Service géotechnique du Ministère des Richesses Naturelles du QUEBEC.
Centre de Géologie de l'Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de PARIS.

+ + + + +

Documents complémentaires / Additional files
Licence / License

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES ARGILES DE LA MER CHAMPLAIN BECANCOUR, QUEBEC

GM 69634

+ + + + +

Ressources naturelles et Faune, Québec
18 SEP. 2016
DIR. INFORM. GÉOL.

RAPPORT DE RECHERCHE DE

M. G. SOBOTKA.

JUILLET 1974.

R E M E R C I E M E N T S

Cette étude, qui se situe dans le domaine de la recherche appliquée et plus particulièrement dans celui de la Géologie de l'Ingénieur, n'aurait pu être réalisée sans une étroite collaboration entre le Centre de Géologie de l'Ingénieur (C.G.I.) de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris et le Service Géotechnique du Ministère des Richesses Naturelles du Québec (M.R.N).

Je tiens ici à remercier toutes les personnes qui en ont permis la réalisation ou qui y ont collaboré.

- M. NICOLAS, Professeur de Géologie appliquée à l'Université Paris VI, qui a accepté de diriger ce travail en vue de l'obtention d'un diplôme d'études approfondies (D.E.A.) ;

- M. ARNOULD, Directeur du C.G.I., qui m'a accueilli dans son laboratoire et qui, en me confiant cette étude, m'a permis de découvrir un très beau pays : le Québec. Pour ses précieux conseils et son dynamisme, je lui voue ma reconnaissance ;

- Le Service Géotechnique du Ministère des Richesses Naturelles du Québec qui m'a accueilli chaleureusement comme stagiaire pendant deux mois. J'en remercie son Directeur, M. J.Y. CHAGNON et son adjoint, M. R. MARANDA, sans oublier toute l'équipe de terrain et tout le personnel du service pour leur sympathique collaboration ;

- M. LEGASSE, Directeur général de la Société du Parc Industriel du Centre du Québec, qui a permis aux équipes du Service Géotechnique du M.R.N. d'effectuer les campagnes de reconnaissance désirées et de prélever les échantillons nécessaires aux études ;

- Mlle C. CADOR et M. A. LEROUX, du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, n'ont pas hésité à me consacrer leur temps pour m'aider à observer mes échantillons à l'aide des microscopes électroniques ;

- M. J.M. DEBATS, Ingénieur de recherche au C.G.I., qui n'a pas ménagé son temps et sa peine pour me guider dans ce travail.Qu'il en soit remercié

- Je n'aurai garde d'oublier Mme AUDIGUIER, MM. PELLERIN, AUDRIC et tous les chercheurs du C.G.I. qui, par la réalisation et l'interprétation de nombreux essais, ont contribué à la progression de ce travail ;

- Je n'oublierai pas de citer également le travail fastidieux de la mise au net du manuscrit, accompli avec patience par ma femme, Martine ;

- Je veux aussi remercier tout le personnel du C.G.I. et, en particulier, M. CHANETTE, pour sa participation à la mise en forme de ce document ;

- Enfin, je rappellerai que ce travail a été réalisé grâce à une Bourse de recherche du Ministère du Développement Industriel et Scientifique.

AVANT - PROPOS

Cette étude a pu être menée grâce à une étroite collaboration entre le service géotechnique du Ministère des Richesses Naturelles du Québec (M.R.N.) et le Centre de Géologie de l'Ingénieur (C.G.I.) de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, dans le cadre de la coopération Franco-Québecoise en géotechnique. Ce travail entre, dans le cadre plus général d'une étude pour l'aménagement du parc industriel et du site urbain de Bécancour (Québec).

Cette première partie de l'étude peut se diviser en deux étapes :

- 2ème semestre 1973 (à Québec et à Bécancour),
  - . Réalisation d'une carte de documentation (M.R.N. et C.G.I.),
  - . Campagne de reconnaissance (M.R.N.)
    sismique réfraction ; sondages au pénétromètre statique ; essais au scissomètre de chantier ; échantillonnage au tube à parois minces (argiles) ; échantillonnage de surface.
  - . Essai de constitution d'un fichier type (M.R.N. - C.G.I)
    réalisation des bordereaux ; analyse du programme de création du fichier ;
- 1er semestre 1974,
  - . A Québec (M.R.N.) étude des échantillons en laboratoire (essais de mécanique des sols) ;
  - . A Paris (C.G.I.), analyse générale des programmes ; études granulométriques, minéralogiques et structurales d'échantillons d'argile.

Ce programme de coopération technique pourra se poursuivre au 2ème semestre 1974 et en 1975 par la présence d'un ingénieur du C.G.I. : J.M. Debats, (15 jours au mois d'août 1974) et d'un coopérant militaire : G. Sobotka (septembre 1974 - novembre 1975) au Service géotechnique du M.R.N.

S O M M A I R E

PREMIERE PARTIE : LES ARGILES SENSIBLES
ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Pages

Introduction 1

I - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIE

1. Situation géographique 2

. Géologie 2

2.1. Origine des sédiments 2
2.2. Paléogéographie et sédimentologie . . . 3

II - NATURE DES ARGILES SENSIBLES

1. Granulométrie 5

2. Minéralogie 5

3. Chimie 7

4. Eau interstitielle et paléosalinité 7

4.1. Teneur en sel 7
4.2. Influence de l'électrolyte 8
4.3. Paléosalinité 8

5. Structure 8

5.1. Macrostructure 8
5.2. Microstructure 8
5.3. Interactions particulaires 10

III - LA SENSIBILITE

1. Définitions et méthodes de mesure 11

2. Classifications 12

3. Les causes 13

IV - PROPRIETES ET CORRELATIONS

1. Teneur en eau, limites d'Atterberg et Activité 16

2. Electrolyte 16

3. Pression interstitielle 17

4. Consolidation 17

5. Résistance au cisaillement 17

6. Déformation 18

7. Retrait 19

8. Action du gel 20

V - LES CONSEQUENCES

1. Problèmes de fondation 20

2. Les tassements 21

3. Problèmes de stabilité des pentes naturelles 21

3.1. Formes des coulées 21
3.2. Les causes 22

CONCLUSION 23

DEUXIEME PARTIE : ETUDE DE SI' ECHANTILLONS D'ARGILE DE LA MER CHAMPLAIN, BECANCOUR, QUEBEC

I - INTRODUCTION — Pages

1. Situation géographique et économique 24
2. Géologie 24

II - ETUDE DES ECHANTILLONS

1. Localisation 25
2. Echantillonnage 25
3. Description et consistance 26
4. Odeur et couleur 26
5. Analyse granulométrique 26
   - 5.1. Analyse granulométrique par tamisage . . 27
   - 5.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie 27
     - 5.2.1. Principe 27
     - 5.2.2. Préparation des échantillons . . . 27
     - 5.2.3. Mesures 27
   - 5.3. Représentation des résultats 27
     - 5.3.1. Courbes cumulatives 27
     - 5.3.2. Les histogrammes 28
   - 5.4. Commentaires des résultats 28
   - 5.5. Calcul de paramètres caractéristiques d'une distribution granulométrique 28
6. Teneur en eau, limites d'Atterberg et activité 29
7. Teneur en carbonates et teneur en matières organiques 30
   - 7.1. Teneur en carbonates 30
     - 7.1.1. Méthodes de mesure 30
     - 7.1.2. Résultats 30
   - 7.2. Teneur en matières organiques 31
     - 7.2.1. Méthodes de mesure 31
     - 7.2.2. Résultats 32
8. Morphoscopie, minéralogie et structure 32
   - 8.1. Observations à la loupe binoculaire . . . 32
   - 8.2. Diffraction des rayons X 33
     - 8.2.1. Méthodes d'étude 33
       - a) Méthode des poudres 33
       - b) Méthode des agrégats orientés 33
     - 8.2.2. Résultats 34
   - 8.3. Microscopie électronique à transmission et microdiffraction X 34
     - 8.3.1. Description de l'appareil 34
     - 8.3.2. Les supports d'échantillon 35
     - 8.3.3. Préparation des échantillons . . . 35
     - 8.3.4. Etude des suspensions 35

8.4. Microscopie électronique à balayage (M.E.B. ou Scan) 35
8.4.1. Principe et description de l'appareil 35
8.4.2. Préparation des échantillons 36
8.4.2.1. Déshydratation 36
a) Dessication à l'air 36
b) Lyophilisation 36
8.4.2.2. Taille des échantillons 37
8.4.2.3. Métallisation 37
8.4.3. Etude de la structure 37
8.4.4. Etude micropaléontologique . . 38
8.5. Microscopie optique (microscope polarisant) 39
8.5.1. Préparation des échantillons. . 39
8.5.2. Etude des lames minces 39
a) structure 39
b) composition minéralogique 40

9. Porosimétrie 40

9.1. Généralités 40
9.2. Principe du porosimètre à mercure . . 40
9.3. Le porosimètre 41
9.3.1. Préparation des échantillons 41
9.3.2. Mesure 41
9.3.3. Représentation des résultats 42
9.4. Commentaires des résultats 43

III - CONCLUSION 44

BIBLIOGRAPHIE 45

PREMIERE PARTIE

LES ARGILES SENSIBLES

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

A la suite des glissements de terrain qui se produisirent en Scandinavie et en Amérique du Nord, de nombreuses études ont été entreprises pour essayer d'en comprendre les mécanismes et d'en prévenir les effets.

Ces études ont été menées par divers organismes et principalement :

. Pour la Suède par :
  - le"Swedish geotechnical institute"
  - le "Swedish geological survey",

. Pour la Norvège par :
  - le département de géologie de l'Université d'Oslo
  - le "Norwegian geological survey"
  - le "Norwegian geotechnical institute"
  - le "Norwegian Highwah laboratory",

. Pour le Danemark par :
  - le"Danish gedtechnical institute"

. Pour les Etats-Unis d'Amérique par :
  - les départements de génie chimique, de génie civil et de géologie de l'Université de Columbia à New-York,

. Pour le Canada par :
  - le "National research council of Canada"
  - le "Canadian geological survey".

Ces glissements d'un type particulier que l'on pourrait également qualifier de coulées d'argiles, se caractérisent par la liquéfaction subite d'une masse importante d'argile compacte qui est entraînée vers une région plus basse. Ces phénomènes naturels peuvent être parfois spectaculaires et catastrophiques.

D'après A. Helland (1896), le premier glissement de ce type à être mentionné dans la littérature fut celui de Gauldalen (Norvège) en 1345. Depuis, grâce aux études géologiques et géotechniques, les traces de nombreux glissements préhistoriques ont été mises en évidence. Dans des siècles plus récents, beaucoup de ces glissements ont été décrits.

Cette argile très sensible qui est à l'origine de ces glissements a été appelée : Quick clay, H.Reusch (1901) fut le premier scientifique à utiliser ce terme. On le trouve parfois écrit avec un trait d'union : Quick-clay.

Récemment, J.C. Cabrera et I.J. Smalley (1973) pensent que quick clay est une mauvaise traduction et lui préfèrent le terme allemand "quickerde" qui leur semble mieux convenir. Mais, partant du terme de base suédois "Kvicklera", qui pour R. Söderblom (1969) aurait été utilisé pour la première fois en 1767, ils préconisent l'utilisation du terme quick clay en un seul mot. Ils définissent ainsi un matériau spécial, un type particulier de sédiment, le distinguant d'une argile au comportement sensible.

I - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIE

1°) Situation géographique

Les argiles très sensibles ont une distribution géographique assez bien marquée. Elles sont concentrées à l'intérieur ou à proximité d'une zone continentale de l'hémisphère nord qui, au quaternaire, a été recouverte par les glaces lors de la dernière glaciation.

Les régions concernées sont essentiellement les côtes et les zones peu élevées de Scandinavie et d'Amérique du Nord.

Ce type particulier de sédiment fin se situe :

. En Scandinavie :

essentiellement sur les côtes sud de Suède et de Norvège (fig.1), mais aussi au Danemark et en Finlande,

. En Amérique du Nord :

- Au Canada,

Sur la côte sud-est, le long du Saint-Laurent, au nord des grands lacs ; dans la région de la Baie d'Hudson (fig.2) et sur la côte ouest,

- Aux Etats-Unis,

Sur la côte nord-est, dans les états du Maine, Vermont, New-York ; le long de la rivière Hudson, autour du lac Champlain (fig.3), sur la côte ouest et en Alaska (P.F. Kerr et I.M. Drew, 1968).

Différents auteurs en citent en Allemagne, en Angleterre et en Nouvelle-Zélande.

Un nouveau type de gisement a été mis en évidence à l'occasion de plusieurs glissements qui eurent lieu au Chili et dans les Andes péruviennes et qui seraient dus à des argiles sensibles.

2°) Géologie

a) origine des sédiments

Le matériel qui les constitue peut avoir des origines multiples.

Pour les argiles très sensibles déposées dans les régions peu élevées et sur les côtes, ce matériel provient de l'abrasion glaciaire de roches plutoniques, métamorphiques et sédimentaires qui ont été très finement broyées. On a donc une "farine" de roche (J.Y. Chagnon, 1966).

En ce qui concerne celles qui se sont déposées dans des régions plus élevées, elles proviennent, soit de roches broyées par le même processus, mais cette fois par des glaciers de montagne, soit de l'altération sous un climat humide de cendres volcaniques.

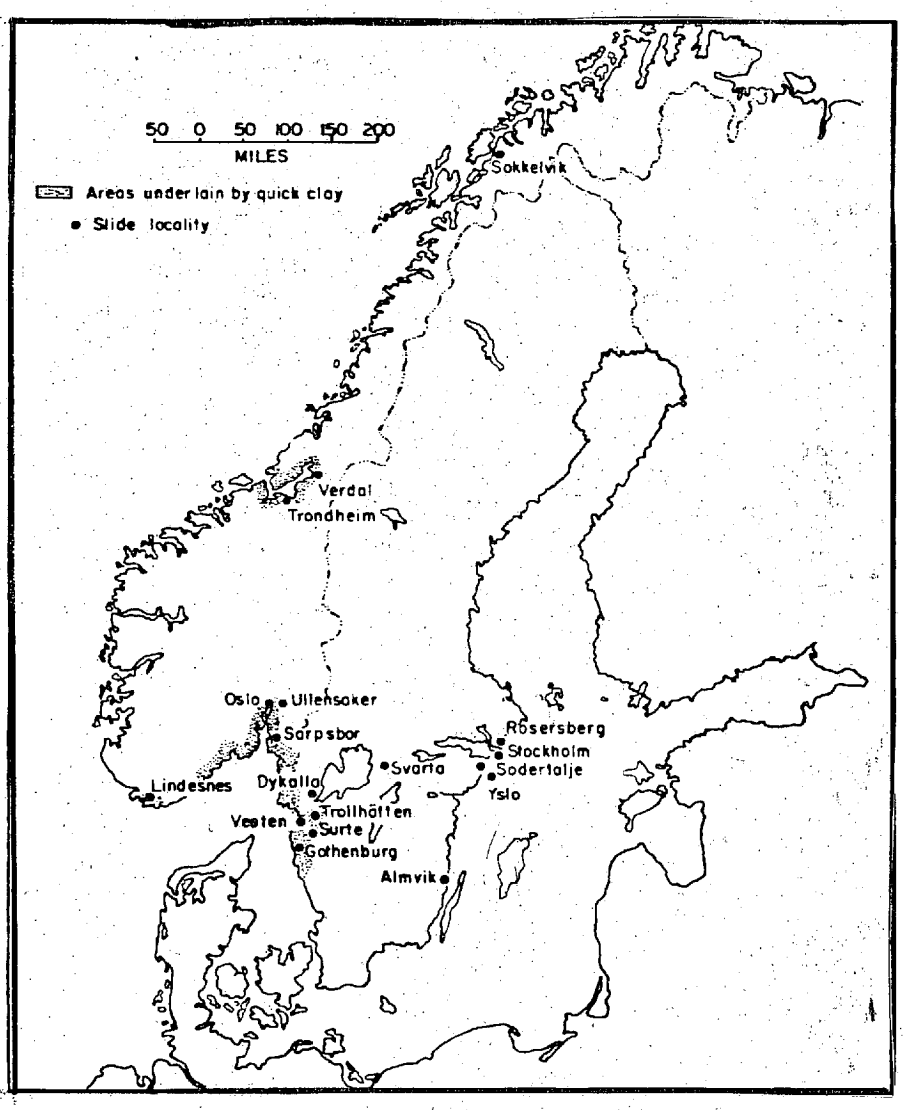


Fig.1 : Localités de Suède et de Norvège où se sont produits des glissements dans des argiles sensibles. (D'après R.S.Liebling et P.F. Kerr, 1965).

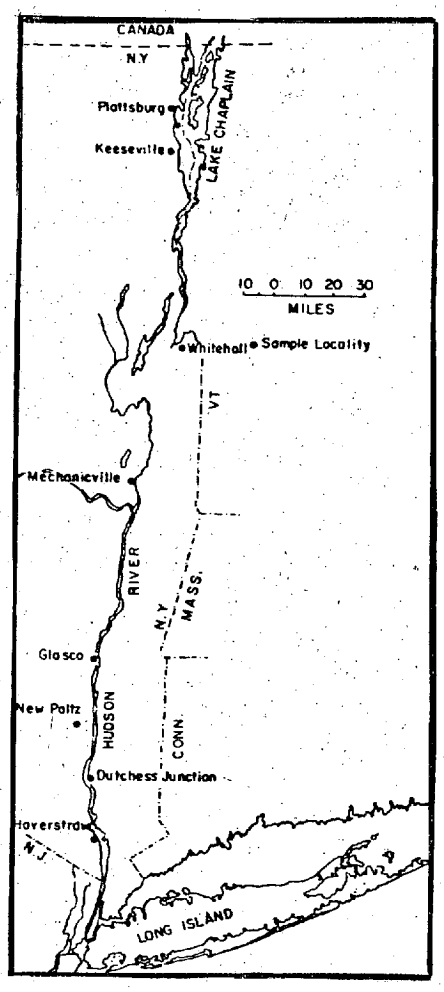


Fig. 3 : Localités des U.S.A. où se sont produits des glissements dans des argiles sensibles.(D'après R.S. Liebling et P.F. Kerr, 1965).

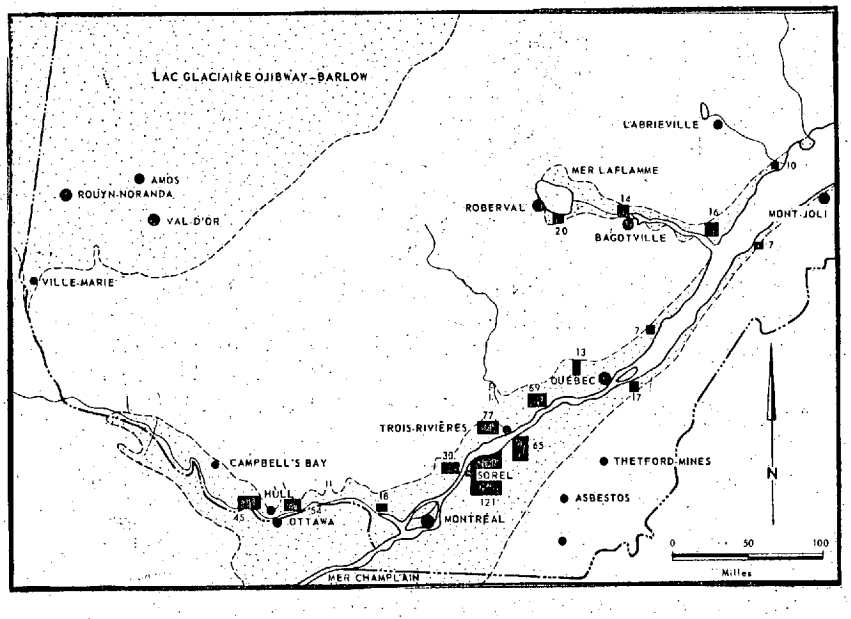


Fig. 2 : Argile glaciaire et zones de coulées au Québec (Canada).(D'après J.Y Chagnon, 1968).

b) Paléogéographie et sédimentologie

Pour A.W. Skempton (1948), les conditions de dépôt ont été contrôlées par deux facteurs fondamentaux :

- une élevation eustatique mondiale du niveau de la mer causée par la fonte des glaces,
- un relèvement isostatique local du continent dans les zones qui ont été recouvertes par les glaciers, dû à la décharge du poids des glaces sur la croûte terrestre (fig.4).

Durant la dernière glaciation quaternaire, la Scandinavie a été couverte par les glaciers qui causèrent une dépression du socle sous-jacent. Le retrait de la glace permit à la mer d'envahir une partie du continent où se déposèrent des sédiments. Un relèvement isostatique les amena au-dessus du niveau de la mer. En conséquence, une croûte superficielle dure se forma et le processus de percolation fit décroître graduellement la concentration en sel de l'eau interstitielle. Sous cette croûte, ont pu se former des argiles très sensibles (R.W. Berry et P. Jørgensen, 1971).

En Suède, à la suite de ces deux phénomènes (Isostasie et eustatisme), ces dépôts affleurent à 100 mètres au-dessus du niveau de la mer. Certaines argiles sont d'origine marine, d'autres, varvées, se sont déposées en eau douce, J. Osterman, 1963).

On trouve parfois des argiles sensibles d'eau douce associées à de la tourbe (R. Söderblom, 1966). Les argiles de ce type sont aussi assez communes en Finlande (L. Keinonen, 1963). La vallée de la rivière Göta, qui doit sa forme en U à l'avance des glaciers, a été envahie par la mer après le retrait de ceux-ci entre 14.000 et 12.000 ans av. J.C.

A.W. Skempton (1948), grâce à des études sur les pollens et grâce aux varves, data des argiles post-glaciaires entre 10.000 et 4.000 ans ; en effet, la transgression marine prit fin, il y a 4.000 ans. Cependant, des études micro-paléontologiques récentes menées par le "Swedish geological survey" datèrent les argiles de la rivière Göta à environ 15.000 ans.

En Norvège, le relèvement différentiel fut au maximum de 220 m dans la région du fjord d'Oslo.

Avec le retrait des glaciers et un climat plus chaud, les roches broyées furent transportées par des cours d'eau jusqu'à la mer et s'y déposèrent.

L. Bjerrum (1954) explique l'absence de stratification de ces dépôts par une sédimentation en eau salée.

La séparation granulométrique ne se faisant pas, il en résulte une argile homogène avec de nombreuses particules silteuses et sableuses. Il est cependant possible de distinguer les argiles déposées dans le Nord de la zone de sédimentation de celles déposées dans sa partie sud ; celles du nord contiennent un plus faible pourcentage de particules inférieures à 2 microns et un plus fort pourcentage de silt que celles du sud.

I - Th. Rosenquist (1952) décrit des argiles sensibles qui se présentent souvent sous forme de lentilles dans des argiles "normales". Ces lentilles ont en général plusieurs centaines de mètres de long, 10 à 15 mètres de large et 10 mètres d'épaisseur. Cet ellipsoïde d'argile sensible est séparé des argiles "normales" par une zone de transition. De très petites lentilles de quelques centimètres ou décimètres sont également rencontrées. Ceci tendrait à prouver que les argiles sensibles ont eu les mêmes conditions de sédimentation que les argiles "normales" qui les entourent.

Au Canada, à cette période, après le retrait des glaces, la vallée du Saint-Laurent a été envahie par la mer. Cette extension de l'Océan est appelée "Mer Champlain" (fig.5) et "Mer La Flamme". D'après P.F. Karrow (1961), cette transgression marine dura 4.000 ans entre 12.000 et 8.000 ans B.P.

Des travaux plus récents de P. Lasalle (1966) estiment l'origine de la Mer Champlain à 11.500 ans et son retrait à 9.500 ans.

La Mer La Flamme serait plus récente , 9.500 à 8.500 ans (P. Lasalle, 1968). Pendant cette période par le jeu du réajustement isostatique (230 m) et de la montée du niveau de la mer due à l'eustatisme (33 m), les dépôts marins affleurent généralement à une altitude de 200 mètres environ.

L'épaisseur maximum de ces dépôts a été estimée par W.A. Johnston (1917) à plusieurs centaines de pieds près d'Ottawa. Ils recouvrent presque toutes les basses terres et se prolongent dans plusieurs vallées. V.T. Allen W.D. Johns (1960) pensent que la présence d'argiles silteuses définissent des conditions marines de dépôts, ce qui est en accord avec les idées de L. Bjerrum, alors que les argiles à blocaux et les varves définissent des conditions plus glaciaires.

En 1961, P.F. Karrow décrit les sédiments qui se sont accumulés dans ces mers. Ils proviennent tout d'abord de l'érosion fluviale des zones de retrait des glaciers. Au contact de la mer,des deltas se forment avec leurs dépôts typiques, les matériaux les plus fins sont emportés le plus loin. Des coulées boueuses sous-marines créèrent des variations dans le dépôt final. Plus tard, lors de la remontée isostatique, quelques uns de ces dépôts furent érodés de la ligne de rivage et redéposés dans la mer.

N.R. Gadd, en 1962, suggère une redéposition majeure d'argiles marines en eau douce dûe à un soudain apport provenant des grands lacs, accompagné d'une forte érosion.

Son opinion est basée sur la discordance qui existe à certains endroits emtre des argiles oxydées non carbonatées et non fossilifères et des argiles non oxydées, carbonatées et fossilifères.

Ceci pourrait expliquer la faible teneur en sel des argiles d'Ottawa (W.J. Eden et C.B. Crawford, 1965).

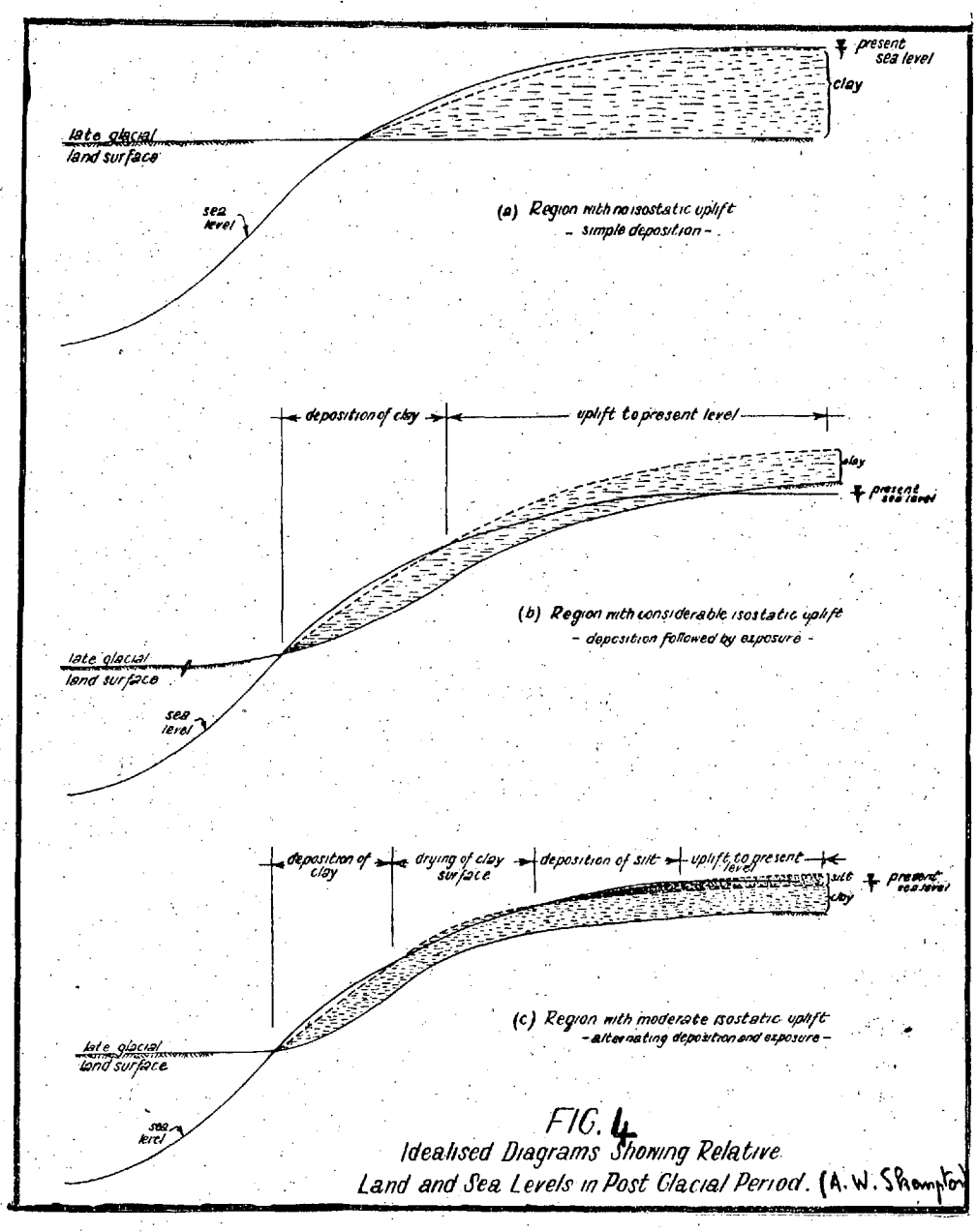


Fig. 4 : Schémas représentant les niveaux relatifs du sol et de la mer dans la période post-glaciaire.

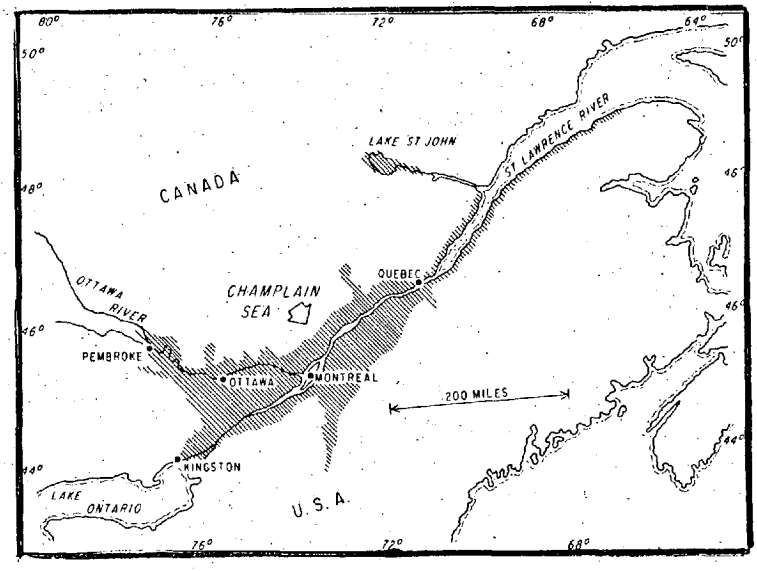


Fig.5 : Mer Champlain (D'après C.B.Crawford, 1968).

La Mer Champlain n'a donc pas toujours été un véritable milieu marin, mais un milieu saumâtre surtout dans les dernières étapes de la transgression alors que la mer est devenue un lac : le Lac Lampsilis (J.Y. Chagnon).

Les argiles sensibles de la Mer Champlain ont été appelées argiles "Leda" par un des premiers géologues canadiens, Dr J.W. Dawson à cause d'un fossile très commun de ces formations (Leda glacialis). On les trouve parfois dans la littérature géologique sous le nom d'argiles laurentiennes, d'argiles Rideau et d'argiles Champlain.

II - NATURE DES ARGILES SENSIBLES

1°) Granulométrie

Les argiles sensibles sont classées parmi les argiles (sens pétrographique) parce qu'elles contiennent une appréciable quantité de particules dont le diamètre est inférieur à 2 microns.

N.R. Gadd (1971) a décrit les sédiments de la Mer Caamplain comme des argiles, des argiles silteuses, des silts et des sables qui peuvent se présenter en associations variables.

La granulométrie peut donc varier localement, mais en général la fraction inférieure à 2 microns (fraction "argileuse") est comprise entre 20 et 60 %. Cette distribution s'observe aussi bien en Scandinavie (fig. 6 et 7) qu'en Amérique du Nord (fig. 7 et 8). R.S. Liebling et P.F. Kerr (1965) ont calculé une moyenne de 59,3 % de particules dont le diamètre est inférieur à 2 microns pour les argiles sensibles et de 17,4 % pour les non sensibles.

Ces analyses granulométriques ont été obtenues par différentes méthodes, soit par densimétrie, soit par sédimentation accompagnée de centrifugation.

2°) Minéralogie

De nombreuses études minéralogiques ont été menées dans les différents pays concernés principalement à l'aide de la diffraction de rayons X et de l'analyse thermique différentielle, mais également par d'autres méthodes (microscope optique, électronique, etc...)

En 1948, A.W. Skempton parle d'illite dans des argiles post glaciaires d'Angleterre. Elles dériveraient des argiles de Gosport qui contiennent 60 % d'illite et 40 % d'halloysite. Il pense que les argiles américaines provenant de l'érosion glaciaire de roches plutoniques et métamorphiques ne contiennent pas de minéraux argileux.

Pour I. Th. Rasenquist (1952) et L. Bjerrum (1954), le seul minéral argileux des argiles de Norvège est presque toujours de l'illite. Il est associé à beaucoup de minéraux non argileux.

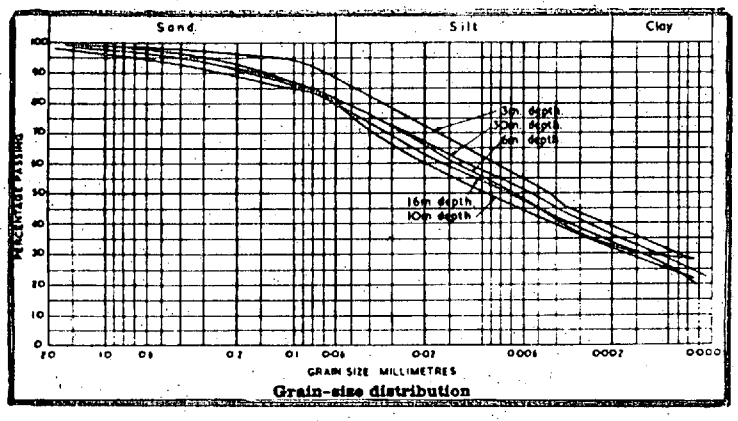


Fig. 6 : Analyses granulométriques d'argiles sensibles du Danemark (D'après J.Brinch-Hansen, 1950).

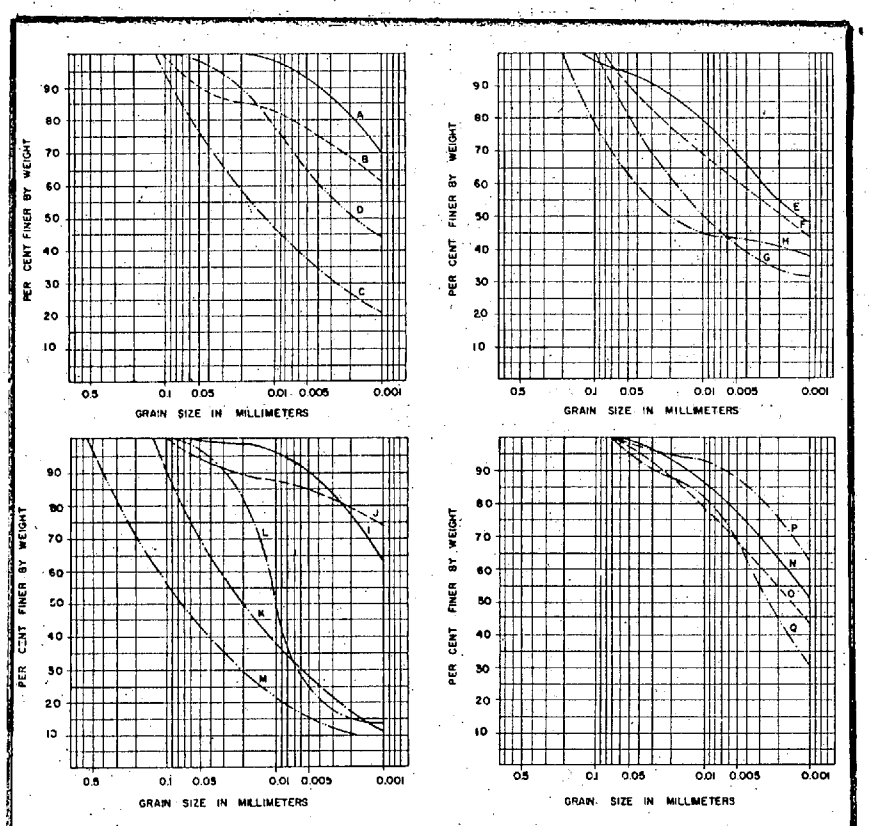


Figure 7. Particle-size analyses for fine clays:

A. Hawkesbury
B. St. Vallier
C. Rimouski
D. Trois Pistoles
E. St. Stanislas
F. St. Thuribe
G. Ste. Genevieve
H. St. Alban
I. Nicolet
J. Portneuf
K. St. Joseph de la Rive
L. Ellesmere Island
M. Ste. Anne de Beaupré
N. Vesten
O. Dykalla
P. Rosersberg
Q. Oslo

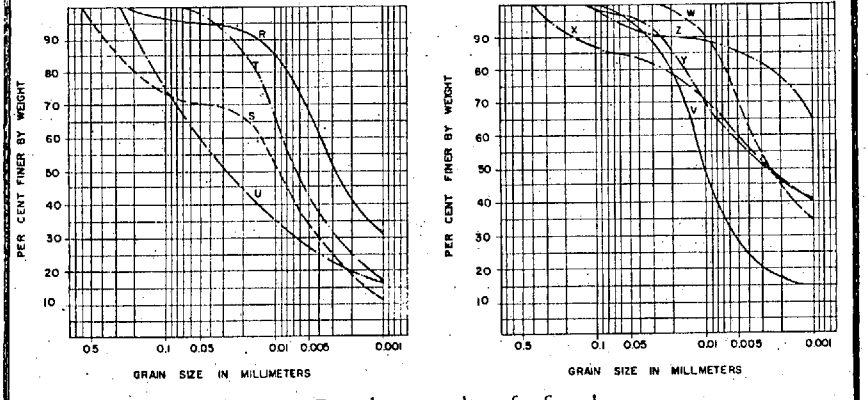


Figure 8. Particle-size analyses for fine clays:

R. Glasco
S. Haverstraw
T. Dutchess Junction
U. New Paltz
V. Keeseville
W. Mechanicville
X. Portland
Y. Plattsburg
Z. Whitehall

Fig. 7 et 8 : (D'après R.S Liebling et P.F. Kerr, 1965).

En accord avec ces idées, R.B. Peck (1951) et J. Beland (1956) pensent que les argiles Leda sont essentiellement constituées de quartz et de feldspath avec, en petite quantité : des fragments de mica, de la montmorillonite et de la kaolinite.

P.F. Karrow (1957), au contraire, suggère que la présence de quartz et de feldspath n'excède pas 10 % et que la plus grande partie de ces argiles est constituée par de l'illite et de la chlorite qui pourrait provenir d'une néoformation. Avec également de l'amphibole et parfois de la calcite.

W.J. Eden et C.B. Crawford (1957) parlent d'illite à tendance vers le mica, de plagioclases, quartz, chlorite et d'interstratifiés d'illite - chlorite.

V.T. Allen et W.D. Johns (1960) ont une opinion plus partagée. Le quartz et le feldspath seraient toujours présents mais, parfois en grande quantité, parfois en trace (moins de 10 %). Pour eux, la présence de kaolinite est douteuse, cette erreur proviendrait de la confusion du pic principal de la kaolinite avec celui de 7 Å de la chlorite. Les principaux minéraux argileux seraient l'hydromica, la chlorite et la vermiculite.

Les premières analyses minéralogiques par fractions granulométriques ont été faites par J.E. Brydon et L.M. Patry sur des sédiments de la mer Champlain, en 1961. La composition de la fraction supérieure à 2 microns a pu être quantifiée par la séparation densimétrique. Les minéraux ayant une densité inférieure à 2,70 représentent 90 % (quartz : 25 %, plagioclases : 25 %, feldspaths potassiques : 50 %). Dans les 10 % restants, composés par les minéraux de densité supérieure à 2,70, des hornblendes des pyroxènes, des biotites, des chlorites et des grenats ont pu être déterminés.

La fraction inférieure à 2 microns comprend du quartz, du feldspath et de la chlorite. Des études plus récentes faites par P.F. Kerr et I.M. Drew (1968) sur les matériaux qui ont glissé à Anchorage (Alaska) ont montré que dans la fraction fine, l'illite et la chlorite prédominent, alors que dans la fraction plus grossière, c'est le quartz et le feldspath (fig.9).

E. Penner (1965) et J.E. Gillott (1971) ont décrit la minéralogie des argiles Leda. Elle consiste en proportion variable de feldspath (le plagioclase se situe entre l'albite et l'oligoclase), quartz et amphibole dans les différentes fractions granulométriques, bien que le feldspath prédomine dans la fraction inférieure à 2 microns. Parmi les minéraux argileux, l'illite, l'hydromica sont fréquents avec parfois de la chlorite, de la vermiculite et rarement de la montmorillonite.

A la suite du glissement d'Ullensaker (Norvège), R.W. Berry et P.Jørgensen décrivent une composition minéralogique assez semblable à celles citées précédemment (quartz, feldspath, chlorite, illite).

Ils remarquent que le pourcentage de quartz décroît avec la taille des particules ; à l'inverse, le pourcentage d'illite et de chlorite augmente (fig. 10).

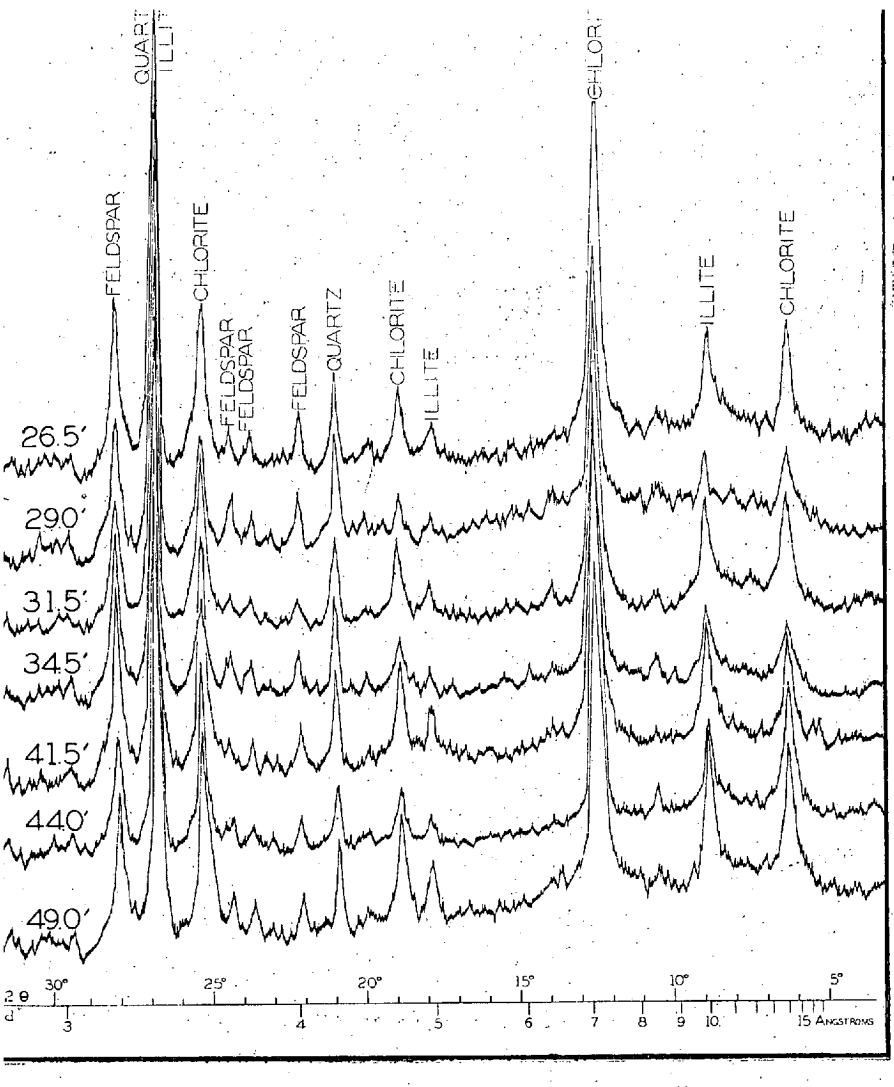


Fig. 9 : Diffractogrammes d'argiles sensibles d'Anchorage (Alaska, U.S.A.) (D'après I.M. Drew et P.F. Kerr, 1968).

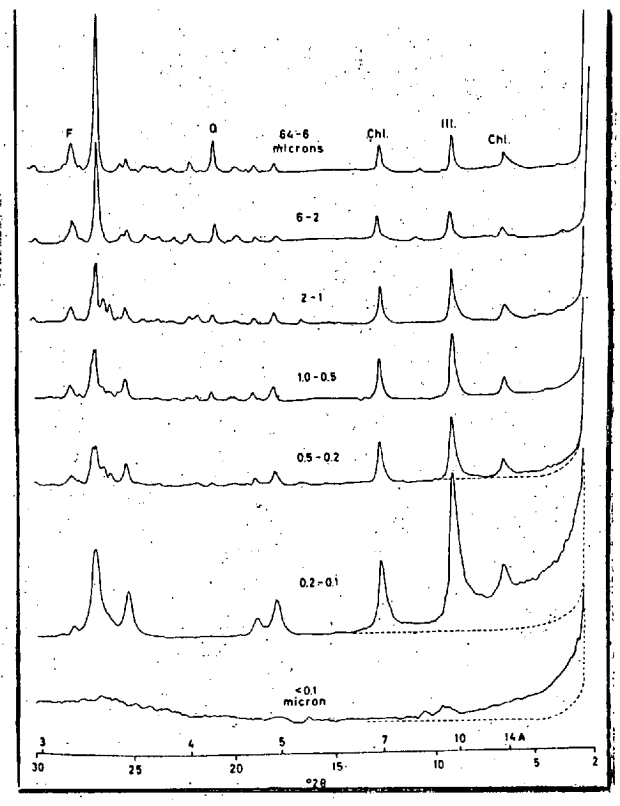


Fig. 10: Diffractogrammes de 7 fractions granulométriques différentes d'argiles sensibles d'Ullensaker (Norvège). (D'après A.W. Berry et P. Jorgensen, 1971).

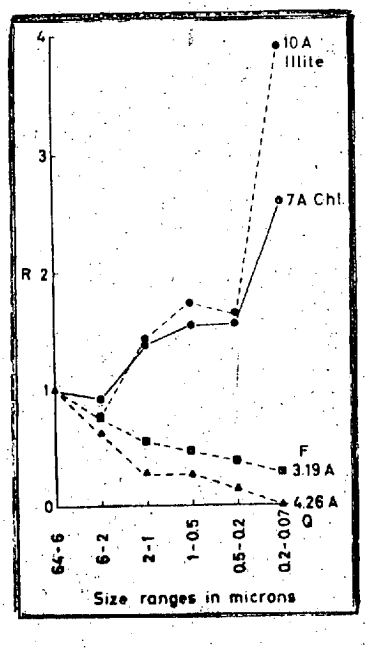


Fig. 11 : Courbes montrant la proportion de chlorite, illite, feldspath et quartz de chaque fraction granulométrique par rapport à leur proportion dans la fraction la plus grossière (D'après R.W. Berry et P.Jorgensen, 1971).

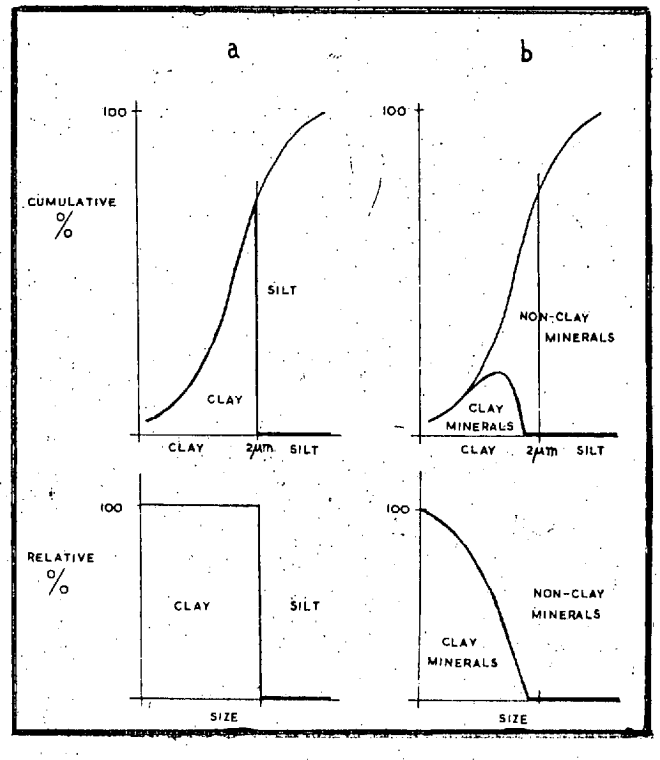


Fig. 12 : Deux approches de la distribution granulométrique des argiles sensibles. a) définition et division usuelle par la taille (en argile, silt,etc...) b) division plus proche de la réalité sui vant la composition minéralogique (D'aprè J.G.Cabrera et I.J. Smalley, 1973).

Ceci fut mis en évidence à l'aide du coefficient R, R étant défini comme le rapport de l'intensité d'un pic caractéristique du minéral d'une fraction granulométrique à l'intensité du même pic de la fraction la plus grossière (fig.11)

A l'aide de la séparation électromagnétique, ils mirent en évidence un seul type de chlorite dans la fraction comprise entre 2 et 4 microns.

A la suite de toutes ces données , J.G. Cabrena et I.J. Smalley (1973) tentent une nouvelle approche des argiles sensibles. Tenant compte du fait que les argiles ont en général une très faible activité (Rapport de l'indice de plasticité au pourcentage de particules inférieures à 2 microns), c'est à dire un indice de plasticité (IP) très faible et une forte proportion de particules inférieures à 2 microns, ilspensent que la proportion de minéraux argileux est faible par rapport à la proportion des particules inférieures à 2 microns (fig.12).

3°) Chimie

La composition chimique de quelques argiles est donnée par le tableau I. Les échantillons 1,2,3 et 4 étant des argiles marines du Québec, l'analyse 5 représente une moyenne de 77 analyses d'argile marine de Norvège (V.M. Goldschmidt, 1954).

V.M. Goldschmidt pense que cette analyse représente un échantillon type d'une majeure partie du globe constituée de roches cristallines. La composition de l'argile glaciaire reflète en partie la portion minéralogique la plus stable des formations érodées (J.Y. Chagnon, 1968). Les tableaux II et III représentent l'analyse chimique des échantillons provenant du Canada et de Norvège par fraction granulométrique. On remarque la diminution du pourcentage de SiO_2 parallèlement à l'augmentation du pourcentage d'Al_2O_3, Fe_2O_3 et MgO avec la diminution du diamètre des particules, ce phénomène correspondant grossièrement à la diminution du pourcentage de quartz et à l'augmentation de celui des minéraux argileux.

4°) Eau interstitielle et paléosalinité

a) Teneur en sel

La concentration en sel de l'eau interstitielle de l'argile peut varier de moins d'un gramme à 25 grammes par litre. On estime la salinité normale dans un milieu franchement marin, lors de la sédimentation, à 35 g/litre. Des argiles de Suède déposées en eau douce contiennent un peu de sel : 0,01 à 1 g/litre (R.S. Liebling et P.F. Kerr, 1965).

E. Penner (1963) constate que les argiles Leda ne dépassent que rarement 1 à 2 g/litre, alors que les argiles norvégiennes ont des concentrations en sel beaucoup plus élevées. Ces faibles teneurs seraient dues au lessivage ainsi qu' à la diffusion des sels dans les sédiments voisins.

Analyses chimiques d'argile marine

	1	2	3	4	5
SiO_2	58.16	56.12	62.23	57.85	59.12
Al_2O_3	17.01	16.50	15.95	16.88	15.82
Fe_2O_3	6.75	6.81	3.97	2.79	{ 6.99
FeO	2.09	1.29	2.42	4.33	
MgO	3.33	2.93	2.68	3.38	3.30
CaO	1.62	2.10	3.22	3.73	3.07
Na_2O	2.52	2.49	3.24	3.00	2.05
K_2O	3.13	2.75	3.03	3.76	3.93
H_2O^+	4.03	–	2.75	{ 2.80	3.02
H_2O^-	1.64	–	0.68		
TiO_2	0.68	–	0.69	0.93	0.79
P_2O_5	–	–	–	0.38	0.22
MnO	–	–	–	0.08	–
ZrO_2	–	–	–	0.04	–
CO_2	0.95	0.29	0.12	nil	–
Total	101.91	91.28	100.98	99.95	98.31

Analyses (1), (2) et (3) — de Brady et Dean (1966)
Analyse (4) — Ministère des Richesses Naturelles
Analyse (5) — Goldschmidt (1954)

Tableau I : (D'après J.YChagnon,1968)

Sample	Fraction	SiO_2	Al_2O_3	FeO *	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	L.O.I.	TiO_2	CO_2	P_2O_5	Total
A	Unfractionated	52.3	19.3	7.9	4.8	3.4	3.3	3.8	5.2	—	0.91	0.15	101.1
	2–0.2 μm	55.8	17.0	7.4	4.2	2.8	3.0	3.8	2.6	1.3	—	—	97.9
	< 0.2 μm	46.8	19.5	9.3	5.1	1.8	2.7	3.0	6.8	1.2	—	—	96.2
B	Unfractionated	52.2	18.1	7.8	5.0	4.7	3.1	3.8	4.8	—	1.5	0.17	101.2
	2–0.2 μm	55.2	16.1	7.7	4.2	3.5	3.3	3.7	1.8	1.7	—	—	97.5
	< 0.2 μm	47.0	16.9	11.4	6.0	2.0	2.1	3.8	4.5	1.8	—	—	95.5
C	Unfractionated	53.4	17.8	7.4	4.2	5.2	2.7	3.6	6.2	—	2.6	0.17	103.3
	2–0.2 μm	59.1	13.1	6.4	4.5	3.1	3.1	3.6	2.0	1.5	—	—	96.4
	< 0.2 μm	49.8	18.2	9.5	5.0	1.7	1.8	3.5	4.9	1.4	—	—	95.8
D	Unfractionated	48.1	24.1	8.1	4.6	3.5	3.2	3.4	5.8	—	1.0	0.08	101.9
	2–0.2 μm	56.9	15.8	7.0	3.9	3.1	3.4	3.2	2.3	1.4	—	—	97.0
	< 0.2 μm	48.5	19.3	9.6	5.2	1.5	2.0	2.9	4.8	1.2	—	—	95.0
E	Unfractionated	55.1	16.4	5.7	4.4	5.3	1.4	2.5	8.1	—	4.3	0.08	103.3
	2–0.2 μm	52.5	18.1	8.7	4.1	0.6	1.0	3.4	5.6	2.1	—	—	96.1
	< 0.2 μm	44.7	24.0	8.2	4.5	0.2	0.9	4.9	7.5	1.0	—	—	95.9
F	Average clay * *	54.28	14.51	6.39	2.99	5.04	1.21	2.12		0.42	3.53	0.09	

* Fe" not differentiated from Fe'''
** Analyzed by : Analytical Section, Division of Chemistry, N.R.C., Ottawa
** Data from Clarke, 1924, p. 631
— Indicates no analysis available

Tableau II : Argiles Leda : composition chimique (%)

Fraction limits (μ)	*SiO_2*	*TiO_2*	*Al_2O_3*	*Fe_2O_3*	*MnO*	*MgO*	*CaO*	*Na_2O*	*K_2O*
64 –6	74.25	0.87	13.20	4.90	0.10	2.06	1.38	2.29	2.70
6 –2	67.35	1.06	17.30	6.60	0.11	2.88	1.19	1.77	3.65
2 –1	61.45	1.20	20.10	7.70	0.14	3.43	1.04	1.52	4.45
1.0–0.5	57.15	1.50	21.80	8.40	0.14	3.97	0.95	1.12	4.85
0.5–0.2	54.25	1.14	23.30	9.40	0.17	4.34	0.83	0.85	5.05
0.2–0.1	51.25	0.74	23.10	11.30	0.29	4.14	0.89	0.51	4.85
<0.1	51.75	0.64	18.80	18.40	0.96	4.90	0.56	0.31	4.70

Tableau III : argiles sensibles de Norvège : composition chimique (%) par fraction granulométrique (D'apr R.W.Berry et P. Jorgensen,1971).

b) Influence de l'électrolyte

En 1958, T.W. Lambe a montré que les liaisons entre les particules étaient assurées par l'eau orientée.

R.D. Northey et A.W. Skempton, en 1952, suggèrent que l'orientation de l'eau (eau absorbée) est due à la présence d'ions Na.

D'après la théorie du lessivage de I. Th. Rosenquist (1946), la diffusion des ions Na rend la structure des argiles métastable. Leur remaniement transforme l'eau absorbée en eau intersticielle et l'argile se fluidifie. En 1952, I Th. Rosenquist établit qu'une addition de 3 % de chlorure de sodium à une argile sensible très remaniée (fluide) fait augmenter la résistance. Avec le temps, la résistance continue d'augmenter alors que, pour une argile sensible non traitée, la résistance ne varie pas avec le temps. L'addition de sel influence donc les propriétés d'absorption des minéraux argileux.

On a donc pour les faibles teneurs en sel de hautes snesibllités. Par contre, si on augmente beaucoup la concentration en sel, on passe à des argiles de faible sensibilité (augmentation de la résistanee). En 1970, J.E. Gillott détermine la composition chimique de l'eau interstitielle d'argiles Leda (tableau 5).

c) Paléosalinité

Pour avoir une bonne estimation de la paléosalinité, J.E. Gillott (1970) utilise la teneur en bore contenue dans les illites sachant que la teneur en bore est plus élevée en milieu marin qu'en eau douce. Il a déterminé la teneur en bore par fraction granulométrique (tableau 4).

5°) Structure

a) Macrostructure

Généralement, ces argiles sont assez homogènes et ne présentent pas de stratification. Elles peuvent avoir des fentes de dessications dues au départ de l'eau.

A.W. Skempton et R.D. Northey (1952) expliquent ce phénomène comme le résultat d'un procesuus colloïdal : la synérèse. Les particules tendent à se rapprocher les unes des autres sous l'action de forces d'attraction et ainsi expulsent une partie de l'eau intersticielle.

b) Microstructure

La sédimentation en milieu marin suppose une floculation et une sédimentation rapide des particules, formant ainsi des dépôts très poreux. Différentes structures schématiques ont été suggérées par des auteurs très connus, tels que A. Casagrande (1932), T.K. Tan (1957), T.W. Lambe(1958); ces deux derniers pensaient que la taille des particules argileuses ne jouait aucun rôle dans le processus de floculation.

Sample[1]	*Fraction size (μ)*	*Carbonate*[2] *(%)*	*Organic carbon (%)*	*Boron (p.p.m.)*	*Palaeosalinity designation*
	total	2.1	0.27		
A	2 – 0.2		0.21	100	fresher than normal marine
	< 0.2		0.50	50	
	total	3.3	0.37		
B	2 – 0.2		0.54	10	fresher than normal marine
	< 0.2		0.98	50	
	total	5.9	0.31		
C	2 – 0.2		0.30	100	near normal marine
	< 0.2		0.43	150	
	total	2.4	0.19		
D	2 – 0.2		0.24	50	fresher than normal marine
	< 0.2		0.53	25	
	total	9.7	0.24		
E	2 – 0.2		0.24	250	near normal marine
	< 0.2		0.40	250	

[1] A. Ottawa Sewage Plant; B. Ottawa Sewage Plant; C. Walkley Rd., Ottawa; D.H. M.C.S. Gloucester, Ontario; E. St. Joachim de Tourelle, Quebec.
[2] Data are given only for the 'total sample' as carbonates are removed by acid treatment prior to separation of the 2–0. 2 μ and < 0.2 μ size fractions.

Tableau IV : Argiles Leda : Paléo salinité (D'après J.E. Gillott, 1970).

Sample	MgO	CaO	K_2O	Na_2O	Cl^-	SO_4^{--}
A	29.2	8.9	81.4	400.3	31.3	178.4
B	27.8	9.8	64.9	363.4	19.6	171.2
C	31.1	117.1	72.8	73.8	18.8	228.9
D	15.7	4.99	32.0	289.0	32.8	107.2
E	37.6	156.6	41.6	51.2	16.0	310.1

Composition in mgm per 100 gm, dried clay

Tableau V : Argiles Leda : composition chimique de l'eau interstitielle (D'après J.E. Gillott, 1970).

D'après T.W. Lambe, la floculation donne une orientation pratiquement parallèle des particules.

Pour T.K. Tan, la structure de ces argiles marines montre un arrangement régulier qui met en contact : la surface d'une particule avec le bord d'une autre. L'arrangemnet microstructural de A. Casagrande montre l'importance de la taille des particules. Les petites particules floculées forment des liens entre les particules plus grosses.

En 1958, I. Th. Rosenquist, à l'aide d'échantillons lyophylisés conclut que l'arrangement des particules argileuses est du type de celui suggéré par T.K.Tan (1957) (fig.13).

R. Pusch (1962) étudia la microstructure d'argiles sensibles suédoises à l'aide de très fines sections (300 à 700 Å) observées au microscope électronique à transmission. Il mit en évidence des liens formés par des chaînes de petites particules entre des aggrégats ou entre des particules plus grosses (fig.14). En 1966, il poursuit ses recherches sur la forme et la taille des pores et des particules (fig.15). Il identifie à l'aide de microphotographies une classe de pores de 0,03 microns de diamètre maximum. Il constate également que la surface relative des pores est plus grande dans les argiles marines que dans les argiles d'eau douce de même teneur en eau.

En 1970, il étudie les changements microstructuraux d'une argile sensible de Suède sous l'effet de la compression simple. Les liens se brisent au fur et à mesure de l'augmentation du cisaillement et ainsi des groupes de particules parallèles se forment. Dans la zone macroscopique de cisaillement, les forces tendent à orienter et déformer les aggrégats (fig.16). Les aggrégats se comporteraient comme des corps rigides jusqu'à une certain niveau de contrainte durant le processus de cisaillement. Le concept de résistance résiduelle pourrait correspondre à l'état où la majorité des liens ont été brisés, alors que les aggrégats sont encore intacts. En 1966, R.M. Quigley et C.D. Thompson étudièrent la relation entre la structure d'une argile et les propriétés de consolidation unidimensionnelle en employant la diffraction des rayons X. Cette étude a été faite sur des argiles Leda (Ottawa). L'intensité des réflexions (001) de l'illite des échantillons non remaniés, mesurés dans le plan principal, est augmentée sous une charge de 64 tonnes/pied carré.

Ils attribuent cette augmentation d'intensité à une réorientation de plusieurs plaquettes dans le plan perpendiculaire à la direction de charge. Une réorientation brusque fut observée quand la charge de surconsolidation fut dépassée.

Le remaniement de l'argile rompant les liaisons interparticulaires, le degré de parallélisme représenté par une augmentation des réflexions (001) est plus grand au fur et à mesure que la pression augmente. Cette augmentation de parallélisme est associée à une grande réduction de l'indice des vides (fig.17).

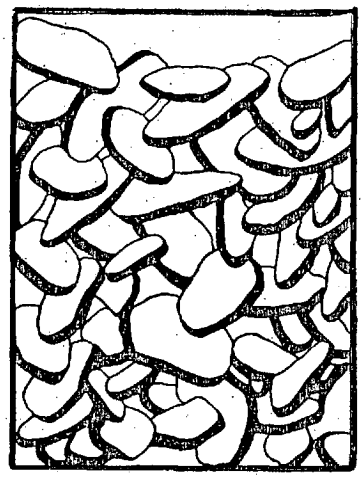


Fig.13 : Structure en "château de cartes" (D'après T.K. Tan,1957)

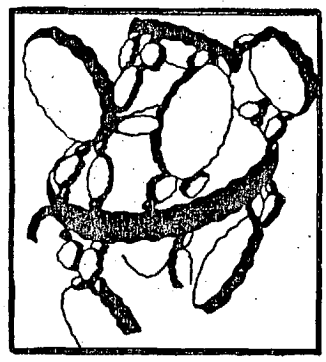


Fig. 14 : Structure hypothétique floculée ou aggrégée (D'après R. Pusch,1962)

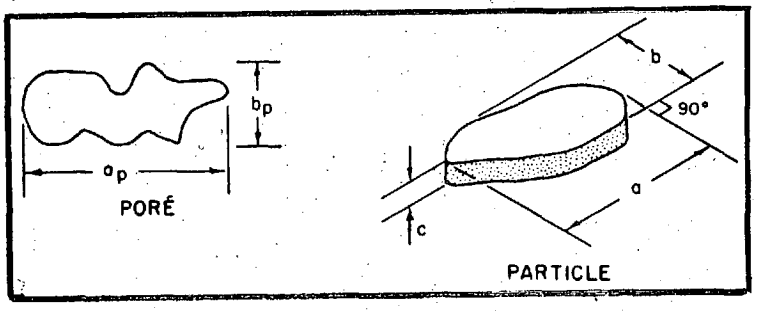


Fig.15 : Image schématique d'un pore et d'une particule argileuse, a) diamètre maximum, b)diamètre intermédiaire, c) épaisseur (D'après R. Pusch,1966-1970)

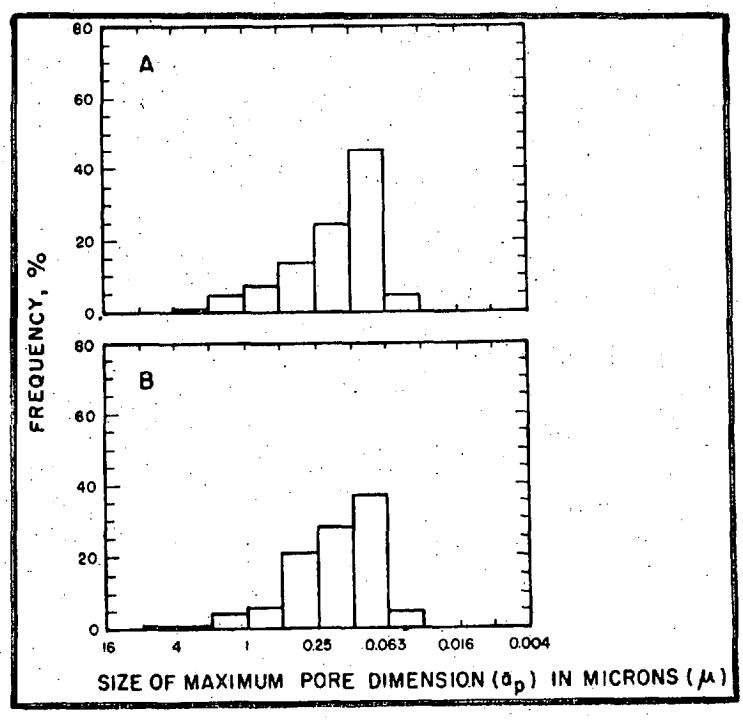


Fig.15 bis : Histogramme de la dimension maximum des pores (D'après R. Pusch, 1966)

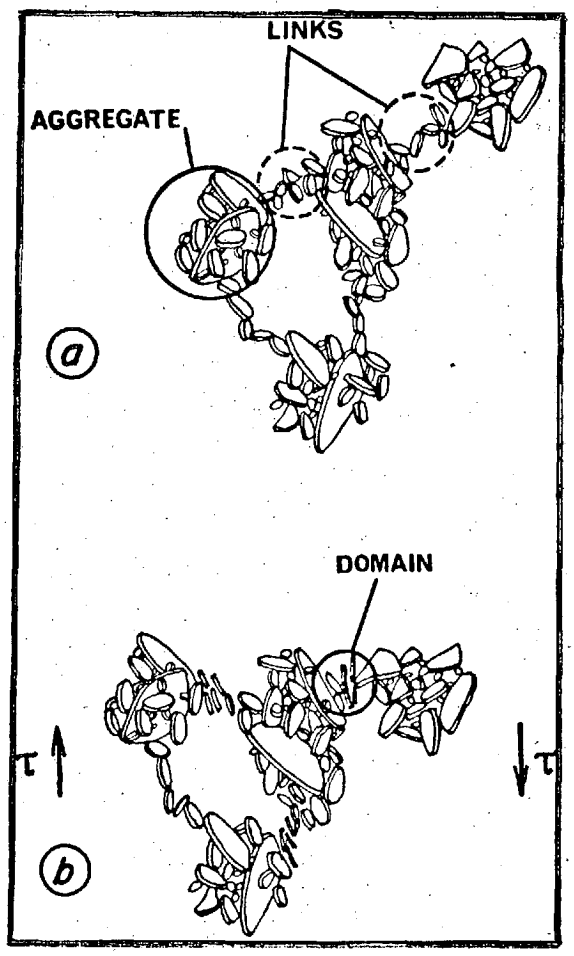


Fig. 16 : Schéma du processus de ruptur dans les argiles sensibles a) microstructure originelle, b) rupture des liaisons entra nant la formation d'ensembles de particules (R.Pusch,1970)

Pour une étude quantitative de minéraux argileux, J.E. Gillott (1970) est amené à définir un indice de structure à l'aide de la diffraction des rayons X.

$$\text{Indice de structure} = \frac{V}{(P + V)}$$

V = aire du pic de base d'une section perpendiculaire

P = aire du même pic d'une section parallèle.

L'indice de structure varie de 0 pour une structure parfaitement orientée à 0,50 pour une structure parfaitement désordonnée.

c) Interactions particulaires

L'idée de deux types de liaisons entre particules avait été utilisée par M. Goldstein et G. Ter-Stepanian (1957) pour expliquer leurs observations sur les déformations de sols argileux. Ils définissent en effet :

- les liaisons cassantes (rompues lors du cisaillement)
- les liaisons visqueuses (rompues lors du cisaillement, mais réformées après).

Pour C.B. Crawford (1968), il y a également deux sortes de liens : des liens rigides et des liens plastiques. Les liens rigides sont attribués à la recristallisation ou à la cimentation (oxyde de fer ou carbonates).

A la suite des analyses de sols de glissements qui montrèrent la faible proportion de minéraux argileux et qui mirent en évidence le rôle essentiel des fines non argileuses, I.J. Smalley (1971) définit deux types de liaisons interparticulaires :

1) des liaisons "actives" à long rayon d'action
2) des liaisons "inactives" à court rayon d'action (fig.18)

Les liaisons actives à long rayon d'action existent entre les particules argileuses et dépendent de la charge de celles-ci, de la présence d'un électrolyte, de l'eau orientée.

Les liaisons inactives à court rayon d'action existent entre les particules de quartz, silt, sable... et dépendent des contacts entre les particules. Si un contact est détruit, la liaison est "inactive". Dans les argiles sensibles, ce sont ces dernières qui prédominent.

Le lessivage d'un sol riche en ions diminue les liaisons argile - argile et augmente la proportion de liaison à faible rayon d'action. Il définit un rapport qui introduit une relation entre différentes particules de composition minérale différente.

$$R = \frac{\text{force interparticulaire}}{\text{poids des particules}}$$

Si R = 1, les forces se balancent

R inférieur à 1 : le poids de la particule inhibe l'effet des forces interparticulaires

R supérieur à 1 : le système est cohérent et l'effet interparticulaire prédomine sur le poids.

La ligne AB (fig.19) représente les argiles (forte cohésion).

La ligne CDE, des particules non argileuses dont la taille va de"l'argile" granulométrique aux sables. L'absence de particules en D est due au fait que les particules de quartz (prédominantes) ont une distribution bimodale, l'érosion glaciaire donnant deux classes principales de particules. Il n' y a, d'après I.J. Smalley (1970) cependant qu'une seule source et qu'un seul processus d'érosion.

Les argiles sensibles contiendraient principalement des particules qui se situent dans la région C avec de courtes liaisons.I .J. Smalley détermine ainsi trois types de sols en utilisant le critère de la taille des particules et le type de liaison interparticulaire.

1°) Sols formés de petites particules et ayant des liaisons"actives" à long rayon d'action (argiles vraies)

2°) Sols formés de petites particules et ayant des liaisons "inactives" à court rayon d'action

3°) Sols formés de grosses particules et ayant des liaisons "inactives" à court rayon d'action (sable).

Anciennement, les argiles sensibles étaient rangées dans la première catégorie de sol avec une forte teneur en silt. Pour l'auteur, il paraît plus satisfaisant de les classer dans la deuxième catégorie.

III - LA SENSIBILITE

1°) Définitions et méthodes de mesure

La sensibilité a été définie par K. Terzaghi en 1944 comme le rapport de la résistance en compression simple d'un sol non remanié à sa résistance en compression après remaniement et à la même teneur en eau.

$$St = \frac{c}{c_r}$$

Cette méthode donne satisfaction pour les sensibilités relativement faibles.

Pour les hautes sensibilités,plusieurs méthodes sont utilisées.

A. Andresen et L. Bjerrum (1956) utilisent le scissomètre de chantier.

$$(4)S_t = \frac{\text{Résistance au scissomètre de chantier d'un sol non remanié}}{\text{Résistance au scissomètre de chantier du même sol remanié}}$$

Le scissomètre de laboratoire donne des valeurs supérieures à celles données par la précédente méthode. Mais des difficultés apparaissent pour la mesure des faibles résistances de sol memanié.

$$(2)S_t = \frac{\text{Résistance au scissomètre de laboratoire d'un sol non remanié}}{\text{Résistance au scissomètre de laboratoire du même sol remanié}}$$

Essai au cône de conssitance (fall-cone test). Un cône pénètre sous son propre poids dans l'argile. S. Hansbo (1957) en déduit une résistance au cisaillement

$$S_s = \frac{(k\ Q)}{H2}$$

S_g = résistance au cisaillement

H = pénétration

Q = poids du cône

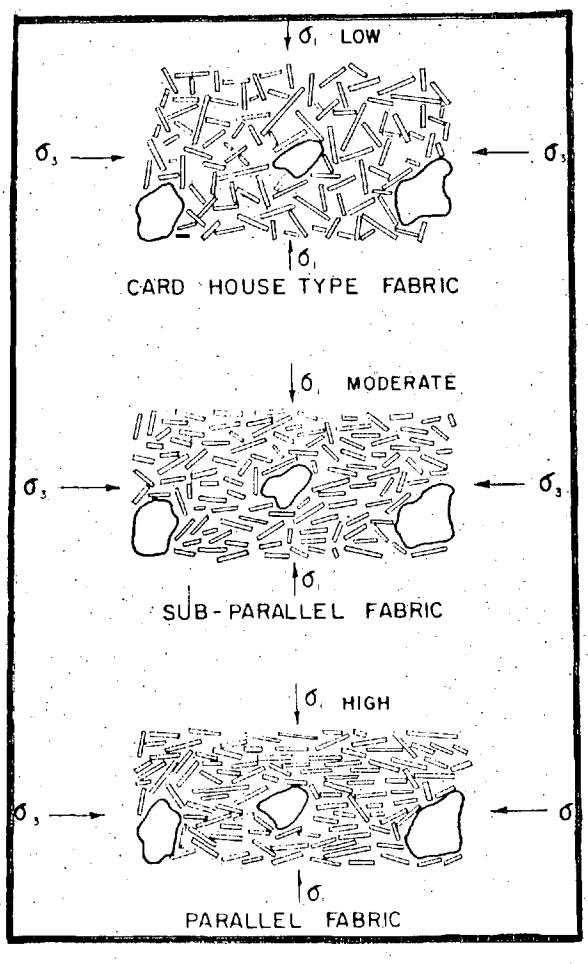


Fig. 17 : Structure d'une argile marine à différentes étapes de la consolidation anisotropique (D'après R.M. Quigley et C.D Thompson, 1966).

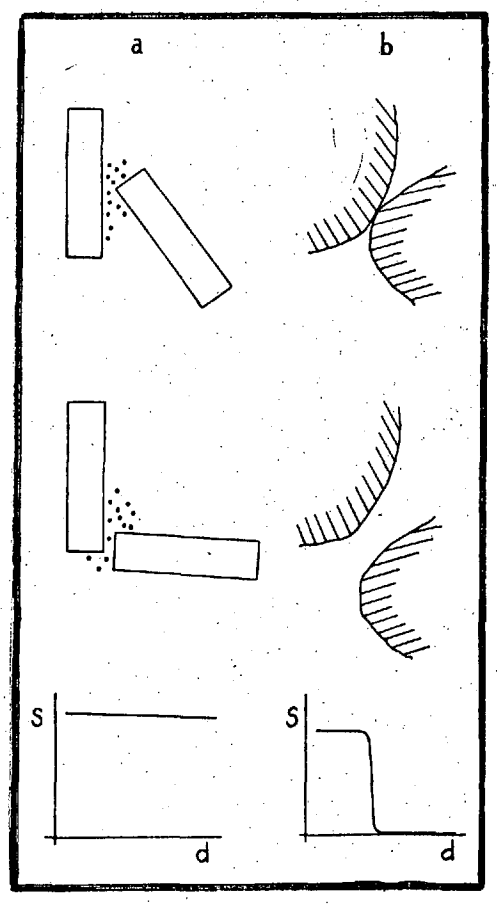


Fig.18 :Comportement de deux types de liaisons interparticulaires sous l'action d'une contrainte de cisaillement. La résistance de la liaison est représentée par le déplacement. a) liaison "active" à long rayon d'action, b) liaison "inactive" à court rayon d'action (D'après I.J. Smolley et J.G.Cabrera, 1973).

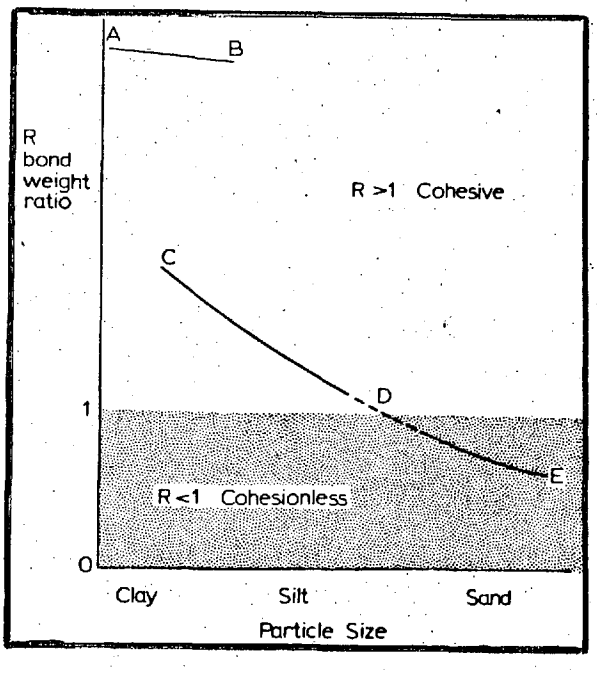


Fig. 19 : Relation entre le rapport "Poids-Liaison" R et la taille des particules.
A,B : particules argileuses; C,D,E :particules non argileuses (D'après I.J. Smalley, 1971)

Le test fait sur un échantillon non remanié et sur un échantillon remanié donne une valeur de la sensibilité :

(3) $S_t = \frac{H^2 \text{ remanié}}{H^2 \text{ non remanié}}$

Pour S. Hausbo, la sensibilété est donnée par la relation suivante :

(5) $S_t = \frac{H \text{ remanié}}{H \text{ non remanié}}$

A ces différentes définitions, W.J. Eden et J.K. Kubota (1961) y ajoutent :

(1) $S_t = \frac{\frac{1}{2} \text{ (résistance en compression) d'un sol non remanié}}{\text{Résistance au scissomètre de laboratoire du même sol remanié}}$

L. Bjerrum montre qu'il y a une corrélation logarithmique entre la sensibilité et l'indice de liquidité :

$$IL = \frac{W - LP}{LL - LP}$$

La figure20 montre que les méthodes 1 et 2 suivent de plus près la relation de Bjerrum.

2°) Classifications

A.W. Skempton et R.D. Northey (1952) classent les argiles suivant leur sensibilité ($S_t = \frac{c}{c_r}$) de la manière suivante :

S_t = 1 : argiles non sensibles

S_t = 1 à 2 : argiles de faible sensibilité

S_t = 2 à 4 : argiles de moyenne sensibilité

S_t = 4 à 8 : argiles sensibles

S_t supérieur à 8 : argiles extra sensibles

S_t supérieur à 16 : argiles "rapides" (Quickclays)

Beaucoup d'argiles norvégiennes ayant des valeurs de sensibilité supérieures à celles données par les argiles les plus senbibles définies par A.W. Skempton et R.D. Northey, I Th. Rosenquist est amené à étendre la classification :

S_t = 1 : argiles non sensibles

S_t = 1 à 2 : argiles faiblement sensibles

S_t = 2 à 4 : argiles moyennenent sensibles

S_t = 4 à 8 : argiles très sensibles

S_t = 8 à 16 : argiles faiblement "rapides"

S_t = 16 à 32 : argiles moyennement "rapides"

S_t = 32 à 64 : argiles très "rapides"

S_t supérieur à 64 : argiles extra "rapides"

3°) Les causes

Avant d'avoir la possibilité de prendre des échantillons intacts, différentes explications ont été données.

La plus évidente était un sol constitué d'une suspension liquide d'argile recouverte par une croûte solide.

Puis différents auteurs suggèrèrent que les glissements dans les argiles sensibles étaient dus à la pluie qui pénétrait dans le sol et ramollissait l'argile. Avec la prise d'échantillons quasi intacts, I Th. Rosenquist (1953) base son explication sur la structure en "château de carte" de ces argiles. Cette théorie consiste principalement en la sédimentation, en présence d'un électrolyte, de plaquettes argileuses qui s'arrangent de telle manière qu'elles laissent de grands vides (floculation) (fig.21). En cas de remaniement, la structure s'écroule et l'eau contenue dans les pores rend ces argiles liquides. Cette structure deviendrait métastable à la suite d'une réduction de la salinité due au lessivage (fig.22). Cette théorie a été abandonnée avec les études chimiques et microscopiques qui montrèrent qu'il n'y avait aucune différence notable entre la minéralogie des argiles sensibles et des argiles "normales". et aucun arrangement particulier des minéraux plats.

Grâce à des études faites sur les propriétés thixotropiques (fig.23) de ces matériaux, A.W. Skempton et R.D. Northey (1952) montrèrent que des argiles très sensibles remaniées retrouvent une partie de leur résistance après un certain repos (fig.24) à teneur en eau constante. Ce regain de résistance est variable suivant les types de minéraux argileux (moyen à faible pour les illites) et semble atteindre un maximum quand W = LL.

Le phénomène n'est pas strictement réversible, c'est pourquoi H. Van Olphen (1963) préfère parler de "chute de résistance" plutôt que de thixotropie. Certains sols que l'on classe parmi les argiles sensibles ne présentent aucun regain de résistance. La thixotropie ne peut donc pas à elle seule expliquer la sensibilité. R Söderblom (1966) suggère que la sensibilité peut s'expliquer par l'action de substances à fort pouvoir dispersif (acides gras, savons) et que la microstructure n'a pas l'importance qu'on lui attribue. Ainsi, à la suite de ces études sur la thixotropie des colloïdes et l'influence de l'électrolyte sur la floculation, I. Th. Rosenquist (1966) reprend sa théorie en la modifiant comme suit : "Des quickclays sont formées lorsqu'une suspension d'argiles est transportée rapidement dans de l'eau salée avec une concentration telle que la fraction la plus fine flocule et soit mise en place avec les particules les plus grosses. Le gel d'argile formé en eau salée serait stable avec une forte teneur en eau à cause d'un épais film d'eau qui lierait chaque grain.

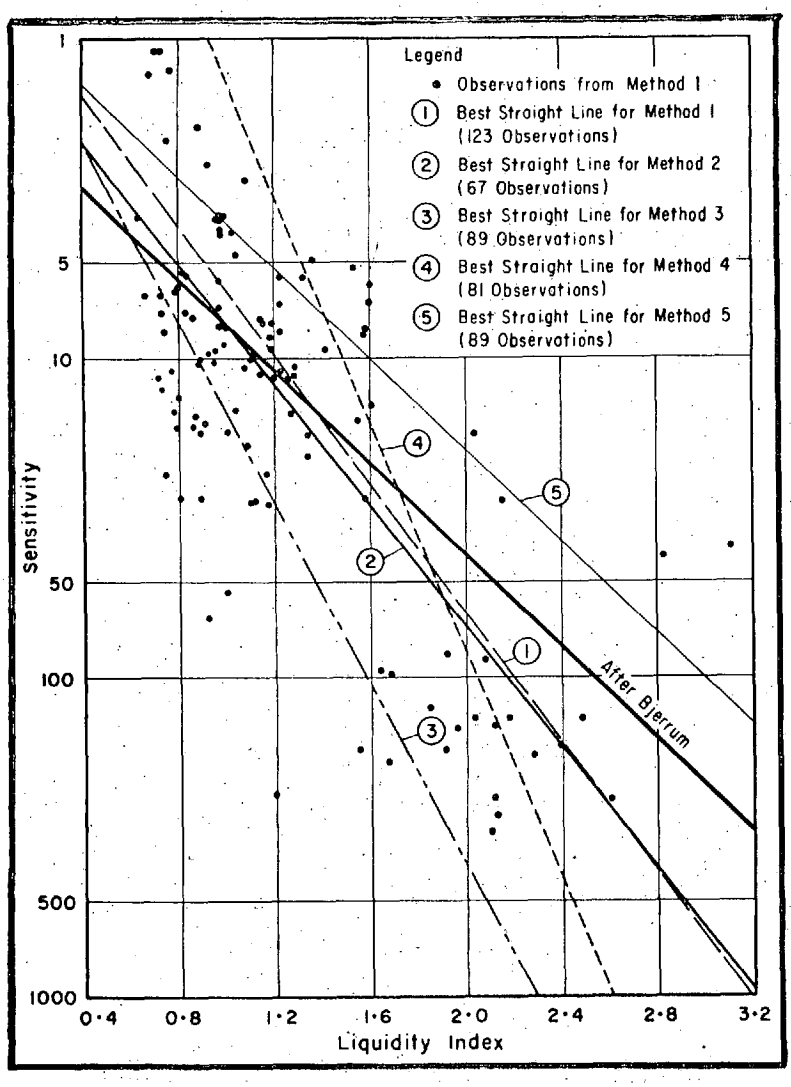


Fig. 20 : Relation entre l'indice de liquidité et la sensibilité suivant les 5 méthodes (D'après W.J. Eden, et J.K. Kubota, 1961)

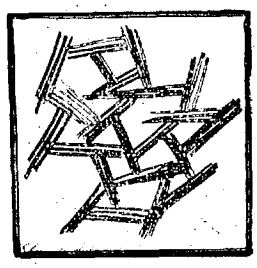


Fig.21 : Structure en agrégats floculés (D'après Van Olphen).

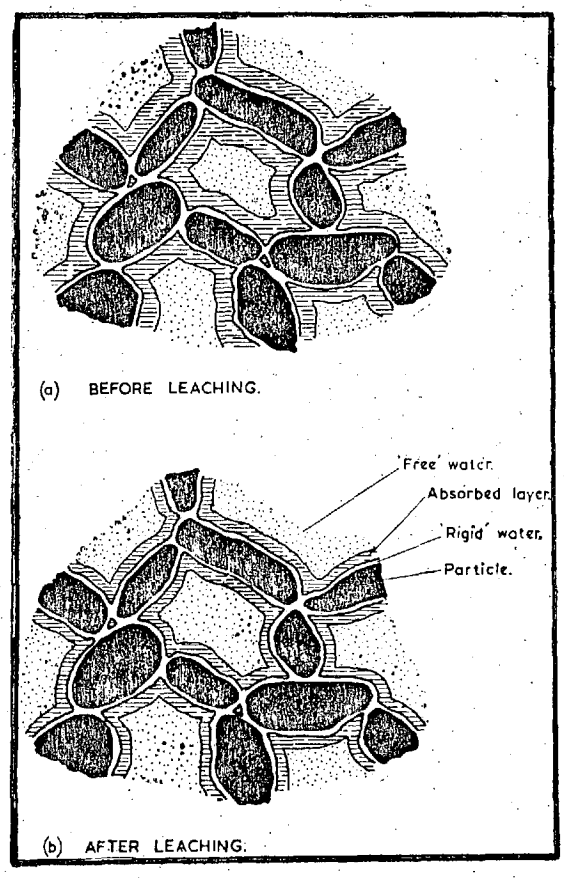


Fig.22 : Effets du lessivage sur une argile marine non remaniée (d'après A.W. Skempton, et R.D. Northey, 1950)

Après le dépôt de l'argile, la teneur en sel décroît à la suite de la diffusion dans le sol. Ce phénomène se produit non seulement pour les dépôts d'argile situés au-dessus au niveau de la mer, mais également pour des dépôts sous-marins tant que l'eau interstitielle ne se mélange pas avec l'eau de mer. Ces argiles restent très solides, même lorsque tout le sel a diffusé, aussi longtemps qu'elles ne sont pas remaniées. Si un remaniement intervient alors, cette structure instable est détruite et l'excès d'eau rend ces argiles remaniées pratiquement liquides. Du fait de cette théorie, beaucoup d'argiles "normales" diffèrent des argiles sensibles :

- dépôt dans une eau plus douce,
- suspension trop diluée (pas de floculation),
- non diffusion du sel,
- perte d'eau par consolidation.

Puis I.Th. Rosenquist modifia sa théorie. Le sel et le lessivage de ce sel ne sont plus les causes primordiales de la sensibilité. Il ajoute qu'elle peut provenir de l'augmentation de la répulsion dans la double couche à la suite du lavage de l'électrolyte ou l'addition de substances à haut pouvoir dispersif(phosphates) Plus tard, certaines investigations mirent en doute quelques aspects de la théorie de Th. Rosenquist.

E. Penner (1965) montra que s'il existait une corrélation entre la sensibilité et la teneur en sel pour les argiles sensibles de Norvège, il n'y en avait pas pour les argiles Leda. Il démontre cependant que la sensibilité est influencée par le potentiel électrocinétique (fig.25). R. Söderblom (1969) se referant à certains sols suédois,rapporta qu'il n'était pas possible de trouver une corrélation entre la sensibilité et la teneur en sel totale.

R. Pusch et M. Arnold (1969) n'ont pas réussi à fabriquer une argile très sensible par lessivage d'une argile artificielle sédimentée en milieu salin.

D'autre part, il apparaît que la structure en "château de cartes" due aux particules argileuses mentionnée par I. Th. Rosenquist (1953) n'est pas évidente. Avec l'amélioration du microscope électronique, il est possible d'avoir une information structurale assez proche de la réalité. Or, les différentes études faites par I.J. Smalley et J.G. Cabrera (1969), L. Barden et G.R. Slides (1970), J.E. Gillott (1970, N.R. O'Brien (1970,71), N.K. Tovey (1970), L. Barden (1972) ne révèlent aucune structure de ce type. C.F. Moon (1972) ne croit pas non plus à une structure "ouverte" formée de particules argileuses.

Une possibilité plus vraisemblable proposée par L.A.G. Aylmore et J.P. Quirk (1960) incorpore les minéraux argileux à des structures plus complexes.

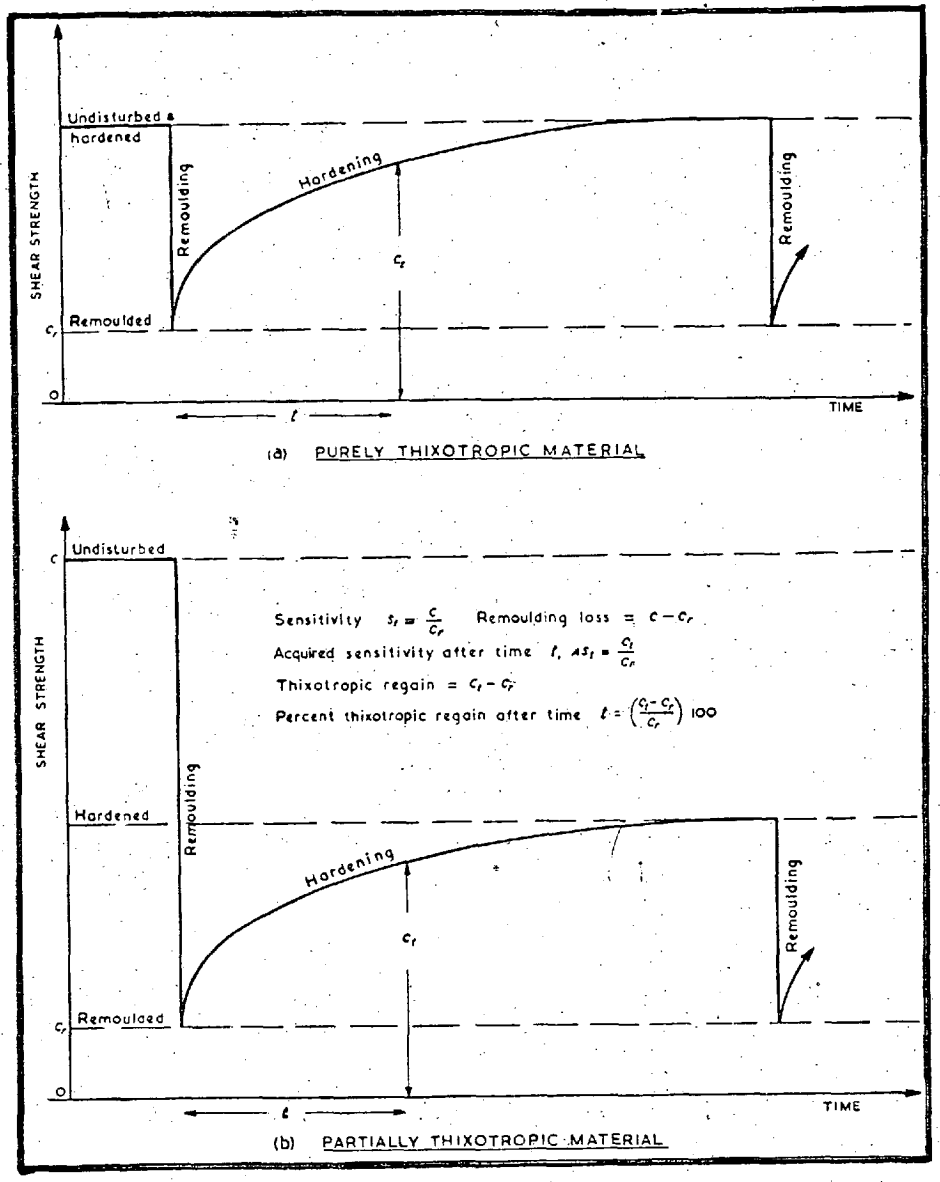


Fig. 23 : Regain thixotropique partiel (b) et total (a) .(D'après A.W. Skempton et R.D. Northey, 1950)

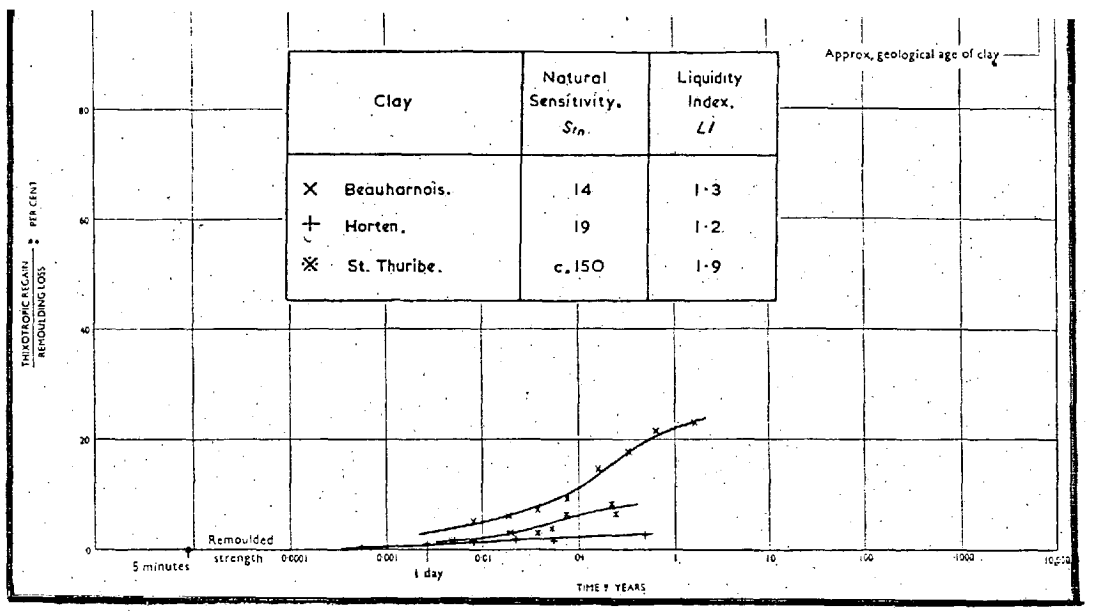


Fig. 24 : Regain thixotropique dans des argiles très sensibles

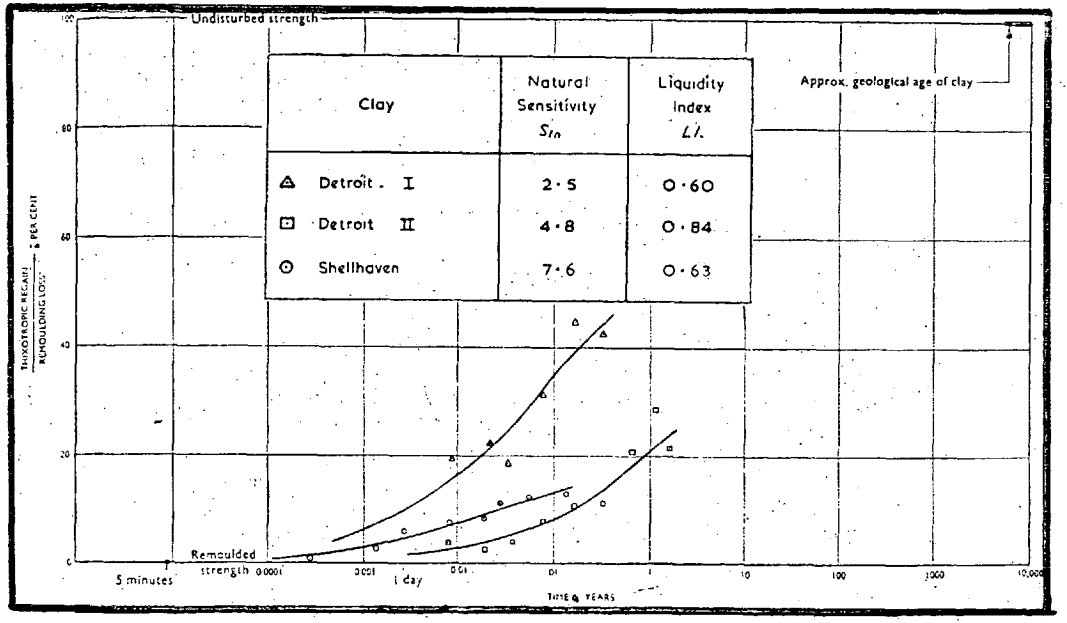


Fig.24 bis : Regain thixotropique dans des argiles modérément sensibles (D'après A.W Skempton et R.D.Northey,1950)

Si comme le pensent D.H. Krinsley et I.V. Smalley (1973), les fines particules de quartz tendent à prendre des formes en plaquette (formes dues au clivage du quartz), il est possible que ce type de structure existe, mais elle serait formée de minéraux non chargés électriquement (inactifs) plutôt que de minéraux argileux (actifs).

Malgré cela, il est indéniable que le lessivage a un effet considérable sur certains sols argileux. A.W. Skempton et R.D. Northey (1952) trouvèrent que la teneur en eau et la résistance non remaniée d'une argile n'étaient pas altérées par le lessivage, bien que la limite de liquidité et la résistance remaniée eussent considérablement décrû. Si les cations échangeables peuvent être supprimées par le lessivage du système eau-argile, cela doit affecter la nature des liaisons et on peut raisonnablement penser que l'indice de plasticité (IP) décroît parce-que la proportion de liaisons actives a également décrû. Les diverses causes de la sensibilité peuvent être résumées de la manière suivante :

Mécanisme	Type de réaction	Limite supérieure de la sensibilité	Type de sol affecté
Structure métastable	Physique	S_t = 8 à 16	Argiles
Squelette silteux et liaisons argileuses	Physique	S_t = 4 à 8	Argile, silt, sable et mélanges
Cimentation	Chimique	S_t = supérieur à 64 (?)	Tous sols contenant des composants susceptibles de former un ciment
Echange d'ions	Physico-chimique	S_t = 8 à 16 (?)	Argiles lessivées
Lessivage du sel	Physico-chimique	S_t = supérieur à 64	Argiles glaciaires et argiles marines post-glaciaires
Thixotropie	Physico-chimique	S_t = 2 à 16	Argiles
Addition d'agents à haut pouvoir dispersif	Physico-chimique	S_t = supérieur à 64	Argiles contenant des composants organiques ou en association avec des dépôts organiques

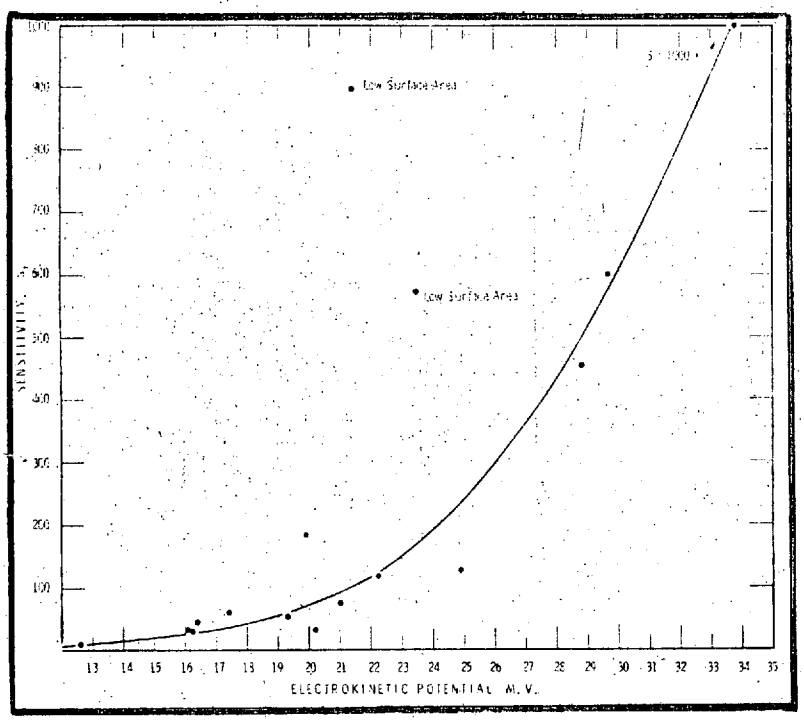


Fig. 25 : Potentiel électrocinétique d'une argile Leda non remaniée comme une fonction de la sensibilité (D'après E. Penner, 1965)

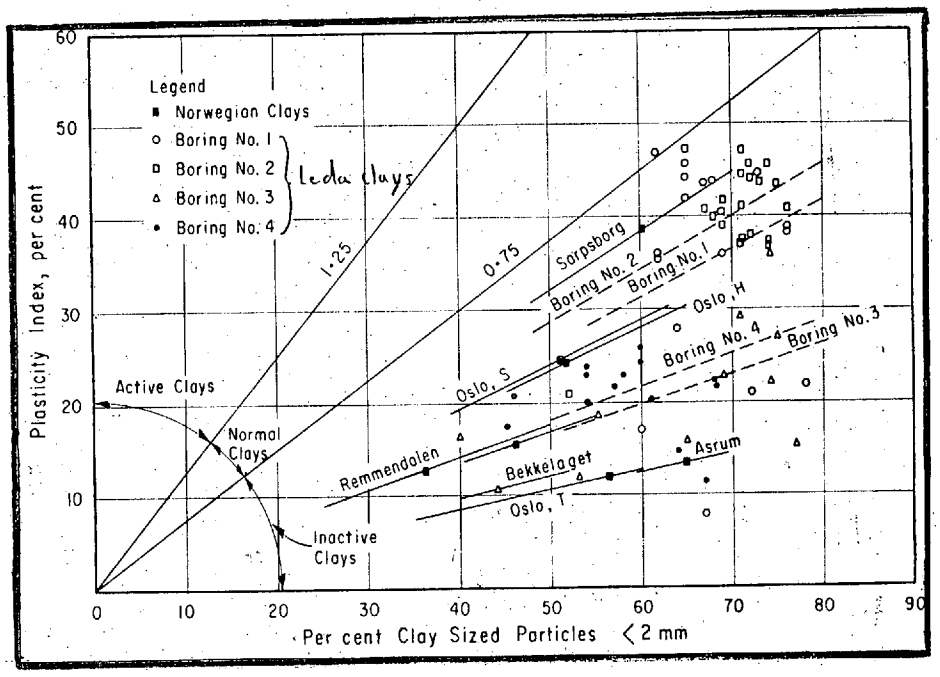


Fig.26 :Abaque d'activité (D'après W.J.Eden et J.K. Kubota, 1961)

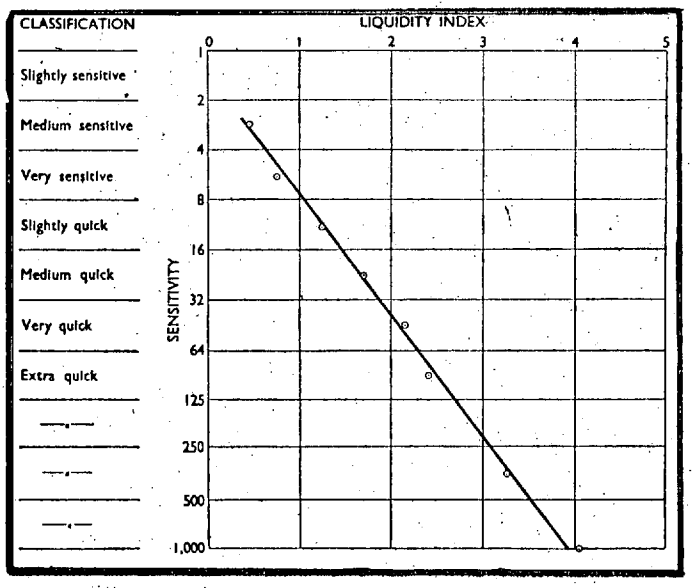


Fig.27 : Relation entre la sensibilité et l'indice de liquidité (D'après L.Bjerrum,1954)

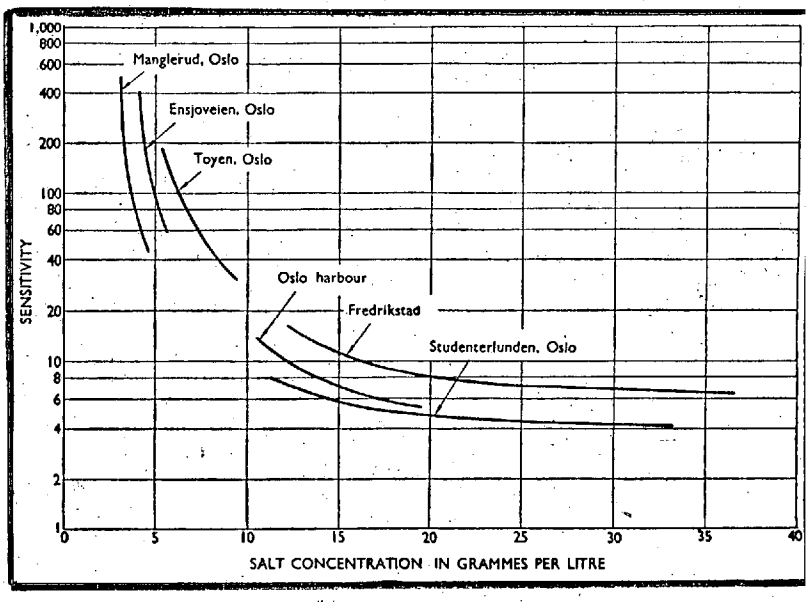


Fig. 28 : Relation entre la sensibilité et la concentration en sel de quelques argile norvégiennes (D'ap.L.Bjerrum,1954)

Il apparaît évident que l'étude de la sensibilité est une des clés principales de la solution au problème de comportement des argiles sensibles. Cependant, malgré les nombreuses idées émises sur les facteurs déterminant cette sensibilité, aucune ne paraît tout à fait satisfaisante. Des études semblent encore nécessaires pour préciser certains points.

IV - PROPRIETES ET CORRELATIONS

1°) Teneur en eau, limites d'Atterberg et activité.

La teneur en eau naturelle (W) des argiles senbibles est toujours très élevée. Cependant, elle peut varier suivant la profondeur. Cette énorme proportion d'eau peut être expliquée par la présence de larges pores due à une structure floculée liée à un indice des vides important.

Les argiles sensibles sont également caractérisées par une teneur en eau naturelle supérieure à la limite de liquidité (LL).

La limite de plasticité (LP) est assez faible, ce qui est rare pour des argiles. Ceci est du en fait au faible pourcentage de minéraux argileux.

L'activité, définie comme le rapport de l'indice de plasticité (IP = LL - LP) au pourcentage de particules inférieures à 2 microns, pour les argiles sensibles est typiquement basse (fig.26).

L. Bjerrum (1954) montre qu'il existe une corrélation entre la sensibilité et l'indice de liquidité (fig.27). Il remarque également que l'activité décroît avec la diminution de la concentration en sel de l'eau interstitielle. Le lessivage entraîne une diminution de la limite de liquidité et une augmentation de l'indice de liquidité et, par conséquent, un accroissement de la sensibilité. Pour certaines argiles norvégiennes, l'activité augmente avec le pourcentage d'illite.

2°) Electrolyte

La sensibilité est inversement proportionnelle à la concentration en sel pour les argiles de Norvège (fig.28). Par contre, pour les argiles Leda, cette relation n'existe pas. E. Penner (1965) a constaté l'existence d'une corrélation entre la sensibilité et le potentiel électrocinétique des argiles sensibles du Canada. J. Moum et I.Th. Rosenquist (1961), à la suite d'expériences sur des sédiments argileux artificiels, remarquent que la capacité d'échange de Na par K est de 90 % pour les illites. Au cours de l'expérience, la sensibilité est passée de 8 à 3,5. Ce phénomène de réduction de sensibilité pourrait être utilisé pour prévenir les glissements de terrains riches en illite.

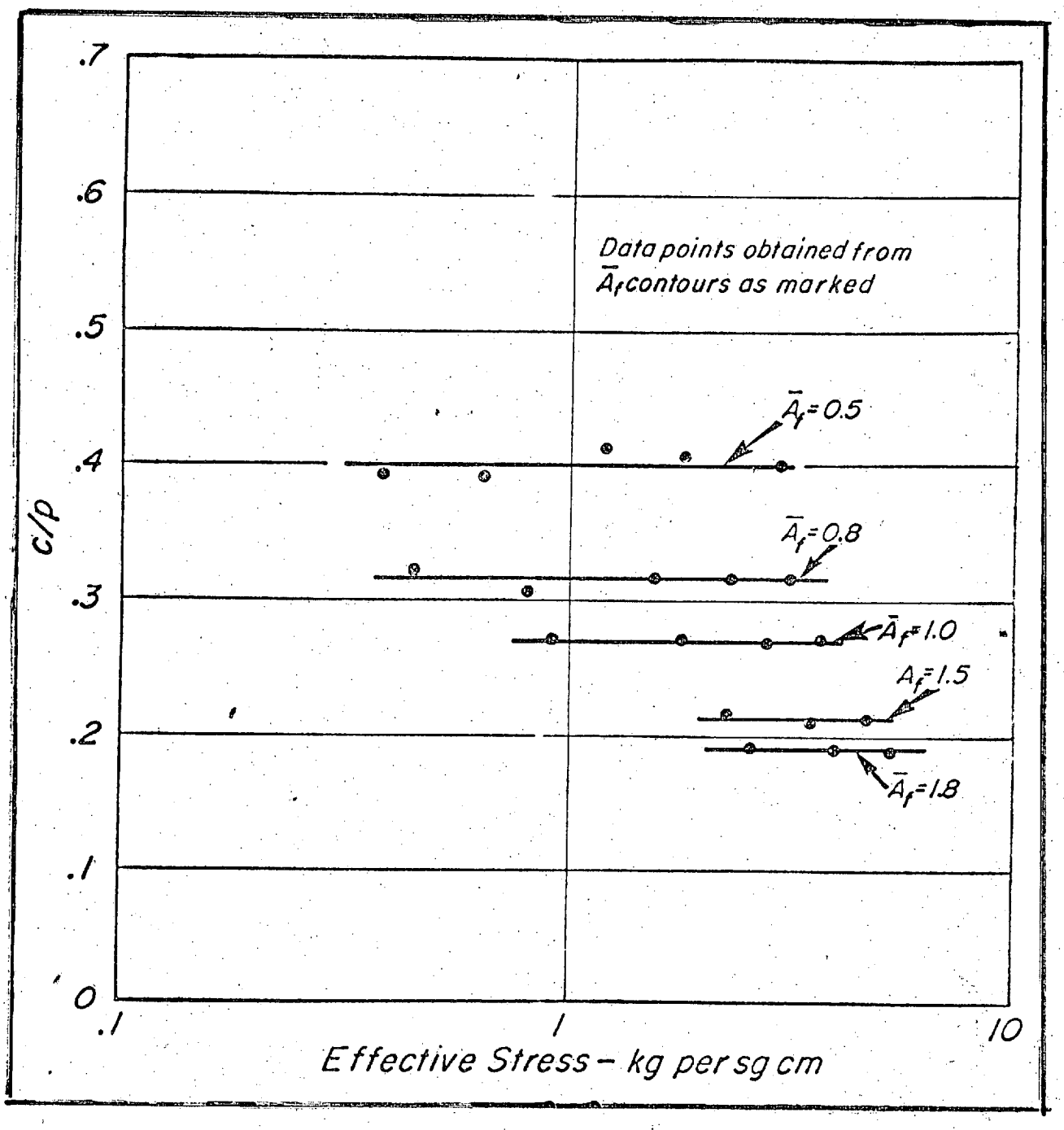


Fig. 29 : Relation entre C/P et la pression effective de consolidation pour différentes valeurs de $\bar{A}$.
(D'après J.K. Mitchell et W.H. Hauston)

3°) Pression interstitielle

Au cours du cisaillement, l'augmentation de la pression interstitielle est généralement plus grande lorsque la sensibilité croît. Durant le cisaillement, une argile sensible tend, en effet, à se contracter. Ceci est dû à un indice des vides très élevé. L'eau va alors reprendre tous les efforts. Ce processus est très bien traduit par le coefficient $\bar{A}$ de Skempton (1954) :

$$\bar{A} = \frac{\Delta u}{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

$\bar{A}$ augmente lorsque C/P (résistance au cisaillement / pression effective des terres) diminue (fig.29). Dans le cas des argiles sensibles, C/P diminuant avec l'augmentation de la sensibilité (fig.36), $\bar{A}$ croît avec la sensibilité.

4°) Consolidation

La plupart des argiles sensibles sont normalement consolidées.

R.J. Conlon (1966) décrit des argiles Leda surconsolidées avec une pression de préconsolidation d'environ 12 kg/cm^2 (Basse vallée du Saint-Laurent).

C.B. Crawford (1968) montre que les courbes pression / indice des vides sont fonction de la procédure de chargement et, en particulier, de sa vitesse(fig.30)

R.M. Quigley et C.D. Thompson (1966) suggèrent que la consolidation entraîne un réarrangement des particules argileuses, les plaquettes s'orientant perpendiculairement à la direction de la contrainte (fig.31). Généralement, la compressibilité des argiles sensibles est encore assez grande après la pression de préconsolidation.

5°) Résistance au cisaillement

L'état non remanié peut varier d'un matériau mou avec une résistance de 0,15 kg/cm^2 (H. Burke et W.Davis,1957) à un matériau très dur avec une résistance de 4 kg/cm^2 (J.M. Conlon, 1966). La résistance au cisaillement non remaniée est en moyenne égale à 30 % de la pression de consolidation.(W.J.Eden et C.B.Crawford,1965)

Lorsque l'argile est remaniée, elle peut avoir la consistance d'un liquide visqueux. La mesure de la résistance au cisaillement d'une argile sensible remaniée devient très difficile voire impossible avec les scissomètres ou les cônes de consistance.L'étude peut se faire à l'aide d'un viscosimètre (fig. 32 et 33). Les argiles sensibles non remaniées ont une structure rigide. La rupture est obtenue généralement à 5 %.de déformation (fig.34). La résistance au cisaillement non remanié est communément mesurée avec le scissomètre de chantier.

W.J. Eden et J.J. Hamilton (1957) trouvèrent que les résistances mesurées au scissomètre de terrain étaient supérieures à celles mesurées au scissomètre de laboratoire (remaniement probable).

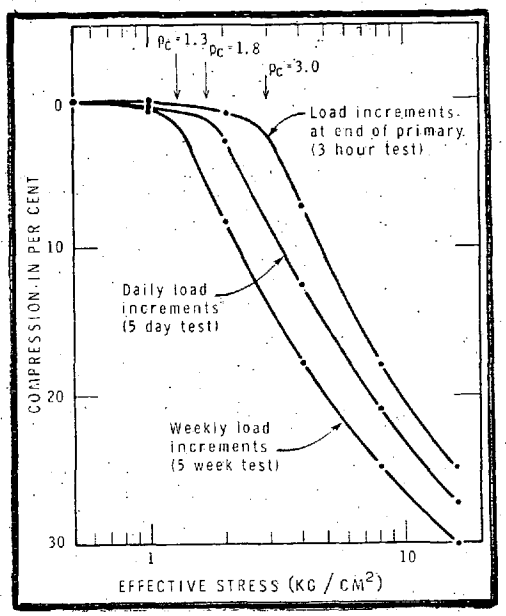


Fig. 30 : Courbes compression Log (Pression) pour différentes vitesses de chargement (D'après C.B.Crawford, 1969)

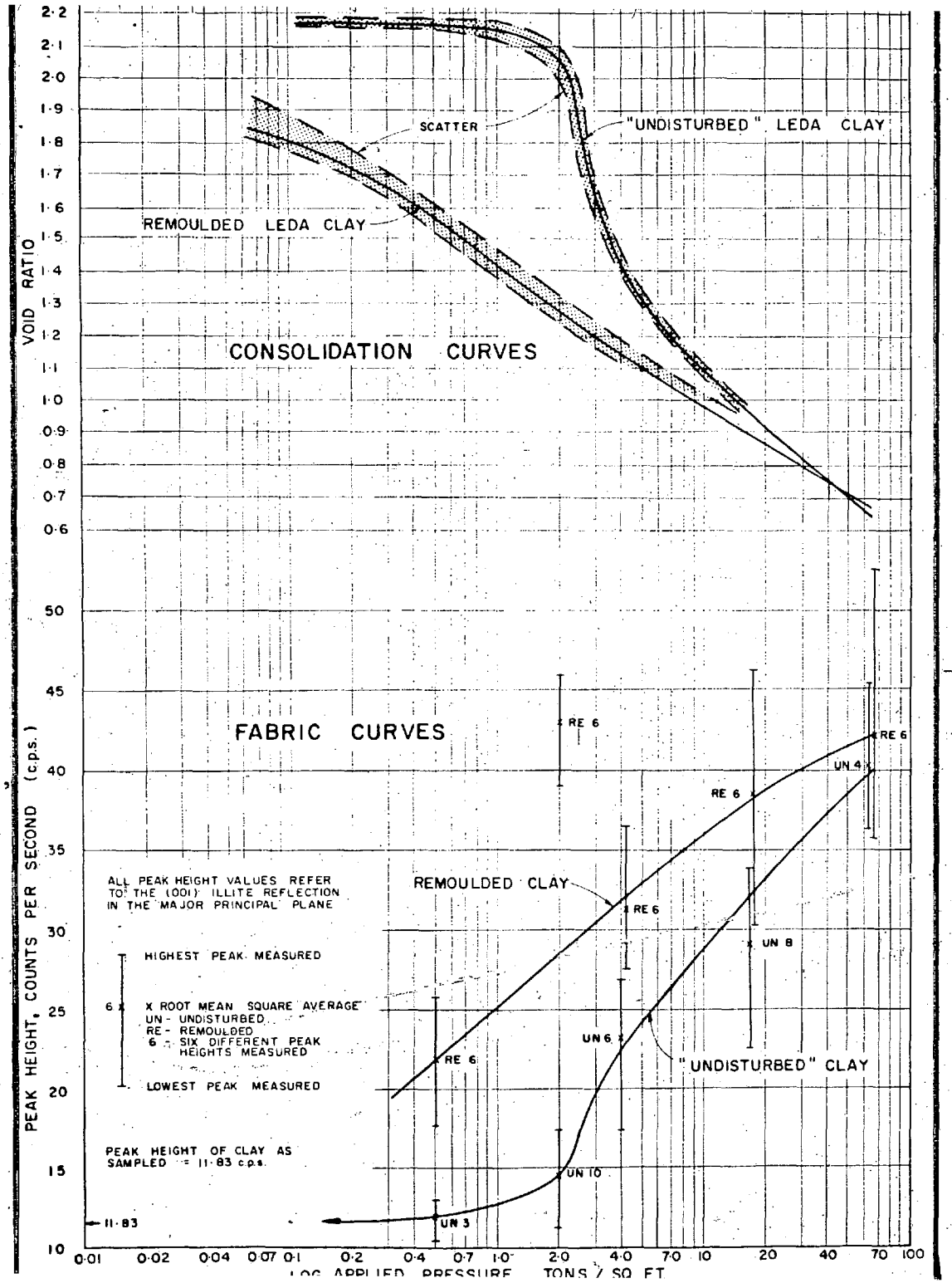


Fig. 31 : Parallélisme de plaquettes argileus produit par une consolidation aniso tropique d'argile Leda remaniée et no remaniée. (D'après R.M. Quigley et C.D. Thompson, 1960

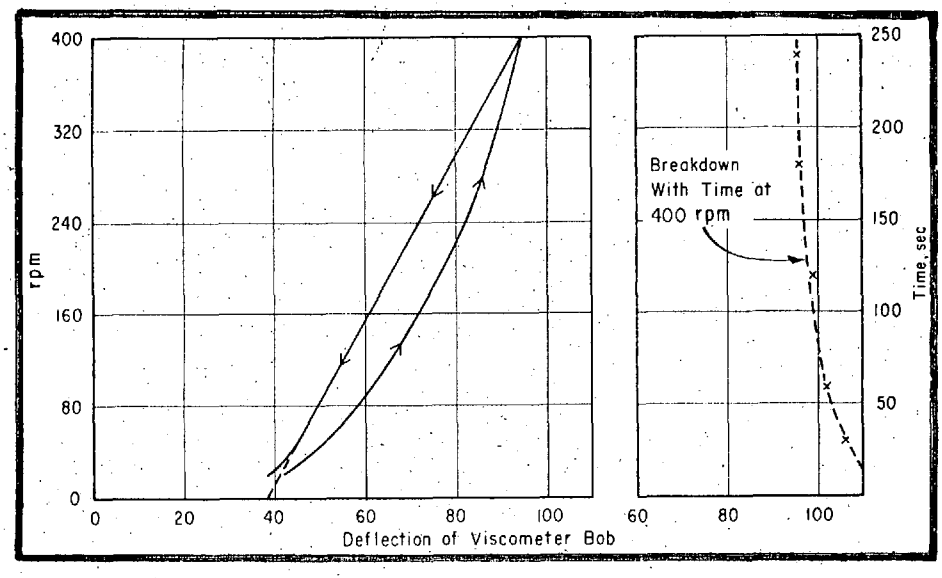


Fig. 32 : Courbes de consistance d'argile sensible obtenues à l'aide d'un viscosimètre (D'après W.J. Eden et J.K. Kubota, 1961)

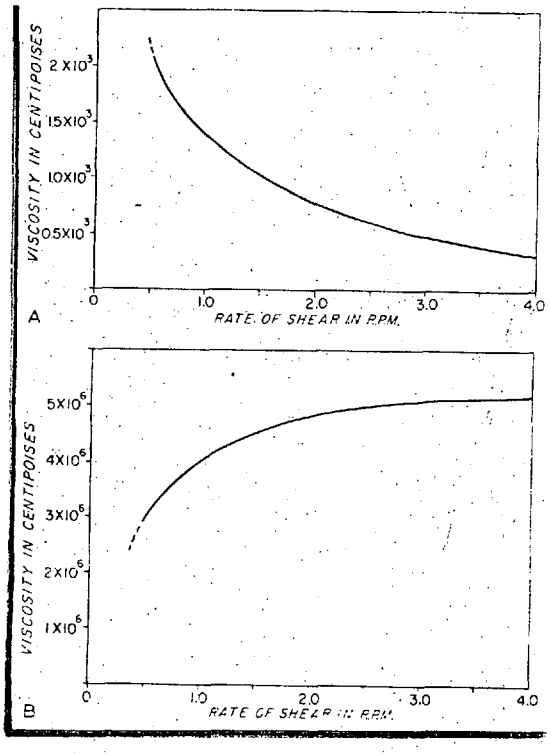


Fig. 33 : Contraste entre la dilatance d'un sable (45 à 75 microns) saturé et la thixotrop d'une argile saturée (inférieures à 2 micro (D'après C.BCrawford, 1968)

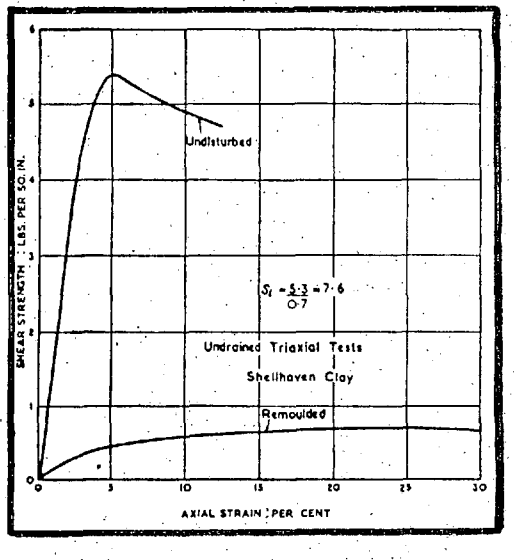


Fig. 34 : Courbe effort-déformation pour une argile sensible typique (D'après A.W. Skempton et R.D.Northey,1952)

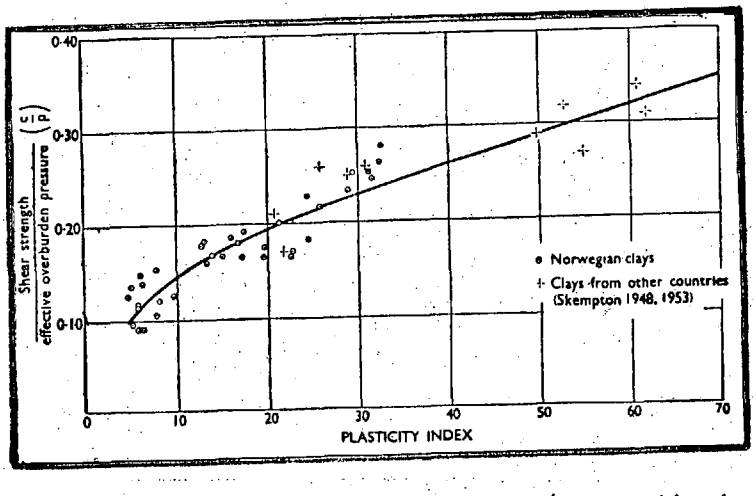


Fig. 35 : Relation entre C/P et l'indice de plasticité (D'après L.Bjerrum, 1954)

W. Skempton (1948) puis W.J. Eden et C.B. Crawford (1957) constatent que pour les argiles postglaciaires, l'augmentation de la pression de consolidation s'accompagne d'une augmentation de la résistance au cisaillement bien que, dans certains cas, cette résistance n'augmente pas avec la profondeur.

Une série d'expériences faite par C.B. Crawford (1959, 1961, 1963) montre que la résistance en compression non drainée maximum décroît substantiellement avec une diminution de la vitesse de déformation. Il arrive à la conclusion que la plupart de la résistance du cisaillement des argiles Leda modérément surconsolidées peut être attribuée à la cohésion causée par les contraintes effectives et les liaisons interparticulaires.

Lorsque la rupture se produit pour une contrainte inférieure à la pression de consolidation, il suggère que l'utilisation de la théorie de Mohr-Coulomb n'est pas appropriée. Plus récemment, T.C. Kenney (1966) offre une nouvelle approche dans laquelle la contrainte de cisaillement est décrite comme la contrainte effective sur le plan de rupture. Pour T.C. Kenney, le frottement interne est la composante majeure de la résistance alors que les liaisons dues à la cimentation ont une faible importance. R.J. Conlon (1966) arrive à une conclusion similaire. La résistance au cisaillement d'une argile de la vallée du St-Laurent peut être divisée en deux composantes : liaisons dues à la cimentation et au frottement interne.
L. Bjerrum (1954) décrit pour des argiles norvégiennes une augmentation linéaire de la résistance au cisaillement non drainée avec la profondeur. Il montre que la résistance au cisaillement croît avec l'indice de plasticité et donc avec C/P (résistance au cisaillement / pression effective du sol) (fig.35). En conséquence, C/P décroît avec une augmentation de la sensibilité (fig.36).

La résistance au cisaillement des minéraux argileux communs dans les argiles sensibles décroît rapidement avec l'augmentation de la teneur en eau naturelle (P.F. Kerr, 1963) (fig.37).

En 1968, P.F. Kerr et I.M. Drew suggèrent que la résistance au cisaillement peut augmenter à la suite de différents phénomènes :

- regain thixotropique de résistance,
- perte d'eau,
- addition de particules plus grosses.

R.E. Grim (1962) pense qu'avec le temps, pour une teneur en eau donnée, certaines argiles atteignent un état d'équilibre grâce auquel elles peuvent avoir une résistance considérable. L'eau se répartit de façon homogène. Une très légère diminution de cette teneur peut entraîner une chute de résistance. Une distribution homogène de l'eau favorise le développement des couches d'eau orientée (cas de certaines bentonites.) Récemment, B. Voight trouve une corrélation entre l'indice de plasticité et le coefficient de résistance résiduelle.

6°) Déformation

Le fait que la déformation à la rupture tende à décroître avec l'augmentation de la sensibilité (fig.38) est un comportement particulier des argiles sensibles. Pour des sols denses qui ont tendance à se dilater, la déformation importante provient de la mobilisation de toute la résistance du sol. Pour les argiles sensibles, ce n'est pas le cas, il y a seulement rupture de liaisons interparticulaires (comportement cassant).

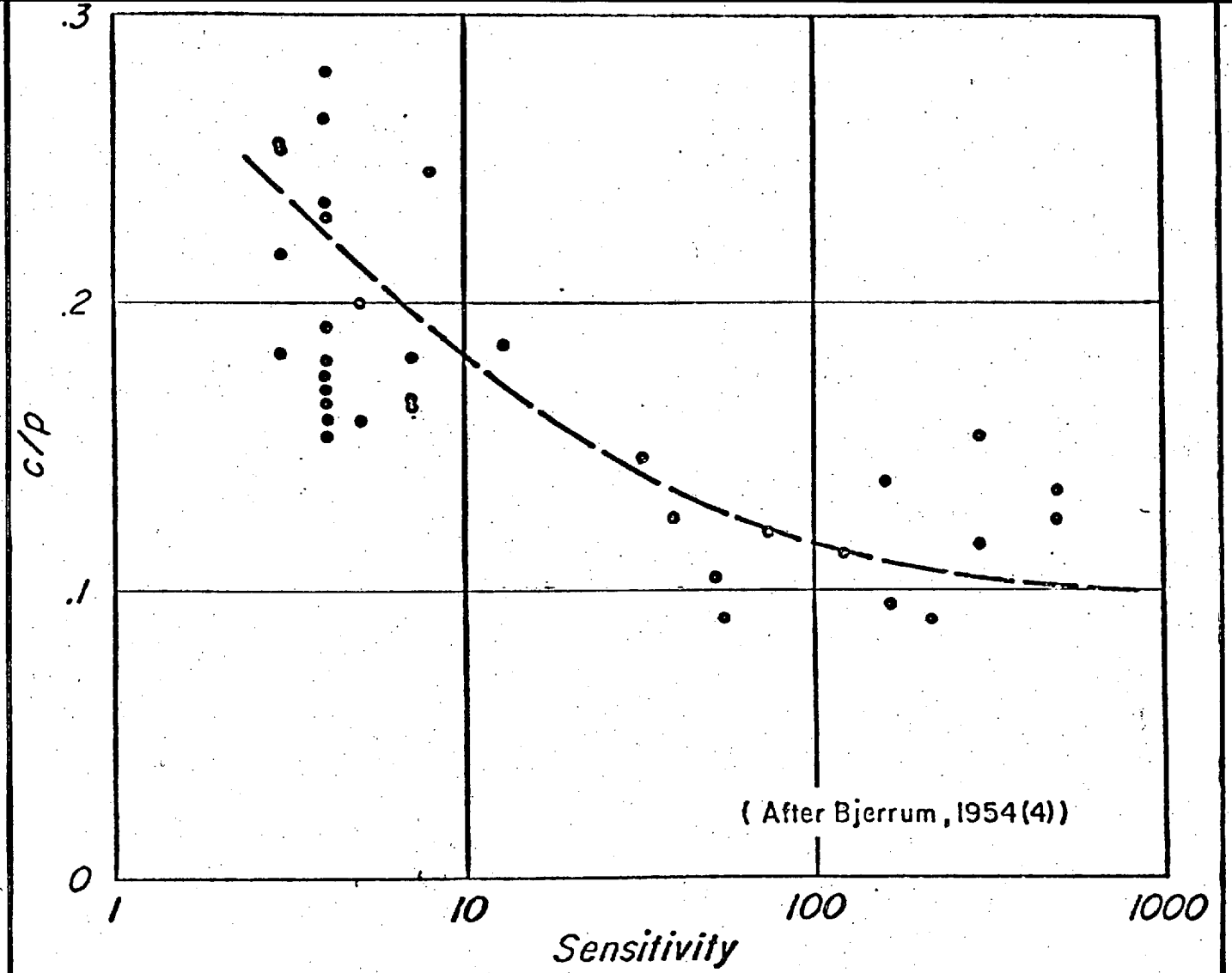


Fig. 36. VARIATION OF c/p WITH SENSITIVITY FOR NORWEGIAN MARINE CLAYS.

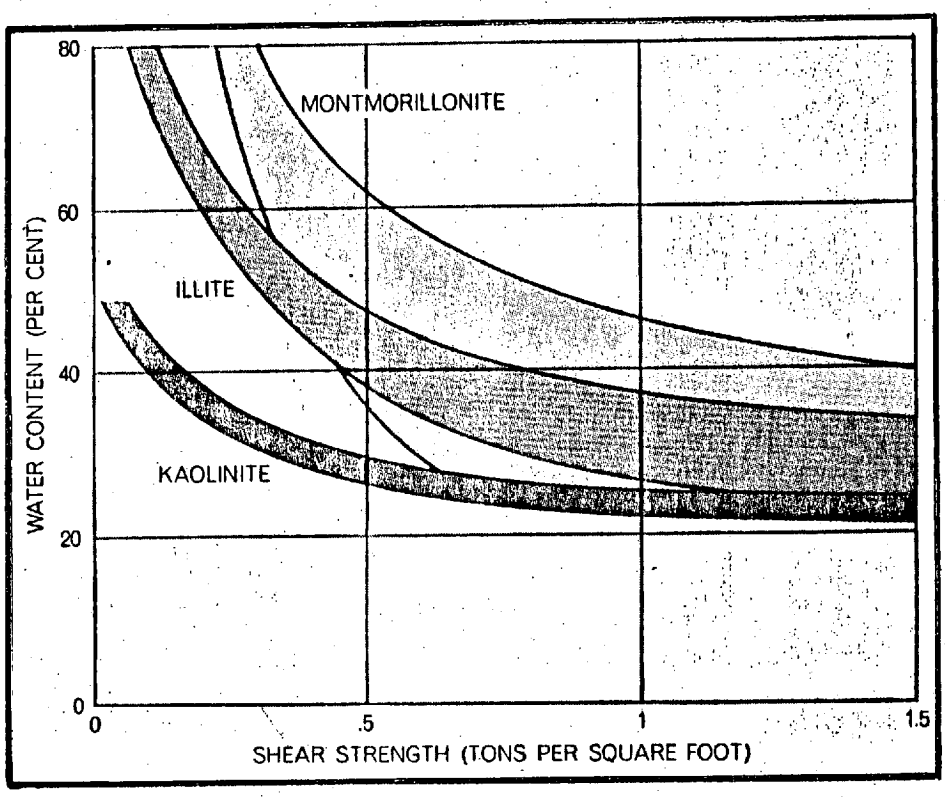


Fig. 37 : Résistance au cisaillement des minéraux argileux communs dans les argiles sensibles, décroissant rapidement avec une augmentation de la teneur en eau (D'après P.F. Kerr, 1963

7°) Retrait

En 1961, J. Moum et I. Th. Rosenquist montrent que les minéraux gonflants et non gonflants se comportent de manière très différente, lorsque la composition de l'électrolyte est changée.

H. Bergseth (1961) démontre que l'importance du mouvement électrophorétique pour les minéraux gonflants et non gonflants est due à la nature des anions et des cations.

Les argiles Leda contiennent une faible proportion de minéraux argileux gonflants. L'influence de la proportion d'argile a été étudiée à l'aide d'un mélange d'argile Leda remaniée et de proportions variables de verre pilé (E. De Jong et B.P. Warkentin, 1965). Ils purent observer que le retrait et la teneur en eau à la limite de retrait diminuait linéairement avec le pourcentage d'argile aussi longtemps que les morceaux de verre étaient à l'état d'inclusion dans cette argile. Pour des concentrations d'argile inférieures à 30 %, le retrait devient très faible.

En 1961, B.P. Warkentin et M. Bozozuk mesurent le retrait différenciel sur des échantillons petits et minces d'argile non remaniée. Ils trouvèrent un retrait horizontal égal au retrait vertical et ce phénomène fut attribué à la structure désordonnée des particules. La limite de retrait décroît lorsque le sol est remanié indiquant une rupture probable de l'arrangement "côté-face" des particules. Les échantillons réhumidifiés ne retrouvent pas leur teneur en eau originelle. Par contre, une légère augmentation de la teneur en eau a été observée avec le séchage.

Le retrait augmente le degré de parallélisme des particules et fait décroître l'espace interparticulaire. Une couche diffuse d'ions échangeables met en oeuvre une force de gonflement osmotique entre particules voisines.

Avec l'augmentation du séchage, le gonflement osmotique devient plus important que les forces de tension superficielles dans les vides et peut contrôler le regain d'humidité. Dans les argiles naturelles, les variations climatiques saisonnières entraînent des variations de volume.

La plus grande variation de volume provient des racines de végétaux qui absorbent l'eau des argiles peu profondes à haute teneur en eau. Des mouvements verticaux du sol ont été mesurés à différentes profondeurs et à des distances variables d'une rangée d'arbres pendant un été particulièrement chaud et sec à Ottawa, en 1955 (M. Bozozuk et K.N. Burn, 1960). Le tassement atteint 8 centimètres en 4 mois près des arbres et à la surface, à 2 mètres de profondeur il est de 5 centimètres L'influence latérale de ces arbres atteint environ 17 mètres. La plus grande partie de ces tassements sont irréversibles.

Le retrait peut causer de nombreux dommages aux fondations. Le tassement différenciel entraîne parfois l'inclinaison de certains bâtiments.

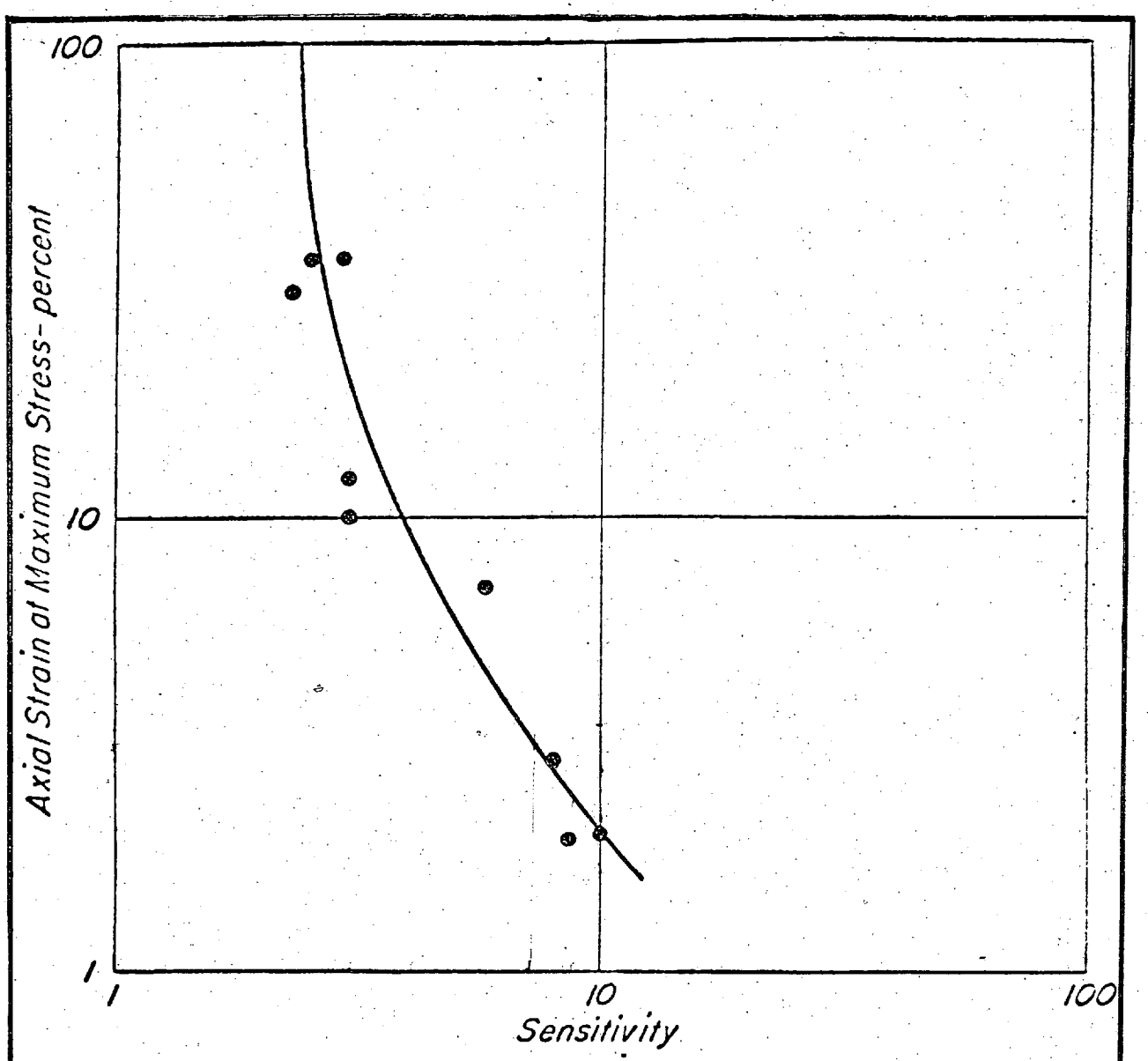


Fig 38 STRAIN-AT-FAILURE AS A FUNCTION OF SENSITIVITY FOR GLACIAL LAKE CLAYS.

(D'après J.K. Mitchell et W.H. Houston)

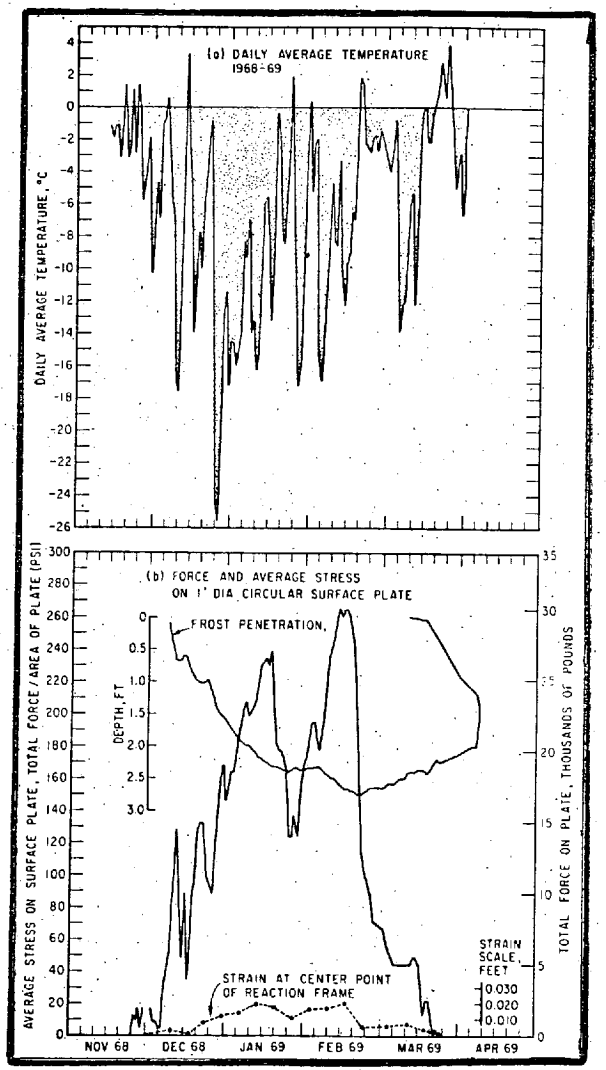


Fig. 39 : (D'après E. Penner, 1969)

C.B. Crawford (1961) conclue qu'en général, si les trois premiers mètres d'argile Leda ont une teneur en eau dépassant 40 %, un retrait est possible et des traitements spéciaux doivent être prévus pour éviter un séchage différenciel.

8°) Action du gel

E. Penner (1969) étudie les forces de soulèvement dues au gel dans les argiles Leda qui se produisent sous une plaque d'acier de diamètre 30,5 centimètres. La plaque est fixée au rocher. Des jauges de soulèvement et des thermocouples installés à différentes profondeurs purent déterminer la position et la profondeur de la zone active de soulèvement.

En général, la force de soulèvement à la surface tendait à s'accroître au cours de l'hiver. Lorsque la ligne de gel atteignit la profondeur maximum, la force de soulèvement dépassait 13 600 kg (fig.39).

Durant cette période, la pression de soulèvement au niveau de la ligne de gel a été estimée entre 0,49 et 0,84 kg/cm^2.

La variation de la force de soulèvement à la surface a suivi de près les conditions climatiques. Durant les périodes moins froides, la température s'est élevée dans la zone de gel et les forces de soulèvement ont diminué.

V - LES CONSEQUENCES

1°) Problèmes de fondation

Lorsque la roche ou bien une couche ferme se trouvent à une profondeur telle qu'elles peuvent être atteintes par des pieux, le problème est résolu assez bien.

Dans le cas contraire, pour L. Bjerrum (1964), l'utilisation de pieux flottants entraînerait un déplacement considérable provoquant un remaniement suivi de tassement. La solution de loin la meilleure est une fondation flottante où le poids du sol excavé et déplacé, correspond au poids du bâtiment. Lors de la réalisation d'une telle fondation, surgit un nouveau problème qui vient de la faible résistance au cisaillement de l'argile. Toute excavation excédant une profondeur de 2 mètres, entraînerait une rupture par soulèvement du fond de l'excavation. Ce problème a été résolu en exécutant l'excavation par petites sections et en coulant du béton pour le radier dès que la profondeur finale est atteinte. Le radier est ensuite chargé par du sable ou de la fonte et on passe à la section suivante.

De cette manière, il est possible de terminer l'excavation et au fur et à mesure que la construction de l'immeuble avance, le poids sur le radier peut être enlevé.

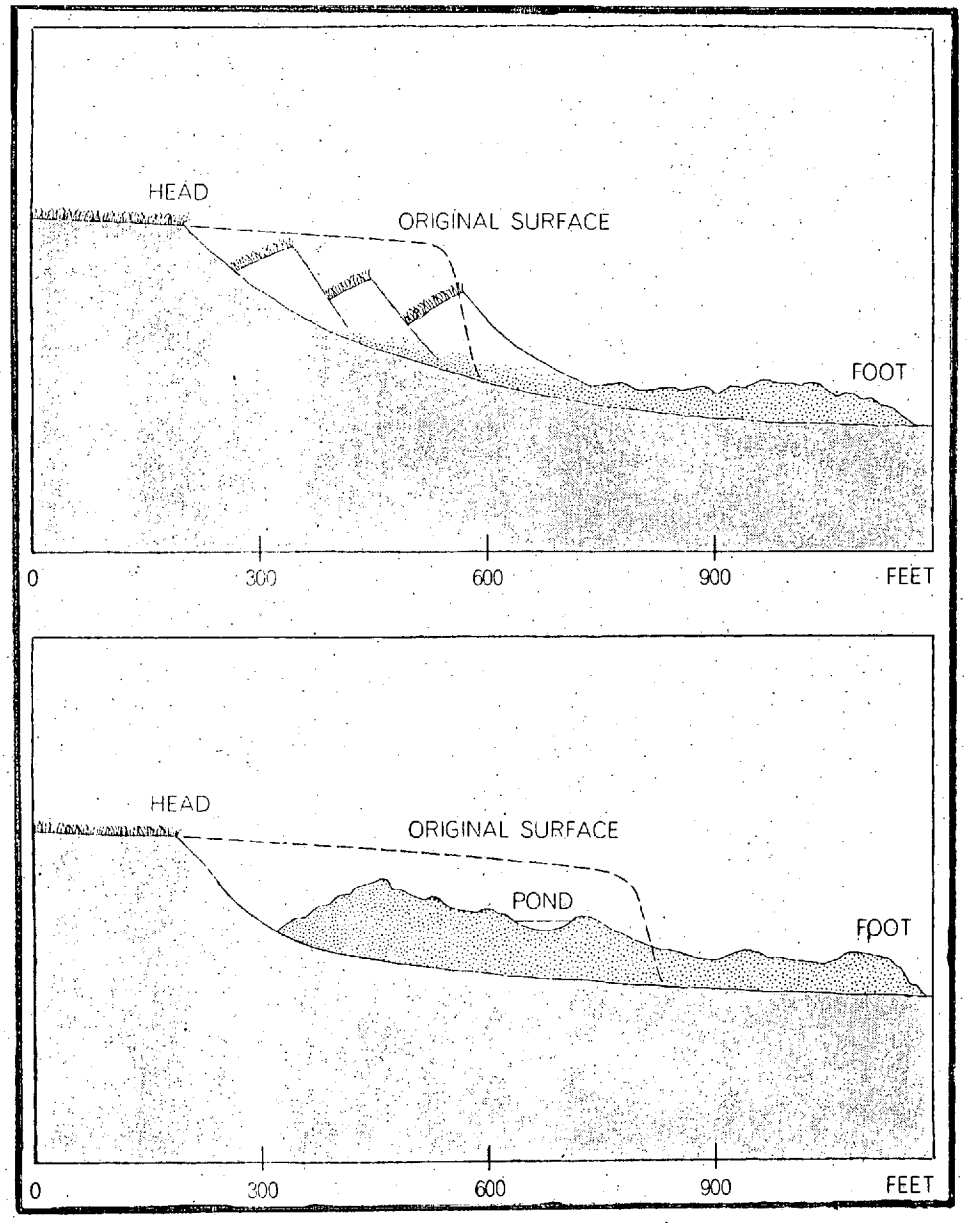


Fig. 40 : Deux types de coulées. En haut : les blocs d'argiles glissent dans une masse visqueuse. En bas : liquéfaction complète du matériel (D'après P.F. Kerr, 1963)

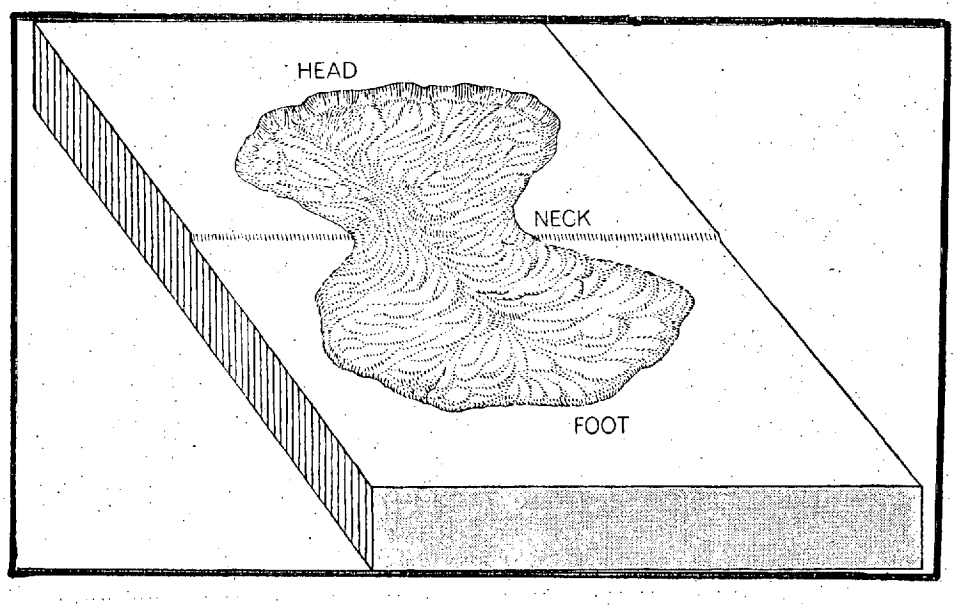


Fig. 41 : Coulée typique (D'après P.F. Kerr, 1963)

Quant aux bâtiments dont le poids est si grand qu'il ne peut pas être compensé par une excavation sans courir le risque que l'argile se soulève en fond de fouille, l'obligation est de recourir aux pieux.

A Oslo, par exemple, la profondeur du rocher varie dans de très grandes limites ; ainsi, l'un des coins de l'Hôtel de Ville est érigé directement sur le rocher, alors que le coin opposé est fondé sur de longs pieux. Il va sans dire que dans ces conditions, il est difficile de prévoir la longueur d'un pieu et l'emploi de pieux préfabriqués en béton ne convient pas. Dans une large mesure, on a recours à des pieux en acier qu'on peut souder ensemble.

2°) Les tassements

Les tassements étant assez faibles, le taux de travail sera toujours bien inférieur à la charge de préconsolidation (L. Bjerrum). K. Hoeg, O. Andersland et E.M. Roljsen (1969) firent des essais de chargement sur argiles très sensibles.

Tant que la charge ne dépasse pas 1/3 de la charge de rupture, les tassements immédiats sont très faibles et sont élastiques (le module d'élasticité = 1000 fois la résistance non drainée). Le chargement entraîne une augmentation progressive de la pression intersticielle.

Au-delà d'une charge critique, on constate q'augmentation prononcée du rythme d'accroissement de la pression interstitielle.

Le calcul de résistance au cisaillement de l'argile d'après la charge critique donne des valeurs de 10 à 15 % supérieures à celles données par le scissomètre de terrain (vane test). Lorsque la charge se rapproche de la charge de rupture théorique, les pressions interstitielles augmentent très rapidement et même au delà de la rupture théorique.

3°) Problèmes de stabilité des pentes naturelles

Les glissements de terrain qui se produisent dans ces argiles sont appelés coulées en raison de la liquéfaction du matériel déplacé.

a) Formes de coulées

Il est fréquent que l'argile soit recouverte par une couche de sable (Amérique du Nord et Scandinavie). Cette couche ainsi que la surface desséchée de l'argile se fracture entraînant la formation de blocs.

La liquéfaction à la base de l'argile leur permet d'être déplacés sur de grandes distances. Ces blocs peuvent se succéder d'une manière régulière et la coulée présente un relief de rides. A d'autres endroits, le matériel se liquéfie totalement et la coulée n'a alors qu'un fabile relief (fig.40).

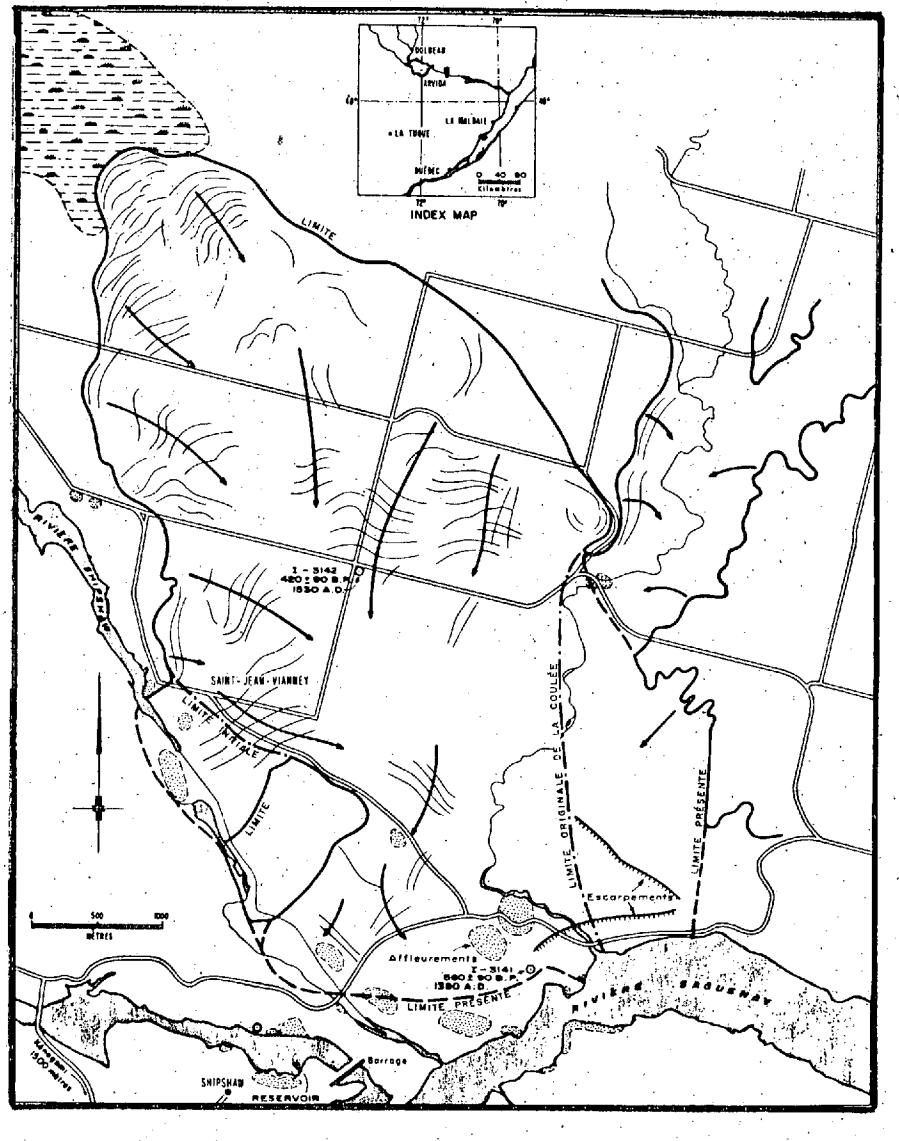


Fig. 42 : Glissement de St-Jean Vianney (Québec)
(D'après J.Y. Chagnon, 1966)

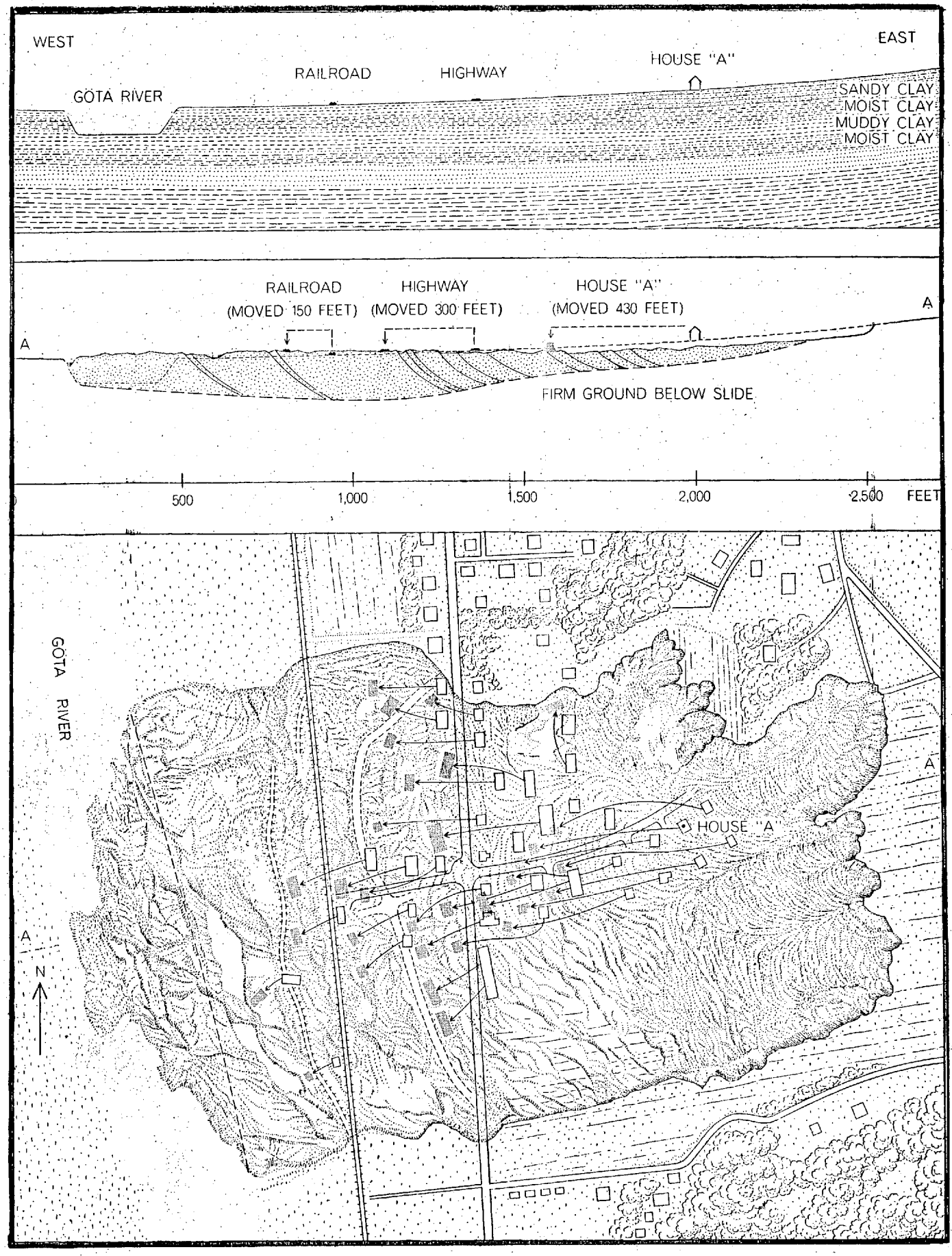


Fig. 43 : Glissement de Surte (Suède) 1950. En haut, section transversale avant le glissement. Au milieu, section transversale après le glissement. En bas, vue en plan après le glissement. (D'après P.F. Kerr, 1963)

Schématiquement, une coulée prend une forme arrondie avec un retrécissement à la base. C'est par ce goulot que s'écoule la matériel glissé. Il peut être déplacé sur de grandes distances. Il est à remarquer que les parois en bordure de la coulée sont abruptes et assez élevées alors que la pente des terrains est assez faible. Ces coulées se situent en général à proximité des cours d'eau (fig.41). Les dimensions de ces glissements sont variables, la plupart sont petits, mais il en existe d'énormes. Au Canada, le plus gros glissement observé est celui de St Jean Vianney, en bordure du Saguenay daté d'environ 500 à 700 ans (fig.42). Il couvre une surface de 8.000 mètres carrés sur une profondeur moyenne de 10 mètres (J.Y.Chagnon,1968).

En Scandinavie, des glissements du même type se produisent, ils peuvent également être de grande taille et catastrophiques (exemple du glissement de Surte : fig.43).

b) les causes

Il n'y a pas de cause unique, chaque coulée est un cas particulier et doit être étudiée d'une manière propre.

Pour J.Y. Chagnon (1968), la cause intrinsèque est évidemment l'ensemble des propriétés mécaniques et physico-chimiques de l'argile qui la rend susceptible de se liquéfier spontanément. La sensibilité y joue un rôle prépondérant. La première condition est la présence d'un talus. La rupture de ce talus peut dépendre de plusieurs facteurs :

- érosion à la base,
- trop grande hauteur,
- déclivité importante (glissement de Rimouski, fig.44);
- augmentation de pression intersticielle,
- surcharge artificielle,
- abaissement de la nappe phréatique,
- infiltration d'eau,
- chocs et travaux de construction,
- séismes (glissement d'Anchorage et glissement sous-marin près de Terre-Neuve, fig. 45 et 46).

Il est très fréquent qu'une coulée soit due à la combinaison de plusieurs de ces facteurs. La distribution géographique de ces coulées correspond assez souvent à des zones où la population est assez dense, aussi bien en Amérique du Nord qu'en Scandinavie. Ces coulées représentent un danger permanent et méritent donc une étude très approfondie afin de créer des méthodes efficaces de prévention.

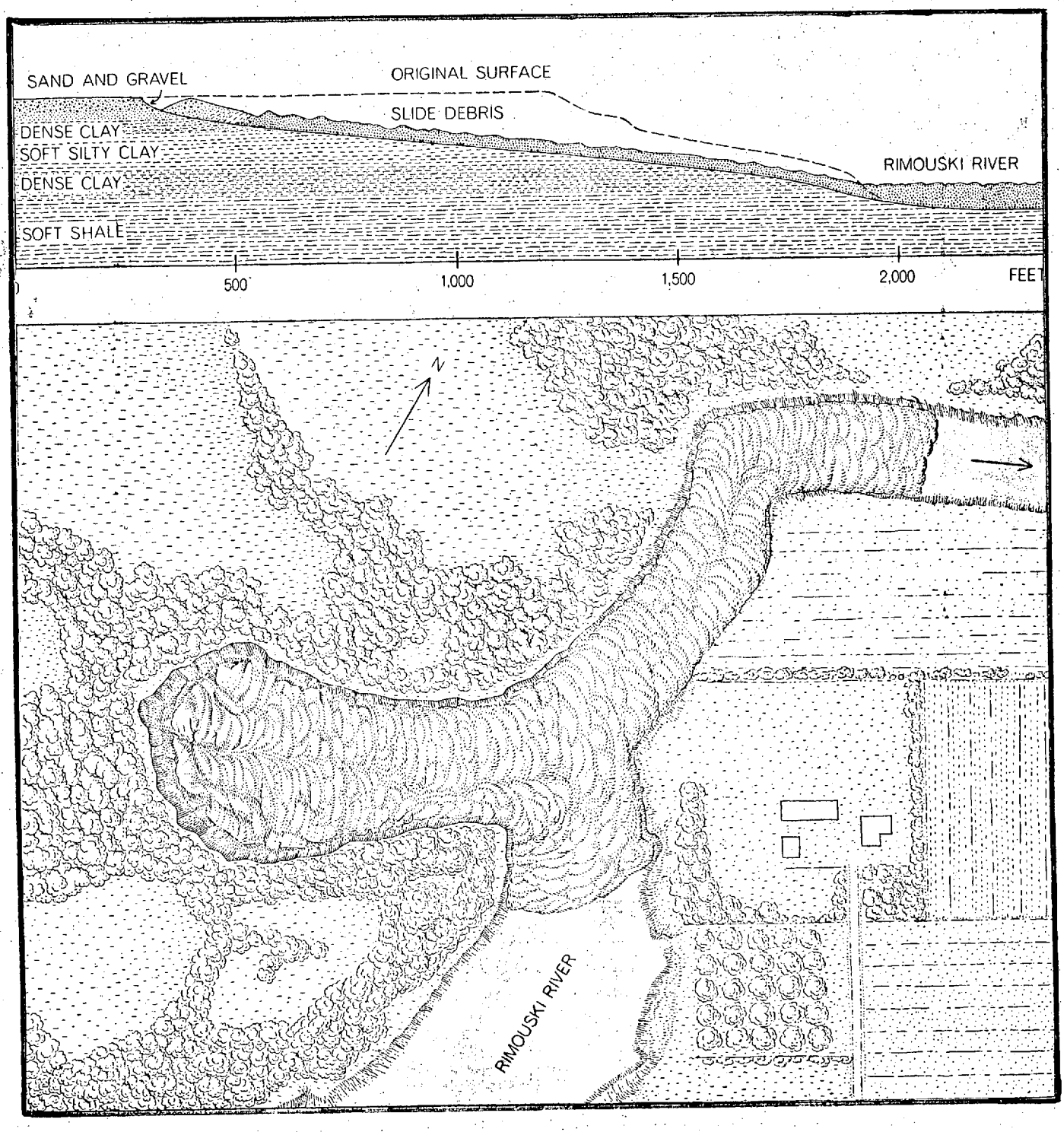


Fig. 44 : Glissement de Rimouski (Québec) causé en partie par une pente de 14 degrés (D'après P.F. Kerr, 1963)

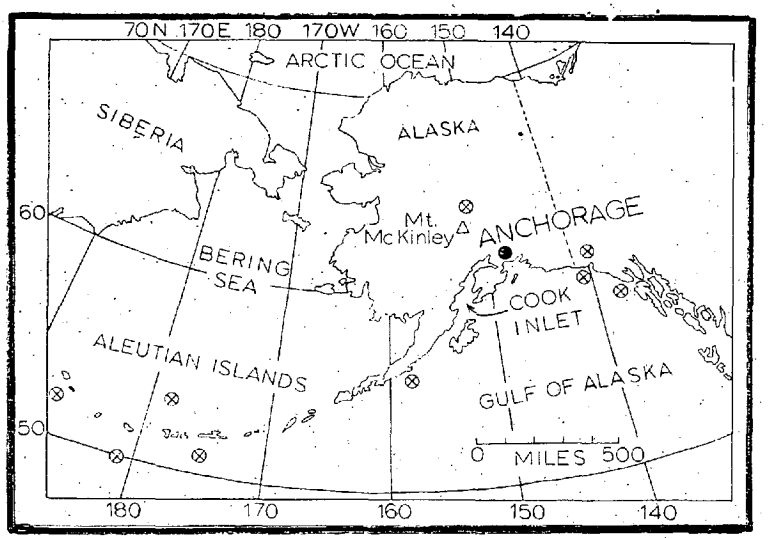


Fig.45 : Epicentres des séismes en Alaska et aux îles Aléoutiennes (intensité 7,75 à 8,5)

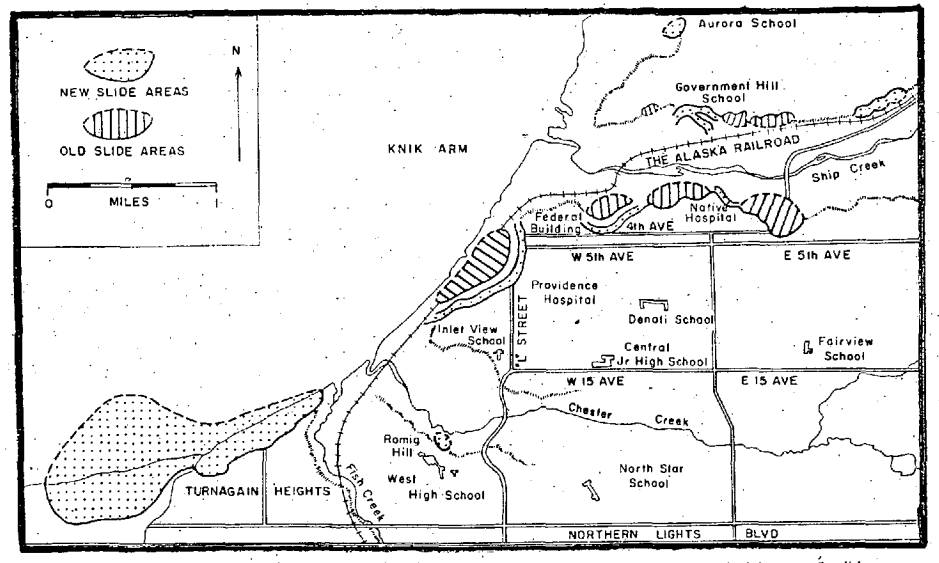


Fig. 45 bis : Récent et ancien glissements d'Anchorage (Alaska).(D'après I.M. Drew et P.F. Kerr, 1968)

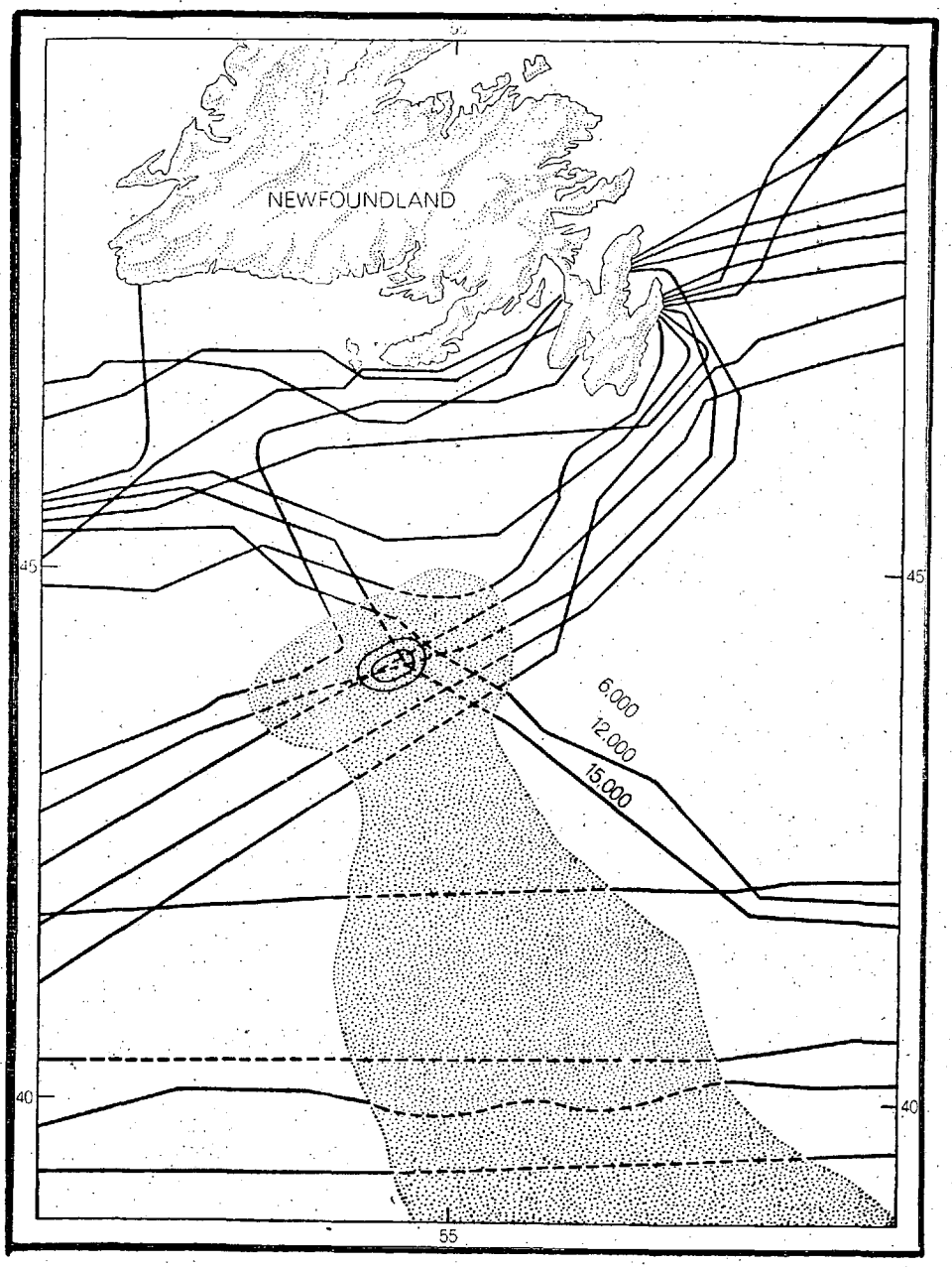


Fig. 46 : Glissement sous-marin (1929) près de Terre-Neuve,du à un tremblement de terre. Douze câbles furent coupés. (D'après P.F. Kerr, 1963)

CONCLUSION

A la suite de la dernière glaciation quaternaire (Pleistocène), des sédiments d'un type particulier se déposèrent dans certaines parties du monde (Amérique du Nord et Scandinavie).

Des dépôts présentent une composition granulométrique (argiles, argiles silteuses et silts) et minéralogiques (quartz, feldspath, illite, chlorite) assez semblables.

En ce qui concerne la structure, différentes théories ont été remises, en particulier la structure en "château de cartes", mais aucune n'a pu encore être réellement mise en évidence malgré les améliorations des moyens d'étude (microscope électronique à transmissinn et à balayage...)

Cependant, le dépôt en milieu marin a largement influencé cette structure (floculation) : présence de larges pores d'eau liée due aux ions Na.

La caractéristique essentielle de ces argiles est leur grande sensibilité. Il semble qu'il n'y ait pas une seule cause, mais plusieurs. La réduction de la concentration en sel de l'eau interstitielle en est une, bien qu'elle ne soit pas générale. En effet, pour les argiles Leda, il n'y a pas de corrélation entre la teneur en sel et la sensibilité, alors que cette relation existe entre les argiles scandinaves. Il faut souligner également l'importance de la structure, la présence de matières organiques et la teneur en eau naturelle (supérieure à la limite de liquidité). Malgré leur forte compressibilité, en relation avec un indice des vides très grand, elles ne présentent qu'une faible déformation ; ceci est du à la structure. Ces argiles peuvent présenter un certain retrait vertical et horizontal dû à la dessication et l'absorption d'eau par les racines des végétaux.

Toutes ces propriétés particulières entraînent nombre de problèmes pour les fondations et la stabilité des pentes naturelles. La mécanique des sols a beaucoup apporté à l'étude de ces problèmes, mais il apparaît indispensable que d'autres disciplines (stratigraphie, minéralogie, sédimentologie, géochimie, chimie..) soient mises à contribution. Le but final de ces études théoriques devrait être la prédiction et la prévention des glissements. Ce but étant loin d'être atteint, il est donc nécessaire de poursuivre les recherches dans différentes directions afin d'avoir une bonne compréhension des mécanismes et ainsi de pouvoir prévenir les catastrophes.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE DE SIX ECHANTILLONS D'ARGILE DE LA MER CHAMPLAIN BECANCOUR, QUEBEC

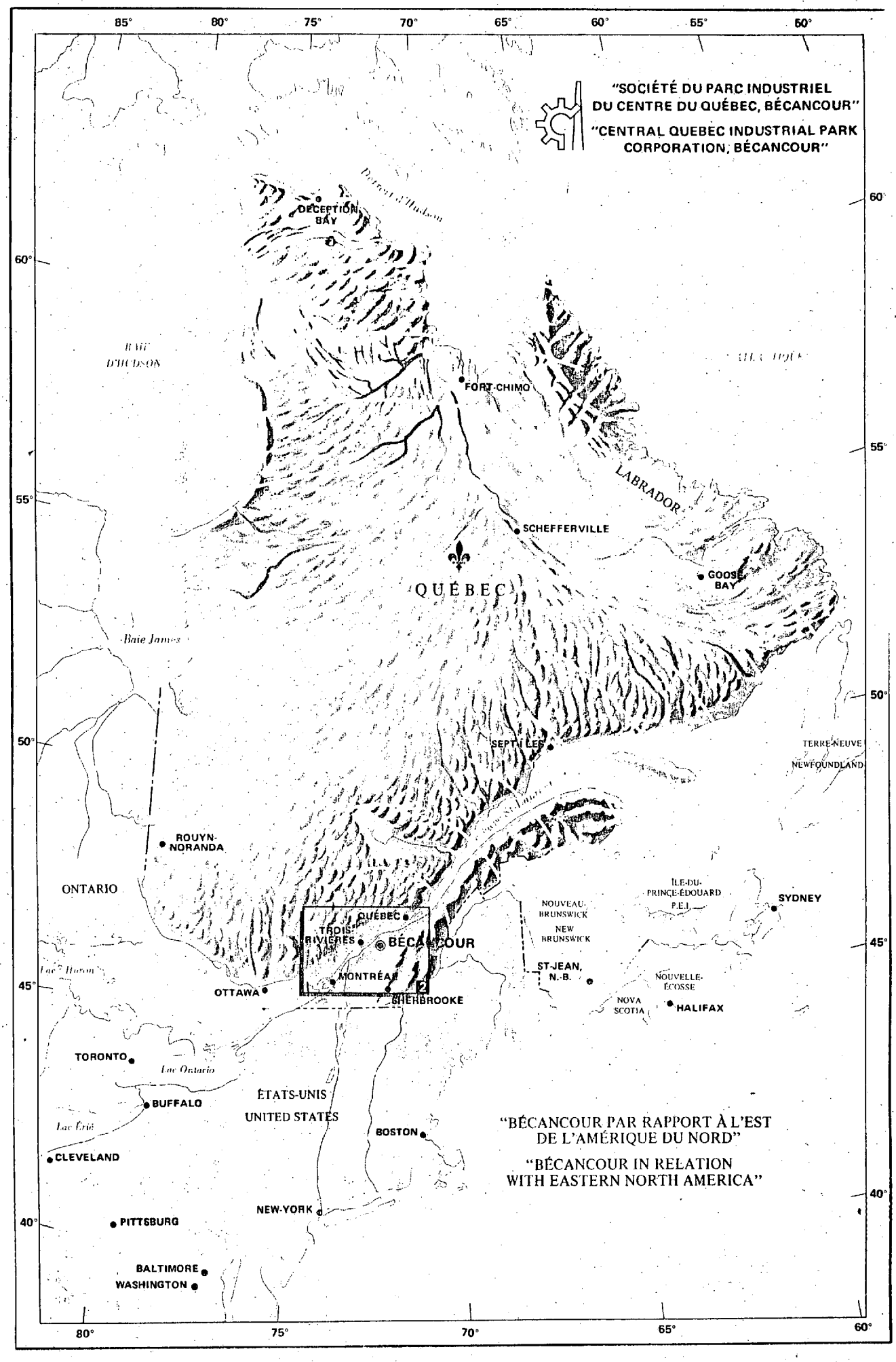

"SOCIÉTÉ DU PARC INDUSTRIEL DU CENTRE DU QUÉBEC, BÉCANCOUR"
"CENTRAL QUEBEC INDUSTRIAL PARK CORPORATION, BÉCANCOUR"
85° 80° 75° 70° 65° 60° 55° 60°
60° 55° 50° 45° 40°
DÉTROIT D'HUDSON
DECEPTION BAY
BAIE D'HUDSON
FORT-CHIMO
LABRADOR
SCHEFFERVILLE
QUÉBEC
GOOSE BAY
Baie James
SEPT-ÎLES
TERRE-NEUVE
NEWFOUNDLAND
ROUYN-NORANDA
ONTARIO
ÎLE-DU-PRINCE-ÉDOUARD
P.E.I.
SYDNEY
NOUVEAU-BRUNSWICK
NEW BRUNSWICK
QUÉBEC
TROIS-RIVIÈRES
BÉCANCOUR
MONTRÉAL
ST-JEAN, N.-B.
NOUVELLE-ÉCOSSE
NOVA SCOTIA
HALIFAX
OTTAWA
SHERBROOKE
Lac Huron
TORONTO
Lac Ontario
BUFFALO
ÉTATS-UNIS
UNITED STATES
Lac Érié
CLEVELAND
BOSTON
NEW-YORK
PITTSBURG
BALTIMORE
WASHINGTON
"BÉCANCOUR PAR RAPPORT À L'EST DE L'AMÉRIQUE DU NORD"
"BÉCANCOUR IN RELATION WITH EASTERN NORTH AMERICA"
80° 75° 70° 65° 60°

Figure 1

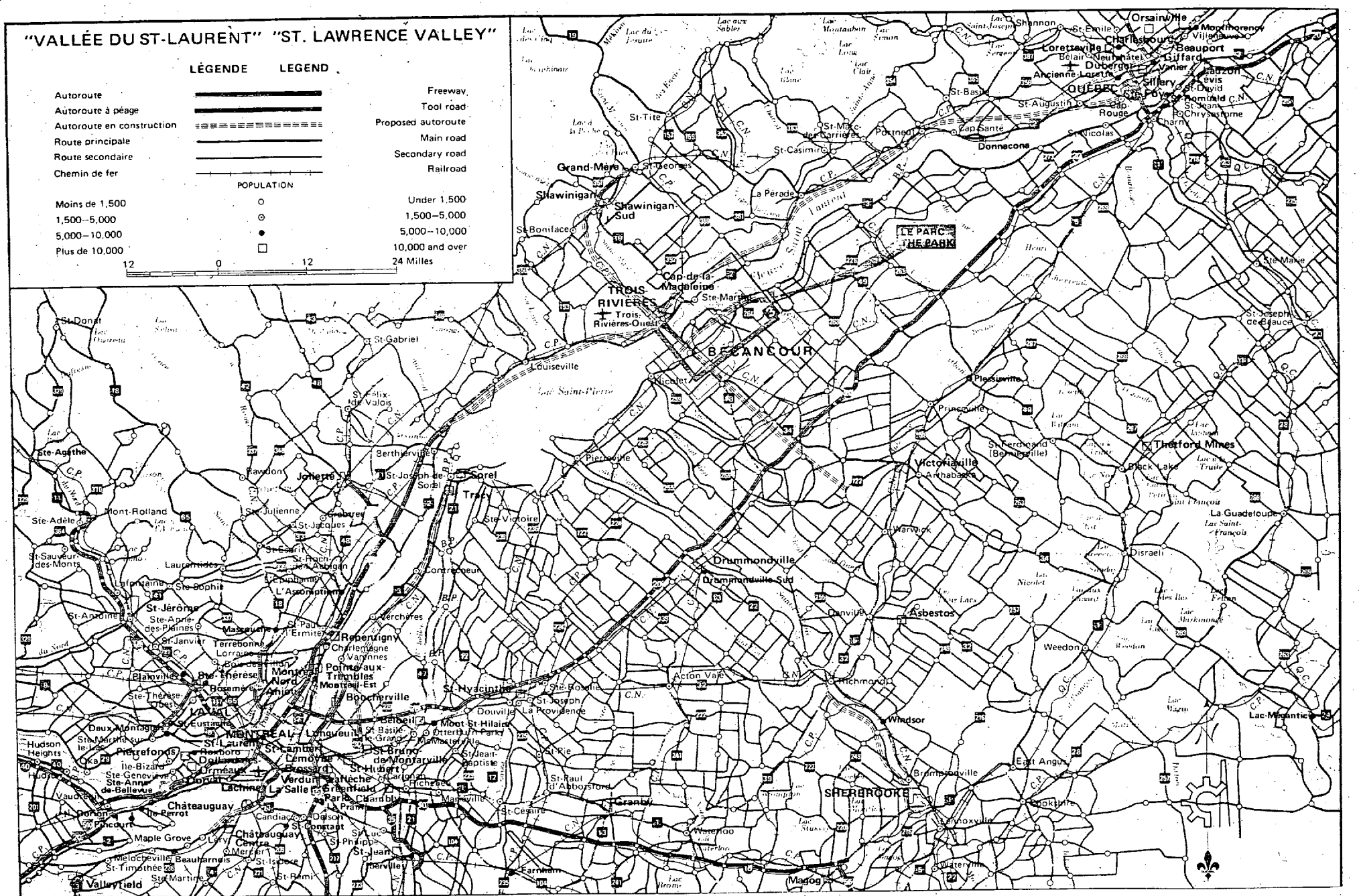

"VALLÉE DU ST-LAURENT" "ST. LAWRENCE VALLEY"
LÉGENDE LEGEND
Autoroute
Autoroute à péage
Autoroute en construction
Route principale
Route secondaire
Chemin de fer
Freeway
Tool road
Proposed autoroute
Main road
Secondary road
Railroad
POPULATION
Moins de 1,500
1,500–5,000
5,000–10,000
Plus de 10,000
Under 1,500
1,500–5,000
5,000–10,000
10,000 and over
12 0 12
24 Milles
LE PARC
THE PARK
TROIS-RIVIÈRES
BÉCANCOUR
QUÉBEC
MONTRÉAL
LAVAL
SHERBROOKE
Shawinigan
Shawinigan-Sud
Grand-Mère
Donnacona
Cap-de-la-Madeleine
Sorel
Tracy
Drummondville
Victoriaville
Thetford Mines
Asbestos
Magog
Lac-Mégantic

Figure 2


CENTRE URBAIN
NEW TOWN
E 15000
E 20000
E 25000
N 30000
N 20000
N 15000
FALCONBRIDGE
(765 ACRES)
②
GLAVERBEL
(90 ACRES)
①
C.I.L.
(200 ACRES)
④
③
AUTOROUTE
IMPLANTATION
No | NOM | ACRES
1 | GLAVERBEL | 90
2 | FALCONBRIDGE | 765
3 | BIRAGHI ENTREPOSE | 93
4 | C.I.L. | 200
Limite du parc
Propriété du parc
Propriété de l'Hydro-Québec
PLAN D'AMÉNAGEMENT · MASTER PLAN
LA SOCIÉTÉ DU PARC INDUSTRIEL DU CENTRE DU QUÉBEC
CENTRAL QUEBEC INDUSTRIAL PARK CORPORATION
ÉCHELLE
SCALE
jodoin lamarre pratte leblanc
architectes urbanistes

FIGURE : 3

I - INTRODUCTION

1°) Situation géographique et économique

La région de Bécancour fait partie des basses terres du Saint-Laurent et se situe plus précisément entre les latitudes 46° 15' et 46° 30' Nord et entre les longitudes 72° 00' et 72° 30' Ouest (fig.1)

Après une étude approfondie de nombreux emplacements, la commission chargée de l'étude d'un projet de complexe sidérurgique au Québec, arrêta son choix sur un terrain de 30-35 ha sur la rive Sud du Saint-Laurent, quelques milles à l'Est de Trois Rivières, à peu près à mi-chemin entre Montréal et Québec (fig.2) Ce site devait, plus tard, devenir le parc industriel du centre du Québec. Pour faciliter le développement harmonieux de la région, on créait, en octobre 1965, en fusionnant onze municipalités environnantes, la ville de Bécancour (510 km^2, 160.000 habitants). En raison du vaste potentiel économique de la région de Bécancour, le gouvernement décidait d'y établir le premier parc industriel d'état du Québec et fondait, pour l'administrer, la Société du Parc Industriel du Centre du Québec. Le parc industriel, situé dans la partie Nord de la ville de Bécancour (fig.3), couvre une superficie de 1420 ha. Il est limité, au Nord, par le Saint-Laurent et au Sud, par la route n°3. La société dispose, en outre de 1215 ha de terrains additionnels attenant au territoire actuel du parc ; ces terrains peuvent être utilisés à des fins d'expansion. Le parc occupe un site idéal dans l'axe des communications et des échanges entre les cinq grandes zones industrielles du Québec, soit les zones de Montréal, de Sorel/Contrecoeur, de Trois-Rivières/Mauricie des Cantons de l'Est, et de Québec.

On trouve dans un rayon de 145 km du parc, 96 % des entreprises manufacturières du Québec et plus de 5 millions de consommateurs.

Au moment où l'économie québécoise fait de rapides progrès dans le domaine de la production de biens durables, le parc industriel du centre du Québec constitue une base de distribution particulièrement bien située permettant d'atteindre les vastes marchés nord-américains et d'outre-mer.

Situé au carrefour des grandes voies de communication du Québec, le parc offre à l'industriel des avantages incomparables et aux travailleurs, une gamme complète de structures d'accueil.

2°) Géologie

Les Basses terres du Saint-Laurent, situées entre le Bouclier Canadien (Précambien) et les Appalaches (Paléozoïque plissé) (fig.4) reposent sur des couches de sédiments marins déposés durant la plus grande partie de lère paléozoïque. Des couches généralement semblables, datant de l'ordovicien supérieur au dévonien, sont exposées dans les Basses terres de la Baie d'Hudson. De petites zones de couches

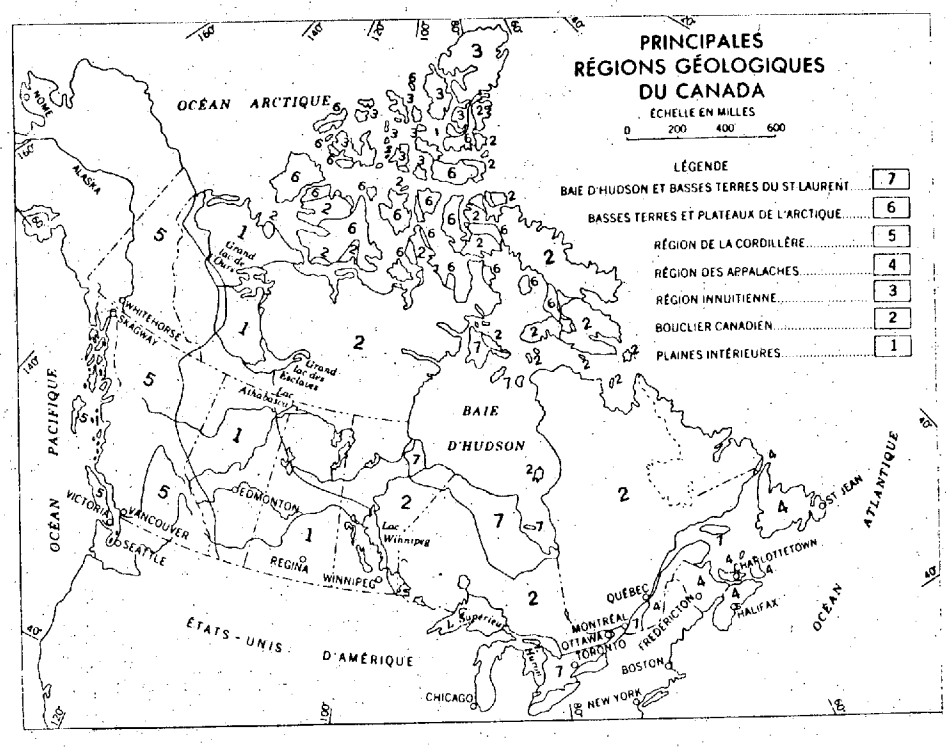


Fig. 4 : d'après la Commission Géologique du Canada, 1967.

tableau I

TABLEAU DES FORMATIONS

Ère	Période	Âge	Formation et lithologie
CÉNOZOÏQUE	Pléistocène et période récente	Wisconsin et plus récent	Dépôts de marécage: principalement de la tourbe, un peu de terre noire
			Sables des Basses terrasses: surtout sable alluvial, un peu de silt et de tourbe; alluvions anciennes de chenaux abandonnés du Saint-Laurent; un peu d'alluvions modernes
			Sables des Hautes terrasses: sables bien triés, grain moyen à fin, un peu de gravier fin, provenant de cours d'eau et d'estuaires
			Sables "crête de coq": sables éoliens très bien triés sous forme de dunes allongées à crêtes aiguës
			Sables de la mer Champlain: sédiments néritiques de la mer Champlain; la plupart fossilifères, sable fin à moyen et un peu de gravier
			Argile de la mer Champlain: sédiments en eau profonde de la mer Champlain; surtout argiles vaseuses fossilifères, 3 faciès: 1) compact, 2) compact avec des taches sombres de matière organique, 3) feuilleté avec quelques lentilles de sable
			Till délavé par la mer Champlain et déposé sur ses rives, sur du till glaciaire affleurant; surtout sable avec blocs erratiques et dépôts de gravier, quelques gîtes fossilifères
			Till Gentilly: gris, sableux et calcareux; granulométrie variée
			Sédiments varvés Deschaillons: sédiments du lac de barrage morainique Deschaillons (Karrow, 1959); silts feuilletés gris et argile vaseuse
		Stade inter-glaciaire Saint-Pierre	Sédiments Saint-Pierre Tourbe très compacte de Sphaigne et de Carex: beaucoup de bois dans certaines couches (datant de plus de 40,000 ans au C_{14}). Sables lités et à stratification entrecroisée, fins à moyens
		Discordance	
		Pré-Wisconsin	Till Bécancour: en général calcareux et sableux, à granulométrie variée; le plus souvent rouge brique
			Silts feuilletés rouges
Discordance			
PALÉOZOÏQUE	Ordovicien	Richmond	Formation Rivière-Bécancour: grès rouge et schistes argileux
			Formation Rivière-Pontgravé: schistes argileux, calcareux gris; quelques affleurements de calcaire

(D'après N.R. Gadd, 1960)

paléozoïques sont conservées à divers endroits du Bouclier canadien entre ces deux basses-terres, ce qui porte à croire que des bras de mer ou des détroits peu profonds du paléozoïque ont peut être relié la Baie d'Hudson actuelle aux Basses-terres du Saint-Laurent.

Ces Basses-terres sont séparées par un prolongement du Bouclier canadien (Précambien) en direction Sud-Est, appelé l'axe Frontenac, qui pénètre aux Etats-Unis au Nord-Est du lac Ontario.

De l'axe Frontenac à Québec, en direction nord-est, on ne rencontre que des couches du paléozoïque inférieur. Des grès du cambrien et d'épaisses couches de calcaire et de schiste de l'ordovicien y atteignent parfois une puissance de 300 mètres. Cette absence de roches sédimentaires d'un âge plus récent que le paléozoïque est l'indice d'une période d'érosion extrêmement longue antérieure aux glaciations quaternaires.

Dans la région de Bécancour, les dépôts quaternaires reposent directement sur les couches ordoviciennes presque horizontales (tableau I). Le socle y est affecté par une faille normale de direction S.O. - N.E. :la faille de Sainte-Angèle. A l'intérieur des premières limites du Parc, l'épaisseur de la couverture quaternaire est très faible (entre 35 cm et 1,5 m). L'extension vers le Sud du parc entraîne plus de problèmes pour l'implantation d'industrie lourde, car l'épaisseur d'argile sensible augmente notablement (20 à 30 m), entrainant par là même, une augmentation du coût des fondations.

C'est en raison des propriétés particulières de ces argiles sensibles de la mer Champlain qu'une étude plus particulière s'est avérée nécessaire.

II - ETUDE DES ECHANTILLONS

1°) Localisation

Les échantillons ont été prélevés dans les dépôts d'argile de la mer Champlain (faciès compact) de la ville de Bécancour au cours de l'été 1973, aux endroits indiqués A, B et C sur la carte de Documentation (voir annexe) :

	côte (m)	profondeur (m)
A1	10	3,60 - 3,65
A2	10	3,75 - 3,80
B1	43	7,60 - 7,65
B2	43	7,75 - 7,80
C1	40	6,60 - 6,65
C2	40	6,75 - 6,80

2°) Echantillonnage

A l'aide d'un échantilloneur Géonor, on prélève un échantillon d'argile "non remaniée" dans un tube à parois minces de 54 mm de diamètre et 800 mm de longueur. Trois sondages continus ont été exécutés. Les tubes extraits sont scellés et gardés pour analyses ultérieures.

Deux échantillons(de 5 cm de hauteur) par sondages furent envoyés au C.G.I. (A1, A2, B1, B2, C1, C2) sur lesquels furent faits divers essais et études durant le premier semestre 1974.

Bien qu'étant conçu pour la prise d'échantillons intacts, le piston stationnaire entraîne certaines perturbations dans les sédiments carottés, notamment au contact des parois du tube et aux extrémités (tassement). De plus, les diverses manipulations (emballage, transports, préparation aux essais, etc...) entrainent un certain remaniement dont il faudra tenir compte lors des essais.

3°) Description et consistance

	C (kg/cm^2)	Description
A 1	0,648	Argile moyennement raide à raide
A 2	0,450	Argile moyennement raide à raide
B 1	0,232	Argile molle à moyennement raide
B 2	0,207	Argile molle à moyennement raide
C 1	0,281	Argile molle à moyennement raide
C 2	0,232	Argile molle à moyennement raide

La résistance du cisaillement (C) a été mesurée sur des échantillons non remaniés à l'aide d'un scissomètre de Laboratoire.

4°) Odeur et couleur

Aucune odeur particulière ne se dégage des échantillons (faible teneur en matières organiques ?). D'après la "Munsell Soil Color Charts", tous les échantillons après séchage à l'air présentent la couleur : 5Y 6/1 à 5Y 5/1 (gris clair à gris).

5°) Analyse granulométrique

La granulométrie est une des caractéristiques de nature d'un sol qui entre en jeu dans les classifications géotechniques des sols.

Dans la classification des Laboratoires des Ponts & Chaussées (tab.II), classification utilisée dans cette étude, elle permet de distinguer :

- un sol grenu : au moins 50 % des particules de diamètre $>$ à 0,08 mm
- un sol fin : plus de 50 % des particules de diamètre $<$ à 0,08 mm.

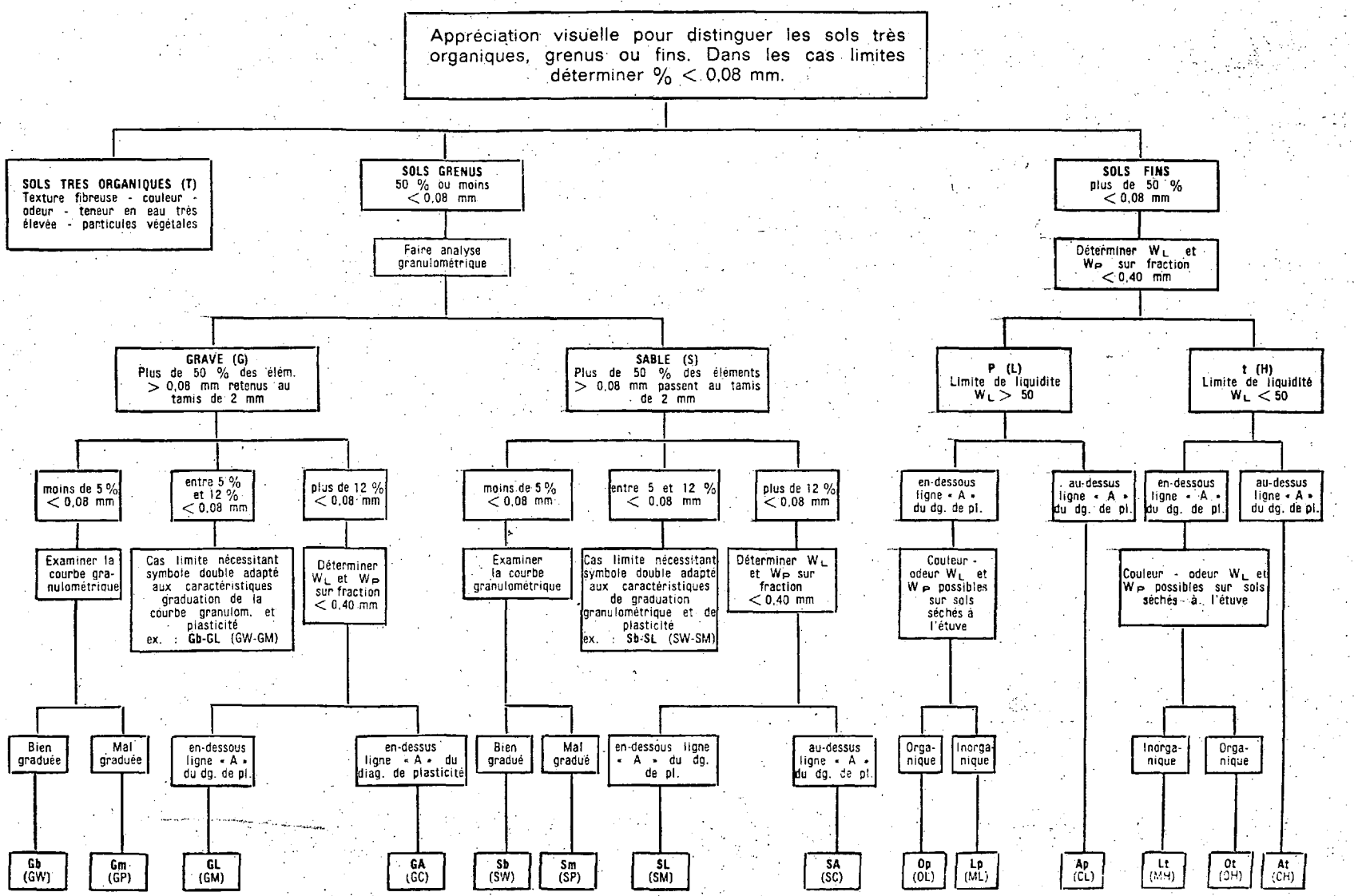
Cette distinction de base se fait généralement par appréciation visuelle. Les six échantillons étudiés peuvent être classés parmi les sols fins (plus de 50 % des particules ont un diamètre inférieur à 0,08 mm).

L'étude se déroule ensuite en deux étapes :

- analyse granulométrique par tamisage,
- analyse granulométrique par sédimentométrre.

TABLEAU II

CLASSIFICATION DES SOLS EN LABORATOIRE



5.1. - Analyse granulométrique par tamisage

Le tamisage s'est effectué sous l'eau à l'aide de la série de tamis à mailles carrées de diamètres suivants :

0, 200 mm ; 0,125 mm ; 0,100 mm ; 0,080 mm ; 0,063 mm ; 0,040 mm. (tab.III)

5.2. - Analyse granulométrique par sédimentométrie

Cette étude a été faite sur la fraction inférieure à 40 microns à l'aide de la pipette d'Andreasen-Rivière.

5.2.1. Principe

Cette méthode est basée sur la loi de Stokes : une sphère de rayon R animée seulement d'un mouvement de translation uniforme de vitesse V dans un liquide immobile, infini, de viscosité dynamique μ qui la mouille parfaitement, subit de la part de ce liquide une résistance égale à :

$$f = 6 \pi . \mu . R . V .$$

La vitesse de sédimentation est alors :

$$V = CR^2 \qquad C = \text{constante de Stokes}$$

Pour une hauteur de chute donnée, cette méthode donne des diamètres équivalents de particules.

5.2.2. Préparation des échantillons

- Destruction des humates : par addition d'eau oxygénée concentrée à chaud (60°C) jusqu'à disparition de l'effervescence caractéristique,
- Destruction des carbonates (calcite - dolomie) : par addition d'acide chlorydrique (N/10) à ébullition,
- Mise en suspension : par addition d'hexamétaphosphate à 5 % et par agitation pendant une nuit à l'aide d'un agitateur à renversement.

5.2.3. Mesures

La suspension est maintenue à 25°C par un bain thermostaté. Les prélèvements sont de 10 cm^3 et se font aux temps suivants :

0 mn, 2 mn, 4 mn, 16 mn, 32 mn, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 24 h et 48 h.

5.3. - Représentation des résultats

Ils se présentent sous deux formes :

Courbes cumulatives et histogrammes.

5.3.1. Les courbes cumulatives

Le logarithme des dimensions est porté en abscisse et le pourcentage cumulé en poids en ordonnée.

Cette représentation semi-logarithmique est très pratique, car elle permet de comparer des phénomènes semblables à des échelles différentes De plus, la distribution de la taille des particules suit fréquemment une loi Log-normale.

refus de tamis (%) tableau III

ech. \ Ø(mm)	0,200	0,125	0,100	0,080	0,063	0,040	total	<0,040
A 1	1,3	0,4	0,8	1,4	1,6	5,0	10,5	89,5
A 2	0,5	0,2	0,2	0,5	0,9	0,5	2,8	97,2
B 1	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6	2,7	5,1	94,9
B 2	0,5	1,1	1,9	2,1	1,9	4,9	12,4	87,6
C 1	1,8	0,8	0,3	0,3	0,7	0,7	4,6	95,4
C 2	1,4	0,6	1,4	0,1	0,3	0,7	4,5	95,5

5.3.2. les Histogrammes

Ils permettent d'apprécier très rapidement la (ou les) fraction (s) granulométrique (s) la(ou les) plus représentée(s).

5.4. Commentaires des résultats

	Sable fin $\phi > 20\,\mu$	Limon $2\,\mu < \phi < 20\,\mu$	Argile $\phi < 2\,\mu$
A 1	15 %	43 %	40 %
A 2	8 %	35 %	57 %
B 1	15 %	49 %	36 %
B 2	30 %	40 %	30 %
C 1	6 %	22 %	71 %
C 2	8 %	20 %	71 %

Les courbes cumulatives représentent une distribution granulométrique hétérométrique. Nous avons donc des sédiments bien gradués (mal triés) surtout dans les fractions limoneuses et argileuses.

En effet, la fraction supérieure à 20 microns ne représente qu'un faible pourcentage (inférieur à 15 %) sauf pour l'échantillon B2 où elle est égale à 30 %.

Les échantillons C1 et C2, de composition granulométrique identique (fig. 9 et 10), présentent la fraction argileuse la plus importante (71 %).
A l'inverse, les échantillons B1 et B2, qui n'ont pas une distribution aussi semblable (fig. 7 et 8) possèdent une fraction argileuse assez faible (30 à 36 %).
Ce qui pourrait traduire une position plus proche du rivage.

Avec les échantillons A1 et A2, de distribution intermédiaire (fig. 5 et 6) entre les échantillons B et C, le fuseau général (fig.11) formé par les six courbes granulométriques montre bien la dispersion de la taille des particules, et l'hétérogénéité de ces sols.

5.5. Calcul de paramètres caractéristiques d'une distribution granulométrique (D'après D.L. Inman, 1952)

- Médiane $Md\phi = \phi\ 50$ $\quad \phi = -\log_2$ diamètre en mm
- Moyenne $M\,\phi = 1/2\ (\phi\ 16 + \phi\ 84)$
- Ecart type (Sorting) $\sigma\phi = 1/2\ (\phi\ 84 - \phi\ 16)$
- Dissymétrie (Skewness) $\alpha\,\phi = \dfrac{M\,\phi - Md\,\phi}{\sigma\phi}$
- Angularité (Kurtosis) $\beta\,\phi = \dfrac{1/2\ (\phi\ 95 - \phi\ 5) - \sigma\phi}{\sigma\phi}$

	$Md\phi$	$M\phi$	$\sigma\phi$	$\alpha\,\phi$	$\beta\,\phi$
A 1	8,24	8,38	3,08[a]	0,07[b]	-
A 2	9,59	9,75	2,73[a]	0,06[b]	-
B 1	7,93	8,12	2,4	0,08	0,6[b]
B 2	7,06	7,71	2,88	0,23	0,53[b]
C 1 & C 2	10,5	-	3,33[a]	-	-

a = calculés à partir de valeurs estimées

b = calculés à partir de valeurs différentes de celles de la définition

A 1

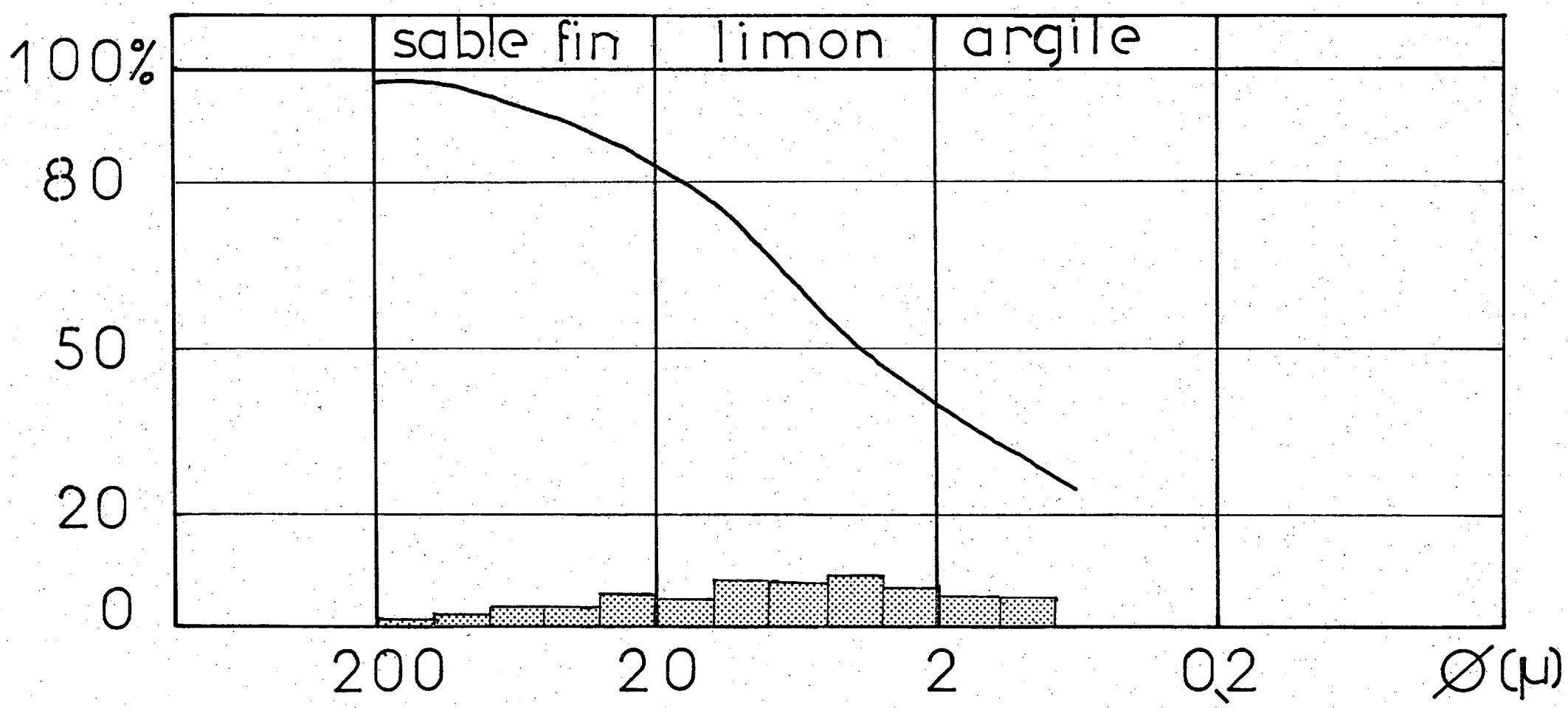


fig 5

A Z

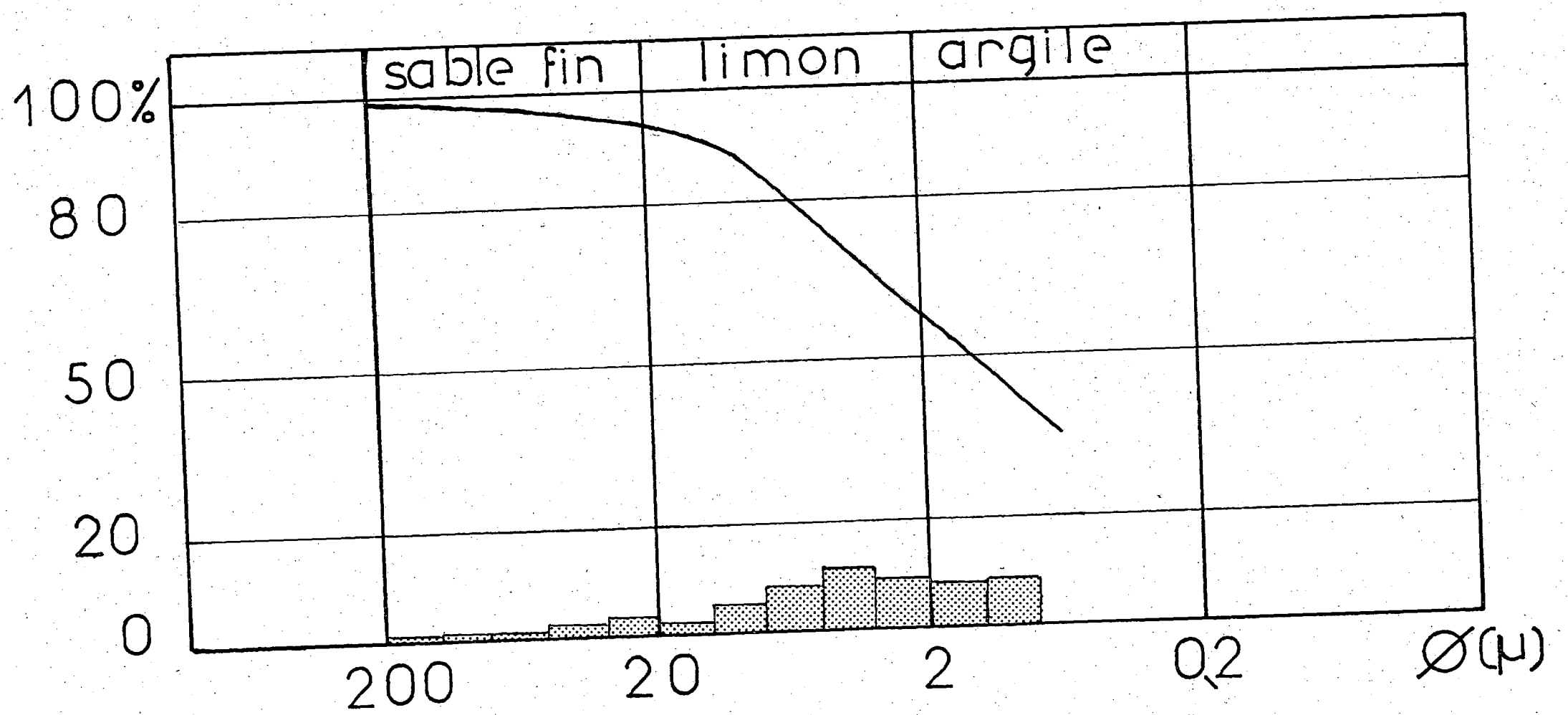


fig 6

B 1

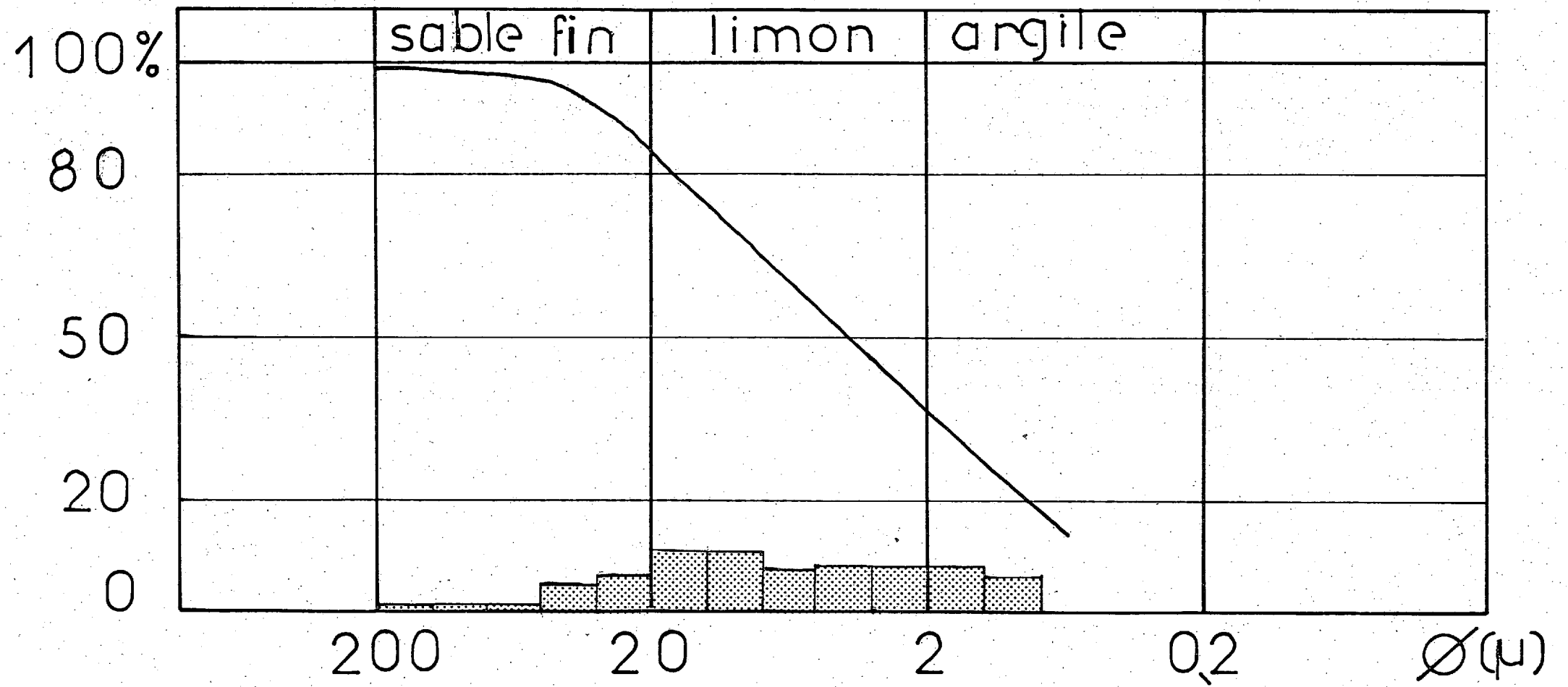


fig 7

BZ

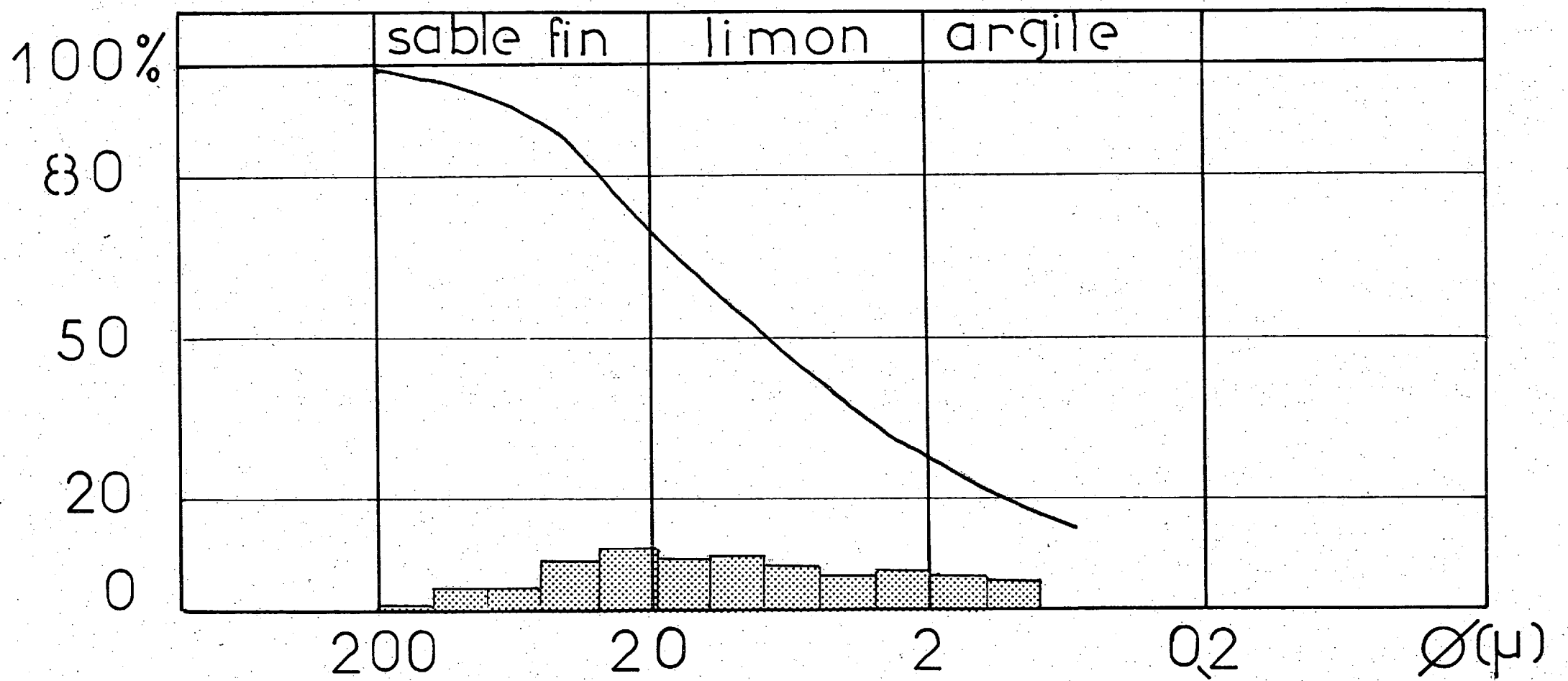


fig 8

C 1

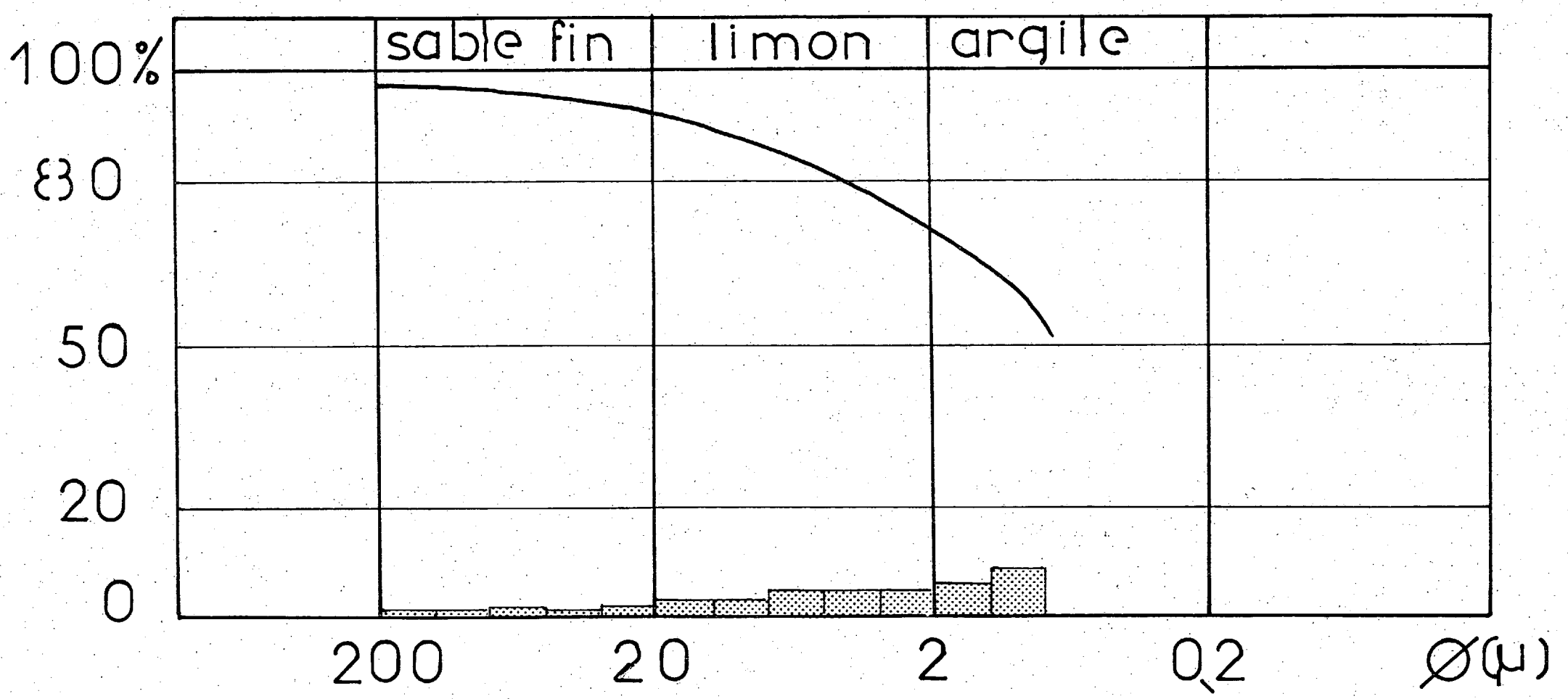


fig 9

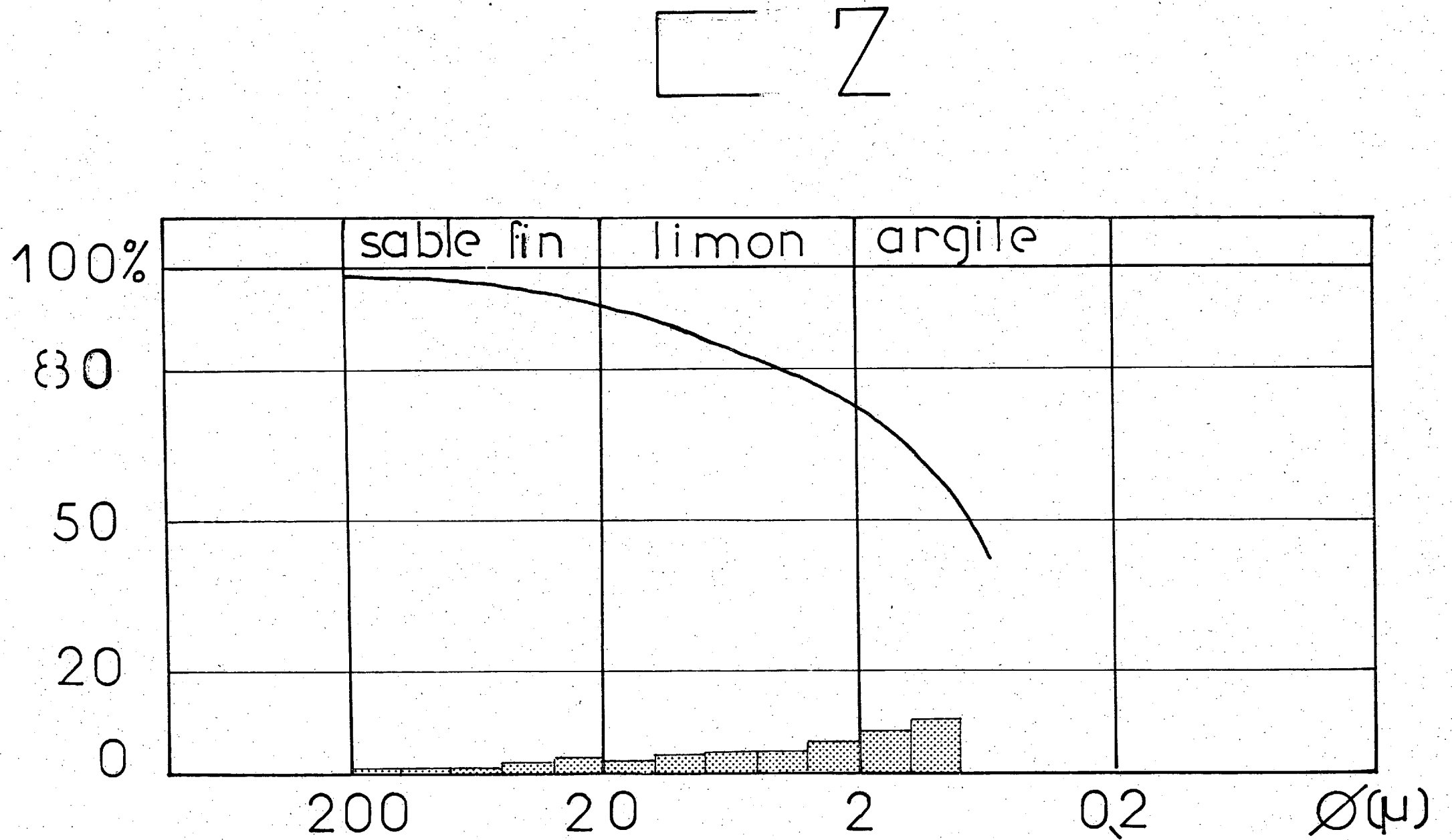
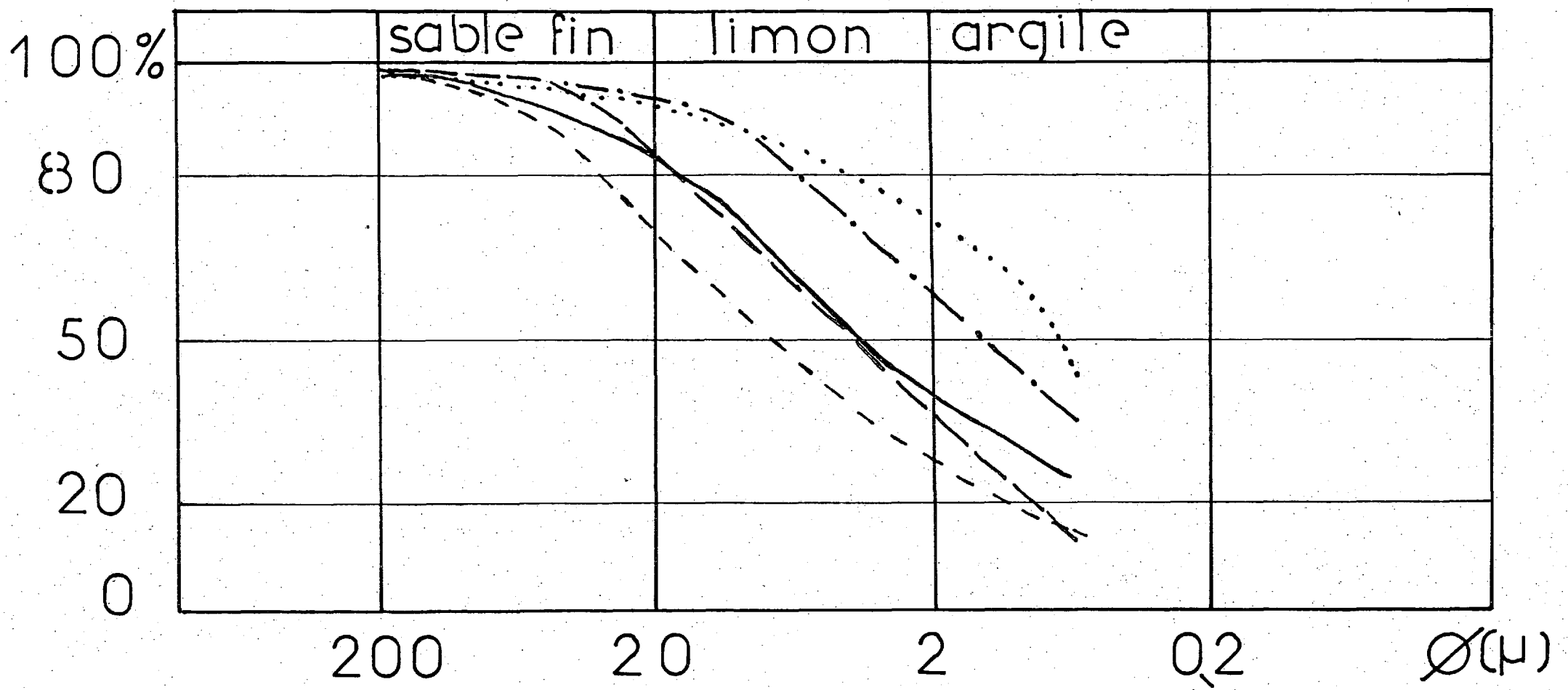


fig 10

fuseau général



——: A1
—·—: A2
– – : B1
– – – : B2
·····: C1 et C2

fig 11

Les médianes montrent que ces sédiments peuvent être classés granulométriquement parmi les argiles fines (C1 et C2) , les argiles moyennes (A2) et les argiles granières (A1) et parmi les limons (silts) très fins (B1 et B2).

Les écarts types indiquent un très mauvais tri des particules (distributions très hétérométriques). Il est cependant un peu meilleur pour les échantillons C.

Les coefficients $\alpha\emptyset$ montrent une dyssimétrie positive importante vers les fractions fines. Ce phénomène étant moins bien marqué pour l'échantillon B2. D'après une étude de R.W. Berry et P. Jorgensen (1971) sur les argiles sensibles d'Ullensaker (Norvège), cette dissymétrie serait due non à une abondance de fines, mais à une absence de particules grossières. Cette dissymétrie positive des particules argileuses est complémentaire d'une dissymétrie négative dans des sables voisins et l'on peut supposer que les particules argileuses ont été séparées des sables et déposées en milieu marin. Les coefficients d'angulosité (B) sont légèrement inférieurs à la normale (0,65) et indiquent une distribution pratiquement log-normale.

6°) Teneur en eau, limites d'Atterberg et Activité

Il est à noter que tous ces essais de mécanique des sols ont été effectués par le Service géotechnique du M.R.N sur des échantillons provenant des mêmes sondages, mais de profondeur différente de ceux envoyés au C.G.I.

A: 3,30 m B : 7, 30 m C : 6,30 m

Typiquement, ces sédiments ont une teneur en eau naturelle élevée (40 à 70 %) qui décroît avec la profondeur et toujours supérieure à la limite de liquidité (30 à 50 %).

Leur faible plasticité, caractéristique des argiles sensibles, peut être représentée sur un diagramme IP - LL (fig. 12).

Il est évident que l'utilisation du diagramme de plasticité pour un sol dont les limites d'Atterberg sont telles que les points représentatifs soient proches ou sur la droite A de Casagrande , d'équation : IP = 0,73 (LL-20) entraîne des classifications tantôt dans la catégorie "limon", tantôt dans la catégorie "argile". Ceci est du :

- d'une part à la dispersion des limites d'Atterberg,
- d'autre part, à l'hétérogénéité des sols.

Il est en général possible de traduire les cas limites par un double symbole. Dans le cas présent, les sols étudiés peuvent être classés comme argiles peu plastiques (A_p) et limons peu plastiques (L_p) d'où le double symbole A_p-L_p.

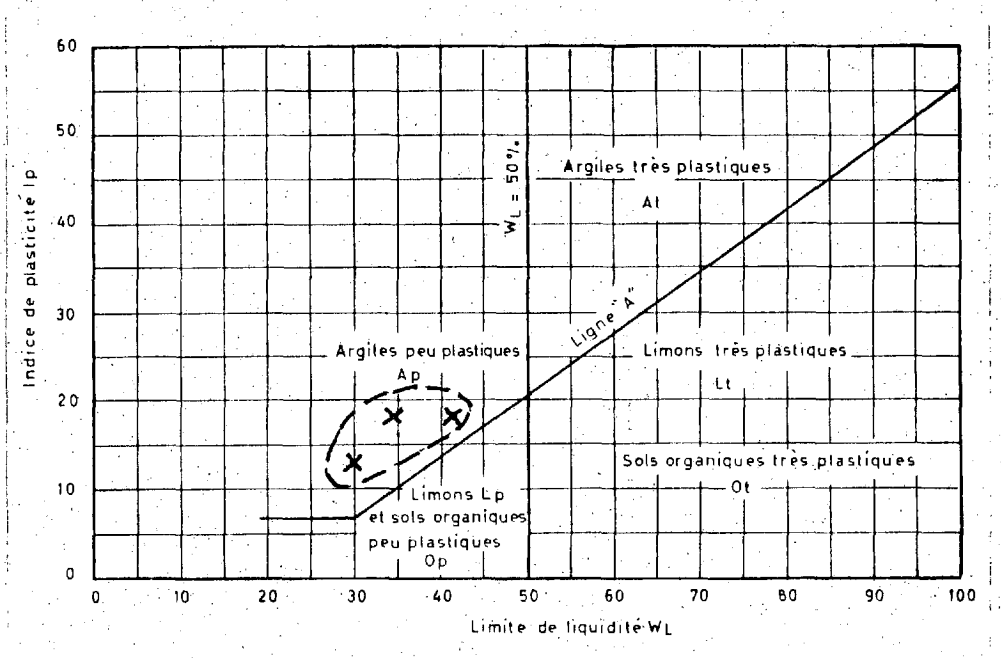


Fig. 12 : Diagramme de plasticité

L'activité, définie comme le rapport de l'indice de plasticité au pourcentage de particules dont le diamètre est inférieur à 2 microns, est ici peu élevée (0,25 à 0,45).

Il est à remarquer que les échantillons A et C ont le même indice de plasticité malgré une granulométrie, une teneur en eau et des limites d'Atterberg différentes. Ceci pourrrait être expliqué par la présence d'un plus grand nombre de minéraux actifs (minéraux argileux) dans les échantillons A (Activité : 0,45) que dans les échantillons C (Activité : 0,25) (Tableau IV).

TABLEAU IV

	Profondeur (m)	W % x	LL % x	LP % x	IP % x	%<2 µ	Activité	Sensibilité
A1	3,60 - 3,65	42	34,3	16,2	18,1	40	0,45	5
A2	3,75 - 3,80	41	-	-	-	57	-	-
B1	7,60 - 7,65	46	30	17	19	36	0,36	5
B2	7,75 - 7,80	41	-	-	-	30	-	-
C1	6,60 - 6,65	67,2	42	24	18	71	0,25	5
C2	6,75 - 6,80	67,2	-	-	-	71	-	-

x- Les limites d'Atterberg ont été mesurées sur des échantillons prélevés à une profondeur légèrement inférieure à celle des échantillons étudiés au C.G.I.

7°) Teneur en carbonates et teneur en matières organiques

7.1. Teneur en carbonates

7.1.1. Méthode de mesure

Le pourcentage de carbonates (calcite + dolomie) a été déterminé à l'aide du calcimètre Dietrich-Frühling. Cette méthode est basée sur la mesure du volume d'anhydride carbonique dégagé par action d'acide chlorydrique sur les carbonates. Grâce à des tables, on tient compte de la température, de la pression atmosphérique et de l'absorption d'anhydride carbonique par la solution d'acide chlorydrique

7.1.2. Résultats

Les échantillons A et C contenant très peu de carbonates (2 à 3 %) peuvent être qualifiés comme "non carbonatés" alors que les échantillons B sont "légèrement carbonatés" (9 à 10 %) (tableau V).

TABLEAU V

	W %	% > 2 µ	% de carbonates	% de M.O.
A1	42	60	2,5	3,0
A2	41	43	3	2,6
B1	46	63	9,7	3,1
B2	41	70	11,6	4,1
C1	67,2	29	2	2,6
C2	67,2	29	2,5	2,0

Il est à remarquer que les échantillons les plus grossiers B sont les plus riches en carbonates. Ceci tendrait à prouver que les carbonates se trouvent préférentiellement dans les fractions les plus grossières et seraient donc en majeure partie d'origine détritique, la proportion de carbonates néoformés d'origine chimique étant très faible (peut être dolomitisation secondaire ?) Ce phénomène pourrait correspondre à l'hypothèse de M.R. Gadd (1962) suivant laquelle il y aurait eu une redéposition d'argile marine en eau douce, liée à une érosion majeure, du à un apport venu de la région des Grands Lacs. Cette hypothèse est basée sur la présence d'une discordance entre une couche d'argile non calcaire et non fossilifère et une couche d'argile calcaire et fossilifère dans la région d'Ottawa.

En conséquence, les diverses théories attribuent en partie la structure des argiles sensibles aux liaisons de type rigide dues à une cimentation ou à une recristallisation de carbonates pourraient être mises en doute.

7.2. Teneur en matières organiques

7.2.1. Méthode de mesure

La technique utilisée est basée sur l'oxydation du carbone total par un mélange d'acide sulfurique et de bichromate de potassium. Puis on dose en retour de l'excès de bichromate par un sel réducteur (sel de Mohr). Pour obtenir le pourcentage de matières organiques, il faut multiplier le pourcentage de carbone total par un coefficient, adopté par différents auteurs (1,724). Celui-ci correspond à une composition moyenne de composés organiques se trouvant dans le sol. La valeur ainsi calculée est une teneur conventionnelle

7.2.2. Résultats

La teneur en matières organiques des six échantillons est comprise entre 2 et 4 %. D'après une nouvelle classification des sols organiques (J. Perrin, 1974), les échantillons A et C (2 à 3 %) sont inorganiques alors que les échantillons B peuvent être classés comme faiblement organiques ($3\ \% < MO \leqslant 10\ \%$): f O.

On peut ainsi distinguer des sous-groupes selon le diagramme IP-LL de Casagrande :

- sol faiblement organique argileux peu plastique: f O-A_p
- sol faiblement organique limoneux peu plastique f O-L_p

Avec l'utilisation du double symbole, ces sédiments pourraient être classés de la manière suivante : f O - (A_p-L_p)

Cette faible teneur en matirees organiques n'est pas significative d'un milieu de dépôt. Elle pourrait expliquer pour une part la sensibilité assez faible de ces argiles.

8°) Morphoscopie, Minéralogie et Structure

8.1. Observations à la loupe binoculaire

Cette étude porte uniquement sur les fractions granulométriques supérieures à 40 microns.

L'observation à la loupe binoculaire a permis de faire une première approche sur la composition minéralogique des fractions grossières. Ces diverses fractions présentent une composition assez semblable, bien que le % de micas augmente avec les fractions les plus fines :

- quartz (≃ 90 %)
- feldspaths
- micas (biotite ?)
- chlorite
- minéraux ferro-magnésiens (amphiboles ou pyroxènes)
- minéraux métalliques : magnétite et pyrite
- microfossiles (foraminifères)
- fragments de roches cristallines (microgranite, microdiorite?)

Elle a permis d'étudier également la forme des grains (surtout celle du quartz). Les grains de quartz sont le plus souvent "émoussés luisants", ce qui traduit une usure et un état de surface dus au transport par l'eau : transport fluviatile et marin. Certains grains plus anguleux indiqueraient un transport avec peu ou pas d'usure, c'est à dire un transport soit par la glace (glaciers et icebergs), soit par des coulées ou par solifluxion.

8.2. Diffraction des rayons X

La diffraction X est la méthode la plus rapide et la plus valable pour l'étude minéralogique des argiles et elle a l'avantage d'être applicable aux mélanges.

8.2.1. Méthodes d'étude

Les appareils utilisés pour cette étude furent des diffractomètres, l'un muni d'une anticathode de cuivre (raie $k_{\alpha 1}$ du cuivre de longueur d'ordre : 1,540 Å) et un autre, muni d'une anticathode de cobalt (raie $k_{\alpha 1}$ du cobalt de longueur d'onde : 1,789 Å). Ces appareils permirent une étude minéralogique qualitative. Les techniques d'investigation aux rayons X les plus favorables ici sont :

- la méthode des poudres,
- la méthode des agrégats orientés.

a) la méthode des poudres

Elle fut mise en oeuvre sur la fraction inférieure à 40 microns des échantillons. Tous présentent une composition minéralogique identique. La présence de certains minéraux a pu être confirmée :

- quartz (très abondant),
- feldspaths (plagioclase) (abondant),
- amphibole (peu),
- calcite (uniquement pour les échantillons B) (très peu),
- micas et argiles (pics à 14,10 et 7 Å) (peu).

(figure 13.)

Pour déterminer plus précisément la nature des minéraux argileux, l'étude de la fraction inférieure à 2 microns par la méthode des agrégats orientés est indispensable.

b) la méthode des agrégats orientés

Les particules argileuses, préalablement défloculées et débarrassées des matières organiques et des carbonates (voir § 5.2.2.) sont orientées par sédimentation.

Au cours de cette étude, trois lames orientées furent préparées systématiquement pour chaque échantillon :

- une lame naturelle (N) (fig.14),
- une lame glycolée (G) (fig.15),
- une lame chauffée à 490° pendant 2 h (C) (fig.16).

anticathode au cobalt (K_{α_1})

q : quartz
f : feldspath
a : amphibole
i : illite
c : chlorite
ca : calcite

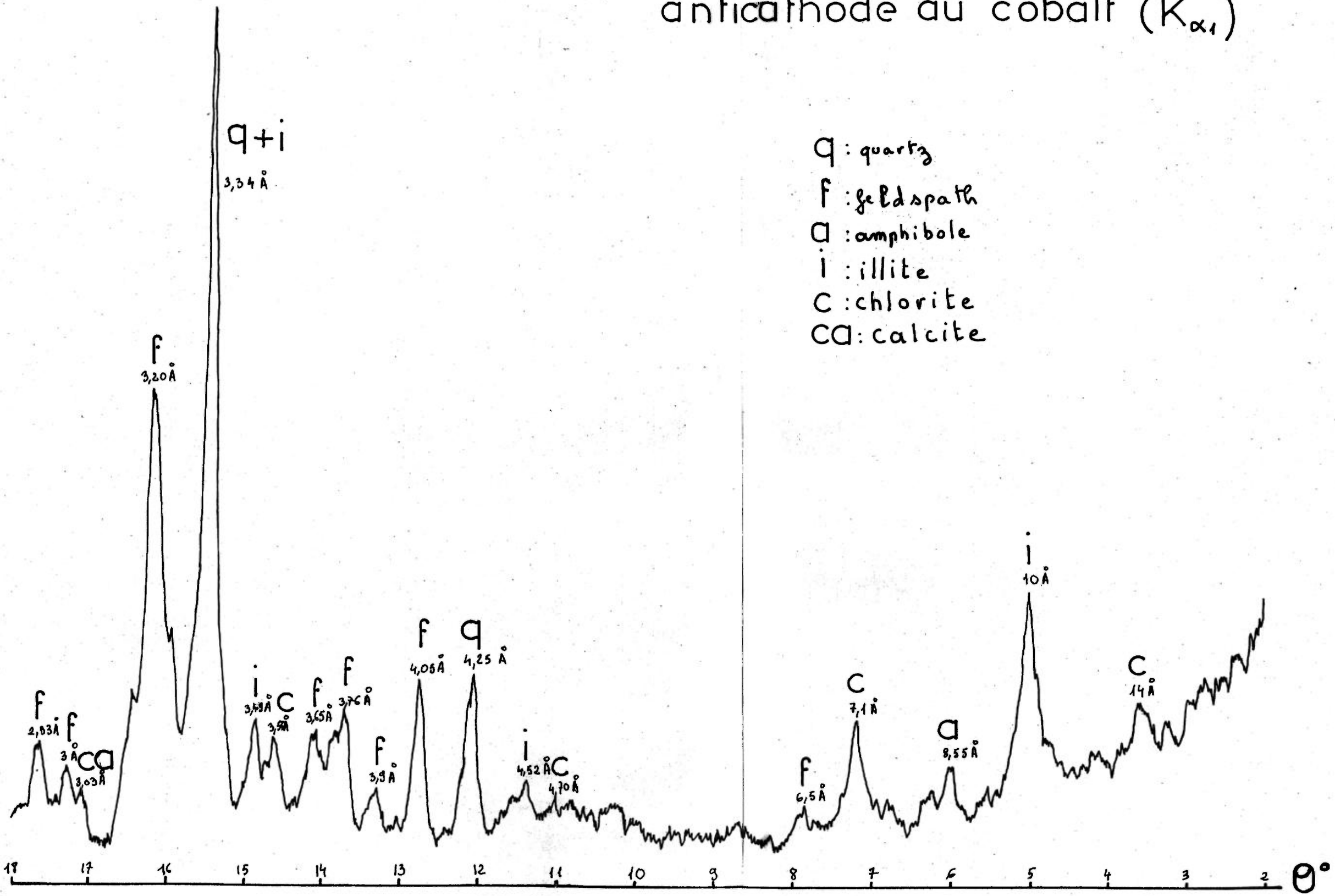
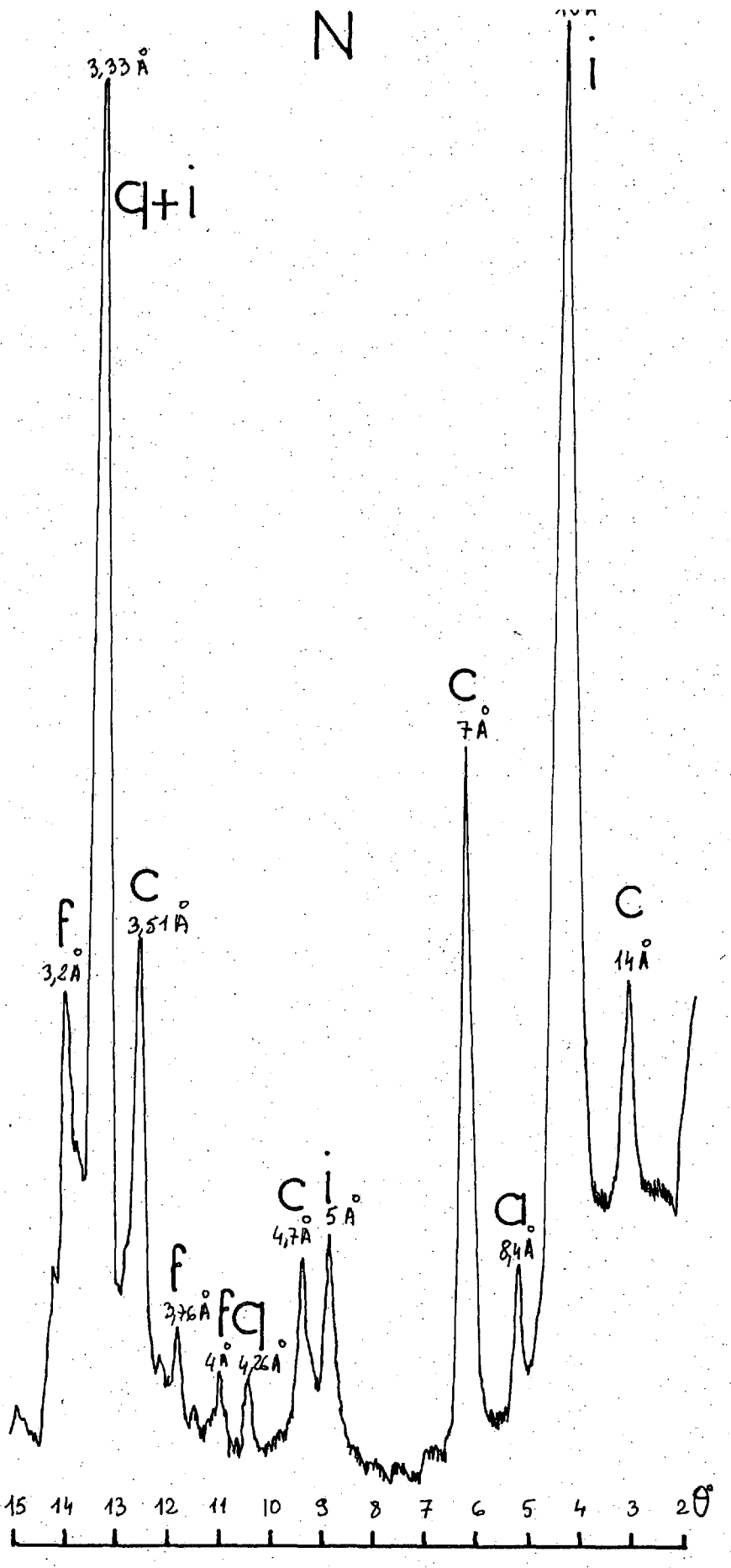


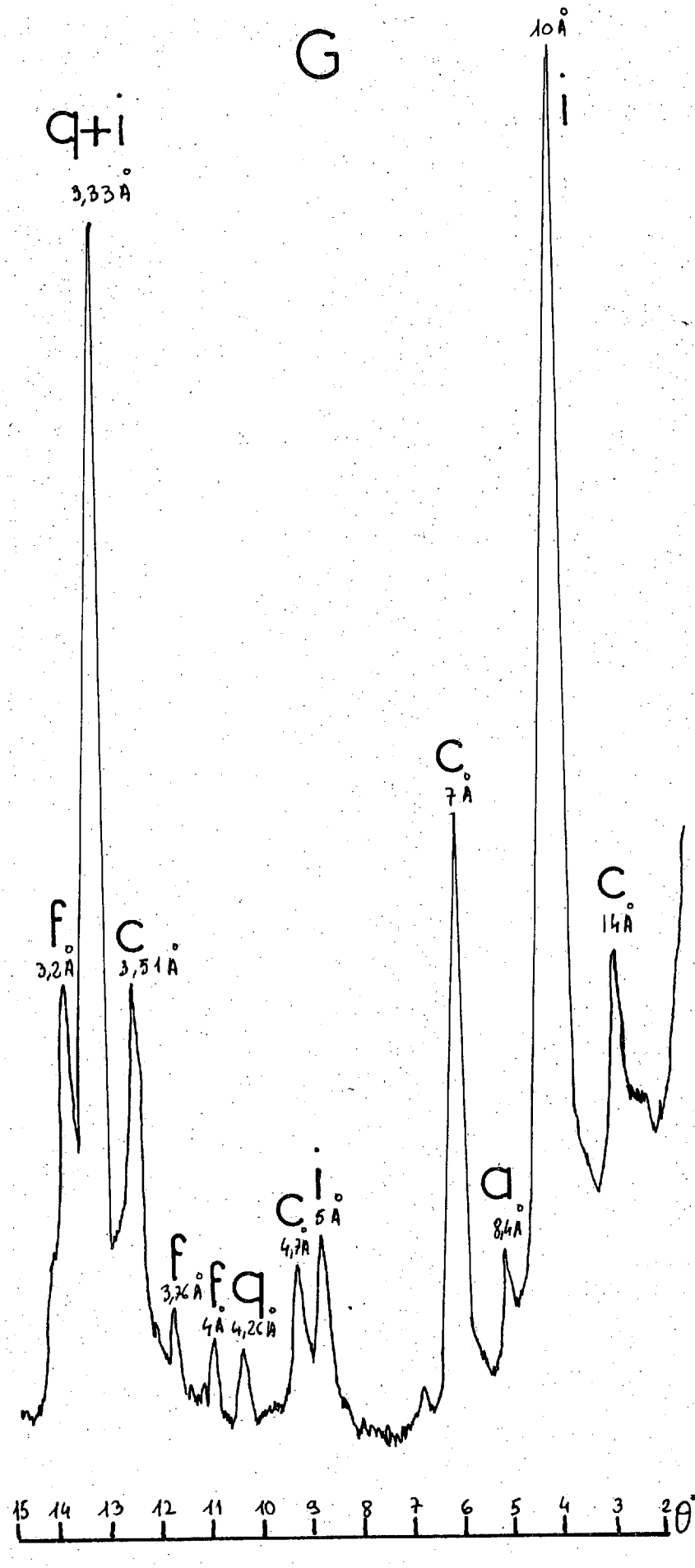
diagramme de poudre moyen

fig 13



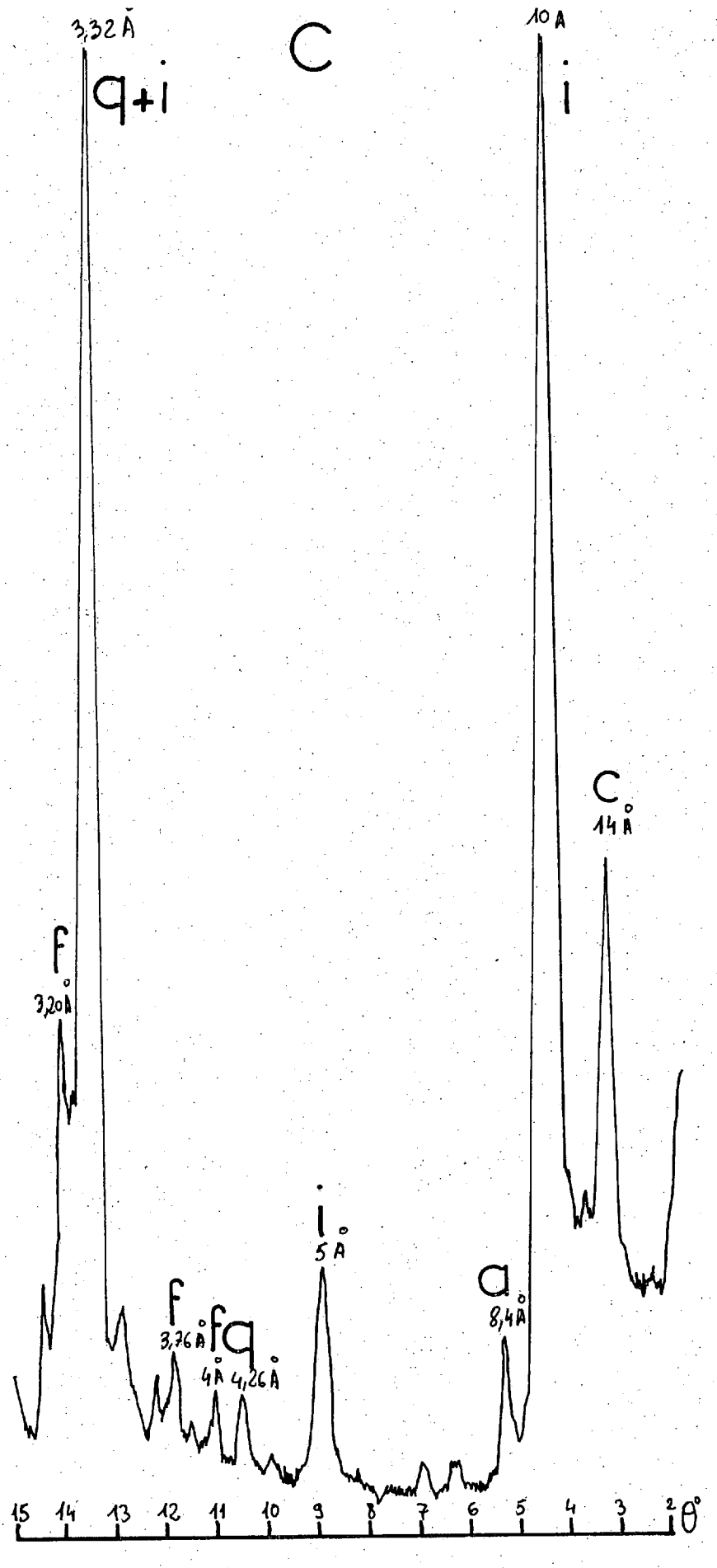
agrégats orientés N

fig 14



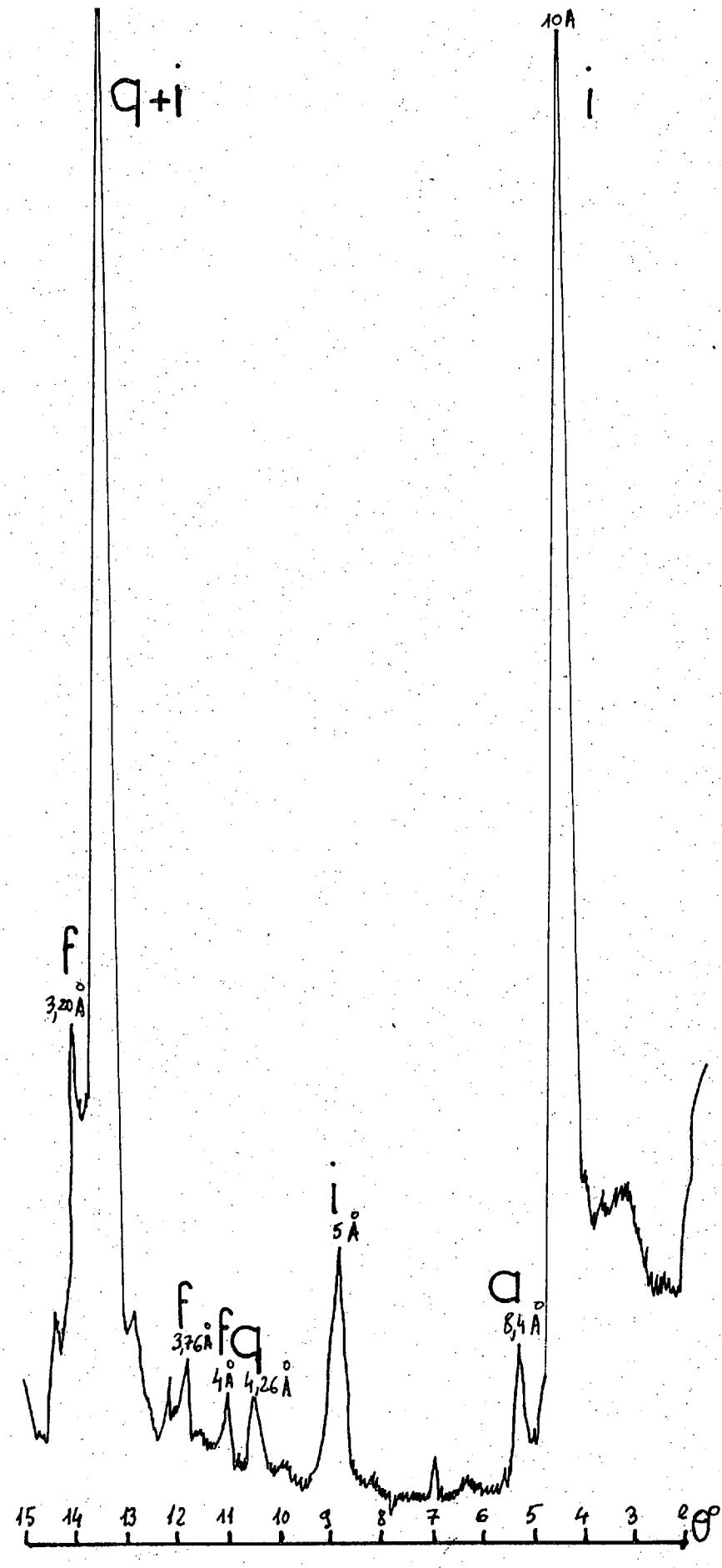
agregats orientés G

fig 15



agrégats orientés C

fig 16



agrégats orientés HCL 2N

fig 17

Après traitement, chacune de ces lames fut analysée au diffractomètre (anticathode au cuivre). Cette méthode permit de déterminer de la chlorite (riche en fer) dont une partie gonfle en présence de Glycol et de l'illite (riche en fer, type glauconite), bien cristallisée. Le problème posé par la présence ou non de kaolinite en raison de la disparition de certains pics (7 Å ; 3,55 Å) fut résolu par un traitement complémentaire :

- addition d'HCl 2N à ébullition pendant 1 h 30. En effet, ce traitement détruit la chlorite alors qu'il laisse intact la kaolinite. La disparition de toutes les raies caractéristiques de la chlorite et, par conséquent, celles communes à la chlorite et à la kaolinite (7 Å et 3,55 Å) permit d'éliminer cette dernière (fig.17).

8.2.2. Résultats

La diffraction des rayons X permit de caractériser pour les six échantillons la composition minéralogique identique suivante :

- quartz , très abondant,
- feldspath (plagioclases), abondant,
- amphibole, peu,
- illite, peu abondant,
- chlorite, peu abondant,
- chlorite gonflante, très peu.

L'utilisation des méthodes thermiques : analyse thermique différentielle (ATD) et analyse thermogravimétrique (ATG) ainsi que la spectrométrie infra-rouge n'ayant pas apporté d'éléments complémentaires, ne feront pas l'objet ici de commentaires.

8.3. Microscopie électronique à transmission et microdiffraction X

8.3.1. Description de l'appareil

Le Laboratoire Central des Ponts & Chaussées de Paris possède un "SOPELEM MICRO 75" (fig.18) travaillant sous des tensions d'accélération de 30, 50 et 75 kv ; le grandissement maximal est 130.000 et le pouvoir séparateur de 8 Å .

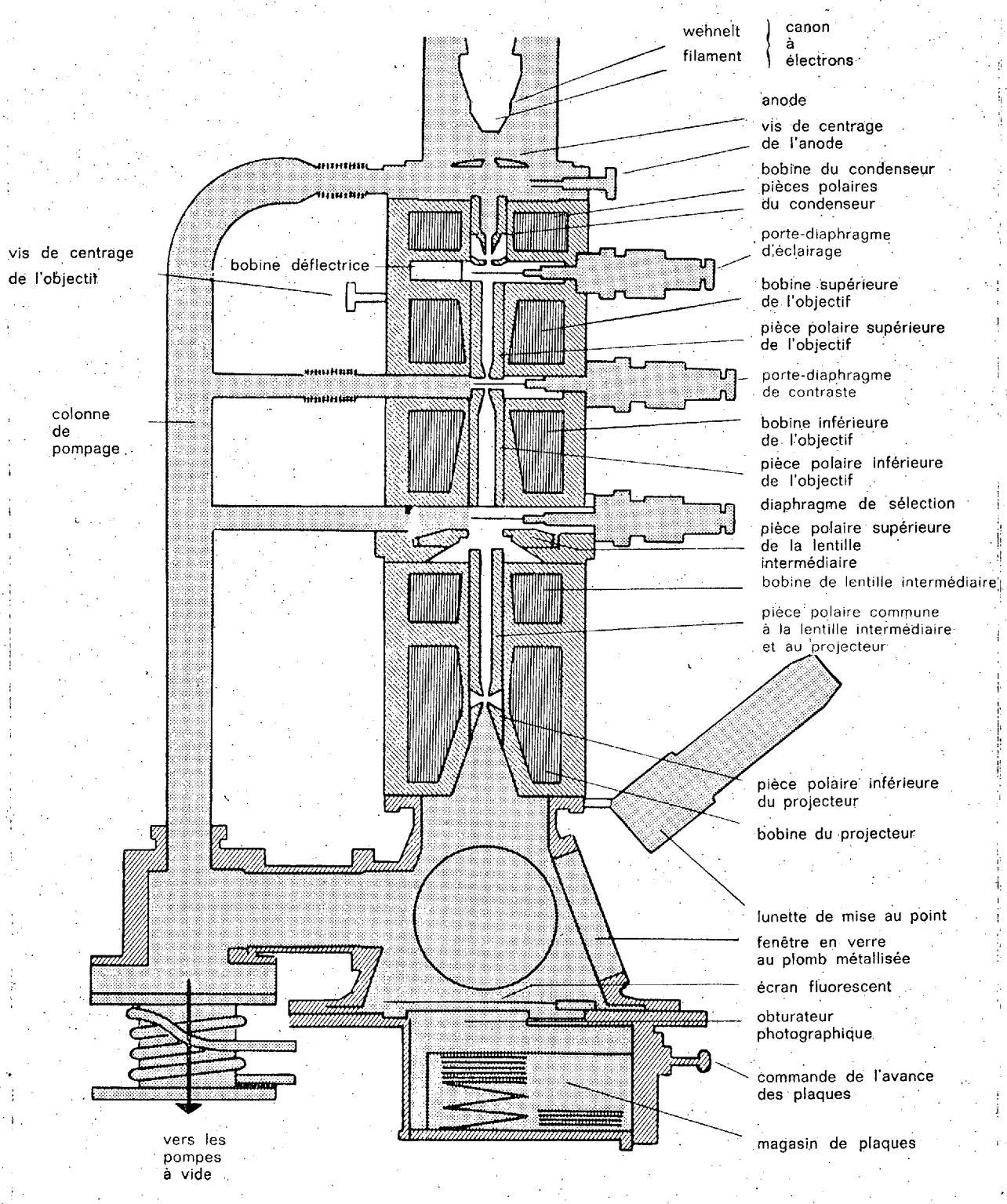


Fig. 18 : coupe de la colonne du microscope électronique "Micro 75"
l'objet est placé au même niveau que le porte-diaphragme de contraste (D'après A. Leroux)

8.3.2. Les supports d'échantillons

Etant donné la dimension des échantillons observables, ceux-ci sont disposés sur des grilles de cuivre de 3 mm de diamètre. Les grilles à pas très fin (0,1 mm) sont obtenues par procédé électrolytique et revêtues d'un film continu (carbone-colbdion) qui servira de support à l'objet à examiner.

8.3.3. Préparation des échantillons

L'observation directe est employée pour des échantillons pouvant être mis en suspension. C'est une méthode qui convient parfaitement dans ce cas présent pour la fraction inférieure à 2 microns. La mise en suspension s'est faite manuellemntt, mais elle peut également se faire à l'aide des ultra-sons, ceux-ci permettant de réaliser une meilleure répartition et de mieux diviser les éléments agglomérés. Cette suspension obtenue, les éléments étant assez fins, on peut soit y plonger directement la grille habillée, soit en déposer une goutte à l'aide d'un capillaire. Pour réaliser ces suspensions, on emploie de préférence l'eau distillée. Dès que la grille est prête, on peut l'examiner au microscope.

8.3.4. Etude des suspensions

Cette technique, uniquement qualitative, permet de visualiser les particules argileuses (Pl.I,ph1) et, dans certains cas, de les reconnaitre soit par une morphologie particulière (Pl.I,ph2), soit à l'aide de la diffraction électronique associée : exemple de l'illite présente dans toutes les suspensions (Planche II) .

Ce procédé ne permet cependant que l'étude de particules séparées; or il est très intéressant d'examiner des assemblages de particules , c'est à dire des structures ; on peut alors utiliser la microscopie électronique à balayage sur des échantillons intacts et suffisamment épais.

8.4. Microscopie électronique à balayage (M.E.B. ou Scan)

8.4.1. Principe et description de l'appareil

Un solide bombardé par un faisceau d'électrons émet des électrons de deux types :

- électrons primaires rétrodiffusés,
- électrons secondaires arrachés à la cible.

PLANCHE I

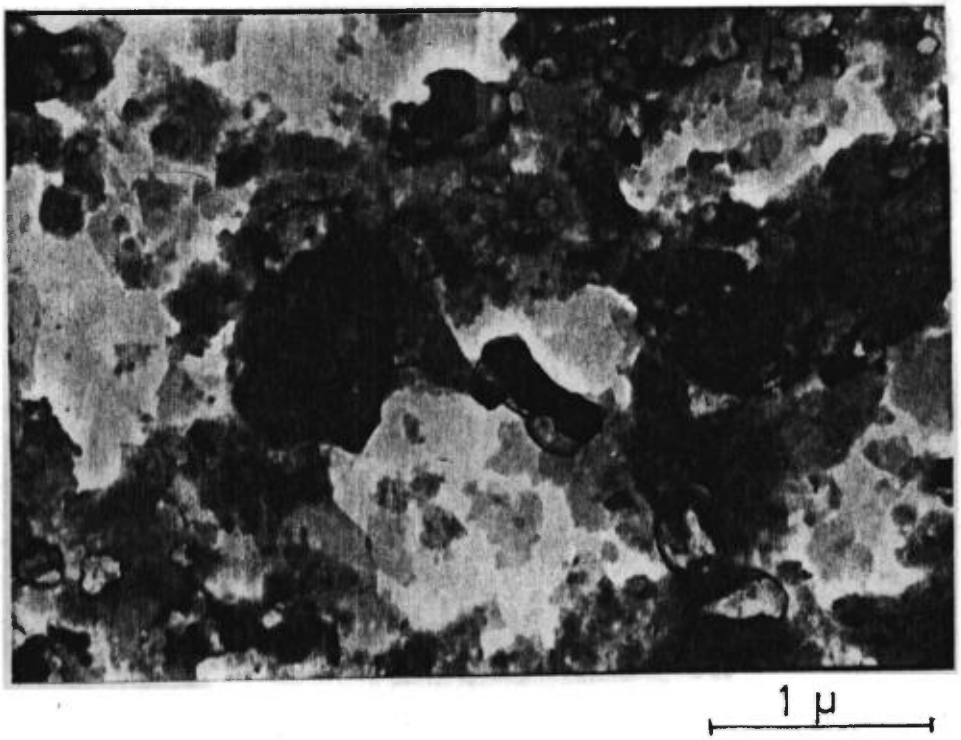


photo 1

Minéraux argileux (x 30.000)

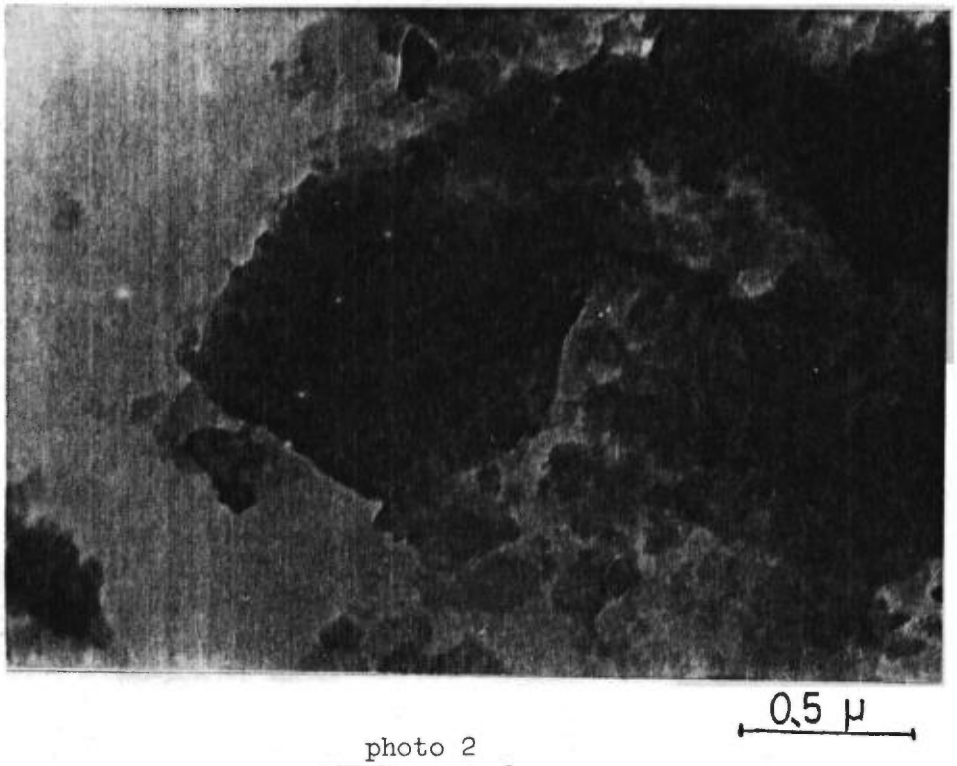


photo 2

Cristal hexagonal d'Illite
(x 48.000)

PLANCHE II

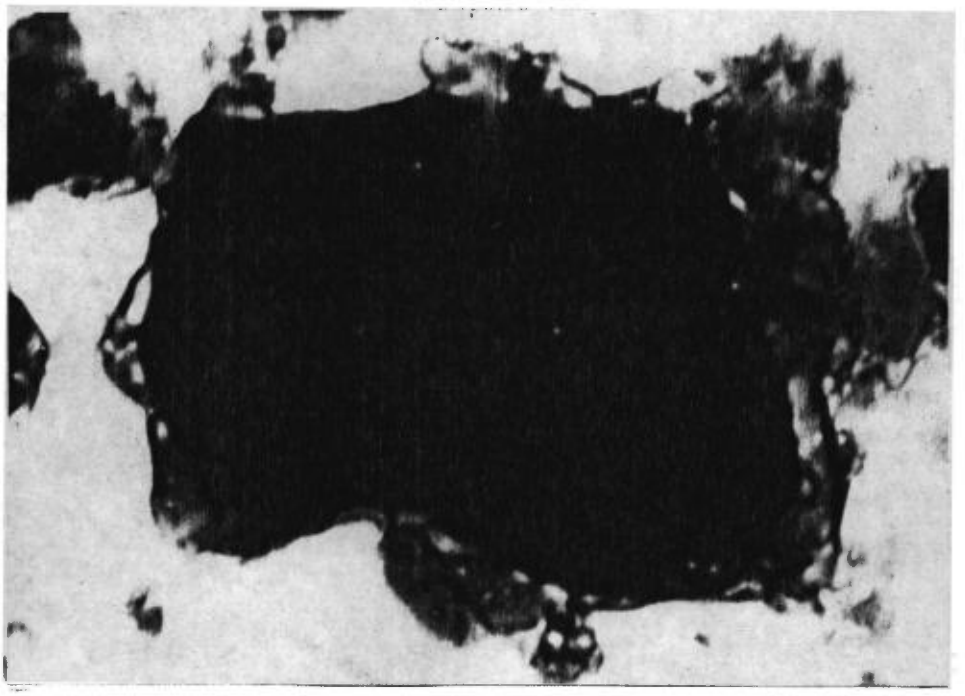


photo 1

Cristal d'Illite (x 40.500)

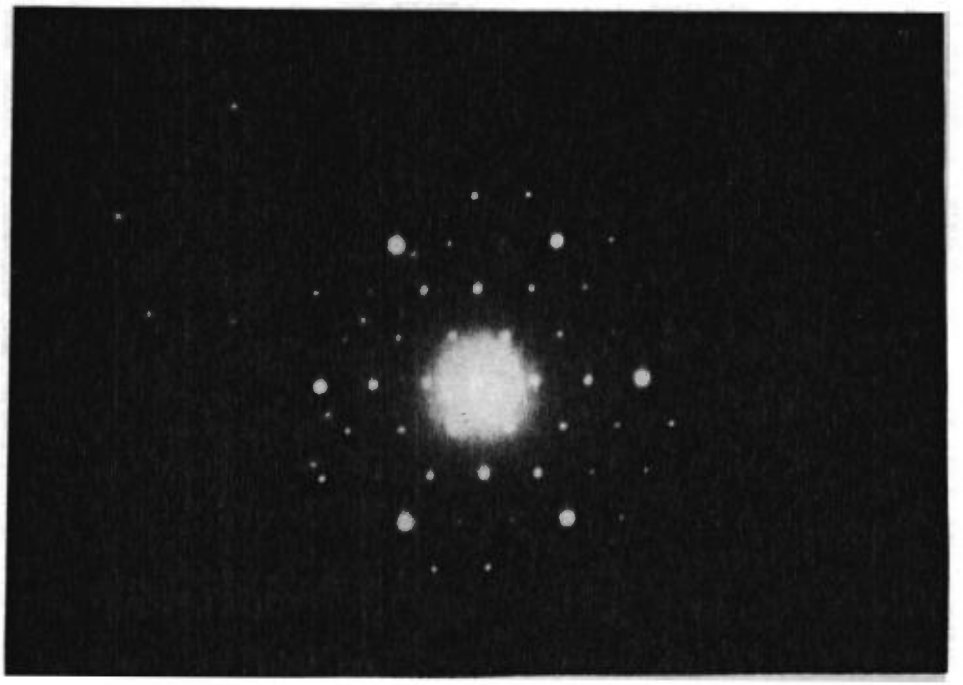


photo 2

Microdiffraction X du

Cristal d'Illite

Un canon a électrons produit un flux d'électrons accélérés sous une tension de 20 à 30 kv. Une série de lentilles concentre le faisceau qui, point par point, balaie l'échantillon. Les électrons rétrodiffusés sont recueillis par un collecteur, le signal convenablement amplifié, est utilisé pour moduler le spot d'un tube cathodique (fig.19). Contrairement au microscope classique où tous les points de l'image sont obtenus en même temps, on utilise ici, comme en télévision, la persistance des impressions rétiniennes pour former une image.

Le microscope électronique à balayage possède une profondeur de champ importante et montre la surface observée avec une impression de relief remarquable. Le grandissement maximal est de 50.000.

8.4.2. Préparation des échantillons

Pour être observable, un échantillon doit être préalablement métallisé. Cette métallisation est réalisée sous un vide inférieur à 10^{-4} Torr. Pour opérer dans de telles conditions, l'échantillon, riche en eau, doit être déshydraté.

8.4.2.1. La deshydratation

Elle peut être obtenue par deux méthodes, soit par dessiccation à l'air (20°C), soit par lyophilisation.

a) Dessication à l'air

Dans ce cas, la structure du matériau est profondément modifiée par affaissement et retrait, on constate une diminution de volume importante qui s'accompagne vraisemblablement d'un réarrangement des particules et la présence de fentes de retrait, proportionnelles à la teneur en eau.

b) Lyophilisation

Principe : il s'agit de la dessication sous vide d'une substance préalablement congelée à basse température. La déshydratation se fait alors par sublimation, c'est à dire que la glace est transformée directement en vapeur sans passer par la phase liquide intermédiaire, alors que la température peut s'élever dans l'enceinte jusqu'à + 40°C, mais toujours sous vide (Y. Alix et F. Ottmann, 1969)

On obtient alors un produit parfaitement déshydraté qui a parfois tendance à une rapide réhydratation hygroscopique à l'air libre, comme c'est le cas des argiles.

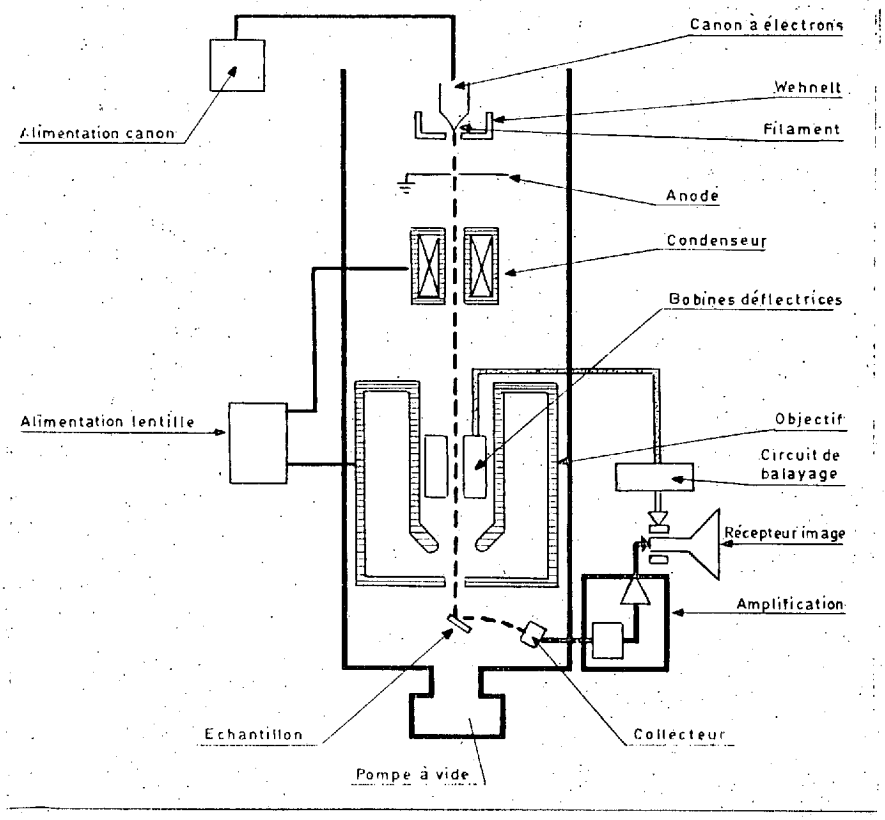


Fig. 19 : schéma du microscope électronique à balayage (D'après A.Leroux, 1971)

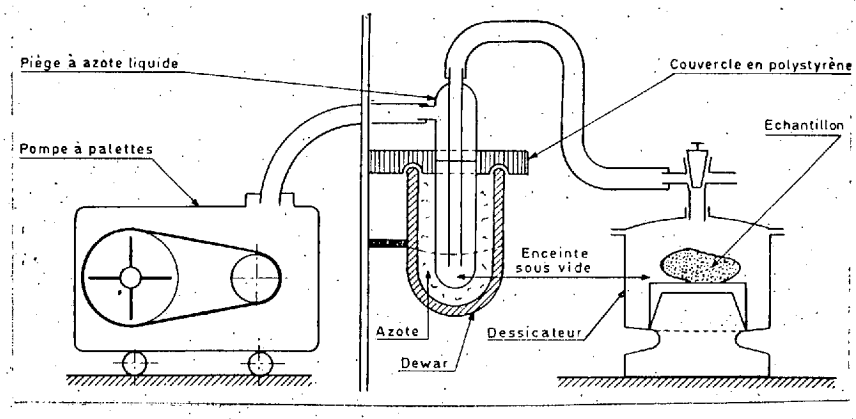


Fig. 20 : schéma du lyophilisateur (D'après A. Leroux, 1971)

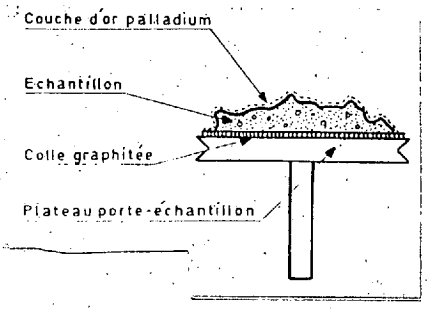


Fig. 21 : échantillon prêt à l'observation (D'après A. Leroux 1971)

Technique utilisée : L'échantillon est refroidi à -185°C par immersion dans l'azote liquide. A cette température, la glace se forme instantanément sans développement d'aiguilles de glace, ce qui se produirait par congélation lente et, ainsi, la structure est conservée aussi voisine que possible de celle de l'échantillon en place. Ensuite, il suffit de déshydrater en sublimant la glace sous un vide 10^{-2} Torr (fig.20). L'opération terminée, l'échantillon est particulièrement fragile et friable et présente l'aspect typique de "meringue" (A. Leroux, 1973).

8.4.2.2. Taille des échantillons

Les échantillons observés au M.E.B. sont prélevés directement sur le bloc lyophilisé ou séché par cassure. Cette cassure peut être "rafraichie" par le passage répété d'un morceau de scotch.

Ils se présentent sous la forme de parallélépipèdes de 20 mm de long, 10-15 mm de large et 5-7 mm de hauteur. Ils sont ensuite fixés sur un plateau porte-échantillon à l'aide d'une colle conductrice à base de graphite.

8.4.2.3. Métallisation

Les échantillons de sols ou de roches étant non conducteurs le bombardement électronique charge les échantillons. Le faisceau d'électrons se trouve dévié, le point d'impact varie constamment de manière aléatoire. Il est donc indispensable de préparer l'échantillon en déposant à sa surface un film métallique qui permet aux charges de s'écouler. On utilise pour la métallisation un fil d'alliage or - palladium qui est vaporisé sous vide. On obtient ainsi un film continu à la surface de l'échantillon (50 à 100 Å d'épaisseur) (fig.21).

Pour assurer un écoulement parfait des charges, on dispose une trace de laque d'argent.

8.4.3. Etude de la structure

L'observation au M.E.B. a porté sur des fragments séchés et lyophilisés de chaque échantillon, ce qui permit de comparer l'influence du mode déshydratation sur la structure originelle des sédiments.

La similitude entre les surfaces parallèles et perpendiculaires au dépôt montre l'existence d'une structure totalement désordonnée.

PLANCHE III

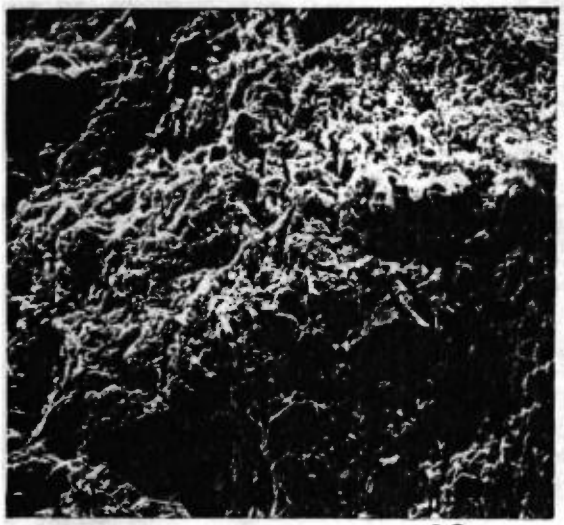


photo 1

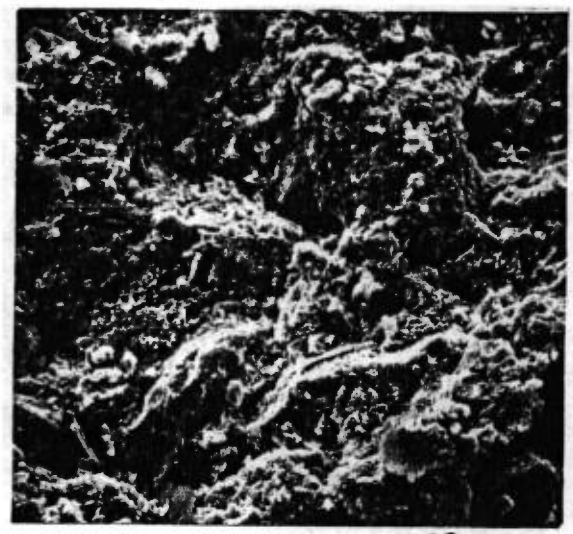


photo 2

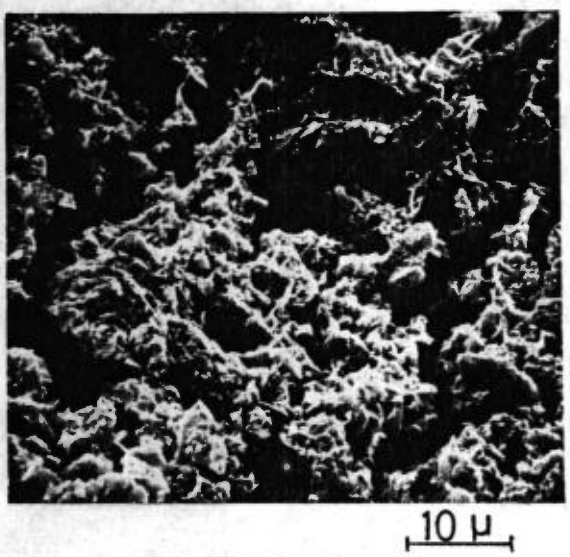


photo 3

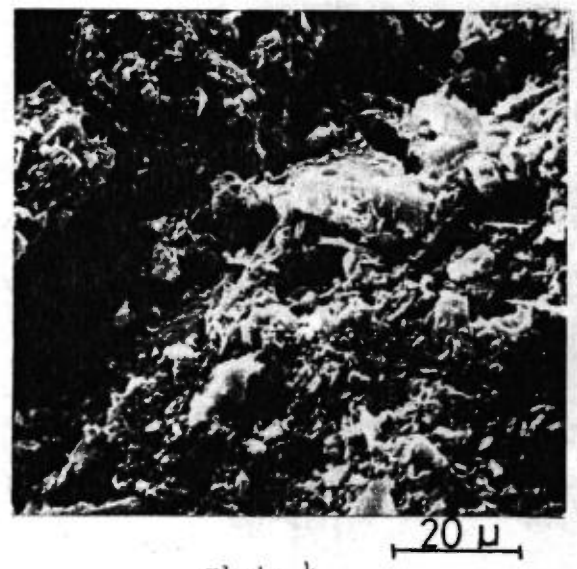


photo 4

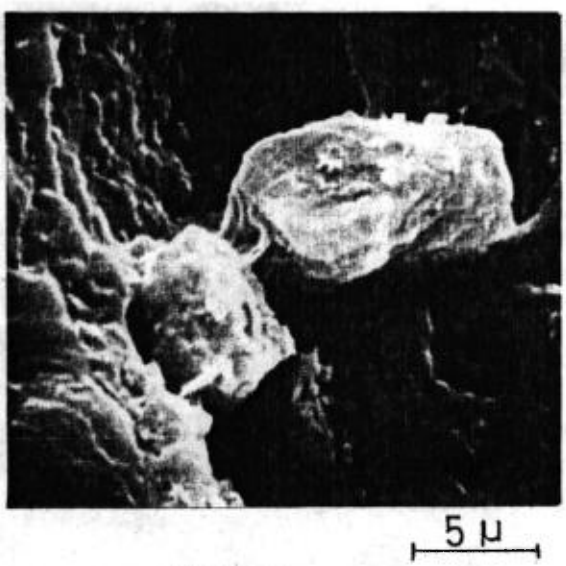


photo 5

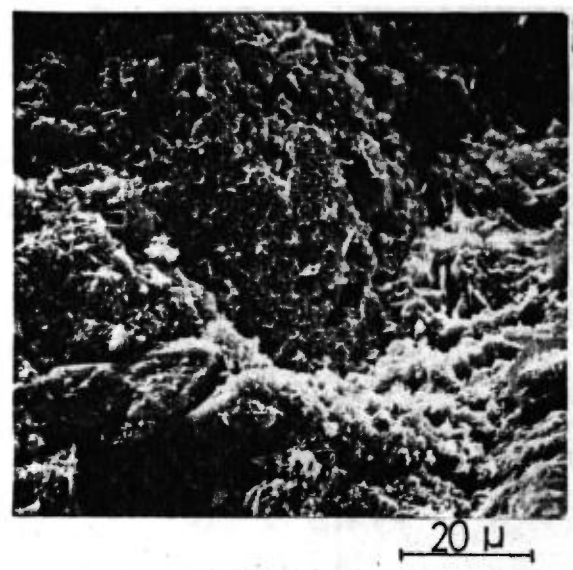


photo 6

PLANCHE IV

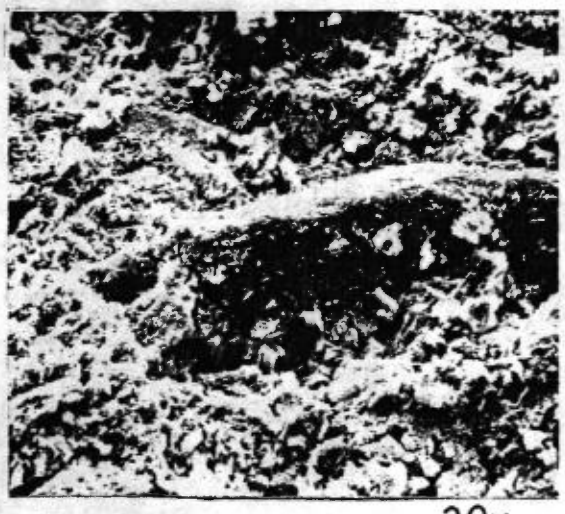


photo 1

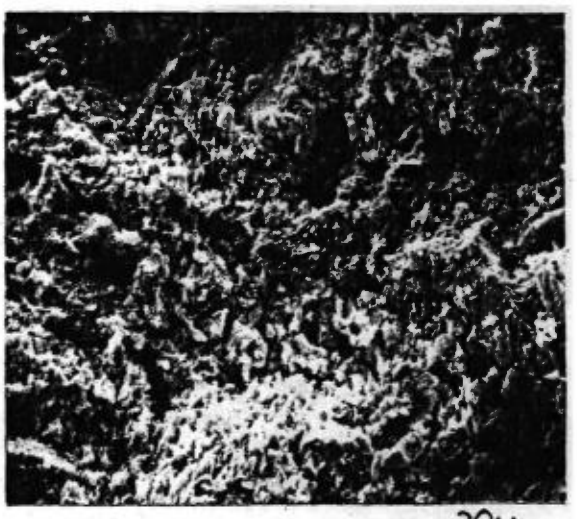


photo 2

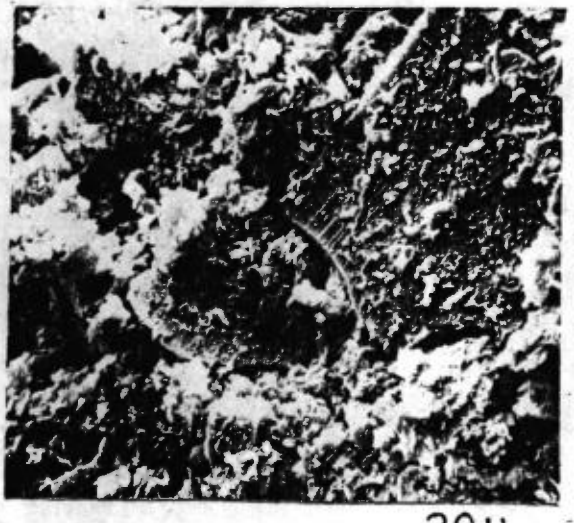


photo 3



photo 4



photo 5



photo 6

PLANCHE V



photo 1

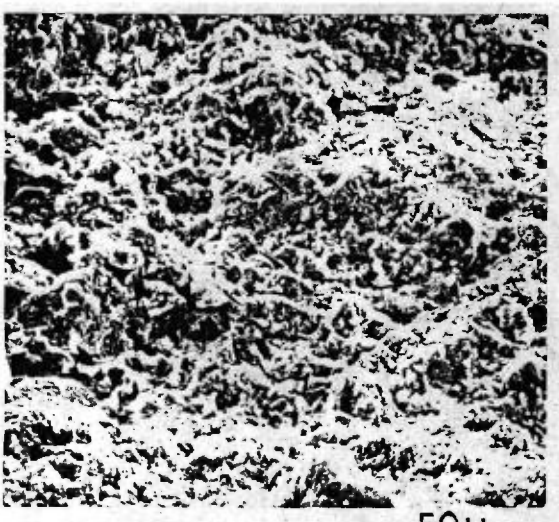


photo 2

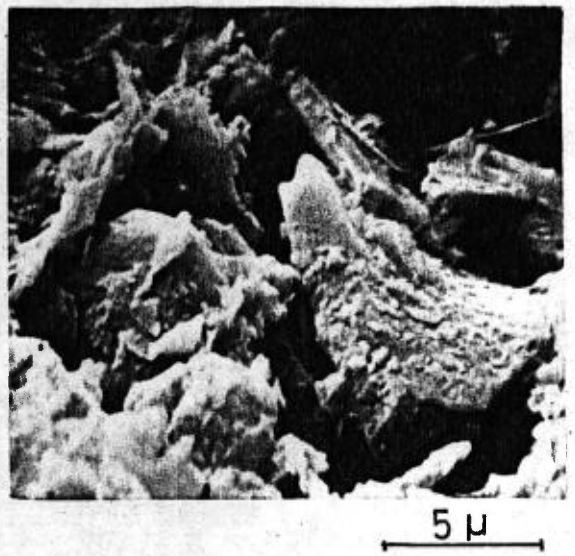


photo 3

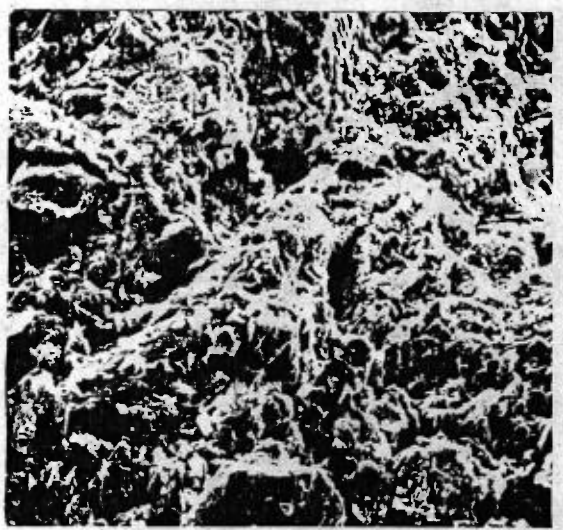


photo 4



photo 5



photo 6

PLANCHE VI

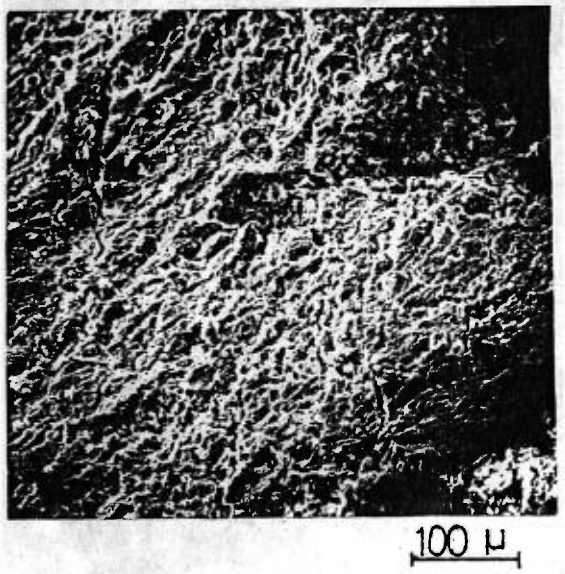


photo 1

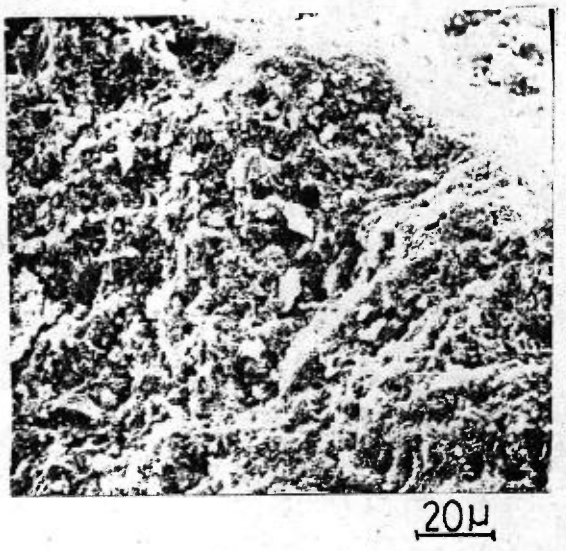


photo 2

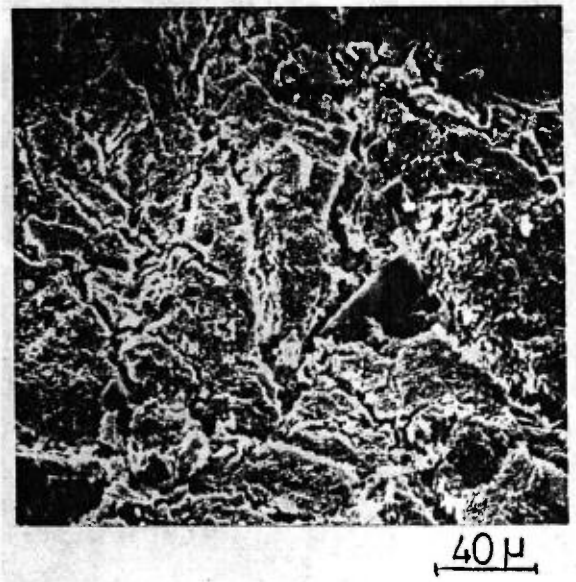


photo 3

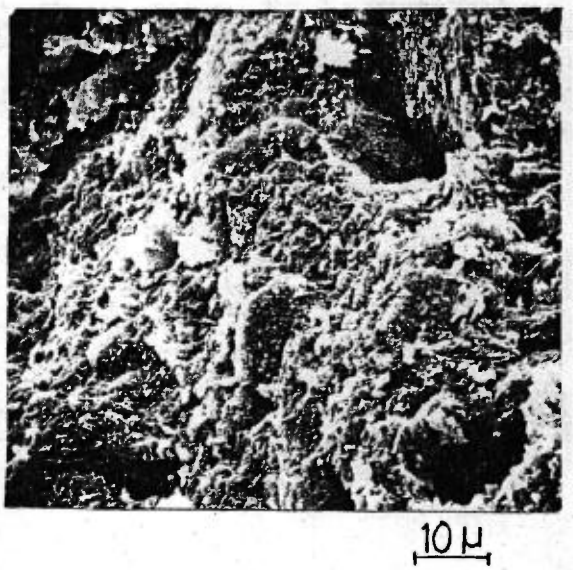


photo 4

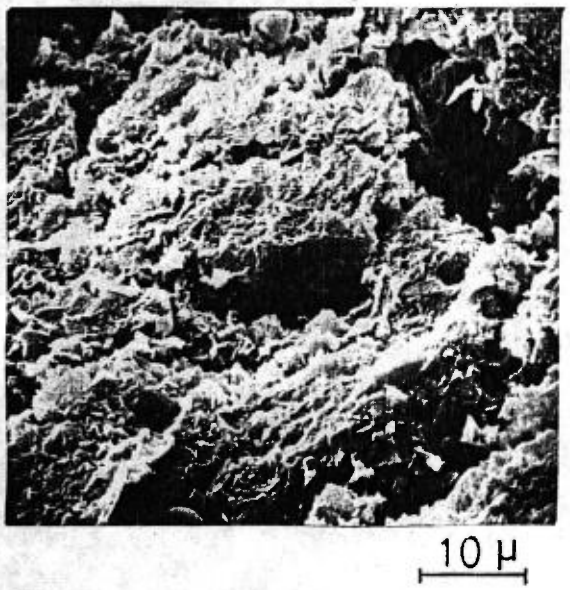


photo 5

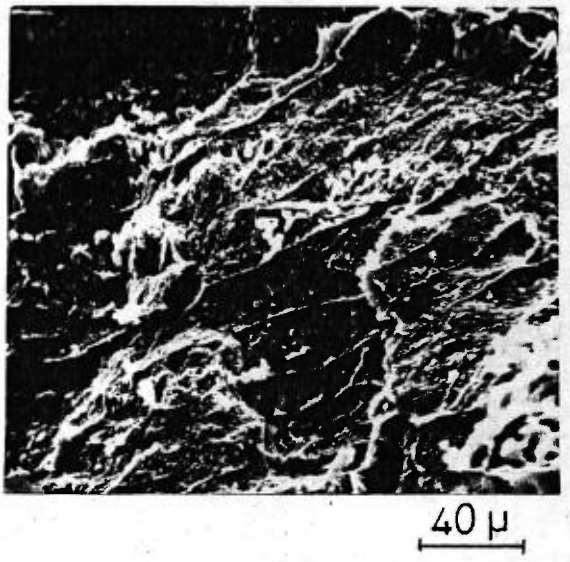


photo 6

PLANCHE III

Photo 1 : Echantillon A 2 L (x 370)

Photo 2 : Echantillon A 2 S (x 420)

Photo 3 : Echantillon A 2 R (x 1.400)

Photo 4 : Echantillon A 2 S (x 840)

Photo 5 : Echantillon A 2 L - lien de type rigide entre deux particules (x 3.500)

Photo 6 : Echantillon A 2 S - structure organique (x 840)

PLANCHE IV

Photo 1 : Echantillon B 2 S (x 540)

Photo 2 : Echantillon B 2 L (x 350)

Photo 3 : Echantillon B 2 L - gros grain de quartz (x 700)

Photo 4 : Echantillon B 2 L - détail du gros grain de quartz (x 4.200)

Photo 5 : Echantillon B 2 L - structure en "château de cartes" (x 3.500)

Photo 6 : Echantillon B 2 L - particules argileuses (x 8.400)

PLANCHE V

Photo 1 : Echantillon B 2 L - agrégats (x 1.400)

Photo 2 : Echantillon B 1 S(x260)

Photo 3 : Echantillon B 2 L (4.200)

Photo 4 : Echantillon B 1 S (x 350)

Photo 5 : Echantillon B 2 S - pyrite (faciès framboïde) (x 2.900)

Photo 6 : Echantillon B 1 S (x 1.400)

PLANCHE VI

Photo 1 : Echantillon C 2 L - fentes de congélation (x 140)

Photo 2 : Echantillon C 2 S (x 490)

Photo 3 : Echantillon C 2 L - fentes de congélation (x 350)

Photo 4 : Echantillon C 2 S - empreinte de grain (x 1.050)

Photo 5 : Echantillon C 2 L (x 1.400)

Photo 6 : Echantillon C 1 L - filonnets de carbonate ? (x 350)

On remarque que les échantillons lyophilisés présentent une structure plus "ouverte" que les échantillons séchés (Planche III, photos 1,2,3,4). Ce phénomène est du à la conservation de la structure originelle, mais aussi parfois à l'ouverture de fentes dues à la congélation (Planche VI, photos 1 et 3).

Les échantillons A (Planche III) surconsolidés (P_c = 2,2 kg/cm^2) d'aspect assez compact, se composent de gros grains (quartz) recouverts de petites plaquettes argileuses. On note la présence de liaison de type rigide formant un pont entre deux grains (Planche III, photo 5).

Les échantillons B (Planches IV et V) sous-consolidés (P_c = 0,84 kg/cm^2) sont composés de nombreux gros grains couverts de plaquette d'argiles (Planche IV, photos 1, 3,4). La structure paraît plus lâche et l'on remarque des structures qui rappellent celle imaginée par T.K. Tan, 1957, en "château de cartes" (Planche IV, photos 5 et 6). On peut remarquer les liaisons "côté-côté" et "côté-face" alors que les empilements "face-face" sont pratiquement inexistants. Ce mode d'arrangement laisse de nombreux vides. Cependant, le modèle de structure qui s'adapterait le mieux, le cas présent, serait celui suggéré par R. Pusch (1962) : chaînes de petites particules (argiles et autres) entre des agrégats ou entre des particules plus grosses (Planche V, photos 1 et 3). De la pyrite (faciès framboïde) a pu être observée dans un échantillon (photo 5). Les échantillons C normalement consolidés (P_c = 1,18 kg/cm^2) présentent les mêmes caractéristiques avec cependant des vides qui peuvent être interprétés comme des empreintes laissées par des grains de quartz (Planche VI, photos 4 et 5).

Un réseau de filonnets présent dans un échantillon pourrait indiquer une recristallisation de carbonates (dolomie ?) dans des joints (Planche VI photo 6).

8.4.4. Etude micropaléontologique (Planche VII)

Certains microfossiles, qui ont pu être dégagés, ont été déterminés comme des foraminifères : Islandiella teretis (Tappan) (Photo 1) et Islandiella islandica(Norvang)? (ph.2) Certains fragments et les fossiles restés en place , par contre, n'ont pas pu être déterminés (ph.3,4,5,6).

Aucun pollen n'a été observé. Cependant, ce point mérite d'être précisé car ils s'avèrent très utiles pour la datation des formations quaternaires.

PLANCHE VII

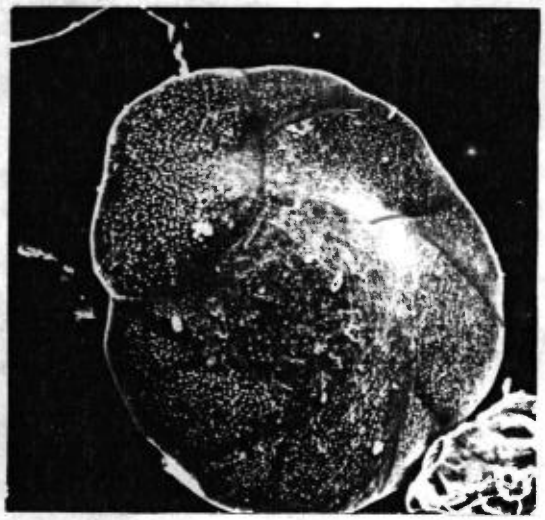


photo 1

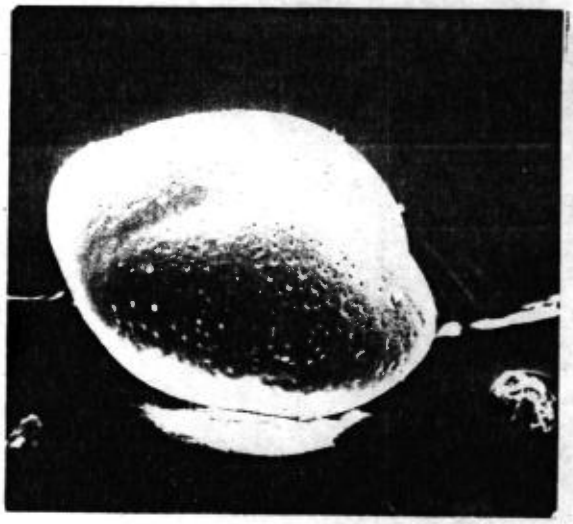


photo 2

islandiella ~~sl~~ hillenae

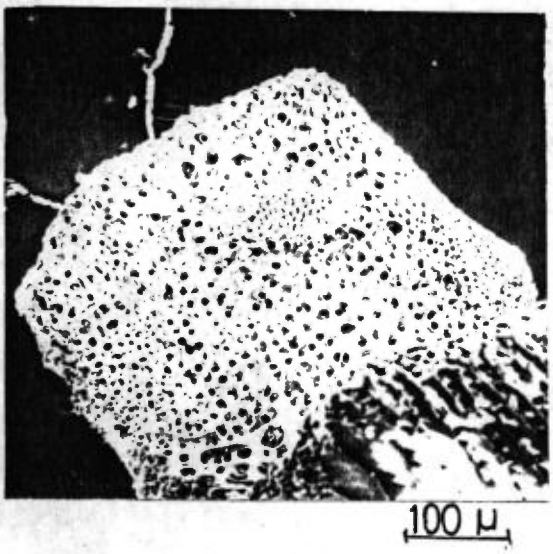


photo 3

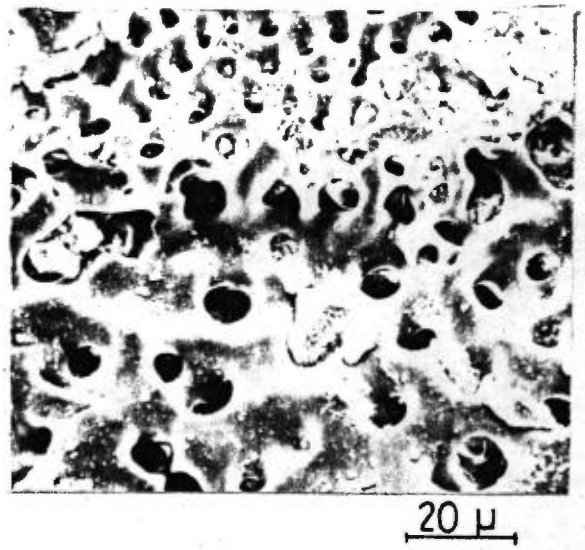


photo 4

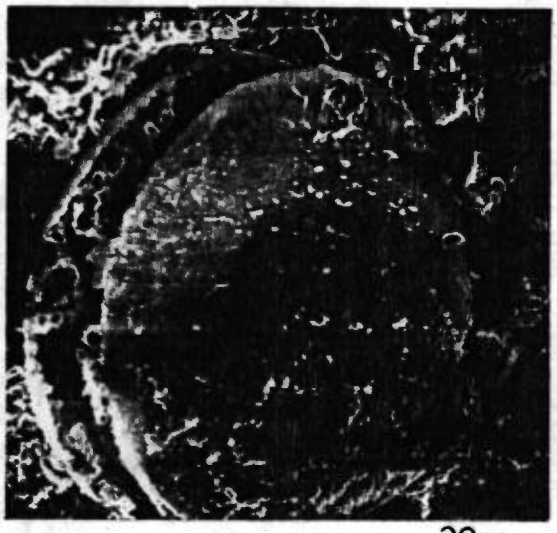


photo 5



photo 6

PLANCHE VII

Photo 1 : Islandiella teretis (Tappan) (x 140)

Photo 2 : Islandiella islandica (Norvang)? (x 350)

Photo 3 : fragment de fossile non déterminé (x 140)

Photo 4 : détail du fragment de fossile non déterminé (x 700)

Photo 5 : microfossile non déterminé en place (x 260)

Photo 6 : microfossile non déterminé en place (x 350)

8.5. Microscopie optique (microscope polarisant)

8.5.1. Préparation des échantillons

Les échantillons lyophilisés étant très légers et friables ne permettent ni le sciage, ni le polissage nécessaire à la réalisatinn des lames minces.

Il est donc indispensable de continuer la préparation par une inclusion dans une résine très fluide pour éviter la destruction de l'échantillon. L'inclusion se fait sous vide, la résine prend la place occupée par l'eau par capillarité. On utilise un mélange à trois composants dans les proportions suivantes :

- une résine époxy : épikote 815 — 20 g
- un diluant : Butyglycidilether (DY021) — 5 g
- un durcisseur : Diéthylénetriamine (DETA) — 2,5 g

La polymérisation se fait en 24 h à l'étuve à 60°C. On n'observe que très peu de retrait, ce qui conserve à l'échantillon sa structure initiale.

Deux lames minces par échantillon ont été réalisées systématiquement, une parallèlement au dépôt et une autre perpendiculairement à ce dépôt.

8.5.2. Etude des lames minces

a) Structure

L'examen des lames minces montre que la structure interne des sédiments n'est pas modifiée. On note cependant dans certains échantillons riches en eau C une microfissuration en général perpendiculaire au dépôt, dont on peut se demander si elle n'était pas déjà potentielle dans le sédiment (exsudation de l'eau ou des gaz lors de la compaction).

D'autre part, on peut signaler qu'il se produit parfois un certain décollement des zones riches en particules fines au contact de zones riches en éléments plus grossiers B . On peut penser comme L. Barbaroux, M. Chauveau, Y. Morel et F. Ottmann (1971) que la congélation a "ouvert" la discontinuité occupée par une pellicule d'eau au contact des éléments fins/grossiers.

Aucune stratification, aucun litage ni orientation préférentielle de minéraux n'est visible.

PLANCHE VIII

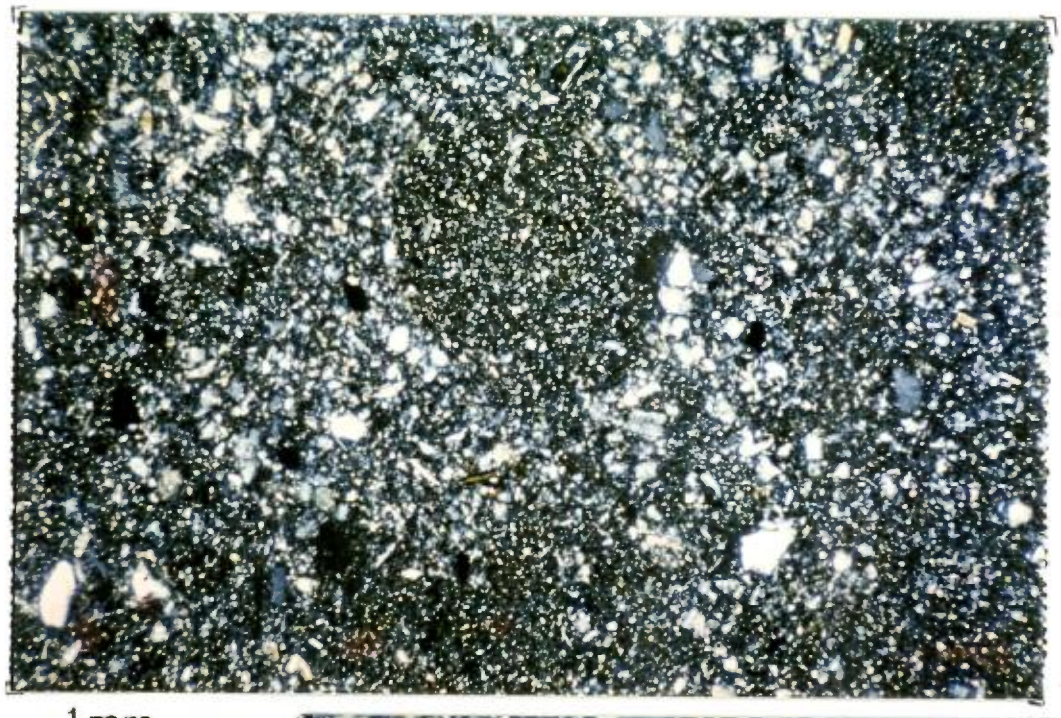


Photo 1 :
structure en "amas"
(LP. x 16)

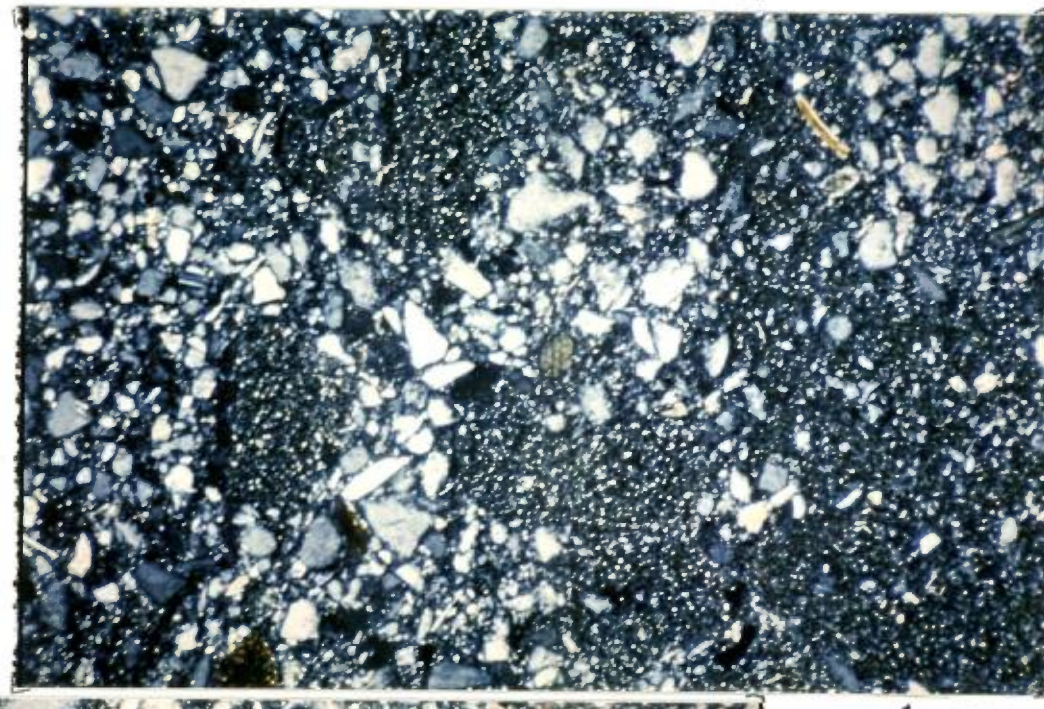


Photo 2 :
structure en
"amas"
(LP. x 16)

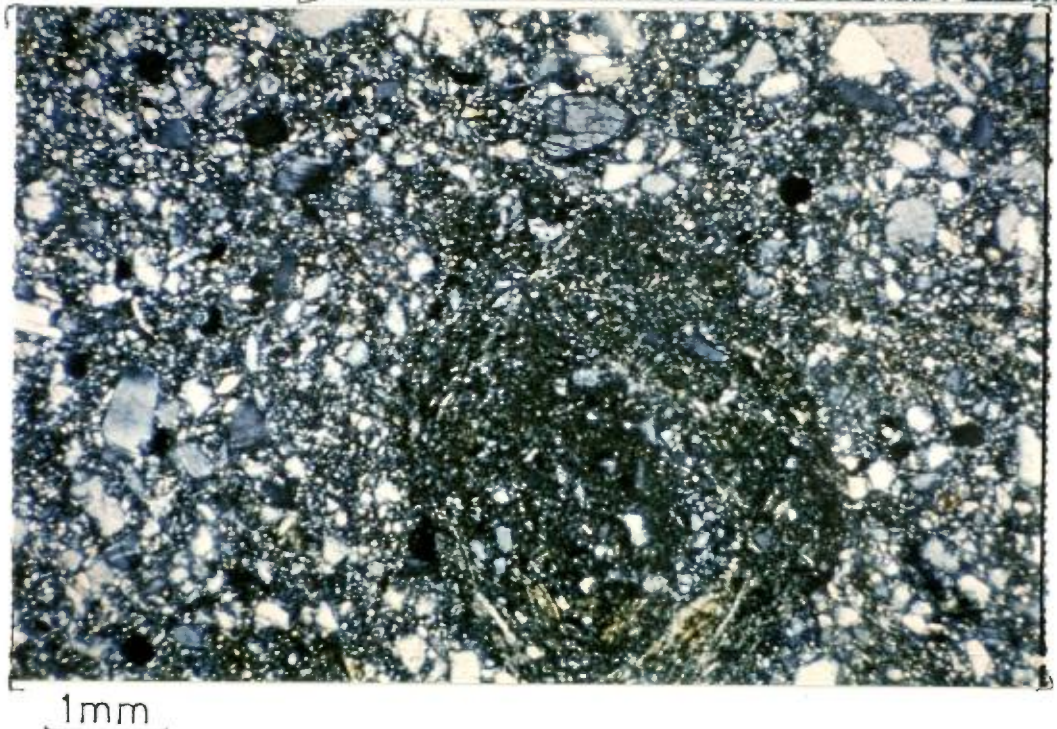


Photo 3 :
structure en "amas"
(LP. x 16)

On peut cependant remarquer une structure particulière en "amas" pour les échantillons les plus grossiers B . Ces amas formés de particules grossières (quartz et feldspath) représentent les noeuds d'un réseau dont les mailles sont constituées par des filonnets d'éléments grossiers . Ces filonnets, entourant des amas de particules plus fines (phyllites et quartz) (Planche VIII).

b) Composition minéralogique

En plaque micce, la résine apparaît incolore (en lumière naturelle) avec cependant quelques bulles de couleur plus foncée. Tous les échantillons présentent la même composition minéralogique avec principalement les minéraux suivants :

- quartz,
- feldspath : plagioclases (Albite - Andésine)
- phyllites : biotite, micas blancs, chlorite,
- amphiboles : hornblende verte, actinote (riche en fer),
- épidote : pistacite,
- grenat,
- carbonates,
- minéraux opaques : magnétite - (Planche IX).

Il est à noter la présence de pseudomorphoses : plagioclases complètement séricitisés de fragments de roche et de microfossiles à test carbonaté (Planche X)

9) Porosimétrie

9.1. Généralités

1) Principe de la porosimétrie

La porosité P d'un échantillon se définit par la relation :

$P = \frac{Vp}{Vt} \times 100$ Vp : volume des pores Vt : volume total

Le volume des pores, lui même, peut s'exprimer par unité de volume ou de poids d'un échantillon. Ce volume peut être obtenu par différence de poids avant et après saturation par un liquide mouillant.

Cependant, si l'on veut analyser la répartition des volumes partiels des pores en fonction de leur rayon d'entrée, il est nécessaire d'utiliser le mercure, liquide non mouillant, sous pression.

9.2. Principe de porosimètre à mercure

Le principe du porosimètre à mercure repose sur la loi de Jurin. Si l'on plonge un tube capillaire dans un récipient contenant du mercure (liquide non mouillant) au niveau du ménisque, la pression dans le mercure est supérieure à la pression dans l'air. Pour faire pénétrer le mercure dans le tube capillaire, il est nécessaire d'appliquer une pression, et cette pression P (absolue) doit être d'autant plus élevée que le rayon r du tube capillaire est faible :

PLANCHE IX

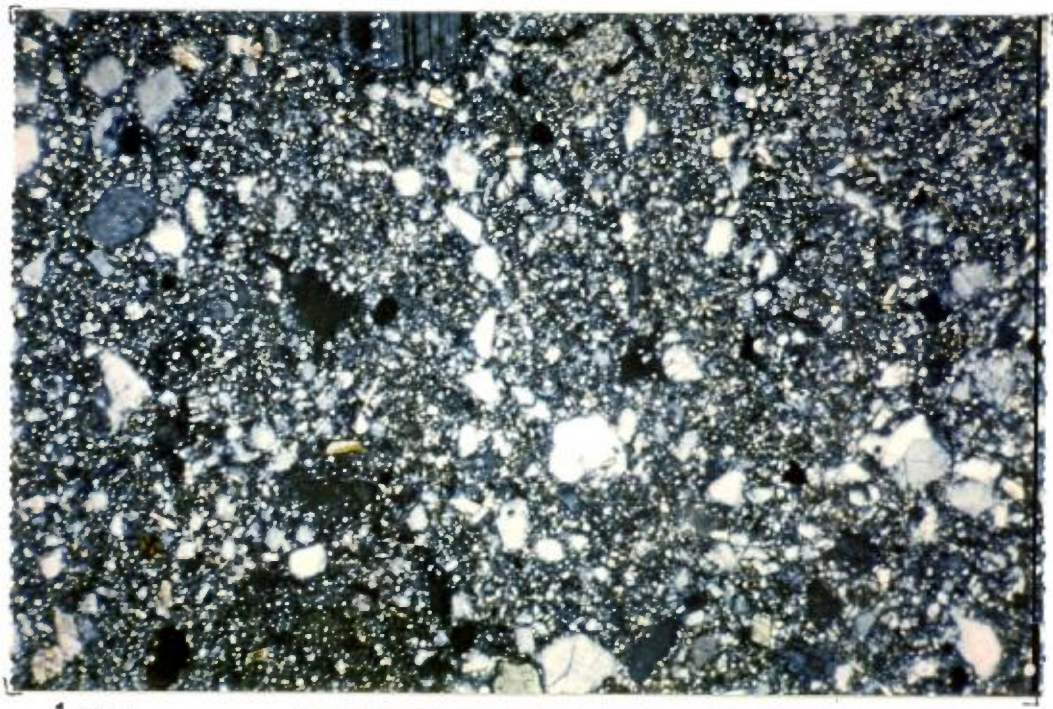
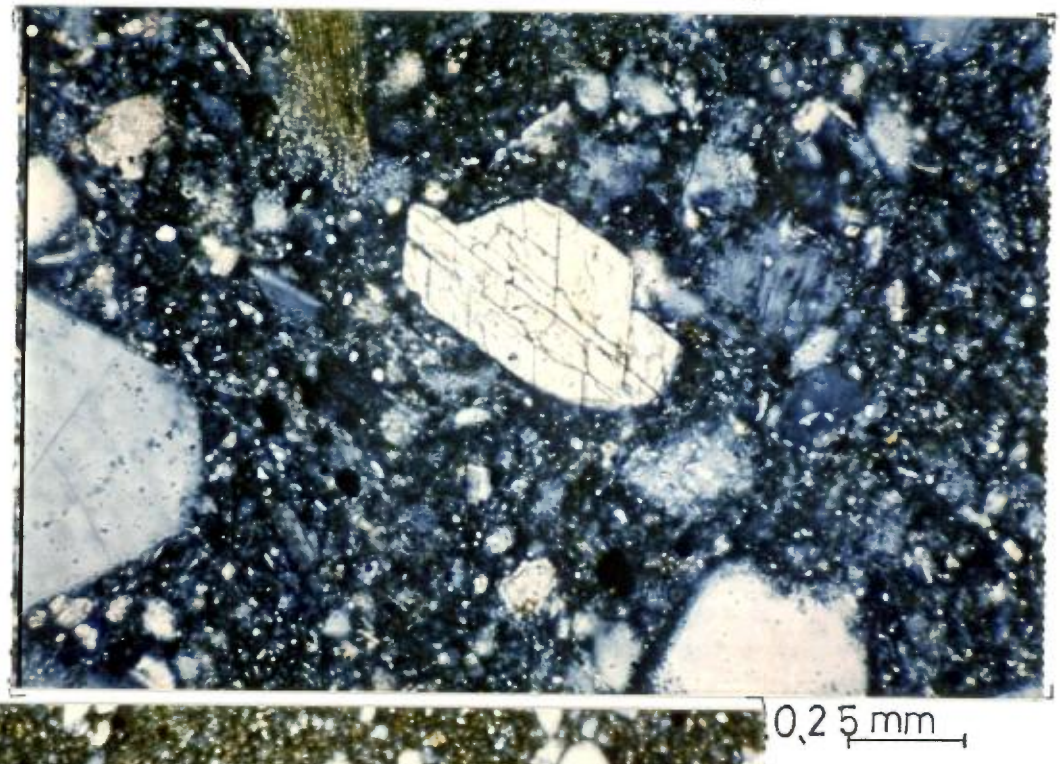


Photo 1 :

quartz et feldspath (plagioclase maclé) (LP. x 16)

Photo 2 :

section basale d'amphibole verte (LP. x 64)



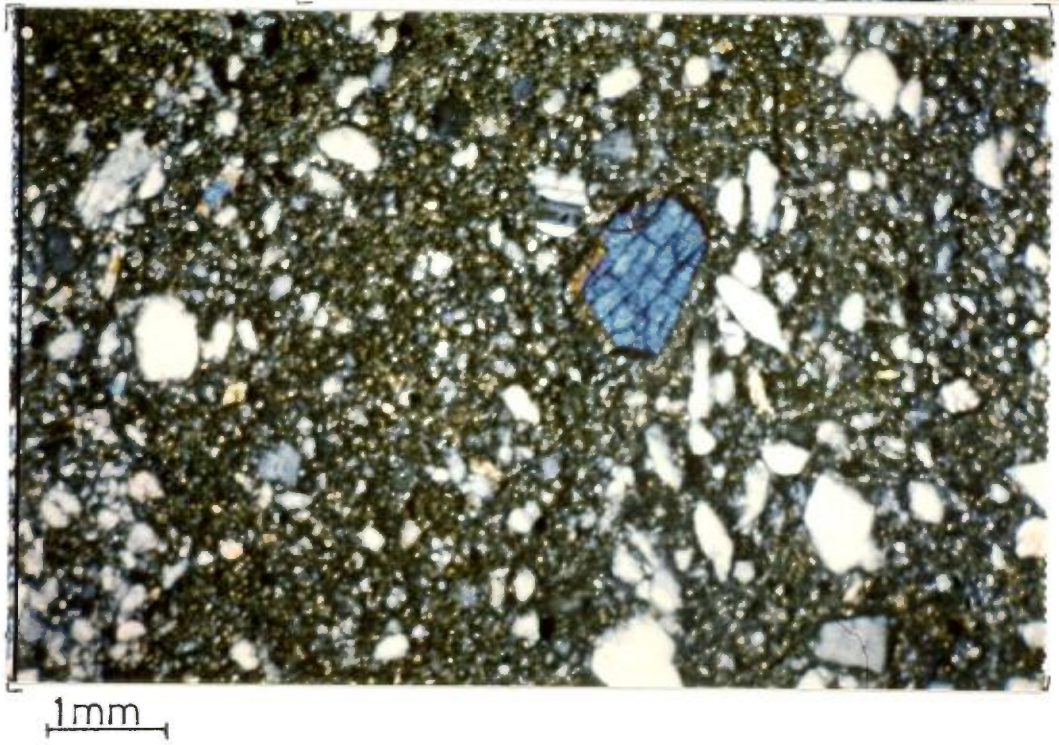


Photo 3 :

cristal d'épidote (Pistacite) (LP. x 16)

PLANCHE X



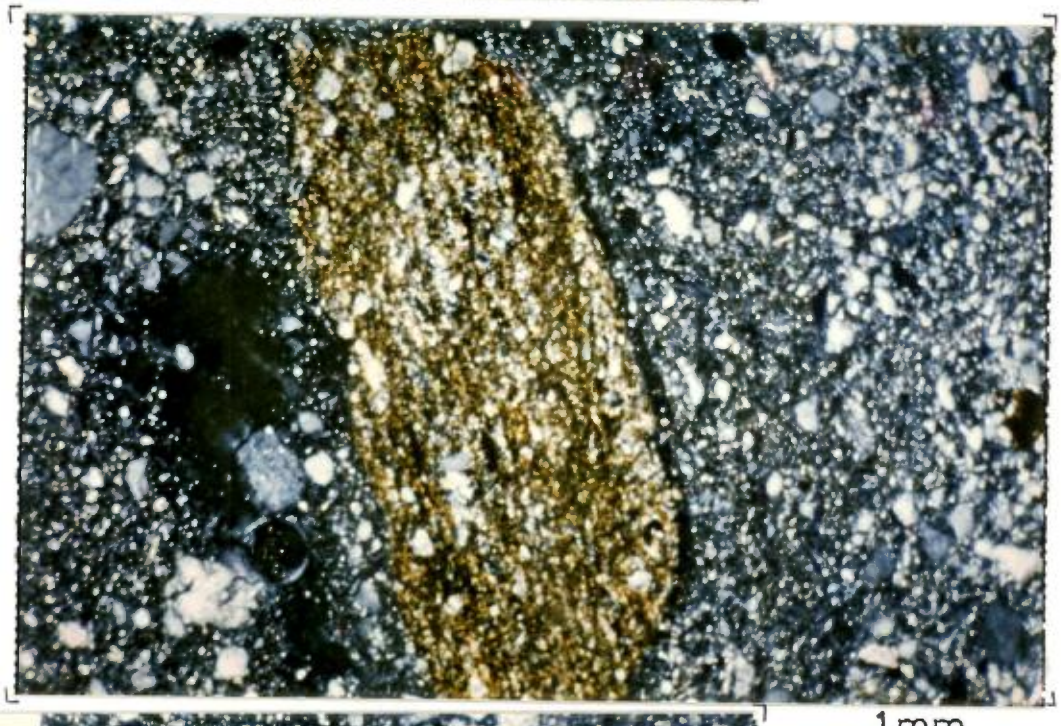
1mm

Photo 1 :

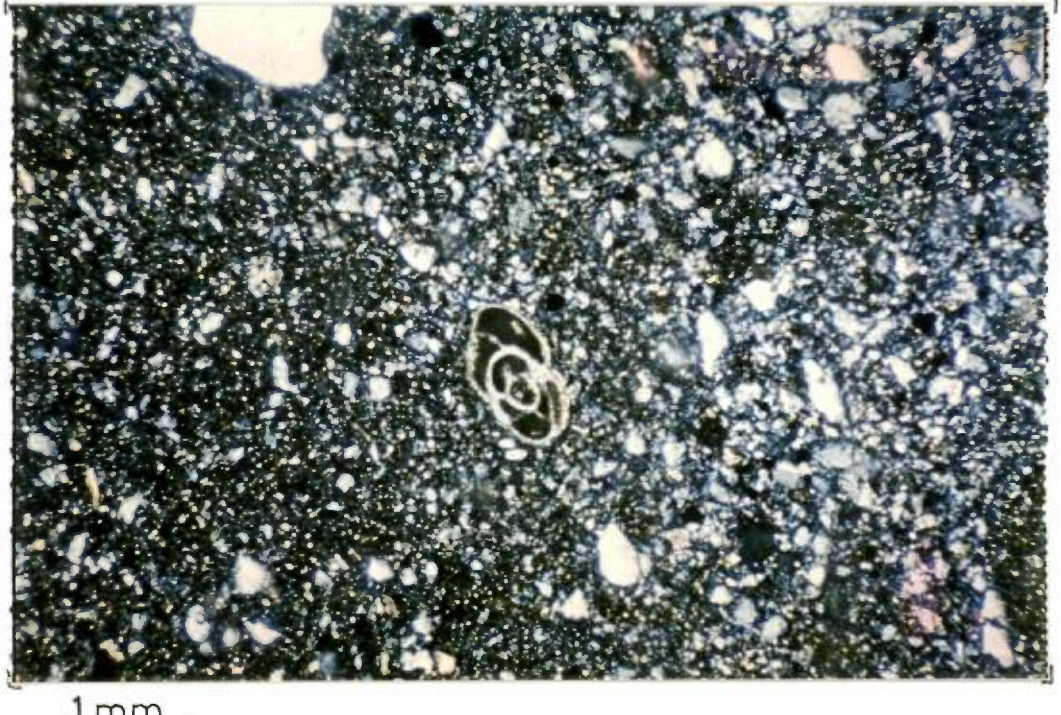
fragment de roche (LP. x 16)

Photo 2 :

pseudo-morphose plagioclase complètement sériciti-sé (LP. x 16)



1mm



1mm

Photo 3 :

microfossile à test carbonaté (LP. x 16)

$$P = \frac{2T \cos \Theta}{r}$$

T : tension superficielle du mercure
Θ : angle de contact du mercure et de la paroi du tube capillaire
r : rayon du tube capillaire.

Il en est de même pour faire pénétrer le mercure dans les pores d'un échantillon, pores que l'on assimile à des cylindres de rayon décroissant.

Dans le système C.G.S., on a :

T = 484 dynes /cm à 25°C

Θ = 141,3

En exprimant P en kg/cm^2, r est donné en Angströms par la relation :

$$r\ (\text{Å}) = \frac{75000}{P(\text{kg/cm}^2)}$$

1.1.
1.2. Le porosimètre

On a effectué les mesures de porométrie sur un appareil Carlo Erba (fig.) ; en augmentant la pression de 1 à 1500 kg/cm^2, il est possible de déterminer le volume partiel des pores de rayon d'entrée compris entre 75.000 et 50 Å.

9.3.1. Préparation des échantillons

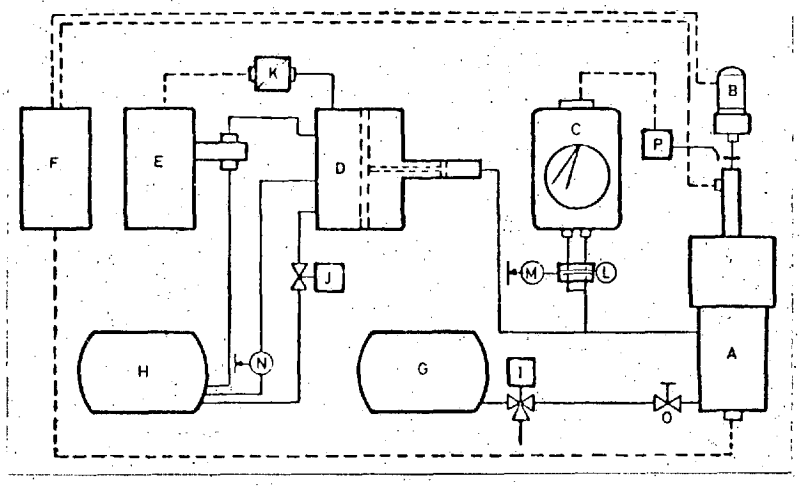
L'échantillon est pesé, puis placé dans un dilatomètre en verre dont la partie supérieure est composée d'un tube mobile de section calibrée constante.

A l'aide d'un dispositif de remplissage et d'une pompe à vide ($<2.10^{-2}$ mm de Hg), l'échantillon préalablement séché à l'étuve (60°C pendant 24 h) est dégazé, et le dilatomètre (tube calibré compris) est rempli de mercure propre ; au cours de cette opération, les pores de rayon supérieur à 75.000 Å (7,5 microns) sont saturés par le mercure.

9.3.2. Mesure

Le dispositif de mesure consiste en un petit autoclave (fig.), dans lequel est placé le dilatomètre. Le mercure fait contact avec une aiguille dont l'avancement est contrôlé par un moteur synchrone. Le niveau de mercure est suivi électriquement au moyen d'un relais électronique: quand un accroissement de la pression entraîne une baisse de niveau dans le tube calibré, l'aiguille ne fait plus contact avec le mercure ; le moteur se met en mouvement et le contact est rétabli.

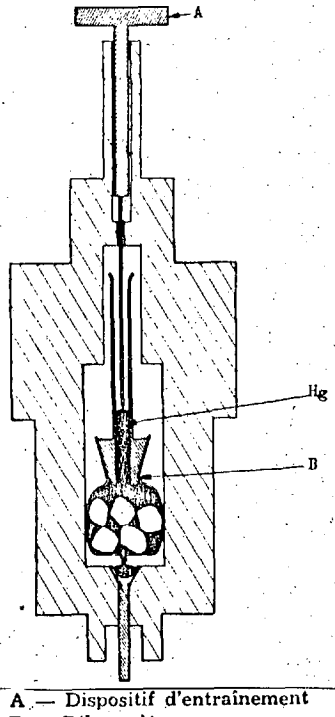
En même temps, un système électronique fait avancer le diagramme d'enregistrement et le niveau du mercure se trouve ainsi enregistré.



A — Dispositif de mesure (voir détail figure 11)
B — Moteur d'avancement de l'aiguille (voir détail figure 11)
C — Enregistreur de pression
D — Multiplicateur de pression
E — Pompe
F — Relais
G — Réservoir d'alcool
H — Réservoir d'huile
I-J — Valves électro-magnétiques
K — Manomètres de commande
L — Valve automatique
M — Valve de sécurité « haute pression »
N — Valve de sécurité « basse pression »
O — Valve de haute pression à commande manuelle
P — Dispositif d'avancement du diagramme d'enregistrement

33 a

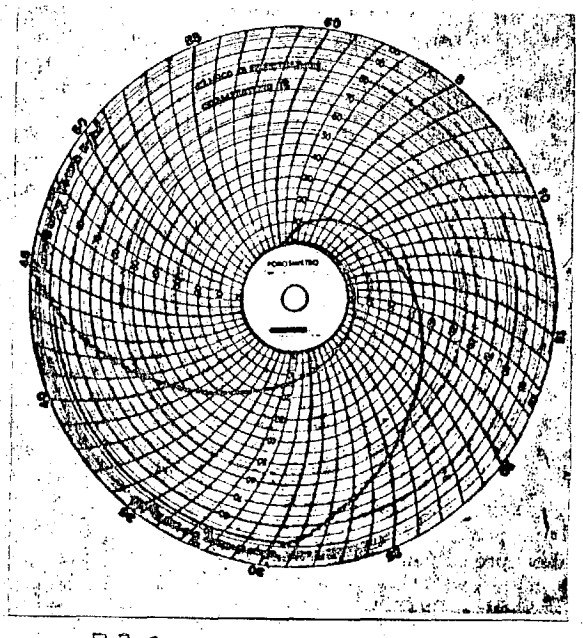
Fig. 33a : schéma du porosimètre à mercure, type Carlo-Erba



A — Dispositif d'entraînement
B — Dilatomètre
Hg — Mercure

33b

Fig. 33b : porosimètre type Carlo-Erba
schéma du dispositif de mesure



33 c

Fig. 33c : porosimètre type Carlo-Erba
diagramme d'enregistrement

La pression nécessaire est produite dans le multiplicateur de pression. Il consiste en un système différenciel de deux pistons : piston de basse pression et piston de haute pression travaillant dans un rapport de 1 à 100.
La basse pression est transmise par l'huile ; la haute pression est transmise au mercure à l'aide de l'alcool comme fluide intermédiaire. La lecture des données de mesures se fait sur un diagramme circulaire : les pressions sont lues en abscisses et la baisse du niveau de mercure dans le tube calibré en ordonnées. Deux courbes sont enregistrées par échantillon, l'une pour les pressions comprises entre 1 et 100 kg/cm^2, l'autre pour celles comprises entre 1 et 1000 kg/cm^2 (fig.23 bis).
En fait, l'enregistrement de la baisse de niveau du mercure ne se fait pas en continu, mais par intervalles constants de 1/6 mm chaque décrochement de la courbe enregistrée correspond, par conséquent, à un volume fixe de mercure ayant pénétré dans l'échantillon dans un intervalle de pression donnée - ou encore, dans un intervalle de rayon d'entrée de pore donné.

3.3.3. Représentations des résultats

Courbes cumulées : "volume des pores - rayon d'entrée". Ces courbes représentent la répartition des volumes des pores en fonction de leur rayon d'entrée. Les volumes des pores (exprimés en mm^3/g) sont portés en ordonnées, selon une échelle arithmétique. Les rayons d'entrée des pores (exprimés en $\mathring{A}$) sont portés en abscisse, selon une échelle logarithmique. Histogrammes : "Volume des pores - rayon d'entrée". L'histogramme de la courbe différencielle de répartition des volumes partiels des pores pour des classes (intervalle arithmétique constant) fixé arbitrairement. L'avantage de ce mode de représentation est d'attirer l'attention du pétrographe sur certaines "populations" de pore, essentiellement identifiables au microscope (M.E.B., M.E.T., etc...)
Courbes cumulées et histogrammes sont exprimés au cours de cette étude, en pourcentage du volume poreux total ; elles représentent dès lors, la saturation des pores par le mercure, exprimée en pourcentage de leur volume, en fonction de leur rayon d'entrée.

9.4. Commentaires des résultats

L'étude porométrique mise en oeuvre sur les échantillons B1 et B2 séchés et lyophilisés, a permis de montrer leur très grande porosité. Cependant, les échantillons séchés à l'air montrent une porosité presque de moitié inférieure à celle des échantillons lyophilisés.

La porosité est donnée ici en volume poreux par unité de poids(mm^3/g)

	Lyophilisé	Séché
B1	446,9	253,7
B2	334,6	188,8

L'analyse des courbes cumulatives montre une distribution de pores très homométrique pour les échantillons séchés (fig.24), alors qu'elle est hétérométrique pour les échantillons lyophilisés (fig.25).

Ces histogrammes (fig.26) rendent mieux compte de ces phénomènes. Les échantillons séchés présentent une distibution unimodale avec un mode très large entre 0,05 et 0,5 microns.

Les échantillons lyophilisés présentent eux une distribution bimodale avec deux classes de pores très représentées : une entre 0,05 et 0,1 microns et une autre entre 0,8 et 2 microns.

Si l'on admet que la lyophilisation ne modifie pas la structure originelle du sédiment, les courbes et les histogrammes permettent de déduire deux conséquences dûes au mode de déshydratation.

La dessication à l'air entraîne :

- la fermeture des pores les plus gros, compris entre 0,8 et 2 microns liée au tassement et au retrait,

- l'ouverture de pores entre 0,5 et 0,1 microns, liée à la présence de fentes de dessication.

On a donc des sédiments très poreux avec principalement des pores dont le diamètre d'entrée est compris entre 0,05 et 0,1 microns et entre 0,8 et 2 microns.

POROMETRIE

courbes cumulatives

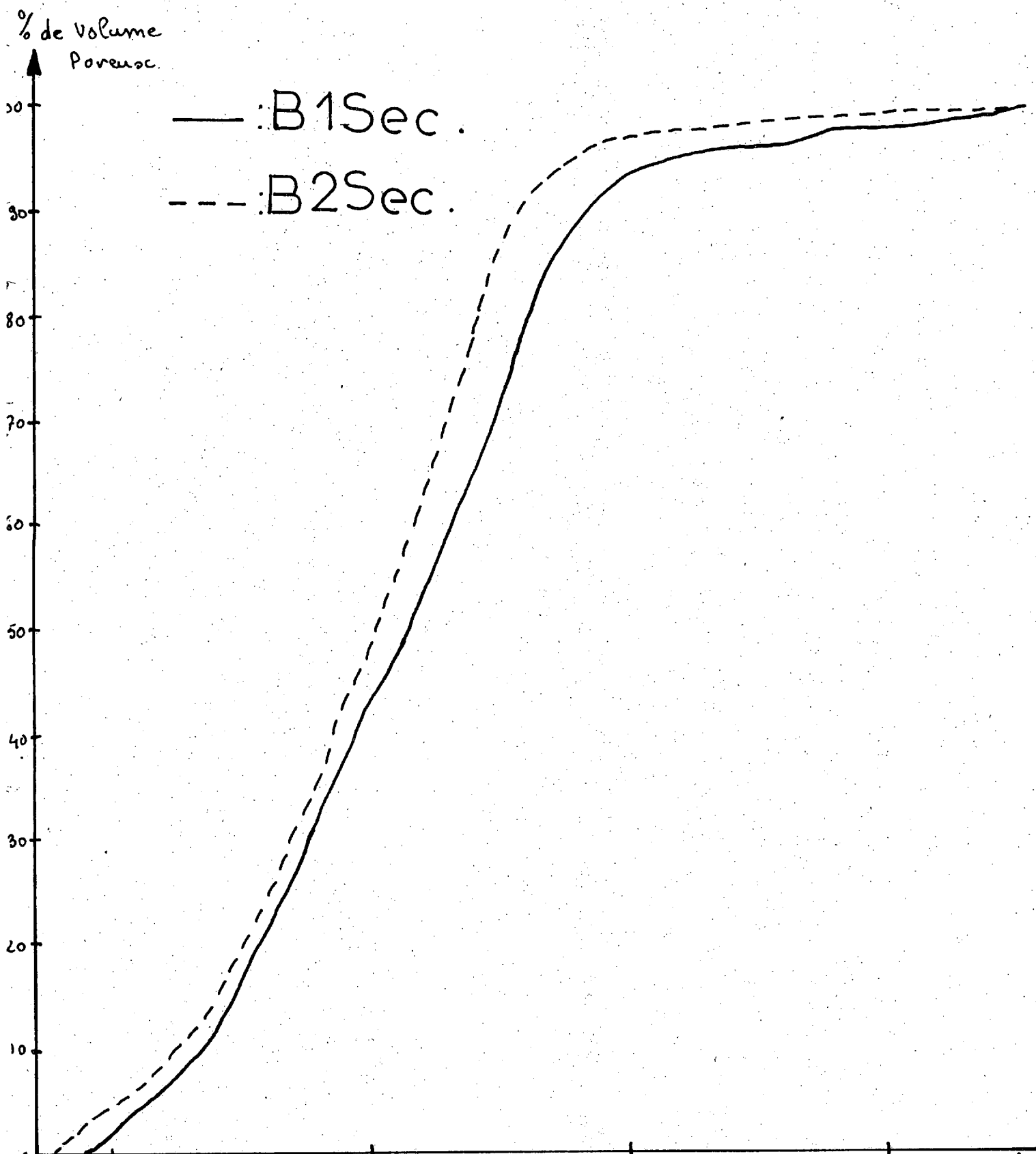


fig 24

POROMETRIE

courbes cumulatives

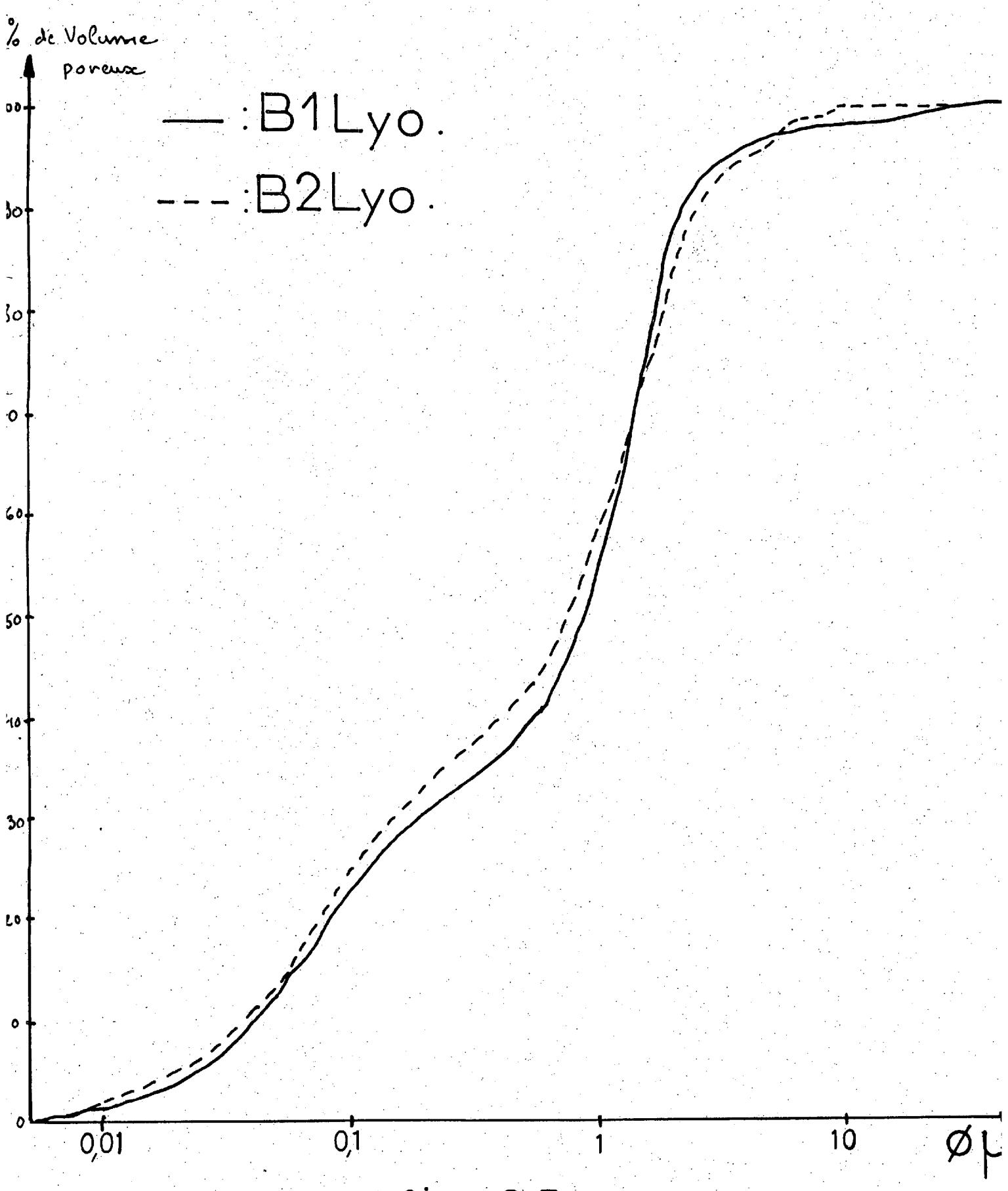


fig 25

POROMETRIE

histogrammes

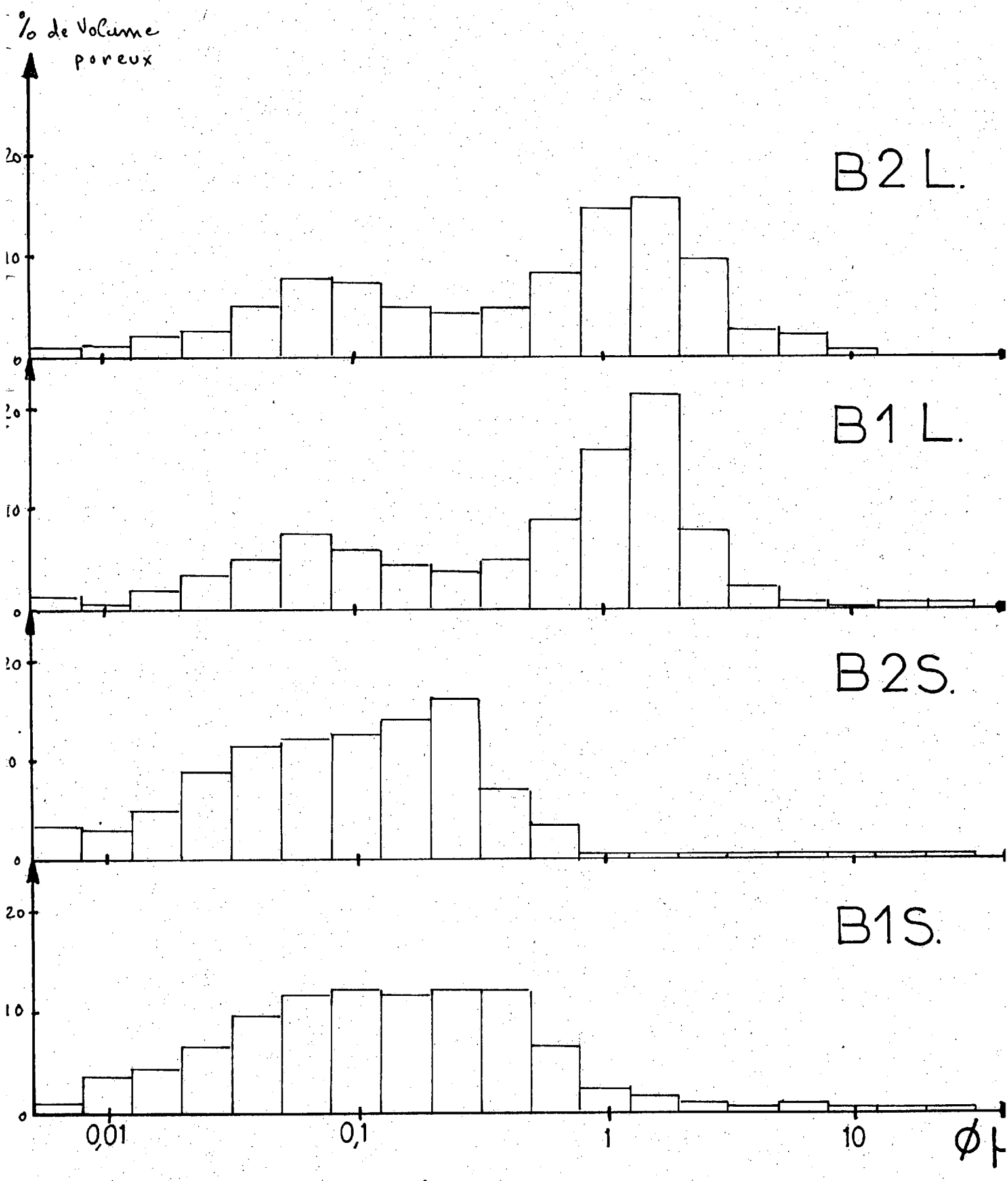


fig 26

III - CONCLUSION

Cette étude portant sur six échantillons d'argile de la mer Champlain (Bécancour, Québec) a permis de préciser certaines caractéristiques de ce sédiment quaternaire :

- la granulométrie,
- les teneurs en carbonates et matières organiques,
- la minéralogie,
- la structure,
- la porosité.

1) La granulométrie

Sédiments de composition granulométrique très variable allant du limon (silt) grossier à l'argile avec tous les intermédiaires possibles (fuseau granulométrique très large).

2) Teneur en carbonates et en matières organiques

Généralement peu carbonatés (2 à 3 %), certains échantillons B présentent une teneur notable (10 %). On peut alors penser à un apport différent.

3) Minéralogie

Principalement constitués de quartz et feldspath (plagioclases) avec peu de phyllites (illite et chlorite) et quelques minéraux lourds : amphiboles, épidotes et magnétite.

4) Structure

Elle n'est pas nette et paraît difficilement reliable à la pression de préconsolidation. Cependant, on peut admettre qu'il existe une bonne similitude avec le modèle de R. Pusch (1962) "chaînes de fines particules reliant des agrégats et des particules plus grosses".

5) Porosité

Très grande pour les échantillons, elle dépend beaucoup du mode de déshydratation. Présence de deux grandes classes de pores de diamètre compris entre 0,05 et 0,1 microns et entre 0,8 et 2 microns.

La sensibilité assez faible (St = 5) de ces échantillons pourrait être expliquée par les faibles teneurs de substances à haut pouvoir dispersif (matières organiques)et par l'absence de structures nettement métastables (structure en "château de cartes" par exemple).

Il apparaît cependant difficile de conclure sur les causes des propriétés de ces argiles, car certaines analyses qui auraient pu se révéler très utiles : analyse chimique, composition de l'eau interstitielle, teneur en sels etc... n'ont pu être faites. Un plus grand nombre d'échantillons paraît nécessaire pour une étude plus rigoureuse. On pourrait ainsi obtenir de meilleures corrélations et accorder aux résultats une plus grande valeur.

Cette étude, essentiellement analytique,est l'amorce d'une étude plus complète et aura permis de mettre en évidence les diverses voies vers lesquelles il faudra orienter les recherches ultérieures.

B I B L I O G R A P H I E

ALIX Y. et OTTMANN F., 1969, "Emploi de la lyophilisation pour l'induration d'un sédiment meuble saturé d'eau", C.R. Somm. Soc. geol. Fr. Fasc 3, Séance du 3.3.1969, pp. 77-79.

ALLEN V.T. et JOHNS W.D., 1960, "Clays and clay minerals of New England and Eastern Canada", Soc. Am. Bull. 71, pp. 75-86.

ANDRESEN A. et BJERRUM L., 1956, "Vane testing in Norway", Symposium on Vane shear testing of soils, ASTM, STP n° 193, Am. Soc. Testing Mats, pp. 54-60.

AYLMORE L.A.G. et QUIRK, P.P., 1960, "Domain or Turbostratic Structure of Clays", Nature, 187, pp. 1046-1048.

BARBAROUX L., CHAUVEAU M. MOREL Y. et OTTMANN F., 1971, "Quelques applications de la lyophilisation à l'étude des sédiments meubles ou en suspension en lames minces ou au microscope électronique", Revue de Géogr. phys. et de géol. dynam. Vol. XIII , fasc.4, pp. 369-378 et 4 planches.

BARBAROUX L. BOURON-BOUGE A. et al.,1972, "Utilisation de la radiographie, de la gamma densimétrie et du microscope électronique à balayage pour l'étude des sédiments marins , Intérêt pour la Géol. de l'Ing."I.A.E.G. n°6, pp.48-74.

BARDEN L. , 1972, "The relation of soil structure to the engng. geology clay soil" Q.I. engn. geol. 5, pp. 85-102.

BARDEN L. et SLIDES G.R., 1970, "Engineering behaviour and structure of compacted clay" J. Soil. Mech. Found. Div. Am. Soc. Civ. Engng. 96 (SM4), pp. 1171-1200.

BELAND J., 1956, "Nicolet Landslide", Proc. Geol. Assoc. Can., 8, pp. 143-156.

BERGSETH H., 1961, "Vergeich der elektrophoretischen Wanderungsgeschwindigkeit für Teilchen eines quellfäbrigen und eines nicht quellfäbrigen Schichtsilikates", Kolloid-Z, 179 (1), pp. 67-69.

BERRY R.W. et JORGENSEN P., 1969, "Separation of illite and chlorite in clays by electromagnetic technique", Clay and Clays Minerals, 8, pp. 201-212.

BERRY R.W. et JORGENSEN P., 1971, "Grain size, mineralogy and chemistry of a quick clay sample from the Ullensaker slide Norway", Engng. Geol. 5, pp. 73-84.

BISCAYE P.E., 1964, "Distinction between kaolinite and chlorite in recent sediments by X.Ray diffraction", Amer.Mine.49, pp. 1281-1289.

BJERRUM L., 1954, "Geotechnical Properties of Norwegian Marine Clays", Geotechnique 4, pp. 49-69.

BJERRUM, L. et ROSENQUIST I., 1956, "Some experiments with artificially sedimented Clays", Geotechnique, 6 , pp.124-136.

BJERRUM L., 1964, "Problemes de fondation dans les argiles sensibles de Norvège", Sols Soils, 11, pp. 11-20.

BOILLOT G., 1968, "Travaux pratiques de pétrographie sédimentaire", CDU, 56 p.

BOZOZUK M.,1963, "The modulus of elasticity of Leda Clay from field measurement", Can. Geotech. J. , 1, pp. 43-51.

BOZOZUK M. et BURN K.N., 1960, "Vertical ground movements near elm trees", Géotechn. 10, pp. 19-32.

BROWN G.W., 1961, "The X Ray identification and cristal structure of clay minerals" Mineralogical Soc., London, 544 p.

BRYDON J.E., PATRY L.M, 1961, "Mineralogy of Champlain Sea sediments and Rideau Clay soil profile", Can. Jour. Soil.Sc. 41, pp. 169-181.

BURKE H. et DAVIS W., 1957, "Physical properties of marine clay and their effect on the Grass River Lock excavation", Proc. Intern. Conf. Soil Mech. Found.Engng 4 th, London 1956, 2, pp. 301-304

CABRERA J.G. et SMALLEY I.J., "Quickclays as products of glacial action : a new approach to their nature, geology, distribution and geotechnical properties", Engng. Geol., 7, pp. 115-133.1973.

CADOR C., 1970, "Techniques de préparation employées en microscopie électronique", Bull. Liaison Labo. Routiers P. & Ch. N° 46, pp. 93-100.

CASAGRANDE A., 1932, "The Structure of Clay and its importance in Found. Engng", Journal of BSCE.

CHAGNON J.Y., 1968, "Les coulées d'argile dans la province de Québec", Naturaliste Can., 95, pp. 1327-1343.

CONLON R.J., 1966, "Landslide on the toulnoustuc River, Québec" Can. Geotech. Journ. 3, pp. 113-144.

CRAWFORD C.B., 1959, "The influence of the rate of strain on effective stresses in sensitive clay", Am. Soc. testing Mater. Spec. Tech. Publ., 254, pp. 36-61.

CRAWFORD C.B., 1961, "Engineering studies of Leda Clay", R.F. Legget (Ed). Soils in Canada, Ed. Soc. Royale du Can., Publ. sp. n°3, pp. 200-217.

CRAWFORD, C.B., 1963, "Cohesion in an Undisturbed Sensitive Clay", Geotech.13,pp. 132-145.

CRAWFORD, C.B. 1968, "Quick Clays of Eastern Canada", Engng Geol. , 2, pp.239-245.

CRAWFORD C.B. et EDEN W.J., 1965, "A comparison of Laboratory results with in situ properties of Leda Clay", Proc. intern. Conf. Soil Mech. Found. Engng, 6th Montreal 1964, 1, pp. 31-35.

DAWSON G.M., 1899, "Remarkable landslip in Pontneuf County, Quebec", Bull. Geol. Soc. Am., 10, pp. 474-490.

DEBYSER J., 1957, "Note sur un procédé de préparation des plaques minces dans les sédiments fins actuels", Revue de l'Institut Français du Pétrole, XII, n°4, pp. 489-492.

DE JONG et WAPKENTIN B.P., 1965, "Shrinkage of soil samples with warying clay concentrations", Can. Geotech. Journal, 2, pp. 16-22.

DELOYE F.X. et CADOR C., 1972, "Méthode rapide de dépouillement de diagrammes de microdiffraction électronique", Bull. Liaison Labo P & C, n°59, pp. 9-11.

DURRIEU J., 1965, "Nouvelle classification des sols proposée par le Laboratoire Central des P & C", Bull. Liaison P. & C. N° 16, 16 p.

EDEN W.J., 1956, "The Hawkesbury landslide", Tenth Can. Soil Mech. Conf. Proc., Nat. Research Council Assoc. Com. on Soil and Snow Mech. Tech. Memoir, 46, pp. 14-22.

EDEN W.J. et CRAWFORD C.B., 1957, "Geotechnical Properties of Leda Clay in the Ottawa Area", Proc., 4th intern. Conf. on Soil Mech and Found. Engng, 1, pp. 577-594.

EDEN W.J. et HAMILTON J.J., 1957, "The use of a field vane apparatus in sensitive clay", Symp. In-Place Shear Testing Soil Vane Method., Am. Soc. Testing Mater., Spec. Tech. Publ., 193, pp. 41-53.

EDEN W.J. et KUBOTA J.K., 1961, "Some observations on the measurement of sensitivity of clays", Proc. Am. Soc. Testing Mater., 61, pp. 1239-1249

GADD N.R., 1956, "Geological aspects of eastern Canada flow slides", Tenth Can. Soil Mech. Conf. Proc., Natural research Council Assoc. Com. on Soil and Snow Mech. Tech. Memoir 46, pp. 2-8.

GADD NR, 1960, "Surficial Geology of the Becancour map area, Quebec 31 1/8", Dept Mines and tech. Surveys Canada Paper 59-8, 34 pp.

GADD N.R., 1962, "Surficial geology of Ottawa map area, Ontario and Quebec", Geol. Surv. Can. Paper 62 (16), 4 p.

GADD N.R., 1971, "Pleistocene geology of the central St Lawrence Lowland", Geol. Surv. Can. Mem. 359, 153 pp.

GILLOTT,J.E., 1969, "Study of the Fabric of fine grained sediments with the scanning Electron Microscope", J. Sed. Pet., 39, pp. 90-105.

GILLOTT J.E., 1970, "Fabric of Leda clay investigated by optical, electronoptical and X Ray diffraction methods", Engng. Geol. 4, pp. 133-153.

GILLOTT J.E., 1971, "Mineralogy of Leda Clay", The Canadian mineralogist, 10, pp. 797-811.

GOLDSCHMIDT V.M., 1954, "Geochemistry", Oxford, Clarendon Press.

GOLDSTEIN M. et TER-STEPANIAN G., 1957, "The long term strength of clays and depth creep of slopes", Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. 4th London, 2 pp. 311-314.

GRIM R.E., 1962, "Applied Clay Mineralogy", McGraw-Hill, New York.

GRIM R.E., 1968, "Clay Mineralogy", 2nd ed. McGraw-Hill, New-York.

HANSBO S., 1957, " A new approach to the determination of the strength of clay by the Fall-cone test", Proc.N° 14, Royal Swedish Geotech. Inst. Stockholm.

HANSEN J.B., 1950, "Vane Tests in a Norwegian Quick-Clay", Geotechnique 2, pp. 58-63.

HELLAND A., 1896, "Lerfall", Norsk. Tek. Tidsskr. 3, pp. 88-96, 4, pp. 105-121.

HOEG K., ANDERSLAND, O et ROLFSEN E.M., 1969, "Undrained behaviour of Quick-clay under Load tests at Asrum", Geotechnique 19, pp. 101-115.

HOLMSEN P. 1952, "Landslips in Norwegian Quick-clays", Geotechnique 3,pp. 187-194.

HOUSTON W.N. et MITCHELL, J.K., 1969, "Property Interrelationships in Sensitive Clays", Proc. A.S.C.E., 95, SM4, pp. 1037-1062.

INMAN D.L.,1952, "Measures for describing the size distribution of sediments".Journ. of Sedimentary Petrology, 22 (3), pp. 125-145.

JOHNSTON W.A., 1917, "Pleistocene and recent deposits in the vicinity of Ottawa, with a description of soils", Geol. Surv.Can. Mem. 101, 69 pp.

KARROW P.F., 1961, "The Champlain Sea and its sediments", R.F. Legget (editor), Soils in Canada, Roy. Soc. Can. Sp. Publ.3, pp. 97-108.

KEINONEN L., 1963, "On the sensitivity of Water-laid Sediments in Finland and factors inducing sensitivity", State Inst. for Tech. Res. Pub. N° 77.

KENNEY T.C., 1966, "Shearing Resistance of Natural Quick-clays", Thesis Univ. London, 138 pp.

KERR, P.F., 1963, "Quick-clay", Scientific American, 209.

KERR P.F. et DREW I.M., 1968, "Quick-clay slides in U.S.A.", Engng. Geol., 2, pp. 215-238.

KRINSLEY D.H. et SMALLEY I.J., 1973, "The shape and nature of small sedimentary quartz particles", Science 180, pp. 1277-1279.

LAMBE T.W., 1958, "The structure of Compacted Clay", Proc. A.S.C.E., 91, SM 4, pp. 85-106.

LASALLE P. et CHAGNON J.Y., 1968, "An ancient landslide along the Saguenay River, Quebec", Can. J. Earth Sc. 5 (3), pp. 548-549.

LEROUX A., 1969, "Traitements des sols argileux par la chaux", Bull. Liaison Labo Routiers P. & C. N° 40, pp. 59-96.

LEROUX A., 1970, "Les Argiles", Polycopié du L.C.P.C., 21 p. 4 pl.

LEROUX A., 1971, "La lyophilisation : technique d'étude des textures des marnes et argiles", Bull. Liaison Labo. P & C. N° 55, pp. 27-30.

LEROUX A., 1971, "Le microscope électronique à balayage : applications à l'étude des marnes", Bull. Liaison Labo P. & C. N° 54, pp. 6-13.

LEROUX A., 1973, "Application de la microscopie électronique à l'étude de structure des vases", Journées de Méca. Sols, Nancy, Stabilité des Pentes (cas concrets), pp. 127-132.

LIEBLING R.S. et KERR P.F., 1965, "Observations on Quick-clay", Bull. Geol. Soc. Am. 76, pp. 853-878.

LUCAS J., CAMEZ Th et MILLOT G., 1959, "Détermination pratique aux R.X des minéraux argileux simples et interstratifiés", Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr. T.12, fasc.2, pp. 21-31.

MC CARTNEY M.W.D., 1967, "Géologie du Canada", Commission géol. du Canada, 19 p.

MEYERHOFF, C.G., 1953, "Field investigations of the earth flow of Rimouski", Seventh Can. Soil Mech. Conf. Proc. , pp. 40-45.

MEYERHOFF C.G., 1957, "The mechanism of flow slides in cohesive soils", Geotechnique 7 (1), pp. 41-49.

MITCHELL J.K., 1956, "The fabric of natural clays and its relation to Engng. Properties", Proc. Highway Researcg Board, 35, pp. 693-713.

MITCHELL, J.K. and HOUSTON W.H., 1969, "The causes of clay sensitivity", Proc.A.S.C.E. 95, SM3, pp. 845-871.

MOON C.F., 1972, "Microstructure of clay sediment", Earth Sc. Rev., 8, pp.303-321.

MOUM J. et ROSENQUIST I., 1961, "The mechanical properties of montmorillonitic and illitic clays related to the electrolytes of the Pore water", Proc.5th. Int.Conf. Soil Mechs. and Found Engng, 1, pp. 263-267.

NEWLAND P.L. et ALLELY B.M., 1956, "Results of some investigations on two sensitive clays", Proc. Second. Australia- New Zealand, Conf. Soil. Mech. Christchurch, N.Z., pp. 39-43.

NEWLAND P.L. et ALLELY B.H., 1957, "A study of the sensitivity resulting from consolidation of a remolded clay", Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mechs. and Found. Engng, Vol I, p.83.

O' BRIEN N.R., 1970, "Fabric of floculated clay sediments", Earth Sc. Rev. 8,303-321.

O' BRIEN N.R., 1971, "Fabric of kaolinite and illite flocules", Clays Miner., 19, pp. 353- 359.

O' BRIEN N.R. et HARRISSON W., 1967, "Clay flake orientatinn in a sensitive pleistocene clay", Maritime Sediments, 3, pp. 1-4.

ODOM I.E., 1967, "Clay fabric and its relation to structural properties in mid-continent Pennsylvanian Sediments", J. Ses. Petr. , 37, pp. 610-623.

OSTERMAN J., 1962, "A theoretical study of the failure conditions in saturated soils", Swedish Geotech. Inst. Proc. , 20, pp. 1-34.

OSTERMAN J., 1963, "Studies on the properties and formation of Quick-clays", 12th Nat. Clay Minerals Conf. Proc. Pergamon Press, London, pp. 87-108.

OSTERMAN J., 1964, "Studies on the properties and formation of Quick-clays", Clays and Clay minerals, Monograph N° 19, Earth Sc. Series, Pergamon Press,pp. 87-108.

PENNER E., 1963, "Sensitivity in Leda Clay", Nature 197, pp. 347-348.

PENNER E., 1964, "Studies of sensitivity and electrokinetic potentiel of Leda clay", Nature 204, pp. 808-809.

PENNER E., 1965, "A study of sensitivity in Leda clay", Can. J. Earth Sc. 2 p.245.

PENNER E., 1970, "Frost heaving forces in Leda clay", Can. Geotech. J., 7,8.

PERRIN J., 1974, "Classification des sols organiques", Bull. Liaison Labo. P & C., n° 69, pp. 39-47.

PHAN K.D., 1973, "Elements de minéralogie appliquée. Minéralogie des argiles". Polycopié E.N.S.M.P. 82 p.

PHILLIPS, 1963, " A A.T.D. study of the chlorites", Mineral Mag. 33, pp. 404-414.

PIERCE J.W. et SIEGEL F.R., 1969, "Quantification in clay mineral studies of sediments and sedimentary rocks", Jour. of Sed. Petrol. 39 (1), pp. 187-193.

PUSCH R., 1962, "Clay particles, their size, shape and arrangement in relation to some important physical properties of clays", Handlingar n°40 trans, Ultigare : Statens Rad för Byggnadsforskminy Stockholm, 150 p.

PUSCH R. 1966, "Quick-clay Microstructure", Engng Geology, 1 (6), pp. 433-444.

PUSCH R., 1966, "A technique for investigation of clay microstructure",J.Microscopie, 6, pp. 963-986.

PUSCH R., 1070, "Microstructural changes in soft quick-clay at failure", Can. Geotech. J. 7 (1), pp. 1-7.

PUSCH R. et ARNOLD M., 1969, "The sensitivity of artificially sedimented organic free illitic clay", Engng. Geol., 3, pp. 135-148.

QUIGLEY R.M. et THOMPSON C.D., 1966, "The fabric of anisotropically consolidated sensitive marine clay", Can. Geotechnical Journal, 3, 2, pp. 61-73.

RAYMON D.G. et al., 1971, "The effect of sampling on the undrained soil properties of a Leda soil", Can. Geotech. J., 8 (4), pp. 546-557.

REUSCH H., 1901, "Nogle optegnesler fra verdalen", Norg. Geol. Undensokelse, 32, 1-32.

RIEKE III H.H. et CHILINGARIAN G.U., 1974, "Compaction of argillaceous sediments", Elsevier (Editor), pp. 127-131.

ROCHETTE P.A., 1956, "Experimental and theoretical investigation on the engineering properties of Canadian clay deposits", 10th Can. Soil Mech. Conf. Proc., Natural Research Council Assoc. Com. on Soil and Snow Mech. tech. Memoir, 46, pp. 27-34.

ROSENQUIST I Th, 1952, "Consideration on the sensitivity of Norwegian Quick-clays", Geotechnique 3, pp. 195-200.

ROSENQUIST I. Th., 1955, "Investigations in the Clay-Electrolyte-Water system", N.G.I. Pub. N° 9.

ROSENQUIST I. Th., 1959, "Physico-chemical properties of soil : soil-water systems", Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs. J. Soil Mech. Div., 85, pp. 31-53.

ROSENQUIST I. Th., "Norwegian Research into the properties of Quick-clay - A review", Engng. Geology, 1 (6), Dec. 1966, pp. 445-450.

SANGREY D.H., 1972, "Naturally cemented sensitive soils", Geotechnique 22 (1),139-152.

SKEMPTON A.W., 1948, "A study of the geotechnical properties of some postglacial clays" Geotechnique 1, pp. 7-22.

SKEMPTON A.W. et NORTHEY R.D., 1950, "The sensitivity of clays", Geotechnique 3.

SKEMPTON A.W., 1954, "The pore-pressure coefficients A and B", Geotechnique 4,143-147.

SMALLEY I.J. and CABRERA J.G., 1969, "Particle Association in compacted Kaolin", Nature, 222, pp. 80-81.

SMALLEY I.J., 1971, "Nature of Quick-clays", Nature, pp. 231-310.

SODERBLOM R. , 1966, "Chemical aspects of Quick-clay formation", Enggng. Geology, 1 (6), pp. 415-431.

SODERBLOM R., 1969, "Salt in Swedish clays and its importance for Quick-clay formation" , Swed. Geotechn. Inst. Proc. 22, 63 pp.

TAN T.K., 1957, "Report on Soil properties and their measurement", Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engng., 3.

TERZAGHI K et PECK R.B., 1948, "Soil mechanics in engineering practice", New York, John Wiley and Sons, Inc. , 566 pp.

TOVEY N.K., 1970, "Electron Microscopy of clays", Thesis, Univ. of Cambridge, 726 pp.

VAN OLPHEN H., 1963, "An introduction to clay colloid chemistry", Inter Science, N.Y.

VERBEKE R., 1969, "Sur un procédé de fabrication des lames minces dans des roches peu cimentées et des sols", Bull. Soc. geol. de France (7), XI, pp. 426-433.

VITA-FINZI C. et SMALLEY I.J., 1970, "Origin of quartz silt : comment on a note by Ph. H. Kuenen", J. Sed. Petrol. 40,pp.1367-1368.

VOIGHT B., 1973, "Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils", Geotechnique 23 (2), pp. 265-267.

VOINOVITCH I.A., 1971, "L'analyse minéralogique des sols argileux", Eyrolles Ed., Paris, 93 p.

WARKENTIN B.P. et BOZOKUK M., 1961, "Shrinking and swelling properties of two Canadian clays", Proc. Intern. Conf. Soil Mech. Found. Engng., 5th Paris, 1960, 1, pp. 851-855.