DP 610

ETUDE DES CARACTERISTIQUES DES ARGILES DU QUEBEC ET CRITERES D'IDENTIFICATION DES ARGILES EXTRA-SENSIBLES

Documents complémentaires

Additional Files

Licence

License

Cette première page a été ajoutée
au document et ne fait pas partie du
rapport tel que soumis par les auteurs.

Énergie et Ressources naturelles
Québec

SERVICE DE
GEOTECHNIQUE

MINISTÈRE
DES RICHESSES
NATURELLES

DIRECTION GÉNÉRALE
DES MINES

ETUDE DES CARACTERISTIQUES DES ARGILES DU QUEBEC ET CRITERES D'IDENTIFICATION DES ARGILES EXTRA-SENSIBLES

SECTION GEOTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
UNIVERSITE DE SHERBROOKE

Rapport final

1978

DP-610

ETUDE DES CARACTERISTIQUES DES ARGILES DU QUEBEC ET CRITERES D'IDENTIFICATION DES ARGILES EXTRA-SENSIBLES

Rapport GEO-78-06

préparé par Guy Lefebvre et Gilles Grondin

Section de géotechnique

Département de génie civil

Université de Sherbrooke

présenté au

Service de géotechnique

Ministère des richesses naturelles du Québec

Octobre 1978

PREFACE

L'identification de l'argile extra-sensible constitue un élément très important dans la localisation des zones qui sont exposées aux risques de grandes coulées argileuses. Cette étude présente différents critères géotechniques et géochimiques des sols qui ont déjà été impliqués dans d'importants mouvements de terrain situés essentiellement dans les Basses Terres du Saint-Laurent. Ce rapport, préparé au département de Génie civil de l'université de Sherbrooke, est un outil de travail qui est déjà utilisé par le service de la Géotechnique dans la préparation des cartes prévisionnelles.

J. Lebuis, directeur
Service de Géotechnique

AVANT-PROPOS

Le présent rapport présente les résultats des travaux effectués dans le cadre du projet sur la susceptibilité aux coulées des dépôts d'argiles (CT 94597 en date du 24 septembre 1975).

Le projet avait pour but de mieux caractériser les argiles sensibles du Québec et de définir quelques critères permettant d'identifier les argiles extra-sensibles impliquées dans les grandes coulées.

Les travaux ont été réalisés principalement par monsieur Gilles Grondin alors étudiant gradué, assisté du personnel de la section géotechnique en collaboration avec monsieur Jean-Paul Morin, professeur et sous la direction de monsieur Guy Lefebvre, professeurs au département de génie civil. Le rapport a été préparé par monsieur Gilles Grondin et Guy Lefebvre.

SOMMAIRE

Ce rapport présente une étude des caractéristiques des argiles sensibles du Québec réalisée afin de définir des critères pour identifier les zones d'argile extra-sensibles susceptibles d'engendrer des mouvements de terrain de grandes dimensions du type coulée. Une attention particulière a été apportée pour d'abord établir l'état des connaissances sur le sujet en consultant les nombreux documents déjà publiés tant en Norvège et en Suède qu'au Canada.

Quelque 124 échantillons d'argile ont été prélevés à l'aide de tubes à paroi mince dans 13 forages exécutés à proximité de glissements et de coulées dans trois différentes régions de la plaine du Saint-Laurent. Des essais ont été faits pour déterminer les caractéristiques géotechniques et géochimiques de ces argiles. Les mêmes essais ont aussi été effectués sur des échantillons d'argile disponibles au laboratoire de l'université. Ces échantillons provenaient de onze autres sites répartis dans la majeure partie des dépôts argileux de la province de Québec.

La quantité des données recueillies principalement à partir des essais de détermination des limites de consistance, de mesure de la résistance non remaniée et remaniée, d'analyse granulométrique, de mesure de la teneur en sel de l'eau interstitielle et d'analyse des principaux cations échangeables et des principaux cations de l'eau interstitielle ont permis d'identifier les caractéristiques générales des argiles du Québec. Par la suite, les sites de rupture de pente étudiés

ont été groupés en deux types de mouvement du sol, soit les glissements et les coulées d'argile. Les relations tracées à partir des caractéristiques géotechniques et géochimiques de ces argiles ont permis de préciser les caractéristiques particulières de l'argile extra-sensible et de déterminer quelques critères pouvant identifier cette argile.

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS i

SOMMAIRE ii

TABLE DES MATIERES iii

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX viii

INTRODUCTION 1

1. REVUE DE LA LITTERATURE 5

1.1 Introduction 5

1.2 Revue des études suédoises et norvégiennes sur l'argile extra sensible 5

1.2.1 Formation de l'argile extra-sensible 5

1.2.2 Minéralogie de l'argile extra-sensible 10

1.2.3 Classification de l'argile extra-sensible 11

1.2.4 Salinité de l'argile extra-sensible 13

1.2.5 Analyse de la salinité de l'argile 14

1.2.6 Les agents dispersants de l'argile 15

1.2.7 Zones propices à la formation d'argile extra-sensible . 17

1.2.8 Caractéristiques générales de l'argile extra-sensible de la Suède et de la Norvège 18

1.3 Revue des études effectuées dans l'est du Canada sur l'argile extra-sensible 19

1.3.1 Formation de l'argile extra-sensible de l'est du Canada 19

1.3.2 Facteurs contrôlant la sensibilité des argiles de l'est du Canada 21

1.3.3 Minéralogie des argiles de l'est du Canada 23

1.3.4 Classification de l'argile extra-sensible de l'est du Canada 24

1.3.5 Salinité et agents dispersants des argiles extra-sensibles de l'est du Canada 24

1.3.6 Caractéristiques générales des argiles extra-sensibles de l'est du Canada 25

2. CHOIX ET DESCRIPTION DES SITES ETUDIES..... 26

2.1 Introduction 26
2.2 Région de la rivière Yamaska 27
2.2.1 Description du glissement de Yamaska 27
2.2.2 Localisation des forages de Yamaska 28
2.2.3 Description des deux coulées d'argile étudiées à St-Louis de Bonsecours 28
2.2.4 Localisation des forages à St-Louis de Bonsecours 29
2.3 Région de Louiseville 29
2.3.1 Coulée d'argile du club de golf de Louiseville 30
2.3.2 Glissement près de la Grande Rivière du Loup 30
2.4 Région de St-Ambroise de Kildare 31
2.4.1 Coulée d'argile du 19 avril 1975 32
2.4.2 Autres sites étudiés dans la région de St-Ambroise de Kildare 33
2.4.3 Localisation des forages à St-Ambroise 33
2.5 Autres sites étudiés 34
2.5.1 Sites situés dans les dépôts de la mer Champlain 34
2.5.2 Site étudié dans les dépôts de la mer de Laflamme 37
2.5.3 Sites situés dans les dépôts du lac glaciaire Barlow-Ojibway 37
2.5.4 Site situé dans les dépôts de la mer de Tyrrell 38

3. ECHANTILLONNAGE ET ESSAIS EFFECTUES 39

3.1 Essais effectués sur le terrain..... 39
3.2 Essais effectués au laboratoire 39
3.3 Procédure des différents essais 40
3.3.1 Echantillonnage 40
3.3.2 Détubage, taillage et conservation des échantillons .. 41
3.3.3 Homogénéisation de l'argile 42
3.3.4 Essais pour déterminer les caractéristiques géotechniques de l'argile 42
3.3.5 Essais pour déterminer les caractéristiques géochimiques de l'argile 45

4. PRESENTATION DES RESULTATS 49

4.1 Caractéristiques géotechniques de l'argile 49

4.2 Caractéristiques géochimiques de l'argile 50

5. DISCUSSION DES RESULTATS 52

5.1 Introduction 52

5.2 Discussion des résultats: relations générales 52

5.2.1 Caractéristiques géotechniques des argiles du Québec . 53

5.2.2 Relations entre les caractéristiques géotechniques des argiles du Québec 57

5.2.3 Classification des argiles du Québec selon leurs caractéristiques géotechniques 59

5.2.4 Caractéristiques géochimiques des argiles du Québec .. 60

5.2.5 Relations entre la teneur en sel et quelques caractéristiques géotechniques des argiles du Québec 64

5.2.6 Classification des argiles du Québec selon leurs caractéristiques géochimiques 65

5.3 Discussion des résultats: relations entre les sites de glissements et de coulées d'argile 66

5.3.1 Définition d'un glissement et d'une coulée 67

5.3.2 Caractéristiques géotechniques des argiles des sites de glissements et de coulées 69

5.3.3 Relation entre les propriétés géotechniques des argiles de glissements et de coulées 73

5.3.4 Caractéristiques géochimiques des argiles de glissements et de coulées 74

5.3.5 Classification de l'argile extra-sensible selon ses caractéristiques géochimiques 76

5.3.6 Relations entre les propriétés géochimiques et géotechniques de l'argile des sites de glissements et de coulées77

5.3.7 Discussion sur le cas de Louiseville (site #2) 79

CONCLUSION 81

APPENDICE A: LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS 86

APPENDICE B: DESCRIPTION DE LA METHODE D'ANALYSE DU POTASSIUM, DU CALCIUM, DU MAGNESIUM ET DU SODIUM ECHANGEABLES DANS L'ARGILE 88

APPENDICE C: RESULTATS DES DEUX ANALYSES DES CATIONS DE L'EAU INTERSTITIELLE 90

APPENDICE D: ETUDE DE LA FIABILITE DU CONE SUEDOIS POUR DETERMINER LA LIMITE LIQUIDE DES ARGILES 93

APPENDICE E: ETUDE DE LA VARIATION DE LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE L'ARGILE AVEC LE TEMPS DE CONSERVATION 94

BIBLIOGRAPHIE 97

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1 : Activité de quelques argiles norvégiennes (Bjerrum 1954).

Figure 2 : Relation entre la sensibilité et la teneur en sel de quelques dépôts d'argile norvégienne (Bjerrum 1954).

Figure 3 : Relation entre l'activité et la teneur en sel de quelques dépôts d'argile naturelle (Bjerrum, 1954).

Figure 4 : Activité de quatre différentes argiles pour des teneurs en sel différentes dans l'eau interstitielle (Bjerrum, 1954).

Figure 5 : Relation entre la sensibilité et l'indice de liquidité pour des argiles de Scandinavie.

Figure 6 : Relation entre l'activité et la teneur en sel pour les argiles de Suède et de Norvège.

Figure 7 : Relation entre la sensibilité et la résistance remaniée pour des argiles norvégiennes et suédoises.

Figure 8 : Potentiel électrocinétique d'argile à Leda non remaniée en fonction de sa sensibilité d'après Penner 1965.

Figure 9 : Carte géographique des dépôts argileux du Québec.

Figure 10 : Photos illustrant le glissement du 2 novembre 1974 à Yamaska.

Figure 11 : Localisation du glissement du 2 novembre 1974 à Yamaska.

Figure 12 : Localisation du glissement et des forages à Yamaska.

Figure 13 : Profil de la pente à Yamaska.

Figure 14 : Localisation des coulées de St-Louis.

Figure 15 : Profil de la pente de la coulée de 1968 à St-Louis de Bonsecours (d'après Lefebvre, 1970).

Figure 16 : Profil de la coulée de 1945 à St-Louis de Bonsecours (d'après Lefebvre, 1970).

Figure 17 : Localisation des sites et des forages à Louiseville.

Figure 18 : Photos illustrant la coulée d'argile du 15 avril 1969 au club de golf de Louiseville.

Figure 19 : Profil du terrain actuel au club de golf de Louiseville.

Figure 20 : Photo montrant les endroits et les débris de deux glissements de berge sur la Grande Rivière du Loup à Louiseville.

Figure 21 : Profil du glissement de la Grande Rivière du Loup, à Louiseville.

Figure 22 : Localisation des coulées d'argile et des forages à St-Ambroise.

Figure 23 : Photo illustrant la coulée d'argile du 19 avril 1975 à St-Ambroise.

Figure 24 : Photos illustrant la petite coulée de 1975 à St-Ambroise.

Figure 25 : Profil de la grande coulée de 1975 à St-Ambroise.

Figure 26 : Profil d'une ancienne coulée à St-Ambroise.

Figure 27 : Pente naturelle à côté du glissement de 1973 à St-Ambroise.

Figure 28 : Forage dans une pente naturelle à côté de la grande coulée de 1975 à St-Ambroise.

Figure 29 : Profil de la petite coulée de 1975 à St-Ambroise.

Figure 30 : Localisation des glissements à Le Coteau.

Figure 31 : Localisation des coulées et des forages à St-Thuribe.

Figure 32 : Localisation des coulées à St-Urbain.

Figure 33 : Photo illustrant les coulées d'argile de St-Urbain.

Figure 34 : Description du taillage de chaque tube.

Figure 35 : Montage pour l'extraction d'eau interstitielle.

Figure 36 : Teneur en sel vs conductivité à 21°C.

Figure 37 : Relation entre la teneur en sel et la conductivité.

Figure 38 : Caractéristiques géotechniques, Le Coteau, forage 2.

Figure 39 : Caractéristiques géotechniques, Louiseville, forage 1.

Figure 40 : Caractéristiques géotechniques, Louiseville, forage 2.

Figure 41 : Caractéristiques géotechniques, Nicolet, forage 2.

Figure 42 : Caractéristiques géotechniques, Nicolet, forage 3.

Figure 43 : Caractéristiques géotechniques, St-Ambroise, forage 1.

Figure 44 : Caractéristiques géotechniques, St-Ambroise, forage 2.

Figure 45 : Caractéristiques géotechniques, St-Ambroise, forage 3.

Figure 46 : Caractéristiques géotechniques, St-Ambroise, forage 4.

Figure 47 : Caractéristiques géotechniques, St-Ambroise, forage 5.

Figure 48 : Caractéristiques géotechniques, St-Ambroise, forage 6.

Figure 49 : Caractéristiques géotechniques, St-Ambroise, forage 7.

Figure 50 : Caractéristiques géotechniques, St-Louis, forage 1.

Figure 51 : Caractéristiques géotechniques, St-Louis, forage 2.

Figure 52 : Caractéristiques géotechniques, St-Urbain, forage du Ministère des Richesses Naturelles.

Figure 53 : Caractéristiques géotechniques, St-Urbain, forage de l'Université de Sherbrooke.

Figure 54 : Caractéristiques géotechniques, Yamaska, forage 1.

Figure 55 : Caractéristiques géotechniques, Yamaska, forage 2.

Figure 56 : Essais de thixotropie, Le Coteau, forage 2.

Figure 57 : Essais de thixotropie, Nicolet, forage 3.

Figure 58 : Essais de thixotropie, Louiseville, forage 1.

Figure 59 : Essais de thixotropie, Louiseville, forage 2.

Figure 60 : Essais de thixotropie, St-Ambroise, forage 1.

Figure 61 : Essais de thixotropie, St-Ambroise, forage 6.

Figure 62 : Essais de thixotropie, St-Ambroise, forage 7.

Figure 63 : Essais de thixotropie, St-Louis, forage 1.

Figure 64 : Essais de thixotropie, St-Louis, forage 2.

Figure 65 : Essais de thixotropie, St-Urbain.

Figure 66 : Essais de thixotropie, Yamaska, forage 1.

Figure 67 : Essais de thixotropie, Yamaska, forage 2.

Figure 68 : Sensibilité vs résistance remaniée.

Figure 69 : Sensibilité vs indice de liquidité.

Figure 70 : Indice de plasticité vs sensibilité.

Figure 71 : Résistance remaniée vs indice de plasticité.

Figure 73 : Indice de liquidité vs résistance remaniée.

Figure 73 : Activité vs indice de liquidité.

Figure 74 : Indice de plasticité vs pourcentage d'argile.

Figure 75 : Indice de plasticité vs limite liquide.

Figure 76 : Caractéristiques géochimiques, Le Coteau.

Figure 77 : Caractéristiques géochimiques, Louiseville, forage 1.

Figure 78 : Caractéristiques géochimiques, Louiseville, forage 2.

Figure 79 : Caractéristiques géochimiques, Nicolet, forage 3.

Figure 80 : Caractéristiques géochimiques, St-Ambroise, forage 1.

Figure 81 : Caractéristiques géochimiques, St-Ambroise, forage 3.

Figure 82 : Caractéristiques géochimiques, St-Ambroise, forage 4.

Figure 83 : Caractéristiques géochimiques, St-Ambroise, forage 5.

Figure 84 : Caractéristiques géochimiques, St-Ambroise, forage 6.

Figure 85 : Caractéristiques géochimiques, St-Ambroise, forage 7.

Figure 86 : Caractéristiques géochimiques, St-Louis, forage 1.

Figure 87 : Caractéristiques géochimiques, St-Louis, forage 2.

Figure 88 : Caractéristiques géochimiques, St-Urbain, forage de l'Université de Sherbrooke.

Figure 89 : Caractéristiques géochimiques, Yamaska, forage 1.

Figure 90 : Caractéristiques géochimiques, Yamaska, forage 2.

Figure 91 : Résistance remaniée vs teneur en sel.

Figure 92 : Sensibilité vs teneur en sel.

Figure 93 : Limite liquide vs teneur en sel.

Figure 94 : Indice de liquidité vs teneur en sel.

Figure 95 : Activité vs teneur en sel.

Figure 96 : Concentration de l'électrolyte vs pourcentage de sodium échangeable.

Figure 97 : Pourcentage de sodium vs teneur en sel de l'eau interstitielle.

Figure 98 : Hauteur de pente vs longueur du glissement ou de la coulée.

Figure 99 : Sensibilité vs résistance remaniée.

Figure 100 : Résistance remaniée vs teneur en eau.

Figure 101 : Limite liquide vs teneur en eau.

Figure 102 : Indice de plasticité vs limite liquide.

Figure 103 : Résistance remaniée vs indice de plasticité.

Figure 104 : Indice de plasticité vs sensibilité.

Figure 105 : Sensibilité vs indice de liquidité.

Figure 106 : Activité vs indice de liquidité.

Figure 107 : Indice de plasticité vs pourcentage d'argile.

Figure 108 : Résistance remaniée vs teneur en sel.

Figure 109 : Résistance remaniée vs pourcentage de magnésium dans l'eau interstitielle.

Figure 110 : Résistance remaniée vs pourcentage de calcium dans l'eau interstitielle.

Figure 111 : Résistance remaniée vs pourcentage de sodium dans l'eau interstitielle.

Figure 112 : Résistance remaniée vs pourcentage de sodium échangeable.

Figure 113 : Résistance remaniée vs pourcentage de magnésium échangeable.

Figure 114 : Résistance remaniée vs pourcentage de calcium échangeable.

Figure 115 : Résistance remaniée vs pourcentage de calcium et de magnésium échangeables.

Figure 116 : Sensibilité vs rapport des cations échangeables K/Na.

Figure 117 : Concentration de l'électrolyte vs pourcentage de sodium échangeable.

Figure 118 : Pourcentage de sodium dans l'eau interstitielle vs teneur en sel.

Figure 119 : Limite liquide vs teneur en sel.

Figure 120 : Indice de plasticité vs teneur en sel.

Figure 121 : Activité vs teneur en sel.

Figure 122 : Sensibilité vs teneur en sel.

Figure 123 : Indice de liquidité vs teneur en sel.

Figure 124 : Résistance remaniée vs Σ cations échangeables.

Figure 125 : Limite liquide vs Σ cations échangeables.

Figure 126 : Indice de plasticité vs Σ cations échangeables.

Figure 127 : Activité vs Σ cations échangeables.

Figure 128 : Comparaison des appareils pour déterminer les limites liquides: coupelle à Casagrande vs cône suédois.

Tableau 1 : Classification de l'argile selon sa sensibilité (Skempton et Northey, 1952).

Tableau 2 : Classification de l'argile extra-sensible (Rosenqvist, 1953).

Tableau 3 : Expérience de lessivage avec des argiles déposées en eau salée (Bjerrum, 1954).

Tableau 4 : Caractéristiques géotechniques de sites de coulées d'argile en Scandinavie.

Tableau 5 : Caractéristiques géotechniques de sites de glissements en Scandinavie.

Tableau 6 : Caractéristiques géotechniques de quelques argiles extra-sensibles de Scandinavie.

Tableau 7 : Sensibilité, surface spécifique et pourcentage de cations bivalents et monovalents dans l'eau interstitielle de quelques argiles (Penner, 1965).

Tableau 8 : Comparaison des caractéristiques géochimiques de quelques sites de coulées d'argile (Mitchell et Markell, 1974).

Tableau 9 : Caractéristiques géotechniques de quelques sites de glissements et de coulées au Canada.

Tableau 10 : Caractéristiques géotechniques des argiles étudiées.

Tableau 11 : Essais de thixotropie.

Tableau 12 : Caractéristiques géochimiques des argiles étudiées.

Tableau 13 : Analyse minéralogique qualitative de quelques argiles.

Tableau 14 : Comparaison des résultats du Ministère et de l'Université dans l'analyse des cations de l'eau interstitielle pour des teneurs en sel similaires.

Tableau 15 : Légende générale pour l'identification des sites.

Tableau 16 : Identification de chaque site, caractéristiques géométriques des glissements et des coulées d'argile et profondeur des couches d'argile où une moyenne a été calculée comme valeur représentative de chaque site.

Tableau 17 : Caractéristiques géotechniques des argiles des glissements et des coulées.

Tableau 18 : Gain thixotropique des argiles des glissements et des coulées.

Tableau 19 : Caractéristiques géochimiques des argiles des glissements et des coulées.

Tableau 20 : Variation de la résistance au cisaillement avec le temps de conservation.

INTRODUCTION

De nombreux mouvements de terrain se produisent chaque année dans les dépôts d'argile marine de la vallée du Saint-Laurent. Ces ruptures de pentes naturelles sont souvent reliées à l'érosion des pieds de la pente par un cours d'eau et à une augmentation des pressions interstitielles dans la pente suite à la fonte des neiges ou à de fortes pluies.

Du point de vue dommages à la propriété et risques de perte de vie humaine, il est important de distinguer deux types de mouvements de terrain. Le premier type désigné dans ce rapport par le terme glissement est le mouvement d'une masse de sol résultant d'une rupture par cisaillement le long d'une surface à section plus ou moins circulaire. Dans ce type de rupture l'argile n'est pas liquifiée et la zone affectée ne s'étend pas très loin à l'arrière de la crête de la pente. Le second type de mouvement désigné dans ce rapport par le terme coulée consite en une succession de ruptures immédiatement à la suite d'un premier glissement créant ainsi un phénomène rétrogressif. Les coulées d'argile peuvent s'étendre très loin à l'arrière de la crête de la pente et atteindre des proportions catastrophiques. Ce phénomène de rétrogression est initié par la liquéfaction de l'argile impliquée dans la première rupture. Le sol rupturé s'écoule et ne peut stabiliser les parois du cratère du glissement; de nouvelles ruptures se produisent et ainsi de suite. L'existence des coulées d'argile est donc reliée à une sensibilité de l'argile suffisamment élevée pour permettre la liquéfaction.

Nous savons que suite à l'érosion, des ruptures de berges sont susceptibles de se produirent souvent sans causer de dommages trop considérables. Il devient cependant très important de pouvoir caractériser et identifier les zones d'argile extra-sensible ("quick clay") dans lesquelles un premier glissement peut dégénérer en coulée.

Le but de l'étude présentée dans ce rapport est de mieux caractériser les argiles sensibles du Québec, afin d'établir des critères permettant d'identifier les zones d'argile extra-sensible susceptibles de produire des coulées. Les propriétés de plusieurs dépôts d'argile dans lesquels se sont produits soit des glissements soit des coulées seront étudiées. Des relations générales seront établies entre diverses propriétés géotechniques et géochimiques des argiles du Québec, notamment la sensibilité, la résistance remaniée, l'indice de liquidité et la teneur en sel de l'eau interstitielle. La plupart de ces relations ont déjà été établie à partir des propriétés des argiles de Suède et de Norvège mais n'ont pas été vérifiée de façon systématique pour les argiles du Québec. Sachant quels dépôts d'argile ont généré soit des glissements, soit des coulées, les différentes propriétés seront examinées afin d'identifier lesquelles de ces propriétés peuvent servir de critères pour déceler les zones d'argile extra-sensible susceptibles de générer des coulées.

L'ouvrage se divise en cinq chapitres. Il comprend une revue de littérature, une description des sites étudiés et du programme d'essais réalisé, une compilation des résultats obtenus et une discussion de ces résultats.

La revue de la littérature aborde d'abord les travaux accomplis en Suède et en Norvège sur les argiles sensibles. Cette première

partie donne une explication de la formation des dépôts argileux et des transformations subséquentes favorisant une augmentation de la sensibilité de l'argile. Les caractéristiques des argiles de plusieurs sites de glissements et de coulées survenus dans ces deux pays sont données et les critères permettant d'identifier les argiles extra-sensibles sont présentés. La revue de la littérature résume aussi l'avancement des travaux accomplis dans le même sens sur les argiles de l'est du Canada.

Le deuxième chapitre présente les trois régions choisies où treize forages ont été exécutés pour les besoins de l'étude. Ces régions ont été choisies à cause de leur activité récente et ancienne au point de vue mouvement de sol. L'une de ces régions présente presque uniquement des vestiges de coulées tandis que les deux autres régions comprennent des sites de glissements et de coulées. Un minimum de deux sites par région a été étudié. Ce chapitre donne aussi une brève description des onze autres sites étudiés grâce à la disponibilité d'échantillons au laboratoire de l'université.

Le troisième chapitre décrit le programme d'essais réalisé dans le cadre de cette étude. Ce programme comprend l'échantillonnage au moyen de tubes à paroi mince, des essais réalisés sur le terrain et en laboratoire: Les principaux essais effectués sont la mesure de la résistance non remaniée et remaniée, l'analyse granulométrique, la détermination des limites de consistance, la mesure de la teneur en sels de l'eau interstitielle et l'analyse des principaux cations de l'argile et de l'eau interstitielle.

Le chapitre suivant présente les résultats obtenus à partir des essais effectués. Les données disponibles dans la littérature ne sont pas utilisées pour éviter une trop grande dispersion des résultats

due à des modes de mesure et à des opérateurs différents. Seulement quelques résultats d'identification de l'argile (teneur en eau naturelle, limites et granulométrie) de travaux accomplis à l'Université de Sherbrooke ou en collaboration avec l'Université ont été utilisés. Tous les autres résultats proviennent d'essais réalisés selon les mêmes procédures. Ceci devient important surtout lorsqu'il est question de sensibilité ou de résistance remaniée; les résultats sont alors très différents selon le mode de mesure utilisé.

Les résultats sont discutés dans le dernier chapitre. Des relations générales sont tracées à partir des caractéristiques géotechniques et géochimiques des argiles de l'est du Canada. Par la suite, des relations semblables sont tirées en divisant les résultats en deux groupes, soit ceux obtenus des sites de glissements et ceux obtenus des sites de coulées. Cette confrontation permet de définir quelles sont les caractéristiques des argiles extra-sensibles.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTERATURE

1.1 Introduction

Comme beaucoup des travaux ont déjà été accomplis dans le même domaine, une revue de la littérature traitant de ce sujet s'imposait afin d'orienter les recherches. Les Suédois et les Norvégiens ont étudié une grande quantité de glissements et de coulées d'argile. Ils ont ainsi établi des critères leur permettant d'identifier ou de localiser assez précisément les zones d'argile extra-sensible.

De même, quelques travaux similaires ont déjà été faits sur les argiles de l'est du Canada. Cependant, peu de relations générales permettant de classifier les argiles extra-sensibles de l'est du Canada ont été établies.

1.2 Revue des études suédoises et norvégiennes sur l'argile extra-sensible

1.2.1 Formation de l'argile extra-sensible

Les pentes dans les dépôts argileux d'origine pro-glaciaire sont les plus susceptibles aux glissements et aux coulées d'argile. Lors des dernières glaciations, certains continents ou certaines parties de continents se sont affaissés sous le poids énorme des glaciers. Après le retrait de ces derniers, de grandes superficies ont ainsi été envahies par la mer et les sédiments transportés par l'eau de fonte des gla-

ciers se sont déposés au fond de ces bassins. A la suite du rebondissement subséquent du continent (180 m. en Norvège et 90 m. en Suède), des rivières ont creusé leur lit dans ces dépôts argileux et des réseaux d'écoulement de l'eau se sont établis dans ces mêmes dépôts. Un processus de lessivage des sels de l'eau interstitielle a alors commencé.

Selon Rosenqvist (89), il faut qu'il y ait floculation des minéraux argileux lors de la déposition pour avoir la formation d'une argile extra-sensible. Il faut que les minéraux argileux soient mélangés rapidement dans l'eau salée et en concentration assez élevée de sorte que même les particules les plus fines précipitent avec les plus grosses. Chaque particule argileuse se dépose avec une mince couche d'eau adsorbée; il en résulte une teneur en eau initiale très grande. Toujours selon Rosenqvist (87), les minéraux argileux, étant chargés négativement, adsorbent des ions positifs s'ils se déposent en eau salée. Ceci a pour effet de réduire leur charge négative et de diminuer leur répulsion mutuelle. Deux minéraux peuvent ainsi se rapprocher en formant un dipôle et il en résulte une attraction entre eux. C'est ce qu'on appelle la floculation. Cette dernière donne une structure particulière dite "structure en château de carte ou de nid d'abeille" à l'argile. Les minéraux sont placés de façon aléatoire contrairement à une déposition en eau douce où les minéraux sont plutôt déposés horizontalement. Le degré de floculation dépend aussi de la concentration de l'électrolyte, c'est-à-dire de la salinité de l'eau dans laquelle l'argile se dépose.

Van Olphen (Soderblom (99)) donne une théorie similaire pour expliquer la floculation. Les minéraux argileux ont la forme de plaquettes. Leurs deux faces ont une charge négative et leurs côtés sont possiblement chargés positivement. Ces charges électriques favorisent la floculation des minéraux de la façon suivante: le côté d'une plaquette se lie à la face d'une autre plaquette; il en résulte une structure en château de carte ayant un indice des vides élevé.

Ces deux théories pour expliquer la floculation semblent se compléter et elles sont généralement acceptées comme explication logique de cette dernière.

Après la déposition et le soulèvement postérieur des terres, la salinité de l'argile est fortement réduite due au lessivage des sels de l'eau interstitielle par les eaux d'infiltration (Rosenqvist (87)). La structure en château de cartes conserve quand même sa teneur en eau initiale au lessivage (Bjerrum (9), Rosenqvist (87)). La résistance non remaniée de l'argile diminue alors un peu, mais c'est surtout sa résistance remaniée qui diminue de façon considérable.

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur ce problème et ont tenté d'en découvrir la cause. Selon le modèle schématique de Alexander et Johnson (Penner (81)), les minéraux argileux se déposent avec une couche d'eau adsorbée appelée couche de Stern et une couche d'eau plus ou moins épaisse contenant des ions positifs et négatifs et appelée double couche ou couche diffuse. La couche de Stern est une couche d'eau solide en ce sens qu'elle ne se dissocie pas du minéral.

Skempton et Northey (98) ont déduit que l'augmentation de la sensibilité est due à une diminution de l'épaisseur de la couche de Stern

et à une augmentation de la couche d'eau libre entre les particules. Ceci favorise la liquéfaction au remaniement. En 1955, Rosenqvist (87) a trouvé que l'épaisseur de la couche de Stern augmente avec la concentration de l'électrolyte. Lors du lessivage, des cations sont dissociés de la particule et les forces répulsives entre les minéraux augmentent. Bjerrum et Rosenqvist (12) et Loken (66) affirment que cette augmentation des forces répulsives est due à l'augmentation de l'épaisseur de la double couche. Sherard, Deckers et Ryker (95) abondent un peu dans le même sens, mais selon eux, c'est le sodium qui est responsable de l'augmentation de volume de la double couche. Il fait ainsi décroître les forces attractives entre les particules rendant ces dernières plus faciles à se détacher.

Des expériences de la réduction de la teneur en sel de l'eau interstitielle par Bjerrum (9) et Rosenqvist (87) ont prouvé l'importance du lessivage des sels jusqu'à une très faible concentration ($< 7g/l$) pour avoir la formation d'une argile extra-sensible. Cependant, le mécanisme par lequel la résistance remaniée diminue considérablement reste encore incertain. Il semble que ce soit dû à l'augmentation des forces répulsives entre les particules.

Des analyses des cations adsorbés par Moum, Loken et Torrance (78) et Soderblom (100) démontrent qu'il n'y a pas de différence fondamentale entre les ions adsorbés d'une argile extra-sensible et d'une argile peu sensible lessivée. Les deux argiles ont une double couche riche en ions bivalents et, selon Moum et al. (78), le rapport K/Na des cations adsorbés est plus faible pour les argiles extra-sensibles. Il semble donc que les cations échangeables n'aient pas de relation dominante sur la diminution de la résistance remaniée.

Soderblom (99 et 101) explique le lessivage de la façon suivante: les sels sont enlevés par diffusion vers le haut dans la partie supérieure des dépôts argileux et par lessivage dans la partie inférieure du dépôt; c'est la raison pour laquelle on retrouve une salinité généralement plus élevée au milieu des dépôts argileux de la Suède.

En accord avec Yong et Warkentin (109), Soderblom (99 et 101) affirme que les ions monovalents sont plus facilement enlevés par lessivage que les ions bivalents. Lors du lessivage, l'argile passe donc d'un système avec Na^{+} à un système avec Ca^{++} et Mg^{++} comme cations dominants dans l'eau interstitielle. Ce dernier système est cependant propre à une argile peu sensible. Pour avoir une argile extra-sensible, il ne suffit donc pas de réduire la teneur en sel de l'eau interstitielle. Soderblom (99 et 101) indique que la sensibilité est causée par des agents dispersants et par la transformation anaérobique de la matière organique des argiles. Ces agents dispersants augmentent les charges répulsives des minéraux argileux et se lient de façon complexe aux ions Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau interstitielle.

Soderblom (101) a de plus relevé des zones d'argile extra-sensible dans les argiles varvées. Il suppose que ces argiles sont déposées dans une eau plutôt douce et il conclut que le milieu de sédimentation a peu d'influence sur la grande sensibilité de l'argile. Il faut ajouter ici que Rosenqvist (87) a prouvé que la concentration de l'électrolyte n'a pas besoin d'être aussi élevée que dans l'eau de mer pour qu'il y ait floculation. Des facteurs autres que la salinité peuvent aussi provoquer la floculation.

Soderblom (101) a identifié à partir de ses recherches les

zones où l'argile est plus susceptible d'être extra-sensible. Ce sont les endroits où il y a des sources ou des puits de pompage et également les dépôts argileux situés à proximité des zones d'infiltration traversées par des fossés évacuant des eaux polluées.

Cabrera et Smalley (16) ont déduit qu'il y a formation d'argile extra-sensible s'il y a une quantité plus importante de quartz et de feldspath que de minéraux argileux lors de la déposition. Ils basent leur théorie sur la différence des liens entre les minéraux argileux et les minéraux résistates. Entre les minéraux argileux, selon la théorie de Van Olphen (Soderblom (98)), la floculation est due à l'attraction électrique entre les particules. Il en résulte des liens dits visqueux car ils permettent un certain déplacement avant de se briser complètement; les minéraux argileux qui sont liés face-côté peuvent ainsi glisser l'un sur l'autre avant de se séparer. Par contre, les liens entre les particules amorphes sont plutôt fragiles et sont dus aux forces de Van der Waals et à une certaine cimentation. Le moindre déplacement rompt ces liens et tout le système se liquéfie facilement.

1.2.2 Minéralogie de l'argile extra-sensible.

Les argiles norvégiennes et suédoises appartiennent au groupe des micas hydratés de type illite. Les minéraux argileux les plus importants sont l'illite et la chlorite avec des traces de montmorillonite, de kaolinite et de bauxite-latérite. Parmi les minéraux non argileux ou résistates on retrouve surtout du quartz et du feldspath (Bjerrum (9), Rosenqvist (87)).

La composition minéralogique des argiles extra-sensibles ne diffère pas de celle des argiles peu sensibles. Ceci est très logique car les zones d'argile extra-sensible sont très restreintes (Soderblom (101)) et sont entourées d'argile moins sensible qui fait partie du même dépôt. Il semble cependant que les dépôts comprenant beaucoup de minéraux résistates sont plus susceptibles aux coulées d'argiles (Cabrera et Smalley (16)).

1.2.3 Classification de l'argile extra-sensible

Plusieurs classifications ont été proposées pour classifier les argiles extra-sensibles de Suède et Norvège à partir de leur sensibilité. Cette dernière est obtenue en faisant le rapport de la résistance non remaniée sur la résistance remaniée.

Skempton et Northey (98) ont proposé une classification reproduite au tableau 1. Selon l'ordre de grandeur des valeurs de la sensibilité de cette classification, il est évident que ces valeurs sont déduites à partir de mesures de résistance effectuées avec un appareil autre que le cône suédois.

Rosenqvist (86) complète la classification de Skempton et Northey en donnant différentes catégories d'argile extra-sensible ou "quick" (tableau 2). Encore une fois, ces valeurs de sensibilité ne sont probablement pas obtenues à partir de valeurs de résistance mesurées au cône suédois.

Soderblom (99 et 101) a proposé une autre classification à partir de mesures de résistance effectuées au cône suédois. Une argile

extra-sensible a une sensibilité supérieure à 50 et un nombre de rapidité R_N supérieur ou égal à 8. Ce nombre de rapidité est déterminé de la façon suivante: un échantillon d'argile non remaniée de 40 mm. de hauteur par 50 mm. de diamètre est placé dans l'appareil de Casagrande servant à déterminer la limite liquide. On lui impose alors 250 chutes de 10 mm.; si l'échantillon est intact, R_N vaut 1 et s'il est totalement liquéfié, R_N vaut 10. Pour tous les cas intermédiaires, une évaluation visuelle donne la valeur de R_N. De cette façon, Soderblom définit trois types d'argile extra-sensible:

- une argile qui demande peu d'énergie pour se liquéfier ("rapid quick clay"),
- une argile qui demande beaucoup d'énergie pour se liquéfier ("slow quick clay"),
- une argile qui devient plus sensible après remaniement probablement à cause de la formation d'agents dispersants avec l'oxydation (pseudo quick clay).

Kenney (50) qualifie d'extra-sensible une argile ayant une résistance remaniée inférieure à 0.02 t/m^2 et une sensibilité supérieure à 30, probablement mesurée au cône suédois. Cette classification groupe des argiles de différente histoire géologique et de régions climatiques différentes. Leur caractère dominant est d'avoir une résistance remaniée très faible.

Selon la classification de Skempton (97), les argiles norvégiennes tombent dans le groupe des argiles inactives, l'activité étant définie comme le rapport de l'indice de plasticité d'une argile sur sa fraction plus petite que deux microns. Selon Bjerrum (9), leur ac-

tivité varie de 0.15 à 0.64, les valeurs les plus faibles étant celles des argiles extra-sensibles (fig. 1). Bjerrum a aussi démontré que cette activité croît avec le pourcentage d'illite de la fraction argileuse, la teneur en sel étant la même.

1.2.4 Salinité de l'argile extra-sensible

La teneur en sel d'une argile extra-sensible est très basse. C'est en effet une condition nécessaire pour avoir une argile extra-sensible.

Des expériences de lessivage par Bjerrum (9) et Rosenqvist (87) ont permis d'établir une relation entre la sensibilité et la teneur en sel de l'eau interstitielle pour les argiles norvégiennes. Selon les expériences de Bjerrum, les argiles extra-sensibles ont une teneur en sel dans l'eau interstitielle inférieure à 7 g/l (fig. 2). Torrance (106) indique que la méthode de séchage de l'argile et l'extraction des sels par lavage utilisée par Bjerrum surestime la teneur en sel. La méthode d'extraction d'eau interstitielle par consolidation et de mesure de sa conductivité donne une concentration de sel inférieure à 2 g/l pour l'argile extra-sensible.

Des études plus récentes par Moum, Loken et Torrance (78) et Soderblom (99) ont démontré que la faible teneur en sel dans l'eau interstitielle n'est pas une condition suffisante pour avoir une argile extra-sensible. Il n'y a pas de relation systématique entre la sensibilité et la teneur en sel. Soderblom a trouvé que la composition ionique des sels expliquait la variation de la sensibilité entre deux argiles de même teneur en sel. Ainsi, après avoir fait des analyses sur les argiles de la vallée

de la rivière Göta en Suède, il indique que les argiles extra-sensibles ont Na^+ comme cation dominant dans l'eau interstitielle tandis que les argiles peu sensibles ont Ca^{++} et Mg^{++} comme cations dominants. L'anion dominant est SO_4^{--} pour les deux types d'argiles.

Des études de Moum, Loken et Torrance (78) sur l'argile de Drammen en Norvège abondent dans le même sens que Soderblom. La concentration en sel de l'eau interstitielle de cette argile est inférieure à 0.35 g/l pour l'argile peu sensible et pour l'argile extra-sensible. La composition ionique varie cependant pour les deux zones du même profil. Pour la zone la plus sensible, Na^+ est le cation dominant tandis que la sensibilité baisse quand Ca^{++} et Mg^{++} sont dominants.

Comme il a été mentionné à la section 1.2.1, la composition ionique totale des cations échangeables ne diffère pas pour l'argile peu sensible et l'argile extra-sensible.

Bjerrum (9) a démontré que la diminution de la teneur en sel de l'électrolyte à moins de 7 g/l (2 g/l selon Torrance (106)) diminue sensiblement l'activité de l'argile (fig. 3 et 4), sa limite liquide, son indice de plasticité et sa résistance au cisaillement non remaniée et remaniée, mais augmente de beaucoup son indice de liquidité et sa sensibilité (tableau 3).

1.2.5 Analyse de la salinité de l'argile

Il existe différentes méthodes d'analyser la teneur en sel des argiles. L'analyse peut être faite directement sur l'argile en mesurant sa conductivité ou avec de l'eau interstitielle extraite par con-

solidation et de l'eau de lessivage. La teneur en sel de l'eau de lessivage ou de l'eau interstitielle peut être déterminée par une mesure de la conductivité, par pesée du résidu après évaporation ou encore par des analyses chimiques et par spectométrie.

Soderblom (99) a comparé quelques méthodes. Il a trouvé que l'analyse de la salinité à partir de l'eau de lessivage surestime généralement la teneur en sel de l'eau interstitielle car ce procédé enlève des composés organiques de l'argile et un pourcentage plus ou moins élevé d'ions adsorbés, le tout dépendant du traitement donné à l'argile et de la concentration de la suspension soumise au lessivage. Torrance (106) a aussi prouvé que cette méthode surestime la teneur en sel de plus de 3 g/l .

La mesure de la conductivité de l'eau interstitielle extraite par consolidation ne peut donner une valeur précise de la teneur en sel à cause de la variation de la composition ionique du sel. Les valeurs obtenues sous-estiment généralement un peu la teneur en sel, mais elles sont tout de même une bonne approximation et se comparent aux valeurs obtenues par évaporation de l'eau interstitielle extraite par consolidation. Selon Soderblom (99), la méthode d'extration d'eau interstitielle par consolidation et de pesée du résidu après évaporation est la plus précise pour déterminer la teneur en sel. Soderblom (99) mentionne également que la mesure de la conductivité de l'argile donne une bonne approximation de la teneur en sel de l'eau interstitielle.

1.2.6 Les agents dispersants de l'argile

Outre la faible teneur en sel de l'eau interstitielle, les agents

dispersants ou défloculents sont responsables de la grande sensibilité des argiles. Soderblom (100) a fait beaucoup de travaux dans ce domaine après avoir remarqué qu'il n'y avait pas nécessairement de relation entre la sensibilité et la teneur en sel pour les argiles suédoises, contrairement aux argiles norvégiennes (Bjerrum (9)). Il affirme que les agents dispersants sont très souvent responsables de la liquéfaction de l'argile lors des glissements et qu'ils favorisent la formation de glissements rétrogressifs de type coulée.

Selon Soderblom (100), les agents dispersants existant dans la nature sont des composés organiques ou inorganiques. Les silicates et les phosphates forment le groupe des défloculents inorganiques et proviennent souvent des eaux usées. Les agents dispersants organiques se divisent en deux classes: des composés assez simples comme des acides, des polyphénols, des hydrocarbones, ... et des composés assez complexes dérivant de l'humus. Parmi ces composés, ce sont ceux dont la structure moléculaire est peu élevée qui sont des défloculents tandis que les composés à grande structure moléculaire agissent comme des ciments. De plus, Soderblom a trouvé qu'il n'y a pas de simple composé organique, mais plutôt de grands groupes de composés qui rendent l'argile extra-sensible.

Malgré la certitude de l'influence des agents dispersants, leur mode d'action sur les minéraux argileux est très peu connu. Selon Soderblom (100), les agents dispersants se lient de quelque façons aux ions Ca^{++} et Mg^{++} et ils précipitent avec eux. C'est pour cette raison que l'on retrouve un système avec Na^{+} dominant dans l'eau interstitielle après lessivage au lieu d'un système avec Ca^{++} et Mg^{++} comme cations dominants. Emerson (30) et Olphen (Soderblom (99)) émettent l'opinion que la matière organique provoque la défloculation de l'argile en neutralisant les arêtes positives des minéraux argileux.

En général, l'effet des agents dispersants est de diminuer considérablement la résistance remaniée de l'argile et sa thixotropie.

Les agents dispersants et principalement les agents organiques sont très difficiles à extraire à cause de leur structure complexe et instable. De plus, les résultats obtenus varient avec les procédures utilisées. Les principales sources d'agents dispersants sont les détergents, les eaux usées, les eaux contenant des déchets de plantes et les eaux provenant de tourbières. Toute infiltration de ces eaux dans un dépôt d'argile peut augmenter sa sensibilité.

1.2.7 Zones propices à la formation d'argile extra-sensible

Les zones propices à la formation d'argile extra-sensible se retrouvent principalement dans les dépôts marins bien que Soderblom (99) et Cabrera et Smalley (16) indiquent qu'il est possible d'en avoir dans les dépôts lacustres. En Suède, selon Soderblom (101), ces zones se retrouvent souvent à proximité de tourbières et dans des dépôts d'argile avec des couches plus perméables de sable et de gravier appelées "Lee formations". Ces couches drainantes servent de pipeline pour l'eau et favorisent le lessivage des argiles environnantes. Elles sont souvent des zones d'infiltration pour des eaux usées contenant des phosphates et des détergents qui, comme mentionné dans la section 1.2.6, agissent comme défloculents. Pour appuyer ses dires, Soderblom (101) affirme que l'eau des sources dans les cratères des coulées d'argile a souvent une odeur d'eau polluée.

Les principaux facteurs pouvant provoquer des ruptures de pente

sont l'érosion des berges, le dragage et l'abaissement du niveau d'un cours d'eau, les vibrations causées par le fonçage de pieux, la circulation lourde près d'une pente, le dynamitage et les tremblements de terre, la construction d'un remblai sur le bord d'une pente et une coupe dans l'argile avec des pentes trop fortes. Il est certain que l'érosion des berges est le facteur le plus important, mais les autres facteurs ici mentionnés sont cités comme étant la cause de plusieurs mouvements de sol dans la littérature. Ces phénomènes se produisent presque toujours lorsque la nappe phréatique est haute.

1.2.8 Caractéristiques générales de l'argile extra-sensible de Suède et de Norvège

Les argiles extra-sensibles de Suède et de Norvège sont principalement composées d'illite, de quartz et de feldspath et ont une résistance remaniée très faible, une limite liquide inférieure à leur teneur en eau naturelle, un indice de plasticité faible et une faible teneur en sel dans l'eau interstitielle avec Na^+ comme cation dominant.

Les tableaux 4 et 5 donnent les caractéristiques géotechniques des argiles de plusieurs sites de glissements et coulées en Suède et en Norvège. Le tableau 6 donne les mêmes caractéristiques pour plusieurs argiles classifiées comme extra-sensibles. Les valeurs moyennes utilisées dans ces tableaux sont celles des auteurs et lorsque cette dernière n'était pas indiquée, une moyenne a été faite pour le profil ou la portion de profil impliquée dans le glissement.

Bjerrum (9) a trouvé une relation logarithmique entre la sensibilité et l'indice de liquidité pour les argiles norvégiennes. Le même graphique

a été tracé avec les valeurs des tableaux 4, 5 et 6. Ceci donne une relation en général identique à celle de Bjerrum, mais qui pourrait être interprétée différemment si l'on fait une distinction entre l'argile peu sensible et l'argile extra-sensible. Cette dispersion des résultats est peut-être due aussi à la diversité des instruments de mesure et des opérateurs.

Pour tous ces sites, il existe une certaine relation entre l'activité et la teneur en sel (fig. 6). L'activité augmente avec la teneur en sel. La relation de Bjerrum ne peut cependant pas être vérifiée (fig. 3 et 4) car le nombre de valeurs est insuffisant, la teneur en sel des sites étudiés trop faible et le mode de mesure de la teneur en sel non identique pour tous les sites.

La résistance remaniée calculée à partir des valeurs de sensibilité est inférieure à 0.173 t/m^2 pour les sites de coulées d'argile ou d'argile extra-sensible. Pour les autres glissements, cette valeur est supérieure à 0.2 t/m^2 (fig. 7). La teneur en sel de l'eau interstitielle est inférieure à 2 g/l pour les sites de coulées d'argile.

1.3 Revue des études effectuées dans l'est du Canada sur l'argile extra-sensible

1.3.1 Formation de l'argile extra-sensible de l'est du Canada

Au point de vue mode de déposition, l'argile sensible de l'est du Canada diffère très peu de celle des pays scandinaves. Lors du retrait des glaciers du Wisconsin (Gadd (36)), il y a eu déposition dans les zones envahies par l'eau à cause de l'affaissement du continent sous le poids

énorme des glaciers. Il semble cependant que la concentration du sel dans ces bassins n'était pas aussi élevée que dans l'eau de mer contrairement au mode de déposition accepté pour la plupart des argiles scandinaves. La mer Champlain était au début un lac glaciaire (Prest (83)). Il y a eu ensuite invasion de la mer mais avec un apport d'eau douce plus ou moins important du côté des Grands Lacs provenant de l'eau de fonte des glaciers (Hurtubise et al. (40)). C'est pourquoi la teneur en sel de l'eau interstitielle des dépôts d'argile du Québec ne se rapproche pas de celle de l'eau de mer.

La même théorie de floculation est cependant acceptée car la teneur en sel de l'électrolyte nécessaire pour favoriser la floculation est assez faible (Rosenqvist (87)). O'Brien (79) a examiné au microscope une argile composée d'illite et sédimentée artificiellement en eau salée. Il a remarqué un arrangement aléatoire des minéraux argileux et des contacts face contre face ou face contre côté entre les plaquettes argileuses. Crawford (20) a prouvé l'arrangement aléatoire des particules des argiles marines en mesurant la conductivité thermique qui n'est que 10% plus élevée horizontalement que verticalement comparé à 70% pour une argile lacustre. Le retrait est aussi à peu près égal dans les deux directions. Mitchell et Houston (72) ont remarqué cependant que les minéraux argileux tels que la kaolinite, la chlorite et l'illite ont tendance à floculer même s'il n'y a pas de sel dans l'eau. Ceci peut expliquer la floculation des argiles varvées.

Le rebondissement subséquent du continent de l'ordre de 180 m. (Liebling et al. 64) a permis une érosion et un lessivage des dépôts argileux (il est évalué à 244 m. pour la vallée de la rivière Ottawa par Sangrey

et Paul (91)). Cependant, dans la plupart des dépôts du Québec, ce lessivage s'effectue de la surface vers la profondeur (Larochelle et al. (58)) alors que Soderblom (99) a remarqué un lessivage vers le haut et vers le bas pour les argiles suédoises. De plus, Larochelle et al. (58) concluent que les vallées dans le roc favorisent un écoulement de l'eau et en même temps un lessivage plus intense de l'argile. C'est pourquoi les zones instables sont souvent associées à ces vallées.

Il est donc certain que le lessivage des sels de l'eau interstitielle a contribué à l'augmentation de la sensibilité des argiles de l'est du Canada. Jusqu'à date cependant, aucune relation générale n'a été établie entre la teneur en sel de l'eau interstitielle et la sensibilité de ces argiles. Seule la région d'Ottawa a été étudiée dans ce sens par Eden et Crawford (25) et Penner (81). Ils ont conclu que le lessivage n'est pas le seul facteur contrôlant la sensibilité. Il faut toutefois noter que, selon Gadd (Penner (81)), la partie supérieure du dépôt argileux de cette région a été redéposée en eau douce après que le dépôt original eut été érodé par un apport d'eau douce important provenant de la fonte des glaciers et de la région des Grands Lacs. Le dépôt de cette région est donc différent des autres dépôts de la mer Champlain.

1.3.2 Facteurs contrôlant la sensibilité des argiles de l'est du Canada

Plusieurs chercheurs ont tenté d'élucider le problème de la sensibilité des argiles. Outre la nécessité d'une faible teneur en sel, Penner (81) a remarqué que la sensibilité des argiles augmente avec le potentiel électrocinétique des particules ou leur répulsion (fig. 8), tout comme l'ont déduit Bjerrum et Rosenqvist (12). Il ajoute aussi que les

autres facteurs augmentant la sensibilité des argiles sont la granulométrie et la valence des ions de l'eau interstitielle de charge opposée aux particules solides. En effet, la sensibilité croît avec la diminution de la surface spécifique de l'argile, la diminution de la quantité de cations bivalents de l'eau interstitielle et l'augmentation de la quantité de cations monovalents. (tableau 7)

Eden et Mitchell (27) ont trouvé que la fissuration des argiles est un important facteur influençant la sensibilité. De même, Sangrey et Paul (91) ont remarqué dans leur étude des mouvements de sol de la région d'Ottawa que les coulées d'argile se produisent dans la zone où l'argile est très fissurée (fissures de 1 à 10 mm.). Cette zone ne correspond pas à la partie la plus sensible du dépôt, mais seulement à la couche d'argile redéposée.

Mitchell et Houston (72), Kenney, Moum et Berre (54) et Houston et Mitchell (39) s'accordent pour dire que les argiles de l'est du Canada sont cimentées soit par des carbonates, des oxydes de fer, de l'aluminium et des matières organiques. Ces ciments augmentent la résistance au cisaillement et par le fait même la sensibilité car ils sont brisés au remaniement.

Selon Skempton et Northey (98), la sensibilité peut être due à la thixotropie pour les argiles de faible à moyenne sensibilité. Quant aux argiles extra-sensibles, la thixotropie ne contribue qu'à une faible partie de la sensibilité. Ils basent leur hypothèse à partir d'essais de thixotropie faits sur une période de plus d'un an; les argiles peu sensibles ont un regain de résistance beaucoup plus élévé que les argiles très sensibles, le regain de résistance étant calculé par rapport à la résistance non remaniée.

1.3.3 Minéralogie des argiles de l'est du Canada

La minéralogie des argiles sensibles de l'est du Canada diffère très peu de celle des pays scandinaves. La fraction argileuse se compose surtout d'illite avec une certaine quantité de chlorite comme celle de ces derniers mais elle comprend en plus une petite quantité de minéraux expansifs comme la montmorillonite et la vermiculite et un peu de kaolinite. La fraction non argileuse plus petite que 2μ se compose de farine de roche, soit du quartz et du feldspath avec un peu d'amphibole et des carbonates (Crawford (20), Houston et Mitchell (39), Liebling et Kerr (64), Torrance (106)).

Les argiles de l'est du Canada contiennent généralement un pourcentage plus élevé de particules plus petites que 2μ que les argiles scandinaves (Penner (81)).

Soderman et Quigley (102) ont analysé une argile lacustre du lac glaciaire Barlow-Ojibway et l'argile à Léda de la région d'Ottawa. Les pourcentages de minéraux argileux et non argileux sont respectivement 90% et 10% pour la première et 85% et 15% pour la deuxième. Pour la région de Fort-Rupert, Ballivy et Loiselle (5) donnent un pourcentage de minéraux argileux de 35% seulement pour la couche d'argile marine. Ces pourcentages semblent démesurément élevés car une étude plus récente de Foscal-Mella (35) évalue le pourcentage des minéraux argileux entre 15 et 25% pour les argiles distales et entre 5 et 15% pour les argiles proximales. Les argiles proximales sont les argiles des dépôts les plus près du front glaciaire, donc vers le nord, et les argiles distales sont celles des dépôts formés plus au sud du front glaciaire.

1.3.4 Classification de l'argile extra-sensible de l'est du Canada

Il n'existe pas de classification propre aux argiles de l'est du Canada pour différencier celles qui sont peu sensibles et extra-sensibles. Ces argiles sont souvent comparées à celles de Scandinavie et la classification utilisée dans ces pays est généralement adoptée pour les classifier.

1.3.5 Salinité et agents dispersants des argiles extra-sensibles de l'est du Canada

Les argiles sensibles de l'est du Canada ont une teneur en sel très basse. Il ne faut pas cependant conclure à un lessivage aussi important qu'en Scandinavie car le milieu de déposition était généralement moins salé (section 1.3.1). La relation entre la salinité et la sensibilité n'est pas la même qu'en Norvège (Sangrey et Paul (91), Penner (81)).

Sangrey et Paul (91) ont trouvé que les coulées d'argile dans la région d'Ottawa étaient limitées à la zone d'argile redéposée où les cations dominants dans l'eau interstitielle sont Ca^{++} et Mg^{++} et où le rapport Na^{+}/Ca^{++} est inférieur à 5. Ces valeurs entrent en contradiction avec les données de Mitchell et Markell (75) pour cinq coulées d'argile; dans tous les cas, Na^{+} est nettement dominant et le rapport Na^{+}/Ca^{++} est de beaucoup supérieur à 5 (tableau 8). Egalement, ces résultats sont totalement contraires aux données des Suédois et des Norvégiens qui ont identifié le sodium comme cation dominant dans les argiles extra-sensibles.

Torrance (106) en vient à la conclusion que l'argile d'Ottawa se comporte comme les argiles norvégiennes à l'addition de sel. La résis-

tance remaniée et la limite liquide croissent avec l'augmentation de la concentration de l'électrolyte. Ces études prouvent que le lessivage a beaucoup d'influence sur la sensibilité de l'argile à Léda.

Une grande part de l'augmentation de la sensibilité des argiles de l'est du Canada est attribuée à la présence d'agents dispersants (Torrance (106), Mitchell et Houston (72)). Cependant, il n'y a pas eu d'études pour déterminer quels sont ces agents dispersants.

1.3.6 Caractéristiques générales des argiles extra-sensibles de l'est du Canada

Les argiles extra-sensibles de l'est du Canada sont d'origine marine et leurs propriétés sont très semblables aux argiles scandinaves. Elles sont inactives et se composent principalement d'illite, de chlorite, de quartz et de feldspath. Leur indice de plasticité est faible et leur limite liquide est inférieure à leur teneur en eau naturelle. Leur résistance remaniée est évidemment très faible de même que la teneur en sel de l'eau interstitielle qui est inférieure à 2 g/l (Penner (81)).

Les caractéristiques géotechniques de plusieurs sites de l'est du Canada où il s'est produit des glissements de terrain et des coulées d'argile sont données au tableau 9.

CHAPITRE 2

CHOIX ET DESCRIPTION DES SITES ETUDIES

2.1 Introduction

Comme cette étude nécessitait l'analyse d'argile provenant de glissements et de coulées d'argile, trois régions des dépôts de la mer Champlain ont été étudiées. Ce sont les régions de la rivière Yamaska, de Louiseville et de St-Ambroise de Kildare. Ces régions ont été choisies d'après leur position et leur activité au point de vue des mouvements de sol ou des ruptures de pentes. Elles sont assez éloignées l'une de l'autre pour que l'argile de chacune soit différente et permette ainsi de définir des relations générales. De plus, chaque région étudiée a été le siège de glissements et de coulées d'argile assez récents. De nombreuses cicatrices de mouvements plus anciens sont aussi facilement identifiables le long des berges des cours d'eau.

Dans la région de la rivière Yamaska, trois sites ont été étudiés, soit un glissement et deux coulées. Dans celle de Louiseville, un site de chaque type de mouvement de sol a été étudié tandis qu'à St-Ambroise de Kildare, cinq sites ont fait l'objet d'études, soit trois coulées, un glissement et un site sans rupture de pente.

De plus, des essais ont été effectués sur des échantillons d'argile de onze autres sites représentant la grande majorité des dépôts argileux de la province. Parmi ces sites, sept représentent encore les dépôts argileux de la mer Champlain, deux sont situés dans les dépôts du

lac glaciaire Barlow-Ojibway, un dans la mer Laflamme et un dans la mer de Tyrrel. Tous ces sites sont identifiés à la figure 9.

2.2 Région de la rivière Yamaska

Cette région où coule la rivière Yamaska est marquée de nombreuses cicatrices de glissements et de coulées, particulièrement à St-Louis de Bonsecours. Ce dernier site a d'ailleurs fait l'objet d'études antérieures.

2.2.1 Description du glissement de Yamaska

Le premier site étudié est localisé dans le village de Yamaska. C'est un important glissement de terrain qui s'est produit le 2 novembre 1974 au matin. Selon les informations recueillies sur place, le phénomène s'est déroulé en deux étapes. Une première tranche jusqu'en bordure de la route glissa dans la rivière Yamaska; environ deux heures plus tard, un deuxième glissement emporta la route sur une longueur de 130 mètres et les terrains avoisinants jusqu'à 55 mètres de la rive, faisant basculer une maison dans le cratère et endommageant lourdement une deuxième (fig. 10).

Le glissement s'est produit dans une légère courbure de la rivière (fig. 11 et 12). A cet endroit, selon le maire du village, l'érosion rongeait lentement la berge particulièrement lors de la crue du printemps et le chenal pour la navigation de plaisance passait tout près de la rive. La berge y était aussi très escarpée avec une pente de l'ordre de 30°. Le

profil du terrain avant et après le glissement a été relevé à partir de plans topographiques fournis par le Ministère des Richesses Naturelles (fig. 13).

2.2.2 Localisation des forages de Yamaska

Deux forages ont été exécutés à proximité du glissement de Yamaska (fig. 11, 12 et 13). Dans le forage à l'arrière du glissement, des échantillons de 75 cm. ont été prélevés à tous les deux mètres tandis que les mêmes prélèvements ont été faits à tous les mètres dans le forage sur le haut de la berge à côté du glissement.

2.2.3 Description des deux coulées d'argile étudiées à St-Louis de Bonsecours

Les deux autres sites étudiés sont situés près de St-Louis de Bonsecours, environ vingt kilomètres en amont de Yamaska. Ces deux sites sont localisés sur la ferme de M. Paul Deroy sur les rives de la rivière Yamaska. Ce sont deux coulées d'argile qui se sont produites voisines l'une de l'autre (fig. 14). A cet endroit, la berge de la rivière a une pente moyenne de près de 27° et les cicatrices de plusieurs autres petits glissements mineurs sont visibles.

La coulée la plus importante s'est produite en 1945 emportant une partie de la route et quelques batiments de ferme. Le cratère formé par cette coulée a la forme d'un goulot de bouteille avec une longueur de 275 mètres par 100 mètres de large près de la rivière et 180 mètres à sa largeur maximale (Morin (77)).

La seconde coulée est survenue au printemps 1968 à 120 mètres en aval de celle de 1945. Le cratère formé mesure environ 40 mètres de large par 73 mètres de profondeur, s'approchant à 38 mètres de la coulée de 1945 (Lefebvre (60)).

2.2.4 Localisation des forages à St-Louis de Bonsecours

Un forage a été exécuté à proximité de chaque coulée (fig. 14). Des échantillons de 75 cm. ont été prélevés à tous les mètres au forage #1 et à tous les deux mètres au forage #2. Les profils des coulées ont été tracés à partir des relevés topographiques de Lefebvre (60) (fig. 15 et 16).

2.3 Région de Louiseville

Les sites étudiés sont localisés à environ 70 kilomètres au sud-ouest de la région de Grondines où la fréquence des glissements et des coulées d'argile a été étudiée par Karrow (46).

Deux sites ont été étudiés dans cette région. Ils sont situés tout près de Louiseville sur les rives de la Grande Rivière du Loup et de la Petite Rivière du Loup (fig. 17). L'examen de photos aériennes de la région a permis de déceler les cicatrices de quelques coulées d'argile. Ces coulées sont de dimensions moyennes comparativement à d'autres sites connus (St-Jean-Vianney, St-Ambroise de Kildare, St-Thuribe, ...). Un examen sommaire des rives des rivières des deux sites étudiés a permis de constater une érosion assez active et la présence de nombreux petits décrochements.

2.3.1 Coulée d'argile du club de golf de Louiseville

Le premier site étudié est localisé sur le terrain du club de golf de Louiseville où une coulée d'argile causa pour $200,000.00 de dommages le 15 avril 1969 (Karrow 48). A cet endroit, la rivière a formé des méandres et l'érosion y est très forte. Plusieurs cratères de petits glissements et de petites coulées sont visibles en amont du club de golf. Sur les verts de ce dernier, il est même possible de voir deux cicatrices de petites coulées et un autre petit glissement assez récent au point d'attaque d'un méandre.

Selon le gérant du club de golf, la coulée d'argile s'est produite à un endroit où la rivière avait été détournée pour l'aménagement du parcours de golf. Par la suite, la rivière a repris son lit antérieur. Le cratère laissé par l'éboulis mesure environ 90 mètres de largeur par 120 mètres de profondeur (fig. 19). Un seul forage a été exécuté à l'arrière de cette coulée. Le profil du terrain actuel a été relevé par arpentage (fig. 19).

2.3.2 Glissement près de la Grande Rivière du Loup

Le second site étudié est situé à environ 3.2 km du club de golf. A cet endroit, le dépôt a déjà été érodé par le fleuve St-Laurent sur une profondeur de 10 mètres environ.

Le glissement étudié s'est produit vers le milieu d'avril 1975 dans la partie convexe d'une légère courbe de la rivière, emportant la route qui longe celle-ci. Le cratère formé mesurait environ 27 mètres de largeur

et autant en longueur. Le matériel déplacé ne s'est pas liquéfié et il obstrue partiellement le lit de la rivière (fig. 20). Deux autres glissements semblables se sont produits à 30 mètres et 90 mètres en amont du glissement étudié respectivement un an et deux ans avant celui-ci. Un seul forage a été exécuté à l'arrière de ce petit glissement. Le profil de la pente a été relevé par arpentage (fig. 21).

2.4 Région de St-Ambroise de Kildare

St-Ambroise de Kildare est localisé à environ 12 kilomètres au nord de Joliette. Le dépôt argileux de cette région fait partie des sédiments de l'ancienne mer Champlain. La région étudiée est située au fond d'une vallée de trois kilomètres de largeur environ. Des affleurements rocheux sont visibles de chaque côté de cette vallée. Le dépôt mesure jusqu'à 38 mètres d'épaisseur selon les puisatiers de la région. Le ruisseau qui y coule et ses tributaires ont fortement érodé le dépôt, creusant des ravins profonds et escarpés qui favorisent les glissements de terrain.

Sur une longueur de 5.5 km.,les cicatrices d'au moins sept coulées d'argile importantes sont visibles (fig. 22).

Les pentes et les berges de la rivière ont en général été tellement remodelées et adoucies par les mouvements de sol qu'il ne reste que peu d'endroits propices au déclenchement d'autres coulées. Aux quelques endroits où les pentes sont restées très escarpées, des zones plus sablonneuses sont visibles dans le profil au niveau de la rivière. Ceci explique la présence de petits glissements et non de coulées d'argile

à ces endroits. Ces petits glissements sont très fréquents, même aux endroits où les pentes ont été passablement adoucies. Ils sont le résultat direct de l'érosion car ils se produisent toujours au point d'attaque du courant dans les courbes de la rivière.

2.4.1 Coulée d'argile du 19 avril 1975

Une importante coulée d'argile s'est produite le 19 avril 1975 sur la ferme de M. Maurice Simard emportant 14 acres de terrain et formant un cratère de 140 m. de largeur par 384 m. de longueur et de 10 m. d'épaisseur environ (fig. 23). La coulée a été limitée d'un côté par une ancienne coulée et de l'autre par un ravin creusé par l'érosion.

Selon le cultivateur, un premier glissement de 10 m. de largeur par 6 m. de longueur s'était produit à cet endroit au printemps 1974. La rivière formait une courbe à cet endroit et érodait activement la pente.

Le glissement de 1975 est de type rétrogressif. Il est en effet possible de voir une alternance de bandes transversales d'argile et de tourbe de 15 m. à 30 m. de largeur dans le cratère du glissement. L'argile s'est liquéfiée en grande partie au remaniement et s'est écoulée dans la rivière. Le reste des débris non totalement remaniés ont obstrué la rivière jusqu'à 335 m. en amont du glissement et à plus d'un kilomètre en aval. Quelques blocs intacts assez volumineux sont restés debout au centre du cratère.

Le dépôt d'argile de cette région est assez homogène. Il se compose d'argile silteuse sous une couche de sable de 1 à 1.2 m. Une stratification horizontale dans l'argile a été décelée sur la paroi du

cratère. De nombreux petits coquillages et quelques pierres mesurant jusqu'à 10 cm. de diamètre sont visibles dans les débris du glissement.

2.4.2 Autres sites étudiés dans la région de St-Ambroise de Kildare.

Tel que mentionné à la section 2.4, plusieurs petits glissements ou petites coulées se produisent fréquemment dans le secteur. Un glissement et une coulée récente parmi ces autres sites ont été étudiés.

Le premier site étudié est une coulée d'argile qui s'est produite en fin de février ou au début de mars 1975, environ 460 m. en amont de la grosse coulée du printemps 1975 et de l'autre côté de la rivière. Le cratère formé mesure 70 m. de longueur par 45 m. de largeur et 8 m. de profondeur (fig. 24).

Le deuxième site étudié est localisé environ 3.2 km. en amont de la grande coulée de 1975. Il s'agit d'un petit glissement qui s'est produit au printemps de 1973. Le cratère mesure 35 m. de longueur par 25 m. de largeur. La couche impliquée dans ce glissement semble s'être limitée à la zone altérée de surface. Il n'y a pas de grosses coulées qui se sont produites dans ce secteur; c'est probablement parce que le dépôt est moins épais à cet endroit (fig. 22).

2.4.3 Localisation des forages à St-Ambroise

Comme cette région assez restreinte présente un problème particulier à cause de sa grande concentration de coulées d'argile six forages ont été exécutés à proximité de glissements et coulées et un autre sur une pente naturelle à proximité de la grande coulée de 1975 (fig. 22).

Les profils des coulées, du glissement et de la pente où des forages ont été faits apparaissent aux figures 25 à 29. Ils ont été relevés par arpentage ou à partir de cartes topographiques détaillées.

2.5 Autres sites étudiés.

Outre les sites échantillonnés lors de ce travail, des études ont été faites sur de nombreux échantillons d'argile de différents sites alors disponibles au laboratoire de l'université.

2.5.1 Sites situés dans les dépôts de la mer Champlain

2.5.1.1 Le Coteau

Des glissements se sont produits au début d'avril 1971 près de la rue Le Coteau à Gatineau. Les échantillons d'argile étudiés proviennent d'un forage exécuté par la firme McRostie et Ass. à proximité des glissements, pour fin d'étude de stabilité de la pente. Ces glissements ont partiellement détruit un immeuble en construction et menacé d'en détruire un second (fig. 30). Une description détaillée de ces événements est fournie par Eden (23).

Même si l'argile de cette région est classée parmi les dépôts de la mer Champlain, la couche supérieure du dépôt est un peu particulière car elle se compose d'une argile qui est d'origine marine, mais qui a été érodée et redéposée dans une eau plus douce (Penner 81). McRostie et Ass. (68) évaluent cette couche d'argile redéposée à 10.5 m. d'épaisseur à l'endroit

du forage (élév. 82.9 m.) avec une couche d'argile marine sous-jacente de 20 m.

Les échantillons d'argile utilisés étaient entreposés dans une chambre humide depuis 15 mois lors des essais. Les résultats d'identification utilisés proviennent du rapport de McRostie et al. (68).

2.5.1.2 Nicolet

L'argile de Nicolet utilisée dans cette étude provient de deux forages et de blocs prélevés par A. Philibert (82) pour l'étude de la résistance au cisaillement. Elle a été prélevée non loin de l'endroit où s'était produit une importante coulée d'argile le 12 novembre 1955 (Hurtubise et al. 40)).

Les échantillons d'argile de Nicolet utilisés étaient entreposés depuis un an et demi environ lors des essais. Les résultats d'identification et de résistance au cisaillement mesurée au scissomètre ont été fournis par Philibert (82).

2.5.1.3 Outardes 2

Les échantillons d'argile de Outardes 2 ont été prélevés à proximité de la digue ouest du complexe hydro-électrique de Outardes 2. Une section de cette digue est construite sur cette argile qui est également utilisée pour fabriquer un mélange sable-argile servant à construire le noyau des digues.

2.5.1.4 Rosemère

L'argile de Rosemère provenait de blocs prélevés par J. Chahde (18). Une rupture s'est produite à cet endroit dans une coupe d'argile pratiquée pour la construction d'une route. Les résultats d'identification utilisés dans cette étude proviennent du forage fait par le Ministère des Transports.

2.5.1.5 Ste-Rosalie

L'argile de Ste-Rosalie avait été prélevée dans le cadre d'un cours par les étudiants de maîtrise en mécanique des sols. Une rupture de la fondation sous un réservoir d'essence s'était produite à cet endroit.

Les échantillons d'argile de ce site étaient entreposés dans une chambre humide depuis huit mois lors des essais.

2.5.1.6 St-Thuribe

Les échantillons d'argile de St-Thuribe ont été prélevés par M. Fafard (31). Une importante coulée d'argile s'était produite à cet endroit en 1898 et une petite en 1972 (fig. 31). Plusieurs des résultats obtenus par Fafard ont été utilisés dans cette étude.

2.5.1.7 St-Urbain

L'argile de St-Urbain provenait des échantillons prélevés par

J. Lafleur dans le cadre de son étude de l'écoulement de l'eau dans les pentes naturelles. Le forage a été fait près de deux coulées d'argile qui se sont produites en 1962 et en 1973 (fig. 32 et 33). Les résultats d'identification sur l'argile du forage fait par le Ministère des Richesses Naturelles ont également été utilisés dans cette étude.

2.5.2 Site étudié dans les dépôts de la mer de Laflamme

2.5.2.1 St-Jean-Vianney

L'argile de St-Jean-Vianney provenait d'un bloc prélevé sur le site de la grande coulée d'argile qui s'est produite le 4 mai 1971. Une description détaillée de l'événement est fournie par Tavenas et al. (103).

Le bloc d'argile était entreposé dans une chambre humide depuis plus de deux ans lors des essais.

2.5.3 Sites situés dans les dépôts du lac glaciaire Barlow-Ojibway

2.5.3.1 Baie-James

L'argile de Baie-James provient de blocs prélevés à deux sites sur le tracé de la route d'accès à la Baie-James. Le premier site est situé tout près de Matagami tandis que le second site est localisé à 40 kilomètres au nord de cette même ville. Cette argile a été étudiée par R. Lemieux (63). Quelques résultats d'identification ont également été fournis par cet auteur.

2.5.3.2 Matagami

L'argile utilisée provenait d'un forage exécuté lors de l'investigation des sols pour la construction d'une école à Matagami.

2.5.4 Site situé dans les dépôts de la mer de Tyrrell

2.5.4.1 La Grande

Le matériau étudié a été prélevé sur les rives de la rivière La Grande. Comme ce bloc était presque exclusivement du silt, très peu d'essais ont été faits sur ce matériau.

CHAPITRE 3

ECHANTILLONNAGE ET ESSAIS EFFECTUES

3.1 Essais effectués sur le terrain

Outre l'échantillonnage nécessairement effectué sur le terrain, deux tubes par forage ont été détubés sur le chantier immédiatement après prélèvement, sauf pour les forages 5, 6 et 7 à St-Ambroise où aucun tube n'a été détubé sur le terrain et pour le forage 2 à Yamaska où un seul tube a été détubé. Une description visuelle de l'argile, la mesure de la résistance au cisaillement non remaniée et remaniée avec le cône suédois, la limite liquide et un essai de thixotropie étaient immédiatement effectués sur l'argile. Les échantillons non utilisés étaient scellés dans la cire pour d'autres essais en laboratoire.

Un relevé des pentes par nivellement et à la stadia a été fait pour les deux forages de Louiseville et les forages 1, 4, 5 et 6 à St-Ambroise.

3.2 Essais effectués au laboratoire

Parmi les essais exécutés au laboratoire, il faut distinguer les essais pour déterminer les caractéristiques géotechniques de l'argile et ceux pour déterminer ses propriétés géochimiques. Parmi les premiers, les essais suivants ont été effectués: teneur en eau, limite liquide, limite plastique, sédimentométrie, mesure de la résistance au cisaillement non remaniée et remaniée avec le cône suédois et essais de thixotropie.

L'analyse du pourcentage de matière organique dans l'argile, la mesure du pH de l'argile, la détermination des principaux cations échangeables, l'extraction d'eau interstitielle, la mesure de la salinité de l'eau interstitielle, l'analyse des principaux cations et anions de l'eau interstitielle et l'analyse minéralogique de l'argile sont les essais réalisés pour déterminer ses caractéristiques géochimiques.

3.3 Procédure des différents essais

3.3.1 Echantillonnage

Le prélèvement d'échantillons a été effectué au moyen de tubes à paroi mince de 6.985 cm. de diamètre et du piston Geonor. L'extrémité des tubes utilisés était usinée selon la désignation ASTM D 1587-74 de façon à tailler l'argile et à minimiser le remaniement lors du prélèvement. L'échantillonnage a été effectué sans creuser d'avant-trou, sauf pour la couche altérée de surface qui était forée à la tarière mécanique. Le piston était ensuite descendu par fonçage jusqu'à la profondeur désirée. Des échantillons de 75 cm. ont ainsi été prélevés soit à tous les mètres ou à tous les deux mètres selon le forage.

Les tubes prélevés étaient aussitôt scellés soit par un bouchon étanche ou une membrane imperméable (genre pellicule plastique transparente). Pour le transport, ils étaient fixés solidement dans des boîtes munies de supports de caoutchouc afin d'amortir les chocs pendant le transport et prévenir le remaniement des échantillons.

3.3.2 Détubage, taillage et conservation des échantillons

Le détubage a généralement été effectué dans la semaine suivant l'échantillonnage, sauf pour le détubage sur le chantier fait immédiatement après le prélèvement. Une description visuelle de l'argile a été faite à ce moment. Chaque tube a généralement été taillé en sept échantillons (fig. 34). Chaque extrémité du tube a été rejetée et sur la partie conservée, trois tranches de 1 cm. ont été découpées pour faire des teneurs en eau. Ensuite, deux échantillons de 12cm. (no. 1 et 7) ont été taillés pour être mélangés ensemble. Les 5 autres échantillons mesuraient généralement 7 cm. Les échantillons 2 et 6 étaient destinés aux extractions d'eau interstitielle. Les échantillons 3, 4 et 5 ont servi à faire des mesures de résistance au cisaillement non remaniée et remaniée à différents intervalles de temps; ces trois échantillons ont été taillés au centre du tube car cette partie est la moins remaniée.

Sauf pour les échantillons de Yamaska où les échantillons ont tout d'abord été enveloppés d'une membrane imperméable et d'un filet de nylon avant d'être cirés, les échantillons ont été trempés dans la cire aussitôt après leur taillage, puis enveloppés dans un mince polythène et recouverts d'un filet de nylon protecteur, le tout recouvert de deux ou trois couches de cire. Cette procédure a pour but d'empêcher tout contact de l'air avec l'échantillon et éviter ainsi son oxydation. En effet, si un échantillon est enveloppé avant de le tremper dans la cire, il reste toujours de l'air emprisonné et l'oxydation se produit assez rapidement. Ce phénomène a été remarqué pour les échantillons de Yamaska.

Les échantillons ainsi scellés ont été conservés dans une chambre humide jusqu'au moment de faire les essais.

3.3.3 Homogénéisation de l'argile

Afin d'obtenir des valeurs plus représentatives et pour limiter le nombre d'essais, les échantillons 1 et 7 ont été mélangés ensemble en une pâte pour les essais suivants: teneur en eau, limites liquide et plastique, essai de thixotropie, sédimentométrie, mesure du pH, analyse du pourcentage de matière organique, amalyse des quatre principaux cations échangeables et analyse minéralogique. Ce mélange a été effectué au moment de faire les limites d'Atterberg. Les échantillons ont été nettoyés en surface auparavant.

3.3.4 Essais pour déterminer les caractéristiques géotechniques de l'argile

3.3.4.1 Teneur en eau

Trois teneurs en eau ont été effectuées au détubage en prenant une quantité de 30 à 40 grammes au milieu de la tranche de 1 cm. taillée à cet effet; une quatrième teneur en eau a été effectuée au moment du mélange des échantillons 1 et 7. Ces essais ont été faits selon la procédure ASTM D 2216-71.

3.3.4.2 Limite liquide

La limite liquide a été effectuée sur l'argile mélangée des échantillons 1 et 7. Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer la limite liquide. Ce sont la procédure normalisée ASTM D 423-66 avec la coupelle à Casagrande et le cône Géonor. La table de l'appareil utilisé

avait un rebondissement de 85% et le couteau était celui normalisé par Casagrande. La limite au cône Géonor ou nombre de finesse a été déterminée selon la méthode fournie par Karlsson (45). Elle correspond à la teneur en eau à laquelle le cône de 60 g. - 60° s'enfonce de 10 mm. dans l'argile.

Dans les deux cas, la limite a été effectuée à partir d'échantillons humides. L'argile a été étendue sur du papier absorbant pour réduire graduellement sa teneur en eau naturelle et permettre de déterminer sa limite liquide. De l'eau distillée a été ajoutée en de rares occasions car la limite liquide était généralement inférieure à la teneur en eau naturelle.

3.3.4.3 Limite plastique

La limite plastique a été effectuée à partir du mélange humide asséché avec des papiers absorbants et selon la norme ASTM D 424-59.

3.3.4.4 Sédimentométrie

La granulométrie des argiles a été déterminée sur une partie de la pâte avec la balance hydrostatique mise au point à l'Université de Sherbrooke (Aitcin et Poulin (3)). L'argile n'a pas été séchée avant de faire les analyses granulométriques.

3.3.4.5 Mesure de la résistance au cisaillement

Les mesures de la résistance au cisaillement non remaniée et remaniée ont été faites au cône Géonor. La calibration utilisée a été

celle du "Swedish Geotechnical Institute". La mesure de CU non remaniée a été faite de la façon suivante: la cire a été enlevée à chaque extrémité de l'échantillon et, après avoir aplani les extrémités en enlevant l'argile remaniée avec une spatule, la mesure de la résistance au cisaillement a été faite avec les cônes de 100 g. - 30° et 400 g. - 30°, soit une lecture avec le cône 400 g. et trois lectures avec le cône 100 g. à chaque extrémité. Pour mesurer la résistance remaniée, l'échantillon a été débarrassé de sa cire, nettoyé puis complètement remanié; la pâte a alors été mise dans un becher de 100 ml ayant un diamètre de 5.5 cm. A cette étape, une attention a été apportée pour éviter l'emprisonnement de bulles d'air dans le mélange et pour bien aplanir la surface du mélange. Un délai de cinq à dix secondes était nécessaire pour les manipulations entre la préparation de l'échantillon et l'essai lui-même.

3.3.4.6 Essais de thixotropie

Les essais de thixotropie ont été faits sur une partie de l'argile mélangée. La procédure est semblable à la mesure de la résistance remaniée. La mesure du gain de résistance après remaniement a été faite aux intervalles de temps suivants: ½, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60 et 120 minutes après remaniement. Pour les temps supérieurs à 2 minutes, le becher était recouvert d'une membrane de polythène et de papier mouillé afin de prévenir le séchage de l'échantillon.

3.3.5 Essais pour déterminer les caractéristiques géochimiques de l'argile

3.3.5.1 Analyse du pourcentage de matière organique

Ces analyses ont été effectuées au laboratoire du Ministère de l'Agriculture à Sherbrooke. La procédure utilisée a été celle par voie humide: 0.5 gramme d'argile est oxydé par un acide chromique et l'excès d'acide est ensuite titré avec une solution de sel ferreux. Cette méthode donne le pourcentage de carbone dans l'argile.

3.3.5.2 Mesure du pH de l'argile

Ces analyses ont été faites au Ministère de l'Agriculture à Sherbrooke. La procédure utilisée a été la suivante: mélange de l'argile avec de l'eau distillée dans les proportions 1 dans 1 en volume, attente de 20 minutes, puis mesure du PH.

3.3.5.3 Analyse des principaux cations échangeables

Ces analyses ont été faites aussi au Ministère de l'Agriculture à Sherbrooke. La procédure utilisée est décrite à l'appendice B.

3.3.5.4 Extraction d'eau interstitielle

L'extraction d'eau interstitielle a été faite au moyen d'appa-

reils à consolidation Wykeham Farrance dans un montage en plexiglass (fig. 35). Pour l'extraction d'eau par consolidation, 4 échantillons de 1.9 cm. d'épaisseur environ par 6.15 cm. de diamètre ont été taillés. Un papier filtre a été placé entre chaque échantillon et autour des quatre échantillons. La pression de consolidation utilisée a été de 7 kg/cm^2 sauf dans quelques cas où il a fallu doubler cette pression pour obtenir suffisamment d'eau. Cette pression plus élevée a ainsi été nécessaire pour extraire l'eau des argiles de Le Coteau, St-Jean-Vianney et St-Urbain.

3.3.5.5 Mesure de la salinité de l'eau interstitielle

La salinité de l'eau interstitielle a été mesurée à l'aide d'un pont de conductivité Yellow Springs Instrument, model 31. La sonde utilisée a été la cellule 3403 de la même compagnie. La calibration de la cellule a été faite selon les spécifications du manufacturier.

La salinité de l'eau interstitielle est exprimée en équivalent NaCl ou KCl tout au long de cet ouvrage, les deux sels ayant sensiblement la même conductivité (fig. 36). La relation obtenue entre la conductivité et la teneur en sel lors de la calibration de l'appareil se rapproche beaucoup de celle de l'eau de mer (fig. 37).

3.3.5.6 Analyse des principaux cations et anions de l'eau interstitielle

Les analyses des principaux cations de l'eau interstitielle ont été effectuées au Ministère de l'Agriculture à Sherbrooke et à l'Université de Sherbrooke au moyen d'absorption atomique. Au Ministère, un appareil de

marque Perkin Elmer # 370 a été utilisé et les analyses ont été faites sans diluer les échantillons d'eau. Au laboratoire de génie chimique de l'université, un appareil de marque Varian AA6 a été utilisé et les analyses ont été faites en diluant plusieurs fois les échantillons lorsque la teneur en sel était élevée.

Les anions de l'eau interstitielle ont été analysés à l'Université de Sherbrooke. Pour ces analyses, les échantillons d'eau de tout un forage ont été mélangés ensemble. Les analyses ont été faites selon les procédures publiées dans "American Public Health Association (4)". Le chlore a été analysé selon la méthode argentométrique et le sulfate selon la méthode turbidimétrique.

3.3.5.7 Analyse minéralogique de l'argile

Des échantillons d'argile du mélange homogénéisé ont servi pour les analyses minéralogiques. Plusieurs échantillons d'un même forage ont été mélangés ensemble pour ne former qu'un seul échantillon sauf pour Yamaska où le profil semblait avoir trois zones stratigraphiques différentes.

Les analyses ont été faites par le Dr. Robert Ledoux du département de génie géologique de l'Université Laval. La détermination des minéraux argileux et non argileux a été faite par diffraction aux rayons X. Les échantillons ont été préparés de la façon suivante pour l'analyse:

- Dispersion de l'argile avec de l'hexamétaphosphate.
- Séparation mécanique par centrifugation de la fraction comprise entre 2 et 0.2 microns et de la fraction plus petite que 2 microns.

- L'échantillon est monté sur une lame de verre sous forme d'une pâte.
- Dilution de la pâte au glycérol 10% dans de l'éthanol. Une goutte de cette solution est déposée sur la pâte étendue.

CHAPITRE 4

PRESENTATION DES RESULTATS

4.1 Caractéristiques géotechniques de l'argile

Les résultats des essais pour déterminer les propriétés géotechniques de l'argile sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques.

Le tableau 10 donne les caractéristiques géotechniques des argiles de tous les sites étudiés. Les valeurs contenues dans ce tableau sont souvent des moyennes pour chaque couche différente dans chacun des profils. D'ailleurs, les profondeurs de chaque couche où une moyenne a été calculée sont identifiées. Ce mode de présentation permet d'éviter d'avoir une foule de valeurs presque identiques. Les caractéristiques géotechniquesfournies dans ce tableau sont la teneur en eau naturelle, les limites de consistance, les indices de plasticité et de liquidité, la résistance au cisaillement non remaniée et remaniée mesurée au cône suédois uniquement, la sensibilité, le pourcentage d'argile ($< 2\mu$) et l'activité. Les résultats de limite liquide présentés dans ce tableau sont ceux des essais faits avec la coupelle à Casagrande tandis que les résultats de résistance au cisaillement sont ceux des essais faits le plus tôt après le détubage.

Le tableau 11 présente les résultats de tous les essais de thixotropie. Ces résultats sont exprimés en pourcentage de regain de résistance par rapport à la résistance remaniée initiale.

Les caractéristiques géotechniques des profils argileux des dépôts étudiés sont présentées sous forme de graphiques aux figures 38 à 55. Ces figures donnent la variation des différentes caractéristiques géotechniques de l'argile avec la profondeur. En plus des mêmes caractéristiques que celles compilées au tableau 10, ces figures donnent la description visuelle de l'argile faite lors du détubage, la résistance au cisaillement de l'argile non remaniée et remaniée mesurée au cône suédois après différents temps de conservation et la résistance au cisaillement de l'argile mesurée aussi au cône suédois à différents intervalles de temps après son remaniement. Cette dernière mesure s'appelle aussi le regain thixotropique de l'argile. Les figures 41, 42 et 52 donnent des valeurs de résistance au cisaillement mesurées au scissomètre de terrain ou de laboratoire. Ces résultats ne sont pas utilisés dans la discussion des résultats.

Les figures 56 à 67 présentent sous forme de graphiques la plupart des résultats des essais de thixotropie compilés au tableau 11. Elles permettent de voir l'augmentation du regain de résistance de l'argile remaniée en fonction du temps.

4.2 Caractéristiques géochimiques de l'argile

Les résultats servant à déterminer les caractéristiques géochimiques de l'argile sont également présentés sous forme de tableaux et de graphiques.

Le tableau 12 donne les caractéristiques géochimiques des argiles de tous les sites étudiés. Tout comme au tableau 10, plusieurs valeurs représentent une moyenne pour chaque couche différente à l'intérieur d'un même profil. Ces couches sont identiques à celles déterminées au tableau 10.

Les caractéristiques géochimiques de l'argile contenues dans ce tableau sont le pH, le pourcentage de matière organique, la teneur en sel de l'eau interstitielle, les principaux cations et anions de l'eau interstitielle (calcium, magnésium, potassium, sodium, chlore et sulfate) et les principaux cations échangeables de l'argile (calcium, magnésium, potassium et sodium).

Les résultats des analyses minéralogiques effectuées sur huit échantillons sont compilés au tableau 13. Les analyses ont été faites sur la fraction totale, sur la fraction comprise entre 0.2 et 2 microns et sur la fraction plus petite que 2 microns.

Les caractéristiques géochimiques des forages exécutés sont aussi présentées sous forme de graphiques aux figures 76 à 90. Ces figures montrent la variation de la salinité de l'eau interstitielle avec la profondeur et celle des principaux cations de l'eau interstitielle et des principaux cations échangeables de l'argile.

Les résultats d'analyses des principaux cations de l'eau interstitielle présentés au tableau 12 et aux figures 76 à 90 sont ceux des analyses faites au Ministère de l'Agriculture. Ces résultats ont été choisis après avoir comparé la variation de la sommation des cations exprimés en ppm. pour des échantillons d'eau interstitielle ayant une teneur en sel à peu près égale (tableau 14). Les résultats du Ministère de l'Agriculture et de l'Université sont généralement du même ordre de grandeur mais la variation enregistrée au Ministère est nettement inférieure à celle calculée à partir des résultats de l'Université. Ces résultats plus consistants sont probablement dus aux modes d'analyses différents. Comme mentionné précédemment, les analyses à l'Université ont été faites avec dilution contrairement à celles effectuées au Ministère. Les résultats des deux laboratoires sont fournis à l'appendice C.

CHAPITRE 5

DISCUSSION DES RESULTATS

5.1 Introduction

La discussion des résultats est présentée en deux parties. Dans la première partie, des relations générales sont établies pour les argiles du Québec à partir de la somme des données recueillies lors des essais. Ces relations sont comparées avec celles des argiles de Scandinavie et elles vérifient les relations déjà établies pour les argiles du Québec.

Dans la deuxième partie, la discussion des résultats est faite en identifiant séparément les sites de glissements et de coulées dans le but de déterminer quelles sont les caractéristiques des argiles extra-sensibles et de trouver des critères pouvant identifier ces argiles.

La comparaison des résultats des limites liquides effectuées avec la coupelle à Casagrande et le cône suédois n'est pas discutée dans ce chapitre. Elle est présentée à l'appendice D. De même, la variation de la résistance au cisaillement non remaniée et remaniée de l'argile après différents temps de conservation est discutée à l'appendice E.

5.2 Discussion des résultats: relations générales.

Les caractéristiques géotechniques et géochimiques des argiles

du Québec sont discutées dans cette section à partir des résultats présentés au chapitre précédent. La discussion est d'abord faite en étudiant la variation de chaque caractéristique pour l'ensemble des sites étudiés et en mettant en évidence les changements des propriétés de l'argile avec la profondeur dans les dépôts. Par la suite, des relations générales sont établies entre les différentes caractéristiques de l'argile. Pour faciliter la discussion et l'identification des sites, une légende générale a été adoptée et elle est utilisée dans tous les graphiques pour déterminer des relations générales. Cette légende est présentée au tableau 15.

5.2.1 Caractéristiques géotechniques des argiles du Québec

Les caractéristiques géotechniques des argiles du Québec sont discutées à partir des résultats présentés aux tableaux 10 et 11 et aux figures 38 à 67.

5.2.1.1 Teneur en eau

Les argiles du Québec ont une teneur en eau qui varie beaucoup d'un endroit à un autre (variation de 25% à 85%). Par contre, dans un même profil, cette teneur en eau est plus constante. Elle est plus faible dans la zone altérée de surface et ensuite, elle tend généralement à décroître un peu avec la profondeur. Le seul endroit où cette tendance n'a pas été observée est dans les deux forages de Yamaska (fig. 54 et 55). A cet endroit, la stratigraphie est changeante comparativement aux autres sites étudiés.

Il se compose d'une couche d'argile de 5 à 6 mètres en surface, puis d'une zone de silt et de sable fin de 3 mètres d'épaisseur et ensuite d'une autre couche d'argile.

5.2.1.2 Limite liquide

Outre la partie affectée par l'altération de surface, la limite liquide est toujours égale ou inférieure à la teneur en eau naturelle pour les dépôts marins du Québec. Le seul profil où la limite liquide est de beaucoup supérieure à la teneur en eau naturelle est celui de Le Coteau et cette portion de profil correspond justement avec la zone d'argile redéposée (fig. 38).

5.2.1.3 Indice de plasticité

La plasticité de l'argile varie de très faible à très élevée (indice de plasticité variant de 3.8 à 51). Dans les différents profils étudiés, l'indice de plasticité peut être constant et il peut aussi diminuer ou augmenter avec la profondeur du dépôt.

5.2.1.4 Indice de liquidité

Généralement, l'indice de liquidité est supérieur à 1.0. Dans les argiles à sensibilité moyenne, cet indice varie de 1.0 à 2.0. Pour les argiles extrêmement sensibles, il peut atteindre des valeurs aussi élevées que 7.5. Pour les argiles marines peu sensibles, sa valeur se maintient autour de l'unité, mais elle peut atteindre une valeur aussi faible que 0.68.

5.2.1.5 Résistance non remaniée

La résistance non remaniée mesurée au cône suédois varie de 1.5 t/m^2 jusqu'à 14 t/m^2 pour les argiles fortement surconsolidées. Dans un même profil, cette résistance est plus élevée dans la partie affectée par l'altération de surface. La résistance décroît avec la profondeur dans cette zone altérée et par la suite, elle tend à croître régulièrement avec la profondeur si le profil est homogène. Mais dans quelques profils, une légère diminution de résistance avec la profondeur a également été enregistrée.

5.2.1.6 Résistance remaniée

La résistance remaniée des argiles du Québec varie beaucoup. En effet, les argiles étudiées avaient une consistance à l'état remanié qui variait d'une pâte épaisse difficile à malaxer à un état quasi liquide.

Dans les profils étudiés, la résistance remaniée est plus élevée près de la surface à cause de l'influence de l'altération de cette zone. Ensuite, cette résistance est constante ou a tendance à diminuer un peu avec la profondeur.

5.2.1.7 Pourcentage d'argile ($<2\mu$)

Le pourcentage de particules plus petites que 2 microns varie beaucoup d'un site à l'autre. A l'intérieur d'un même profil ou d'une même région, ces variations sont moins grandes. Les dépôts les plus au

nord du bassin de déposition de la mer Champlain contiennent moins de particules plus petites que 2 microns. Les sites de St-Thuribe, St-Urbain et Outardes 2 sont des exemples typiques de ces dépôts avec des pourcentages d'argile variant entre 35% et 45% comparativement à des pourcentages atteignant 80% pour d'autres sites comme Louiseville, St-Louis et Le Coteau.

5.2.1.8 Thixotropie

Les résultats des essais de thixotropie nous montrent clairement qu'il y a deux stages différents de regain de résistance après le remaniement. Pendant les 15 premières minutes après le remaniement, le gain de résistance est rapide, soit un gain moyen par minute de 3% à 5% de la résistance remaniée initiale. Le taux d'accroissement de résistance diminue par la suite jusqu'à 30 minutes et il est ensuite assez constant jusqu'à une période de deux heures après le remaniement avec un regain moyen de 0.5% à 1% par minute (fig. 56 à 67 et tableau 11).

Quelques exceptions sont à signaler parmi ces conclusions générales. Les échantillons entreposés depuis près ou plus d'un an montrent des gains de résistance généralement moins marqués pendant les 15 premières minutes après le remaniement (regain de 1% à 2% par minute). Le regain total est aussi moins prononcé pour ces échantillons. Ces échantillons provenaient des sites de Baie-James, Matagami, Ste-Rosalie, St-Thuribe et quelques-uns de Nicolet. L'argile de St-Jean-Vianney, entreposée depuis plus de deux ans déjà lors de l'essai, ne manifeste pas cette tendance.

Les regains de résistance les plus élevés exprimés en pourcentage sont ceux des sites de Le Coteau (couche d'argile non redéposée), St-Ambroise et St-Jean-Vianney. Lorsqu'ils sont exprimés en valeur absolue, les regains de résistance sont beaucoup plus élevés pour les argiles ayant les résistances remaniées les plus élevées.

5.2.2 Relations entre les caractéristiques géotechniques des argiles du Québec

5.2.2.1 Relations entre la sensibilité et la résistance remaniée, l'indice de liquidité et l'indice de plasticité

Pour toutes les argiles du Québec, il existe une relation de non-proportionnalité entre la sensibilité et la résistance remaniée (fig. 68). Pour les valeurs de sensibilité inférieures à 50, la résistance remaniée varie de 0.04 t/m^2 à plus de 0.4 t/m^2 et pour des valeurs de résistance remaniée inférieures à 0.04 t/m^2, les valeurs de la sensibilité varient entre 70 et plus de 900. Ceci indique que les valeurs de la sensibilité telle que définie au chapitre 1 ne sont pas représentatives pour classifier ces argiles. Deux argiles peuvent avoir la même résistance remaniée tout en ayant les valeurs de sensibilité totalement différentes, car leur résistance non remaniée peut être plus ou moins élevée si ces argiles sont surconsolidées ou normalement consolidées.

La relation logarithmique entre la sensibilité et l'indice de liquidité des argiles du Québec a la même allure que les relations établies par Bjerrum (9) et Houston et Mitchell (39) (fig. 69). La relation qui

caractérise les argiles du Québec est une moyenne entre ces deux relations et le fuseau englobant la majorité des valeurs est assez large. Il est intéressant de noter que les valeurs de St-Ambroise et de St-Thuribe se retrouvent de chaque côté du fuseau. Ceci signifie en somme que, d'une région à l'autre, la relation logarithmique existe toujours, mais avec une pente légèrement différente.

Bjerrum (9) a trouvé une relation entre l'indice de plasticité et la sensibilité pour les argiles de Norvège. Le fuseau englobant toutes les valeurs est très étroit. Pour les argiles du Québec, la limite supérieure du fuseau serait beaucoup plus élevée comme l'indique la figure 70. Cette différence peut être due en partie à la façon de mesurer la sensibilité de l'argile. Il est possible que le fuseau de Bjerrum ait été établi à partir de valeurs de sensibilité calculées avec des résistances de l'argile mesurées au scissomètre de terrain. Le grand nombre de sites et de dépôts étudiés peut aussi être la cause de cette grande dispersion des résultats pour les argiles du Québec.

5.2.2.2 Relations entre la résistance remaniée et les indices de plasticité et de liquidité

Il n'existe pas de relation bien spécifique entre la résistance remaniée et l'indice de plasticité des argiles du Québec. L'examen de la figure 71 nous montre cependant qu'à mesure que l'indice de plasticité augmente, la plage de valeurs de la résistance remaniée croît aussi.

La presque totalité des points sur ce graphique sont situés sous une droite dont l'équation est la suivante: $y = x/100$. Ceci indique que l'indice de plasticité est toujours plus grand ou égal à 100 fois la valeur de la résistance remaniée exprimée en t/m^2.

La figure 72 montre la relation qui existe entre l'indice de liquidité et la résistance remaniée. La limite inférieure du fuseau déterminé par Houston et Mitchell (39) pour des argiles de différents pays définit bien la relation qui existe pour les argiles du Québec. La limite supérieure du fuseau est cependant beaucoup plus haute. Ceci indique que pour une valeur de résistance remaniée bien spécifique, la plage de valeurs de l'indice de liquidité est plus grande pour les argiles du Québec comparativement aux autres argiles et vice-versa.

5.2.2.3 Relation entre l'activité et l'indice de liquidité

Pour toutes les argiles étudiées, il existe une relation bien nette entre l'activité telle que définie par Skempton (97) et l'indice de liquidité (fig. 73). Sauf pour quelques points représentant des argiles fortement surconsolidées comme celles de St-Urbain et de St-Jean-Vianney où des argiles lacustres comme celles de la Baie-James, toutes les valeurs se retrouvent dans un fuseau bien défini.

5.2.3 Classification des argiles du Québec selon leurs caractéristiques géotechniques

Les argiles du Québec se retrouvent dans le groupe des argiles inactives selon la classification de Bjerrum (9). Cependant, contrairement

aux argiles norvégiennes (fig. 74), il n'existe pas de relation linéaire entre l'indice de plasticité et le pourcentage d'argile pour l'argile de chaque dépôt. Une telle relation existe seulement pour le site de Yamaska. Pour la plupart des dépôts, l'indice de plasticité de l'argile varie beaucoup dans un même profil même si la granulométrie change peu. Par exemple, l'indice de plasticité de l'argile de St-Ambroise varie entre 8 et 28 pour une variation du pourcentage d'argile entre 60% et 70%.

Selon la classification de Casagrande (17), les argiles du Québec se retrouvent toutes au-dessus de la ligne A (fig. 75). Elles sont inorganiques et leur plasticité varie de très faible à très élevée. Plusieurs d'entre elles sont très silteuses et ce sont généralement ces argiles silteuses qui sont les moins plastiques.

5.2.4 Caractéristiques géochimiques des argiles du Québec

La discussion des résultats de cette section sera conduite de la même façon que celle des caractéristiques géotechniques. Elle est basée sur les résultats compilés aux tableaux 12 et 13 et les profils représentés aux figures 76 à 90.

5.2.4.1 pH de l'argile

Le pH des argiles se situe généralement entre 8 et 9. Dans la portion de profil affectée par l'influence de l'altération de surface, le pH est souvent inférieur à 8. A l'intérieur d'un même profil,le PH tend à augmenter avec la profondeur. Il est un peu plus élevé que

celui des argiles suédoises qui se situe autour de 8 (Soderblom (99)).

5.2.4.2 Pourcentage de matière organique contenu dans l'argile

Le pourcentage de matière organique contenu dans l'argile varie entre 0.5% et 1.2% pour une moyenne de près de 1%. Les argiles très foncées ne comportent pas un pourcentage de matière organique plus élevé que les argiles pâles même si cette coloration foncée est habituellement attribuée à la présence de matière organique.

5.2.4.3 Teneur en sel

La teneur en sel de l'eau interstitielle des argiles du Québec est de beaucoup inférieure à la teneur en sel de l'eau de mer. Elle est même très souvent inférieure à une concentration de un gramme par litre. Les concentrations les plus élevées ont été trouvées à Yamaska et à Louiseville où elles atteignent 15 grammes par litre.

Généralement, à l'intérieur d'un même profil, la teneur en sel croît avec la profondeur. Dans trois forages à St-Ambroise et dans celui de St-Urbain, la teneur en sel augmente avec la profondeur et diminue par la suite. Des forages plus profonds à tous les sites auraient permis de vérifier si cette tendance est générale dans tous les dépôts, comme l'a remarqué Soderblom (99) pour les dépôts de la Suède.

5.2.4.4 Principaux cations et anions de l'eau interstitielle

Les quatre principaux cations analysés dans l'eau interstitielle

extraite par consolidation sont le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium. Pour les dépôts marins, le sodium est de loin le cation dominant suivi du magnésium. Ces deux cations augmentent généralement avec l'augmentation de la teneur en sel. Une exception a été notée pour la région de St-Ambroise où la concentration du magnésium est peu élevée et à peu près constante dans tout le profil. Le calcium et le potassium sont en faible concentration et cette dernière ne varie presque pas avec la profondeur.

Dans le dépôt lacustre de la Baie-James et dans le dépôt d'argile redéposée de Le Coteau, les concentrations du calcium et du magnésium sont importantes et parfois même plus élevées que celle du sodium.

Les anions analysés ont été les chlorures et les sulfates. Pour les dépôts marins sauf Nicolet, les clorures sont de beaucoup plus élevés que les sulfates. L'exception de Nicolet demeure incompréhensible; il s'agit peut-être d'une erreur de laboratoire ou peut-être parce que l'argile était oxydée car elle était entreposée depuis près de deux ans lors de l'extraction de l'eau interstitielle. Dans les dépôts lacustres, l'importance des sulfates augmente beaucoup.

Quelques échantillons d'eau extraite par consolidation avaient une coloration jaune très foncée. Des analyses ont été faites pour vérifier si la concentration de fer était responsable de cette coloration. Toutes les analyses ont donné des concentrations de fer inférieures à 0.9 ppm. On en conclut que cette coloration était probablement due à la présence de matière organique.

5.2.4.5 Principaux cations échangeables de l'argile

Des analyses ont été faites pour déterminer la concentration des principaux cations adsorbés dans l'argile. Les cations analysés sont le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium.

Pour tous les sites étudiés à l'exception de St-Ambroise, le pourcentage de cations adsorbés bivalents (calcium et magnésium) est plus élevé que celui des cations monovalents (sodium et potassium) avec le calcium comme cation dominant. Pour la région de St-Ambroise, les cations adsorbés bivalents (calcium et magnésium) sont encore en quantité appréciable, mais le sodium devient important et il est même souvent le cation prépondérant.

5.2.4.6 Minéralogie de quelques argiles étudiées

Selon les quelques analyses minéralogiques qualitatives effectuées, les résistates sont les minéraux les plus abondants dans la fraction totale (tableau 13). Le quartz, le feldspath, l'illite, la chlorite et l'amphibole se suivent par ordre d'importance. La région de Le Coteau diffère avec l'illite comme minéral prédominant suivi du feldspath, du quartz et de l'amphibole.

Dans la fraction plus petite que 2μ, les minéraux argileux sont plus abondants que les résistates. L'illite et la chlorite sont prépondérants suivis du feldspath, de la smectite et de l'amphibole.

Comme les pourcentages de particules plus petites que 2 microns sont souvent très élevés dans ces argiles, les résultats de ces analyses minéralogiques qualitatives nous portent à croire que les minéraux argileux y sont assez abondants. Cette idée vient en contradiction avec

une récente étude sur l'analyse quantitative des minéraux argileux des dépôts de l'est du Canada (Foscal-Mella (35)). Dans son étude, Foscal-Mella utilise une méthode différente de celle utilisée dans le présent ouvrage et ses résultats indiquent que les argiles du Québec contiennent très peu de minéraux argileux dans la fraction plus petite que 2 microns. Comme celui qui a fait nos analyses minéralogiques est d'accord avec cette étude, il semble que les résultats d'une analyse qualitative ne peuvent pas être interprétés comme ceux d'une analyse quantitative.

5.2.5 Relations entre la teneur en sel et quelques caractéristiques géotechniques des argiles du Québec

La figure 91 montre qu'il existe une relation avec la résistance remaniée lorsque la teneur en sel est supérieure à un gramme par litre. Pour certains profils où la teneur en sel est inférieure à cette valeur, comme c'est le cas à St-Louis et à St-Thuribe, il n'existe aucune relation. La résistance remaniée croît dans ces cas même si la teneur en sel de l'eau interstitielle demeure très basse.

La sensibilité a été exprimée en fonction de la teneur en sel afin de comparer les relations de Bjerrum (9). Pour les argiles du Québec dont la sensibilité varie en fonction de la teneur en sel, la relation obtenue a la même allure que celle de Bjerrum (9), mais les teneurs en sel sont plus basses pour des valeurs de sensibilité élevées (fig. 92). Ceci est probablement dû à la surestimation de la teneur en sel par Bjerrum tel que mentionné par Torrance (106). La teneur en sel n'explique pas toujours la variation de la sensibilité car pour des concentrations de sel

dans l'eau interstitielle très basses, la sensibilité varie de faible à très élevée, tout comme la résistance remaniée.

Il n'existe aucune relation entre la limite liquide et la teneur en sel de l'eau interstitielle des argiles du Québec (fig. 93). Par contre, il existe une certaine relation pour quelques sites comme Yamaska, Louiseville et St-Ambroise entre cette teneur en sel et l'indice de liquidité (fig. 94).

La figure 95 exprimant l'activité en fonction de la teneur en sel de l'eau interstitielle nous permet de constater que les relations de Bjerrum (9) sont difficiles à appliquer aux argiles du Québec. D'abord, il n'y a pas de relation bien définie pour chacun des sites. Il existe cependant une relation globale lorsque la teneur en sel est supérieure à 1.5 g/l. Pour une teneur en sel inférieure à cette valeur, tout comme pour la sensibilité et la résistance remaniée, il existe une grande variation de l'activité.

5.2.6 Classification des argiles du Québec selon leurs caractéristiques géochimiques

Selon la classification de Ingles (43), les argiles étudiées se retrouvent presque entièrement dans la zone des argiles floculées stables (fig. 96). Ce sont donc des argiles sensibles à l'influence de l'eau de percolation. Si cette eau est relativement pure ou peu chargée de sels, l'argile va peu à peu passer de son état stable à un état instable sujet à la défloculation. Cette classification n'est peut-être pas valide pour les argiles du Québec car elle ne différencie pas les argiles peu sensibles des argiles très sensibles.

La classification de Sherard et al. (95) est basée sur les études faites sur les argiles d'un grand nombre de barrages et de digues dont plusieurs ont rupturé. Les zones 1 et 2 (fig. 97) représentent les argiles où il y a eu de graves problèmes d'érosion et des ruptures. La zone 3 représente les argiles où il n'y a pas eu de problèmes tandis que la zone 4 correspond à une zone de transition. Les argiles du Québec se retrouvent dans les quatre zones; les argiles les plus sensibles se classent dans les zones 1 et 2 tandis que les argiles moins sensibles, soit les argiles lacustres, les argiles partiellement altérées en surface des dépôts et celles ayant une forte teneur en sel dans l'eau interstitielle, se situent dans la zone 3.

Cette dernière classification donne une estimation de la valeur des argiles du Québec comme matériau imperméable dans un ouvrage de retenue d'eau. Il ne faut cependant pas oublier que cette classification a été faite à partir d'argiles bien différentes des argiles de l'est du Canada.

5.3 Discussion des résultats: relations entre les sites de glissements et de coulées d'argile

De tous les sites étudiés, seuls les sites de glissements et de coulées sont l'objet d'une discussion dans cette section. Tous ces sites sont situés dans des dépôts d'argile marine. On veut examiner les caractéristiques des argiles impliquées dans les coulées pour déterminer lesquelles sont plus aptes à servir de critère d'identification pour les argiles extra-sensibles.

Pour atteindre ce but, la discussion des résultats dans cette section est basée sur des moyennes générales établies pour chaque portion de profil jugée représentative de la couche d'argile impliquée dans les glissements et les coulées. Généralement, une seule moyenne a été calculée pour chaque portion de profil choisie; cependant, lorsqu'il y a deux couches d'argile avec des caractéristiques différentes, une moyenne a été calculée pour chaque couche (St-Thuribe, forages 4 et 7 et St-Urbain). Le tableau 16 donne un numéro d'identification pour chaque site discuté dans cette section; ainsi, chaque nombre sur les figures 98 à 127 réfère à ce tableau pour l'identification des sites. Ce tableau donne également la hauteur de pente disponible à chaque site, la longueur de rétrogression du glissement ou de la coulée et les profondeurs des couches où une moyenne a été calculée.

Les compilations des moyennes représentatives pour chaque site sont données aux tableaux 17, 18 et 19 qui présentent le même type de résultats que les tableaux 10, 11 et 12.

L'examen des caractéristiques tant géotechniques que géochimiques des argiles extra-sensibles a été fait en exprimant les différents paramètres ou caractéristiques de l'argile des sites de glissements et de coulées en fonction d'un autre paramètre dominant. Ceci a permis de vérifier si les relations établies aux sections 5.2.2 et 5.2.5 sont aussi valables pour les sites de glissements et de coulées et de déterminer les caractéristiques dominantes de l'argile extra-sensible.

5.3.1 Définition d'un glissement et d'une coulée

Dans la littérature, une coulée d'argile est habituellement

définie comme un glissement de terrain rétrogressif ayant laissé un cratère en forme de cuvette, c'est-à-dire un cratère dont la largeur au centre est supérieure à la largeur de la brèche par laquelle l'argile liquéfiée a été évacuée (Meyerhof (69), Mitchell et Markell (75)).

Certains auteurs ont cherché à définir les coulées d'argile à partir de critères basés sur des paramètres géométriques. Ainsi Mitchell et Markell (75) appellent coulée d'argile un glissement où la distance de rétrogression est de dix fois supérieure à la hauteur de pente initiale. Cette définition est valable pour les sites où le dépôt est homogène et où il n'y a pas d'autres facteurs géométriques influençant l'ampleur du glissement comme l'épaisseur du dépôt, le profil du roc sous-jacent et la proximité d'anciens glissements.

Dans la présente étude, tous les cas étudiés ont été classifiés en glissements ou coulées selon la rétrogression lors du glissement, le degré de remaniement de l'argile lors du glissement et les caractéristiques géotechniques de l'argile. Ainsi les mouvements de sol dont la longueur est supérieure à plus de une fois et demie la largeur de l'ouverture le long de la berge ont été classés comme coulée.

La figure 98 montre la relation qui existe entre la hauteur de la pente et la distance de rétrogression des coulées ou la longueur du glissement pour tous les cas étudiés. Elle nous permet de voir qu'il existe une relation entre la hauteur de pente et la distance de rétrogression pour les grandes coulées d'argile telles que celles de St-Ambroise (5 et 7), St-Jean-Vianney (10), St-Louis (12) et St-Thuribe (14). Cette relation s'applique aussi pour de petites coulées (sites 9, 11 et 13). La définition de Mitchell et Markell (75) ne s'applique qu'aux coulées où la distance de rétrogression est supérieure à 200 mètres.

La relation qui existe pour les sites de simples glissements est différente de celle qui s'applique aux coulées d'argile. La longueur des glissements est plus proportionnelle à la hauteur de pente, sauf pour le site de Le Coteau (site 1). Cette relation s'applique aussi aux petites coulées (sites 9, 11 et 13). Il existe donc une zone de transition entre les glissements et les coulées; c'est pourquoi les petites coulées d'argile se retrouvent à la rencontre des deux relations. Il faut aussi noter ici que la distance de rétrogression aux sites 9 et 11 a été limitée par des conditions géométriques, soit la proximité d'un autre versant et d'un ancien cratère de glissement. Le site 8 a été classé par sa forme géométrique comme un simple glissement; par contre, les caractéristiques géotechniques de l'argile de ce site sont sans équivoque celles d'une argile extra-sensible. La couche d'argile sensible à cet endroit n'était tout simplement pas assez épaisse pour permettre des glissements rétrogressifs.

La figure 98 nous permet aussi d'évaluer l'importance de la hauteur de pente dans les glissements rétrogressifs. Selon ce graphique, la hauteur de pente critique est de 17 à 18 mètres. Donc, lorsqu'une pente d'argile sensible atteint cette hauteur, une coulée d'argile peut survenir s'il se produit un premier glissement et s'il n'y a pas d'autres conditions géométriques empêchant cette situation.

5.3.2 Caractéristiques géotechniques des argiles des sites de glissements et de coulées

5.3.2.1 Résistance remaniée et sensibilité

Les sites de coulées d'argile sont caractérisés par une argile

ayant une résistance remaniée très faible, i.e. toujours inférieure à 0.1 t/m^2 (fig. 99). Par contre, la sensibilité de chaque site varie de moyenne à très élevée et elle est toujours supérieure à 45 sauf pour le site de Louiseville (no. 2) où elle est inférieure à 20. Les sites de simple glissement ont tous une sensibilité faible, mais leur résistance remaniée varie beaucoup (variation de 0.187 à 0.46 t/m^2).

Même si l'argile des sites de coulées a une résistance remaniée très faible, elle ne se compare pas à l'argile extra-sensible de la Suède et de la Norvège car elle est beaucoup plus difficile à remanier. Quelques essais sur l'argile de St-Thuribe, de St-Jean-Vianney et de Ste-Rosalie pour évaluer le nombre de rapidité tel que défini par Soderblom (101) n'ont donné aucun résultat valable. Après les 250 coups dans l'appareil à limite liquide, seule la bordure de l'échantillon s'appuyant au fond de la coupelle était remaniée sur quelques millimètres d'épaisseur. Le reste de l'échantillon était parfaitement intact dans les trois cas même si ces argiles avaient des résistances remaniées semblables, mais des valeurs de sensibilité totalement différentes. Selon la classification de Soderblom, le nombre de rapidité de ces argiles serait égal à 3 ou 4 et elles seraient appelées "slow quick clay".

5.3.2.2 Teneur en eau

Contrairement à ce qu'il est très facile de penser intuitivement, les résistances remaniées les plus faibles ne coincident pas nécessairement avec les teneurs en eau les plus élevées (fig. 100). Au contraire, les

teneurs en eau les plus faibles correspondent à des résistances remaniées très faibles et les résistances remaniées les plus fortes coincident à des teneurs en eau assez élevées. Les argiles extra-sensibles du Québec ont donc des teneurs en eau variant de faibles à élevées tandis que les argiles peu sensibles ont des teneurs en eau assez élevées. Cette caractéristique est due à la plasticité différente des deux types d'argile.

5.3.2.3 Limite liquide

La limite liquide des argiles marines du Québec est toujours inférieure à la teneur en eau naturelle (fig. 101). L'écart moyen entre la limite liquide et la teneur en eau naturelle est plus grand pour les sites de coulées d'argile et cet écart s'accroît avec la teneur en eau de l'argile. Donc pour une argile extra-sensible, l'écart entre la teneur en eau naturelle et la limite liquide doit être d'autant plus grand que l'argile est plus plastique. Toutes les coulées d'argile, sauf celle de Louiseville, ont une limite liquide égale ou inférieure à 53%. La limite liquide des sites de glissements est supérieure à cette valeur.

5.3.2.4 Indice de plasticité

L'examen de la figure 102 nous montre clairement que les coulées d'argile sont généralement limitées aux argiles ayant une plasticité moyenne à faible. Un indice de plasticité inférieur ou égal à 25 caractérise les sites de coulées. Les figures 103 et 104 montrent encore plus clairement la différence de plasticité entre les argiles extra-sensibles et les argiles

peu sensibles. Seul le site de Louiseville (no. 2) se compare aux sites de glissements au point de vue plasticité.

5.3.2.5 Indice de liquidité

L'indice de liquidité des sites de coulées d'argile est généralement supérieur à 1.4 (fig. 105 et 106). Le site de Louiseville (no. 2) diffère encore et l'une des deux valeurs pour le site de St-Urbain est légèrement inférieure à 1.4.

5.3.2.6 Activité

L'activité des argiles extra-sensibles est inférieure à celle des argiles peu sensibles. Elle se situe généralement sous la valeur de 0.35 (fig. 106). Ceci n'est qu'une autre façon d'exprimer la faible plasticité de l'argile extra-sensible car l'activité est définie comme étant le rapport de l'indice de plasticité sur le pourcentage d'argile.

5.3.2.7 Pourcentage d'argile

Le pourcentage d'argile ($< 2\mu$) des sites de coulées varie beaucoup (fig. 107). Les sites avec de faibles pourcentages de particules plus petites que 2μ sont tous des coulées d'argile tandis que les sites de glissements ont un pourcentage plus élevé de particules inférieures à 2μ.

5.3.2.8 Thixotropie

Le regain thixotropique de résistance après le remaniement n'est pas tellement différent pour les sites de glissements et de coulées d'argile lorsqu'il est exprimé en pourcentage (tableau 18). Les gains les plus élevés exprimés en pourcentage sont ceux de quelques argiles extra-sensibles, mais les gains les plus élevés en valeur absolue sont ceux des argiles les moins sensibles (fig. 38, 40, 54 et 55).

5.3.3 Relation entre les propriétés géotechniques des argiles de glissements et de coulées

5.3.3.1 Relation entre la sensibilité et l'indice de liquidité

La relation de Houston et Mitchell (39) semble bien exprimer celle qui existe entre la sensibilité et l'indice de liquidité pour les sites de glissements et de coulées (fig. 105). Cette figure fait nettement ressortir la différence de l'argile des glissements et des coulées. Seule la coulée de Louiseville se situe parmi les autres sites de glissements sur ce graphique.

5.3.3.2 Relation entre l'activité et l'indice de liquidité

La relation générale établie à la section 5.2.2.3 entre l'activité et l'indice de liquidité s'applique très bien pour les sites de glissements et de coulées (fig. 106). Les sites de coulées d'argile ont l'activité la plus faible et l'indice de liquidité le plus élevé. La coulée

d'argile de Louiseville se classe encore parmi les sites de glissements.

5.3.4 Caractéristiques géochimiques des argiles de glissements et de coulées

5.3.4.1 pH et pourcentage de matière organique

Le pH de l'argile et son pourcentage de matière organique ne sont pas des critères pouvant différencier les argiles extra-sensibles des argiles peu sensibles. En effet, l'examen du tableau 19 nous permet de voir que ces deux caractéristiques sont semblables pour les sites de glissements et de coulées d'argile.

5.3.4.2 Teneur en sel

La teneur en sel de l'eau interstitielle de l'argile des sites de coulées est très basse (fig. 108). Elle est généralement inférieure à 2 g/l. Le site de Louiseville (no. 2) est le seul site d'une coulée d'argile où la teneur en sel moyenne est supérieure à 2 g/l. Des teneurs en sel basses dans l'eau interstitielle ont également été trouvées dans deux sites de glissements, soit le site de Le Coteau et celui de Rosemère.

A Le Coteau, il a déjà été établi que le dépôt d'argile de surface est un dépôt d'argile marine qui a été érodée et redéposée par la suite dans une eau plus douce. Ceci explique bien la faible teneur en sel de l'eau interstitielle de cette argile. A Rosemère, les données recueillies ne permettent pas d'expliquer la faible salinité de l'eau inters-

titielle de cette argile.

5.3.4.3 Principaux cations dans l'eau interstitielle

Parmi les quatre principaux cations de l'eau interstitielle, le magnésium est le seul qui caractérise les sites de coulées d'argile; son pourcentage y est inférieur à 20% du total des quatre principaux cations (fig. 109). Les sites de glissements ont tous un pourcentage de magnésium supérieur à 20%.

Le pourcentage de sodium et de calcium ne semblent pas être une cause spécifique de la sensibilité de l'argile car ces cations se retrouvent en pourcentage aussi élevé dans les argiles provenant des sites de coulées et de glissements (fig. 110 et 111). On remarque par contre que le pourcentage de sodium est généralement supérieur à 80% pour les argiles dont la résistance remaniée est inférieure à 0.03 t/m^2.

5.3.4.4 Principaux cations échangeables

Les cations échangeables de l'argile ne sont pas responsables de la sensibilité de l'argile. Chacun des quatre cations analysés, soit le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium se retrouvent en pourcentage presque identique dans les argiles provenant des sites de coulées et de glissements (fig. 112 à 114).

Le pourcentage de cations bivalents est toujours élevé (supérieur à 80%) pour les argiles peu sensibles et ceci est surtout dû au calcium qui est le cation dominant dans la plupart des sites étudiés (fig. 115). Ce

pourcentage de cations bivalents n'est cependant pas un critère pour différencier les argiles plus ou moins sensibles car certaines argiles de sites de coulées ont aussi un pourcentage de cations bivalents élevé.

Contrairement à ce que Moum et al. (78) ont trouvé pour l'argile de Drammen, le rapport K/Na n'est pas plus faible pour les argiles les plus sensibles. Au contraire, les rapports les plus faibles se retrouvent dans les argiles les moins sensibles (fig. 116).

5.3.4.5 Minéralogie

Comme il n'y a eu que des analyses minéralogiques qualitatives d'effectuées, il faut être prudent dans l'analyse des résultats. L'examen de tableau 13 nous montre que la composition minéralogique des argiles marines extra-sensibles et peu sensibles diffère très peu. Les argiles les plus sensibles (St-Ambroise et St-Urbain) ont très peu de résistates dans leur fraction plus petite que 2μ et elles ont également un pourcentage assez important de smectite.

5.3.5 Classification de l'argile extra-sensible selon ses caractéristiques géochimiques

Les concentrations de sel moyennes dans l'eau interstitielle ont été exprimées en fonction du pourcentage de sodium échangeable et de sodium dans l'eau interstitielle pour tous les sites de glissements et de coulées. La classification de Ingles (43) ne permet pas de différencier les sites de glissements et de coulées (fig. 117). Presque tous les sites se retrouvent dans la zone décrite comme un état floculé stable. L'argile

des sites de coulées se rapproche plus de la zone suspecte de gonflement et de défloculation que l'argile des sites de glissements.

L'étude de Sherard et al. (95) pour différencier les sols causant des problèmes lorsqu'ils sont employés pour construire des digues ou des barrages permet de différencier nettement les sites de coulées d'argile et de glissements (fig. 118). Tous les sites de coulées d'argile se retrouvent dans les zones 1 et 2. L'argile de ces sites est donc considérée comme un matériau dispersif. Le site de Louiseville (no. 2) se retrouve dans la zone intermédiaire tandis que les sites de glissements se placent dans une zone où le matériau est considéré comme non dispersif.

5.3.6 Relations entre les propriétés géochimiques et géotechniques de l'argile des sites de glissements et de coulées

5.3.6.1 Influence de la teneur en sel de l'eau interstitielle sur les caractéristiques géotechniques

Pour tous les sites étudiés, il n'existe pas de relation bien définie entre la teneur en sel de l'eau interstitielle et la limite liquide, l'indice de plasticité et l'activité (fig. 119 à 121). Il existe par contre d'autres relations assez limitées entre cette teneur en sel et la résistance remaniée, la sensibilité et l'indice de liquidité (fig. 108, 122 et 123).

La figure 108 montre la relation qui existe pour certains sites de coulées et de glissements entre la teneur en sel et la résistance remaniée. Cette relation existe seulement lorsque la teneur en sel de l'eau

interstitielle est supérieure à un gramme par litre. Lorsque la teneur en sel est inférieure à cette valeur, il n'y a aucune relation. Ceci indique clairement qu'une faible teneur en sel est nécessaire mais non suffisante pour avoir une résistance remaniée faible.

Parmi les trois plus importants cations de l'eau interstitielle, soit le calcium, le magnésium et le sodium, le magnésium est le seul cation qui a une relation avec la résistance remaniée pour les sites de glissements et de coulées (fig. 109 à 111). La relation n'est pas nettement définie car le fuseau englobant toutes les valeurs est assez large, mais elle permet de voir que la résistance remaniée croît avec l'augmentation du pourcentage de magnésium.

La figure 122 montre qu'il existe une relation entre la sensibilité et la teneur en sel pour certains sites de glissements et de coulées tandis qu'il n'y a aucune relation pour d'autres sites. Cette absence ou cette existence de relation vaut pour les mêmes sites qu'à la figure 108. Ceci provient de la relation qui existe entre la sensibilité et la résistance remaniée (cf. section 5.2.2.1).

Tout comme pour la sensibilité et la résistance remaniée, il existe une relation pour certains sites de glissements et de coulées entre l'indice de liquidité et la teneur en sel lorsque cette dernière est supérieure à un gramme par litre.

5.3.6.2 Influence des cations échangeables sur les caractéristiques géotechniques.

Les cations échangeables de l'argile des sites de glissements

et de coulées, tant au point de vue qualitatif que quantitatif, n'influencent pas les caractéristiques géotechniques de l'argile (fig. 112 à 115 et 124 à 127). L'examen de ces figures montre bien que les cations adsorbés ne sont pas responsables de la sensibilité des argiles étudiées.

5.3.7 Discussion sur le cas de Louiseville (site #2)

Comme il a été mentionné lors de la description des sites, le mouvement de sol qui s'est produit au club de golf de Louiseville est bien une coulée d'argile. Il a été reporté comme tel dans la littérature et le critère adopté à la section 5.3.1 le classe bien comme une coulée d'argile. Cependant ce site s'est presque toujours classé comme intermédiaire entre les sites de glissements et de coulées ou encore parmi les sites de glissements lors de la détermination des caractéristiques géotechniques et géochimiques des argiles extra-sensibles.

Il est certain qu'il doit exister des argiles intermédiaires entre celles propices à de grandes coulées d'argile et celles ne permettant que de simples glissements. Cette zone de transition dans les caractéristiques de l'argile est peut-être plus importante que ne le laisse voir la présente étude et ceci expliquerait l'écart entre les caractéristiques de l'argile de Louiseville (site no. 2) et celles des argiles des autres coulées.

L'étude faite dans la région de St-Ambroise nous a permis de voir que les caractéristiques de l'argile à proximité d'une coulée d'argile même très récente peuvent différer beaucoup, tout dépendant de l'endroit où le forage a été fait. C'est ce que nous révèlent les forages 1 et 3 pratiqués respectivement en arrière et sur le côté de la grande cou-

lée de 1975 à St-Ambroise. Ces deux forages sont distancés de quelques centaines de pieds seulement. La granulométrie de l'argile prélevée aux deux forages est similaire. Par contre, l'argile prélevée dans le forage en arrière de la coulée a une limite liquide, un indice de plasticité, des résistances non remaniées et remaniées et une teneur en sel plus élevés et un indice de liquidité plus faible que l'argile prélevée à côté de la coulée. Comme le forage de Louiseville a été fait à l'arrière du cratère, il est permis de croire que l'argile prélevée à cet endroit n'est peut-être pas représentative de celle qui a été impliquée dans la coulée d'argile. De plus, si les variations des caractéristiques de l'argile à cet endroit sont aussi fortes que celles enregistrées entre les forages 1 et 3 de St-Ambroise, l'argile impliquée dans la coulée de 1969 à Louiseville se classerait parmi les autres sites de coulées d'argile.

CONCLUSION

Le programme de recherche dont les résultats ont été présentés et discutés dans ce rapport avait pour but d'étudier les caractéristiques des argiles sensibles du Québec et de déterminer des critères pour identifier les caractéristiques des argiles extra-sensibles responsables des grandes coulées d'argile.

Une revue de littérature a d'abord permis de connaître l'étendue des travaux accomplis dans ce domaine en Scandinavie et au Canada. La théorie émise par Rosenqvist (87) est généralement acceptée pour expliquer la formation de dépôts argileux. Selon cette théorie, la déposition des minéraux argileux doit se faire dans de l'eau salée pour qu'il y ait floculation. Il en résulte une structure métastable appelée "structure en château de carte". Après le soulèvement des terres, les argiles sont soumises à un lessivage et la teneur en sel de l'eau interstitielle diminue considérablement, augmentant par le fait même la sensibilité de l'argile. Soderblom (99 et 101) a prouvé qu'une faible teneur en sel n'est pas une condition suffisante pour qu'il y ait formation d'argile extra-sensible. Il a découvert la présence d'agents dispersants qui agissent comme défloculents et rendent l'argile très sensible. Ces agents sont principalement des composés organiques et d'autres composés provenant des eaux usées.

Les études de plusieurs sites de coulées d'argile par les Suédois et les Norvégiens leur ont permis de définir des critères pour identifier les argiles extra-sensibles. Ces argiles ont une sensibilité supérieure à 50 et une résistance remaniée mesurée au cône

suédois inférieure à 0.05 t/m^2. La teneur en sel de l'eau interstitielle est inférieure à 2 g/l avec le sodium comme cation dominant. La limite de ces argiles est inférieure à la teneur en eau naturelle et leur plasticité est très faible.

La même théorie de déposition et de lessivage des sels de l'eau interstitielle est acceptée pour les argiles du Québec bien que le milieu de déposition ait été une eau saumâtre dont la concentration en sel était inférieure à celle de l'eau de mer. Cependant, peu d'études ont été faites pour définir quelles sont les caractéristiques des argiles extra-sensibles du Québec.

Trois régions ont été choisies dans les dépôts argileux de la plaine du Saint-Laurent pour étudier les caractéristiques de l'argile de plusieurs sites de glissements et de coulées. De plus, des essais ont été effectués sur les argiles de onze autres sites représentant la majorité des dépôts argileux de la province. Les régions choisies sont situées dans des zones où l'érosion est active car les rivières transportent beaucoup de sédiments. Ce sont les régions de la rivière Yamaska, de Louiseville et de Saint-Ambroise de Kildare. Ces régions sont assez actives au point de vue mouvements de sol car les berges des cours d'eau sont parsemées de cicatrices de glissements et de coulées d'argile dont plusieurs sont très récentes. Les glissements et les coulées étudiés se sont généralement produits là où l'érosion est plus forte correspondant à des points d'attaque par le courant.

Les principaux essais effectués sur les échantillons d'argile prélevés dans les régions choisies à l'aide de tubes à paroi mince et sur les échantillons déjà disponibles ont été la mesure de la teneur en eau, de la résistance au cisaillement non remaniée et remaniée avec le cône

suédois, de la teneur en sel de l'eau interstitielle et de la thixotropie, la détermination des limites de consistance, l'analyse granulométrique, l'analyse des principaux cations de l'eau interstitielle, l'analyse des principaux cations échangeables de l'argile et quelques analyses minéralogiques.

Tous ces essais ont permis d'établir des relations générales entre les caractéristiques géotechniques et géochimiques des argiles du Québec. La plupart des relations tracées ont la même allure que les relations établies pour les argiles de Scandinavie, mais les fuseaux sont toujours plus larges. Ceci peut être dû à un plus grand nombre de sites étudiés et à des dépôts différents.

L'étude des résultats provenant uniquement de sites de glissements et de coulées a permis de définir quelles sont les caractéristiques des argiles extra-sensibles responsables des coulées. Ces argiles ont une résistance remaniée inférieure à 0.1 t/m^2, une sensibilité supérieure à 45, une limite liquide et un indice de plasticité inférieurs ou égaux à 53 et 25 respectivement, un indice de liquidité supérieur à 1.4 et une activité inférieure à 0.35. La teneur en sel de l'eau interstitielle est inférieure à 2 g/l; cette condition est nécessaire mais non suffisante car il y a des argiles peu sensibles avec une teneur en sel aussi basse. Le cation dominant dans l'eau interstitielle de l'argile des sites de coulées est le sodium, mais ce cation est aussi dominant dans quelques sites de glissements; son pourcentage est généralement supérieur à 80% pour les argiles dont la résistance remaniée est inférieure à 0.03 t/m^2. La concentration du magnésium dans l'eau interstitielle des argiles des sites de coulées est inférieure à 20% du total des

quatre principaux cations; pour les argiles les plus sensibles, ce pourcentage baisse à 10%. Le regain thixotropique après le remaniement est plus élevé pour les argiles extra-sensibles lorsqu'il est exprimé en pourcentage par rapport à la résistance remaniée initiale. Lorsqu'il est exprimé en valeur absolue, il est plus important pour les argiles peu sensibles. La minéralogie des argiles extra-sensibles diffère très peu de celle des argiles peu sensibles. De même, il n'y a pas de différence marquée entre les principaux cations échangeables des argiles peu sensibles et très sensibles.

Parmi toutes les caractéristiques des argiles extra-sensibles, la résistance remaniée mesurée à l'aide du cône suédois est celle qui est la plus facile à mesurer et c'est probablement celle qui identifie le plus facilement ces argiles. Cette mesure nécessite cependant le prélèvement d'échantillons car la mesure de la résistance remaniée à l'aide d'un scissomètre de terrain donne des valeurs de résistance remaniée beaucoup trop élevées. L'exemple de St-Urbain est assez évident: le scissomètre de terrain a donné des valeurs de résistance remaniée de 10 à 85 fois supérieures à celles obtenues avec le cône suédois (fig. 52 et 53).

Cette étude a également permis de voir que les zones d'argile extra-sensible sont très probablement assez locales. En effet, les forages 1 et 3 exécutés près de la grande coulée de 1975 à Saint-Ambroise ont montré des caractéristiques assez différentes. Ceci indique que l'échantillonnage lors de l'étude d'un mouvement de sol doit se faire le plus près possible du cratère formé et que même dans ces conditions, les résultats obtenus ne sont peut-être pas complètement représentatifs du sol impliqué dans le mouvement de sol.

Les critères pour identifier les argiles extra-sensibles ont été établis à partir d'essais faits selon les mêmes procédures. Les données disponibles dans la littérature n'ont pas été utilisées justement pour éviter d'introduire des erreurs dues à de différentes procédures. Il faudrait cependant utiliser avec réserve les critères établis car le nombre de mouvements de sol étudiés se limite à quinze; les relations établies pourront être complétées et vérifiées dans le futur par l'étude d'autres sites. Egalement, quelques sites de glissements étudiés comme Louiseville (f. 2), Rosemère et Saint-Ambroise (f. 5) ne pouvaient pas dégénérer en coulées à cause de conditions géométriques insuffisantes. Ce sont donc de mauvais sites pour établir des critères sur les argiles susceptibles aux coulées.

APPENDICE A

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

Act.	:	activité
CA	:	calcium
CL	:	chlore
CU	:	résistance au cisaillement non remaniée
CUR	:	résistance au cisaillement remaniée
F.	:	forage
FE	:	fer
G/L	:	gramme par litre
I.L.	:	indice de liquidité
I.P.	:	indice de plasticité
K	:	potassium
Kg/cm^2	:	kilogramme par centimètre carré
MEQ/L	:	milliéquivalent par litre
MEQ/1000g.	:	milliéquivalent par 1000 grammes
MG	:	magnésium
MIN ou min.	:	minute
M.O.	:	matière organique
NA	:	sodium
Pc	:	pression de consolidation
Prof.	:	profondeur
SO_4	:	sulfate
ST	:	sensibilité
T/M^2 ou t/m^2	:	tonne par mètre carré

W	:	teneur en eau naturelle
W_L	:	limite liquide
W_P	:	limite plastique
m	:	mètre
m^2/g	:	mètre carré par gramme
mV	:	millivolt
pi.	:	pied
ppm	:	partie par million
μ	:	micron

APPENDICE B

DESCRIPTION DE LA METHODE D'ANALYSE DU POTASSIUM, DU CALCIUM, DU MAGNESIUM ET DU SODIUM ECHANGEABLES DANS L'ARGILE

La description de la méthode d'analyse des principaux cations échangeables de l'argile a été fournie par le bureau du Ministère de l'Agriculture de Sherbrooke. Cette description est reproduite intégralement aux lignes suivantes:

A. SOLUTION EXTRACTIVE:

Préparation de 20 litres de NH_4Ac - 4N

1. Eau distillée	9925 ml
2. Acide acétique (99.7%)	4560 ml
3. NH_4OH conc. (ajouter lentement)	5515 ml
	20,000 ml. (20 l)

Pour obtenir une solution normale: ajouter 3 litres d'eau distillée par litre de la solution 4 N. Bien agiter.

Ajuster le PH à 7.0 avec CH_3 COOH ou NH_4OH selon le cas.

B. SOLUTION-MERE DE K, Ca, Mg et Na:

I. Solution-mère

a) Peser: 17.5800 g de Ca $(C_2 H_3 O_2)_2 . H_2O$ (22.75% Ca)

: 3.5273 g de Mg $(C_2 H_3 O_2)_2 . 4 H_2 O$ (11.34% Mg)

: 0.5721 g de KCl (52.44% K)

: 0.1271 g. de NaCl (39.34% Na)

b) Dissoudre ces sels dans la solution de NH_4 Ac 1 N pour former un volume de 1000 ml.

c) Cette solution contient:

4000 ppm de Ca
400 ppm de Mg
300 ppm de K
50 ppm de Na

II. Préparation des solutions standards pour tracer les courbes étalons

Ballons	solution-mère	solution extractive	ppm de			
			K	Ca	Mg	Na
1	0ml	500 ml	0	0	0	0
2	5	495	3	40	4	0.5
3	10	490	6	80	8	1.0
4	15	485	9	120	12	1.5
5	20	480	12	160	16	2.0
6	25	475	15	200	20	2.5
7	50	450	30	400	40	5.0

C. MODE OPERATOIRE

Extraction

A $3.^0$ cm^3 (équivalent à $3.^0$ g. en moyenne) de sol séché, dans un erlenmeyer de 125 ml, ajouter 3^0 ml de solution extractive.

Agiter durant 15 minutes.

Filtrer dans un bécher ou fiole conique.

Dosage

K, Ca et Na par photométrie de flamme
(spectrophotométrie d'émission)

Mg (et Ca) par absorption atomique
(spectrophotométrie d'absorption atomique)

Note: Pour le calcium, si l'on procède par absorption atomique, il faudra diminuer la concentration de cet élément dans la solution-mère.

APPENDICE C

RESULTATS DES DEUX ANALYSES DES CATIONS DE L'EAU INTERSTITIELLE

Comme il a été mentionné auparavant, les analyses des principaux cations de l'eau interstitielle ont été exécutées au laboratoire de génie chimique de l'Université de Sherbrooke et au laboratoire du Ministère de l'Agriculture à Sherbrooke. Les résultats du Ministère seulement ont été utilisés dans la discussion au chapitre 5. Les résultats des deux sources sont fournis ici à titre d'information.

Tableau C-1: Résultats des analyses des cations de l'eau interstitielle.

Site	K (ppm)		CA (ppm)		MG (ppm)		NA (ppm)	
	M	U	M	U	M	U	M	U
Yamaska 1-2.5	6.3	5.7	60.0	72.0	30.8	45.0	100.0	109.0
" 1-5	10.4	10.0	34.0	62.0	27.5	38.0	235.0	260.0
" 1-9	43.8	60.0	123.5	270.0	238.7	248.0	1615.0	2136.0
" 1-13	79.2	65.6	135.0	264.0	464.0	621.0	2715.0	2552.0
Yamaska 2-5	9.7	8.6	94.0	118.0	60.5	84.0	73.0	85.0
" 2-9	42.6	55.2	54.0	80.0	257.4	235.0	1580.0	1576.0
" 2-13	93.6	76.0	113.0	264.0	570.4	800.0	3500.0	3120.0
St-Louis 1-5 et 9	20.4	18.0	28.0	37.0	37.4	49.0	150.0	160.0
" 1-11	25.5	24.0	7.1	34.0	7.0	7.8	280.0	326.0
" 1-12	17.8	15.0	4.5	10.2	7.0	6.3	323.0	362.0
" 1-14	21.0	19.4	4.5	9.8	7.8	7.5	370.0	380.0
St-Louis 2-4	10.4	9.5	34.0	57.0	25.7	31.0	40.0	42.0
" 2-8	13.2	12.0	14.0	33.0	19.5	22.0	100.0	117.0
" 2-12	25.5	21.0	15.3	33.0	29.5	34.0	310.0	355.0
" 2-14	27.5	25.6	16.4	41.0	112.0	95.0	740.0	760.0

Site	K (ppm)		CA (ppm)		MG (ppm)		NA (ppm)	
	M	U	M	U	M	U	M	U
Louiseville 1-4	27.5	28.0	36.0	58.0	75.2	84.0	644.0	632.0
" 1-8	46.8	42.4	62.0	91.0	139.2	141.0	1120.0	1200.0
" 1-12	62.4	56.8	50.0	72.0	214.4	176.0	1750.0	1696.0
" 1-17	90.0	71.2	58.0	68.0	320.0	230.0	2460.0	2400.0
" 1-20	106.8	81.6	48.0	68.0	387.2	255.0	2950.0	2776.0
Louiseville 2-4	45.6	76.8	31.8	57.0	148.8	129.0	1100.0	2240.0
" 2-8	85.8	86.4	75.5	103.0	363.2	257.0	2575.0	2496.0
" 2-13	135.0	71.2	40.5	59.0	604.5	712.0	4300.0	2496.0
" 2-15	153.0	81.6	68.0	100.0	663.4	760.0	4600.0	2840.0
St-Ambroise 1-4	34.8	26.0	7.1	25.0	19.5	23.0	383.0	400.0
" 1-8	64.8	56.8	7.1	28.0	33.6	42.0	1000.0	968.0
" 1-14	102.6	84.8	12.5	41.0	64.0	71.0	1750.0	1696.0
" 1-16	111.0	86.4	14.0	42.0	65.6	64.0	1775.0	1696.0
" 1-20	111.0	83.0	6.0	27.0	51.2	13.0	1710.0	1856.0
St-Ambroise 3-4	34.2	29.6	4.5	19.2	13.4	13.0	415.0	408.0
" 3-8	34.2	30.4	4.5	16.2	5.5	7.3	475.0	484.0
" 3-12	32.4	27.0	4.5	25.0	4.8	4.5	445.0	444.0
" 3-16	34.2	28.0	4.5	25.0	5.0	4.6	445.0	444.0
" 3-19	30.0	25.0	4.5	25.0	3.5	3.4	363.0	370.0
St-Ambroise 4-5	20.4	17.0	10.5	36.0	16.3	16.0	45.0	61.0
" 4-9	20.9	17.0	3.3	23.0	2.9	2.5	110.0	125.0
" 4-13	25.5	20.0	4.5	20.0	3.2	3.0	225.0	238.0
" 4-17	30.0	23.0	4.5	20.0	3.7	3.3	270.0	300.0
St-Ambroise 5-5	17.8	16.0	24.3	47.0	25.7	28.0	27.5	24.0
" 5-9	28.2	25.0	6.0	22.0	4.8	4.1	130.0	138.0
" 5-13	21.0	18.0	4.5	22.0	2.4	1.7	150.0	166.0
" 5-17	21.0	18.0	9.4	29.0	5.3	4.5	165.0	174.0
St-Ambroise 6-5	20.4	17.0	7.1	22.0	12.0	14.0	218.0	232.0
" 6-9	30.6	25.0	4.5	22.0	7.8	6.9	430.0	444.0
" 6-13	34.2	31.6	4.5	22.0	6.5	6.0	500.0	544.0
" 6-17	34.2	27.0	4.5	22.0	5.0	4.5	460.0	500.0
St-Ambroise 7-5	31.8	26.0	9.4	29.0	23.4	28.0	370.0	400.0
" 7-10	54.0	43.0	7.1	25.0	25.7	31.0	810.0	876.0
" 7-13	58.2	47.0	6.0	25.0	24.2	30.0	984.0	976.0
" 7-19	62.4	50.0	6.0	25.0	23.4	28.0	1100.0	1168.0
St-Urbain 1-9	32.4	27.0	6.0	123.0	6.0	-	400.0	404.0
" 1-13	22.5	-	4.5	-	2.4	-	295.0	-
" 1-16	19.4	17.0	3.3	20.0	2.6	6.1	270.0	264.0

Site	K (ppm)		CA (ppm)		MG (ppm)		NA (ppm)	
	M	U	M	U	M	U	M	U
Le Coteau 2-4	19.4	17.0	103.5	122.0	67.2	84.0	27.5	24.0
" 2-7	36.0	31.0	68.0	88.0	46.4	65.0	110.0	122.0
" 2-9	40.2	34.0	52.0	77.0	30.4	41.0	175.0	185.0
" 2-12	37.5	30.0	34.0	57.0	20.0	25.0	282.0	303.0
Nicolet 3-7	34.8	29.0	60.0	78.0	108.8	121.0	275.0	301.0
" 3-10	42.6	40.0	26.0	42.0	67.2	75.0	485.0	484.0
" 3-15	73.2	62.0	80.0	114.0	124.8	148.0	920.0	888.0
Nicolet B-4.5	111.0	86.0	46.0	63.0	164.8	134.0	2250.0	2240.0
Rosemère B---	32.4	30.0	113.0	150.0	72.0	98.0	55.0	63.0
St-Jean-Vianney B--	40.2	29.0	3.3	22.0	10.3	9.6	726.0	694.0
Baie-James, site 1	15.0	14.0	91.0	117.0	46.4	65.0	32.5	33.0
Baie-James, site 2	15.0	-	78.0	-	41.6	-	32.5	43.0

Identification: Nicolet 3-7 = Nicolet, forage 3, 7 mètres de profondeur.

M = Ministère

U = Université

APPENDICE D

ETUDE DE LA FIABILITE DU CONE SUEDOIS POUR DETERMINER LA LIMITE LIQUIDE DES ARGILES

Lors de la présente étude, des essais comparatifs ont été faits pour vérifier la fiabilité du cône suédois pour déterminer la limite liquide des argiles du Québec.

Un nombre total de 66 essais de détermination de la limite liquide ont été faits en utilisant la coupelle à Casagrande selon la norme ASTM D 423-66 et le cône Géonor selon la procédure donnée par Karlsson (45).

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 128. Le cône tend à surestimer un peu la limite liquide. Sur les 66 essais, la déviation moyenne est de +1.2 avec un écart-type de 1.9. Le cône Géonor est donc très valable pour déterminer la limite liquide des argiles. L'essai peut être fait plus rapidement qu'avec la coupelle à Casagrande et l'erreur humaine due aux manipulations est moins grande.

APPENDICE E

ETUDE DE LA VARIATION DE LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE L'ARGILE AVEC LE TEMPS DE CONSERVATION

La résistance non remaniée et remaniée de l'argile des différents forages exécutés lors de cette étude a été mesurée au cône suédois pour étudier son comportement après différents temps de conservation. Ces essais ont pour but de vérifier si le transport et le vieillissement des échantillons ont une influence aussi considérable que celle remarquée par Soderblom (99) pour des argiles suédoises.

Les résultats sont présentés aux figures 38 à 55 et au tableau 20. Ce dernier tableau donne les écarts de résistance avec la résistance mesurée au détubage après x mois de conservation. Ces écarts sont exprimés en pourcentage et ils sont une moyenne pour chaque forage. Quelquefois, les valeurs du premier tube d'un forage ont été enlevées parce qu'elles étaient très différentes de l'ensemble du profil.

Après un mois de conservation, la résistance non remaniée a diminué un peu, mais cette tendance n'est pas clairement définie pour tous les profils. Parfois, la résistance est supérieure pour une portion de profil et elle est inférieure pour le reste du profil (fig. 43, 46 et 51). Quelques profils montrent nettement la diminution de résistance non remaniée (fig. 45 et 50). Par contre, dans trois profils, soit Louiseville, forage 1, St-Ambroise, forage 1 et Yamaska, forage 1, il y a eu une légère augmentation de résistance après un mois de conservation. Pour la même période, la résistance remaniée moyenne a elle aussi diminué dans tous les profils sauf pour le forage 2 à St-Louis de Bonsecours où elle a augmenté de 22.5% (fig. 51).

Après quatre mois de conservation, les résistances au cisaillement non remaniées et remaniées ont continué à diminuer. La région de St-Ambroise fait exception car des regains de résistance sont enregistrés partout sauf pour la résistance non remaniée du forage 1.

Après plus de quatre mois de conservation, les essais effectués montrent que les résistances non remaniées et remaniées ont cessé de diminuer et qu'elles augmentent. La résistance non remaniée est tout de même encore inférieure en moyenne à la résistance non remaniée initiale. Par contre, la résistance remaniée est partout supérieure à la résistance initiale sauf pour le forage 2 à Yamaska.

En résumé, il est évident qu'il y a une tendance à une perte de résistance pendant les quatre premiers mois de conservation. Après cette période, l'inverse se produit et le phénomène est plus rapide pour la résistance remaniée. Pour la région de St-Ambroise, ces deux phénomènes sont plus rapides car la perte de résistance maximum a généralement été enregistrée après un mois de conservation.

Les variations les plus importantes ont été enregistrées dans la mesure de résistance remaniée des argiles les plus sensibles. Par exemple, à St-Ambroise, on a enregistré une diminution de résistance remaniée de 25% après un mois de conservation (forage 1). Par contre, une augmentation de 336% a été notée avec l'argile du forage 5 après huit mois de conservation.

Ceci montre qu'il est assez important de mesurer cette résistance le plus tôt possible après l'échantillonnage dans le cas d'argiles très sensibles.

Les mesures de résistance effectuées immédiatement après l'échantillonnage sont trop peu nombreuses pour permettre de tirer des conclusions précises. L'examen des courbes des figures 39 à 55 nous permet cependant de

conclure que le transport n'a pas affecté beaucoup la résistance de l'argile contrairement à ce qu'obtiennent les Suédois (Soderblom (99)).

BIBLIOGRAPHIE

1. Aas, G., Vane Test for Investigation of Anisotropy of Undrained Shear Strength of Clays, Norwegian Geotechnical Institute, Publication no. 76, (1968), pp. 3-8.

2. Aas, G., A Study of the Effect of Vane Shape and Rate of Strain on the Measured Values of in-situ Shear Strength of Clays, Proceedings, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v.1, #6, Montréal, (1965), pp. 141-145.

3. Aitcin, P.C. and Poulin, C., A Rapid Grain Size Analysis Method, Journal of Materials, v.7, #2, (1972), pp. 113-118.

4. American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 13th edition, Washington, (1971), 874p.

5. Ballivy, G. et al., Quelques caractéristiques géotechniques des dépôts d'argile de la Baie-James: les coulées d'argile de Fort-Rupert, Québec, Revue canadienne de géotechnique, v. 12, #4, (1975), pp. 498-509.

6. Béland, Jacques, Nicolet Landslide, nov. 1955, Proceedings, Geological Association of Canada, v.8, #1, (1955), pp. 143-156.

7. Berry, R.W. and Jorgensen, P., Grain Size, Mineralogy and Chemistry of a Quick Clay Sample from the Ullensaker Slide, Norway, Norwegian Geotechnical Institute, Publication no. 87, Oslo, (1971), pp. 73-84.

8. Bjerrum, L., Stability of Natural Slopes in Quick Clay, Géotechnique, v.5, (1955), pp. 101-119.

9. Bjerrum, L., Geotechnical Properties of Norwegian Marine Clays, Géotechnique, v.4, (1954), pp. 49-69.

10. Bjerrum, L. and Kjaernsli, B., Analysis of the Stability of Some Norwegian Natural Clay Slopes, Géotechnique, v.7, (1957), pp. 1-16.

11. Bjerrum, L. and Landva, A., Direct Simple-Shear Tests on a Norwegian Quick Clay, Géotechnique, v.16, #1, (1966), pp. 1-20.

12. Bjerrum, L. and Rosenqvist, Th., Some Experiments with Artificially Sedimented Clays, Géotechnique, v.6, (1956), pp. 124-136.

13. Bjerrum, L. and Tien-Hsing Wu, Fondamental Shear-Strength Properties of the Lilla Edet Clay, Géotechnique, v.10, #3, (septembre 1960), pp. 101-109.

14. Brewer, R., Fabric and Mineral Analysis of Soils, John Wiley and Sons, New-York, (1964), 470p.

15. Brzezinski, L.S., A Review of the 1924 Kenogami Landslide, Canadian Geotechnical Journal, v.8, #1, (February 1971), pp. 1-6.

16. Cabrera, J.G. and Smalley, I.J., Quick Clays as Products of Glacial Action, Engineering Geology, v.7, #2, (1973), pp. 115-133.

17. Casagrande, A., Classification and Identification of Soils, Proceedings, American Society of Civil Engineering, (June 1947).

18. Chahde, J., Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Génie civil, Université de Sherbrooke, (1977).

19. Conlon, Robert J., Landslide on the Toulnustouc River, Quebec, Canadian Geotechnical Journal, v.3, #3, (August 1966), pp. 113-143.

20. Crawford, Carl B., Quick Clays of Eastern Canada, Engineering Geology, v.2, #4, (1968), pp. 239-265.

21. Crawford, Carl B., Stability of Natural Slopes in Sensitive Clay, Proceedings, Journal of the Soils Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering, no. SM 4, (July 1967), pp. 419-436.

22. Dibiagio, E. and Aas, G., The in Situ Undrained Shear Strength Measured on a Horizontal Failure Plane by Large-Scale Direct Shear Tests in Quick Clay, Norwegian Geotechnical Institute, Publication no. 76, Oslo, (1968), pp. 7-14.

23. Eden, W.J., Some Observations at Le Coteau Landslide, Gatineau, Quebec, Canadian Geotechnical Journal, v.9, #4, (1972), pp. 508-514.

24. Eden, W.J., Earthflows at the Beattie Mine Quebec, Canada, Canadian Geotechnical Journal, v.1, #2, (March 1964), pp. 104-114.

25. Eden, W.J. and Crawford, C.B., Geotechnical Properties of Leda Clay in the Ottawa Area, Proceedings, 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, v.1, (1957), pp. 22-27.

26. Eden, W.J. and al., South Nation River Landslide, 16 May 1971, Canadian Geotechnical Journal, v.8, #3, (1971), pp. 446-451.

27. Eden, W.J. and Mitchell, R.J., The Mechanics of Landslides in Leda Clay, Canadian Geotechnical Journal, v.7, #3, (1970), pp. 285-296.

28. Eden, W.J. and Mitchell, R.J., The Mechanics of Landslides in Leda Clay: Reply, Canadian Geotechnical Journal, v.8, #1, (1971), pp. 148-149.

29. Eide, O. and Bjerrum, L., The Slide at Bekkelaget, Géotechnique, v.5, (1955), pp. 88-100.

30. Emerson, W.W., The Structure of Soil Crumbs, Journal of Soil Science, v.10, #2, (1959), pp. 235-244.

31. Fafard, M., Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Génie Civil, Université de Sherbrooke, (en rédaction).

32. Fellenius, Bror, The Landslide at Guntorp, Géotechnique, v.5, (1955), pp. 120-125.

33. Flaate, Kaare and Preber, Terje, Stability of Road Embankments in Soft Clay, Canadian Geotechnical Journal, v.11, #1, (1974), pp. 72-88.

34. Forman, G.A. and Brydon, J.E., Clay Mineralogy of Canadian Soils, Soils in Canada, R.F. Legget, Toronto, (1961), pp. 140-146.

35. Foscal-Mella, Gabriel, Analyse minéralogique des argiles glaciaires, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université de Montréal, (novembre 1976).

36. Gadd, N.R. Surficial Geology of the Becancour Map-area, Quebec 31 1/8, Dept. Mine and Tech. Surveys, Canada, Paper 59-8, (1960), 34p.

37. Grim, Ralph E., Clay Mineralogy, McGraw-Hill Book Company, Second Edition, (1968).

38. Holmsen, Per, Landslips in Norwegian Quick Clays, Géotechnique, v.3, (1952-1953), pp. 187-194.

39. Houston, William N. and Mitchell, James K., Property Interrelationships in Sensitive Clays, Proceedings, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering, v.95, no. SM4, (July 1969), pp. 1037-1062.

40. Hurtubise, J.E. et al., Les éboulements de terrain dans l'est du Canada, Proceedings, Fourth International Conference on Soil Mechanic, London, v.2, (1957), pp. 325-329.

41. Hutchinson, J.N., A Landslide on a Thin Layer of Quick Clay at Furre, Central Norway, Géotechnique, v. 11, # 2, (1961), pp. 69-94.

42. Hutchinson, J.N., The Landslide of February 1959 at Vibstad, in Namdalen, Norwegian Geotechnical Institute, Publication no. 61, Oslo, (1965), pp. 1-16.

43. Ingles, O.G., Soil Chemistry Relevant to the Engineering Behaviour of Soils, Soils Mechanics Selected Topics, I.K. Lee, London, (1968), pp. 42-48.

44. Jarrett, P.M., The Mechanics of Landslides in Leda Clay: Discussion, Canadian Geotechnical Journal, v. 7, # 4, (1970), pp. 504-505.

45. Karlsson, R., Suggested Improvements in the Liquid Limit Test with Reference to Flow Properties of Remoulded Clays, 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v.1, Paris, (1961), pp. 171-184.

46. Karrow, P.F., Pleistocene Geology of the Grondines Map Area Quebec, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Illinois, (1957).

47. Karrow, P.F., The Champlain Sea and its Sediments, Soils in Canada, Roy. Soc. Can., Spec. Publ., # 3, R.F. Legget, (1961), pp. 97-108.

48. Karrow, P.F., Earth Flows in the Grondines and Trois-Rivières Areas, Quebec, Canadian Journal of Earth Science, v. 9, # 5, (May 1972), pp. 561-573.

49. Kenney, T.C., Sea Levels and Post-Glacial Clays, Norwegian Geotechnical Institute, Publication no. 62, Oslo, (1965).

50. Kenney, T.C., Shearing Resistance of Natural Quick Clays, Ph.D. Thesis, London, (1966).

51. Kenney, T.C., Field Measurements of in Situ Stresses in Quick Clays, Norwegian Geotechnical Institute, Publication no. 76, Oslo, (1968), pp. 15-22.

52. Kenney, T.C., Slide Behaviour and Shear Resistance of a Quick Clay Determined from a Study of the Landslide at Selnes, Norway, Norwegian Geotechnical Institute, Publication no. 76, Oslo, (1968), pp. 23-30.

53. Kenney, T.C. and Drury, P., Case Record of the Slope Failure that Initiated the Retrogressive Quick Clay Landslide at Ullensaker, Norway, Géotechnique, v. 23, # 1, (1973), pp. 33-47.

54. Kenney, T.C. and al., An Experimental Study of Bonds in a Natural Clay, Norwegian Geotechnical Institute, Publication no. 76, Oslo, (1968), pp. 31-36.

55. Kjaernsli, Bjorn and Simons, Noel, Stability Investigations of the North Bank of the Drammen River, Géotechnique, v. 12, (1962), pp. 147-167.

56. Ladanyi, B., The Mechanics of Landslides in Leda Clay: Discussion, Canadian Geotechnical Journal, v. 7, # 4, (1970), pp. 506-507.

57. Lafleur, J. et Lefebvre, G., Synthèse des données pour le glissement de St-Urbain, Cté Charlevoix, Rapport # 1 présenté au Service de Géotechnique du Ministère des Richesses Naturelles, Sherbrooke, (mars 1975).

58. Larochelle, P., Chagnon, J.Y. and Lefebvre, G., Regional Geology and Landslides in the Marine Clay Deposits of Eastern Canada, Canadian Geotechnical Journal, v. 7, # 2, (1970), pp. 145-156.

59. Ledoux, R.L., L'analyse minéralogique des sols argileux, Revue canadienne de géotechnique, v. 9, # 1, (1972), pp. 125-126.

60. Lefebvre, Guy, Contribution à l'étude de la stabilité des pentes dans les argiles cimentées, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, (1970).

61. Lefebvre, G. and Larochelle, P., Analysis of Two Slope Failures in Cemented Champlain Clays, Canadian Geotechnical Journal, v.11, #1, (1974), pp. 89-108.

62. Leflaive, E., Les limites d'Atterberg et le pénétromètre à cône, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, #50, (1971), pp. 123-131.

63. Lemieux, Raynald, Etude en laboratoire de la consolidation des argiles du lac Barlow-Ojibway, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Génie civil, Université de Sherbrooke, (1975).

64. Liebling, R.S. and Kerr, P.F., Observations on Quick Clays, Geological Society of America Bulletin, v.76, #8, (August 1965), pp. 853-878.

65. Loiselle, André and al., A Study of the Cementation Bonds of the Sensitive Clays of the Outardes River Region, Canadian Geotechnical Journal, v.8, #3, (1971).

66. Loken, Tor, Recent Research at the Norwegian Geotechnical Institute Concerning the Influence of Chemical Additions on Quick Clays, Norwegian Geotechnical Institute, Publication no. 87, Oslo, (1971), pp. 133-147.

67. Loken, Tor and Torrance, J.K., The Geochemistry of Leached Drammen Marine Clay, Norwegian Geotechnical Institute, Publication no. 87, Oslo, (1971), pp. 172-175.

68. McRostie, G. and al., Subsurface Investigation and Slope Stability Analysis, Le Coteau Street Project, Gatineau, Quebec, Report to Central Mortgage and Housing Corporation, (May 1974).

69. Meyerhof, G.G., The Mechanism of Flow Slides in Cohesive Soils, Géotechnique, v.7, #1, (1957), pp. 41-49.

70. Mitchell, James K., Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons Inc., (1976).

71. Mitchell, James K., The Fabric of Natural Clays ans its Relation to Engineering Properties, Proceedings, Highway Research Board, v.35, (1956), 693p.

72. Mitchell, J.K. and Houston, W.N., The Causes of Clay Sensitivity, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering, v.95, no. SM3, Paper 6568, (May 1969), pp. 845-871.

73. Mitchell, James K. and Houston, W.N., Causes of Clay Sensitivity: Closure, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering, v.97, no. SM1, Paper 7785, (1971), p. 239.

74. Mitchell, R.J. and Lawrence, V.M., An Approach to the Problem of Progressive Failure: Discussion, Canadian Geotechnical Journal, v.10, #3, (1973), pp. 562-564.

75. Mitchell, R.J. and Markell, A.R., Flowsliding in Sensitive Soils, Canadian Geotechnical Journal, v.11, #1, (1974), pp. 11-31.

76. Morin, Jean-Paul, Geotechnical Behaviour of Two Quaternary Clays from the Central St-Lawrence Lowland, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, (1975).

77. Morin, L.G., La coulée d'argile de St-Louis, Le Naturaliste Canadien, v.74, #5 et 6, (1947), pp. 125-143.

78. Moum, J. and al., A Geochemical Investigation of the Sensitivity of a Normally Consolidated Clay from Drammen, Norway (with discussion), Norwegian Geotechnical Institute, Publication no.96, Oslo, (1973).

79. O'Brien, Neal R., Microstructure of a Laboratory Sedimental Flocculated Sediment, Canadian Geotechnical Journal, v.9, #1, (1972), pp. 120-121.

80. Paul, M.J., The Mechanics of Landslides in Leda Clay: Discussion, Canadian Geotechnical Journal, v.8, #1, (1971), pp. 143-148.

81. Penner, E., A Study of Sensitivity in Leda Clay, Canadian Journal of Earth Science, v.2, #5, (1965), pp. 425-441.

82. Philibert, Alain, Etude de la résistance au cisaillement d'une argile Champlain, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Génie Civil, Université de Sherbrooke, (1976).

83. Prest, V.K., Quaternary Geology of Canada, Geology and Economics Minerals of Canada, Geological Survey of Canada, #1, Chapter 12, (1970).

84. Quigley, R.M. and Thompson, C.D., The Fabric of Anisotropically Consolidated Sensitive Marine Clay, Canadian Geotechnical Journal, v.3, #2, pp. 61-73.

85. Ramanatha Iyer, T.S., Causes of Clay Sensitivity: Discussion, Journal of the Soils Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering, v.96, #SM2, (March 1970), pp. 774-776.

86. Rosenqvist, Th., Considerations on the Sensitivity of Norwegian Quick Clays, Géotechnique, v.3, #5, (1953), pp. 195-200.

87. Rosenqvist, Th., Investigations in the Clay-electrolyte-water System, Norwegian Geotechnical Institute, Publication no.9, Oslo, (1955).

88. Rosenqvist, Th., Physico-chemical Properties of Soils: Soil-water Systems, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering, v.85, #SM2, Paper 2000, (April 1959), pp. 31-53.

89. Rosenqvist, Th., Norwegian Research into the Properties of Quick Clay - A Review, Engineering Geology, v.1, #6, (1966), pp. 445-450.

90. Sangrey, Dwight A. and Babu Shanker, N., Property Interrelationship in Sensitive Clays: Discussion, Journal of the Soils Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering, v.96, #SM3, (1970), pp. 1067-1071.

91. Sangrey, D.A. and Paul, J.M., A Regional Study of Landsliding near Ottawa, Canadian Geotechnical Journal, v.8, #2, (1971), pp. 315-335.

92. Sankaran, K.S. and Bhaskaran, R., Strength Anisotropy and Time Effects of Two Sensitive Clays: Discussion, Canadian Geotechnical Journal, v.10, #3, (1973), pp. 564-566.

93. Scott, J.G., Regional Geology and Landslides in the Marine Clay Deposits of Eastern Canada: Discussion, Canadian Geotechnical Journal, v.8, #1, (1971), pp. 139-142.

94. Sevaldson, R.A., The Slide in Lodalen, October 6th, 1954, Géotechnique, v.6, (1956), pp. 167-182.

95. Sherard, James L. and al., Piping in Earth Dams in Dispersive Clay, Proceedings, Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-supported Structure, American Society of Civil Engineering, v.1, Part 1, (June 1972), pp. 589-626.

96. Simons, N.E., The Influence of Stress Path on Triaxial Test Results, American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication, #361, (1964), pp. 270-278.

97. Skempton, A.W., The Colloidal Activity of Clays, Proceedings, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, #3, Zurich, (1953).

98. Skempton, A.W. and Northey, R.D., The Sensitivity of Clays, Géotechnique, v.3, (1952-1953), pp. 30-53.

99. Soderblom, R., Salt in Swedish Clays and its Importance for Quick Clay Formation, Swedish Geotechnical Institute, Proceedings no.22, Stockholm, (1969).

100. Soderblom, R., Organic Matter in Swedish Clays and its Importance for Quick Clay Formation, Swedish Geotechnical Institute, Proceedings #26, Stockholm, (1974).

101. Soderblom, R., New Lines in Quick Clay Research, Swedish Geotechnical Institute, Proceeding no.55, Stockholm (1974).

102. Soderman, L.G. and Quigley, R.M., Geotechnical Properties of Three Ontario Clays, Canadian Geotechnical Journal, v.2, #2, (May 1965), pp. 167-189.

103. Tavenas, F. and al., The Saint-Jean-Vianney Landslide: Observations and Eyewitnesses Accounts, Canadian Geotechnical Journal, v.8, #3, (1971), pp. 463-478.

104. Taylor, A.W., Physico-chemical Properties of Soils: Ion Exchange Phenomena, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineering, v.85, #SM2, Paper 1999, (April 1959), pp. 19-30.

105. Thompson, G., Geotechnical Properties of Three Ontario Clays: Discussion, Canadian Geotechnical Journal, v.2, #2, (May 1965), pp. 194-195.

106. Torrance, K.J., On the Role of Chemistry in the Development and Behavior of the Sensitive Marine Clays of Canada and Scandinavia, Canadian Geotechnical Journal, v.12, #3, (1975), pp. 326-335.

107. Townsend, D.L., Geotechnical Properties of Three Ontario Clays: Discussion, Canadian Geotechnical Journal, v.2, #2, (May 1965), pp. 190-193.

108. Vonmoos, M., Determination of Organic Matter for the Classification of Soil Samples, Proceedings, Sixth International Conference of the Soils Mechanics and Foundation Engineering, v.1, (1965), pp. 77-79.

109. Yong, R. and Warkentin, B.P., Introduction to Soil Behavior, Macmillan Company, New-York, (1966), 451p.

Tableau 1. Classification de l'argile selon sa sensibilité.
(Skempton et Northey 1952)

ST = 1	: Argile insensible.
ST = 1 à 2	: Argile à faible sensibilité.
ST = 2 à 4	: Argile à sensibilité moyenne.
ST = 4 à 8	: Argile sensible.
ST = 8 à 16	: Argile très sensible.
ST = >16	: Argile extra-sensible.

Tableau 2. Classification de l'argile extra-sensible. (Rosenqvist 1953)

ST = 8 à 16	: Argile peu "quick".
ST = 16 à 32	: Argile moyennement "quick".
ST = 32 à 64	: Argile très "quick".
ST = >64	: Argile extra "quick".

Tableau 3. Expérience de lessivage avec des argiles déposées en eau salée. (Bjerrum, 1954)

Echantillon no.	Pc	W	Sel	W_L	W_P	I.P.	I.L.	CU	CUR	ST
	Kg/cm^2	%	G/L	%	%			Kg/cm^2	Kg/cm^2	
1 (avec lessivage)	0.80	40.4	1.0	27.4	18.0	9.4	2.38	0.086	0.001	90
2 (sans lessivage)	0.95	41.0	39.0	43.4	19.5	23.9	0.90	0.31	0.048	6.4

Tableau 4. Caractéristiques géotechniques de sites de coulées d'argile en Scandinavie.

Site	Référence	W	W_L	W_P	I.L.	Sel	Argile ($<2\mu$)	ST	CU	CUR
		%	%	%		G/L	%		t/m_2	t/m_2
Ullensaker (Norvège, 1953)	Bjerrum (1955)	32	26	19	1.86	2.0	37	42*	1.1	(.026)
Aserumvannet (Norvège)	Meyerhof (1957)	62	35	22	3.08	0.0	62	200**	1.08	(.005)
Selnes (Norvège, 1965)	Kenney (1968)	34	22	17	3.40	0.6	40	>100*	1.5-2.5	≈ 0.0
Naddum (Norvège, 1958)	Kenney (1966)	38	28	20	2.25	-	-	> 70*	1.0	(≤014)
Save (Suède, 1945)	Meyerhof (1957)	65	55	25	1.33	-	-	11*	1.9	(.173)
Skottorp (Suède, 1946)	Meyerhof (1957)	66	54	24	1.40	<1.0	53	35*	3.9	(.111)
Surte (Suède, 1950)	Meyerhof (1957)	70	60	25	1.29	<1.0	67	25*	1.9	(.076)
Gota (Suède, 1957)	Kenney (1966)	75	65	30	1.29	-	-	20*	2.0-5.0	(.1 - .25)

( ) : Valeur calculée par l'auteur

* : Valeur mesurée au scissomètre

** : Valeur mesurée au cône suédois

Tableau 5. Caractéristiques géotechniques de sites de glissements en Scandinavie.

Site	Référence	W	W_L	W_P	I.L.	Sel	Argile ($< 2\mu$)	ST	CU	CUR
		%	%	%		G/L	%		t/m^2	t/m^2
Bekkelaget (+) (Norvège, 1953)	Eide et Bjerrum (1955)	39	26	17	2.44	3.0	45	80*	0.8	(.01)
Furre (+) (Norvège, 1959)	Hutchinson (1961)	43	32	22	2.1	< 1.0	41	>100**	1.15	0.01
Vibstad (Norvège, 1959)	Hutchinson	24	30	22	0.25	1.0-1.5	18	3**	4.3	1.5
Drammen (Norvège, 1955)	Kjaernsli et Simons (1962)	35	34	18	1.06	20	37	8**	1.6	0.2
Lodalen (Norvège, 1954)	Sevaldson (1956)	31	35	18	0.76	3.0-15.0	40	3*	4.7	1.3
Nesset (Norvège, 1957)	Flaate et Preber (1974)	50	41	22	1.47	-	-	7**	1.4	(0.2)
Tjernsmyr (+) (Norvège, 1957)	Flaate et Preber (1974)	50	35	22	2.15	-	-	15**	1.1	(0.073)
Aas (Norvège, 1962)	Flaate et Preber (1974)	42	37	21	1.31	-	-	7**	1.7	(0.24)

Tableau 5. Suite

Site	Référence	W	W_L	W_P	I.L.	Sel	Argile ($< 2\mu$)	ST	CU	CUR
		%	%	%		G/L	%		t/m^2	t/m^2
Aulielva (Norvège, 1963)	Flaate et Preber (1974)	50	50	26	1.0	-	-	5**	2.1	(0.42)
Skjeggerod (+) (Norvège, 1963)	Flaate et Preber (1974)	45	29	18	2.45	-	-	50**	1.2	(0.024)
Falkenstein (+) (Norvège, 1964)	Flaate et Preber (1974)	35	22	14	2.62	-	-	70**	0.9	(0.013)

\+ : Argile "quick" ou glissement dû à une strate d'argile extra-sensible.

* : Valeur mesurée au scissomètre.

** : Valeur mesurée au cône suédois.

( ): Valeur calculée par l'auteur.

Tableau 6. Caractéristiques géotechniques de quelques argiles extra-sensibles de Scandinavie.

Site	Référence	W	W_L	W_P	I.L.	Sel	Argile ($<2\mu$)	ST	CU	CUR
		%	%	%		G/L	%		t/m^2	t/m^2
Utby (S) (Forage 658, 14m.)	Soderblom (1969)	65	48	-	-	1.8	-	279**	2.93	.011
Utby (S) (Forage 99, 17m.)	Soderblom (1969)	55	42	-	-	5.4	-	78**	3.55	.046
Ellesbo (S) (9m.)	Soderblom (1969)	80	55	-	-	-	-	>210**	1.28	<.006
Lodose (S) (Forage 1, 7m.)	Soderblom (1969)	87	57	-	-	0.35	-	99**	0.98	.0075
Tonsberg (N)	Dibiagio et Aas (1968)	51	37	24	2.08	-	-	71*	1.4	(.02)
Drammen (N) (Forage 2)	Moum et al. (1971)	35	22	19	5.33	<.35	25	80**	1.0	< .01
Kjelsas (N)	Kenney (1968)	43	26	20	3.83	-	-	>100**	0.7	(.007)
Lilla Edet (S) (Forage 3)	Bjerrum et Wu (1960)	66	58	28	1.27	-	-	30-70*	3.9	(.13-.05)
Manglerud (N)	Bjerrum (1954)	36	29	19	1.7	-	66	52*	1.2	(.023)

Tableau 6. Suite

Site	Référence	W	W_L	W_p	I.L.	Sel	Argile ($<2\mu$)	ST	CU	CUR
		%	%	%		G/L	%		t/m^2	t/m^2
Aserum (N)	Aas (1968)	67	45	26	2.16	-	-	20-100*	1.0	(.05-.01)
Lierstranda (N)	Dibiagio et Aas (1968)	35	25	19	2.67	-	-	76*	1.2	(.016)
Oslo (N)	Loken (1970)	45	29	22	3.29	0.45	44	(>70)** *	0.7	<.01
Toyen (N)	Bjerrum (1954)	34	26	21	2.60	-	-	175*	1.9	.011

N : Norvège

S : Suède

* : Valeur mesurée au scissomètre

** : Valeur mesurée au cône suédois

( ) : Valeur calculée par l'auteur

Tableau 7. Sensibilité, surface spécifique et pourcentage de cations bivalents et monovalents dans l'eau interstitielle de quelques argiles. (Penner, 1965)

Code	Profondeur	I.P.	$CA^{++} + MG^{++}$	$NA^{+} + K^{+}$	Potentiel électro-cinétique	ST	Argile ($< 2\mu$)	Surface spécifique
	pi.		%	%	mV		%	m^2/g
136-2	32	44	-	-	12.6	11	85	77.8
94-13-3	22	38	47	53	16.2	30	82	72
124-19-5	60	17	13	87	20.2	33	77	62
126-5-4	75	45	11	89	16.1	34	85	72
126-4-4	65	45	10	90	16.4	45	89	-
126-1-4	35	40	9	91	19.3	53	78	60
126-3-4	55	46	10	90	17.4	60	79	66
126-2-4	45	38	9	91	21.0	74	78	60
129-16-4	57	-	-	-	22.2	118	85	85
124-3-5	12	28	7	93	24.9	126	71	79
129-7-5	30	32	8	92	19.9	183	79	76
124-12-5	39	27	5	95	28.8	453	76	79
94-20-5	53	8	8	92	23.5	575	72	47
124-9-6	30	24	5	95	29.7	600	86	80
94-27-1	72	10	6	94	21.4	900	67	54
123-2-3	-	5	2	98	33.8	> 1000	54	29

Sites: Sewer Plant 94
Toulnoustouc 123
Gloucester 124
Queensway Overpass 126
Breckenridge, Qué. 129
Interceptor Shaft 136

Tableau 8. Comparaison des caractéristiques géotechniques de quelques sites de coulées d'argile. (Mitchell et Markell, 1974)

Site	Composition chimique de l'eau interstitielle (ppm)				
	CA	NA	K	MG	FE
Rockliffe, Ottawa	4.6	375	22	4.7	0.1
Pineview, Ottawa	2.5	210	18	3.0	3.1
Sewerline, Ottawa	5.8	500	24	8.6	0.1
Rivière South-Nation	24.0	482	-	-	-
Notre-Dame de la Salette	16.0	600	18	8.0	0.05

Tableau 9. Caractéristiques géotechniques de quelques sites de glissements et coulées au Canada.

Site	Référence	W	W_L	W_P	I.L.	Sel	Argile	ST	CU	CUR
		%	%	%		G/L	%		t/m^2	t/m^2
Beattie Mine (1) (C., 1943)	Eden (1964)	60	60	24	1.0	-	84	7*	3.4	0.49
Breckenridge (C., 1963)	Crawford (1967)	80	65	28	1.41	-	-	-	4.7	-
Desbiens (C., 1946)	Meyerhof (1957)	50	46	26	1.20	-	-	> 40	4.4	-
Fort Rupert (C., 1969 et 1970)	Ballivy et al. (1975)	26-37	24-40	15-19	1.4	-	39-43	20-100*	2.0	-
Greencreek (1) (C.)	Sangrey et Paul (1971)	60	63	32	0.9	-	64	57**	11.0	-
Hawkesbury (C., 1955)	Meyerhof (1957)	70	58	26	1.38	0	64	30	3.9	-
Kénogami (C., 1924)	Brzezinski (1971)	40	48	22	0.69	-	45	15*	12.2	-
Labrador (G.)	Kenney et al. (1968)	36	32	22	1.40	2.0	55	100	5.5	-

Tableau 9. Suite

Site	Référence	W	W_L	W_P	I.L.	Sel	Argile	ST	CU	CUR
		%	%	%		G/L	%		t/m^2	t/m^2
Rockcliffe (C., 1969)	Sangrey et Paul (1971)	68	72	30	0.9	-	54	35**	12.0	-
St-Jean-Vianney (C., 1971)	Université de Sherbrooke	42	-	-	-	-	65	807**	10.5	.013
St-Louis (C., 1968)	Lefebvre et Larochelle (1974)	65	50	25	1.6	0.4	80	50*	4.0	0.40
St-Vallier (C., 1968)	Lefebvre et Larochelle (1974)	60	60	23	1.0	4.0	65	20*	3.8	0.50
South-Nation (C., 1971)	Eden et Fletcher (1971)	70	70	30	1.0	-	-	10-100	5.0	-
Toulnustouc (G., 1962)	Conlon (1966)	32	20	16	4.0	-	28	-	38.7 (2)	-

(1) : Argile varvée.
(2) : Mesuré à partir d'essais non consolidés non confinés.

* : Mesuré au scissomètre.
** : Mesuré au cône suédois.

C. : Coulée d'argile.
G. : Glissement.

Tableau 10. Caractéristiques géotechniques des argiles étudiées.

Site	Prof.	W	W_L	W_P	I.P.	I.L.	CU	CUR	ST	Argile ($< 2\mu$)	Act.
	m.	%	%	%			t/m^2	t/m^2		%	
Baie-James, site 1	-	90	56	25	31	2.10	1.51	0.13	12	50-70	0.52
Baie-James, site 2	-	88	67	30	37	1.57	1.55	0.077	20	88	0.42
La Grande		32	35	-	-	-	3.40	0.28	12	-	-
Le Coteau (F. 2)	2-9	65	79	29	50	0.72	7.77	0.46	17	82	0.61
	10-13	60	57	27	30	1.10	6.60	0.11	60	84	0.36
Louiseville (F. 1)	2-12	80	68	27	41	1.29	2.28	0.105	22	78	0.53
(Club de golf)	13-20	70	64	25	39	1.15	3.84	0.198	19	81	0.48
Louiseville (F. 2)	2-8	72	66	25	41	1.15	3.52	0.16	22	83	0.49
(Grande rivière du Loup)	9-15	68	63	25	38	1.13	4.93	0.25	20	79	0.48
Matagami	7-12	78	78	-	-	-	2.30	0.18	13	-	-
Nicolet (F. 2)	2-7	66	62	23	39	1.10	-	-	-	76	0.51
	8-15	51	44	23	21	1.33	-	-	-	46	0.46
Nicolet (F. 3)	3-7	63	54	24	30	1.30	2.14	0.14	15	73	0.41
	8-13	62	43	23	20	1.95	2.17	0.10	22	64	0.31
	14-18	53	31	20	11	3.00	-	-	-	68	0.16
Nicolet (Blocs)	4.5	66	63	-	-	-	2.63	0.15	18	-	-
Outardes 2	3	33	21	18	3	5.00	7.30	<.0075	>973	34	0.09

Tableau 10. Suite

Site	Prof.	W	W_L	W_P	I.P.	I.L.	CU	CUR	ST	Argile ($< 2\mu$)	Act.
	m.	%	%	%			t/m^2	t/m^2		%	
Rosemère (Blocs)	-	66	61	27	34	1.15	5.23	0.20	26	80	0.43
Rosemère	2-5	53	33	19	14	2.43	-	-	-	44	0.32
	6-8	59	44	24	20	1.75	-	-	-	58	0.34
St-Ambroise (F. 1)	4	36	20	15	5	4.20	1.82	0.015	121	28	0.18
	6-8	64	45	25	20	1.95	3.54	0.033	107	64	0.31
	14-16	61	52	24	28	1.32	4.53	0.106	43	63	0.44
	20	45	35	19	16	1.63	3.33	0.064	51	48	0.33
St-Ambroise (F. 3)	3-5	49	30	18	12	2.58	1.69	0.0093	182	53	0.23
	6-14	65	29	21	8	5.50	3.05	<.0075	> 407	66	0.12
	15-19	50	23	18	5	6.40	4.32	<.0075	> 576	50	0.10
St-Ambroise (F. 4)	5	60	46	23	23	1.61	4.9	.03	163	69	0.33
	7-14	64	35	22	13	3.23	4.48	<.0075	> 597	66	0.20
	15-19	46	25	18	7	4.00	4.90	<.0075	> 653	53	0.13
St-Ambroise (F. 5)	5	45	42	23	19	1.16	6.17	0.15	41	50	0.38
	7-15	45	27	20	7	3.57	5.31	0.0094	565	55	0.13
	17	37	31	17	14	1.43	4.98	0.08	62	43	0.33
St-Ambroise (F. 7)	4	58	-	-	-	-	6.30	0.034	191	-	-
	5-12	69	33	22	11	4.27	3.25	<.0075	> 433	68	0.16
	13-19	52	26	19	7	4.71	2.83	<.0075	> 377	46	0.15

Tableau 10. Suite

Site	Prof.	W	W_L	W_P	I.P.	I.L.	CU	CUR	ST	Argile (< 2μ)	Act.
	m.	%	%	%			t/m^2	t/m^2		%	
St-Ambroise (F. 7)	3	40	-	-	-	-	9.93	0.25	40	-	-
	4-8	66	38	22	16	2.75	2.78	0.0125	222	67	0.24
	9-16	68	49	24	25	1.76	3.22	0.024	134	68	0.37
	19	48	31	20	11	2.54	3.70	0.021	176	50	0.22
St-Jean-Vianney (Bloc)	-	42	30	20	10	2.2	10.5	0.013	807	58	0.17
St-Louis (F. 1)	4-5	67	61	29	32	1.19	2.89	0.17	17	77	0.42
	6-7	73	57	28	29	1.55	3.00	0.077	39	-	-
	8-12	66	49	27	22	1.77	2.93	0.032	92	80	0.28
	13-15	64	50	21	29	1.48	4.49	0.030	150	84	0.34
St-Louis (F. 2)	3-5	65	51	23	28	1.50	1.90	0.10	19	62	0.45
	6-10	68	53	26	27	1.56	2.21	0.039	57	75	0.36
	11-14	62	47	26	21	1.71	2.97	0.024	124	78	0.27
Ste-Rosalie	3-8	81	68	28	40	1.32	2.37	0.054	44	-	-
St-Thuribe (F. 1)	2	38	35	19	16	1.19	-	-	-	36	0.44
	4-7.5	48	32	22	10	2.60	2.60	0.044	59	43	0.23
	9.5-13.5	44	32	21	11	2.09	2.18	0.055	40	46	0.24
St-Thuribe (F. 2)	2	44	41	19	22	1.14	-	-	-	41	0.54
	3.5-4.5	39	32	19	13	1.53	4.06	0.1245	33	33	0.39
	7-13.5	41	25	19	6	3.67	2.87	0.0189	152	37	0.16

Tableau 10. Suite

Site	Prof.	W	W_L	W_P	I.P.	I.L.	CU	CUR	ST	Argile ($< 2\mu$)	Act.
	m.	%	%	%			t/m^2	t/m^2		%	
St-Thuribe (F. 3)	2	43	32	17	15	1.73	-	-	-	44	0.34
	3-13.5	40	28	18	10	2.20	4.01	0.042	95	37	0.27
St-Thuribe (F. 4)	2-3	53	43	21	22	1.45	3.03	0.077	39	47	0.47
	4-5	44	34	20	14	1.71	3.35	0.068	49	41	0.34
	7-13.5	41	24	19	5	4.40	2.93	0.025	117	37	0.14
St-Thuribe (F. 5)	2.5	52	46	23	23	1.26	3.83	0.22	17	49	0.47
	3.5-7	43	31	20	11	2.09	3.08	0.083	37	37	0.30
	8.5-14.5	41	23	18	5	4.60	2.77	0.014	198	36	0.14
St-Thuribe (F. 6)	2	47	40	20	20	1.35	2.88	0.11	26	44	0.45
	4-8	41	29	19	10	2.20	3.37	0.095	35	32	0.31
	9.5-13	41	23	19	4	5.50	2.90	0.0084	345	35	0.11
St-Thuribe (F. 7)	2	35	36	19	17	0.94	2.46	0.11	22	28	0.61
	4-5.5	46	30	22	8	3.00	2.61	0.033	79	32	0.25
	7-10	43	25	20	5	4.60	2.17	<.0075	>289	35	0.14
	11	29	16	14	2	7.50				26	0.08
St-Thuribe (F. 8)	2	30	27	19	8	1.38	4.10	0.37	11	18	0.44
	4-10.5	40	35	22	13	1.38	4.27	0.19	22	36	0.36
St-Urbain	2-8	30	28	19	9	1.22	-	-	-	36	0.25
	9-18	28	25	18	7	1.43	10.5	0.044	239	35	0.20

Tableau 10. Suite

Site	Prof.	W	W_L	W_P	I.P.	I.L.	CU	CUR	ST	Argile ($< 2\mu$)	Act.
	m.	%	%	%			t/m^2	t/m^2		%	
Yamaska (F. 1)	2-6	45	37	19	18	1.44	1.85	0.116	16	40	0.45
	7-8	25	24	19	5	1.20	1.48	0.057	26	13	0.38
	9	60	43	21	22	1.77	3.20	0.20	16	53	0.42
	10-14	60	59	27	32	1.03	3.12	0.21	15	75	0.43
Yamaska (F. 2)	3-5	47	39	20	19	1.42	2.14	0.2	11	44	0.43
	7	40	30	17	13	1.77	-	0.095	-	33	0.39
	9-11	64	57	26	31	1.23	3.62	0.28	13	70	0.37
	12-14	60	61	29	32	0.97	4.04	0.27	15	81	0.40

Tableau 11. Essais de thixotropie.

Site	Forage ou bloc	Profondeur	Regain de résistance - %								
			Temps après remaniement - min.								
		m.	0.5	1	2	4	8	15	30	60	120
Baie-James, site 1	-	-	0	0	0	0	14	21	43	57	128
	-	-	0	0	8	8	17	17	15	50	75
Baie-James, site 2	-	-	0	0	0	8	15	18	28	62	89
	-	-	12	12	12	25	24	19	38	38	75
Le Coteau	2	4	-	23	40	53	23	40	63	63	163
		7	15	15	22	29	34	56	90	107	117
		9	3	13	23	41	54	59	85	100	128
		12	9	27	9	36	36	64	73	191	218
Louiseville	1	2	0	9	9	18	18	36	64	82	82
		4	21	34	71	71	71	95	95	143	168
		6	1	1	11	21	31	31	52	72	82
		8	0	9	9	27	27	45	64	91	136
		10	0	7	29	21	50	64	79	100	164
		12	8	8	15	31	38	46	85	108	138
		15	6	12	12	35	24	35	71	94	224
		20	5	14	19	29	38	33	76	86	124

Tableau 11. Suite

Site	Forage ou bloc	Profondeur	Regain de résistance - %								
			Temps après remaniement - min.								
		m.	0.5	1	2	4	8	15	30	60	120
Louiseville	2	4	12	18	18	24	35	71	88	118	118
	2	8	6	17	17	22	50	61	89	106	117
	2	10	0	14	14	14	43	79	68	114	157
	2	15	5	14	23	32	50	55	77	114	141
Matagami	3	7	0	0	7	7	7	33	87	113	113
	3	12	0	5	19	19	5	19	33	33	52
Nicolet	3	7	0	7	14	21	29	29	50	64	100
	3	8	0	9	9	9	27	64	82	100	145
	3	13	0	20	20	20	20	20	63	96	150
Nicolet	Bloc 3	-	0	20	20	20	47	67	67	93	80
Rosemère	Bloc	5	6	12	37	56	56	75	100	131	175
St-Ambroise	1	4	0	8	15	15	38	62	92	154	154
		6	6	19	19	42	52	71	110	110	197
		8	11	26	31	51	60	74	123	214	214

Tableau 11. Suite

Site	Forage ou bloc	Profondeur	Regain de résistance - %								
			Temps après remaniement - min.								
		m.	0.5	1	2	4	8	15	30	60	120
St-Ambroise	1	14	0	9	18	36	45	64	73	127	164
		16	5	9	14	25	25	48	82	105	105
		20	4	10	9	9	20	33	43	88	117
St-Ambroise	3	4	9	27	55	64	73	73	109	182	182
St-Ambroise	4	5	4	25	38	54	71	121	154	271	196
St-Ambroise	5	5	6	18	29	41	47	88	88	123	212
		17	8	15	31	46	46	62	69	100	138
St-Ambroise	6	5	15	31	38	62	69	77	138	215	200
		9	3	11	15	27	33	47	73	73	140
		13	6	11	20	24	27	52	65	90	141
St-Ambroise	7	5	14	29	36	64	79	114	136	236	336
		10	0	8	16	24	80	124	140	152	224
		13	33	50	45	64	60	98	162	233	305
		19	13	22	26	39	74	104	152	209	261

Tableau 11. Suite

Site	Forage ou bloc	Profondeur	Regain de résistance - %								
			Temps après remaniement - min.								
		m.	0.5	1	2	4	8	15	30	60	120
St-Jean-Vianney	Bloc	-	8	23	38	46	48	77	131	261	346
St-Louis	1	5	0	0	9	18	18	36	36	100	127
		7	0	4	0	24	45	55	82	104	145
		9	11	20	46	46	51	86	134	149	157
		11	0	14	19	24	33	52	62	95	105
		14	6	19	19	32	52	71	110	168	152
St-Louis	2	4	1	2	5	14	36	36	48	73	110
		6	4	13	14	14	19	36	57	100	114
		8	0	6	17	17	40	74	74	103	154
		10	0	6	9	16	41	59	69	116	125
		12	0	8	8	8	20	24	48	52	112
		14	3	9	9	16	28	59	69	69	97
Ste-Rosalie	1	8	0	10	16	10	16	22	50	72	98
St-Thuribe	2	9	1	6	6	17	20	20	20	45	57
		10	0	0	0	20	20	18	33	81	117

Tableau 11. Suite

Site	Forage ou bloc	Profondeur	Regain de résistance - %								
			Temps après remaniement - min.								
		m.	0.5	1	2	4	8	15	30	60	120
St-Thuribe	4	4	0	4	4	11	19	24	38	88	100
St-Thuribe	8	5	0	12	19	19	25	30	100	100	100
St-Urbain	U.de S.	9	17	35	44	50	52	82	97	127	233
		10	4	17	33	47	47	60	100	113	153
		11	8	14	24	25	39	59	76	116	155
		13	13	16	19	29	46	56	54	73	108
Yamaska	1	2	0	7	21	7	7	29	29	50	79
		5	3	8	8	8	20	20	30	74	107
		7	16	23	26	40	40	46	44	56	40
		9	5	5	10	20	25	40	25	60	115
		11	0	6	25	44	56	75	81	100	131
		13	5	11	11	32	37	37	63	84	95
Yamaska	2	3	6	13	19	25	19	38	38	75	81
		4	0	0	0	16	32	32	47	84	53
		5	5	11	11	17	17	33	56	56	-
		7	5	5	16	26	26	37	47	68	89
		9	14	5	14	23	32	32	68	68	114
		11	5	5	14	24	45	59	68	95	141
		13	0	9	17	26	35	43	52	91	96

Tableau 12. Caractéristiques géotechniques des argiles étudiées.

Site	Prof.	PH	M.O.	Anions et cations dans l'eau MEQ/L						Cations échangeables MEQ/1,000g.				Sel
	m.		%	CL	SO_4	K	NA	MG	CA	K	NA	MG	CA	G/L
Baie-James, site 1	-	8.1	0.6	-	-	-	-	-	-	7	4	49	773	-
Baie-James, site 2	-	8.1	0.7	22.5	6.5	0.38	1.41	3.62	4.22	9	4	48	562	0.4
La Grande	-	6.9	1.2	-	-	-	-	-	-	3	2	21	31	-
Le Coteau (F. 2)	2-9	8.4	0.8	11.3	6.3	0.82	4.53	3.95	3.71	16	12	69	136	0.5
	10-13	8.7	0.9			0.96	12.27	1.65	1.70	21	30	56	150	0.7
Louiseville (F. 1)	2-12	8.5	1.0	93.1	1.9	1.17	43.70	11.76	2.46	12	54	104	217	3.7
	13-20	8.5	1.0			2.52	117.66	29.09	2.65	15	94	112	245	8.5
Louiseville (F. 2)	2-8	8.5	1.1	191.7	0.4	1.68	79.93	21.06	2.68	14	77	112	346	5.9
	9-15	8.4	1.0			3.68	193.57	52.15	2.71	16	135	120	248	14.1
Nicolet (F. 3)	3-7	8.4	0.9	2.5	21.9	0.89	11.96	8.95	2.99	12	20	96	562	1.0
	8-13	8.7	1.0			1.09	21.10	5.53	1.30	14	31	98	413	1.3
	14-18	8.4	0.9			1.87	40.02	10.27	3.99	14	39	85	219	2.7
Nicolet (Blocs)		8.8	1.1	-	6.1	2.84	97.87	13.56	2.30	16	89	80	563	6.3
Rosemère (Blocs)	-	7.9	0.9	1.6	6.7	0.83	2.39	5.92	5.64	13	5	83	299	0.6

Tableau 12. Suite

Site	Prof.	PH	M.O.	Anions et cations dans l'eau MEQ/L						Cations échangeables MEQ/1,000g.				Sel
	m.		%	CL	SO_4	K	NA	MG	CA	K	NA	MG	CA	G/L
St-Ambroise (F. 1)	4	8.5	0.5			0.89	16.66	1.60	0.35	10	21	41	31	0.9
	6-8	8.7	0.8	49.1	0.9	1.66	43.50	2.76	0.35	22	60	67	36	2.8
	14-16	8.9	1.0			2.73	65.79	5.33	0.66	23	80	57	33	4.7
	20	8.9	0.8			2.84	74.38	4.21	0.30	19	65	46	28	4.5
St-Ambroise (F. 3)	3-5	8.6	0.8			0.87	18.05	1.10	0.22	16	37	66	34	0.9
	6-14	9.0	0.9	4.3	0.9	0.85	20.01	0.42	0.22	23	55	46	38	1.0
	15-19	8.9	0.7			0.82	17.58	0.35	0.22	19	39	27	30	0.9
St-Ambroise (F. 4)	5	8.0	0.8			0.52	1.96	1.34	0.52	15	9	56	53	0.2
	7-14	8.4	0.9	-	0.6	0.59	7.29	0.25	0.19	23	27	53	42	0.4
	15-19	8.8	0.9			0.77	11.74	0.30	0.22	17	31	37	33	0.6
St-Ambroise (F. 5)	5	7.9	0.7			0.46	1.20	2.11	1.21	13	5	48	49	0.2
	7-15	8.5	0.7	5.6	1.0	0.63	6.09	0.30	0.26	20	20	38	42	0.3
	17	8.7	0.5			0.54	7.18	0.44	0.47	12	15	26	53	0.4
St-Ambroise (F. 6)	5-12	8.8	1.0	2.9	0.4	0.65	14.09	0.82	0.29	21	45	52	48	0.7
	13-19	9.1	0.8			0.87	20.88	0.47	0.22	19	47	31	31	1.0
St-Ambroise (F. 7)	3	8.1	0.8	-	-	-	-	-	-	13	20	58	42	-
	4-8	8.6	0.9			0.81	16.09	1.92	0.47	19	42	58	38	0.9
	9-16	8.9	1.0	20.6	0.9	1.44	39.02	2.05	0.33	22	64	49	34	2.3
	19	9.0	0.9			1.60	47.85	1.92	0.30	19	56	31	24	2.8

Tableau 12. Suite

Site	Prof.	PH	M.O.	Anions et cations dans l'eau MEQ/L						Cations échangeables MEQ/1,000g.				Sel
	m.		%	CL	SO_4	K	NA	MG	CA	K	NA	MG	CA	G/L
St-Jean-Vianney	-	9.5	0.8	-	-	1.03	31.58	0.85	0.16	17	52	39	599	1.6
St-Louis (F. 1)	4-5	8.4	1.1	-	-	-	-	-	-	13	11	99	467	-
	6-7	8.6	1.0			0.52	6.52	3.08	1.40	14	19	102	416	0.5
	8-12	8.9	1.1	3.8	0.9	0.56	13.12	0.58	0.29	16	38	91	442	0.7
	13-15	9.1	1.1			0.54	16.09	0.64	0.22	17	52	96	255	0.8
St-Louis (F. 2)	3-5	8.3	0.9			0.27	1.74	2.11	1.70	8	6	73	380	0.3
	6-10	8.6	1.0	6.2	1.2	0.34	4.35	1.60	0.70	12	16	93	437	0.3
	11-14	8.9	1.0			0.68	22.84	5.82	0.79	14	32	90	477	1.6
St-Thuribe (F. 1)	2	7.8	0.7	-	-	0.6	3.6	2.7	1.9	7	6	61	66	0.5
	4-7.5	8.5	1.0	-	-	1.2	22.0	2.9	0.4	15	31	55	101	1.8
	9.5-13.5	8.8	0.7	-	-	2.2	45.9	4.7	0.2	17	48	45	95	4.1
St-Thuribe (F. 2)	2	7.8	1.2	-	-	0.5	2.1	5.3	5.2	9	5	43	133	0.6
	3.5-4.5	8.0	1.0	-	-	0.9	4.3	3.3	1.0	12	7	46	163	0.5
	7-13.5	8.6	0.7	-	-	1.0	16.1	1.2	0.2	16	31	31	115	1.2
St-Thuribe (F. 3)	2	7.9	1.0	-	-	0.5	1.6	3.9	0.7	7	4	37	234	0.3
	3-13.5	8.1	1.0	-	-	0.9	7.6	1.8	0.3	14	14	43	169	0.6
St-Thuribe (F. 4)	2-3	7.7	0.8	-	-	0.5	1.4	2.7	2.1	8	3	59	66	0.3
	4-5	7.9	1.4	-	-	0.7	4.2	2.0	0.6	13	8	48	173	0.4
	7-13.5	8.3	1.0	-	-	0.9	12.3	0.7	0.1	16	26	32	124	0.8

Tableau 12. Suite

Site	Prof.	PH	M.O.	Anions et cations dans l'eau MEQ/L						Cations échangeables MEQ/1,000g.				Sel
	m.		%	CL	SO_4	K	NA	MG	CA	K	NA	MG	CA	G/L
St-Thuribe (F. 5)	2.5	7.8	1.2	-	-	0.8	2.7	7.6	5.5	11	21	37	170	0.7
	3.5-7	8.3	1.1	-	-	1.0	6.9	3.3	1.1	15	53	48	161	0.7
	8.5-14.5	9.1	1.0	-	-	1.1	18.9	1.1	0.1	16	128	33	124	1.3
St-Thuribe (F. 6)	2	7.8	0.9	-	-	0.4	1.5	3.5	1.6	8	3	40	132	0.4
	4-8	8.1	1.0	-	-	0.8	3.4	1.6	0.5	14	9	41	170	0.3
	8.5-13	8.5	1.0	-	-	0.8	7.6	0.6	0.1	16	19	34	139	0.5
St-Thuribe (F. 7)	2	7.9	0.9	-	-	0.7	1.6	4.7	3.7	6	3	30	102	0.4
	4-5.5	7.9	0.9	-	-	0.6	4.1	1.4	0.7	14	10	33	126	0.4
	7-10	8.3	1.1	-	-	0.8	8.0	0.6	0.2	18	23	30	121	0.6
	11	8.6	0.6	-	-	-	-	-	-	12	18	20	78	-
St-Thuribe (F. 8)	2	7.8	1.0	-	-	0.4	1.0	6.9	9.1	4	2	20	180	0.8
	4-10.5	7.8	1.0	-	-	0.7	0.8	3.3	2.8	12	2	37	264	0.4
St-Urbain	9-18	9.1	0.6	-	-	0.64	13.99	0.30	0.23	15	32	31	66	0.7
Yamaska (F. 1)	2-6	8.4	0.8			0.22	7.29	2.40	2.35	5	12	53	249	0.6
	7-8	8.7	0.8	141.0	3.9	-	-	-	-	2	17	27	196	-
	9	8.4	0.8			1.12	70.25	19.64	6.16	6	55	68	429	5.5
	10-14	8.4	1.0			2.03	118.10	38.17	6.74	11	86	103	544	9.3
Yamaska (F. 2)	3-5	8.1	0.9			0.25	3.18	4.98	4.69	5	7	50	329	0.6
	7	8.2	0.7	114.2	3.7	-	-	-	-	4	6	39	416	-
	9-11	8.4	1.1			1.09	68.73	21.17	2.69	9	72	95	581	5.2
	12-14	8.3	1.1			2.39	152.24	46.95	5.64	12	102	109	510	11.3

Tableau 13. Analyse minéralogique qualitative de quelques argiles.

Site	Fraction totale							Fraction comprise entre 0.2 et 2 microns							Fraction plus petite que 2 microns						
	Quartz	Feldspaths	Amphibole	Illite	Chlorite	Smectite	Interstratifies	Quartz	Feldspaths	Amphibole	Illite	Chlorite	Smectite	Interstratifies	Quartz	Feldspaths	Amphibole	Illite	Chlorite	Smectite	Interstratifies
Le Coteau	C	B	D	A	E	-	-	E	B	D	A	C	-	-	-	tr	tr	A	B	-	tr
Louiseville (F. 1)	A	B	E	C	D	-	-	tr	C	D	A	B	-	-	tr	tr	tr	A	B	-	C
St-Ambroise (F. 1)	A	B	D	C	E	-	-	tr	tr	E	A	B	C	-	tr	tr	tr	A	B	-	-
St-Ambroise (F. 7)	A	B	D	C	E	-	-	tr	tr	C	A	B	tr	-	-	tr	tr	A	B	C	-
St-Louis	A	C	E	D	B	-	tr	D	C	E	B	A	-	tr	-	tr	-	A	B	tr	tr
St-Urbain	A	B	E	C	D	-	-	tr	tr	tr	A	B	C	-	tr	tr	-	B	C	A	-
Yamaska (F. 2)(1)	A	B	E	D	C	-	-	D	C	E	B	A	-	tr	tr	tr	tr	A	B	-	C
Yamaska (F. 2)(2)	A	C	D	C	B	tr	-	E	C	D	B	A	-	tr	-	tr	tr	A	B	-	tr

Les lettres indiquent l'ordre décroissant d'abondance: A, B, C, D, E, tr (traces).

(1) : 3m. à 5m. de profondeur.

(2) : 9m. à 14m. de profondeur.

Tableau 14. Comparaison des résultats du Ministère et de l'Université dans l'analyse des cations de l'eau interstitielle pour des teneurs en sel similaires.

Teneur en sel	Ministère		Université	
	Σ des cations	Variation	Σ des cations	Variation
G/L	PPM	%	PPM	%
(1) 0.25	110	15.8	139	20.9
(2) 0.23	95		115	
(1) 1.0	519	8.4	538	1.7
(2) 1.0	479		529	
(1) 2.0	783	14.4	802	21.6
(2) 2.05	896		975	
(1) 3.75	1368	3.2	1474	69.7
(2) 3.67	1326		2502	
(1) 5.52	2021	2.6	2828	41.4
(2) 5.37	2076		2000	
(1) 7.65	2928	5.8	2769	6.2
(2) 8.16	3099		2942	
(1) 9.25	3393	2.9	3503	10.2
(2) 9.25	3492		3180	

Tableau 15. Légende générale pour l'identification des sites.

Site	Sigle
Baie-James	▼
La Grande	◬
Le Coteau	⊙
Louiseville	△
Matagami	▨
Nicolet	■
Outardes 2	⊡
Rosemère	◪
St-Ambroise	○
St-Jean-Vianney	▽
St-Louis	×
Ste-Rosalie	◩
St-Thuribe	▲
St-Urbain	□
Yamaska	●

Tableau 16. Identification de chaque site, caractéristiques géométriques des glissements et des coulées d'argile et profondeur des couches d'argile où une moyenne a été calculée comme valeur représentative de chaque site.

No.	Site	Hauteur de pente	Longueur de rétrogression	Profondeur représentative
		m.	m.	m.
1	Le Coteau	30.5	46	5-8
1-a	Le Coteau	-	-	9-13
2	Louiseville (F. 1)	18	120	2-9
3	Louiseville (F. 2)	10	26	2-12
4	Rosemère	11	22	2-8
5	St-Ambroise (F. 1)	20	384	5-12
6	St-Ambroise (F. 3)	-	-	3-14
7	St-Ambroise (F. 4)	25	480	5-14
8	St-Ambroise (F. 5)	15	48	7-14
9	St-Ambroise (F. 7)	≈ 18	70	5-15
10	St-Jean-Vianney	30	550	-
11	St-Louis (F. 1)	19	68	5-15
12	St-Louis (F. 2)	22	268	4-12
13	St-Thuribe (F. 4)	≈ 17	74	3-7
13-a	St-Thuribe (F. 4)	-	-	8.5-13.5
14	St-Thuribe (F. 7)	≈ 23	983	4-5.5
14-a	St-Thuribe (F. 7)	-	-	7-11
15	St-Urbain	18	125	2-8
15-a	St-Urbain	-	-	9-18
16	Yamaska (F. 1)	12	56	9-14
17	Yamaska (F. 2)	-	-	9-14

Tableau 17. Caractéristiques géotechniques des argiles des glissements et des coulées.

No.	Site	Prof.	W	W_L	W_P	I.P.	I.L.	CU	CUR	ST	Argile (< 2μ)	Act.
		m.	%	%	%			t/m^2	t/m^2		%	
1	Le Coteau*	5-9	65	79	29	50	0.72	7.77	0.46	17	82	0.61
1-a		10-13	60	57	27	30	1.10	6.60	0.11	60	84	0.36
2	Louiseville** (Club de golf)	2-9	81	69	27	42	1.29	2.11	0.10	21	77	0.55
3	Louiseville* (Grande rivière du Loup)	2-12	71	66	25	41	1.12	3.91	0.187	21	83	0.49
4	Rosemère*	-	66	61	27	34	1.15	5.23	0.20	26	80	0.43
5	St-Ambroise (F. 1)**	5-12	64	45	25	20	1.95	3.54	0.033	107	64	0.31
6	St-Ambroise (F. 3)**	3-14	61	29	20	9	4.56	2.68	<.0075	>357	61	0.15
7	St-Ambroise (F. 4)**	5-14	63	39	22	17	2.41	4.56	<.0075	>608	67	0.25
8	St-Ambroise (F. 5)**	7-14	46	27	20	7	3.71	5.15	<.0075	>687	55	0.13
9	St-Ambroise (F. 7)**	5-15	67	46	24	22	1.95	3.07	0.0204	150	68	0.32
10	St-Jean-Vianney**	-	42	30	20	10	2.20	10.50	0.013	807	58	0.17
11	St-Louis (F. 1)**	5-15	67	53	28	25	1.56	3.03	0.047	64	80	0.31
12	St-Louis (F. 2)**	4-12	67	51	26	25	1.64	2.29	0.044	52	71	0.35

Tableau 17. Suite

No.	Site	Prof.	W	W_L	W_P	I.P.	I.L.	CU	CUR	ST	Argile (< 2 μ)	Act.
		m.	%	%	%			t/m^2	t/m^2		%	
13	St-Thuribe (F. 4)**	2.7-7.5	45	34	20	14	1.79	3.35	0.072	47	40	0.35
13-a		8.5-14	42	23	19	4	5.75	2.75	0.0117	235	38	0.11
14	St-Thuribe (F. 7)**	3-5.5	46	30	22	8	3.00	2.61	0.033	79	32	0.25
14-a		6-12	39	23	18	5	4.20	2.17	<.0075	>289	33	0.15
15	St-Urbain**	2-7.5	30	28	19	9	1.22	-	-	-	36	0.25
15-a		9-18	28	25	18	7	1.43	10.50	0.044	239	35	0.20
16	Yamaska (F. 1)*	9-13	60	54	25	29	1.21	3.15	0.20	16	68	0.43
17	Yamaska (F. 2)*	9-13	62	58	27	31	1.13	3.79	0.28	14	74	0.42

* : Glissement

** : Coulée

Tableau 18. Gain thixotropique des argiles des glissements et des coulées.

No.	Site	Profondeur	Gain de résistance - %								
			Temps après remaniement - min.								
		m.	0.5	1	2	4	8	15	30	60	120
1	Le Coteau	4-9	9	17	28	41	37	52	79	90	136
1-a	Le Coteau	10-13	9	27	9	36	36	64	73	191	218
2	Louiseville	2-9	6	13	25	34	37	52	69	97	117
3	Louiseville	2-12	6	16	16	20	43	70	82	113	131
4	Rosemère	-	6	12	37	56	56	75	100	131	175
5	St-Ambroise	5-12	9	23	25	47	56	73	117	162	206
6	St-Ambroise	4	9	27	55	64	73	73	109	182	182
7	St-Ambroise	5	4	25	38	54	71	121	154	271	196
9	St-Ambroise	5-15	24	29	32	51	73	112	146	207	288
10	St-Jean-Vianney	-	8	23	38	46	48	77	131	261	346
11	St-Louis	5-15	3	11	19	29	40	60	85	123	137
12	St-Louis	4-12	1	7	11	14	31	46	59	89	123
13	St-Thuribe	4	0	4	4	11	19	24	38	88	100
15-a	St-Urbain	9-18	11	21	30	38	46	64	82	107	162

Tableau 18. Suite

No.	Site	Profondeur	Gain de résistance - %								
			Temps après remaniement - min.								
		m.	0.5	1	2	4	8	15	30	60	120
16	Yamaska	9-13	3	7	15	32	39	51	56	81	114
17	Yamaska	9-13	6	6	15	24	37	45	63	85	117

Tableau 19. Caractéristiques géochimiques des argiles des glissements et des coulées.

No	Site	Prof.	PH	M.O.	Cations dans l'eau MEQ/L					Cations échangeables MEQ/1,000g.					Sel
		m.		%	K	NA	MG	CA	Σ cations	K	NA	MG	CA	Σ cations	G/L
1	Le Coteau	5-9	8.4	0.9	0.82	4.53	3.95	3.71	13.01	16	12	69	136	233	0.54
		10-13	8.6	0.9	0.96	12.27	1.65	1.70	16.58	21	30	56	150	257	0.71
2	Louiseville (Club de golf)	2-9	8.5	0.9	0.95	38.36	8.82	2.44	50.58	12	46	102	195	355	2.87
3	Louiseville (Grande rivière du Loup)	2-12	8.5	1.1	1.68	79.93	21.06	2.68	105.35	14	88	115	318	535	5.91
4	Rosemère	-	7.9	0.9	0.83	2.39	5.92	5.64	14.78	13	5	83	299	400	0.60
5	St-Ambroise (F. 1)	5-12	8.7	0.8	1.27	30.08	2.18	0.35	34.13	22	60	67	36	185	1.86
6	St-Ambroise (F. 3)	3-14	8.9	0.9	0.86	19.36	0.65	0.22	21.08	22	52	50	37	161	0.96
7	St-Ambroise (F. 4)	5-14	8.3	0.9	0.56	5.51	0.61	0.30	6.99	21	23	54	44	142	0.31
8	St-Ambroise (F. 5)	7-14	8.4	0.7	0.63	6.08	0.29	0.26	7.27	21	20	37	41	119	0.34
9	St-Ambroise (F. 7)	5-15	8.8	0.9	1.23	31.37	2.01	0.37	34.98	21	55	52	36	164	1.83
10	St-Jean-Vianney	-	9.5	0.8	1.03	31.58	0.85	0.16	33.62	17	52	39	599	707	1.55
11	St-Louis (F. 1)	5-15	8.8	1.1	0.54	12.21	1.22	0.55	14.52	15	31	96	404	546	0.64
12	St-Louis (F. 2)	4-12	8.6	1.0	0.42	6.52	2.05	1.05	10.04	11	16	88	443	558	0.42

Tableau 19. Suite

No	Site	Prof.	PH	M.O.	Cations dans l'eau MEQ/L					Cations échangeables MEQ/1,000g.					Sel
		m.		%	K	NA	MG	CA	Σ cations	K	NA	MG	CA	Σ cations	G/L
13	St-Thuribe (F. 4)	2.7-7.5	7.8	1.1	0.8	5.1	1.3	0.4	7.9	12	8	49	141	210	0.47
		8.5-14	8.4	1.0	0.9	13.7	0.65	0.1	15.3	16	29	30	117	192	0.90
14	St-Thuribe (F. 7)	4-5.5	7.9	0.9	0.6	4.1	1.35	0.65	6.8	14	10	33	126	183	0.37
		6.5-10	8.3	1.1	0.8	8.0	0.60	0.20	9.6	16	20	28	110	174	0.58
15-a	St-Urbain	9-16	9.1	0.6	0.64	13.99	0.30	0.23	15.15	15	32	31	66	144	0.69
16	Yamaska (F. 1)	9-13	8.4	0.9	1.57	94.17	28.9	6.45	131.1	9	75	91	506	681	7.38
17	Yamaska (F. 2)	9-13	8.3	1.1	1.74	110.48	34.06	4.16	150.45	10	82	99	557	748	8.22

Tableau 20. Variation de la résistance au cisaillement avec le temps de conservation.

Site	Forage	Ecart avec la résistance initiale - %													
		non remanié							remanié						
		Temps de conservation - Mois							Temps de conservation - Mois						
		1	1.25	4	8	11	12	13	1	1.25	4	8	11	12	13
Louiseville	1	+1.2	-	-9.6	-	-6.5	-	-	-4.4	-	-14.4	-	+5.7	-	-
Louiseville	2	-4.0	-	-10.7	-	-	-	-	-9.6	-	-11.7	-	-	-	-
St-Ambroise	1	+2.0	-	-17.8	-	-	-	-	-25.5	-	-1.9	-	-	-	-
St-Ambroise	3	-11.4	-	-2.1	-	-	-	-	*	-	*	-	-	-	-
St-Ambroise	4	-6.5	-	-1.6	-	-	-	-	*	-	*	-	-	-	-
St-Ambroise	5	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	>+335.6	-	-	-
St-Ambroise	6	-	-	-	+4.1	-	-	-	-	-	-	>+28.4	-	-	-
St-Ambroise	7	-	-	-	+2.6	-	-	-	-	-	-	+39.9	-	-	-
St-Louis	1	-	-8.7	-13.7	-	-	-4.3	-	-	-0.6	-3.6	-	-	+63.8	-
St-Louis	2	-	-1.9	-17.1	-	-	-	-	-	+22.5	+2.5	-	-	-	-
Yamaska	1	+8.6	-	+7.3	-	-	-	-	-3.2	-	-15.8	-	-	-	-
Yamaska	2	-4.7	-	-9.8	-	-	-	-1.7	-6.7	-	-24.1	-	-	-	-5.2

* : non mesurable

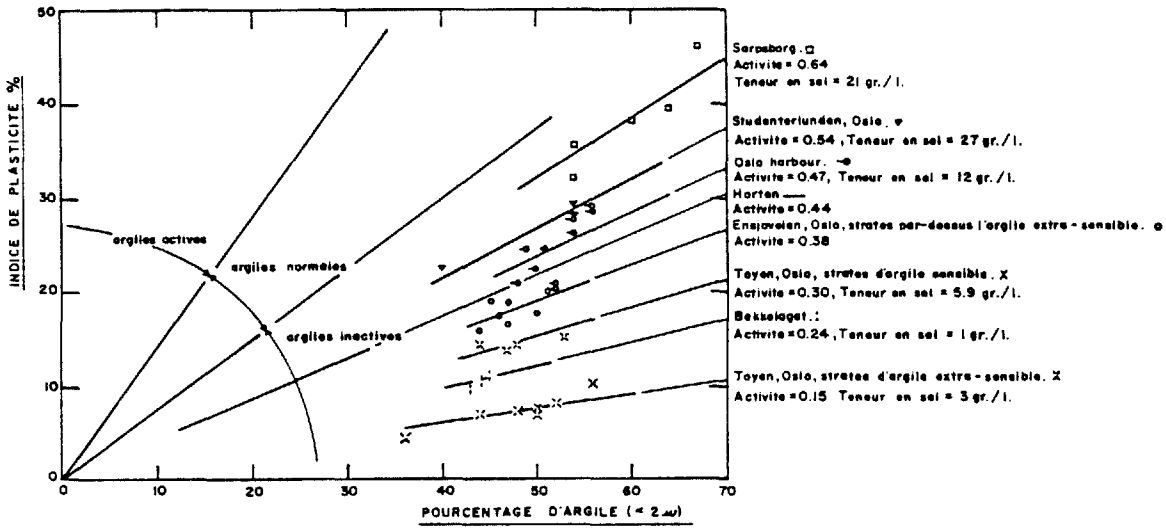

FIGURE 1. ACTIVITE DE QUELQUES ARGILES NORVEGIENNES D'APRES BJERRUM 1954.

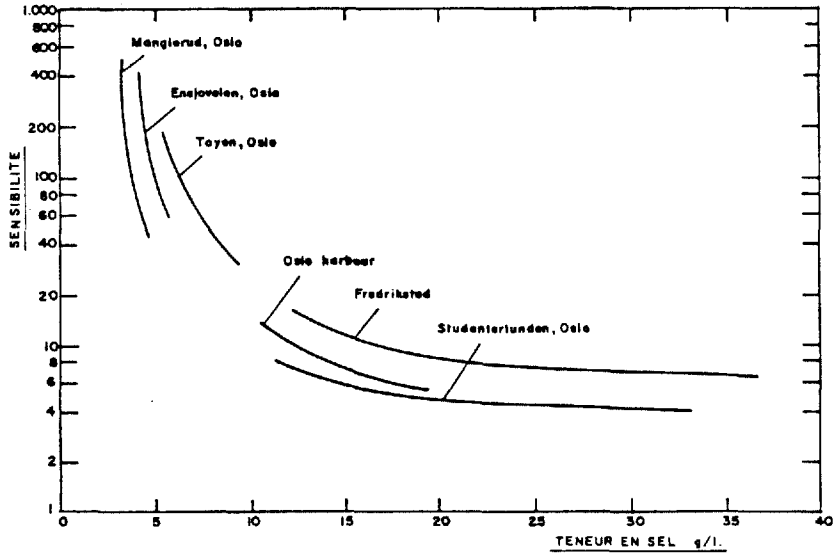

FIGURE 2. RELATION ENTRE LA SENSIBILITE ET LA TENEUR EN SEL DE QUELQUES DEPOTS D'ARGILE NORVEGIENNE D'APRES BJERRUM 1954.

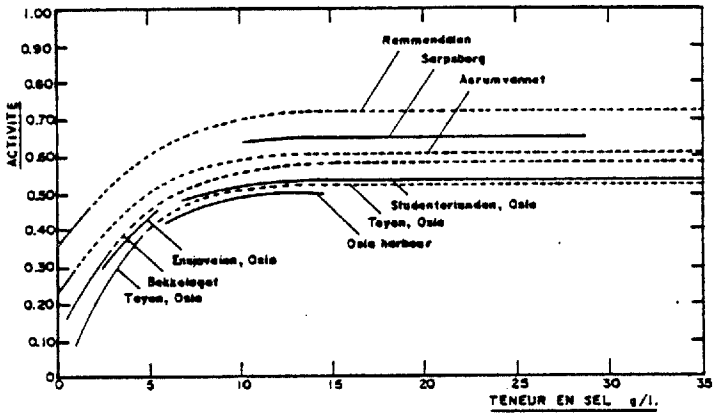

FIGURE 3. RELATION ENTRE L'ACTIVITE ET LA TENEUR EN SEL DE QUELQUES DEPOTS D'ARGILE NATURELLE, D'APRES BJERRUM 1964.

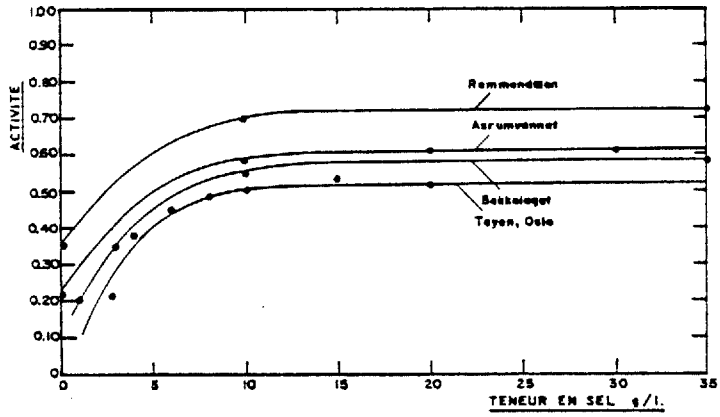

FIGURE 4. ACTIVITE DE QUATRE (4) DIFFERENTES ARGILES POUR DES TENEURS EN SEL DIFFERENTES DANS L'EAU INTERSTITIELLE, D'APRES BJERRUM 1964.

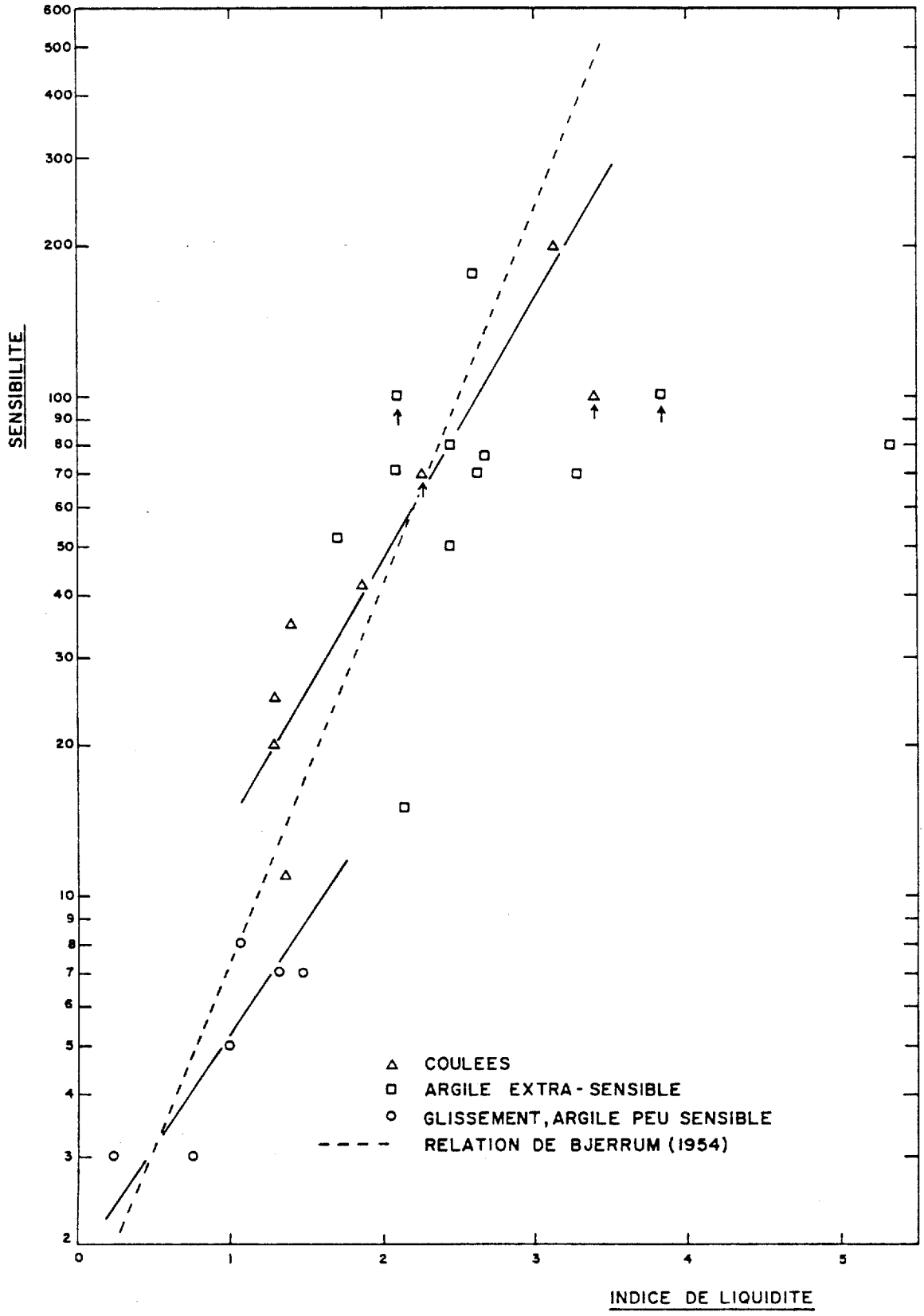

FIGURE 5. RELATION ENTRE LA SENSIBILITE ET L'INDICE DE LIQUIDITE POUR DES ARGILES DE SCANDINAVIE.

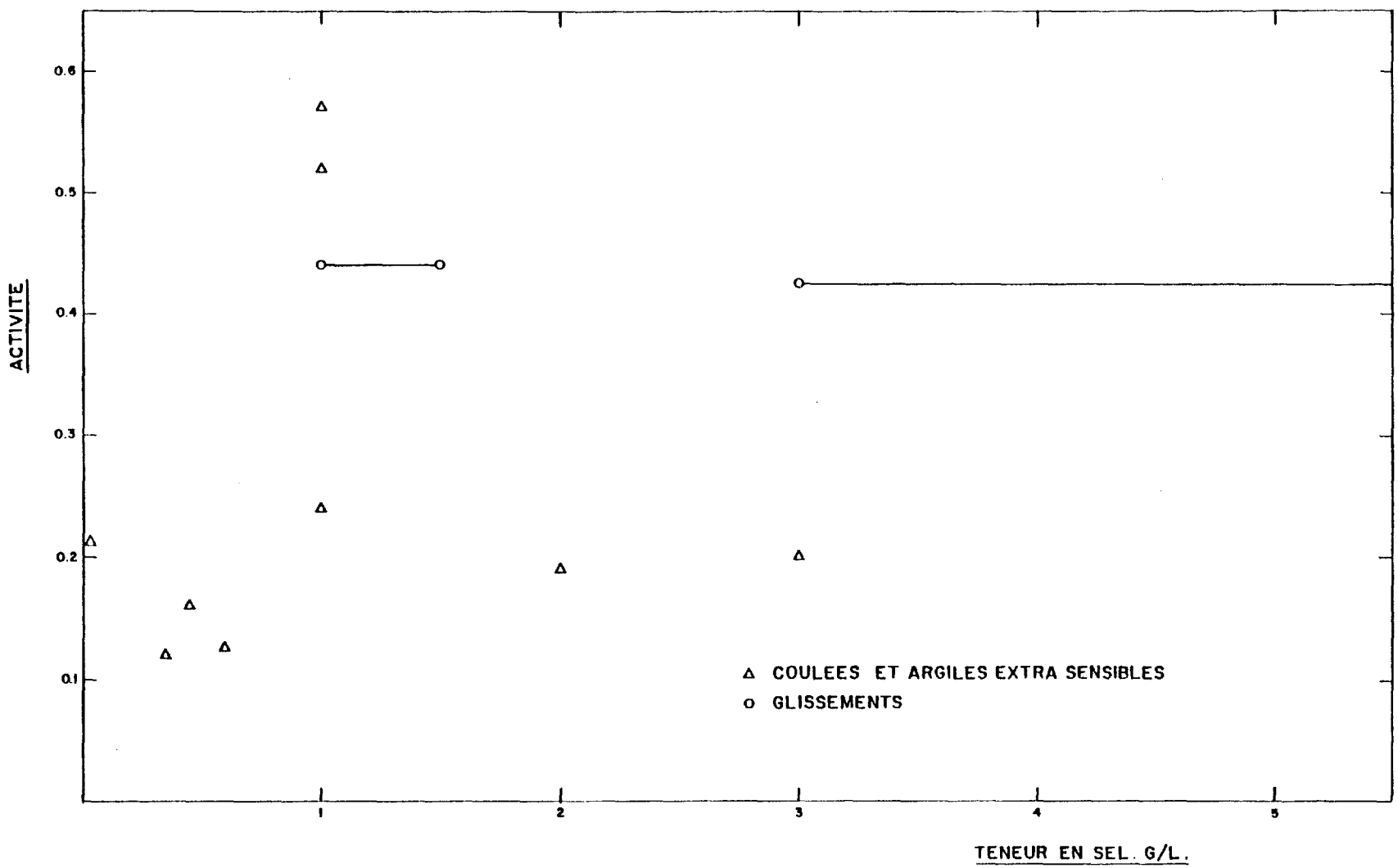

FIGURE 6. RELATION ENTRE L'ACTIVITE ET LA TENEUR EN SEL POUR LES ARGILES DE SUEDE ET DE NORVEGE.

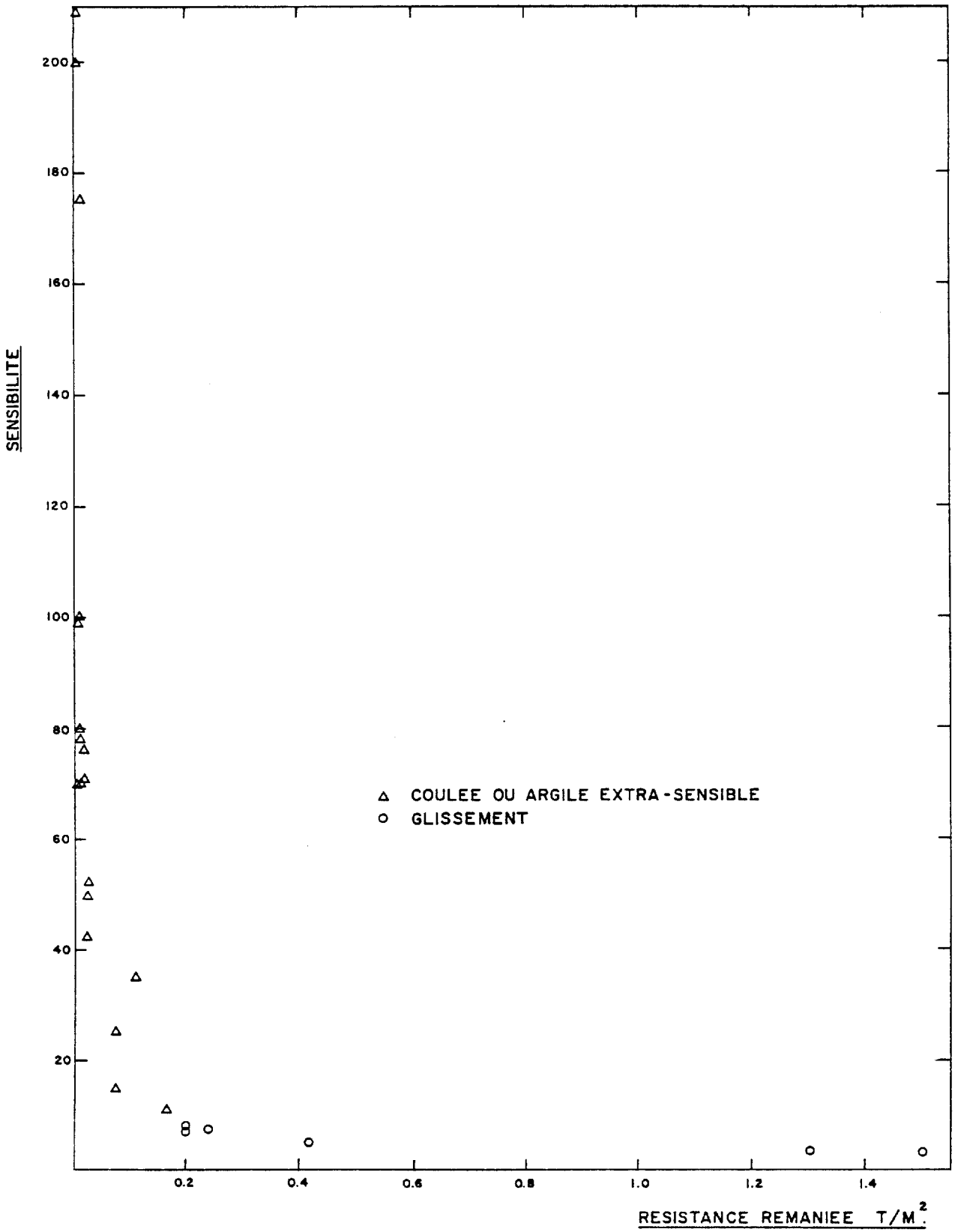

FIGURE 7. RELATION ENTRE LA SENSIBILITE ET LA RESISTANCE REMANIEE POUR DES ARGILES NORVEGIENNES ET SUEDOISES.

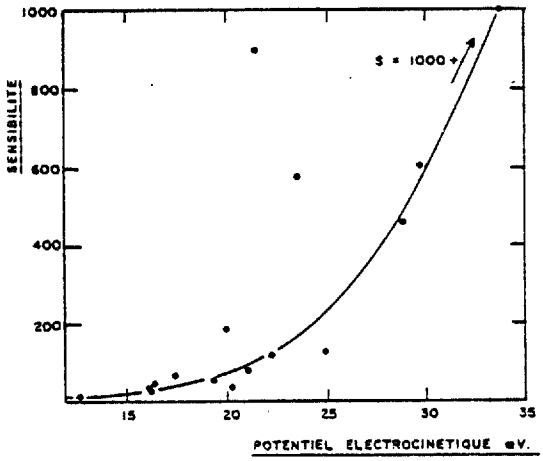

FIGURE 6. POTENTIEL ELECTROCINETIQUE D'ARGILE A LEDA NON-REMANIEE EN FONCTION DE SA SENSIBILITE. D'APRES PENNER 1965.

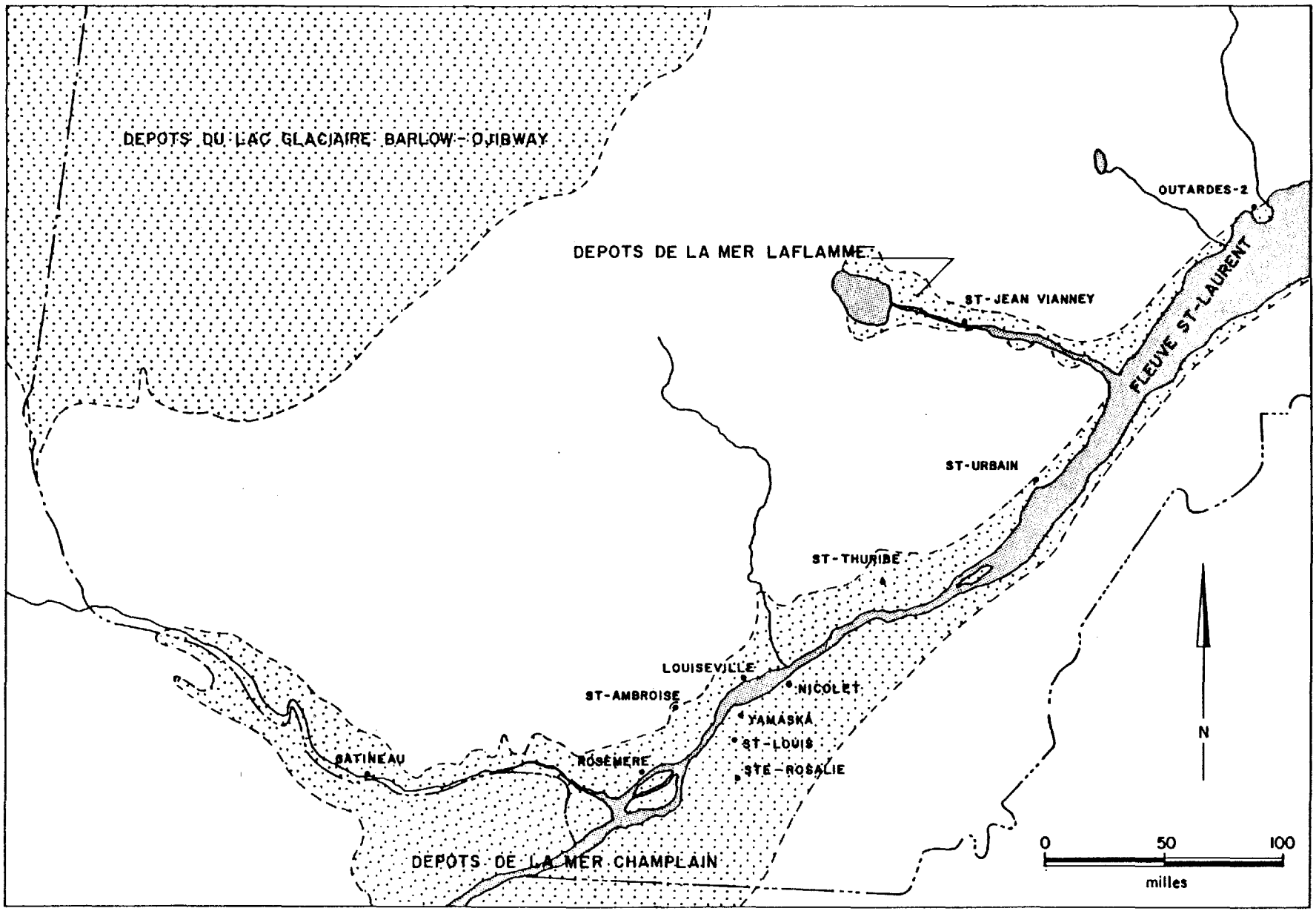

FIGURE 9. CARTE GEOGRAPHIQUE DES DEPOTS ARGILEUX DU QUEBEC

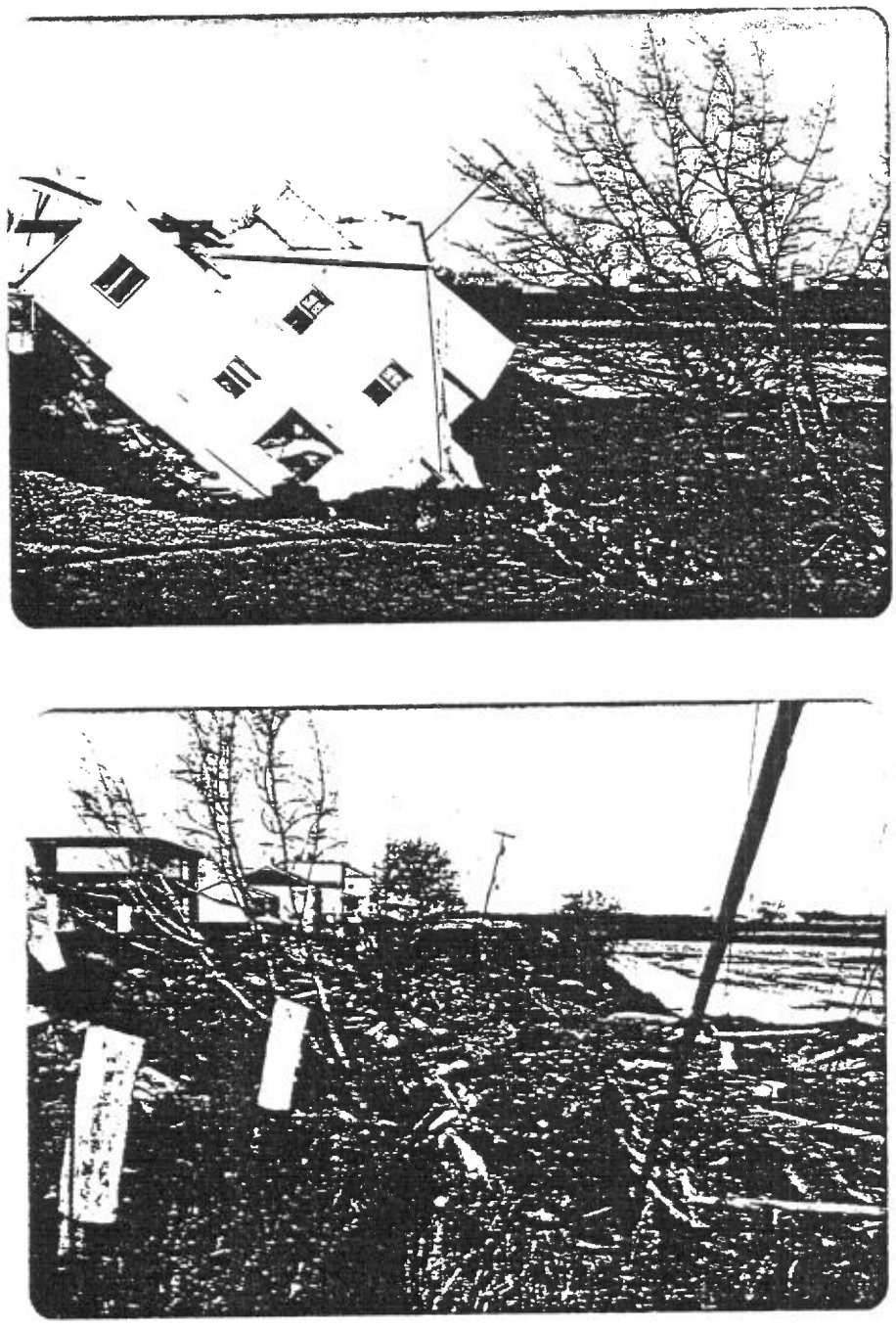

Figure 10: Photos illustrant le glissement du 2 novembre 1974 à Yamaska.

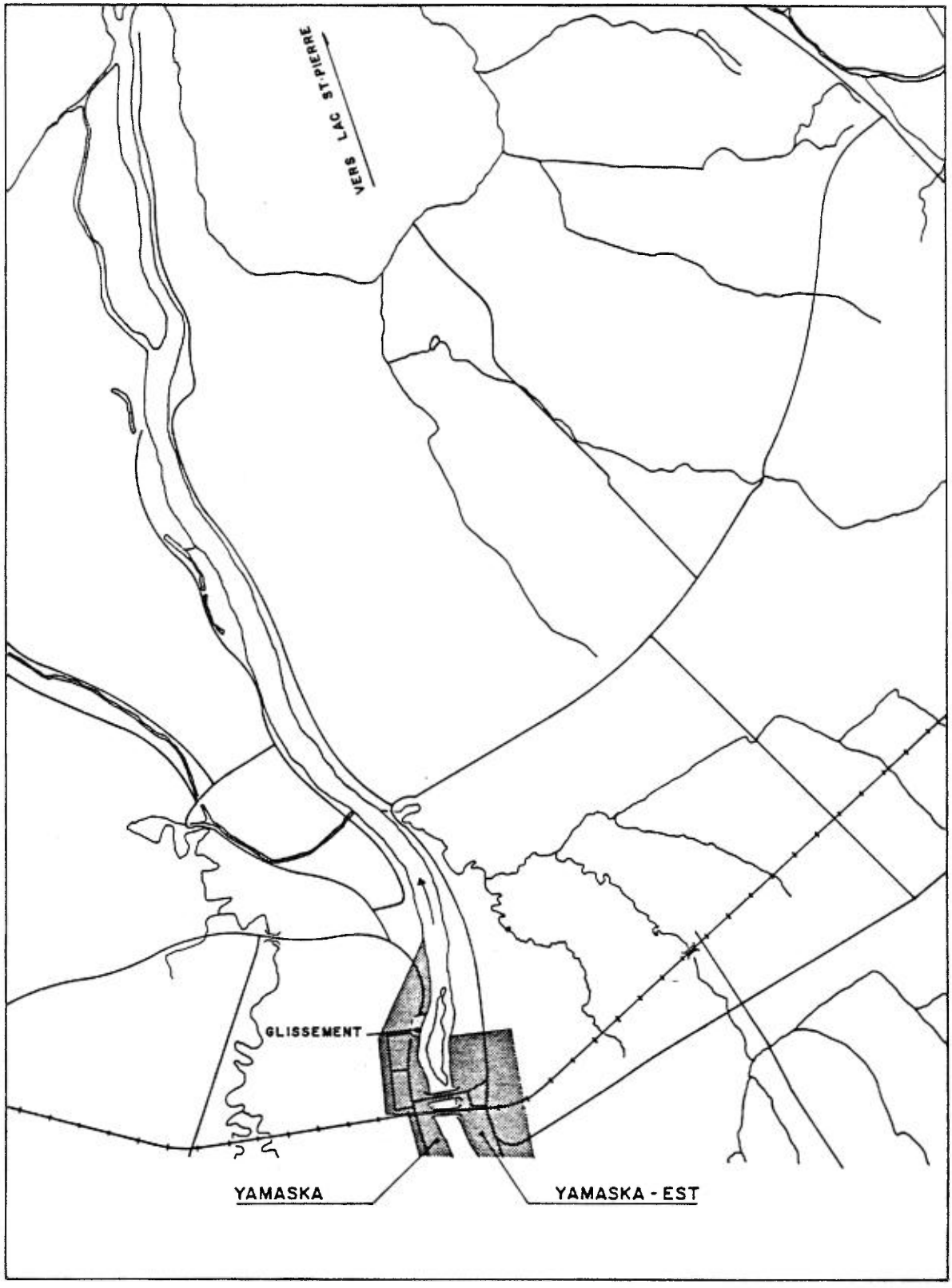

FIGURE 11. LOCALISATION DU GLISSEMENT DU 2 NOVEMBRE 1974 A YAMASKA.
ECHELLE : 1 : 50,000

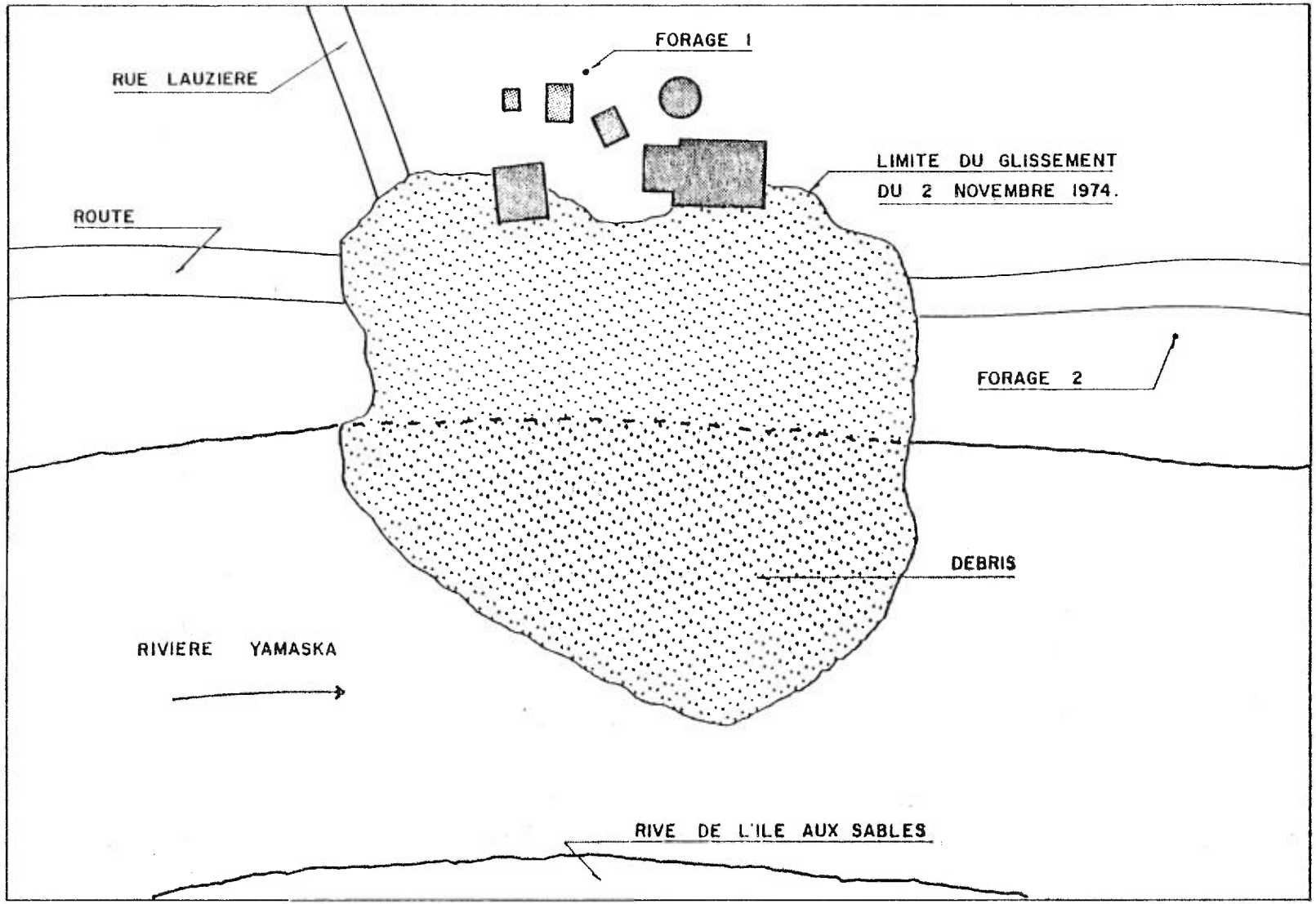

FIGURE 12. LOCALISATION DU GLISSEMENT ET DES FORAGES A YAMASKA.

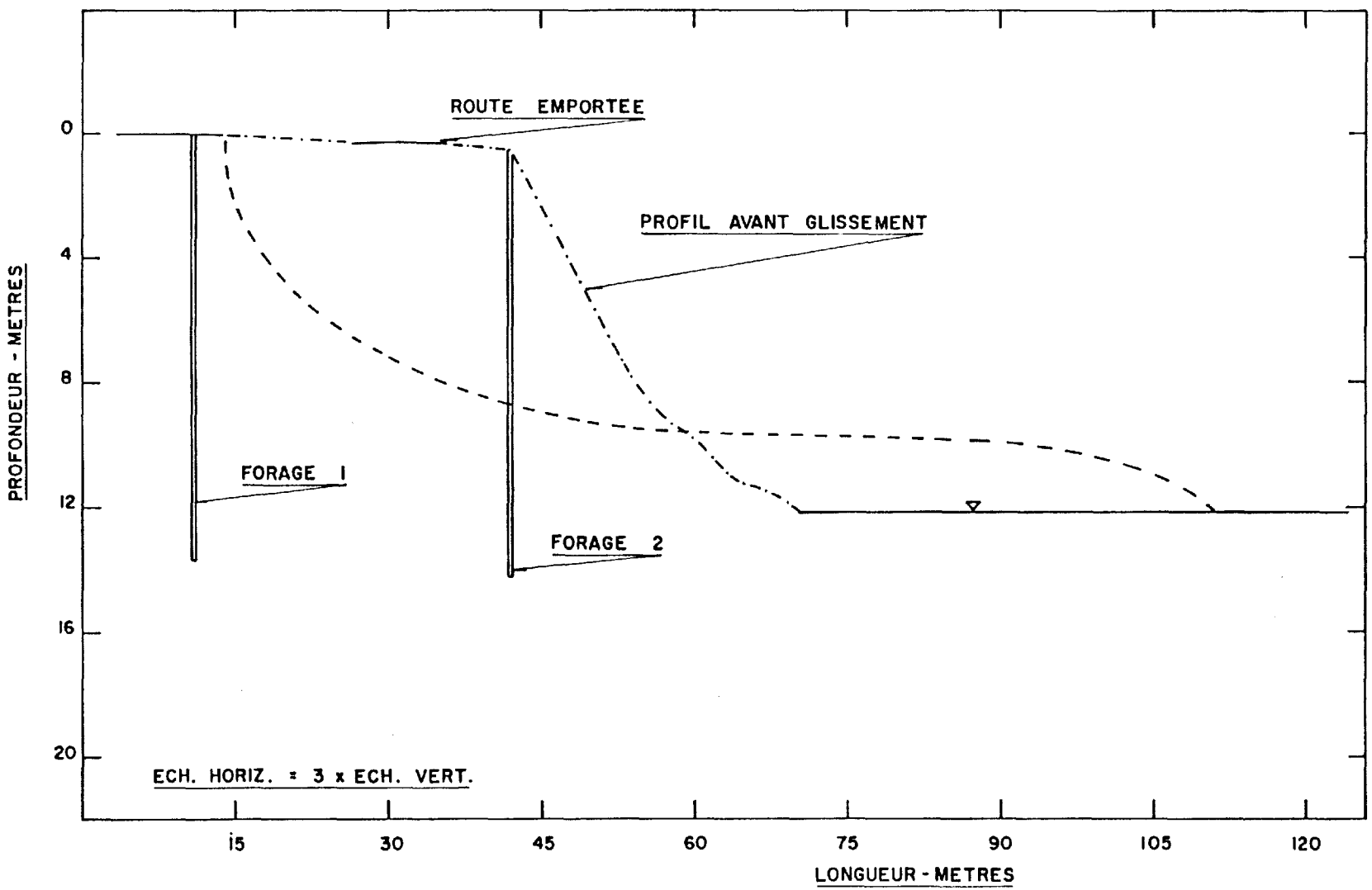

FIGURE 13. PROFIL DE LA PENTE A YAMASKA

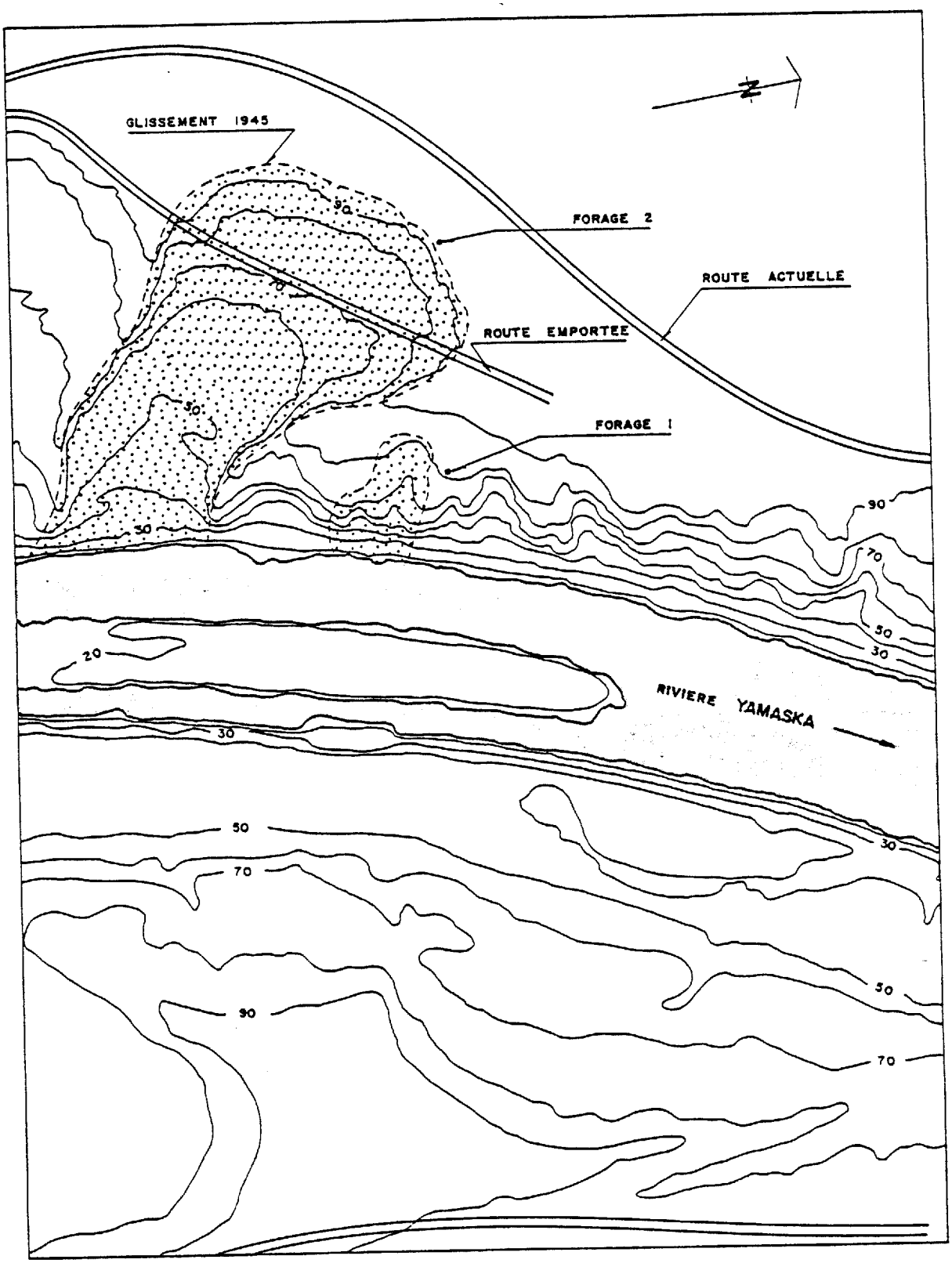

FIGURE 14. LOCALISATION DES COULEES DE ST-LOUIS ECHELLE: 1"= 300'

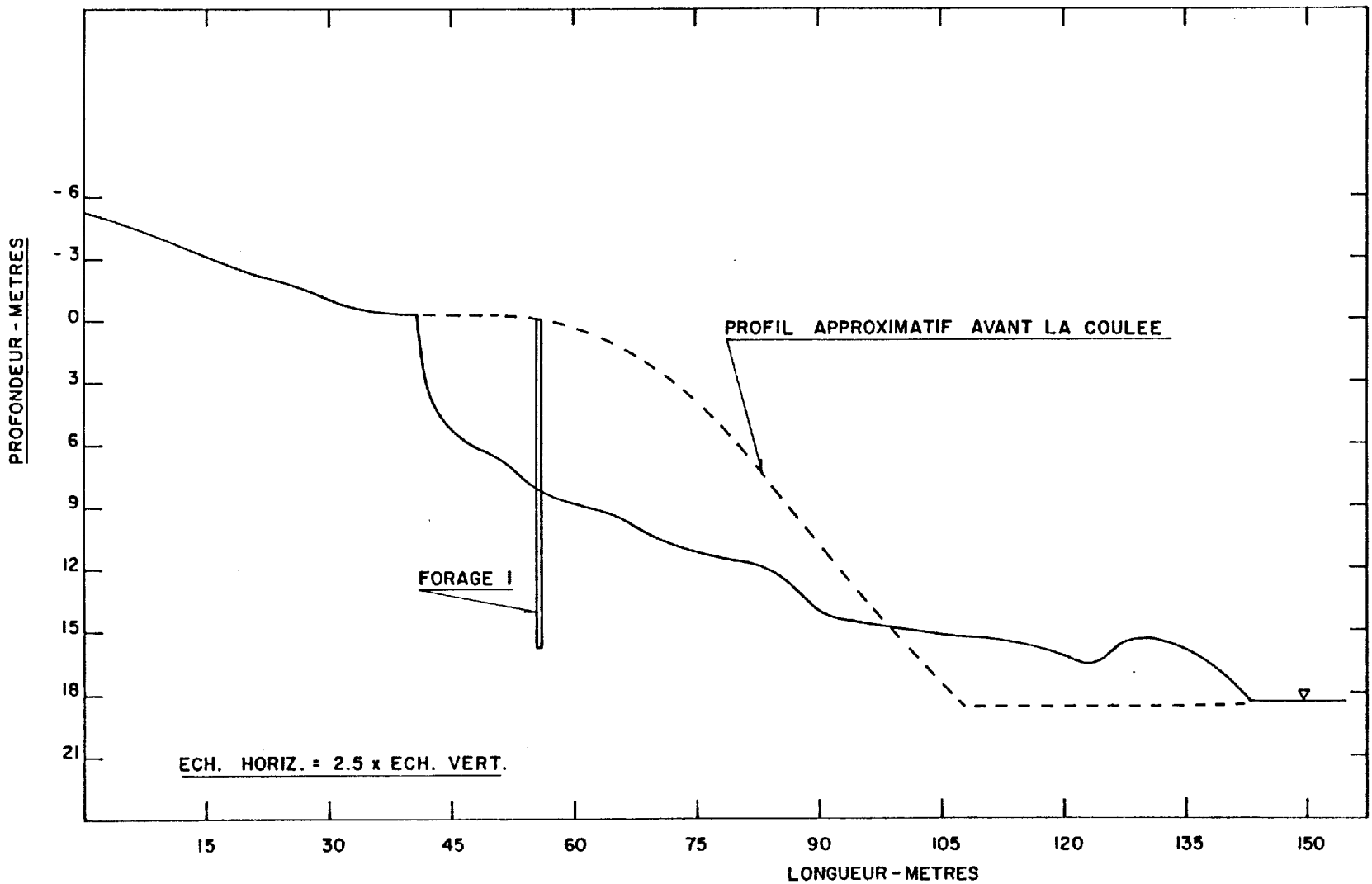

FIGURE 15. PROFIL DE LA PENTE DE LA COULEE DE 1968 A ST-LOUIS DE BONSECOURS.
(D'APRES LEFEBVRE 1970)

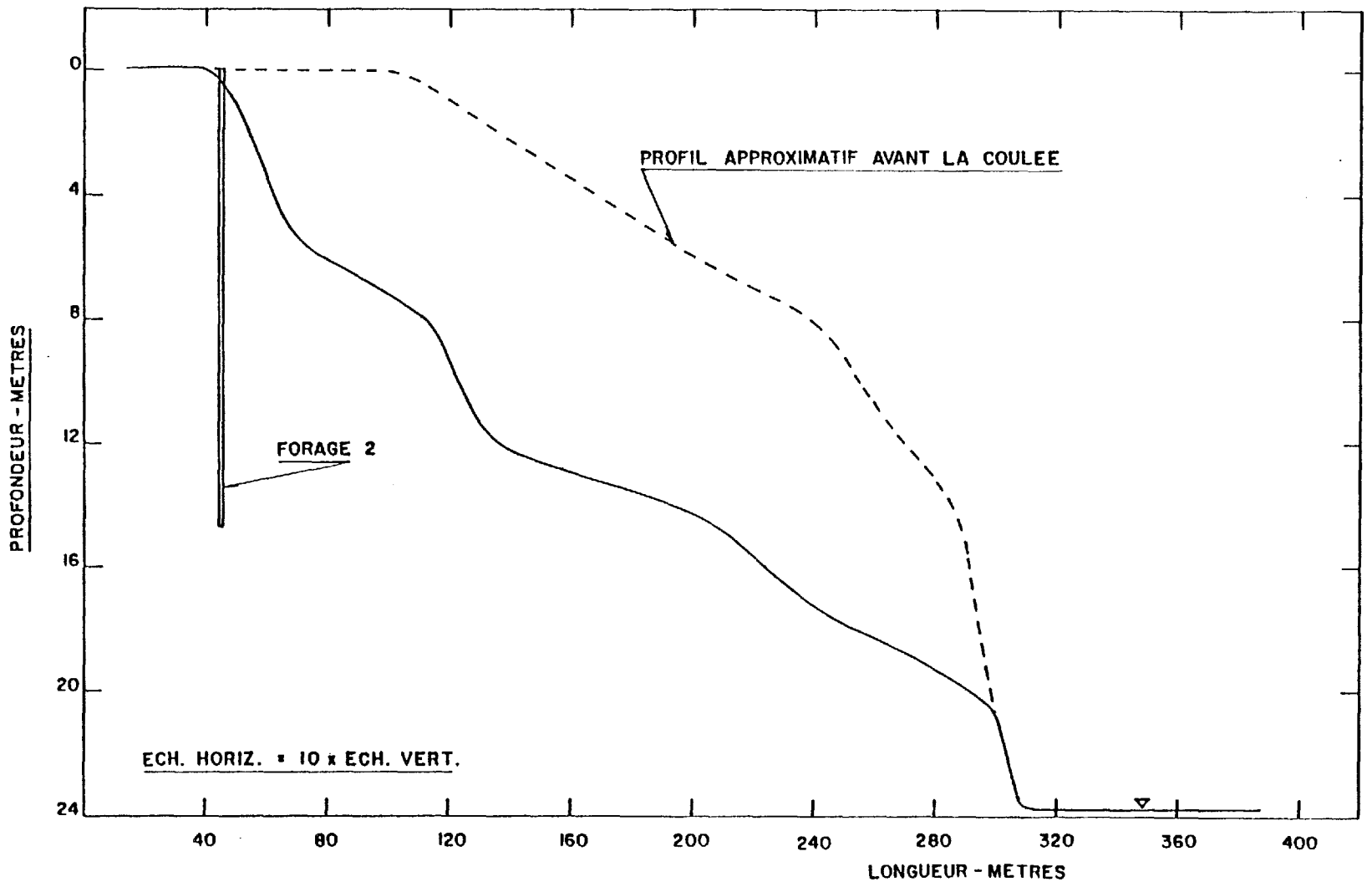

FIGURE 16. PROFIL DE LA COULEE DE 1945 A ST-LOUIS DE BONSECOURS

(D'APRES LEFEBVRE 1970)

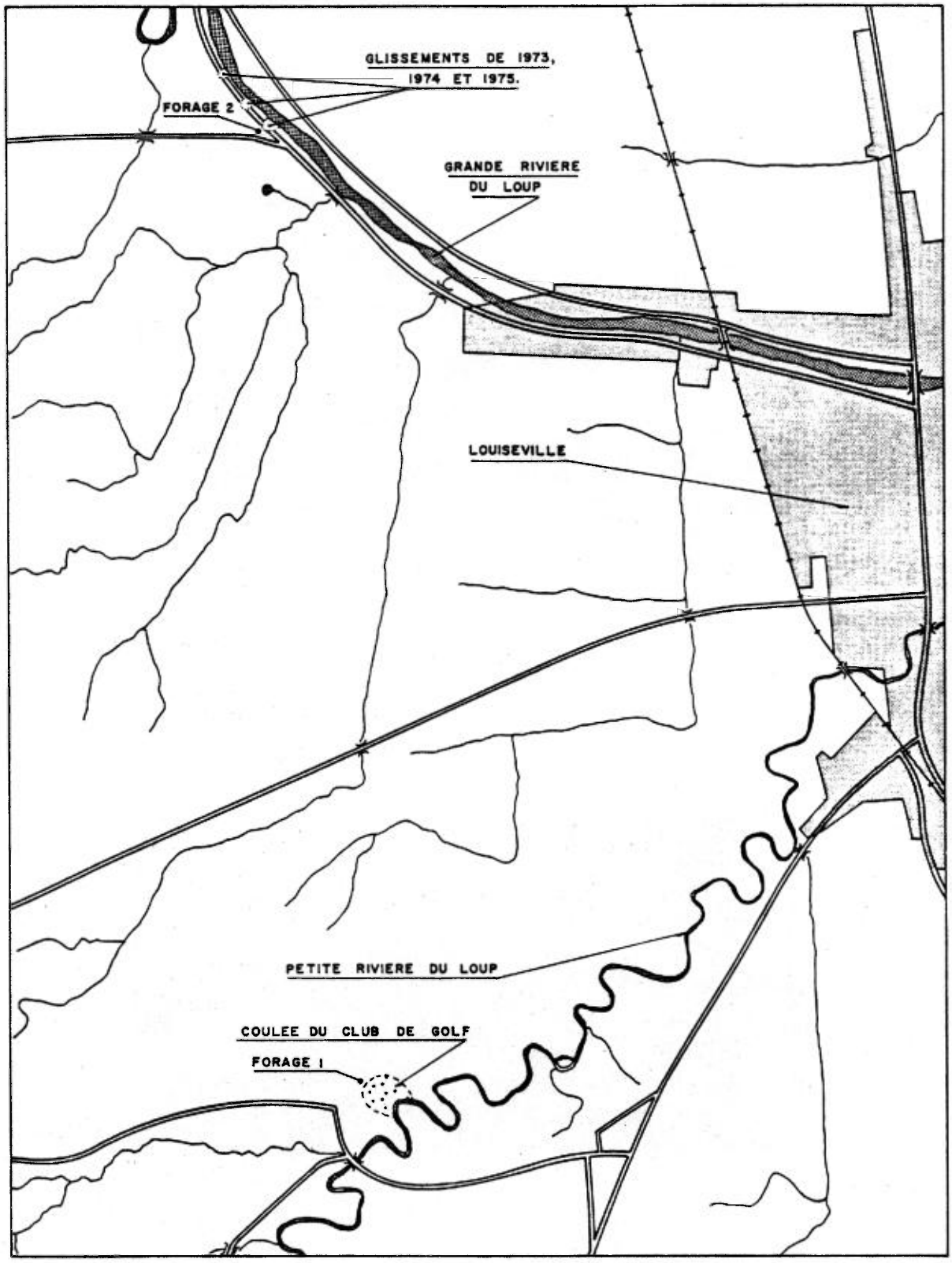

FIGURE 17. LOCALISATION DES SITES ET DES FORAGES A LOUISEVILLE.
ECHELLE : 1 : 20,000

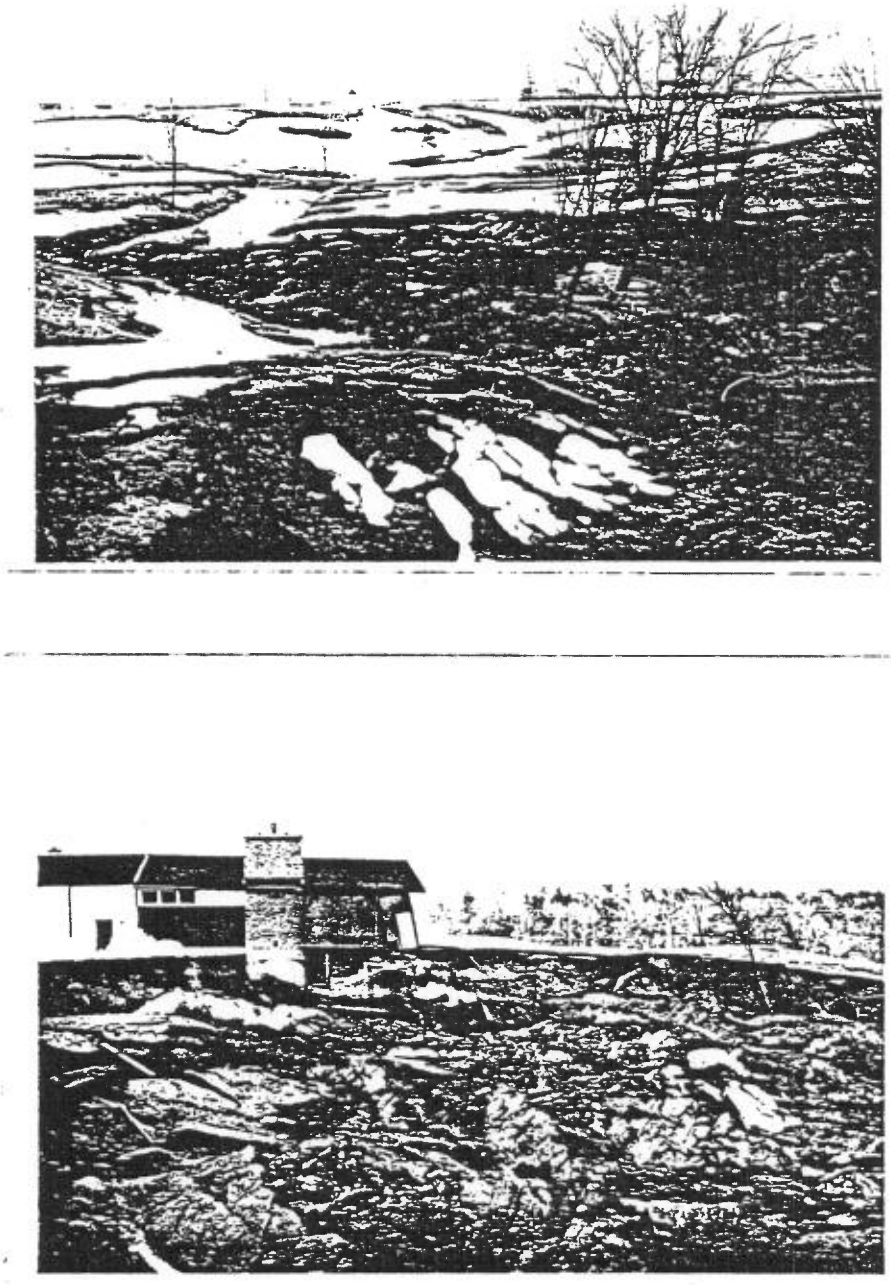

Figure 18: Photos illustrant la coulée d'argile du 15 avril 1969 au club de golf de Louiseville.

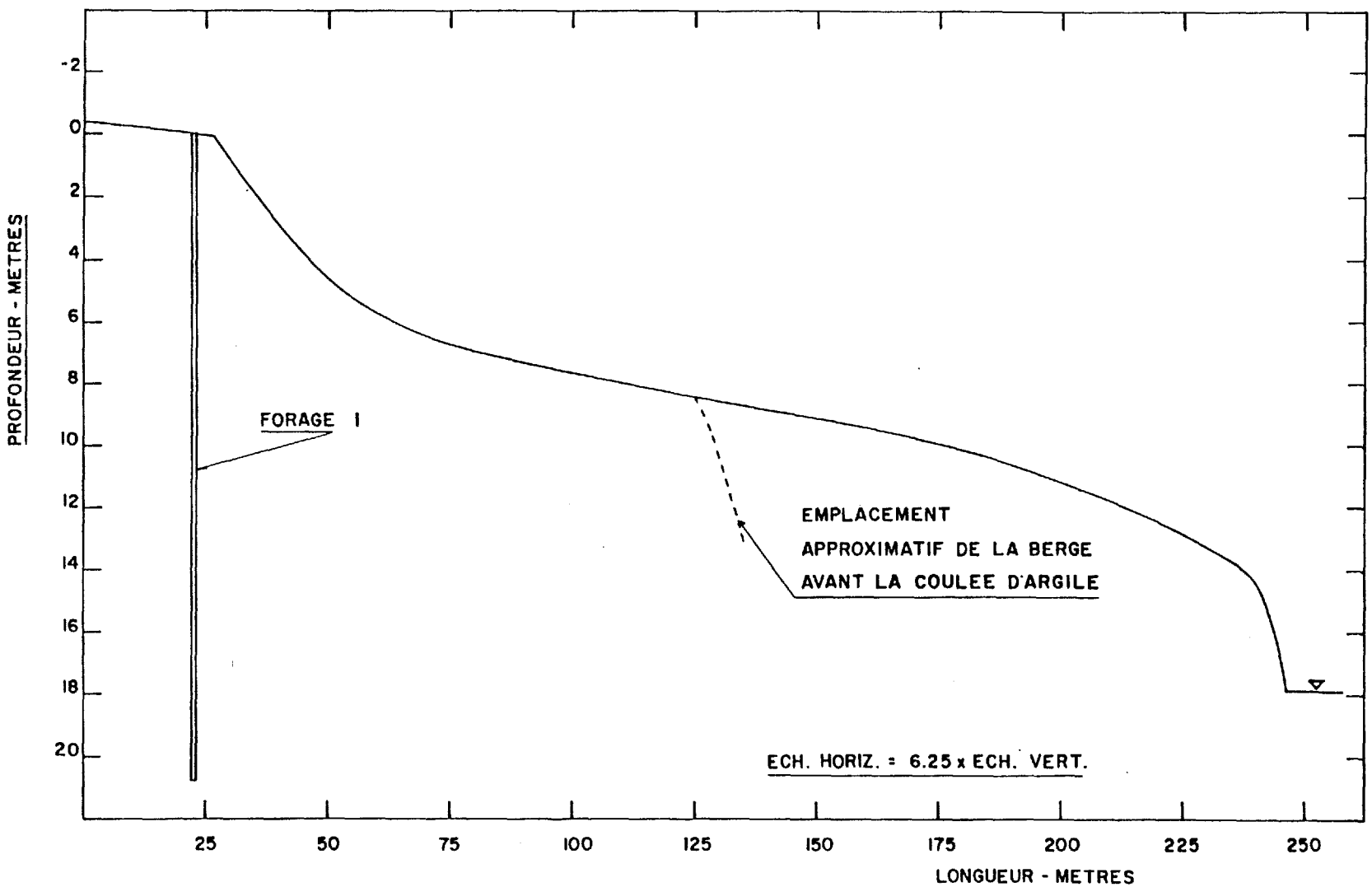

FIGURE 19. PROFIL DU TERRAIN ACTUEL AU CLUB DE GOLF DE LOUISEVILLE.

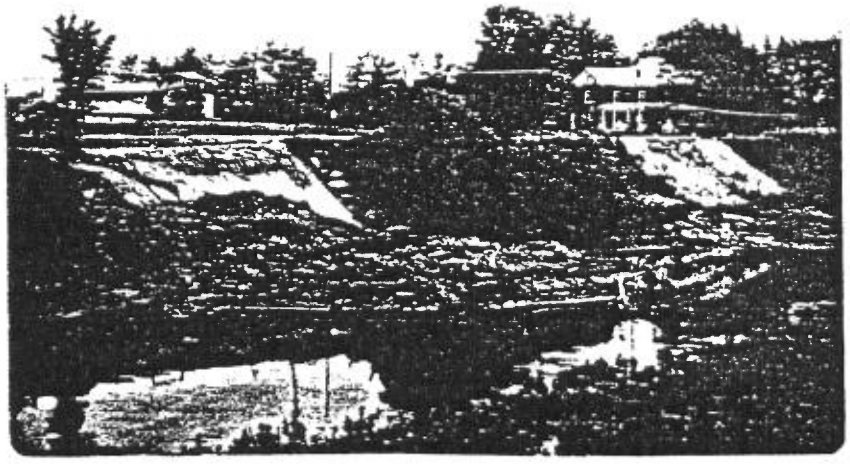

Figure 20: Photo montrant les endroits et les débris de deux glissements de berge sur la Grande Rivière du Loup à Louiseville.

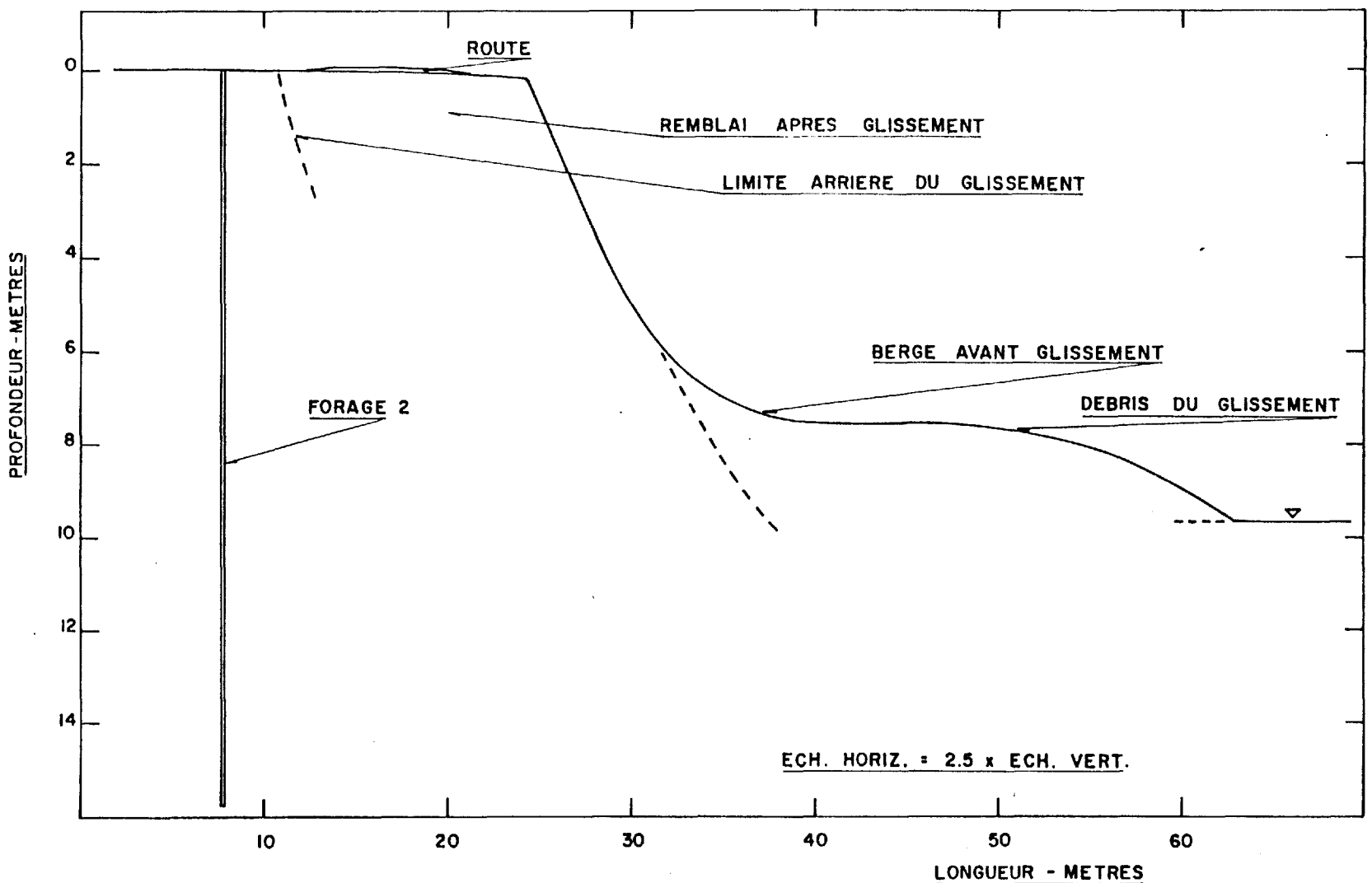

FIGURE 21. PROFIL DU GLISSEMENT DE LA GRANDE RIVIERE DU LOUP A LOUISEVILLE.

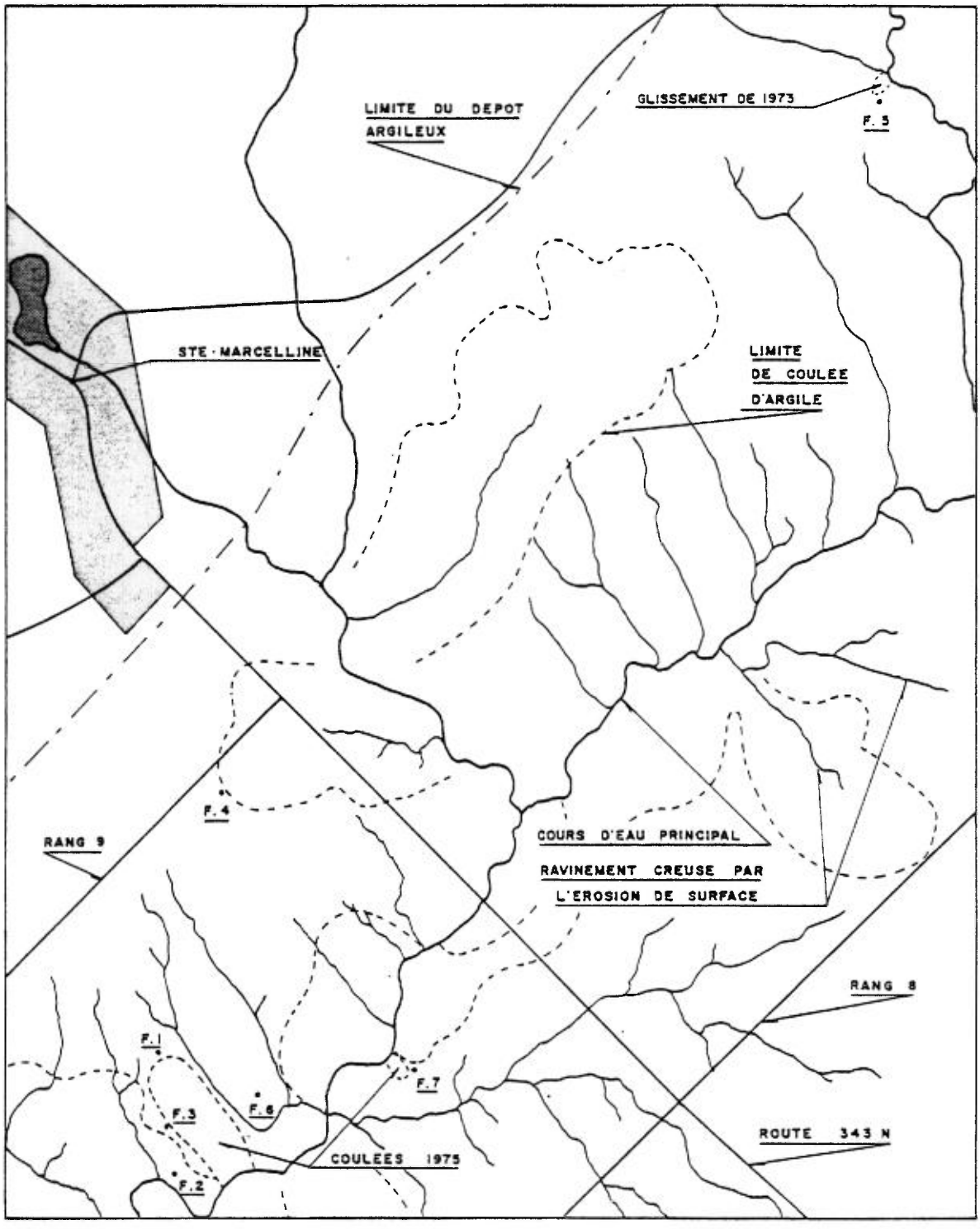

FIGURE 22. LOCALISATION DES COULEES D'ARGILE ET DES FORAGES A ST-AMBROISE. ECHELLE : 1 : 15,840

Figure 23: Photo illustrant la coulée d'argile du 19 avril 1975 à St-Ambroise.

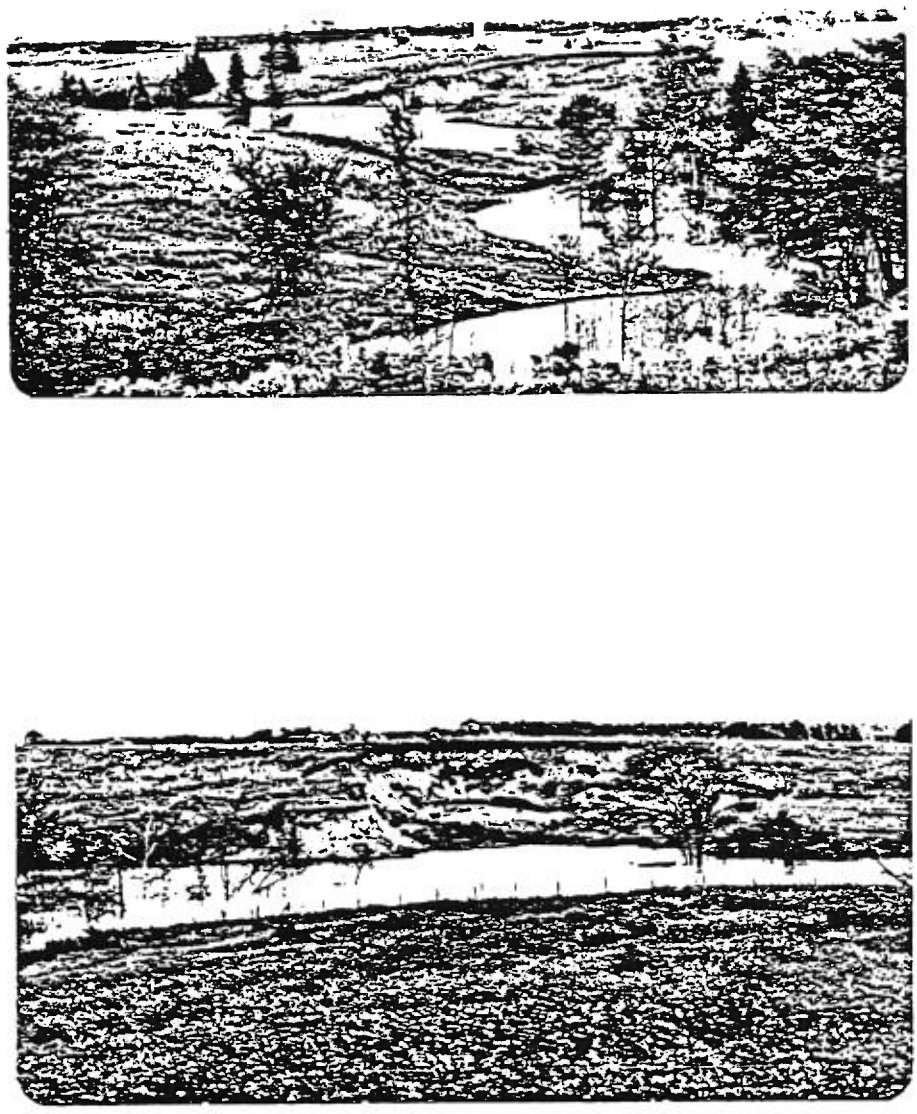

Figure 24: Photos illustrant la petite coulée de 1975 à St-Ambroise.

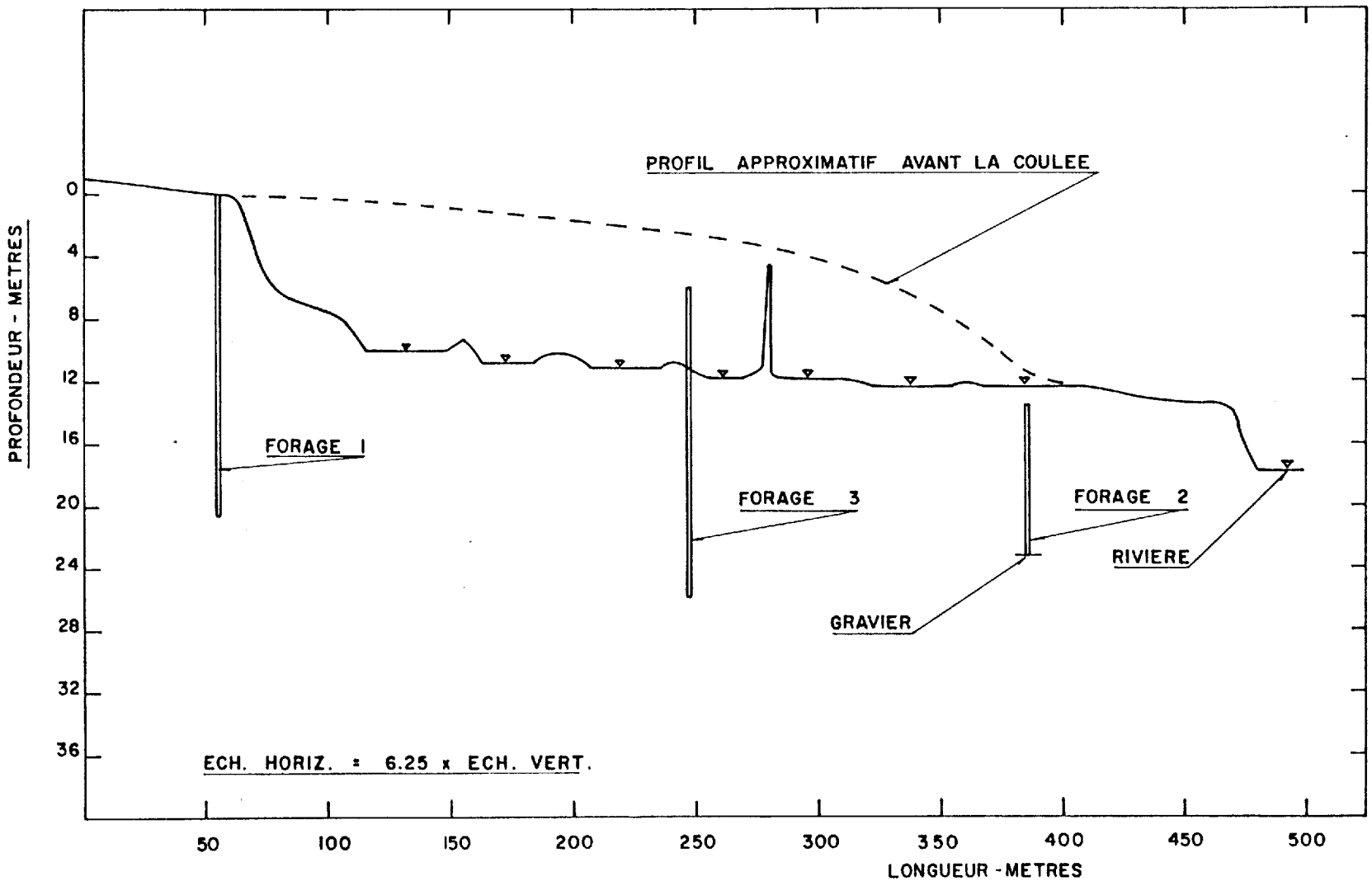

FIGURE 25. PROFIL DE LA GRANDE COULEE DE 1975 A ST-AMBROISE.

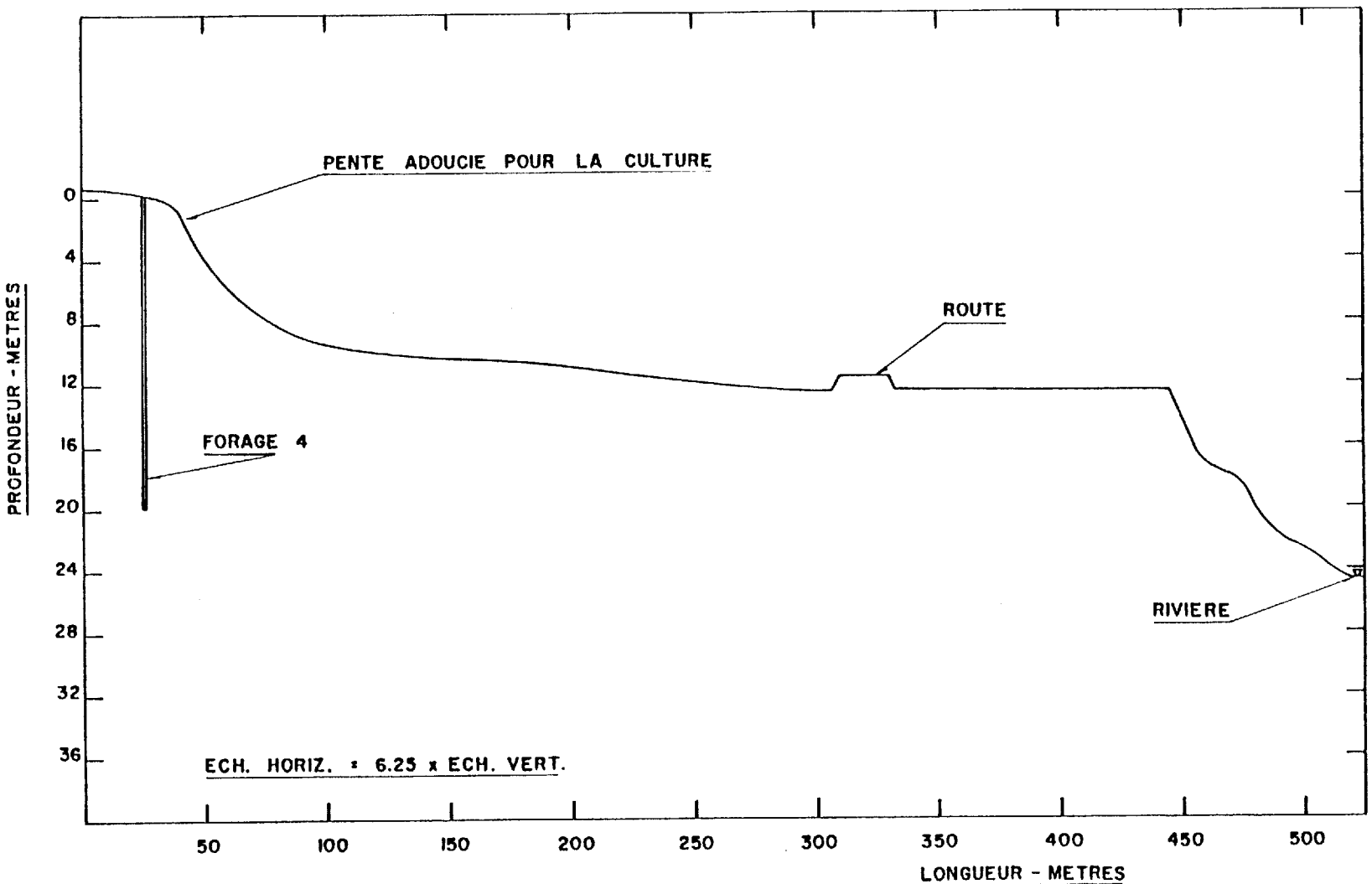

FIGURE 26. PROFIL D'UNE ANCIENNE COULEE A ST-AMBROISE

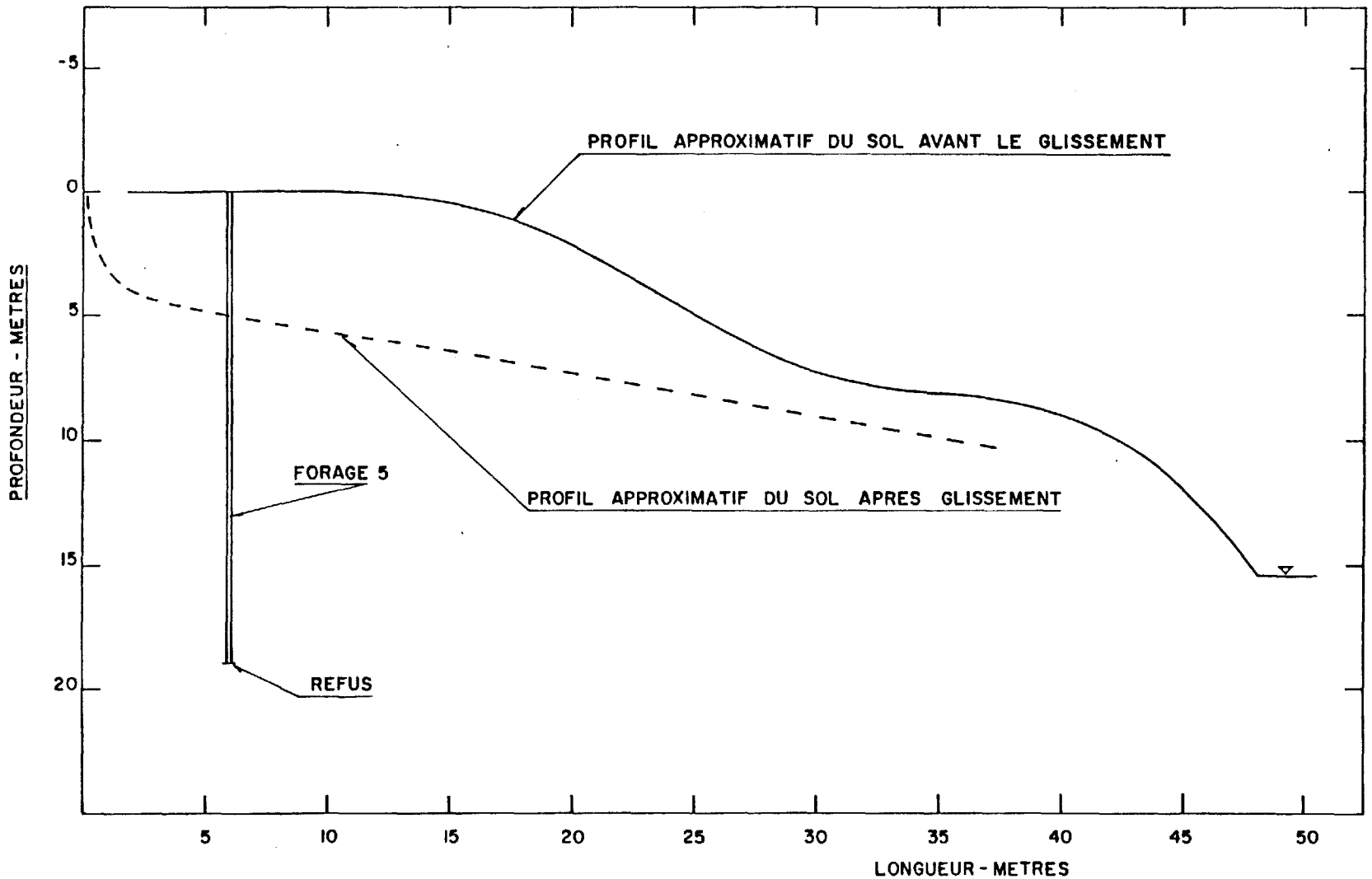

FIGURE 27. PENTE NATURELLE A COTE DU GLISSEMENT DE 1973 A ST-AMBROISE

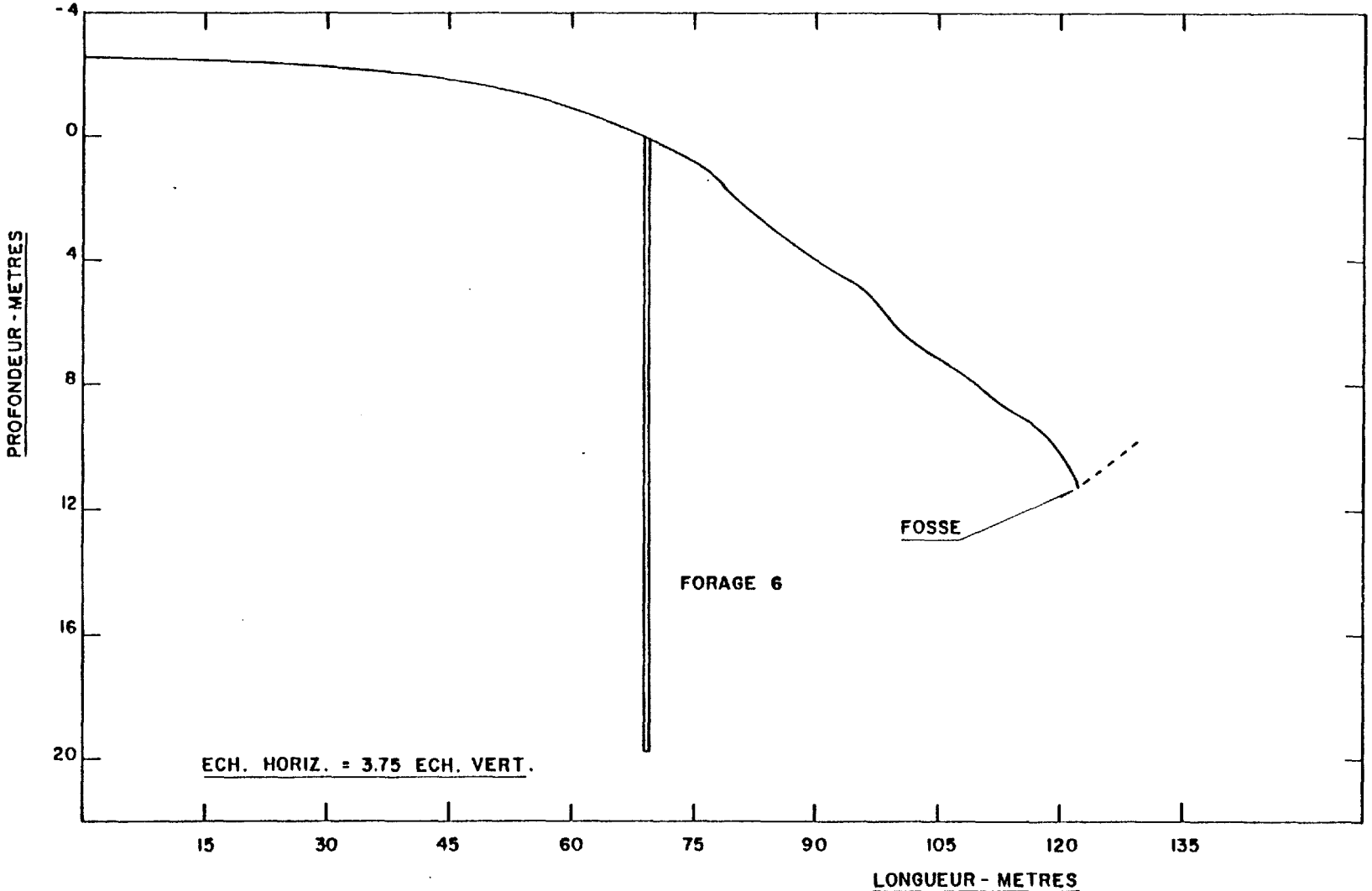

FIGURE 28. FORAGE DANS UNE PENTE NATURELLE A COTE DE LA GRANDE COULEE DE 1975 A ST-AMBROISE.

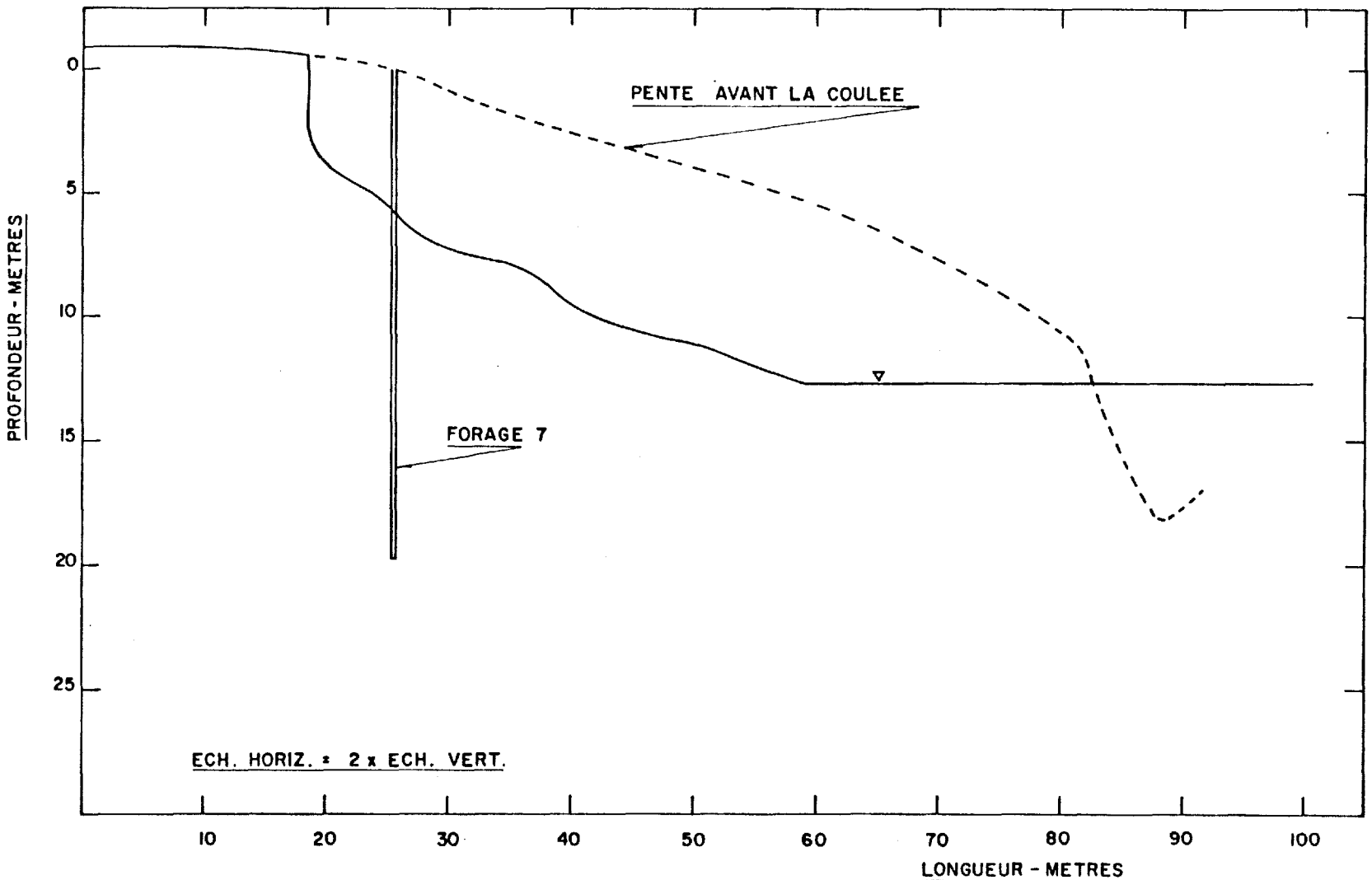

FIGURE 29. PROFIL DE LA PETITE COULEE DE 1975 A ST-AMBROISE

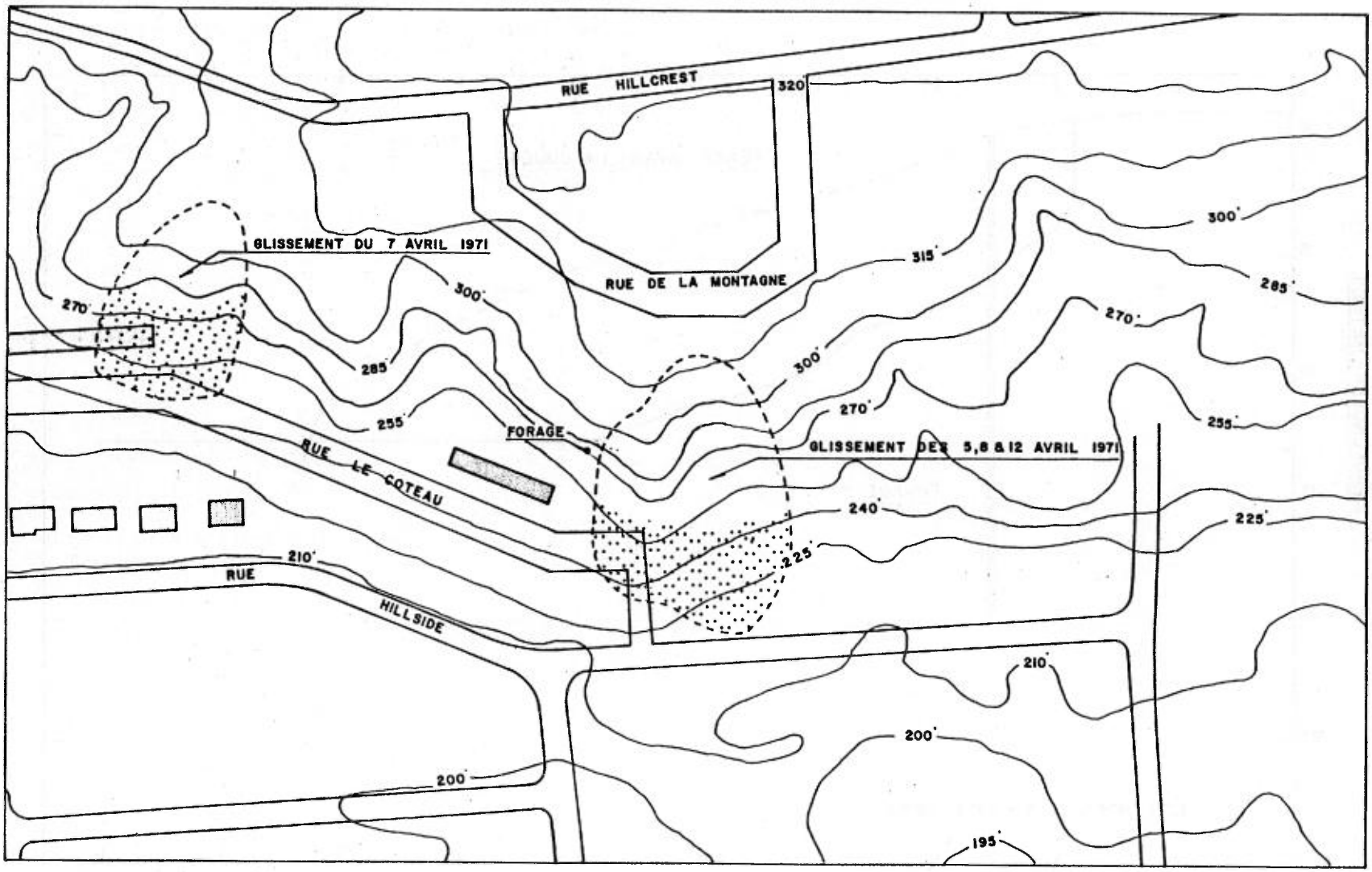

FIGURE 30. LOCALISATION DES GLISSEMENTS A LE COTEAU. ECHELLE APPROX.: 1"=100'

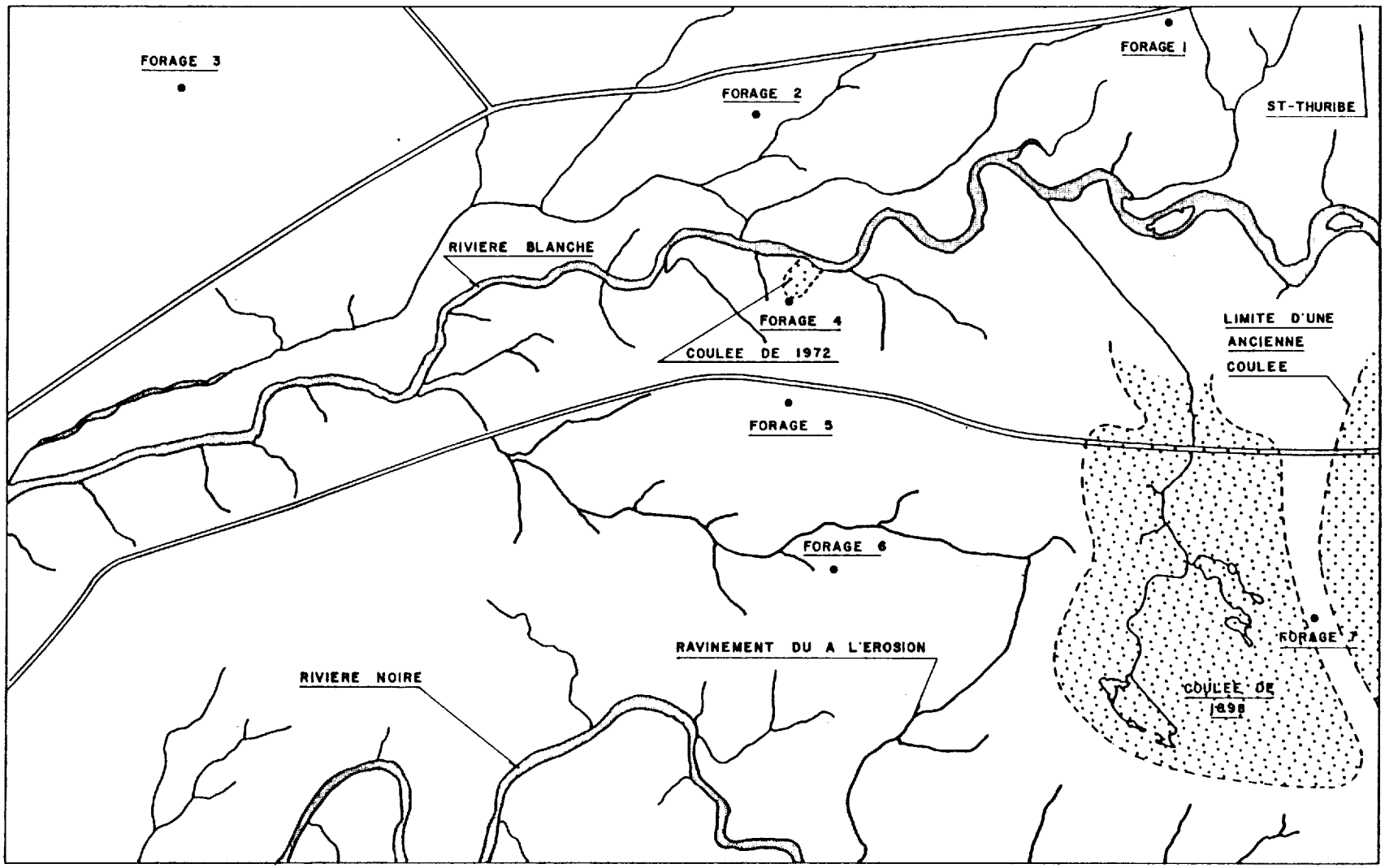

FIGURE 31. LOCALISATION DES COULEES ET DES FORAGES A ST-THURIBE. ECHELLE APPROX.: 1" = 820'

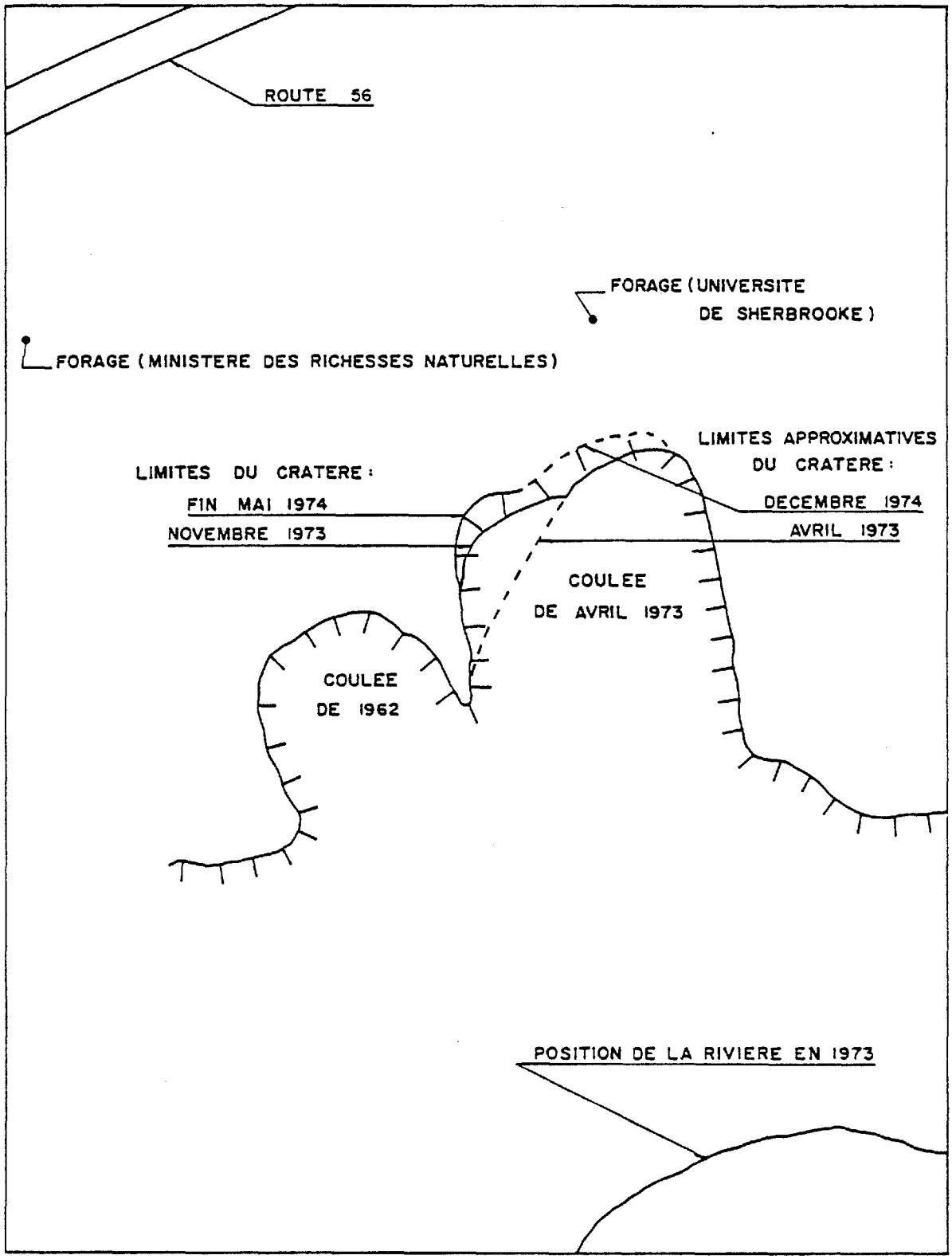

FIGURE 32. LOCALISATION DES COULEES A ST-URBAIN. ECHELLE : 1" = 100'.
(D'APRES LAFLEUR ET LEFEBVRE 1975)

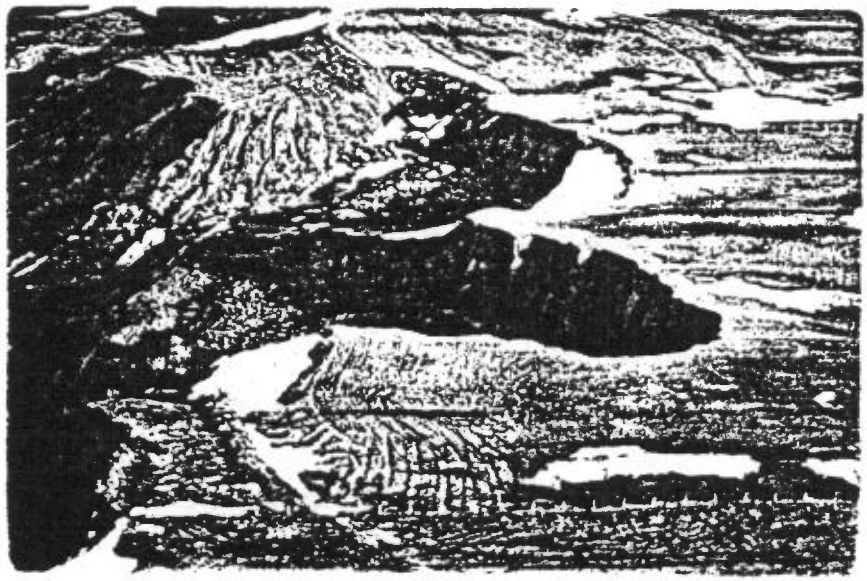

Figure 33: Photo illustrant les coulées d'argile à St-Urbain.

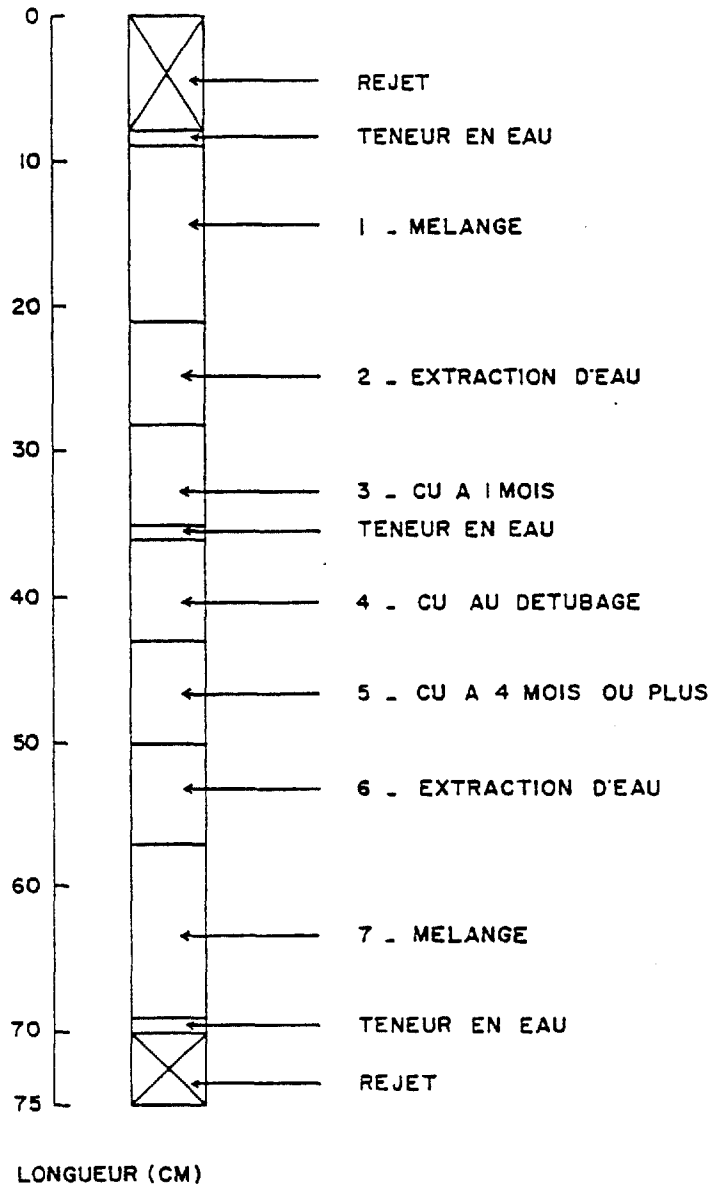

FIGURE 34. DESCRIPTION DU TAILLAGE DE CHAQUE TUBE.

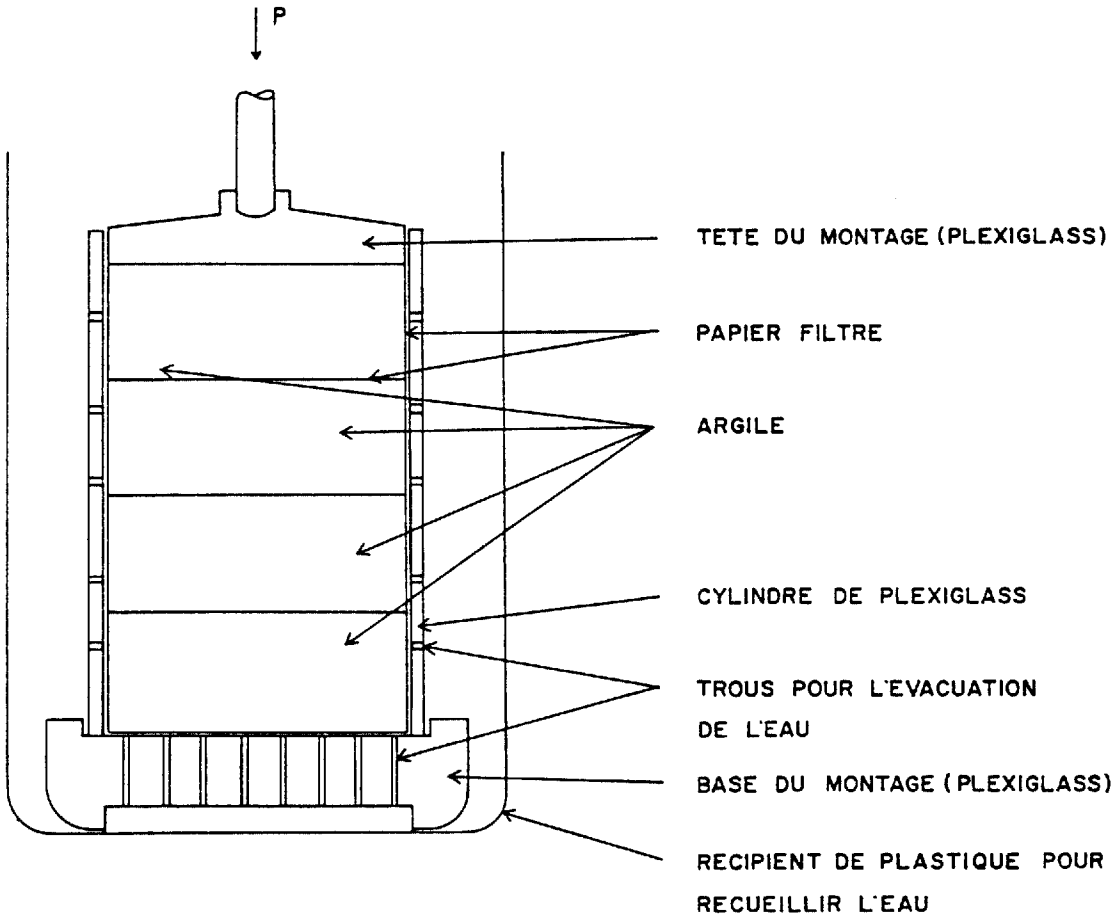

FIGURE 35. MONTAGE POUR L'EXTRACTION D'EAU INTERSTITIELLE.

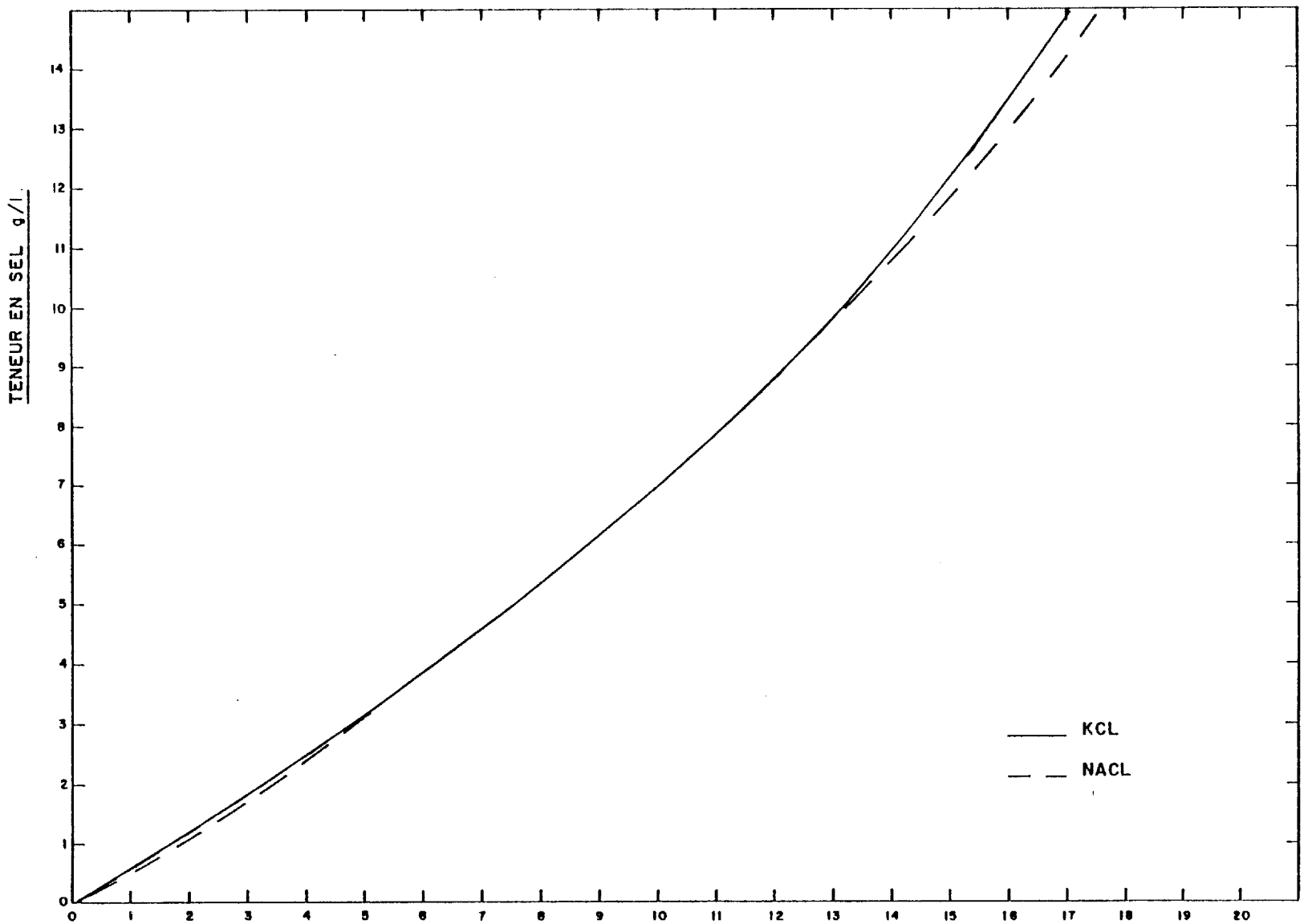

FIGURE 36. TENEUR EN SEL VS CONDUCTIVITE A 21°C.

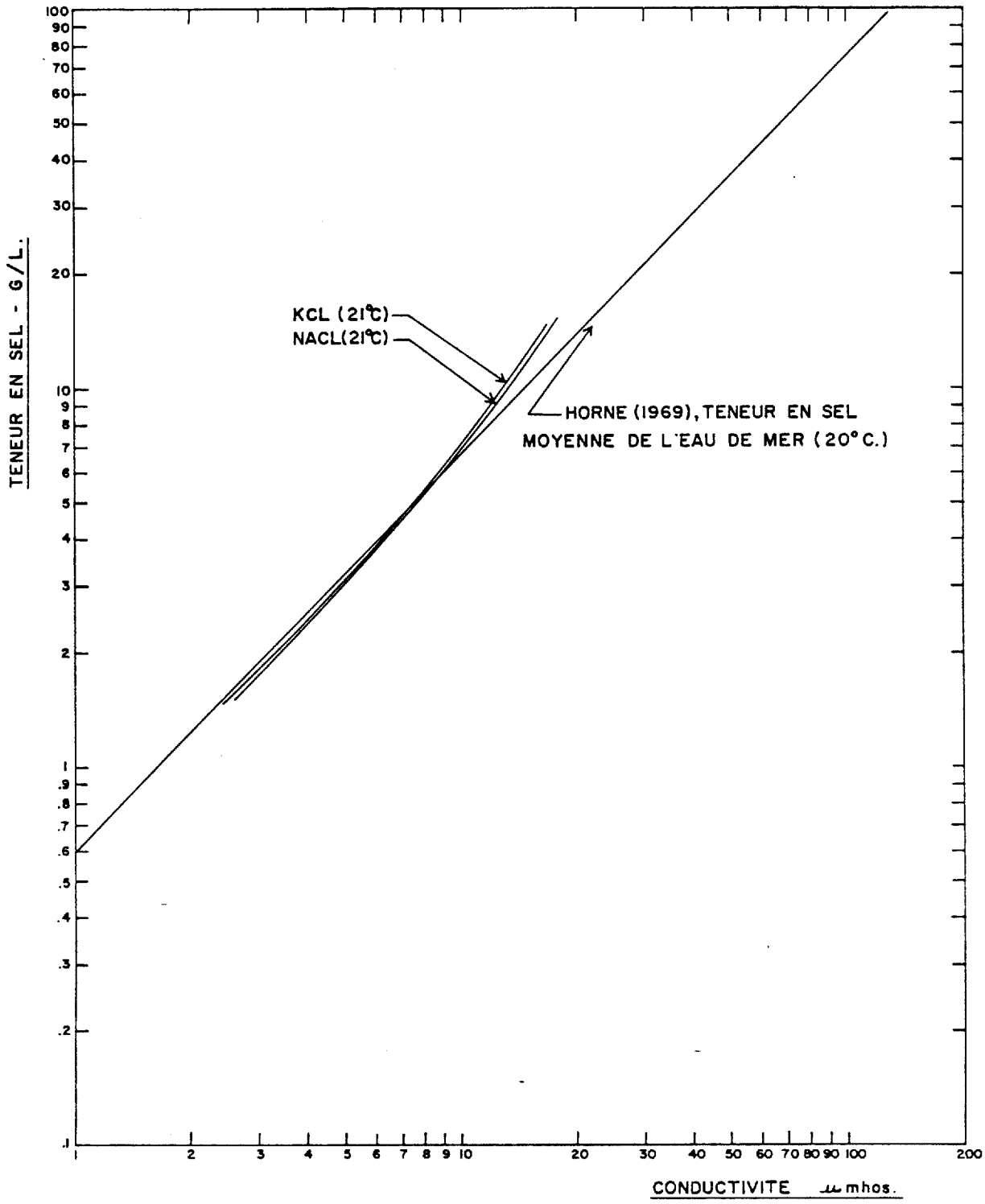

FIGURE 37. RELATION ENTRE LA TENEUR EN SEL ET LA CONDUCTIVITE.

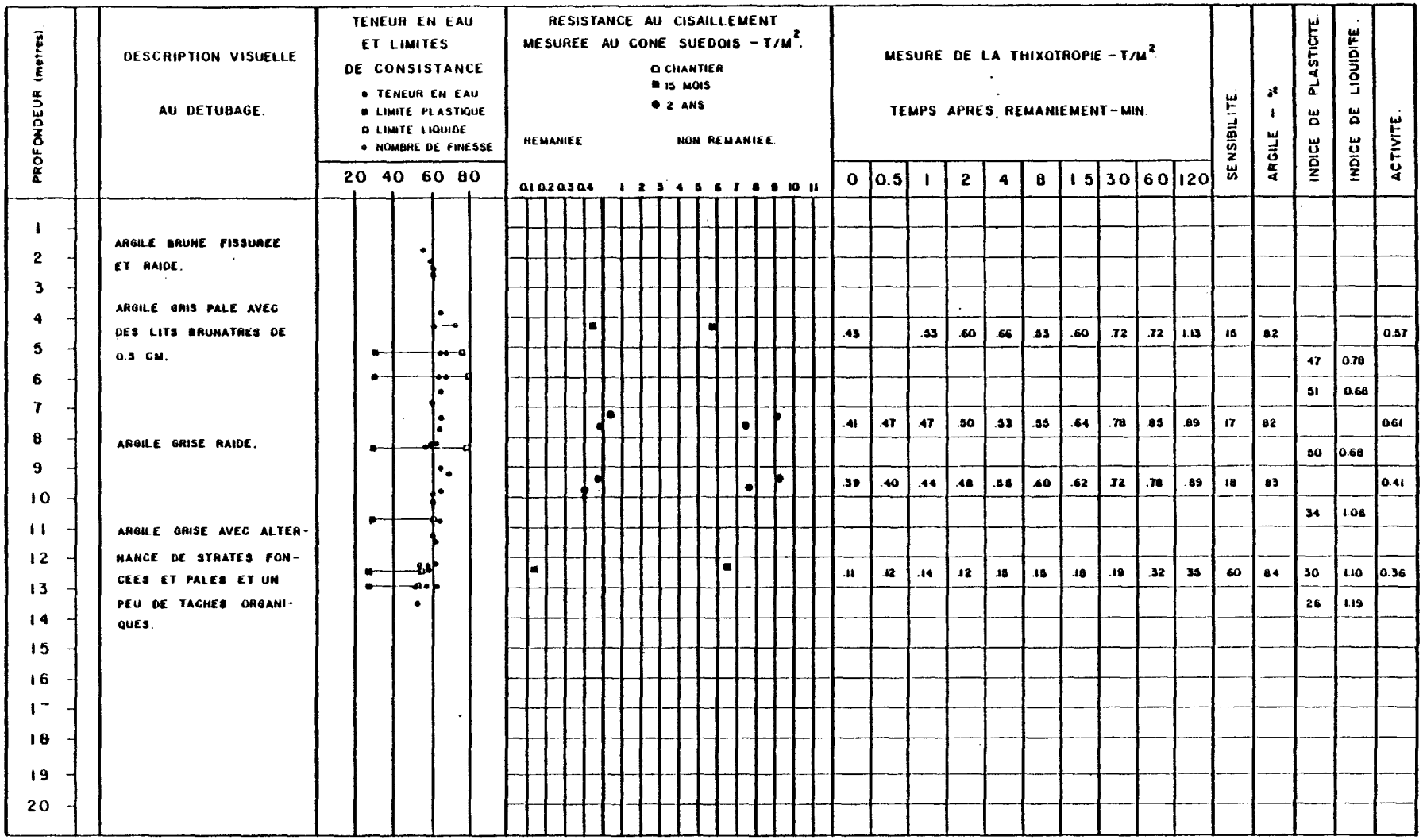

FIGURE 38. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, LE COTEAU, FORAGE 2.

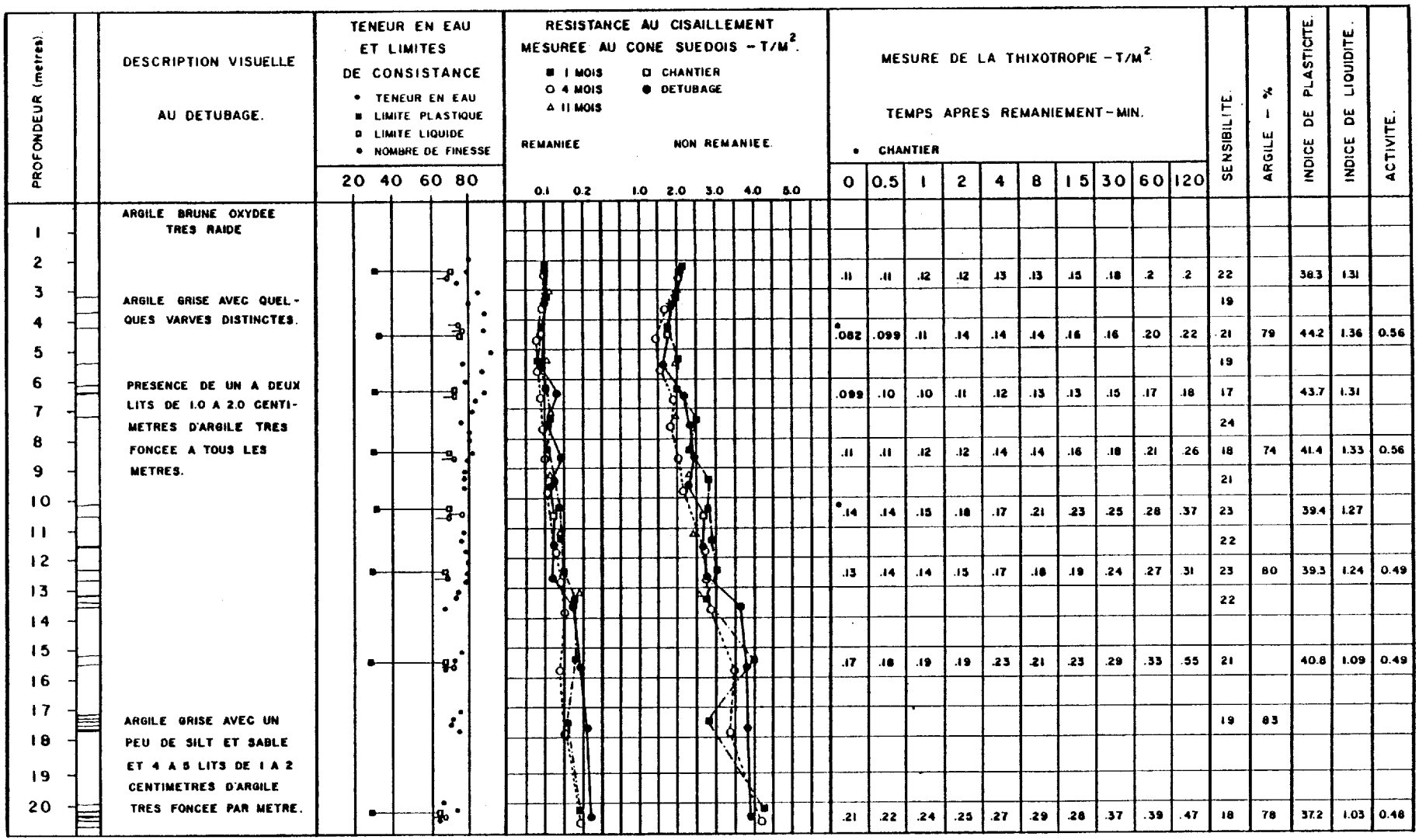

FIGURE 39. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, LOUISEVILLE, FORAGE 1.

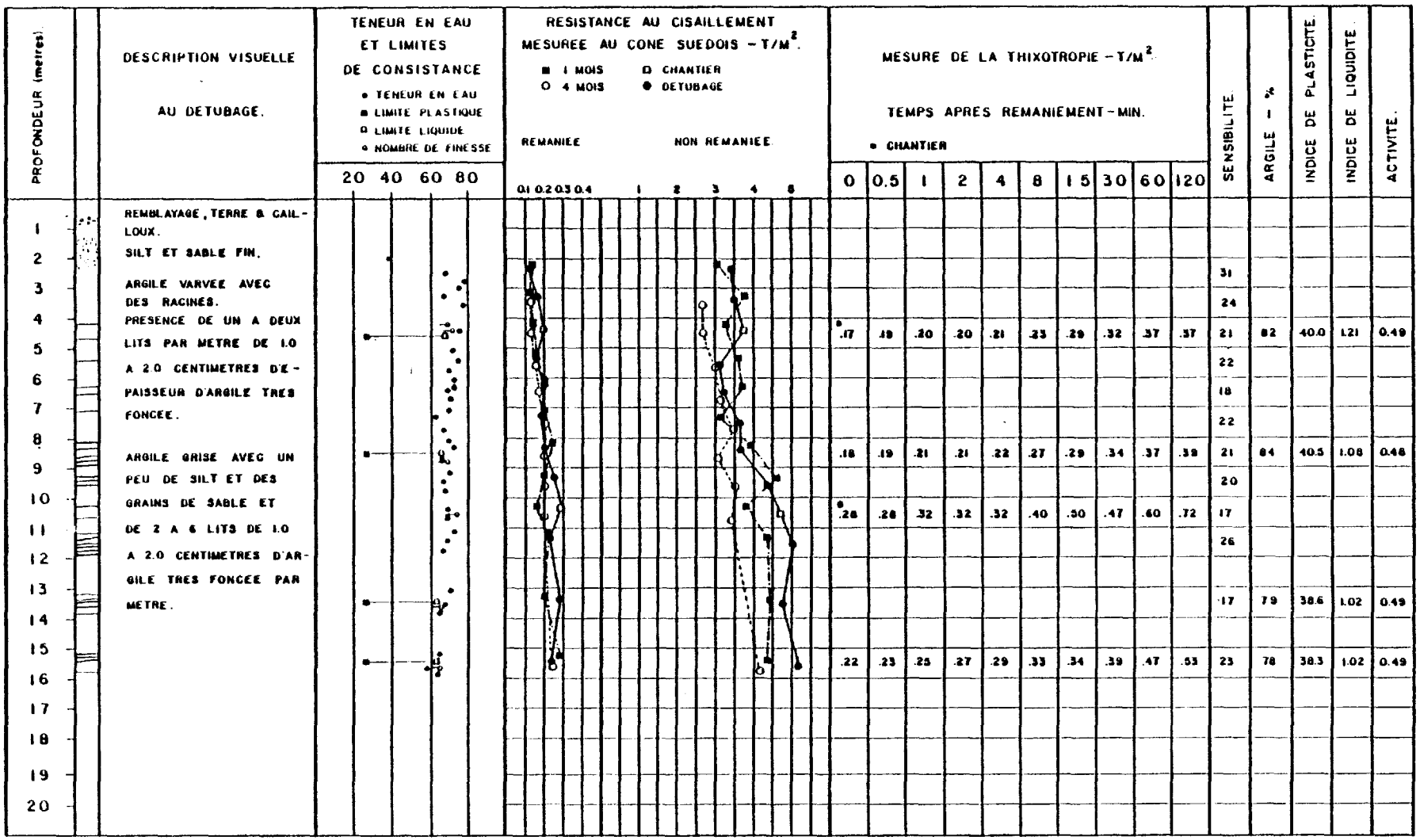

FIGURE 40. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, LOUISEVILLE, FORAGE 2.

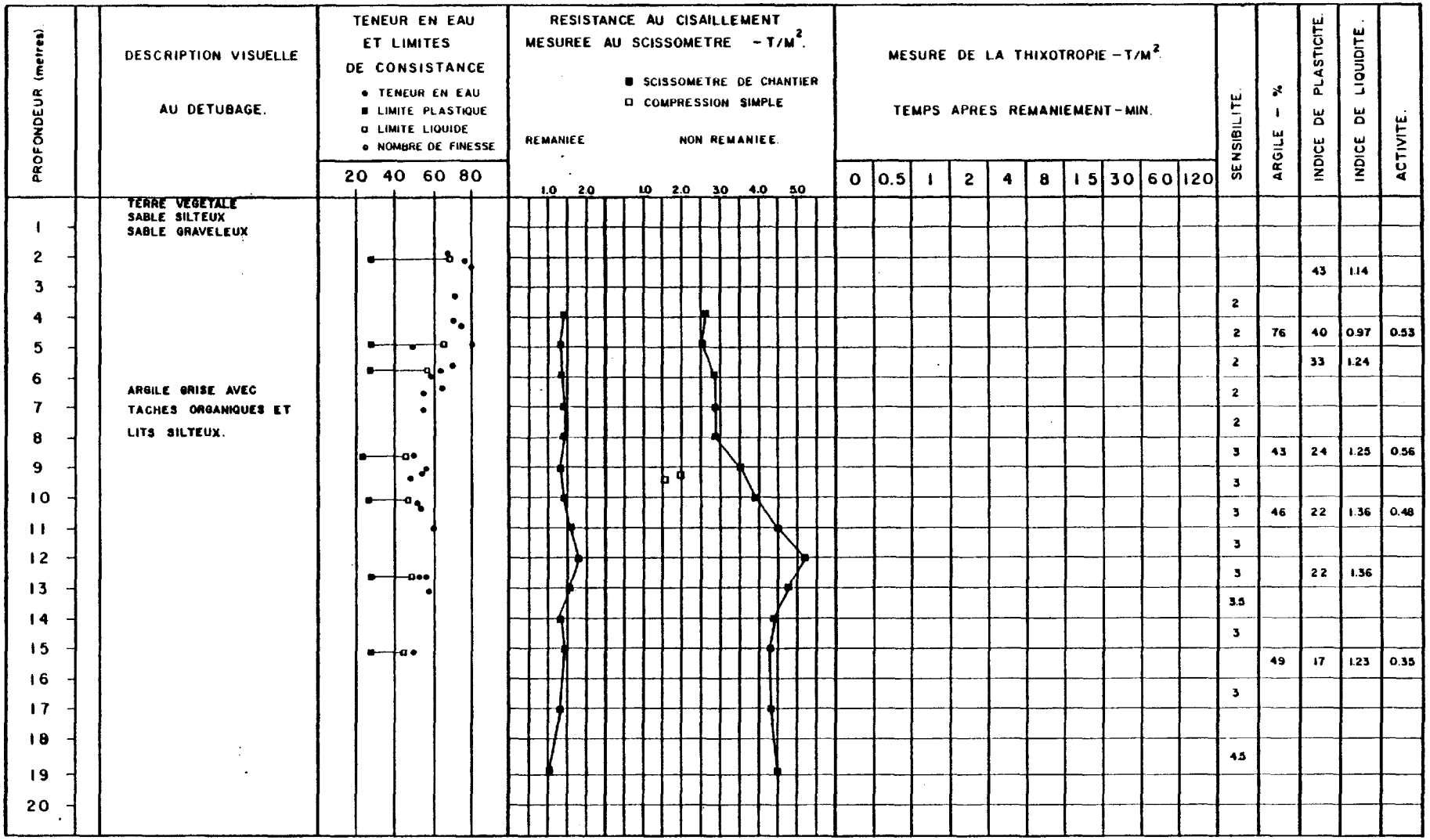

FIGURE 41. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, NICOLET, FORAGE 2.

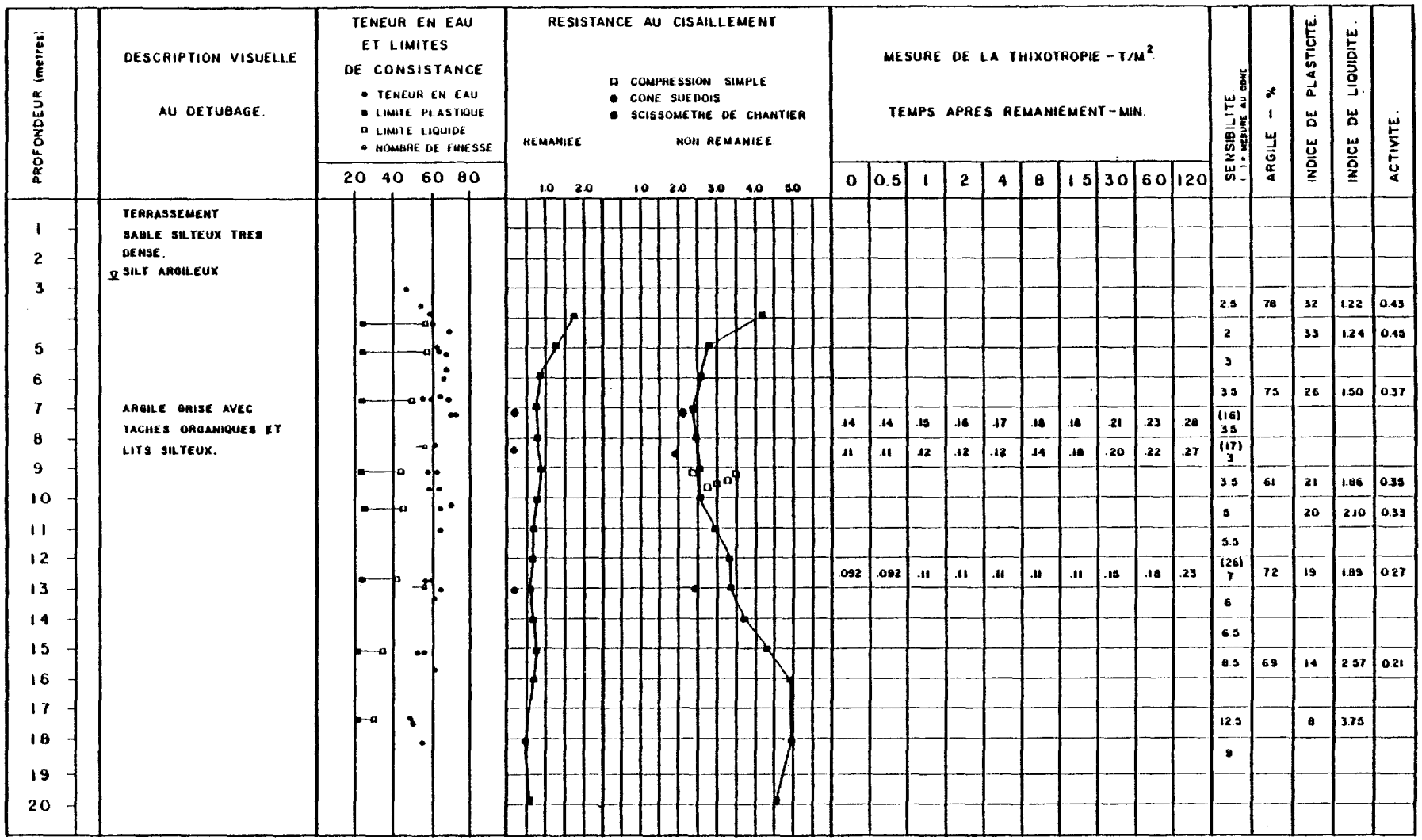

FIGURE 42. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, NICOLET, FORAGE 3.

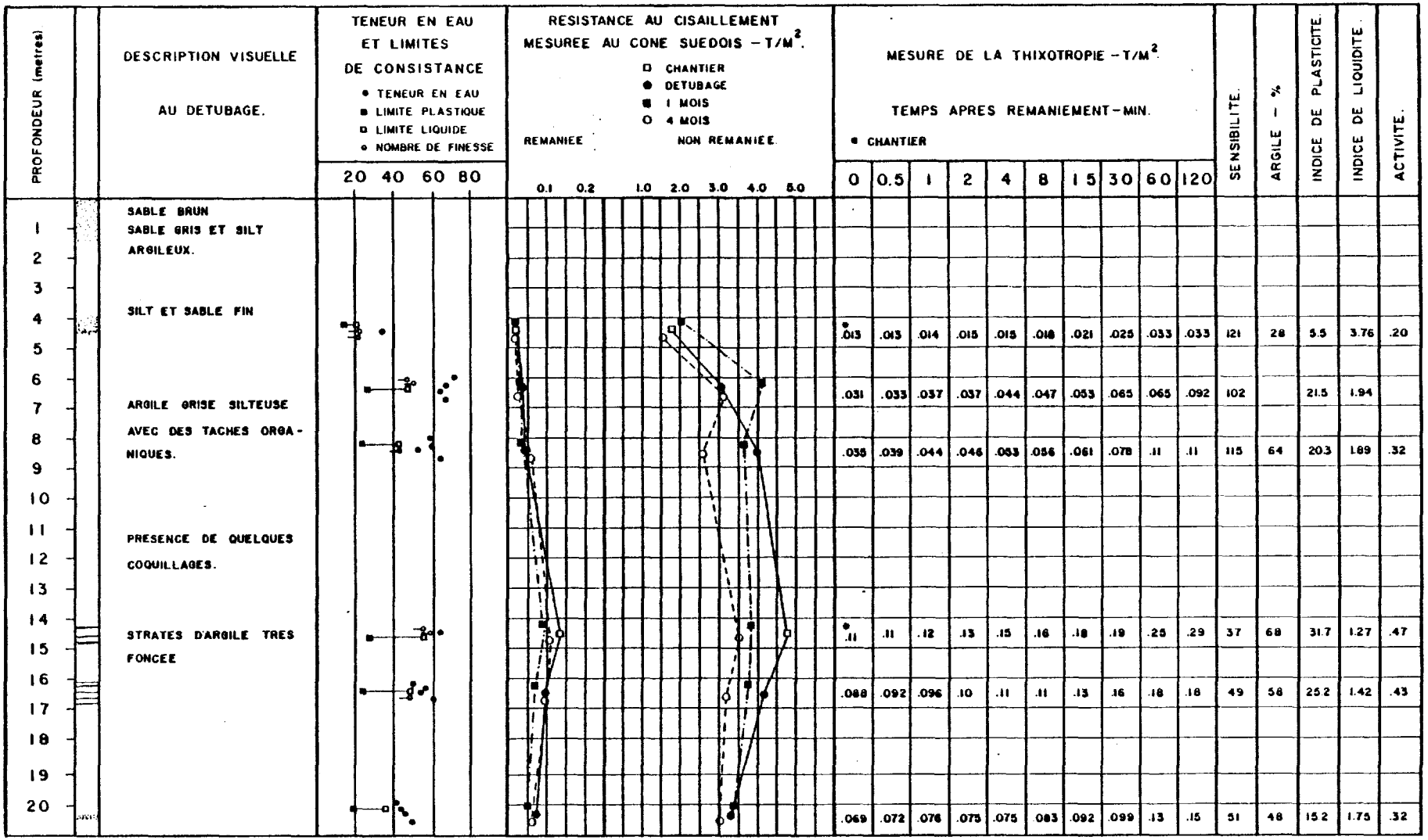

FIGURE 43. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 1.

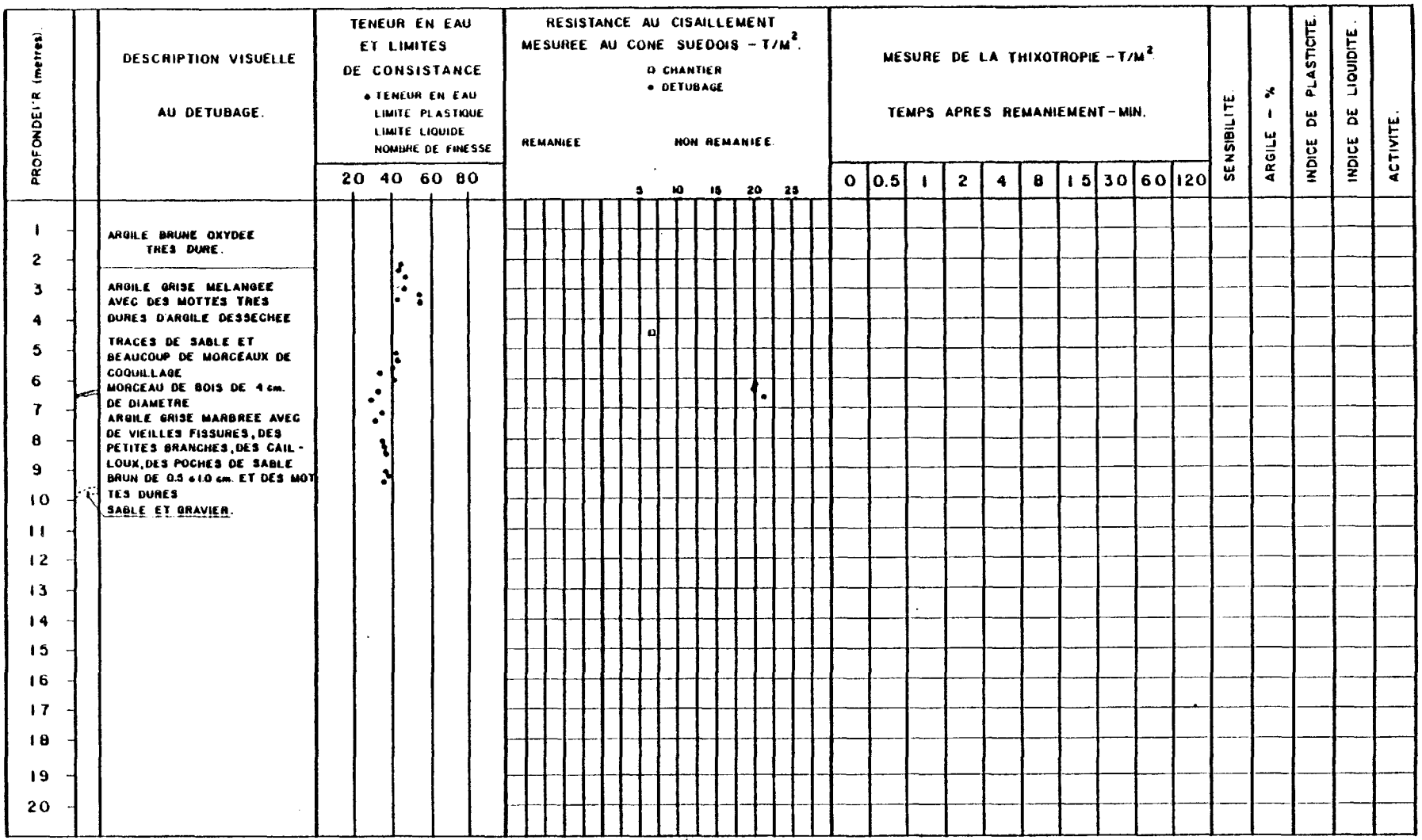

FIGURE 44. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 2.

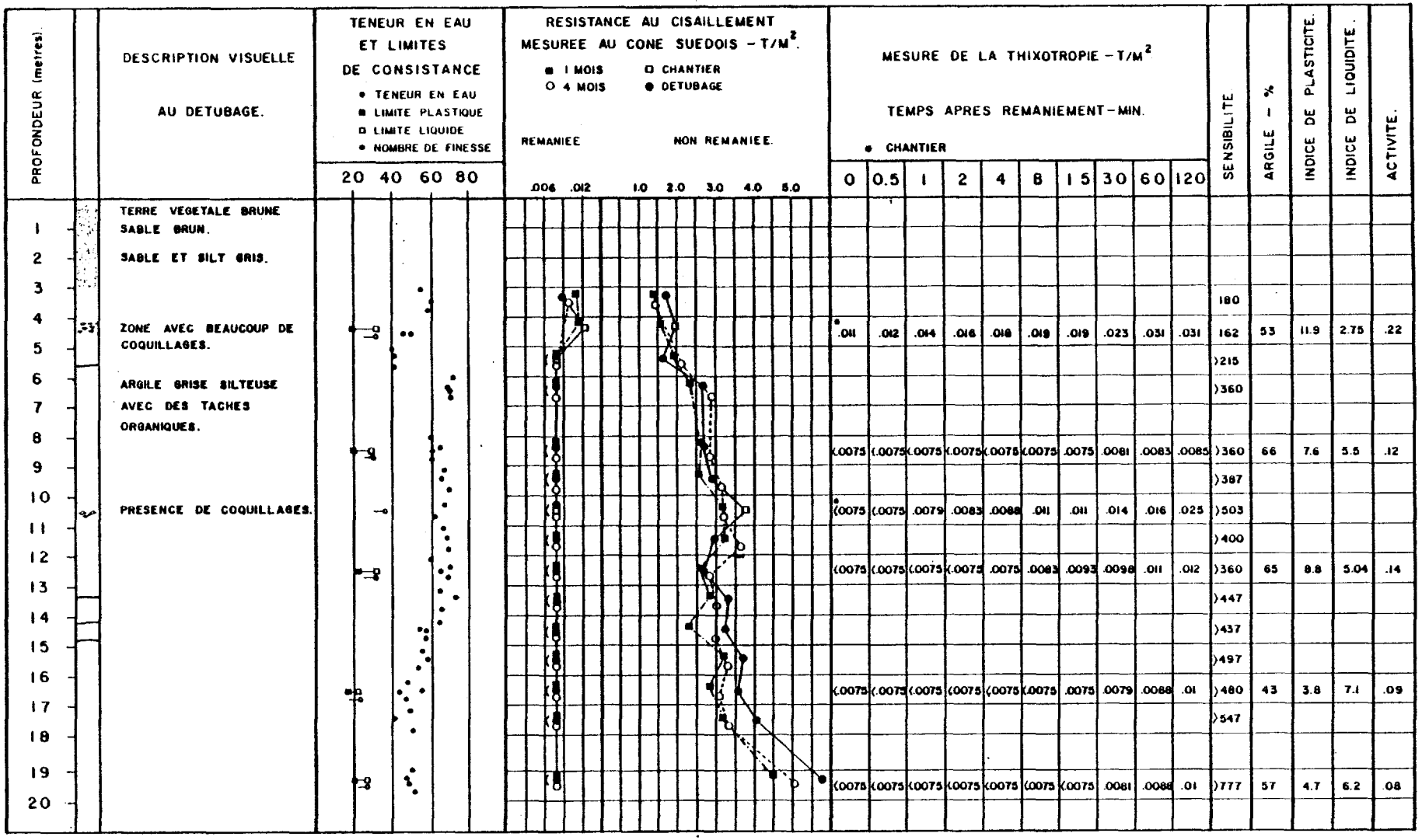

FIGURE 45. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 3.

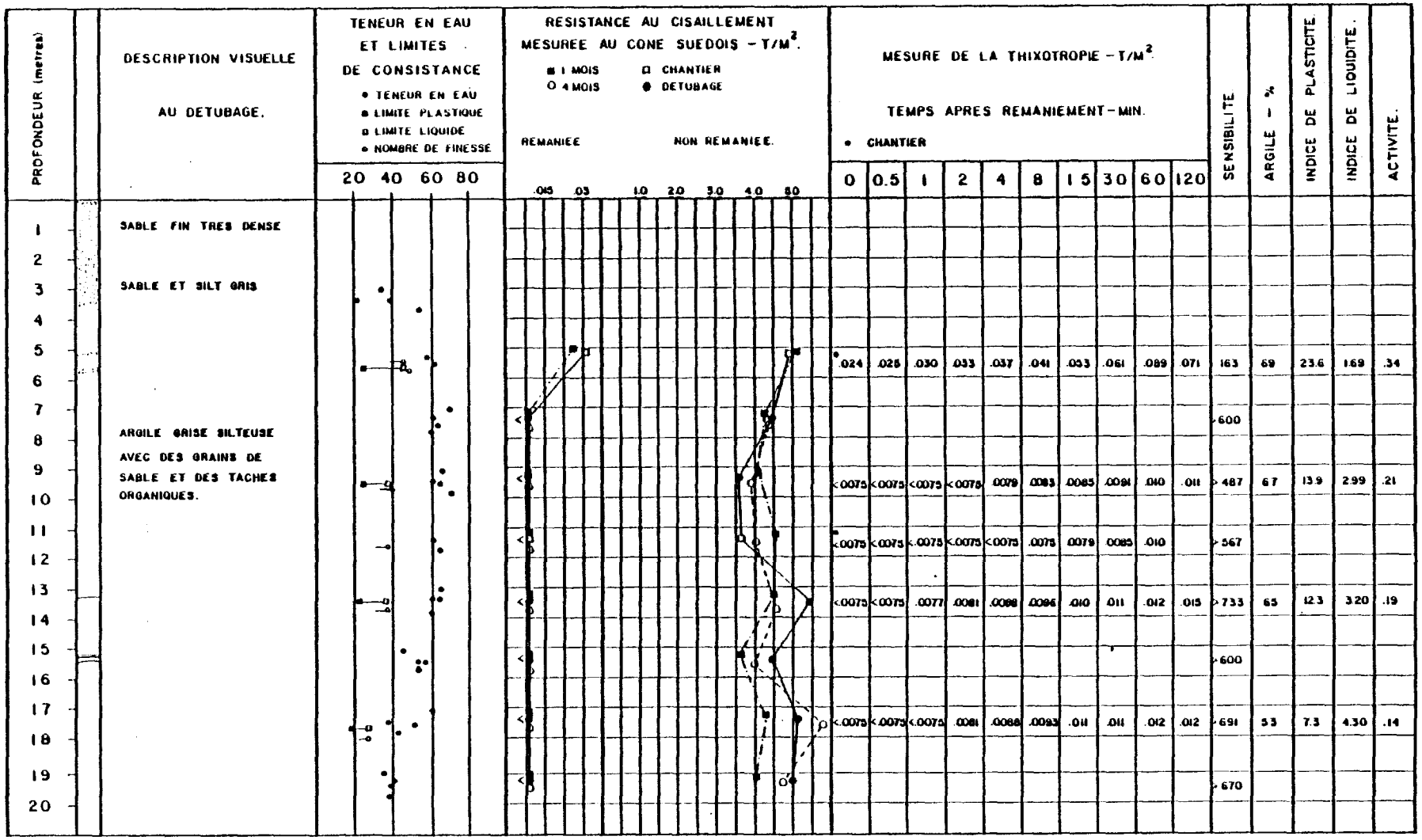

FIGURE 46. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 4.

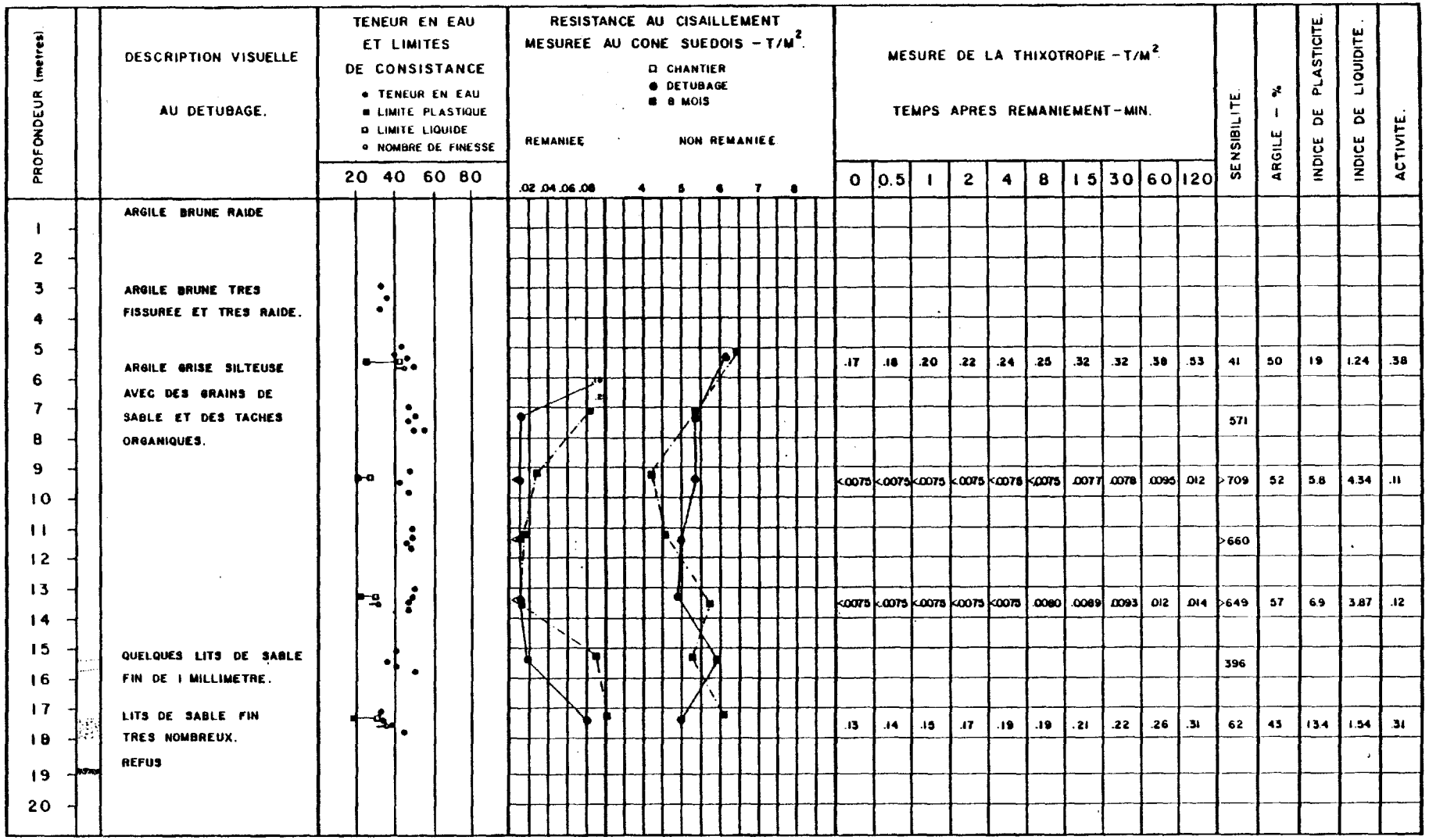

FIGURE 47. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 5.

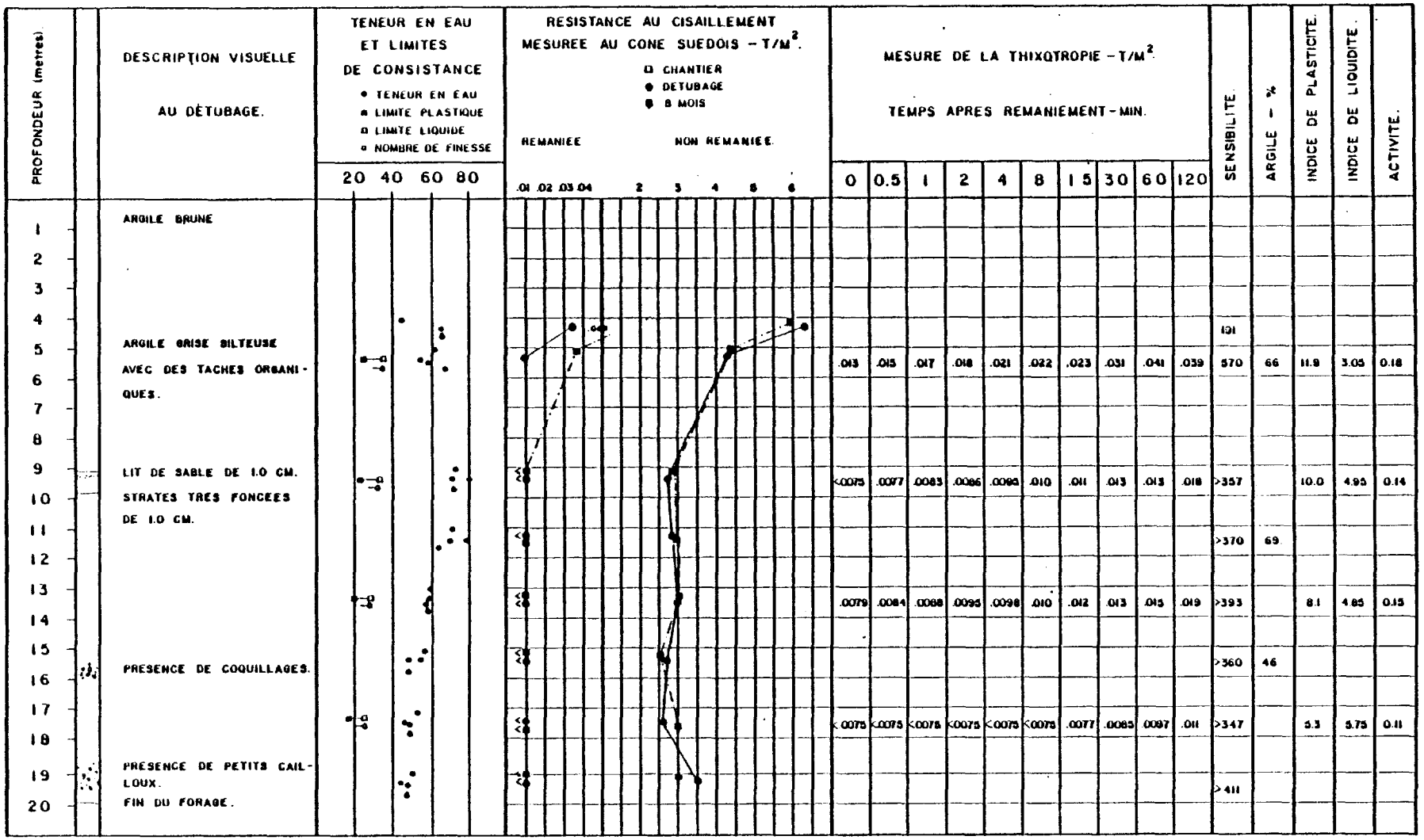

FIGURE 48. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 6.

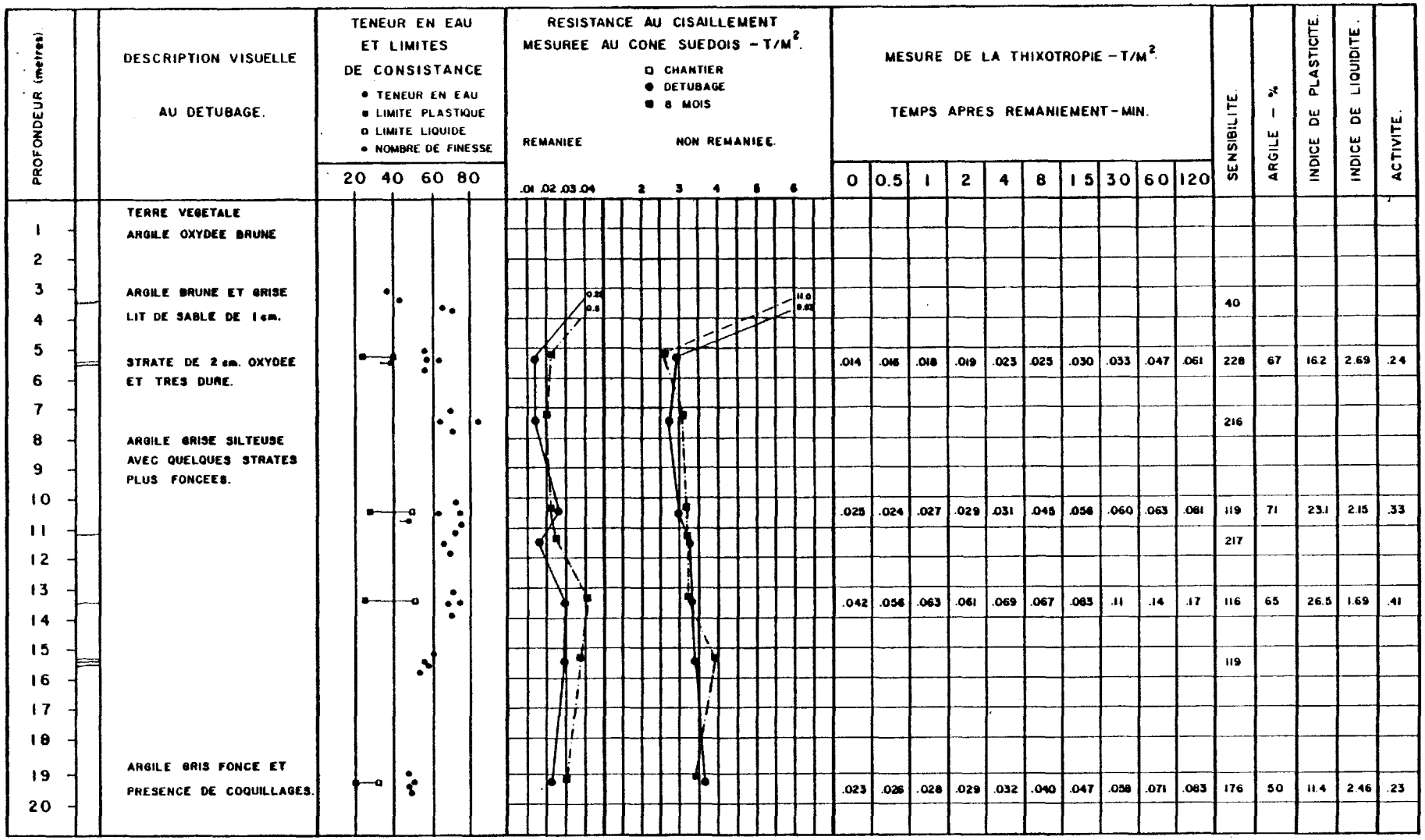

FIGURE 49. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 7.

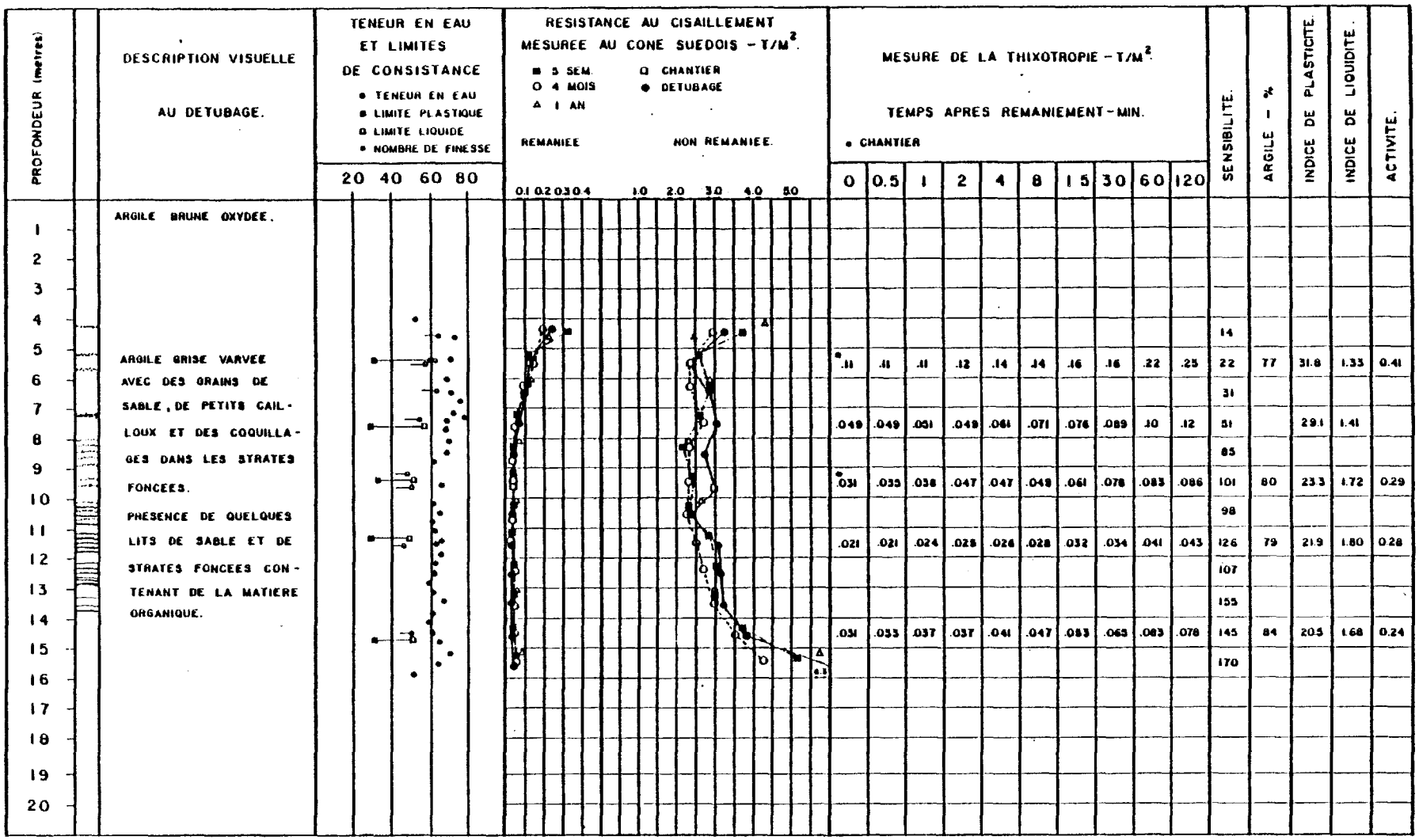

FIGURE 50. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, ST-LOUIS, FORAGE I.

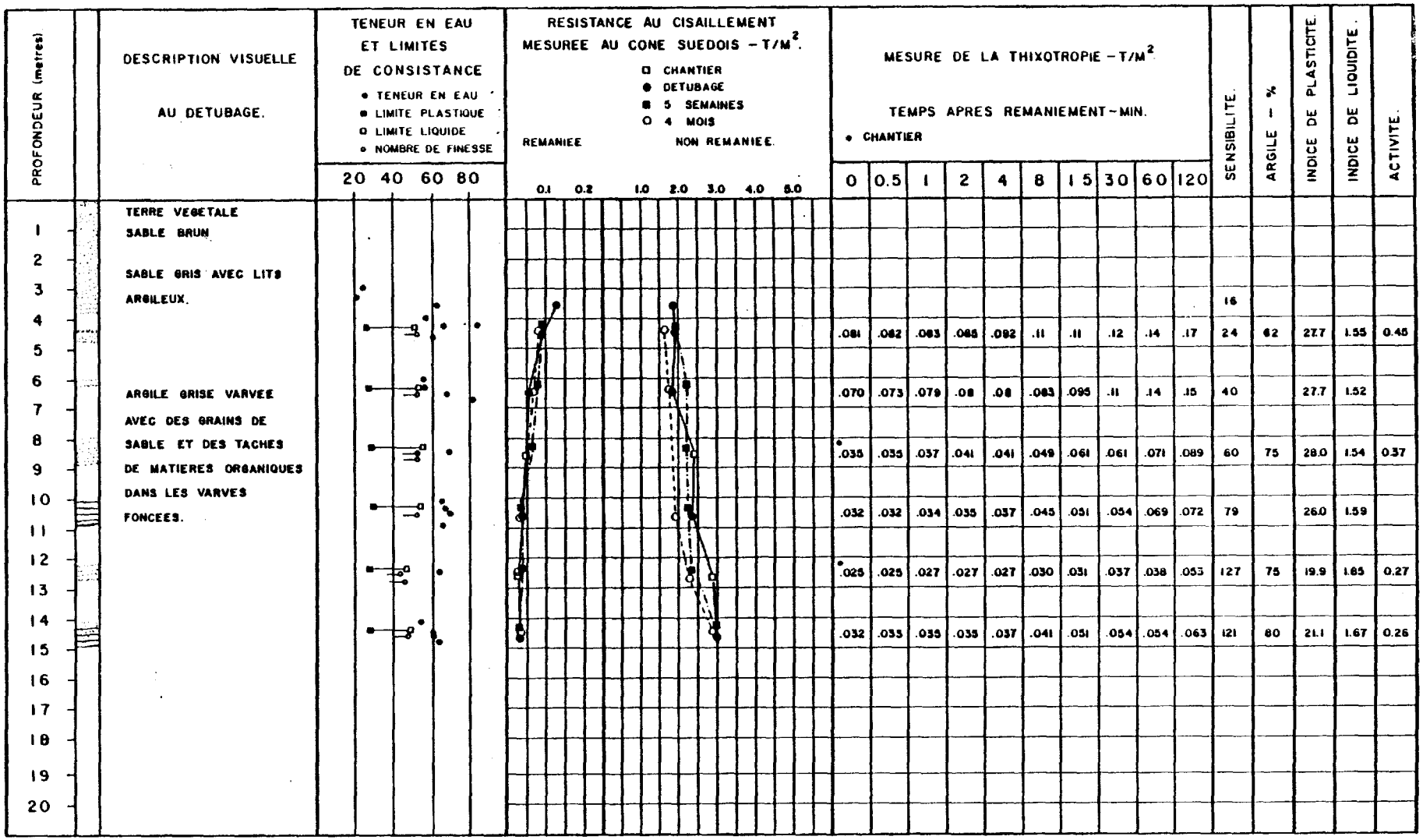

FIGURE 51. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, ST-LOUIS, FORAGE 2.

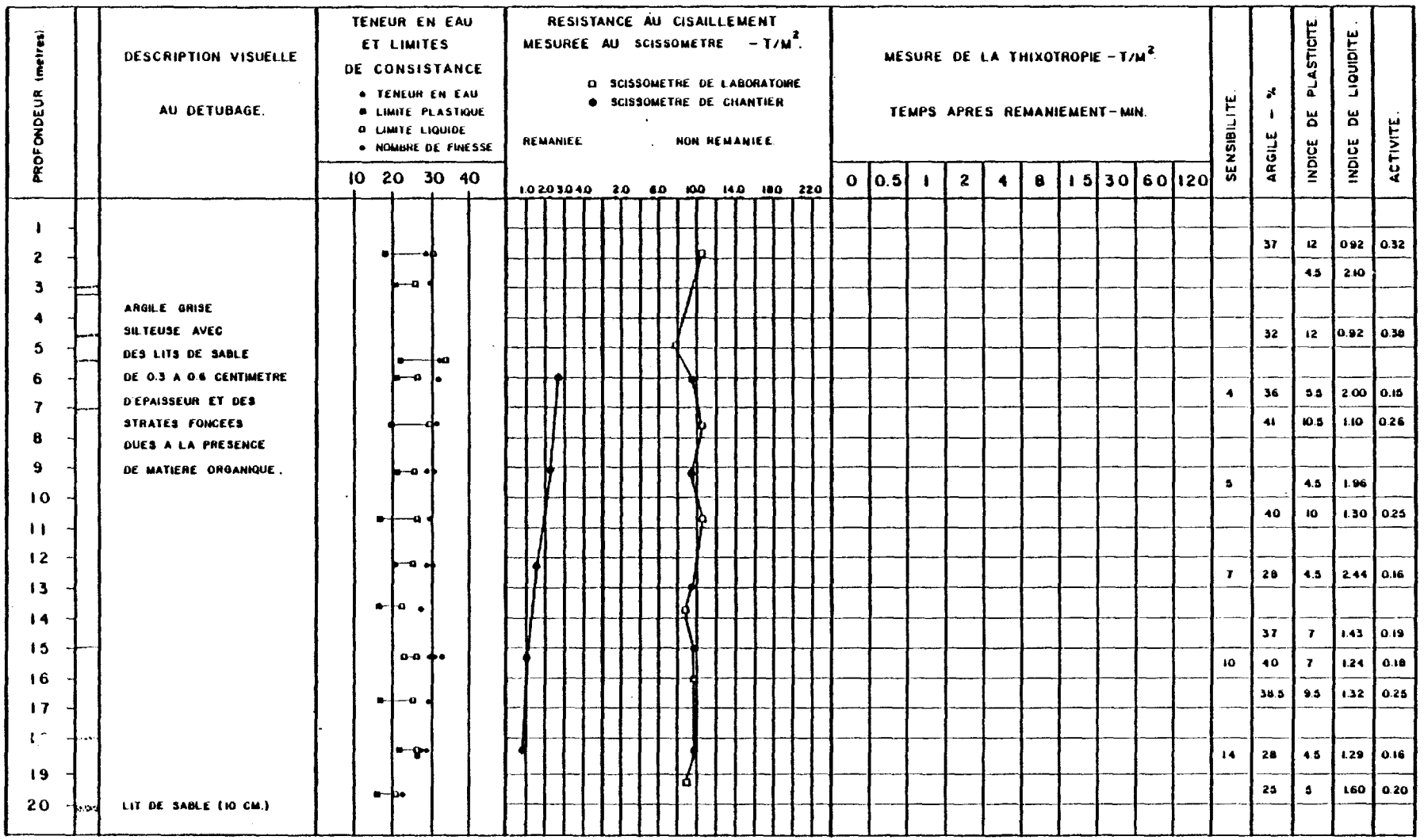

FIGURE 52. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, ST-URBAIN, FORAGE DU MINISTERE DES RICHESSES NATURELLES.

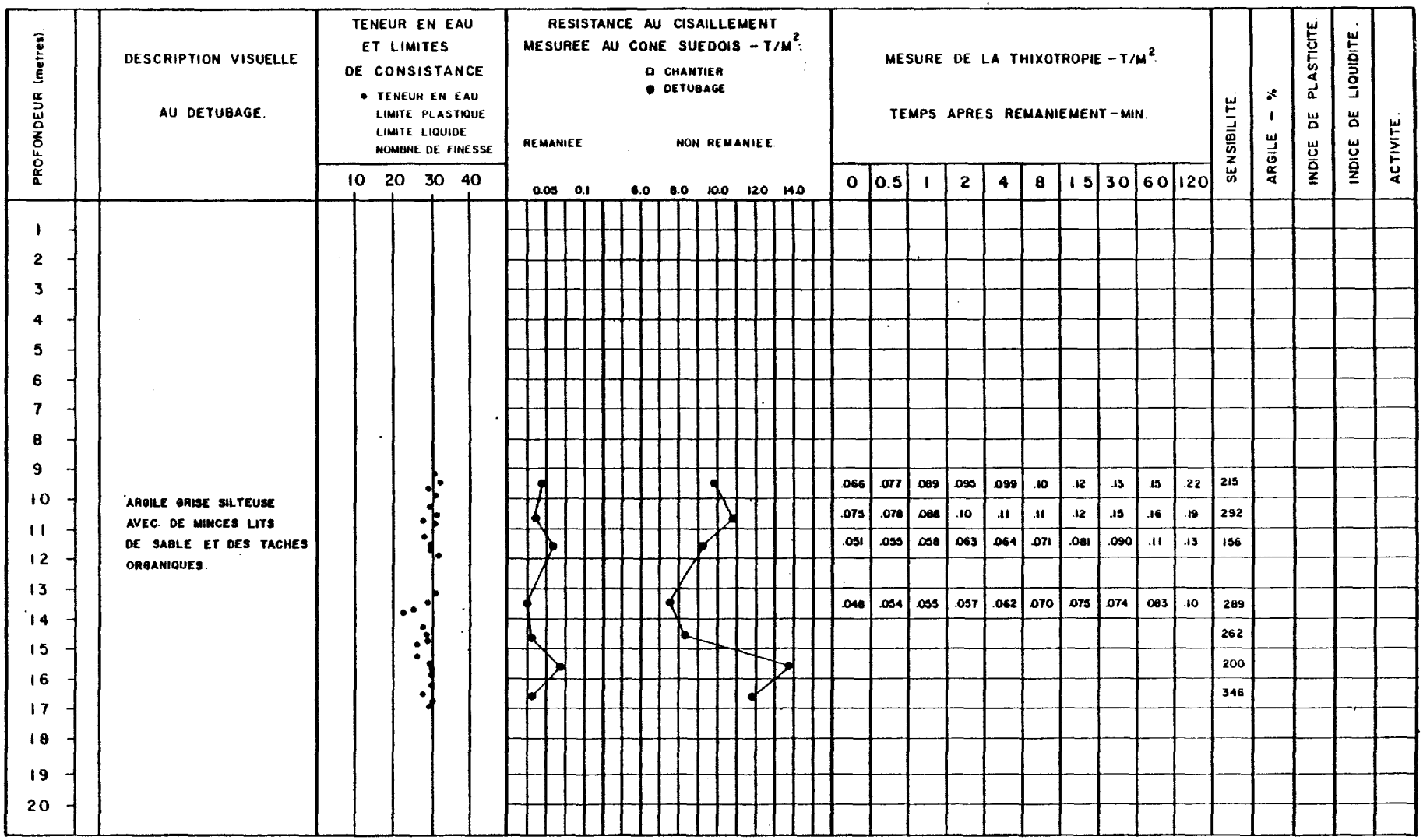

FIGURE 53. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, ST-URBAIN, FORAGE DE L'UNIVERSITE DE SHERBROOKE.

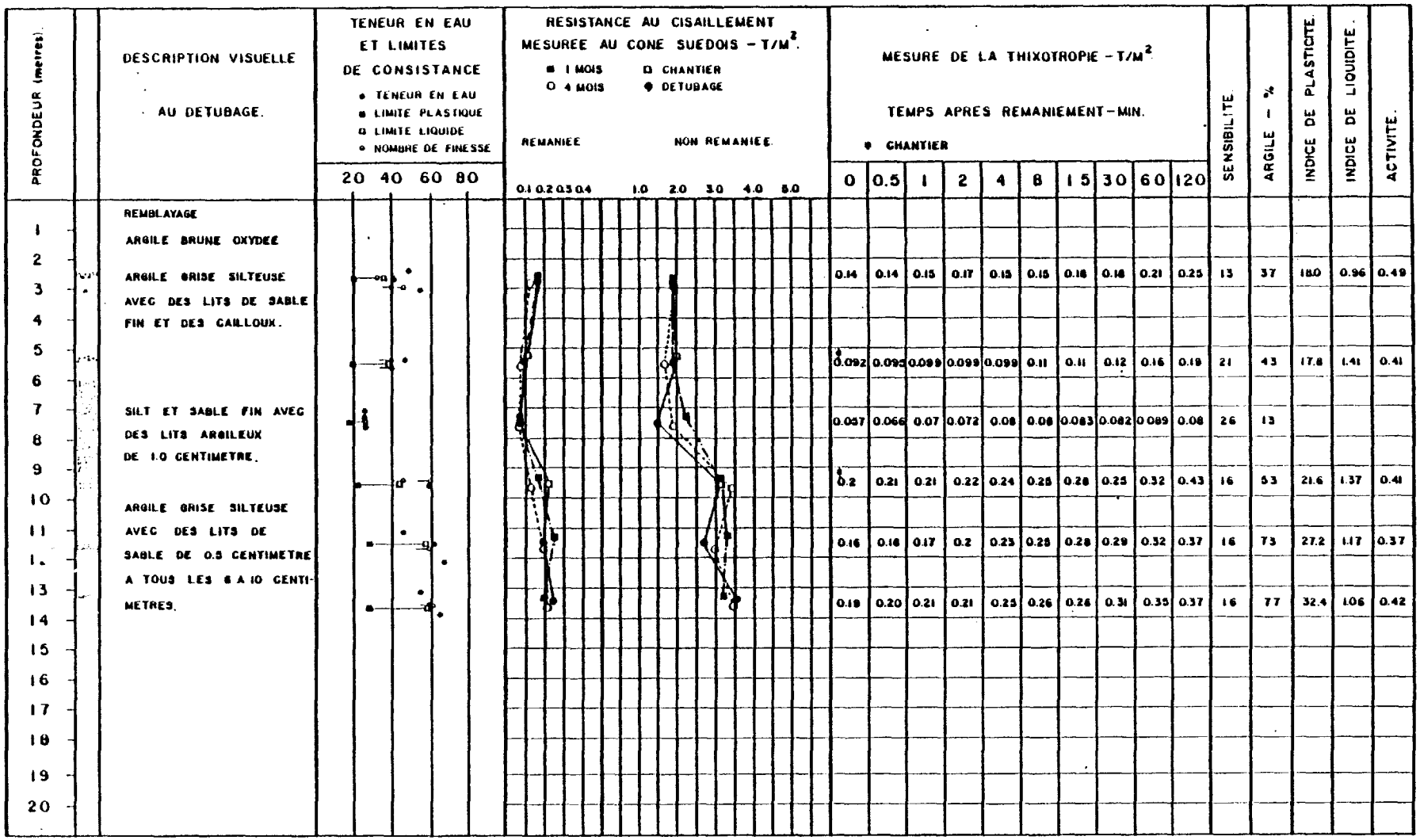

FIGURE 54. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, YAMASKA, FORAGE 1.

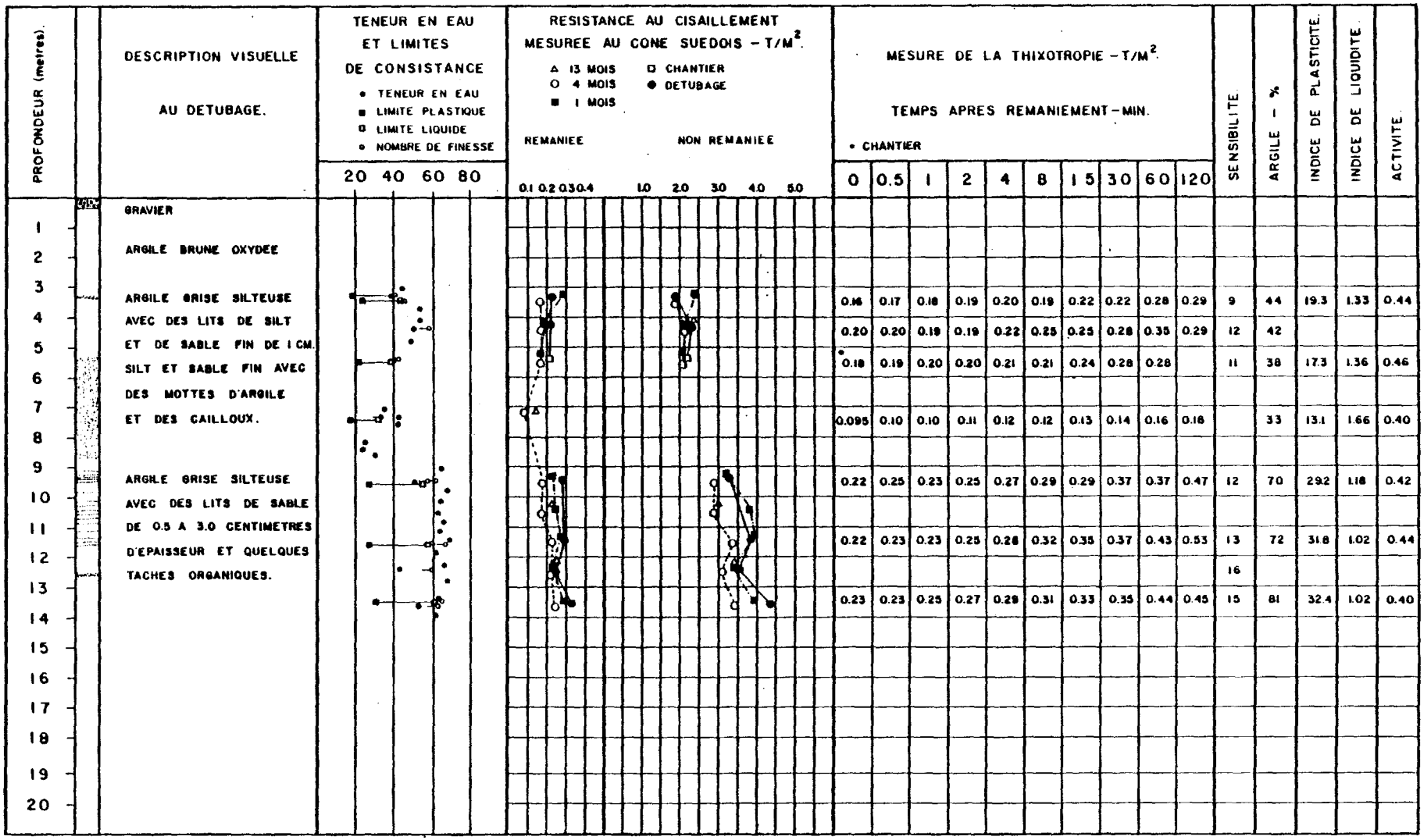

FIGURE 55. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES, YAMASKA, FORAGE 2.

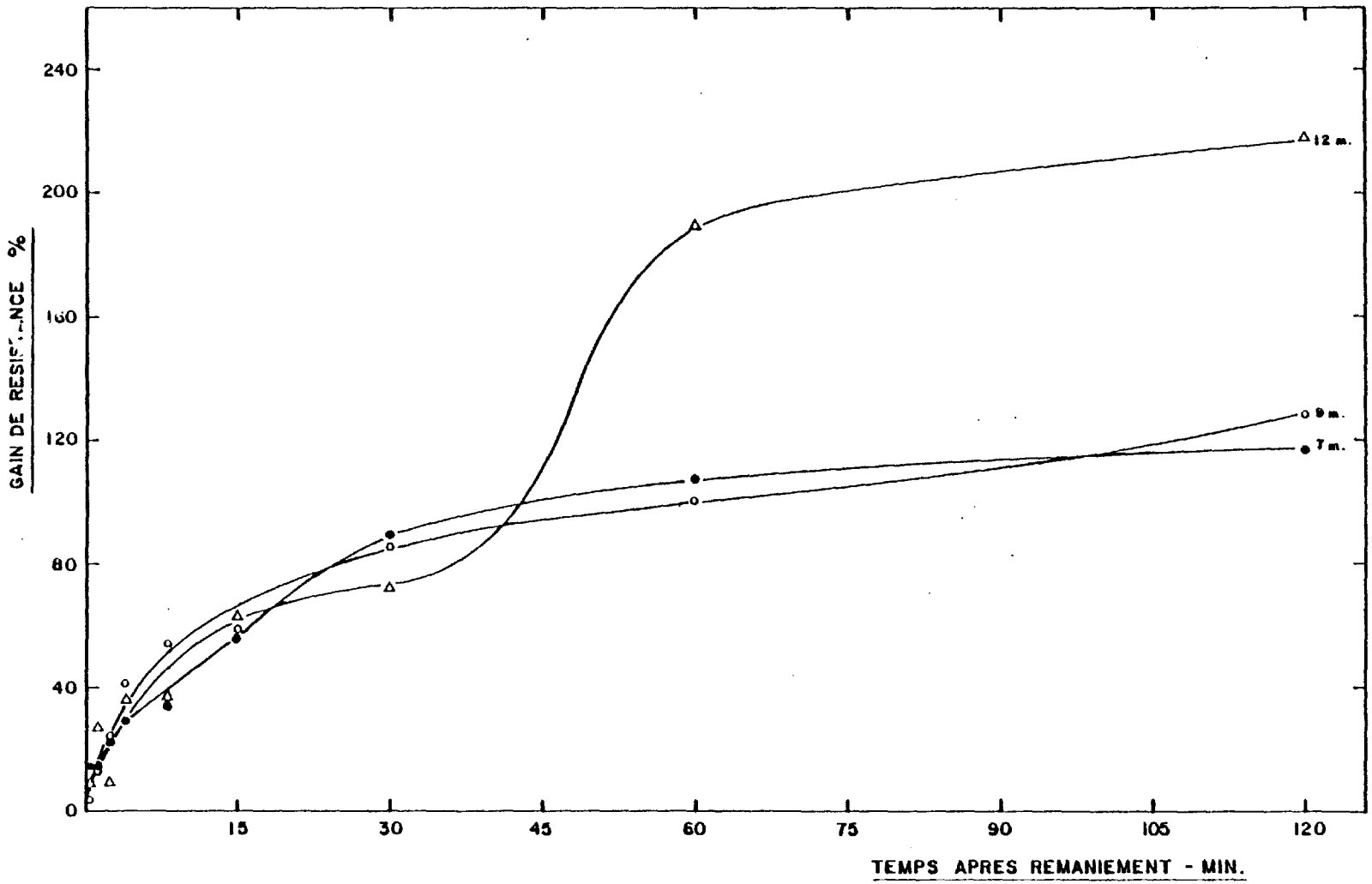

FIGURE 56. ESSAIS DE THIXOTROPIE - LE COTEAU, FORAGE 2.

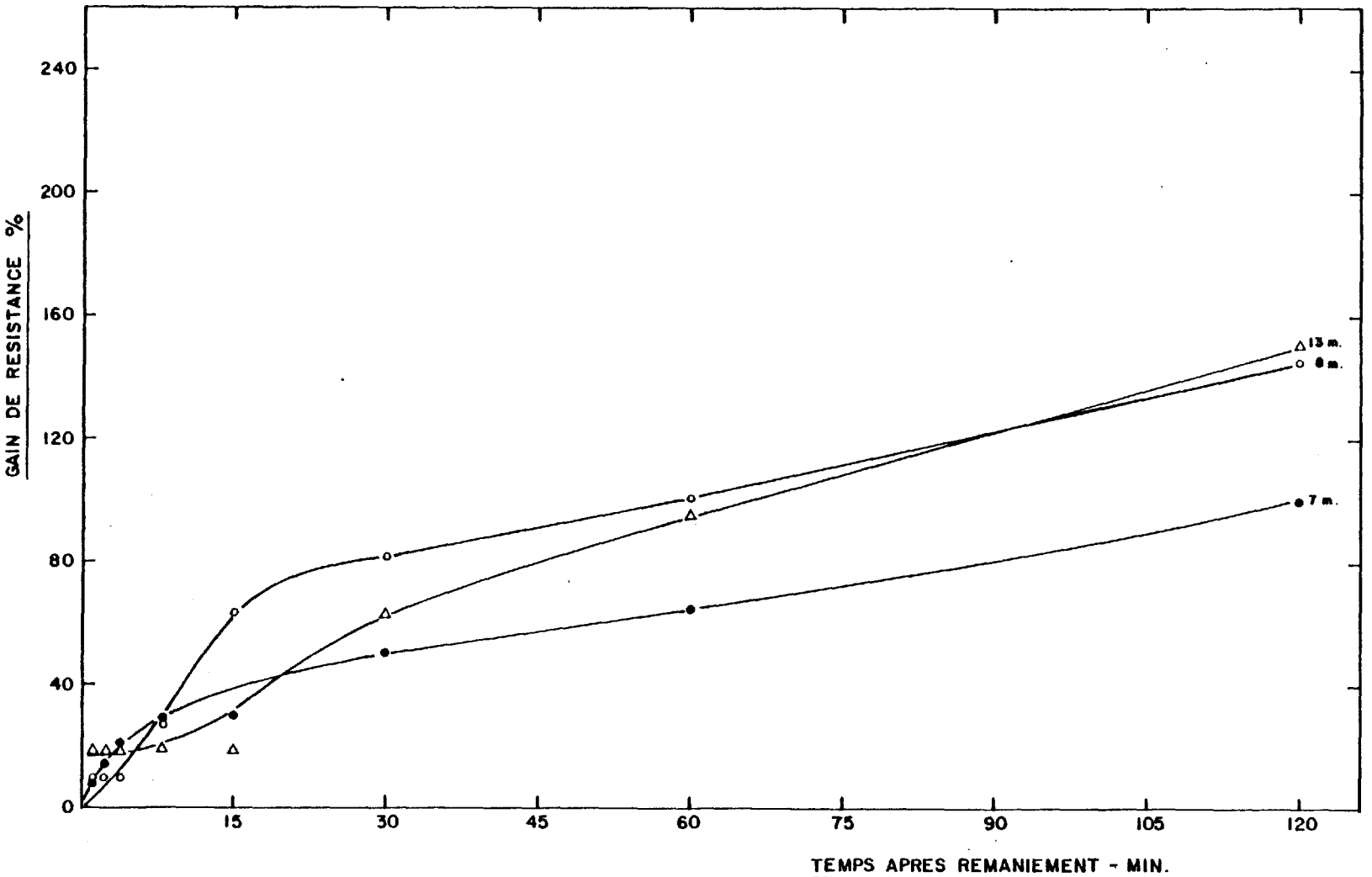

FIGURE 57. ESSAIS DE THIXOTROPIE - NICOLET, FORAGE 3

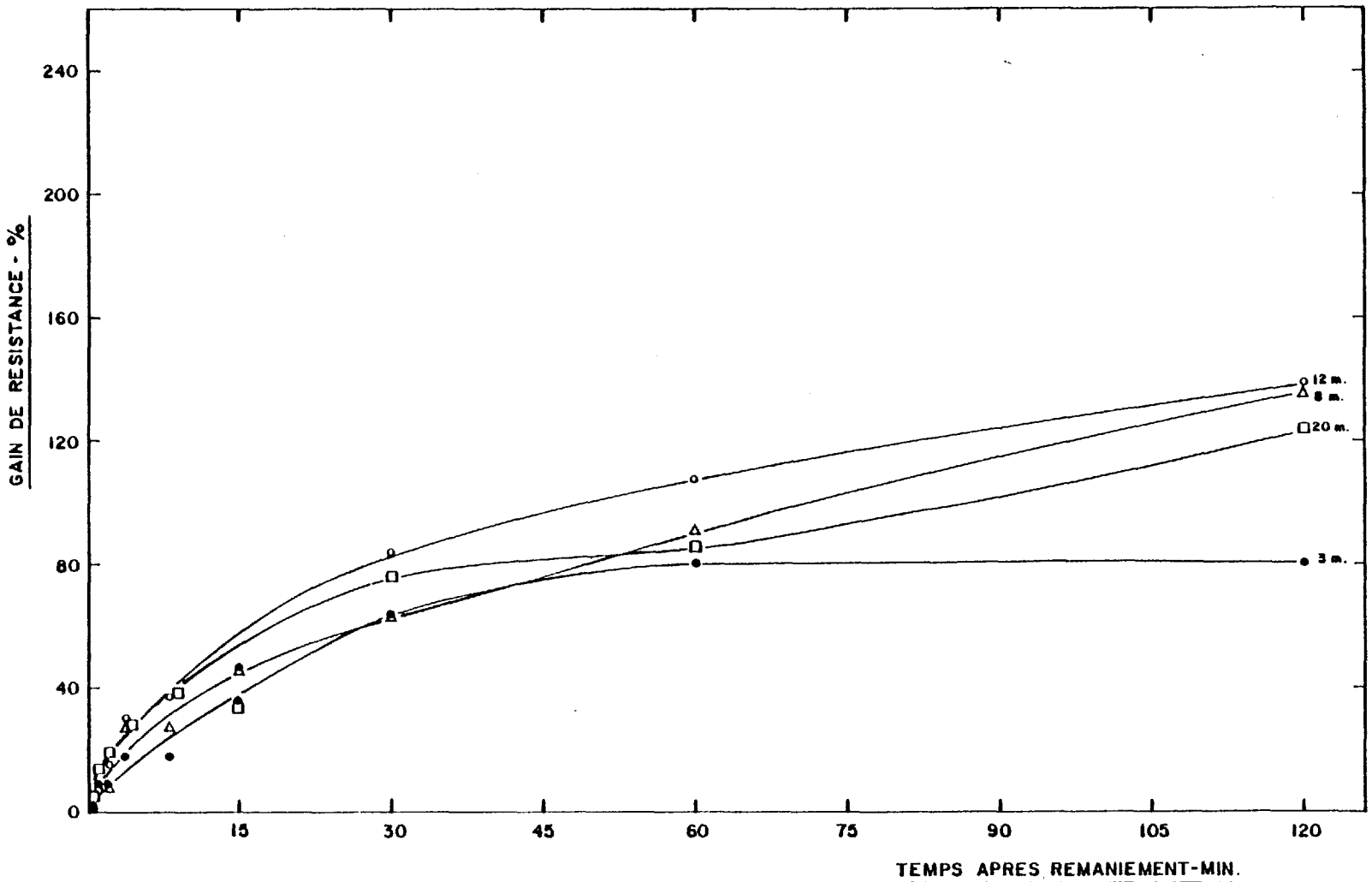

FIGURE 58. ESSAIS DE THIXOTROPIE – LOUISEVILLE, FORAGE I.

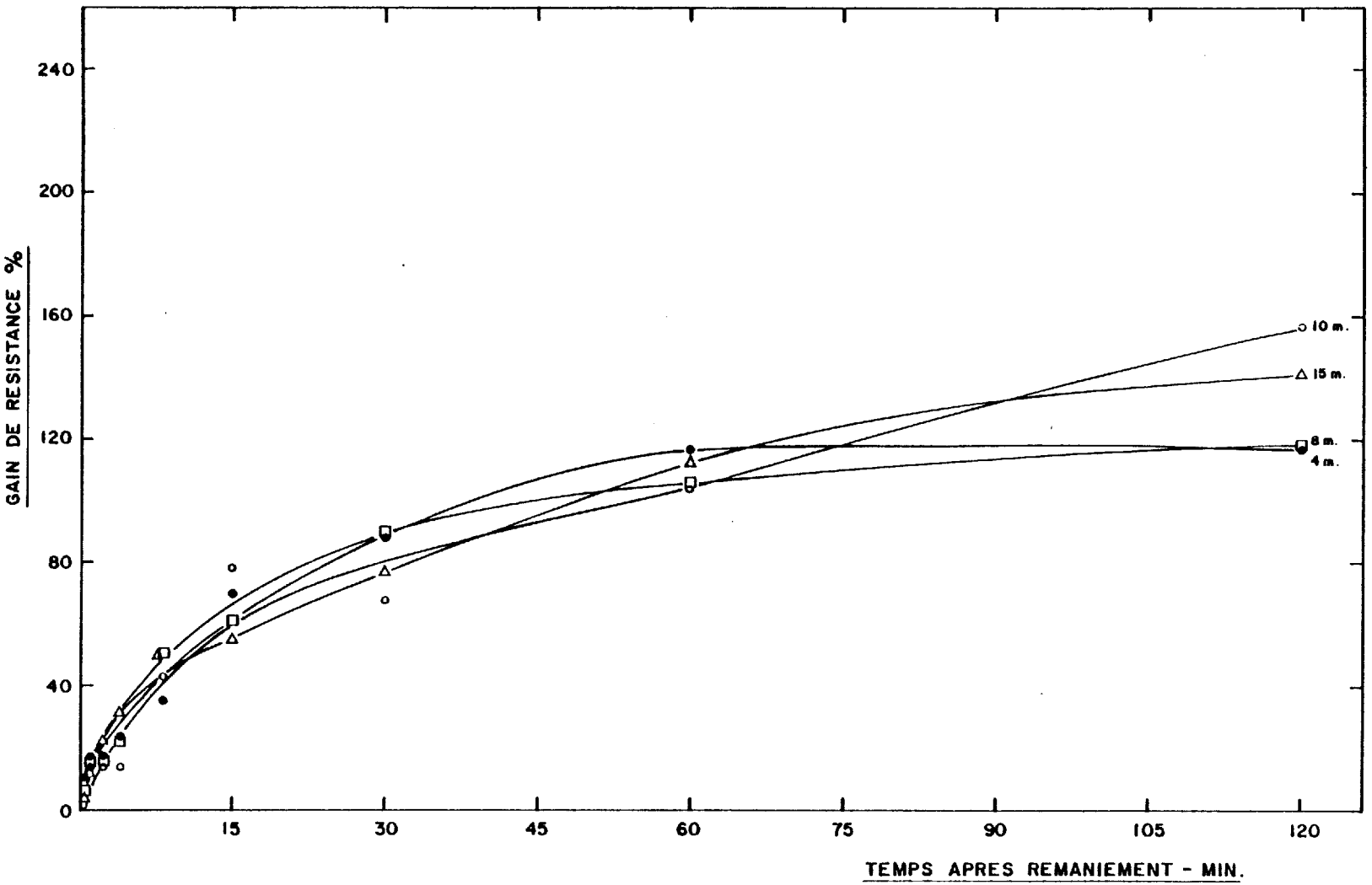

FIGURE 59. ESSAIS DE THIXOTROPIE – LOUISEVILLE, FORAGE 2.

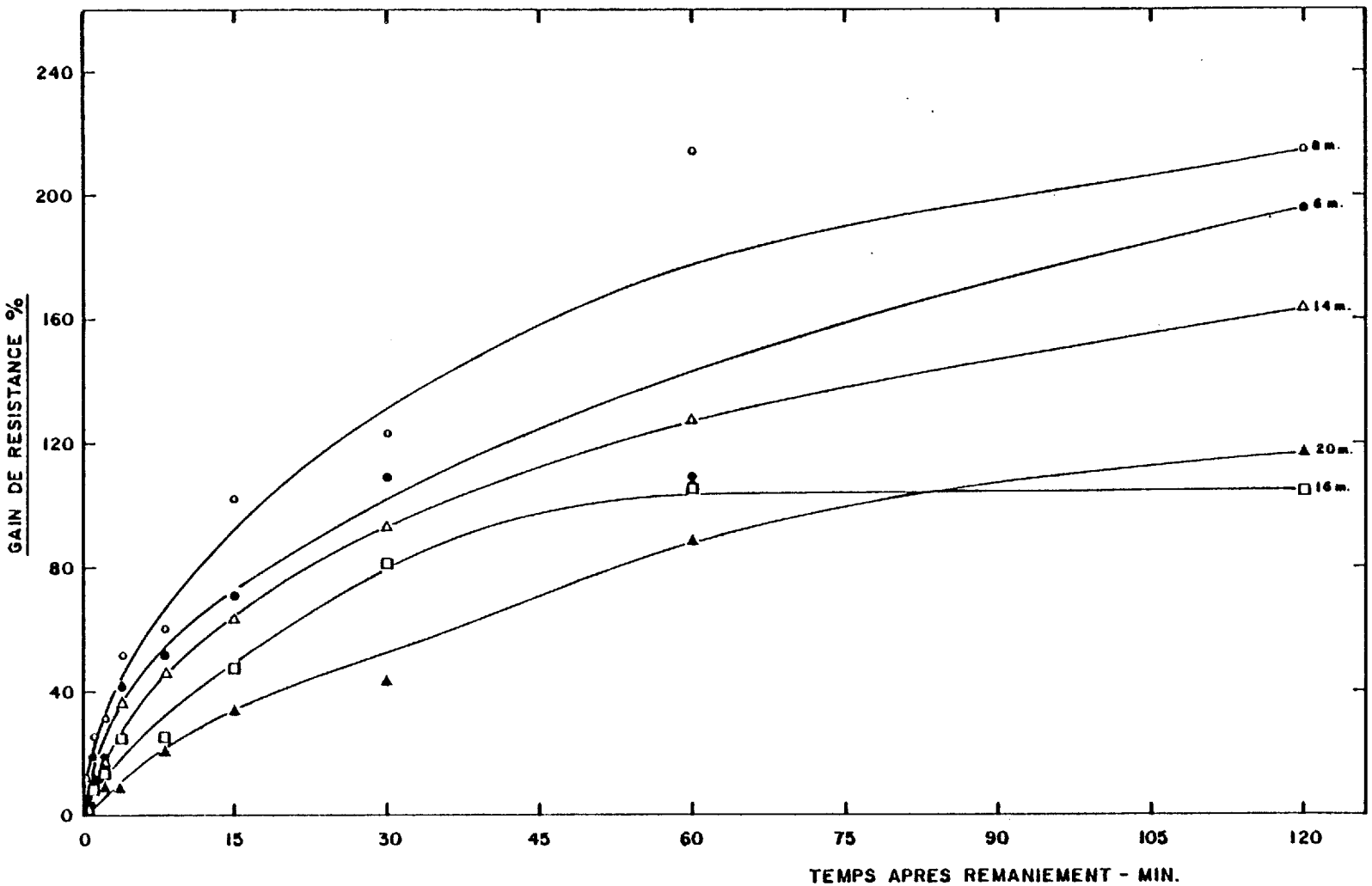

FIGURE 60. ESSAIS DE THIXOTROPIE - ST-AMBROISE, FORAGE 1.

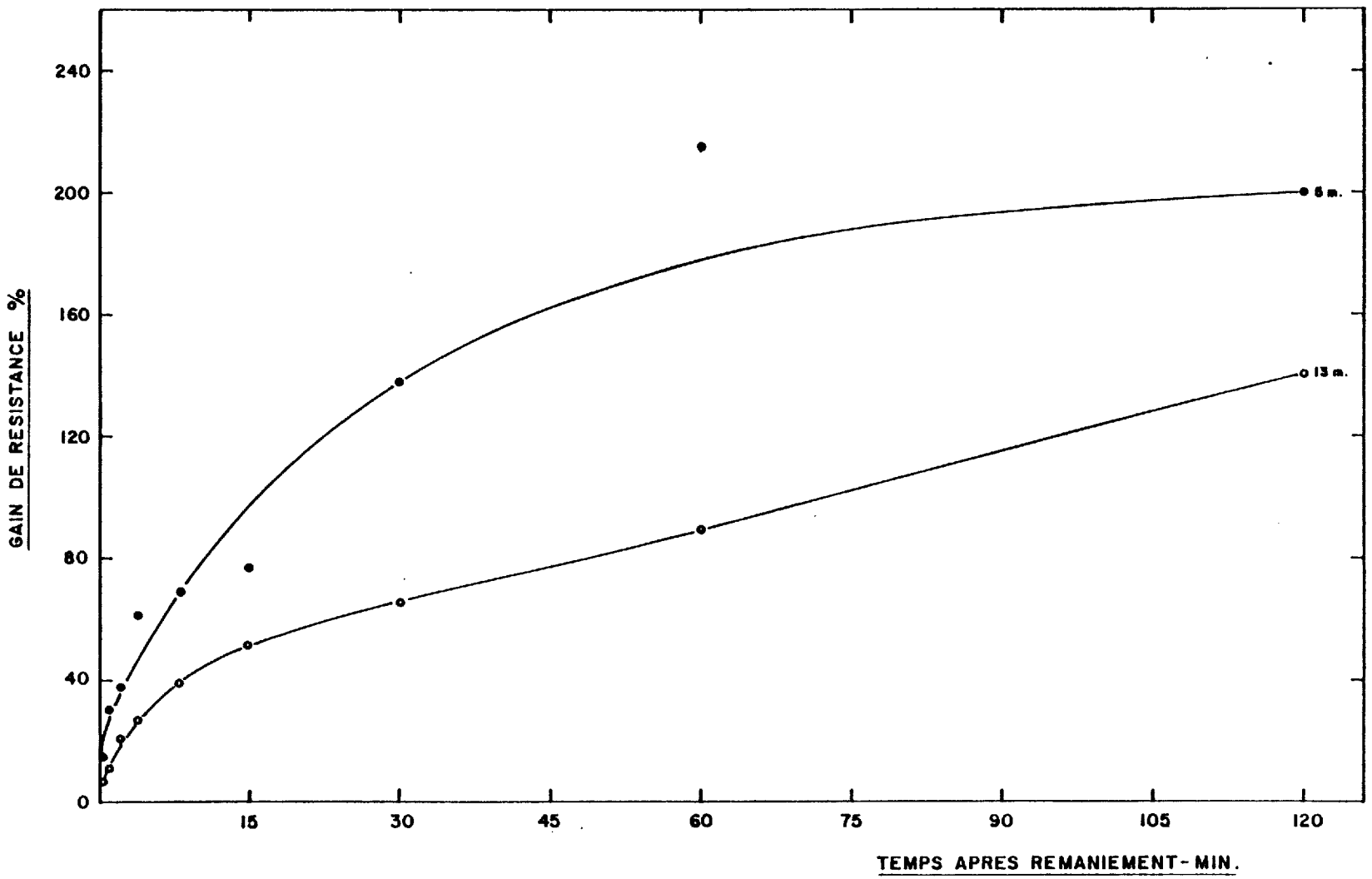

FIGURE 61. ESSAIS DE THIXOTROPIE - ST-AMBROISE, FORAGE 6.

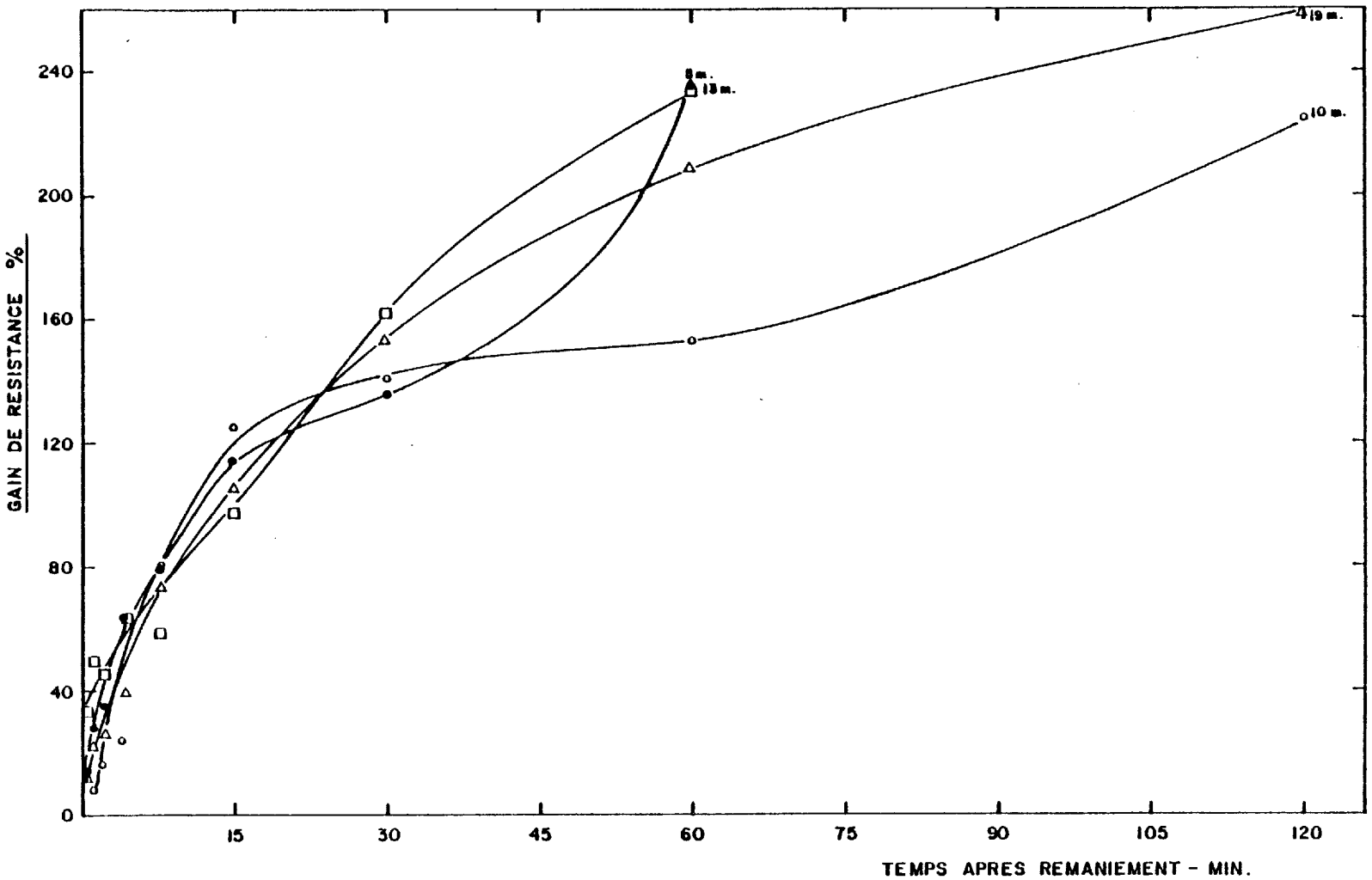

FIGURE 62. ESSAIS DE THIXOTROPIE - ST-AMBROISE, FORAGE 7.

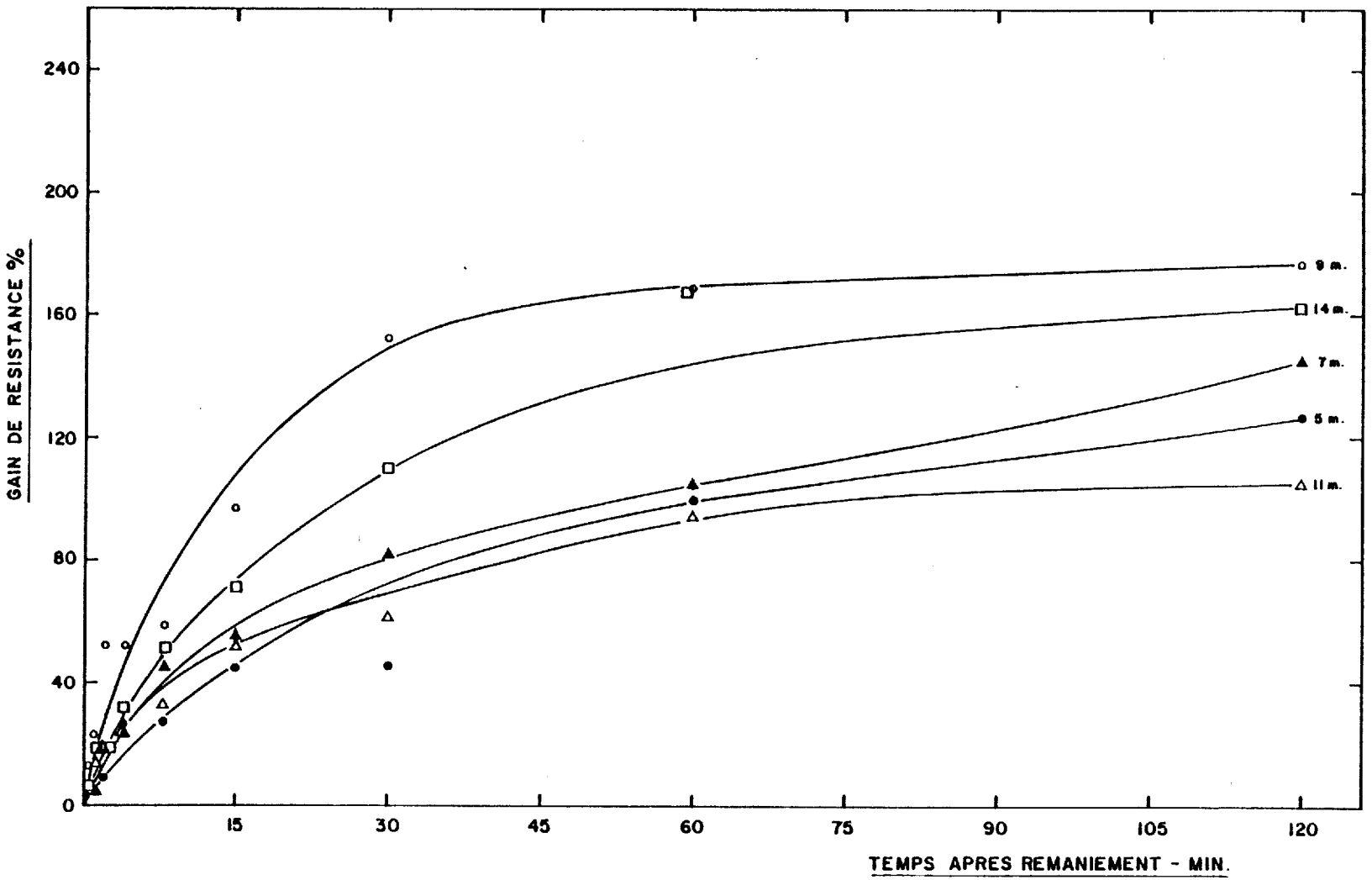

FIGURE 63. ESSAIS DE THIXOTROPIE - ST-LOUIS, FORAGE I.

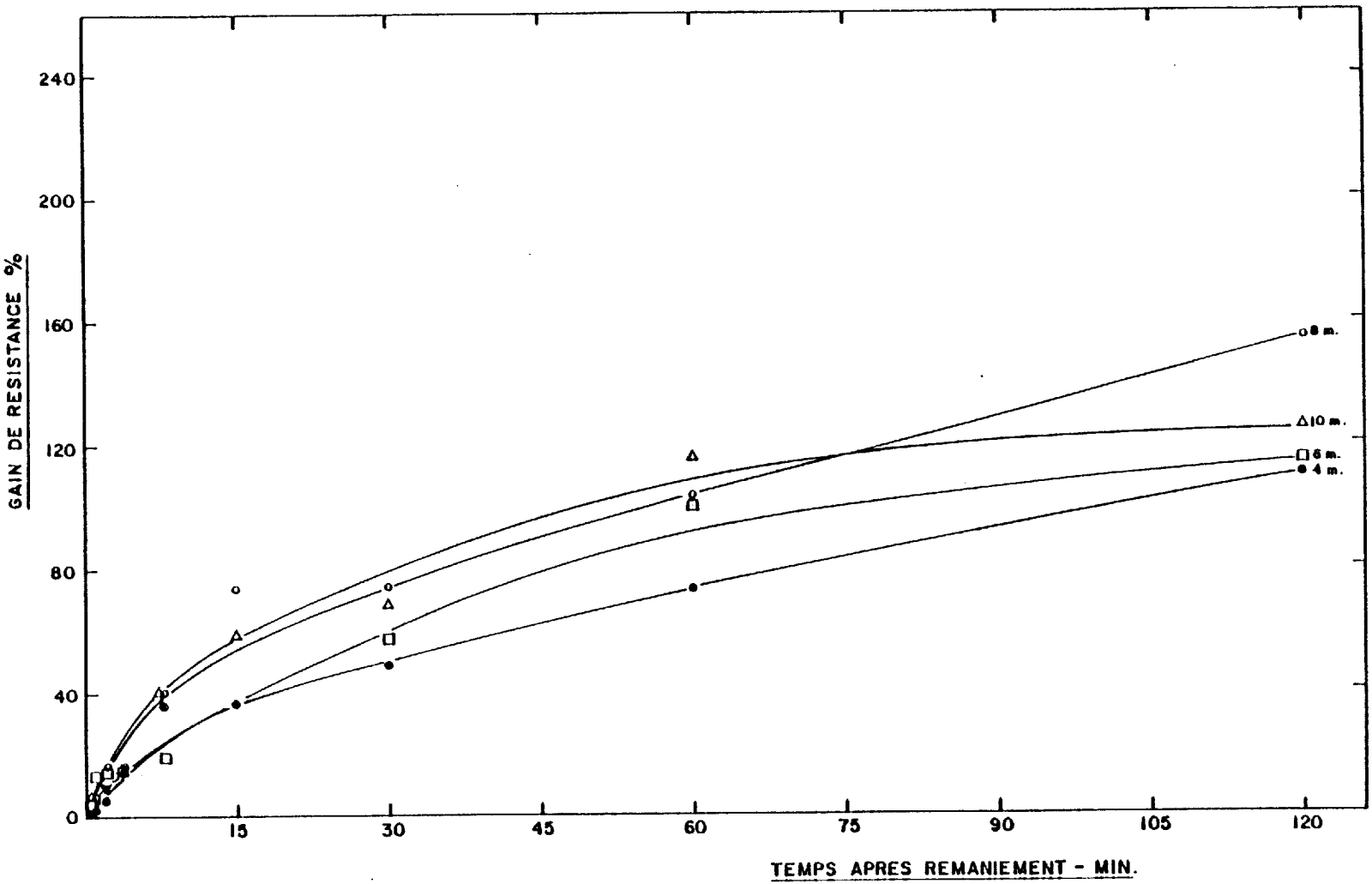

FIGURE 64. ESSAIS DE THIXOTROPIE - ST-LOUIS, FORAGE 2.

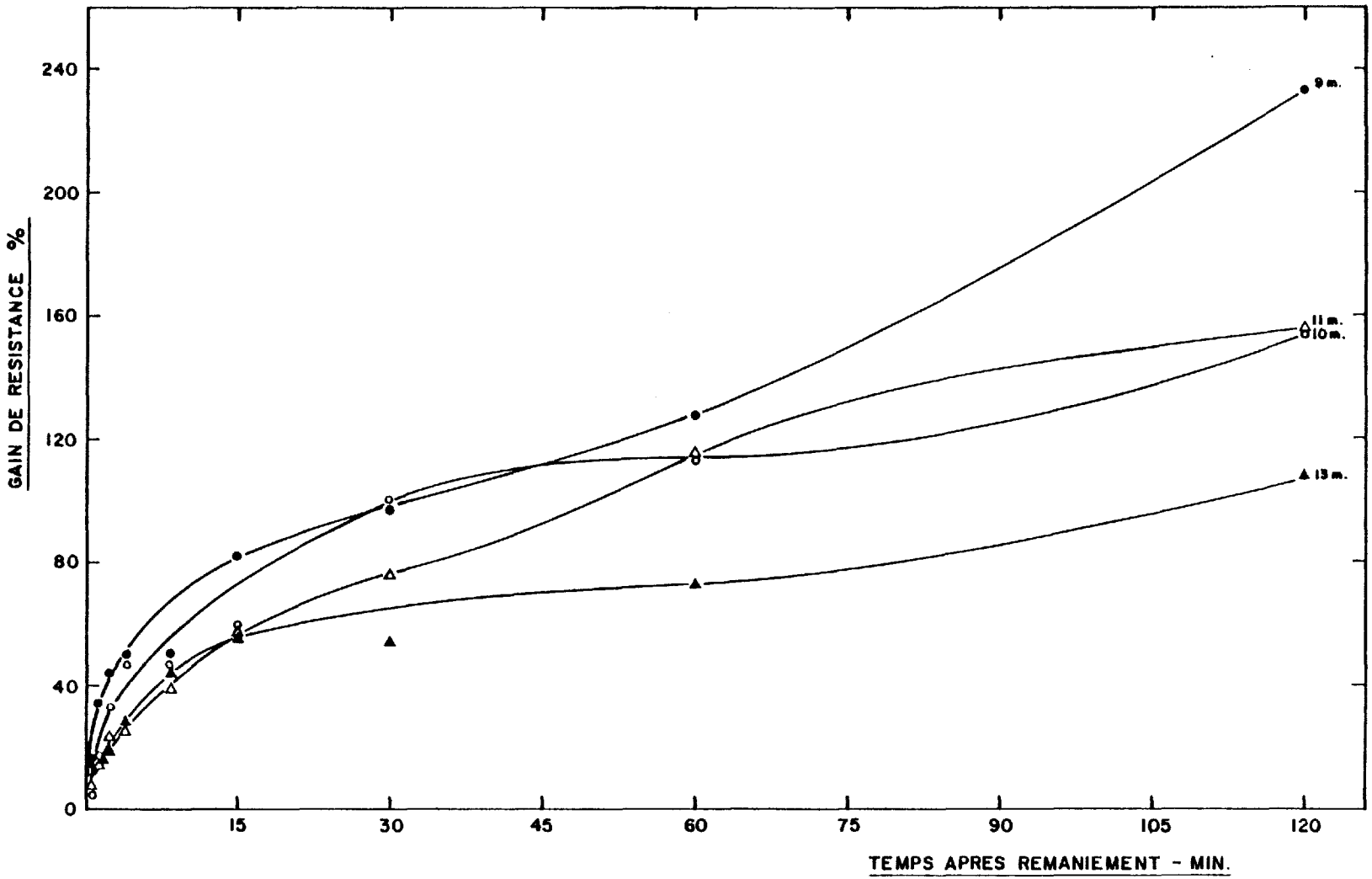

FIGURE 65. ESSAIS DE THIXOTROPIE - ST - URBAIN.

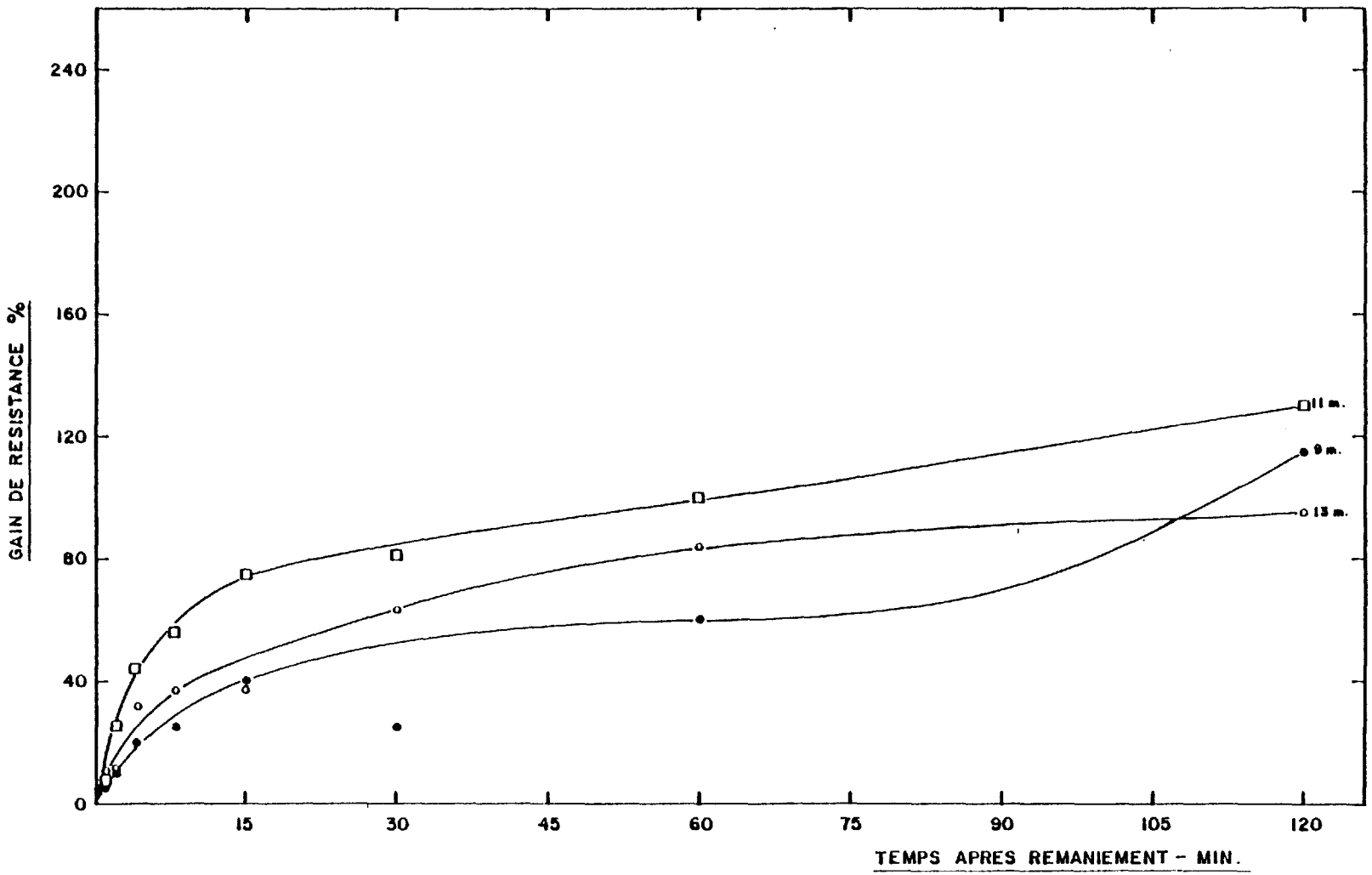

FIGURE 66. ESSAIS DE THIXOTROPIE - YAMASKA, FORAGE I.

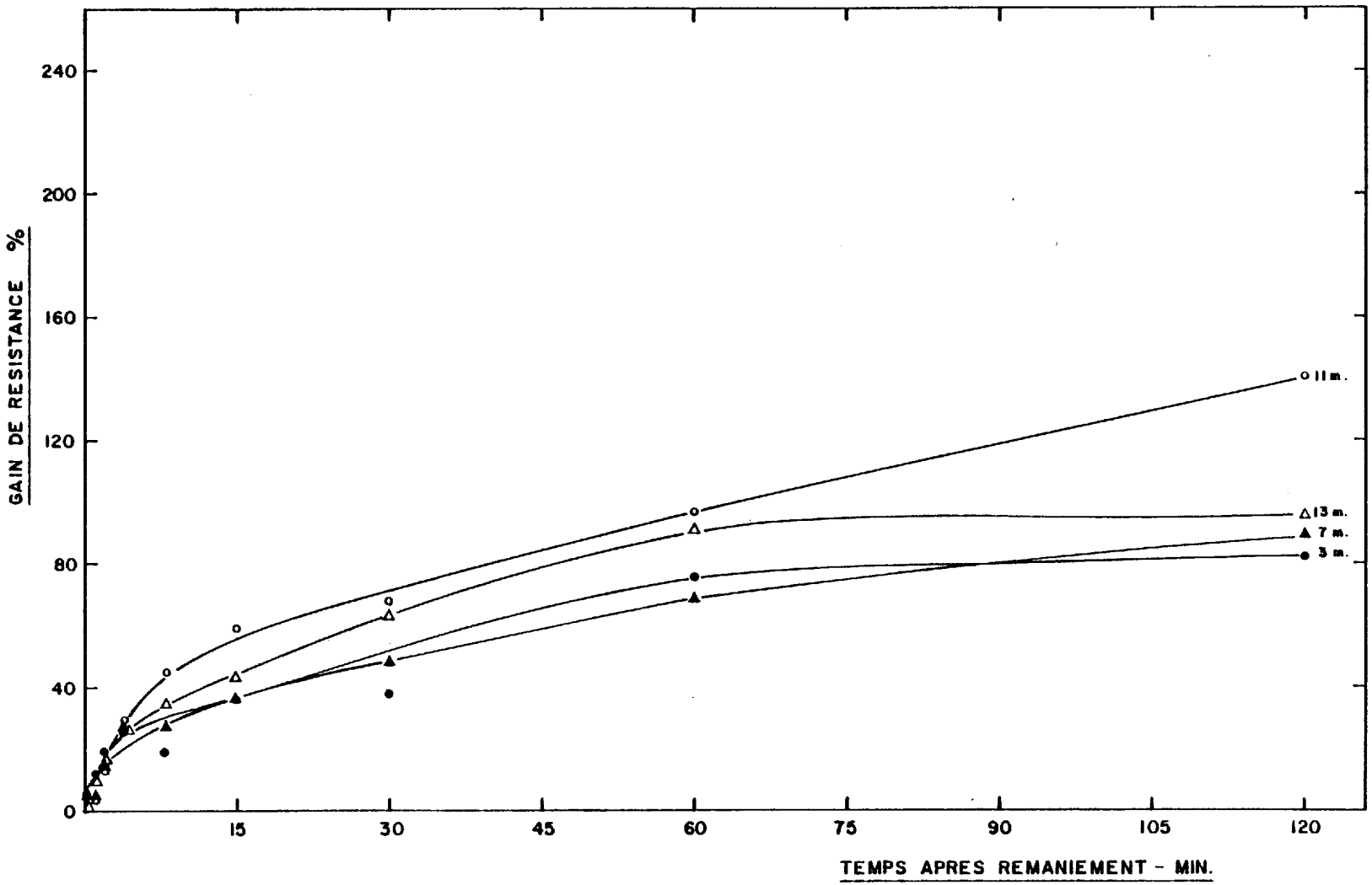

FIGURE 67. ESSAIS DE THIXOTROPIE - YAMASKA, FORAGE 2.

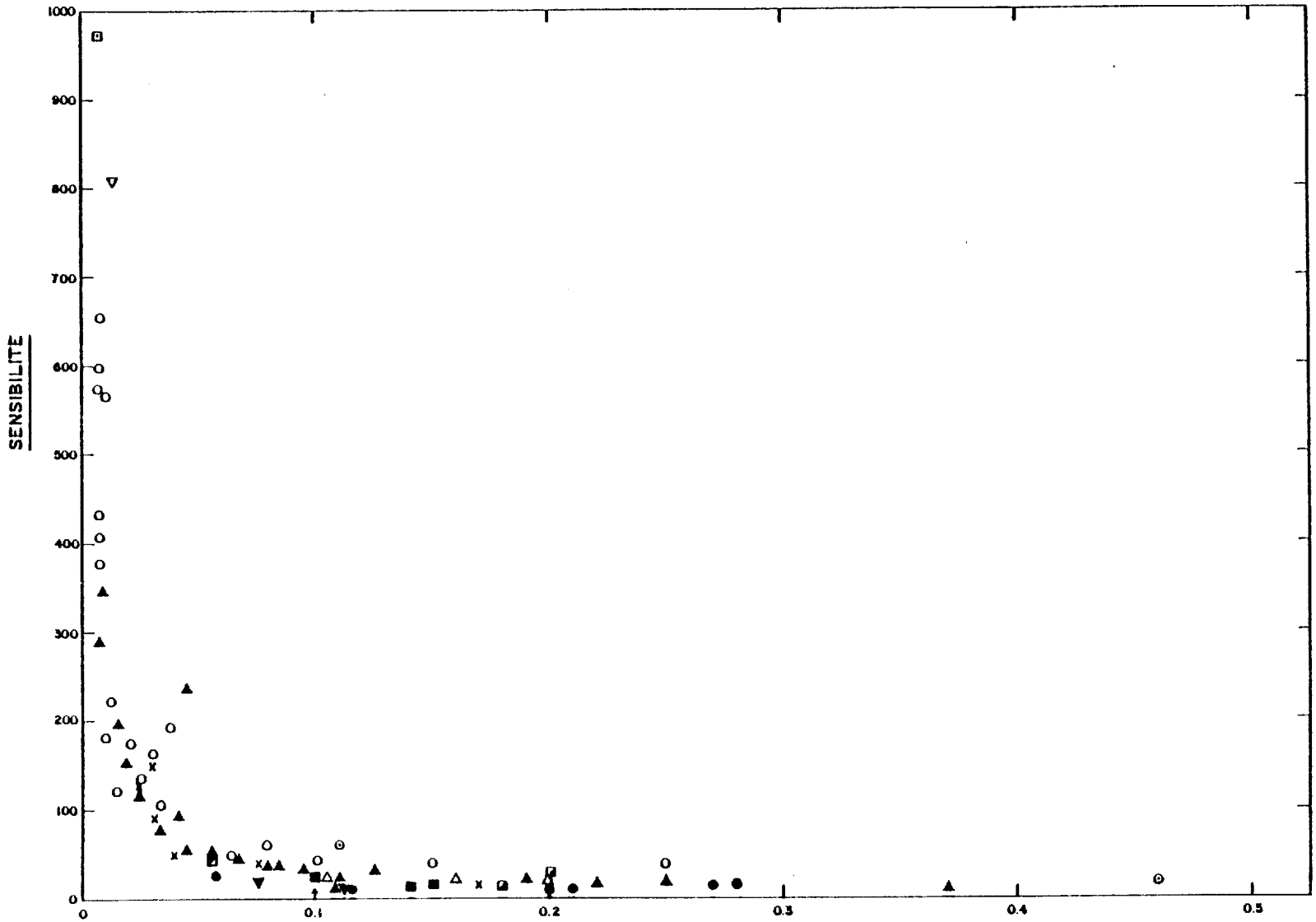

FIGURE 68. SENSIBILITE VS RESISTANCE REMANIEE.

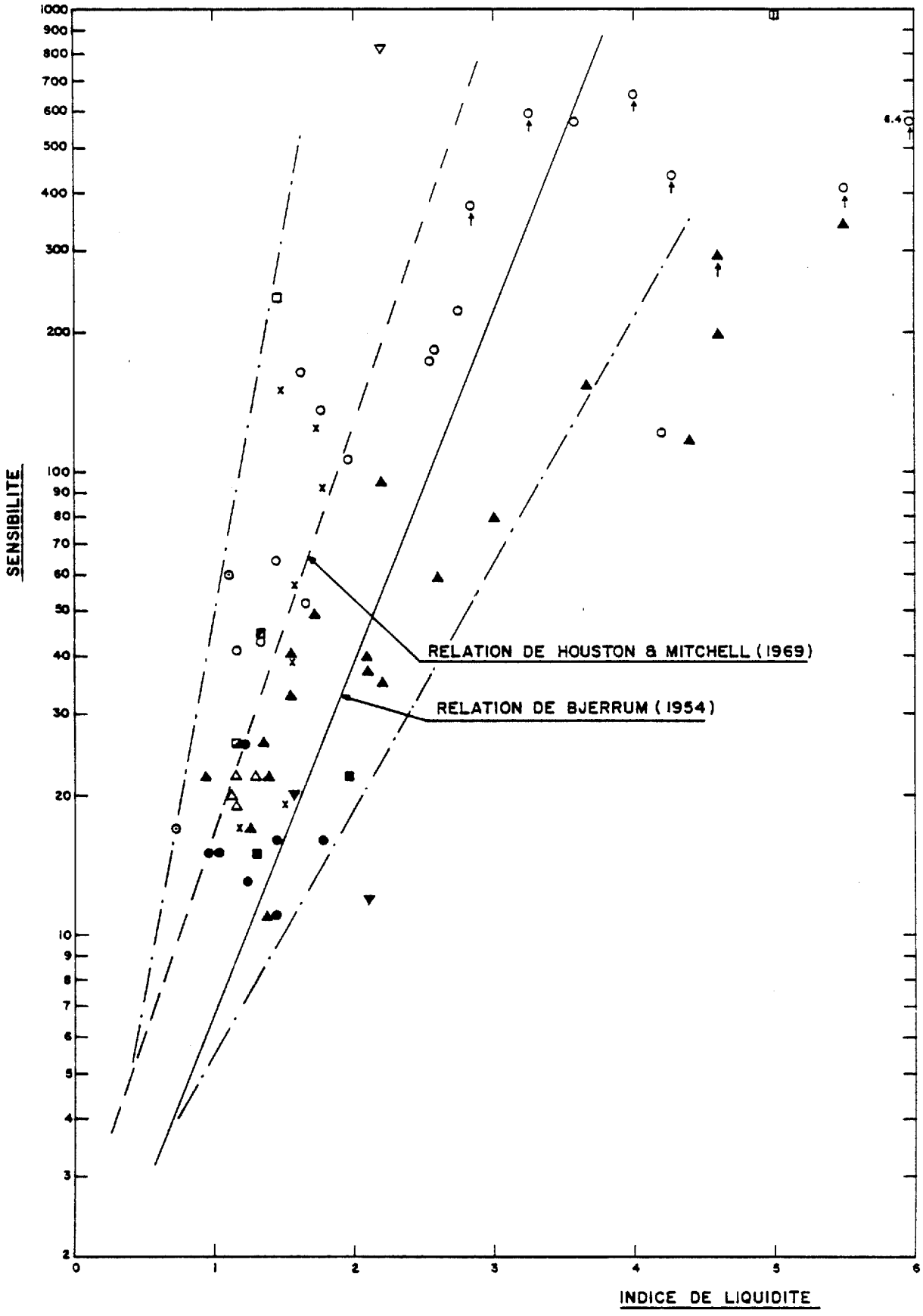

FIGURE 69. SENSIBILITE VS INDICE DE LIQUIDITE.

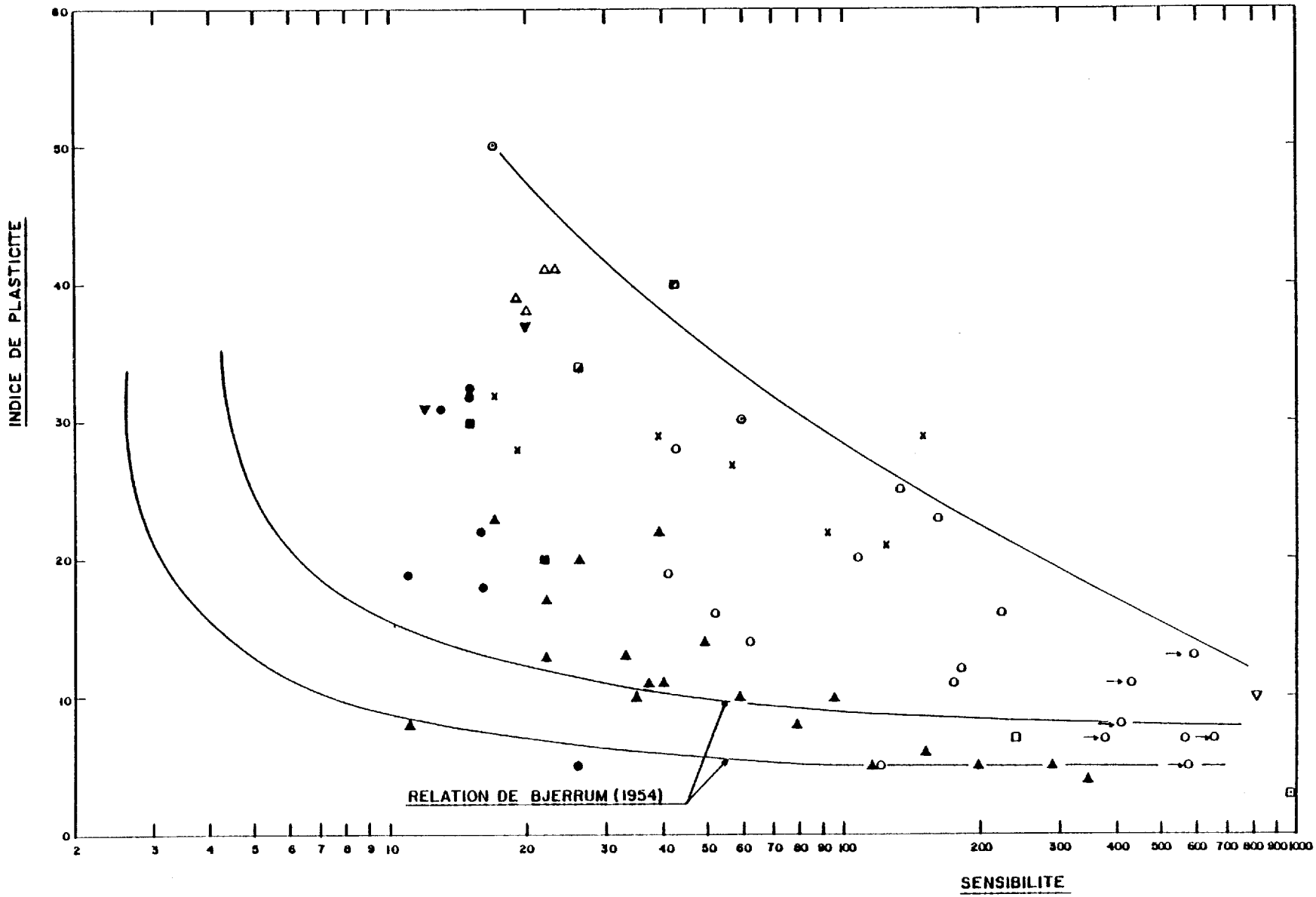

FIGURE 70. INDICE DE PLASTICITE VS SENSIBILITE.

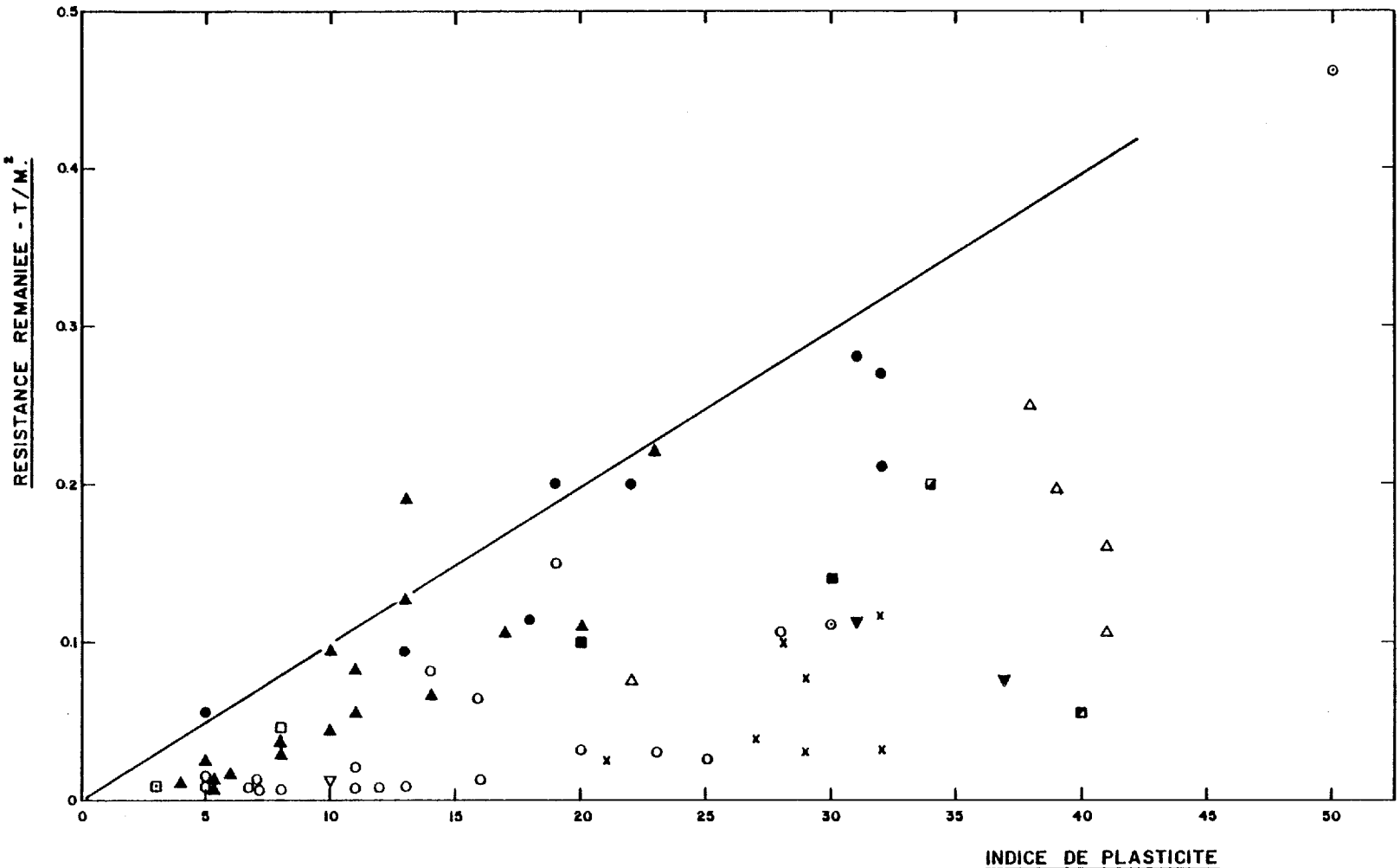

FIGURE 71. RESISTANCE REMANIEE VS INDICE DE PLASTICITE

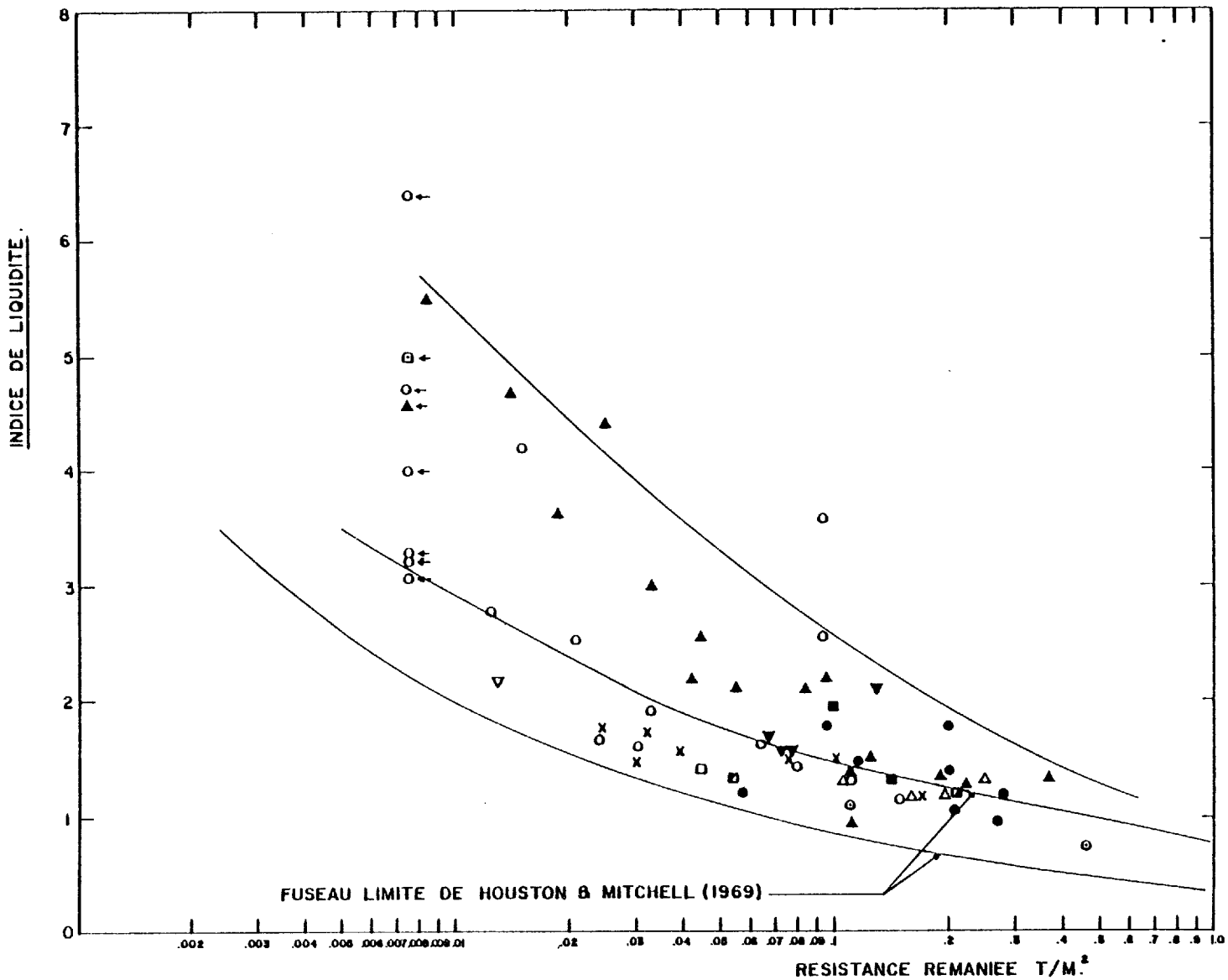

FIGURE 72. INDICE DE LIQUIDITE VS RESISTANCE REMANIEE.

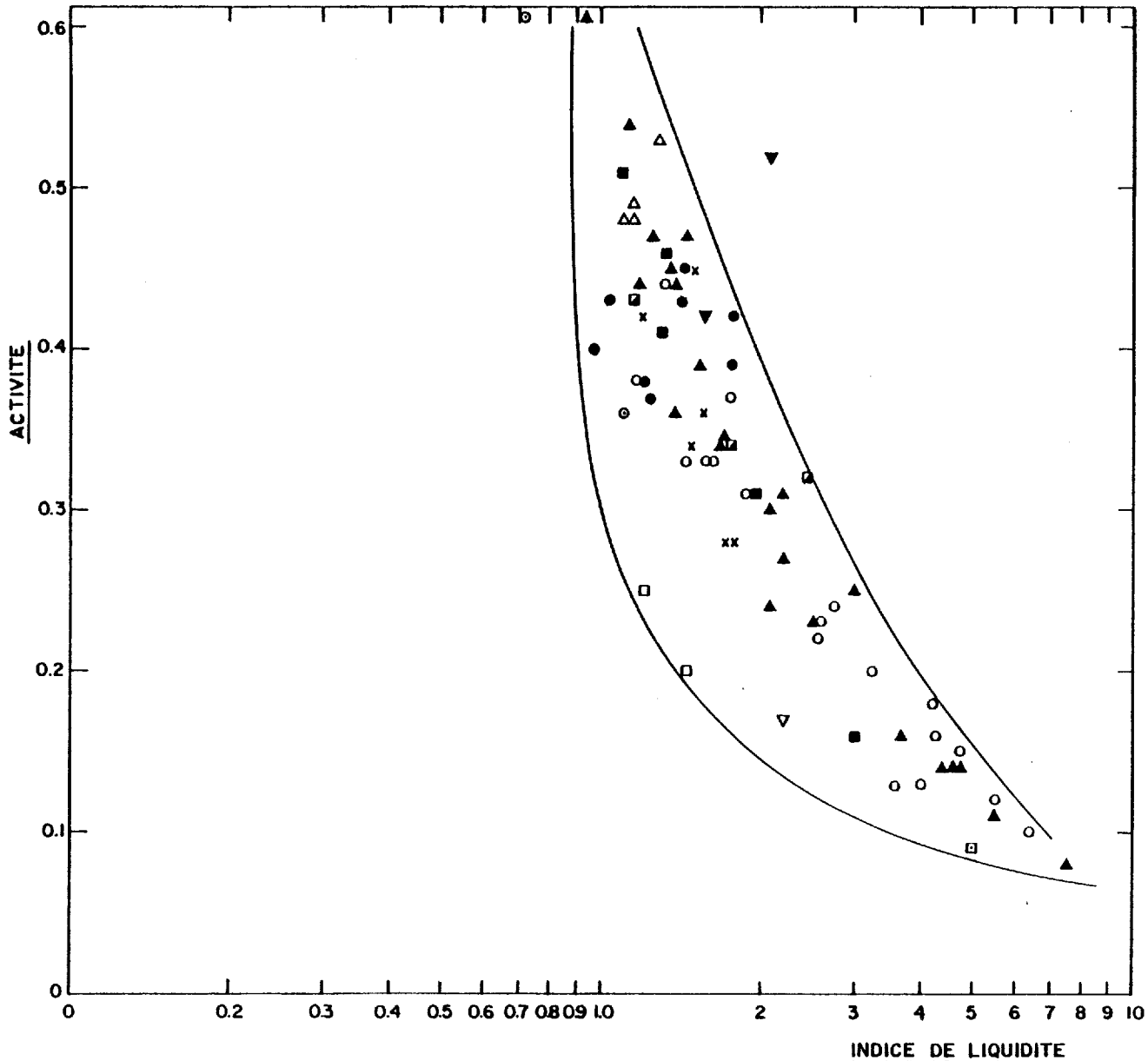

FIGURE 73 ACTIVITE VS INDICE DE LIQUIDITE.

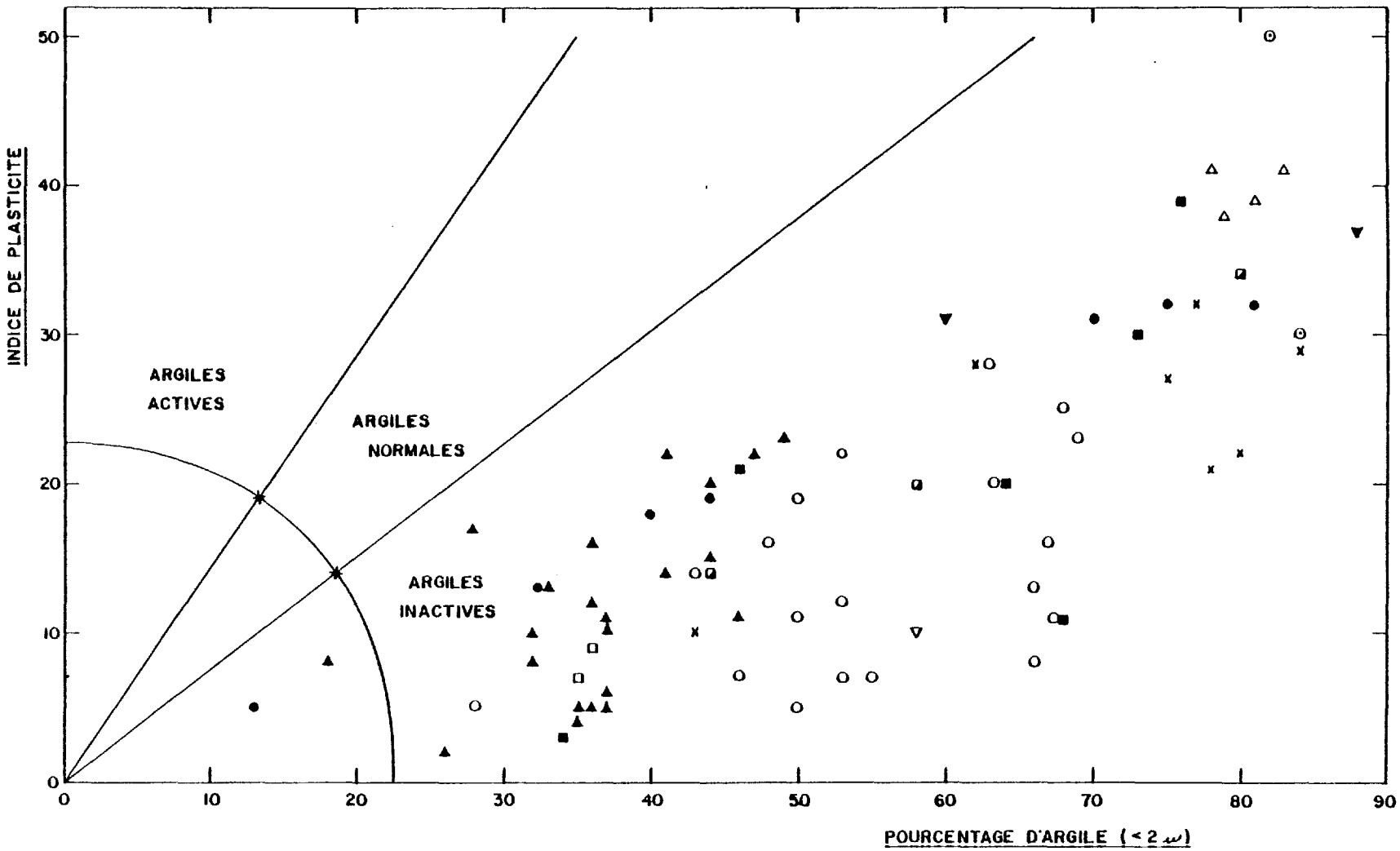

FIGURE 74. INDICE DE PLASTICITE VS POURCENTAGE D'ARGILE.

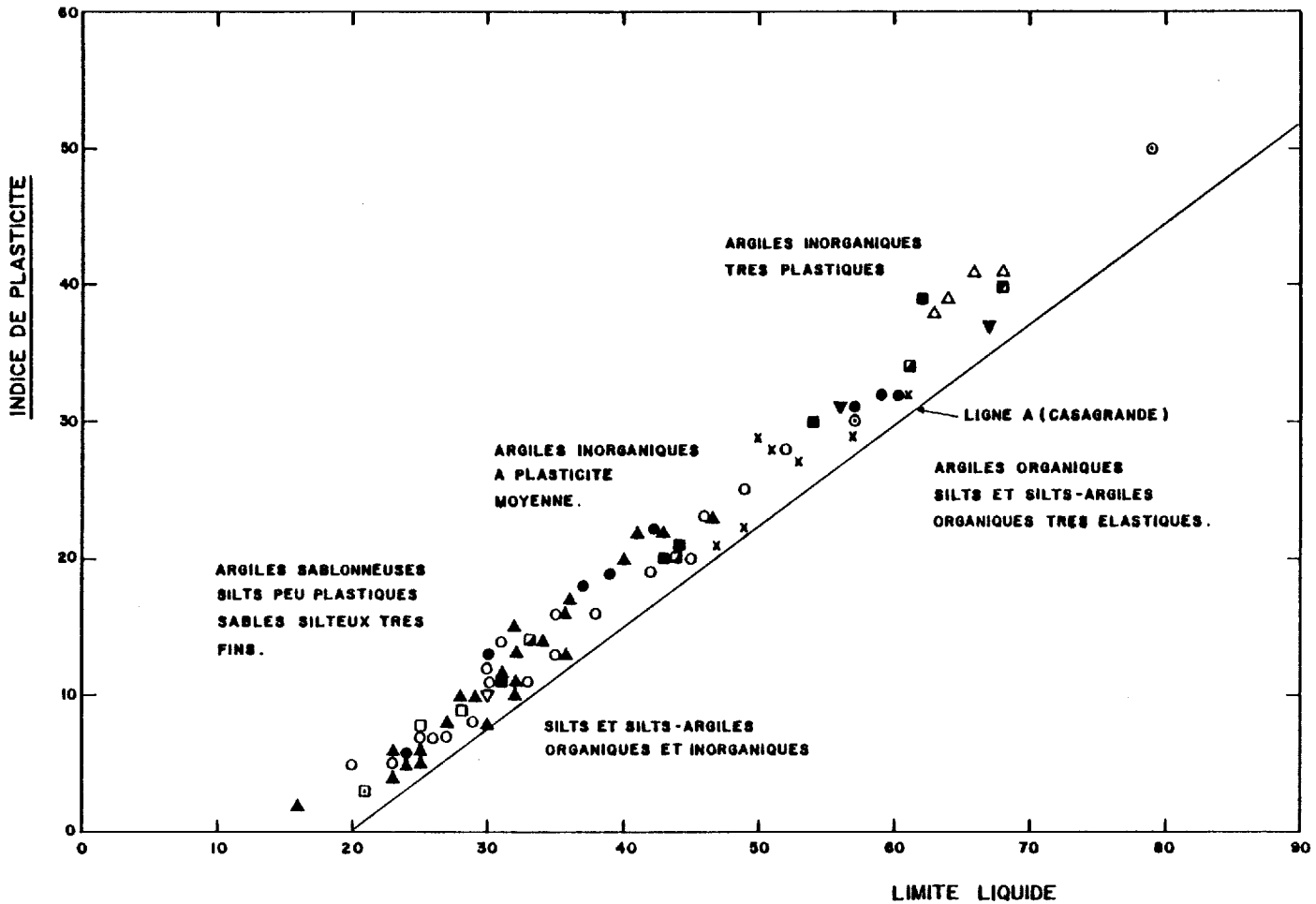

FIGURE 75. INDICE DE PLASTICITE VS LIMITE LIQUIDE

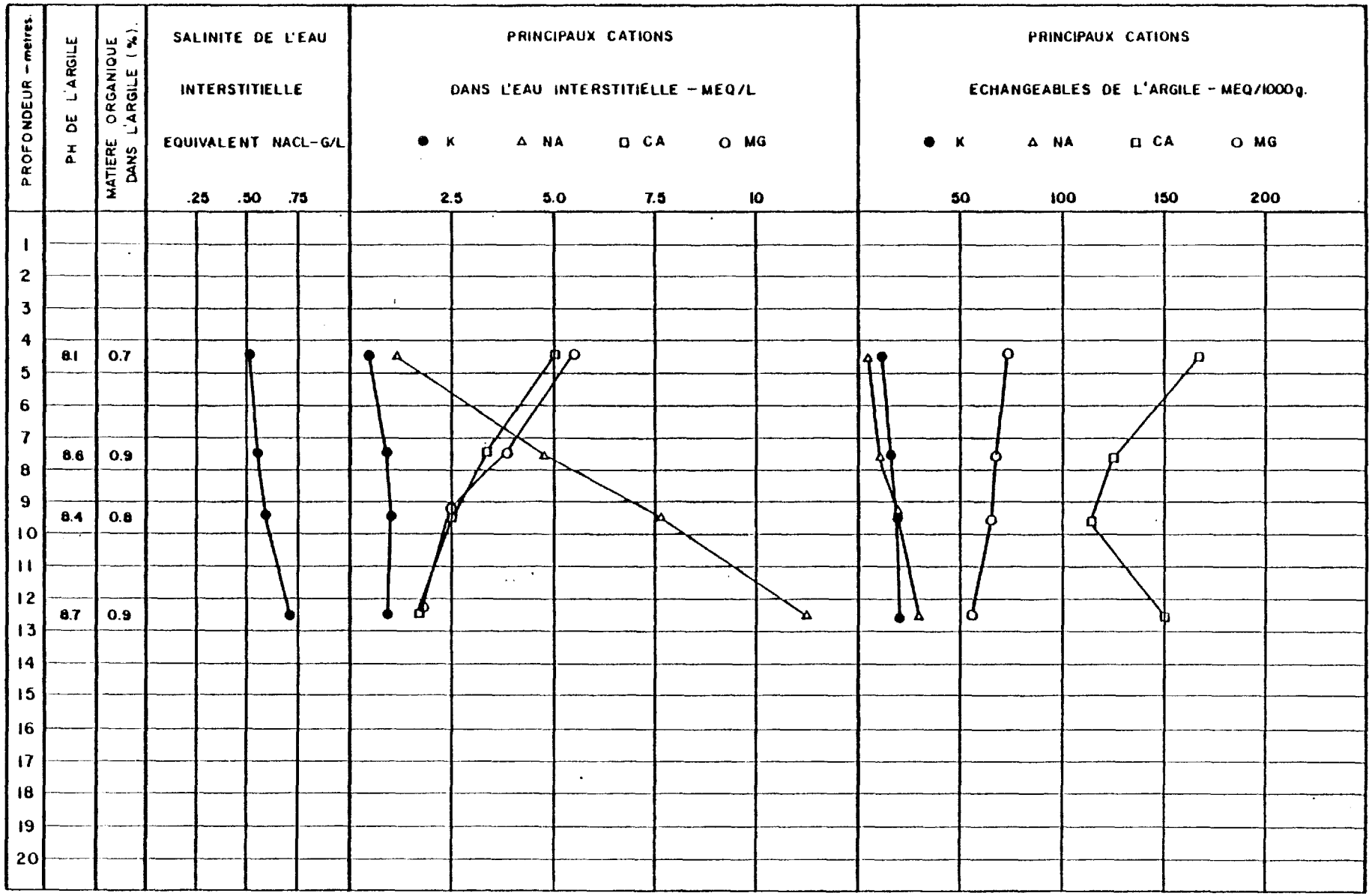

FIGURE 76. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, LE COTEAU.

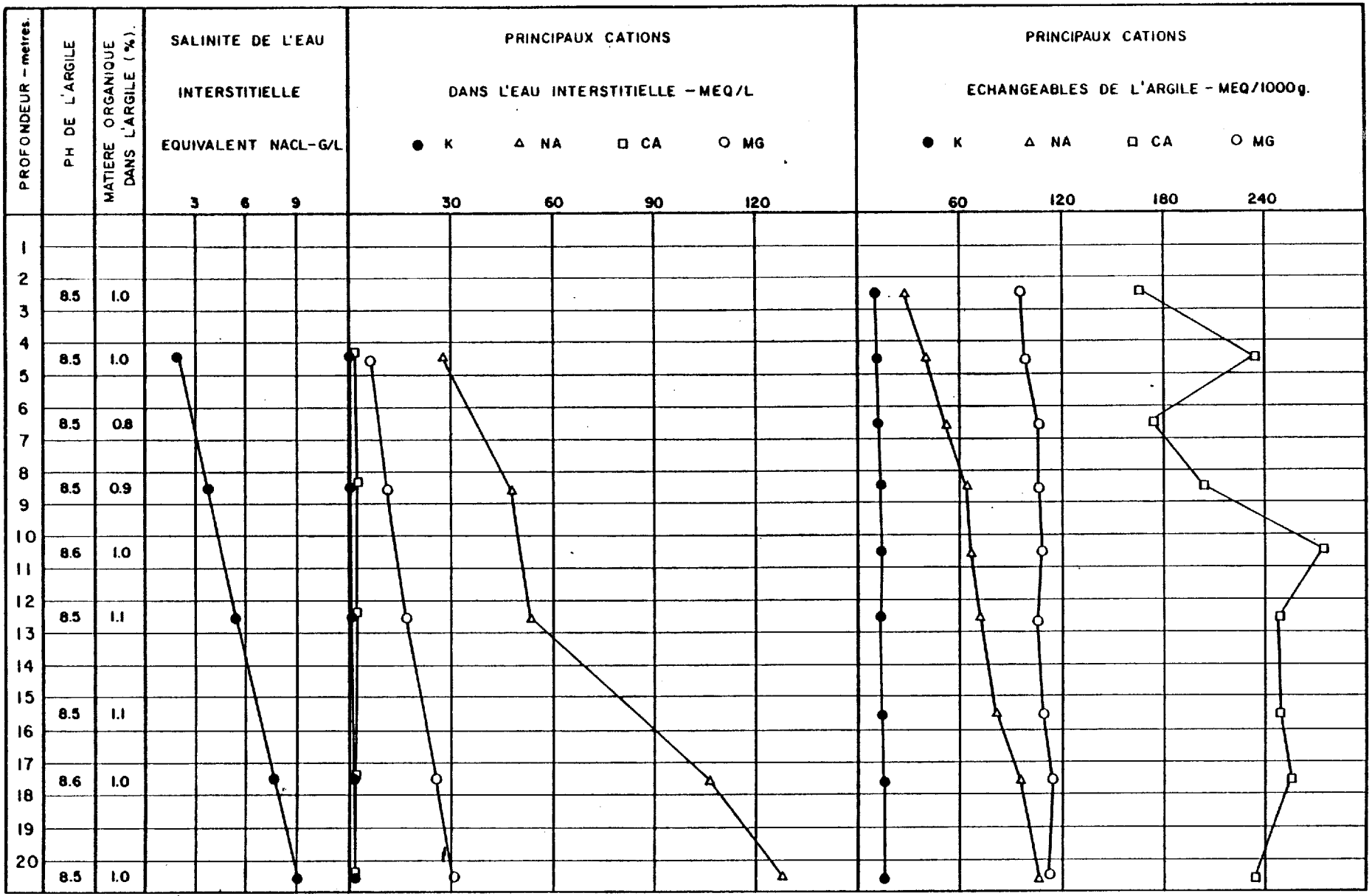

FIGURE 77. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, LOUISEVILLE, FORAGE 1.

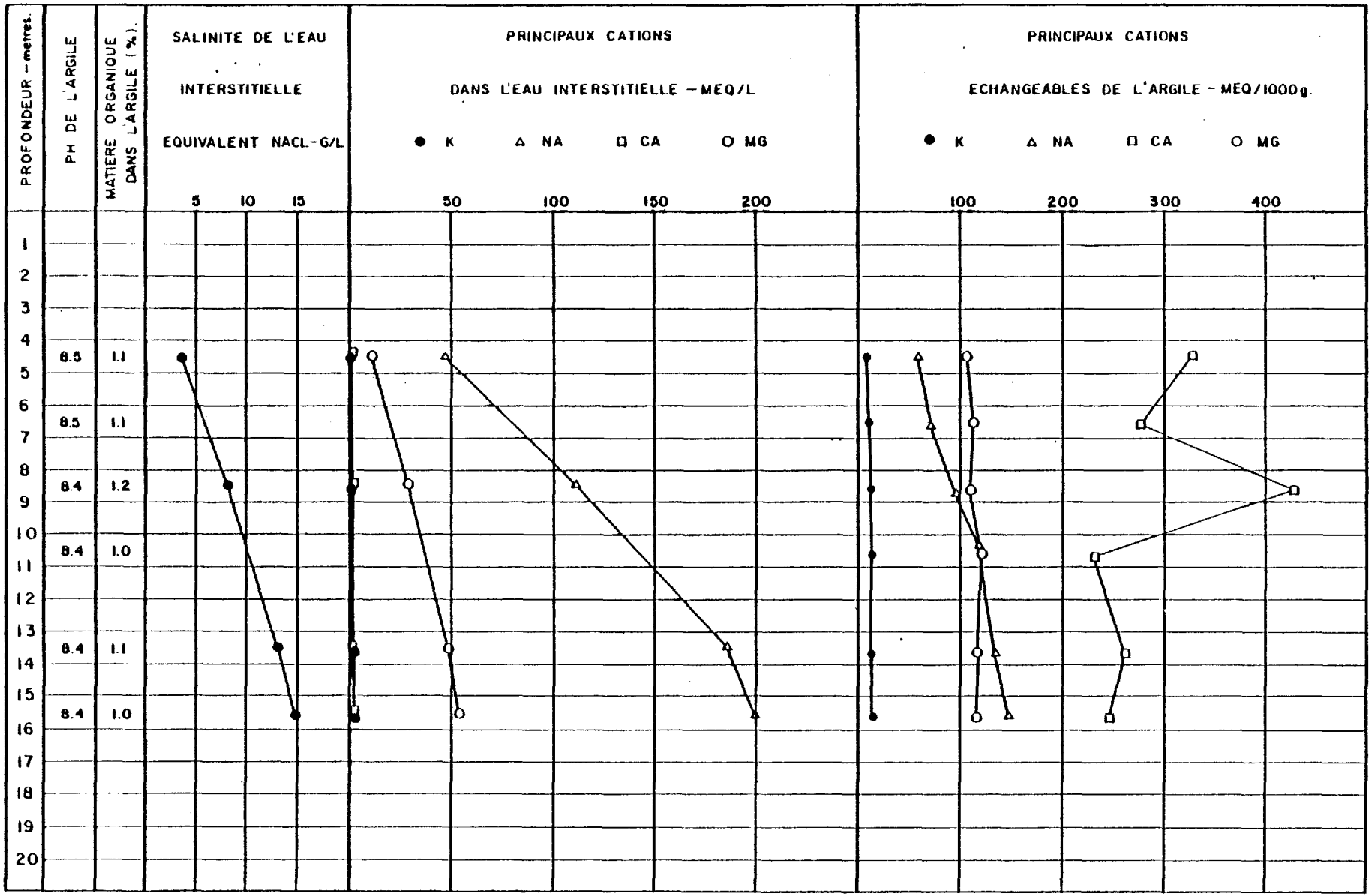

FIGURE 78. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, LOUISEVILLE, FORAGE 2.

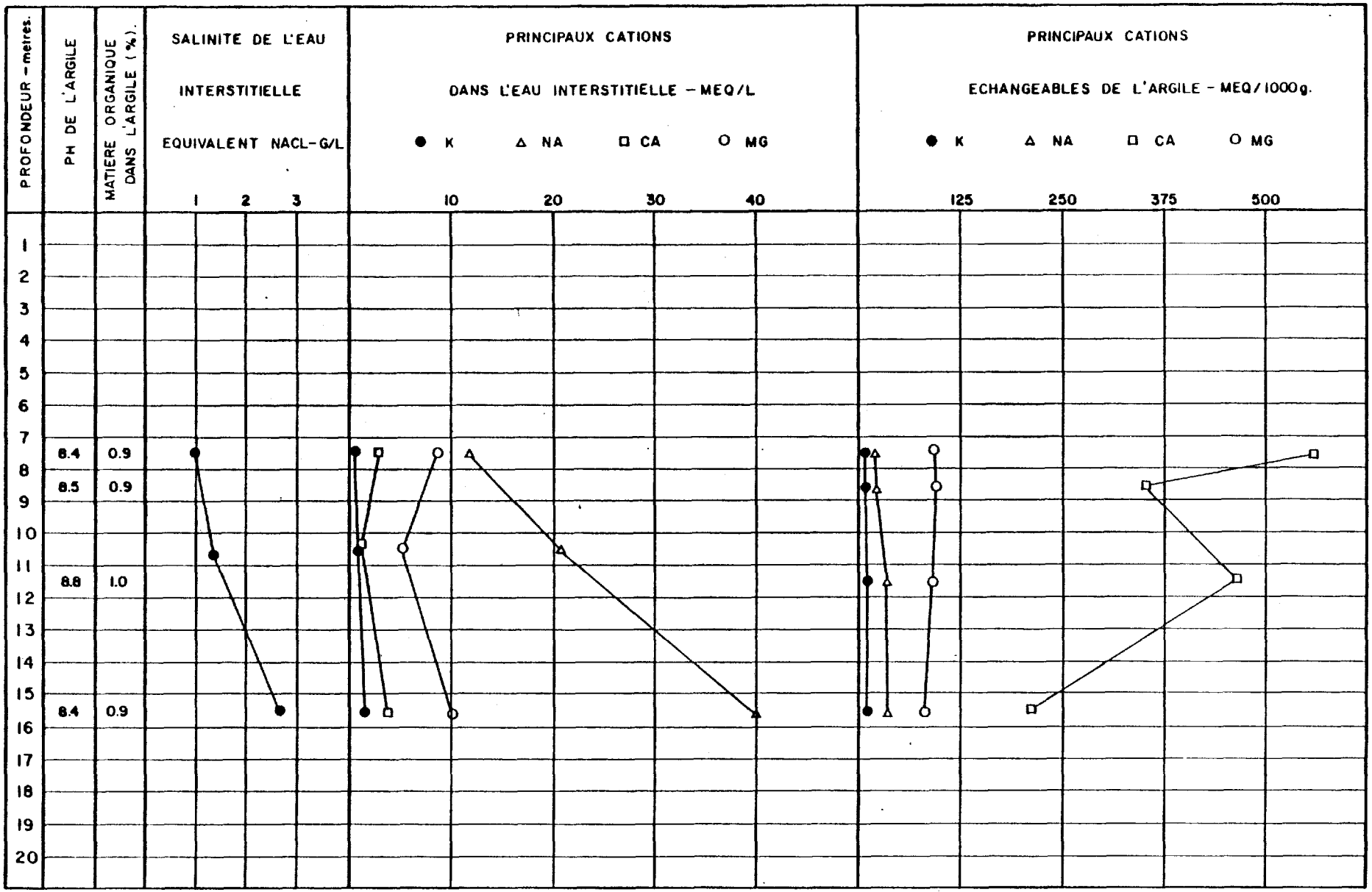

FIGURE 79. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, NICOLET, FORAGE 3.

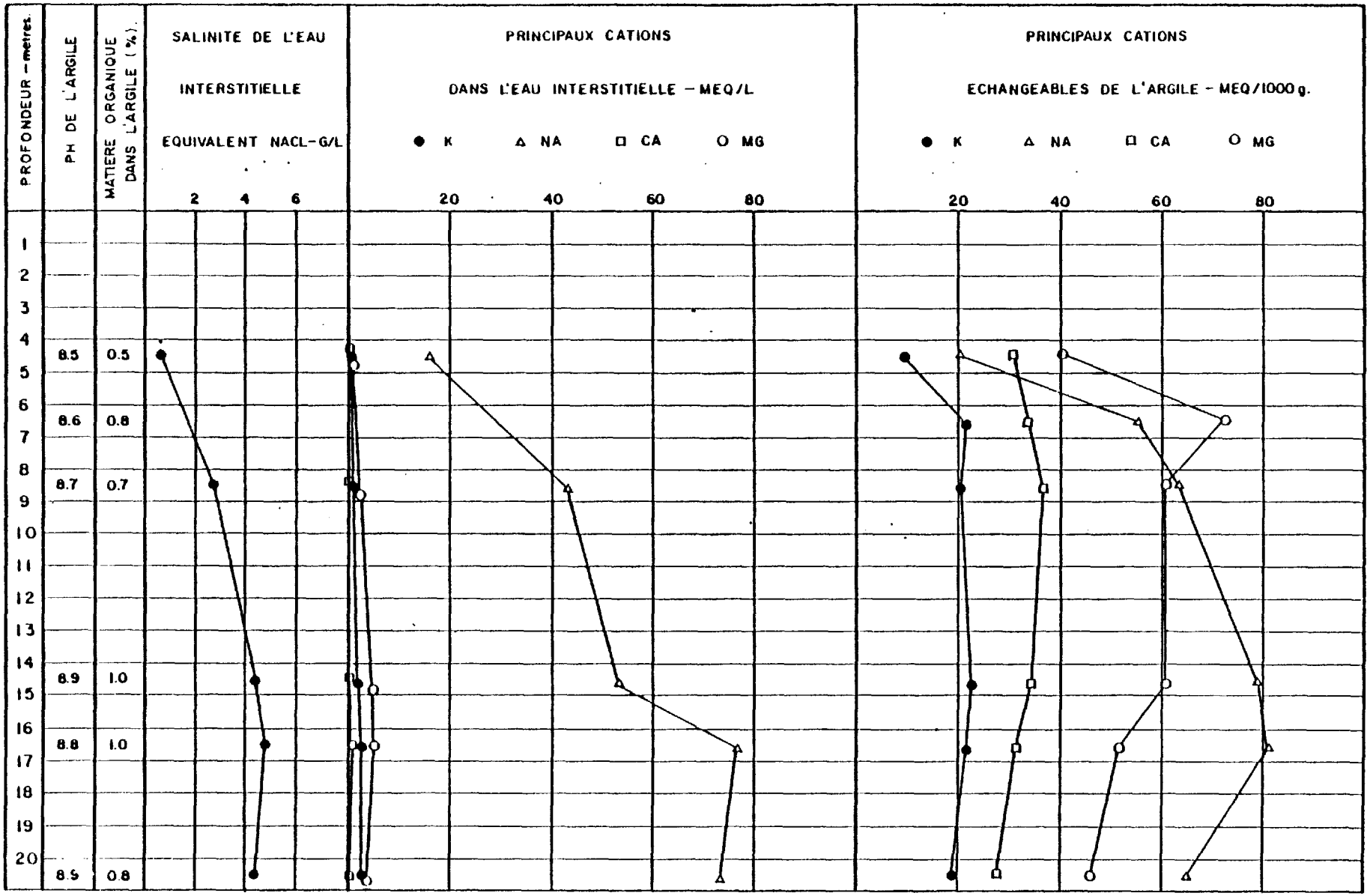

FIGURE 80. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 1.

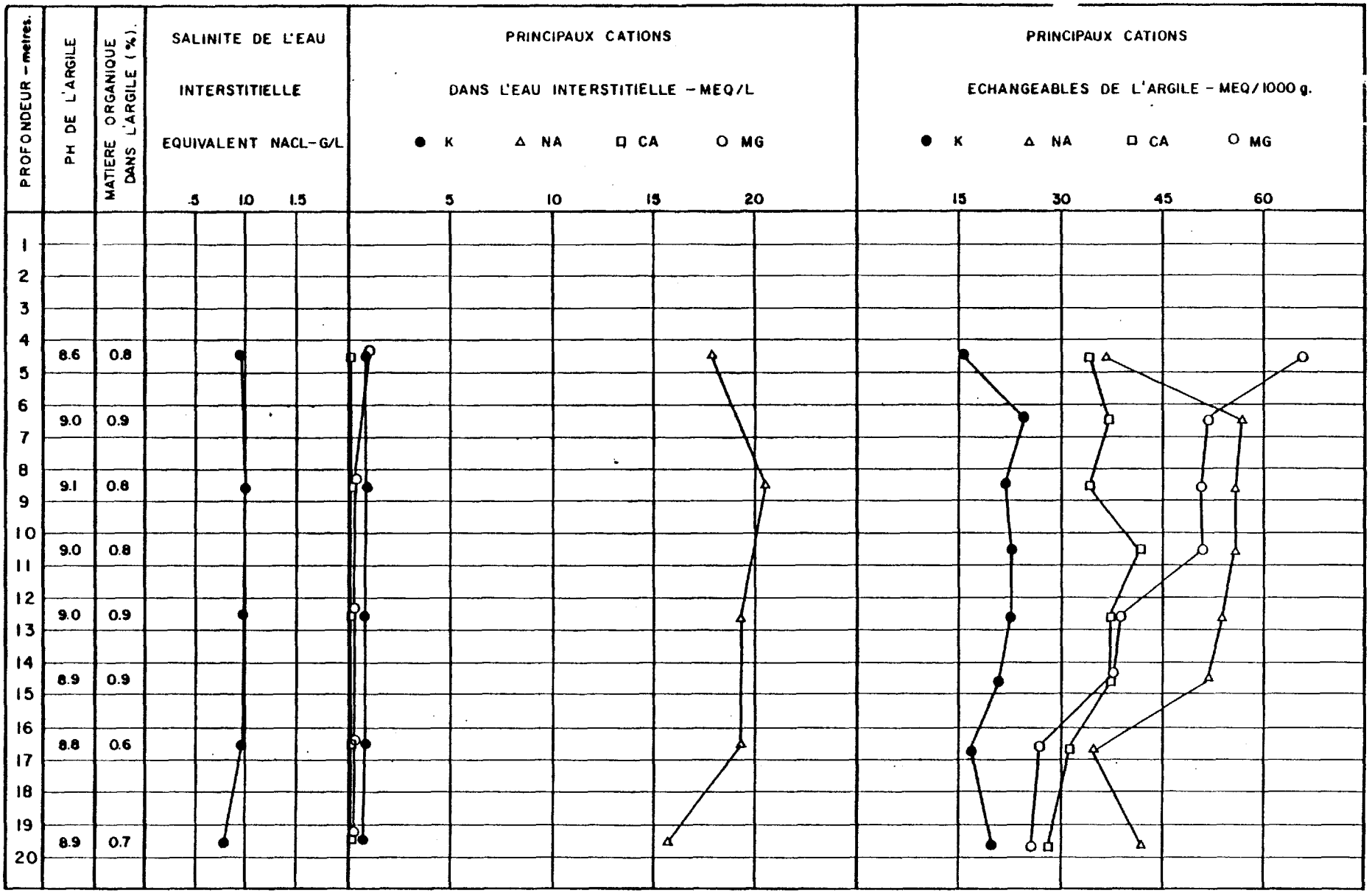

FIGURE 81. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 3.

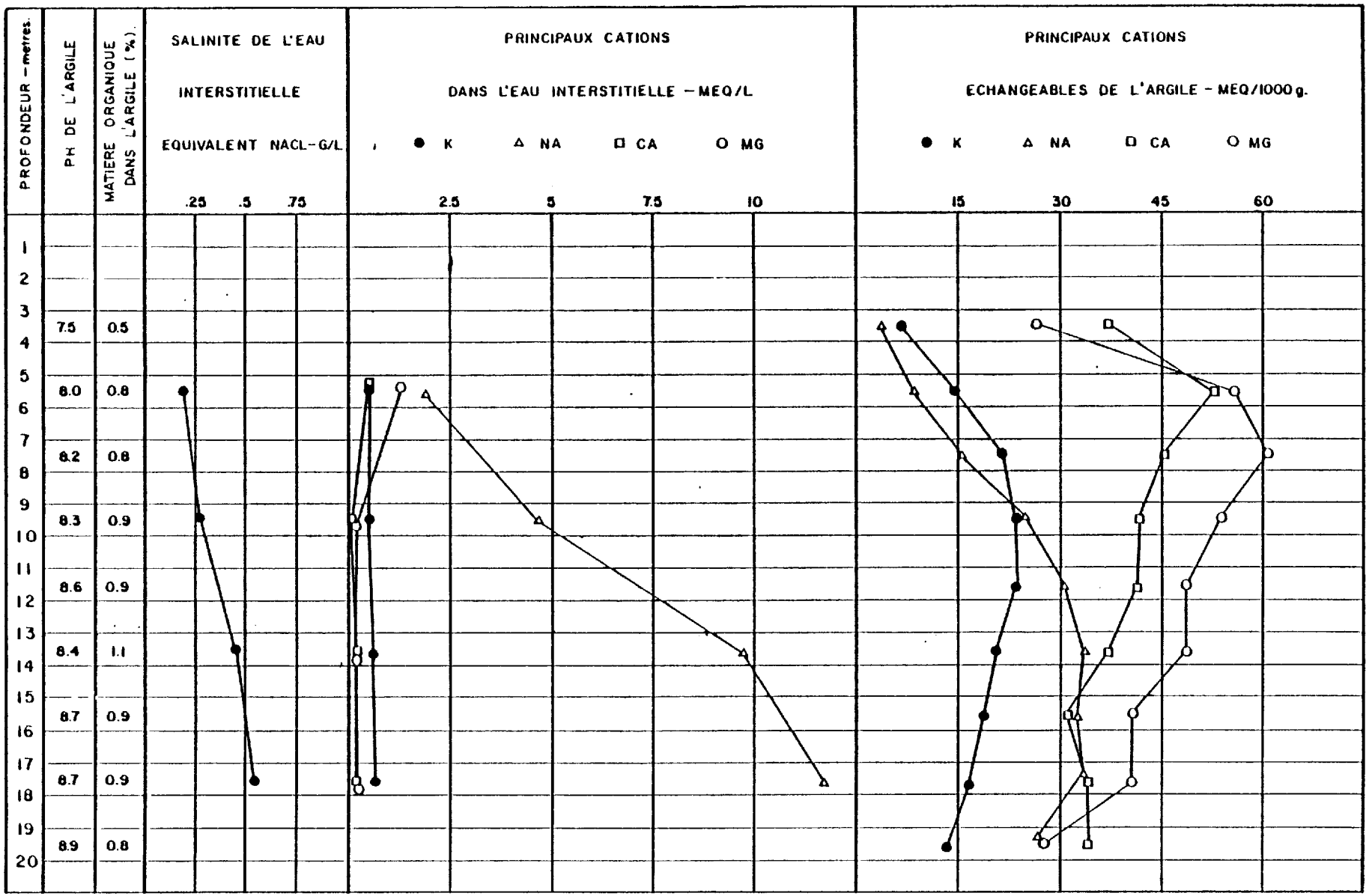

FIGURE 82. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 4.

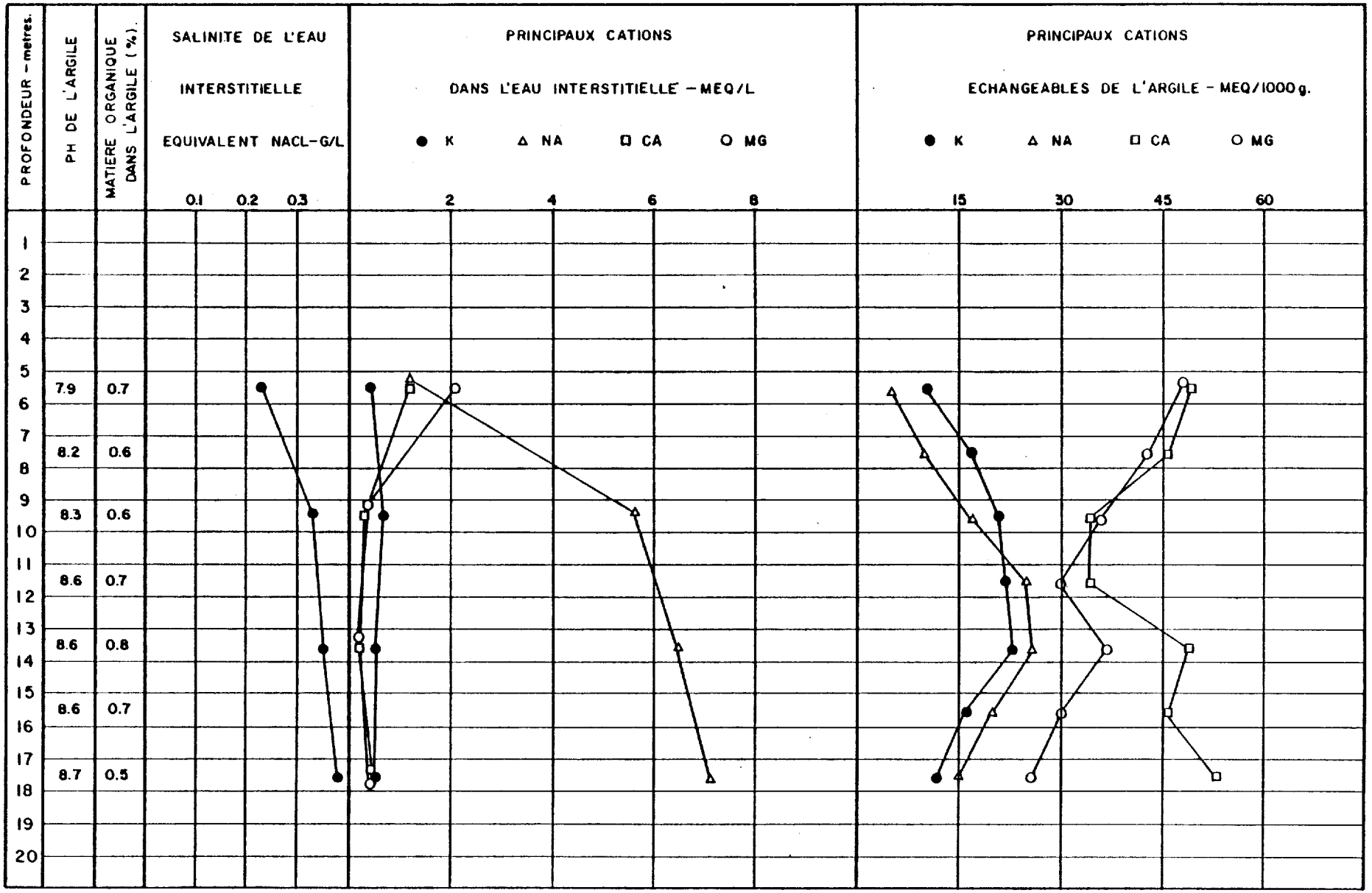

FIGURE 83. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 5.

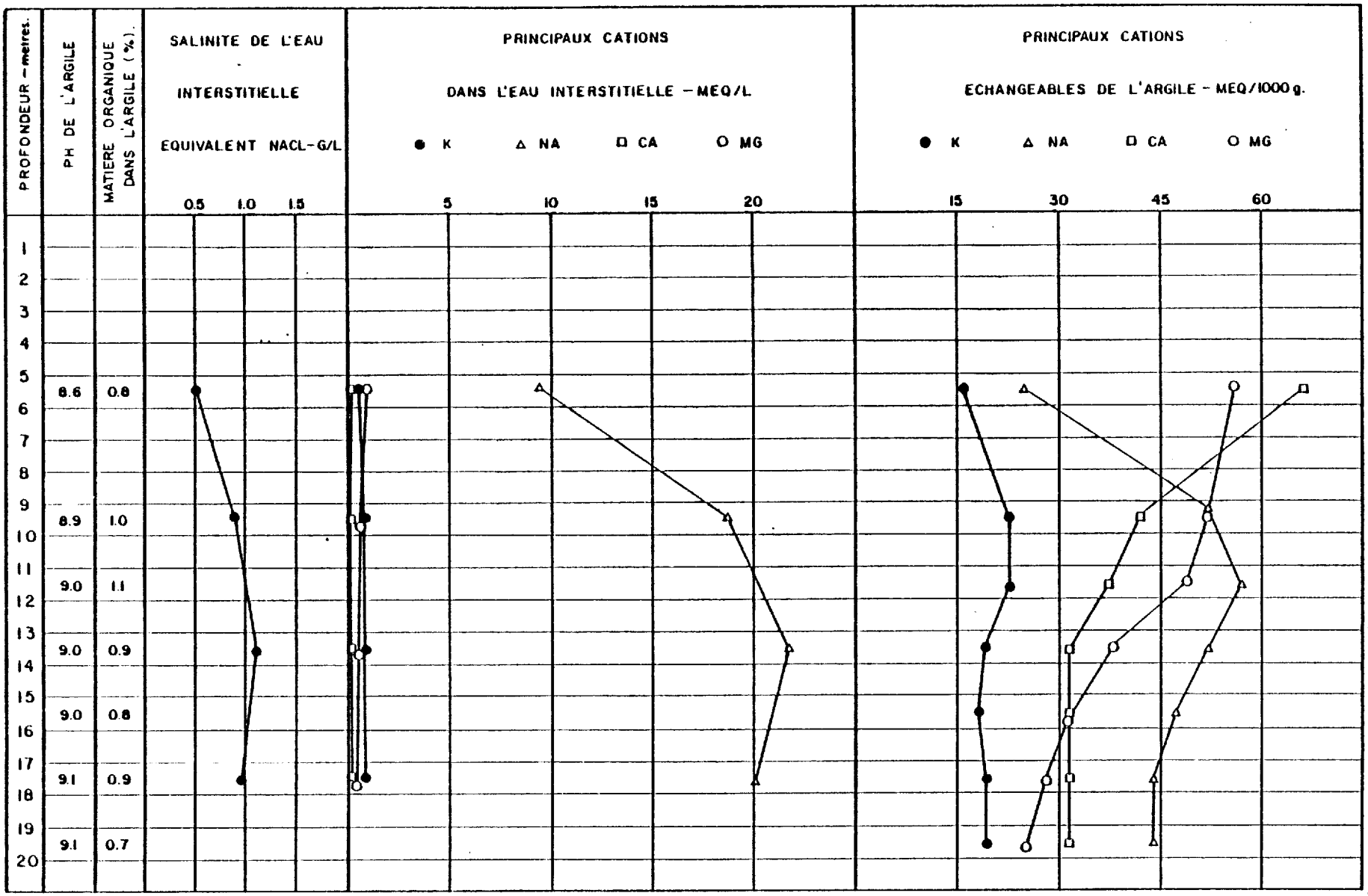

FIGURE 84. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 6.

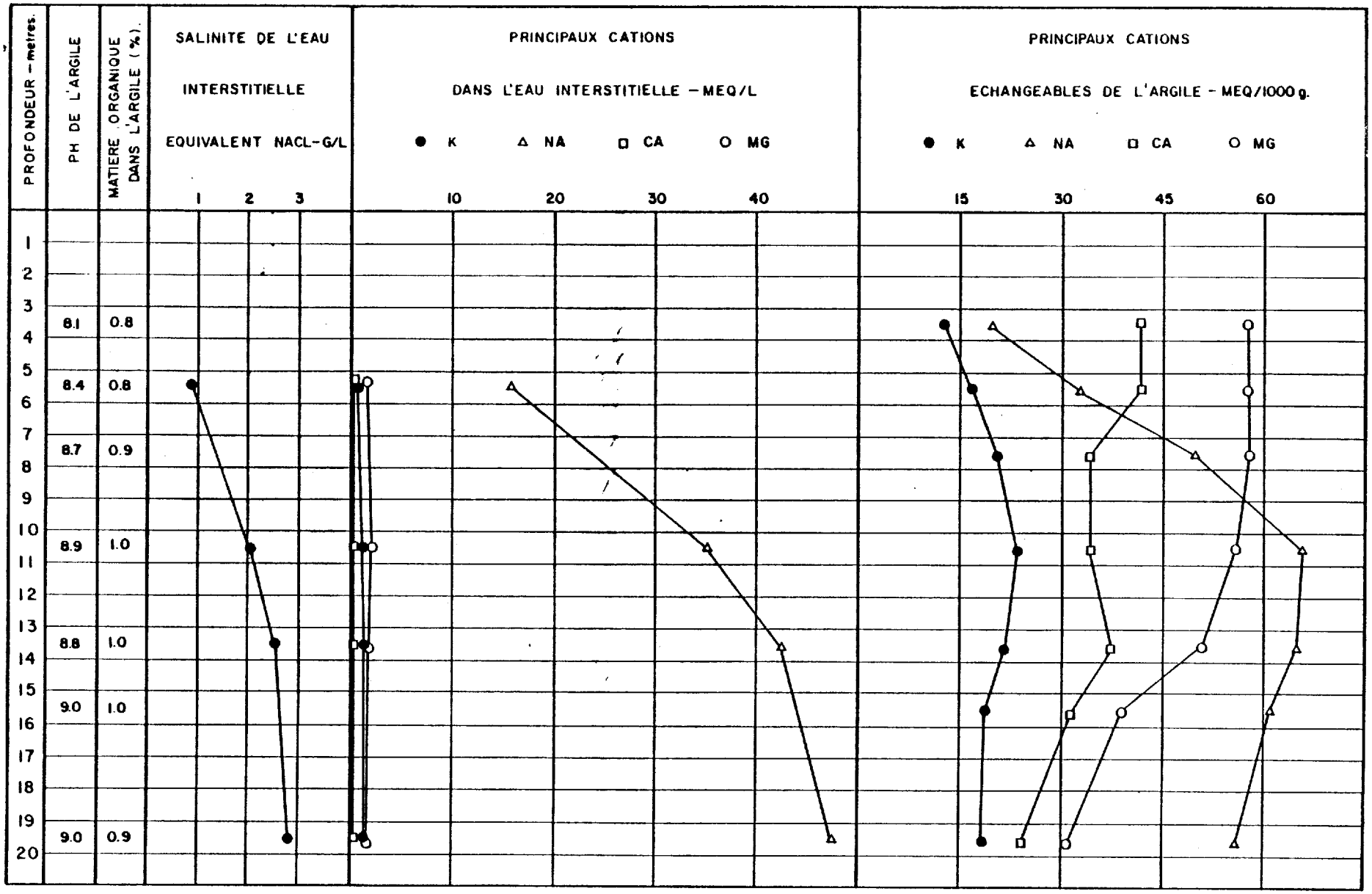

FIGURE 85. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, ST-AMBROISE, FORAGE 7.

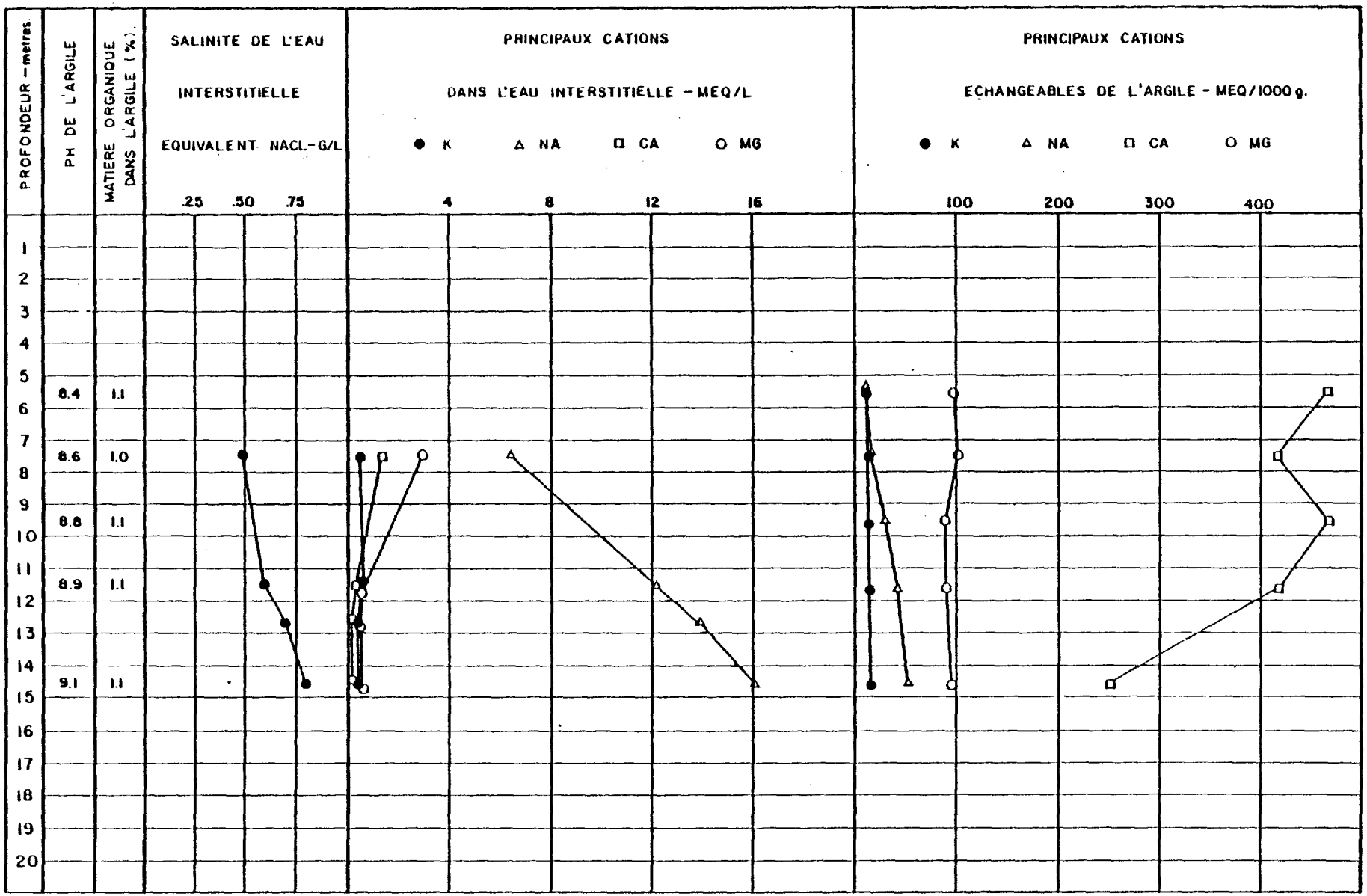

FIGURE 86. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, ST-LOUIS, FORAGE 1.

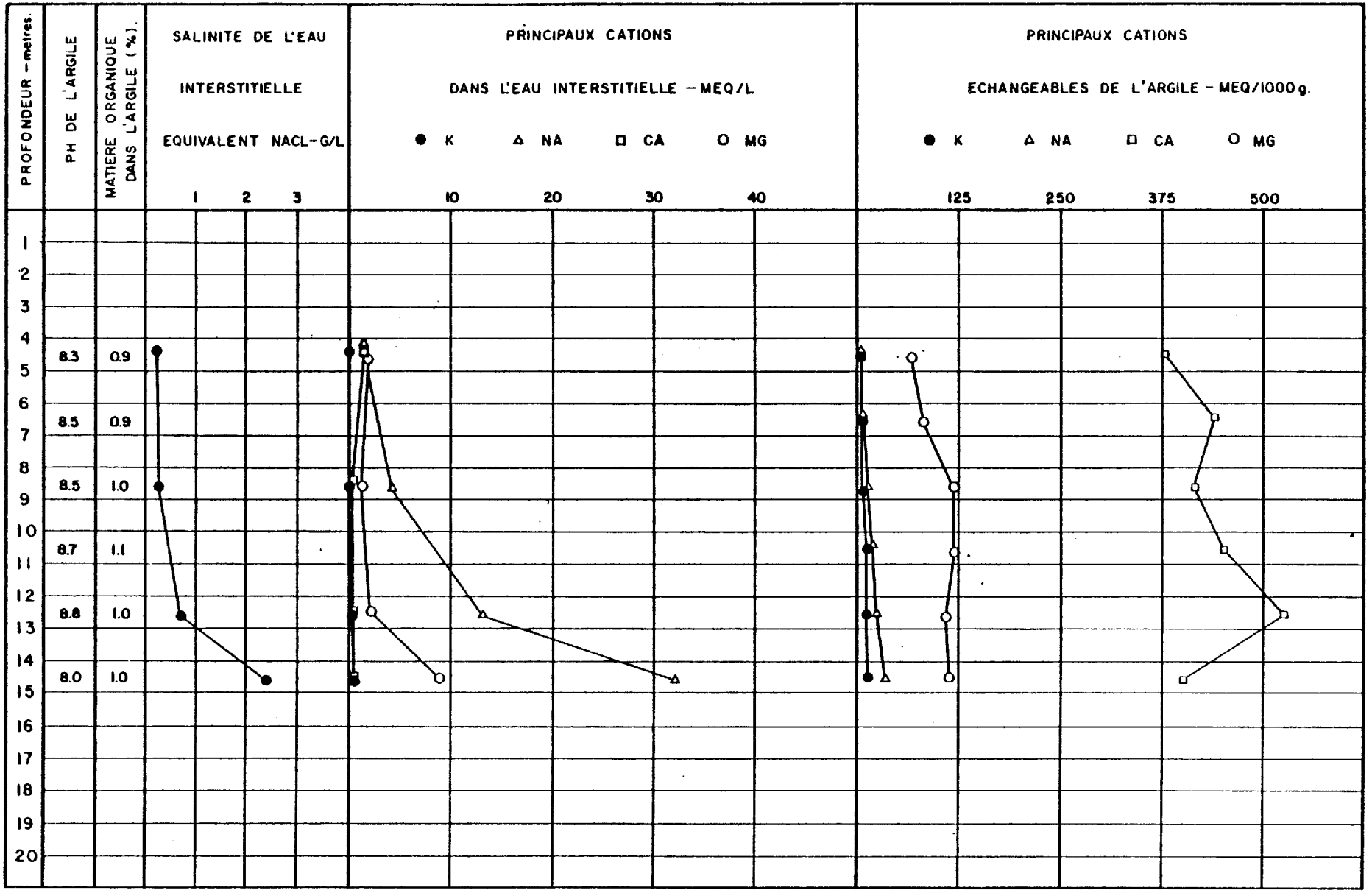

FIGURE 87. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, ST-LOUIS, FORAGE 2.

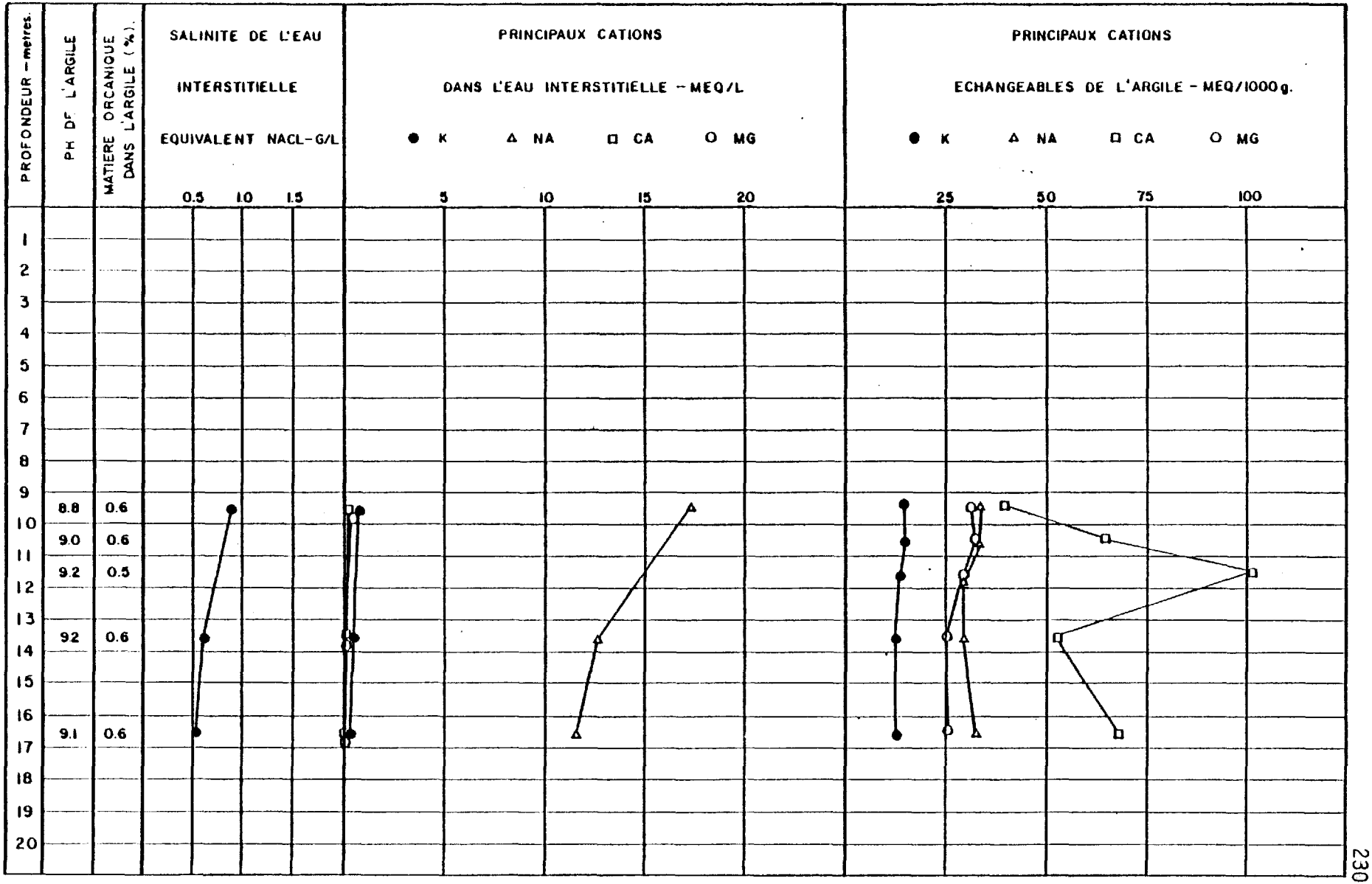

FIGURE 88. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, ST-URBAIN, FORAGE DE L'UNIVERSITE DE SHERBROOKE.

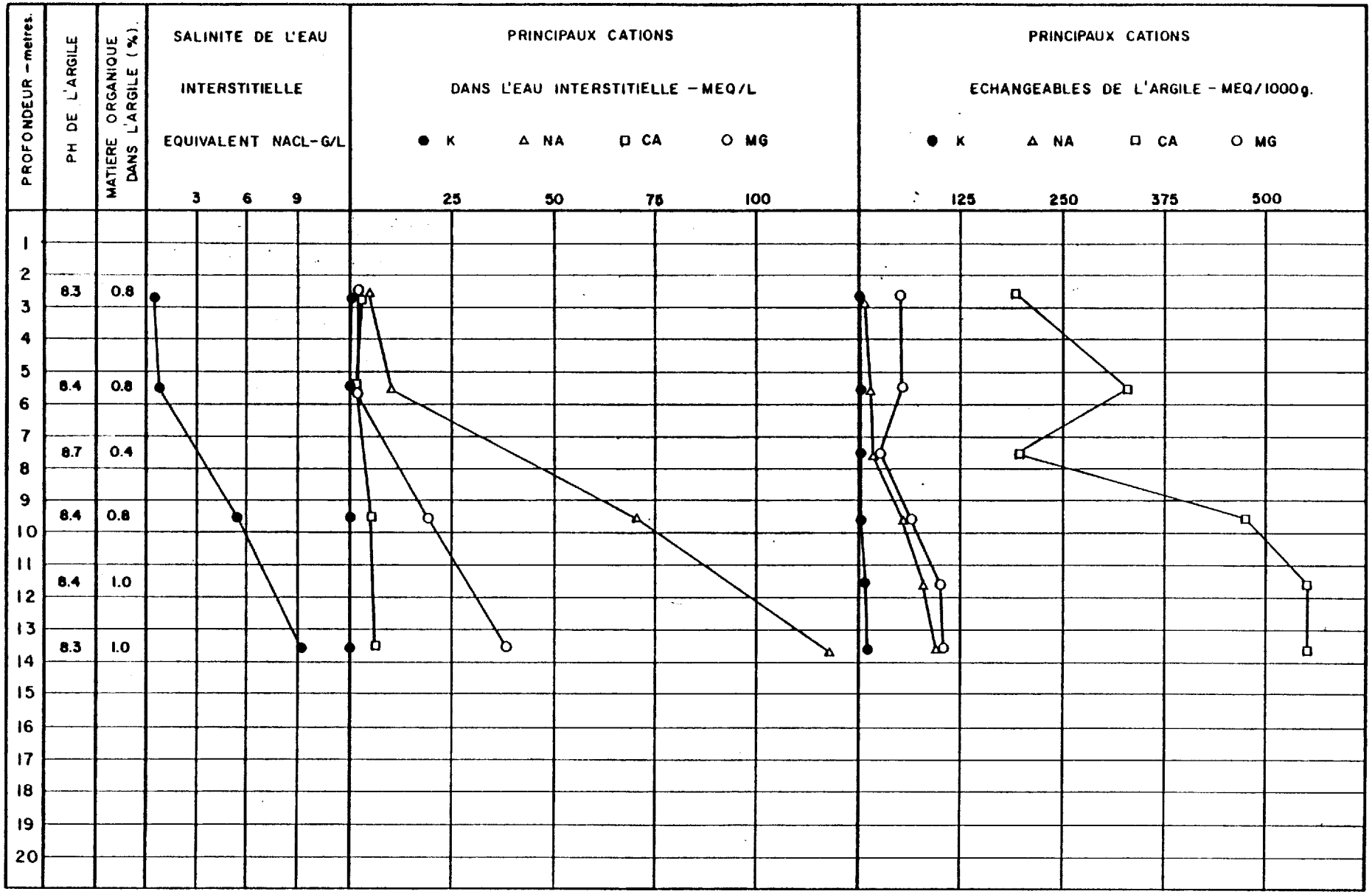

FIGURE 89. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, YAMAŞKA, FORAGE 1.

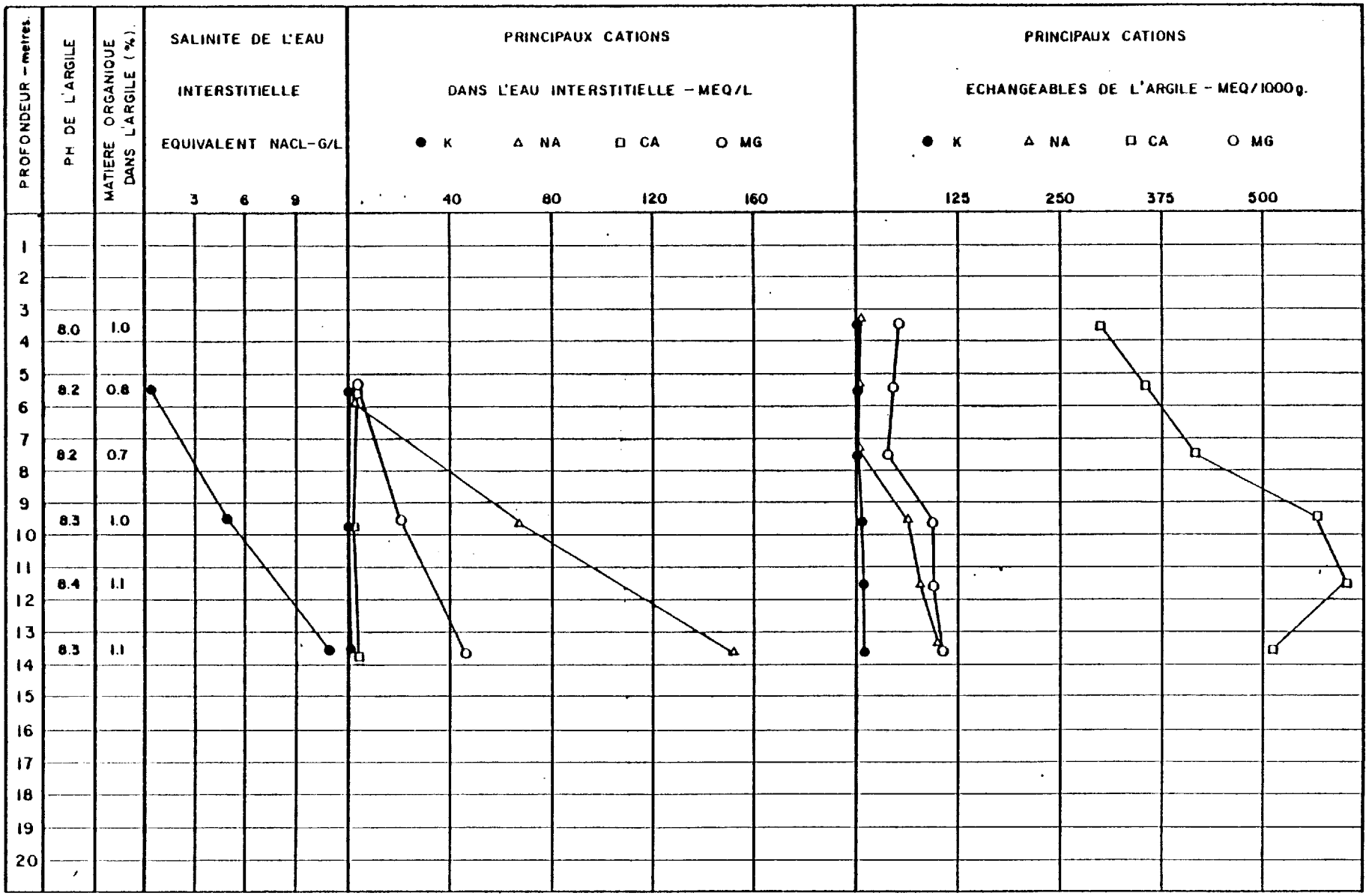

FIGURE 90. CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES, YAMASKA, FORAGE 2.

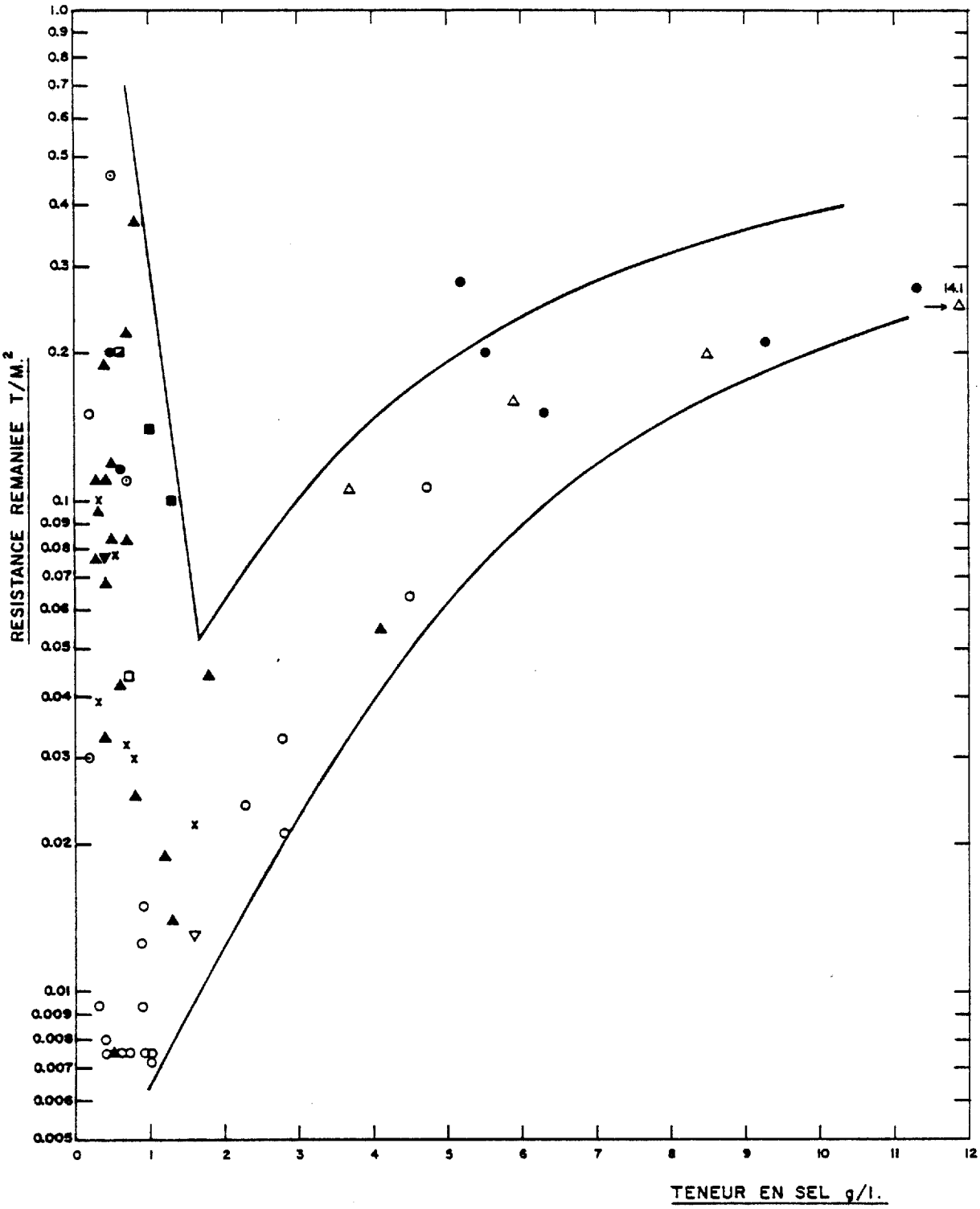

FIGURE 91. RESISTANCE REMANIEE VS TENEUR EN SEL.

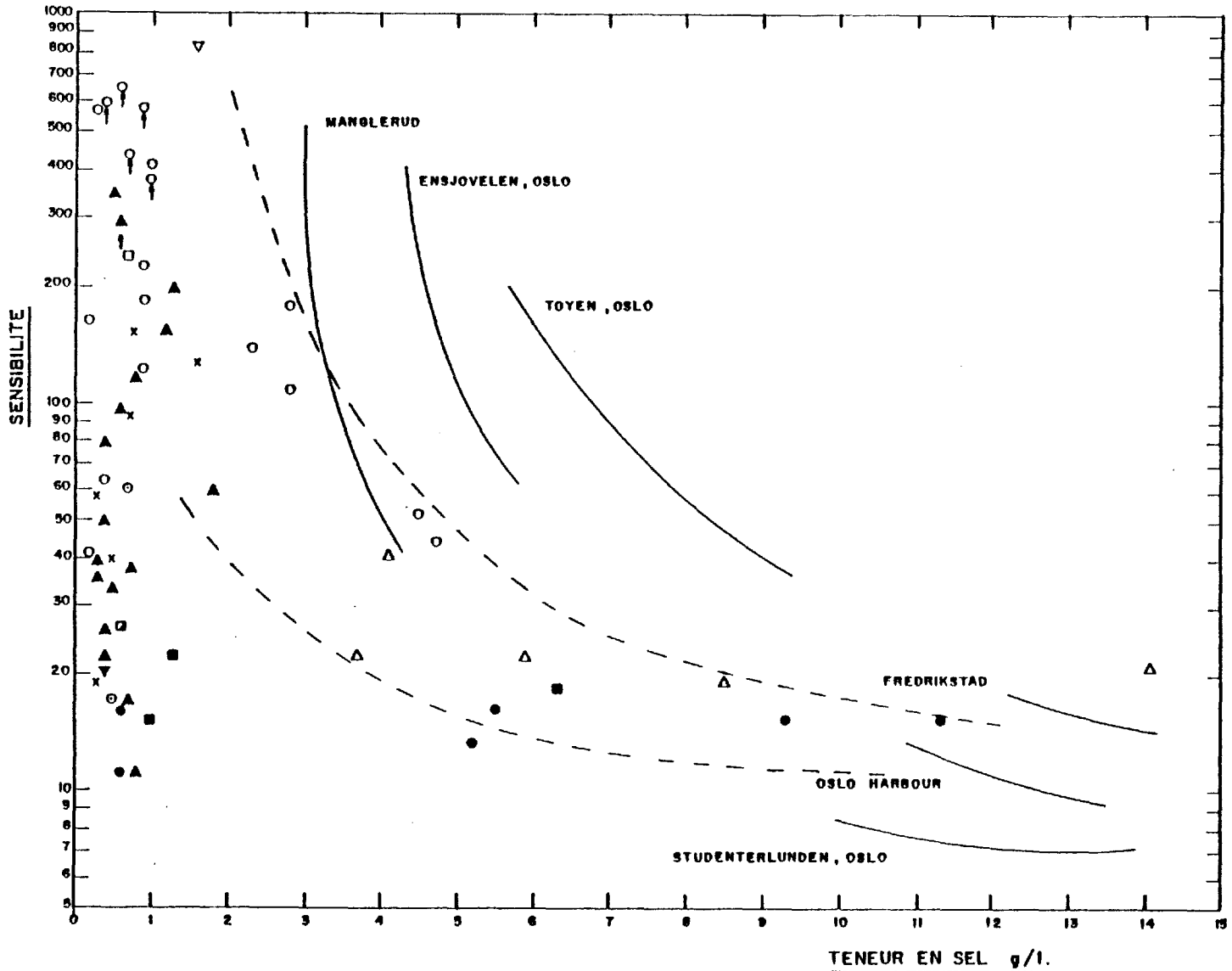

FIGURE 92. SENSIBILITE VS TENEUR EN SEL, D'APRES BJERRUM 1954.

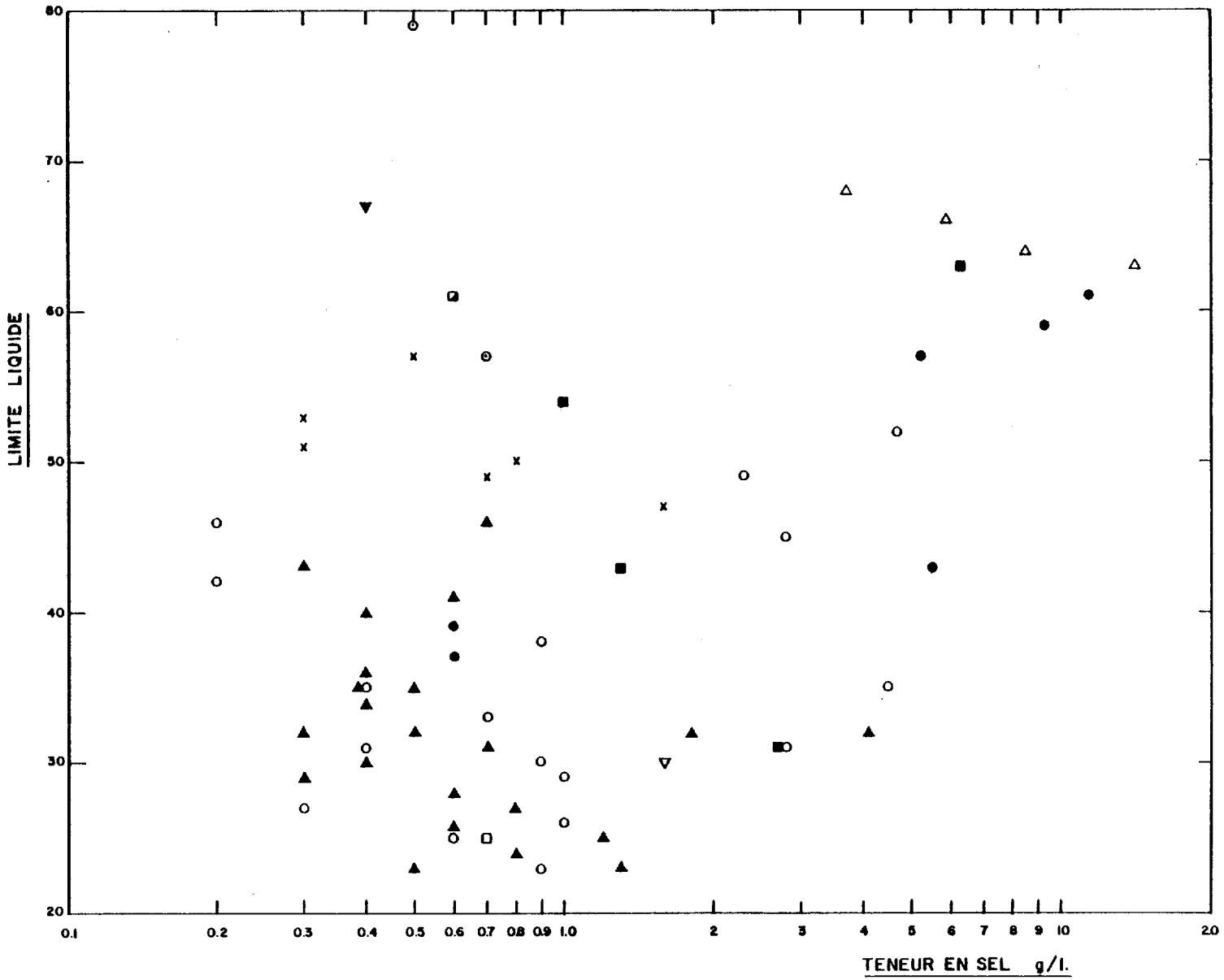

FIGURE 93. LIMITE LIQUIDE VS TENEUR EN SEL

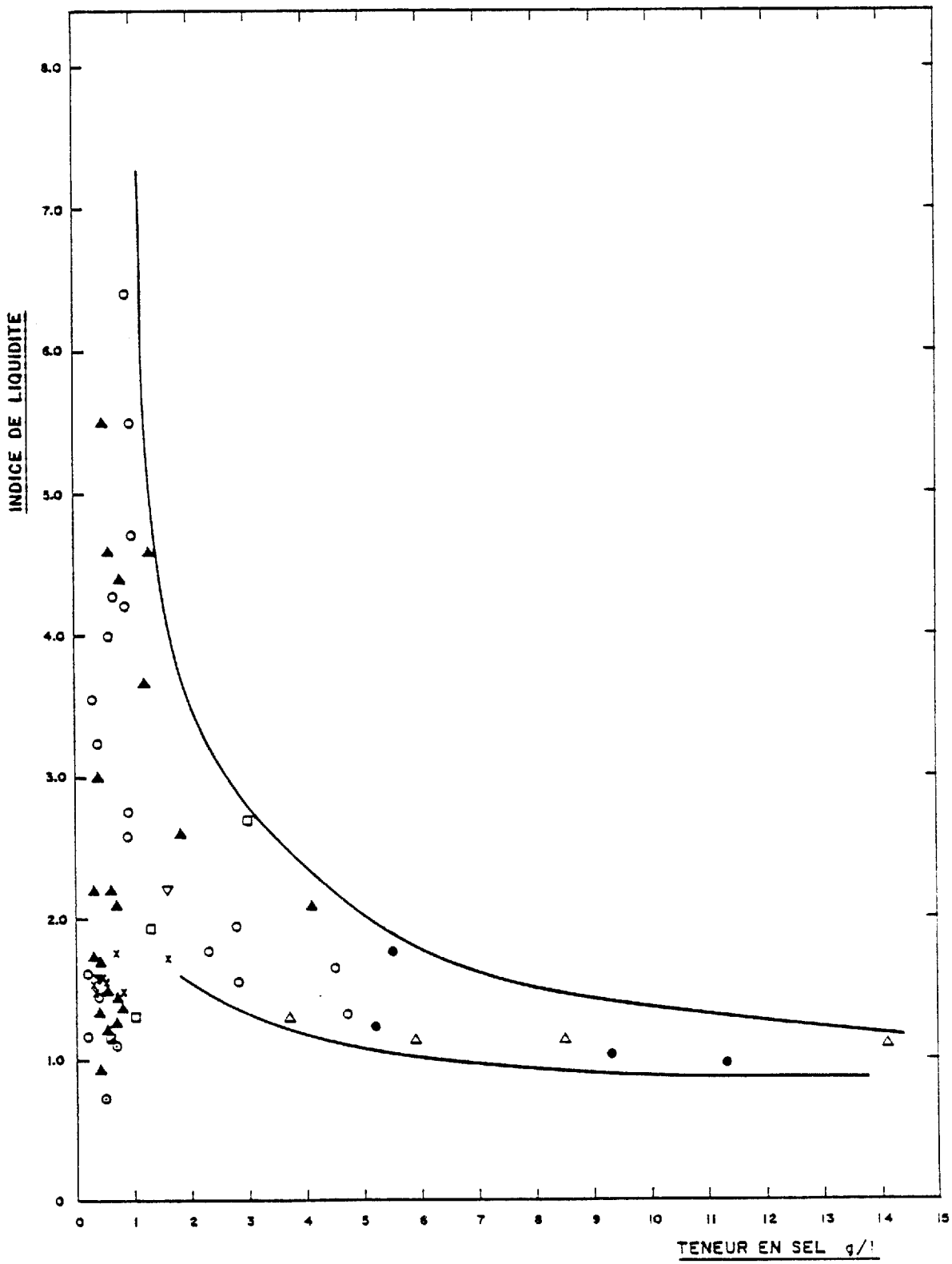

FIGURE 94 INDICE DE LIQUIDITE VS TENEUR EN SEL.

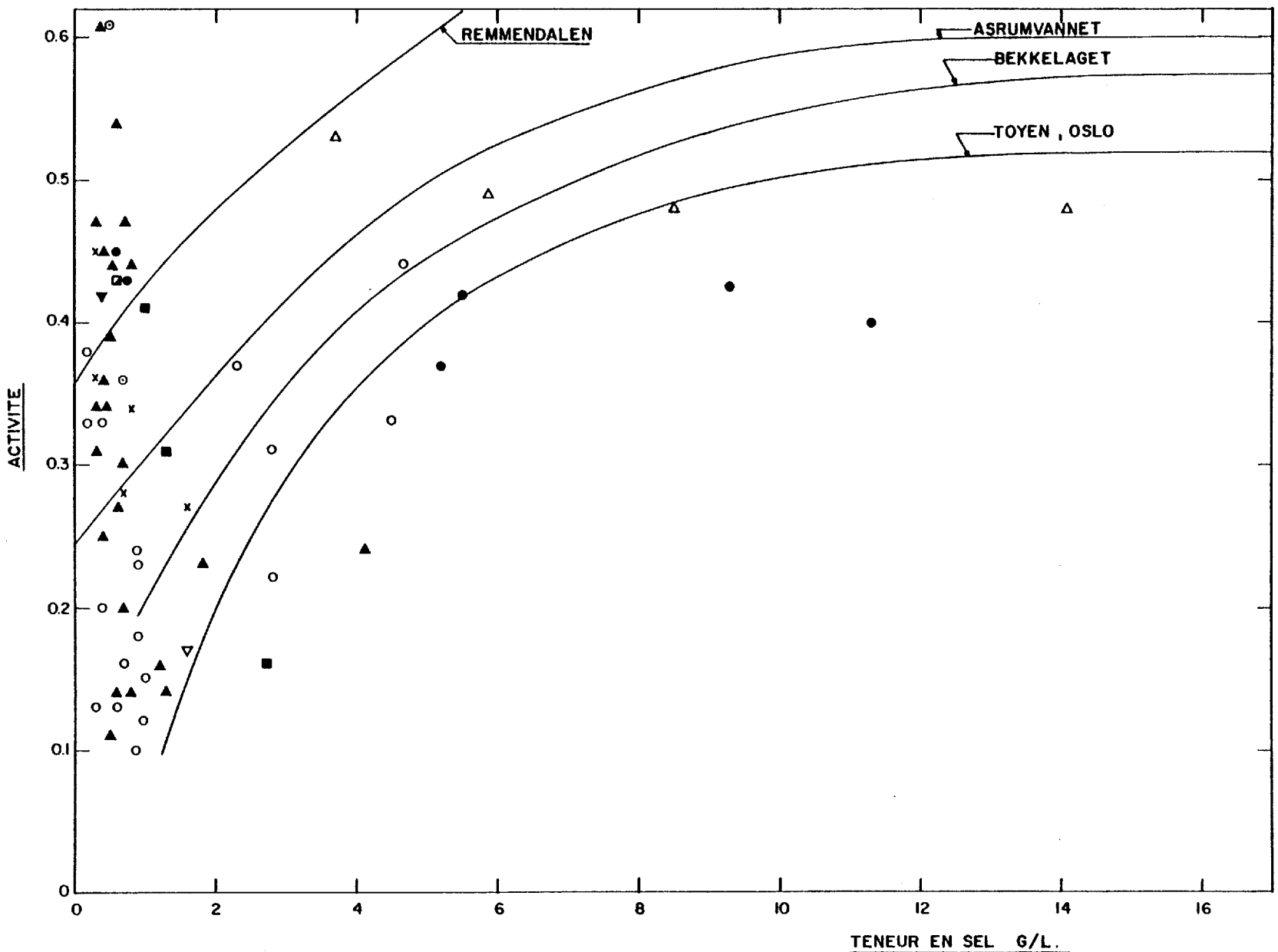

FIGURE 95. ACTIVI VS TENEUR EN SEL , D'APRES BJERRU ,954.

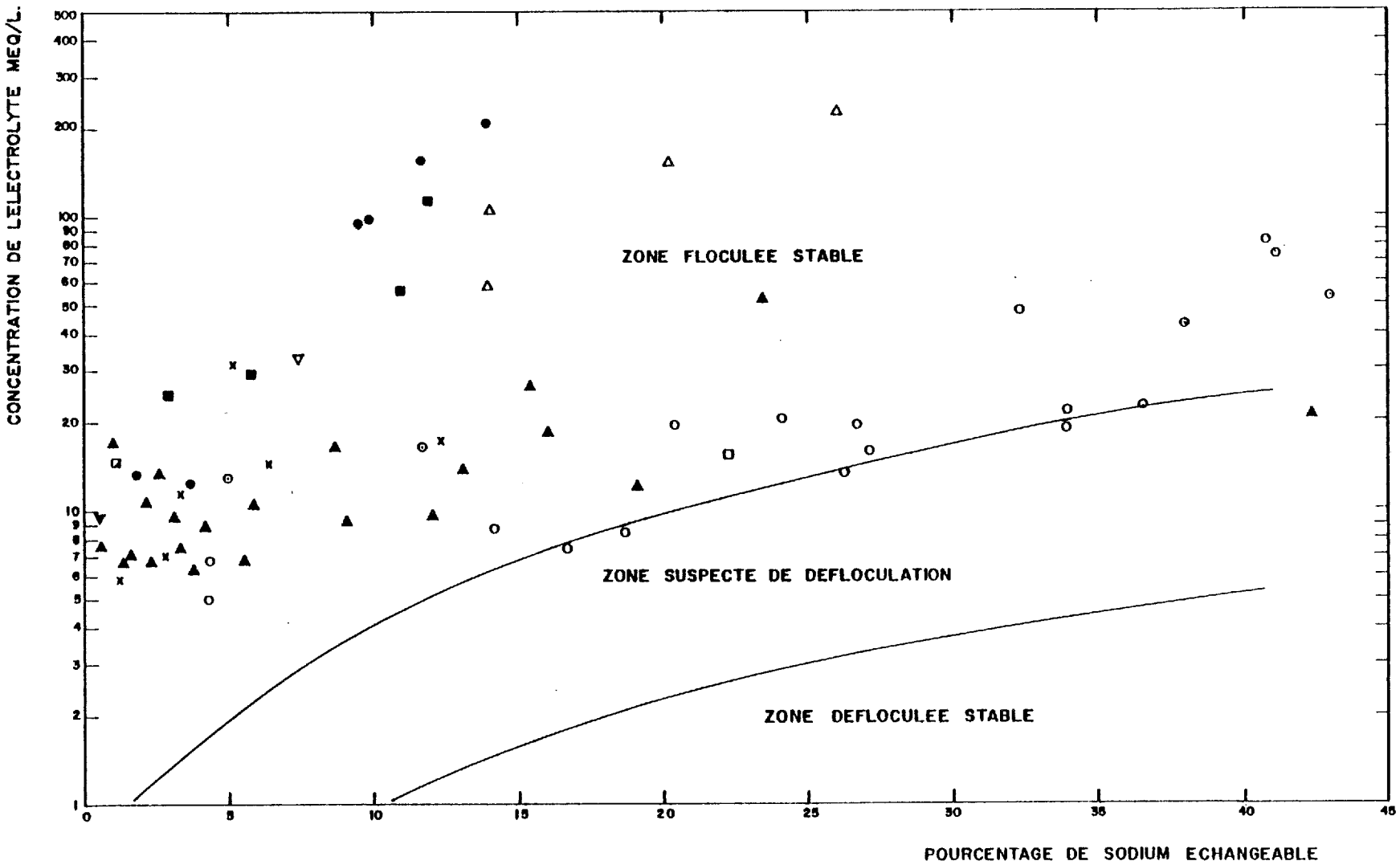

FIGURE 96. CONCENTRATION DE L'ELECTROLYTE VS POURCENTAGE DE SODIUM ECHANGEABLE (INGLES 1968).

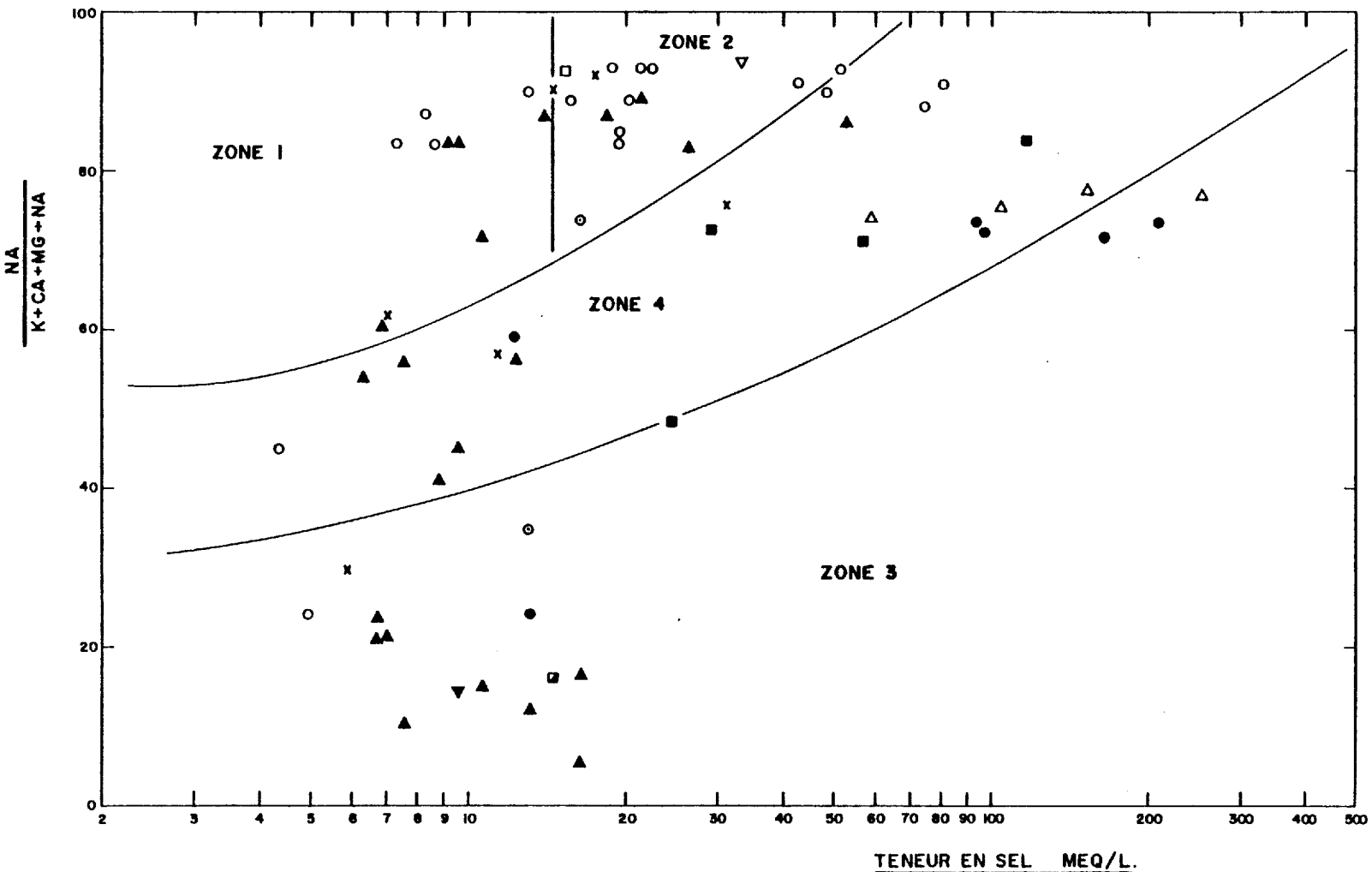

FIGURE 97. POURCENTAGE DE SODIUM VS TENEUR EN SEL DE L'EAU INTERSTITIELLE

(SHERARD ET AL, 1972)

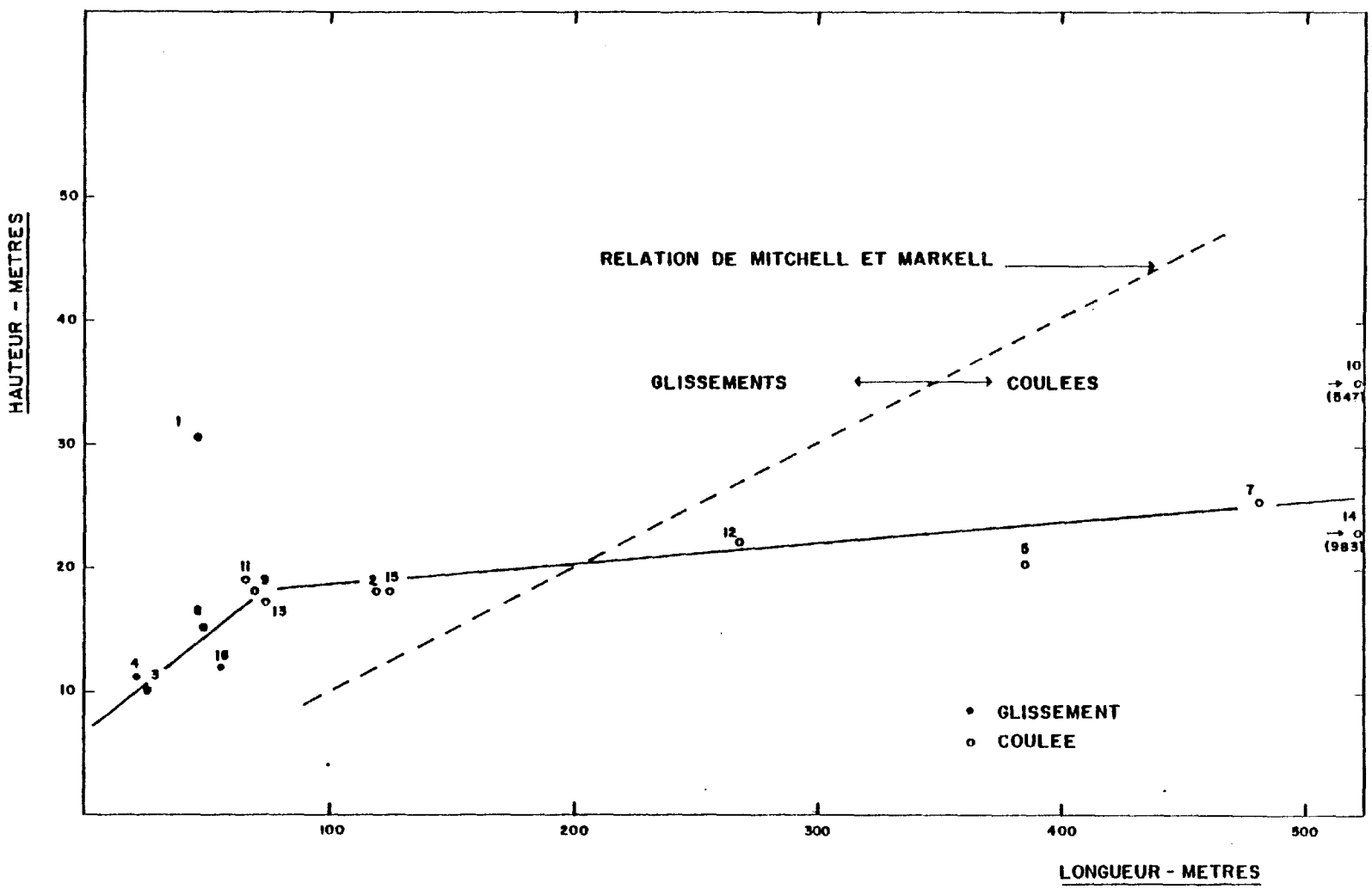

FIGURE 98. HAUTEUR DE PENTE VS LONGUEUR DE GLISSEMENT OU DE LA COULEE

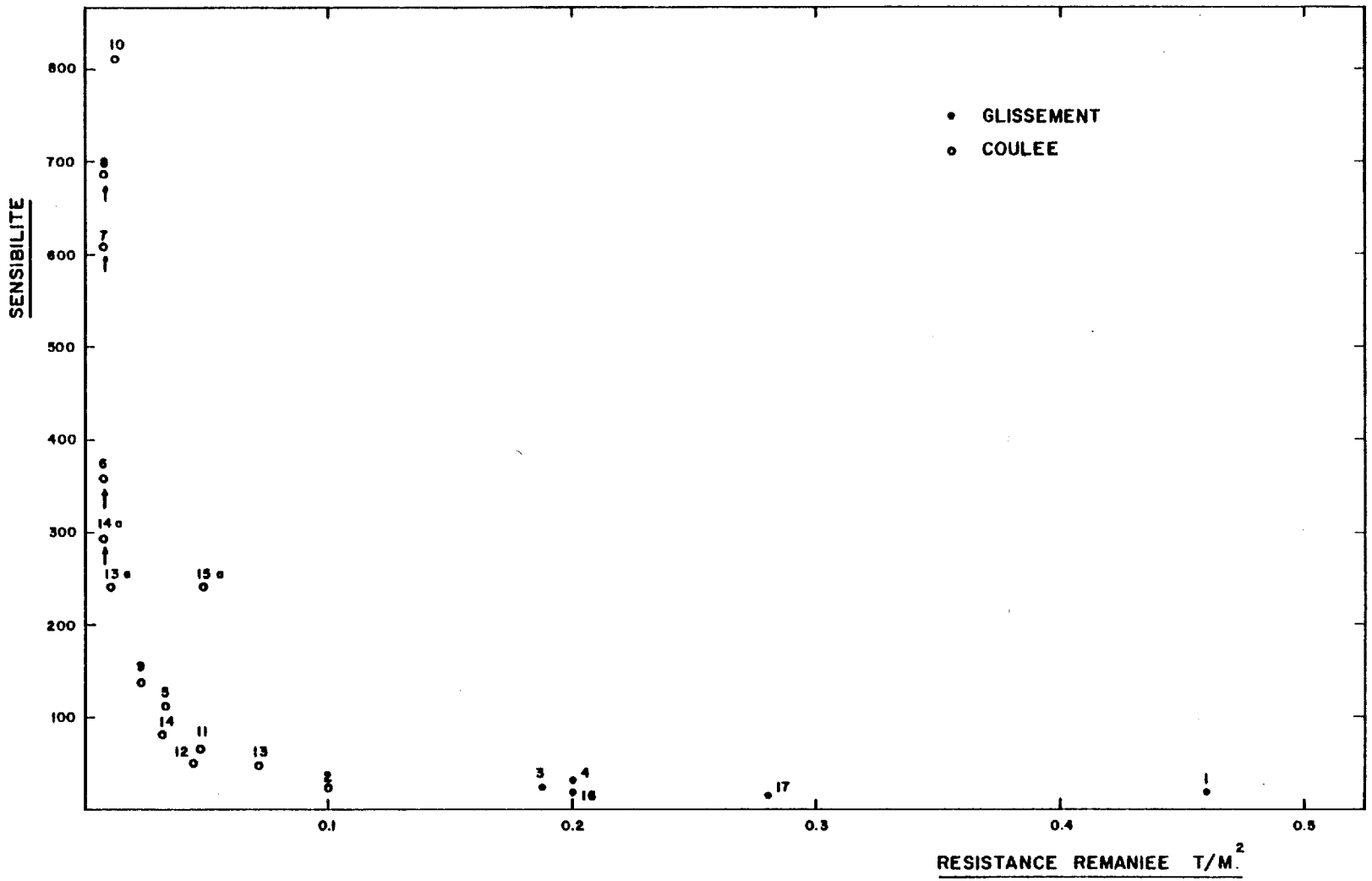

FIGURE 99. SENSIBILITE VS RESISTANCE REMANIEE.

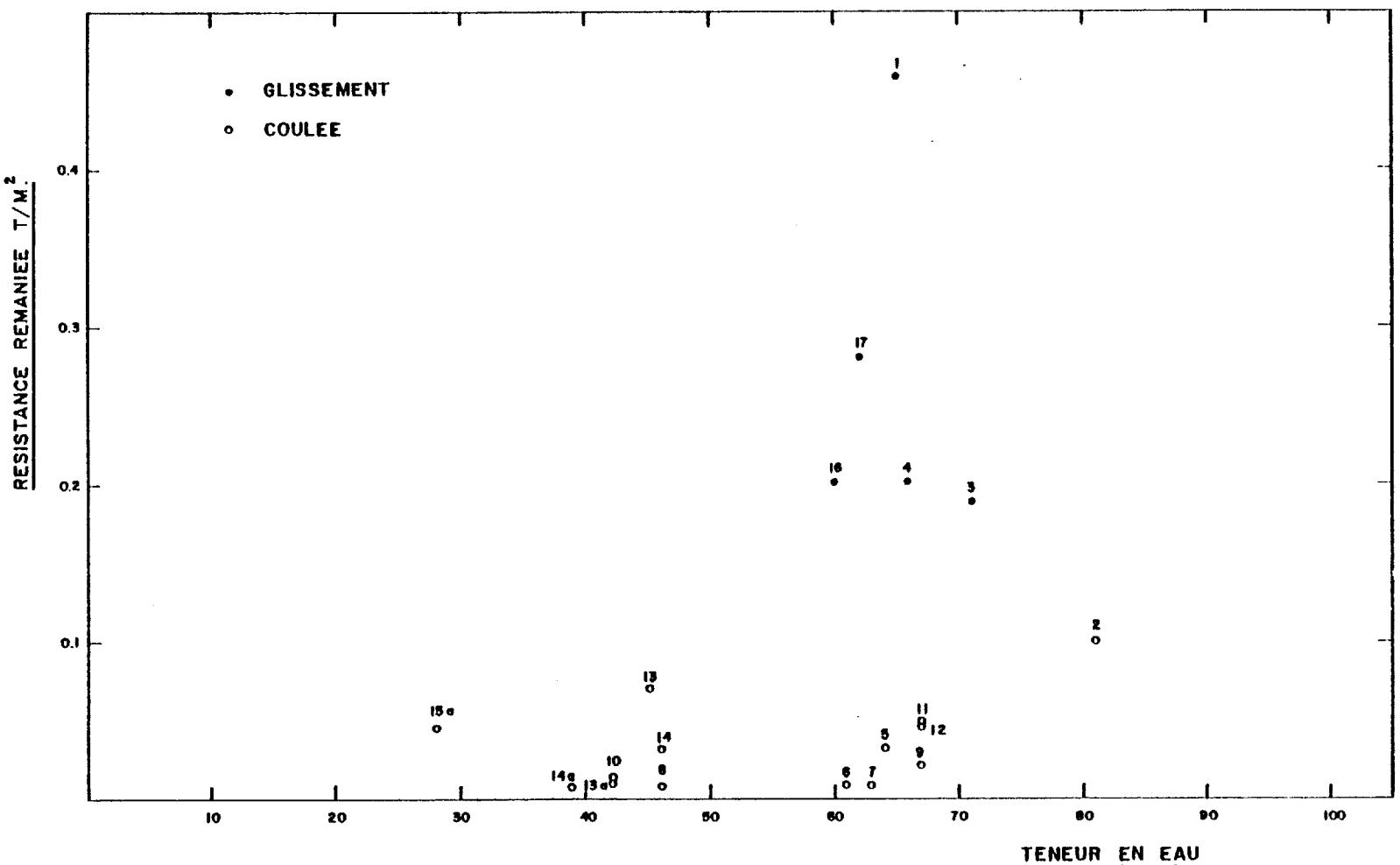

FIGURE 100 RESISTANCE REMANIEE VS TENEUR EN EAU

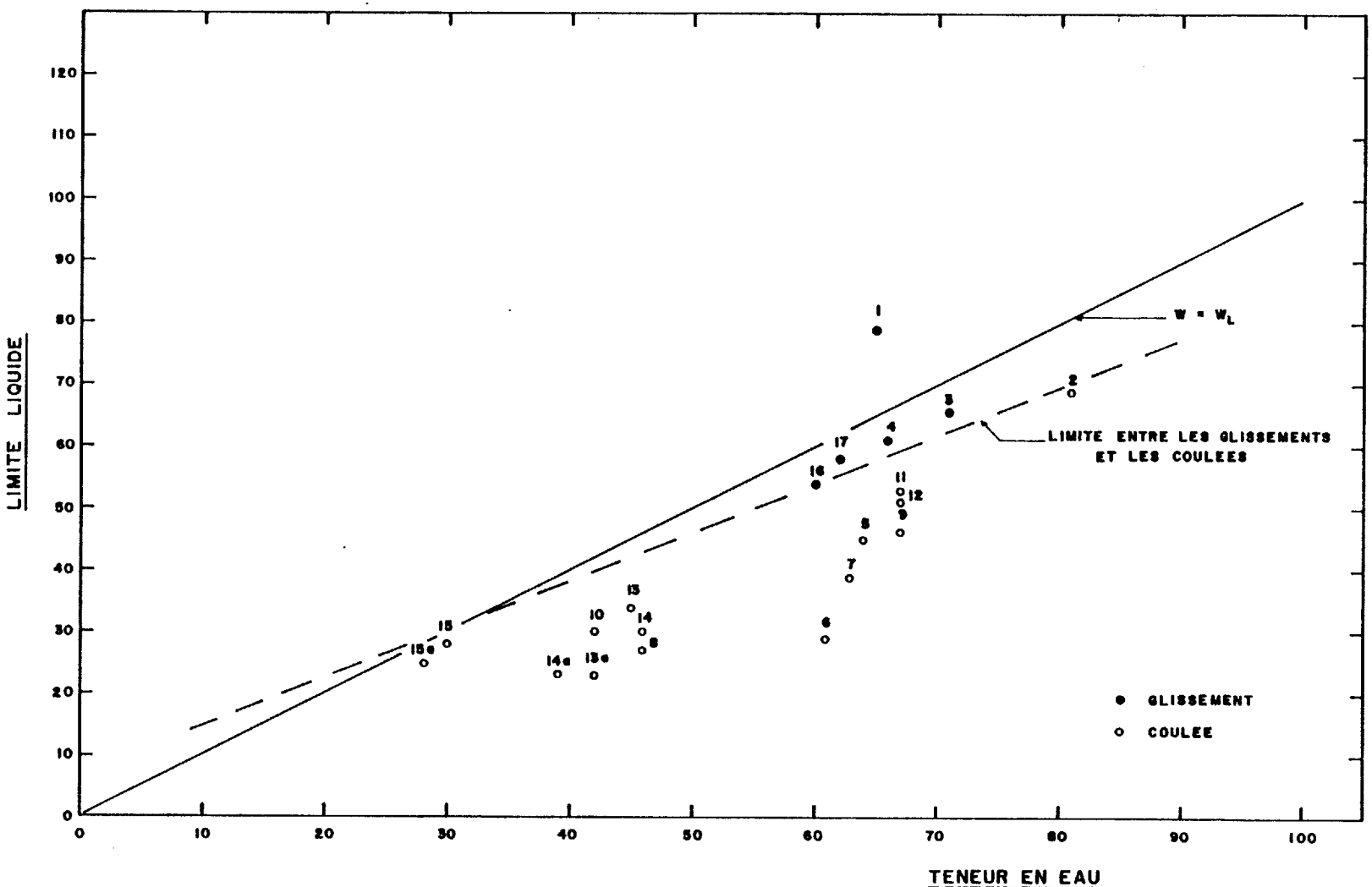

FIGURE 101. LIMITE LIQUIDE VS TENEUR EN EAU

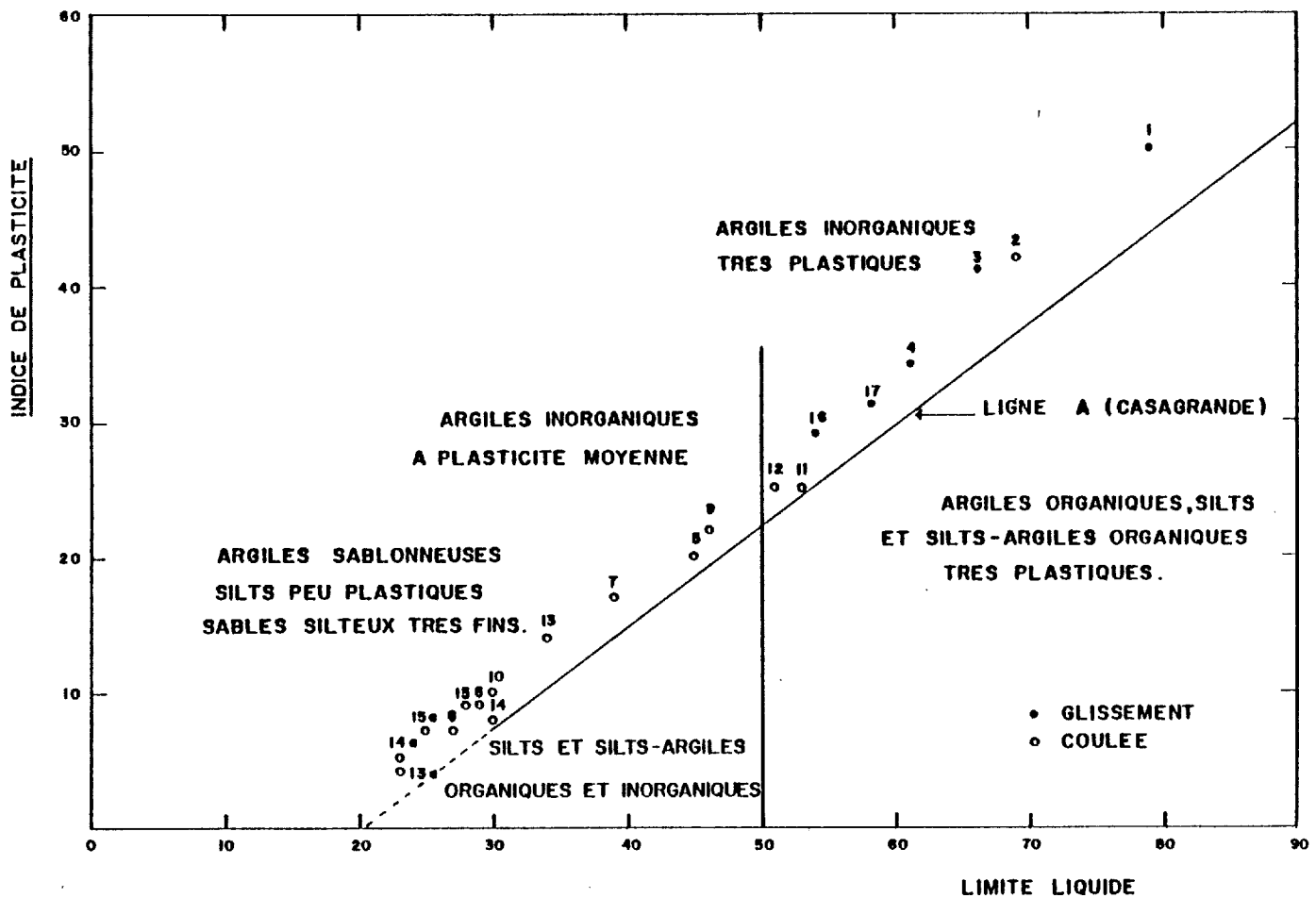

FIGURE 102. INDICE DE PLASTICITE VS LIMITE LIQUIDE

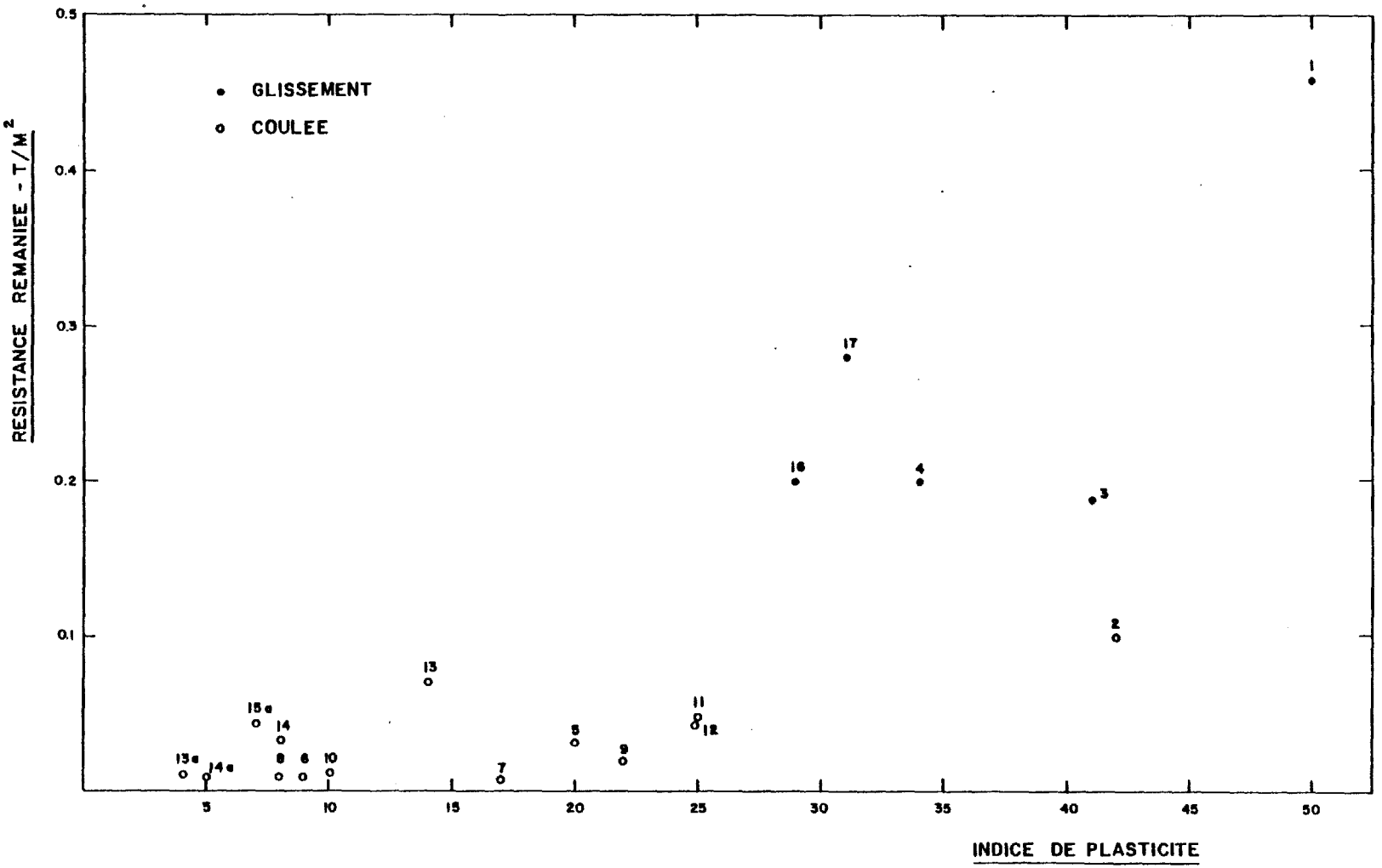

FIGURE 103. RESISTANCE REMANIEE VS INDICE DE PLASTICITE.

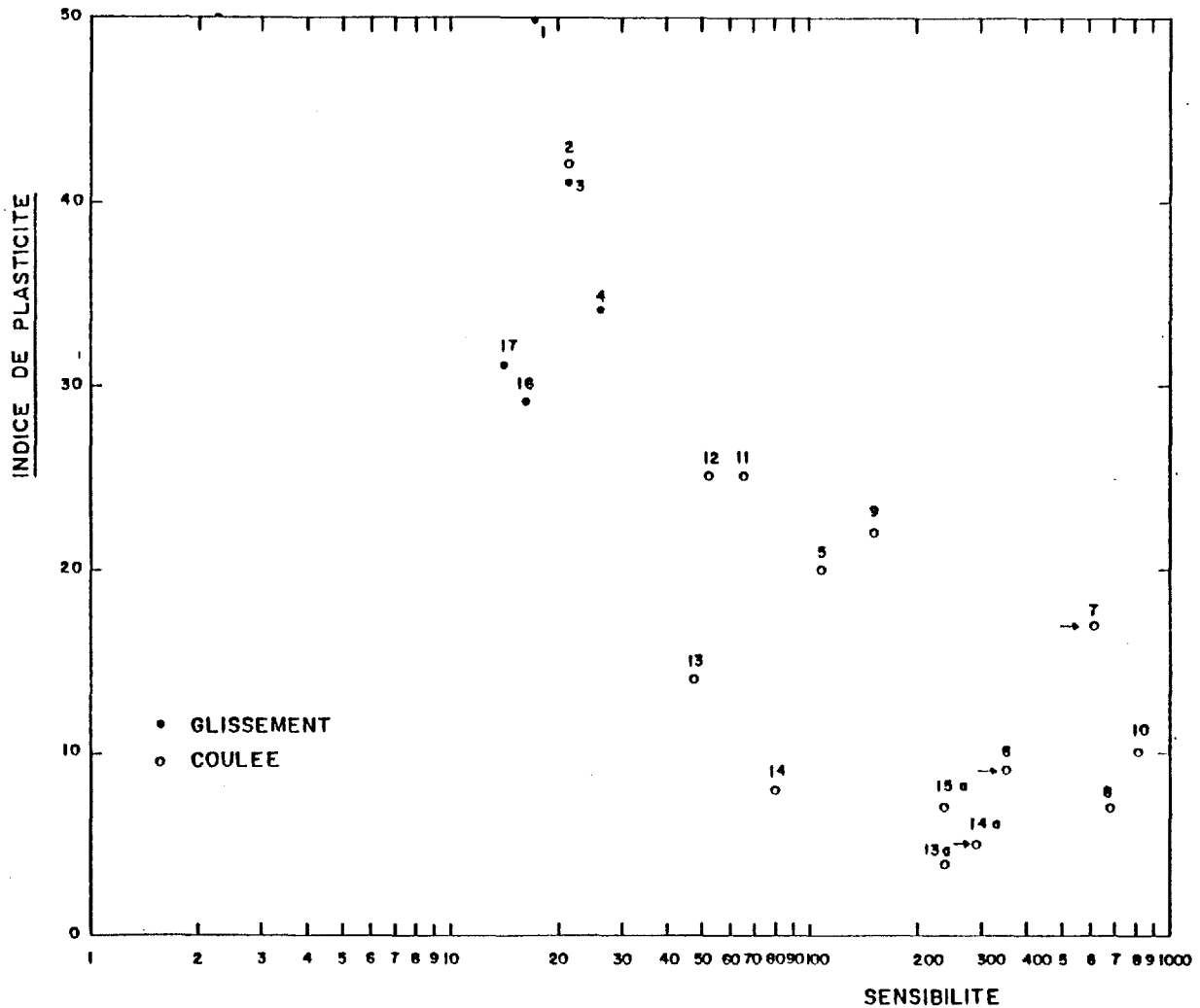

FIGURE 104. INDICE DE PLASTICITE VS SENSIBILITE.

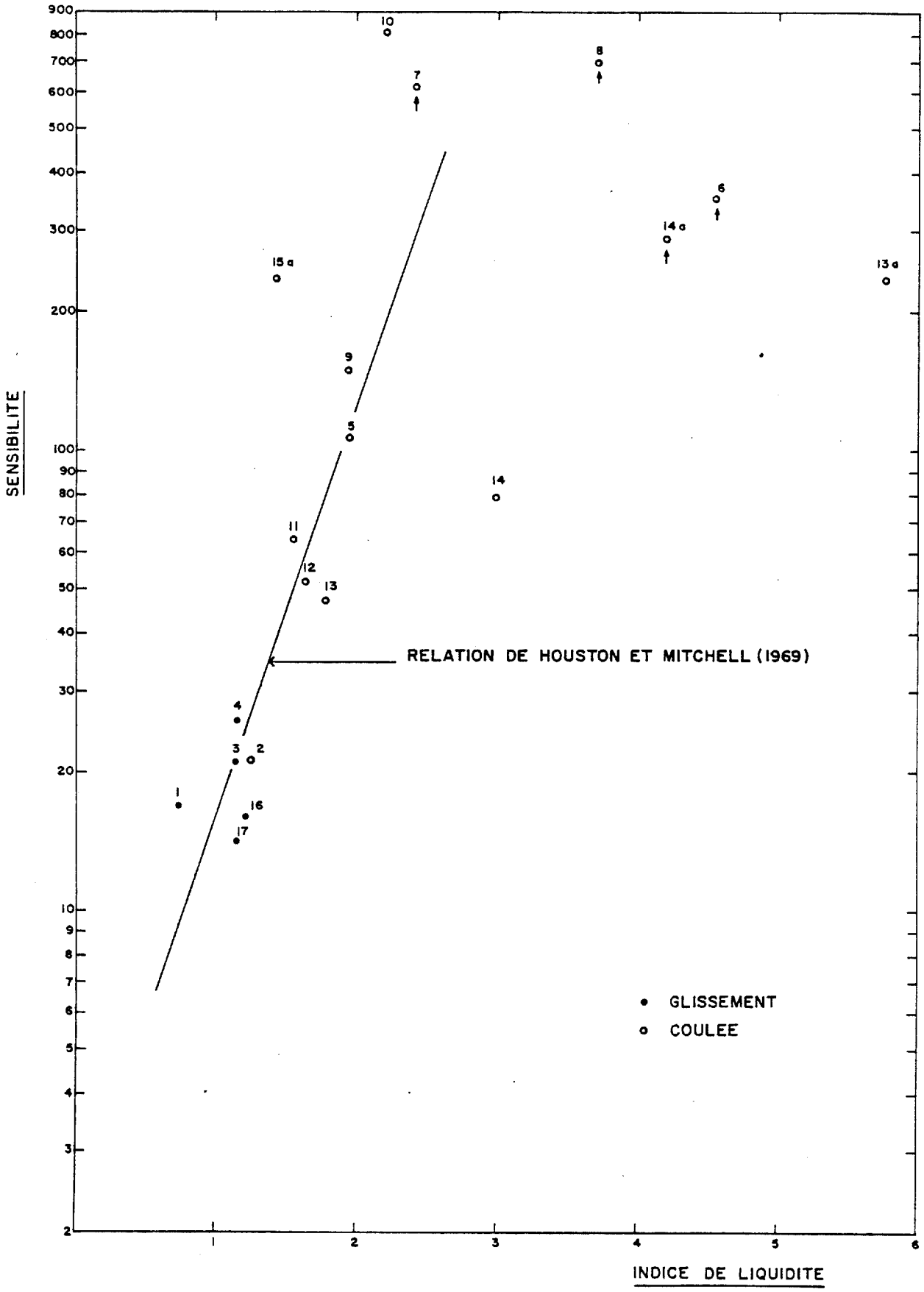

FIGURE 105. SENSIBILITE VS INDICE DE LIQUIDITE

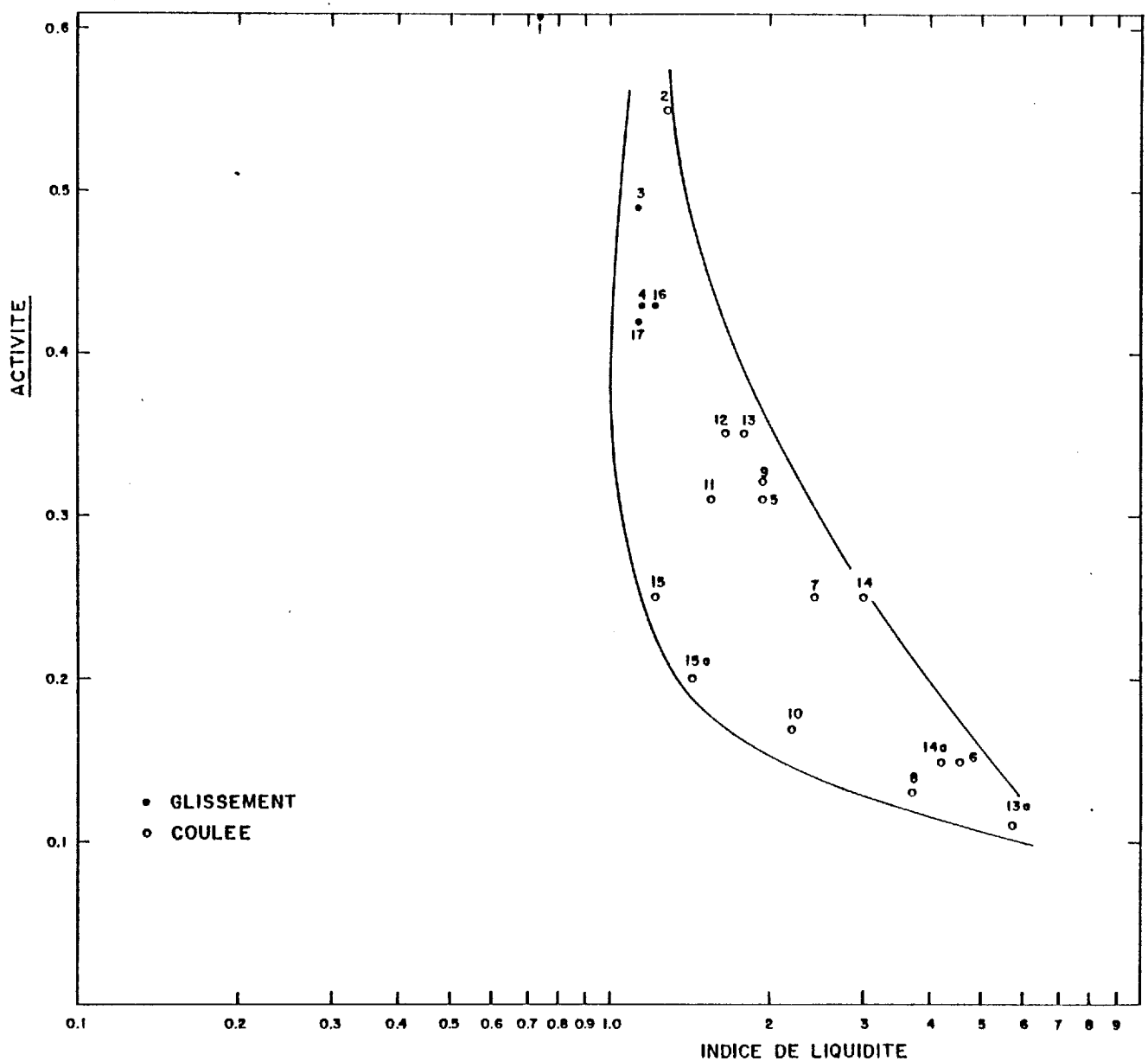

FIGURE 106. ACTIVITE VS INDICE DE LIQUIDITE.

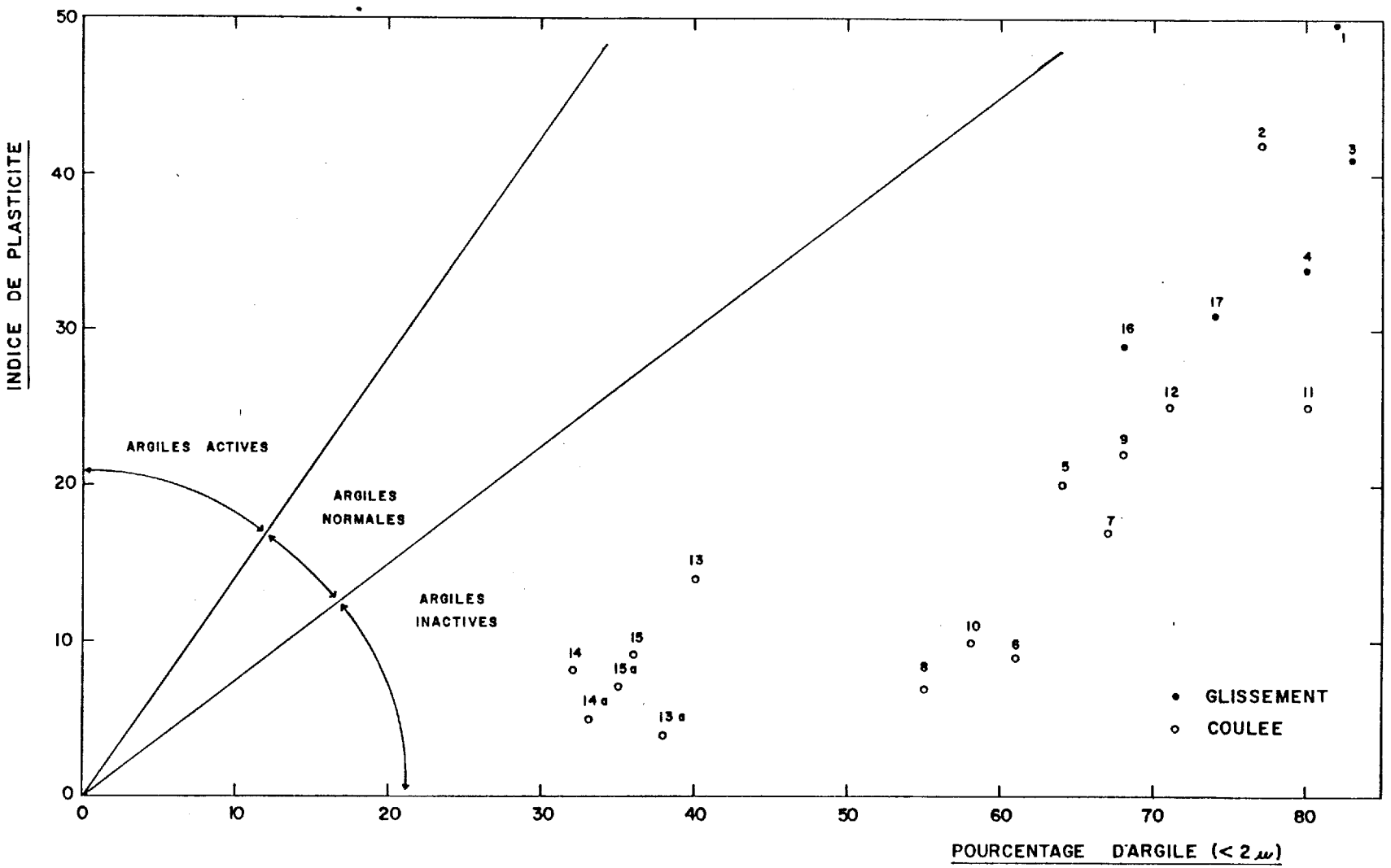

FIGURE 107. INDICE DE PLASTICITE VS POURCENTAGE D'ARGILE

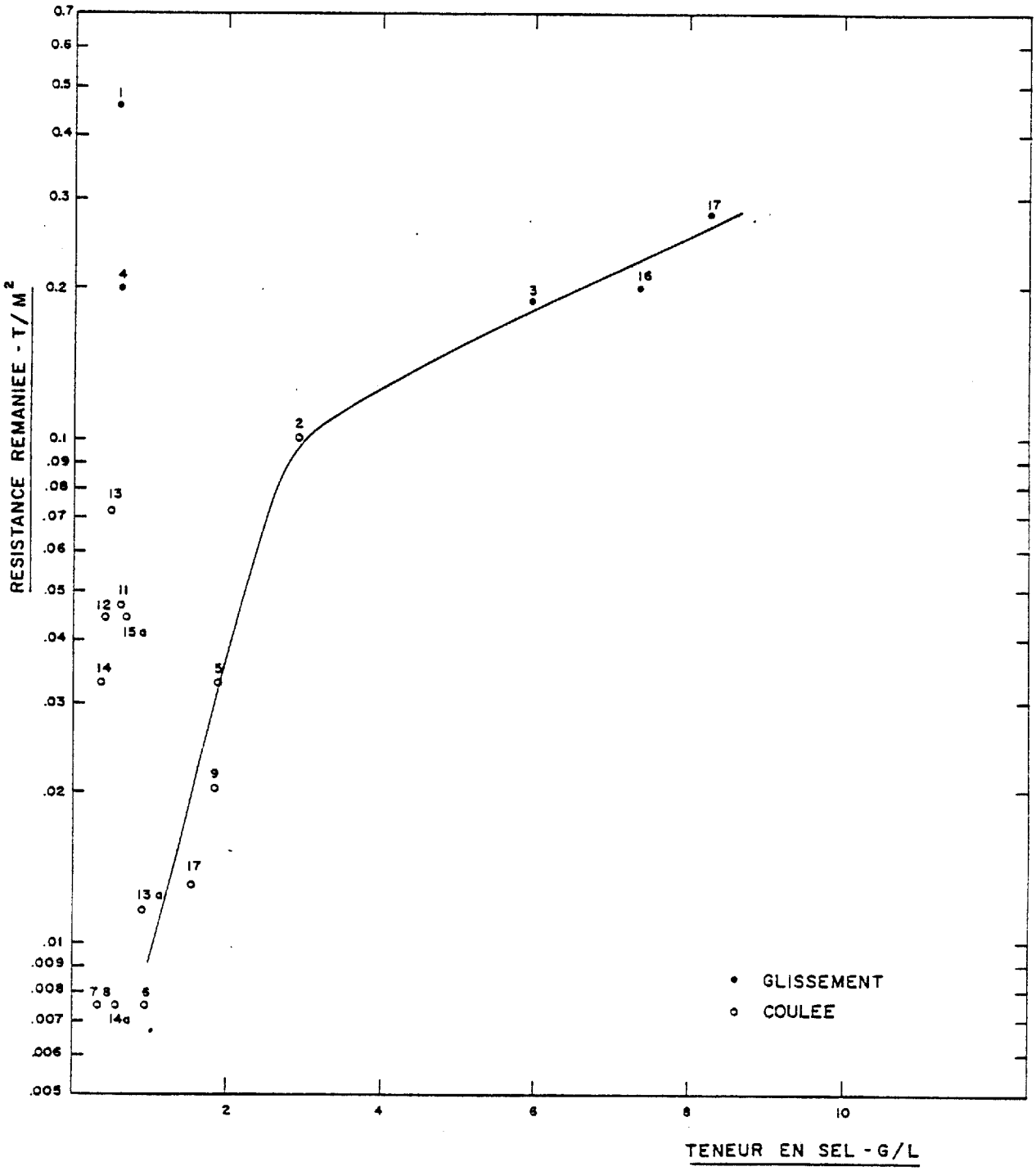

FIGURE 108. RESISTANCE REMANIEE VS TENEUR EN SEL

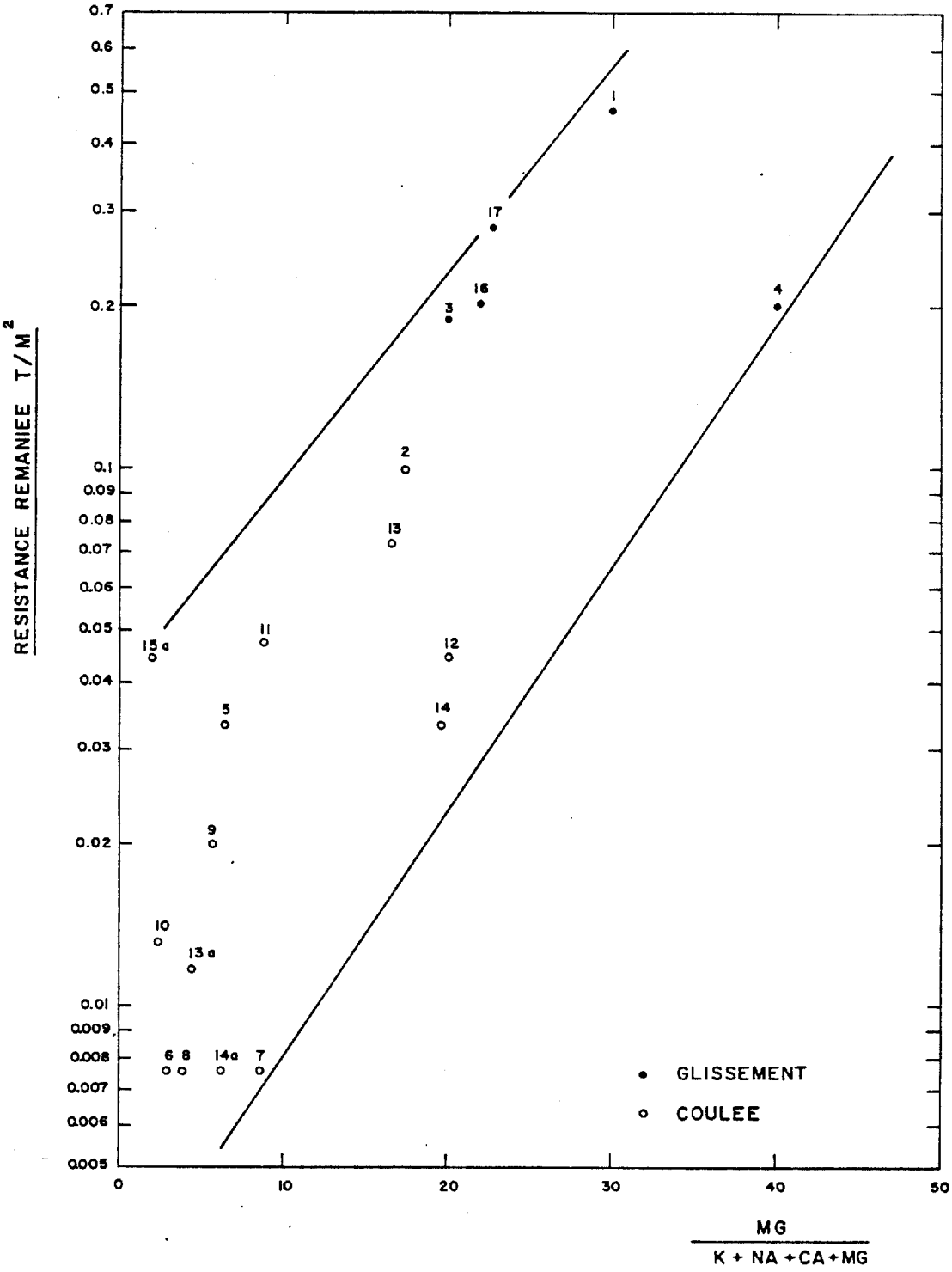

FIGURE 109. RESISTANCE REMANIEE VS POURCENTAGE DE MAGNESIUM DANS L'EAU INTERSTITIELLE.

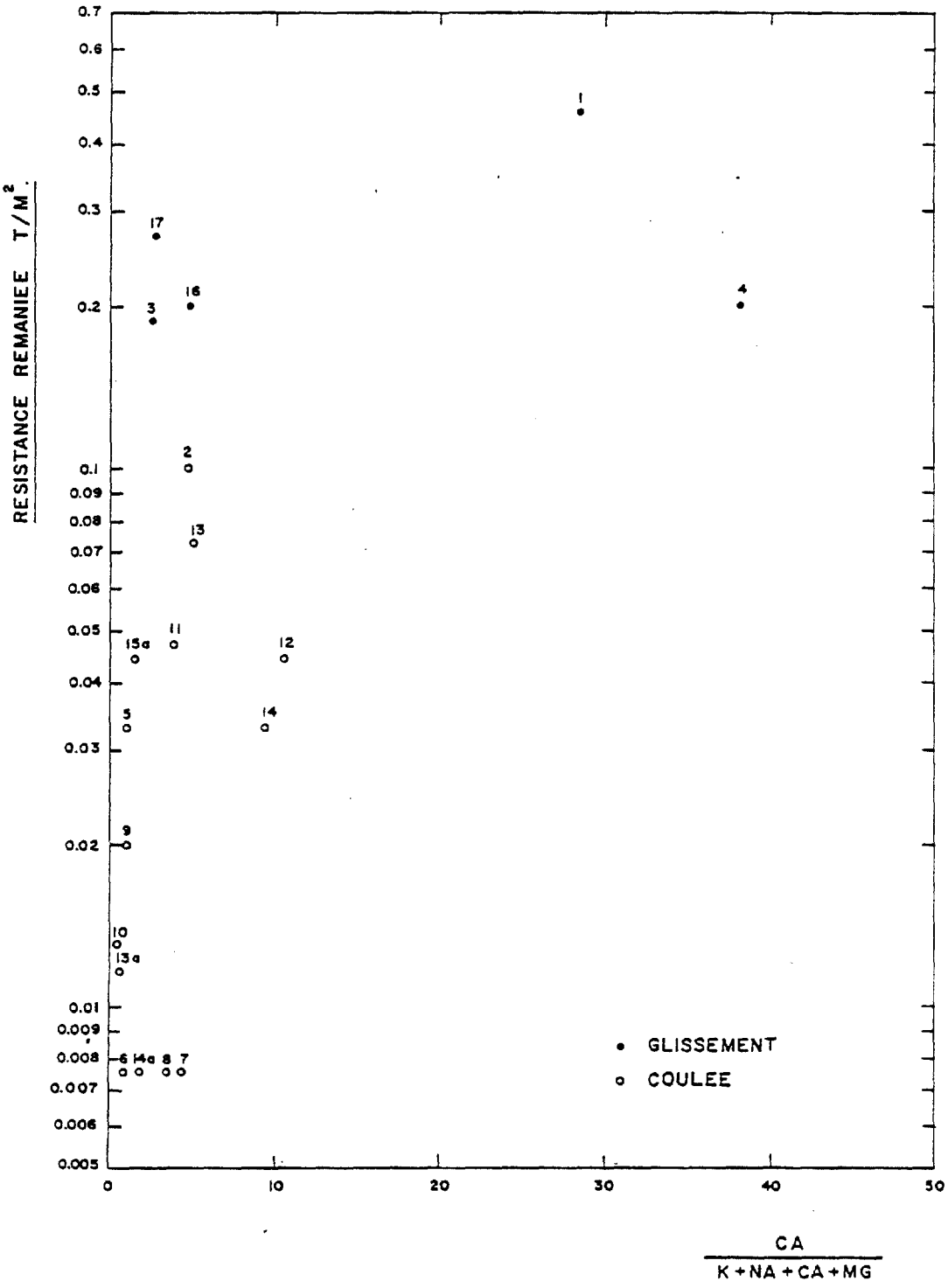

FIGURE 110. RESISTANCE REMANIEE VS POURCENTAGE DE CALCIUM DANS L'EAU INTERSTITIELLE.

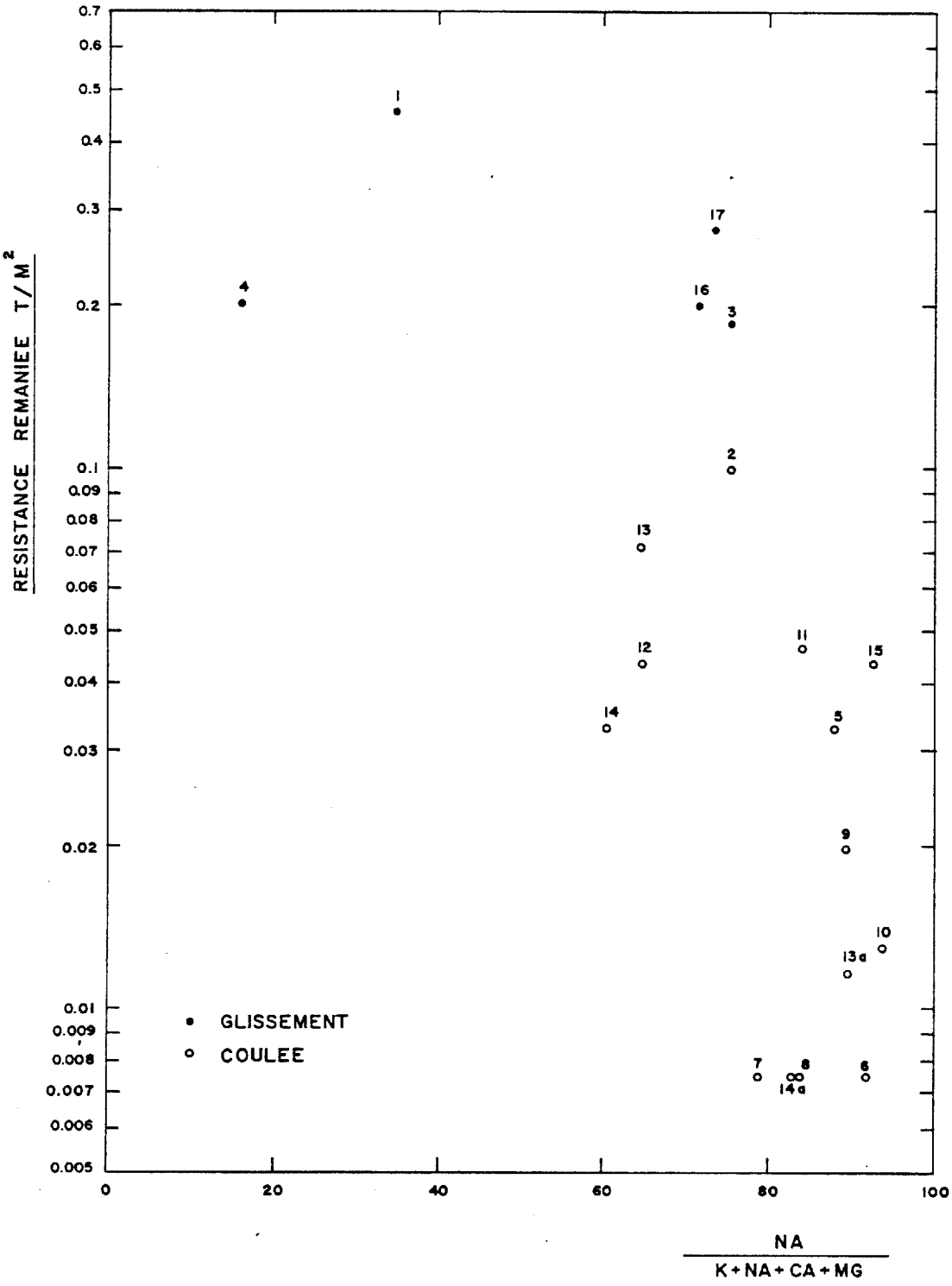

FIGURE III. RESISTANCE REMANIEE VS POURCENTAGE DE SODIUM DANS L'EAU INTERSTITIELLE.

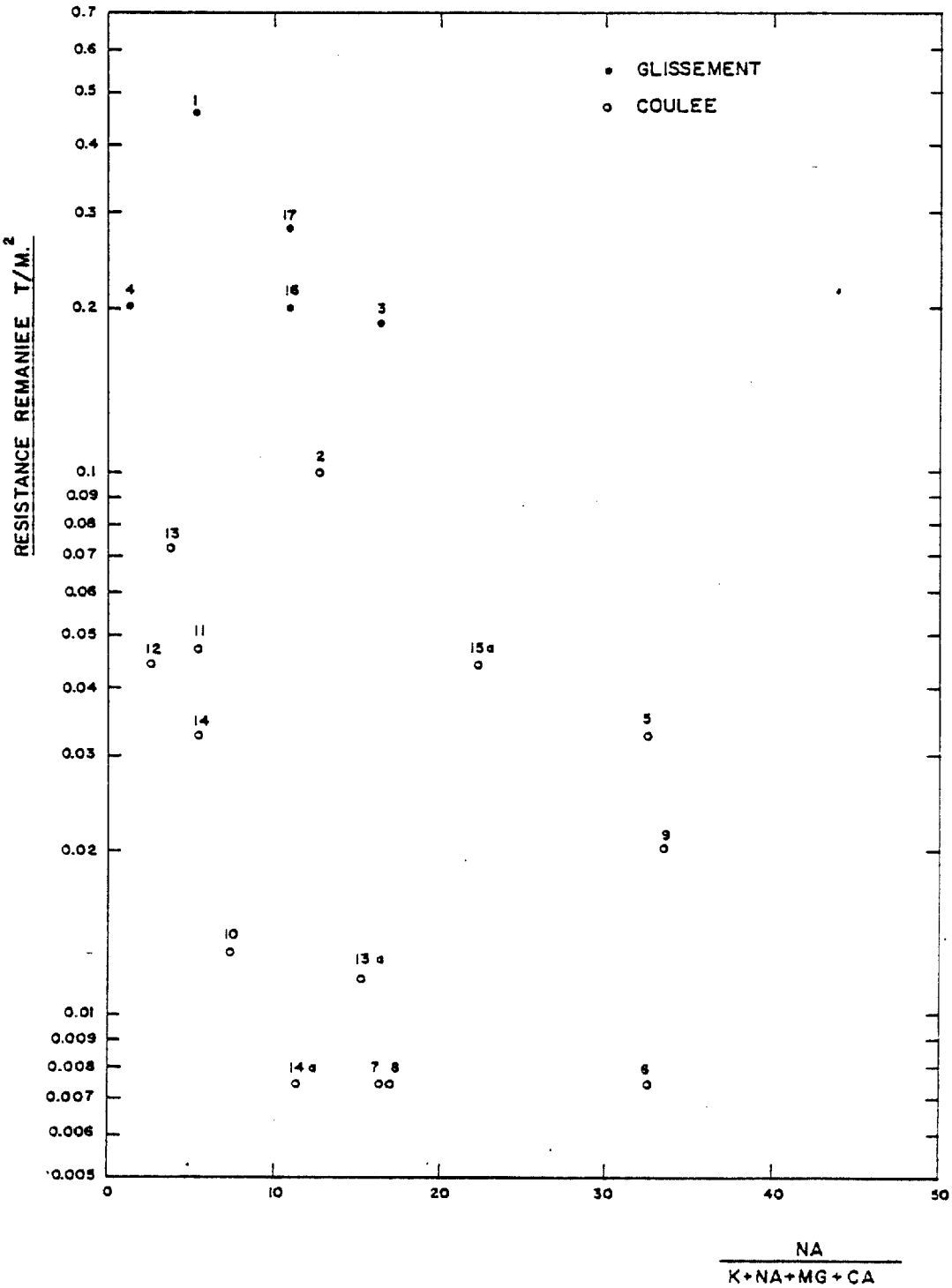

FIGURE 112. RESISTANCE REMANIEE ' S POURCENTAGE DE SODIUM ECHANGEABLE.

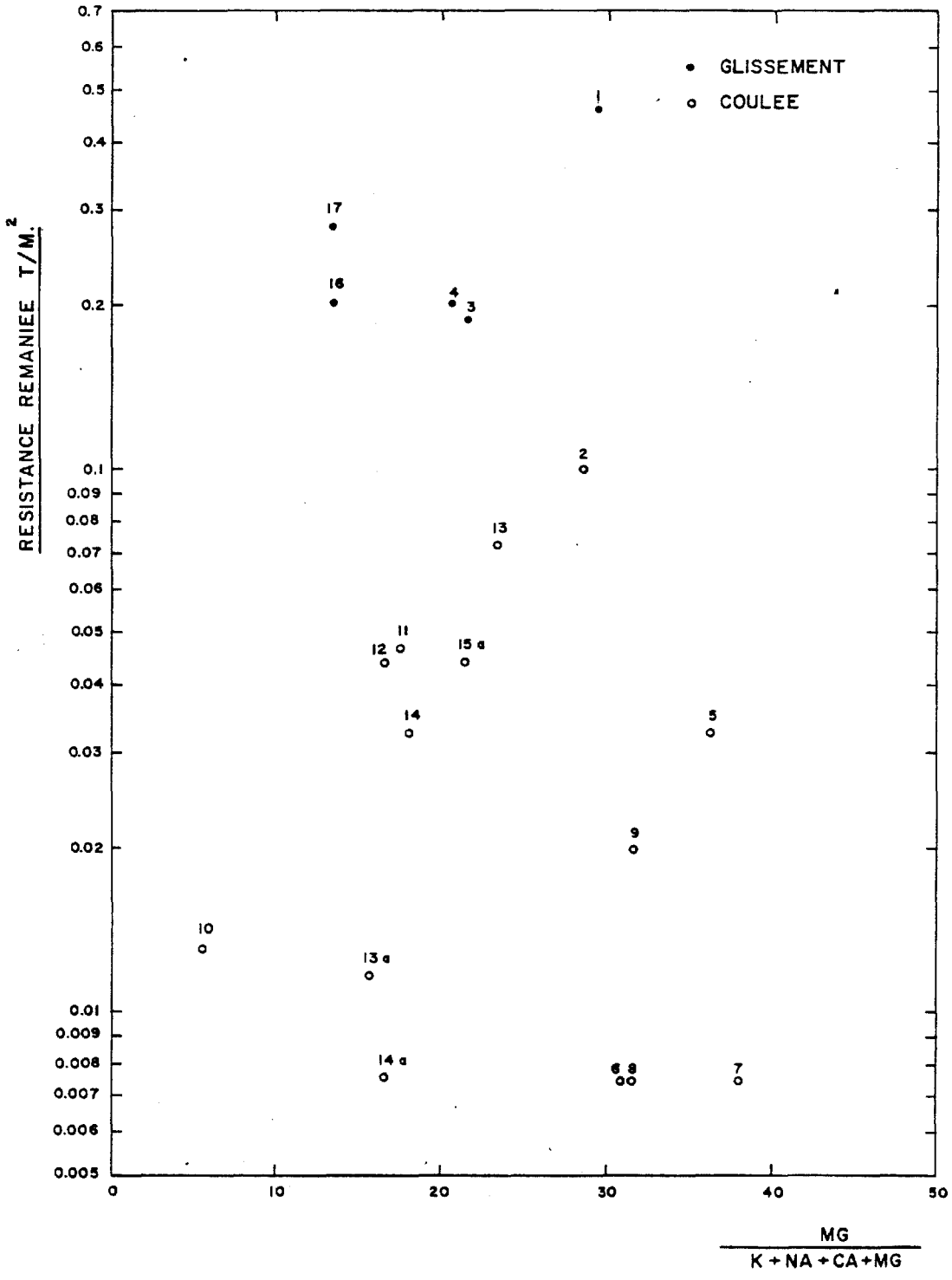

FIGURE 113. RESISTANCE REMANIEE VS POURCENTAGE DE MAGNESIUM ECHANGEABLE.

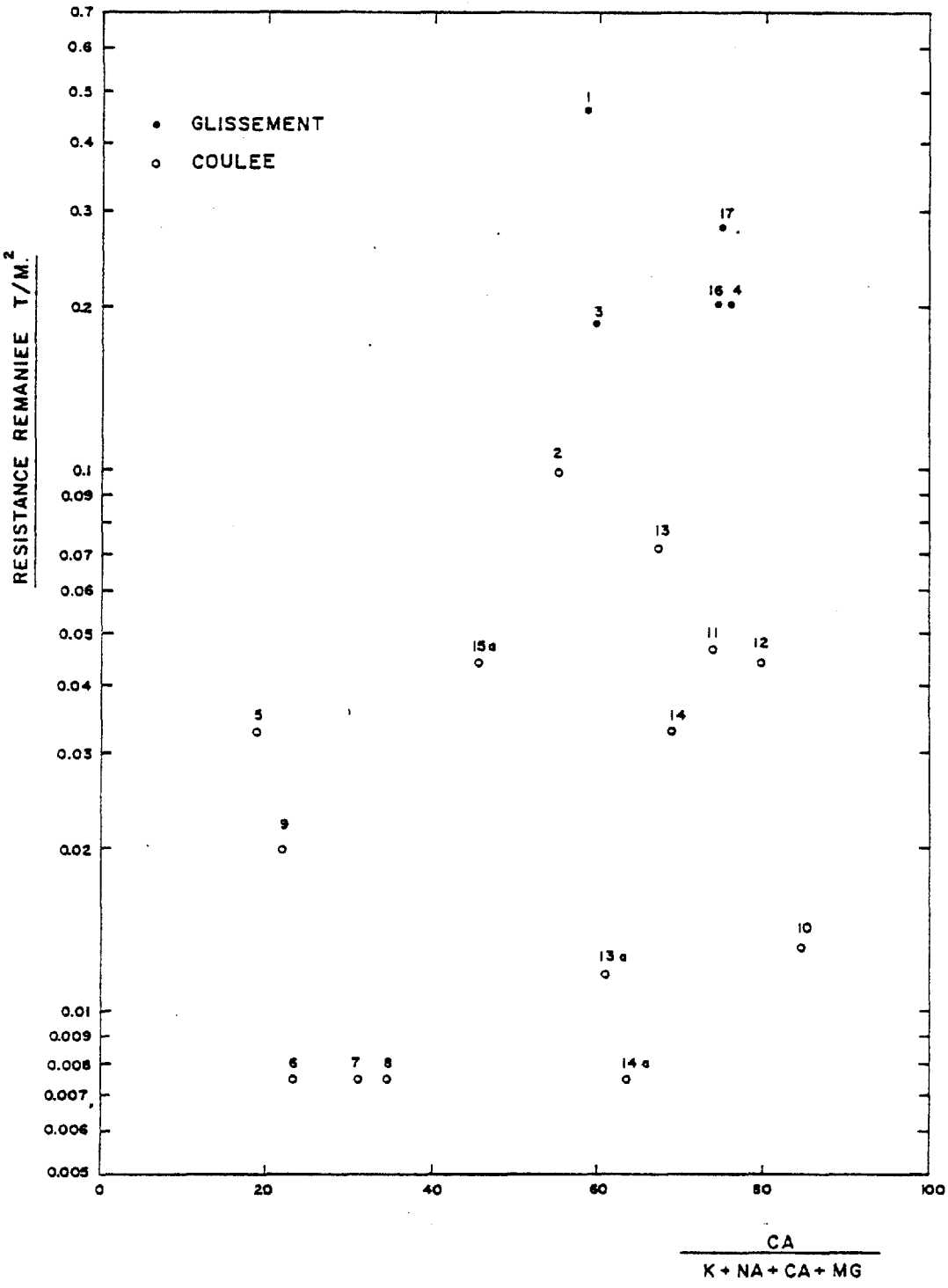

FIGURE 114. RESISTANCE REMANIEE VS POURCENTAGE DE CALCIUM ECHANGEABLE.

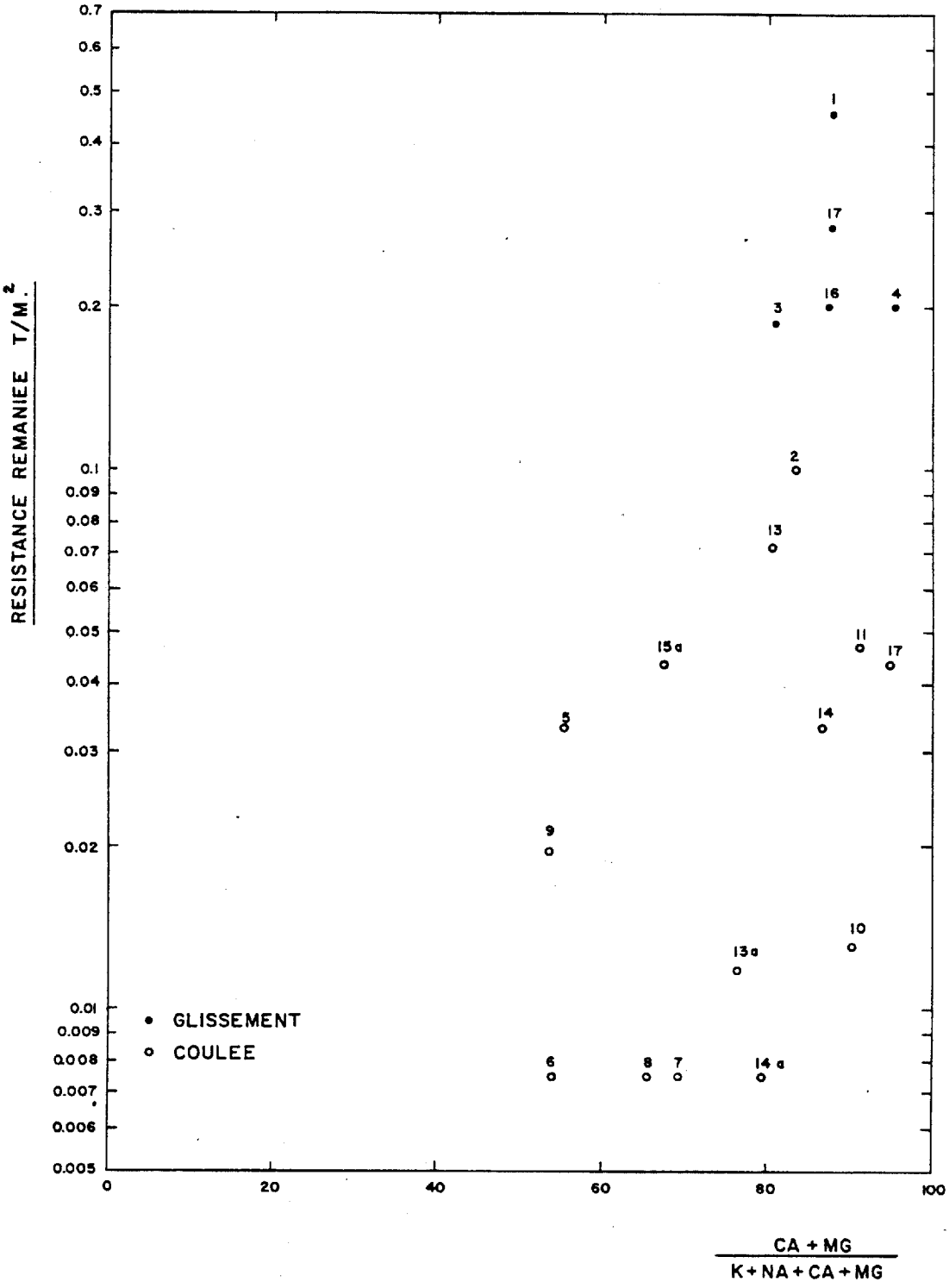

FIGURE 115. RESISTANCE REMANIEE VS POURCENTAGE DE CALCIUM ET DE MAGNESIUM ECHANGEABLE.

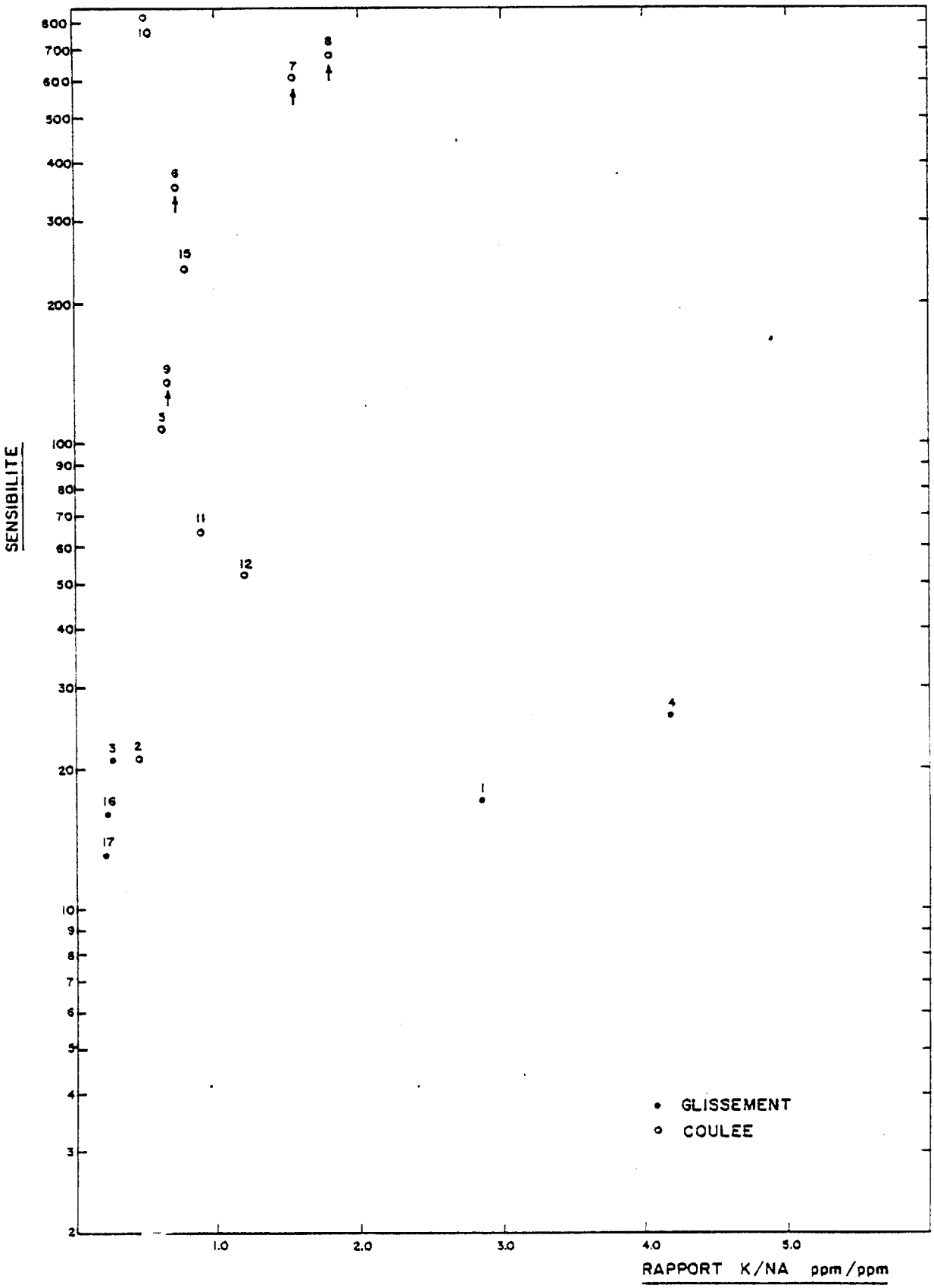

FIGURE 116. SENSIBILITE VS RAPPORT DES CATIONS ECHANGEABLES. K/NA .

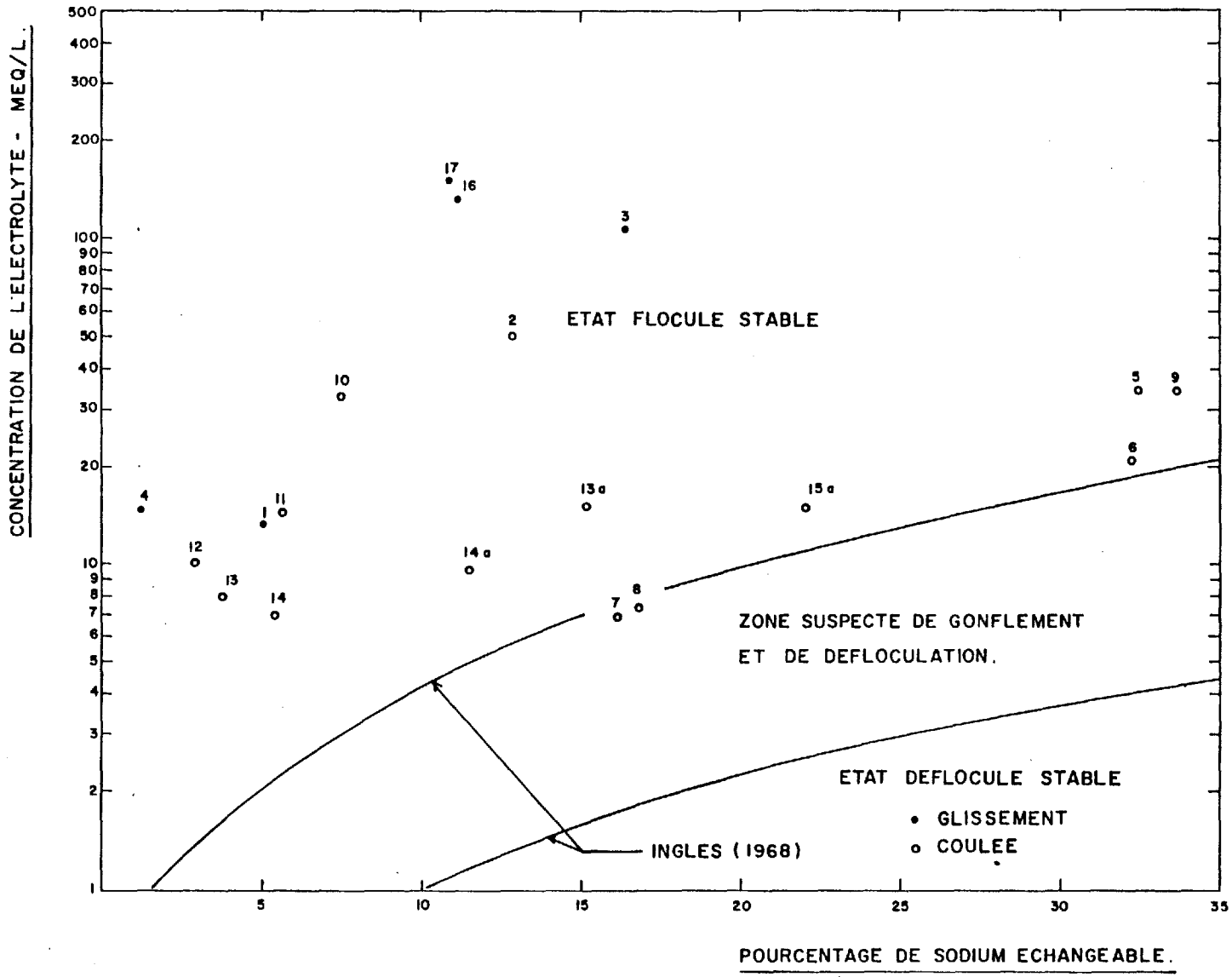

FIGURE 117. CONCENTRATION DE L'ELECTROLYTE VS POURCENTAGE DE SODIUM ECHANGEABLE.

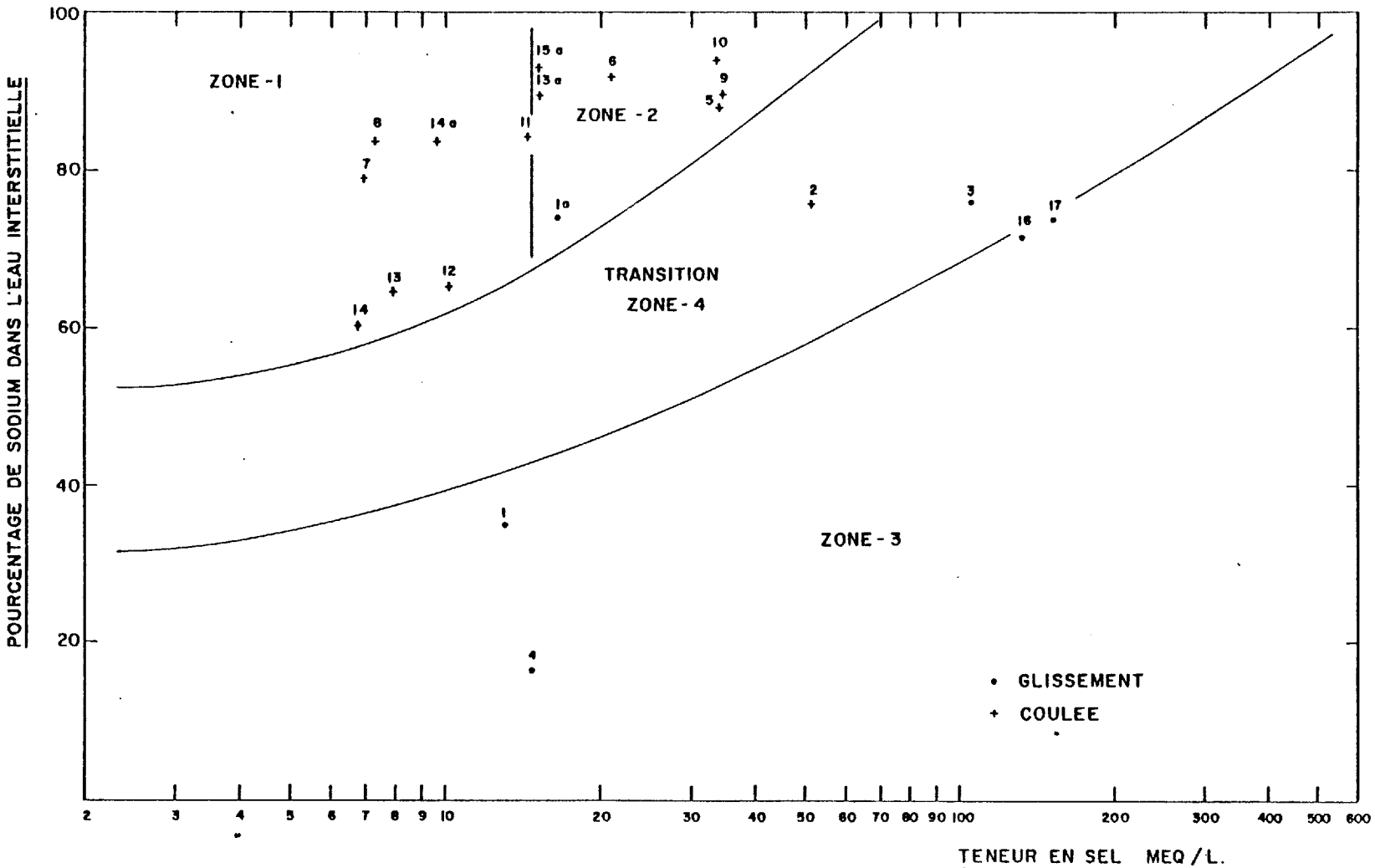

FIGURE 118. POURCENTAGE DE SODIUM DANS L'EAU INTERSTITIELLE VS TENEUR EN SEL.

(SHERARD ET AL., 1972)

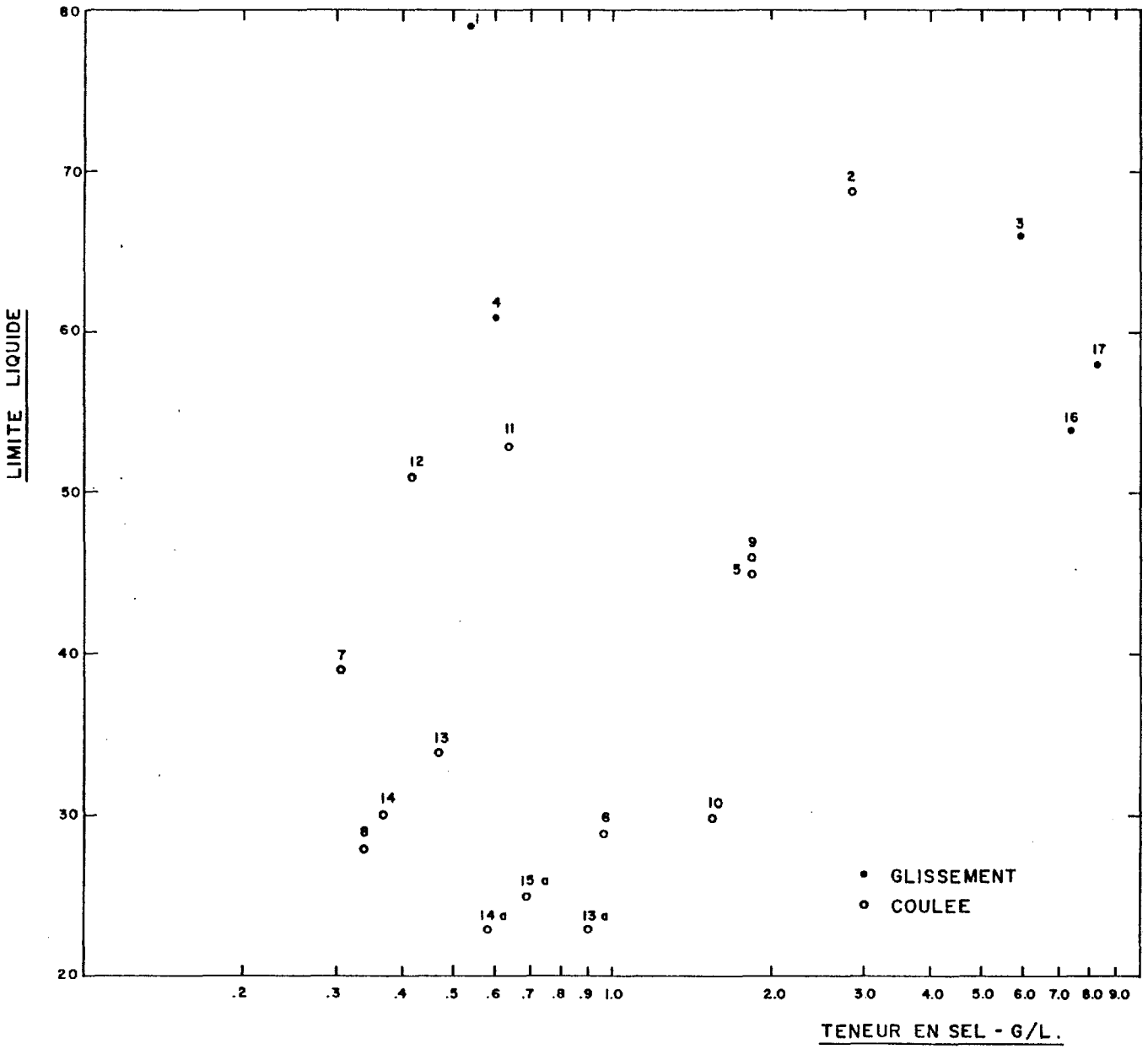

FIGURE 119. LIMITE LIQUIDE VS TENEUR EN SEL

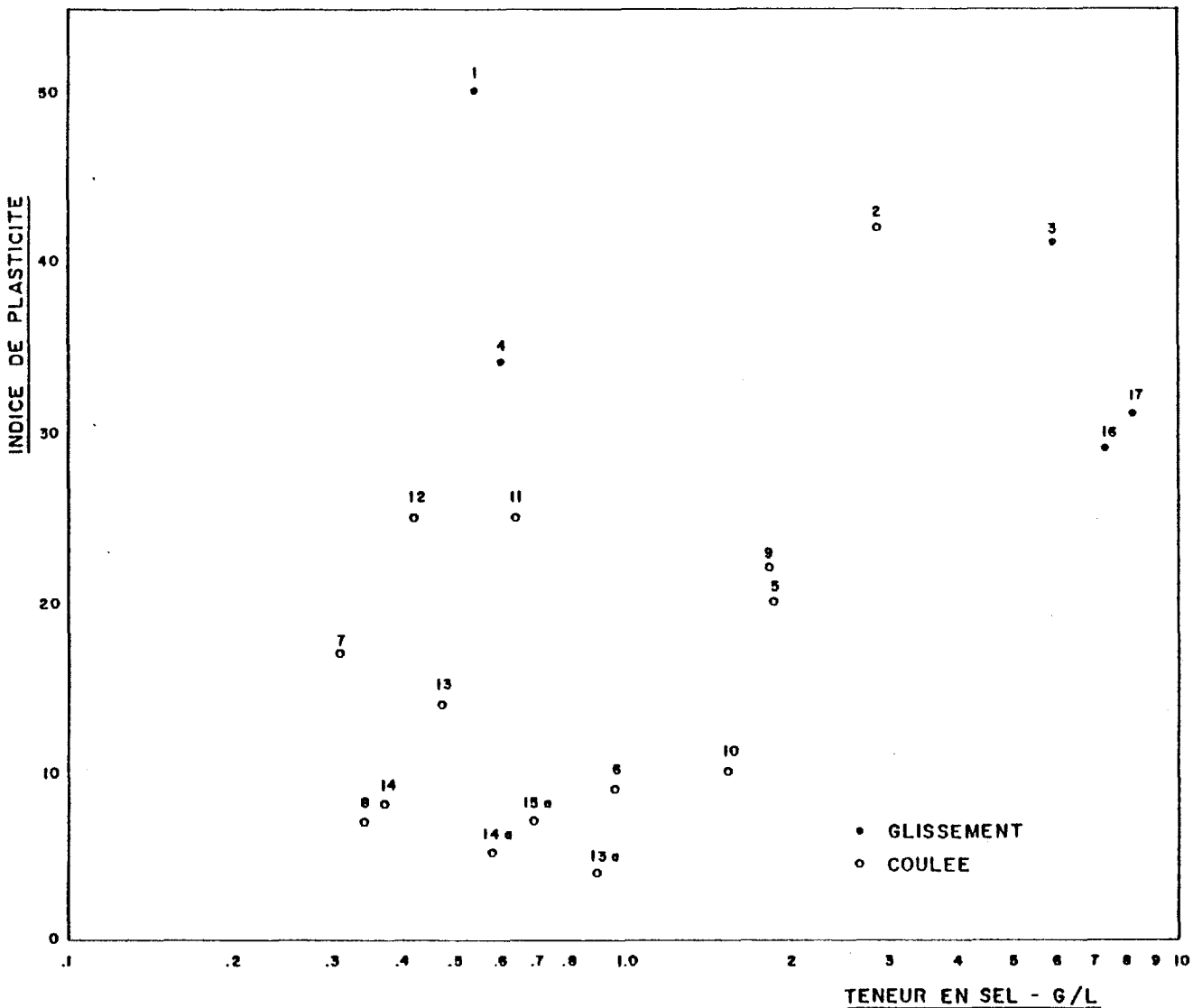

FIGURE 120. INDICE DE PLASTICITE VS TENEUR EN SEL.

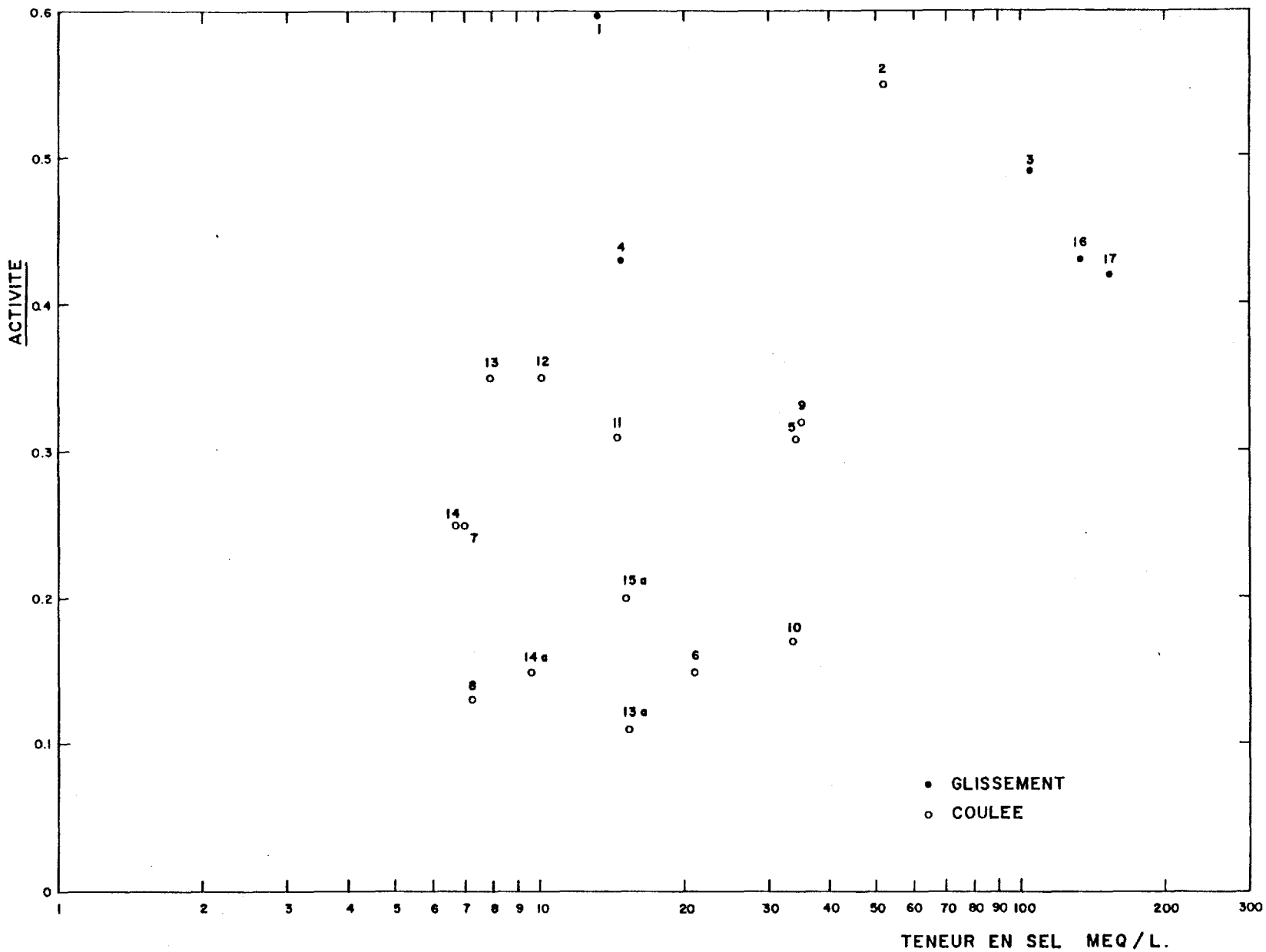

FIGURE 121. ACTIVITE VS TENEUR EN SEL

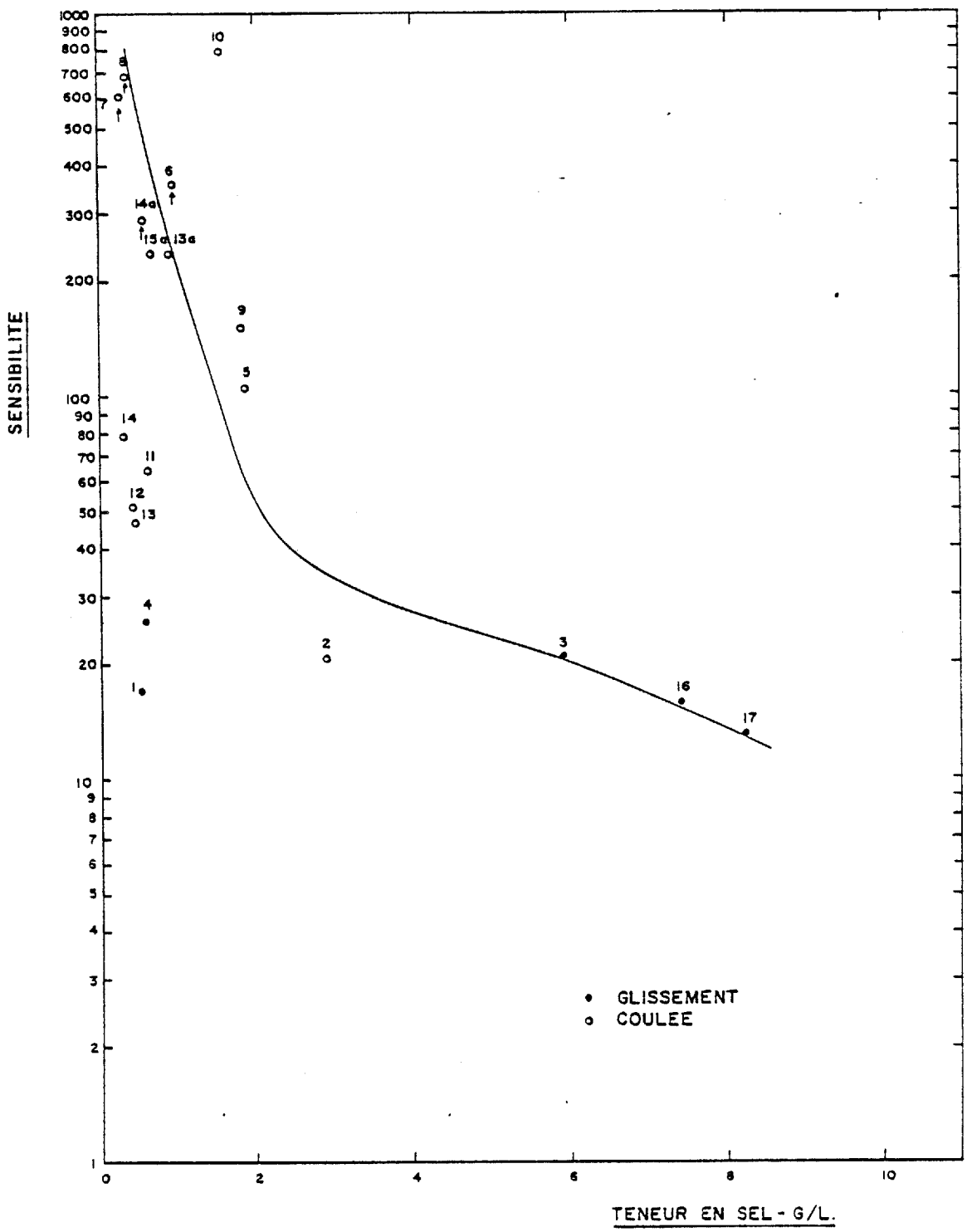

FIGURE 122. SENSIBILITE VS TENEUR EN SEL.

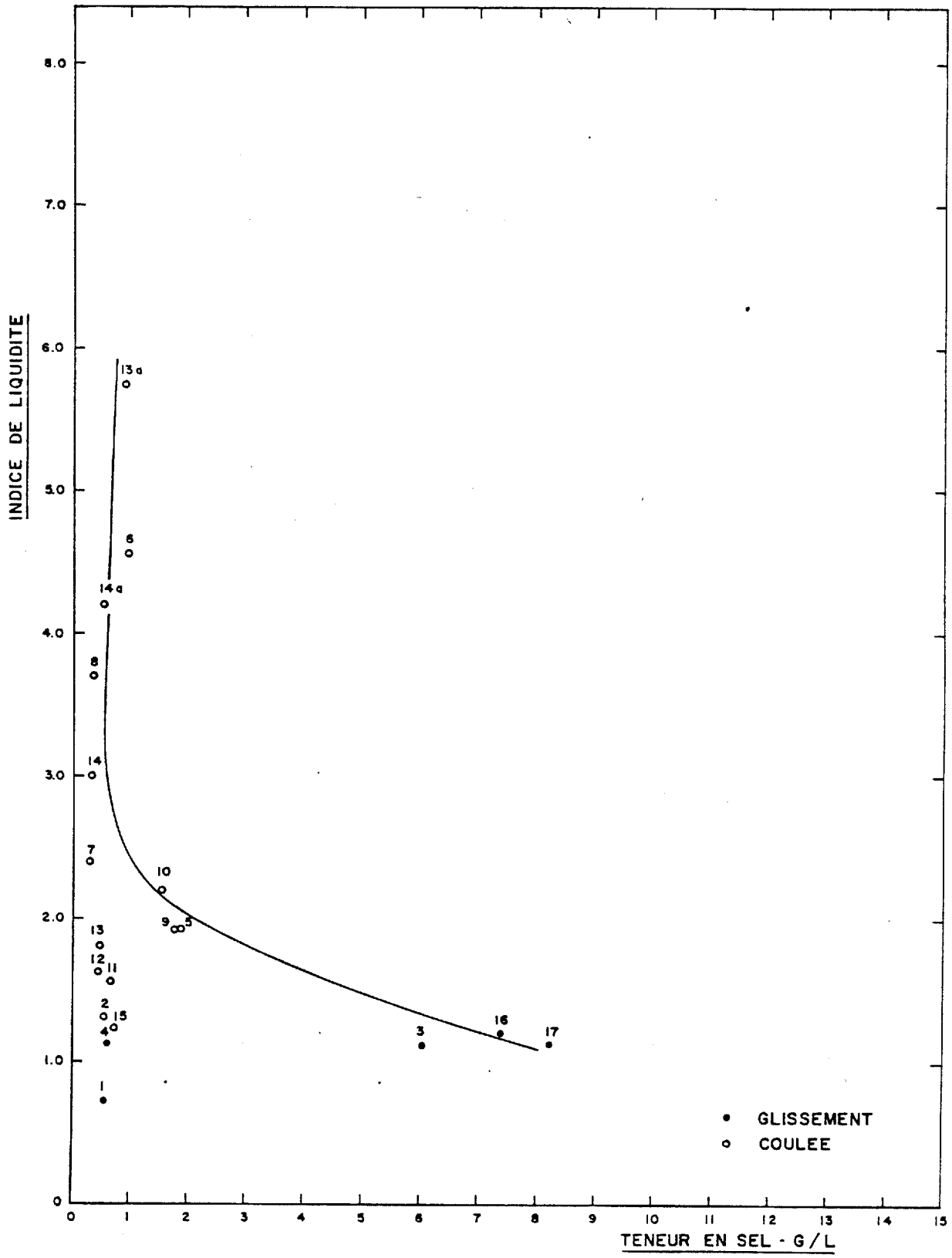

FIGURE 123. INDICE DE LIQUIDITE VS TENEUR EN SEL

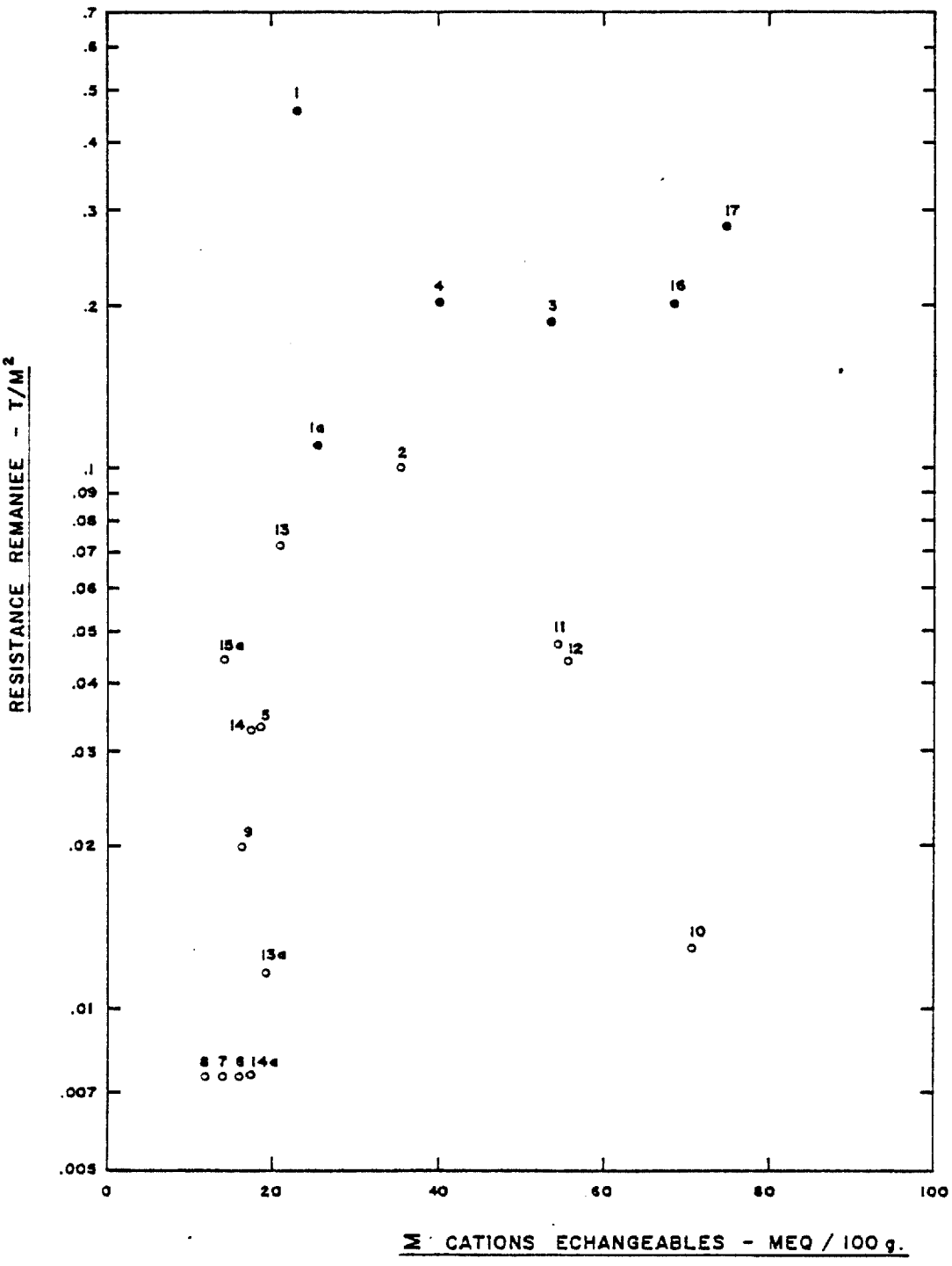

FIGURE 124. RESISTANCE REMANIEE VS Σ CATIONS ECHANGEABLES.

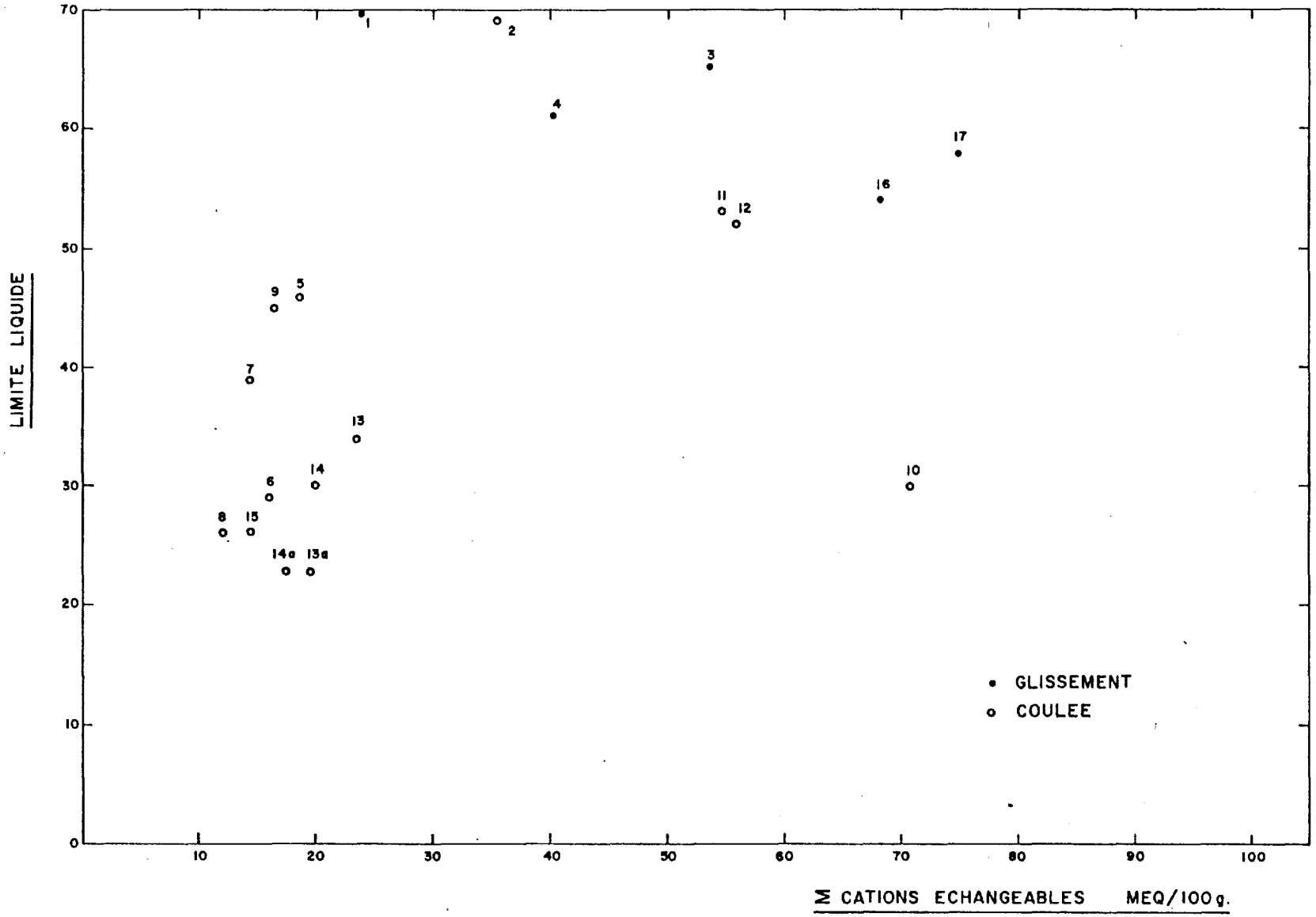

FIGURE 125. LIMITE LIQUIDE VS Σ CATIONS ECHANGEABLES.

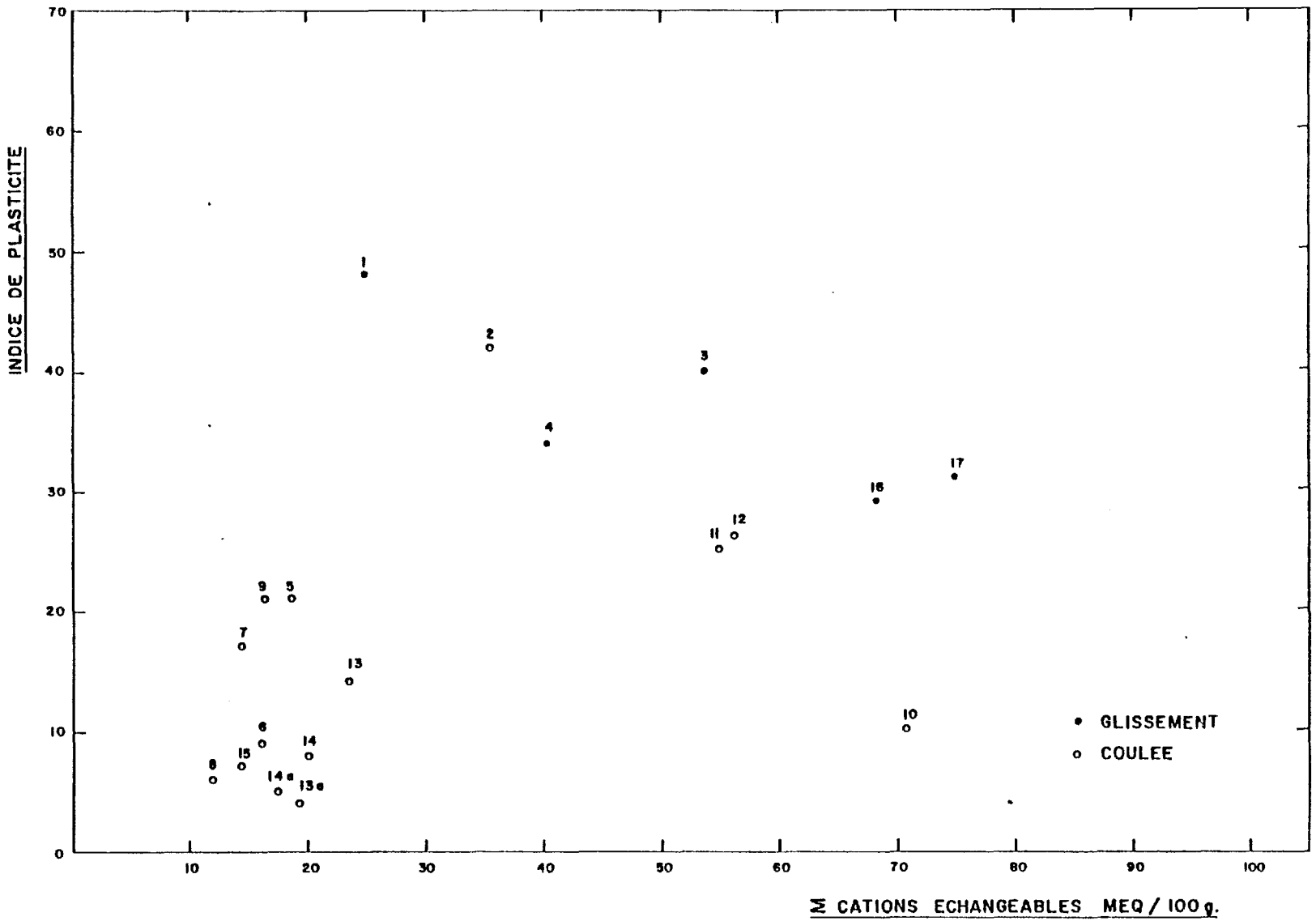

FIGURE 126. INDICE DE PLASTICITE VS Σ CATIONS ECHANGEABLES

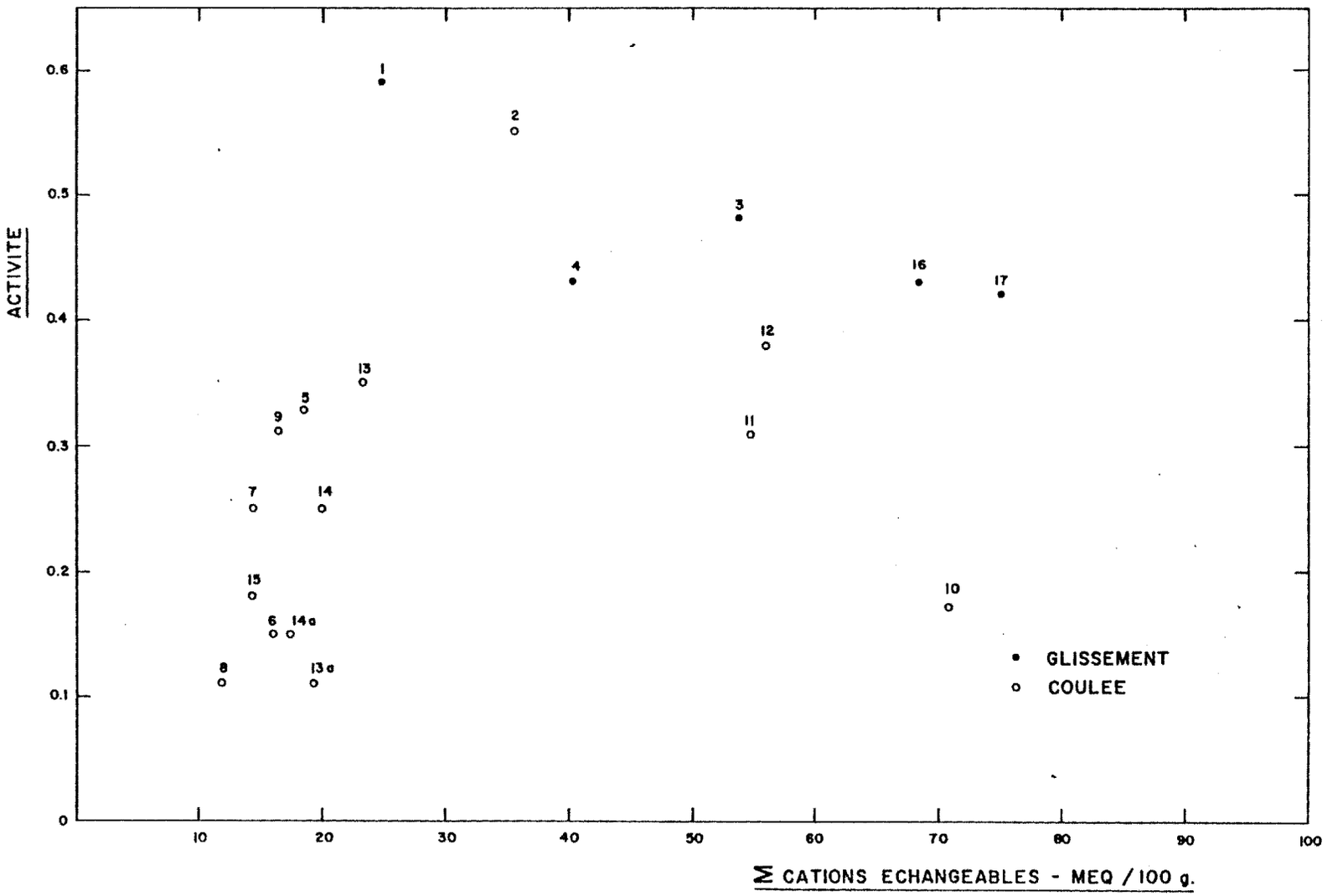

FIGURE 127. ACTIVITE VS Σ CATIONS ECHANGEABLES

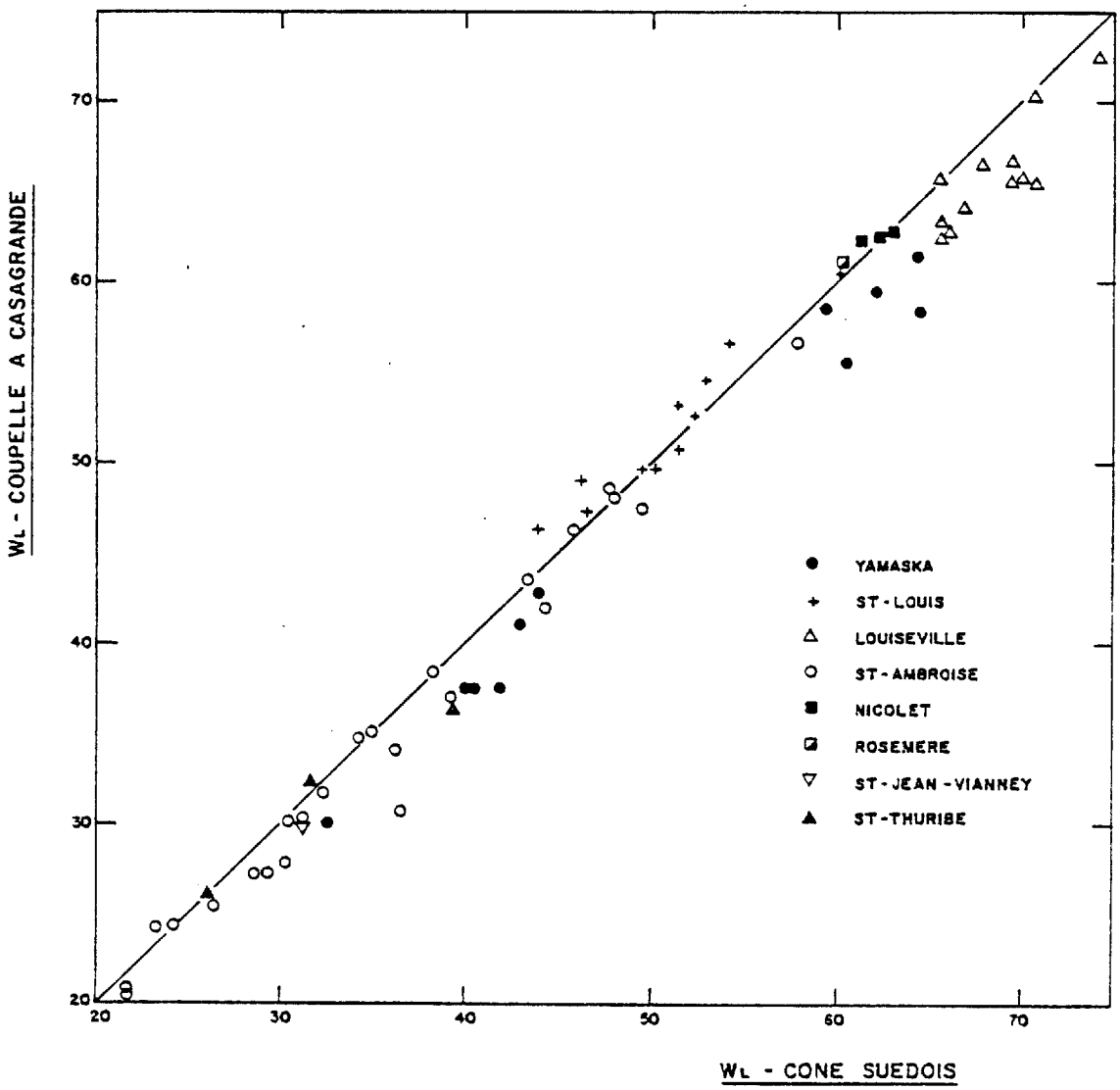

FIGURE 128. COMPARAISON DES APPAREILS POUR FAIRE LES LIMITES LIQUIDES : COUPELLE A CASAGRANDE VS CONE SUEDOIS.