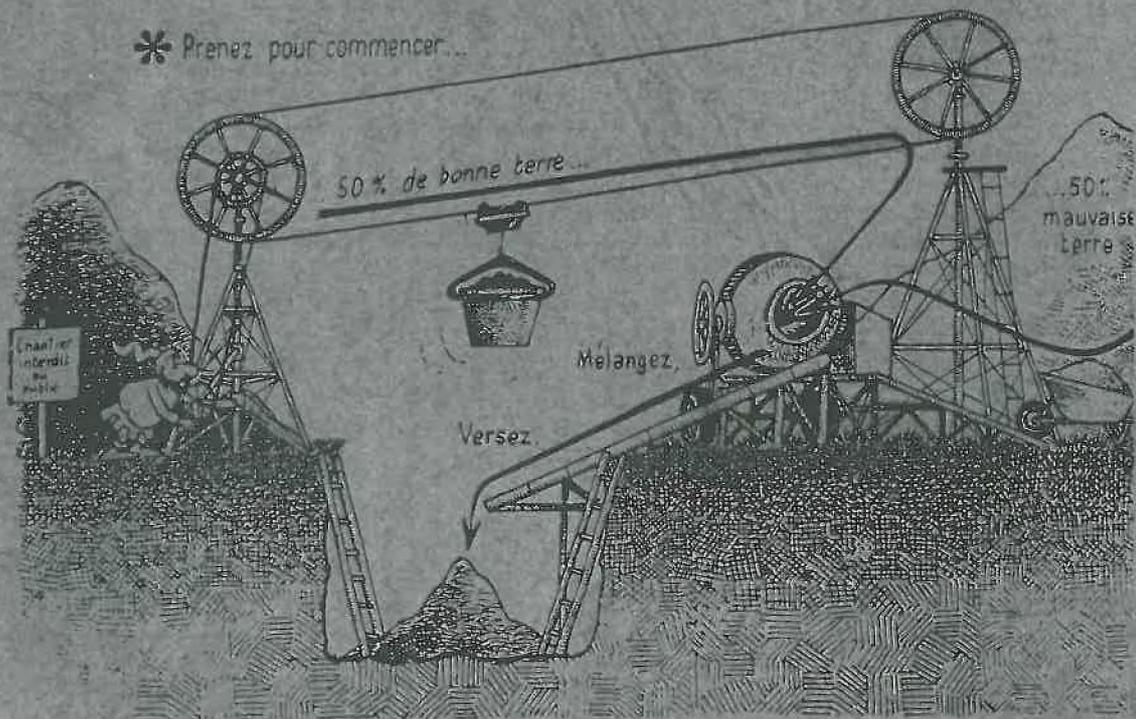


Laurent LE CALVEZ

GENESE DES FORMATIONS LIMONEUSES  
DE BRETAGNE CENTRALE :  
ESSAI DE MODELISATION



H-  
A10

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

1979



*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

## SOMMAIRE

### 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

# **INTRODUCTION**

Le Massif Armoricaïn est constitué de roches variées : schistes, grès, granites, roches métamorphiques, très localement des calcaires. De très nombreux filons, en particulier de dolérite, recourent 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".

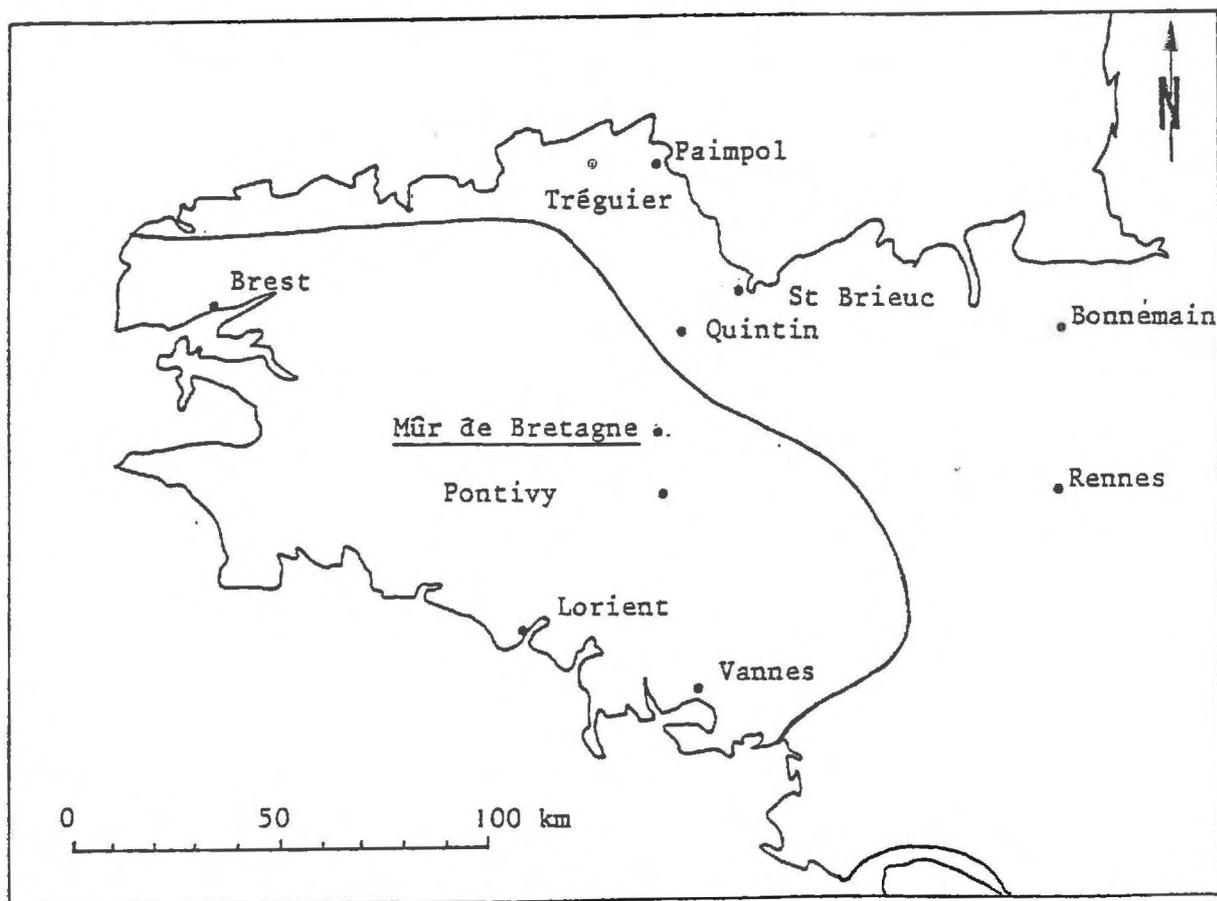
Dans ce mémoire l'expression "formation limoneuse" se rapportera à la définition géologique du terme (en excluant toutefois les altérites de schistes), l'expression "particule limoneuse" à sa définition granulométrique.

Dans le Massif Armoricaïn 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 Armoricaïn. 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 constitutifs 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 ESTEIOLE 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 diff rent. 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 M r-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 M r-de-Bretagne semble " tre 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 corrélérer 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			MASSIF DE QUINTIN		
	% hornblende verte	% limon		% hornblende verte	% limon
Bo <sub>7</sub>	9	39,3	COUPE 1000		
Bo <sub>5</sub>	4	66	1006	40	56
Bo <sub>3</sub>	2	40,7	1007	0	18
Bo <sub>2</sub>	0,7	17,6	1008	20	62,5
Bo <sub>01</sub>	0,1	12,6	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 (ESTEIOULE 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 Armoricaïn 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 genèse 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

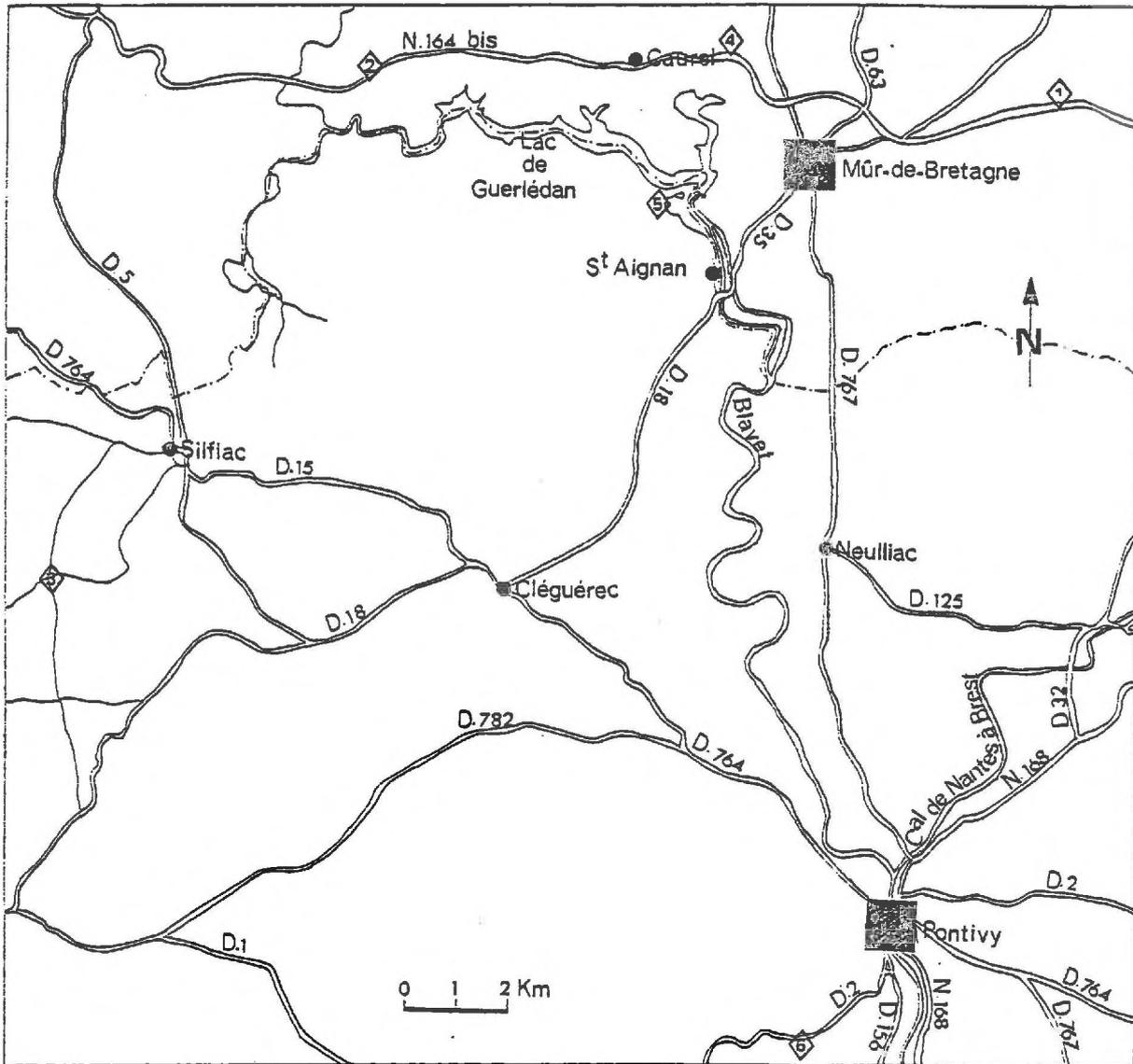
La région de Mûr-de-Bretagne constitue une zone de relief liée au Paléozoïque antécarbonifère, "un mur" séparant deux bassins : le bassin briovérien, à l'Est - Sud-Est, le bassin carbonifère de Châteaulin, à l'Ouest - Nord-Ouest (GUILCHER, 1948). La présence, dans la région Sud-Ouest de la zone d'étude, 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 MARRIC, 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 (MARRIC, 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 Quénécan (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 Armoricaïn".

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).

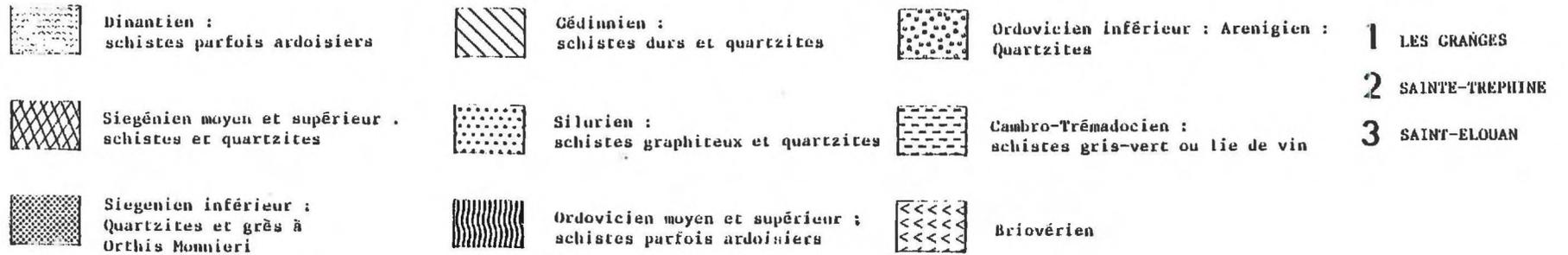
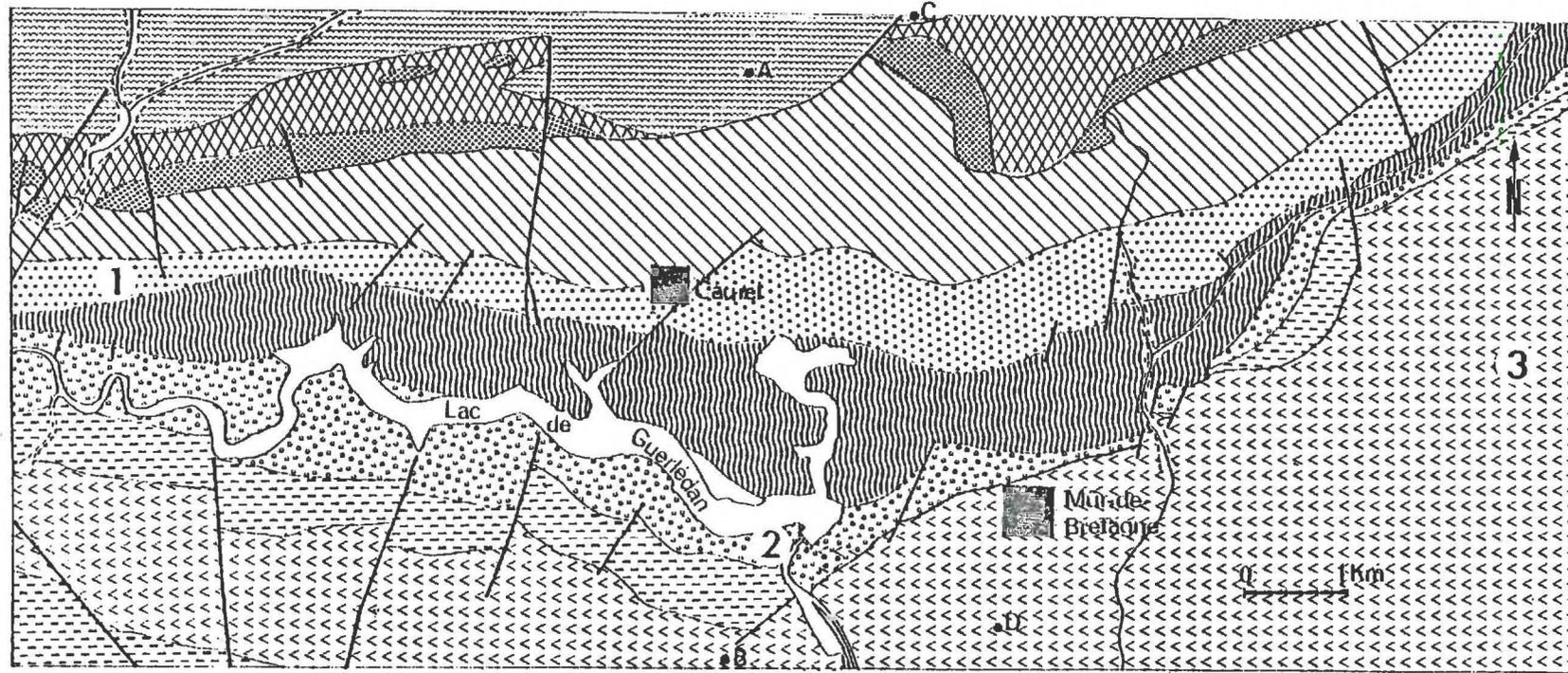
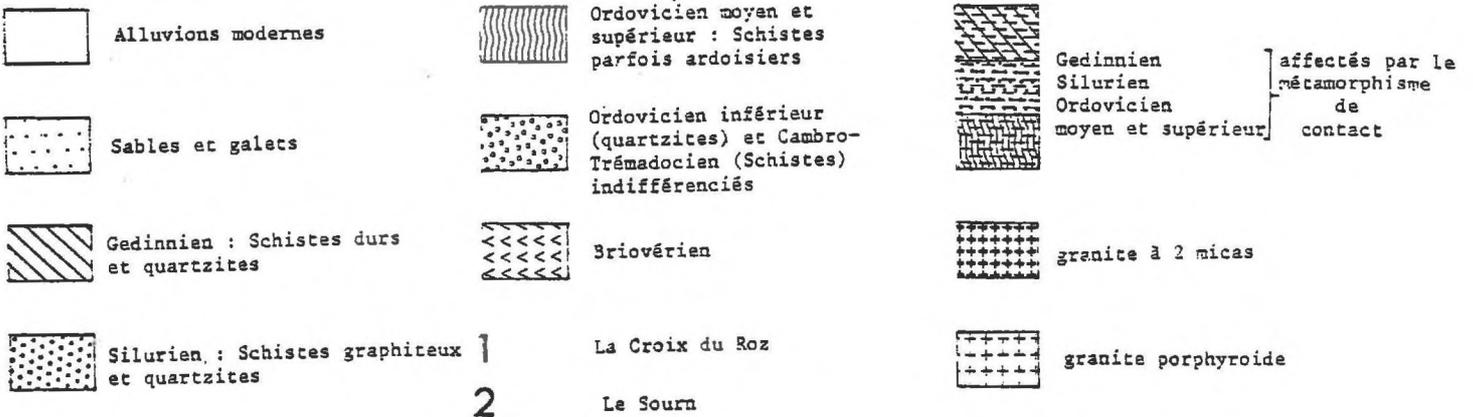
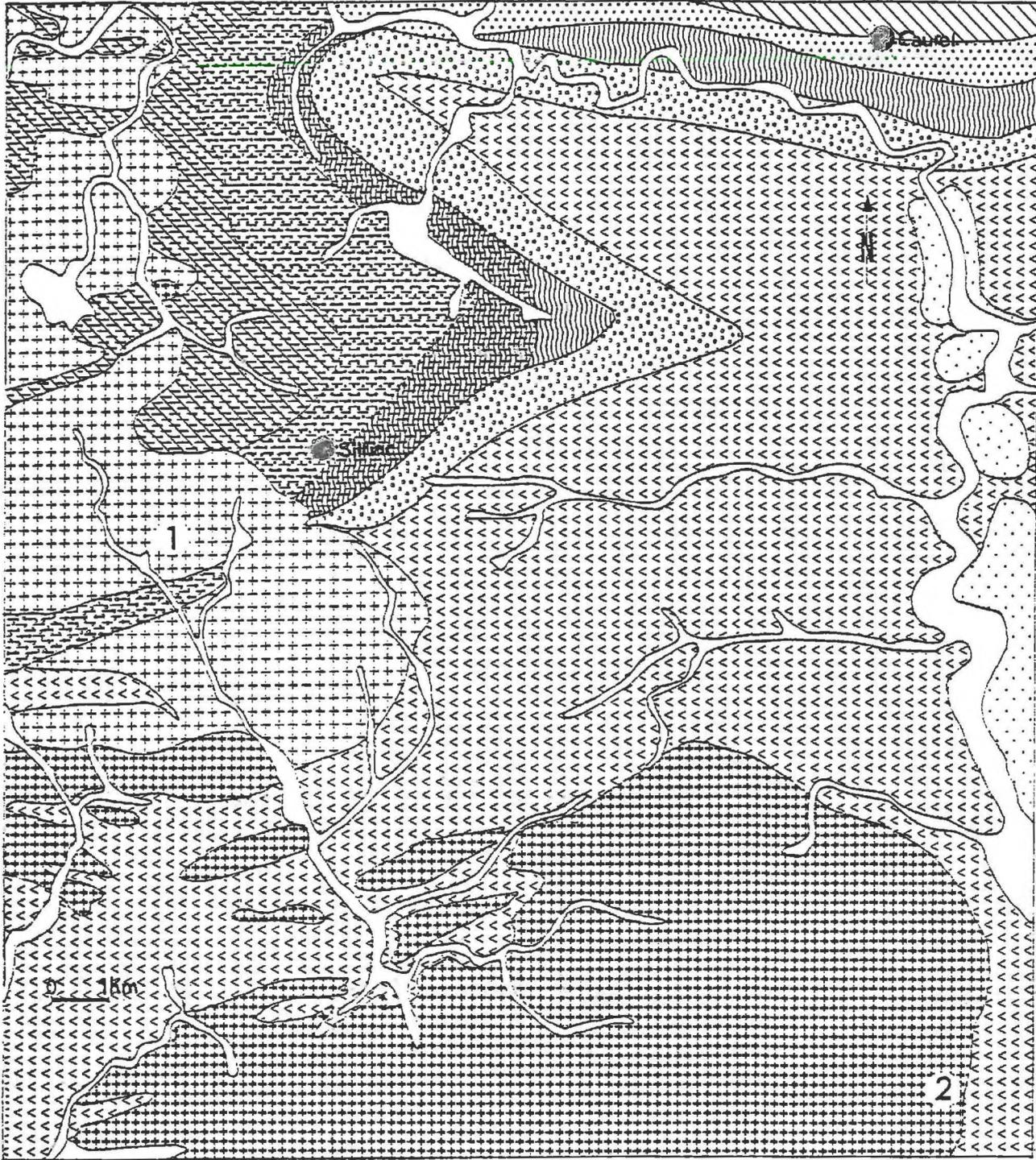


Figure 4 : LOCALISATION GÉOLOGIQUE DES SÉQUENCES ET PROFILS SITUÉS SUR GRANITE (d'après la feuille de PONTIVY de la carte géologique de la France au 1/80.000).



Silurien.

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

- 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 responsable 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 grauwaque 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 nicas, 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

MINÉRAUX LOURDS	STRATIGRAPHIQUE								METAMORPHISME DE CONTACT DU GRANITE DE ROSTRENEH				
	BRIOVÉRIEN	CAMBRO - TRÉMADOCIEN	ORDOVICIEN INFÉRIEUR	ORDOVICIEN MOYEN ET SUPÉRIEUR	SILURIEN	DÉVONIEN	DINANTIEN	VOLCANISME DINANTIEN	FILONS DE DIABASE À GRAINS MOYENS	ORDOVICIEN	GÉDINIEN	COBLÉNCIEN	DINANTIEN
Zircon	●	●	●	●	●	●	●	■					
Kutile	●	● ■	● ■	● ■	● ■	● ■	● ■						
Anatase					●	●							
Sphère								■					
Tourmaline	● ■	● ■	●	●	● ■	●	● ■				■		
Grenat										■	■	■	
Augite													
Staurtide								■				■	
Andalousite										■	■	■	■
Sillimanite										■	■	■	
Disthène													
Epidote				●	●	●		■	■				
Hornblende verte									■				
Hypersthène													
Glaucophane													
Apatite							●	■	■				
Brookite					●								
Actinote								■					
Trémolite								■					
Fluénite								■					
Cordiérite													

● Minéraux détritiques

■ Minéraux néoformés

TABEAU 11 : TABLEAU DE RÉPARTITION DES PRINCIPAUX MINÉRAUX LOURDS  
DANS LES ROCHES DE LA RÉGION DE MUR-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 quatre 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 paysage 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 Guerliédan 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 "salle de cheval".

### II - 2. Les autres zones

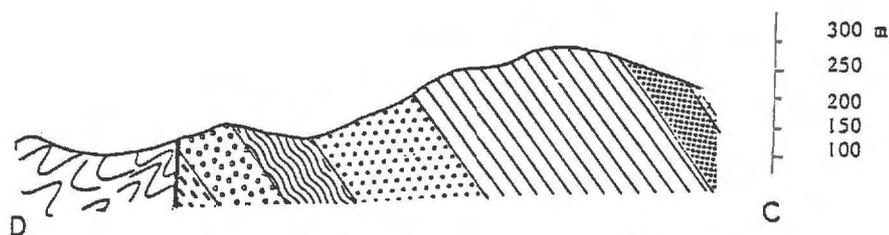
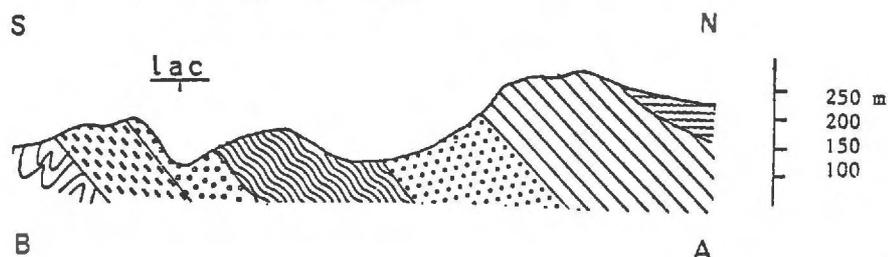
Dans les autres zones les reliefs sont beaucoup moins accentués que sur le Primaire.

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).



0 1Km



Dinantien



OrdoVICIEN moyen et supérieur



Siegenien moyen et supérieur



OrdoVICIEN inférieur



Siegenien inférieur



Cambro-Trémadocien



Gedinnien



Briovérien



Silurien

### 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<sub>1</sub> 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<sub>p</sub> 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 grumuleuse très très fine dite soufflée ou fluffy (AUROUSSEAU, 1976). Le pH FNa est supérieur à 10 parfois à 11. Après avoir été appelé A<sub>3</sub> (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<sub>2</sub> 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 a 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<sub>g</sub> 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<sub>g</sub> ; 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 aval, dans un matériel limoneux.

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

Comme dans l'ensemble précédant 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° naît 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 un 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 masquer 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

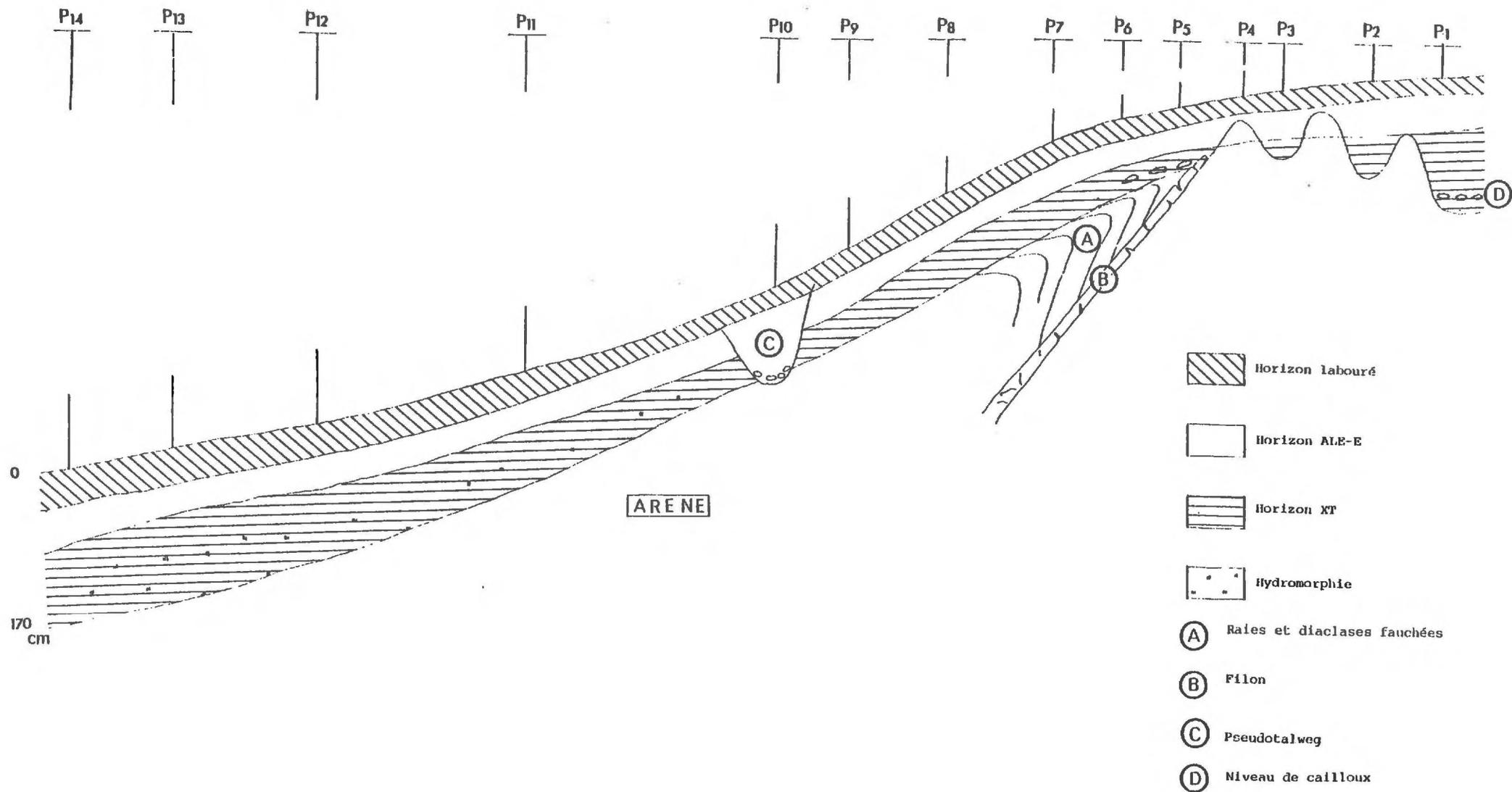


FIGURE 6: LE SOURN: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA SEQUENCE  
LOCALISATIONS DES PROFILS

- 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-Tréphine (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

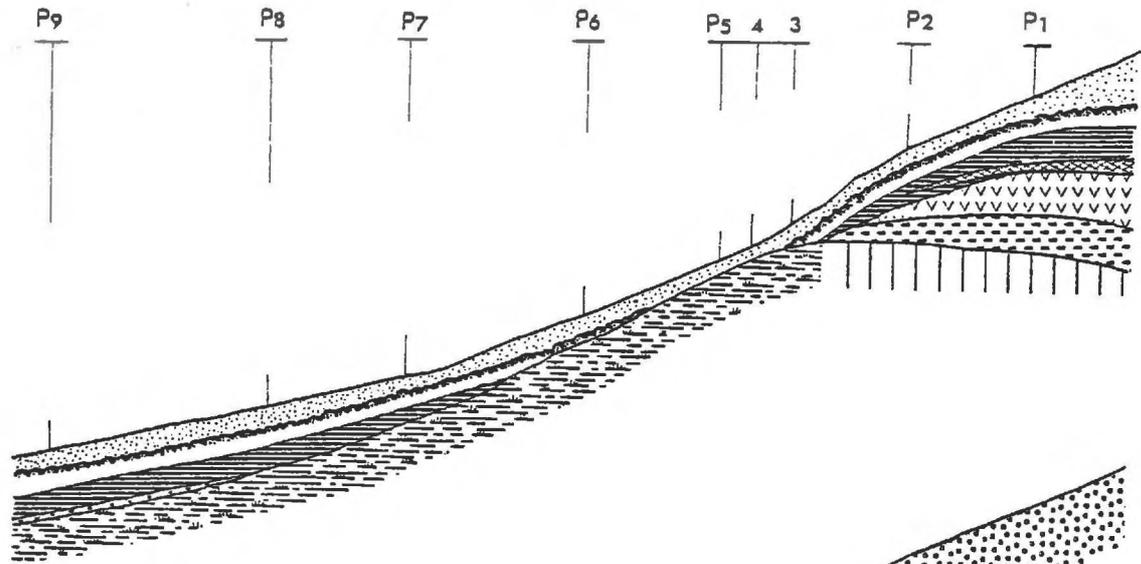


FIGURE 7

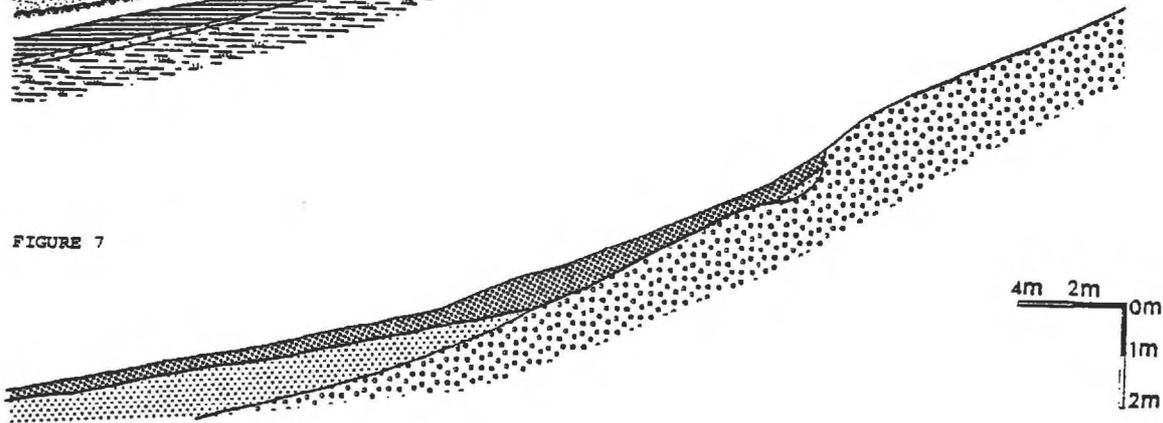
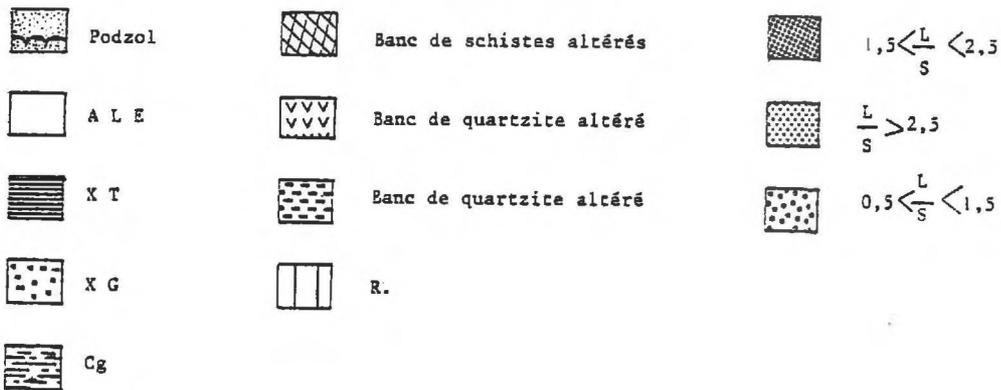


FIGURE 8



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)

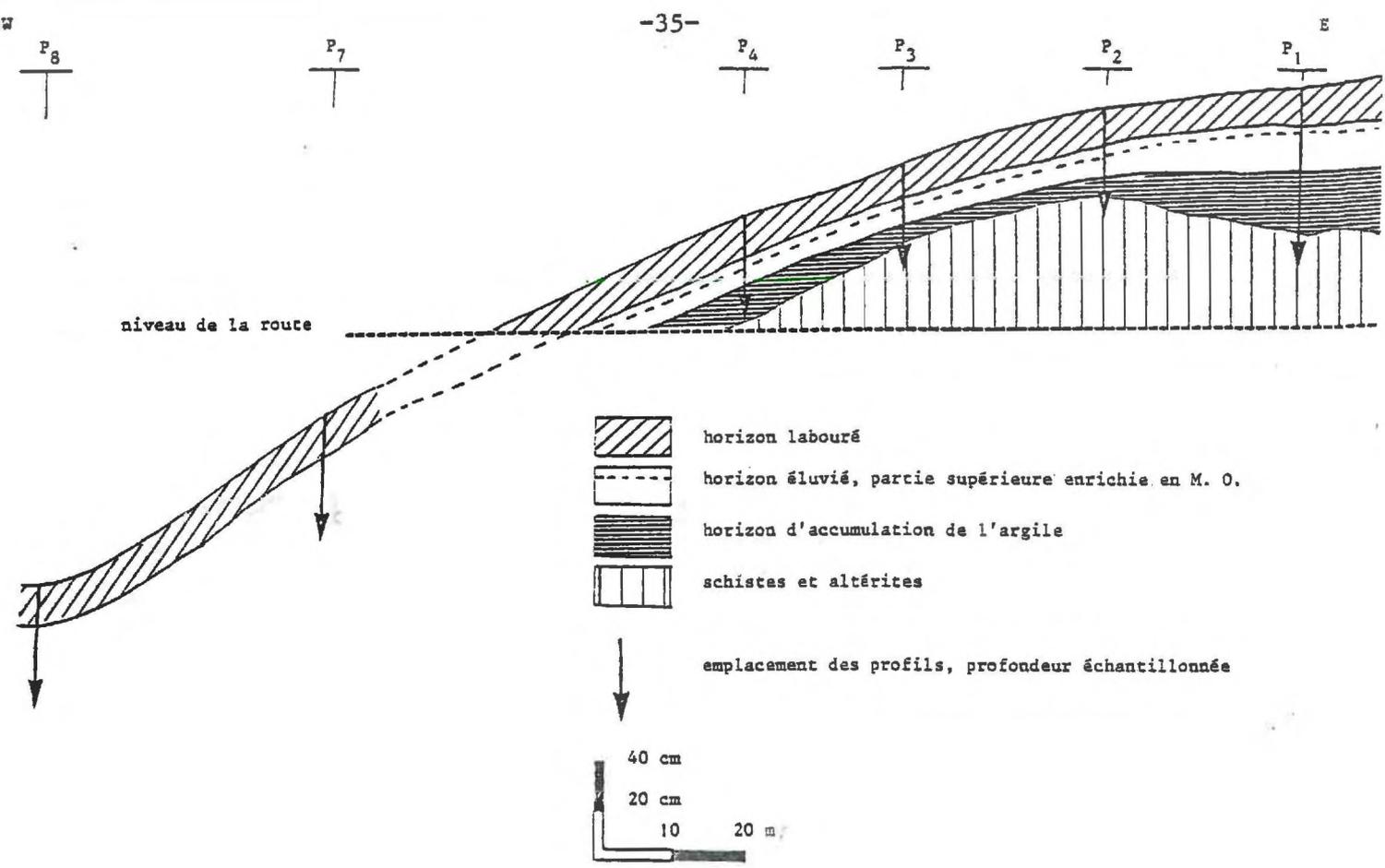


FIGURE 9: SAINT-ELOUAN : COUPE PÉDOLOGIQUE, EMPLACEMENT DES PROFILS.

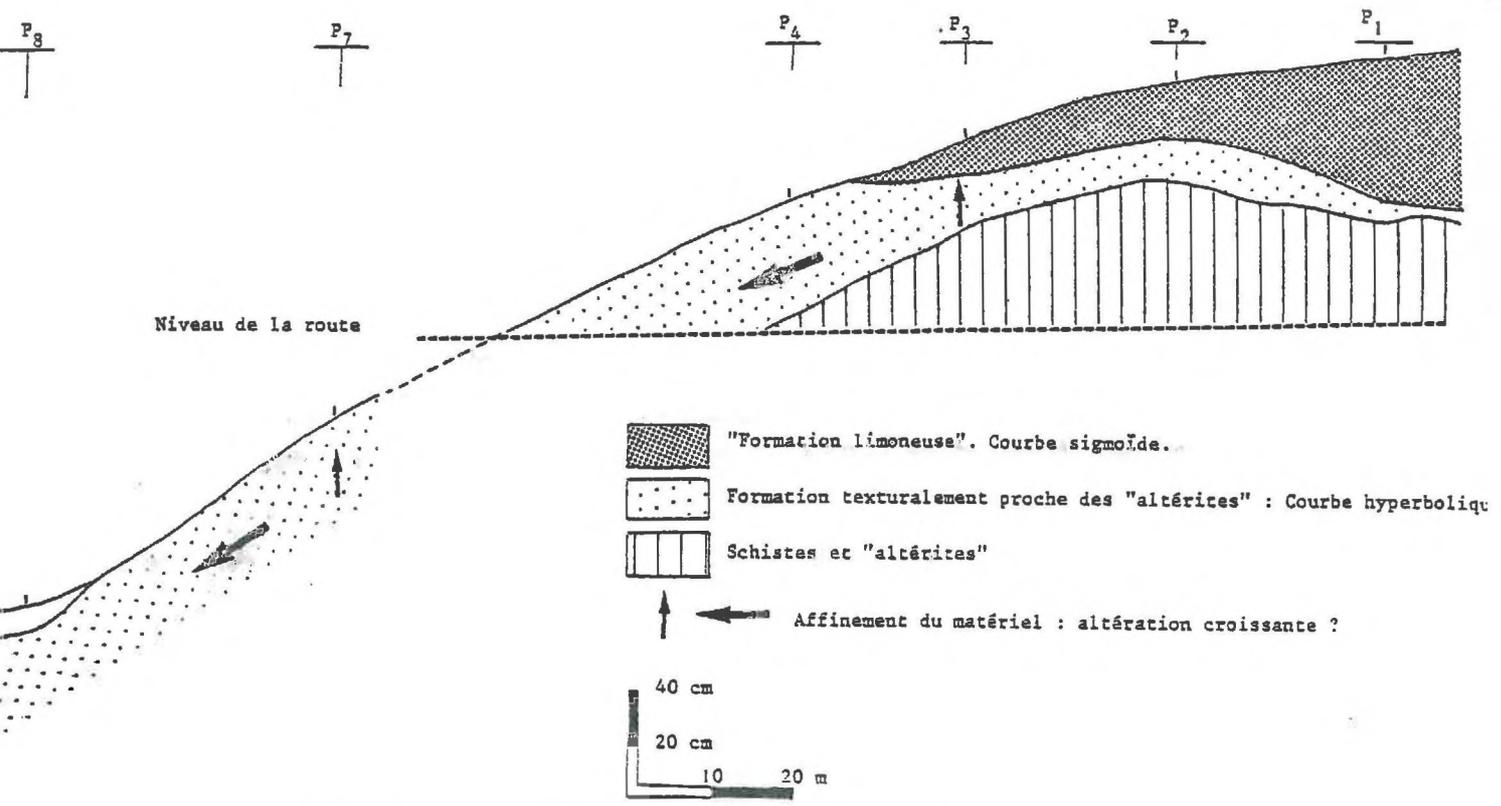


FIGURE 10: SAINT-ELOUAN : RÉPARTITION DES MATÉRIAUX (INTERPRÉTATION).

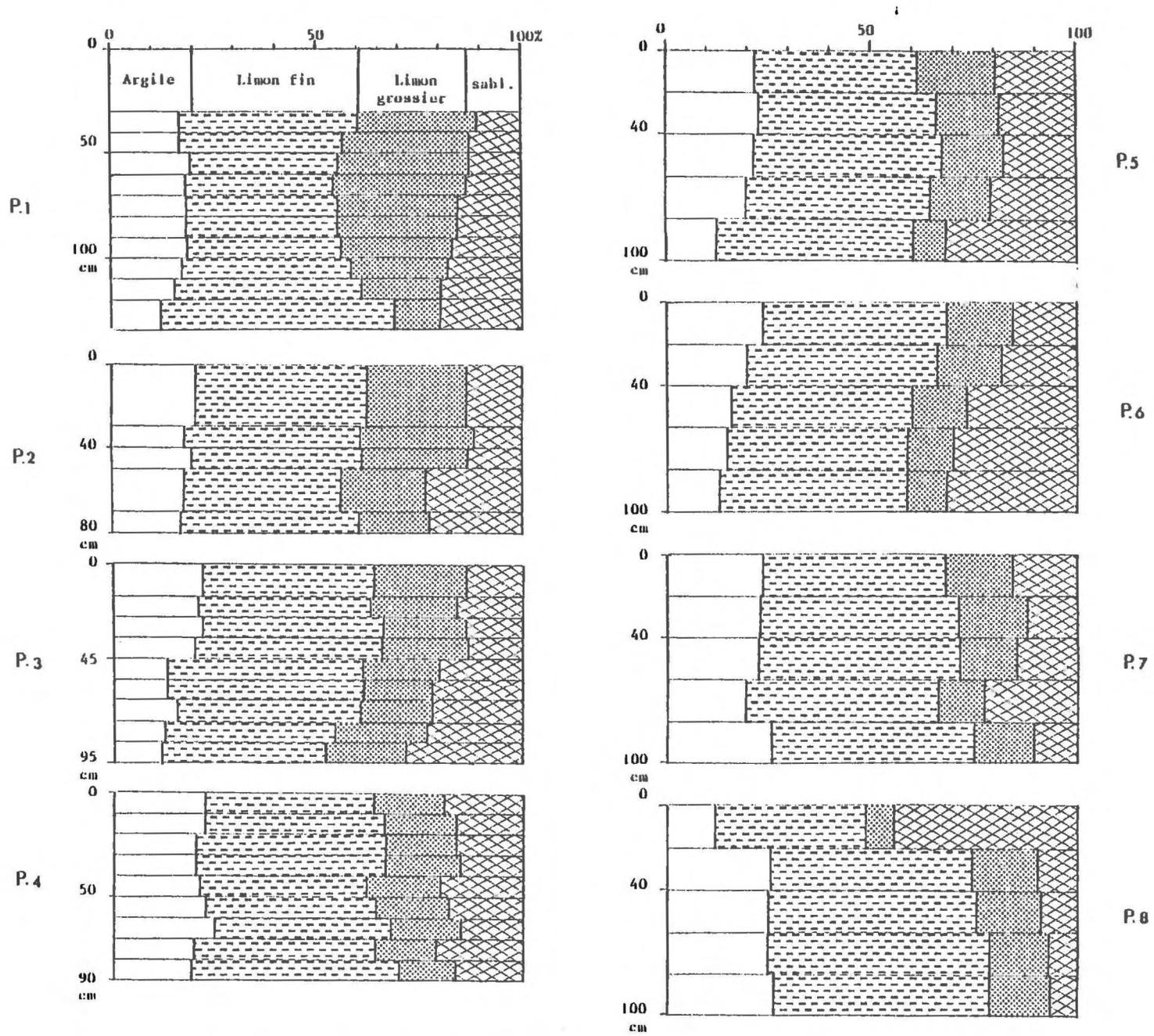


FIGURE 11: SAINT-FLOVAN. ÉVOLUTION DES TEXTURES.

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 8) 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 carrière 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  $\text{SiO}_2$  augmentent tandis que les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  diminuent.
- Dans le second quelle que soit la granulométrie de l'échantillon, on n'observe pas de variation chimique notable.



- 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 genèse 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  $\beta$ ). 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. 3 et 5 p. 20 et 28).

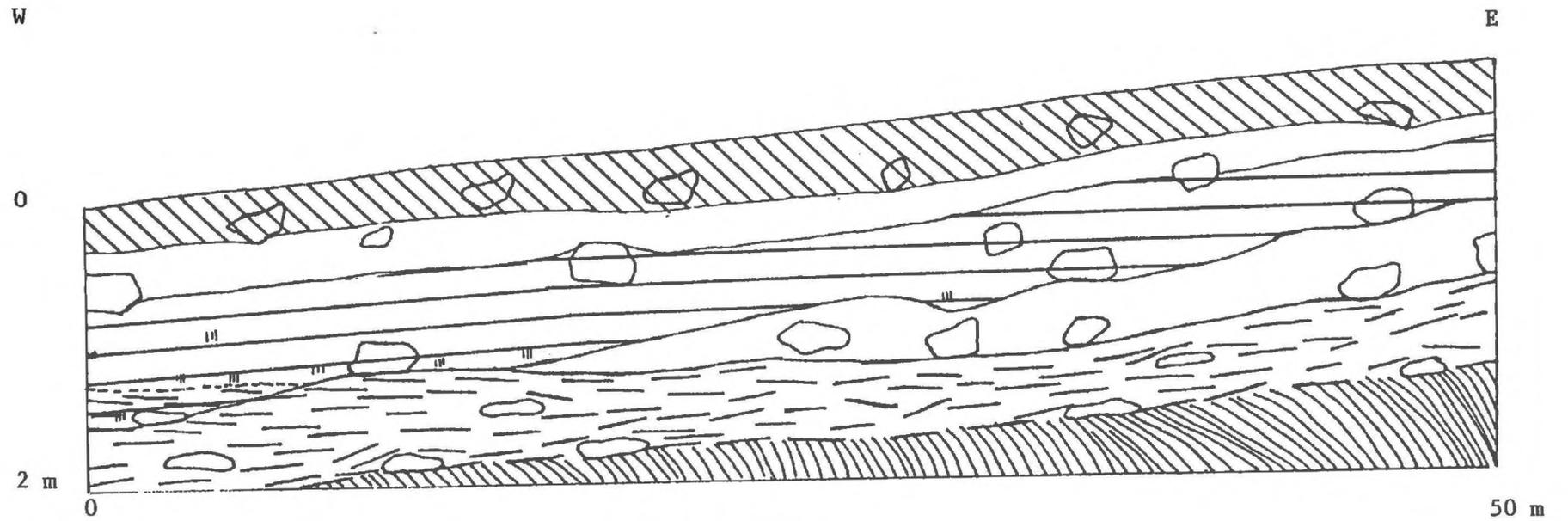
#### II - 1. Les faits

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



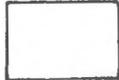
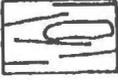
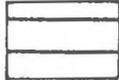
- |   |                                    |   |   |
|---|------------------------------------|---|---|
|    | horizon labouré                    |    | formation limoneuse à blocs de quartzites |
|   | horizon éluvié                     |   | formation à blocs de schistes             |
|  | horizon d'accumulation de l'argile |  | schistes en place                         |
|  | traces d'hydromorphie              |   |   |

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

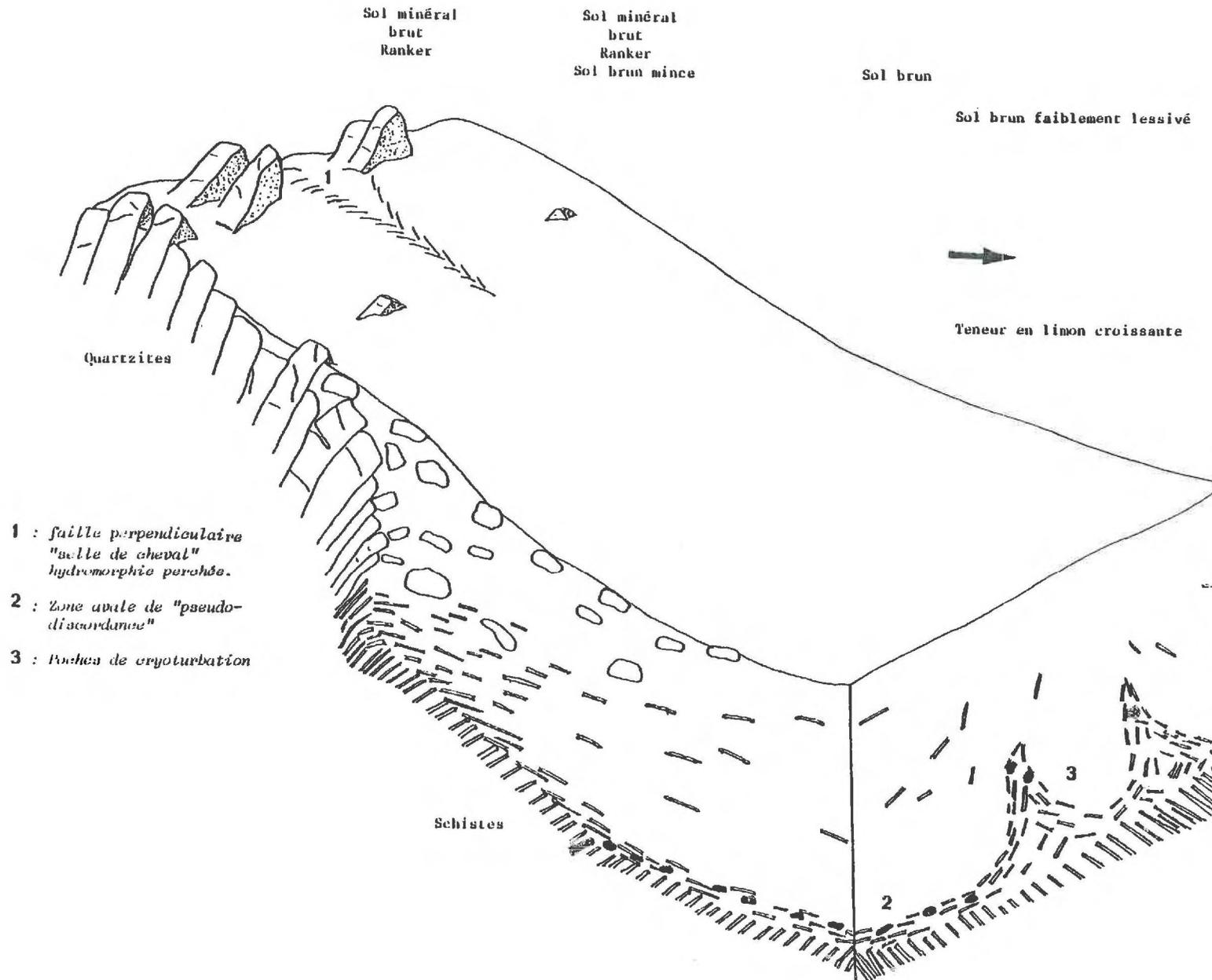
Toutes ces observations montrent l'importance des déplacements de matériaux le long des versants dans cette région. Deux questions se posent :

- 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 ; CALLEUX 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  $\beta$ . Le profil de Saint-Elouan  $\beta$  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 aval.

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 progressivement "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 quatre 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.

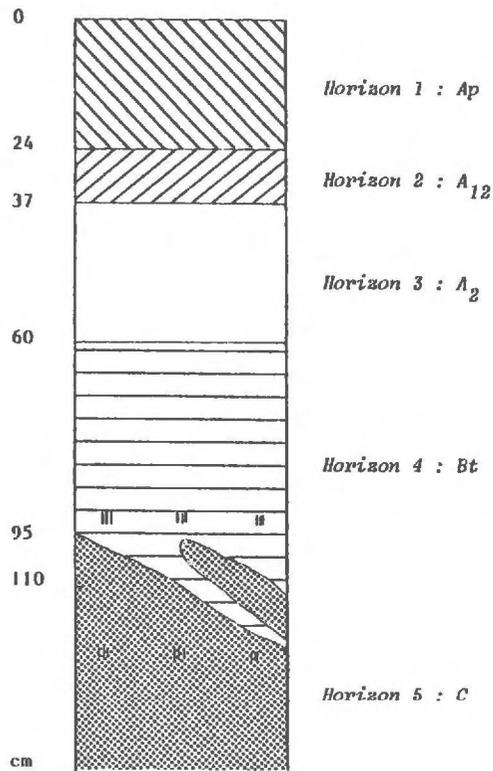


FIGURE 16: PROFIL DES GRANGES : REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE.

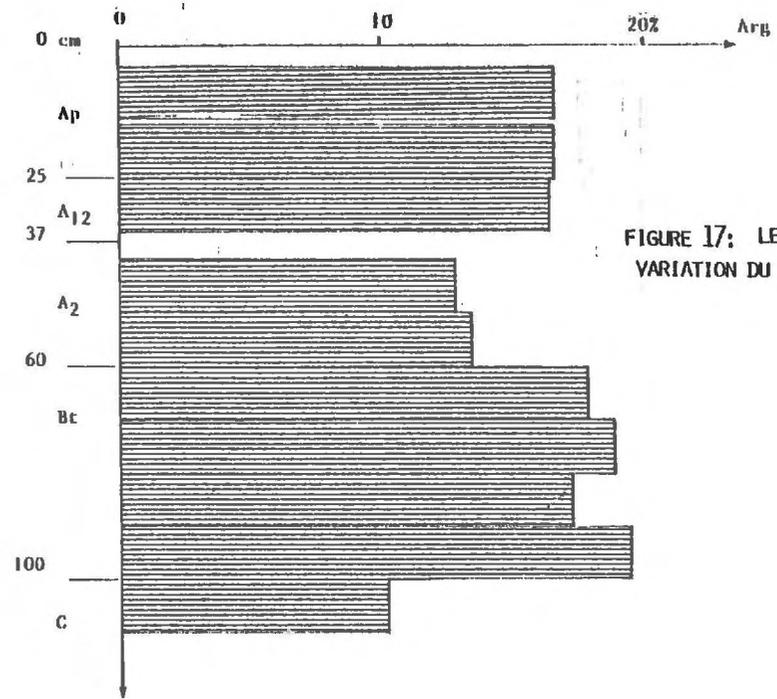


FIGURE 17: LES GRANGES  
VARIATION DU TAUX D'ARGILE.

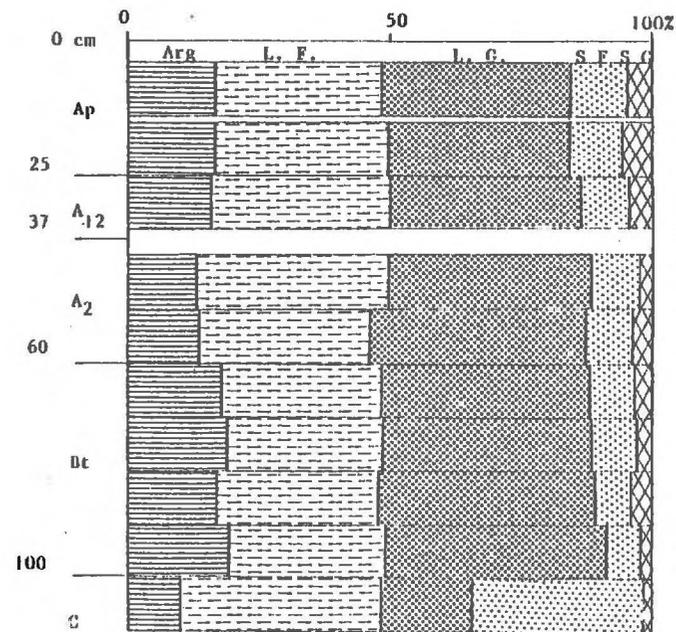
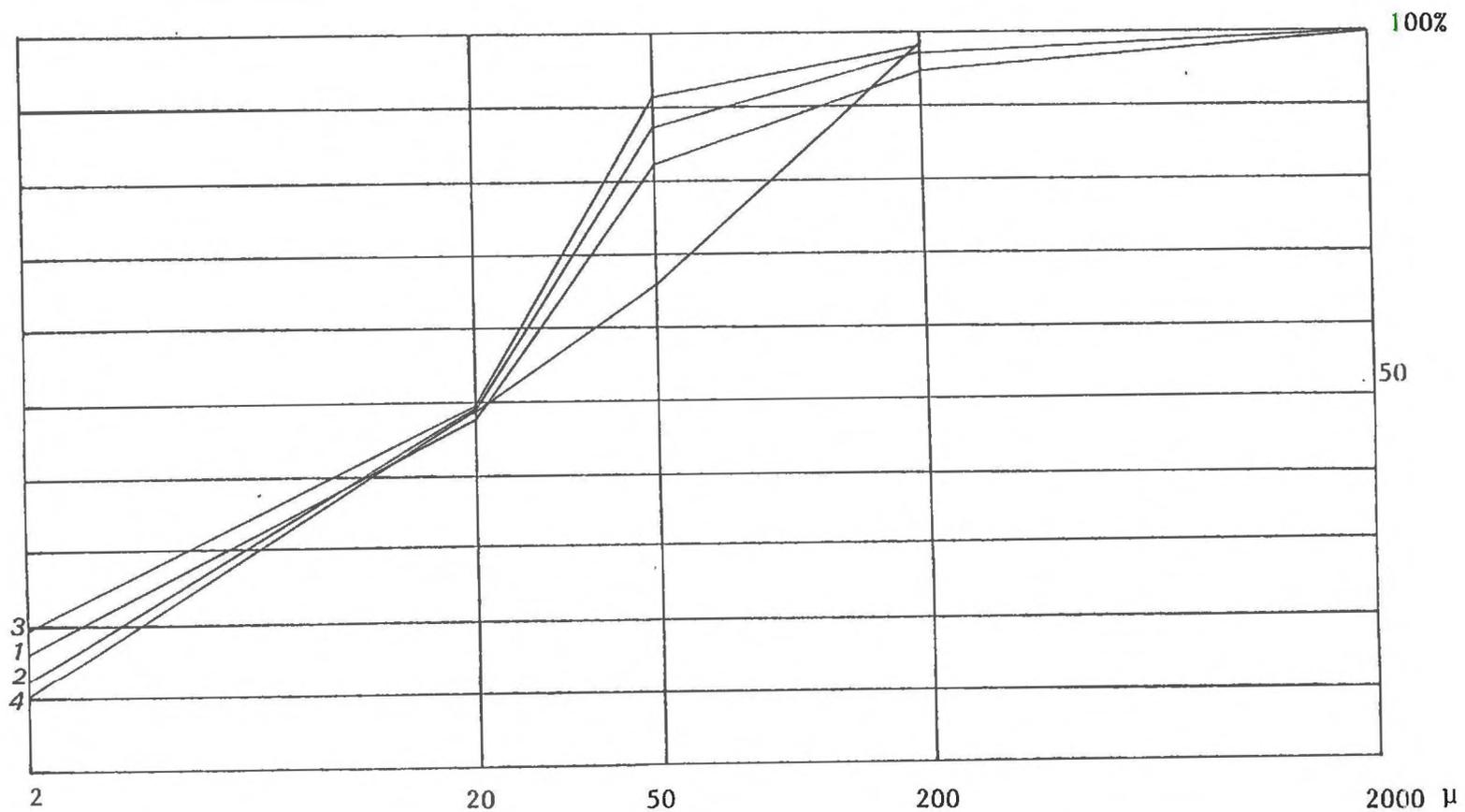


FIGURE 18: LES GRANGES  
VARIATION DE LA TEXTURE.

HORIZON	GRANULOMETRIE					MATIERE ORGANIQUE			
	A	L. F.	L. G.	S. F.	S. G.	C	M. O.	N	$\frac{C}{N}$
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	34,2	10,4	5,7	2,21	3,80	0,232	9,53
A <sub>12</sub> 25 - 35 cm	16,4	33,3	36,8	9,0	4,5	1,20	2,06	0,134	8,95
A <sub>2</sub> 40 - 50 cm	12,8	35,9	39,9	8,8	2,6				
A <sub>2</sub> 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	$\frac{S}{T}$	
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 <sub>12</sub> 25 - 35 cm	5,00	4,10	0,9	0,07	0,072	0,101	1,143	6,3	18,1	
A <sub>2</sub> 40 - 50 cm	5,05	4,40								
A <sub>2</sub> 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 (A<sub>p</sub>)  
 2 : 40 - 50 cm (A<sub>2</sub>)

3 : 90 - 100 cm (B<sub>t</sub>)  
 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  $A_p$ .

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<sub>1-2</sub>, A<sub>2</sub>, Bt (g), C (g), l'indice d'entraînement de l'argile est de 1,52, l'horizon A<sub>2</sub> 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 actions 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 § 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 INNEMANN (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 (Phi quartil 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.

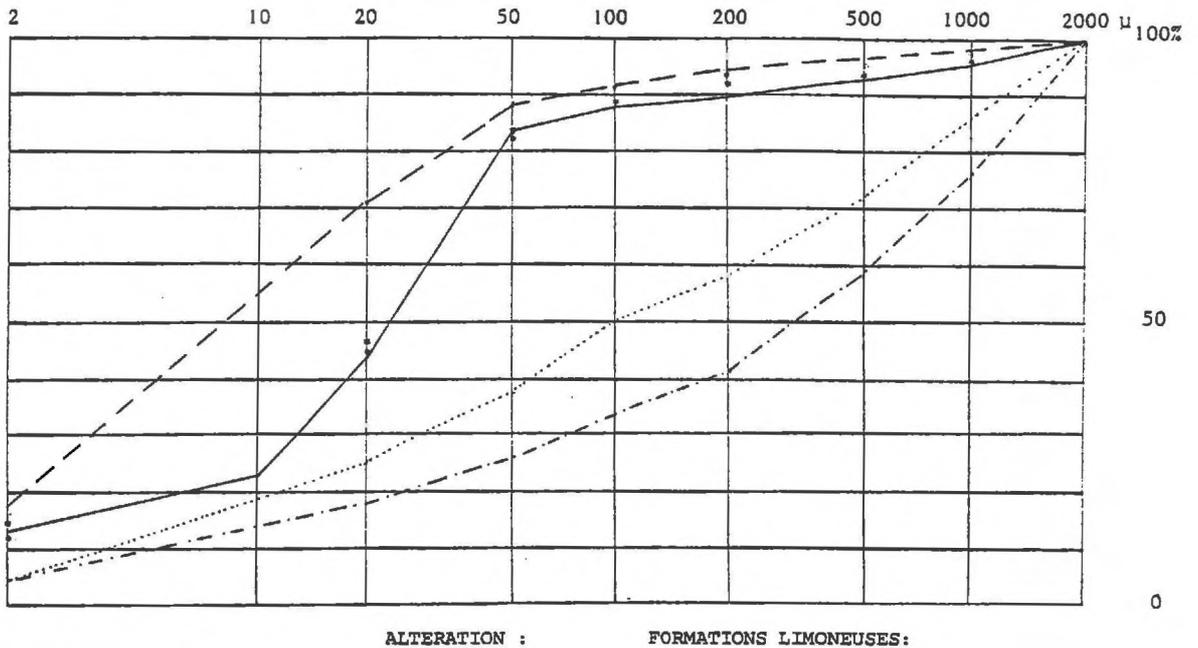
L'argument fondamental en faveur de la première hypothèse est :

- 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.



ALTERATION :                      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
Déviat. 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 $\frac{\phi16+\phi84-2(\phi50)}{2}$	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.

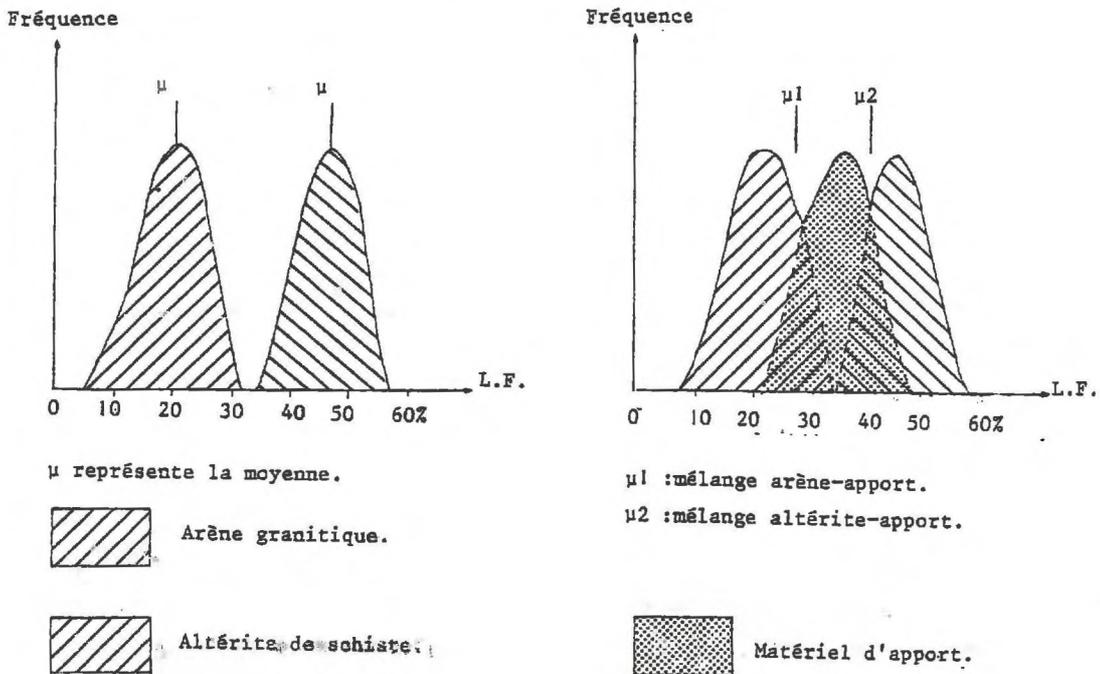


FIGURE 21 : COMPARAISON DES MOYENNES GRANULOMETRIQUES DE PRODUITS DE MELANGE ET DE PRODUITS D'ALTERATION (Les chiffres ne sont pas significatifs.)

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.

À 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  $d = \sqrt{x \cdot y}$  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  $50 \mu$  dans la formation de Pont-Réan, de  $10$  à  $20 \mu$  dans les schistes d'Angers et de  $10$  à  $30 \mu$  dans la formation du Riadan"

(LE CORRE, 1978).

PROFILS MINÉRAUX LOURDS	Rossuliét		St Elouan $\alpha$		St Elouan $\beta$		Ste Tréphine P. 1 *				Ste Tréphine P. 8 *			
	XT	R	ALE	R	XT	R	ALE		C		ALE		C	
							< 175 $\mu$	<64 $\mu$	<175 $\mu$	<64 $\mu$	<175 $\mu$	<64 $\mu$	<175 $\mu$	<64 $\mu$
	Zircon	59(40)	1	122(95)	1	10(5)	5(3)	7(5)	64(58)		9	17(14)	169140	
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													
Staurtide	3		5											
Andalousite	22	8	8	2	1	13		1				18		2
Sillimanite								3						
Disthène	1													
Épidote	4		2		2							13		
Homblende 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 irréfutable d'un apport de matériel et, dans le cas des glaucophanes, compte tenu de la géologie régionale, d'un apport relativement lointain.

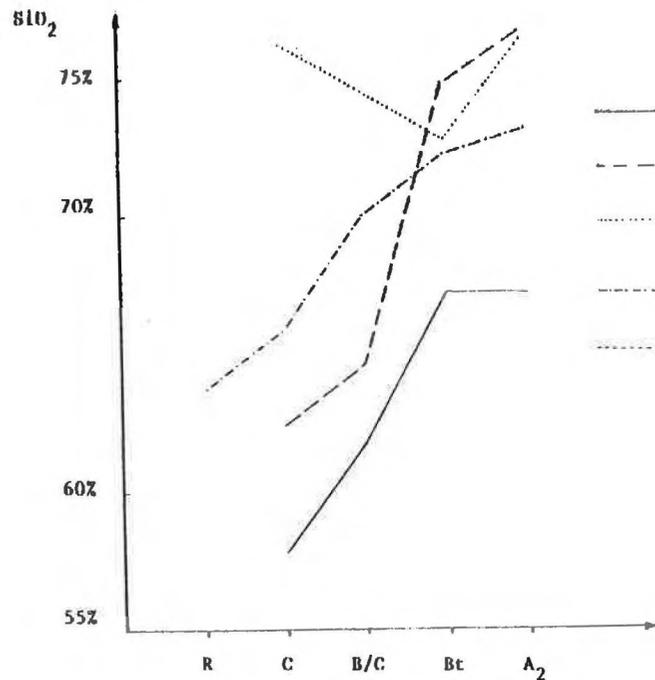
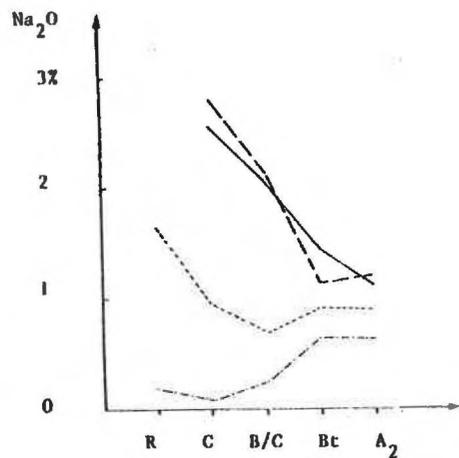
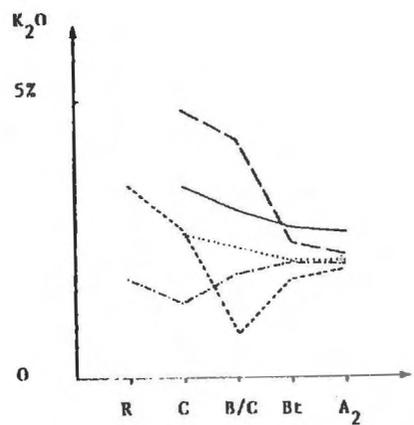
La taille de ces minéraux et leur abondance dans les formations limoneuses conduisent à penser que leur présence est, pour une part, liée à la texture de ces formations.

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 10 $\mu$  with mode at 4 $\mu$  (JACKSON et al 1971, WALKER and COSTINE, 1971), quite distinct from the dominantly 10 to 7 $\mu$  particle size distribution of loesses associated with the Pleistocene (RUHE, 1969 : JACKSON et al 1971)" (In JACKSON et al 1973, p. 137).



- La Croix du Roz granite
- - - Le Sourn n° 13, granite
- ... Les Granges, schistes et quartzites siluriens
- · - Saint-Elouan β Filon.
- · · Rossuliet : schistes Ordovicien

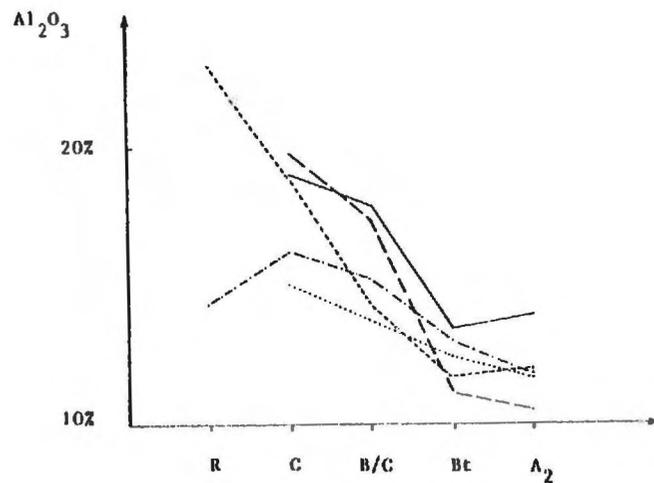
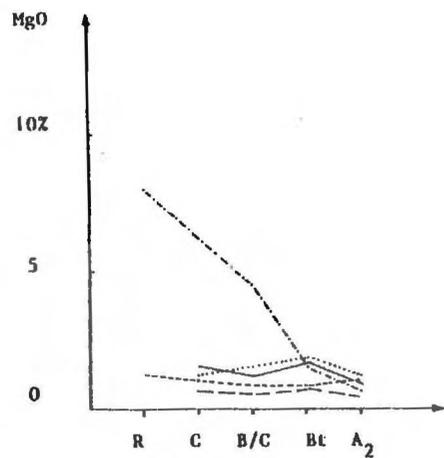
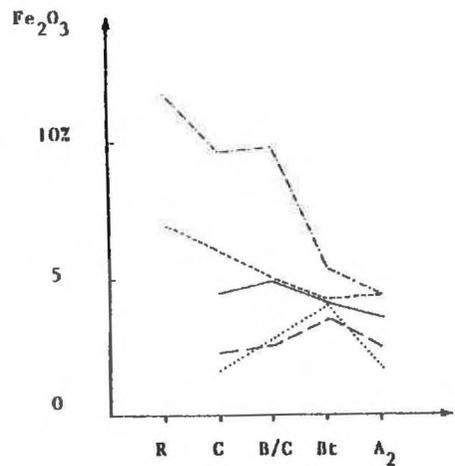


PLANCHE I : ÉVOLUTION DES ÉLÉMENTS MAJEURS.

### 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  $\text{SiO}_2$  augmente des arènes aux sols tandis que la teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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  $\alpha$  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  $\beta$  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  $\alpha$  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.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ , Sr, V, Ni, Co, Cr, B, Zn, Ga, Ca, Pb, Sn, ont été dosés par spectrométrie à lecture directe,  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$  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  $\beta$  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 supérieures 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 MARRIC, 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 :

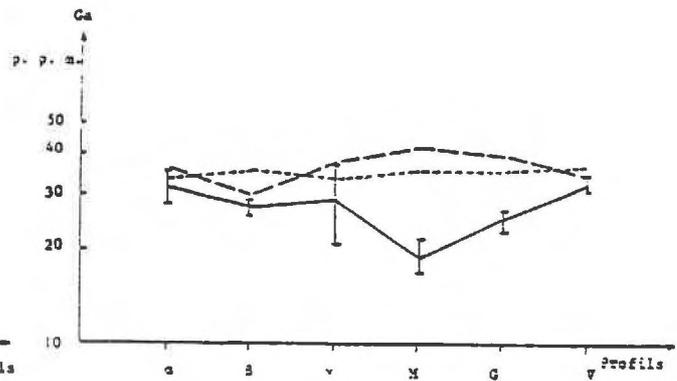
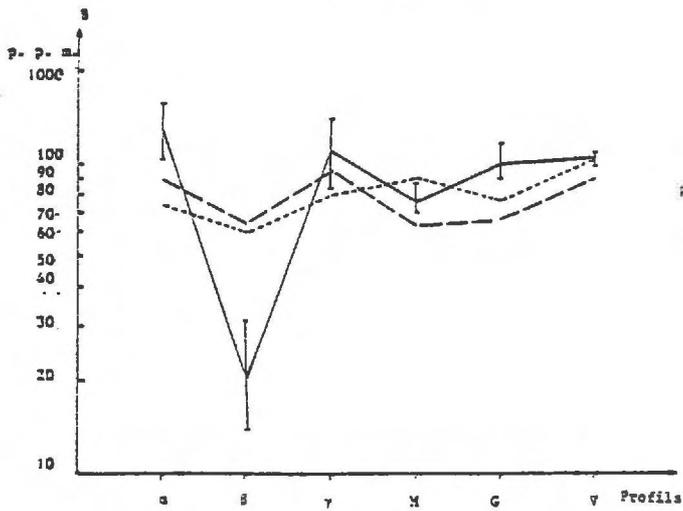
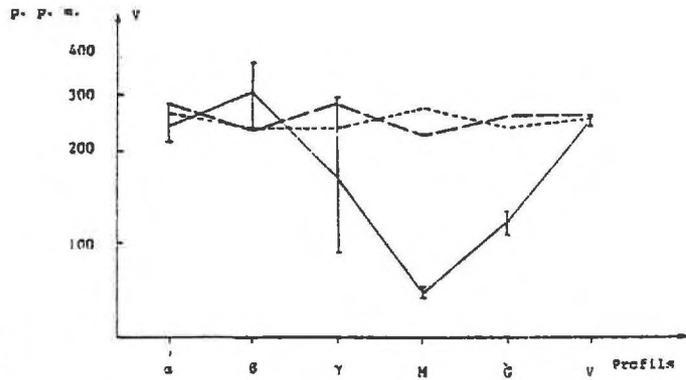
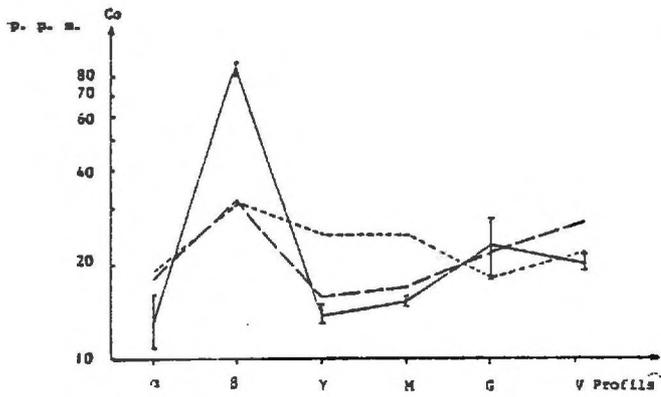
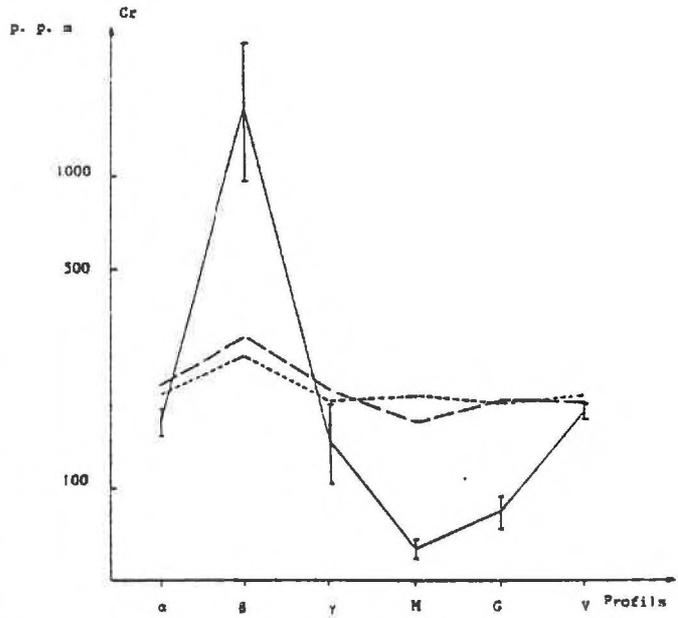
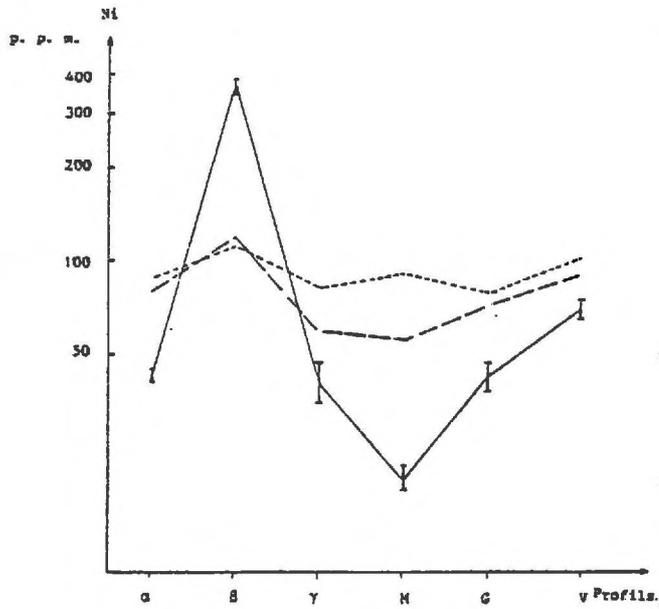
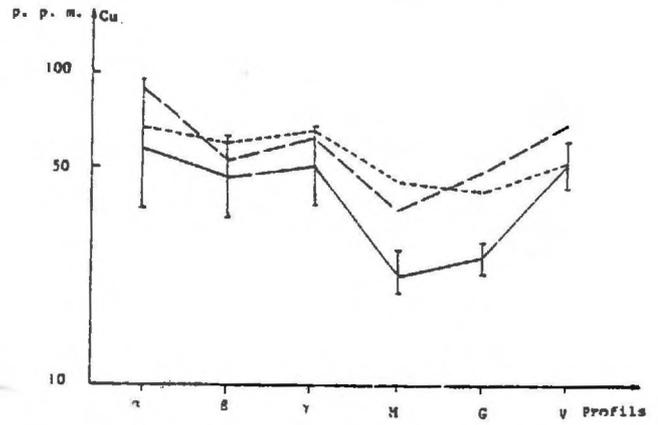
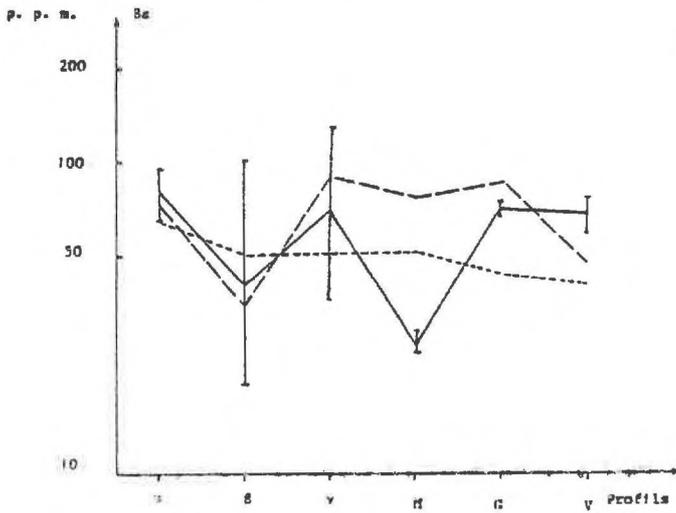
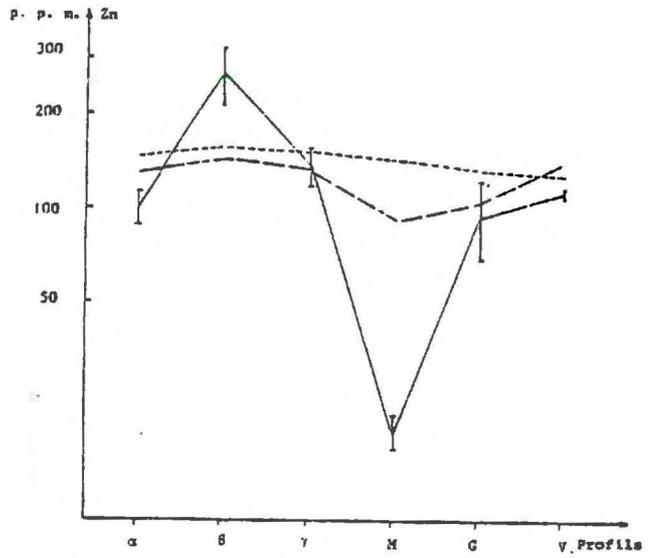
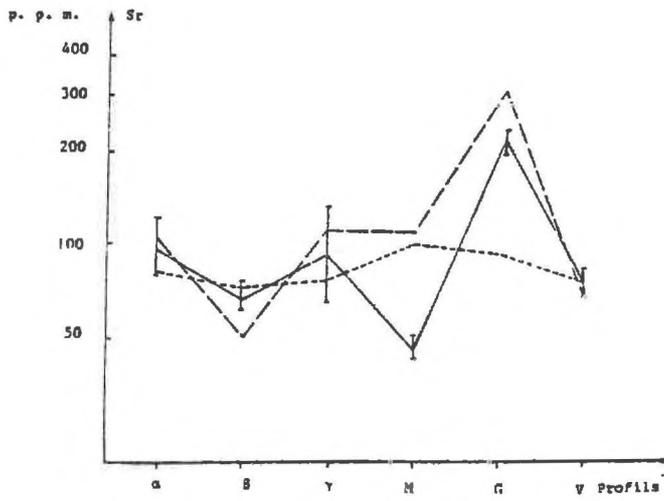


PLANCHE II : LES ELEMENTS TRACES:



----- Horizon XT  
----- Horizon B/C  
----- Substrat..

COMPARAISON DES PROFILS

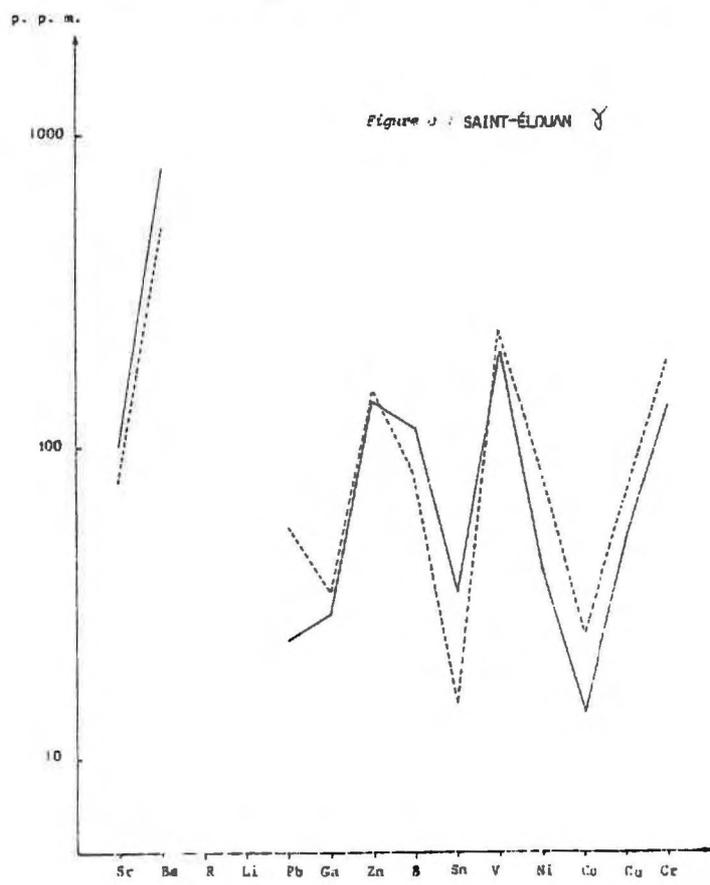
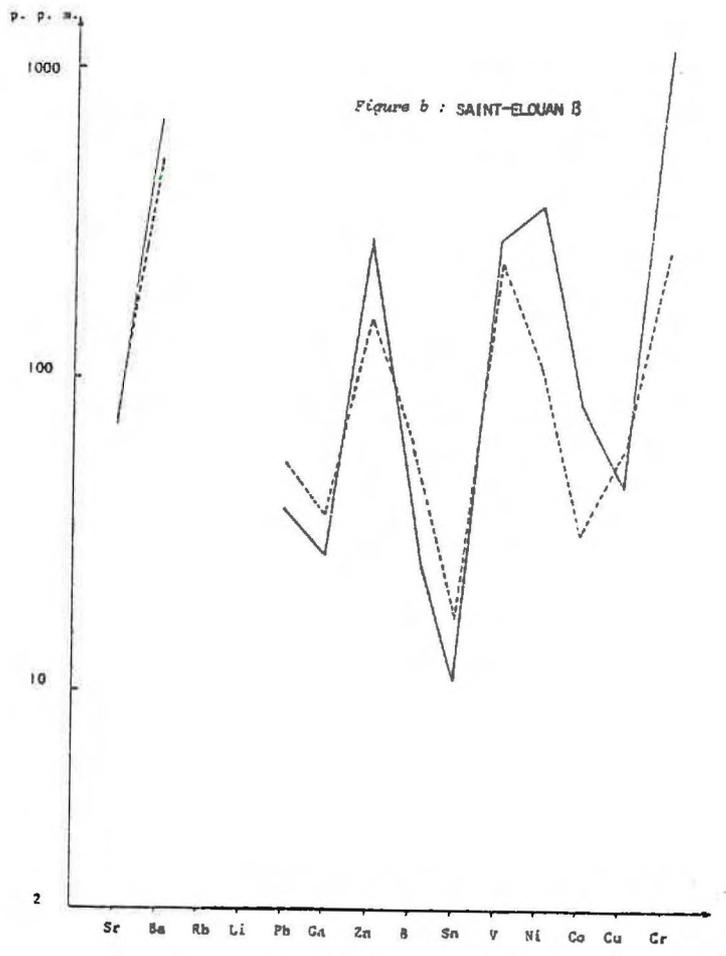
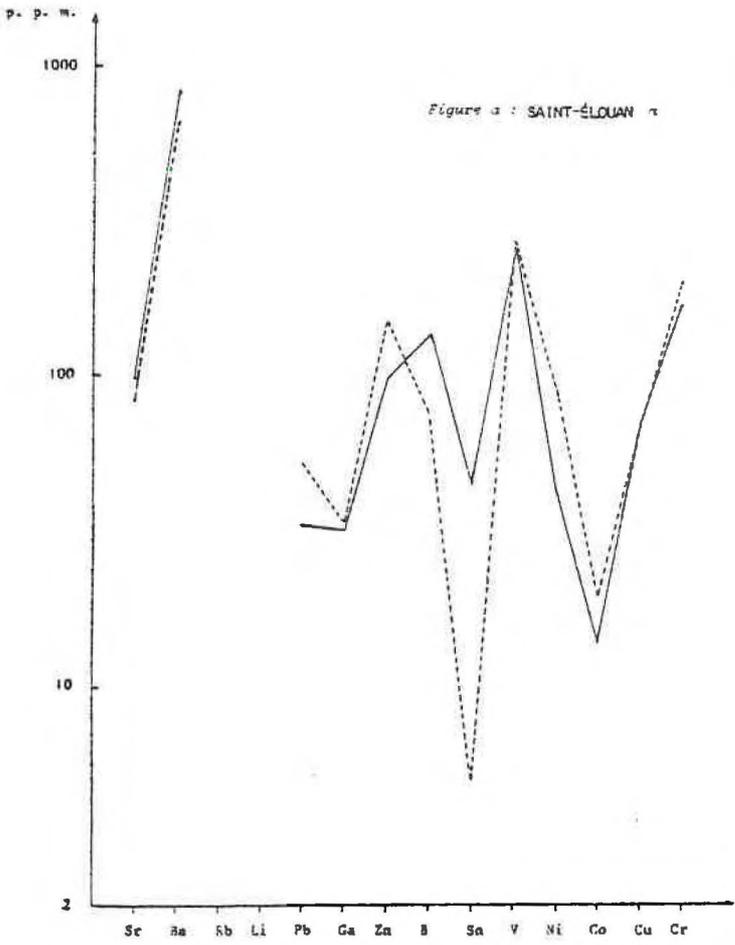
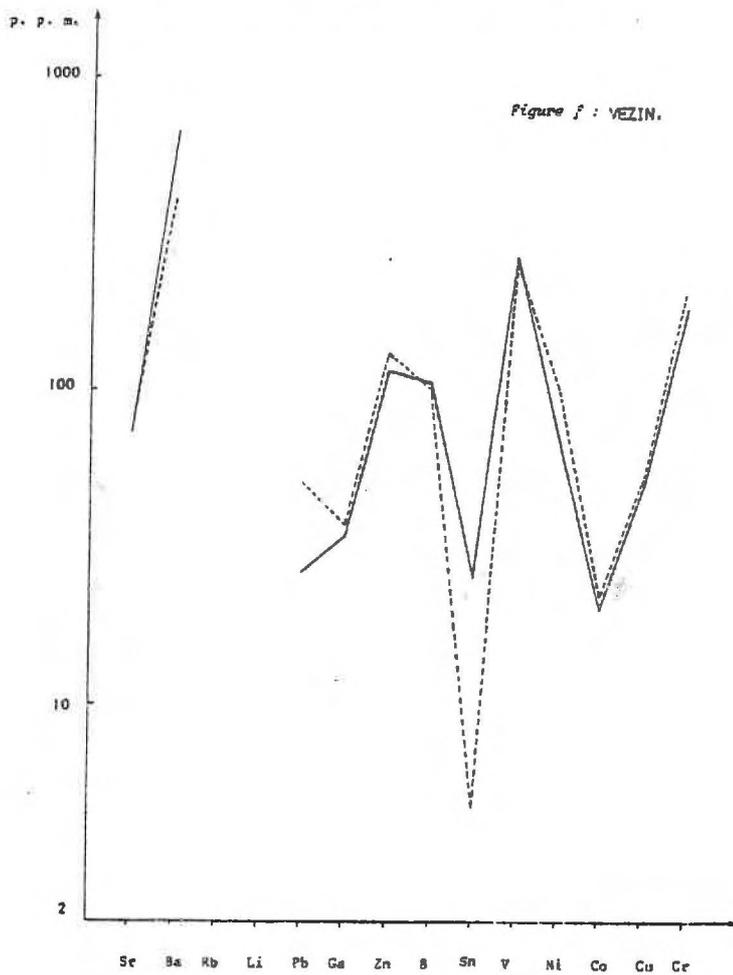
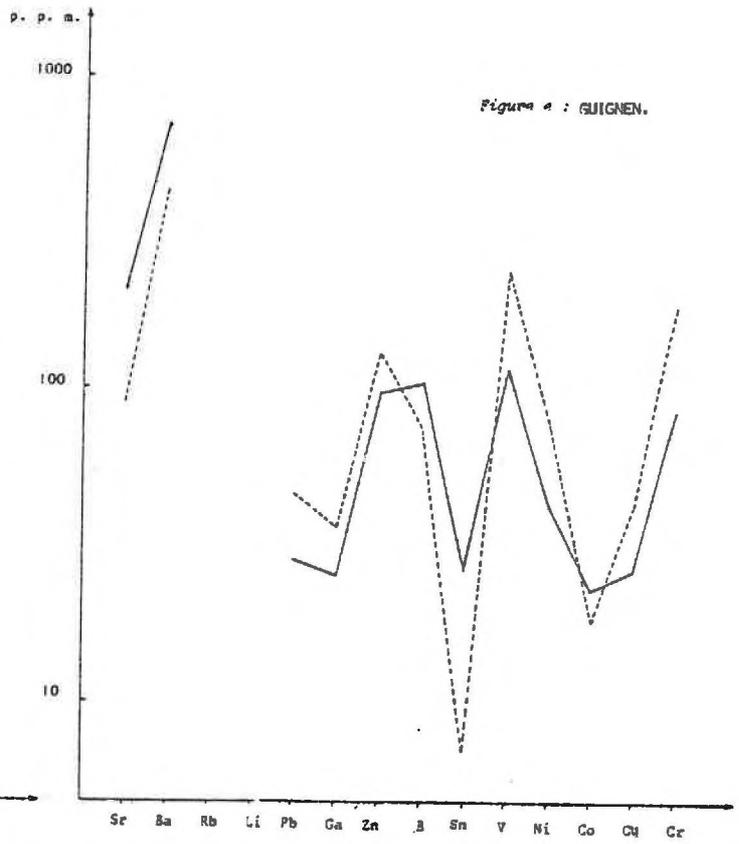
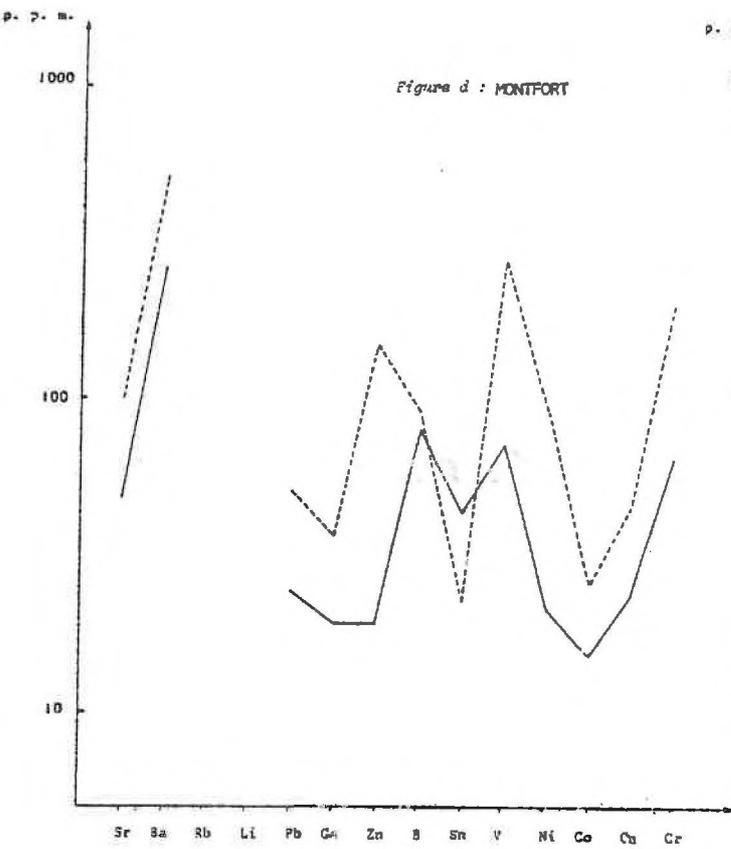


PLANCHE III : LES ELEMENTS TRACES:



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 granita 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 les 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 genèse 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 ?

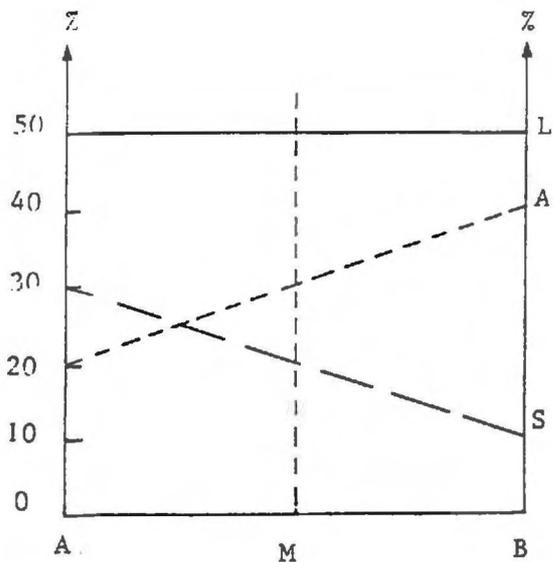


FIGURE 22 : DIAGRAMME PROPORTION DE MÉLANGE, CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES.

FIGURE 23 : RELATION ENTRE DEUX CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES.

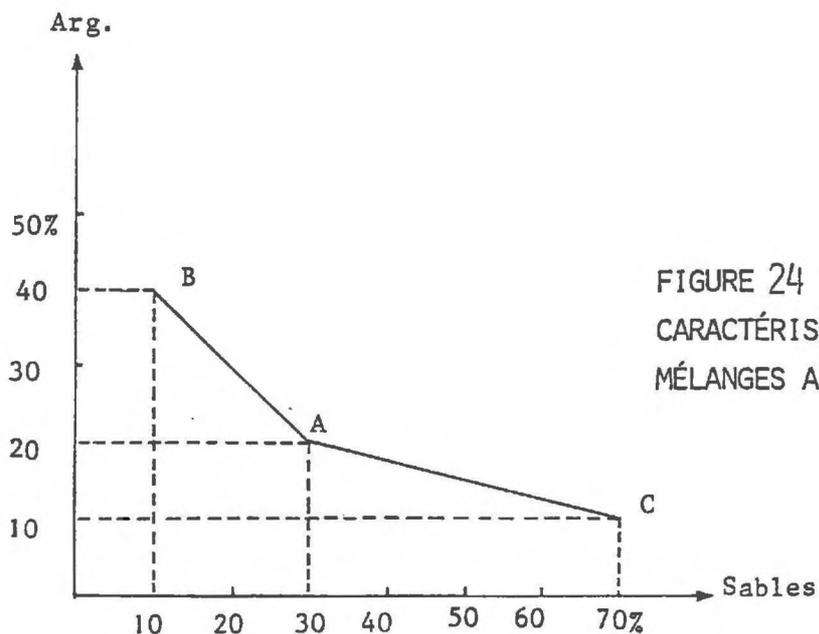
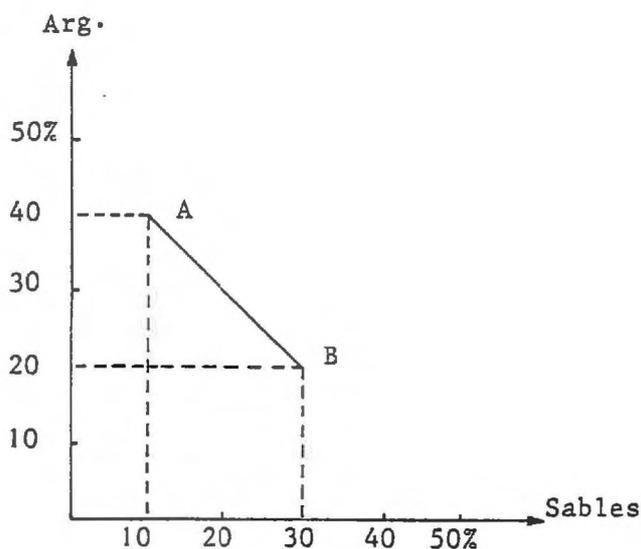


FIGURE 24 : RELATIONS ENTRE DEUX CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES, MÉLANGES A, B ET A, C INDÉPENDANTS.

## A) LE MÉLANGE DE MATÉRIAUX

### I - UN EXEMPLE CONCRET ; LES PROBLÈMES POSÉS.

#### 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

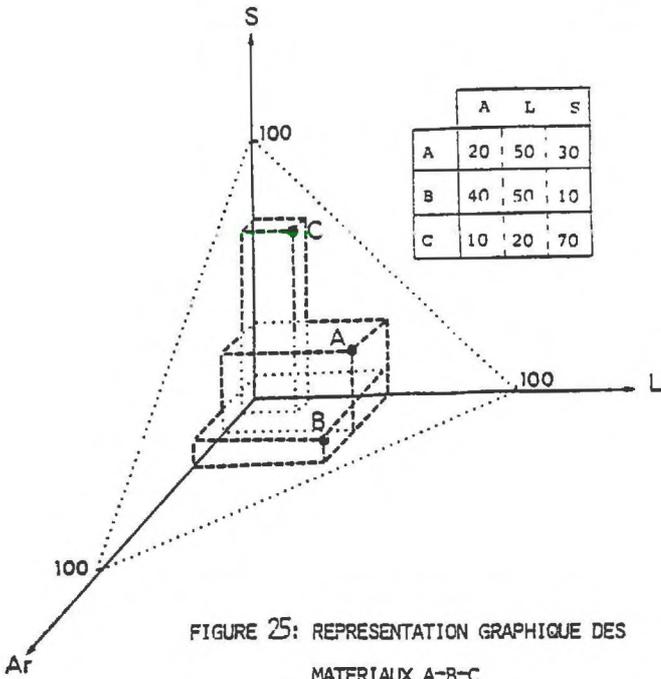


FIGURE 25: REPRESENTATION GRAPHIQUE DES MATERIAUX A-B-C

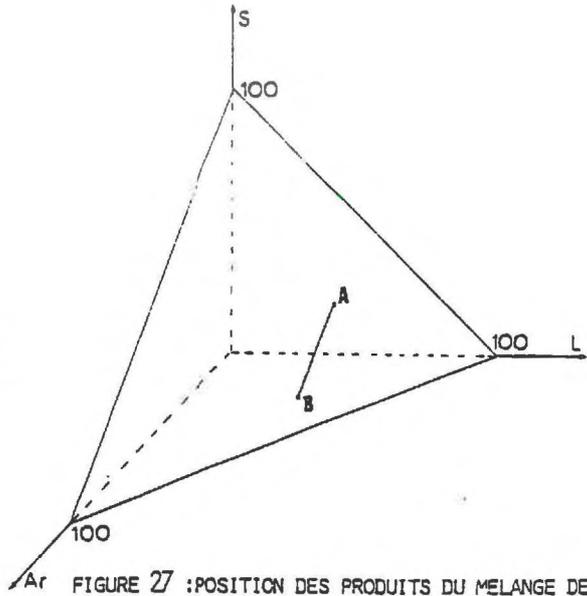


FIGURE 27: POSITION DES PRODUITS DU MELANGE DE A ET B

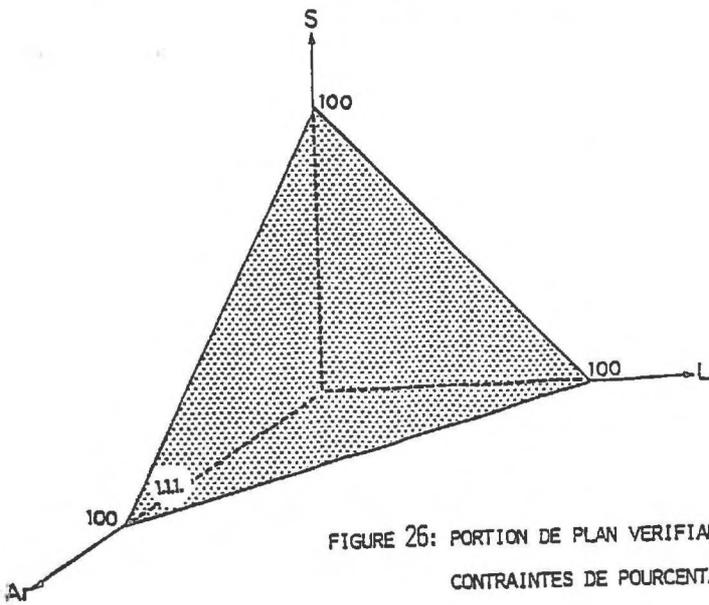


FIGURE 26: PORTION DE PLAN VERIFIANT LES CONTRAINTES DE POURCENTAGE

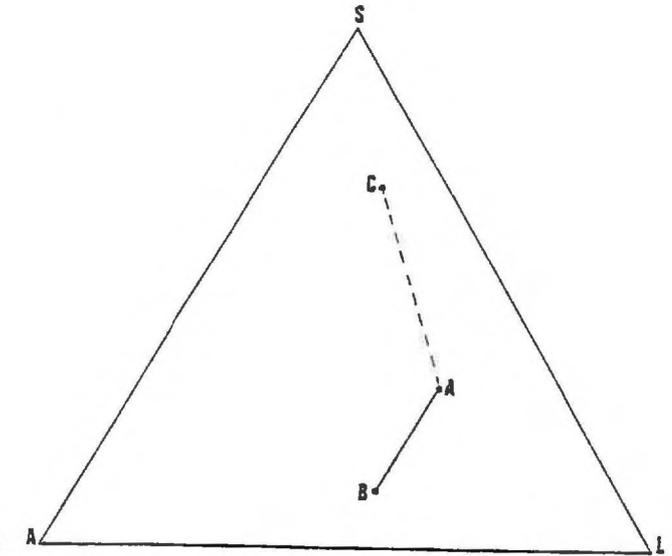
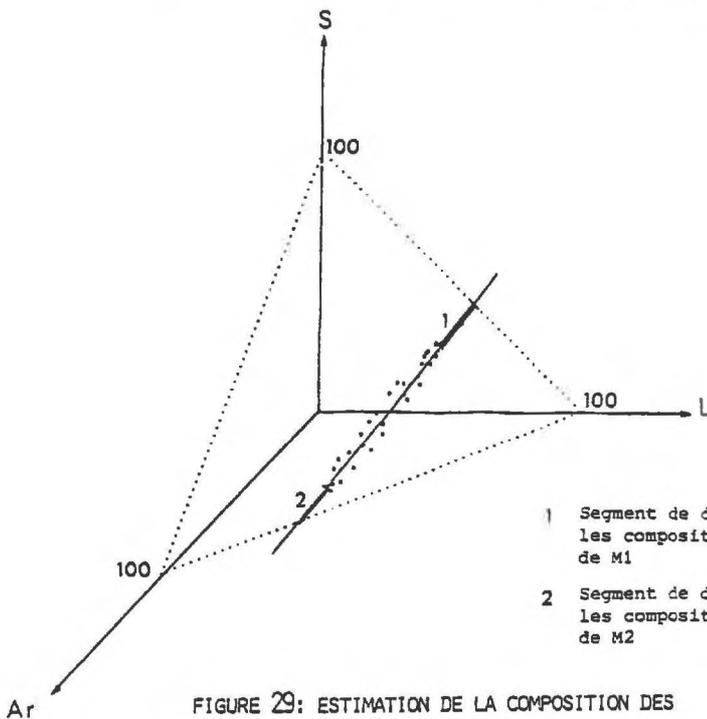


FIGURE 28: DEUX MELANGES INDEPENDANTS A-B ET A-C: POSITION DES PRODUITS DE MELANGE DANS LE TRIANGLE DE TEXTURE



- 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 % .*

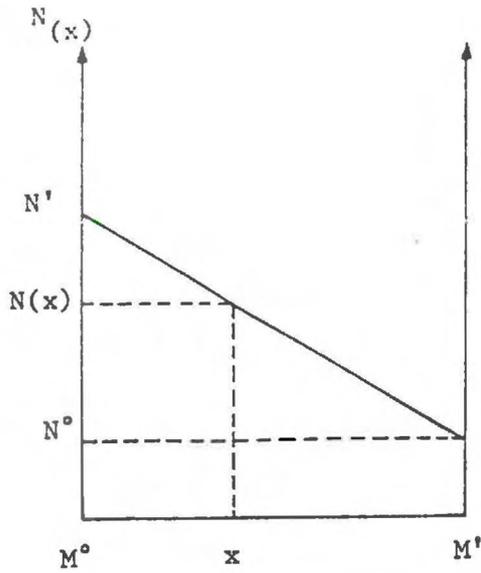


FIGURE 30: DIAGRAMME DE L'ÉQUATION 2  $N' > N^\circ$ , LA PENTE DE LA DROITE EST NÉGATIVE.

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

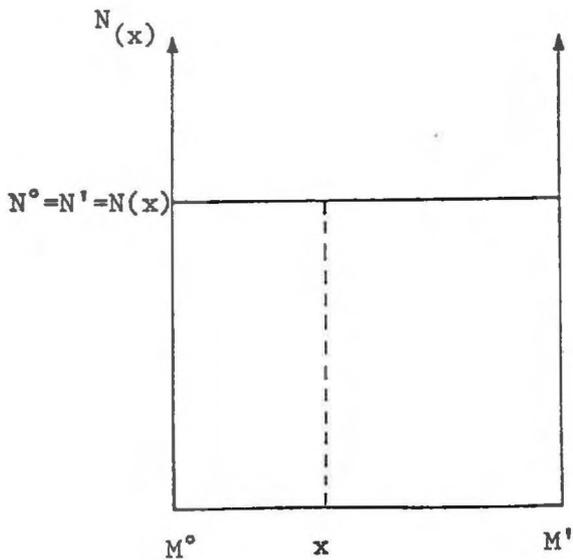
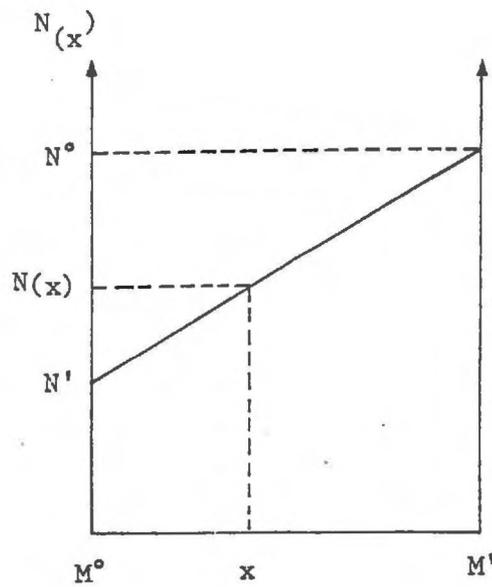


FIGURE 32 : DIAGRAMME DE L'ÉQUATION 2  $N^\circ = N' = N(x)$ , LA PENTE DE LA DROITE EST NULLE.

**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 :

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

Par définition :

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

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  $N^{\circ}$  : valeur de la caractéristique  $N$  du matériel  $M^{\circ}$

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

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

$x$  : proportion de  $N^{\circ}$  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 :

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

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

Lorsque  $x = 1$   $N_1 = N^{\circ}$

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  $(1, N^{\circ})$

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

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  $N^{\circ} = N' \iff N^{\circ} = N' = N_{(x)} = \text{constante}$  (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 :

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

et

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

Ces équations  $\textcircled{a}$  et  $\textcircled{b}$  existent si, et seulement si,

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

Ces équations entraînent que :

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

Soit :

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

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

Soit :

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

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

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

avec  $K^{\circ}$  et  $N^{\circ}$  valeurs des caractéristiques K et N dans le matériel  $M^{\circ}$

$K'$  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 :  $(K^{\circ}, N^{\circ})$  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

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

pente de cette droite. Lorsque  $\alpha$  est défini par  $\frac{K^o - K'}{N^o - N'}$  ce n'est qu'un cas particulier.

Ce cas est intéressant lorsque les matériaux  $M^o$  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  $N^o$  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 :

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

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

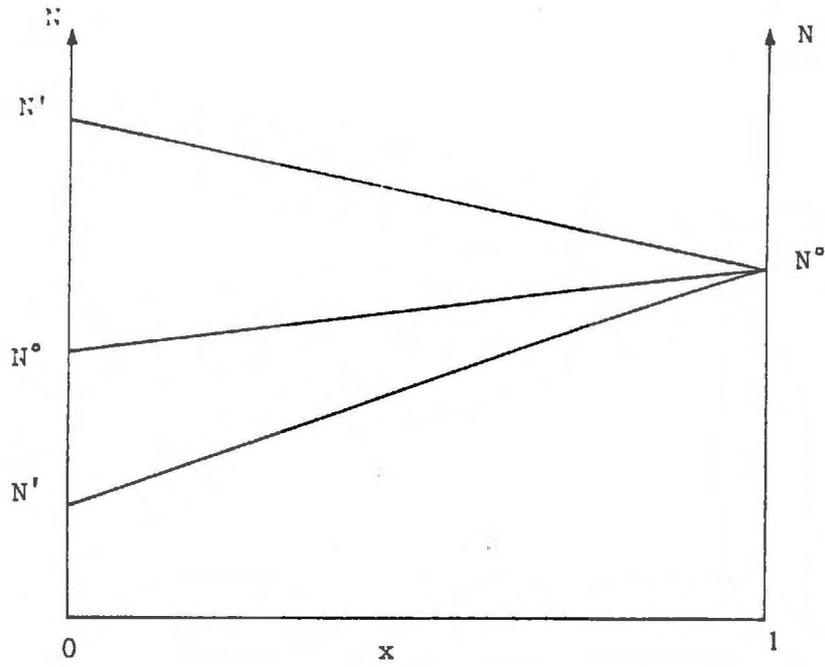


FIGURE 33 a : COMPOSITION DES MATÉRIAUX EN FONCTION DES PROPORTIONS DE MÉLANGE, CAS DE TROIS MÉLANGES INDÉPENDANTS, 1 MATÉRIEL COMMUN.

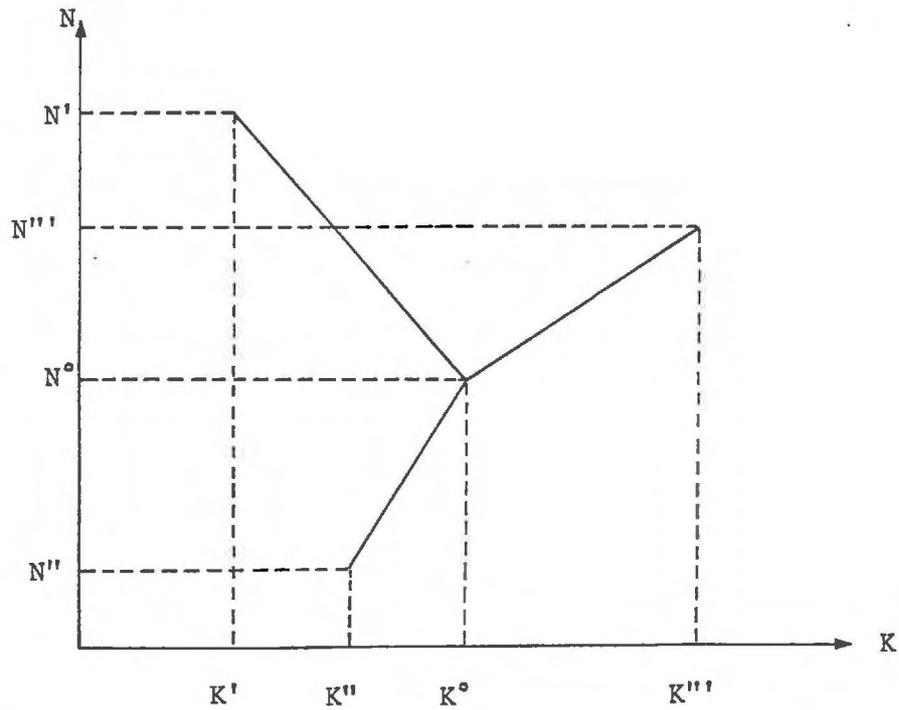


FIGURE 33 b : ÉVOLUTION DE DEUX CARACTÉRISTIQUES LORS DU MÉLANGE DE MATÉRIAUX, CAS DE TROIS MÉLANGES INDÉPENDANTS, 1 MATÉRIEL COMMUN ( $M^\circ$ ).

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.

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

$$K' (N^{\circ} - N') = (K^{\circ} - K') N' \implies \boxed{K' N^{\circ} = K^{\circ} N'} \iff \frac{K^{\circ}}{N^{\circ}} = \frac{K'}{N'}$$

Hypothèse 1 : Si  $K^{\circ}$ ,  $K'$ ,  $N^{\circ}$ ,  $N'$  sont différents de zéro les proportions des caractéristiques  $K$  et  $N$  sont les mêmes dans les matériaux  $M^{\circ}$  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  $M^{\circ}$ , 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 :

$$K_1 = \alpha_1 N_1 + \beta_1$$

$$K_2 = \alpha_2 N_2 + \beta_2$$

$$K_i = \alpha_i N_i + \beta_i$$

Au point de rencontre :

$$K_1 = K_2 = K_3 = \dots = K_i$$

et 
$$N_1 = N_2 = N_3 = \dots = N_i$$

Ceci entraîne entre les droites 1 et 2

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

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

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

Soit dans un cas quelconque : 
$$\frac{\beta_i - \beta_j}{\alpha_i - \alpha_j} = -N$$

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 ;  $K^o, N^o$ , 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.

$\alpha_1$  et  $\beta_1$  : pente et ordonnée à l'origine de la droite de régression reliant les caractères K et N dans la séquence 1.

$\alpha_2$  et  $\beta_2$  : pente et ordonnée à l'origine de la droite de régression reliant les caractères K et N dans la séquence 2.

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

$$\alpha_1 = \frac{K^o - K'}{N^o - N'} \quad \alpha_2 = \frac{K^o - K''}{N^o - N''}$$

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

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

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

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 :

$$\begin{aligned} A(x) &= \alpha_a \cdot N(x) + \beta_a \\ B(x) &= \alpha_b \cdot N(x) + \beta_b \\ K(x) &= \alpha_k \cdot N(x) + \beta_k \\ M(x) &= \alpha_m \cdot N(x) + \beta_m \end{aligned}$$

$$A(x) + \dots + K(x) + \dots + M(x) = (\alpha_a + \dots + \alpha_n + \dots + \alpha_n) N_x + (\beta_a + \dots + \beta_k + \dots + \beta_n) \text{ d'où}$$

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

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

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

a) valeur de la pente

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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

$\sum_{k=A}^N K_{(x)} = 100$
------------------------------

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  $M^0$  et un matériel issu de l'altération du substrat  $M'$ .

D'après l'équation 1  $N_{(x)} = (N^0 - N') \cdot x + N'$

D'où le pourcentage d'apport  $x = \frac{N_{(x)} - N'}{N^0 - N'}$

avec  $x$  : pourcentage d'apport

$N^0$  : 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

$$x = \frac{K_{(x)} - K'}{K^0 - K'} = \frac{N_{(x)} - N'}{N^0 - N'}$$

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  $M^{\circ}$  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 :

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

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

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

$$K(x) = \alpha \cdot N(x) + \beta \quad \text{Equation 4}$$

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

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

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

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

III - 1. Le modèle de mélange

III - 1. 1. Notations

Soient :

-  $X_{ij}$  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,  $j \in (1, \bar{J})$  ;

-  $X_{iJ}$  : l'ensemble des mesures pour le prélèvement  $i$  :

$$X_{iJ} = \{X_{ij} / j = 1, \bar{J}\}$$

-  $X_{IJ}$  : l'ensemble des mesures pour tous les prélèvements :

$$X_{IJ} = \{X_{ij} / i = 1, \bar{I} ; j = 1, \bar{J}\}$$

Ces notations peuvent être représentées par le schéma qui suit :

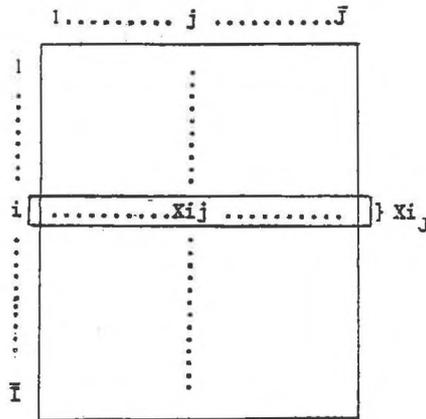


FIGURE 34 : RECAPITULATION DES NOTATIONS

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  $Z_j$  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  $P_i$  la proportion de Y :

$$\forall i \in 1, \bar{I} ; j \in 1, \bar{J} \text{ on a : } X_{ij} = P_i Y_j + (1 - P_i) Z_j$$

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

- les  $X_{ij}$  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 subi 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 :

$$\forall i \in 1, \bar{I} ; j \in 1, \bar{J} \text{ on a : } X_{ij} = P_i Y_j + (1 - P_i) Z_j + A_{ij}$$

où  $A_{ij}$  est une variable aléatoire qui représente à la fois les erreurs de mesure et la transformation postérieure au mélange.

Dans ce modèle  $X_{ij}$  est une variable aléatoire,  $P_i, Y_j, Z_j$ , sont des paramètres. Pour estimer ces paramètres, quelle que soit la méthode utilisée, il est nécessaire de lui adjoindre une hypothèse:

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

Cette hypothèse implique notamment que, pour chaque échantillon et quelle que soit la variable considérée,  $A_{ij}$  peut être indifféremment positif ou négatif. Mais les transformations postérieures au mélange font que cette hypothèse est partiellement fautive. 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  $A_{ij}$  liés à la nature des horizons pédologiques, donc à la profondeur du prélèvement (fig. 35)

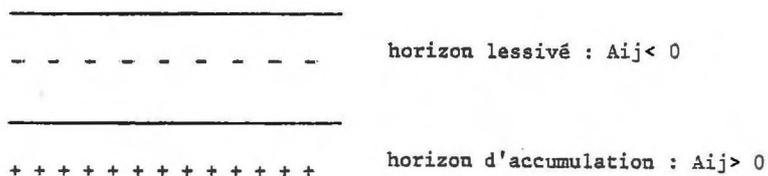


Figure 35 : DISTRIBUTION ATTENDUE DES  $A_{ij}$  DANS LE CAS DE L'ARGILE.

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  $P_i, Y_j, Z_j$
- $\hat{X}_{ij} = \hat{P}_i \hat{Y}_j + (1 - \hat{P}_i) \hat{Z}_j$ , l'estimation de  $X_{ij}$
- $\hat{P}_I = \{\hat{P}_i \mid i \in I, \bar{I}\}$
- $\hat{Y}_J = \{\hat{Y}_j \mid j \in J, \bar{J}\}$
- $\hat{Z}_J = \{\hat{Z}_j \mid j \in J, \bar{J}\}$
- $\hat{X}_{IJ} = \{\hat{X}_{ij} \mid i \in I, \bar{I}, j \in J, \bar{J}\}$

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  $X_{ij}$ . Or il est naturel de mesurer l'écart entre  $\hat{X}_{IJ}$  et  $X_{IJ}$  par  $Q = \sum_i \sum_j (\hat{X}_{ij} - X_{ij})^2$

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  $I \times J$  équations du type :  $X_{ij} = P_i Y_j + (1 - P_i) Z_j + \hat{A}_{ij}$  avec  $I + 2J$  inconnues.

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

- C 1 :  $0 \leq \hat{P}_i \leq 1 \quad i \in I, \bar{I}$
- C 2 :  $0 \leq \hat{Y}_j \leq 100 \quad j \in J, \bar{J}$
- C 3 :  $0 \leq \hat{Z}_j \leq 100 \quad j \in J, \bar{J}$
- 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  $I + 2J$  paramètres et  $I \times J$  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  $X_{ij}$  comme un élément de l'espace  $R^J$ . 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  $R^J$  et  $\hat{X}_{ij} = \{\hat{X}_{ij} = \hat{P}_i \hat{Y}_j + (1 - \hat{P}_i) \hat{Z}_j \mid j \in J, \bar{J}\}$  appartient au segment qui relie  $\hat{Y}_J$  et  $\hat{Z}_J$ .

Notons que  $Q$  représente la distance usuelle entre  $\hat{X}_{ij}$  et  $X_{ij}$ .

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

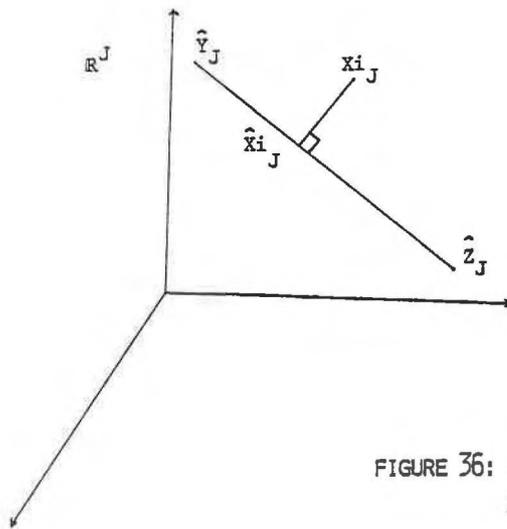


FIGURE 36: INTERPRÉTATION GÉOMÉTRIQUE  
DU MODÈLE DE MÉLANGE

D'où une nouvelle formulation du problème : Recherche des 2 points  $\hat{Z}_J$  et  $\hat{Y}_J$  de  $R_J$  tels que l'inertie des points  $X_{i_j}$  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 vérifiée. En effet, tous les  $X_{i_j}$  vérifient  $\sum_j X_{i_j} = 100$ . Le problème se situe donc dans l'hyperplan de  $R^J$  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  $\hat{Y}_J$ .



avec :

$Y_{0j}$  et  $Z_{0j}$  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.

$$\hat{X}_{zj} = \min \{ \hat{X}_{ij} \mid i \in 1, I \}$$

$$\hat{X}_{yj} = \max \{ \hat{X}_{ij} \mid i \in 1, I \}$$

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  $\hat{X}_{ij}$  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  $(\hat{Y}_{0j}, \hat{X}_{zj})$  puis  $(\hat{X}_{yj}, \hat{Z}_{0j})$

== 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  $\hat{Y}_{0j}$ ,  $\hat{X}_{yj}$ ,  $\hat{X}_{zj}$ ,  $\hat{Z}_{0j}$ , 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<sub>2</sub> par exemple) à plus de 65% (SiO<sub>2</sub> 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 a 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'occurrence de les réduire.

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

1° le modèle reste le même

$$\text{En effet : } X_{ij} = P_i Y_j + (1 - P_i) Z_j + A_{ij}$$

$$\text{devient : } \frac{X_{ij}}{S_j} = P_i \frac{Y_j}{S_j} + (1 - P_i) \frac{Z_j}{S_j} + \frac{A_{ij}}{S_j}$$

$$\text{avec : } S_j^2 = \frac{1}{n} \sum_i \left[ X_{ij} - \frac{X_{ij}}{I} \right]^2$$

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

On réévalue donc les variables ayant un S<sub>j</sub> faible. L'intérêt de la réduction dépend donc du sens de S<sub>j</sub>. Il faut donc étudier la signification de S<sub>j</sub>.

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

$$IS_j^2 = \sum_i \left[ P_i (Y_j - Z_j) + Z_j + A_{ij} \right]^2 - \left[ (Y_j - Z_j) \bar{P}_I + Z_j + \bar{A}_{ij} \right]^2$$

$$= \underbrace{(Y_j - Z_j)^2 \sum_i (P_i - \bar{P}_I)^2}_A + \underbrace{\sum_i (A_{ij} - \bar{A}_{ij})^2}_B + \underbrace{2(Y_j - Z_j) \sum_i (P_i - \bar{P}_I) (A_{ij} - \bar{A}_{ij})}_C$$

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 A<sub>ij</sub> et P<sub>i</sub> : le problème est alors de savoir si les modifications postérieures au mélange jouent différemment ou non suivant le P<sub>i</sub>, c'est-à-dire en fonction des proportions apport - substrat.

Il en ressort que la quantité S<sub>j</sub> 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 :

$$\frac{X_{ij}}{\bar{X}_{Ij}} = P_i \frac{Y_j}{\bar{X}_{Ij}} + (1 - P_i) \frac{Z_j}{\bar{X}_{Ij}} + \frac{A_{ij}}{\bar{X}_{Ij}}$$

On minimisera :  $\sum_{ij} \left( \frac{A_{ij}}{\bar{X}_{Ij}} \right)^2$  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  $\hat{Z}_{0j}$  et  $\hat{X}_{2j}$  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 ( $\hat{Z}_{0j}, \hat{X}_{2j}$ ) et ( $\hat{X}_{yj}, \hat{Y}_{0j}$ ) dépend de la présence ou non de prélèvements qui sont proches des limites des contraintes  $0 < X_{ij} < 100$ . 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.

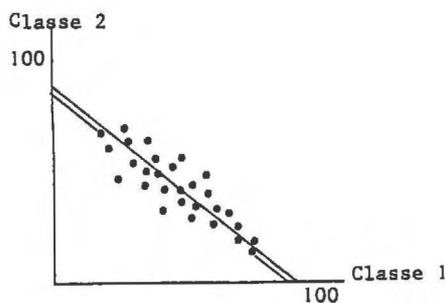


FIGURE 38

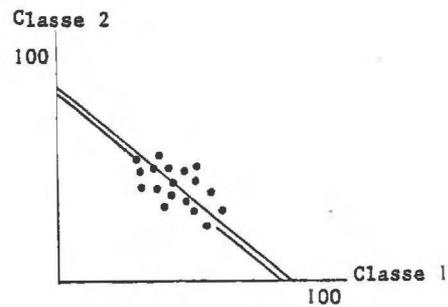


FIGURE 39.

Pour avoir des intervalles 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 fraction 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.

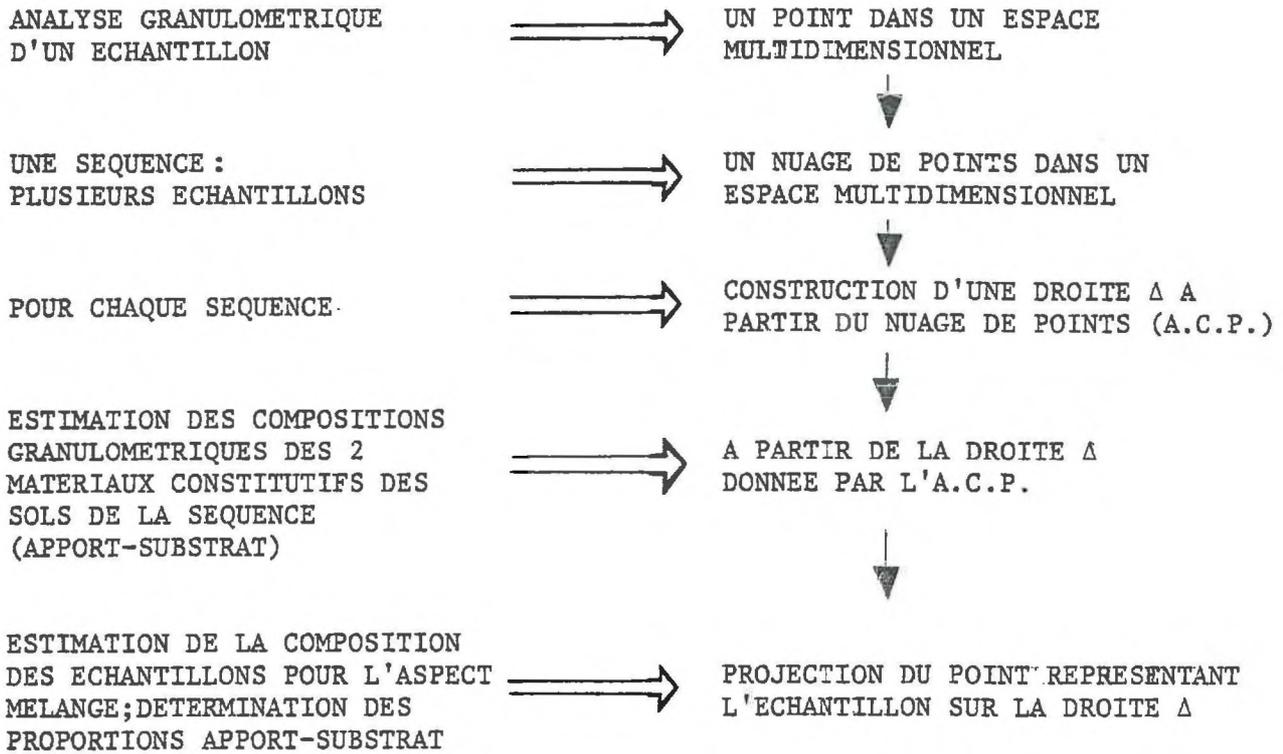


FIGURE 40: ORGANIGRAMME REPRESENTANT LA DEMARCHE "MODELE DE MELANGE"