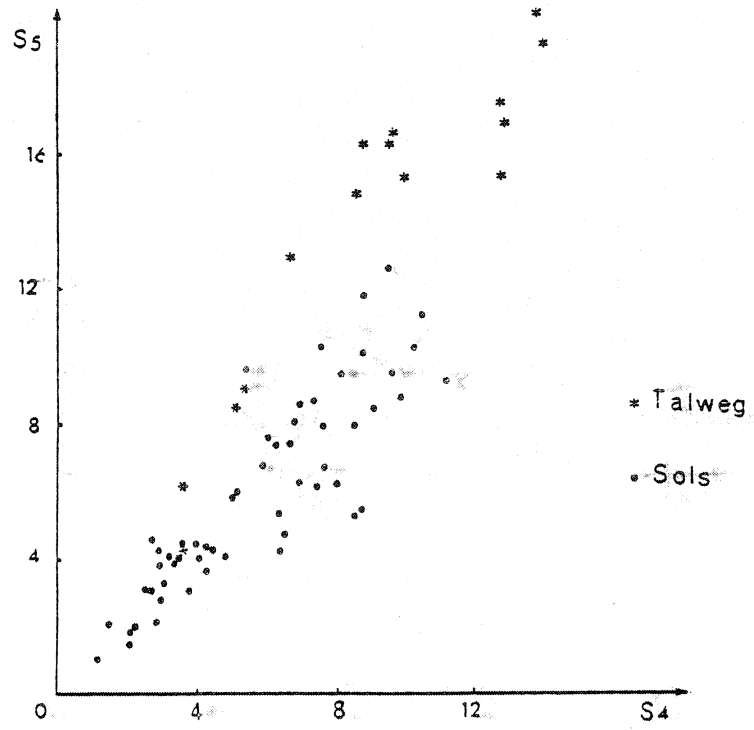


PLANCHE V : LE SOURN : 2 EXEMPLES ILLUSTRANT LES RELATIONS ENTRE LES GRANULOMETRIES DES SOLS ET CELLES DES ARENES.



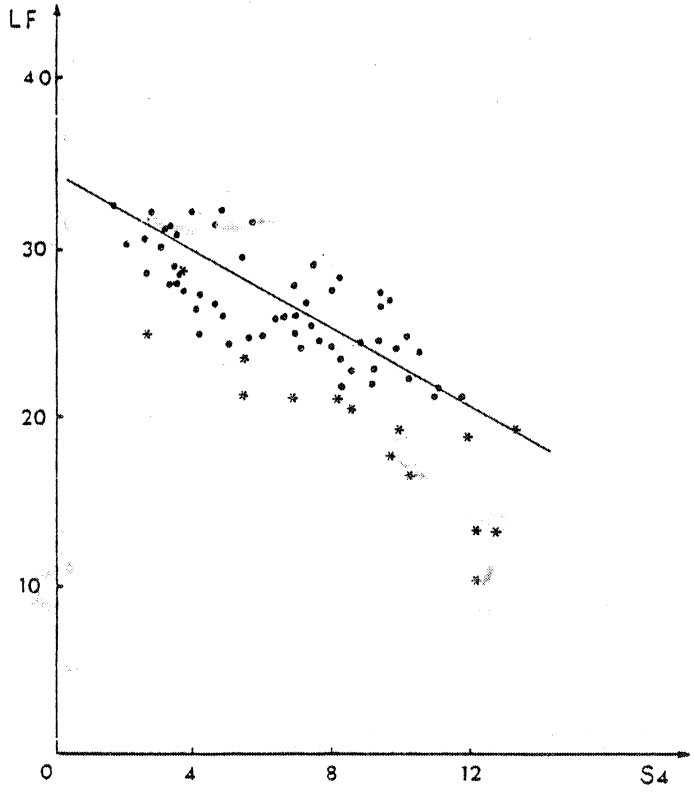


PLANCHE VI : LE SOURN : RELATIONS ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES DES SOLS ET DU TALWEG.

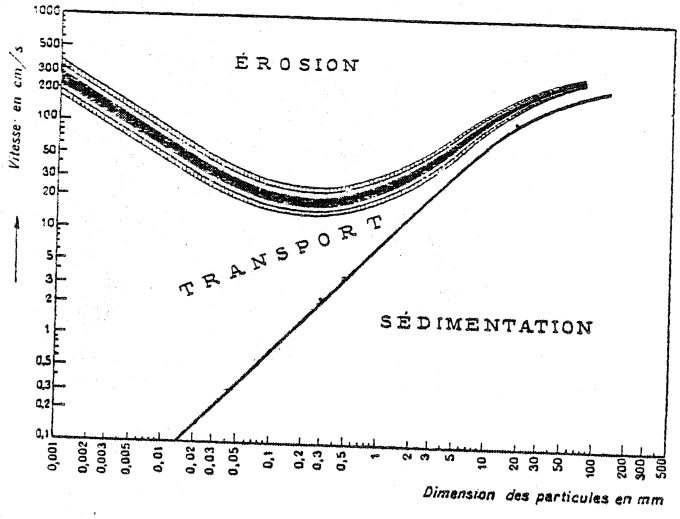


FIGURE 41 : DIAGRAMME DE HJÜLTROM

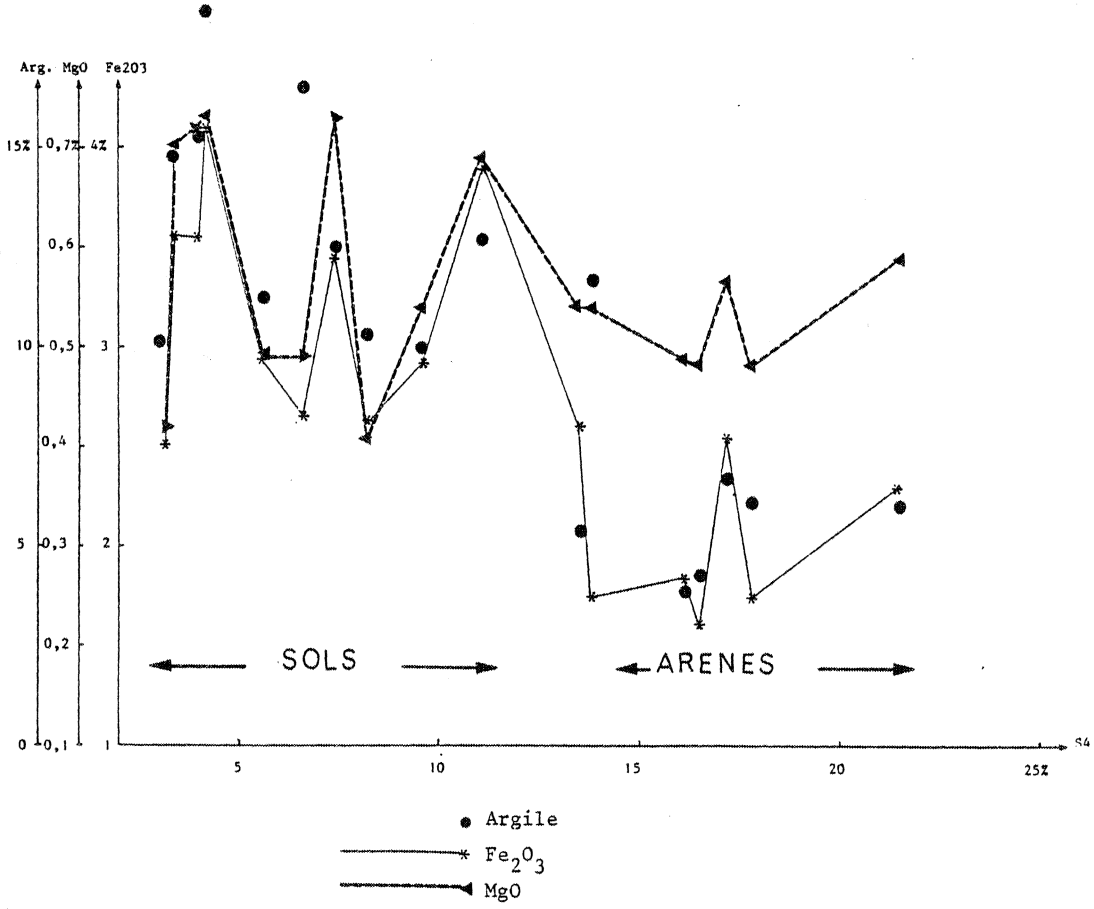


FIGURE 42 : .

LE SOURN : ÉVOLUTION COMPARÉE DE Fe_2O_3, de MgO ET DE L'ARGILE EN FONCTION DE S4.

Ceci signifie qu'elles ne peuvent s'interpréter en terme de mélange de matériaux.

d) Comparaison des diverses données

1) Les points qui représentent les arènes n'apparaissent pas dans le prolongement du nuage correspondant aux sols (planche V). Ils présentent notamment pour une teneur donnée en S_4, un déficit en S_1 et un excès de limon grossier. Les échantillons prélevés à la limite sol-arène ont un comportement "mixte".

2) Par rapport aux sols, les matériaux du talweg présentent, pour une même teneur en S_4, un déficit en limon fin et un excès de S_5. Deux échantillons du P_{15} font exception ; l'un a été prélevé dans l'horizon labouré l'autre à la base du profil sous un lit de cailloux, dans l'arène (planche VI).

e) Conclusion

L'analyse statistique des données granulométriques dissocie bien les trois populations précédemment définies : il faut souligner que :

1) Un ensemble de relations linéaires existent entre les diverses données des sols, celles-ci sont donc compatibles avec l'hypothèse d'un mélange à deux constituants.

2) Les arènes ne présentent pas un ensemble de relations linéaires et ne peuvent donc s'interpréter comme le mélange de deux matériaux.

3) Les caractéristiques granulométriques des échantillons du talweg s'intégrent parfaitement dans le schéma théorique de HJULTROM (fig. 41).

II - 1. 2. 2. Les données chimiques

Dans le cadre de ce mémoire l'analyse chimique de quelques échantillons seulement était possible. Pour l'étude statistique dix échantillons de sols ont été retenus. Ils ont été choisis en fonction de leur composition granulométrique afin d'avoir une dispersion homogène allant du moins limoneux au plus limoneux. A titre de comparaison, deux échantillons prélevés à la limite sol-arène et cinq dans l'arène proprement dite ont, de plus, été analysés.

a) Les sols

Les diagrammes de la planche VII et de la figure 42 montrent que , en fonction de leur liaison avec S_4, les oxydes peuvent être divisés en trois groupes d'importance inégale.

1) Le premier groupe est composé de SiO_2, Al_2O_3, Na_2O, K_2O, TiO_2 et P_2O_5. Ces oxydes, dont les teneurs varient sensiblement d'un échantillon à l'autre, se corrèlent bien à S_4. Les équations des droites de régression et les coefficients de corrélation sont conginés ci-après :

$SiO_2 = -1{,}88\ S_4 + 81{,}66 \qquad r = -0{,}90$

$Al_2O_3 = 1{,}03\ S_4 + 7{,}55 \qquad r = 0{,}94$

$Na_2O = 0{,}07\ S_4 + 0{,}91 \qquad r = 0{,}89$

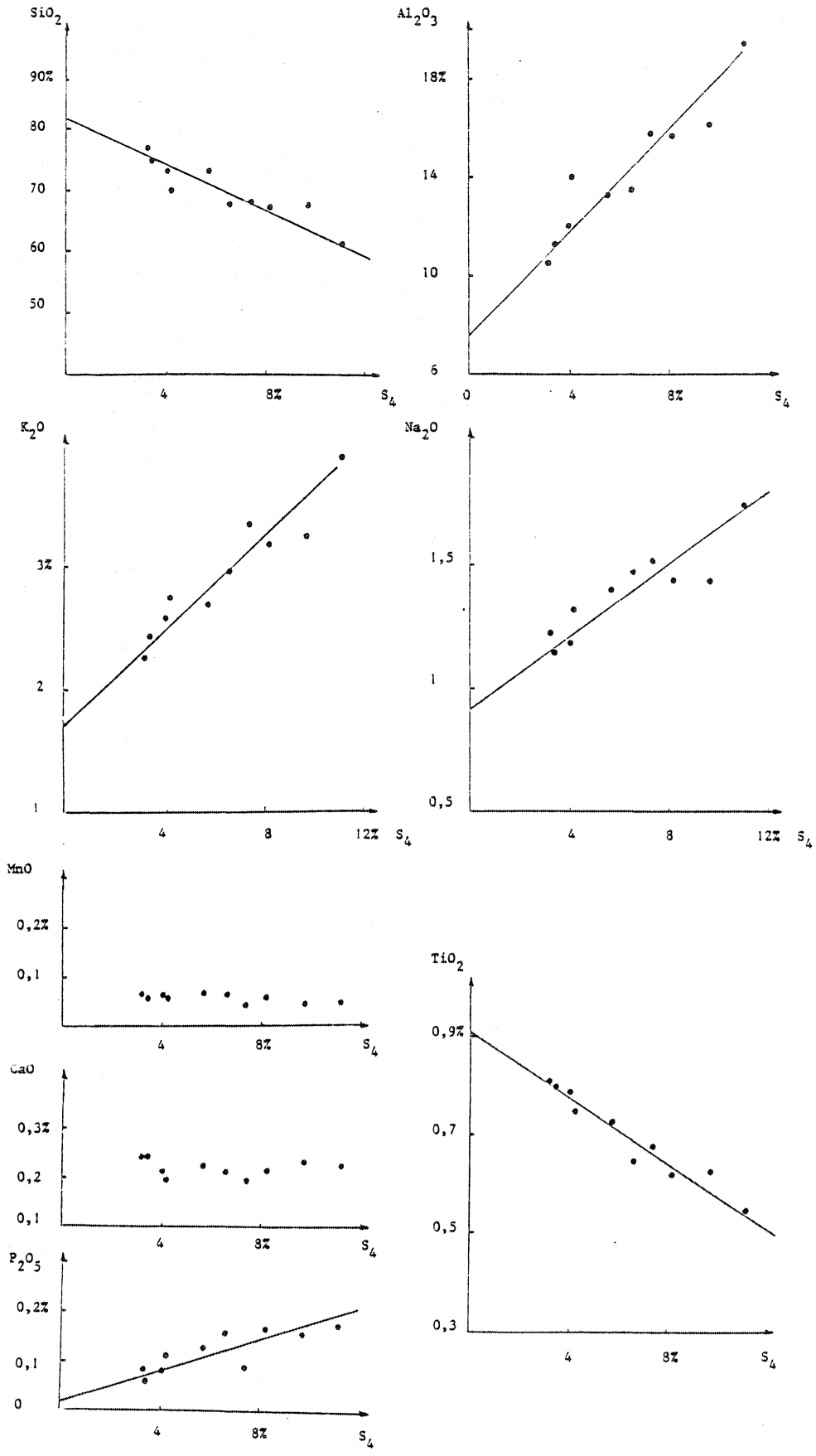


PLANCHE VII : LE SOURN : RELATIONS ENTRE LES ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET LA GRANULOMÉTRIE.

$K_2O = 0,19\ S_4 + 1,71 \qquad r = -0,95$

$TiO_2 = -0,03\ S_4 + 0,90 \qquad r = -0,96$

$P_2O_5 = 0,013\ S_4 + 0,03 \qquad r = 0,83$

Les coefficients de corrélation attestent de la validité de ces relations linéaires, puisque, pour 10 degrés de liberté et aux erreurs de première espèce de 0,01% près, un coefficient égal ou supérieur à 0,71 peut être considéré comme significatif.

2) Le second groupe est composé de Fe_2O_3 et MgO. Ils sont en quantité différente suivant les échantillons et ne se corrèlent pas à S_4. Mais la figure 42 indique que tous deux varient parallèlement à l'argile. L'absence de liaisons linéaires avec S_4 semble donc à rapprocher de la sensibilité de ces oxydes aux redistributions pédogénétiques. Le modèle de mélange va, d'ailleurs, permettre de préciser l'importance de ces redistributions.

3) Le troisième groupe est formée de deux éléments, CaO et MnO, qui apparaissent en proportions constantes dans les sols.

b) Les arènes

Dans les arènes les variations n'apparaissent pas linéaires ; la teneur en TiO_2 est relativement constante. Pour cet élément les échantillons contenant entre 15 et 16% de sables de la classe 4 peuvent être rattachés à la fois aux sols et aux arènes (planche VIII B, figure C). Pour les autres éléments, en particulier pour SiO_2 (planche VIII), les points représentant les arènes n'appartiennent pas aux droites définies à partir des échantillons des sols. Le comportement de MgO et Fe_2O_3 est assez semblable dans les sols et les arènes, mais le rapport entre ces deux éléments est compris entre 6-7 dans les sols et entre 4-5 dans les arènes (fig. 42).

c) Les limites sols - arènes (planche VIII)

Deux échantillons situés à la base des sols et renfermant respectivement 13,5 et 13,8% de S_4 présentent des caractères intermédiaires entre ceux des deux groupes précédents.

Pour SiO_2, TiO_2 et Al_2O_3 ils semblent dans le prolongement des droites de régression (planche VIII).

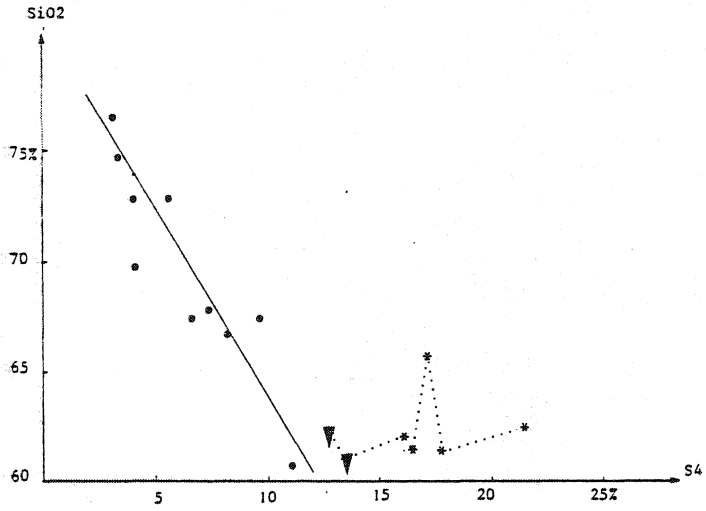
Pour K_2O seul l'échantillon contenant 13,5% de S_4 est dans l'axe de la droite (planche VIII).

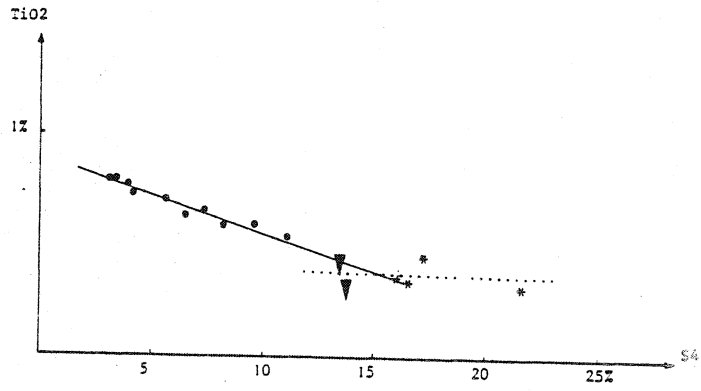
Pour Na_2O aucun des deux échantillons ne peut appartenir à la droite définie dans les sols (planche VIII A, fig. B).

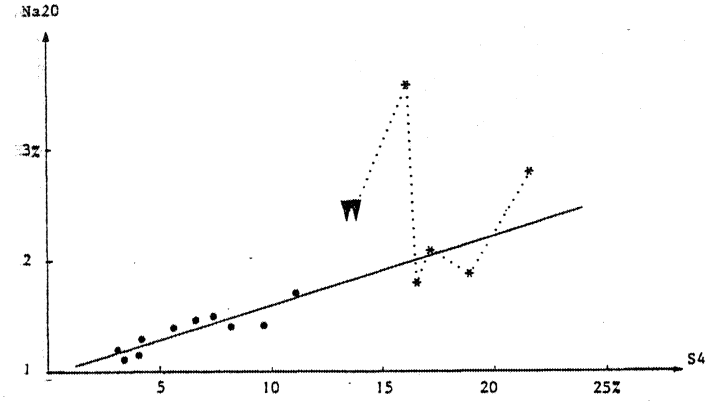
II - 1. 3. Conclusion

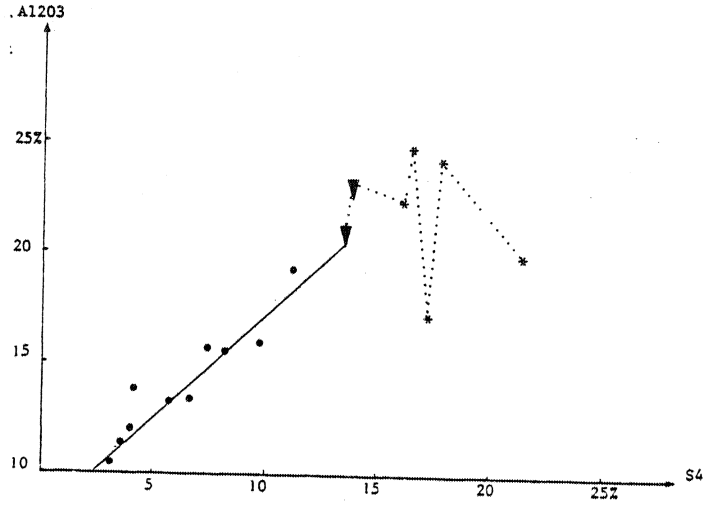
Dans les arènes en place, les variables chimiques et granulométriques ne présentent pas de relations linéaires entre elles, leurs variations ne peuvent donc s'interpréter comme résultant du mélange de deux matériaux.

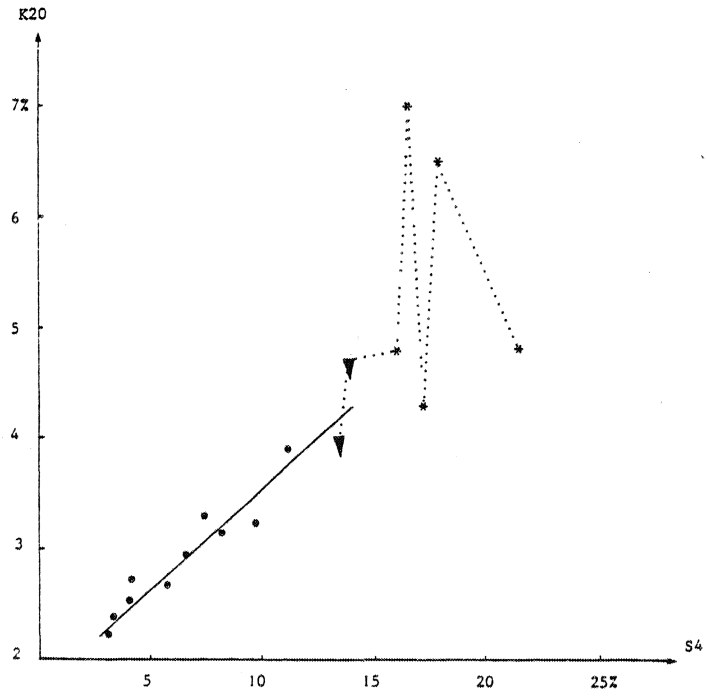
Dans les sols, au contraire, les variations des données granulométriques et chimiques (à l'exception de celles sensibles au lessivage) peuvent s'interpréter comme dues











• Sol

▼ Base du sol

* Arène

PLANCHE VIII :

LE SOURN : ÉVOLUTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES EN FONCTION S4.

au mélange de deux matériaux.

Les échantillons situés à la charnière de ces deux populations ont un comportement mixte. Il apparaît impossible de préciser s'ils doivent être rattachés aux sols ou, aux arènes.

II - 2. La séquence de Sainte-Tréphine

II - 2. 1. Présentation

Deux carrières abandonnées forment cette séquence (cf. IIème partie, p.33) ; il convient de souligner que ;

1 - Sur la carte géologique au 1.50.000ème, feuille de Pontivy (SAGON 1976), la limite entre les schistes cambro-trémadociens et les quartzites ordoviciens est placée entre ces deux carrières.

2 - La zone amont (Profil 1) de la carrière principale a été décrite ainsi : LE CALVEZ-LE BARS (1977) p. 40 : "Les bancs (de roche) sont amenés à l'affleurement par le système de pendage, ils sont alors profondément transformés et intégrés aux horizons pédologiques. Les différences pétrographiques de ces bancs entraînent une plus ou moins grande résistance aux actions pédogénétiques ; aussi est-il parfois possible de retrouver leur succession originelle à l'intérieur de l'horizon A_3 x (t) (XT). Au-dessus de cet horizon la restructuration pédologique (homogénéisation du matériel parental et différenciation des horizons) est trop forte pour que l'on puisse retrouver une quelconque succession lithologique... Le sol renferme de nombreuses espèces de minéraux lourds dont certaines telle la hornblende verte ne peuvent provenir du substrat sous-jacent".

Les problèmes spécifiques à cette séquence sont donc :

1 - Les formations meubles des deux carrières constituent-elles, ou non, deux familles différentes ?

2 - Les matériaux constitutifs des sols de la partie amont de la carrière principale sont-ils suffisamment homogènes pour pouvoir être analysés comme un mélange à deux constituants ?

II - 2. 2. Dépouillement préliminaire

II - 2. 2. 1. La granulométrie

Dans la carrière principale les échantillons du profil 1 ont été exclus des calculs, ceux-ci portent donc sur 30 données granulométriques. Pour la seconde carrière les calculs sont effectués à partir des 33 données.

a) Vérification de l'existence de corrélations linéaires

Les diagrammes de la planche IX font apparaître des corrélations linéaires entre les diverses variables de la carrière principale. Les coefficients de corrélations confir-

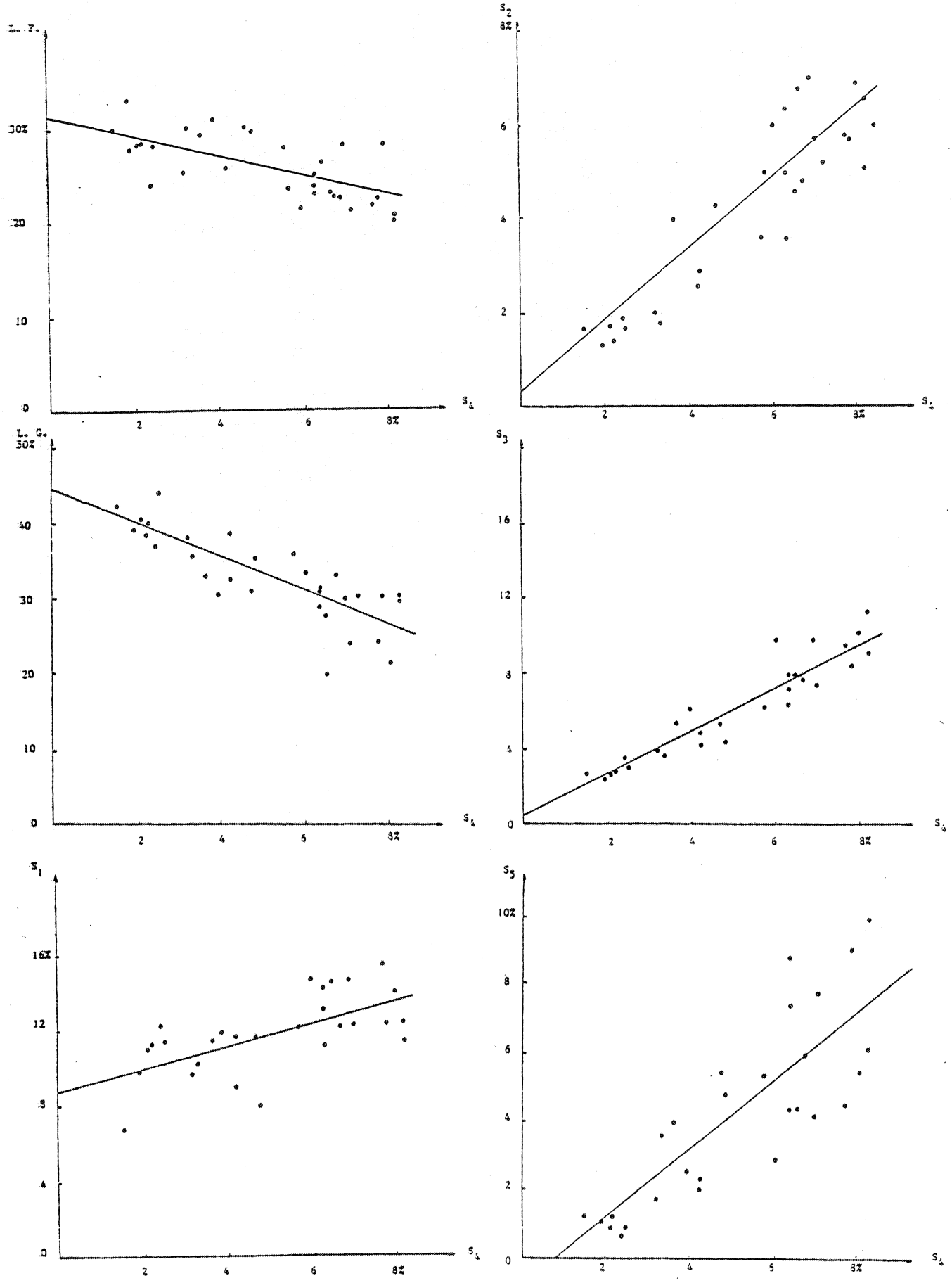


PLANCHE IX : SAINTE TRÉPHINE : 1ÈRE CARRIÈRE : RELATIONS ENTRE LES CARACTERISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES DANS LES SOLS.

ment l'existence de telles liaisons. En effet, ils valent respectivement :

- 0,61 pour L. F. - S_4	0,91 pour S_2 - S_4
- 0,80 pour L. G. - S_4	0,93 pour S_3 - S_4
0,62 pour S_1 - S_4	0,82 pour S_4 - S_5

Ils sont donc tous supérieurs à 0,48, valeur qui correspond pour 25 degrés de liberté et au risque de première espèce de 0,01. près au seuil à partir duquel l'hypothèse de relation peut être acceptée.

En ce qui concerne la seconde carrière, les nuages de points peuvent être divisés en deux groupes :

1) Ils semblent montrer des corrélations linéaires entre L. G. et S_4, S_2 et S_4, S_3 et S_4, S_5 et S_4. Les coefficients de corrélation valent alors respectivement - 0,73 ; 0,80 ; 0,80 et 0,87. Ils sont supérieurs à la valeur de référence (0,48) et confirment donc, au risque de première espèce de 0,01, l'existence des relations linéaires entre les variables.

2) Dans le cas de L. F. et S_4 d'une part, de S_1 et S_4 de l'autre, ils sont allongés parallèlement à l'axe des abscisses ce qui conduit à les considérer comme des fonctions constantes. Bien que les coefficients de corrélation soient inférieurs au seuil de 0,48 (respectivement - 0,37 et + 0,37) ces deux cas n'infirment pas l'hypothèse de mélange.

b) Comparaison des deux carrières

Les équations des droites de régression déterminées à partir des nuages de points des planches IX et X valent respectivement :

carrière principale :

L. F. = - 1,04 S_4 + 32,5	S_2 = 0,77 S_4 + 0,11
L. G. = - 2,23 S_4 + 44,4	S_3 = 1,17 S_4 + 0,34
S_1 = 0,61 S_4 + 8,8	S_5 = 1,03 S_4 - 0,94

seconde carrière :

L. F. = cte = 32,4	S_2 = 1,2 S_4 + 0,4
L. G. = - 3,56 S_4 + 45	S_3 = 0,75 S_4 - 0,2
S_1 = cte = 8,7	S_5 = 1,62 S_4 - 0,3

De ces relations, il est possible de déduire qu'un échantillon renfermant 10% de S_4, contiendra en moyenne :

s'il appartient à la carrière principale :

L. F. = 22%	S_1 = 2,7%	S_3 = 11,5%
L. G. = 22%	S_2 = 7,5%	S_5 = 9%

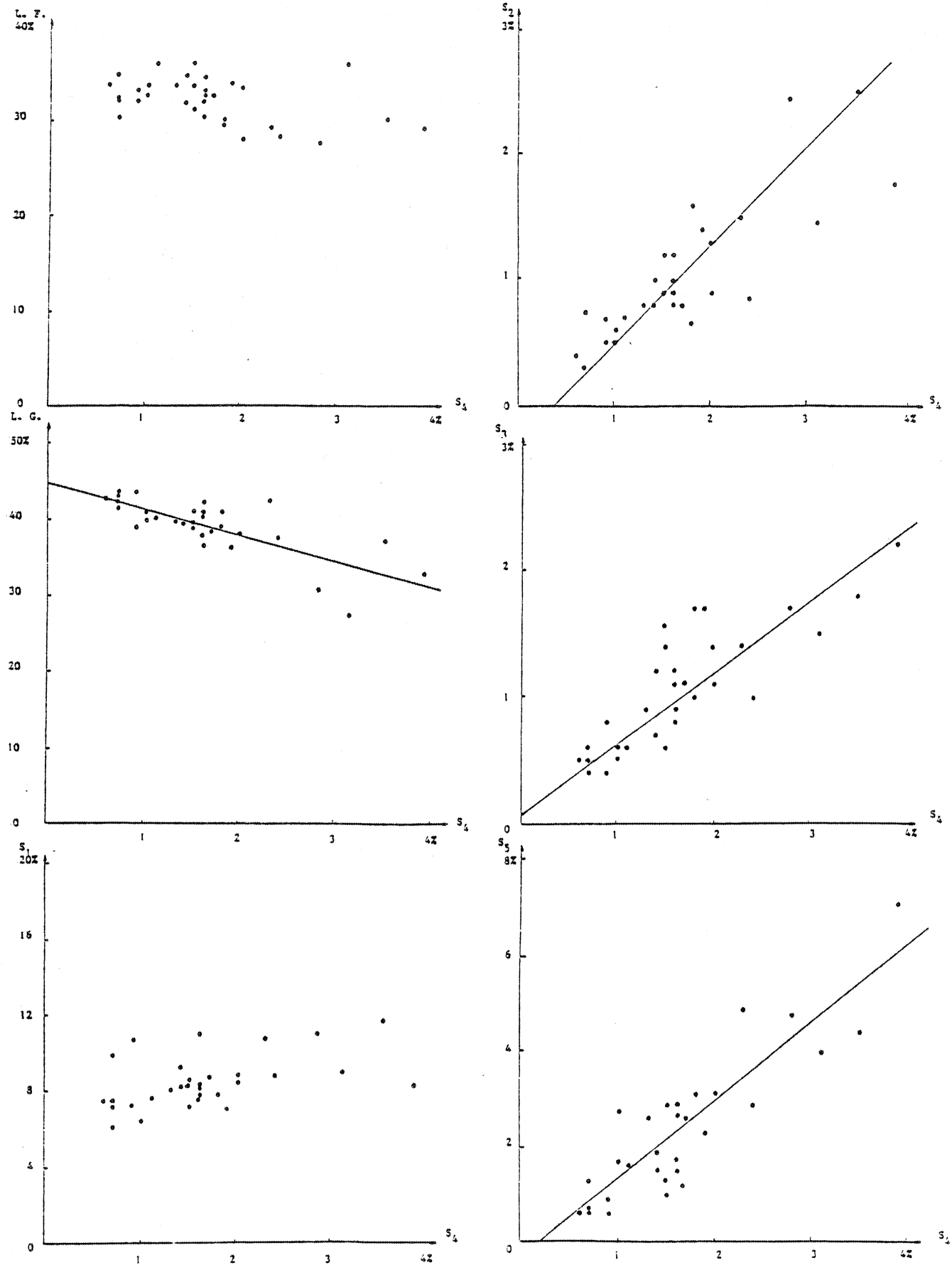
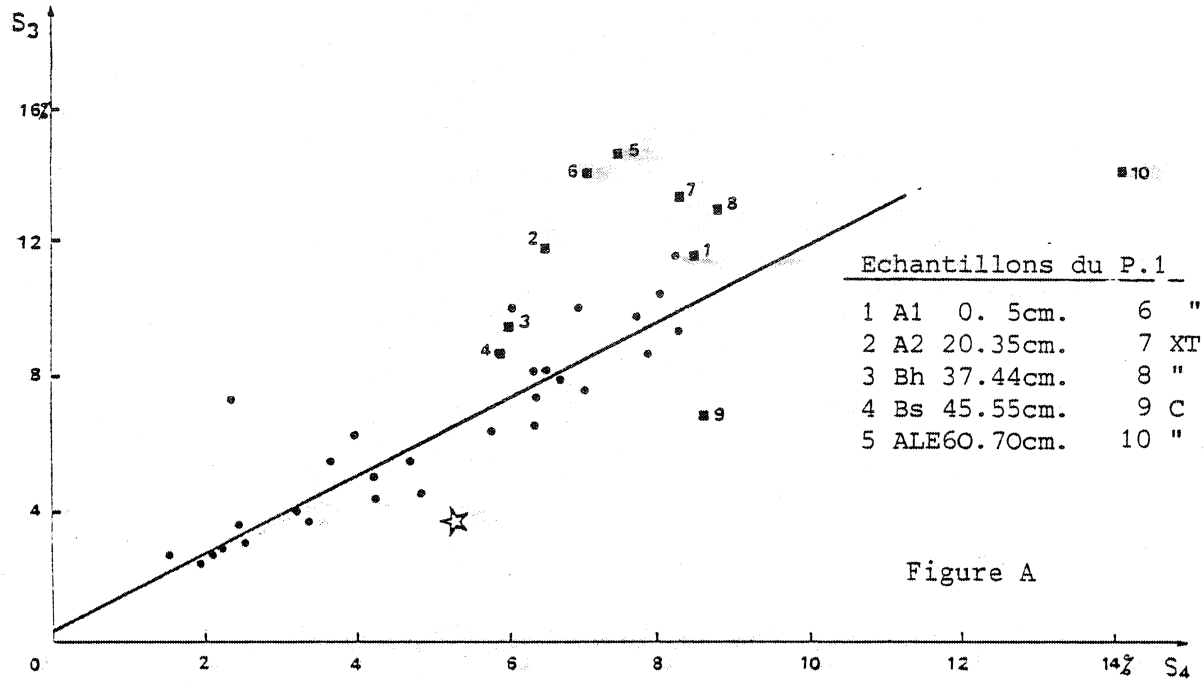


PLANCHE X : SAINTE TRÉPHINE : 2ÈME CARRIÈRE : RELATIONS ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES DANS LES SOLS.



Echantillons du P.1

1	A1 0. 5cm.	6	" 72.85cm.
2	A2 20.35cm.	7	XT 85.II0cm.
3	Bh 37.44cm.	8	" II0.II5cm.
4	Bs 45.55cm.	9	C I45.I65cm.
5	ALE60.70cm.	10	" 260.280cm.

Figure A

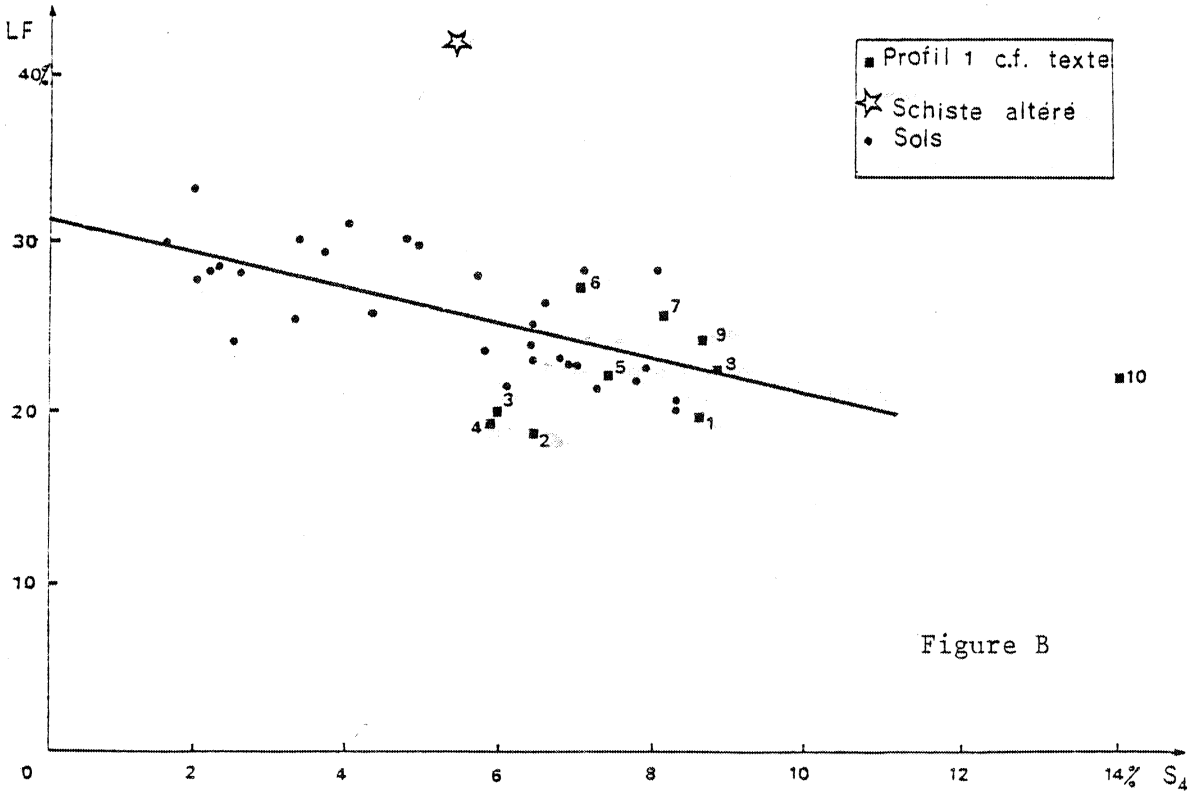
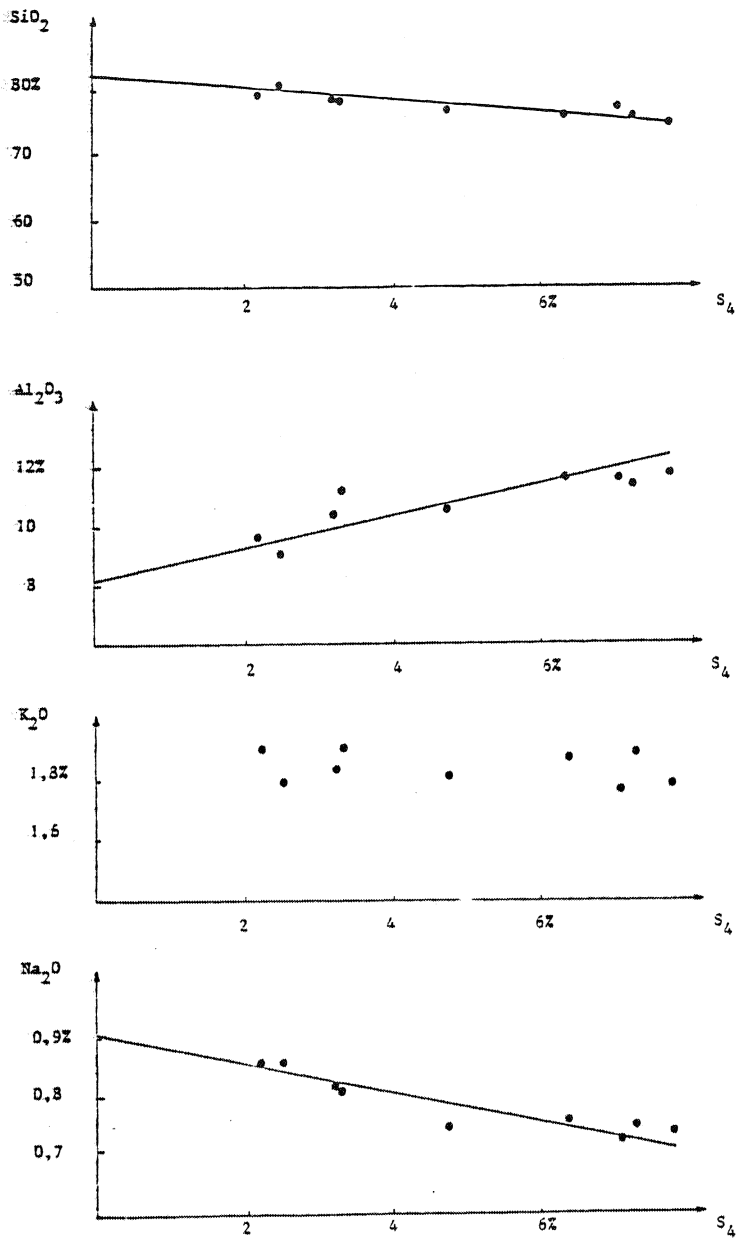


Figure B

PLANCHE XI : SAINTE-TRÉPHINE, *carrière 1* : COMPARAISON DES GRANULOMÉTRIES DU PROFIL 1 ET DES AUTRES PROFILS (*2 exemples*).



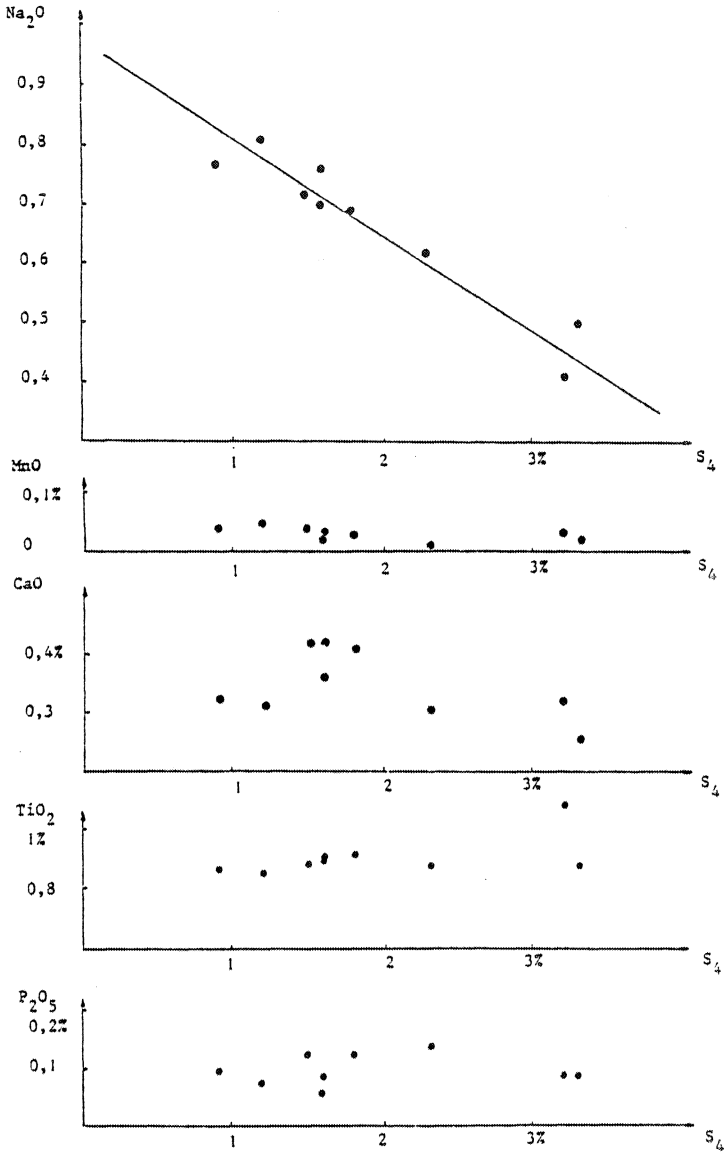


PLANCHE XII : SAINTE TRÉPHINE : 1ÈRE CARRIÈRE : RELATIONS ENTRE LES ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET LA GRANULOMÉTRIE.

s'il appartient à la seconde carrière :

L. F. = 32%	S_1 = 8%	S_3 = 7,5%
L. G. = 10%	S_2 = 12%	S_5 = 16%

Ces deux textures moyennes sont nettement différentes. Par conséquent, les échantillons de ces carrières doivent être considérés comme appartenant à des familles distinctes. Ceci signifie que, quelle que soit leur importance les phénomènes de versant n'ont pas oblitéré l'influence des schistes rouges dans la seconde carrière.

c) Comparaison du profil 1 et des autres profils de la carrière principale (planche XI)

Sur la figure A de la planche XI les points qui correspondent à la base du profil 1 sont relativement éloignés de la droite ajustée à partir des données des autres profils ; les points du sommet de ce profil ont tendance à s'en rapprocher.

Ce résultat semble bien s'accorder avec les observations de terrain (rappelées dans la présentation).

La figure B permet d'observer que le banc de schistes altérés s'individualise par sa forte teneur en limons fins.

II - 2. 2. 2. Les données chimiques

Pour la carrière principale les traitements statistiques ont été effectués sur 9 analyses* (planches XII). Les droites de régression et les corrélations sont les suivantes :

$SiO_2 = - 0,97\ S_4 + 81,63$ $\quad r = - 0,90$

$Al_2O_3 = 0,53\ S_4 + 8,11$ $\quad r = 0,81$

$Na_2O = - 0,025\ S_4 + 0,90$ $\quad r = - 0,93$

Les autres éléments sont pratiquement invariants, à l'exception de Fe_2O_3 et MgO qui varient parallèlement entre eux, comme au Sourn.

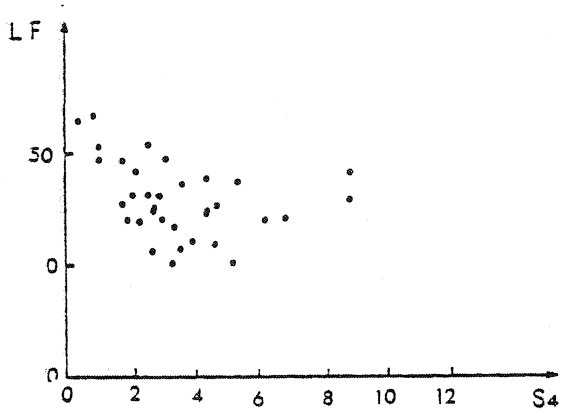
II - 2. 3. Conclusion

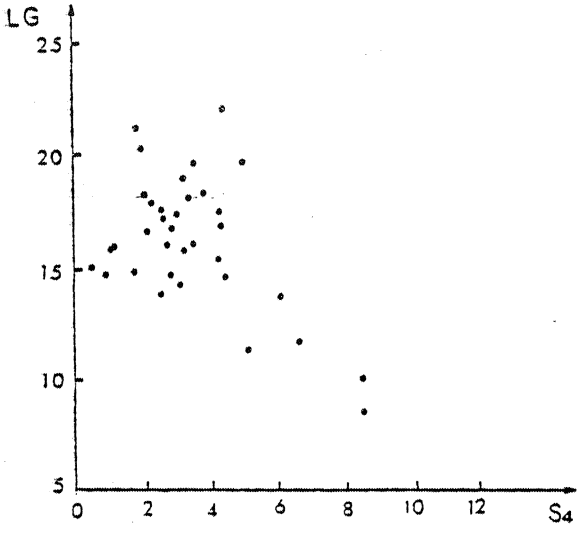
Les données de chacune des carrières (à l'exception de celles du profil 1) sont compatibles avec l'hypothèse de mélange mais doivent être étudiées séparément.

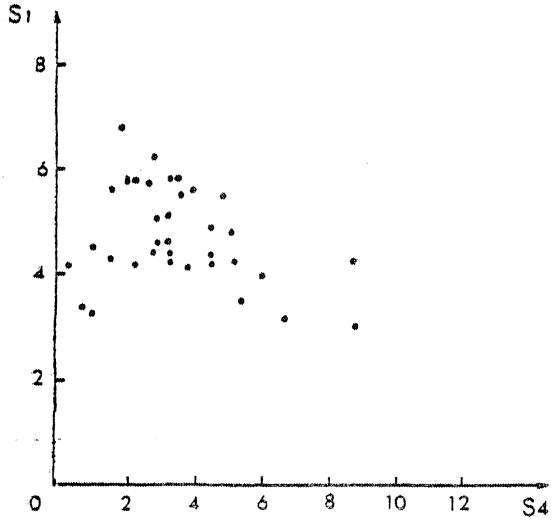
Les valeurs des caractéristiques granulométriques du profil 1 n'appartiennent pas aux droites de régression. Les échantillons de ce profil ne peuvent donc s'interpréter

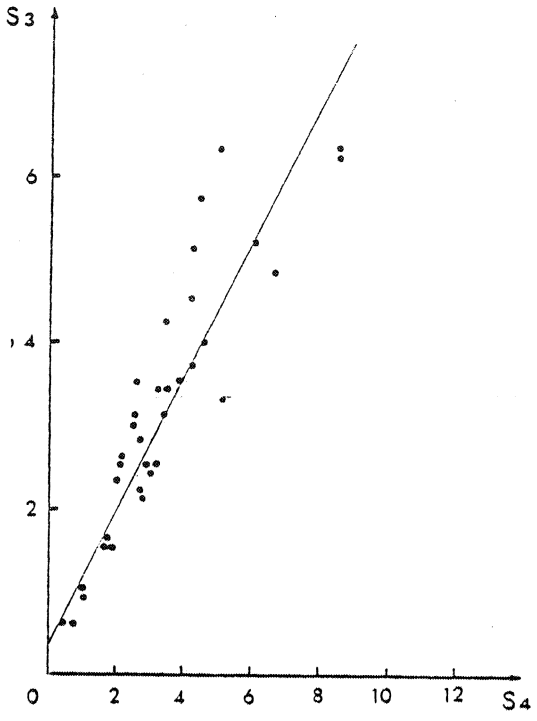
---

* *N. B. : La seconde carrière où deux analyses seulement ont été effectuées ne sera pas prise en considération*









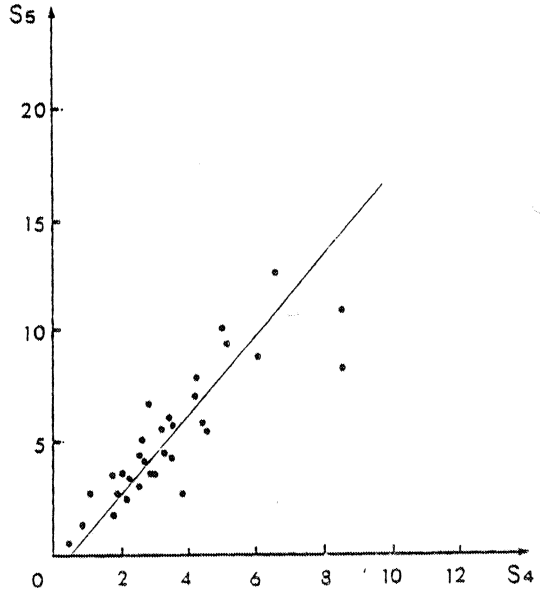


PLANCHE XIII : SAINT-ELOUAN : RELATION DANS LES ALTÉRITES DE SCHISTES.

comme le résultat du mélange de deux matériaux ce qui est en accord avec les observations de terrain.

II - 3. La séquence de Saint-Elouan

Il faut rappeler que cette séquence, décrite p.33 est caractérisée notamment par les deux faits suivants :

1) Les sols le long de la pente convexe paraissent provenir de l'altération des schistes sous-jacents

2) Le profil 1 et les niveaux superficiels des profils 2 et 3 se rattachent aux formations limoneuses.

II - 3. 1. Les matériaux d'altération des schistes

Les données relatives au niveau superficiel du profil 8 n'ont pas été prises en considération, car ce niveau a été interprété comme d'origine colluviale. Les calculs portent donc sur 35 données.

Les résultats, correspondant aux diagrammes de la planche XIII, sont les suivants :

$L.F. = -4,8\ S_4 + 62 \qquad r = -0,36$

$L.G. = -3,0\ S_4 + 26,5 \qquad r = -0,51$

$S_1 = -1,5\ S_4 + 9,8 \qquad r = -0,31$

$S_2 = 0,41\ S_4 + 0,7 \qquad r = 0,70$

$S_3 = 0,82\ S_4 + 0,3 \qquad r = 0,90$

$S_5 = 1,78\ S_4 - 0,8 \qquad r = 0,85$

Certaines classes granulométriques contiguës ($S_5 - S_4$; $S_3 - S_4$) présentent de bonnes corrélations. Mais l'absence de relations linéaires entre L. F., L. G., S_1 et S_4 conduit à l'impossibilité d'interpréter ces matériaux comme un mélange à deux constituants.

II - 3. 2. Les formations limoneuses

II - 3. 2. 1. La granulométrie (planche XIV)

Les résultats des calculs effectués sur 14 données sont les suivants :

$L.F. = 3,70\ S_4 + 34,1 \qquad r = 0,80$

$L.G. = -9,26\ S_4 + 43,1 \qquad r = -0,91$

$S_1 = -1,61\ S_4 + 9,7 \qquad r = -0,76$

$S_2 = 1,02\ S_4 - 0,1 \qquad r = 0,82$

$S_3 = 1,29\ S_4 - 0,2 \qquad r = 0,89$

$S_5 = 1,54\ S_4 - 0,7 \qquad r = 0,91$

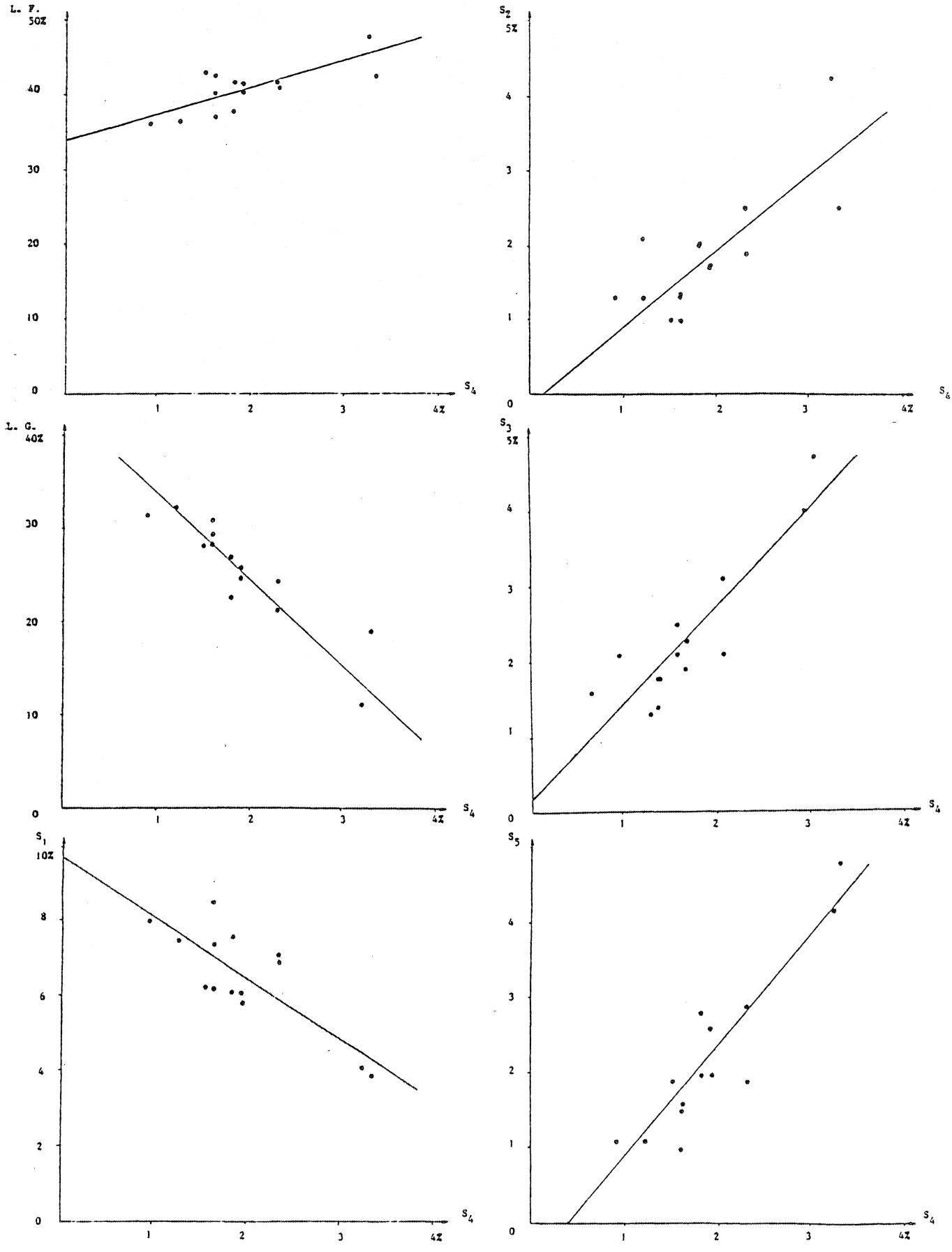


PLANCHE XIV : SAINT-ELOUAN : RELATIONS ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES DANS LES SOLS.

Pour 12 degrés de liberté un coefficient égal ou supérieur à 0,66 peut être considéré comme significatif, au risque de première espèce de 0,01. L'ensemble de ces variables présentent de bonnes corrélations linéaires avec S_4. Notons cependant qu'elles apparaissent moins bonnes que celles enregistrées au Sourn. Ceci est à lier à la plus grande hétérogénéité du substrat.

II - 3. 2. 2. Les analyses chimiques

Les analyses, toutes effectuées dans le profil 1, sont au nombre de 9. Un coefficient de corrélation égal ou supérieur à 0,79 sera donc considéré comme significatif. Comme dans les autres séquences trois groupes peuvent être distingués (planche XV) :

1 - Les oxydes dont les teneur varient sensiblement d'un échantillon à l'autre et qui se corrèlent à S_4 constituent le premier groupe. Les équations et les coefficients de corrélation correspondant à ces oxydes sont les suivants :

$SiO_2 = -4,85\ S_4 + 81,85 \qquad r = -0,90$

$Al_2O_3 = 2,80\ S_4 + 9,42 \qquad r = 0,93$

$Na_2O = -0,16\ S_4 + 0,97 \qquad r = -0,95$

$K_2O = 0,40\ S_4 + 1,71 \qquad r = 0,90$

2 - Le second groupe est formé par les oxydes pratiquement invariants : TiO_2, P_2O_5, CaO, MnO.

3 - Le troisième est représenté par MgO et Fe_2O_3 qui, comme dans les autres séquences, ne se corrèlent pas à S_4 mais varient simultanément.

II - 3. 3. Conclusion

Les niveaux interprétés à partir des données morphologiques et analytiques comme entièrement issus de l'altération des schistes ne présentent pas de relations linéaires entre leurs diverses caractéristiques granulométriques. Ils ne peuvent donc s'interpréter comme le résultat d'un mélange à deux constituants.

Dans les formations présumées de mélange on note la présence de relations linéaires entre les diverses variables, (à l'exception de l'argile, de Fe_2O_3 et de MgO), ce qui est compatible avec l'hypothèse de mélange.

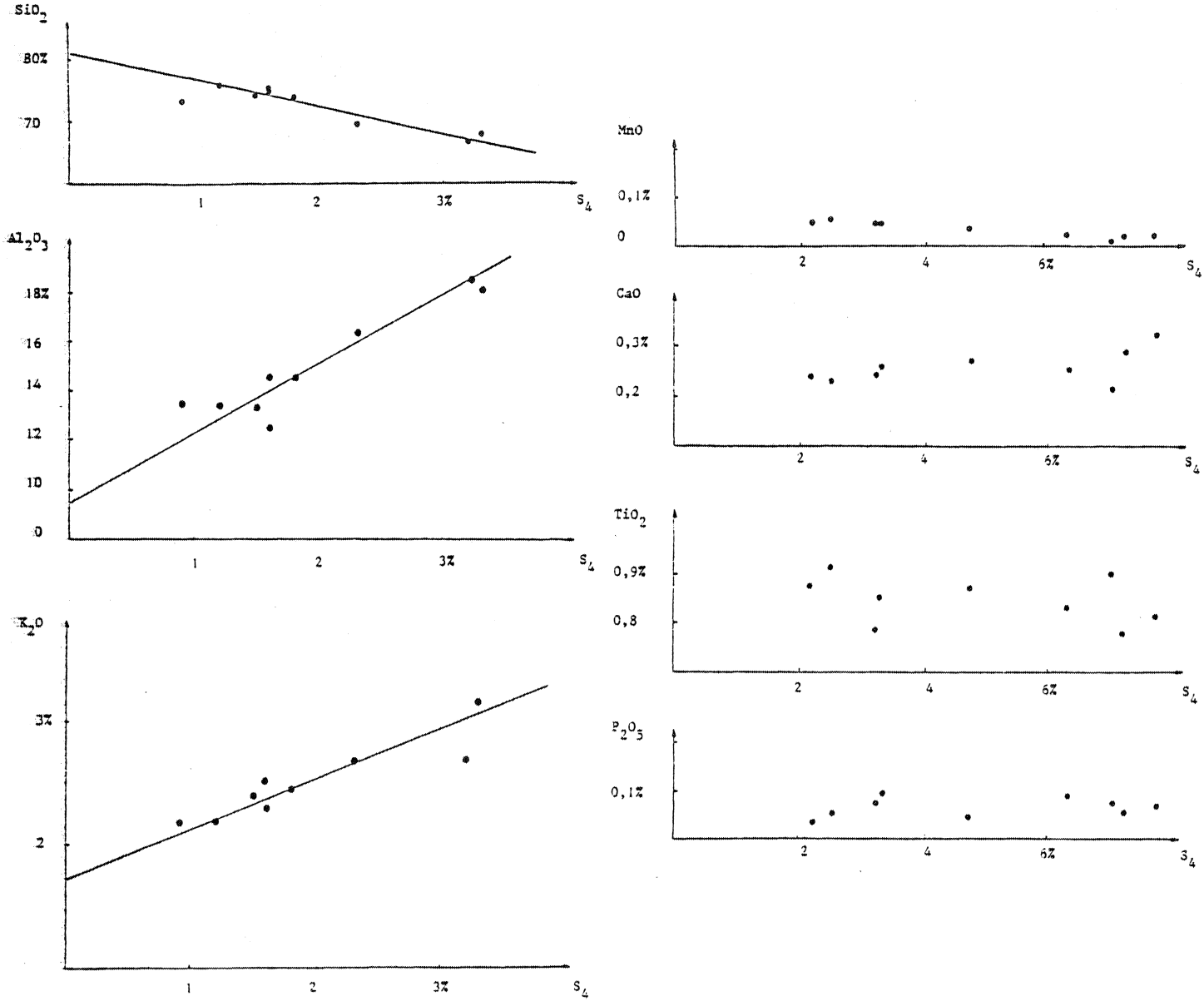


PLANCHE XV : SAINT ELOUAN : RELATIONS ENTRE LES ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET LA GRANULOMÉTRIE.

III - CONCLUSION

Ce pré-traitement statistique (calcul des corrélations) des données analytiques a permis de retrouver dans toutes les séquences les grands groupes de matériaux identifiés dans la seconde partie de ce mémoire. Plus précisément, il faut souligner que dans tous les cas :

- les matériaux qui apparaissaient directement issus d'une altération in situ ne présentent pas de relations linéaires généralisées entre leurs diverses caractéristiques.

- les formations limoneuses, interprétées comme un mélange de matériaux, présentent de bonnes corrélations entre la plupart de leurs caractéristiques.

Ces faits justifient la démarche suivie ; seules les formations limoneuses vont maintenant être étudiées de façon plus détaillée.

C) ETUDE DÉTAILLÉE DES SÉQUENCES PAR LE MODÈLE DE MÉLANGE (A. C. P.).

Ce paragraphe sera consacré à l'étude de détail par analyse en composantes principales des données granulométriques et chimiques des séquences suivantes :

- Le Sourn : matériaux constitutifs des sols, y compris les niveaux de base.
- Sainte-Tréphine : matériaux constitutifs des sols des deux carrières, à l'exclusion de ceux du profil 1.
- Saint-Elouan : matériaux constitutifs des sols situés en pente douce.

Dans chacune de ces séquences les analyses en composantes principales seront d'abord utilisées pour classer et positionner les données, ensuite le modèle de mélange sera appliqué.

I - LE SOURN : UNE SEQUENCE SUR GRANITE.

I - 1. Les résultats des analyses en composantes principales

I - 1. 1. La granulométrie

Les données granulométriques de 66 échantillons servent de base à cette étude. Les pourcentages d'inertie des différents axes sont les suivants :

1er axe : 79,8%

2ème axe : 10,3%

3ème axe : 5,9%

4ème axe : 3,1%

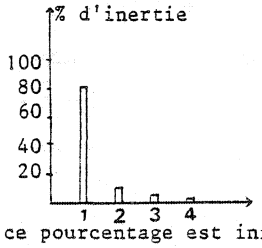


FIGURE 43

Pour les autres axes ce pourcentage est inférieur à 1%.

Il se dégage donc un axe prépondérant qui explique environ 80% des variations des mesures.

I - 1. 1. 1. Le premier axe

a) Corrélation des variables à l'axe

Les corrélations des variables à cet axe sont respectivement de :

A : 0,310

L. F. : 0,766

L. G. : 0,981

S_1 : - 0,750

S_2 : - 0,940

S_3 : - 0,927

S_4 : - 0,961

S_5 : - 0,861

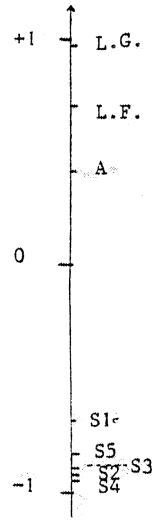


FIGURE 44

L'ensemble des variables, à l'exception de l'argile, présente une excellente corrélation à l'axe. Celui-ci oppose les limons qui présentent des corrélations positives, aux sables dont les valeurs sont négatives. Il constitue donc, un indicateur synthétique de la texture et, notamment de la quantité de limon par rapport à celle de sables ; cet indicateur n'est que très faiblement dépendant de la teneur en argile. Les coordonnées sur l'axe des échantillons riches en sables auront une valeur négative et celles des

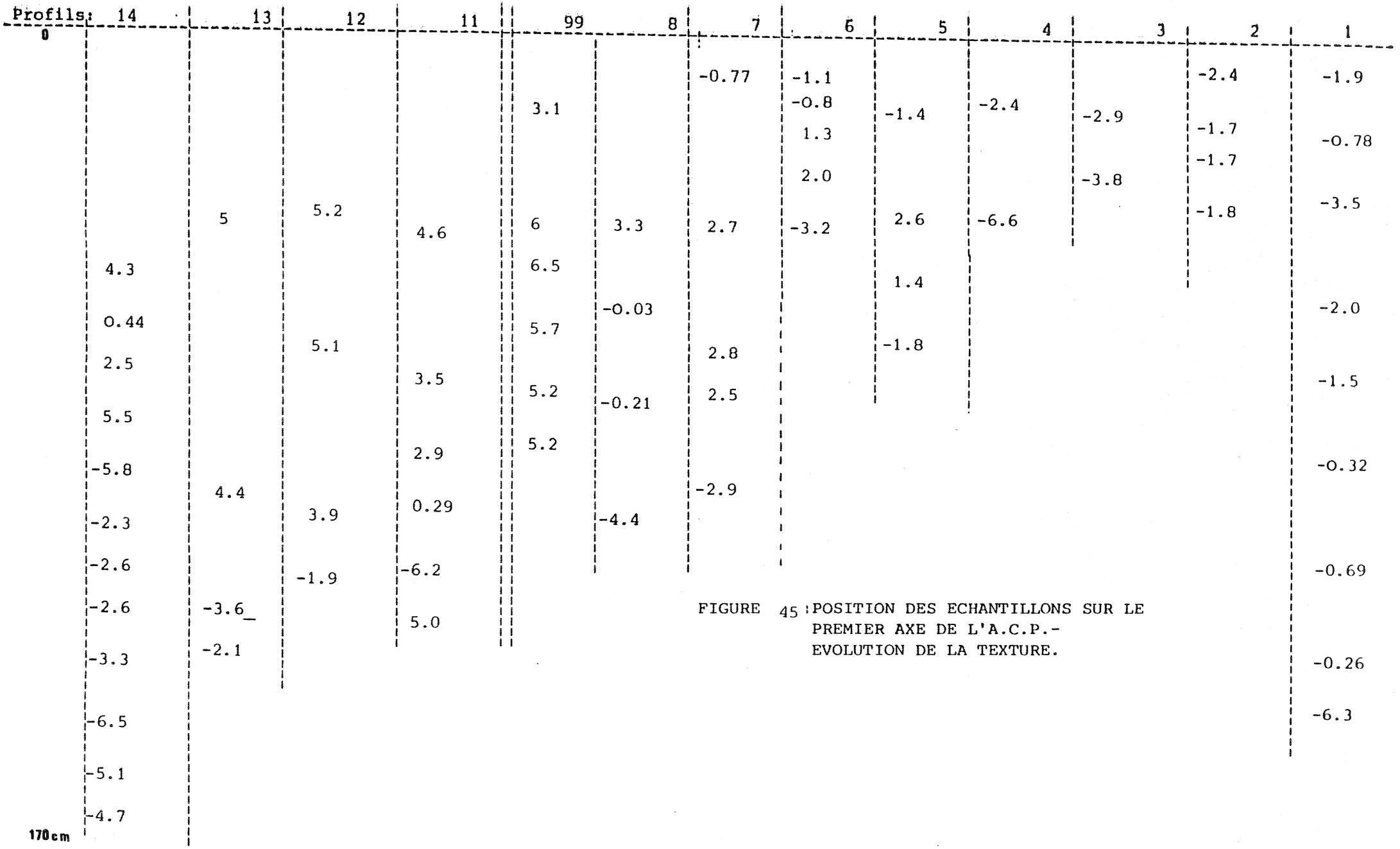


FIGURE 45 : POSITION DES ECHANTILLONS SUR LE PREMIER AXE DE L'A.C.P.- EVOLUTION DE LA TEXTURE.

échantillons limoneux auront une valeur positive.

b) La position des échantillons sur l'axe

La position des échantillons sur l'axe a été reporté sur la séquence (fig. 45). Ce schéma indique l'évolution globale de la texture ; trois aspects principaux sont à retenir :

1° Comme l'indique la comparaison avec la coupe pédologique (fig. 6, p.32), les caractéristiques texturales des échantillons sont indépendantes de la nature des horizons pédologiques.

2° Dans la zone où la couverture limoneuse est continue la répartition globale est en enveloppes ouvertes vers l'aval. Les valeurs les plus faibles (échantillons sableux) se situent à la périphérie et les plus fortes (échantillons limoneux) au coeur de ces enveloppes. Le passage de niveaux sableux aux niveaux limoneux est progressif, notamment à la base de la séquence. Cette répartition globale sera interprétée dans le cadre de la synthèse. Du profil 5 au profil 9 ces enveloppes sont régulières et les valeurs les plus élevées de l'ensemble de la séquence sont atteintes au coeur du profil 9. A partir du profil 11, c'est-à-dire au-delà du talweg (profil 10), cette structure est beaucoup moins régulière et se redéveloppe à partir de valeurs plus basses (4,6 au coeur du profil 11 au lieu de 6 et 6,5 au centre du profil 9).

Du point de vue de la répartition des matériaux, la limite marquée par le petit talweg apparaît, donc, comme majeure. L'irrégularité de la répartition au-delà de ce talweg, conduit à penser qu'il marque la zone où le colluvionnement devient important.

3° Une poche de la zone amont a été échantillonnée de façon systématique (P.1). Par rapport au reste de la séquence, la répartition des matériaux y est particulière. On remarque, notamment que :

- à la base, le passage des niveaux sableux aux niveaux limoneux, est rapide (de - 6,3 à - 0,26 en 5 cm).

- de la base, au coeur de la poche, la texture du matériel reste constante (- 0,26, - 0,69, - 0,32) ; au-dessus elle redevient progressivement plus sableuse (- 1,5, - 2, - 3,5).

- enfin, la texture de l'horizon labouré est relativement limoneuse (- 0,78, - 1,9) et voisine de celle de l'horizon labouré des profils voisins (ce qui plaide en faveur d'une homogénéïsation par le labour).

La rapidité du passage à la base de la poche, conduit à penser, que sa formation est postérieure à la différenciation texturale ; la répartition initiale des textures étant, alors, comparable à celle décrite pour le reste de la séquence. Dans ce cas, il faut envisager un mécanisme qui transforme un passage progressif en un passage brutal, qui homogénéïse la base de la poche et qui inverse les tendances dans la partie superficielle.

Ceci est réalisé dans les phénomènes d'involution en climat périglaciaire. En effet, les alternances de gonflement et de contraction, liées aux cycles gel - dégel,

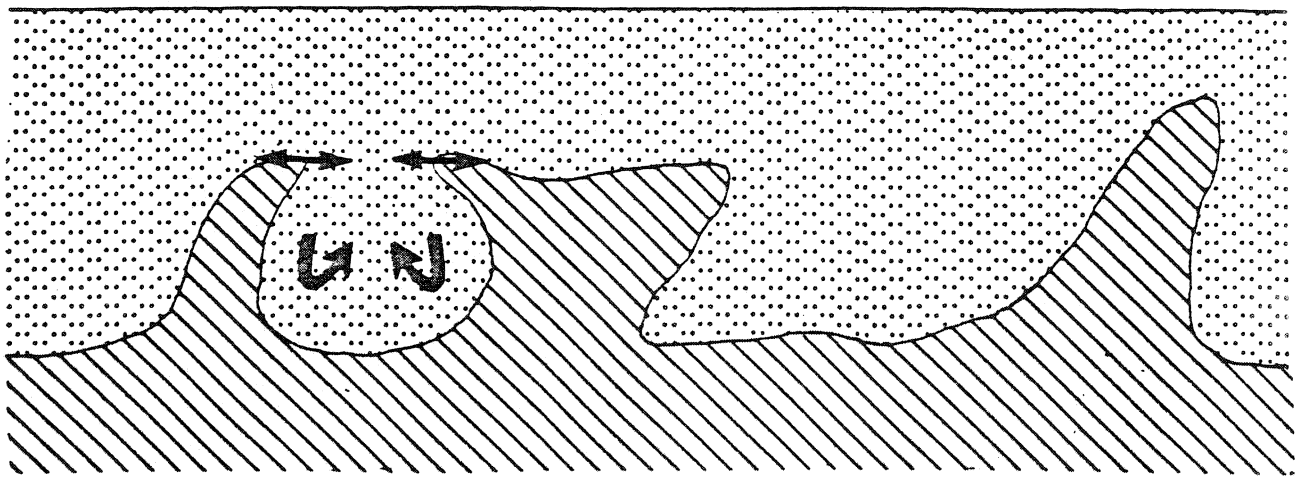


Figure 46 a

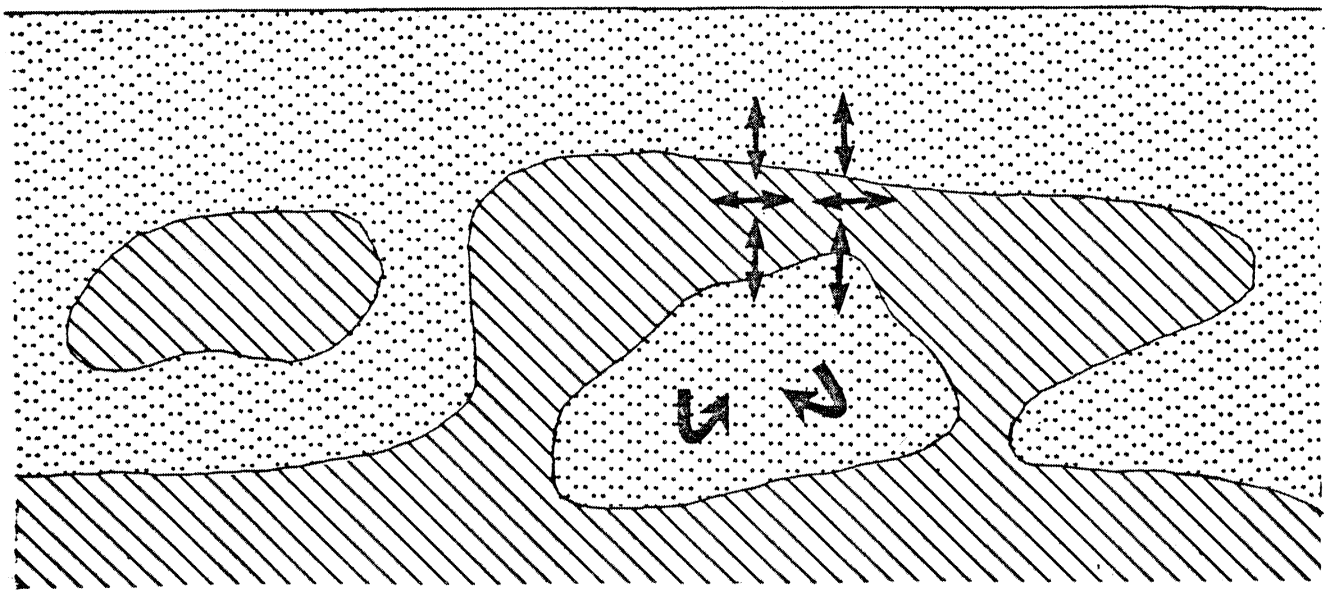


Figure 46 b

Matériel limoneux

Arène

Homogénéisation au coeur des poches

Mélange arène-limon

FIGURES 46 a et b: HYPOTHESE DE FORMATION DES POCHES DE LA ZONE AMONT DU SOURN PAR CRYOTURBATION (d'après R.G. West 1972)

inégales suivant la granulométrie et la porosité des matériaux, provoquent la formation des poches. Au coeur de celles-ci, il y a homogénéisation complète du matériel et, au sommet, injection des produits sous-jacents initiaux. Ceci peut, même conduire à couper les matériaux de leur racine et, à individualiser des noyaux d'arène au sein des limons, et réciproquement (SPARKS in WEST 1972) (fig. 46 a et b).

Cette interprétation intègre l'ensemble des aspects de la répartition des matériaux dans les poches ; toutefois, rien n'indique qu'elle soit exclusive.

I - 1. 1. 2. Le second axe

a) Corrélation des variables avec l'axe

Les corrélations des variables à cet axe sont respectivement de :

Argile	:	0,947
Limon fin	:	- 0,278
Limon grossier	:	- 0,083
S_1	:	- 0,134
S_2	:	- 0,019
S_3	:	- 0,141
S_4	:	- 0,141
S_5	:	- 0,127

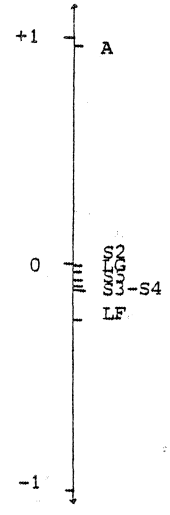


FIGURE 47

Une seule variable présente une bonne corrélation à l'axe : l'argile. Cette teneur en argile est déjà intervenue, pour une faible part, dans la constitution du premier axe. Elle a donc une double signification :

- l'une, de faible importance, selon laquelle la teneur en argile est liée à la teneur en limon, en opposition à la teneur en sables (cette liaison, représentée sur le premier axe, sera explicitée par la suite).
- l'autre, prédominante, est indépendante de la teneur en limon. Elle correspond au second axe.

b) Position des échantillons sur l'axe

La position des échantillons sur l'axe a été reportée sur la séquence (fig. 48), ce schéma représente les variations d'argile indépendantes des variations globale de texture (notons que le point zéro correspond à la teneur moyenne en argile de la séquence).

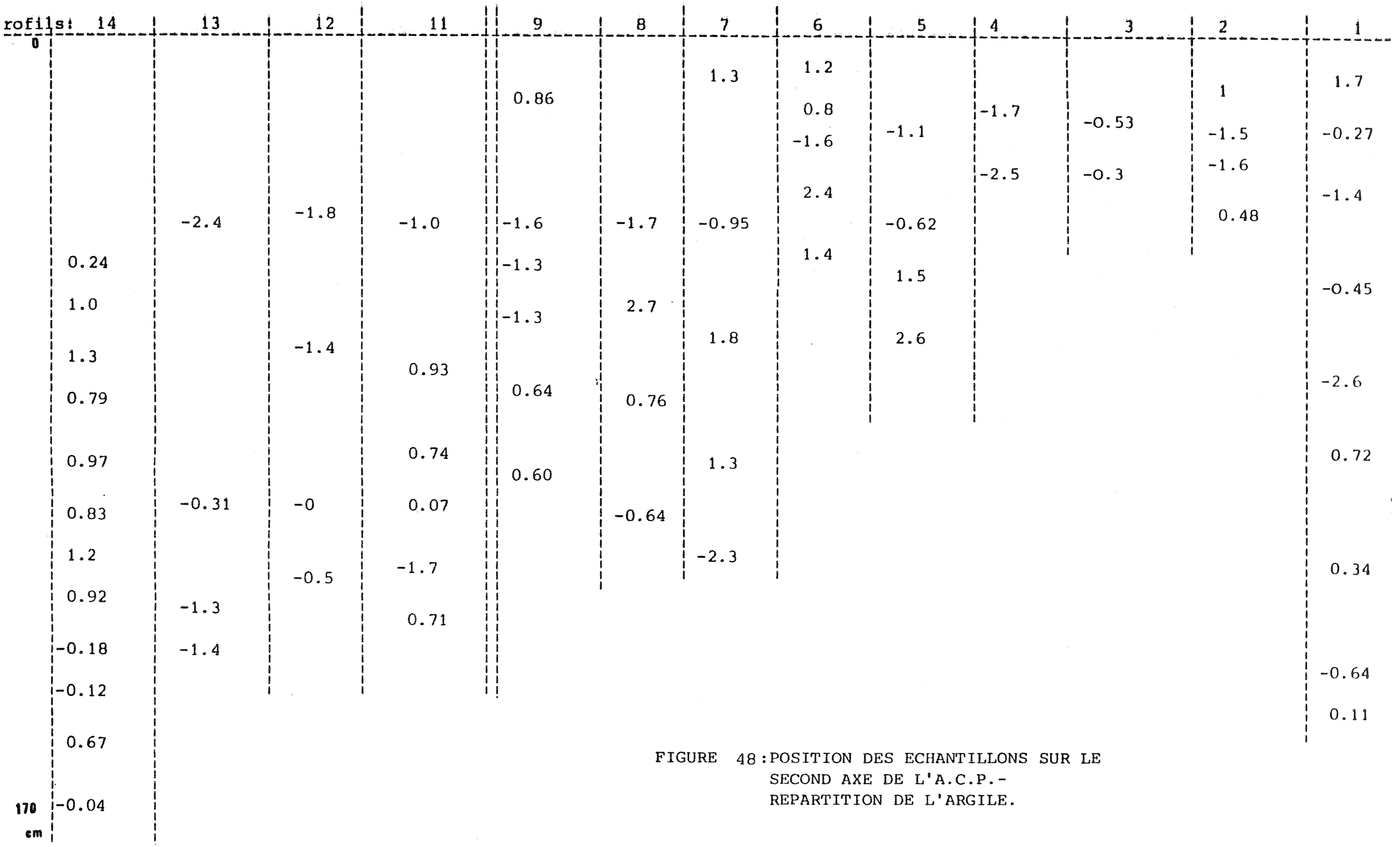


FIGURE 48 : POSITION DES ECHANTILLONS SUR LE SECOND AXE DE L'A.C.P.- REPARTITION DE L'ARGILE.

1) La partie amont :

Du profil 1 au profil 9 quatre niveaux sont aisément identifiables :

- Dans le premier les valeurs sont positives, elles correspondent aux prélèvements effectués dans l'horizon labouré et à un échantillon de l'horizon ALE du P_6 (cet échantillon se situe directement sous l'horizon labouré dans une zone encore riche en matière organique). Il faut noter que le prélèvement effectué dans l'horizon Ap du P_5 appartient au second niveau.

- Dans ce second niveau les valeurs sont négatives. Il est constitué des échantillons prélevés dans l'horizon ALE (à l'exception des deux cas précédemment cités).

- Le troisième niveau qui, de nouveau, présente des valeurs positives, est formé par les prélèvements des horizons tassés et accumuliques (X, XT).

- Dans le quatrième niveau, les valeurs sont négatives. Les échantillons qui le définissent proviennent de la limite arène - sol.

Dans cette partie de la séquence le simple signe (positif ou négatif) de la position des échantillons sur l'axe 2, permet de reconstituer les horizons pédologiques identifiés sur le terrain.

Ceci montre que la différenciation des horizons est étroitement liée aux mouvements de l'argile, indépendants des variations globale de texture. Les valeurs exactes des positions des échantillons sur l'axe 2 devraient donc permettre de quantifier l'importance des redistributions d'argile. Pour ceci, il semble, à priori, qu'il suffise, dans chaque profil, de soustraire à la valeur de l'horizon T, celle de l'horizon E. Dans le cas où il n'y a pas eu de lessivage de l'argile l'indice ainsi établi doit être nul.

Ce calcul, effectué à partir des valeurs extrêmes des deux profils dont l'échantillonnage a été le plus serré (P_1 et P_7), conduit aux résultats suivants :

Profil 1 : + 0,56 - (- 0,59) = 1,15
Profil 7 : 1,55 - (- 0,98) = 2,53

Il fait donc apparaître le P_7 plus différencié que le P_1 ce qui est en accord avec les observations morphologiques. Il faut remarquer que les indices calculés sur les valeurs brutes sont en désaccord avec ces constatations, en effet :

Profil 1 : enrichissement absolu : 16,7 - 9,7 = 7 %
indice d'entraînement : 16,7 / 9,7 = 1,72

Profil 7 : enrichissement absolu : 20,1 - 13,1 = 7 %
indice d'entraînement : 20,1 / 13,1 = 1,53

Les variations d'argile propres à la différenciation pédologique semblent donc indépendantes des variations globales de texture. Aussi, on peut dire que les indices calculés à partir de l'axe de l'A. C. P., traduisent de façon satisfaisante ces remaniements. Toutefois ces indices sont délicats à comparer à ceux classiquement utilisés. Nous verrons plus loin comment résoudre en partie cette difficulté, pour l'instant nous nous bornerons à constater que les courbes correspondantes (fig. 49) sont toutes de type sigmoïde. Cette

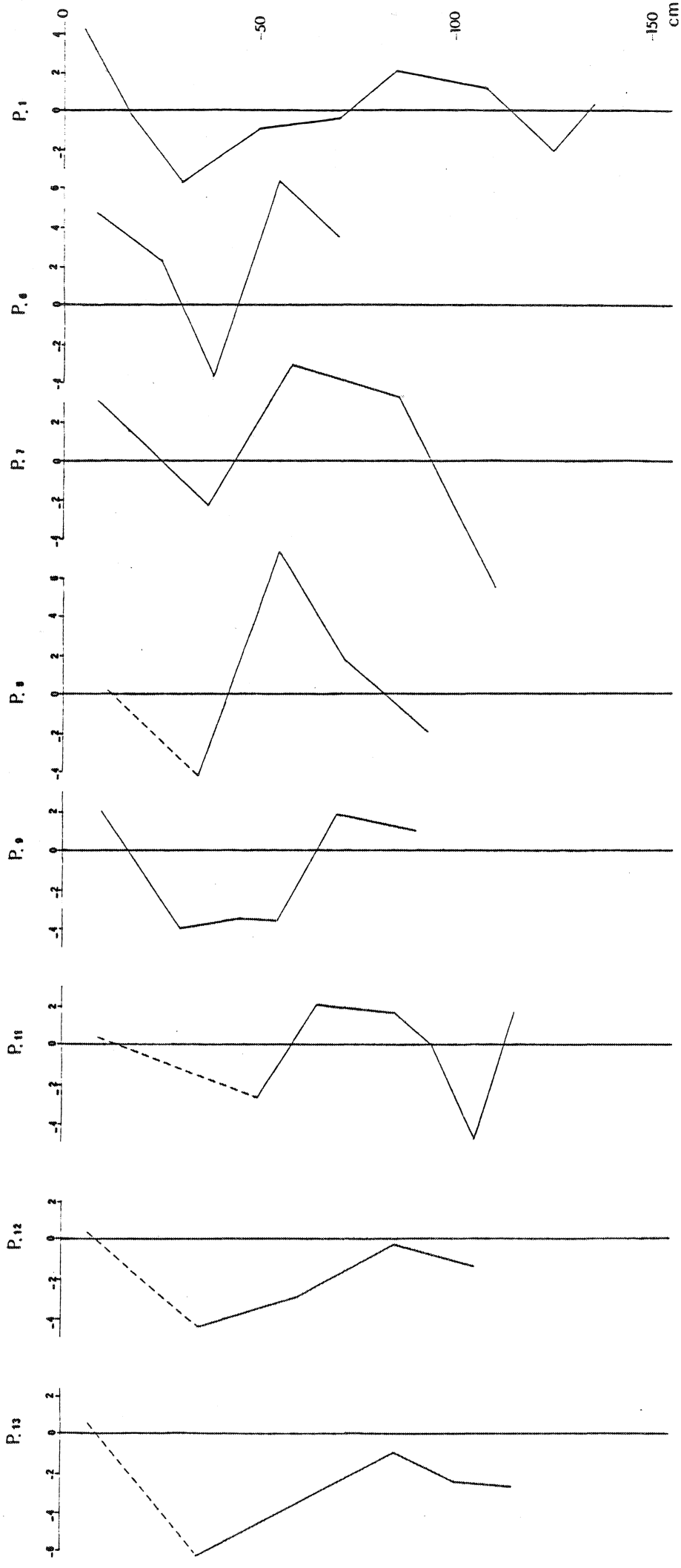


FIGURE 49: LE SOURN: POSITION DES ECHANTILLONS SUR L'AXE 2 (LESSIVAGE)

allure sigmoïde est caractéristique des sols soumis au lessivage (SOUCHIER 1971).

2) La partie aval :

Du profil 11 au profil 14 la position des échantillons apparaît plus difficilement interprétable .

Néanmoins, exception faite du P_{14}, le déficit en argile de l'horizon E croît globalement vers l'aval, ce qui doit correspondre à une accentuation du lessivage dans cette zone. Parallèlement l'excédent de l'horizon T décroît et, cet horizon devient même déficitaire en argile au niveau de P_{12} et P_{13}. L'interprétation la plus naturelle est d'associer cette évolution à la présence des langues de dégradation qui apparaissent au P. 11 et se développent ensuite vers l'aval.

Les interprétations seront développées après l'application du modèle de mélange.

I - 1. 1. 3. Conclusion

Deux axes majeurs apparaissent. Le premier traduit les variations globales de la texture, en opposant notamment les limons, et dans une faible mesure l'argile, aux sables.

Le second axe correspond aux variations de teneur en argile indépendamment des variations globales de texture.

I - 1. 2. Les données chimiques

Dix échantillons dont la teneur en limons est croissante servent de base à cette étude.

Dans un premier temps nous ferons une analyse globale des résultats. L'interprétation complète se fera à la lumière de ceux de la granulométrie.

Les pourcentages d'inertie des différents axes sont les suivants :

1er axe : 98,2%

2ème axe : 1,7%

3ème axe : 0,1%

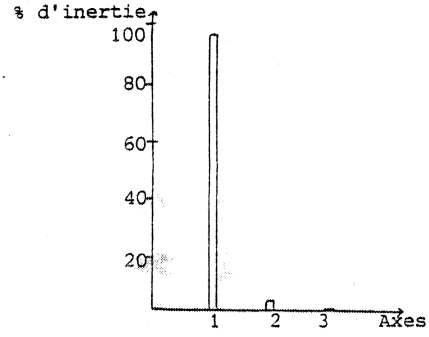


FIGURE 50

Pour les autres axes le pourcentage est inférieur à 0,1%. Il se dégage donc un axe très largement prépondérant qui explique 98,2% des variations des mesures. Entre les deux premiers axes 99,9% des variations sont expliquées.

I - 1. 2. 1 Le premier axe

Les corrélations des variables à cet axe sont les suivantes :

SiO_2	0.998
Al_2O_3	- 0.994
Fe_2O_3	- 0.436
MgO	- 0.275
Na_2O	- 0.908
K_2O	- 0.976
TiO_2	+ 0.937
P_2O_5	+ 0.738

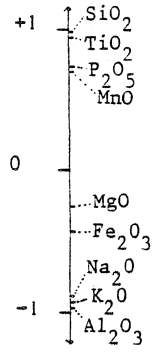


FIGURE 51

L'ensemble des variables présente une bonne corrélation à l'axe à l'exception de Fe_2O_3, MgO. Cet axe oppose les échantillons riches en SiO_2 et TiO_2, à ceux riches en Al_2O_3, K_2O et Na_2O.

I - 1. 2. 2. Le second axe

Les corrélations des variables à cet axe sont de :

SiO_2	- 0,053
Al_2O_3	- 0,103
Fe_2O_3	0,895
MnO	- 0,191
MgO	0,908
Na_2O	- 0,254
K_2O	- 0,146
TiO_2	- 0,330
P_2O_5	- 0,496

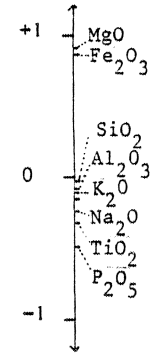


FIGURE 52

Deux variables présentent une bonne corrélation à l'axe : MgO et Fe_2O_3. Cet axe classe donc les individus en fonction de leur teneur en MgO et Fe_2O_3 indépendamment des variations prises en compte par le premier axe.

I - 1. 3. Synthèse des données granulométriques et chimiques

Dans les analyses granulométriques, comme dans les analyses chimiques, l'analyse en composantes principales fait apparaître un axe prépondérant, qui explique les variations de la plupart des variables, et, un second qui traduit les variations de l'argile pour la granulométrie, de MgO et Fe_2O_3 pour la chimie.

A ce point de l'étude il n'est pas absolument certain que ces deux couples d' axes ont la même signification

Pour résoudre cette question deux voies sont possibles :

- Comparer les positions des échantillons communs aux deux analyses sur les axes de même rang. Ceci peut se faire par l'intermédiaire d'une représentation graphique croisant les axes factoriels, complétés par le calcul de coefficient de corrélation.

- Traiter par une seule analyse en composantes principales l'ensemble des variables granulométriques et chimiques.

I - 1. 3. 1. Les corrélations entre les axes issus des analyses chimiques et granulométriques

Les représentations graphiques (fig. 53 a et b) croisant les axes de même rang des données chimiques et granulométriques montrent qu'ils se correspondent. Toutefois, les échantillons 21 S_4 pour les axes 1 et 21 S_2 pour les axes 2 font exception. Or, l'échantillon 21 S_4 est le prélèvement le plus argileux pris en compte et l'échantillon 21 S_2 provient d'un horizon éluvié enrichi en matière organique (CURMI, thèse en cours). Cette richesse en matière organique explique, vraisemblablement, que le lessivage n'apparaisse pas au niveau des données granulométriques. Les coefficients de corrélation valent respectivement 0,94 et 0,90 (en excluant des calculs les échantillons 21 S_2 et 21 S_4). Ils confirment que les données chimiques et granulométriques sont reliées par un facteur naturel.

Une identification de ce facteur peut être fourni par une analyse portant sur les deux ensembles de données.

I - 1. 3. 2. L'analyse en composantes principales des données chimiques et granulométriques

Les résultats bruts de l'analyse en composantes principales qui porte sur les données granulométriques et chimiques des dix échantillons sont les suivants :

Pourcentage d'inertie des axes :

1er axe : 79,2%

2ème axe : 13,1%

3ème axe : 4,9%

4ème axe : 1,4%

5ème axe : 1,0%

6ème axe et suivants $\leq$ 0,3%

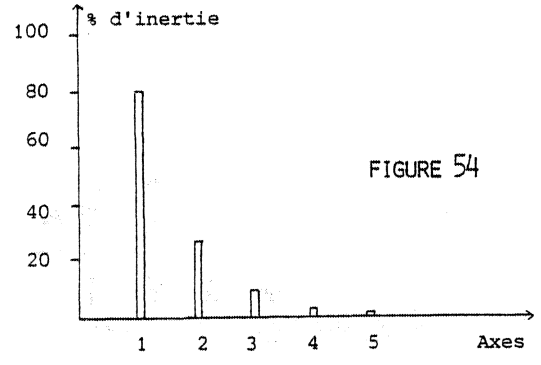


FIGURE 54

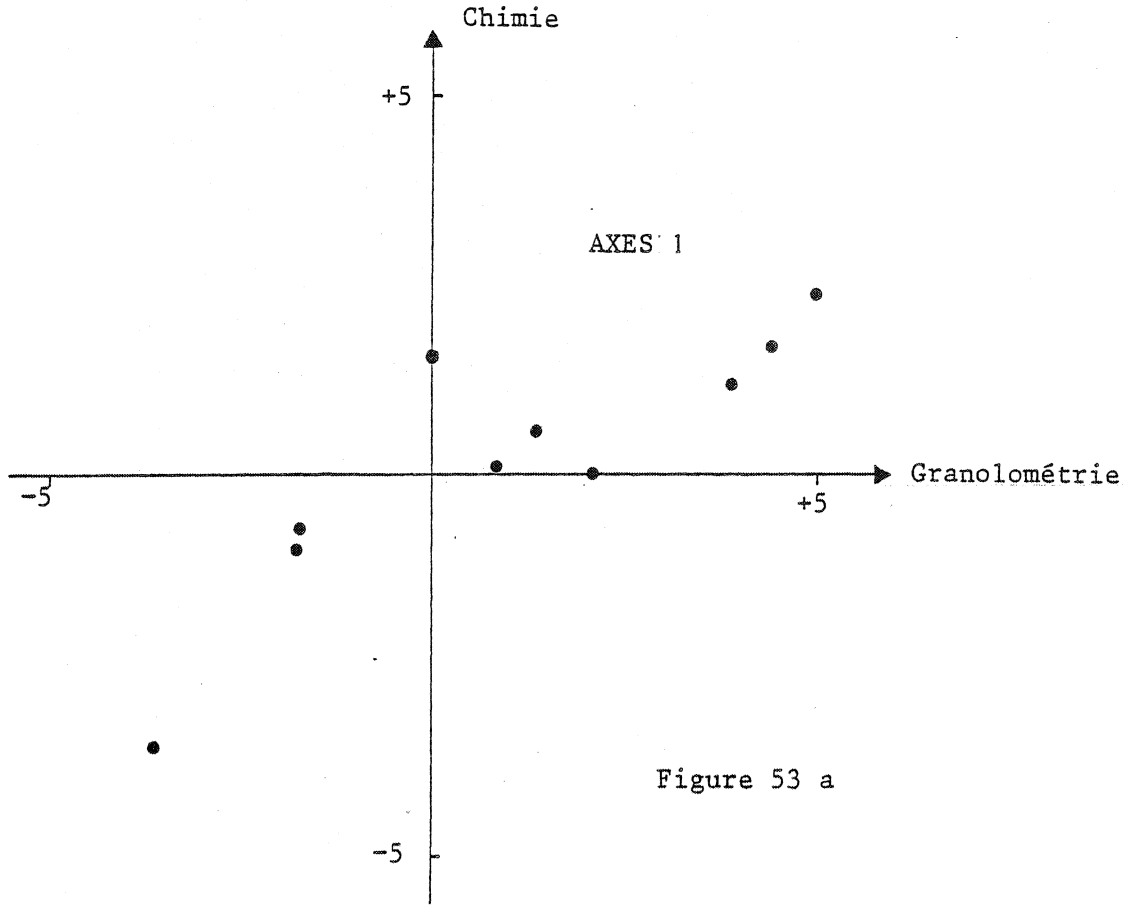


Figure 53 a

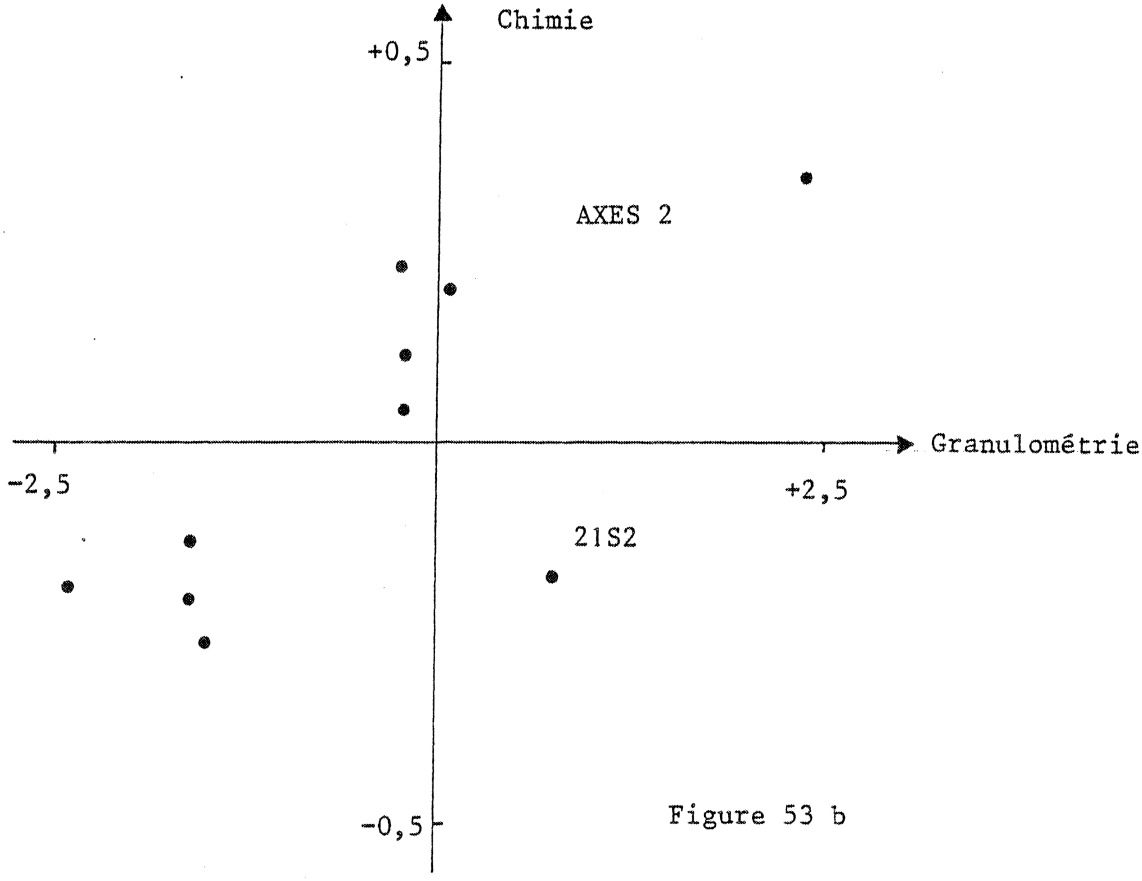


Figure 53 b

FIGURE 53 a et b: CORRÉLATION DES AXES DE MÊME RANG

Il se dégage donc un axe prépondérant dont le pourcentage d'inertie est de 79,2% et un deuxième axe qui explique 13,1% des variations des mesures .

Au premier axe se corrèle la majorité des variables à l'exception de l'argile, de MgO et de Fe_2O_3. Ces trois variables se corrèlent bien au second axe.

I - 1. 4. Conclusion

L'ensemble des analyses en composantes principales permet de dégager deux axes :

- le premier axe explique 80 à 90% des variations des mesures. La plupart des variables s'y corrèlent bien. La position des échantillons sur cet axe est indépendante de la nature des horizons pédologiques.

- le second explique 10% environ des variations des mesures. Les éléments les plus sensibles au lessivage, l'argile, Fe_2O_3 et MgO, se corrèlent bien à cet axe. La position des individus sur l'axe est déterminée par la nature des horizons pédologiques,et en particulier par l'intensité du lessivage.

- Il existe donc deux facteurs naturels qui induisent 90% des variations des mesures :

- l'un de ces facteurs, qui se traduit au niveau du second axe, apparaît correspondre aux différenciations pédologiques observables actuellement, notamment à celles liées aux redistributions de l'argile, de Fe_2O_3 et de MgO (lessivage et lixiviation).

- l'autre facteur (premier axe) par contre, ne correspond pas aux différenciations pédologiques observables. Il semble devoir s'interpréter en terme de mélange. Les compositions des deux constituants de ce mélange ont été estimées selon la méthode présentée dans la partie théorique : les résultats de l'A. C. P. sont utilisés en entrée dans le programme mélange.

I - 2. L'estimation des deux composants du mélange

I - 2. 1. Les données des 66 analyses granulométriques

Les estimations les plus compatibles avec l'ensemble des données granulométriques sont les suivantes :

Matériel 1 : M_1		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M1a borne du nuage	% bruts	16.4	31.4	43.6	3.9	0.85	1.1	1.4	1.2
	% cumulés		(47.8)	(91.4)	(95.3)	(96.1)	(97.2)	(98.6)	(99.8)
M1b annulation d'une composante	% bruts	16.8	32.4	46.2	3.6	0.3	0	0.4	0.2
	% cumulés		(49.2)	(95.4)	(99.0)	(99.3)	(99.3)	(99.7)	(99.9)

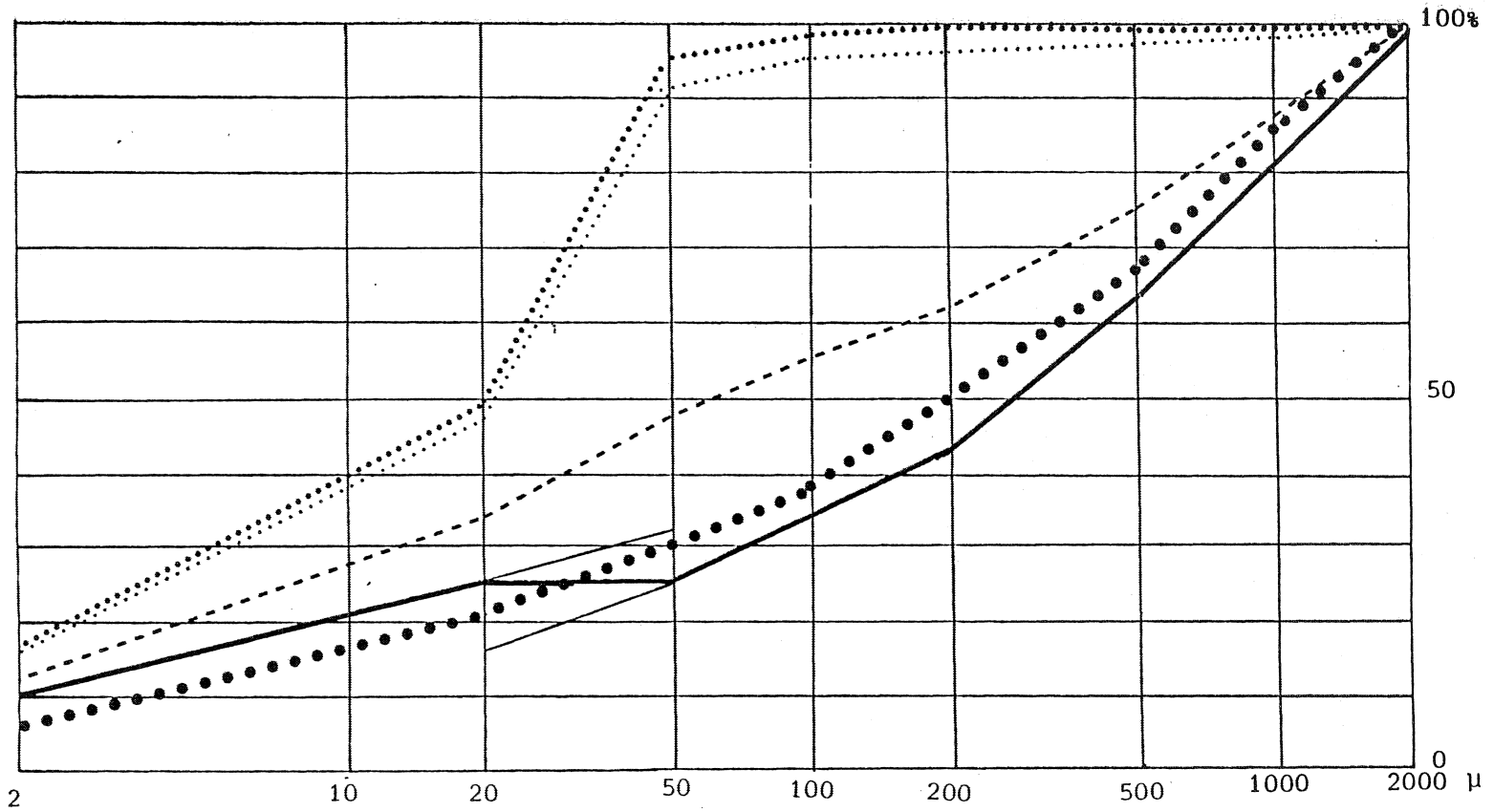


FIGURE 55: LE SOURN: COURBES GRANULOMETRIQUES CUMULATIVES DES DIFFERENTS MATERIAUX

Matériel 2 : M_2		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M2a borne du nuage	% bruts	12.5	20.8	15.2	7.3	6.4	13.3	12.6	11.9
	% cumulés		(33.3)	(48.5)	(55.8)	(62.2)	(75.5)	(88.1)	(100)
M2b annulation d'une composante	% bruts	10.3	15.0	0	9.0	9.3	19.8	18.6	17.6
	% cumulés		(25.3)	(25.3)	(34.3)	(43.6)	(63.4)	(82.0)	(99.6)

Discussion :

Il faut tout d'abord rappeler que ces estimations sont ponctuelles ; c'est-à-dire que l'incertitude sur l'axe n'est pas prise en considération.

Les écarts entre les deux estimations ponctuelles de M_1 sont relativement faibles. La composante qui s'annule est S_3 mais, S_2, S_4, S_5 sont alors également voisins de zéro. Il n'y a donc aucune raison de rejeter l'hypothèse selon laquelle ce matériel 1 ne renferme pas de fraction supérieure à 100 µ. Ceci sera précisé lors de la synthèse de l'ensemble des résultats.

Les écarts entre les deux estimations ponctuelles de M_2 sont assez élevés. Les courbes granulométriques cumulatives, qui correspondent à ces deux estimations ont un aspect concave, comparable à celui des courbes de l'arène sous-jacente (fig. 55). La composition moyenne de celle-ci est d'ailleurs voisine de celle des estimations de M_2 :

		A.	L.F.	L.G.	S.1	S.2	S.3	S.4	S.5
Arene moyenne	% brut	6.1	13.5	9.3	7.3	8.5	18.9	17.7	18.5
	% cumulé		(19.6)	(28.9)	(36.2)	(44.7)	(63.6)	(81.3)	(99.8)

Or, :

1°) Il est peu probable que l'arène en s'altérant donne un matériel qui ne contient pas de limon grossier (cas de M_2b).

2°) Il semble également peu vraisemblable qu'un matériel qui renferme des sables de classe I et des limons fins ne contienne pas de limon grossier. Une construction par lissage de la courbe M_2b indique entre 10 et 14% de limon grossier.

3°) Enfin, lors du dépouillement préliminaire (p.103) on observe que les échantillons qui contiennent plus de 14% de S_4 ne sont pas issus du mélange de deux matériaux (ceux dont la teneur en S_4 est comprise entre 12 et 14% ont un comportement mixte).

Il est donc justifié d'émettre une hypothèse sur la composition de M_2. Comme ce matériel apparaît proche des arènes elle va être proposée par référence à celles-ci.

La teneur moyenne en limon grossier des échantillons d'arène directement situés

sous le sol est de 12,64%. Dans la suite de calculs je considérerai que ces arènes ne peuvent fournir moins de 12% de limon grossier. La composition de M_2 qui en résulte est :

		A.	L.F.	L.G.	S.1	S.2	S.3	S.4	S.5
M_{2C}	hypothèse % brut	12	19.6	12.0	7.7	7.0	14.7	13.9	13.1
	sur L.G. % cumulé		(31.6)	(43.6)	(51.3)	(58.3)	(73.0)	(86.9)	(100)

Notons que la teneur en S_4 (13,9%) se situe à l'intérieur de la fourchette définie lors du dépouillement préliminaire (12-14%).

Les deux composants du mélange étant estimés il devient possible de donner leur proportion relative pour chaque échantillon. Cette proportion correspond à leur positon sur l'axe 1. La teneur maximum en M_2 est comprise entre 89 et 100% (échantillon 1510), la teneur maximum en M_1 entre 92 et 100% (échantillon 243). L'amplitude de la fourchette obtenue est donc relativement faible.

Les résultats pour le profil 1 sont présentés dans le tableau suivant. Les résultats complets sont donnés en annexe.

IDENTIFICATION de l'échantillon	COMPOSITION	ARGILE	LIMON FIN	LIMON GROSSIER	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	POURCENTAGE de M_2 Maximum	Minimum
121	réelle	18,1	22,7	24,5	7,5	4,1	8,3	8,6	6,5		
	estimée	13,9	24,5	25,3	6,1	4,4	9,0	8,6	8,1	67	57
122	réelle	13,9	28,8	26,1	5,9	4,1	7,6	7,5	6,1		
	estimée	14,2	25,4	27,8	5,7	3,9	7,9	7,6	7,1	59	49
123	réelle	9,7	23,7	22,8	7,9	5,4	11,3	10,5	8,7		
	estimée	13,4	23,3	21,9	6,5	5,1	10,4	10,0	9,4	78	69
124	réelle	13	26,8	24,4	5,7	4,2	7,8	9,7	8,4		
	estimée	13,9	24,5	25,2	6,1	4,4	9,0	8,7	8,1	68	58
125	réelle	13,6	27,2	25,2	6,4	3,8	7,2	8,0	8,6		
	estimée	14,0	24,9	26,3	5,9	4,2	8,5	8,2	7,7	64	55
126	réelle	16,5	27,6	27,0	6,1	3,6	7,0	6,9	5,3		
	estimée	14,4	25,9	28,8	5,6	3,7	7,5	7,2	6,7	56	48
127	réelle	15,3	26,6	27,0	6,2	3,5	6,8	7,2	7,4		
	estimée	14,2	25,6	28,0	5,7	3,9	7,8	7,6	7,1	59	49
128	réelle	12,4	27,9	27,5	5,7	3,5	6,0	6,9	6,1		
	estimée	14,4	25,9	28,9	5,6	3,7	7,4	7,2	6,7	56	46
129	réelle	12,8	19,8	16,6	6,3	5,3	9,8	12,4	17,0		
	estimée	12,5	21,0	15,8	7,2	6,2	13,0	12,4	11,7	98	87

I - 2. 2. Les données chimiques

I - 2. 2. 1. Les données des analyses chimiques

Dix échantillons prélevés au vu des résultats granulométriques ont fait l'objet d'analyses chimiques. Ces résultats pondérés pour que leur somme boucle à 100 % ont été traités par ACP et le programme mélange. Les estimations des pôles du mélange sont les suivantes :

Matériel 1 : M 1

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
M 1 a borne du nuage	81.1	10.5	3.1	0.06	0.56	1.18	2.28	0.86	0.06	0.24
M 1 b annulation d'une composante	88	5.1	2.6	0.07	0.49	0.83	1.3	1.0	0	0.25

Matériel 2 : M 2

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
M 2 a borne du nuage	66.2	21.7	4.0	0.4	0.72	1.9	4.4	0.57	0.20	0.22
M 2 b annulation d'une composante	40.9	40.7	5.6	0	0.98	3.1	7.9	0.08	0.42	0.20

Pour diminuer les fourchettes sur les estimations des deux pôles du mélange, on pourrait envisager, comme pour la granulométrie, de fixer une contrainte supplémentaire. Il semble plus simple de traiter simultanément les données granulométriques et chimiques des 10 échantillons qui ont fait l'objet d'analyses chimiques totales.

I - 2. 2. 2. Les données chimiques associées aux données granulométriques

a) Résultats

Les estimations des pôles du mélange, établies à partir des données communes aux analyses chimiques et granulométriques, sont les suivantes :

Matériel 1 : M 1

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	SiO_2	AlO_2	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
M1a borne du nuage	14.4	29.8	41.9	3.8	1.3	3.0	2.4	3.1	80.6	10.8	3.3	0.06	0.60	1.2	2.3	0.86	0.06	0.24
M1b annulation d'une composante	14.9	31.5	48.7	3.0	0.2	0.58	0	1.0	84.1	8.0	3.2	0.7	0.60	1.0	1.8	0.94	0.02	0.24

Matériel 2 : M 2

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
M2a borne du nuage	12.4	24.3	19.5	6.6	5.1	11.2	10.6	10.2	68.7	20	3.7	0.04	0.65	1.8	4.0	0.6	0.18	0.22
M2b annulation d'une composante	10.8	19.3	0	9	8.5	18.2	17.7	16.2	58.4	28.0	4.0	0.03	0.7	2.3	5.6	0.38	0.29	0.21
M2c hypothèse sur LG	11.8	22.4	12.0	7.5	6.5	13.9	13.3	12.5	64.7	23.1	3.8	0.04	0.65	2.0	4.6	0.52	0.23	0.22

On peut constater que, par rapport aux estimations établies à partir des seules analyses chimiques, les fourchettes sont considérablement réduites.

b) Vérification de la stabilité des estimations granulométriques

Les prélèvements les plus sableux et les plus limoneux n'ont pas subi d'analyses chimiques; sont donc comparables entre elles les estimations M1b pour le matériel M1 et M2c pour le matériel M2.

Dans le cas de M1, l'écart maximum entre les estimations concerne la variable LG; il est de 2,5 % en valeur absolue et de 5 % en valeur relative. L'écart minimum en valeur absolue est obtenu sur la variable S1 et est de 0,1 %. Pour M2, l'écart maximum entre les estimations est obtenu sur LF; il vaut 2,2 % en valeur absolue, soit 10 % en valeur relative.

c) Conclusion

Les estimations établies à partir de 10 et de 66 données granulométriques sont très voisines. L'axe 1 est donc stable, ce qui permet de s'appuyer sur les données granulométriques pour améliorer les estimations concernant la chimie. D'autre part, la variable S3 s'annule dans l'estimation M1b qui porte sur 66 données, alors que, dans l'autre estimation, c'est S4 qui s'annule. Ceci confirme l'interprétation précédemment avancée, à savoir l'absence de particules supérieures à 100 µ dans le matériel M1.

Comparons maintenant les compositions de M1b et M2c qui représentent les valeurs extrêmes pour les deux constituants du mélange, à celle de l'arène.

I - 3. Relations entre les deux composants du mélange et l'arène

Une composition moyenne d'arène a été déterminée à partir des analyses effectuées sur les échantillons prélevés à moins de 250 cm de profondeur. Comme pour l'étude par A.C.P., les compositions chimiques des sols ont dû être ramenées à 100 %, celle de l'arène moyenne a été corrigée de la même façon.

I - 3. 1. Comparaison des compositions de M2c et de l'arène

I - 3. 1. 1. La granulométrie

La courbe cumulative de M2c est proche de celle de l'arène et est décalée vers le haut (fig. 55). Ceci traduit un enrichissement en éléments fins et un appauvrissement en éléments grossiers. En effet, par rapport à l'arène M2c renferme :

A	:	+ 5,7 %	S2	:	- 2,0 %
LF	:	+ 8,9 %	S3	:	- 2,5 %
LG	:	+ 2,7 %	S4	:	- 4,4 %
S1	:	+ 0,2 %	S5	:	- 6,0 %

Du point de vue granulométrique, M2c apparait comme pouvant être dérivé de l'arène et plus altéré que celle-ci .

I - 3. 1. 2. La chimie

a) Résultat

Les compositions chimiques de l'arène moyenne et de M2c sont voisines (Tableau VII). La solubilité des éléments qu'il faut envisager pour passer de l'arène à M2c par altération a été calculée selon la formule :

$$\text{solubilité d'un élément} = \frac{\text{sa teneur dans l'arène} - \text{sa teneur dans M2c}}{\text{sa teneur dans l'arène}}$$

L'ordre de solubilité qu'il faut envisager dans l'hypothèse d'une altération in situ (Tableau VII) est représenté par la figure 56 :

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
arène moyenne	6.1	13.5	9.3	7.3	8.5	18.9	17.7	18.5	66.5	22.1	2.36	0.02	0.50	2.9	4.8	0.41	0.16	0.29
M1b	14.9	31.5	48.7	3.0	0.2	0.6	0	1	84.1	8.0	3.2	0.07	0.60	1.0	1.8	0.94	0.02	0.24
M2c	11.8	22.4	12.0	7.5	6.5	13.9	13.3	12.5	64.7	23.1	3.8	0.04	0.66	2.0	4.6	0.52	0.23	0.22
arène M2c solubilité = arène - M2c / arène									-2.7	-4.5	-61	/	-32	31	4.2	-26	44	24
arène M1b solubilité = arène - M1b / arène									-26.5	63.8	-35.6	/	-20	65.5	62.5	-129	-87	17

Tableau VII : Le Sourn : Comparaison de la composition des arènes moyennes et de celle des 2 constituants initiaux du mélange.
Solubilité des divers éléments dans l'hypothèse d'une altération in situ

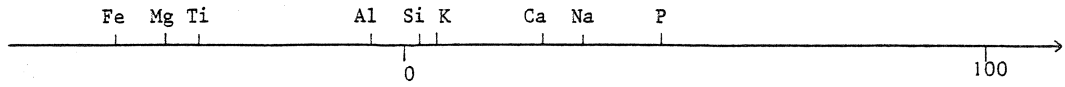


FIGURE 56: SOLUBILITÉ RELATIVE DES ÉLÉMENTS DANS L'HYPOTHÈSE D'UNE ALTÉRATION IN SITU : ARÈNE ---> M2c

b) Discussion

Mg et Fe varient de façon importante dans les arènes et sont peu dépendants du premier axe de l'A.C.P.; leur estimation peut donc être biaisée; ils ne seront pas pris en considération. Si l'on excepte ces deux éléments, les ordres de solubilité sont :

- dans une présentation inspirée des travaux de DEJOU (1958) et TARDY (1969) :
  Si > Al ; Na > K

- dans une présentation inspirée des travaux de SEDDOH (1973) :
  Na > Ca > K > Si > Al

Or, les ordres de départ qui ont été présentés par les premiers sont :
Si > Al > Fe ; Na > K ; Ca > Mg
et ceux proposés par SEDDOH (1973, p. 214) :
Ca , Na > Fe^{2+} > Mg > Si > Fe^{3+} > K > Al pour les roches granitiques faiblement micacées;
Ca , Na > Fe^{2+} > Mg > K > Si > Fe^{3+} > Al pour les roches riches en micas trioctaédriques.

Pour ces éléments, l'ordre de départ supposé pour passer de l'arène à M2c est donc comparable à celui donné par ces auteurs. Il est donc possible d'établir, pour les éléments considérés, le bilan des exportations. Le bilan effectué à Al_2O_3 constant indique une exportation, pour une masse initiale de 100 g d'arène,de :

4.6 g de SiO_2	0.4 g de K_2O
1 g de Na_2O	0.08 g de CaO

c) Comparaison avec d'autres bilans

Afin d'apprécier la signification de ce bilan, il m'apparait indispensable de le comparer à d'autres qui ont pu être présentés par ailleurs.

- Dans le bassin d'Alrance (Massif Central), TARDY (1969) a déterminé les masses perdues par volume de roche, soit (p. 144) :

95.5 g de SiO_2 pour 100 cc de roche ; 7.40 g de K_2O pour 100 cc de roche
7.24 g de Na_2O pour 100 cc de roche ; 3.46 g de CaO pour 100 cc de roche

Pour les rapprocher de celles évacuées au Sourn, il est nécessaire d'émettre une hypothèse

sur la densité du granite; je considèrerai une densité de 2,7. Les exportations dans le bassin d'Alrance auraient donc été pour 100 g de roche au départ, de :

3.82 g pour SiO_2 0,30 g pour K_2O

0.29 g pour Na_2O 0.14 g pour CaO

- Dans les massifs des Vosges et de la Margeride, les exportations varieraient, selon BOURRIE (1976, p. 169) :

de 2211 à 4410 kg/km^2/an pour SiO_2 ; 42 à 226 kg/km^2/an pour K_2O

de 298 à 899 kg/km^2/an pour Na_2O ; 247 à 1682 kg/km^2/an pour CaO

Ces exportations sont exprimées en masse par unité de bassin versant et par an. Il convient donc, pour les comparer à celles déterminées au Sourn, d'émettre deux hypothèses sur les données du Sourn : l'une sur l'age du mélange et l'autre sur l'épaisseur moyenne du sol. La dernière venue limoneuse est habituellement datée de 15000 ans (MONNIER, 1973 ; PLIHON, 1974); c'est ce chiffre qui sera retenu dans les calculs. L'épaisseur du sol a été considérée comme variant de 50 cm à 1 m, sa densité étant égale à 1,6. Sous ces hypothèses, les exportations du Sourn seraient comprises entre :

2450 et 4900 kg/km^2/an pour SiO_2 ; 210 et 420 kg/km^2/an pour K_2O

500 et 1000 kg/km^2/an pour Na_2O ; 42 et 85 kg/km^2/an pour CaO

Dans les trois cas, les exportations sont du même ordre de grandeur. Les arènes du Sourn, peu calciques, conduisent à de faibles exportations de cet élément.

d) Conclusion

L'ordre de départ des éléments qu'il faut envisager dans le cas d'une altération in situ arène M2c est comparable à ceux généralement admis. Par conséquent, de même que l'étude granulométrique permet de montrer que M2c provient de l'arène par un affinement, l'étude chimique met en évidence que M2c peut être considéré comme dérivant de l'arène par une altération plus poussée.

I - 3. 2. Comparaison de M1b et de l'arène (Tableau VII)

M1b a un excellent granoclassement et sa courbe cumulative est d'allure sigmoïde (fig. 55). Ceci parait caractéristique d'un matériel transporté. On peut néanmoins supposer qu'il dérive des arènes. Dans cette hypothèse, la solubilité des éléments qu'il faut envisager est (Tableau VII, fig. 57) :

Na $\gg$ Al $\gg$ K $\gg$ Ca $>$ Mg $>$ Si $>$ Fe $\gg$ Ti

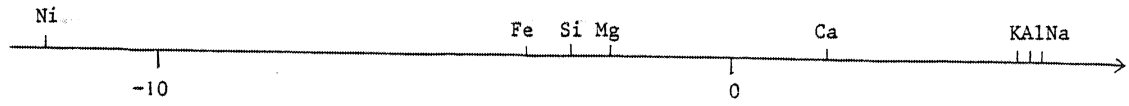


FIGURE 57: SOLUBILITÉ RELATIVE DES ÉLÉMENTS DANS L'HYPOTHÈSE D'UNE ALTÉRATION IN SITU : ARÈNE ⟶ M1b

Notamment, il faut concevoir une très grande solubilité pour l'aluminium; ceci est en contradiction avec les connaissances sur l'altération. Mlb ne peut donc dériver de l'arène sous-jacente et doit être considéré comme un matériel d'apport.

I - 3. 3. Conclusion

L'étude et la comparaison des compositions granulométriques et chimiques des arènes et des deux constituants des sols mettent en évidence que l'un d'eux dérive des arènes par altération, tandis que l'autre ne présente aucun lien de parenté avec le substrat et doit s'interpréter comme un apport.

I - 4. Les différenciations pédogénétiques

I - 4. 1. Les données granulométriques

I - 4. 1. 1. Introduction

La plupart des indices d'entrainement mettent en rapport la teneur de l'horizon d'accumulation et celle de l'horizon lessivé d'un profil. Ce calcul suppose implicitement que les teneurs initiales des deux horizons étaient identiques. Or, dans la séquence du Sourn (comme dans les autres), le fait qu'il y ait mélange interdit une telle supposition.

Le modèle de mélange permet, dans ce cas, d'isoler les variations d'argile propres à la pédogenèse. Nous avons vu en effet (I - 1. 1. 2., p. 133) que l'axe 2 de l'A.C.P. est représentatif, pour l'essentiel, des variations d'argile et, plus précisément, des variations qui sont indépendantes, au sens mathématique, du mélange (axe 1). Nous pouvons donc admettre que la différence entre la teneur réelle en argile d'un échantillon et sa teneur estimée correspond, principalement, au lessivage.

Pour illustrerceci, comparons entre eux :

1 - les indices d'entrainement de l'argile calculés habituellement, c'est-à-dire le simple rapport entre la teneur en argile de l'horizon XT sur celle de l'horizon E.

2 - les indices déterminés en tenant compte des variations initiales d'argile dans le profil et en "reconstituant" un profil initial homogène.

3 - les indices fondés sur les départs observés dans les horizons E, sans tenir compte de l'accumulation dans les horizons XT.

I - 4. 1. 2. Principes de calcul

Appelons :

A_I : le taux d'argile initial d'un horizon avant le lessivage; il correspond, ici, au taux estimé pour le modèle.

A_{Ie} : taux d'argile initial d'un horizon lessivé

A_{It} : taux d'argile initial d'un horizon d'accumulation

A_M : la quantité d'argile migrée; elle correspond à la différence entre le taux d'argile réel et le taux estimé. Dans le cas d'une accumulation, A_M est positif, dans le cas inverse, il est négatif.

A_{Me} : argile qui a migré d'un horizon E

A_{Mt} : argile qui s'est accumulée dans un horizon T

A_T : la teneur réelle d'un horizon d'accumulation

A_E : la teneur réelle d'un horizon éluvié

On peut écrire :

$$A_T = A_{It} + A_{Mt} \qquad \text{et} \qquad A_E = A_{Ie} - A_{Me}$$

a) L'emploi de l'indice d'entrainement est justifié si $A_{It} = A_{Ie}$; l'enrichissement absolu est alors :

$A_T - A_E = 2\ A_M$ d'où $A_M = \frac{A_T - A_E}{2}$; l'indice d'entrainement est

$$\frac{A_T}{A_E} = \frac{A_I + A_M}{A_I - A_M}$$

b) Lorsque dans un profil, A_I n'est pas constant, il apparait logique de se ramener à un A_I moyen; appelons-le $A_{I\mu}$. $A_{I\mu} = \frac{A_{It} + A_{Ie}}{2}$. L'enrichissement absolu est : $A_{Mt} - A_{Me}$, soit $2\ A_M$. L'indice d'entrainement est alors : $\frac{A_{I\mu} + A_M}{A_{I\mu} - A_M}$. Un tel profil où le taux d'argile initial a été corrigé sera appelé "profil corrigé".

c) De plus, il semble souhaitable de pouvoir distinguer le lessivage proprement dit de l'accumulation; ceci conduit à ne prendre en compte que l'horizon E. Il faut donc construire un profil théorique correspondant au lessivage observé dans cet horizon E. Dans ce but, considérons que toute l'argile qui a migré de l'horizon E s'est accumulée dans l'horizon T; l'enrichissement absolu est alors : $2\ A_{Me}$ et l'indice d'entrainement est :

$$\frac{A_{Ie} + A_{Me}}{A_{Ie} - A_{Me}} \qquad \text{soit} \qquad \frac{A_{Ie} + A_{Me}}{A_E}$$

I - 4. 1. 3. Les résultats

Ces différents calculs ont été effectués pour tous les profils (Tableau VIII)

a) Les résultats sur les valeurs brutes et sur les profils corrigés sont assez voisins. Ceci est lié aux faibles différences de teneurs en argile des deux composants

PROFILS	1	2	3	5	6	7	8	9	11	12	13
A_E	9,7	10	12,3	14	11,2	13,1	11,3	12,3	13,1	11,4	9,8
A_{Ie}	13,4	13,9	13,6	15,2	14,9	15,3	15,4	16,3	15,8	16	16,0
A_{Me}	- 3,7	- 3,9	- 1,3	- 1,2	- 3,7	- 2,2	- 4,1	- 4	- 2,7	- 4,6	- 6,2
A_T	16,5	15,2	12,7	19,1	21,4	20,1	21,7	17,8	17,5	15,3	14,8
A_{It}	14,4	13,9	13,3	14,9	15,1	15,3	14,4	16	15,5	15,6	15,8
A_{Mt}	2,1	1,3	- 0,6	4,2	6,3	4,8	7,3	1,8	+ 2,5	- 0,3	- 1
$A_{I\mu}$	13,9	13,9	13,45	15,05	15	15,3	14,9	16,15	15,65	15,8	15,9
$A_T - A_E$	6,8	5,2	0,4	5,1	10,2	7	10,4	5,5	4,4	3,9	5
A_T / A_E	1,70	1,52	1,0	1,36	1,91	1,53	1,92	1,45	1,33	1,34	1,51
$A_{Mt} - A_{Me}$	5,8	5,2	0,7	5,4	10	7	11,4	5,8	5,2	4,3	6,1
$\frac{A_{I\mu} + A_{M\mu}}{A_{I\mu} - A_{M\mu}}$	1,53	1,46	1,05	1,44	2	1,60	2,24	1,44	1,47	1,31	1,47
$\frac{2\lvert A_{Me}\rvert}{A_{Ie} + \lvert A_{Me}\rvert}$	7,4 / 1,76	7,8 / 1,78	2,6 / 1,21	2,4 / 1,17	7,4 / 1,99	4,4 / 1,33	8,2 / 1,72	8 / 1,65	5,4 / 1,41	9,2 / 1,81	12,4 / 2,26

TABLEAU VIII : LE SOURN : CALCULS DES INDICES D'ENTRAÎNEMENT DE L'ARGILE

(À PARTIR DES ÉCHANTILLONS LES PLUS ET LES MOINS ARGILEUX).

du mélange. Néanmoins, dans les profils où le taux d'argile initial dans l'horizon d'accumulation est plus élevé que dans l'horizon lessivé, l'indice d'entrainement diminue (P.1), alors qu'il augmente dans les profils qui présentent le cas inverse (P.6,12,13)

b) Les calculs qui prennent en compte uniquement l'horizon lessivé conduisent, dans la partie aval de la séquence, à des résultats sensiblement différents. Dans cette zone, en effet, les indices d'entrainement augmentent et celui du P.13 vaut 2,27 pour un enrichissement absolu de 12,4 %. Ces résultats semblent en accord avec les observations morphologiques qui montrent un éclaircissement et une tendance à la structure massive de l'horizon éluvié vers l'aval. Or, ces derniers calculs se différencient des précédents par le fait qu'ils traduisent le lessivage indépendamment de l'accumulation.

I - 4. 1. 4. Conclusion

Ces résultats, qui complètent ceux présentés au § I-1.1.2, montrent que :

- dans les horizons E, l'appauvrissement en argile croît régulièrement de l'amont vers l'aval.
- dans les horizons T, il apparait un enrichissement séquentiel en argile dans la zone amont, alors que, dans la zone aval, cet enrichissement diminue parallèlement au développement des taches et langues d'oxydo-réduction (ceci explique que les indices qui comparent les horizons T aux horizons E sous-estiment le lessivage proprement dit).

I - 4. 2. Les données chimiques

I - 4. 2. 1. Présentation

Les axes 2 des A. C. P. des données chimiques et granulométriques se corrèlent entre eux (p.140). Les variations chimiques indépendantes du mélange doivent donc représenter les remaniements pédogénétiques et, plus particulièrement, ceux liés à la différenciation des horizons éluviés et illuviés. Or, les variations indépendantes du mélange correspondent aux écarts qui existent entre la teneur réelle de chaque échantillon et sa teneur estimée par le modèle. L'étude de ces écarts va permettre de préciser les principales modifications attribuables à la pédogénèse.

Les 10 échantillons retenus pour les analyses chimiques ont été choisis en fonction de leur granulométrie. Du point de vue pédologique les prélèvements sont dispersés et, en particulier, aucun profil vertical n'a été systématiquement analysé . Les résultats doivent donc être considérés comme complémentaires de ceux de la granulométrie, c'est pourquoi la zone amont sera distinguée de la zone aval.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O
	1S2 (P2 - ALE)					
Composition réelle CR	73.27	17.11	2.99	0.45	1.56	3.47
Composition estimée CI	72.14	17.35	3.57	0.64	1.63	3.56
C = CR - CI	1.13	-0.24	-0.58	-0.19	-0.07	-0.01

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K2O
	1S3 (P2 - ALE)					
Composition réelle CR	72.76	17.33	3.17	0.58	1.53	3.50
Composition estimée CI	72.00	17.46	3.57	0.64	1.63	3.58
C = CR - CI	0.76	-0.13	-0.40	-0.06	-0.10	-0.06

	1S8 (P2 - XT)					
Composition réelle CR	66.53	21.21	4.27	0.75	1.90	4.26
Composition estimée CI	68.72	20.01	3.68	0.65	1.81	4.07
C = CR - CI	-2.19	1.20	0.59	0.10	0.09	0.19

	21S2 (P6 - ALE)					
Composition réelle CR	75.4	15.0	2.98	0.47	1.63	3.30
Composition estimée CI	73.5	16.3	3.52	0.63	1.55	3.35
C = CR - CI	1.9	-1.9	-0.54	-0.16	0.08	-0.05

	21S3 (P6 - ALE)					
Composition réelle CR	76.92	14.00	3.10	0.52	1.45	2.82
Composition estimée CI	75.91	14.42	3.45	0.63	1.43	3.00
C = CR - CI	1.01	-0.42	-0.35	-0.11	0.02	-0.18

	21S4 (P2 - XT)					
Composition réelle CR	74.49	14.85	4.40	0.80	1.40	2.90
Composition estimée CI	76.02	14.33	3.45	0.63	1.42	2.98
C = CR - CI	-1.53	0.52	0.95	0.17	-0.02	-0.08

	31S3 (P12 - XG)					
Composition réelle CR	77.53	12.76	3.78	0.77	1.24	2.73
Composition estimée CI	78.82	12.15	3.36	0.62	1.27	2.57
C = CR - CI	-1.29	0.61	0.42	0.15	-0.03	0.16

	31S4 (P12 - XG)					
Composition réelle CR	72.47	16.81	3.71	0.78	1.61	3.56
Composition estimée CI	71.83	17.59	3.57	0.64	1.64	3.60
C = CR - CI	0.64	-0.78	0.14	0.14	-0.03	-0.04

	32S1 (P13 - E)					
Composition réelle CR	80.96	11.05	2.66	0.44	0.28	2.37
Composition estimée CI	80.59	10.78	3.30	0.61	1.18	2.30
C : CR - CI	0.37	0.27	-0.64	-0.17	0.18	0.07

	32S2 (P13 - XG)					
Composition réelle CR	78.76	11.82	3.76	0.74	1.19	2.54
Composition estimée CI	79.58	11.57	3.34	0.61	1.23	2.45
C = CR - CI	-0.82	0.25	0.42	0.13	-0.04	0.09

TABLEAU IX: LE SOURN: PRINCIPALES DONNÉES CHIMIQUES

I - 4. 2. 2. Méthode de calcul et résultats

Soit un échantillon; appelons :

C_I : sa composition estimée par le modèle ; cette composition représente le résultat du mélange

C_R : sa composition donnée par l'analyse ; cette composition représente le résultat du mélange et de la pédogenèse

Les variations de compositions induites par la pédogenèse sont données par l'équation :

$$\Delta C = C_R - C_I$$

a) La zone amont (tableau IX)

Dans la zone amont de la séquence, 6 échantillons ont été analysés :
- 4 dans l'horizon ALE
- 2 dans l'horizon XT

Les valeurs de ΔC pour les principaux oxydes sont :

SiO_2	Horizon ALE	:	$\Delta C > 0$
	Horizon XT	:	$\Delta C < 0$
Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO	Horizon ALE	:	$\Delta C < 0$
	Horizon XT	:	$\Delta C > 0$
K_2O	Horizon ALE	:	$\Delta C < 0$
	Horizon XT	un échantillon :	$\Delta C < 0$
		un échantillon :	$\Delta C > 0$
Na_2O	Horizon ALE	un échantillon :	$\Delta C < 0$
		2 échantillons :	$\Delta C > 0$
	Horizon XT	un échantillon :	$\Delta C < 0$
		un échantillon :	$\Delta C > 0$

On peut tout d'abord noter que l'échantillon $21S_2$ prélevé dans une zone de l'horizon ALE enrichie en matière organique, présente les mêmes caractères que les trois autres prélèvements de cet horizon. En granulométrie, par contre, l'éluviation ne se marque pas. De ce point de vue, la composition chimique parait un indicateur plus fidèle. L'ensemble des résultats montre que la différenciation pédologique se traduit par un appauvrissement de l'horizon ALE en Al_2O_3, Fe_2O_3 , MgO et K_2O (et un enrichissement relatif en SiO_2) et un enrichissement de l'horizon XT en ces quatre oxydes. Les variations de Na_2O sont ambigües à interpréter; si on établit une moyenne, cet oxyde semble s'accumuler dans l'horizon XT.

b) La zone aval (Tableau IX)

Dans la zone aval de la séquence, 4 échantillons ont été analysés :
- un dans l'horizon éluvié
- 3 dans l'horizon illuvié

Les valeurs de Δ C pour les principaux oxydes sont :

SiO_2	Horizon E		: Δ C > 0
	Horizon TG	2 échantillons	: Δ C < 0
		1 échantillon	: Δ C > 0
Al_2O_3	Horizon E		: Δ C > 0
	Horizon TG	2 échantillons	: Δ C > 0
		1 échantillon	: Δ C < 0
Fe_2O_3 , MgO	Horizon E		: Δ C > 0
	Horizon TG		: Δ C < 0
Na_2O	Horizon E		: Δ C > 0
	Horizon TG		: Δ C < 0
K_2O	Horizon E		: Δ C < 0
	Horizon TG	2 échantillons	: Δ C > 0
		1 échantillon	: Δ C < 0

Comme dans la zone amont, l'horizon éluvié est déficitaire en Fe_2O_3 et MgO , l'horizon illuvié est excédentaire. Par contre, les variations des autres oxydes semblent peu cohérentes. Ceci est probablement en relation avec l'absence d'enrichissement en argile de l'horizon TG et la présence des taches et des langues d'oxydo-réduction.

I - 4. 3. Mélange et actions pédogénétiques (Tableau IX)

Les variations granulométriques et chimiques sont liées à la fois au mélange entre deux matériaux et aux remaniements par la pédogenèse. Les parts respectives de ces deux facteurs ont été évaluées comme suit :

- Variations dues au mélange : écart des estimations ponctuelles des bornes des nuages de points M2a - M1a

- Variations liées à la pédogenèse : $C_R - C_I$ maximum de l'horizon E + $C_R - C_I$ maximum de l'horizon T (les calculs ne portent que sur la zone amont).

- L'ensemble mélange et actions pédologiques est ensuite ramené à l'unité.

Les résultats sont les suivants (les chiffres entre parenthèses indiquent les valeurs brutes) :

Pour SiO_2 : le mélange a induit 75 % (11.87 %) des variations des mesures
la pédogenèse a induit 25 % (3.99%) des variations des mesures

Pour Al_2O_3 : le mélange a induit 79 % (9.23 %) des variations des mesures
la pédogenèse a induit 21 % (2.50%) des variations des mesures

Pour Fe_2O_3 : le mélange a induit 19 % (0.38 %) des variations des mesures
la pédogenèse a induit 91 % (1.58 %) des variations des mesures

Pour MgO : le mélange a induit 8 % (0.03 %) des variations des mesures
la pédogenèse a induit 92 % (0.36 %) des variations des mesures

Pour Na_2O : le mélange a induit 81 % (0.64 %) des variations des mesures
la pédogenèse a induit 19 % (0.15 %) des variations des mesures

Pour K_2O : le mélange a induit 90 % (1.76 %) des variations des mesures
la pédogenèse a induit 10 % (0.20 %) des variations des mesures

Ces résultats sont illustrés par la figure 59 qui tient compte du sens des actions pédogénétiques et intègre le cas de l'argile.

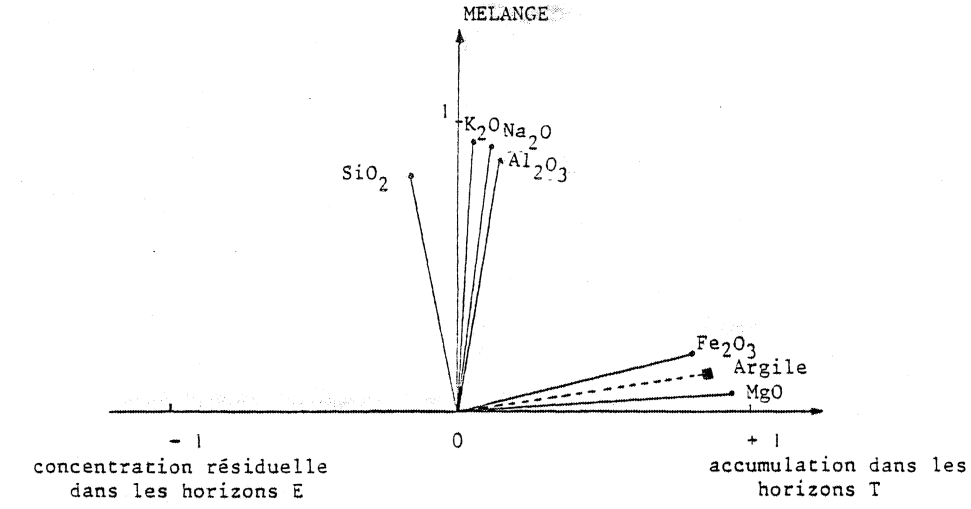


FIGURE 59 : IMPORTANCE RELATIVE DE L'ACTION DE LA PÉDOGENÈSE ET DU MÉLANGE SUR LA COMPOSITION CHIMIQUE ET LA TENEUR EN ARGILE DES SOLS DU SOURN (ZONE AMONT)

I - 5. Conclusion

Les sols du Sourn sont le résultat du mélange de deux matériaux, l'un est d'apport et l'autre est issu du substrat par altération. La pédogenèse a transformé les produits ainsi définis. Des points de vue chimique et granulométrique , l' éluviation et l'illuviation sont les processus essentiels qui se développent dans la zone amont de la séquence. Vers l'aval, l'illuviation semble se perturber parallèlement au développement des taches et langues d'oxydo-réduction.

La répartition des matériaux le long de la séquence est illustrée par la figure 60

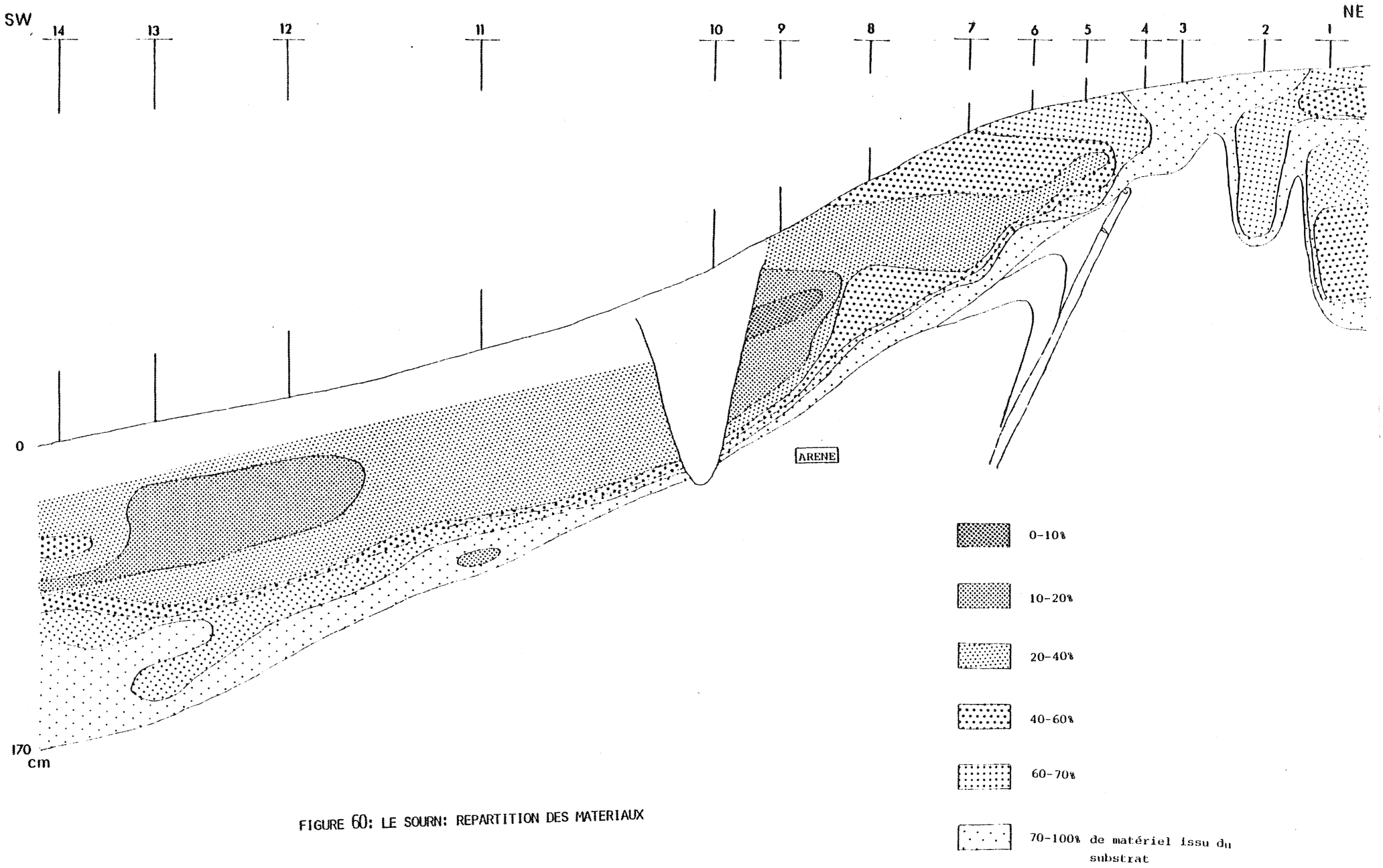


FIGURE 60: LE SOURN: REPARTITION DES MATERIAUX

II - LES AUTRES SEQUENCES

II - 1. La séquence de Ste Tréphine 1

II - 1. 1. Les résultats des A.C.P.

II - 1. 1. 1. Les 30 données granulométriques

a) Les faits

Les pourcentages d'inertie des différents axes construits à partir des 30 données granulométriques sont de :

1er axe : 65.3 %
2ème axe : 18.4 %
3ème axe : 10.5 %
4ème axe : 4.1 %
5ème axe : 1.1 %
6ème et suivants : 0.5 %

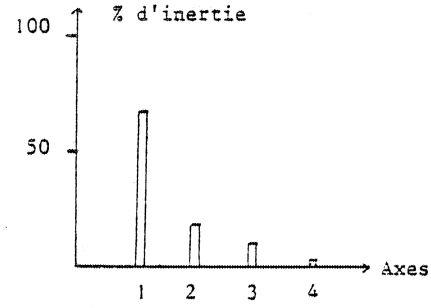


FIGURE 61

Les corrélations des variables aux trois premiers axes sont de :

	1 Axe	2 Axe	3 Axe
A	.551	.663	- .528
LF	.540	.555	.631
LG	.919	- .394	- .017
S1	- .636	- .181	- .216
S2	- .932	- .181	.069
S3	- .946	- .215	- .081
S4	- .932	- .183	- .031
S5	- .814	- .177	.089

Le premier axe, comme dans la séquence du Sourn, oppose les sables aux éléments plus fins et constitue un indicateur synthétique de la texture. Remarquons que la corrélation de l'argile à l'axe est meilleure qu'au Sourn tandis que celle des limons fins est plus faible (l'analyse des autres axes, puis les estimations de la composition des deux constituants du mélange vont permettre de comprendre ces différences). Le report sur la séquence des positions des échantillons sur l'axe conduit à un schéma comparable à celui obtenu au Sourn : une disposition en enveloppes ouvertes vers l'aval, les échantillons les plus limoneux se situant au coeur de ces enveloppes (cette position est équivalente des proportions de mélange; il convient donc de se reporter à la figure 69, p.170)

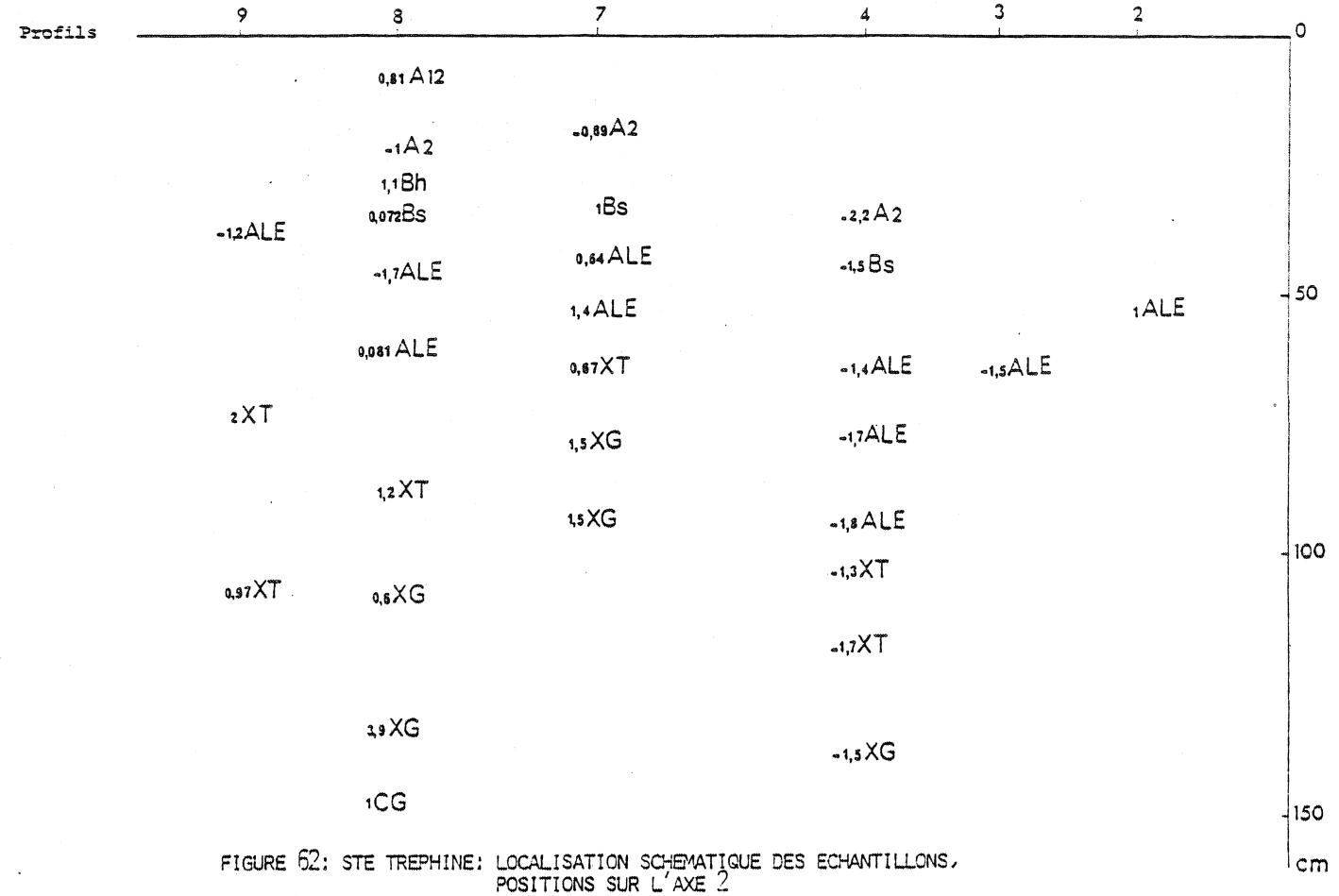


FIGURE 62: STE TREPHINE: LOCALISATION SCHEMATIQUE DES ECHANTILLONS, POSITIONS SUR L'AXE 2

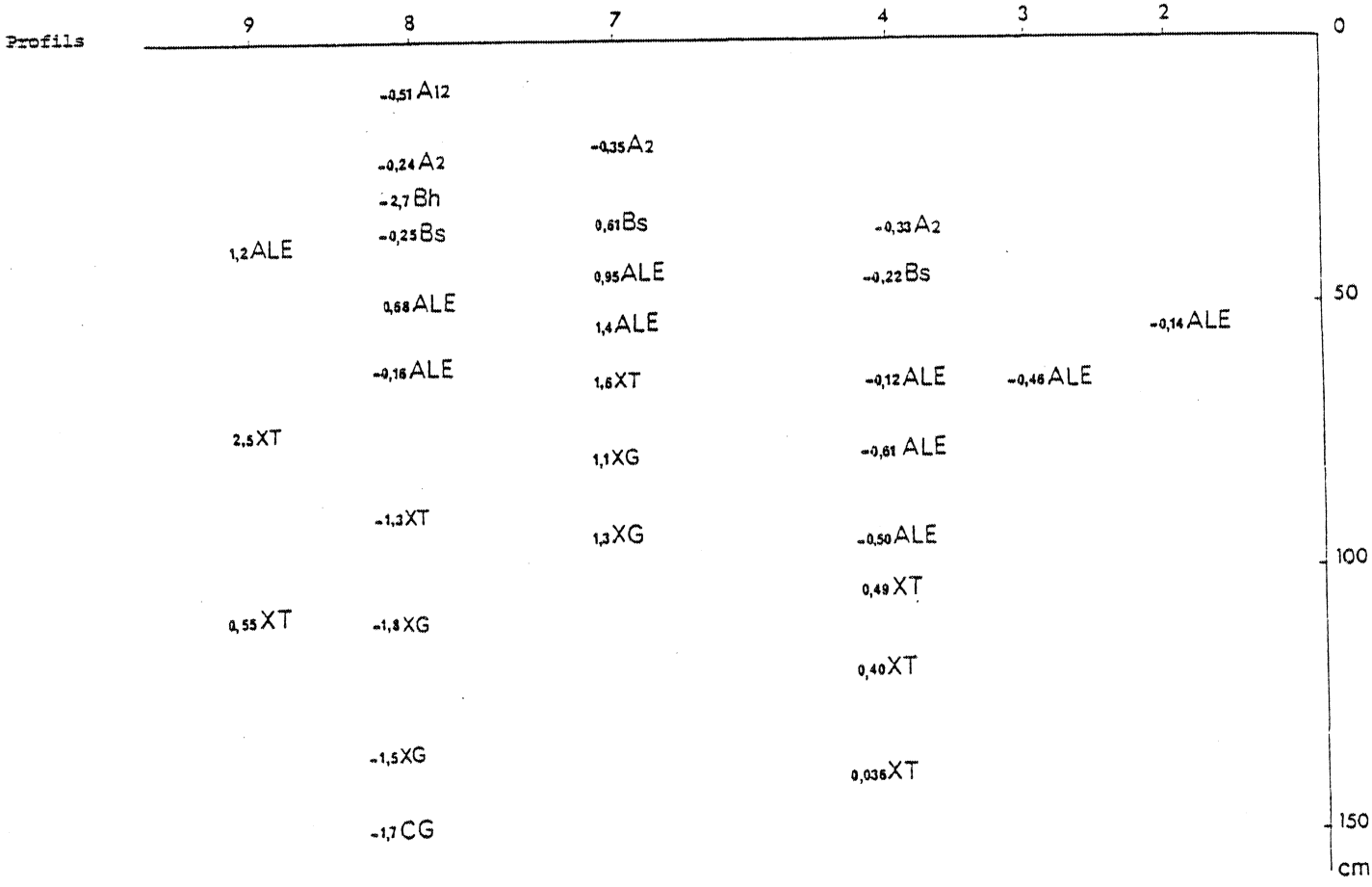


FIGURE 63: STE TREPHINE: LOCALISATION SCHEMATIQUE DES ECHANTILLONS, POSITIONS SUR L'AXE 3

Le second et le troisième axes représentent les variations de teneurs en argile. Mais le second axe traduit les variations de teneurs en argile qui s'effectuent parallèlement aux variations de teneurs en limons fins, alors que le troisième axe fait apparaitre les variations de teneurs en argile qui s'effectuent de façon opposée aux variations de teneurs en limons fins. Aussi faut-il rechercher le ou les facteurs naturels qui permettent d'expliquer ces variations.

b) Interprétation des axes 2 et 3 (fig. 62,63,64,)

Trois facteurs naturels peuvent conduire à des variations simultanées de l'argile et des limons fins :

- un enrichissement par un matériel schisteux; les altérites de schistes présentent, en effet, des teneurs assez fortes en argile et en limons fins .
- un lessivage simultané de l'argile et du limon fin.
- une altération, celle-ci conduisant généralement à un enrichissement en argile et en limons fins.

Les variations traduites par l'axe 2 (à l'opposé de celles intégrées à l'axe 3) résultent donc de l'un de ces trois facteurs.

Ainsi, l'augmentation vers l'aval de la plupart des valeurs définies par la position des échantillons sur l'axe 2 peut s'interpréter comme une accentuation de l'influence des schistes de l'amont vers l'aval. Nous avons vu (p. 115), en effet, que cette séquence se situe à la limite des schistes rouges et des quarzites ordoviciens; et le passage entre ces deux formations est progressif (SAGON, 1976). En plus de cette influence globale, la présence de matériel schisteux se marque de façon ponctuelle dans l'avant dernier échantillon du P.8 (valeur 3.9) et, peut-être, dans l'horizon ALE du P.2 (valeur 1). Pour le P.8, l'horizon X G où a été prélevé l'échantillon renferme de nombreux fragments de schistes; quant à l'horizon ALE du P.2, il se situe dans le prolongement d'un banc schisteux qui s'estompe à ce niveau car"la restructuration pédologique est trop forte" (LE CALVEZ-LE BARS, 1977, P.40). L'A.C.P. fait apparaitre que cette restructuration reste insuffisante pour effacer totalement les hétérogénéités lithologiques originelles.

Au niveau pédologique, les différenciations qui existent entre les horizons podzoliques et celles observées entre l'ALE et le XT au niveau du P.8 sont traduites par l'axe 2. L'axe 3 permet seulement de retrouver la différencition entre les horizons ALE et XT du P.4. Ceci semble indiquer que, dans toute la séquence pour l'épipédon podzolique et, dans la partie aval pour l'hypopédon, l'argile et le limon fin se déplacent simultanément, alors que, dans la zone amont de la séquence, les redistributions à l'intérieur de l'hypopédon sont strictement limitées à l'argile (notons que ces redistributions n'apparaissent pas sur les taux d'argile bruts). Or, l'étude micromorphologique montre que, dans la zone aval, l'horizon XT contient des "revêtements nombreux et lités constitués d'argile et limon fin"(LE CALVEZ - LE BARS, 1977, p. 45) alors que la présence de limon fin n'a pas été notée dans les cutanes de la zone amont (p. 26).

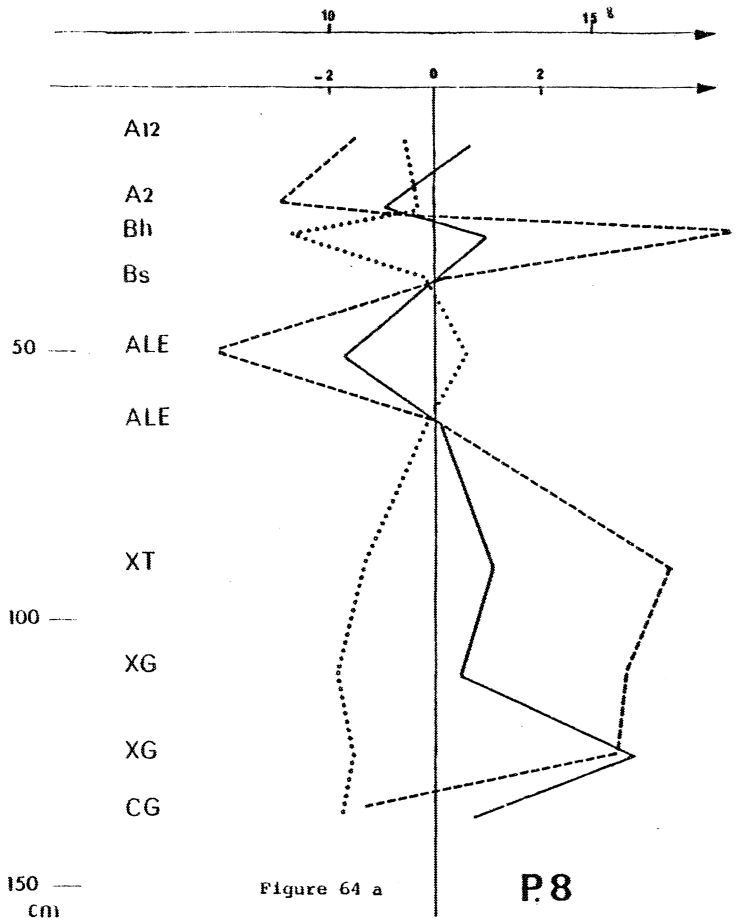


Figure 64 a

P.8

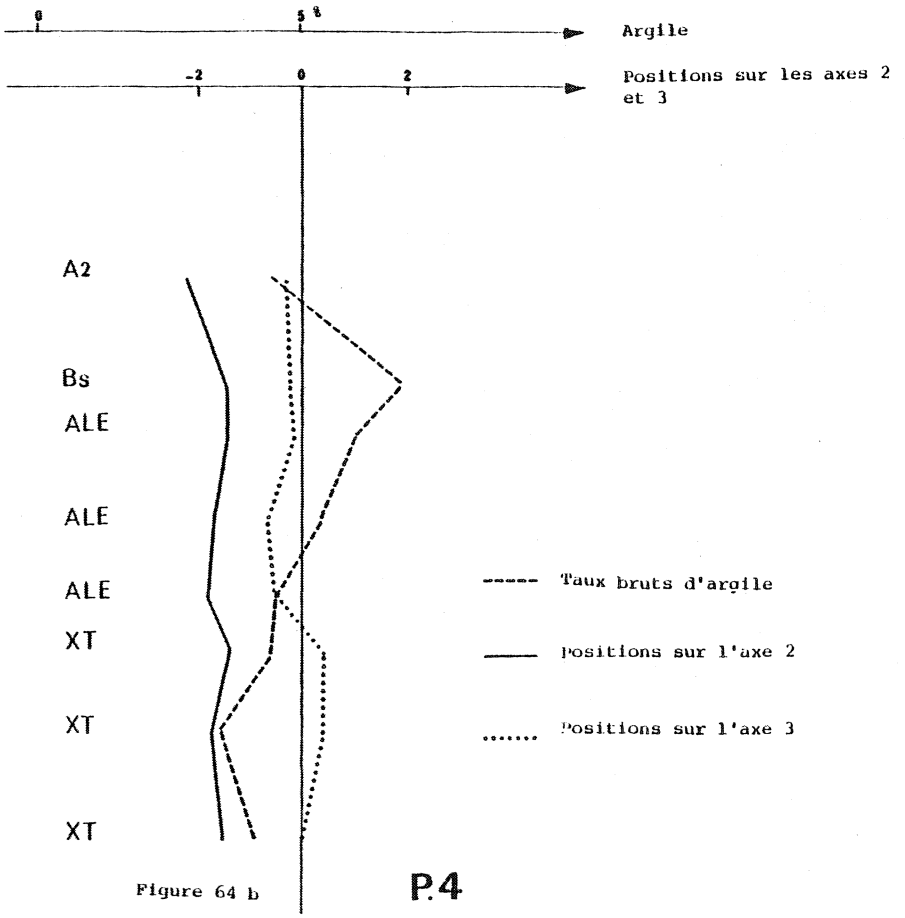


Figure 64 b

P.4

FIGURE 64 a et b: STE TREPHINE: EVOLUTION DE L'ARGILE, COMPARAISON DES TAUX BRUTS ET DES POSITIONS SUR LES AXES 2 ET 3

c) Conclusion

Trois axes principaux se dégagent. Le premier n'est pas lié aux horizons pédologiques et constitue un indicateur synthétique de la texture. Les deux autres axes sont directement liés à la différenciation pédologique. Ils permettent de mettre en évidence que le lessivage concerne à la fois l'argile et le limon fin dans les horizons superficiels (podzols) et même pour la zone aval, dans les horizons profonds (ALE - XT), alors que ce lessivage se limite à l'argile dans les horizons profonds de la partie amont de la séquence.

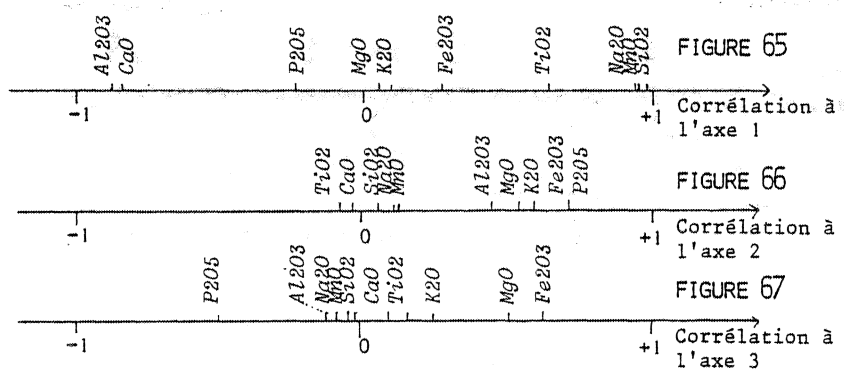
II - 1. 1. 2 - Les données chimiques

a) Les données chimiques seules

Le premier axe a un pourcentage d'inertie de 94,6 %, le second de 4,2 %, le troisième de 1 %. Les corrélations des variables à ces axes sont :

	1 Axe	2 Axe	3 Axe
SiO_2	.998	.061	- .022
Al_2O_3	- .883	.452	- .124
Fe_2O_3	.275	.719	.637
MnO	.957	.120	- .049
MgO	.043	.516	.491
CaO	- .850	-.081	.143
Na_2O	.944	.108	- .096
K_2O	.093	.599	.229
TiO_2	.637	- .113	.160
P_2O_5	- .246	.773	- .444

Comme au Sourn, la majorité des variables se corrèlent au premier axe. Celui-ci oppose les échantillons riches en SiO_2 , Na_2O et TiO_2 aux échantillons riches en Al_2O_3.



Les variations chimiques indépendantes du premier axe apparaissent relativement complexes. Ceci est naturellement à mettre en relation avec l'hétérogénéité du substrat. Les comparaisons de ces données chimiques avec les données granulométriques correspondantes, puis les estimations des composants du mélange vont nous permettre de comprendre ces résultats et notamment les bonnes corrélations de K_2O et Al_2O_3 au second axe.

b) Comparaison des données chimiques et granulométriques

Si nous croisons les axes de même rang (Fig. 68), seule la corrélation qui correspond aux axes 1 apparait significative. Ce résultat autorise l'estimation des composants du mélange, mais confirme la complexité des variations indépendantes de ce mélange et exclut, de ce fait, une interprétation des remaniements pédologiques aussi fine que celle effectuée sur la séquence du Sourn.

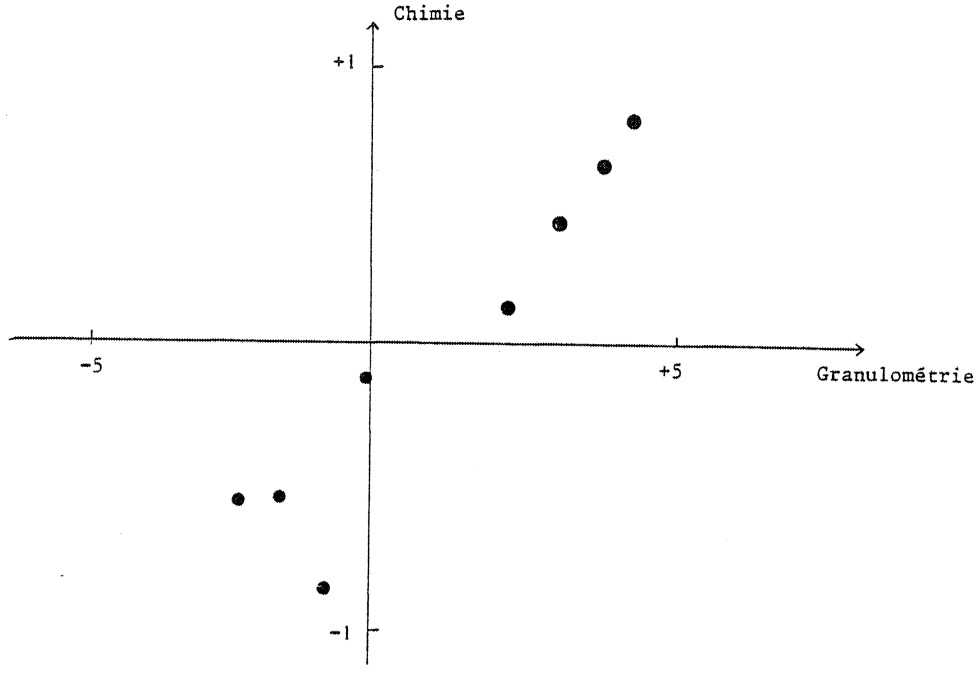


FIGURE 68: STE TRÉPHINE 1 : CORRÉLATION ENTRE LES AXES 1

L'A.C.P. qui porte sur les données communes à la granulométrie et à la chimie, met en évidence trois axes principaux dont les pourcentages d'inertie sont :

1er axe : 75.4 %
2ème axe : 12.3 %
3ème axe : 10.6 %

Les corrélations des variables à ces axes sont :

	1 Axe	2 Axe	3 Axe
SiO_2	.739	-.300	-.163
Al_2O_3	-.861	.055	-.162
Fe_2O_3	.256	.794	-.059
MnO	.960	-.007	.152
MgO	-.141	.557	-.214
Na_2O	.904	-.322	.070
K_2O	-.541	.196	-.319
TiO_2	.388	-.018	.898
P_2O_5	-.193	.165	-.273
A	.787	.226	-.574
L.F.	.661	.602	.446
L.G.	.914	-.384	.127
S1	-.829	-.347	.330
S2	-.978	-.052	.047
S3	-.956	-.208	-.142
S4	-.978	-.137	-.089
S5	-.977	.094	.039

Les variables chimiques, à l'exception de Fe_2O_3, MgO, TiO_2 et P_2O_5 et toutes les variables granulométriques, y compris l'argile se corrèlent au premier axe. Celui-ci oppose les échantillons riches en limons et en argile, aux échantillons sableux. Fe_2O_3 , MgO et L.F. se corrèlent au second axe, qui tend à opposer les échantillons riches en ces trois éléments aux échantillons riches en SiO_2 et Na_2O. L'estimation des composants du mélange, à partir du premier axe des A.C.P. va permettre de mieux interpréter ces résultats.

II - 1. 2. Estimation des composants du mélange

II - 1. 2. 1. A partir des 30 données granulométriques

Les estimations les plus compatibles avec les 30 données granulométriques sont les suivantes :

Matériel 1		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M1a borne du nuage	% bruts	12.0	29.1	41.5	10.4	1.3	2.3	2.1	0.9
	% cumulés		(41.1)	(82.6)	(93)	(94.3)	(96.6)	(98.7)	(99.6)
M1b annulation d'une composante	% bruts	12.9	29.9	43.9	9.9	0.6	1.3	1.3	0
	% cumulés		(42.8)	(86.7)	(96.6)	(97.2)	(98.5)	(99.8)	(99.8)

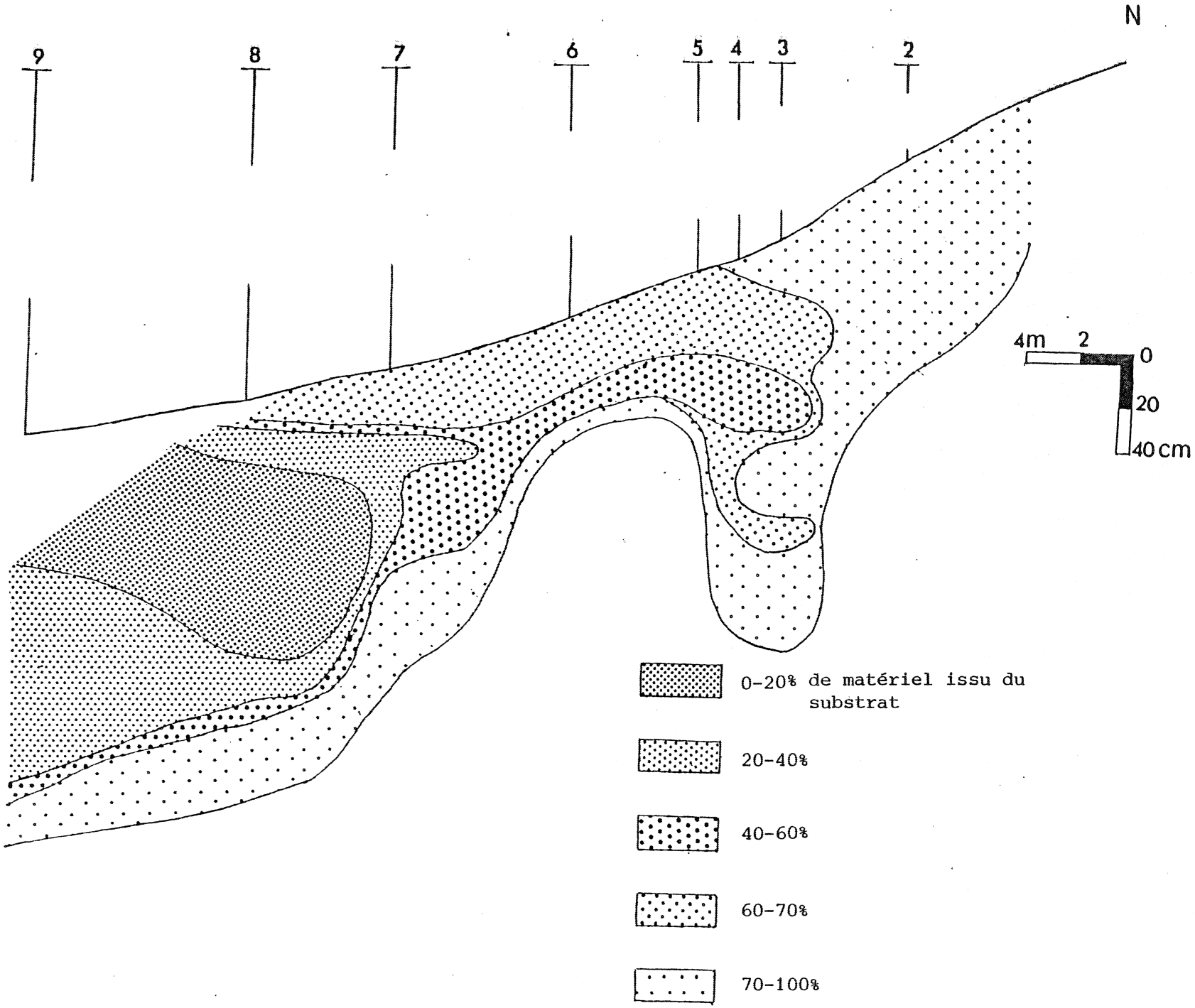


FIGURE 69: STE TREPHINE 1: REPARTITION DU MATERIEL ISSU DU SUBSTRAT

Matériel 2

		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M2a borne du nuage	% bruts	4.5	22.2	21.6	14.5	7.5	11.7	8.9	9.0
	% cumulés		(26.7)	(48.3)	(62.8)	(70.3)	(82)	(90.0)	(99.9)
M2b annulation d'une composante	% bruts	0	18	9.5	17	11.2	17.3	13.1	13.9
	% cumulés		(18)	(27.5)	(44.5)	(55.7)	(73)	(86.1)	100

Les 2 estimations ponctuelles du matériel 1 sont assez voisines; celles du matériel 2 sont plus éloignées. Ce matériel 2 a une courbe granulométrique cumulative d'allure concave, comparable à celle des quartzites altérés (fig. 71, p.170). Or, le banc de quartzites le moins altéré , dont l'analyse granulométrique a été effectuée, contient 3.3 % d'argile. Il est donc peu vraisembleble que le matériel 2 en renferme une moindre quantité, soit moins de 3 %. La nouvelle estimation de M2 qui est ainsi obtenue est

		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M2c contrainte sur l'argile	% bruts	3	20.7	17.5	15.3	8.7	13.6	10.4	10.7
	% cumulés		(23.7)	(41.2)	(56.5)	(65.2)	(78.8)	(89.2)	(99.9)

Les deux composants du mélange étant estimés, il devient possible de donner leur proportion relative pour chaque échantillon. Les résultats sont donnés en annexe, les pourcentages qui représentent les proportions du matériel 2. sont reportés sur la séquence (fig. 69). On remarque que le pourcentage maximal du matériel 1 est compris entre 90 et 100 % (P.8 45 à 55 cm) et le pourcentage maximum du matériel 2 est compris entre 82 et 100 % (P.2).

II - 1. 2. 2. Estimation à partir des données chimiques et granulométriques

Les estimations les plus compatibles avec les données chimiques étudiées seules, sont les suivantes :

Matériel 1 : M 1

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
M1a borne du nuage	82.21	9.96	3.22	0.05	0.60	0.88	1.90	0.91	0.04	0.23
M1b annulation d'une composante	85.64	6.80	3.05	0.08	0.52	1.00	1.80	0.99	0	0.13

Matériel 2 : M 2

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
M2a borne du nuage	79.52	12.45	3.34	0.02	0.66	0.78	1.98	0.84	0.08	0.31
M2b annulation d'une composante	77.37	14?43	3.44	0	0.70	0.70	2.03	0.79	0.10	0.38

Comme au Sourn, les constituants initiaux ont été estimés à partir des données communes à la granulométrie et à la chimie. Les estimations qui en résultent sont les suivantes :

Matériel 1 : M 1

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
M1a borne du nuage	12.2	29.0	40.9	10.5	1.3	2.7	2.2	1.0	81.5	10.46	3.36	0.05	0.62	0.86	1.91	0.89	0.06	0.24
M1b Annulation d'une composante	13.3	29.9	42.6	10.1	0.7	1.8	1.5	0	81.8	10.18	3.39	0.05	0.62	0.88	1.90	0.90	0.05	0.23

Matériel 2 : M 2

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
M2a borne du nuage	4.5	23.3	29.5	13.1	5.5	8.7	7.1	8.3	79.7	12.40	3.20	0.02	0.65	0.77	1.97	0.85	0.05	0.32
M2b annulation d'une composante	0	20.0	22.8	14.6	7.9	12.1	9.9	12.5	78.7	13.52	3.10	0.02	0.66	0.72	2.02	0.82	0.07	0.36
M2c argile = 3 %	3	22.2	27.3	13.6	6.3	9.8	8.1	9.7	79.4	12.77	3.16	0.01	0.65	0.75	1.99	0.84	0.07	0.33

II - 1. 2. 3. Comparaison des diverses estimations

Les comparaisons s'effectuent entre les estimations concernant les bornes des nuages de points pour la chimie (M1a et M2a) et celles concernant la saturation d'une contrainte pour la granulométrie (M1b et M2c).

a) Le matériel 1

Pour la granulométrie comme pour la chimie, les estimations sont voisines : l'écart maximum en valeur absolue se situe sur L.G. et est de 1.3 %; la précision la plus faible est obtenue pour Al_2O_3 (5 % environ). L'estimation de M1 est donc stable et peut être considérée comme fiable.

b) Le matériel 2

Les écarts entre les diverses estimations de la composition granulométrique de M2 sont très importants : 9.8 % pour L.G., soit une erreur relative de 36 %. Pour la chimie, les écarts restent relativement faibles : le plus élevé est de 0.22 % et se situe sur SiO_2. L'écart important pour les estimations des teneurs en limons grossiers traduit la faible stabilité de l'axe. Cette faible stabilité est liée à l'hétérogénéité du substrat . En ce sens, il faut noter que les échantillons marqués par un enrichissement ponctuel en matériel schisteux ont été systématiquement exclus des analyses chimiques. Comme les altérites de schistes sont généralement riches en L.F. et pauvres en L.G., il est naturel que l'estimation qui exclut ces matériaux soit plus riche en L.G. que celle qui les prend en compte.

c) Conclusion

Les estimations de M1 sont voisines et celles de M2 sont dispersées. On peut donc symboliser le nuage de points qui représente les matériaux de cette séquence par un triangle dans un graphique à trois dimensions (fig. 70)

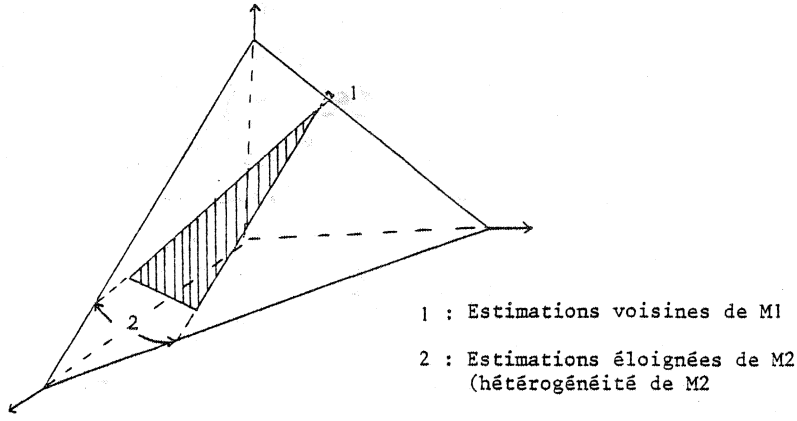


FIGURE 70: STE TRÉPHINE:1: SCHÉMA SYMBOLISANT LE NUAGE DE POINTS REPRÉSENTANT LES MATÉRIAUX DE LA SÉQUENCE

II - 1. 3. Comparaison des constituants du mélange et des quartzites altérés

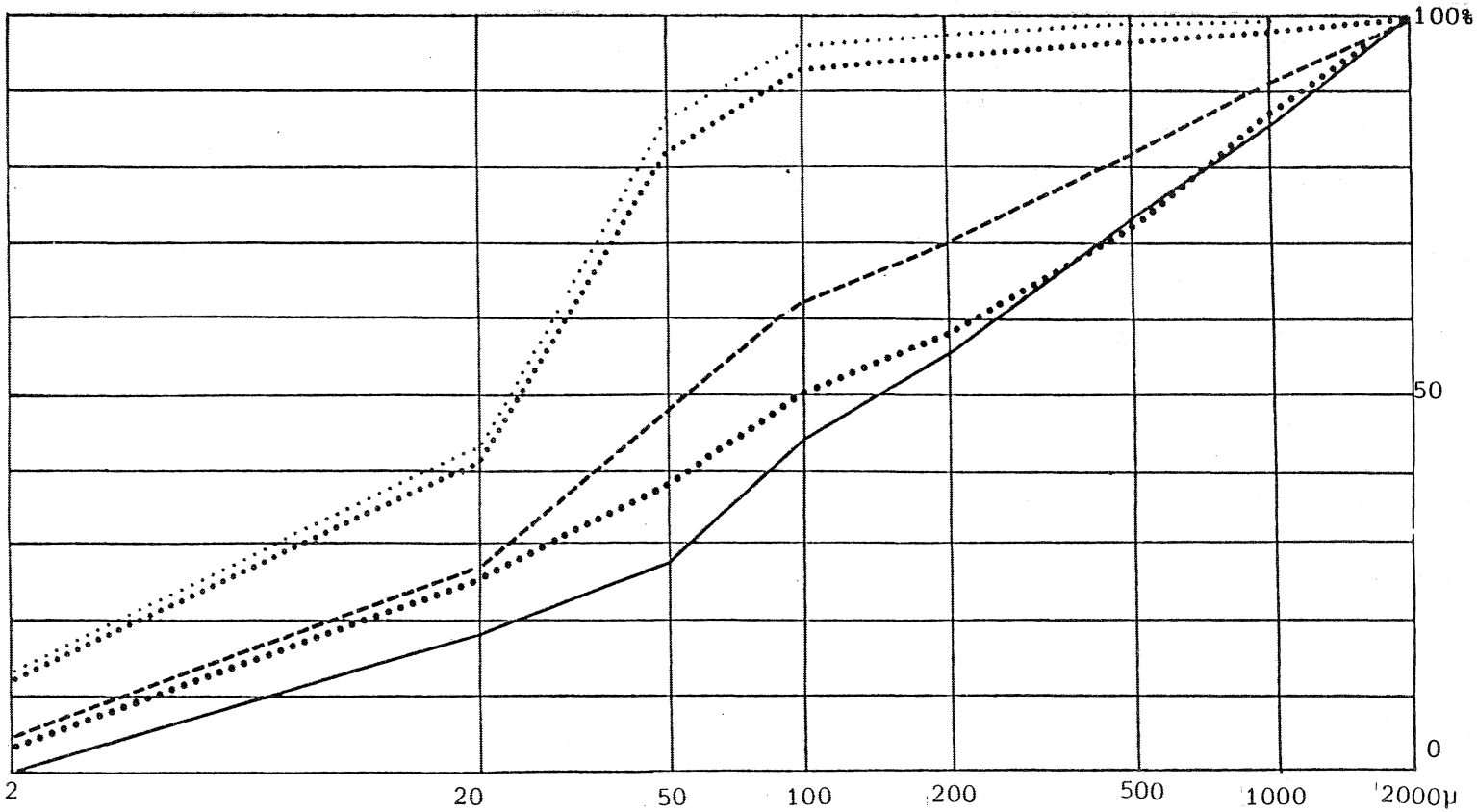
Du point de vue chimique les matériaux M1 et M2 ne sont pas fondamentalement différents. Leur richesse en SiO_2, leur faible teneur en Al_2O_3 montrent que tous deux pourraient dériver des substrats sous-jacents; les quartzites se caractérisent précisément par ces deux faits. L'analyse d'un banc de quatzite altéré du P.1 a donné la composition suivante :

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
80.84	12.03	2.80	0.02	0.61	0.72	1.95	0.62	0.05	0.34

Mais les compositions granulométriques de ces deux matériaux sont nettement différentes. Celle de M2 l'apparente aux quartzites altérés (fig. 71) alors que celle de M1, bien granoclassée, le rapproche du matériel 1 du Sourn; nous étudierons donc son origine dans la synthèse des résultats.

II - 1. 4. Les variations indépendantes du mélange

Nous avons vu que les variations indépendantes du mélange sont complexes et la stabilité de l'axe 1 relativement faible. Une étude aussi détaillée que celle présentée au Sourn est donc impossible; seuls quelques grands traits - concernant plus particulièrement la chimie - semblent pouvoir être dégagés.



Matériel M1a

Matériel M1b

Matériel M2a

Matériel M2b

Quartzite altéré

FIGURE 71: STE TREPHINE 1: COURBES GRANULOMETRIQUES CUMULATIVES DES DIFFERENTS MATERIAUX

Les différences entre les teneurs estimées par le modèle et les teneurs réelles des divers échantillons sont consignées dans le tableau suivant :

Ech.	Hor.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O en %
3R1	ALE	0.43	-0.35	-0.09	-0.01	0.02	0.04
4R3	ALE	-0.44	0.56	-0.04	-0.08	-0.01	-0.05
4R6	XT	0.02	-0.01	-0.07	0.06	0.01	0.01
7R2	Bs	-1.31	0.76	0.45	0.03	-0.04	0.03
7R5	XT	0.47	-0.56	0.13	0	-0.03	-0.03
8R5	ALE	0.74	-0.26	-0.36	-0.11	0.01	-0.05
8R6	ALE	-0.03	-0.25	0.14	0.11	0.02	0.06
8R8	XG	0.12	0.12	-0.15	0.01	-0.02	0

Un seul échantillon de Bs a été analysé; ses teneurs réelles en SiO_2 et Na_2O sont plus faibles que ses teneurs estimées, alors que pour les autres éléments, c'est le cas inverse. Les résultats ponctuels des horizons XT et ALE sont délicats à interpréter, cependant la moyenne établie sur les quatre valeurs concernant l'horizon ALE met en évidence une concentration pour SiO_2 et Na_2O, un déficit pour les autres éléments. Ceci montre, par référence au Sourn, que l'horizon Bs fonctionne comme un horizon d'accumulation alors que l'horizon ALE fonctionne comme une zone de départ d'éléments.

Les parts respectives du mélange et des "actions pédogénétiques" ont été évaluées selon la méthode décrite lors de l'étude du Sourn. Les résultats, illustrés par la figure 72, sont résumés dans le tableau suivant (les chiffres entre parenthèses indiquent les valeurs brutes) :

	Mélange		Actions pédogénétiques	
SiO_2	48%	(1.8)	-52%	(2)
Al_2O_3	63%	(1.9)	37%	(1.1)
Fe_2O_3	20%	(0.2)	80%	(0.8)
MgO	20%	(0.03)	80%	(0.12)
Na_2O	53%	(0.09)	-47%	(0.08)
K_2O	73%	(0.08)	27%	(0.03)
Arg.	46%	(7.5)	54%	(9%)

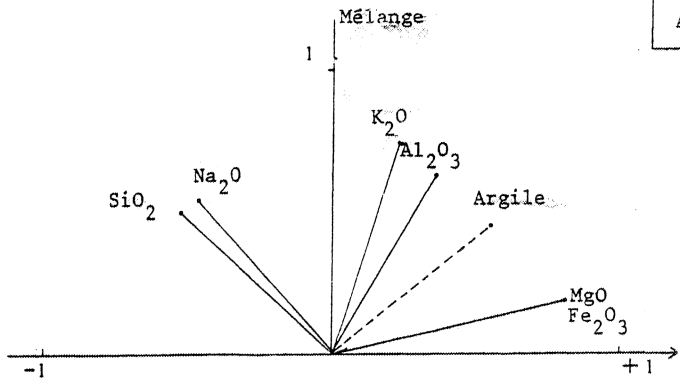


FIGURE 72: STE TRÉPHINE 1: IMPORTANCE RELATIVE DU MÉLANGE ET DES ACTIONS PÉDOGÉNÉTIQUES

Par rapport au Sourn, il faut noter :

1 - le comportement de Na_2O : il tend ici à se concentrer dans les horizons ALE.

2 - que les importances respectives du mélange et des actions pédogénétiques ne sont pas les mêmes. Ceci s'explique principalement par les écarts faibles qui existent entre les compositions des 2 constituants du mélange.

II - 2. La séquence de Ste Tréphine 2

II - 2. 1. Les données des A.C.P.

Les A.C.P. portent sur 33 données granulométriques. Le dépouillement préliminaire nous a permis d'observer que les teneurs en L.F. et S.1 sont relativement constantes. Leurs variations ne devraient donc pas être guidées par le mélange : ces variables doivent donc présenter une faible corrélation à l'axe 1.

Les pourcentages d'inertie des différents axes sont les suivants :

1er axe : 46.1 %
2ème axe : 30.9 %
3ème axe : 17.1 %
4ème axe : 5.3 %

Les corrélations des variables aux premiers axes sont :

	1 Axe	2 Axe	3 Axe
A	- .374	.978	- .025
LF	.190	- .202	.958
LG	.980	.112	- .165
S1	- .351	- .745	- .364
S2	- .572	- .620	- .289
S3	- .598	- .427	- .077
S4	- .767	- .259	- .262
S5	- .696	- .286	- .258

L.G. présente une forte corrélation au premier axe; S2 , S3 , S4 , S5 présentent une corrélation plus faible; celles de A , L.F. et S1 sont mauvaises. Cet axe oppose les échantillons riches en L.G. aux échantillons sableux.

Le second axe traduit principalement les variations de l'argile, le troisième celles des limons fins.

II - 2. 2. Estimation des composants initiaux

Les estimations les plus compatibles avec ces données granulométriques sont les suivantes :

Matériel 1 : M 1

		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M1a borne du nuage	% bruts	12.1	33.1	44.5	7.4	0.5	0.6	0.8	0.9
	% cumulés		(45.2)	(89.7)	(97.1)	(97.6)	(98.2)	(99.0)	(99.9)
M1b annulation d'une composante	% bruts	11.1	33.5	47.8	6.7	0.3	0.4 .	0.2	0
	% cumulés		(44.6)	(92.4)	(99.1)	(99.4)	(99.8)	(100.1)	(100.1)

Matériel 2 : M 2

		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M2a borne du nuage	% bruts	17.8	30.9	26.5	11.2	2.0	2.0	3.7	5.8
	% cumulés		(48.7)	(75.2)	(86.4)	(88.4)	(90.4)	(94.1)	(99.9)
M2b annulation d'une composante	% bruts	26.2	27.6	0	16.8	4.2	4.0	8.0	13.2
	% cumulés		(53.8)	(53.8)	(70.6)	(74.8)	(78.8)	(86.8)	(99.9)

Les fourchettes sur M 1 sont particulièrement étroites. Elles sont plus larges pour M 2. Pour ce matériel, l'annulation des L.G. apparait peu plausible (cf. Le Sourn). Les schistes rouges constituent probablement le substrat (cf. dépouillement préliminaire), bien qu'ils ne soient pas visibles dans cette carrière. Devant l'absence d'altérites de ces schistes, je me suis fondé sur la teneur minimale en L.G. observée dans les altérites schisteuses de la région, soit 10 % dans les altérites de schistes briovériens à St Elouan. La nouvelle estimation de M 2 qui en résulte est :

		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M2c : LG = 10%	% bruts	23.0	28.8	10.0	14.7	3.4	3.3	6.4	10.4
	% cumulés		(51.8)	(61.8)	(76.5)	(79.9)	(83.2)	(89.6)	(100)

Les fourchettes restent relativement élevées ce qui traduit, vraisemblablement la présence d'une forte proportion de M 1 dans tous les échantillons de cette séquence. La dispersion des prélèvements (cf. p.115) exclut une interprétation fine de la répartition des matériaux dans la séquence et des variations indépendantes du mélange. Nous nous contenterons de remarquer que, dans la petite tranchée, les échantillons les moins limoneux proviennent de la formation limoneuse à blocs (fig. 74). Les résultats de l'A.C.P. (position des échantillons sur les axes) et du programme de mélange sont donnés en annexe.

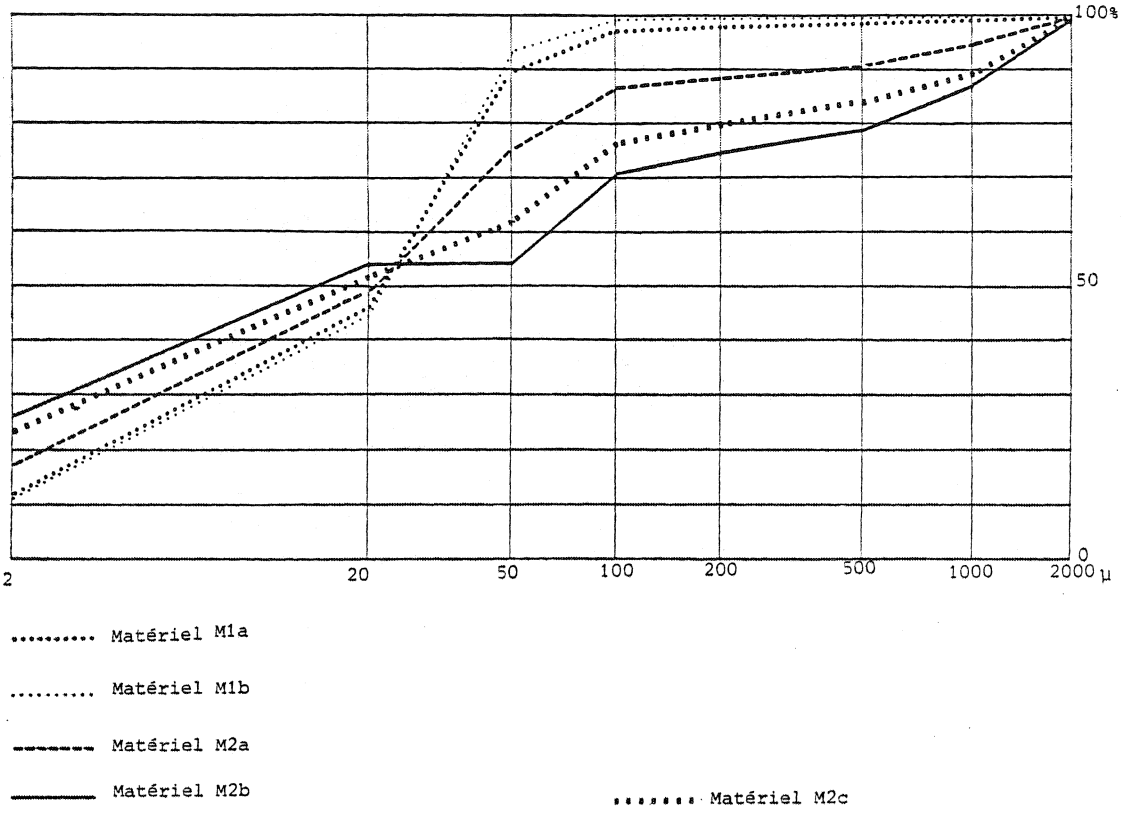


FIGURE 73: STE TREPHINE 2: COURBES GRANULOMETRIQUES CUMULATIVES DES DIFFERENTS MATERIAUX

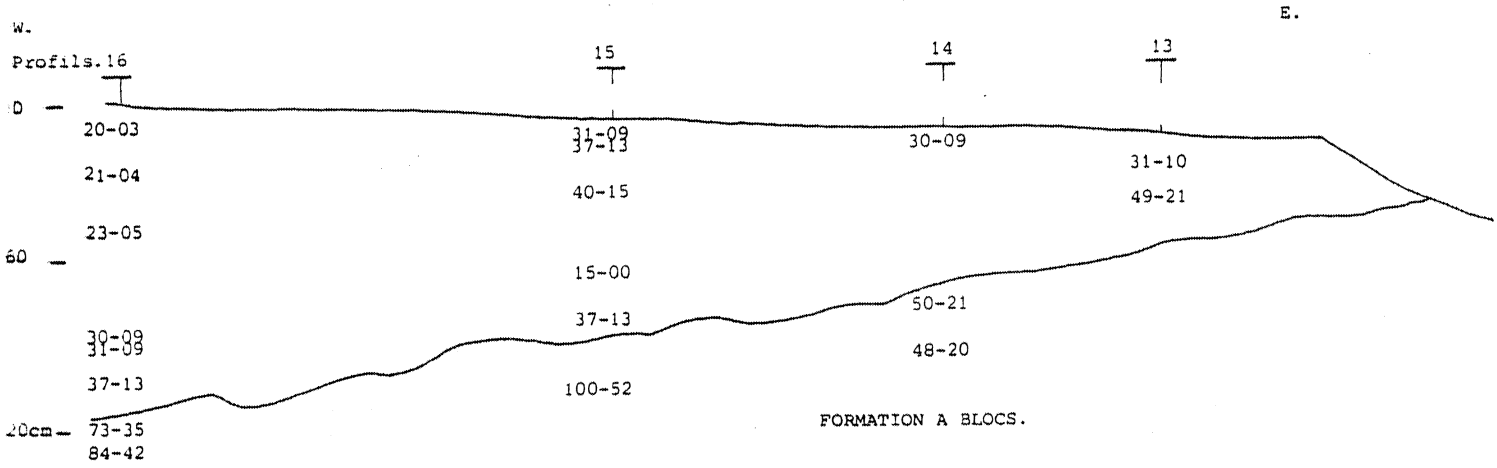


FIGURE 74: STE TREPINE 2: FOURCHETTES DES POURCENTAGES DE M.2

II - 3. La séquence de St Elouan

Pour la plupart des éléments chimiques (Fe , Mg exceptés), les variations indépendantes du mélange ne semblent pas directement liées aux horizons pédologiques. Aussi l'étude de cette séquence est-elle essentiellement abordée pour la question du mélange de matériaux; en particulier, les parts respectives de ce mélange et des actions pédogénétiques ne ne seront pas établies.

II - 3. 1. Les principales données des A.C.P.

Les deux échantillons qui ont été prélevés dans le niveau de cailloux situé à la base du P.1 (1E9) et dans l'altérite sous-jacente (1E10) ont été exclus des A.C.P. Celles-ci ne portent donc que sur 12 individus pour les données granulométriques et 7 pour les données chimiques. Ces faibles nombres ne sont justifiables que par les résultats du Sourn.

II - 3. 1. 1. Les données granulométriques

Les pourcentages d'inertie des principaux axes sont de :

1er axe : 73.7 %
2ème axe : 19.9 %
3ème axe : 4.4 %
4ème axe : 1.3 %

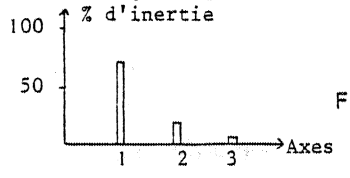


FIGURE 74

Les corrélations des variables aux trois premiers axes sont de :

	1 Axe	2 Axe	3 Axe
A	- .569	- .776	.270
LF	- .967	.208	.145
LG	.974	.219	.052
S1	.854	- .083	- .278
S2	- .904	- .122	- .331
S3	- .851	- .013	- .449
S4	- .923	- .095	- .218
S5	- .914	- .065	- .244

a) Le premier axe

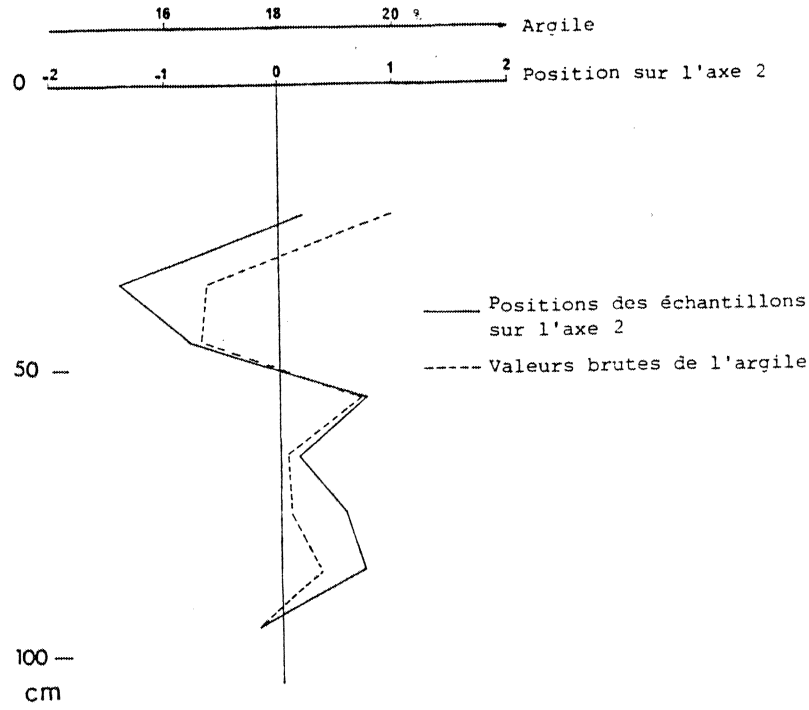
Un axe prépondérant se dégage. La plupart des variables s'y corrèlent. Il oppose les échantillons riches en L.G. et S1 à ceux riches en A , L.F. , S2 , S3 , S4 , S5 et constitue un indicateur synthétique de la texture. Comme les positions des échantillons sur cet axe déterminent les proportions relatives des matériaux M 1 et M 2 dans les divers é-

chantillons , on se reportera à la fig. 78, p. 182 pour étudier la répartition des textures. Comme dans les autres séquences, cette répartition est en enveloppes et les échantillons les plus riches en L.G. se situent au coeur de ces enveloppes; mais celles-ci s'ouvrent vers la partie amont. Or, cette séquence de St Elouan se situe le long d'une petite pente convexe et courte, contrairement à celles du Sourn et de Ste Tréphine qui sont plus longues et à tendance rectiligne ou concave. Il apparait évident que ce type de pente particulier est directement lié à la répartition des matériaux dans la séquence, ce qu'illustre le bloc-diagramme synthétisant la répartition des matériaux limoneux dans la région (fig. 80, p.188)

b) Le second axe

Le second axe représente,pour l'essentiel, les variations de l'argile indépendantes du premier axe. La corrélation de l'argile à cet axe est negative. Les positions des échantillons sur cet axe doivent donc constituer le négatif des variations pédologiques liées au lessivage; et, en effet, en reportant ces positions sur le P.1 (fig. 75), on obtient une courbe sigmoïde caractéristique d'un sol lessivé (notons que ceci apparait déjà au niveau des valeurs brutes d'argile)

FIGURE 75: ST ELOUAN P.1: EVOLUTION DE L'ARGILE,COMPARAISON DES TAUX BRUTS ET DES POSITIONS SUR L'AXE 2



II - 3. 1. 2. Les données chimiques

a) Les données chimiques étudiées seules

Les pourcentages d'inertie des différents axes sont :

1er axe	:	94 %
2ème axe	:	5.8 %
3ème axe	:	0.1 %
4ème axe	:	0.1 %

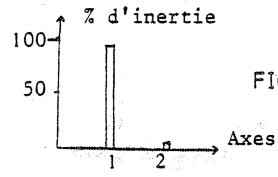


FIGURE 76

Les corrélations des variables aux deux premiers axes sont les suivantes :

	1 Axe	2 Axe
SiO_2	.998	- .074
Al_2O_3	- .981	- .188
Fe_2O_3	- .544	.836
MnO	.696	.555
MgO	- .361	.727
Na_2O	.616	.685
K_2O	- .740	- .639
TiO_2	- .090	- .793
P_2O_5	- .477	- .279

Le premier axe oppose donc principalement les échantillons riches en SiO_2 et Na_2O aux échantillons riches en Al_2O_3 et K_2O.A l'exception de P_2O_5, les variables qui se corrélent mal à cet axe (MgO , Fe_2O_3 ...) se corrèlent assez bien au second axe.

b) Les données chimiques et granulométriques

Une A.C.P. portant sur les données communes aux analyses chimiques et granulométriques met également en évidence deux axes principaux. Les pourcentages d'inertie de ces axes sont respectivement de 61,8 % et 32 % et la plupart des variables se corrèlent au premier axe, alors que les autres variables et notamment Fe_2O_3 MgO et l'argile se corrèlent au second axe .

II - 3. 1. 3. Conclusion

Ces quelques résultats, qu'il conviendra par la suite de confirmer par un échantillonage plus important, illustrent que, dans cette séquence également, deux facteurs naturels lient entre elles des diverses variables. L'un apparait correspondre à la différenciation pédologique (variation de l'argile, Fe_2O_3 et MgO); l'autre doit s'interpréter en terme de mélange.

II - 3. 2. Estimations des deux composants du mélange

Les diverses estimations des compositions des pôles du mélange ont été établies comme pour les séquences précédentes. La composition de M 2 apparaissant voisine de celle des altérites de schistes (fig. 76) et l'absence totale de L.G. peu plausible (M2b), un seuil minimal de 10 % a été introduit pour L.G. Cette valeur correspond, en effet, à la plus faible teneur observée dans les altérites de schistes (10.3 exactement, échantillon du P.6 prélevé entre 80 et 100 cm). La composition moyenne de ces altérites étant :

		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
composition moyenne de l'altérite	% bruts	21.2	51.2	14.2	4.1	2.2	2.1	2.4	2.6
	% cumulés		(72.4)	(86.6)	(90.7)	(92.9)	(95.0)	(97.4)	(100)

II - 3. 2. 1. Les résultats

Les estimations les plus compatibles avec les 12 données granulométriques sont les suivantes :

Matériel 1 : M 1

		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M1a borne du nuage	% bruts	17.3	37.5	32.1	7.9	1.1	1.7	1.2	1.1
	% cumulés		(54.8)	(86.9)	(94.8)	(95.9)	(97.6)	(98.8)	(99.9)
M1b annulation d'une composante	% bruts	15.2	33.3	39.8	9.4	0.5	1.2	0.5	0
	% cumulés		(48.5)	(88.3)	(97.7)	(98.2)	(99.4)	(99.9)	(99.9)

Matériel 2 : M 2

		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M2a borne du nuage	% bruts	20.1	43.0	21.7	6.0	2.0	2.3	2.2	2.6
	% cumulés		(63.1)	(84.8)	(90.8)	(92.8)	(95.1)	(97.3)	(99.9)
M2b annulation d'une composante	% bruts	25.9	54.5	0	1.9	3.9	3.5	4.3	5.8
	% cumulés		(80.4)		(82.3)	(86.2)	(89.7)	(94.0)	(99.8)
M2c LG = 10 %	% bruts	23.2	49.2	10.0	3.8	3.1	3.0	3.3	4.3
	% cumulés		(72.4)	(82.4)	(86.2)	(89.3)	(92.3)	(95.6)	(99.9)

Les estimations les plus compatibles avec les 7 données chimiques sont les suivantes :

Matériel 1 : M 1

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
M1a borne du nuage	79.6	12.4	3.72	0.04	0.86	0.78	2.23	0.89	0.07	0.41
M1b annulation d'une composante	87.5	5.6	2.24	0.04	0.69	0.96	1.50	0.88	0	0.57

Matériel 2 : M 2

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	$P2O_5$	CaO
M2a borne du nuage	72.6	16.9	4.7	0.01	0.98	0.66	2.72	0.90	0.13	0.31
M2b annulation d'une composante	70.1	18.9	5.1	0	1.03	0.61	2.93	0.90	0.15	0.27

Enfin, les estimations établies à partir des données communes à la granulométrie et à la chimie sont les suivantes :

Matériel 1 : M 1

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
M1a	18.2	37.0	31.8	8.0	1.1	1.5	1.1	1.1	77.4	13.1	4.18	0.04	0.93	0.79	2.24	0.88	0.07	0.37
M1b	19.1	32.0	39.1	9.1	0	0.5	0.1	0.03	80.7	10.0	4.3	0.06	0.97	0.93	1.75	0.84	0.03	0.36

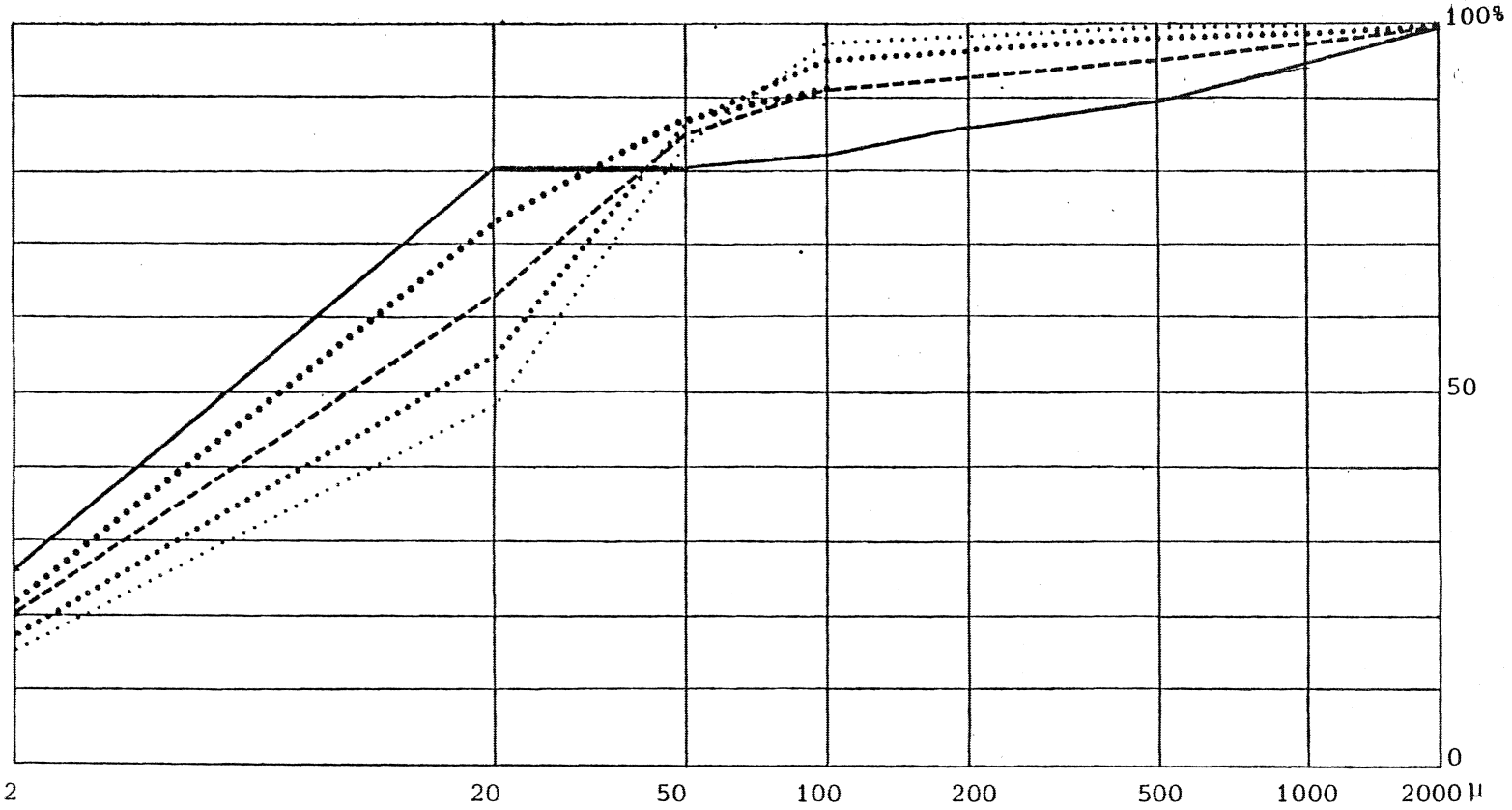
Matériel 2 : M 2

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	CaO
M2a	17.3	42.4	24	6.8	2.2	2.7	2.2	2.4	73.9	16.3	4.0	0.01	0.88	0.64	2.76	0.92	0.14	0.38
M2b	16.7	45.3	19.7	6.2	2.8	3.3	2.9	3.0	71.9	18.1	3.99	0	0.85	0.56	3.05	0.94	0.18	0.39

II - 3. 2. 2. Comparaison des diverses estimations

Les écarts les plus sensibles entre les diverses estimations apparaissent sur les variables qui se corrèlent peu au 1er axe : l'argile pour la granulométrie , Fe_2O_3 pour la chimie.

Il faut noter que, dans l'estimation de M2 établie à partir des données communes aux analyses chimiques et granulométriques, la variable qui s'annule est MnO, la teneur en LG étant alors de 19.7 %. Ceci signifierait que M2 ne peut contenir moins de 19.7 % de L.G. (seuil retenu 10 %). Il convient cependant de tempérer cette affirmation : MnO est en très faible quantité et une variation de 0.01 % sur MnO se traduit par une variation de 4.3 % sur L.G.



..... Matériel M1a

..... Matériel M1b

------- Matériel M2a

——— Matériel M2b

..... Schistes altérés

FIGURE 77: ST ELOUAN: COURBES GRANULOMETRIQUES CUMULATIVES DES DIFFERENTS MATERIAUX

II - 3. 3. Comparaison des constituants du mélange et des schistes altérés. Commentaire sur les proportions relatives M 1 - M 2.

L'échantillon de schistes altérés prélevé à la base du P.1 (1 E 10) a la composition suivante :

A	:	12.4 %	SiO_2	:	70.57 %
LF	:	54.9	Al_2O_3	:	18.33
LG	:	11.0	Fe_2O_3	:	4.62
S1	:	3.9	MnO	:	0.03
S2	:	4.2	MgO	:	1.09
S3	:	4.7	Na_2O	:	0.42
S4	:	3.3	K_2O	:	2.78
S5	:	5.6	TiO_2	:	1.08
			P_2O_5	:	0.08
			CaO	:	0.33

II - 3. 3. 1. comparaison M 2 - schistes altérés

Il n'apparait aucune différence notable entre les compositions chimiques estimées de M 2 et celles de l'échantillon 1 E 10. Du point de vue granulométrique, M 2 s'apparente également aux altérites de schistes fig. 76). Il renferme sensiblement plus d'argile que l'échantillon 1 E 10 (entre 5 et 10 % selon les estimations) ce qui semble indiquer qu'il est plus altéré que l'altérite qui s'observe à la base du P.1.

II - 3. 3. 2. Comparaison M 1 - schistes altérés

Par ses compositions granulométriques et chimiques, M 1 diffère des altérites de schistes : il renferme plus de L.G. et moins de L.F. et, du point de vue chimique, il contient 10 % de SiO_2 de plus que l'échantillon d'altérite 1 E 10 et , par contre, une quantité deux fois plus faible d'Al_2O_3. Ces différences de compositions chimiques indiquent que M 1 ne peutpas dériver des schistes par une simple fragmentation. S'il en dérivait par altération, il faudrait admettre alors que Al est l'élément le plus soluble étudié ici. Or, Al est précisément un élément peu soluble (cf. P. 148 . M 1 provient donc d'un apport.

II - 3. 3. 3. Les proportions relatives M 1 - M 2

Les proportions relatives de M 1 et M 2 pour tous les échantillons sont données en annexe. Les fourchettes proposées sont relativement larges. Ainsi l'échantillon qui contient le plus de matériel issu du substrat (M 2) en renferme entre 100 et 47 % (3 E 2) et l'échantillon qui en contient le moins en renferme entre 0 et 43 % (1 E 5). Si l'on consi-

dère que M 1 ne contient pas de fraction supérieure à 100 (ceci sera argumenté dans la synthèse) ce sont les chiffres 100 et 43 % qu'il faut retenir. Ceci montre que ces matériaux, bien que très limoneux, renferment peu d'apport.

II - 4. Conclusion

Les études de ces trois séquences, bien qu'elles portent parfois sur des nombres restreints d'échantillons, permettent de dégager les grands traits déjà mis en évidence au Sourn :

- le mélange entre 2 matériaux; l'un de ces matériaux est issu du substrat et l'autre provient d'un apport; leur répartition dans la séquence se présente en enveloppes et les échantillons qui renferment la plus forte quantité d'apport se situent au coeur de ces enveloppes;
- l'existence de variations indépendantes de ce mélange qui reflètent, plus ou moins fidèlement, la nature des horizons pédologiques et semblent, pour l'essentiel, induites par les phénomènes de lessivage.

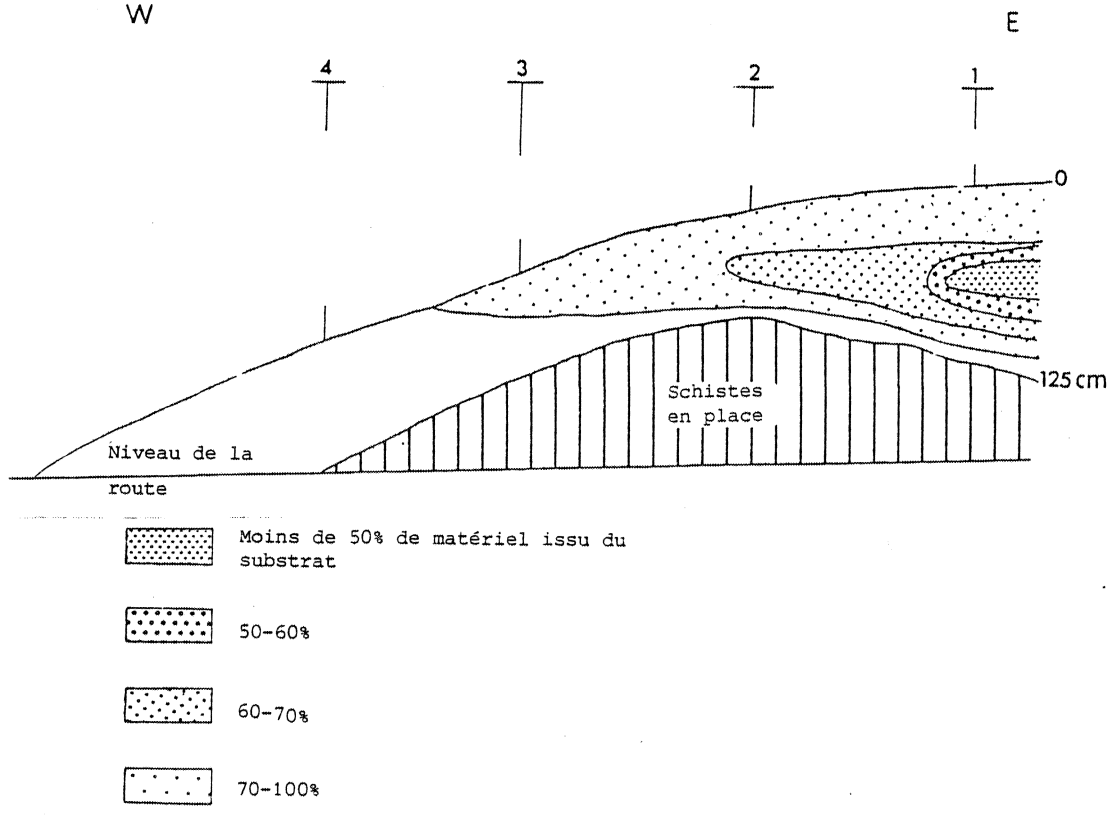


FIGURE 78: ST ELOUAN: REPARTITION DU MATERIEL ISSU DU SUBSTRAT

D) ORIGINE ET MISE EN PLACE DES MATÉRIAUX

Nous venons de démontrer que dans chaque séquence, les sols sont issus du mélange entre deux matériaux; l'un d'eux provient directement du substrat et l'autre a été apporté. Trois questions viennent naturellement à l'esprit :

- s'agit-il d'un même apport pour toutes les séquences ?
- quelle(s) est(sont) la(les) province(s) d'alimentation de cet(ces) apports ?
- comment, dans chaque séquence, le mélange, entre l'apport et les produits de l'altération du substrat, s'est-il effectué ?

Pour répondre à la première question, il est nécessaire de comparer les estimations de la composition de l'apport qui ont été établies à partir des données de chaque séquence; la mise en place des matériaux sera ensuite envisagée; enfin, une discussion méthodologique sera ouverte à propos de l'origine de l'apport.

I - COMPARAISON DES DIVERSES ESTIMATIONS DE LA COMPOSITION DE L'APPORT

I - 1. Introduction

Toutes les estimations qui ont été établies sont présentées dans le tableau X . Je rappelle que les estimations M1a correspondent aux bornes des nuages de points et les estimations M1b à l'annulation d'une composante. Parmi celles-ci, les estimations effectuées à partir des seules données chimiques ne sont mentionnées qu'à titre de référence car, comme nous l'avons vu, elles ne peuvent pas correspondre à une réalité concrète.

D'une séquence à l'autre, ce sont les différences entre les estimations établies à partir de l'annulation d'une composante granulométrique qui sont les plus faibles. La composante qui s'annule peut être, selon le cas soit S2, soit S3, soit S4, soit S5 et les trois autres sont alors proches de 0 (maximum 1.8 %). Ces résultats s'accordent bien avec ceux de l'étude morphologique et analytique (IIème partie). En effet, il a alors été constaté que l'apport est limité aux fractions inférieures à 100 µ . Ceci indique d'une part que dans les fourchettes qui concernent les proportions du mélange (cf. annexe), les pourcentages maxima de M2 sont les plus proches de la réalité et, d'autre part, que la comparaison des estimations de M1b doit être affinée.

	SAINT-ELOUAN				SAINTE-TREPHINE 1				SAINTE-TREPHINE 2		LE SOURN			
	A		B		A		B		A		A		B	
	M_1a	M_1b	M_1a	M_1b	Al_1a	M_1b	M_1a	M_1b	M_1a	M_1b	M_1a	M_1b	M_1a	M_1b
A	17,3	15,2	18,2	19,1	12	12,9	12,2	13,3	12,1	11,1	16,4	16,8	14,4	14,9
L. F.	37,5	33,3	37	32,0	29,1	29,9	29	23,9	33,1	33,5	31,4	32,4	29,8	31,5
L. G.	32,1	39,8	31,8	39,1	41,5	43,9	40,9	42,6	44,5	47,8	43,6	46,2	41,9	48,7
S_1	7,9	9,4	8	9,1	10,4	9,9	10,5	10,1	7,4	6,7	3,9	3,6	3,8	3,0
S_2	1,1	0,5	1,1	0	1,3	0,6	1,3	0,7	0,5	0,3	0,85	0,3	1,3	0,2
S_3	1,7	1,2	1,5	0,5	2,3	1,3	2,7	1,8	0,6	0,4	1,1	0	3,0	0,6
S_4	1,2	0,5	1,1	0,1	2,1	1,3	2,2	1,5	0,8	0,2	1,4	0,4	2,4	0
S_5	1,1	0	1,7	0,03	0,9	0	1,0	0	0,9	0	1,2	0,2	3,1	1
SiO_2	78,6	(87,5)	77,4	80,7	82,21	(85,64)	81,53	81,79			81,1	(88,0)	80,6	84,1
Al_2O_3	12,4	(5,6)	13,1	10,0	9,96	(6,80)	10,46	10,46			10,5	(5,1)	10,8	8,0
Fe_2O_3	3,72	(2,24)	4,18	4,3	3,22	(3,05)	3,36	3,39			3,1	(2,6)	3,3	3,2
MnO	0,04	(0,04)	0,04	0,06	0,05	(0,08)	0,05	0,05			0,06	(0,07)	0,06	0,07
MgO	0,86	(0,69)	0,93	0,97	0,60	(0,52)	0,52	0,62			0,56	(0,49)	0,60	0,60
Na_2O	0,78	(0,96)	0,79	0,93	0,88	(1,00)	0,86	0,88			1,18	(0,83)	1,2	1,0
K_2O	2,23	(1,50)	2,24	1,75	1,90	(1,80)	1,91	1,90			2,28	(1,3)	2,3	1,8
TiO_2	0,89	(0,88)	0,88	0,84	0,91	(0,99)	0,89	0,88			0,86	(1,0)	0,86	0,94
P_2O_5	0,07	(0)	0,07	0,03	0,04	(0)	0,06	0,05			0,06	(0)	0,06	0,02
CaO	0,41	(0,57)	0,37	0,36	0,23	(0,13)	0,24	0,23			0,24	(0,25)	0,24	0,24

A : granulométrie et chimie séparée

B : granulométrie et chimie simultanée

M_1a : borne du nuage de points

M_1b : annulation d'une composante

TABLEAU X : RÉCAPITULATION DES DIVERSES ESTIMATIONS DE L'APPORT.

I - 2. Les compositions chimiques

Les trois estimations M1b des compositions chimiques sont très voisines .

a) Les différences les plus sensibles apparaissent entre celle du Sourn d'une part et celles de St Elouan et Ste Tréphine 1. Ainsi, au Sourn, l'apport renfermerait de 2.5 à 3.5 % de SiO_2 de plus que celui de St Elouan ou Ste Tréphine et 2 % d'Al_2O_3 en moins. Comme ces estimations sont ponctuelles, la signification de ces différences est difficile à préciser. Remarquons qu'elles ne sont que légèrement supérieures à celles qui existent entre les 2 estimations de M1a à St Elouan. Il n'est donc pas justifié de considérer que l'apport au Sourn diffère, du point de vue chimique, de celui mis en évidence dans les autres séquences.

b) D'autre part, les pourcentages de Fe_2O_3 et MgO sont sensiblement plus forts à St Elouan que dans les deux autres séquences (respectivement 4.3 % au lieu de 3.3 % et 0.97 % au lieu de 0.60 %). Or, ces deux éléments présentent une faible corrélation au 1er axe et il est probable que les remaniements postérieurs au mélange ayant été trop importants, leurs estimations sont biaisées (cf. partie théorique).

c) Les estimations établies à partir des données des diverses séquences ne peuvent pas être considérées comme différentes. La composition chimique de l'apport doit être considérée comme homogène à l'échelle de la région étudiée. Elle présente même des analogies avec celle des loess du Nord de la France; un échantillon typique renfermant, par exemple, selon JAMAGNE (1973, p. 130) : "échantillon du Vermond 687"

SiO_2	79.66	TiO_2	0.38	MgO	0.65
Al_2O_3	10.34	P_2O_5	0.19	K_2O	2.22
Fe_2O_3	2.95	MnO	0.10	Na_2O	1.28
FeO	0.66	CaO	0.82		

Les principales différences portent sur TiO_2 (0.32 au lieu de 0.9) et CaO (0.82 au lieu de 0.2) ce qui pourrait signifier que l'apport du Sourn est relativement ancien (JAMAGNE, communication personnelle).

I - 3. Les compositions granulométriques

Les estimations qui concernent la granulométrie présentent, globalement, les mêmes caractéristiques: forte teneur en limons avec prédominance de L.G., annulation quasi simultanée de S2, S3, S4, S5. Les différences entre les estimations semblent, cependant, plus importantes que celles observées pour la chimie.

Pour les raisons énoncées au sujet de Fe_2O_3 et MgO, les écarts qui existent sur l'argile doivent s'interpréter avec prudence (on notera d'ailleurs, qu'il y a environ 4 % de

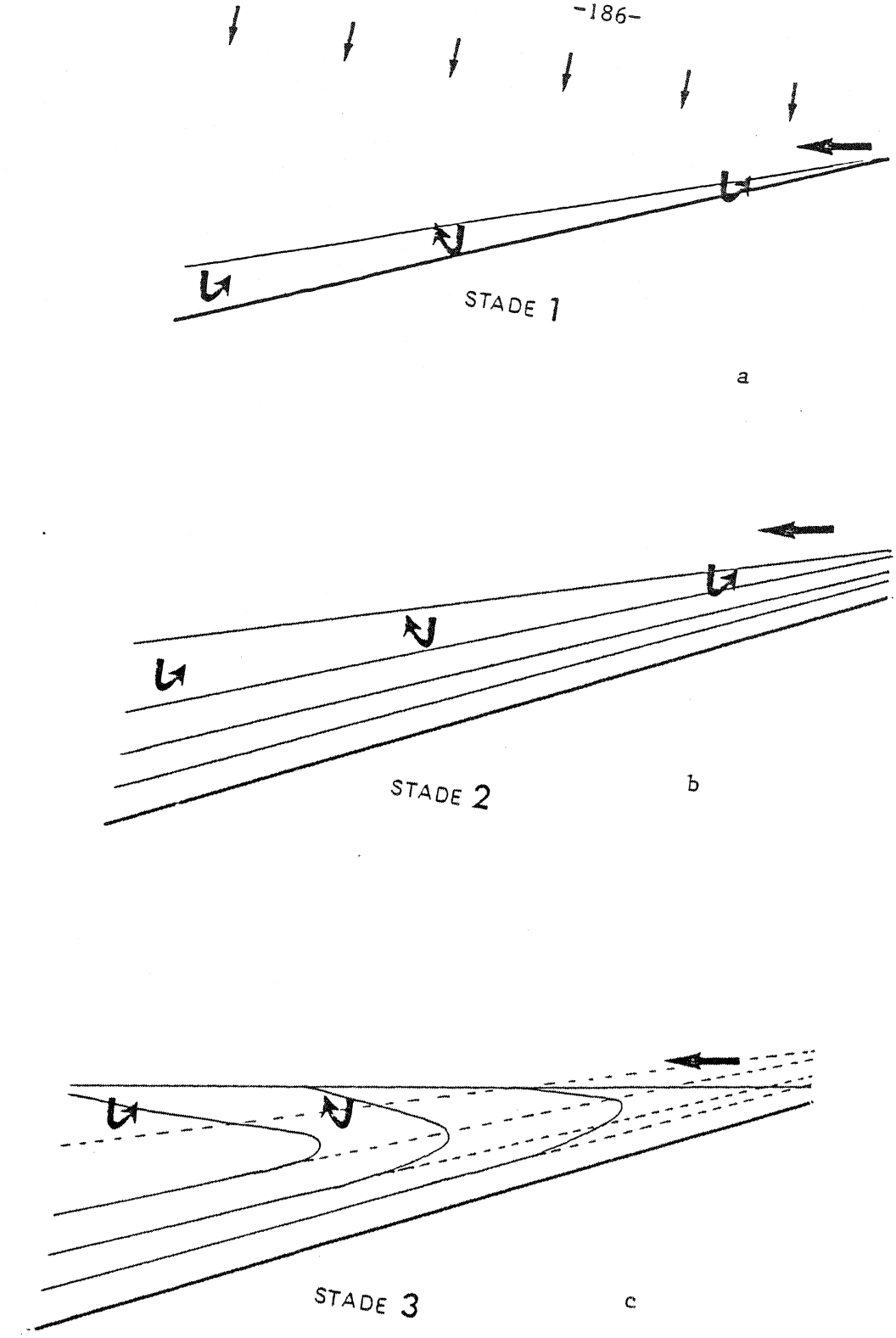


FIGURE 79: MISE EN PLACE DES MATERIAUX

différence entre les deux estimations Mlb à St Elouan). Ces réserves étant faites, il apparait indéniable que l'estimation du Sourn se distingue de celles de St Elouan et Ste Tréphine 1 par ses faibles teneurs en Sl et, dans une moindre mesure, par ses très fortes teneurs en L.G. Ceci signifierait que le grain moyen de l'apport est légèrement plus faible dans la séquence du Sourn que dans les autres. Cette remarque sera mieux perçue lors de la discussion sur la province d'alimentation de l'apport.

I - 4. Conclusion

A l'échelle de la région d'étude, la composition chimique de l'apport apparait homogène et le grain moyen de cet apport légèrement plus fin au Sud (le Sourn) qu'au Nord (St Elouan - Ste Tréphine).

II - LA MISE EN PLACE DES MATERIAUX

La répartition globale des matériaux est en "enveloppes". Les échantillons les plus riches en apport se situent au coeur de ces enveloppes qui s'ouvrent vers l'aval au Sourn et à Ste Tréphine et vers l'amont à St Elouan. Cette disposition, bien qu'apparemment complexe, peut s'expliquer assez simplement.

En effet, l'apport est relativement homogène sur au moins les 50 km^2 de la zone étudiée et est présent indépendamment de la topographie, ce qui ne semble être compatible qu'avec une mise en place sous l'action du vent. L'aspect concave de la courbe cumulative (je rappelle que les niveaux les plus limoneux qui ont été étudiés par densimétrie montrent deux inflexions, l'une à 10 et l'autre à 80 µ , p.54) , l'absence de fraction supérieure à 100 µ traduisent d'ailleurs un tri éolien.

Ainsi, au fur et à mesure de son dépôt, le matériel éolien est mélangé aux produits issus du substrat, ceci à la fois par érosion et par l'ensemble des mouvements plus ou moins verticaux (ou de convexions) qui existent au sein des niveaux superficiels d'une formation meuble (pédoturbation). Les déplacements latéraux dus à l'érosion font que, dès les premiers stades, l'épaisseur du matériel croît de l'amont vers l'aval et, de façon plus générale, des zones de forte érosion vers les zones de faible érosion ou d'accumulation (fig. 79 a). Au début, la quantité de matériel issu du substrat est évidemment dominante, puis, peu à peu, la masse des produits d'apport augmente et les proportions s'inversent. Ceci explique la croissance du pourcentage d'apport de la base au sommet dans les parties inférieures des formations meubles. Lorsque l'apport cesse, il ne se produit plus que les déplacements latéraux et subverticaux (fig. 79 b). Ceux-ci conduisent au décapage des zones amont et à une redistribution des produits vers les zones aval. Leur caractère progressif permet aux matériaux déplacés d'être intégrés au reste de la couverture par la pédoturbation. Il en résulte une répartition sous forme d'enveloppes de matériaux le long du versant (fig. 79 c). Le bloc diagramme (fig.80) propose une disposition des enveloppes qui tient compte des grands traits de la topographie.

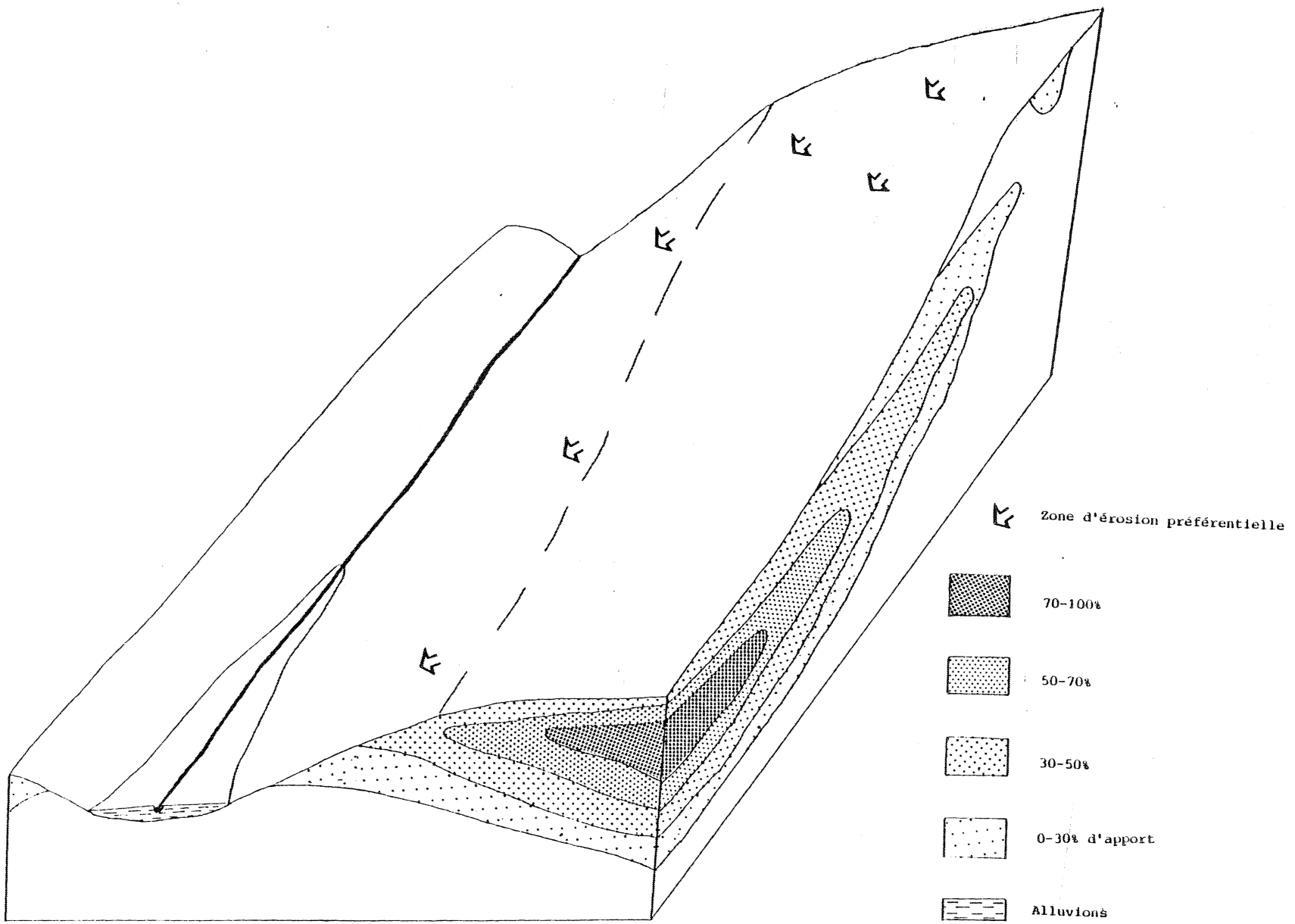


FIGURE 80: BLOC DIAGRAMME SYNTHETISANT LA REPARTITION DES MATERIAUX

III - ORIGINE DE L'APPORT

Nous venons de voir que l'apport doit être considéré comme étant d'origine éolienne. De plus, le glaucophane indique que sa province d'alimentation est assez lointaine; pour la localiser, il serait intéressant d'évaluer l'épaisseur des formations limoneuses et de grain moyen de l'apport (SMITH, 1942 in KRUMBEIN & SLOSS, 1956). Il semble que l'épaisseur des formations limoneuses va, dans le Massif Armoricain, en décroissant du Nord vers le Sud. Mais, le mélange et les phénomènes de versants empêchent de préciser l'épaisseur de l'apport et il est indispensable de se fonder sur le grain moyen. Seul, le traitement par le modèle de mélange, des données provenant de divers points le permettrait. Une telle étude sort du cadre de ce mémoire. Je me bornerai à constater que le grain moyen est de :

- 40µ environ dans les loess récents de la région de St Brieuc (MONNIER, 1973)
- 30µ dans les formations les plus limoneuses de la région de Quintin (PLIHON, 1974)
- 20µ pour l'apport en Bretagne centrale avec un léger affinement vers le Sud.

Ces quelques faits sont en faveur d'une origine septentrionale mais seule une étude plus complète à l'échelle du Massif Armoricain, au moins, permettrait de localiser de façon rigoureuse la province d'alimentation

*

* *

E - CONCLUSION A L'ESSAI DE MODÉLISATION

Le traitement, par un modèle de mélange, des données granulométriques et chimiques de quatre séquences, montre que les caractéristiques actuelles des sols limoneux de Bretagne centrale résultent de deux phénomènes principaux :

- le mélange de deux matériaux : l'un est issu du substrat, l'autre est un limon éolien. Le mélange, qui apparait comme le facteur prédominant, se concrétise par des variations généralement importantes mais progressives et continues. L'architecture qu'il confère aux matériaux est en enveloppes et est indépendante des différenciations pédologiques observables.
- les actions pédogénétiques. Elles tendent à individualiser des horizons, c'est-à-dire à conférer une architecture discontinue : à l'intérieur d'un horizon donné, les caractères sont identiques et ils diffèrent d'un horizon à l'autre. A long terme, ceci conduit à effacer les propriétés issues du mélange; celles-ci ne sont déjà plus apparentes (sur les valeurs brutes) en ce qui concerne l'argile, Fe_2O_3, MgO et, en règle générale, dans tous les cas où les différences entre les deux matériaux initiaux sont plus faibles que les remaniements dus aux actions pédogénétiques (cf. le K_2O de Ste Trephine).

QUATRIEME PARTIE

CONCLUSION

Cette étude des formations limoneuses de Bretagne centrale a été menée en deux étapes autonomes dont les conclusions se corroborent et se complètent.

I - UNE APPROCHE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE

Dans un premier temps, l'étude morphologique et analytique (lames minces - minéraux lourds - éléments majeurs et traces) de profils et de séquences a permis de mettre en évidence, en chaque station, les influences combinées de :

- un matériel d'apport qui se limite aux fractions inférieures à 100 µ et dont la province d'alimentation est probablement lointaine;
- de produits issus du substrat qui peuvent être strictement en place ou provenir de l'amont;
- une différenciation pédologique postérieure au mélange.

II - UN ESSAI DE MODELISATION

Dans un second temps, le traitement, par un modèle de mélange, des données de trois séquences représentatives, a permis d'estimer, en chaque station, les compositions des 2 constituants du mélange. Ces estimations effectuées, il a alors été possible :

- de démontrer que l'un de ces matériaux est un apport limoneux éolien dont la composition est homogène à l'échelle de la région étudiée, alors que l'autre provient de l'altération du substrat ;

- de préciser les proportions relatives de l'apport et du substrat dans chaque échantillon ;

- de mettre en évidence des variations d'argile et d'éléments chimiques (Si , Al , Fe , Mg , K , Na) liées à la nature des horizons pédologiques ce qui montre que les processus d'éluviation et d'illuviation sont prédominants dans ces sols;

- d'évaluer les parts respectives du mélange et des actions pédogénétiques dans les variations des mesures.

III - PERSPECTIVES

Le principal intérêt de cette étude réside, à mon avis, dans l'essai de modélisation. Dans toutes les régions où des formations hétérogènes se développent et, en particulier dans les régions marquées par les apports limoneux, le modèle proposé devrait être utilisé avec succès. Ainsi, il ouvre des perspectives qui semblent particulièrement intéressantes :

- sur le plan pédologique : il est possible d'estimer la composition d'un sol à l'issue du mélange et par comparaison avec sa composition actuelle, d'étudier les transformations postérieures (pédogenèse) ;

- sur le plan sédimentologique : il est possible d'estimer, à l'échelle d'une région, la composition de l'apport en différents lieux, ce qui peut contribuer à localiser sa province d'alimentation.

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

B I B L I O G R A P H I E

AUROUSSEAU P., 1976 - Morphologie et genèse des sols sur granite du Morvan. Thèse Ing. Doc. Univ. Rennes, 210p.

AUROUSSEAU P., CURMI P., LE CALVEZ - LE BARS Y., et ROUSSEL F., 1978 - Characterisation of deep horizons in catenas with podzolic surface development. Proc. of 11th Congress. ISSS Vol. 1, Edmonton, Canada p. 220-221.

BAGNOLD R.A., 1960 - The physics of blown sand and desert dunes. London, Methuen, XXIV, 266 p.

BARROIS Ch., 1897 - Sur l'extension du limon quaternaire en Bretagne. Extrait Ann. Soc. Géol. du Nord, T. XXVI, p. 33-44.

BARSHAD I., 1966 - The effect of a variation in precipitation on the nature of clay mineral formation in soils from acid and basic igneous rocks. Proc. of the Int. Clay Conference, I, Jerusalem, Israel, p. 167-173.

BAULIG H., 1933 - A propos du relief armoricain et de l'origine du loess breton. B.A.G.F. n° 67, p. 51-55.

BERTHOIS L., 1937 - Contribution à l'étude des limons de Bretagne. Bull. Soc. Scient. de Bretagne, t. XIV, n° 1-2, p. 53-62.

BERTHOIS L. et MILON Y., 1932 - Note préliminaire sur l'origine des limons quaternaires du Finistère. C.R.S. S.G.F., p. 54-56.

BOULBIN M., 1976 - Les sols de la forêt de Rennes et l'influence des incendies sur leurs propriétés morphologiques et physico-chimiques. Thèse 3ème cycle, Rennes. 127 p.

BOURRIE G., 1976 - Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré. Application au granite des Vosges et de la Margeride. Thèse Ing. Doc. Univ. Strasbourg. 215 p.

CAILLEUX A., 1938 - Cailloux éoliens et solifluxion en France et en Europe septentrionale. Bull. Soc. Geol. France. 5ème série, p. 719-730.

CAILLEUX A. et TAYLOR, 1954 - Cryopédologie. Etude des sols gelés. Hermann et Cie, ed. 218 p.

CAMEZ T., 1962 - Etude sur l'évolution des minéraux argileux dans les sols des régions tempérées. Mem. Serv. Carte Geol. Alsace-Lorraine, Strasbourg, 20, 90 p.

CAMEZ T., FRANC DE FERRIERE P.J.J., LUCAS J. et MILLOT G., 1960 - Sur l'importance de la vermiculite dans certains sols tempérés et dans les dépôts du quaternaire ancien. C.R.A.S., 250, p. 3038-3041.

CARNET C., 1978 - Bocage : Sols et Eaux. T. II. Etude des sols et de leur régime hydrique en région granitique de Bretagne : une approche du rôle du bocage. Thèse 3ème cycle, Rennes. 235 p.

COLLIER D., 1961 - Mise au point sur les processus de l'altération des granites en pays tempéré. Ann. Agron., 12, 3, p. 273-331.

COLLIN L., 1913 - Evolution de la côte Nord du Finistère pendant l'époque quaternaire. Bull. Soc. Sc. Nat. Ouest de la France, 3ème série, III, p. 18-24.

COPPENET M. et RAMPON A., 1969 - Contribution à l'étude des sols granitiques et schisteux de Bretagne. Le bassin versant du Blavet. Ann. Agron. 18, 5, p. 455-484.

CURMI P. - Une séquence de sol sur granite de Pontivy : morphologie et genèse. A paraitre.

DEJOU J., 1958 - Etude comparative des phénomènes d'altération sur granite porphyroïde de Lormes et sur anatexites à cordiérite du Morvan Nord et sols qui en dérivent. Thèse ClermontFerrand, 164 p.

DEJOU J., GUYOT J., MORIZET J., CHAUMONT C. et ANTOINE H., 1970 - Etude de l'évolution superficielle des micaschistes à deux micas de la région de Berzac-Trezennes (Hte Vienne). Bull. AFES, n° 3, 1970, 27 p.

DENOY C., DREYFUS C., OLIVIER J.R., TOUTLEMONDE D. et ZUPAN D. , 1976 - Les bases pédologiques de l'aménagement des communes de Mûr de Bretagne et de Saint Aignan. Mem. DEA - DAA; SDS 55; ENSA Rennes, 247 p.

DERRUAU M., 1972 - Précis de géomorphologie. 5ème édition, 2ème tirage, Masson et Cie ed. 415 p.

DUCLOUX et NIJS R., 1974 - Influence de la pédogenèse sur les associations des minéraux lourds des sols sur sédiments pleistocènes de la Vendée méridionale (région du Marais Poitevin et bordures - France). Bull. AFES, n° 4, p. 247-257.

ESTEOULE J., ESTEOULE-CHOUX J. et PERRET P., 1972 - Etude des formations superficielles du Massif Armoricain : caractères distinctifs et passages des altérites et des dépôts tertiaires aux formations quaternaires. Bull. Soc. Min. Bret. Rennes, C. IV, 2, p. 96-106.

FOLK R., 1968 - Petrology of sedimentary rocks. The University of Texas Geology, 370 K, 383 L, 383 M, 170 p.

GUILCHER A., 1948 - Le relief de la Bretagne méridionale de la Baie de Douarnenez à la Vilaine. La Roche s/ Yon, Potier ed., 682 p.

GUILCHER A. et GIOT R., 1969 - Livret-guide de l'excursion C 16 Bretagne - Anjou, VIII° Cong. INQUA, Paris, 76 p.

GUILLAUME-BRUNO S., 1972 - Le Plio-Quaternaire des côtes du Morbihan. Etude sédimentologique et stratigraphique. Thèse 3ème cycle, Paris Sud, Centre d'Orsay, 121 p.

HAMEURT J., 1961 - Etude géologique et pétrographique du Massif granitique de Pontivy. Thèse Univ. Nancy. 132 p.

JACKSON M.L., GILLETTE D.A., DANIELSEN E.F., BLIFFORD I.H., BRYSON R.A. et SYERS J.K., 1973 - Global dustfall during the quaternary as related to environments. Soil Sc., v. 116, n° 3, p. 135-145.

JAMAGNE M., 1973 - Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France. Thèse Fac. Gembloux (Belgique), 445 p.

KRUMBEIN et SLOSS, 1956 - Stratigraphy and sedimentation. Freeman and Co, ed. San Francisco, California, 497 p.

LAUTRIDOU J.P., 1969 - Colloque sur les limons du Bassin de Paris. Commission de terminologie des limons. Mem. h. série S.G.F., 5, p. 123-137.

LE CALVEZ - LE BARS Y., 1977 - Les podzols et leurs horizons sous-jacents sur les grès armoricains de Mur de Bretagne. Mem. D.E.A. SDS 90, ENSA et Fac. Sci. Rennes, 104 p.

LE CALVEZ L. et MARHIC Y., 1976 - Caractérisations détaillées de quelques sols de la région de Mûr de Bretagne. Relations avec les roches sous-jacentes. Mem. D.E.A., SDS 54, ENSA et Fac. Sci. Rennes, 89 p.

LE CORRE C., 1978 - Approche quantitative des processus synschisteux : l'exemple du segment hercynien de Bretagne centrale. Thèse Rennes, 381 p.

MELOU M., 1968 - Contribution à l'étude sédimentologique du Quaternaire sud-finistérien. L'anse de Trez-Rouz et la ria de l'Odet. Thèse 3ème cycle, Paris-Orsay, 81 p.

MILLOT G., 1964 - Géologie des argiles. Masson Paris ed., 499 p.

MILON Y. et DANGEARD L., 1928 - Sur l'importance des phénomènes de solifluxion en Bretagne pendant le Quaternaire. C.R.A.S. Paris, t. 187, p. 136.

MONNIER J.L., 1973 - Contribution à l'étude des dépôts quaternaires de la région de St Brieuc. Thèse 3ème cycle, Rennes, 259 p.

MOSSER C.,1978 - Le problème de la permanence des éléments en traces dans l'altération argileuse des roches éruptives et volcaniques. C.R.A.S. Paris, t. 286, p. 1187-1190.

PEDRO G., 1964 - Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Thèse, Paris, 344 p.

PLIHON G., 1974 - Les formations meubles sur les granites de Bonnemain et de Quintin (Massif Armoricain). Arènes, arènes remaniées et limons. Thèse 3ème cycle, Rennes, 138 p.

RAMBAUD D. et PINTA M., 1970 - Sur la répartition et la concentration de quelques éléments à l'état de traces dans des profils de sols ferrallitiques : leur rapport avec la granulométrie. C.R.A.S. Paris, t. 270, p. 2426-2429.

RAMPON, 1971 - Contribution à l'étude des facteurs du bilan de l'eau : les bassins versants élémentaires représentatifs du Blavet. C.T.G.R.E.F. Antony, t. 1 : texte, 354 p. t. 2 : planches.

REYNAUD J., 1848 - Mémoire sur les embouchures de la rivière de Pontrieux. C.R.A.S. Paris, p. 218.

RUELLAN A., 1970 - Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes : les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya (Maroc Oriental). Mem. ORSTOM, n° 54, 302 p.

SAGON J.P., 1976 - Contribution à l'étude géologique de la partie orientale du bassin de Chateaulin (Massif Armoricain) : stratigraphie, volcanisme, métamorphisme, tectonique. Thèse Univ. Paris VI, t. I : texte, 671 p; t. II, fig.

SEDDOH F., 1973 - Altération des roches cristallines du Morvan. Mem. Géol. de l'Univ. de Dijon, 376 p.

SOUCHIER B., 1971 - Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges). Thèse Univ. Nancy, 133 p.

TARDY Y., 1969 - Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Strasbourg. Mem. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine, n° 31, 199 p.

VON ENGELHARDT W., 1977 - The origin of sediments and sedimentery rocks. Sedimentary Petrology Part III. Trad. de W.D. JOHNS. J. Wiley and sons ed., 360 p.

WEST R.G., 1972 - Pleistocene geology and biology. Longman, London, 378 p.

YAALON D.H. et GANOR E., 1973 - The influence of dust on soils during the Quaternary. Soil Sc., v. 116, n° 3, p. 146-155.

ANNEXES

ST ELOUAN .

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M2c	23.23997	49.19247	10.00002	3.80283	3.06431	2.99823	3.34659	4.35
M2a	20.08348	42.95695	21.74068	6.01123	2.04400	2.31051	2.21216	2.64114
M1a	17.30450	37.46719	32.07718	7.95550	1.14572	1.70503	1.21345	1.13096
M1b	15.22336	33.35596	39.81812	9.41156	.47301	1.25160	.46551	.00000

		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	PROPORTION DE M2 Max.	PROPORTION DE M2 Min.
1E1	teneur reelle	20.00	40.70	25.70	6.10	1.70	1.90	1.90	2.00	.792	.298
	teneur estimée	19.07	40.96	25.49	6.71	1.71	2.09	1.84	2.09		
1E2	teneur réelle	16.70	43.39	28.00	6.20	1.00	1.30	1.50	1.90	.715	.237
	teneur estimée	18.71	40.24	26.83	6.97	1.60	2.01	1.71	1.89		
1E3	teneur reelle	16.60	40.20	30.80	7.40	1.00	1.40	1.60	1.00	.529	.083
	teneur estimée	17.79	38.44	30.23	7.60	1.30	1.81	1.39	1.39		
1E4	teneur réelle	19.39	36.39	31.30	8.00	1.30	1.50	.90	1.10	.456	.023
	teneur estimée	17.44	37.74	31.56	7.85	1.19	1.73	1.26	1.20		
1E5	teneur réelle	18.10	36.70	32.00	7.50	1.30	2.10	1.20	1.10	.429	.000
	teneur estimée	17.30	37.46	32.07	7.95	1.14	1.70	1.21	1.13		
1E6	teneur reelle	18.10	37.30	29.20	9.20	1.30	1.80	1.60	1.50	.539	.091
	teneur estimée	17.84	38.53	30.06	7.57	1.32	1.82	1.40	1.42		
1E7	teneur reelle	18.60	37.80	26.89	7.60	2.00	2.50	1.80	2.80	.667	.195
	teneur estimée	18.46	39.76	27.75	7.14	1.52	1.95	1.63	1.76		
1E8	teneur réelle	17.60	41.30	24.20	7.10	2.50	3.10	2.30	1.90	.836	.334
	teneur estimée	19.28	41.38	24.69	6.56	1.78	2.13	1.92	2.20		
2F1	teneur réelle	19.50	41.70	24.50	5.80	1.70	2.30	1.90	2.60	.860	.353
	teneur estimée	19.40	41.61	24.26	6.48	1.82	2.16	1.96	2.27		
2F2	teneur réelle	16.80	42.50	28.20	6.20	1.30	1.80	1.60	1.60	.693	.217
	teneur estimée	18.59	40.01	27.27	7.05	1.56	1.98	1.67	1.83		
3F1	teneur réelle	21.60	41.89	22.50	6.10	2.00	2.10	1.80	2.00	.954	.434
	teneur estimée	19.88	42.55	22.49	6.15	1.97	2.26	2.13	2.53		
3E2	teneur réelle	20.89	41.80	21.20	5.90	1.90	2.10	2.30	2.90	1.000	.468
	teneur estimée	20.08	42.95	21.74	6.01	2.04	2.31	2.21	2.64		

STE TREPHINE 2.

		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M2	c	23.01137	28.84868	10.00002	14.67646	3.37045	3.28587	6.38906	10.37430
	a	17.81703	30.86584	26.49101	11.21461	2.02685	2.01569	3.70718	5.84427
M1	a	12.13545	33.07222	44.52893	7.42803	.55722	.62637	.77373	.88931
	b	11.11573	33.46822	47.76634	6.74843	.29345	.37702	.24724	.00000

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	Prop. de M2 Max.	Prop. de M2 Mín.
11T1	7.20000	29.39999	42.50000	10.80000	1.50000	1.40000	2.30000	4.90000		
	12.90705	32.77258	42.07925	7.94228	.75681	.81505	1.17212	1.56223	.26	.07
11T2	8.30000	32.89999	42.39999	10.90000	1.20000	1.20000	1.60000	1.50000		
	12.64761	32.87332	42.90292	7.76937	.68970	.75161	1.03817	1.33597	.22	.04
11T3	10.70000	35.00000	39.60001	9.20000	1.00000	1.20000	1.40000	1.90000		
	13.39088	32.58469	40.54320	8.26473	.88196	.93336	1.42192	1.98418	.33	.11
11T4	12.00000	33.60001	38.10001	8.50000	1.30000	1.40000	2.00000	3.10000		
	13.98505	32.35394	38.65683	8.66072	1.03565	1.07866	1.72869	2.50236	.42	.17
11T5	14.00000	32.60001	38.50000	8.70000	.80000	1.10000	1.70000	2.60000		
	14.02076	32.34009	38.54346	8.68452	1.04488	1.08739	1.74713	2.53350	.43	.17
11T6	17.60001	28.30000	38.20000	8.80000	.90000	1.10000	2.00000	3.10000		
	14.55908	32.13103	36.83438	9.04330	1.18413	1.21902	2.02507	3.00298	.51	.22
11T7	18.39999	28.50000	37.50000	8.90000	.70000	.70000	2.40000	2.90000		
	14.78467	32.04343	36.11818	9.19364	1.24248	1.27419	2.14155	3.19971	.54	.24
12T1	15.80000	32.39999	38.00000	7.60000	.80000	1.10000	1.60000	2.70000		
	14.23650	32.25630	37.85854	8.82831	1.10069	1.14014	1.85852	2.72165	.46	.19
12T2	12.30000	33.30000	41.00000	8.40000	.90000	.80000	1.60000	1.70000		
	13.16383	32.67285	41.26401	8.11341	.82323	.87784	1.30470	1.78617	.30	.09
12T3	12.40000	34.00000	39.89999	8.10000	.80000	.90000	1.30000	2.60000		
	13.45609	32.55936	40.33615	8.30819	.89882	.94931	1.45559	2.04105	.34	.12
12T4	14.00000	32.30000	41.00000	8.30000	.80000	.70000	1.40000	1.50000		
	13.29586	32.62158	40.84485	8.20141	.85738	.91013	1.37286	1.90131	.32	.10
12T5	15.10000	31.30000	41.30000	8.30000	.90000	.80000	1.50000	1.80000		
	13.30778	32.61696	40.80702	8.20935	.86046	.91304	1.37902	1.91171	.32	.10
12T6	14.10000	30.50000	40.80000	8.20000	1.00000	.90000	1.60000	2.90000		
	13.51352	32.53706	40.15382	8.34647	.91368	.96335	1.48524	2.09114	.35	.12
12T7	14.80000	30.00000	39.20000	7.80000	1.60000	1.70000	1.80000	3.10000		
	14.00741	32.34526	38.56562	8.67563	1.04143	1.08413	1.74024	2.52186	.43	.17
13T1	9.80000	36.30000	39.60001	7.20000	1.20000	1.70000	1.50000	2.90000		
	13.24744	32.64040	40.99858	8.16914	.84485	.89829	1.34786	1.85908	.31	.10
13T2	14.30000	34.70000	36.60001	7.90000	.90000	1.10000	1.60000	2.90000		
	14.42762	32.16208	37.25175	8.95568	1.15012	1.18688	1.95720	2.88833	.49	.21
14T1	12.00000	36.20000	40.20000	7.60000	.70000	.80000	1.10000	1.60000		
	13.17432	32.66679	41.23073	8.12040	.82594	.88041	1.31011	1.79531	.30	.09
14T2	15.00000	34.10001	36.50000	7.10000	1.40000	1.70000	1.90000	2.30000		
	14.47634	32.16316	37.09708	8.98815	1.16273	1.19879	1.98235	2.93082	.50	.21
14T3	7.80000	30.50000	37.10001	12.40000	2.50000	1.80000	3.50000	4.40000		
	14.38216	32.19974	37.39606	8.92539	1.13837	1.17576	1.93373	2.84868	.48	.20
15T1	14.90000	33.70000	41.00000	8.50000	.60000	.60000	1.00000	1.70000		
	13.22166	32.65039	41.06035	8.15197	.83819	.89199	1.33456	1.83662	.31	.09
15T2	15.90000	32.80000	40.00000	8.50000	.50000	.50000	1.00000	2.80000		
	13.84523	32.46592	39.73569	8.43425	.94775	.99556	1.55324	2.20600	.37	.13
15T3	12.10000	33.20000	38.89999	12.50000	.70000	.80000	.90000	.90000		
	13.79741	32.42682	39.25255	8.53567	.98711	1.03277	1.63181	2.33871	.40	.15
15T4	8.80000	34.89999	43.70000	9.90000	.80000	.60000	.70000	.60000		
	12.13545	33.07222	44.52893	7.42803	.55722	.62637	.77373	.88931	.15	.00
15T5	12.70000	33.89999	39.30000	8.70000	1.20000	1.40000	1.50000	1.30000		
	13.59943	32.50369	39.88109	8.40372	.93590	.98436	1.52960	2.16606	.37	.13
15T6	18.10001	37.30000	24.80000	9.80000	1.40000	1.50000	3.10000	4.00000		
	17.81703	30.86584	26.49101	11.21461	2.02685	2.01569	3.70718	5.84427	1.00	.52
16T1	14.50000	32.30000	43.70000	7.20000	.50000	.40000	.90000	.60000		
	12.51640	32.92429	43.31949	7.68192	.65576	.71953	.97042	1.22154	.20	.03
16T2	13.60000	33.80000	43.00000	7.50000	.40000	.50000	.60000	.60000		
	12.57748	32.90056	43.12558	7.72263	.67156	.73446	1.00196	1.27480	.21	.04
16T3	14.80000	32.70000	43.00000	7.40000	.30000	.50000	.70000	.60000		
	12.70114	32.85254	42.73300	7.80504	.70354	.76470	1.06580	1.38265	.23	.05
16T4	16.00000	32.60001	41.50000	7.20000	.30000	.40000	.70000	1.30000		
	13.20423	32.65717	41.13577	8.14033	.83368	.88772	1.32555	1.82140	.31	.09
16T5	19.80001	30.50000	42.39999	5.40000	.30000	.40000	.70000	.70000		
	13.19139	32.66216	41.17654	8.13178	.83035	.88458	1.31892	1.81020	.30	.09
16T6	19.50000	29.80000	41.10001	5.20000	.60000	1.00000	1.60000	1.00000		
	13.59827	32.50415	39.88475	8.40295	.93560	.98408	1.52900	2.16505	.37	.13
16T7	16.39999	29.39999	32.80000	8.50000	1.70000	2.20000	3.90000	7.10000		
	16.03467	31.55800	32.14966	10.02673	1.56582	1.57985	2.78693	4.26986	.73	.35
16T8	13.50000	27.10001	30.60001	17.00000	2.50000	1.70000	2.60000	4.80000		
	16.77417	31.27063	29.60190	10.51958	1.75710	1.76068	3.16874	4.93478	.84	.42

STE TREPHINE 1.

		A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M2	c	3.00000	20.75845	17.48892	15.34607	8.75896	13.59175	10.36134	10.68451
	a	4.55619	22.20146	21.62834	14.49401	7.47783	11.66321	8.95666	9.00892
M1	a	12.04893	29.14928	41.55891	10.38187	1.30948	2.37762	2.09719	.94128
	b	12.92314	29.95990	43.88428	9.90209	.58979	1.29423	1.29687	.00000

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	Prop. de M2 Max.	Prop. de M2 Min.
2R1	6.70000	23.30000	20.00000	14.50000	6.80000	11.70000	6.60000	10.40000		
	4.55619	22.20146	21.62834	14.49401	7.47783	11.66321	8.95668	9.00892	1.00	.82
4R1	4.30000	21.80000	33.70000	14.80000	6.00000	10.00000	6.00000	3.00000		
	7.81095	25.21951	30.28596	12.70774	4.79837	7.62965	5.97699	5.50443	.61	.46
4R2	6.90000	23.70000	36.10001	12.30000	3.60000	6.30000	5.70000	5.40000		
	9.02623	26.34827	33.52390	12.03968	3.79625	6.12110	4.86259	4.19375	.46	.33
4R4	5.30000	20.20000	30.39999	11.60000	5.10000	9.20000	8.20000	10.00000		
	6.67140	24.16284	27.25478	13.33315	5.73650	9.04187	7.02023	6.73142	.74	.59
4R5	4.50000	20.60001	30.00000	12.50000	6.60000	11.40000	8.20000	6.20000		
	6.53333	24.03462	26.88751	13.40892	5.85016	9.21298	7.14663	6.88008	.76	.60
4R7	3.40000	22.50000	30.60001	12.40000	5.70000	8.50000	7.80000	9.10000		
	6.82269	24.30313	27.65721	13.25012	5.61195	8.55438	6.88173	6.56852	.72	.57
4R8	4.10000	22.70000	30.39999	14.70000	7.00000	10.00000	6.90000	4.20000		
	6.99090	24.45911	28.10463	13.15780	5.47348	8.64593	6.72774	6.38741	.70	.55
7R1	6.50000	23.10001	31.10001	14.30000	6.30000	8.00000	6.30000	4.40000		
	7.60374	25.02737	29.73477	12.82147	4.96896	7.88645	6.16669	5.72754	.63	.49
7R3	8.70000	29.50000	33.20000	11.60000	4.00000	5.40000	3.60000	4.00000		
	9.33047	26.62852	34.32785	11.87381	3.54743	5.74654	4.58590	3.86832	.42	.30
7R4	8.50000	31.10001	30.70000	12.00000	5.00000	6.20000	3.90000	2.60000		
	8.87182	26.20323	33.10785	12.12552	3.92501	6.31494	5.00578	4.36216	.48	.35
7R6	7.10000	28.30000	24.30000	12.40000	5.70000	7.40000	7.00000	7.80000		
	6.51153	24.01460	26.82951	13.42089	5.86811	9.24000	7.16659	6.90355	.76	.61
7R7	5.50000	28.20000	21.50000	14.10000	6.90000	10.30000	8.00000	5.50000		
	5.53779	23.11168	24.23938	13.95530	6.66974	10.44674	8.05804	7.95201	.88	.71
8R1	10.50000	25.10001	29.20000	11.30000	3.60000	6.50000	6.30000	7.50000		
	7.84102	25.24739	30.36594	12.69124	4.77362	7.59239	5.94947	5.47206	.60	.46
8R2	9.10000	25.60000	36.59999	11.60000	2.90000	4.90000	4.20000	2.40000		
	10.42509	27.64352	37.23950	11.27306	2.64630	4.39001	3.58379	2.68972	.29	.17
8R3	17.80000	24.00000	37.30000	12.30000	1.90000	3.80000	2.40000	.70000		
	11.05071	28.22366	38.90367	10.92971	2.13125	3.61469	3.01104	2.01609	.22	.11
8R4	12.30000	28.50000	40.70000	11.10000	1.70000	2.70000	2.10000	.90000		
	11.77312	28.89352	40.82524	10.53324	1.53654	2.71943	2.34969	1.23826	.13	.03
8R7	16.50000	27.80000	39.00000	9.90000	1.30000	2.50000	1.90000	1.10000		
	11.79040	28.90955	40.87122	10.52376	1.52231	2.69801	2.33387	1.21965	.13	.02
8R9	15.50000	26.39999	20.10001	14.60000	4.60000	7.90000	6.50000	4.40000		
	6.41214	23.92244	26.56514	13.47544	5.94493	9.36317	7.25758	7.01057	.77	.62
8R10	10.70000	21.70000	24.30000	15.70000	5.80000	9.80000	7.70000	4.50000		
	6.19716	23.72310	25.99330	13.59342	6.12691	9.62958	7.45439	7.24204	.80	.64
9R1	7.10000	30.00000	42.39999	13.40000	1.70000	2.70000	1.50000	1.20000		
	11.74909	28.87125	40.76132	10.54643	1.55632	2.74921	2.37169	1.26413	.14	.03
9R2	8.50000	35.10001	32.50000	8.90000	2.60000	4.20000	4.20000	2.00000		
	9.98906	27.23921	36.07968	11.51236	3.00525	4.93037	3.98297	3.15920	.35	.22
9R3	11.50000	25.80000	35.50000	7.30000	1.90000	4.40000	4.80000	4.80000		
	10.26478	27.49489	36.81310	11.36104	2.77827	4.58868	3.73055	2.86233	.31	.19
3R1	5.20000	21.30000	30.39999	13.50000	5.20000	9.70000	7.20000	7.50000		
	6.87832	24.35472	27.80518	13.21959	5.56615	8.78544	6.83080	6.50862	.72	.57
4R3	6.00000	23.20000	33.30000	12.30000	4.80000	7.70000	6.70000	6.00000		
	8.05436	25.44524	30.93346	12.57415	4.59797	7.32798	5.75414	5.24233	.58	.44
4R6	4.40000	23.60000	31.30000	13.10000	5.00000	7.30000	6.30000	8.80000		
	7.37617	24.81636	29.12944	12.94636	5.15630	8.16847	6.37503	5.97257	.66	.51
7R2	11.20000	30.30000	35.60001	10.40000	1.80000	3.70000	3.30000	3.70000		
	10.43104	27.64905	37.25534	11.26980	2.64140	4.38264	3.57834	2.68331	.29	.17
7R5	6.80000	30.30000	31.20000	11.80000	4.30000	5.40000	4.70000	5.50000		
	8.62722	25.97643	32.45721	12.25976	4.12638	6.61807	5.22971	4.62553	.51	.37
8R5	7.70000	28.30000	44.30000	11.50000	1.70000	3.10000	2.50000	.90000		
	12.04893	29.14928	41.55891	10.38187	1.30948	2.37762	2.09719	.94128	.10	.00
8R6	12.00000	28.60001	40.30000	11.30000	1.40000	2.90000	2.20000	1.30000		
	11.63152	28.76222	40.44859	10.61095	1.65311	2.89491	2.47932	1.39072	.15	.04
8R8	15.60000	25.30000	38.30000	9.80000	2.00000	4.00000	3.20000	1.80000		
	11.09107	26.26108	39.01100	10.90756	2.09603	3.56468	2.97410	1.97264	.21	.10

LE SOURN.

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5
M2c	12.01236	19.56244	12.00002	7.66018	6.98756	14.67724	13.90770	13.12285
M2a	12.46508	20.77312	15.23232	7.27399	6.36044	13.29011	12.62899	11.90395
M1a	16.43871	31.39960	43.60318	3.88432	.85601	1.11495	1.40542	1.20537
M1b	16.80260	32.37273	46.20128	3.57391	.35193	.00000	.37761	.22564

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	Prop.de M2 Max.	Min.
1S1	16.39999	22.50000	24.20000	5.90000	3.90000	8.00000	8.50000	10.60000		
	13.72151	24.13313	24.20299	6.20220	4.61998	9.44042	9.08018	8.52114	.71	.61
1S4	15.20000	24.30000	25.30000	5.70000	4.20000	9.20000	7.60000	8.50000		
	13.90373	24.62044	25.50398	6.04676	4.36756	8.88210	8.56550	8.03053	.66	.57
1S7	12.30000	24.00000	23.80000	5.60000	4.50000	10.00000	9.80000	10.00000		
	13.58603	23.77083	23.23567	6.31777	4.80765	9.85553	9.46284	8.88591	.74	.64
1S9	9.70000	26.50000	24.80000	6.00000	4.00000	9.60000	9.40000	10.00000		
	13.74731	24.20212	24.38712	6.18020	4.58425	9.36139	9.00733	8.45170	.70	.60
1S10	5.40000	19.30000	18.30000	9.90000	7.00000	17.39999	13.50000	9.20000		
	12.46508	20.77312	15.23232	7.27399	6.36044	13.29011	12.62899	11.90395	1.00	.89
2IS1	17.39999	24.00000	26.80000	5.30000	3.80000	8.70000	8.00000	6.00000		
	14.13682	25.24376	27.16814	5.84793	4.04469	8.16794	7.90716	7.40299	.61	.52
2IS5	17.00000	21.89999	22.39999	5.90000	4.90000	10.90000	9.10000	7.90000		
	13.50676	23.55884	22.66971	6.38539	4.91746	10.09841	9.68674	9.09933	.75	.66
22S1	17.60001	24.70000	27.20000	5.00000	3.60000	7.70000	6.90000	7.30000		
	14.23094	25.49548	27.84018	5.76764	3.91430	7.87953	7.64129	7.14956	.59	.49
22S2	13.10000	31.30000	34.60001	4.60000	2.50000	4.90000	4.60000	4.10000		
	15.29057	28.32918	35.40567	4.86374	2.44646	4.63286	4.64837	4.29663	.34	.25
22S3	20.10001	28.60001	33.80000	4.40000	2.20000	3.70000	3.40000	3.80000		
	15.31983	28.40742	35.61458	4.83877	2.40593	4.54321	4.56573	4.21785	.34	.25
22S4	18.50000	25.89999	35.10001	4.40000	2.10000	4.30000	4.80000	4.40000		
	15.22329	28.14925	34.92528	4.92113	2.53967	4.83902	4.83842	4.47779	.36	.27
22S5	7.10000	21.10001	27.20000	6.50000	5.30000	11.90000	11.80000	9.10000		
	13.59062	23.78311	23.26845	6.31386	4.80129	9.84146	9.44988	8.87355	.74	.64
23S1	11.30000	31.89999	36.30000	4.70000	2.50000	5.30000	3.90000	3.90000		
	15.45928	28.78035	36.61023	4.71982	2.21276	4.11593	4.17185	3.84240	.30	.22
23S2	21.70000	24.50000	27.20000	4.50000	3.40000	6.70000	5.60000	5.80000		
	14.45466	26.09377	29.43750	5.57680	3.60439	7.19406	7.00939	6.54722	.54	.44
23S3	16.20000	24.00000	29.50000	5.60000	4.00000	8.90000	7.10000	4.70000		
	14.40275	25.95493	29.06683	5.62108	3.67631	7.35313	7.15603	6.68699	.55	.45
23S4	11.20000	21.00000	21.50000	6.50000	6.10000	12.70000	10.90000	10.10000		
	13.12096	22.52711	19.91518	6.71450	5.45168	11.28050	10.77644	10.13806	.84	.74
31S1	11.40000	31.00000	42.10001	5.00000	1.40000	3.00000	3.00000	3.10000		
	16.04601	30.34940	40.79932	4.21932	1.40001	2.31822	2.51464	2.26270	.17	.08
31S2	12.30000	29.80000	42.30000	4.60000	1.50000	3.00000	3.10000	3.40000		
	16.02553	30.29465	40.65314	4.23678	1.42837	2.38094	2.57246	2.31782	.17	.09
32S3	10.50000	27.20000	20.60001	8.10000	5.00000	9.50000	9.40000	11.70000		
	13.36466	23.17883	21.65514	6.50661	5.11430	10.53380	10.08814	9.48192	.79	.69
32S4	11.20000	33.20000	21.10001	7.10000	4.30000	8.40000	8.10000	6.60000		
	13.84164	24.45438	25.06062	6.09973	4.45358	9.07237	8.74089	8.19773	.68	.58
121	18.10001	22.70000	24.50000	7.50000	4.10000	8.30000	8.60000	6.20000		
	13.87639	24.54732	25.30878	6.07008	4.40543	8.96587	8.64272	8.10415	.67	.57
122	13.90000	28.80000	26.10001	5.90000	4.10000	7.60000	7.50000	6.10000		
	14.22855	25.48906	27.82307	5.76968	3.91762	7.88688	7.64806	7.15601	.59	.49
123	9.70000	23.70000	22.80000	7.90000	5.40000	11.30000	10.50000	8.70000		
	13.39838	23.26901	21.89590	6.47784	5.06759	10.43048	9.99286	9.39113	.78	.68
124	13.00000	26.80000	24.39999	5.70000	4.20000	7.80000	9.70000	8.40000		
	13.86539	24.51788	25.23018	6.07947	4.42068	8.99960	8.67381	8.13378	.67	.58
125	13.60000	27.20000	25.20000	6.40000	3.80000	7.20000	8.00000	8.60000		
	14.02095	24.93393	26.34096	5.94676	4.20517	8.52292	8.23439	7.71491	.64	.54
126	16.50000	27.60001	27.00000	6.10000	3.60000	7.00000	6.90000	5.30000		
	14.36775	25.86133	28.81696	5.65094	3.72479	7.46036	7.25488	6.78122	.56	.46
127	15.30000	26.60001	27.00000	6.20000	3.50000	6.80000	7.20000	7.40000		
	14.25536	25.56076	28.01448	5.74681	3.88048	7.60473	7.57234	7.08383	.58	.49
128	12.40000	27.89999	27.50000	5.70000	3.50000	6.00000	6.90000	6.10000		
	14.38699	25.91278	28.95430	5.63453	3.69814	7.40142	7.20055	6.72943	.55	.46
129	12.80000	19.80000	16.60001	6.30000	5.30000	9.80000	12.40000	17.00000		
	12.55094	21.00275	15.84537	7.20075	6.24150	13.02703	12.38647	11.67278	.98	.87
201	16.80000	24.70000	25.30000	6.60000	4.20000	6.30000	6.00000	9.90000		
	14.03019	24.95862	26.40686	5.93889	4.19239	8.49464	8.20832	7.69006	.63	.54

LE SOURN. (Suite et fin)

	A	LF	LG	S1	S2	S3	S4	S5	Prop.de M2 Max.	Min.
202	14.00000	32.00000	33.30000	6.10000	2.30000	3.80000	4.80000	3.70000		
	15.24855	28.21681	35.10568	4.89958	2.50467	4.76160	4.76705	4.40976	.35	.26
203	19.10001	29.30000	29.70000	5.70000	2.70000	3.90000	5.40000	4.20000		
	14.88527	27.24530	32.51192	5.20947	3.00790	5.87469	5.79315	5.38786	.44	.35
204	20.39999	21.10001	25.00000	6.20000	5.30000	7.10000	8.20000	6.70000		
	13.92846	24.68657	25.68053	6.02567	4.33331	8.80634	8.49566	7.96396	.66	.56
241	17.39999	27.30000	35.89999	6.30000	2.20000	3.10000	3.70000	4.10000		
	15.40525	28.63586	36.22447	4.76591	2.28760	4.28148	4.32445	3.98787	.32	.23
242	12.30000	33.20000	42.70000	4.60000	1.60000	2.20000	2.30000	1.10000		
	16.28844	30.99774	42.53027	4.01251	1.06417	1.57538	1.82986	1.60996	.11	.03
243	12.90000	32.30000	44.30000	4.70000	1.20000	1.90000	1.60000	1.10000		
	16.43871	31.39960	43.60318	3.88432	.85601	1.11495	1.40542	1.20537	.08	.00
244	12.80000	31.89999	42.60001	4.50000	1.40000	2.00000	2.70000	2.10000		
	16.21277	30.79536	41.98997	4.07706	1.16900	1.80725	2.04361	1.81371	.13	.05
245	17.80000	30.39999	40.20000	4.30000	1.20000	2.10000	2.50000	1.50000		
	16.05273	30.36740	40.84738	4.21358	1.39068	2.29759	2.49562	2.24458	.17	.08
301	13.10000	30.60001	40.00000	4.60000	2.10000	3.30000	3.40000	2.90000		
	15.85498	29.83856	39.43547	4.38227	1.66462	2.90350	3.05418	2.77701	.21	.13
302	17.50000	24.70000	38.70000	4.20000	2.20000	4.10000	4.10000	4.50000		
	15.51706	28.93486	37.02275	4.67053	2.13272	3.93890	4.00865	3.68684	.29	.20
303	16.89999	24.10001	37.60001	4.60000	2.40000	5.10000	5.00000	4.30000		
	15.33481	28.44749	35.72156	4.82599	2.38518	4.49730	4.52341	4.17751	.33	.24
304	14.50000	23.39999	32.10001	4.20000	3.20000	6.50000	8.20000	7.90000		
	14.55546	26.36330	30.15712	5.49082	3.46477	6.88524	6.72471	6.27585	.51	.42
305	7.80000	16.39999	21.10001	4.50000	4.50000	12.90000	15.90000	16.89999		
	12.56906	21.05119	15.97473	7.18529	6.21640	12.97151	12.33529	11.62399	.97	.87
306	17.70000	27.70000	41.50000	2.90000	1.60000	3.10000	3.30000	2.20000		
	15.99941	30.22479	40.46664	4.25906	1.46455	2.46098	2.64624	2.38815	.18	.09
331	16.30000	28.30000	39.50000	3.70000	1.90000	3.50000	3.50000	3.30000		
	15.76877	29.60800	38.81990	4.45581	1.78404	3.16766	3.29769	3.00913	.23	.15
332	17.30000	25.89999	29.80000	5.00000	3.30000	7.20000	6.90000	4.10000		
	14.60177	26.48717	30.48782	5.45131	3.40061	6.74332	6.59388	6.15114	.50	.41
333	18.30000	26.50000	34.39999	5.10000	2.70000	3.90000	4.00000	4.50000		
	15.22012	28.14078	34.90256	4.92383	2.54406	4.84872	4.84736	4.48632	.36	.27
334	18.00000	28.30000	42.10001	3.60000	1.30000	2.20000	2.60000	1.90000		
	16.13310	30.58231	41.42116	4.14502	1.27936	2.05135	2.26863	2.02821	.15	.06
335	17.20000	25.50000	30.60001	4.80000	2.90000	5.80000	6.40000	6.80000		
	14.64459	26.60167	30.79355	5.41478	3.34129	6.61212	6.47294	6.03585	.49	.40
336	15.80000	24.30000	23.39999	7.40000	5.40000	9.10000	9.30000	5.30000		
	13.76532	24.25027	24.51572	6.16483	4.55930	9.30620	8.95646	8.40320	.70	.60
337	16.70000	22.70000	23.30000	6.70000	5.60000	10.40000	9.20000	5.20000		
	13.67872	24.01869	23.89743	6.23871	4.67926	9.57154	9.20105	8.63636	.72	.62
338	16.20000	24.30000	22.80000	6.30000	4.20000	8.00000	8.80000	9.40000		
	13.67805	24.01689	23.89262	6.23928	4.68019	9.57360	9.20295	8.63817	.72	.62
339	12.90000	23.89999	22.10001	7.00000	5.60000	9.00000	10.80000	8.70000		
	13.46121	23.43703	22.34447	6.42425	4.98056	10.23799	9.81541	9.22198	.77	.67
3310	11.90000	19.10001	16.70000	6.60000	8.30000	18.89999	11.70000	6.80000		
	12.49408	20.85068	15.43939	7.24925	6.32026	13.20125	12.54707	11.82587	.99	.89
3311	14.70000	22.20000	17.70000	6.80000	5.80000	10.10000	10.20000	12.50000		
	12.92672	22.00766	18.52831	6.88019	5.72096	11.87566	11.32509	10.66104	.89	.79
3313	13.10000	24.60001	17.70000	7.70000	6.00000	11.30000	10.20000	9.40000		
	13.02445	22.26901	19.22610	6.79682	5.58558	11.57621	11.04904	10.39791	.87	.77
1S2	10.30000	28.10001	25.50000	6.10000	3.60000	8.00000	8.20000	10.20000		
	13.95681	24.76237	25.88292	6.00149	4.29404	8.71948	8.41559	7.88764	.65	.56
1S3	10.00000	27.80000	25.70000	5.90000	4.50000	10.20000	9.70000	6.20000		
	13.94571	24.73270	25.80371	6.01095	4.30941	8.75348	8.44693	7.91751	.65	.56
1S8	12.70000	21.60001	22.50000	6.10000	4.50000	10.40000	11.10000	11.10000		
	13.31302	23.04073	21.28642	6.55066	5.18584	10.69204	10.23397	9.62097	.80	.70
21S2	16.50000	25.80000	26.89999	5.30000	3.50000	7.90000	6.60000	7.50000		
	14.22259	25.47314	27.78055	5.77476	3.92587	7.90513	7.66488	7.17205	.59	.50
21S3	11.20000	31.30000	31.60001	5.40000	2.70000	6.20000	5.70000	5.90000		
	14.87136	27.20810	32.41261	5.22134	3.02717	5.91731	5.83243	5.42531	.44	.35
21S4	21.39999	27.00000	32.00000	4.50000	2.40000	5.30000	4.20000	3.20000		
	15.06819	27.73447	33.81790	5.05344	2.75452	5.31424	5.27649	4.89538	.39	.30
31S3	15.30000	26.20000	39.89999	4.30000	1.90000	4.40000	4.00000	4.00000		
	15.64924	29.28833	37.96646	4.55778	1.94963	3.53391	3.63532	3.33096	.26	.17
31S4	12.50000	25.20000	25.30000	6.30000	5.50000	9.80000	7.40000	8.00000		
	13.87441	24.54202	25.29463	6.07177	4.40818	8.97194	8.64832	8.10948	.67	.57
32S1	9.80000	31.10001	42.30000	4.00000	1.60000	3.40000	3.20000	4.60000		
	15.98630	30.18973	40.37305	4.27025	1.48271	2.50115	2.68327	2.42345	.18	.10
32S2	14.80000	27.70000	40.70000	3.80000	1.60000	3.70000	3.40000	4.30000		
	15.80084	29.69377	39.04889	4.42845	1.73962	3.06940	3.20711	2.92278	.23	.14

TABLE DES MATIERES

Pages

INTRODUCTION 1

PREMIÈRE PARTIE : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE ET MÉTHODES D'ÉTUDE 5

A - QUELQUES DÉFINITIONS 7

B - ANALYSE DES TRAVAUX ANTÉRIEURS 9

I - REVUE BIBLIOGRAPHIQUE 9

II - DISCUSSION DE CES TRAVAUX 11

II - 1. La composition du matériel 11

II - 1. 1. Les minéraux lourds 11

II - 1. 2. La fraction fine 12

II - 1. 3. Les grains du squelette 13

II - 1. 4. Conclusion 13

II - 2. Origine de la fraction apportée 13

C - CONCLUSION : LA DÉMARCHE D'ÉTUDE 14

DEUXIEME PARTIE : APPROCHE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DES SOLS DE LA RÉGION DE MUR DE BRETAGNE 15

INTRODUCTION 17

A - CADRE DE L'ETUDE 19

I - CADRE GEOLOGIQUE 19

I - 1. Le substrat 19

I - 1. 1. Les principaux faciès 19

a) Le Briovérien 19

b) Le Paléozoïque inférieur 19

c) Le Carbonifère 22

d) Le granite 22

I - 1. 2. Les minéraux lourds 22

I - 2. Quelques critères de reconnaissance des formations d'altération 24

I - 2. 1. L'arène granitique 24

I - 2. 2. L'altération des quartzites et grès 24

a) Les quartzites ordoviciens 24

b) Les quartzites et grès ferrugineux du Siegenien inf. 25

c) Les schistes et quartzites du Devonien 25

I - 2. 3. Les schistes 25

a) Caractères généraux 25

b) Caractères particuliers 26

II - QUELQUES ASPECTS DE LA GEOMORPHOLOGIE 27
II - 1. La zone du Primaire anté-carbonifère 27
II - 2. Les autres zones 27
III - LES GRANDS ENSEMBLES PEDOLOGIQUES 29

B) APPROCHE DES PROBLÈMES PRINCIPAUX 31
I - INTRODUCTION 31
II - LES SEQUENCES ETUDIEES 31
II - 1. 1. La séquence du Sourn 31
II - 1. 2. La séquence de Ste Tréphine 33
II - 1. 3. La séquence de St Elouan 33
a) Présentation et rappel 33
b) Quelques données analytiques 37
II - 1. 4. Le profil de la Croix du Roz 39
III - DISCUSSION : LES PROBLEMES POSES 40

C) LES FORMATIONS LIMONEUSES DANS LE PAYSAGE 41
I - INTRODUCTION 41
II - LES PHENOMENES DE VERSANTS 41
II - 1. Les faits 41
II - 2. Discussion 43
II - 3. Conclusion 44
III - LES PASSAGES ENTRE LES SUBSTRATS ET LES FORMATIONS LIMONEUSES 45
III - 1. Les faits 45
III - 2. Discussion 46
IV - CONCLUSION 46

D) ETUDE PÉDOLOGIQUE D'UN PROFIL TYPE : LES GRANGES 47
I - LES FAITS 47
II - INTERPRETATION 51
III - CONCLUSION 52

E) LES DONNÉES ANALYTIQUES 53
I - ETUDE GRANULOMETRIQUE 53
I - 1. Les faits 53
II - ETUDE MINERALOGIQUE 56
II - 1. Les principaux éléments du squelette 56
II - 1. 1. Les faits 56
II - 1. 2. Discussion 56
II - 2. Les minéraux lourds 59
III - LES ANALYSES CHIMIQUES 61
III - 1. Les éléments majeurs 61

III - 2. Les éléments traces 61
III - 2. 1. Introduction 61
III - 2. 2. Les faits : présentation et discussion 62
a) Les formations limoneuses 62
b) Les niveaux de base des sols 63
III - 2. 3. Conclusion 68

IV - CONCLUSION 68

F) CONCLUSION À L'APPROCHE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE 69

I - LES ACQUIS 69

II - LES PROBLEMES POSES 69

TROISIÈME PARTIE : APPROCHE QUANTITATIVE DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DES SOLS DE LA RÉGION DE MUR DE BRETAGNE 71

INTRODUCTION 73

A) LE MÉLANGE DE MATÉRIAUX 75

I - UN EXEMPLE CONCRET - LES PROBLEMES POSES 75
I - 1. Introduction 75
I - 2. Etude des variables deux à deux 75
I - 2. 1. Etude d'un mélange 75
I - 2. 2. Etude de plusieurs mélanges ayant un matériel commun 77
I - 3. Etude simultanée de l'ensemble des variables 77
I - 3. 1. Représentation graphique 77
I - 3. 2. Interprétation géométrique du mélange 78
I - 3. 3. Estimation de la composition des pôles du mélange 78
I - 4. Quelques aspects pratiques 79
I - 4. 1. Existence de plusieurs populations 79
I - 4. 2. Estimation de la composition des pôles du mélange 79

II - ETUDE DES VARIABLES DEUX A DEUX 81
II - 1. Généralités 81
II - 1. 1. Relation entre une caractéristique et les proportions du mélange 81
II - 1. 2. Relation entre deux caractéristiques 81
II - 1. 3. Conclusion 82
II - 2. Quelques remarques 83
II - 2. 1. Signification de la pente 83
II - 2. 2. Signification de l'ordonnée à l'origine 83
II - 2. 3. La droite de régression passe par l'origine 85
a) Généralités 85
b) Application 85
II - 3. Détermination de l'apport 85

II - 3. 1. A partir d'un ensemble de profils sur des roches différentes 85
a) Introduction 85
b) Discussion 86
c) Appendice 86
II - 3. 2. Sur une seule roche 87
a) Valeur de la pente 88
b) Valeur de l'ordonnée à l'origine 88
c) Valeur des caractéristiques 89
d) Conclusion 89
II - 4. Détermination des proportions du mélange 89

III - ETUDE SIMULTANEE DE L'ENSEMBLE DES VARIABLES : LE MODELE DE MELANGE 91
III - 1. Le modèle de mélange 91
III - 1. 1. Notations 91
III - 1. 2. Le modèle de mélange 91
III - 1. 3. Formulation des questions posées en terme de modèle de mélange 93
III - 2. Estimation des paramètres du modèle 93
III - 2. 1. Remarque générale 93
III - 2. 2. Interprétation géométrique 93
III - 3. La méthode proposée 94
III - 3. 1. Détermination de l'axe Δ 95
III - 3. 2. Détermination de $\hat{Z}_J$ et de $\hat{Y}_J$ 95
III - 3. 3. Détermination de $\hat{P}_J$ 96
III - 4. Discussion sur la méthode 96
III - 4. 1. Les différences de niveau entre les variables 96
III - 4. 2. Les estimations des composants initiaux 98

B) PRÉSENTATION DES SÉQUENCES ET DÉPOUILLEMENT PRÉLIMINAIRE 101

I - CONDITIONS PRELIMINAIRES ET CHOIX DES SEQUENCES 101
I - 1. Les formations limoneuses : conditions d'échantillonage 101
I - 2. Les altérations en place et le mélange de matériaux 102

II - DESCRIPTION DES SEQUENCES ET DEPOUILLEMENT PRELIMINAIRE 103
II - 1. La séquence du Sourn 103
II - 1. 1. Présentation 103
II - 1. 2. Dépouillement préliminaire 103
II - 1. 2. 1. Les données granulométriques 103
a) Un exemple de calcul 104
b) Les données des sols 105
c) Les données des arènes 105
d) Comparaison des diverses données 111
e) Conclusion 111
II - 1. 2. 2. Les données chimiques 111
a) Les sols 111
b) Les arènes
c) Les limites sols - arènes 113

II - 1. 3. Conclusion 113
II - 2. La séquence de Ste Tréphine 115
II - 2. 1. Présentation 115
II - 2. 2. Dépouillement préliminaire 115
II - 2. 2. 1. La granulométrie 115
a) Vérification de l'existence de corrélations linéaires 115
b) Comparaison des deux carrières 117
c) Comparaison du profil 1 et des autres profils de la carrière principale 121
II - 2. 2. 2. Les données chimiques 121
II - 2. 3. Conclusion 121
II - 3. La séquence de St Elouan 123
II - 3. 1. Les matériaux d'altération des schistes 123
II - 3. 2. Les formations limoneuses 123
II - 3. 2. 1. La granulométrie 123
II - 3. 2. 2. Les analyses chimiques 125
II - 3. 3. Conclusion 125
III - CONCLUSION

C) ETUDE DÉTAILLÉE DES SÉQUENCES PAR LE MODÈLE DE MÉLANGE (A.C.P.) 128

I - LE SOURN : UNE SEQUENCE SUR GRANITE 129
I - 1. Les résultats des analyses en composantes principales 129
I - 1. 1. La granulométrie 129
I - 1. 1. 1. Le premier axe 129
a) Corrélation des variables à l'axe 129
b) Position des échantillons sur l'axe 131
I - 1. 1. 2. Le second axe 133
a) Corrélation des variables à l'axe 133
b) Position des échantillons sur l'axe 133
I - 1. 1. 3. Conclusion 137
I - 1. 2. Les données chimiques 137
I - 1. 2. 1. Le premier axe 138
I - 1. 2. 1. Le second axe 138
I - 1. 3. Synthèse des données granulométrique et chimiques 138
I - 1. 3. 1. Les corrélations entre les axes issus des analyses granulométriques et chimiques 139
I - 1. 3. 2. L'analyse en composantes principales des données chimiques et granulométriques 139
I - 1. 4. Conclusion 141
I - 2. L'estimation des deux composants du mélange 141
I - 2. 1. Les données des 66 analyses granulométriques 141
I - 2. 2. Les données chimiques 145
I - 2. 2. 1. Les données des analyses chimiques 145
I - 2. 2. 2. Les données chimiques associées aux données granulométriques 145

a) Résultats 145
b) Vérification de la stabilité des estimations granulométriques 146
c) Conclusion 146
I - 3.Relations entre les deux composants du mélange de l'arène 146
I - 3. 1. Comparaison des compositions de M_2c et de l'arène 147
I - 3. 1. 1. La granulométrie 147
I - 3. 1. 2. La chimie 147
a) Résultat 147
b) Discussion 148
c) Comparaison avec d'autres bilans 148
d) Conclusion 149
I - 3. 2. Comparaison de M1b et de l'arène 149
I - 3. 3. Conclusion 150
I - 4. Les différenciations pédogénétiques 150
I - 4. 1. Les données granulométriques 150
I - 4. 1. 1. Introduction 150
I - 4. 1. 2. Principes de calcul 151
I - 4. 1. 3. Les résultats 151
I - 4. 1. 4. Conclusion 153
I - 4. 2. Les données chimiques 153
I - 4. 2. 1. Présentation 153
I - 4. 2. 2. Méthode de calcul et résultats 155
I - 4. 3. Mélange et actions pédogénétiques 156
I - 5. Conclusion 157
II - LES AUTRES SEQUENCES 159
II - 1. La séquence de Ste Tréphine 1 159
II - 1. 1. Les résultats des A.C.P. 159
II - 1. 1. 1. Les données granulométriques 159
a) Les faits 159
b) Interprétation des axes 2 et 3 161
c) Conclusion 163
II - 1. 1. 2. Les données chimiques 163
a) Les données chimiques seules 163
b) Comparaison des données chimiques et granulométriques 164
II - 1. 2. Estimation des composants du mélange 165
II - 1. 2. 1. A partir de 30 données granulométriques 165
II - 1. 2. 2. Estimation à partir des données chimiques et granulométriques 167
II - 1. 2. 3. Comparaison des diverses estimations 168
a) Le matériel 1 168
b) Le matériel 2 168
c) Conclusion 169
II - 1. 3. Comparaison des constituants du mélange et des quartzites altérés 169
II - 1. 4. Les variations indépendantes du mélange 169

II - 2. La sequence de Ste Tréphine 2 172
II - 2. 1. Les données des A.C.P. 172
II - 2. 2. Estimation des composants initiaux 173
II - 3. La séquence de St Elouan 175
II - 3. 1. Les principales données des A.C.P. 175
II - 3. 1. 1. Les données granulométriques 175
a) Le premier axe 175
b) Le second axe 176
II - 3. 1. 2. Les données chimiques 177
a) Les données chimiques étudiées seules 177
b) Les données chimiques et granulométriques 177
II - 3. 1. 3. Conclusion 177
II - 3. 2. Estimation des deux composants du mélange 178
II - 3. 2. 1. Les résultats 178
II - 3. 2. 2. Comparaison des diverses estimations 179
II - 3. 3. Comparaison des constituants du mélange et des schistes altérés. Commentaire sur les proprotions relatives M1 - M2 181
II - 3. 3. 1. Comparaison M2 - Schistes altérés 181
II - 3. 3. 2. Comparaison M1 - Schistes altérés 181
II - 3. 3. 3. Les proportions relatives M1 - M2 181
II - 4. Conclusion 182

D) ORIGINE ET MISE EN PLACE DES MATÉRIAUX 183

I - COMPARAISON DES DIVERSES ESTIMATIONS DE LA COMPOSITION DE L'APPORT . 183
I - 1. Introduction 183
I - 2. Les compositions chimiques 185
I - 3. Les compositions granulométriques 185
I - 4. Conclusion 187

II - LA MISE EN PLACE DES MATERIAUX 193

III - ORIGINE DE L'APPORT 195

E) CONCLUSION À L'ESSAI DE MODÉLISATION 190

QUATRIÈME PARTIE : CONCLUSION 191

BIBLIOGRAPHIE 197

ANNEXES 201

VU :

Le Président de la Thèse

VU :

Le Directeur de Thèse

Vu et APPROUVE

RENNES , le

Le Directeur de l'U.E.R.

VU pour autorisation

RENNES, le

Le PRESIDENT de l'UNIVERSITE de RENNES

R. DABARD

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL
BIBLIOTHÈQUE
INSTITUT DE GÉOLOGIE