

MB 2018-24

Energie de remaniement et régression des coulées d'argile, rapport final (GCT-82-01)

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 



UNIVERSITÉ LAVAL

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

section mécanique des sols

ÉNERGIE DE REMANIEMENT
ET RÉGRESSION DES COULÉES D'ARGILE

Rapport final

Rapport GCT-82-01

P. Flon, Et. grad.

F. Tavenas, D. Ing.

S. Leroueil, Ing. Ph. D.

4024

Mars 1982

P. Flon

ENERGIE DE REMANIEMENT ET
REGRESSION DES COULEES D'ARGILE

Rapport final

présenté par

Paul Flon, étudiant gradué

François Tavenas, professeur

et

Serge Leroueil, professeur adjoint

Laboratoire de Mécanique des Sols
Département de Génie civil
Faculté des Sciences et de Génie
Université Laval
Québec QUEBEC
G1K 7P4

Mars 1982

TABLE DES MATIERES

PAGE TITRE	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES	iii
AVANT-PROPOS	1
 CHAPITRE 1 PRESENTATION GENERALE	 2
1.1 Position du problème	2
1.2 Etat des connaissances	5
1.2.1 Kallstenius T. (1963)	5
1.2.2 Goodman L.J. et Leininger R. (1967)	5
1.2.3 Ladanyi B., Morin J.-P., Pelchat C. (1971)	6
1.2.4 Söderblom (1974)	7
1.2.5 Massarsch, K.R. (1976)	8
1.3 Description générale des travaux	9
1.3.1 But de l'étude	9
1.3.2 Travaux de chantier	9
1.3.3 Travaux de laboratoire	10
1.3.4 Interprétation des résultats	11
1.3.5 Cône suédois	11
 CHAPITRE 2 PROPRIETES DES SITES ETUDIES	 14
2.1 Généralités	14
2.1.1 Description générale des argiles étudiées	14
2.1.2 Nature des travaux sur les différents sites	15
2.2 Saint-Léon de Maskinongé	15
2.2.1 Description du site	15
2.2.1.1 Situation	15
2.2.1.2 Topographie et géologie	16

2.2.2	Travaux de chantier	16
2.2.2.1	Description des travaux	16
2.2.2.2	Reconnaissance géotechnique	16
2.2.3	Travaux de laboratoire	19
2.2.4	Profil stratigraphique	20
2.2.4.1	Description globale	20
2.2.4.2	Propriétés physiques	20
2.2.4.3	Propriétés mécaniques	23
2.2.4.4	Condition de nappe	30
2.2.4.5	Conclusion	30
2.3	Saint-Hilaire	31
2.3.1	Description du site	31
2.3.1.1	Situation	31
2.3.1.2	Topographie et géologie	31
2.3.2	Travaux de chantier	31
2.3.3	Travaux de laboratoire	32
2.3.4	Profil stratigraphique	32
2.3.4.1	Description globale	32
2.3.4.2	Propriétés physiques	32
2.3.4.3	Propriétés mécaniques	32
2.4	Saint-Thuribe	34
2.4.1	Description du site	34
2.4.1.1	Situation	34
2.4.1.2	Topographie et géologie	34
2.4.2	Travaux effectués	34
2.4.3	Profil stratigraphique	35
2.4.3.1	Description globale	35
2.4.3.2	Propriétés physiques	35
2.4.3.3	Propriétés mécaniques	35

2.5	Autres sites	38
2.5.1	Louiseville	38
2.5.1.1	Description du site	38
2.5.1.2	Travaux effectués	38
2.5.1.3	Caractéristiques du dépôt	39
2.5.2	Mascouche	40
2.5.3	Saint-Alban	41
2.5.4	Saint-Jean Vianney	41
2.6	Conclusion: comparaison des propriétés physiques et mécaniques des différents sites	42
2.6.1	Propriétés physiques	42
2.6.2	Propriétés mécaniques	43
CHAPITRE 3	ESSAIS D'IMPACT	46
3.1	Essais en chute libre	46
3.1.1	Généralités	46
3.1.2	Appareillage	46
3.1.3	Résultats	47
3.1.3.1	Echantillon de 5 × 5 cm	49
3.1.3.2	Echantillon de plus grande dimension	51
3.1.4	Conclusion	51
3.2	Essais de pilonnage	52
3.2.1	Généralités	52
3.2.2	Appareillage	52
3.2.3	Résultats	53
3.2.3.1	Echantillon de 5 × 5 cm	53
3.2.3.2	Echantillon de 10 × 10 cm	54
3.3	Conclusion	54

CHAPITRE 4	ESSAIS D'EXTRUSION	57
4.1	Généralités	57
4.2	Appareillage	57
4.3	Description de l'essai	58
4.4	Résultats	59
4.4.1	Force d'extrusion F et résistance au cisaillement c_u	59
4.4.2	Domaine stable de F et c_u et teneur en eau	61
4.4.3	Etat de remaniement dans la filière	62
4.5	Conclusion	62
CHAPITRE 5	ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE	64
5.1	Généralités	64
5.2	Appareillage	64
5.3	Description de l'essai	65
5.4	Résultats	66
5.4.1	Force de cisaillement	66
5.4.2	Force au demi-cycle	68
5.4.3	Résistance au cisaillement scissométrique	69
5.4.4	Résistance au cisaillement déterminée au cône en fin d'essai ..	71
5.4.5	Energie cumulée	73
5.5	Conclusion	74
CHAPITRE 6	INTERPRETATION - DISCUSSION	76
6.1	Simplification: choix du meilleur type d'essai	76
6.1.1	Normalisation	76
6.1.1.1	Degré de remaniement I_r	76
6.1.1.2	Energie normalisée W_N	76
6.1.2	Relations I_r vs W_N	77

6.1.3	Comparaison des différents procédés de remaniement	78
6.1.3.1	Chute libre et pilonnage	78
6.1.3.2	Extrusion	79
6.1.3.3	Cisaillement simple	79
6.1.4	Limitations de l'essai CIS choisi	80
6.1.4.1	Frottement	80
6.1.4.2	Distribution de l'énergie	80
6.1.4.3	Liquéfaction	81
6.2	Interprétation	82
6.2.1	Energie de remaniement <i>in situ</i>	82
6.2.2	Application aux sites étudiés	83
6.2.3	Analyse de la relation I_r vs W_N (essai CIS, figure 141)	84
6.2.4	Corrélations degré de remaniement vs caractéristiques des argiles	86
6.2.4.1	Généralités	86
6.2.4.2	Corrélation I_r vs activité	87
6.2.4.3	Corrélation I_r vs teneur en eau	88
6.2.4.4	Corrélation I_r vs sensibilité	88
6.2.4.5	Corrélation I_r vs I_p ou w_L	88
6.3	Risques de rétrogression	89
6.3.1	Etudes antérieures	89
6.3.2	Critères de rétrogression	90
6.3.2.1	Généralités	90
6.3.2.2	Rupture initiale de la pente	90
6.3.2.3	Ruptures successives	91
6.3.2.4	Ecoulement des débris	91
6.3.2.5	Processus de remaniement	92
6.3.3	Autres facteurs de rétrogression	94
6.4	Avenir des essais d'énergie	94

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS GENERALES	96
BIBLIOGRAPHIE	98
LISTE DES TABLEAUX	100
LISTE DES FIGURES	101
LISTE DES PHOTOGRAPHIES	106

AVANT-PROPOS

Par contrat intervenu le 2 octobre 1980 entre le ministère de l'Energie et des Ressources du Québec et le laboratoire de géotechnique de l'Université Laval, ce dernier a entrepris une étude de l'énergie de remaniement des argiles Champlain, dans le but de définir des paramètres et des techniques d'essai qui pourraient servir de base à une évaluation du risque de coulée.

Cette étude a été effectuée sur sept sites expérimentaux, dont trois ont été définis par le Service de Géotechnique du ministère de l'Energie et des Ressources. Les quatre autres ont été choisis par l'université parmi des sites déjà répertoriés au laboratoire de géotechnique, et complétant la plage de données nécessaires à cette recherche. Notons que le contrat initial avait prévu le choix d'un quatrième et dernier site par le ministère, mais il a été abandonné car il n'offrait pas des caractéristiques permettant d'étendre la plage des données.

Cette recherche fait l'objet d'une thèse de maîtrise présentée à l'Ecole des Gradués de l'Université Laval en mars 1982.

Un premier rapport intérimaire soumis en mars 1981 donnait les propriétés du premier site choisi, le détail des techniques expérimentales, et une idée du potentiel de la méthode. Le deuxième rapport soumis en octobre 1981 rassemblait la plupart des résultats bruts sous forme de figures et tableaux. Le troisième et dernier rapport reprend les données des deux rapports précédents, et présente tous les résultats des travaux de chantier et de laboratoire, en particulier les résultats compilés des essais d'énergie ainsi que leurs interprétations et commentaires correspondants.

1. PRESENTATION GENERALE

1.1 Position du problème

Les nombreux glissements de terrain qui se produisent de nos jours dans le monde ont un impact socio-économique énorme. En particulier dans l'Est du Canada et en Scandinavie, ces glissements peuvent dégénérer en coulées d'argile aux effets destructeurs, par un processus de rétrogression. Des millions de mètres cubes de sol sont alors liquéfiés et évacués par un cours d'eau, emportant surfaces cultivées, propriétés, maisons, bâtiments, industries et voies de communication; des pertes humaines sont le plus souvent à déplorer. Il est donc d'une importance capitale pour l'ingénieur et pour le planificateur de pouvoir prévoir la possibilité d'occurrence de coulées ainsi que leur étendue possible. Ainsi, l'établissement de cartes de zonage dans les régions sujettes à glissements doit tenir compte de ce phénomène et des risques encourus. Malheureusement, on ne dispose encore que de très peu d'informations sur la nature du mécanisme; un seul glissement, celui de Rissa (Norvège) en 1978, a pu être filmé et peut donc être analysé à l'aide d'observations précises.

Des études ont été conduites depuis quelques années, en particulier par le Service de Géotechnique du ministère de l'Energie et des Ressources du Québec, pour définir les conditions topographiques et géotechniques qui favorisent le développement de coulées à partir d'un glissement initial limité.

Pour qu'un glissement dégénère, il semble nécessaire de réunir les circonstances suivantes:

- (a) La stabilité à court terme de la face créée par le premier glissement doit être insuffisante (talus trop haut et trop raide). Ce facteur a été mis en évidence par Mitchell et Markell (1974), et Carson (1977), qui montrent que le développement des coulées est lié au rapport $\gamma H/c_u$.
- (b) Les débris du glissement initial et des glissements successifs lors du développement de la coulée doivent se remanier rapidement et totalement de manière à être évacués par écoulement hors du cratère du glissement, et à ce que la face arrière du glissement en progression ne reçoive pas de support par la présence de ces débris.

- (c) La topographie de la vallée doit être telle que les débris remaniés puissent être évacués rapidement du site du glissement pour maintenir le cratère vide et assurer ainsi une hauteur maximum à la face arrière, sujette à régression.

rétrogression

- (d) La stratigraphie et les conditions hydrogéologiques doivent être telles que des sous-pressions et éventuellement des apports d'eau libre viennent favoriser les glissements successifs, le remaniement et l'écoulement des débris. Par exemple, la proximité d'affleurements rocheux, la présence de couches silteuses ou sableuses sub-horizontales et artésiennes, sont des raisons supplémentaires de régression.

rétrogression

rétrogression

Le premier facteur, relié à l'idée d'une régression par tranches de sol devenues instables, a permis aux auteurs d'établir une relation entre le "nombre de stabilité" $N_c = \frac{\gamma H}{c_u}$ et la distance de rétrogression (fig. 148 et 149) (Mitchell et Rankell 1974)

Le second facteur, relié à la facilité de remaniement du sol, a fait l'objet de quelques études, destinées surtout à identifier les sols sujets à coulée.

Grondin (1978) puis Leblais et Rissmann (1979) donnent des caractéristiques géotechniques et géochimiques des argiles extra-sensibles et établissent des relations générales entre elles. Ils montrent ainsi que les grandes coulées se produisent dans des silts argileux à faible plasticité (les sols dont $I_p < 20$ ou $w_L < 40\%$ sont sujets à rétrogression de plus de 500 m, les autres à rétrogression de 100 à 500 m) et forte sensibilité, et dont la résistance remaniée est inférieure à 1 kPa. Pour pouvoir évacuer le cratère, le sol doit en effet avoir une très faible résistance à l'état remanié.

Toutefois, les corrélations établies entre les propriétés physiques ou mécaniques du sol, telles w_L , I_p , I_L , S_t , c_{ur} , teneur en sel, et l'occurrence et l'ampleur des coulées ne sont pas bi-univoques et systématiques. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces propriétés permettent de décrire la différence entre les états intact et remanié du sol mais pas nécessairement le processus de passage d'un état à l'autre. Or, c'est ce processus qui va dicter le comportement de la masse de débris en cours de glissement et donc le développement d'une coulée.

Söderblom (1974) a été le premier à proposer un moyen de caractériser le processus de passage de l'état intact à l'état remanié. Le concept de "rapidité" avait le mérite d'identifier une propriété distincte de la "sensibilité". Malheureusement, la méthode de mesure de la rapidité était trop subjective pour être utilisable en pratique.

Une étude récente sur l'énergie de déformation (Tavenas et al. 1979), poussa les auteurs à considérer la "rapidité" comme une caractérisation de l'énergie nécessaire à remanier l'argile. L'énergie de remaniement fut alors considérée comme un paramètre contrôlant le processus de remaniement d'une argile, et contrôlant donc aussi la possibilité de développement de glissements rétrogressifs et de coulées.

On peut envisager le problème de la façon suivante: lorsqu'un glissement se produit, une certaine quantité d'énergie potentielle est libérée dans la masse en glissement. Cette énergie est dissipée en frottement le long de la surface de rupture, en déformation de la masse et en remaniement des débris, et sous forme d'énergie cinétique. La distinction entre ces différentes formes d'énergie est difficile actuellement; cependant, il est clair que le remaniement des débris sera d'autant plus intense que la quantité d'énergie nécessaire pour produire ce remaniement sera faible par rapport à l'énergie potentielle libérée lors du glissement. L'énergie de remaniement du sol apparaît bien comme un paramètre important dans le développement des coulées argileuses.

En cours de glissement, la masse d'argile subit certainement, non seulement des déformations de distorsion et de compression, mais aussi des chocs et autres impacts; elle peut aussi, localement, être soumise à des processus de type extrusion ou laminage. L'énergie nécessaire au remaniement doit être fonction du type de sollicitation. On se propose donc d'étudier les relations entre énergie fournie et remaniement obtenu, sous sollicitation quasi statique sous impact, en extrusion et en cisaillement; des corrélations entre énergie de remaniement et propriétés caractéristiques des argiles devront être cherchées. Il s'agira en définitive de définir des paramètres et des techniques d'essai pouvant servir de base à une évaluation du risque de coulée.

1.2 Etat des connaissances

Un nombre relativement restreint de travaux ont porté sur l'étude des effets du remaniement et de l'énergie de remaniement.

Nous avons pu rassembler les articles suivants:

1.2.1 Kallstenius T. (1963)

Afin de mesurer le remaniement d'échantillons durant un transport, celui-ci a analysé l'effet de chocs sur la résistance mesurée au cône de deux argiles différentes, en laissant tomber des échantillons d'une hauteur de 1 m.

Il constate que la réduction de résistance de l'argile de "Skå Edeby" est davantage prononcée pour les indices de liquidité les plus forts (30% pour $I_L = 1,3$). Par contre, il n'observe pas de réduction de résistance pour les argiles très sensibles "quick clays".

1.2.2 Goodman L.J. et Leininger R. (1967)

Etudiant les problèmes de trafficabilité des pistes argileuses, ces auteurs ont essayé de prédire la décroissance en résistance d'échantillons de sol partiellement remaniés dans une boîte de cisaillement à volume constant, en mesurant l'énergie dissipée durant le remaniement, ou le travail nécessaire pour obtenir une certaine déformation de cisaillement (déformation angulaire).

Ils ont défini une échelle de degré de remaniement d'un sol subissant des enfoncements successifs de roues de camion; ils simulent les passages répétés des camions en imposant à un échantillon, plusieurs cycles de déformation angulaire de 0 à 50°, dans la boîte de cisaillement simple. Pour chaque cycle, la courbe force appliquée vs déformation angulaire est tracée. Le dernier cycle est celui pour lequel la force est minimum et le remaniement complet. L'énergie correspondant à chacun des cycles est déterminée par calculs de surfaces, et tracée en fonction du nombre de cycles. L'échelle de degré de remaniement est alors définie en indexant le graphique obtenu de 0 à 100%, depuis le départ de l'essai jusqu'au remaniement complet de l'échantillon.

Les auteurs ont fait deux essais sur la même argile à deux teneurs en eau différentes et obtiennent les résultats suivants: le travail effectif accumulé au cours des différents cycles, et requis pour atteindre 100% de remaniement, est environ deux fois plus fort (6 700 po. lbs) pour l'échantillon à 30,6% de teneur en eau que pour celui à 37,9% (3 300 po. lbs); par ailleurs, 100 cycles ont été nécessaires pour obtenir un remaniement complet pour le premier cas, et 30 cycles pour le deuxième cas.

Ils suggèrent à partir de leur étude, de multiplier les essais pour tenter d'établir une relation entre le degré de remaniement et la teneur en eau ou la densité du matériau.

Ils ont ainsi tracé pour quatre degrés de remaniement différents, quatre courbes teneur en eau vs énergie (entre $w = 30\%$ et 38%), pour une argile donnée.

Ils ont noté enfin les premiers points d'une relation entre la résistance au cisaillement mesurée au scissomètre de laboratoire et le degré de remaniement mesuré par le nombre de cycles.

1.2.3 Landanyi B., Morin J.-P., Pelchat C. (1971)

Afin d'étudier le progrès du remaniement sous déformation de masse, ils soumettent des échantillons d'argile, dans une presse, à des compressions croissantes et répétées; la résistance au cisaillement est mesurée au scissomètre de laboratoire. Ils mettent ainsi en évidence l'effet de l'affaissement de la structure sur la résistance résiduelle dans le domaine des déformations élevées (des déformations axiales de 200% ont été atteintes).

Par ailleurs, ils montrent que deux argiles aussi différentes que celles de Saint-Thuribe ($S_t > 200$) et d'Outardes ($S_t = 11$), peuvent avoir une décroissance identique de résistance; leurs limites liquides sont cependant les mêmes, 33% et 32,4%, respectivement; la résistance complètement remaniée est atteinte aux alentours de 200% de déformation axiale.

1.2.4 Söderblom (1974)

Ayant noté que la sensibilité n'est pas le seul paramètre qui gouverne le développement de grandes coulées argileuses, Söderblom détermine en 1974, l'énergie nécessaire pour casser la structure de l'argile, et montre que deux argiles de même sensibilité peuvent se comporter différemment.

Söderblom propose de caractériser la vitesse de mobilisation de la sensibilité d'une argile par la "rapidité" définie au moyen d'un "nombre de rapidité" R_N entre 1 et 10. La mesure de R_N se fait en plaçant un échantillon d'argile dans la coupelle à limite de liquidité de Casagrande et en le soumettant à 250 chocs standard de cette coupelle. Le degré de remaniement, c'est-à-dire le nombre de rapidité R_N , est alors évalué visuellement à partir de l'état de détérioration de l'échantillon en se servant des critères suivants:

NOMBRE DE RAPIDITE R_N

DEGRE D'INFLUENCE

1	échantillon non visiblement affecté;
2	à peine affecté visiblement;
3	environ 1 mm de la partie inférieure est déformé en une masse gélatineuse;
4	environ 5 mm de la partie inférieure est déformé en une masse gélatineuse; partie supérieure visiblement inchangée;
5	environ 5 mm de la partie inférieure est déformé en une masse gélatineuse et liquide; partie supérieure visiblement inchangée;
6	environ 10 mm de la partie inférieure est déformé en une masse gélatineuse et liquide; partie supérieure visiblement inchangée;
7	partie inférieure très déformée en une masse liquide; partie supérieure visiblement inchangée;
8	l'échantillon entier commence à se déformer en une masse liquide; les angles et irrégularités disparaissent;
9	l'échantillon entier est très déformé en une masse liquide et commence à sortir de la coupelle de Casagrande;
10	l'échantillon entier est transformé en masse liquide.

Selon la classification de Söderblom (1974), une argile serait dite "quick clay" si elle présente une sensibilité $S_t > 50$ et un nombre de rapidité $R_N > 8$.

On peut relever deux problèmes dans la définition et la mesure de la rapidité. D'une part, la mesure de R_N est hautement subjective puisque associée à une interprétation uniquement visuelle de l'état de remaniement de l'échantillon. D'autre part, et surtout, la quantité globale d'énergie fournie étant fixée, la définition de R_N fait abstraction de l'effet de la résistance initiale de la structure argileuse. Ainsi, lorsqu'on applique la méthode de Söderblom aux argiles de l'Est du Canada qui ont des degrés de surconsolidation et des résistances intactes beaucoup plus forts que les argiles suédoises, il est extrêmement rare d'obtenir des R_N supérieurs à 3 ou 4, alors même que ces argiles ont été le siège de très grandes coulées.

1.2.5 Massarsch, K.R. (1976)

Etudiant l'effet du battage de pieux sur le remaniement de l'argile, Massarsch met au point un essai d'extrusion et exprime la réduction de résistance au cisaillement par un rapport de remaniement:

$$RR = \frac{c_u \text{ de l'argile intacte non drainé}}{c_u \text{ de l'argile à un degré de remaniement donné}} = \frac{\tau_{fu}}{\tau_{di}}$$

Dans l'extrudoir développé par Massarsch, l'échantillon est poussé au travers d'une bague perforée dont la surface des trous représente 18% de la surface initiale, puis dans une filière dont la section est 70% de la surface initiale. La résistance de l'argile est mesurée au cône tombant, avant l'essai (τ_{fu}), et à sa sortie de la filière (τ_{di}).

A partir de 30 essais pour étudier les effets du remaniement causé par le fonçage d'un pieu, Massarsch tire les conclusions suivantes:

- Pour un faible remaniement, la réduction de résistance au cisaillement peut varier pour des argiles de même sensibilité.

- Il est recommandé d'utiliser le rapport de remaniement RR plutôt que la sensibilité, pour une étude de pieux foncés dans l'argile; une attention spéciale doit être apportée aux fortes valeurs de RR : un glissement de terrain important s'est produit pendant le fonçage de pieux sur un site où $RR > 15$.

- Aucune corrélation n'a été trouvée entre RR et la teneur en eau, l'indice de plasticité et la résistance au cisaillement.

1.3 Description générale des travaux

1.3.1 But de l'étude

La recherche entreprise visait d'abord à étudier le processus de mobilisation d'énergie et de remaniement dans une série d'argiles du Québec possédant des résistances intactes, des sensibilités et des propriétés physiques très diverses. L'étude visant à développer une meilleure compréhension des processus de développement des grands glissements rétrogressifs et des coulées d'argile, les mécanismes de remaniement courant en cours de glissement ont été reproduits en laboratoire par cisaillement, impact, extrusion.

Dans le but de permettre une certaine corrélation entre les résultats expérimentaux de l'étude et l'occurrence de glissements rétrogressifs plus ou moins imposants, les échantillons étudiés ont été prélevés sur des sites voisins de glissements de caractéristiques connues et variables. Ce choix des sites a été fait conjointement avec le Service de Géotechnique du ministère de l'Energie et des Ressources.

1.3.2 Travaux de chantier

Pour trois sites récemment choisis, soit Saint-Léon de Maskinongé, Saint-Hilaire, Saint-Thuribe, on a procédé à une étude de la stratigraphie par relevés piézopénétrométriques et scissométriques, et par échantillonnage en ϕ 200 mm jusqu'à une profondeur de 12 m environ, en continu (Saint-Léon) ou à deux profondeurs différentes (Saint-Hilaire, Saint-Thuribe).

Quatre autres sites, soit Louiseville, Saint-Alban, Mascouche et Saint-Jean-Vianney, ont fait l'objet de relevés et échantillonnage antérieurs par l'université; une description sommaire de chacun de ces sites est reprise dans ce rapport.

Chaque échantillonnage effectué sur le terrain s'accompagne de prise de mesures systématiques au cône tombant sur chaque échantillon (sauf

pour Saint-Jean-Vianney).

1.3.3 Travaux de laboratoire

L'argile a été étudiée complètement en laboratoire à deux profondeurs différentes pour les trois premiers sites, une seule profondeur pour les trois suivants.

Pour chacune de celles-ci, des caractéristiques mécaniques et physiques moyennes ont été déterminées et figurent aux tableaux 1 et 2. Il s'agit en particulier d'essais d'identification [poids volumique, densité, sédimentométrie, analyse chimique de l'eau interstitielle (résumé au tableau 5)], de prises de teneur en eau (résumé au tableau 3) et de limites mesurées au cône tombant, de mesures des résistances au cisaillement intactes et remaniées, et d'essais oedométriques.

Les essais d'énergie, qui visent à reproduire en laboratoire le processus d'un glissement de terrain, ont été réalisés aux mêmes profondeurs et se divisent en quatre sortes d'essais: essais de chute libre, de pilonnage, d'extrusion, de cisaillement simple. Pour chacun de ces essais, des mesures physiques et mécaniques ont été relevées sur les échantillons correspondants. Ces mesures au cône tombant définissent l'état intact de l'échantillon avant essai, puis des états de remaniement croissants en cours d'essai. Les valeurs intactes sont aussi incluses dans les moyennes générales des tableaux 1 et 2.

On notera que le projet initial comportait une série d'essais triaxiaux CIU rapides, afin de déterminer une énergie de cisaillement par intégration de surface sous la courbe effort-déformation. Cette série a été abandonnée pour les raisons suivantes:

Les premiers essais CIU effectués sur l'argile de Saint-Léon à la profondeur de 10 m n'ont pas permis d'obtenir un anti-écrouissage suffisant à faible contrainte et donc une variation significative des paramètres ΔW et Δq que l'on cherchait à quantifier. On aurait rencontré le même problème pour les autres sites car les essais devaient de toute façon être réalisés à faible contrainte, à l'intérieur de la courbe d'état limite.

L'apparition d'un plan de cisaillement permet de croire que toute l'énergie mise en jeu dans cet essai est dépensée dans la formation de ce plan et non dans le remaniement de l'échantillon. On aurait pu tout au plus déterminer une énergie globale impossible à rapporter à un certain volume de sol.

Les essais CIU n'auraient donc servi qu'à établir une limite entre l'énergie de déformation et l'énergie de remaniement, en particulier à connaître la limite inférieure de l'énergie qui nous intéresse.

De nombreux échantillons sont stockés au laboratoire après essais pendant un certain temps. Toutes les feuilles de mesures sont conservées dans les dossiers de l'université.

1.3.4 Interprétation des résultats

Tous les essais d'énergie ont ensuite été transcrits sous forme de courbe afin de mettre en relation les forces impliquées, les déplacements produits, avec les résistances au cisaillement obtenues, pour différents degrés de sollicitation; les teneurs en eau et autres caractéristiques physiques (indice de liquidité en particulier) et mécaniques (sensibilité et pression de préconsolidation en particulier) ont été le plus souvent associées à chaque essai.

La dernière phase de cette étude consista à interpréter chaque figure, en essayant de lier les constatations évidentes ou les tendances, avec les observations visuelles enregistrées au cours de l'essai.

Les quatre sortes d'essais devront enfin être reliées entre elles.

1.3.5 Cône suédois

On signalera en dernier lieu l'importance prise par l'utilisation du cône suédois pour cette étude, puisque c'est l'instrument de base qui a servi pour presque tous les essais, à déterminer la résistance au cisaillement induite sous chaque sollicitation, c'est-à-dire à évaluer le degré de remaniement.

Toutes les études réalisées jusqu'à ce jour démontrent la supériorité du cône sur la méthode de Casagrande pour la mesure de la limite de liquidité, tant d'un point de vue exactitude qu'efficacité. Même s'il tend à surestimer légèrement la limite liquide (Grondin 1978), le cône permet de donner rapidement une valeur de résistance au cisaillement et de limites, et établit plusieurs corrélations entre diverses caractéristiques argileuses (Le Bihan et Leroueil 1980).

L'interprétation de l'essai au cône suédois en terme de résistance au cisaillement de l'argile est associée à quelques difficultés. Cette interprétation est fondée sur la relation empirique

$$c_u = 9,8 K \frac{M}{p^2}$$

proposée par Hansbo (1957) où M est la masse du cône en gr., p sa pénétration en mm et K un coefficient empirique qui serait indépendant de la masse du cône, fonction seulement de l'angle au sommet du cône et du type d'argile. Ainsi, pour un cône de 30° d'angle au sommet, on aurait $K = 1,0$ dans l'argile intacte et $K = 0,8$ dans l'argile totalement remaniée, alors que pour un cône de 60° d'angle au sommet, on aurait $K = 0,3$ et $K = 0,27$ dans les mêmes circonstances.

La variation de K de l'état intact à l'état remanié crée un problème dans notre étude, lors de la mesure des résistances en état de remaniement intermédiaire. En l'absence d'information, nous avons décidé d'utiliser la valeur de K correspondant à l'argile intacte.

Par ailleurs, la très grande quantité d'essais réalisés a permis de vérifier la validité des coefficients K , par corrélation des essais au cône entre eux. Nous avons ainsi pu constater que, pour le cône 400 gr- 30° , la valeur de K serait $K = 1,5$, plutôt que $K = 1,0$; pour les autres cônes, les valeurs usuelles de K seraient applicables.

Il est étonnant de constater d'autre part (tableau 2) qu'il existe parfois des différences notables entre les mesures prises sur le chantier et

celles du laboratoire, indiquant qu'une étude doit être entreprise sur l'effet de la paraffine, ou du relâchement progressif des contraintes dans le temps.

Les valeurs utilisées tout au long de cette étude sont celles qui ont été déterminées en laboratoire.

2. PROPRIETES DES SITES ETUDIES

2.1 Généralités

2.1.1 Description générale des argiles étudiées

Les sites choisis pour la réalisation de cette étude font partie des dépôts d'argile marine de l'est du Canada (voir figure 1). Situés principalement dans les Basses Terres du Saint-Laurent, ces dépôts datent de la dernière déglaciation wisconsinienne, soit de 8000 à 12000 ans avant aujourd'hui. Ils ne sont pas homogènes dans toute la vallée, tant du point de vue propriétés physiques que mécaniques, ce qui nous permet d'identifier et d'analyser des sites différents afin de contribuer à l'étude du comportement global de l'argile, valable autant que possible d'un bout à l'autre de la province.

La nature et l'origine des particules ainsi que leur milieu de sédimentation, par exemple la salinité des eaux, ont été la source de propriétés différentes de ces argiles. Ainsi, les matériaux étudiés présentent des teneurs en particules argileuses ($< 2 \mu$) variant de 30 à 85%, des limites liquides comprises entre 25% et 73% et des indices de plasticité variant de 5 à 46%. Les argiles Champlain sont donc en fait des matériaux pouvant aller des argiles silteuses à plasticité moyenne à forte, aux silts argileux à très faible plasticité (tableau 1).

Par ailleurs, des phénomènes post-sédimentaires tels le lessivage, thixotropie ou cimentation, et la surcharge géologique ont affecté certains de ces dépôts dans des proportions variables. Ainsi, les matériaux étudiés présentent des indices de liquidité variant de 1,0 à plus de 4,0 (tableau 1), des rapports de surconsolidation compris entre 1,3 et 5,6 et des résistances au cisaillement non drainé variables entre 20 et 200 kPa (tableau 2).

Les sites étudiés représentent bien les différents types de matériaux qu'on peut rencontrer dans les dépôts de la mer Champlain et les résultats de l'étude devraient avoir une validité générale à tous ces dépôts.

2.1.2 Nature des travaux sur les différents sites

L'ampleur des études de terrain et de laboratoire a varié d'un site à l'autre.

A Saint-Léon, le site choisi devait servir à l'étude du comportement à long terme du talus voisin. Il a donc fait l'objet en 1980 d'une étude très détaillée avec essais *in situ* au scissomètre et au piézocône et échantillonnage continu au moyen de l'échantillonneur de ϕ 200 mm.

A Saint-Thuribe et à Saint-Hilaire, les sites ont été choisis et étudiés en fonction des besoins de la présente recherche. Ils ont fait l'objet en 1981 d'essais *in situ* au piézocône et au scissomètre et d'un échantillonnage local au moyen de l'échantillonneur de ϕ 200 mm à deux profondeurs sélectionnées compte tenu des résultats des essais *in situ*.

Les autres sites de Louiseville, Mascouche, Saint-Alban et Saint-Jean-Vianney ont été étudiés au moyen d'échantillons prélevés lors de travaux antérieurs du groupe de géotechnique de l'Université Laval. Dans les trois premiers cas, les échantillons ont été prélevés au moyen de l'échantillonneur de ϕ 200 mm en 1979 ou 1980. Pour Saint-Jean-Vianney, on a utilisé des blocs prélevés en tranchée dans le fond du glissement en 1971, et stockés depuis dans une chambre humide.

2.2 Saint-Léon de Maskinongé

2.2.1 Description du site

2.2.1.1 Situation

Le site d'essai est localisé sur la rive nord du fleuve St-Laurent, à 30 km à l'ouest de Trois-Rivières, à 6 km au nord de Louiseville, au bord de la rivière Chacoura. Le talus proprement dit, dit "talus Loulou", a été choisi à proximité immédiate du village de Saint-Léon, sur le côté concave d'un méandre de la rivière Chacoura. Les figures 1 à 3 en présentent le plan de localisation.

2.2.1.2 Topographie et géologie

Le talus se développe entre les élévations 12 et 29 m, de la rivière au sommet du talus; l'inclinaison de la pente est comprise entre 24° et 34°. La topographie du site a été relevée selon trois profils par le personnel du ministère de l'Energie et des Ressources. Du point de vue géologique, la région semble caractérisée par la présence d'épais dépôts d'argile marine molle formés par la mer Champlain, et parfois surmontés par des dépôts lacustres et fluvio-glaciaires, formés en particulier par le lac post-glaciaire Lampsilis (Prest 1970).

La distinction entre les deux dépôts semblerait avoir été détectée dans la région de Louiseville (élévation + 7 m); par contre, l'argile marine semble être présente jusqu'en surface dans la région de Saint-Léon (élévation + 29 m).

Contrairement à la région de Louiseville où il est possible qu'il y ait eu une première érosion jusqu'à l'élévation -6 m, suivie d'une redépôtation fluvio-lacustre jusqu'à l'élévation + 7 m, l'argile de Saint-Léon serait l'argile marine d'origine.

2.2.2 Travaux de chantier

2.2.2.1 Description des travaux

Les différents travaux de chantier pour récupérer les échantillons, et recueillir des renseignements sur les propriétés physiques et mécaniques du sol, ont été exécutés par le laboratoire de géotechnique de l'Université Laval. Les travaux d'arpentage, un forage descriptif, en particulier à partir de la profondeur où s'arrêtait celui de l'Université Laval, et des essais de laboratoire, ont été effectués par le ministère de l'Energie et des Ressources.

2.2.2.2 Reconnaissance géotechnique

A) Implantation des forages et des sondages

L'université a réalisé un forage descriptif échantillonné au moyen

de l'échantillonneur spécial de ϕ 200 mm, un profil au piézocône et un profil scissométrique; leurs emplacements sur le talus n'ont pas été localisés avec précision (fig. 3). Deux autres piézocônes avaient été effectués sur d'autres sites de la région de Saint-Léon, mais qui n'ont pas été retenus pour l'étude: ils ne figurent pas dans ce rapport.

B) Technique de forage et de prélèvement

Dans le but de prélever des échantillons de qualité comparable à celles des blocs d'argile récupérés dans des excavations, un échantillonneur à paroi mince de 200 mm de diamètre interne a été mis au point en 1974.

Utilisé systématiquement lors des campagnes d'échantillonnage de l'université, il s'est avéré être un excellent moyen de prélever des échantillons intacts à faible, moyenne et grande profondeur. Des échantillons provenant de 19,5 m de profondeur sont actuellement en chambre humide et ne semblent pas avoir souffert des différentes manipulations d'échantillonnage, de détubage et de conservation (La Rochelle et al. 1981).

On se rapportera au rapport GCT-80-01 de Marchand et Tavenas (1980) pour la description des différentes manipulations lors de l'échantillonnage.

Une série d'essais au cône tombant est effectuée sur chaque échantillon immédiatement après prélèvement sur le terrain.

La résistance au cisaillement calculée au cône est déterminée par la relation:

$$c_u = 9,8 K \frac{M}{p^2}$$

où

c_u = résistance au cisaillement non drainé; *kPa*

K = 1,0 pour un cône de 100 gr-30° et une argile intacte; *0,8 pour remanié*

K = 1,5 pour un cône de 400 gr-30° et une argile intacte;

K = 0,3 pour un cône de 60 gr-60° et une argile ~~remaniée~~; *0,27 pour remanié*

M = masse du cône en grammes;

. intacte

p = profondeur de pénétration en mm.

La teneur en eau correspondante permet d'estimer la limite de liquidité à l'aide de l'équation suggérée par Le Bihan et Leroueil (1980) et la norme B.N.Q. 2560:

$$w_L = \frac{20 (w - 15)}{p_{60} + 10} + 15$$

où p_{60} = pénétration du cône de 60 g - 60°.

La limite de plasticité est déterminée en utilisant la relation proposée par Garneau et Le Bihan (1977).

$$w_p = 0,15 w_L + 16,15.$$

L'indice de liquidité peut alors être calculé par la relation:

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p}$$

et peut être vérifié à partir de la résistance au cisaillement remaniée, en utilisant la relation suggérée par Le Bihan et Leroueil (1980):

$$c_{ur} = \frac{1}{(I_L - 0,21)^2}$$

C) Techniques de sondage

a) Scissomètre Nilcon

L'appareil scissomètre utilisé à Saint-Léon est de type Nilcon. Un moteur a été ajouté sur son bâti pour contrôler la vitesse de rotation du train de tige en surface.

Les essais ont été effectués tous les 50 cm de profondeur à partir de la surface du terrain. La vitesse de rotation du train de tige en surface était de 27° par minute, ce qui correspond à des durées d'essais à la rupture de l'ordre de 2 à 5 min.

L'interprétation des essais a été faite avec l'équation:

$$c_u = K.a$$

- où
- c_u = résistance au cisaillement non drainé;
 - K = constante de calibration de l'appareil, fonction du croisillon utilisé;
 - a = distance radiale sur la charte de lecture.

Pour le croisillon employé (croisillon à palettes de 11 cm × 5 cm), la constance K était: $K = 21,44$ kPa/cm.

b) Piézocône

On se reportera au rapport GCT-80-01 de Marchand et al. (1980) pour la description de l'appareil et de l'essai.

A partir des résultats enregistrés sur la courbe d'enregistrement, les paramètres q_c , résistance en pointe et u_T , pression interstitielle, peuvent être calculés. Plusieurs graphiques ont été tracés par la suite:

- 1° Profil de la résistance en pointe: q_c vs élévation (fig. 7).
- 2° Profil du rapport de la différence entre la résistance en pointe et la pression totale des terres sur la résistance au cisaillement non drainé: $(q_c - \sigma_{vo})/c_u = N_k$ (fig. 8).
- 3° Profil de la pression interstitielle générée lors du fonçage: u_T vs élévation (fig. 9).
- 4° Profil du rapport de la différence de la pression interstitielle et la pression interstitielle avant le fonçage sur la résistance au cisaillement non drainé: $(u_T - u_o)/c_u$ (fig. 10).
- 5° Profil du rapport de la pression interstitielle sur la résistance en pointe: u_T/q_c (fig. 11).

2.2.3 Travaux de laboratoire

Les essais de laboratoire ont été effectués à deux profondeurs différentes, toujours appelées 4,8 m et 9,3 m dans la suite de ce rapport. Il n'en reste pas moins que tous les essais de laboratoire et d'énergie n'ont pu être réalisés à cette même profondeur, et qu'il s'agit donc d'une valeur moyenne.

Le lecteur pourra aller chercher la profondeur exacte pour chaque essai de chaque site au tableau 7. A Saint-Léon, par exemple, les échantillons ont été prélevés entre 4,60 m et 5,97 m pour la première profondeur, 9,04 m et 10,29 m pour la deuxième profondeur.

2.2.4 Profil stratigraphique

2.2.4.1 Description globale

Les figures 4 et 5 présentent le rapport de forage. De façon générale, le dépôt est composé essentiellement d'une argile grise ferme, très plastique, stratifiée.

En surface et jusqu'à 2,5 m de profondeur, l'argile est brune, un peu oxydée et fissurée. A partir de 8,5 m de profondeur, des traces de matières organiques ont été observées. A partir de 14,5 m de profondeur et jusqu'au fond du forage, soit 21,8 m, les échantillons montrent de petits lits de silt et sable fin. Au-dessous de cette profondeur, le ministère de l'Energie et des Ressources rapporte que le dépôt d'argile comprend des traces de sable fin rubané de 15 m à 31 m de profondeur, puis de silt et sable fin rubané de 33 m à 46 m de profondeur.

Une certaine fissuration, tant horizontale que verticale, a été décelée tout au long du profil; quelques fissures notoires ont été indiquées sur le rapport de forage.

Celui-ci présente d'autre part le profil de résistance au cisaillement, au scissomètre et au cône suédois, les teneurs en eau correspondant à chaque essai au cône intact, les limites liquides et plastiques, l'indice de liquidité I_L et la sensibilité S_t , pour chaque profondeur.

2.2.4.2 Propriétés physiques: tableau 1

De nombreuses valeurs figurant dans le tableau 1 sont des moyennes générales résultant de plusieurs mesures prises au cours de différents essais, à une profondeur donnée.

A) Teneur en eau et poids volumique

Les teneurs en eau prises sur le chantier s'échelonnent globalement de 80% en surface à 50% en profondeur, avec une moyenne de 75% pour les six premiers mètres, 55% pour les cinq derniers mètres et 65 à 70% pour les 10 mètres intermédiaires.

A la profondeur de 9,3 m, de nombreuses teneurs en eau ont été déterminées lors des essais de laboratoire. La moyenne des moyennes est $w = 70\%$. On remarque qu'elle correspond bien à celles déterminées sur le chantier, soit 70% et 74%. A 4,8 m de profondeur, on a trouvé $w = 79\%$ en laboratoire et $w = 75\%$ sur le chantier.

Des poids volumiques ont été calculés à partir des échantillons oedométriques et triaxiaux; la moyenne est de $15,8 \text{ kN/m}^3$ à 9,3 m et $15,3 \text{ kN/m}^3$ à 4,8 m.

B) Sédimentation

Les courbes granulométriques obtenues (fig. 12) révèlent que l'échantillon analysé contient environ 70% d'argile et 30% de silt, à la profondeur de 9,3 m, 76% d'argile et 24% de silt à la profondeur de 4,8 m.

On rappellera que si cet essai standardisé donne d'utiles renseignements sur la structure de l'argile, il comporte quand même des approximations importantes:

- les grains argileux ont une structure lamellaire et non sphérique;
- chaque grain est entouré d'une pellicule d'eau liée, qui fait partie du phénomène de sédimentation, alors qu'elle est en partie éliminée pendant la mesure de la masse spécifique des grains solides (qui intervient dans le calcul);
- des forces d'interaction se développent entre les parois du cylindre et les grains d'une part, entre les grains eux-mêmes d'autre part, ralentissant ou accélérant la chute de ceux-ci.

- à ces sources d'erreurs dues au principe de l'essai, peuvent s'ajouter de nombreuses erreurs de manipulation: mauvais agent dispersant, mauvaise dispersion des grains, insertion trop brusque de l'hydromètre...

C) Densité des grains solides

Elle a été déterminée à l'aide d'un picnomètre. Les valeurs trouvées, 2,75 à 9,3 m et 2,79 à 4,8 m, sont communément rencontrées pour les argilles Champlain.

D) Limites de consistance

a) Limites d'Atterberg

Au moyen de l'appareil de Casagrande, les valeurs suivantes ont été trouvées à la profondeur de 9,3 m:

$w_L = 63,5$ et $71,1$, soit une moyenne de $67,3$;

$w_p = 23,8$ et $30,2$, soit une moyenne de $27,0$;

$I_L = 1,07$ et $0,91$, soit une moyenne de $1,0$.

Les résultats de cet essai sont éminemment fonction de:

- l'homogénéité du matériau;
- la rapidité de l'opérateur à mélanger, étaler, compter le nombre de coups, etc..., la teneur en eau diminuant assez vite avec le temps;
- l'appréciation personnelle du poids de sol utilisé, la longueur de contact des lèvres de la fente;
- la thixotropie du matériau;
- la norme utilisée.

b) Cône suédois

Les essais au cône sur le chantier ont permis de donner un profil de limites sur toute la profondeur:

- la limite liquide a une moyenne assez nette de 70% jusqu'à 14,5 m de profondeur, puis de 60% jusqu'à 20 m de profondeur. Cette constatation vient confirmer la variation de teneur en silt et sable du dépôt, à partir de 14,5 m de profondeur;
- la limite plastique se situe autour de 25% tout au long du profil;
- l'indice de liquidité diminue globalement de 1,2 en surface à 0,8 en profondeur. Une valeur moyenne de 1,0 permet de parler d'un indice de liquidité "moyen", selon la terminologie de Leroueil et Le Bihan (1981).

Les résultats moyens (w , w_L , w_p , I_L) donnés par l'essai au cône tombant pour les deux profondeurs étudiées figurent au tableau 1.

Un tableau comparatif des limites à la profondeur de 9,3 m, a pu être établi:

	<u>w_L</u>	<u>w_p</u>	<u>I_p</u>	<u>I_L</u>
Limites au cône en laboratoire	68	26,4	41,6	1,0
Limites au cône sur le chantier	70,5	26,7	43,8	1,0
Limites d'Atterberg	67,3	28,9	38,4	1,0

On constatera une bonne similitude des résultats.

E) Analyses chimiques de l'eau interstitielle

Les résultats figurent au tableau 5. Les teneurs en sels de 2,2 et 5,5 ppm sont relativement élevées et conformes à l'origine marine du dépôt de Saint-Léon.

2.2.4.3 Propriétés mécaniques: tableau 2

La plupart des valeurs du tableau 2 sont aussi des moyennes de plusieurs mesures prises au cours des différents essais.

A) Résistance au cisaillement non drainé

a) Cône suédois

Des profils de résistance intacte et remaniée ont été déterminés sur toute la profondeur, grâce aux essais effectués sur le chantier.

La résistance au cisaillement déterminée au cône sur l'argile intacte varie à peu près linéairement avec la profondeur, de 20 kPa à 2 m de profondeur, à 60 kPa à 20 m de profondeur. L'augmentation est plus rapide à partir de 14,5 m de profondeur.

L'argile peut être considérée comme ayant une consistance moyenne à ferme.

La résistance remaniée croît avec la profondeur de 1,2 kPa à 2 m de profondeur, à 3 kPa en fond de forage; on peut faire ressortir une moyenne générale de 2,1 kPa.

La relation $c_{ur} = \frac{1}{(I_L - 0,21)^2}$ suggérée par Le Bihan et Leroueil (1980) a été utilisée. Le profil obtenu donne en général des valeurs de résistance remaniée inférieure à celles déterminées par l'essai au cône lui-même, de 5 à 15% pour les faibles valeurs de c_{ur} , de 15 à 30% pour les plus fortes valeurs de c_{ur} . On peut noter par ailleurs que les valeurs de c_{ur} et I_L dépendent du mode de remaniement de l'argile par l'opérateur.

Le calcul de la sensibilité de l'argile à différentes profondeurs, $S_t = \frac{c_u}{c_{ur}}$, donne des valeurs s'étalant entre 15 et 25, avec une moyenne assez nette de 19, et permettant de la classer comme "moyenne" selon le tableau 4.

A 9,3 m de profondeur, les essais de laboratoire sont résumés par les valeurs suivantes:

c_u intact moyen, déterminée au cône 100 gr - 30° = 49,5 kPa

c_u intact moyen, déterminée au cône 400 gr - 30° = 49 kPa

c_u remanié moyen, déterminée au cône 60 gr - 60° = 2,1 kPa.

b) Scissomètre

Le profil de résistance scissométrique est aussi globalement linéaire avec la profondeur; il est en général décalé supérieurement d'une dizaine de kPa par rapport au profil déterminé au cône. Il accuse aussi une nette augmentation de résistance au passage de la profondeur de 15 m.

Le tracé du profil scissométrique est présenté à la figure 6.

B) Piézocône

L'essai au piézocône fournit deux séries de données, l'une pour décrire la résistance en pointe q_c , l'autre pour décrire la pression interstitielle u_T générée lors du fonçage.

La résistance en pointe nous donne des renseignements sur la raideur du matériau et la pression interstitielle sur sa perméabilité.

Les profils de q_c et u_T , présentés aux figures 7 et 9, permettent de vérifier l'uniformité du dépôt et de confirmer le changement de teneur en silt et sable, par le léger palier de la courbe situé à 15 m de profondeur (élévation: 14 m) sur les deux graphiques.

Plus précisément, la bonne continuité globale du profil des pressions interstitielles montre la bonne homogénéité du site, et en particulier l'absence de strate drainante d'épaisseur significative. On notera de plus, que le profil u_T montre une augmentation plus sensible à l'approche du matériau plus silteux et sableux, à 15 m de profondeur: il n'y a pas lieu de croire ainsi que le dépôt devient plus perméable en profondeur. La valeur de u_T croît donc régulièrement de 200 kPa à 2,5 m de profondeur (élévation: 26,5 m) à 1150 kPa à 28 m de profondeur (élévation: 1 m).

La résistance en pointe augmente aussi avec la même régularité, de 400 kPa à 3,0 m de profondeur (élévation: 26 m), à 1800 kPa à 28 m de profondeur (élévation: 1 m), en passant par une augmentation significative à 15 m de profondeur (élévation: 14 m).

La régularité de ces deux courbes permet d'expliquer la constance globale du rapport $\frac{u_T}{q_c}$ (fig. 11) dont la valeur varie de 0,5 à 0,6, entre 3 m et 28 m de profondeur.

Par ailleurs, en se servant des paramètres q_c et u_T et des valeurs de c_u provenant de l'essai au scissomètre, nous avons tracé aux figures 8 et 10 les profils des rapports $N_k = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{c_u}$ et $\frac{\Delta u}{c_u} = \frac{u_T - u_0}{c_u}$, où σ_{vo} est la pression totale des terres et u_0 la pression interstitielle avant le sondage.

Le rapport N_k , appelé aussi facteur de corrélation entre la résistance en pointe du pénétromètre et la résistance au cisaillement non drainé obtenue au scissomètre, augmente irrégulièrement entre 12 et 15 de 3 m à 21 m de profondeur (élévation: 26 m à 8 m): ces valeurs sont comparables à celles obtenues pour d'autres sites.

Le profil de $\frac{\Delta u}{c_u}$ a la même allure que celui de N_k et varie entre 6 et 10.

Il est difficile de faire ressortir des changements précis de matériau dans le dépôt à l'examen de ces deux profils, même s'ils se juxtaposent bien, étant donné que l'on ne dispose que d'un seul essai. On peut cependant déceler pour les deux graphiques une tendance légèrement différente de la partie inférieure de la courbe, avec une valeur moyenne de rapport plus forte que pour la partie supérieure, et devant correspondre au passage dans le dépôt argileux plus silteux.

C) Consolidation oedométrique

Trois essais de consolidation ont été effectués pour la profondeur de 9,3 m et un essai pour la profondeur de 5,2 m.

Ils ont été réalisés par paliers de charge de 24 heures, avec un accroissement de charge de 50% de la charge précédente. Un des essais a été éliminé car la rupture d'une pierre poreuse en cours d'essai semble avoir affecté les résultats.

Une courbe de consolidation pour chaque niveau est présentée à la figure 43.

La pression de préconsolidation σ_p' déterminée par la construction de Casagrande est de 100 kPa à 5,2 m de profondeur, de 130 kPa à 8,3 m de profondeur et de 180 kPa à 10 m de profondeur.

A 9,3 m, les rapports suivants ont été calculés:

$$\frac{c_u}{\sigma_p'} \text{ (scissomètre)} = \frac{43}{180} = 0,25$$

$$\frac{c_u}{\sigma_p'} \text{ (cône laboratoire)} = \frac{49,5}{180} = 0,27$$

$$\frac{\sigma_p'}{\sigma_{vo}'} = \frac{180}{80} = 2,25 = \text{OCR (rapport de surconsolidation)}$$

A 4,8 m, les mêmes rapports donnent:

$$\frac{c_u}{\sigma_p'} \text{ (scissomètre)} = \frac{31}{100} = 0,31$$

$$\frac{c_u}{\sigma_p'} \text{ (cône laboratoire)} = \frac{30}{100} = 0,30$$

$$\text{OCR} = \frac{\sigma_p'}{\sigma_{vo}'} = \frac{100}{50} = 2$$

Les rapports c_u/σ_p' (scissomètre) sont à rapprocher des relations c_u/σ_p' vs I_p de Bjerrum (1973) $c_u/\sigma_p' = 0,28$, ou de Leroueil et Le Bihan (1981) $c_u/\sigma_p' = 0,30$. Les valeurs c_u/σ_p' (scissomètre) sont présentées à la figure 44.

A toutes fins pratiques, cette assez bonne constance du rapport c_u/σ_p' laisse présumer une bonne homogénéité du dépôt argileux.

Les modules de compressibilité C_c et C_s ont été calculés respectivement au point d'inflexion de la partie normalement consolidée et au point de pression des terres sus-jacentes:

	<u>9,3 m</u>	<u>4,8 m</u>
C_c	2,3	1,6
C_g	0,02	0,06

D) Surface d'état limite

a) Description des essais triaxiaux

Six essais triaxiaux ont été effectués à la profondeur de 9,3 m. Quatre échantillons ont été prélevés dans la galette F1T16E1, un cinquième dans la galette F1T15E3. Trois autres échantillons prélevés dans la première galette présentaient un plan de rupture naturel qui a empêché le montage.

Voici les caractéristiques des essais réalisés:

CID: $\sigma'_1 = \sigma'_3$ consolidation = 0,4 $\sigma'_p = 68$ kPa, en 2 paliers;

CIU - 1: $\sigma'_1 = \sigma'_3$ consolidation = $\sigma'_p = 170$ kPa, en 5 paliers;

CIU - 2: $\sigma'_1 = \sigma'_3$ consolidation = 1,5 $\sigma'_p = 250$ kPa, en 8 paliers;

CIU - 3: $\sigma'_1 = \sigma'_3$ consolidation = 0,176 $\sigma'_p = 30$ kPa, en 1 palier;

CAD: σ'_1 consolidation = 0,35 $\sigma'_p = 59,5$ kPa, en 2 paliers et

$$K = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} = 0,5;$$

CAU - 4: σ'_1 consolidation = 1,897 $\sigma'_p = 322,5$ kPa par accroissement de charge de 46 kPa et $K = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} = 0,5$.

Les étapes de consolidation des essais CIU 1 et 2 ont permis de déterminer le point d'état limite sur l'axe isotrope ($K = 1$), et celles de l'essai CAU 4 le point d'état limite sur l'axe $K = 0,5$.

L'échantillon CAU - 4 a été déstructuré par une forte consolidation hors de la courbe d'état limite jusqu'à $S = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} = 242$ kPa, puis déchargé jusqu'à $\sigma'_1 = \sigma'_3 = 80$ kPa et enfin cisailé de façon non drainée. Donc seule l'étape de la consolidation a servi à trouver un point d'état limite, et le cheminement de contraintes de l'essai de cisaillement n'apparaît pas sur le diagramme $T = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{3}$ vs $S = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ à la figure 17.

Dans tous les cas, une contrepression de 50 kPa a été appliquée.
Les vitesses de cisaillement utilisées ont été de:

- 0,0012 mm/min pour les essais drainés;
- 0,0061 mm/min pour les essais non drainés.

La charge verticale a été mesurée au moyen d'un piston de 900 kg de capacité.

Aucune correction n'a été apportée aux essais surconsolidés; des corrections de surface et de membrane selon Bishop - Henkel ont cependant été apportées aux essais normalement consolidés.

b) Résultats des essais triaxiaux

Les résultats apparaissent aux figures 13 à 17.

La droite de Mohr-Coulomb et la ligne rejoignant les états de grandes déformations ont été tracées à la figure 17. La première, définie comme l'enveloppe des déviateurs maximums des essais normalement consolidés, permet d'évaluer (la réalisation d'autres essais aurait été nécessaire) les paramètres mécaniques de l'argile: $\phi' = 29,5^\circ$, $c' = 0$.

La deuxième droite présente une pente un peu plus faible ($28,5^\circ$) et une cohésion effective de 18 kPa qui semble cependant un peu forte pour l'argile étudiée.

Le point de contrainte *in situ* est calculé de la façon suivante:

$$\sigma'_1 = 10 \text{ m} \times 15,8 \text{ kN/m}^2 - 8 \text{ m} \times 9,8 \text{ kN/m}^3 = 80 \text{ kPa}$$

$$K_0 = 1 - \sin \phi' = 0,51$$

$$T = \frac{\sigma'_1 - K_0 \sigma'_1}{2} = 19,8 \text{ kPa}$$

$$S = \frac{\sigma'_1 + K_0 \sigma'_1}{2} = 60,2 \text{ kPa.}$$

c) Discussion des résultats

- Les essais CIU - 1 et CID semblent ne pas avoir été poursuivis assez longtemps pour être en mesure de définir un état vraiment stable à grandes déformations.

- Le graphique $2 \times T = \sigma_1 - \sigma_3$ vs ϵ (fig. 14) présente une certaine dispersion pour une même courbe. Cela peut être attribuable à l'utilisation de pistons de chargement comme moyen de mesurer la charge verticale. Ces appareils, en plus d'être très rigides, subissent aussi une certaine dérive aléatoire de leur contrôle électrique. L'erreur introduite est en général acceptable pour les argiles raides mais devient trop forte dans le cas des argiles molles. Il serait dorénavant préférable d'utiliser des anneaux de charge.

- La valeur de ϕ' mesurée ($29,5^\circ$) peut être comparée à celles trouvées sur d'autres sites (Saint-Alban 27° , Saint-Louis 24° , Saint-Jean Vianney 31°).

Notons que G. Lefebvre a trouvé $\phi' = 35^\circ$ et $c' = 8$ kPa à grandes déformations sur un site voisin à Saint-Léon, à partir d'essais CID à faibles contraintes.

2.2.4.4 Condition de nappe

Des relevés piézométriques récents ont indiqué un niveau de nappe à 2,4 m de profondeur. Le niveau déjà adopté avant cette mesure était celui donné par le relevé au piézocône, soit 2 m de profondeur. Pour la plupart des autres sites, le niveau de la nappe sera aussi donné par le relevé au piézocône et figure au tableau 1.

2.2.4.5 Conclusion

L'homogénéité des limites, la progression régulière des profils de résistance déterminés au cône suédois, au scissomètre et au piézocône (résistance de pointe) et le profil de pression interstitielle permettent de croire à une bonne homogénéité du dépôt argileux.

Il apparaît cependant clairement que le dépôt argileux devient un peu plus silteux et sableux à partir de 14,5 m de profondeur.

Les caractéristiques de l'argile de Saint-Léon sont résumées aux tableaux 1 et 2.

2.3 Saint-Hilaire

2.3.1 Description du site

2.3.1.1 Situation

Le deuxième site choisi par le ministère de l'Energie et des Ressources a été implanté dans un terrain vague appartenant au ministère des Transports, près de l'intersection entre la route transcanadienne n° 20 et la rivière Richelieu, à 2 ou 3 km de l'agglomération de Saint-Hilaire, à 30 km à l'est de Montréal, sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent. On se reportera à la figure 18.

2.3.1.2 Topographie et géologie

L'endroit précis se situe à 100 m au sud de l'autoroute et 200 m d'un des bras du ruisseau dit "le Déboulis" sur la rive est de la rivière Richelieu, à 35 m d'altitude, à 2 km au nord de l'escarpement du Mont Saint-Hilaire.

Un dépôt d'argile gris pâle légèrement bleutée de la mer Champlain repose en général dans cette région sur un till brun rougeâtre et peut atteindre 45 m d'épaisseur; l'argile contient un peu de silt et des fossiles marins, sous forme plus ou moins stratifiée.

2.3.2 Travaux de chantier

Deux profondeurs différentes ont été échantillonnées, soit de 4,50 m à 6 m, et de 9,5 m à 12 m. Un sondage scissométrique et un sondage au piézo-cône ont été exécutés à côté du forage. Les techniques de sondage, forage et prélèvement sont les mêmes que celles décrites au paragraphe 2.2.2.2.

2.3.3 Travaux de laboratoire

Réalisés sur des échantillons provenant de deux profondeurs moyennes 5,6 m et 11,4 m, les travaux de laboratoire comprennent: essais d'identification (sédimentométrie, densimétrie, analyse chimique de l'eau interstitielle), essais oedométriques, essais d'énergie (chute libre, pilonnage, extrusion, cisaillement simple).

2.3.4 Profil stratigraphique

2.3.4.1 Description globale

Elle est donnée par le rapport de forage, figures 19 et 20. Après une couche de surface d'argile brune, raide, oxydée sur les deux à quatre premiers mètres, le dépôt reste homogène tout au long du profil, et se compose d'une argile gris pâle avec un peu de silt, de consistance moyenne à ferme, très plastique et de sensibilité grande à très grande, avec quelques traces de matières organiques.

2.3.4.2 Propriétés physiques: tableau 1

On relèvera les points suivants, aux deux profondeurs respectives de 5,6 m et 11,4 m: une teneur en eau moyenne (70 et 72%), une forte proportion d'argile (85 et 79%), un fort indice de liquidité (1,3 et 2,0), un indice de plasticité moyen (35 et 26), une faible salinité (0,4 et 1,0 g/l).

2.3.4.3 Propriétés mécaniques: tableau 2

A) Résistance au cisaillement non drainé

Le tableau 2 montre que les propriétés de cette argile ne diffèrent pas beaucoup de la première à la deuxième profondeur.

La résistance moyenne intacte se situe entre 30 et 35 kPa; une résistance remaniée très faible pour la deuxième profondeur occasionne une forte sensibilité, de 106 à 11,4 m de profondeur, alors qu'elle vaut 44 à 5,6 m de profondeur.

Le profil scissométrique (fig. 21) oscille entre 30 et 40 kPa jusqu'à 12 m de profondeur, ce qui confirme la présence d'un dépôt assez homogène, puis croît d'une manière irrégulière jusqu'à 60 kPa à 23 m de profondeur.

On notera que les mesures de résistance prises au cône sont inférieures de 5 kPa environ aux valeurs scissométriques (fig. 19).

B) Piézocône

Les profils du sondage au piézocône, montrés aux figures 22 à 26, permettent de vérifier l'uniformité du dépôt.

Après des oscillations de surface jusqu'à 4 m de profondeur, le profil q_c de la résistance de pointe augmente régulièrement avec la profondeur, si ce n'est une petite anomalie passagère à 12 m de profondeur, probablement due à la présence d'un caillou ou d'un coquillage.

Le profil u_T de la pression interstitielle croît aussi régulièrement de 275 kPa à 4 m de profondeur à 675 kPa à 22 m de profondeur.

Le profil N_k reste constant autour de la valeur 13. Les rapports $\frac{\Delta u}{c_u}$ et $\frac{u_T}{q_c}$ oscillent entre 6 et 9 pour le premier et 0,5 et 0,7 pour le deuxième, accusent une petite variation à 12 et 20 m de profondeur, mais confirment dans l'ensemble l'homogénéité du dépôt.

C) Consolidation oedométrique

Une pression de préconsolidation identique pour les deux profondeurs et relativement faible de 115 kPa a été mesurée dans cette argile légèrement surconsolidée (fig. 43); les rapports $\frac{c_u}{\sigma'_p}$ et $\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}}$ valent:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{c_u}{\sigma'_p} \text{ (scissomètre) } = 0,30 \\ \frac{c_u}{\sigma'_p} \text{ (cône) } = 0,30 \\ \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} = 2,13 \end{array} \right\} \text{ à 5,6 m de profondeur}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{c_u}{\sigma_p} \text{ (scissomètre)} &= 0,32 \\
 \frac{c_u}{\sigma_p} \text{ (cône)} &= 0,28 \\
 \frac{\sigma_p'}{\sigma_{vo}} &= 1,27
 \end{aligned} \right\} \text{ à 11,4 m de profondeur}$$

2.4 Saint-Thuribe

2.4.1 Description du site

2.4.1.1 Situation

Le site d'essai est localisé sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, à 85 km à l'ouest de Québec, à 6 km à l'ouest de Saint-Alban et 1 km de Saint-Thuribe, à 400 m à l'est de la rivière Blanche et proche du rang Rivière Blanche (fig. 27).

2.4.1.2 Topographie et géologie

L'emplacement se situe à 300 m du bord du talus, sur un petit plateau de silt et argile de 53 m d'altitude, à proximité immédiate d'une très grande coulée d'argile qui s'est produite en 1898 (Dawson 1899). Pour la région de Saint-Thuribe, la carte géologique parle d'un dépôt d'argile de la mer Champlain, constitué d'argile grise, molle, de massive à finement rubannée, d'argile limoneuse et de silt, calcaire, fossilifère, parfois rubannée de sable et de matière organique éparse. Situé à proximité de la limite nord des dépôts de la mer Champlain, ce matériau est généralement à prédominance silteuse et à forte sensibilité.

2.4.2 Travaux effectués

L'université a réalisé un forage descriptif pour récupérer des échantillons de diamètre 20 cm à deux profondeurs différentes, soit de 5,5 m à 7,0 m, et de 11,5 m à 13,5 m. Des mesures de résistance au cisaillement intacte au cône tombant et de teneur en eau sont effectuées aux mêmes profondeurs.

Le forage dont le rapport est présenté aux figures 28 et 29, a été couplé à deux sondages, l'un scissométrique jusqu'à la profondeur de 24,5 m, l'autre au piézocône jusqu'à la profondeur de 19 m.

Les travaux de laboratoire ont été réalisés aux profondeurs moyennes de 6 et 12 m, de la même façon que pour le site de Saint-Hilaire (paragraphe 2.3.3).

2.4.3 Profil stratigraphique

2.4.3.1 Description globale

La croûte de surface est composée d'une argile brune, raide et oxydée, sur 1,5 m d'épaisseur environ. Le dépôt est constitué de silt et argile gris noir marbré, de consistance ferme, de plasticité moyenne, de très grande sensibilité et comprenant des matières organiques.

Au niveau de la deuxième profondeur échantillonnée, et probablement à partir de la profondeur de 8,5 m (d'après les sondages), une séquence plus silteuse et extrêmement sensible apparaît dans le dépôt.

Des inclusions d'argile oxydée beige verdâtre ont été remarquées dans plusieurs échantillons.

2.4.3.2 Propriétés physiques

Les résultats moyens peuvent s'énoncer ainsi, d'après le tableau 1: une faible teneur en eau (50% à 6 m de profondeur et 42% à 12 m de profondeur), une forte proportion de silt (55% à 6 m et 67% à 12 m), un indice de liquidité très élevé (1,6 à 6 m et supérieur à 4,0 à 12 m de profondeur), un faible indice de plasticité (20 à 6 m et 5 à 12 m), un poids spécifique relativement fort (16,1 kN/m³ à 6 m et 18 kN/m³ à 12 m), et enfin une salinité relativement faible (0,5 gr/l à 6 m de profondeur, 1,1 gr/l à 12 m de profondeur).

2.4.3.3 Propriétés mécaniques

Les différents résultats ont été répertoriés au tableau 2. Les méthodes de mesures sont les mêmes que celles mentionnées au paragraphe 2.2.4.3.

A) Résistance au cisaillement non drainé

a) Cône suédois

La résistance intacte mesurée au cône en laboratoire est d'environ 15 kPa plus forte que celle mesurée sur le terrain. Elle vaut en moyenne 46 kPa à 6 m de profondeur et 36 kPa à 12 m de profondeur.

Si cette résistance intacte permet de classer l'argile de Saint-Thuribe comme ferme, sa résistance remaniée est par contre extrêmement faible, ce qui lui confère une sensibilité remarquablement élevée, de l'ordre de 140 à 6 m de profondeur, et supérieure à 600 à 12 m de profondeur. Rappelons qu'il s'agit de valeurs déterminées en laboratoire (tableau 2). Ces valeurs diffèrent de celles rapportées à la figure 28 qui avaient été obtenues à partir des essais au cône sur le terrain. Cette extrême sensibilité peut se noter très facilement en laboratoire lorsqu'on manipule un échantillon: une faible sollicitation avec le doigt ou une spatule ou le fil à couper le beurre, provoque une liquéfaction superficielle immédiate.

b) Scissomètre

Le profil de résistance scissométrique présenté à la figure 30 décroît linéairement de 40 kPa en surface à 30 kPa entre 9 et 11 m de profondeur, puis se met à croître assez régulièrement pour atteindre 50 kPa à 24,5 m de profondeur.

Ceci suggère l'existence de deux dépôts distincts de 0 à 9 - 11 m et au-dessous de 11 m. Par ailleurs, la deuxième partie de la courbe accuse une chute brutale du c_u à 19,5 m de profondeur, révélant la présence d'une anomalie locale, à une élévation qui correspond sensiblement à celle du lit de la rivière Blanche voisine.

On remarquera la bonne correspondance aux deux profondeurs échantillonnées, des valeurs données par le cône et le scissomètre, sur le terrain.

B) Piézocône

Les profils de q_c et u_T , présentés aux figures 31 et 33,

accusent un changement de pente à la profondeur de 8,5 m, correspondant à la variation de teneur en silt.

La résistance de pointe reste sensiblement constante jusqu'à 9 m, entre 5 et 600 kPa, puis augmente régulièrement pour atteindre 900 kPa à 18,5 m de profondeur.

La pression interstitielle croît de 300 kPa à 2,5 m de profondeur à 750 kPa à 19 m de profondeur.

Le rapport u_T/q_c (fig. 35) passe de 0,6 à 0,7 entre 2 et 9 m de profondeur, puis reste entre 0,7 et 0,8 jusqu'à 19 m.

Le rapport N_k (fig. 32) se stabilise entre 12 et 15.

Le rapport $\Delta u/c_u$ (fig. 34) change de valeur vers les 10 m de profondeur, correspondant probablement au passage dans le dépôt plus silteux et extra sensible.

C) Consolidation oedométrique

La pression de préconsolidation a été mesurée à Saint-Thuribe aux deux profondeurs (fig. 43): à 6 m, $\sigma'_p \approx 175$ kPa et, à 12 m, $\sigma'_p \approx 195$ kPa.

Les rapports $\frac{c_u}{\sigma'_p}$ et OCR s'écrivent:

$$\frac{c_u}{\sigma'_p} \text{ (scissomètre) } = 0,22$$

$$\frac{c_u}{\sigma'_p} \text{ (cône) } = 0,31$$

$$\text{OCR} = 4,1$$

} à 6 m de profondeur

$$\left. \begin{array}{l} \frac{c_u}{\sigma_p} \text{ (scissomètre) } = 0,16 \\ \frac{c_u}{\sigma_p} \text{ (cône) } = 0,21 \\ \text{OCR} = 1,7 \end{array} \right\} \text{ à 12 m de profondeur}$$

2.5 Autres sites

2.5.1 Louiseville

Le site de Louiseville a déjà fait l'objet d'une étude de ses propriétés; on se reportera au rapport interne GCT-80-07 de P. Leblond et F. Tavenas pour plus de détails: on n'en donnera ici qu'un résumé succinct.

2.5.1.1 Description du site

Proche du site de Saint-Léon décrit au début de ce rapport, le site de Louiseville est situé sur la terrasse inférieure des basses terres du Saint-Laurent (fig. 36).

L'élévation moyenne du terrain est de 9,5 m. La distinction habituelle dans cette région, entre un dépôt profond d'argile marine silteuse grise, et un dépôt superficiel lacustre et fluvio-glaciaire beaucoup plus silteux, n'a pas été confirmée ici; au contraire, les propriétés semblent très uniformes et correspondent à un dépôt d'argile marine jusqu'à la surface du terrain.

2.5.1.2 Travaux effectués

Le laboratoire de géotechnique de l'Université Laval avait réalisé en 1979 les travaux suivants: 1 forage descriptif échantillonné ϕ 200 mm, 3 scissomètres, 5 sondages au piézocône, 6 piézomètres.

C'est sur des échantillons provenant de la profondeur de 6 m et conservés en chambre humide que les essais concernant notre étude ont été effectués. Les caractéristiques de l'argile de Louiseville sur toute la

profondeur sont présentées à la figure 37. Les mêmes essais dont on a déjà parlé pour les sites précédents, ont été refaits à la profondeur de 6 m; les résultats figurent aux tableaux 1, 2, 3 et 5.

2.5.1.3 Caractéristiques du dépôt

A) Propriétés physiques

La teneur en eau naturelle diminue progressivement avec la profondeur, passant de 89% à 1,5 m à 58% à 26 m de profondeur, en passant par 75% à 6 m. L'indice de liquidité vaut, à ces mêmes profondeurs respectives, 1,55, 0,77 et 1,1. L'indice de plasticité est de 46 à la profondeur qui nous intéresse.

A cette même profondeur de 6 m, l'analyse sédimentométrique nous indique que le matériau contient 77% d'argile et 23% de silt, valeur moyenne valable pour tout le dépôt.

L'analyse de l'eau interstitielle révèle une forte concentration de sel à 6 m, soit 7,6 gr/l (tableau 5), ce qui confirme l'origine marine de ce dépôt.

B) Propriétés mécaniques

La résistance au cisaillement non drainé croît régulièrement avec la profondeur, de 18 kPa à 0,60 m de profondeur à 92 kPa à 26 m de profondeur, en passant par 37 kPa à la profondeur de 6 m.

La sensibilité de 30 déterminée au moment de cette étude est un peu plus forte que celle de 23 trouvée lors de l'échantillonnage, comme pour les autres sites d'ailleurs.

La bonne continuité des profils de pression interstitielle et de résistance de pointe, relevés au piézocône, a confirmé la grande homogénéité du site.

Les essais de consolidation oedométrique ont permis de définir à 6 m de profondeur une pression $\sigma_p' = 125$ kPa, un indice de compression élevé $C_c = 4,7$, un rapport $c_u/\sigma_p' = 0,31$ et un rapport de surconsolidation $OCR = 3,12$.

2.5.2 Mascouche

On ne s'attardera pas sur la description du site de Mascouche, puisque le lecteur peut se ^{reporter} reporter au travail le concernant de G. Marchand, F. Tavenas, sous la forme du rapport n° GCT-80-01 présenté au ministère de l'Energie et des Ressources en février 1980, ou des travaux déjà réalisés au ministère (D.J. Dion 1978).

A 40 km au nord-est de Montréal, sur la rive gauche d'un canal de dérivation de la rivière Mascouche, l'emplacement exact se trouve sur la crête d'un talus de 8,5 m de hauteur (fig. 38). Celui-ci est constitué d'une argile glaciaire ou post-glaciaire très raide, incluant quelques couches de sable dispersées.

Les propriétés générales du dépôt apparaissent aux figures 39 et 40; celles concernant la profondeur de 9 m choisie pour nos essais sont données aux tableaux 1 et 2.

D'une manière générale, le matériau est une argile grise, raide, plastique, fissurée, rubannée, comprenant un peu de silt, des traces de matières organiques et quelques coquillages. Entre 7,4 et 8,5 m de profondeur, existe une couche intermédiaire d'argile marbrée grise et rose, possédant des caractéristiques un peu différentes: w , I_L , S_t un peu plus faibles, σ_p' et c_u un peu plus forts.

A 9 m de profondeur, les essais effectués dans le cadre de cette étude ont fourni les résultats suivants: 65% d'argile, 34% de silt, une teneur en eau assez faible (58%), un indice de liquidité et plasticité assez fort (1,2 et 30), une forte teneur en sel (4,1 gr/l), et des propriétés mécaniques très élevées: $\sigma_p' = 400$ kPa (essai non refait), $c_u = 130$ kPa, $S_t = 104$, c_u/σ_p' (scissomètre) = 0,34, c_u/σ_p' (cône) = 0,26 et $OCR = 5,56$.

2.5.3 Saint-Alban

Le plan de localisation est donné à la figure 41. Situé sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, à 80 km à l'ouest de Québec, tout près de Saint-Thuribe, on se contentera de présenter un profil des propriétés géotechniques du sol à la figure 42, et d'en faire un résumé sommaire.

(Tavenas et Leroueil 1977)

Le dépôt est constitué d'argile molle de plus en plus silteuse et sableuse avec la profondeur, devenant presque uniquement du sable à partir de 13,5 m de profondeur. Cette argile est caractérisée par une faible plasticité, un fort indice de liquidité, une forte sensibilité, une faible salinité. La résistance au cisaillement et la pression de préconsolidation augmentent linéairement avec la profondeur.

A la profondeur retenue pour nos essais, soit 6,6 m, on a déterminé des valeurs confirmant ces dernières indications (tableaux 1 et 2): 58% d'argile, 37% de silt, 5% de sable, 19 comme indice de plasticité, 2,4 comme indice de liquidité, une salinité de 0,2 gr/l, une résistance au cisaillement de 20 kPa, une sensibilité voisine de 100, une pression $\sigma'_p = 85$ kPa, un rapport $c_u/\sigma'_p = 0,24$ et enfin un $OCR = 2,36$.

2.5.4 Saint-Jean Vianney

Afin d'inclure un cas extrême dans le spectre des argiles marines sensibles, un essai de cisaillement simple a été effectué dans l'argile de Saint-Jean Vianney, échantillonnée en 1971 dans le cratère du glissement de 1971, dans la région du lac Saint-Jean.

De façon générale, l'argile de Saint-Jean Vianney peut être classifiée comme une argile silteuse grise stratifiée et fortement consolidée. De nombreuses strates très minces de silt ou de sable fin blanc peuvent être observées à plusieurs niveaux dans le profil et en particulier dans l'échantillon choisi; des traces de gravier fin et des coquillages ont parfois été trouvés.

Le spécimen testé, conservé en chambre humide depuis 10 ans, a sans doute perdu une part de ses caractéristiques (tableaux 1, 2 et 6). La

teneur en eau naturelle semble ainsi avoir diminué de 40 ou 45 à 36%, l'indice de liquidité de 2 ou 3 à 1,1. L'indice de plasticité a légèrement augmenté (environ 13%). Il en est sûrement de même pour le c_u remanié, qui vaut maintenant 1,2 kPa: l'argile devient plus liquide, et la sensibilité garde une valeur finie (260).

Il n'en reste pas moins que l'échantillon conserve en soi des propriétés extrêmes, intéressantes pour cette étude.

2.6 Conclusion: comparaison des propriétés physiques et mécaniques des différents sites

La comparaison des propriétés physiques et mécaniques a été établie à partir des essais classiques de laboratoire et des essais d'énergie, et transparaît aux tableaux 1 et 2.

Les appréciations choisies dans ce paragraphe, "faible, moyen, fort", sont attribuées en fonction de la plage de sites en présence, mais caractérisent bien les matériaux étudiés, tout au moins pour les profondeurs investiguées, c'est-à-dire les 12 premiers mètres (sauf pour Saint-Jean Vianney, 30 m).

2.6.1 Propriétés physiques

Toutes les argiles utilisées ont un poids ^{volume} ~~spécifique~~ compris entre 15,3 et 16,4 kN/m³, sauf Saint-Thuribe 12 m et Saint-Jean Vianney (18 kN/m³); cette forte valeur est due à une teneur en eau plus faible en profondeur.

La densité des argiles Champlain se situe toujours entre 2,75 et 2,8. C'est le cas ici, et on en profitera pour émettre une réserve quant à l'absolue pertinence de la précision de l'essai de densité tel que pratiqué actuellement.

Le pourcentage de silt est approximativement de 15 à 30% pour les sites de Saint-Hilaire, Louiseville et Saint-Léon, dans l'ordre. Il est plus important pour les sites de Mascouche et Saint-Alban, entre 30 et 40%. Il est enfin très élevé pour le troisième et dernier groupe de valeur, Saint-Jean Vianney et Saint-Thuribe, entre 40 et 70%.

La teneur en eau se répartit aussi en trois groupes de valeur, inversement proportionnelle à la teneur en silt, ce qui est compréhensible. Le premier groupe, Saint-Jean Vianney et Saint-Thuribe, s'étale approximativement entre 40 et 50%; le deuxième, Mascouche et Saint-Alban, entre 50 et 70%, dans l'ordre; le troisième, Saint-Hilaire, Saint-Léon et Louiseville, entre 70 et 80%.

Le même genre de répartition que pour la teneur en eau peut s'appliquer à la limite liquide; on remarquera encore une très faible valeur de 25% à Saint-Thuribe 12 m. La limite plastique reste plus ou moins semblable pour toutes les argiles, entre 20 et 27.

La plage de valeurs des indices I_L et I_p permettent également de séparer les sites en trois groupes approximatifs:

- I_L moyen (1,1) et I_p fort (44) pour Saint-Léon, Louiseville;
- I_L fort (1,2 à 2) et I_p moyen (26 à 35) pour Mascouche et Saint-Hilaire;
- I_L très fort (1,6 à > 4,0) et I_p très faible (5 à 20) pour Saint-Alban et surtout Saint-Thuribe et Saint-Jean Vianney.

Pour ce qui est de la salinité (tableau 5), seuls Louiseville (valeur forte de 7,6 gr/l) et Saint-Alban (valeur faible de 0,2 gr/l) se distinguent des autres. Enfin, la valeur faible de 0,57 comme concentration en cations monovalents permet de mettre à part le site de Saint-Alban.

L'étendue de toutes ces propriétés permet de couvrir un bon ensemble de conditions possibles dans les argiles marines du Québec.

2.6.2 Propriétés mécaniques

Les dépôts de Saint-Alban, Saint-Léon et Saint-Hilaire présentent des rapports de surconsolidation de l'ordre de 2; leur pression σ'_p est de 85 kPa, 100 à 180 kPa et 115 kPa respectivement. Saint-Thuribe et Louiseville

présentent un OCR de l'ordre de 3 et des valeurs de σ_p' de 175 à 195 kPa et 125 kPa respectivement. Les argiles de Mascouche et de Saint-Jean Vianney sont très surconsolidées avec des OCR de 4 à 6 et avec un σ_p' de 400 kPa à 9 m pour l'une et environ 1000 kPa à 30 m pour l'autre.

Les valeurs de résistance au cisaillement non drainé confirment ces indications:

- $c_u \approx 20$ kPa pour Saint-Alban et $c_u \approx 30$ kPa pour Saint-Hilaire;
- $c_u \approx 25$ à 50 kPa pour Saint-Léon et Louiseville;
- $c_u \approx 30$ à 55 kPa pour Saint-Thuribe;
- $c_u \approx 105$ à 135 kPa pour Mascouche;
- $c_u \approx 200$ à 400 kPa pour Saint-Jean Vianney.

Cependant, seules les valeurs de Mascouche et Saint-Jean Vianney se distinguent vraiment des autres; pour compléter la plage de données, il aurait fallu pouvoir disposer d'une argile dont la résistance intacte se situe entre 70 et 80 kPa.

Les rapports c_u/σ_p' déterminés au cône sont compris entre 0,21 et 0,34 et ceux déterminés au scissomètre entre 0,20 et 0,32; ces dernières valeurs sont reportées à la figure 44; elles sont conformes à l'expérience accumulée par Terratech dans les argiles Champlain (Leroueil et Le Bihan 1981).

Les valeurs de résistance remaniée se scindent en deux groupes: le premier groupe, où $1 < c_{ur} < 2$, correspondant à une valeur moyenne à forte, comprend les sites de Mascouche, Louiseville, et Saint-Léon. Le deuxième groupe, où $c_{ur} < 1$, se caractérise par une résistance remaniée assez faible (Saint-Hilaire), ou faible (Saint-Alban), voire extrêmement faible à Saint-Thuribe 12 m (le cône le plus léger disparaît complètement dans la masse liquide). Rappelons qu'à Saint-Jean Vianney, l'essai au cône remanié sur l'échantillon choisi ne reflète sans doute pas la réelle valeur *in situ*, du fait de l'âge de cet échantillon.

Le rapport des deux résistances va donner trois sortes de sensibilité: une sensibilité moyenne entre 20 et 30 pour Saint-Léon et Louiseville, et la partie supérieure du dépôt à Saint-Hilaire (44), une très grande

sensibilité voisine de 100 pour la partie inférieure du même dépôt, pour Saint-Alban et Mascouche, et enfin une sensibilité extrêmement élevée à Saint-Jean Vianney (> 250) et Saint-Thuribe (> 600). On signalera le manque d'un matériau à grande sensibilité, de valeur 60 ou 70 environ, qui aurait permis de couvrir complètement le spectre des données. La terminologie employée ici est celle du tableau 4.

Les indices de compression, qui expriment la facilité de l'argile à se comprimer, varient de 0,8 à 2,4, sauf pour Louiseville, où $C_c = 4,7$; ces indices ont été définis au point de pression des terres (fig. 43).

3. ESSAIS D'IMPACT

3.1 Essais en chute libre

3.1.1 Généralités

Lors d'un glissement, des blocs d'argile sont certainement soumis à des chutes quasi verticales et à des impacts sur les débris antérieurs. Le degré de remaniement de ces blocs doit être fonction de leur énergie cinétique à l'impact et de l'énergie nécessaire pour produire un remaniement par impact.

Pour étudier ce phénomène, on procède à des essais en chute libre d'échantillons d'argile avec impact sur une table rigide, en faisant varier la hauteur de chute, donc l'énergie cinétique à l'impact. On caractérise le degré de remaniement d'une part par la géométrie de l'échantillon après impact (diamètre et hauteur du débris), d'autre part par la résistance moyenne du débris mesurée au cône suédois. On établira ainsi la relation entre énergie et remaniement à l'impact.

3.1.2 Appareillage

Une première série d'essais a été réalisée en utilisant un moule à succion d'essai triaxial ϕ 5 cm comme système de largage. L'échantillon était maintenu dans ce support à l'aide d'une membrane; en appliquant une succion entre la membrane et la paroi du moule, par trois branches différentes pour que le vide puisse se faire également, l'échantillon était alors entraîné en chute libre.

Pour presque tous les essais effectués avec des échantillons de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur (moins haut quand une partie de l'échantillon pouvait être récupérée et l'essai recommencé) et avec une hauteur de chute de 1,0 m par exemple, les problèmes de frottement au moment du largage débalançaient l'échantillon de telle sorte que l'impact ne se produisait pas verticalement. Le remaniement dépendait bien plus de l'angle d'inclinaison de l'échantillon au moment de l'impact que de la hauteur de chute.

Cette méthode de largage a été abandonnée et on a réalisé une deuxième série d'essais de la façon suivante: l'échantillon est posé sur une petite plate-forme maintenue rigoureusement horizontale à la hauteur de chute désirée par un système de fixation approprié (schéma a, fig. 45), et pouvant s'incliner par une charnière. L'échantillon tombe horizontalement dès qu'on incline la petite plaque (schéma b, fig. 45 et photo 1 a).

L'impact est beaucoup plus franc; une éventuelle inclinaison à l'impact est compensée par une largeur de l'échantillon égale au diamètre. Un papier saran est tendu sur la table d'arrivée avant la chute, afin de pouvoir le décoller facilement. L'échantillon est alors renversé et son côté non remanié est déposé sur des cales, en "bateau" (photo 1 b). On décolle le papier saran très délicatement, et les cônes peuvent être exécutés sur la face d'impact. Dans le cas d'une argile molle (Saint-Alban), le côté non remanié peut simplement être échancré pour assurer la stabilité lors de la pénétration du cône dans le matériau.

Trois dimensions différentes d'échantillons ont été utilisées; les plus nombreux avaient un diamètre de 5 cm et une longueur de 5 cm, d'autres 10 x 10 cm, et enfin trois galettes entières de $\phi \approx 20$ cm, $L \approx 15$ cm.

Les hauteurs de chute ont varié entre 0,75 m et 3,33 m pour les petits échantillons, et 3 m à 10 m pour les plus gros. Des essais au cône ont en général été réalisés sur les deux faces de l'échantillon intact avant essai. Les essais remaniés sont faits soit sur des chutes de taille avant essai, soit sur le résidu obtenu après essai.

La plaque de réception a été choisie de façon qu'elle ne transmette aucune vibration et n'absorbe aucune part de l'énergie d'impact.

3.1.3 Résultats

Tous les échantillons se sont affaîssés en formant un triangle, un coin d'argile "s'enfonçant" dans le matériau; les deux plans de cisaillement ainsi formés, font un angle variable entre eux et délimitent une zone de remaniement.

L'énergie prise en compte est l'énergie potentielle; les effets du frottement de l'air sont négligés. En effet, la hauteur de chute étant faible, l'échantillon n'a pas le temps d'acquérir une vitesse suffisamment élevée pour que le frottement soit pris en compte.

Nous pouvons mesurer la force de friction de l'air par la relation

$$F = \frac{1}{2} \rho V_m^2 C_d S$$

où

- F = force de friction;
- ρ = densité de l'air;
- V_m = vitesse moyenne de l'échantillon;
- C_d = coefficient de frottement;
- S = section de l'échantillon.

C_d est fonction du nombre de Reynolds R_d , qui lui-même s'écrit:

$$R_d = \frac{V_m d \rho}{\mu} = \frac{V_m d}{\nu}$$

où

- d = diamètre de l'échantillon;
- μ = viscosité de l'air;
- $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.

Dans le cas d'un disque et d'un écoulement normal à sa surface, le coefficient de frottement vaut:

$$C_d = \frac{0,043}{(Re)^{1/6}} \text{ (sans dimension)}$$

La vitesse moyenne de l'échantillon, égale à la moitié de celle qui est atteinte au moment de l'impact, est déterminée en égalant l'énergie potentielle acquise lors de la chute de l'échantillon et l'énergie cinétique transmise au moment de l'impact sous forme de déformation ou remaniement du matériau:

$$mgh = \frac{1}{2} mv^2$$

g = gravité;

h = hauteur de chute;

$$\text{donc } v = \sqrt{2gh} \quad \text{et} \quad v_m = \frac{1}{2} \sqrt{2gh}$$

Dans notre cas,

$$g = 9,8 \text{ m/sec}^2$$

$$h = 1,0 \text{ m}$$

$$d = 0,05 \text{ m}$$

$$v = 15,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec} \text{ à } 20^\circ \text{ C}$$

$$\rho = 0,0012 \text{ g/cm}^3 \text{ à } 20^\circ \text{ C}$$

$$v_m = 2,21 \text{ m/sec}$$

$$S = 19,63 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{D'où} \quad R_d = \frac{v_m d}{v} = 7234$$

$$C_d = \frac{0,043}{(R_d)^{1/6}} = 14,16 \times 10^{-3}$$

En remplaçant dans les formules appropriées, on trouve $F = 8,1 \times 10^{-21} \text{ N}$, ce qui est ridicule par rapport à la force de gravité:

$$F_g = \text{volume} \times \rho \times g = 165 \times 9,8 \left(\frac{\text{gr} \cdot \text{m}}{\text{sec}^2} \right)$$

$$F_g = 1,65 \text{ N}$$

3.1.3.1 Echantillon de 5 × 5 cm

Ces échantillons ont un diamètre de 5 cm, une longueur de 5 cm et une masse de l'ordre de 160 g. Ils tombent en position couchée.

Les photos 1 c à 5 c montrent plusieurs spécimens tombés de différentes hauteurs.

Le remaniement à l'impact s'est traduit d'une part par une modification de la forme de l'échantillon, d'autre part par une réduction de la

résistance au cisaillement. On présente donc ces deux types de résultats.

La figure 46 donne la variation de diamètre de l'échantillon, sous la forme de hauteur de tas après impact en fonction de l'énergie. La figure 47 donne la variation de la surface d'échantillon après impact en fonction de l'énergie.

Dans les deux cas, on note une augmentation continue de l'importance géométrique du remaniement en fonction de l'énergie. Les deux figures permettent d'autre part de classer les sites les uns par rapport aux autres, sur le plan résistance ou consistance; on obtient par ordre croissant: Saint-Alban (6,6 m), Saint-Léon (4,8 m), Louiseville (6 m) et Saint-Hilaire (11,4 m) simultanément, Saint-Léon (9,3 m) et Saint-Thuribe (12 m). Saint-Alban est effectivement l'argile la plus molle et celle de Saint-Thuribe la plus raide; l'argile de Mascouche n'a pas été testée car il aurait fallu adopter de trop grandes hauteurs de chute pour obtenir des résultats significatifs.

Le tableau 9 donne les valeurs de c_u mesurées au cône dans la partie remaniée de l'échantillon après impact. Cette résistance est sensiblement constante, quelle que soit la hauteur de chute; elle est donc présentée sous forme de moyenne par site. Elle est toujours comprise entre c_u intact et c_u remanié et a donc été appelée " c_u intermédiaire". Cette valeur intermédiaire ne semble pas proportionnelle à la hauteur de chute d'une manière générale; nous n'avons relevé qu'une très légère décroissance de résistance avec l'augmentation d'énergie pour l'argile de Saint-Alban: de 14,6 kPa à 11 kPa en passant régulièrement de 1 m à 3 m de hauteur de chute.

Nous croyons que c'est le mode même de sollicitation, c'est-à-dire un impact brutal, qui est une cause du peu de variation de la résistance; son caractère aléatoire est sans doute dû à la façon de prendre les mesures au cône, irrémédiablement liée à l'appréciation de l'opérateur, même si celui-ci était toujours le même pour choisir visuellement la partie la plus remaniée du "tas" obtenu. D'autre part, nous verrons par la suite au chapitre 6 que les différences d'énergies impliquées entre 1 et 3 m de hauteur de chute ne sont pas très importantes et expliquent aussi le manque de précision des résistances obtenues. Un échantillonnage de valeurs énergétiques est rassemblé au tableau 15.

La hauteur du "triangle de remaniement" dont on vient de parler est elle aussi aléatoire, comme l'angle au centre situé entre les deux plans de cisaillement. Nous avons fréquemment observé par ailleurs d'autres plans de cisaillement plus ou moins importants et inclinés par rapport à l'horizontale, hors du triangle de remaniement. Même s'ils sont dus à la présence de plans de faiblesse naturels, on comprend que l'énergie d'impact se soit dépensée aléatoirement selon la structure originelle de l'échantillon.

3.1.3.2 Echantillon de plus grande dimension

Pour atteindre des énergies et des vitesses à l'impact plus importantes, on a procédé à des essais sur des échantillons de 10×10 cm et sur des galettes entières de $\phi \approx 20$ cm, $L \approx 15$ cm.

Les résultats sont présentés sous forme de c_u intermédiaire au tableau 10. On note là aussi peu de variation de c_u intermédiaire, quel que soit le cas considéré.

On notera cependant quelques observations visuelles faites lors de la chute des galettes d'une hauteur de 10 m (photos 5): l'échantillon éclate littéralement en plusieurs morceaux; certaines parties sont intactes, d'autres plus ou moins remaniées; les surfaces de cisaillement présentent du matériau beaucoup plus remanié, et même des traces de coulées dans le cas de Saint-Thuribe; comme on ne peut aller tester ces surfaces, on a planté le cône suédois dans une zone plus massive qui apparaissait la plus remaniée possible.

3.1.4 Conclusion

Le remaniement dans tous les essais en chute libre est loin d'être complet puisque c_u intermédiaire est toujours nettement plus élevé que c_{ur} . En fait, la variation d'énergie se traduit plutôt par une variation de la quantité de sol remanié dans le spécimen, que par la variation du degré de remaniement. Ceci serait dû au mode même de l'essai, à la façon de prendre les mesures, aux trop petites variations d'énergie en cause.

3.2 Essais de pilonnage

3.2.1 Généralités

Un deuxième type d'impact est celui où un bloc d'argile reçoit une masse en chute libre. Pour étudier ce type d'impact, on procède à des essais dans lesquels une masse métallique à base plate, tombe d'une hauteur variable sur un échantillon d'argile placé sur une table rigide. L'énergie à l'impact est variée en modifiant le poids ou la hauteur de chute de la masse. Le remaniement est évalué en mesurant la géométrie du débris et sa résistance moyenne par essai au cône suédois. On établit ainsi une autre relation entre énergie et remaniement à l'impact. L'énergie sera bien sûr calculée par la formule

$$W = mgh$$

où W = énergie emmagasinée par l'échantillon;

m = masse du pilon;

g = gravité;

h = hauteur de chute du pilon.

3.2.2 Appareillage

La masse métallique utilisée comprend un plateau circulaire à la base de 20,3 cm de diamètre sur lequel est centrée une barre de 92 cm de longueur (schéma c, fig. 45). Le tout pèse 1773 gr. Lors de sa chute, ce pilon est guidé par une tige creuse maintenue rigoureusement verticale à la hauteur de chute désirée, par le même système de fixation que celui utilisé pour l'essai en chute libre (schéma a, fig. 45).

Des masses supplémentaires peuvent être ajoutées sur le plateau circulaire, où la hauteur de chute peut être réglée à l'aide d'une plaque coulissante (schéma a, fig. 45). On s'assure que l'échantillon est bien placé dans l'axe du pilon. Un papier saran est tendu sous le plateau circulaire et sur la table d'arrivée, afin de pouvoir décoller le morceau d'argile plus facilement. Des mesures de résistance intacte précèdent l'essai; la résistance remaniée est déterminée avant ou après essai, à partir de la même galette d'où provient l'échantillon testé.

3.2.3 Résultats

3.2.3.1 Echantillon de 5 × 5 cm

Les hauteurs de chute du pilon ont varié de 20 cm à 1,50 m. Les échantillons ont été posés soit en position verticale, soit en position horizontale. Dans les deux cas, l'échantillon était aplati après impact et présentait donc deux faces de remaniement: celle en contact direct avec le pilon a été appelée face supérieure, et l'autre face inférieure.

Les figures 48 à 51 présentent les déformations géométriques croissantes des échantillons ayant subi du pilonnage, sous forme de hauteur de tas et de surface d'impact en fonction de l'énergie. Ces courbes permettent aussi de classer les différentes argiles entre elles, sur le plan résistance ou consistance; on obtient le même classement que pour la chute libre; l'argile de Saint-Alban n'a pas été utilisée car elle se serait fait trop écraser; par contre, celle de Mascouche se démarque bien des autres.

Des résistances décroissantes ont été obtenues dans le matériau remanié au fur et à mesure de l'augmentation d'énergie, ce qui apparaît aux figures 52 et 53. Cependant, on obtient un palier de résistance qui reste le même après un certain niveau d'énergie. Cette résistance, appelée aussi " c_u intermédiaire" est présentée au tableau 11, pour la face supérieure. La valeur moyenne de ce " c_u intermédiaire" est celle qui revient le plus souvent pour la plupart des pilonnages; les deux valeurs extrêmes, "sup." et "inf.", figurent cependant dans le tableau 11.

Les résultats des essais sont illustrés par les photos 6 a à 9 c. Pour un échantillon posé verticalement, l'impact provoque un écrasement disparate de la partie supérieure sur les côtés, tandis que la face inférieure laisse apparaître une découpe circulaire d'argile quasiment intacte au milieu de la forme argileuse (photo 8 c). Pour un échantillon posé horizontalement, le choc le cisaille grosso modo en trois, le long de l'axe longitudinal, qui présente alors trois axes longitudinaux de remaniement; les valeurs obtenues sur ces trois lignes sont sensiblement les mêmes. Quand l'énergie fournie devient grande, toutes ces formes s'amoindrissent.

Par ailleurs, on peut observer tout un réseau de fracturation, plus ou moins ouvert et en maille plus ou moins serrée, à peu près proportionnellement à l'énergie impliquée. Cette observation suggère que l'énergie se dépense d'abord pour la formation de cette fracturation, puis chaque petit cube ou élément de sol se fait étirer, raboter et donc remanier sur chacune de ses faces.

3.2.3.2 Echantillon de 10 × 10 cm

Nous avons essayé de dépasser le palier de résistance avec des échantillons plus gros et des énergies plus fortes. Cette vérification ne pouvait se réaliser sur des échantillons de 5 × 5 cm car la hauteur du tas obtenue aurait été trop mince pour mesurer une résistance.

Les échantillons ont été placés horizontalement; une hauteur de chute standard de 2 m a été adoptée; par contre, nous avons fait varier le poids du pilon entre 3,08 kg et 10,35 kg, à raison de deux essais par site.

Les résultats sont présentés aux tableaux 12 et 13, pour les faces d'impact supérieure et inférieure.

Les résistances obtenues décroissent légèrement en fonction de l'énergie (PIL 5 × 5 cm, puis 1^{er} PIL 10 × 10 cm, et enfin 2^e PIL 10 × 10 cm). Les différences observées sont cependant assez faibles et les mêmes raisons que pour la chute libre seront invoquées pour les expliquer. Le tableau 16 donne des exemples de valeurs énergétiques.

3.3 Conclusion

Le " c_u intermédiaire" obtenu par pilonnage est suffisamment voisin de celui obtenu par chute libre pour déterminer des moyennes.

Les valeurs de résistance les plus faibles, obtenues pour chacune des deux sortes d'essai, c'est-à-dire correspondant tout de même aux énergies les plus importantes, ont été choisies pour calculer des moyennes pour les deux sortes d'échantillons, puis une moyenne générale. Celle-ci, appelée I_1 ou

" c_u intermédiaire moyen", a permis de calculer d'autres "indices de remaniement", I_2 , I_3 et I_4 , qui apparaissent au tableau 14.

$$I_2 = \frac{c_u \text{ intermédiaire}}{c_u \text{ intact}} \qquad I_3 = \frac{c_u \text{ intermédiaire}}{\sigma_p'}$$

$$I_4 = \frac{c_u \text{ intact} - c_u \text{ intermédiaire}}{c_u \text{ intact} - c_u \text{ remanié}}$$

Les résistances intactes et remaniées moyennes ont été calculées de la façon suivante:

$$c_u \text{ intact moyen} = c_{u1} = \frac{1}{3} [c_{u1} (\text{CHU } 5 \times 5 \text{ cm}) + c_{u1} (\text{PIL } 5 \times 5 \text{ cm}) + c_{u1} \frac{(\text{CHU} + \text{PIL}) 10 \times 10 \text{ cm}}{2}]$$

$$c_u \text{ remanié moyen} = c_{ur} = \frac{1}{2} [c_{ur} (5 \times 5 \text{ cm}) + c_{ur} (10 \times 10 \text{ cm})]$$

Le coefficient I_4 est compris entre 0 (argile intacte) et 1 (argile complètement remaniée); si ce n'est Saint-Thuribe (12 m) où $I_4 = 0,80$, on a obtenu un éventail resserré de valeurs, $0,56 < I_4 < 0,68$, confirmant l'existence d'un état de remaniement sensiblement constant quelle que soit l'énergie d'impact.

Les figures 54, 55 et 56 rassemblent les résultats sous forme normalisée: la résistance au cisaillement est rapportée à la pression de préconsolidation et l'énergie au volume de l'échantillon et à $0,013 \sigma_p'$; ce dernier coefficient sera discuté au paragraphe 6.1.1.2.

On remarquera que sous forme normalisée, les différentes argiles ne se classent plus selon leur "résistance ou consistance" mais plutôt selon la "rapidité" ou selon l'importance de la "coulée argileuse" qui leur est associée: par ordre décroissant d'importance, on rangerait: Saint-Thuribe, puis Saint-Alban, Saint-Hilaire et Mascouche, et enfin Louiseville et Saint-Léon.

I_4 deviendra dans la suite de ce travail le seul indice de remaniement utilisé. C'est en effet le meilleur outil d'interprétation car il

caractérise bien le degré de remaniement, par référence aux résistances intacte et remaniée de l'argile. Nous reviendrons sur sa définition au chapitre 6, paragraphe 6.1.1.1.

En définitive, il ressort des essais d'impact les quatre points suivants:

- Le domaine d'énergie pratique est peu étendu car les effets produits mesurables au cône sont limités; l'échantillon devient trop mince si l'énergie potentielle est trop forte, et la mesure au cône devient impossible.

- Le remaniement n'est pas uniforme; si l'énergie impliquée est faible, le volume concerné est faible aussi, et si l'énergie est forte, le volume l'est aussi; si le matériau est raide, on n'obtient que des plans de fracturation, et si le matériau est mou, la déformation obtenue est plus ou moins massive, tout en étant fissurée. De toute façon, l'action violente provoquée par l'impact a d'abord pour effet de créer des plans de cisaillement, en nombre plus ou moins grand selon le matériau et le genre de sollicitation; la majeure partie de l'énergie accumulée est dépensée dans la formation de ces plans.

- Cette non-uniformité rend la mesure du c_u moins fiable, ne serait-ce que par l'écart des mesures dû au choix par l'opérateur de l'emplacement de l'essai au cône sur le tas d'argile remaniée.

- Il est impossible d'atteindre un remaniement très intense. Nous n'avons pu mesurer une résistance très faible (tableau 10) qu'une seule fois, après la chute libre d'une hauteur de 10 m, d'une galette entière d'argile (20 cm de diamètre, 15 cm de hauteur). Pourtant, des traces de consistance presque liquide peuvent s'observer parfois, comme le prouvent les photos 2 b ou 5 b, suite à une friction brève mais intense le long d'un plan principal de cisaillement.

4. ESSAIS D'EXTRUSION

4.1 Généralités

On a fréquemment observé sur le terrain que l'argile remaniée dans un glissement avait été soumise à un processus d'extrusion entre des blocs de sol intact. Massarsch avait déjà étudié ce phénomène en 1976, en relation avec le problème de fonçage des pieux.

Pour évaluer la dissipation d'énergie en remaniement par extrusion, on procède à des essais au moyen d'un appareil spécial dans lequel on force un échantillon d'argile intact à travers un orifice de diamètre variable. On évalue l'énergie nécessaire directement par la relation force vs déplacement du piston moteur. On fait varier le degré de remaniement en modifiant le diamètre de l'orifice. On contrôle ce remaniement par essai au cône suédois sur le matériau extrudé.

4.2 Appareillage

Il a été conçu à l'Université Laval; le plan de "l'extrudoir" lui-même est présenté à la figure 57. Sa mise en place sur une presse triaxiale est dessinée à la figure 58 et montrée sur les photos 10 a et b.

L'appareillage comprend essentiellement:

- un moule en deux parties pour faciliter le montage de l'échantillon; le diamètre intérieur est de 5 cm; il est fileté aux deux extrémités;
- à l'une des extrémités, est axé le piston monté sur roulements à rouleaux;
- à l'autre bout, la bague d'extrusion est maintenue par un support vissé dans le moule;
- le tout est suspendu par vissage sur un bâti adapté aux montants d'une presse triaxiale;

- un anneau de charge est installé entre le plateau de la presse et le piston de l'appareil pour mesurer la force nécessaire à l'extrusion. Un comparateur mesure le déplacement du piston. Un montage spécial a été fabriqué pour pouvoir positionner adéquatement au-dessus de l'extrusion le cône suédois, qui devra mesurer le degré de remaniement au fur et à mesure de l'essai.

Quatre bagues de rétrécissement différentes ont été utilisées, afin de réduire la section de sortie de 10%, 25%, 50% et 75%.

On a employé la vitesse maximum de la presse, soit 1,524 mm/min, afin de faire un essai en conditions aussi non drainées que possibles; cependant, des migrations d'eau à travers l'échantillon seront décelées pour la plupart des essais.

4.3 Description de l'essai

Quatre échantillons de 5 cm de diamètre et 7,8 cm de long sont taillés dans la même galette, et subissent chacun une extrusion différente, pour chacune des quatre bagues.

Les résistances au cisaillement intacte et remaniée sont déterminées au cône tombant, sur la galette entière avant les essais, et sur ce qui reste de matériau après les essais.

La procédure de l'essai est illustrée par les photos 10 c à 13 c et comprend les étapes suivantes:

- 1° Application d'une mince pellicule d'huile sur le moule et la bague de rétrécissement; l'échantillon est monté; sa position coïncide avec le début de l'extrusion (position ①, fig. 59);
- 2° Mise en contact anneau-piston par l'intermédiaire d'une bille; initialisation des comparateurs; mise en marche de la presse;
- 3° Prise de lecture simultanée anneau de charge - déplacement du piston, jusqu'à ce que 5 mm environ de matériau soit sorti de la filière; les instants ② (fig. 59), fin de l'extrusion proprement dite, et ③ (fig. 59), sortie de la filière, sont notés (après extrusion, le matériau est poussé sur une longueur cylindrique de 4,8 mm avant la sortie définitive);

- 4° Arrêt A de la presse, arasage du matériau et surfacage propre; pesage du sol extrudé;
- 5° Essais au cône tombant: quatre ou cinq sur le pourtour de la section, un au centre;
- 6° Départ D de la presse; lecture anneau de charge - déplacement du piston;
- 7° Arrêt de la presse au bout d'une course de 0,5 à 1 cm;
- 8° Arasage et récupération du matériau extrudé pour mesures de poids et de teneur en eau;
- 9° Reprise à partir du n° 4; quatre ou cinq tranches sont ainsi analysées;
- 10° L'appareil est démonté; on force le restant de l'échantillon à repasser par la filière en sens inverse; l'échantillon tronconique obtenu (photo 12 c) est alors coupé en rondelles (photo 13 a) sur lesquelles des essais au cône sont effectués (photos 13 b et 13 c), afin d'apprécier le degré de remaniement au fur et à mesure de l'extrusion. Les parties coniques sont laissées à sécher, pesées et conservées.

4.4 Résultats

Les résultats sont présentés sous forme de trois séries de graphiques:

4.4.1 Force d'extrusion F et résistance au cisaillement c_u

Les figures 59 à 76 donnent les résultats bruts proprement dits, c'est-à-dire d'une part la relation existant entre la force d'extrusion et le déplacement correspondant, et d'autre part entre la résistance au cisaillement obtenue et le même déplacement, pour les différents rétrécissements.

La force verticale, nécessaire à appliquer sur l'échantillon pour qu'il soit extrudé, est calculée en multipliant la lecture de l'anneau de charge par sa constante de calibration, puis en soustrayant le poids du piston, bague, etc..., ainsi que le poids du matériau (qui varie en cours d'essai, au moment de l'arasage de chaque tranche); on tient compte aussi du frottement de l'échantillon le long de la partie verticale de "l'extrudoir"; en retranchant la lecture qui lui correspond, faite sur un anneau de charge avant l'essai

proprement dit; ce frottement est en général inférieur à 10 N. Par contre, celui occasionné par le passage du spécimen au travers de la partie tronconique, doit être supérieur à 10 N, et doit sans doute être variable en cours d'essai, l'argile poussant la pellicule d'huile au fur et à mesure de son avancement vers la sortie de la filière; ce frottement n'est malheureusement pas mesurable, et pourrait pourtant influencer le résultat significativement, en particulier pour la plus forte réduction de section.

A la lumière des figures montrant l'effort nécessaire pour produire l'extrusion, les constatations générales suivantes peuvent être faites:

- Après une montée en charge plus ou moins régulière lors du confinement grandissant du matériau dans la filière, due entre autres à de petites ruptures plus ou moins locales ou à des migrations d'eau dans l'échantillon (observations visuelles), la force tend à se stabiliser.

- Cet état stable est à peu près proportionnel au pourcentage de réduction de section dans le cas des filières de 25%, 50% et 75%; par contre, les efforts nécessaires pour sortir des filières de 10% et 25% sont assez voisins, ce qui nous a conduits parfois à laisser tomber "l'essai 10%".

Les graphiques donnant l'état de remaniement après extrusion font ressortir les points suivants:

- Le remaniement du centre de l'échantillon est en général un peu plus fort que sur le pourtour; la raison en est sans doute que la distribution des pressions est plus concentrée sur un petit élément de sol situé au centre de la filière.

- Le remaniement est plus important pour les premières tranches extrudées, puis diminue plus ou moins progressivement pour atteindre un état assez stable. La première tranche étant moins confinée que les autres, elle doit être plus déformable donc moins résistante que les suivantes. Par ailleurs, la variation subite de teneur en eau en début d'essai (la première tranche est beaucoup plus humide que les autres; cf paragraphe suivant) devrait expliquer en grande partie les différences observées d'une tranche à l'autre. Seul le c_u de Saint-Thuribe reste vraiment stationnaire tout au

long de l'essai, site pour lequel la teneur en eau est d'ailleurs la plus faible (entre 40 et 50%).

- Les diverses réductions de section conduisent à des différences de résistance relativement modestes. La figure 77 le confirme en montrant à nouveau l'existence d'un palier de résistance. Chacune de ces courbes normalisées se rapporte à un site donné et représente l'indice de remaniement I_4 ou I_r sous forme de pourcentage ou degré de remaniement, en fonction de l'énergie normalisée W_N .

4.4.2 Domaine stable de F et c_u et teneur en eau

Les figures 78 à 86 font ressortir, en correspondance sur la même page, la force d'extrusion, la résistance au cisaillement et la teneur en eau, pour les différents pourcentages de réduction de section, en fonction du déplacement.

Nous ne nous sommes intéressés, dans ces graphiques, qu'aux valeurs stables de la force d'extrusion et du c_u correspondant, la montée en pression vers ce domaine stable étant sujette à trop de variations incontrôlables, comme celles du frottement ou de la teneur en eau.

Cette série de figures met en évidence la montée subite de teneur en eau dans la première tranche extrudée, en particulier pour la filière à 75% de réduction de section. Cette variation s'amoindrit progressivement jusqu'à retrouver un w égal ou légèrement inférieur au w initial de l'échantillon, au niveau de la dernière tranche. Les plus fortes variations de w correspondent aux plus forts degrés d'extrusion (75%) et aux plus faibles résistances; on peut noter des variations de plus de 30%.

Un exemple de graphique donnant la teneur en eau vs temps d'extrusion est montré à la figure 87. Il ressemble à la figure 78 (Saint-Léon 4,8 m) et confirme l'hypothèse de migration d'eau dans l'échantillon en cours d'essai; cette eau flue en fait vers les extrémités, comme l'indiquait souvent la présence d'une fine pellicule d'eau sur la première face émergente de l'échantillon.

4.4.3 Etat de remaniement dans la filière

Après essai, l'échantillon tronconique restant est récupéré et découpé en tranches, afin de tester l'évolution de la résistance au cisaillement dans la filière même.

C'est ce qui fait l'objet des figures 88 à 96. La résistance intacte correspond à la teneur en eau initiale de l'échantillon, au stade appelé ① dans les figures 59 à 76, c'est-à-dire le début de la filière, à l'abscisse 0 du "déplacement dans la filière". Les variations du c_u et du w correspondant sont alors tracées, jusqu'à l'abscisse 2,5 cm, ou sortie de la filière, stade ③, en passant par l'abscisse 2,0 cm, ou fin de rétrécissement, stade ②.

Notons d'abord que ces mesures sont faites après essai, après démontage, w étant déjà plus ou moins stabilisé, comme le prouvent d'ailleurs les nouveaux graphiques. Ceux-ci montrent d'autre part que la chute du c_u s'effectue dès le début de l'extrusion et que sa valeur tend à se stabiliser dès le milieu de la filière. Si la teneur en eau correspondante varie, c'est pour diminuer sur la première moitié de la bague, puis augmenter légèrement sur la deuxième moitié.

On imagine en tout cas que la majeure partie de l'échantillon ait dépassé l'état limite dès le début de l'essai et qu'une certaine déstructuration se produise très rapidement.

4.5 Conclusion

L'essai d'extrusion est une tentative de remaniement plus homogène par rapport aux deux essais précédents, mais qui s'avère plus ou moins fructueuse. Il est en effet dépendant de plusieurs facteurs incontrôlables, en particulier de la migration d'eau, donc de la variation de teneur en eau, et de frottements qui peuvent entraîner des erreurs conséquentes dans le calcul de l'énergie.

De ce fait, sauf pour Saint-Thuribe, la réduction de la résistance remaniée intermédiaire avec le rétrécissement de la bague est plus ou moins

aléatoire, même si la figure 77 montre que les relations I_r vs W_n ont une tendance semblable à celle obtenue par les essais CHU et PIL. Nous verrons par ailleurs dans la suite de ce travail que cette tendance s'inscrit dans un cadre logique.

L'ensemble des essais tend à montrer la difficulté que nous avons connue à produire un remaniement très complet. De toute évidence, celui-ci n'est pas proportionnel à l'énergie mise en oeuvre pour le produire. Il est possible qu'un remaniement complet ne se produise qu'après une action longue et répétée et non forcément violente, même si celle-ci semble nécessaire pour amorcer le phénomène. Cette remarque est étayée par les nombreuses observations visuelles accompagnant tous les essais effectués; elle devrait aussi se trouver confirmée par les essais de cisaillement simple dont le mode d'opération se rapproche davantage de l'action "longue et répétée" que de l'action violente. Il est fort probable par exemple que la première partie de l'énergie accumulée soit dépensée dans la formation de plans de cisaillement, puis que la deuxième partie corresponde au remaniement de l'argile si l'action se poursuit, par friction de deux tranches de sol en contact l'une de l'autre, le long d'un de ces plans de cisaillement.

5. ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE

5.1 Généralités

Cet essai a déjà été utilisé par Goodman et Leininger en 1967 et J. Lafleur en 1970. Il s'agit d'un essai non drainé, à déformation volumique constante, entraînant un mouvement de particules selon des plans parallèles (Lafleur), dans une boîte de cisaillement simple, cubique.

Les buts principaux de l'essai sont d'une part de créer un remaniement homogène plus contrôlé et progressif que dans les essais précédents, et d'autre part de simuler ce qui se passe dans un plan de cisaillement à grand déplacement.

Le principe est schématisé à la figure 97. On impose à la boîte des oscillations successives, de part et d'autre de la position verticale originale. La déformation angulaire résultante est relevée. l'état de remaniement est mesuré par un scissomètre de laboratoire en différents points de l'échantillon, après 1, 2, 3, 6, 10, 22, 38, 60, voire 90 cycles d'oscillation de la boîte.

Une relation force de poussée vs déformation angulaire peut être établie et le travail nécessaire pour obtenir telle déformation ou tel degré de remaniement peut être calculé par intégration de surface.

Trois différentes zones de déformation ont été mises en évidence à l'intérieur de l'échantillon: zone en compression, zone en compression et extension, zone en rotation (Lafleur¹⁹ 70); la zone de remaniement la plus homogène se situe dans la partie centrale de l'échantillon.

5.2 Appareillage

Conçu à l'Université Laval, il est montré aux photos 14 a à 15 c; le plan de la boîte est présenté à la figure 98. Le système utilisé pour découper les échantillons, leur mise en place dans la boîte de cisaillement simple, sont montrés aux photos 16 a et 16 b.

La boîte se compose de quatre pans de plexiglass dont deux sont montés sur charnières et peuvent ainsi glisser en rotation à l'intérieur de l'espace situé entre les deux autres, à raison de 25° de part et d'autre de la verticale; un rapporteur vissé dans un des pans verticaux indique l'angle d'inclinaison; le couvercle suit l'oscillation en coulissant dans des rainures horizontales, maintenant le volume de la boîte constant. Les parois de la boîte restent parfaitement parallèles tout au long de l'essai. Le volume est celui d'un échantillon cubique de dimension 12 × 12 × 10 cm.

Il est certain que l'étanchéité n'est pas totale au niveau des jointures, étant donné l'importance des pressions exercées; cependant, les pertes observées d'eau ou de sol remanié n'ont pas été flagrantes. Nous verrons d'autre part qu'il existe des frottements sur les parois latérales.

Un système spécial a été construit à l'université pour découper un spécimen à faces rigoureusement parallèles et verticales (photo 16 a); un moule a été adapté pour pouvoir le transporter et l'installer dans la boîte (photo 16 b).

La boîte est fixée sur un bâti métallique (photos 14 a, b et c). L'effort est appliqué au tiers supérieur d'une des deux parois mobiles par l'intermédiaire d'un piston axé horizontalement; celui-ci appuie ou tire le pan de plexiglass selon le cas; il est relié à un anneau dynamométrique puis se termine par une vis sans fin ^{entraînée} ~~engrenée~~ par un moteur électrique; ce moteur est monté sur coussins de mousse pour amoindrir les vibrations.

5.3 Description de l'essai

Les résistances intactes et remaniées sont mesurées sur la gâlette avant découpage.

La procédure de l'essai comprend les étapes suivantes:

- 1° Application d'une mince pellicule d'huile sur l'intérieur des pans de la boîte; un papier saran est installé sur le fond de la boîte et remonté sur les côtés pour limiter les pertes d'eau; un filtre synthétique tissé rectangulaire est placé entre le sol et le couvercle pour pouvoir le retirer facilement, en cours d'essai;

- 2° La position originale étant la verticale, 0° sur le rapporteur, mise en marche du moteur jusqu'à la position + 25° sur le rapporteur; prise de lecture simultanée anneau de charge - angle d'inclinaison de la boîte; vitesse de cisaillement rapide: 1,5 mm/sec. soit 1 mm ^{minute} pour ce premier quart de cycle;
- 3° Inversion du sens de marche du moteur: le piston tire la boîte jusqu'à la position -25°, en passant par la verticale; prise de lecture simultanée anneau de charge - angle d'inclinaison;
- 4° Nouvelle inversion du sens de marche du moteur: le piston repousse la boîte jusqu'à la verticale; un cycle entier a donc été parcouru;
- 5° La boîte est dévissée de son bâti, le couvercle retiré, et on adapte le scissomètre de laboratoire de façon à faire un essai dans la partie centrale de l'échantillon (photo 15 c), entre les plans de cisaillement éventuellement observables; l'emplacement de huit autres scissomètres est alors prévu, dans la zone centrale aussi, de telle sorte qu'aucune influence ne puisse s'exercer entre les différents essais;
- 6° La boîte est replacée sur le bâti, un deuxième cycle effectué en mesurant les efforts impliqués; on réalise un deuxième essai scissométrique, puis un troisième après le troisième cycle. Pour les cycles successifs suivants, on ne relève sur l'anneau que la force indiquée au passage de la position 0°; les mesures de c_u au scissomètre sont faites aux cycles nos 6, 10, 22, 38, 60, 80 ou 90;
- 7° En fin d'essai, après 60, 80 ou 90 cycles selon le type d'argile, l'échantillon est sorti de la boîte et découpé en tranches horizontales; 16 essais au cône tombant sont répartis sur chaque tranche, afin de donner l'état final de remaniement à travers tout le spécimen (photos 17 a, b, c).

5.4 Résultats

5.4.1 Force de cisaillement

Les forces impliquées dans le cisaillement sont dessinées aux figures 99 à 108, en fonction du déplacement en degré, à raison d'une figure par site. Environ six cycles sur le total de cycles effectués sont représentés, par souci de clarté et de visualisation du processus de progression du degré de remaniement. L'alternance du déplacement angulaire est matérialisée par un axe divisant la figure en deux, en guise de position verticale de la boîte; les courbes simulent ainsi les allées et venues de la boîte.

A l'examen de cette série de courbes, on relèvera les points suivants, pour la majorité des sites:

- Seul le premier cycle accuse une nette différence de force par rapport aux suivants, voire même le premier quart de cycle; ceci indique que la sollicitation a d'abord pour effet de créer quelques plans majeurs de cisaillement sub-horizontaux, puis que cette voie préférentielle de déplacement est empruntée en grande partie au cours des cycles suivants. Toutes les observations visuelles corroborent cette indication; les autres cycles remanient davantage le matériau au voisinage de ces plans, et font apparaître au fur et à mesure de l'essai un réseau plus resserré de fracturation et fissuration, un peu partout dans l'échantillon, sauf dans la partie inférieure centrale, mode de cisaillement oblique.

- La première rupture dans le spécimen apparaît dès le deuxième degré d'inclinaison de la boîte, au cours du premier quart de cycle, probablement tout de suite après le passage à l'état limite.

- L'effort est plus important pour les inclinaisons les plus fortes, la poussée n'étant plus perpendiculaire à la direction du déplacement de la boîte; les frottements doivent aussi être plus conséquents.

- Les courbes montrent une chute notoire de l'effort appliqué avec son changement de sens, de moins en moins marquée avec le nombre de cycle; cette tendance confirme l'hypothèse de "voie préférentielle de déplacement" évoquée ci-dessus.

- Le frottement de 30 N indiqué sur les figures est une mesure du serrage des vis maintenant la tête de la boîte, c'est-à-dire du frottement de la boîte à vide. Les vis ont toujours été serrées de la même façon par le même opérateur; c'est une espèce de garantie que le frottement du matériau sur les deux parois verticales fixes de la boîte, ait été similaire d'un essai à l'autre. Ce dernier frottement n'a pu être pris en compte, de même que celui occasionné par la tendance au gonflement de l'échantillon dès qu'il est sollicité; ce gonflement entraîne en particulier une tendance au soulèvement de la tête, et donc au frottement des vis dans les rainures.

Dans la suite de ce travail, on parlera d'un autre essai semblable, éliminant presque définitivement ces problèmes de frottement.

5.4.2 Force au demi-cycle

Afin de rendre les courbes précédentes utilisables, nous avons représenté chaque cycle par la force appliquée au demi-cycle. L'échantillon est revenu à sa position verticale originale; c'est celle qui correspond à la force appliquée la plus réaliste.

Les points de mesure permettent alors de tracer les courbes présentées aux figures 109 à 112, en fonction du nombre de cycles. Elles ont en général une bonne régularité, et serviront à calculer l'énergie impliquée. Le frottement de 30 N n'a pas été déduit.

Quelques petites irrégularités peuvent être discutées:

- Saint-Hilaire 5,6 m: le premier point de mesure (1er cycle) nous fait tracer une deuxième alternative de courbe peu probable, comparée à toutes les autres. Nous remarquerons d'autre part que la courbe (5,6 m) est proche en tous points de la courbe (11,4 m), attestant le même genre de comportement pour les deux profondeurs.

- Saint-Thuribe 12 m: l'argile à 12 m de profondeur demande un effort plus faible qu'à 6 m de profondeur au cours des vingt premiers cycles, puis le phénomène inverse semble se produire à partir du 20^e cycle. Une tentative d'explication consisterait à croire qu'à 12 m de profondeur, le remaniement de plus en plus intense provoque des frottements latéraux de plus en plus forts; il peut aussi s'agir d'une anomalie locale, telles les nombreuses inclusions d'argile verte ou beige oxydée observée dans le spécimen, qui était de manière générale une argile grise noire marbrée;

- Saint-Jean Vianney 30 m: plusieurs points de mesure sont écartés de la courbe moyenne tracée; il s'agit de problèmes matériels survenus durant l'essai mais qui ne doivent pas affecter la régularité de la courbe.

- Nous mettrons enfin la remarque suivante en évidence: toutes les courbes tendent de manière très asymptotique (sauf peut-être pour Saint-Jean Vianney) vers une valeur de la force voisine de 60 N, indiquant que la valeur c_{ur} n'est peut-être pas complètement atteinte (on ne doit pas oublier cependant de retirer la valeur du frottement, c'est-à-dire 30 N au moins).

5.4.3 Résistance au cisaillement scissométrique

Pour évaluer le degré de remaniement au fur et à mesure de l'essai, un essai au scissomètre de laboratoire est réalisé à la fin du 1^{er} cycle, 2^e, 3^e, 6^e, 10^e, 22^e, 38^e, 60^e et parfois 80^e ou 90^e cycle. La résistance au cisaillement est calculée par la formule

$$c_u = \frac{6/7 M}{\pi D^3}$$

où M = moment en $\text{kg} \times \text{cm}$ = lecture $\times 0,03333$ (constante du ressort)
 D = diamètre du croisillon en $\text{cm} = H/2 = 1 \text{ cm}$
 c_u en kg/cm^2 ou multiplié par 99,984 pour l'obtenir en kPa .

Les figures 113 à 116 montrent les résultats.

La bonne allure générale de courbes laisse croire que l'emplacement des scissomètres est assez bien choisi, malgré l'espacement inévitable des pales d'un essai à l'autre; cette constatation vient confirmer l'hypothèse d'un remaniement relativement homogène dans toute la partie centrale de l'échantillon. L'emplacement exact des scissomètres apparaît à la série de figures suivante (paragraphe 6.4.4).

Quelques essais scissométriques semblent cependant aberrants; les points de mesure sont quand même reportés sur les graphiques et accompagnés d'un point d'interrogation.

Une résistance au cisaillement intacte est déterminée avec le même scissomètre de laboratoire avant essai; sa valeur est notée sur l'ordonnée des graphiques, qui correspond cependant au c_u obtenu après un cycle de remaniement; il ne faut pas oublier non plus que l'abscisse représente le nombre de cycles en coordonnées logarithmiques.

La résistance complètement remaniée peut être déterminée de différentes manières. L'essai au scissomètre de laboratoire s'effectue dans de l'argile remaniée à la spatule, ou immédiatement après la mesure de la résistance intacte, après avoir donné plusieurs tours de manivelle pour cisailer définitivement le sol sur la surface cylindrique délimitée par les pales. La première façon permet de trouver des valeurs nettement plus proches de la réalité que la deuxième façon, puisqu'on passe de $c_{ur} = 4 \text{ kPa}$ à $c_{ur} = 22 \text{ kPa}$ pour le site de Mascouche, et de $c_{ur} = 3 \text{ kPa}$ à $c_{ur} = 17 \text{ kPa}$ pour le site de Saint-Jean Vianney.

Comme c'est d'abord par la deuxième méthode que nos essais avaient été réalisés, que les résultats donnés par le cône suédois sont de toute façon meilleurs, nous avons décidé de n'adopter que ces dernières valeurs; c'est donc les c_{ur} trouvés au cône qui apparaissent sur chaque ordonnée des graphiques 113 à 116.

L'examen de cette série de courbes nous fait tirer les remarques suivantes:

- La similitude des courbes à Saint-Hilaire 5,6 m et 11,4 m confirme encore une fois une certaine homogénéité du dépôt. Les fortes valeurs de résistance obtenues pour la profondeur de 11,4 m sont cependant étonnantes, en particulier pour un nombre élevé de cycles. L'explication sera fournie au paragraphe suivant, et permettra d'écarter cet essai au chapitre d'interprétation.

- Les deux courbes Saint-Thuribe 6 m et 12 m sont confondues. Par contre, la valeur de la résistance intacte à 12 m est plus faible qu'à 6 m, ce qui précise la remarque évoquée au paragraphe 5.4.2.

- La chute de résistance est assez violente pour le site de Saint-Alban au cours du premier cycle, comme on aurait pu d'ailleurs le relever pour la variation de la force, en raison probablement de sa faible préconsolidation.

- Comme pour les forces, toutes les courbes de résistance tendent très asymptotiquement vers une valeur semblable d'un essai à l'autre, soit environ 5 kPa (sauf Saint-Alban 2,5 kPa).

La résistance complètement remaniée tournant autour de 1 kPa, cette dernière constatation évoque encore la difficulté que l'on connaît à produire du remaniement absolu, bien que moindre pour l'essai de cisaillement simple.

Il est certain d'autre part que la similitude des observations entre la force et la résistance devrait permettre de trouver une relation entre ces deux grandeurs.

5.4.4 Résistance au cisaillement déterminée au cône en fin d'essai

Le degré final de remaniement et la répartition de la résistance à travers l'échantillon sont évalués en fin d'essai à l'aide du cône tombant.

L'échantillon est sorti de sa boîte et découpé en cinq tranches horizontales. Nous effectuons alors sur quatre niveaux différents, 16 essais au cône espacés régulièrement sur la surface de la tranche; 4 moyennes sont calculées selon une ligne perpendiculaire à la direction du cisaillement, et sont reportées dans un plan vertical qui donnera donc une coupe moyenne de la résistance au cisaillement finale à travers l'échantillon.

Les figures 117 à 126 illustrent les résultats obtenus.

Nous avons retranscrit sur ces dessins les éléments suivants:

- les lignes de découpage de l'échantillon en tranches horizontales;
- l'emplacement des plans de cisaillement majeurs observés en cours d'essai, ou les zones de plus fort remaniement s'y associant;
- le réel emplacement et la réelle valeur moyenne de la résistance calculée, pour toute la coupe verticale;
- les teneurs en eau moyennes correspondant à chaque zone de pénétration approximative du cône;
- l'emplacement des scissomètres réalisés (9 essais soit 3 en coupe) et la valeur scissométrique trouvée au dernier cycle;
- les lignes d'égale résistance, en kPa;
- les valeurs de la résistance intacte déterminée au cône avant essai, de la résistance remaniée moyenne, de la teneur en eau initiale du spécimen.

Dans l'ensemble, on peut se réjouir de la pertinence et de l'homogénéité de ces résultats; les commentaires qui suivent apportent des précisions:

Toutes les lignes d'égale résistance ont la même allure et délimitent deux zones plus ou moins intactes, dans la partie supérieure et surtout inférieure de la boîte.

Toute la partie centrale de l'échantillon est bien remaniée et homogène; c'est dans cette zone que les essais scissométriques ont été réalisés. Elle est séparée des zones plus intactes par des plans de cisaillement principaux; la résistance augmente probablement brutalement au passage de chacun de ces plans. Ainsi par exemple à Saint-Thuribe 6 m, la résistance saute de 2 kPa à 20 kPa, et de 4 ou 5 kPa à 20 kPa pour Mascouche ou Saint-Jean Vianney.

Ces plans de cisaillement deviennent en général de moins en moins visible avec le nombre de cycles, au profit d'une zone plus ou moins remaniée, ou plus ou moins fissurée, selon le type d'argile. Certains trous ou fissurations apparus dès le premier cycle peuvent évoluer ou changer de place en cours d'essai.

Nous pouvons parfois suivre la création d'une zone complètement remaniée (voire liquide dans certains cas) le long d'un plan principal de cisaillement, qui passe de quelques dixièmes de mm d'épaisseur à 4 ou 5 mm d'épaisseur en fin d'essai.

La différence parfois flagrante entre zones intactes et remaniées s'illustre bien sur la photo 16 c.

Remarquons d'autre part que les variations de teneur en eau dans l'échantillon ne sont pas violentes, par rapport à la teneur en eau initiale mesurée sur la galette lors du taillage de l'échantillon; elle aurait tendance à être un peu plus forte dans la partie supérieure, un peu plus faible dans la partie inférieure.

L'argile de Saint-Hilaire 11,4 m se comporta d'une manière un peu spéciale: l'échantillon se remania assez uniformément, en particulier à partir du 30^e cycle, mais la zone de remaniement la plus intense est décalée vers le

haut de l'échantillon, par rapport à ce qui a été généralement observé. Ainsi, contrairement aux autres essais, les mesures au scissomètre n'ont pas été effectuées dans la zone de remaniement maximum et les valeurs obtenues sont effectivement fortes et non représentatives (fig. 114 et 121). Il a donc été décidé d'écarter cet essai lors des interprétations.

Les argiles raides (Mascouche et Saint-Jean Vianney) sont sujettes à de nombreuses fracturations, fissurations, fendillages un peu partout; il se crée en plus de nombreux trous et différentes zones de remaniement, qui s'homogénéisent au fur et à mesure de l'essai. A ces perturbations s'ajoutent celles qui sont dues au retrait du scissomètre, en particulier pour Saint-Jean Vianney; nous avons dû en effet employer des pales de 1,28 cm × 2,5 cm, celles de 1 cm × 2 cm ayant été brisées lors de la mesure de la résistance intacte dans cette même argile.

Malgré tout, les mesures de résistance au scissomètre en cours d'essai ou au cône suédois en fin d'essai donnent des résultats très consistants et qui doivent être représentatifs de la résistance moyenne du sol dans la zone de cisaillement.

Signalons enfin que la boîte a subi des déformations et dommages irrémediables au cours de ce dernier essai du fait de la très forte résistance au cisaillement intacte de cette argile. (St Jean Vianney)

5.4.5 Energie cumulée

L'énergie produite à chaque cycle par l'appareil à cisaillement et dépensée dans le remaniement de l'argile, s'accumule de cycle en cycle pour produire un degré de remaniement de plus en plus fort. Cette énergie cumulée en fonction du nombre de cycles a été tracée pour chaque site aux figures 127 à 130.

L'énergie dépensée à la fin du 1^{er} cycle est donnée par le calcul de la surface située sous la courbe "1^{er} cycle" des figures 99 à 108. A la fin du 2^e cycle, l'énergie cumulée est la somme de cette première surface et de celle qui est délimitée par la courbe "2^e cycle"; ainsi de suite pour les autres cycles. A partir du 2^e cycle, chaque surface est en fait déterminée plus

simplement et plus exactement, en utilisant la force appliquée au demi-cycle, tracée sur les figures 109 à 112. On aura donc

$$\begin{aligned} \text{énergie (joules)} &= \text{force au demi-cycle (N)} \times \text{déplacement (m)} \\ \text{ou } W(J) &= F(N) \times 4 \times 0,04 \end{aligned}$$

Sur chacun des graphes, nous avons reporté le cumul de l'énergie due au frottement de 30 N, qui existe pour tous les cycles.

5.5 Conclusion

L'essai de cisaillement simple présente les améliorations suivantes par rapport aux essais précédents:

- La mesure de la force est continue et assez fiable, malgré une petite erreur due au frottement qui pourra être corrigée lors d'une recherche ultérieure.
- Le remaniement est assez homogène dans une zone importante de l'échantillon, où on peut mesurer c_u .
- Les variations de teneur en eau sont faibles.
- On peut disposer d'un large domaine d'énergie, grâce à une sollicitation qui peut se poursuivre longtemps avec le même échantillon; par contre, on n'arrive quand même pas à un remaniement total, tout au moins pour un niveau énergétique réaliste.
- La compilation des essais permet de classer les sites les uns par rapport aux autres, selon un critère qui transparait de plus en plus clairement, la "rapidité".

Le mode de remaniement se traduit toujours par la formation préliminaire de fracturation et fissuration, mais il semble que ce phénomène soit définitivement l'amorce de tout processus de remaniement. C'est encore le degré ou pourcentage de remaniement I_r qui va permettre d'apprécier cette évolution. La rapidité sera contrôlée par l'énergie normalisée W_N , comme déjà

suggéré au paragraphe 3.3. Les relations I_r vs W_N seront établies pour les quatre types d'essais. Ces relations contribueront à comparer les essais entre eux. On pourra ensuite chercher des corrélations entre énergie et caractéristiques des argiles étudiées. On fera alors le rapprochement avec l'énergie de remaniement réellement dépensée sur le terrain, en vue d'évaluer les risques de rétrogression, sous forme de critères.

6. INTERPRETATION - DISCUSSION

6.1 Simplification: choix du meilleur type d'essai

6.1.1 Normalisation

6.1.1.1 Degré de remaniement I_r

Il est défini par la formule

$$I_r = \frac{c_u - c_{ux}}{c_u - c_{ur}} \times 100$$

où

- c_u = résistance intacte (cône tombant);
- c_{ur} = résistance remaniée (cône tombant);
- c_{ux} = résistance intermédiaire (cône tombant, ou scissomètre de laboratoire dans le cas de l'essai de cisaillement simple).

Il définit le pourcentage de remaniement, entre l'intact et le complètement remanié; ~~il~~ vaut 0% pour l'intact, 100% pour le remanié.

6.1.1.2 Energie normalisée W_N

L'énergie doit être normalisée deux fois:

1) Nous avons vu que l'énergie produite par un essai ne se répartit pas uniformément dans l'échantillon. S'il est trop difficile de tenir compte de la distribution d'énergie, on peut au moins la rapporter au volume de l'échantillon, afin de pouvoir comparer les différents essais entre eux, et surtout pour comparer avec le phénomène naturel, le glissement ou la coulée. La proportion du volume intéressé par la distribution d'énergie varie selon le type d'essai et selon le niveau d'énergie adopté pour un essai donné; cette proportion est sans doute assez semblable d'une argile à l'autre; on n'en tient pas compte lors de la normalisation, qui est faite de la même façon pour chaque essai. Ce point sera important pour le choix du meilleur type d'essai (paragraphes 6.1.2 et 6.1.3).

2) Le remaniement de l'argile commence à se produire quand sa structure est brisée ou quand l'état limite est dépassé; on admettra donc l'utilité

de rapporter l'énergie de remaniement à la résistance initiale de la structure, essentiellement à la pression de préconsolidation. Nous savons depuis Tavenas et al. (1979) que l'énergie de déformation nécessaire pour dépasser l'état limite est de l'ordre de $0,013 \sigma'_p$. Il vient alors à l'esprit de référer l'énergie de remaniement à ce niveau d'énergie qui est le seuil du début de remaniement.

L'énergie normalisée s'écrit en définitive:

$$W_N = \frac{\text{énergie par unité de volume}}{0,013 \sigma'_p}$$

6.1.2 Relations I_r vs W_N

Les quatre types d'essai sont reportés sur un même graphe pour un site donné; tous les sites sont ainsi présentés de la figure 131 à la figure 139.

On peut remarquer d'ores et déjà que les différents procédés de remaniement se classent dans le même ordre d'un site à l'autre, à quelques fluctuations près, soit de gauche à droite du graphique (énergies croissantes), la chute libre, le pilonnage et le cisaillement simple, l'extrusion.

En effet, pour un degré de remaniement donné, les faibles valeurs de W_N dans l'essai de chute sont dues à une normalisation sous-estimée, puisque le volume réel de remaniement est de plus en plus faible avec la diminution de la hauteur de chute. Par contre, le volume concerné dans l'extrusion est sans doute beaucoup plus fort, à quelque niveau d'énergie que ce soit; de plus, les fortes forces de frottement contribuent à augmenter l'énergie; les courbes EXT sont donc surestimées, au moins par rapport aux courbes CHU: pour une même énergie W_N , l'extrusion remanie nettement moins que la chute libre et les courbes EXT sont décalées vers la droite du graphique.

Les essais de pilonnage (PIL) et de cisaillement simple (CIS) se classent entre les deux autres, et semblent assez consistants, tout au moins quant au volume concerné.

La deuxième observation importante se rapporte à la facilité avec laquelle les différentes argiles se remanient. Ainsi, par exemple, en comparant Saint-Léon 4,8 m et Saint-Thuribe 12 m, il est clair que la première doit subir une énergie beaucoup plus grande que la deuxième, pour atteindre le même pourcentage de remaniement; on constate aussi qu'au niveau maximum d'énergie atteint dans nos essais, soit $W_N = 250$, l'indice à Saint-Léon vaut 80% alors qu'il est de 90% pour Saint-Thuribe. Par contre, deux autres argiles aussi différentes que Saint-Thuribe et Outardes (Ladanyi et al. 1971) peuvent présenter une progression semblable du remaniement, comme le prouve la figure 140.

Ainsi donc, l'argile de Saint-Thuribe est plus facile à remanier que celle de Saint-Léon, puisque I_r croît beaucoup plus rapidement avec l'énergie impliquée; or Saint-Thuribe est un lieu de glissement rétrogressif important et Saint-Léon un lieu de petits glissements. Dès lors, une interprétation en terme de "rapidité" semble possible, de manière plus précise que ce qu'avait proposé Söderblom en 1974.

6.1.3 Comparaison des différents procédés de remaniement

6.1.3.1 Chute libre et pilonnage

Le volume de matériau remanié est moindre sur la photo 4 b (CHU) que sur la photo 9 a (PIL). Ce volume concerné par le remaniement est probablement plus grand pour le pilonnage, puisque le spécimen subit un impact par deux faces; pour un même niveau d'énergie, le degré de remaniement obtenu est sensiblement le même pour les deux essais, même si la répartition d'énergie est différente. Cependant, rien ne permet d'affirmer que le reste de la masse argileuse de l'échantillon, hors du triangle visible de remaniement dans l'essai CHU, est resté intact, ou que certaines parties n'ont pas dépassé l'état limite; d'ailleurs, on a constaté à plusieurs reprises dans tous nos essais, que des zones paraissant intactes ne l'étaient pas en réalité, d'après le cône suédois.

En définitive, si la distribution d'énergie est aléatoire et incontrôlable, on ajoutera au nombre des inconvénients, la nécessité d'utiliser un bon nombre d'échantillons différents pour avoir différents niveaux d'énergie; ces échantillons ne sont pas forcément identiques, d'autant plus s'ils sont gros. Par ailleurs, les gros échantillons rendent l'essai difficile à réaliser;

les petits et les gros limitent rapidement la possibilité de mesurer quoi que ce soit pour les grandes hauteurs de chute (échantillon trop mince pour y planter un cône). La marge d'énergie disponible est donc limitée; d'ailleurs, un certain " c_u intermédiaire" n'a pas pu vraiment être dépassé.

6.1.3.2 Extrusion

Cet essai demande lui aussi une série d'échantillons. C'est un essai long puisqu'il demande une bonne demi-journée de travail. Il présente enfin les inconvénients de faire varier la teneur en eau et de produire du frottement.

Les faibles énergies (bague $\leq 10\%$) ne peuvent donner des mesures précises à cause de l'existence d'un certain frottement. Les fortes énergies (bague $\geq 75\%$) occasionnent trop de frottement d'une part, et rendent la mesure au cône difficile car le goulot de la filière est devenu trop étroit. Les énergies sont par contre probablement mieux réparties dans toute la masse de l'échantillon que dans les cas précédents.

Cet essai manque donc de précision, aux points de mesures extrêmes, et entre les points de mesures; ceci explique la plus grande dispersion relevée sur les graphiques 131 à 139.

6.1.3.3 Cisaillement simple

Cet essai représente mieux à priori le phénomène naturel car il n'utilise qu'un seul spécimen dont on suit la destruction.

Les courbes 131 à 139 montrent d'autre part que les courbes CIS obtenues sont continues même pour les petites énergies, et que de grandes énergies peuvent être atteintes, contrairement aux autres essais imprécis pour les faibles énergies. Les courbes CIS ont en effet été tracées avec une bonne précision si l'on en juge par les graphiques donnant les résultats bruts proprement dits; elles sont rassemblées à la figure 141.

6.1.4 Limitations de l'essai CIS choisi

6.1.4.1 Frottement

Nous avons vu par contre que des frottements et gonflements de l'échantillon sur les parois de la boîte, différemment selon le type d'argile, pouvaient influencer les résultats; de petites pertes d'eau ont aussi été observées. Ces inconvénients seront éliminés dans l'avenir, par l'utilisation d'un appareil Géonor DSS, ^{comportant} constitué ^{muni d} d'une membrane étanche; la force de cisaillement (ou l'énergie impliquée) devra alors être directement reliée à l'indice de remaniement I_r .

En effet, la diminution de résistance en cours d'essai peut être ^{qui indique que les frottements sont variables d'un essai à l'autre, ou d'une argile à l'autre} mise en relation avec la force appliquée, la résistance intacte correspondant à la force maximum. Les principaux résultats sont rassemblés à la figure 142, Le faisceau de droites devrait être davantage resserré et la dispersion moins grande; ceci est dû en particulier à la façon de prendre les mesures, différentes d'un essai à l'autre. Ces imperfections seront donc imputées aux limitations de l'essai telles que celles dont nous venons de parler, et devraient disparaître en grande partie avec l'utilisation du DSS Géonor.

La discussion sera alors basée sur une relation force vs énergie plutôt que I_r vs W_N ; le pourcentage de remaniement pourrait alors être remplacé par le rapport de remaniement

$$R_r = \frac{F_{\max} - F_N}{F_{\max} - F_{\min}}$$

où

- $F_{\max}$ = force maximum appliquée, au 2^e degré d'inclinaison de la boîte environ;
- F_N = force appliquée au n^e cycle;
- $F_{\min}$ = force minimum définie par l'assymtote de la courbe en fin d'essai.

6.1.4.2 Distribution de l'énergie

Dans cet essai là aussi, l'énergie ne se dissipe sans doute pas uniformément à travers tout l'échantillon; on a cependant observé que le volume remanié reste beaucoup plus constant que dans les autres essais.

D'autre part, on sait qu'une part de l'énergie est dépensée dans la création de plans de cisaillement ou fracturations diverses, et que ceux-ci disparaissent progressivement en cours d'essai; mais on a tout lieu de croire en fait que ces manifestations sont aussi celles qui existent réellement sur le terrain.

6.1.4.3 Liquéfaction

L'essai n'a pas pu produire en laboratoire une liquéfaction de masse, comme c'est arrivé sur le terrain, à Saint-Thuribe, Saint-Jean Vianney ou Rissa par exemple. Pourtant, nous avons pu suivre à travers le plexiglass, pour un échantillon de Saint-Thuribe 12 m en particulier, la formation de minces couches fluides pouvant atteindre 5 mm d'épaisseur après quelques dizaines de cycles; ces couches finissent par se rejoindre et former une zone très molle; en comptant le temps d'essai et le temps de démontage (le sol se resolidifie par thixotropie) et sachant que ces couches fluides ou ces zones molles n'ont pratiquement pas de possibilité d'écoulement, on a obtenu ce que montre la photo 16 c. Notons que la chute d'une galette de la même argile d'une hauteur de 10 m provoque aussi des traces de liquéfaction complète comme le prouve la photo 5 b.

En laboratoire, ces pellicules fluides ne peuvent pas bien sûr être mesurées. Pourtant, en terme de pourcentage de remaniement, des valeurs telles que 99%, 97%, 95% ont été atteintes à Saint-Jean Vianney, Mascouche, Saint-Thuribe et Saint-Léon, respectivement (fig. 141).

Les observations visuelles des essais tendent à prouver que la liquéfaction se produit par un processus de frottement de deux parties argileuses l'une sur l'autre, le long d'un plan de cisaillement; comme la pellicule d'argile liquéfiée produite ne peut pas s'écouler au fur et à mesure de l'essai, contrairement au phénomène naturel, le frottement de ces deux parties initialement distinctes en contact l'une de l'autre se transforme plutôt en remaniement d'une tranche de sol de part et d'autre du plan initial de cisaillement, créant une zone de matériau de plus en plus molle et de plus en plus épaisse.

Lors d'une coulée argileuse, on doit noter que d'énormes tranches de sol peuvent partir à la dérive, comme par exemple dans les glissements du type "flake type"; les masses de matériau impliquées, les distances parcourues

peuvent être énormes et on imagine quels doivent être l'amplitude des forces de frottement, la quantité et le volume d'argile liquéfiée produite au fur et à mesure, et parfois la rapidité avec laquelle elle s'écoule. En outre, nous devons savoir que beaucoup de blocs de matériau plus ou moins intact restent assez longtemps dans la masse liquide avant de disparaître petit à petit par abrasion.

Le cas du glissement de Rissa (Norvège) semble un peu particulier: Janbu (1979) constate qu'un élément de sol situé dans la partie inférieure d'une tranche de sol en train de partir en glissement, présente un nombre de stabilité $N_c = \frac{\gamma H}{c_u} = 20$. Or un facteur $N_c \geq 4$ est déjà une raison suffisante d'instabilité. De plus, cette valeur de $N_c = 20$ correspond à une énergie normalisée $W_N \approx 200$ quatre fois plus grande environ que celle qui est développée dans un glissement usuel, et occasionnant un pourcentage de remaniement de 95% environ. On pourra donc ne pas s'étonner de l'ampleur et de la gravité du glissement de Rissa.

Nous reviendrons sur le calcul de l'énergie normalisée au paragraphe 6.2.1. On comprend en tout cas que le pourcentage de remaniement ait été très élevé (fig. 141), et donc que la liquéfaction sur le terrain fut excessivement forte et rapide (voir paragraphe 6.2.3).

6.2 Interprétation

6.2.1 Energie de remaniement *in situ*

$$\frac{RW \text{ m}^3 \cdot \text{m}}{\text{m}^3}$$

L'énergie potentielle dépensée dans le remaniement d'une argile lors d'un glissement de terrain s'écrit sous la forme $W_p = \frac{\gamma V H}{2}$ où V est le volume du matériau impliqué et H la hauteur d'un talus incliné.

La hauteur critique H_c peut être reliée à la résistance au cisaillement c_u à l'aide du nombre de stabilité N_c de Janbu, par la relation $H_f = N_c \frac{c_u}{\gamma}$.

$N_c = 3,8$ pour un talus vertical et $N_c = 9$ pour un talus quasiment horizontal.

Pour les argiles de l'est du Canada, on a d'autre part $c_u \approx 0,25 \sigma'_p$. L'énergie potentielle normalisée W_{Np} peut alors se calculer comme suit, à la hauteur critique:

$$W_{Np} = \frac{\text{énergie/volume}}{0,013 \sigma'_p} = \frac{\gamma V}{2} N_c \frac{0,25 \sigma'_p}{\gamma} \frac{1}{V} \frac{1}{0,013 \sigma'_p} = 9,6 N_c$$

Donc $W_{Np} \approx 10 N_c$, pour des valeurs moyennes de N_c comprises entre 4 et 8. La plage des valeurs de W_N ^{étudiées} investiguées dans l'essai CIS (abscisse de la figure 141) couvre bien les valeurs d'énergie potentielle normalisée existante dans la réalité.

Pour un talus vertical, l'énergie potentielle est $W_p = \frac{\gamma V^2 H}{3}$ et devient une fois normalisée à la rupture

$$W_{Np} = \frac{\gamma}{0,013 \sigma'_p} \frac{2}{3} \frac{4}{\gamma} c_u = \frac{2 \gamma}{0,013 \sigma'_p} \times \frac{4}{4 \gamma} \frac{\sigma'_p}{\gamma} \approx 50$$

Cette valeur est théoriquement la valeur maximum que l'on puisse atteindre.

L'énergie potentielle dissipée au cours d'une rupture initiale de la pente, gouverne le début de la rétrogression, en remaniant les premiers débris. On peut évaluer cette énergie en connaissant les caractéristiques de l'argile en question; elle peut s'écrire en effet sous la forme normalisée suivante:

$$W_{Np} \approx 10 N_c = 10 \cdot \frac{\gamma H_f}{c_u} = 10 \frac{4 \gamma H_f}{\sigma'_p} = 40 \frac{\gamma H_f}{\sigma'_p}$$

Notons tout de même que W_{Np} peut être fonction de la profondeur à laquelle σ'_p est choisi.

6.2.2 Application aux sites étudiés

Des coulées ou glissements se sont produits au voisinage immédiat de quatre sites parmi les sept choisis pour cette étude.

A Mascouche, un glissement se produisit peu de temps après l'échantillonnage; le talus avait une hauteur de 8,5 m, un poids volumique $\gamma = 16,4 \text{ kN/m}^3$ et une pression de préconsolidation $\sigma'_p = 400 \text{ kPa}$. En remplaçant dans la formule ci-dessus, on trouve $W_{Np} = 14$.

Saint-Léon est un lieu de petits glissements les uns à côté des autres, en particulier près du site échantillonné. L'argile est caractérisée par $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$, $\sigma'_p = 180 \text{ kPa}$ et la hauteur de pente est 17 m. On en déduit $W_{Np} \approx 57$.

L'ancienne grande coulée de Saint-Thuribe de 1896 qui s'était développée à partir d'un talus de 10 m de hauteur, est constituée d'un matériau à poids volumique $\gamma = 17,3 \text{ kN/m}^3$ et $\sigma'_p = 190 \text{ kPa}$. L'énergie normalisée vaut donc $W_{Np} = 36$.

A Saint-Jean Vianney, la rupture initiale se produisit dans une pente de 30 m. Sachant que $\gamma = 17,7 \text{ kN/m}^3$ et $\sigma'_p = 1000 \text{ kPa}$, l'énergie est de l'ordre de 28.

Le domaine de valeurs pratiques d'énergie potentielle normalisée produite lors d'une première rupture est compris entre 10 et 70, avec une moyenne de 40.

6.2.3 Analyse de la relation I_r vs W_N (essai CIS, figure 141)

Pour atteindre un degré de remaniement I_r de 80%, la figure 141 révèle clairement que l'argile de Saint-Léon utilise cinq fois plus d'énergie W_N que l'argile de Saint-Thuribe, puisque l'énergie nécessaire pour atteindre ce pourcentage vaut 50 à Saint-Thuribe et 250 à Saint-Léon. Sachant que Saint-Thuribe est un lieu de grandes coulées et Saint-Léon un lieu de petits glissements, ce résultat laisse entrevoir l'importance de la vitesse du processus de remaniement.

Chaque site peut ainsi s'interpréter en termes de fragilité ou de rapidité; la valeur réelle de l'énergie W_{Np} sur le terrain sert de référence pour comparer la facilité à se remanier des différentes argiles.

L'argile de Saint-Jean Vianney, sujette à grandes coulées, est la plus fragile; l'énergie $W_{Np} = 28$ correspond à un indice de remaniement de 93%; compte tenu de la faible résistance remaniée c_{ur} , on imagine que ce pourcentage (qui pourrait être plus élevé encore si on pense aux limitations de l'essai, paragraphe 6.1.4.3) est largement suffisant pour amener l'argile à un état quasiment fluide, expliquant donc la rétrogression des coulées argileuses.

A Saint-Thuribe, une énergie normalisée de 36 est suffisante pour produire un remaniement de 71%; si on tient compte là aussi des limitations de l'essai et surtout de la résistance remaniée excessivement faible ($c_{ur} < 0,07$ kPa), il est concevable que ce pourcentage explique la liquéfaction des débris et leurs écoulements hors du cratère de glissement, que l'on peut observer en réalité dans la région quand une coulée se produit.

A Saint-Alban, une hauteur de talus de 10 m produirait une énergie $W_{Np} = 74$, soit un indice $I_r = 65\%$ (ou $I_r = 71\%$ en lissant la courbe). En invoquant toujours les mêmes raisons et sachant que $c_{ur} = 0,2$ kPa, les coulées historiques se trouvent aussi expliquées.

A Mascouche et Saint-Léon, on peut parler d'une "rapidité" assez faible ou intermédiaire, puisque les énergies respectives de 14 et 57 correspondent à des indices respectifs de 34% et 55% (moyenne de Saint-Léon 4,8 m et 9,3 m); comme c_{ur} vaut 1 ou 2 kPa, on comprend qu'une quantité significative de débris puisse rester au pied de la pente, dans une petite vallée étroite; en effet, aucune rétrogression majeure n'a été observée sur les lieux.

Les autres argiles étudiées, soit celles de Louiseville et Saint-Hilaire, apparaissent plutôt difficiles à remanier, même si on ne peut préciser les valeurs, en raison du manque de données. Aucun glissement d'importance n'a d'ailleurs été relevé dans ces régions.

Cette analyse tend à prouver que la relation entre énergie et degré de remaniement présentée à la figure 141, est un bon moyen pour caractériser la facilité de l'argile à se remanier ou à se liquéfier après une première rupture, sous forme d'un glissement rétrogressif.

Néanmoins, d'autres cas historiques devront être analysés avant de

proposer une méthode définitive d'analyse du risque de rétrogression dans une région donnée.

6.2.4 Corrélations degré de remaniement vs caractéristiques des argiles

6.2.4.1 Généralités

L'analyse précédente met l'accent sur l'importance du facteur "vitesse de remaniement" dans le développement d'une coulée, mais ne dit pas comment ce facteur est contrôlé ou par quelle caractéristique on peut pratiquement le quantifier. Nous devons pour ce faire, relier le degré de remaniement, base de l'interprétation, aux caractéristiques des argiles étudiées. Cette relation pourra ensuite être étalonnée d'après le degré d'importance connu des cas historiques pour tenter d'établir un nouveau critère de régression.

L'indice I_r le plus significatif est celui qui correspond à l'énergie normalisée disponible en réalité, c'est-à-dire à la valeur moyenne $W_N = 40$. Cependant, au cas où la relation cherchée ne devait pas être explicite, on a voulu faire ressortir une tendance, en traçant des courbes pour différents niveaux énergétiques, soit pour $W_N = 20, 40, 80, 250$.

Les caractéristiques argileuses utilisées furent: la sensibilité S_t , l'indice de liquidité I_L , l'indice de plasticité I_p ou la limite liquide w_L (ces deux grandeurs sont reliées par l'équation $I_p = 0,85 w_L - 16,15$ déterminée au cône dans les argiles Champlain), l'activité Act , la teneur en eau w , la teneur en sel et le pourcentage de cations monovalents.

Les courbes sont présentées aux figures 143 à 146, et suggèrent les remarques suivantes:

- Il existe une corrélation certaine entre le pourcentage de remaniement I_r et les caractéristiques S_t , I_p ou w_L , Act , et w ; par contre, I_r est complètement indépendant de I_L , de la teneur en sel et du pourcentage de cations monovalents.

- La corrélation est beaucoup plus marquée pour les faibles énergies normalisées, en particulier pour la valeur intéressante $W_N = 40$; la

dispersion des points de mesure est grande pour $W_N = 80$ et $W_N = 250$.

- La corrélation n'est plus évidente pour les valeurs extrêmes des caractéristiques argileuses, c'est-à-dire pour les sensibilités extrêmement élevées ($S_t > 200$), les indices I_p ou les limites w_L très faibles ($I_p < 15$ ou $w_L < 37$), et pour les faibles activités.

- La corrélation est très bonne pour I_p ou w_L , moyenne pour S_t et w , et relativement passable pour l'activité.

- L'inexistence de relation entre l'indice de remaniement et l'indice de liquidité tend à prouver que ce n'est pas l'état complètement remanié mais plutôt le passage de l'état intact à cet état remanié qui est important; en effet, l'indice de liquidité ne représente que la résistance complètement remaniée, qui n'a en fait jamais été mesurée dans un essai CIS, ce qui explique l'indépendance trouvée entre I_r et I_L .

Toutes ces relations ont aussi été recherchées dans le cas des essais de chute libre, pilonnage et extrusion. Nous avons pu constater qu'elles accusent la même orientation que pour l'essai de cisaillement simple, mais simplement sous forme de tendance. Elles permettent en tout cas de se féliciter du bon choix de l'essai CIS pour l'interprétation, ou de croire à la véracité des relations établies pour cet essai CIS, puisqu'elle se confirme pour des essais moins performants.

6.2.4.2 Corrélation I_r vs activité

L'activité reflète la minéralogie des particules inférieures à 2μ . La figure 145 établit plutôt une tendance qu'une relation, étant donné la dispersion. Elle montre cependant qu'une structure à particules fines faiblement argileuse (faible activité) est plus fragile qu'une structure plus argileuse. A titre de confirmation, nous savons en effet que du quartz ou de la farine de roche cimentée présente une activité quasiment nulle, tandis que la plasticine ou la bentonite présente une activité énorme.

La dispersion laisse supposer que le phénomène est aussi gouverné par la granulométrie (paragraphe 6.2.4.5).

6.2.4.3 Corrélation I_r vs teneur en eau

La teneur en eau n'est pas une caractéristique intrinsèque de la structure argileuse; c'est plutôt un paramètre très changeant et toute corrélation doit donc être regardée avec scepticisme.

On peut quand même noter que d'une manière générale, les sols moins humides sont plus fragiles, ce qui correspond à la tendance donnée par la figure 145.

6.2.4.4 Corrélation I_r vs sensibilité

On sait depuis longtemps que les sols très sensibles ont tendance à se remanier plus facilement que les sols peu sensibles, comme le confirme la figure 143. On sait maintenant que la raison est loin d'être suffisante, et qu'il faut en tout cas depuis Söderblom, distinguer "sensibilité" et "rapidité", c'est-à-dire S_t et I_r .

6.2.4.5 Corrélation I_r vs I_p ou w_L

La limite liquide est une caractéristique plus intéressante que l'indice de plasticité car elle ne nécessite qu'une seule mesure au lieu de deux, et elle est facile à déterminer en faisant un essai au cône tombant dans l'argile remaniée.

La limite liquide fait intervenir simultanément les notions de plasticité et de granulométrie du matériau: plus elle est faible, plus le matériau est plus silteux et moins plastique.

La corrélation établie au niveau énergétique significatif ($w_N = 40$) est extraite de la figure 144, et reproduite à la figure 147. Elle montre deux groupes de valeurs, de part et d'autre de $w_L = 45$. Les points inférieurs à 45 proviennent de sites sujets à coulées (Saint-Thuribe, Saint-Jean Vianney, Saint-Alban) et sont assez dispersés. Les points supérieurs à 45 correspondent à des sites sujets à petits glissements (Mascouche, Saint-Léon, Louiseville, Saint-Hilaire) et sont bien alignés.

La corrélation est indéniable et la conclusion suivante s'impose: la rapidité avec laquelle le sol se remanie est d'autant plus grande que le sol est plus silteux et moins plastique. Or, nous savons maintenant que la rapidité de remaniement est essentielle pour le développement d'une coulée (fig. 141), et c'est donc w_L qui apparaît comme le facteur clé contrôlant cette rapidité (fig. 147). Un nouveau critère de régression va pouvoir être formulé.

Les raisons de cette corrélation I_r et w_L n'ont pas encore été ^{étudiées} investiguées en détail. Il semble reconnu cependant qu'un matériau à grains fins avec une limite liquide inférieure à 40%, contient très peu de minéraux argileux, de telle sorte que les liens inter-particulaires sont fragiles et que la structure peut être aisément détruite.

6.3 Risques de rétrogression

6.3.1 Etudes antérieures

Trois études sur la rétrogression des glissements de terrain ont été publiées ces dernières années.

Mitchell et Markell (1974) ont compilé de nombreuses observations et repris 41 cas historiques. Ils affirment que la rétrogression s'effectue par tranches et que le nombre de stabilité $N_c = \gamma H / c_u$ est un paramètre essentiel, comme l'indique la figure 148. Ils proposent alors une méthode de prédiction des coulées argileuses qui est présentée à la figure 149: la distance de rétrogression relative à la hauteur de la pente est exprimée en fonction du nombre de stabilité et de l'indice de liquidité de l'argile.

Carson (1977) pense que le mécanisme de rétrogression s'effectue par étalement et développe une relation entre le nombre de stabilité, la géométrie des lieux, le nombre de stabilité et la sensibilité. A toutes fins pratiques, cette méthode aboutit au même genre de résultats qui apparaissent aussi à la figure 149.

Lebuis et Rissman (1979) ont cherché à établir des corrélations statistiques entre les propriétés physiques et mécaniques des argiles Champlain,

pour différents degrés de rétrogression. Cette étude a montré que les grandes coulées se produisent dans les matériaux dont la résistance remaniée est inférieure à 1 kPa (ou $I_L > 1,2$); cette condition est nécessaire mais non suffisante, puisqu'il existe des sites où la condition est remplie mais où aucune rétrogression ne se produit.

Une condition additionnelle doit donc être ajoutée; or, nous venons de prouver que le phénomène est aussi contrôlé par la limite liquide: la figure 150 montre que les très grandes rétrogressions semblent possibles lorsque $w_L < 40\%$.

6.3.2 Critères de rétrogression

6.3.2.1 Généralités

Les trois études précédentes associent le risque de rétrogression avec le nombre de stabilité de la pente initiale et les propriétés de l'argile remaniée (S_t , I_L ou c_{ur}). Par contre, elles ne tiennent pas compte de la rapidité de l'argile, dont l'importance est suggérée par Söderblom en 1974, et mise en évidence par cette étude.

Comme il a été annoncé au début de ce rapport (paragraphe 1.1), une rétrogression ne se réalise que si le talus est toujours trop raide pour être stable en fond de glissement d'une part, et si les débris peuvent rapidement se remanier et s'écouler hors du cratère de glissement d'autre part. Ces deux conditions peuvent se formuler sous forme de deux critères pour chacune de ces conditions.

6.3.2.2 Rupture initiale de la pente

Discuter la stabilité des pentes naturelles n'est pas le sujet de ce travail; néanmoins, un mouvement rétrogressif est d'abord amorcé par une première rupture, qui doit donc être détectée, en l'absence d'une étude approfondie de la stabilité.

Une estimation conservatrice du risque de rupture a été récemment démontrée par Collins (1982) et s'écrit sous la forme suivante:

$$\frac{\gamma H}{c_u} \geq \frac{N_c}{OCR} \quad [1]$$

où

- γ = poids spécifique de l'argile;
- H = hauteur du talus;
- c_u = résistance au cisaillement scissométrique;
- N_c = nombre de stabilité de Janbu (1954);
- OCR = rapport de surconsolidation.

Ce critère de stabilité est défini à partir de l'analyse de nombreux cas historiques de rupture de pentes dans les argiles de la mer Champlain; elle a montré en particulier que le facteur de sécurité, déterminé empiriquement à partir du c_u à la rupture par une analyse en contraintes totales, augmente avec l'OCR jusqu'à une limite supérieure observée, $F = OCR$.

6.3.2.3 Ruptures successives

Elles se produisent aussi dans des conditions non drainées et on admet encore qu'elles soient contrôlées par le nombre de stabilité de Janbu (1954). Le critère de rétrogression s'exprime par la relation

$$\frac{\gamma H}{c_u} \geq N_c \approx 4 \quad [2]$$

où H est la hauteur de l'escarpement provisoire et où N_c vaut à peu près 4, lorsque la pente est proche de la verticale.

Les critères [1] et [2] ne font pas appel à l'amplitude du rapport $\frac{\gamma H}{c_u}$, mais situent la limite en dessous de laquelle rupture et rétrogression sont impossibles.

6.3.2.4 Ecoulement des débris

L'évacuation des débris hors du cratère de glissement a lieu si leur résistance complètement remaniée est très faible. Rissman et Lebuïs (1979) suggèrent le critère

$$c_{ur} < 1 \text{ kPa} \quad \text{ou} \quad I_L > 1,2 \quad [3]$$

Les critères [1] , [2] et [3] figurent dans la méthode proposée par Mitchell et Markell (1974) et Carson (1977).

6.3.2.5 Processus de remaniement

Le quatrième critère constitue l'aboutissement de la présente étude; sa formulation est basée sur la manière dont l'état remanié est atteint, sur le pourcentage minimum de remaniement nécessaire pour que l'argile étudiée ait une chance de pouvoir être évacuée, au lieu de rester empilée au pied de la pente.

Il est question en particulier de l'énergie potentielle disponible W_{Np} pour obtenir un certain pourcentage de remaniement I_r ; si cet indice est atteint suffisamment rapidement, il existe une résistance intermédiaire c_{ux} correspondante à I_r , suffisamment faible pour que la régression se produise. Le seuil de résistance intermédiaire, ou résistance intermédiaire critique c_{uc} , est fonction du type d'argile, et doit faire l'objet de recherches futures. En l'absence de telles valeurs, une limite empirique peut être donnée en décidant de ce qu'est une grande rétrogression et une petite, comme le propose la figure 150. En utilisant alors la figure 147, on obtient le critère suivant:

$$w_L < 40\% \quad \text{ou} \quad I_r > 70\% \quad [4]$$

Si on prétend que les points SAL (6,6 m) et THU (6 m) font partie de la classe "grande rétrogression", on aurait plutôt:

$$w_L < 45\% \quad \text{ou} \quad I_r > 65\% \quad [4]$$

Ce critère devrait donc pouvoir être affiné à l'avenir et s'écrire sous la forme:

$$W_{Np} + (I_r \text{ vs } W_N) \longrightarrow c_{ux} < c_{uc} \quad [4']$$

où W_{Np} = énergie potentielle normalisée disponible sur le terrain;
 $(I_r \text{ vs } W_N)$ = relation pourcentage de remaniement - énergie normalisée établie en laboratoire par un essai de cisaillement simple, pour le site étudié (fig. 141). Cette relation sera remplacée par la relation $(R_r \text{ vs } W_N)$ lors de l'utilisation de l'appareil DSS (paragraphe 6.1.4.1);

c_{ux} = résistance intermédiaire obtenue, définie par l'équation

$$I_r = \frac{c_u \text{ intact} - c_{ux}}{c_u \text{ intact} - c_{ur}}$$

c_{uc} = résistance intermédiaire critique, différente pour chaque argile, en dessous de laquelle le phénomène de rétrogression risque de se produire.

Le facteur clé c_{uc} est donc remplacé pour l'instant par une caractéristique clé de l'argile, la limite liquide w_L , définie grosso modo par l'équation $I_r + 1,14 w_L = 117$ (fig. 147). Il se peut que c_{uc} soit supérieur à c_{ur} ; dans ce cas, la condition $c_{ur} < 1 \text{ kPa}$ serait suffisante mais non nécessaire; cette remarque vient compléter le paragraphe 6.3.1 et montre que le critère [3] doit aussi être utilisé comme tendance, en attendant le critère plus performant [4].

Rappelons que la valeur de la résistance intermédiaire c_{ux} résulte donc, par l'intermédiaire de l'indice I_r , de la consommation de l'énergie potentielle produite par la rupture de la tranche dont on cherche à savoir si les débris vont être suffisamment remaniés pour être évacués; une fois normalisée, cette énergie vaut $W_{Np} = 10 \frac{YH}{c_u} = 10 N_c$; donc, plus la pente est haute, plus N_c est fort, et plus I_r est élevé où c_{ux} est faible; ceci confirme aussi que la rétrogression s'arrêtera quand la hauteur de l'escarpement laissé en place lors du départ de la dernière tranche, sera suffisamment faible pour que $c_{ux} > c_{uc}$.

Remarquons enfin que le critère fonctionne si l'énergie potentielle calculée se trouve bien dans la marge usuelle définie au paragraphe 6.2.2, c'est-à-dire $W_{Np} < 70$. Si l'énergie impliquée est énorme (exemple de Rissa où W_{Np} serait égal à 200), le pourcentage de remaniement atteindra des valeurs pour lesquelles la corrélation I_r vs w_L ne sera plus fiable (et w_L pourra être supérieur à 40%).

La résistance intermédiaire critique c_{uc} est vraisemblablement liée entre autres choses, au temps d'essai ou au taux de dissipation de l'énergie en cours d'essai; aussi la recherche en laboratoire devra-t-elle s'orienter vers la réalisation d'essais très rapides, pour se rapprocher des conditions *in situ*. Par ailleurs, une compilation des relations $(c_{uc} - c_{ux})$ vs distance de rétrogression observée, ou c_{ux} est déterminé par une courbe du genre de celles

de la figure 141, permettra d'approcher la valeur réelle de c_{uc} pour chaque type d'argile.

Ainsi donc, le pourcentage de remaniement obtenu par dissipation de l'énergie potentielle réellement disponible sur le terrain, devrait devenir dans l'avenir une caractéristique intrinsèque d'une argile donnée, et faire l'objet d'une quantification systématique lors d'une étude de stabilité.

6.3.3 Autres facteurs de rétrogression

Il n'en reste pas moins certain que les conditions géomorphologiques, topographiques et hydrographiques restent prépondérantes dans le développement d'un glissement de terrain ou d'une coulée argileuse. Ainsi par exemple, l'écoulement des débris et les grandes rétrogressions ont plus de chances de se produire dans un lac ou dans une vallée à fort gradient où le cours d'eau débite beaucoup, que dans une étroite vallée peu inclinée.

Les aspects topographiques et stratigraphiques ont déjà été discutés par Lebuïs et Rissman (1979).

6.4 Avenir des essais d'énergie

Le passage à l'énergie de remaniement s'avère un bon moyen pour étudier le processus de remaniement dans un glissement ou une coulée d'argile. Il est donc important de poursuivre la réalisation d'essais d'énergie.

L'amélioration de l'essai de cisaillement simple, par l'adoption d'un appareil DSS Géonor, a été démontrée au paragraphe 6.1.4.1.

Le procédé de liquéfaction par frottement de deux parties argileuses qui se consomment petit à petit (paragraphe 6.1.4.3) pourrait être examiné par un essai d'abrasion, où la force de frottement, le déplacement, la vitesse de déplacement, la quantité de matériau consommé, liquéfié ou remanié, seraient parfaitement quantifiés.

Un essai à sollicitation brutale, autre que la chute libre ou le pilonnage, pourrait être suggéré: l'essai de la colonne de sol. Une galette

d'argile ϕ 20 cm est reconsolidée à sa contrainte *in situ*, par d'autres galettes et poids empilés dans un tube; l'excès de la contrainte en place est contrôlé en maintenant les poids, qu'on finit par lâcher; on peut laisser l'échantillon se déformer librement, ou on dirige sa déformation, ou on le confine (essai oedométrique).

On pourra entreprendre par ailleurs une recherche d'essai visant à quantifier l'influence d'une sollicitation locale sur le reste de l'échantillon, de la même façon qu'on étudie les conséquences de la construction d'un remblai sur les déformations sous-jacentes. Il s'agira en particulier de tester les parties qui semblent être restées intactes à l'oeil nu, mais qui en fait sont peut-être proches ou ont dépassé l'état limite. Pour ce faire, une méthodologie plus précise concernant les mesures au cône pourrait être développée.

7. CONCLUSIONS GENERALES

Cette étude visait à simuler en laboratoire les mécanismes courants de remaniement en cours de glissement, le cisaillement, l'impact ou l'extrusion, afin d'appréhender davantage les processus de développement des grands glissements rétrogressifs et des coulées d'argile. Il est évident tout d'abord que la compilation de cas historiques, et d'autres essais sur d'autres sites, devra se poursuivre.

Le procédé a permis en particulier de suivre et quantifier la dépense d'énergie et la production du remaniement résultant. Cette étude de l'énergie de remaniement s'avère un bon moyen pour approcher le phénomène, si l'on pense constamment à corrélérer les résultats expérimentaux avec le développement réel d'un glissement ou d'une coulée.

Cependant, on n'est pas encore en mesure de pouvoir décrire avec précision le développement éventuel dans une région donnée d'un glissement, d'une rétrogression, d'une coulée argileuse, ou de prédire d'une manière fiable l'occurrence de tels événements, étant donné le nombre de facteurs qui entrent en jeu.

La description la plus admise consiste à dire qu'une rétrogression s'effectue par "tranches" successives, en laissant parfois sur place des arêtes d'argile intacte, jusqu'à ce que la pente arrière mise à découvert par le départ de la dernière tranche soit suffisamment stable. Certaines tranches peuvent être énormes, on parle alors de "flake type" (Gegersen 1981).

La présente étude suggère que chaque tranche, ou chaque bloc d'argile résultant de l'importante fracturation au sein même de chaque tranche (causée par les surpressions interstitielles par exemple), se consume par abrasion sur le fond de cratère, ou par abrasion des blocs les uns contre les autres; des recherches pour quantifier ce processus doivent être poursuivies.

D'autre part, la prédiction des coulées argileuses a été améliorée par la mise en évidence de l'importance que l'on doit accorder à un nouveau facteur déterminant, la "rapidité" de l'argile, dont Söderblom avait signalé la

signification en 1974, et dont une quantification vient d'être fournie par le résultat de cette recherche.

Un nouveau critère de rétrogression a été établi en faisant intervenir simultanément l'indice de liquidité et la limite liquide: le premier facteur caractérise l'état complètement remanié, le deuxième caractérise le processus de passage de l'état intact à l'état remanié, en particulier par la "rapidité" de l'argile. Le critère se résume en disant qu'il existe un risque de grande rétrogression quand $I_L > 1,2$ et $w_L < 40\%$ ou I_r (pourcentage de remaniement) $> 70\%$.

Cette étude a permis de plus de jeter les bases d'une recherche ultérieure, qui permettra d'énoncer un critère plus performant: une "résistance intermédiaire" déterminée pour un type d'argile donnée, par un essai de cisaillement simple par exemple, fixera le seuil à partir duquel le matériau est suffisamment remanié pour être évacué; le risque de rétrogression sera alors défini avec précision, si celui de l'instabilité de la première pente est connu, et si les conditions géographiques des lieux sont prises en compte.

BIBLIOGRAPHIE

- Carson, M.A., 1977. On the retrogression of landslides in sensitive muddy sediments. *Can. Geotech. J.*, Vol. 14(4), pp. 582-602.
- Collins, G., 1982. Analyse en contraintes totales et effectives de la stabilité des pentes dans les argiles de la mer Champlain. Thèse de maîtrise, Département de Génie civil, Université Laval, Québec, Canada.
- Dawson, G.M. 1899. Remarkable landslip in Portneuf County, Québec. *Geological Survey of America*, Vol. 10, pp. 483-490.
- Desrosiers, J.P., 1978. L'énergie de déformation comme critère d'état limite. Thèse de maîtrise, Département de Génie civil, Université Laval, Québec, Canada.
- Dion, D.J., 1978. Revue géotechnique de la région Terrebonne-L'Assomption. Ministère des Richesses Naturelles, DPV 552.
- Gadd, N.R., 1973. Geological Survey of Canada, Department of Energy, Mines and Resources, memoir 359.
- Garneau, R., Lebihan, J.P., 1977. Estimation of some properties of Champlain clays with the Swedish fall cone. *Can. Geotech. J.*, Vol. 14(4), pp. 571-581.
- Goodman, L.J., Leininger, R., 1967. Identification of partial disturbance states for cohesive soil. *Proc. 3rd, Pan. Am. Conf. S.M.F.E.*, Vol. 1, pp. 411-428.
- Gregersen, O., 1981. The quick clay landslide in Rissa, Norway. *Proc. 10th ICSMFE, Stockholm*, Vol. III, pp. 421-426.
- Grondin, G., 1978. Etude de la susceptibilité aux coulées d'argile. Thèse de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- Hansbo, S., 1957. A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall cone test. *Royal Swedish Geot. Inst., Proc. No. 14*.
- Janbu, N., 1954. Stability analysis of slopes with dimensionless parameters. *Harvard Soil Mechanics Series*, No. 46, 81 p.
- Janbu, N., 1979. Failure mechanism in quick clays. *Proc. Nordic Geotechnical Meeting, Helsinki*, pp. 1-10.
- Kallstenius, T., 1963. Studies on clay samples taken with standard piston samplers, SGI, *Proc. No. 21*, p. 184.
- Ladanyi, G., Morin, J.P., Pelchat, C., 1971. Post peak behaviour of sensitive clays in undrained shear. *Can. Geotech. J.*, Vol. 5(2).
- Lafleur, J., 1970. Influence of mechanical disturbance on consolidation characteristics of clays. Thèse de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada.
- La Rochelle, P., 1973. Rapport de synthèse des études de la coulée d'argile de Saint-Jean Vianney pour le gouvernement du Québec. Ministère des Richesses Naturelles.

- La Rochelle, P., Sarrailh, J., Tavenas, F., Roy, M., Leroueil, S., 1981. Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils. *Can. Geotech. J.*, Vol. 18(1), pp. 52-66.
- Lasalle, P., Elson, J.A., 1962. Rapport préliminaire sur la région de Beloeil, géologie des dépôts meubles. Rapport interne, ministère des Richesses Naturelles, Québec, Canada.
- Lasalle, P., Tremblay, G., 1978. Dépôts meubles Saguenay-Lac Saint-Jean. Rapport géologique 191, ministère des Richesses Naturelles, Québec, Canada.
- Lebihan, J.P., Leroueil, S., 1980. The fall cone and the behaviour of remoulded clay. Rapport interne Terratech.
- Leblond, P., Tavenas, F., 1980. Etude du tassement de remblais par CONMULT. Rapport interne GCT-80-07, Université Laval, Québec, Canada.
- Lebuis, J., Rissman, P., 1979. Les coulées argileuses dans les régions de Québec et Shawinigan. Rapport interne, ministère de l'Energie et des Ressources.
- Leroueil, S., Lebihan, J.P., 1981. Propriétés caractéristiques des argiles Champlain. Rapport interne Terratech.
- Marchand, G., Tavenas, F., 1980. Etude du comportement des pentes avant rupture. Rapport interne GCT-80-01, Université Laval, Québec, Canada.
- Massarsch, K.R., 1976. Soil movement caused by pile driving in clay. Royal Institute of Technology - Stockholm. Report No. 51, 261 p.
- Mitchell, R.J., Markell, A.R., 1974. Flow sliding in sensitive soils. *Can. Geotech. J.*, Vol. 11(1), pp. 11-31.
- Prest, V.K., 1970. Quaternary geology, geology and economic minerals of Canada. R.J.W. Douglas, Economic Geology. Report No. 11, Geological Survey of Canada.
- Söderblom, R., 1974. A new approach of the classification of quick clays. SGI, Proc. No. 55, pp. 1-17.

Tavenas F. et al., 1979. The use of strain energy as a yield and creep criterion for soft clays. *Geotechnique* Vol 29(3), pp 285-303

Rosenquist, I., 1953. Considerations on the sensitivity of Norwegian quick clays. *Geotechnique* Vol 3(5), pp 195-200

Leroueil, S., 1977. Quelques considérations sur le comportement des argiles sensibles. Thèse de doctorat. Université Laval

LISTE DES TABLEAUX

- 1 - Propriétés physiques moyennes des sites étudiés
- 2 - Propriétés mécaniques moyennes des sites étudiés
- 3 - w, teneur en eau, %
- 4 - Classification de la sensibilité S_t
- 5 - Analyses chimiques de l'eau interstitielle des argiles étudiées
- 6 - Propriétés caractéristiques de l'argile de St-Jean Vianney (partie supérieure du profil). (D'après La Rochelle 1974, Lasalle-Tremblay 1978)
- 7 - Profondeur des échantillons utilisés
- 8 - Essais effectués
- 9 - Essais de chute libre, échantillon 5 cm × 5 cm
- 10 - Essais de chute libre, échantillon 10 cm × 10 cm et galette entière
- 11 - Essais de pilonnage, échantillon 5 cm × 5 cm
- 12 - Essais de pilonnage, échantillon 10 cm × 10 cm horizontal, hauteur de chute: 2 m, face d'impact supérieure
- 13 - Essais de pilonnage, échantillon 10 cm × 10 cm horizontal, hauteur de chute: 2 m, face d'impact inférieure
- 14 - Calculs des "indices de remaniement", essais en chute libre et de pilonnage
- 15 - Essais en chute libre, énergies impliquées
- 16 - Essais de pilonnage, énergies impliquées

LISTE DES FIGURES

- 1 Localisation des dépôts d'argile étudiés
- 2 Localisation de St-Léon
- 3 Localisation du site à St-Léon
- 4 Rapport de forage n° 1, St-Léon
- 5 Rapport de forage n° 1 (suite), St-Léon
- 6 Profil scissométrique de la résistance au cisaillement, St-Léon
- 7 Profil de q_c , St-Léon, piézocône n° 1
- 8 Profil de N_k , St-Léon, piézocône n° 1
- 9 Profil de u_T , St-Léon, piézocône n° 1
- 10 Profil de $\Delta u/c_u$, St-Léon, piézocône n° 1
- 11 Profil de u_T/q_c , St-Léon, piézocône n° 1
- 12 Sédimentométrie, St-Léon
- 13 Consolidation triaxiale: $(\Delta v/v_0)$ vs p' , St-Léon, profondeur 10 m
- 14 Cisaillement triaxial $\sigma_1 - \sigma_3$ vs déformation, St-Léon, profondeur 10 m
- 15 Essais triaxiaux drainés: $(\Delta v/v_0)$ vs déformation, St-Léon, profondeur 10 m
- 16 Cisaillement triaxial: u vs déformation, St-Léon, profondeur 10 m
- 17 Cheminement de contraintes, courbe d'état limite, St-Léon, profondeur 10 m
- 18 Localisation du site à St-Hilaire
- 19 Rapport de forage, St-Hilaire
- 20 Rapport de forage (suite), St-Hilaire
- 21 Profil scissométrique de la résistance au cisaillement, St-Hilaire
- 22 Profil de q_c , St-Hilaire
- 23 Profil de N_k , St-Hilaire
- 24 Profil de u_T , St-Hilaire
- 25 Profil de $\Delta u/c_u$, St-Hilaire
- 26 Profil de u_T/q_c , St-Hilaire
- 27 Localisation du site à St-Thuribe
- 28 Rapport de forage, St-Thuribe
- 29 Rapport de forage (suite), St-Thuribe
- 30 Profil scissométrique de la résistance au cisaillement, St-Thuribe
- 31 Profil de q_c , St-Thuribe
- 32 Profil de N_k , St-Thuribe
- 33 Profil de u_T , St-Thuribe

- 34 Profil de $\Delta u/c_u$, St-Thuribe
- 35 Profil de u_T/q_c , St-Thuribe
- 36 Localisation du site à Louiseville
- 37 Caractéristiques de l'argile sur le site de Louiseville
- 38 Localisation du site à Mascouche
- 39 Propriétés physiques de l'argile de Mascouche
- 40 Propriétés mécaniques de l'argile de Mascouche
- 41 Localisation du site à St-Alban
- 42 Profil des propriétés géotechniques du sol à St-Alban
- 43 Consolidation oedométrique: e vs $\lg \sigma'_v$
- 44 Rapports c_u sciss./ σ'_p en fonction de I_p pour les argiles étudiées
- 45 Essais de chute libre et de pilonnage
- 46 Essais de chute libre (CHU), échantillon 5 cm × 5 cm
- 47 Essais de chute libre (CHU), échantillon 5 cm × 5 cm
- 48 Essais de pilonnage (PIL), échantillon vertical (5 cm × 5 cm)
- 49 Essais de pilonnage (PIL), échantillon horizontal (5 cm × 5 cm)
- 50 Essais de pilonnage (PIL), échantillon vertical (5 cm × 5 cm)
- 51 Essais de pilonnage (PIL), échantillon horizontal (5 cm × 5 cm)
- 52 Essais de pilonnage (PIL), échantillon 5 cm × 5 cm
- 53 Essais de pilonnage (PIL), échantillon 5 cm × 5 cm
- 54 Essais de pilonnage (PIL) et de chute libre (CHU), échantillon horizontal. St-Léon et Louiseville
- 55 Essais de pilonnage (PIL) et de chute libre (CHU), échantillon horizontal. St-Hilaire et St-Thuribe
- 56 Essais de pilonnage (PIL) et de chute libre (CHU), échantillon horizontal. Mascouche et St-Alban
- 57 Extrudoir
- 58 Appareillage à extrusion
- 59 Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur 4,8 m; force vs déplacement
- 60 Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur 4,8 m; c_u vs déplacement
- 61 Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur 9,3 m; force vs déplacement
- 62 Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur 9,3 m; c_u vs déplacement
- 63 Essais d'extrusion, Louiseville, profondeur 6,0 m; force vs déplacement
- 64 Essais d'extrusion, Louiseville, profondeur 6,0 m; c_u vs déplacement
- 65 Essais d'extrusion, St-Hilaire, profondeur 5,6 m; force vs déplacement
- 66 Essais d'extrusion, St-Hilaire, profondeur 5,6 m; c_u vs déplacement
- 67 Essais d'extrusion, St-Hilaire, profondeur 11,4 m; force vs déplacement
- 68 Essais d'extrusion, St-Hilaire, profondeur 11,4 m; c_u vs déplacement

- 69 Essais d'extrusion, St-Thuribe, profondeur 6,0 m; force vs déplacement
- 70 Essais d'extrusion, St-Thuribe, profondeur 6,0 m; c_u vs déplacement
- 71 Essais d'extrusion, St-Thuribe, profondeur 12,0 m; force vs déplacement
- 72 Essais d'extrusion, St-Thuribe, profondeur 12,0 m; c_u vs déplacement
- 73 Essais d'extrusion, Mascouche, profondeur 9,0 m; force vs déplacement
- 74 Essais d'extrusion, Mascouche, profondeur 9,0 m; c_u vs déplacement
- 75 Essais d'extrusion, St-Alban, profondeur 6,6 m; force vs déplacement
- 76 Essais d'extrusion, St-Alban, profondeur 6,6 m; c_u vs déplacement
- 77 Essais d'extrusion; pourcentage de remaniement vs énergie normalisée
- 78 Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur 4,8 m
- 79 Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur 9,3 m
- 80 Essais d'extrusion, Louiseville, profondeur 6,0 m
- 81 Essais d'extrusion, St-Hilaire, profondeur 5,6 m
- 82 Essais d'extrusion, St-Hilaire, profondeur 11,4 m
- 83 Essais d'extrusion, St-Thuribe, profondeur 6,0 m
- 84 Essais d'extrusion, St-Thuribe, profondeur 12,0 m
- 85 Essais d'extrusion, Mascouche, profondeur 9,0 m
- 86 Essais d'extrusion, St-Alban, profondeur 6,6 m
- 87 Essais d'extrusion, teneur en eau vs temps d'extrusion, St-Léon, profondeur 4,8 m
- 88 Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Léon, profondeur 4,8 m
- 89 Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Léon, profondeur 9,3 m
- 90 Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, Louiseville, profondeur 6,0 m
- 91 Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Hilaire, profondeur 5,6 m
- 92 Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Hilaire, profondeur 11,4 m
- 93 Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Thuribe, profondeur 6,0 m
- 94 Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Thuribe, profondeur 12,0 m
- 95 Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, Mascouche, profondeur 9,0 m
- 96 Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Alban, profondeur 6,6 m
- 97 Schéma de l'appareil de cisaillement simple
- 98 Boîte de cisaillement simple

- 99 Essai de cisaillement simple, force vs déplacement, St-Léon (4,8 m)
- 100 Essai de cisaillement simple, force vs déplacement, St-Léon (9,3 m)
- 101 Essai de cisaillement simple, force vs déplacement, Louiseville (6,0 m)
- 102 Essai de cisaillement simple, force vs déplacement, St-Hilaire (5,6 m)
- 103 Essai de cisaillement simple, force vs déplacement, St-Hilaire (11,4 m)
- 104 Essai de cisaillement simple, force vs déplacement, St-Thuribe (6,0 m)
- 105 Essai de cisaillement simple, force vs déplacement, St-Thuribe (12,0 m)
- 106 Essai de cisaillement simple, force vs déplacement, Mascouche (9,0 m)
- 107 Essai de cisaillement simple, force vs déplacement, St-Alban (6,6 m)
- 108 Essai de cisaillement simple, force vs déplacement, St-Jean Vianney (30,0 m)
- 109 Essai de cisaillement simple, force vs nombre de cycles, St-Léon et Louiseville
- 110 Essai de cisaillement simple, force vs nombre de cycles, St-Hilaire et St-Alban
- 111 Essai de cisaillement simple, force vs nombre de cycles, St-Thuribe
- 112 Essai de cisaillement simple, force vs nombre de cycles, Mascouche et St-Jean Vianney
- 113 Essai de cisaillement simple, c_u vs nombre de cycles, St-Léon et Louiseville
- 114 Essai de cisaillement simple, c_u vs nombre de cycles, St-Hilaire et St-Alban
- 115 Essai de cisaillement simple, c_u vs nombre de cycles, St-Thuribe et Mascouche
- 116 Essai de cisaillement simple, c_u vs nombre de cycles, St-Jean Vianney
- 117 Essai de cisaillement simple: zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai, St-Léon (4,8 m)
- 118 Essai de cisaillement simple: zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai, St-Léon (9,3 m)
- 119 Essai de cisaillement simple: zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai, Louiseville (6,0 m)
- 120 Essai de cisaillement simple: zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai, St-Hilaire (5,6 m)
- 121 Essai de cisaillement simple: zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai, St-Hilaire (11,4 m)
- 122 Essai de cisaillement simple: zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai, St-Thuribe (6,0 m)
- 123 Essai de cisaillement simple: zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai, St-Thuribe (12,0 m)
- 124 Essai de cisaillement simple: zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai, Mascouche (9,0 m)
- 125 Essai de cisaillement simple: zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai, St-Alban (6,6 m)
- 126 Essai de cisaillement simple: zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai, St-Jean Vianney (30,0 m)

- 127 Essai de cisaillement simple, énergie vs nombre de cycles, St-Léon et Louiseville
- 128 Essai de cisaillement simple, énergie vs nombre de cycles, St-Hilaire et St-Alban
- 129 Essai de cisaillement simple, énergie vs nombre de cycles, St-Thuribe
- 130 Essai de cisaillement simple, énergie vs nombre de cycles, Mascouche et St-Jean Vianney
- 131 Essais d'énergie, pourcentage de remaniement vs énergie normalisée, St-Léon, 4,8 m
- 132 Essais d'énergie, pourcentage de remaniement vs énergie normalisée, St-Léon, 9,3 m
- 133 Essais d'énergie, pourcentage de remaniement vs énergie normalisée, Louiseville, 6,0 m
- 134 Essais d'énergie, pourcentage de remaniement vs énergie normalisée, St-Hilaire, 5,6 m
- 135 Essais d'énergie, pourcentage de remaniement vs énergie normalisée, St-Hilaire, 11,4 m
- 136 Essais d'énergie, pourcentage de remaniement vs énergie normalisée, St-Thuribe, 6,0 m
- 137 Essais d'énergie, pourcentage de remaniement vs énergie normalisée, St-Thuribe, 12,0 m
- 138 Essais d'énergie, pourcentage de remaniement vs énergie normalisée, Mascouche, 9,0 m
- 139 Essais d'énergie, pourcentage de remaniement vs énergie normalisée, St-Alban, 6,6 m
- 140 Indice de remaniement I_2 vs déformation ϵ . (D'après Ladanyi et al. 1971)
- 141 Essai de cisaillement simple, pourcentage de remaniement vs énergie normalisée
- 142 Essai de cisaillement simple, F vs c_u
- 143 Essai de cisaillement simple, I_r vs S_t , I_L
- 144 Essai de cisaillement simple, I_r vs I_p , w_L
- 145 Essai de cisaillement simple, I_r vs Act., w
- 146 Essai de cisaillement simple, I_r vs teneur en sel, % de cations
- 147 Essai de cisaillement simple, corrélation I_r vs w_L pour $W_N = 40$
- 148 Relation entre le nombre de stabilité et la distance de rétrogression des glissements dans l'est du Canada. (D'après Mitchell et Markell, 1974)
- 149 Méthodes de prédiction de la rétrogression
- 150 Relation I_p vs w_L pour les argiles sujettes à coulées. (D'après Lebuïs et Rissman, 1979)

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

- 1 - Essais en chute libre
 - a - Dispositif de largage
 - b - Mesure de la résistance au cisaillement
 - c - Chute d'un échantillon de 10 × 10 cm
- 2 - Essais en chute libre, échantillons 10 × 10 cm
 - a - St-Thuribe 12 m, $W_N = 21,4$
 - b - St-Alban 6,6 m, $W_N = 83,3$
 - c - St-Thuribe 12 m, $W_N = 50,8$
- 3 - Essais en chute libre, échantillons 10 × 10 cm
 - a - St-Léon 4,8 m, $W_N = 88,4$
 - b - St-Léon 9,3 m, $W_N = 49,6$
 - c - Louiseville 6 m, $W_N = 69,9$
- 4 - Essais en chute libre, échantillons 10 × 10 cm
 - a - St-Hilaire 11,4 m, $W_N = 78,2$
 - b - St-Thuribe 12 m, $W_N = 50,8$
 - c - Mascouche 9 m, $W_N = 29,1$
- 5 - Essais en chute libre, échantillons 20 × 15 cm
 - a - St-Léon 4,8 m, $W_N = 104,5$
 - b - St-Thuribe 12 m, $W_N = 58,8$
 - c - Mascouche 9 m, $W_N = 25,8$
- 6 - Essais de pilonnage
 - a - Chute du pilon
 - b - Exemple de "tas" obtenu
 - c - Mesure de la résistance au cisaillement
- 7 - Essais de pilonnage, Louiseville 6 m
 - a - Echantillon 5 × 5 cm vertical, $W_N = 32,6$
 - b - Echantillon 5 × 5 cm horizontal, $W_N = 32,6$
 - c - Echantillon 5 × 5 cm vertical, $W_N = 76,4$
- 8 - Essais de pilonnage, échantillons 5 × 5 cm
 - a - Echantillon 5 × 5 cm vertical (face supérieure, St-Hilaire 11,4 m, $W_N = 88,6$)

- b - Echantillon 5 × 5 cm horizontal (face supérieure), St-Thuribe 12 m, $W_N = 20,9$
 - c - Echantillon 5 × 5 cm vertical (face inférieure), Mascouche 9 m, $W_N = 34,1$
- 9 - Essais de pilonnage, échantillons 10 × 10 cm horizontaux
 - a - St-Thuribe 12 m, $W_N = 52,7$
 - b - St-Thuribe 12 m, $W_N = 70,6$
 - c - St-Thuribe 12 m, $W_N = 70,6$, mesure de la résistance au cisaillement
- 10 - Essais d'extrusion
 - a - Appareillage
 - b - Extrudoir
 - c - Mesure de la résistance au cisaillement
- 11 - Essais d'extrusion
 - a - St-Alban 6,6 m, 75% de réduction de section, surfaçage et mesures de la résistance
 - b - St-Alban 6,6 m, 75% de réduction de section, fin d'extrusion
 - c - Mascouche 9 m, 50% de réduction de section, début d'extrusion
- 12 - Essais d'extrusion, St-Hilaire 11,4 m
 - a - 25% de réduction de section
 - b - 75% de réduction de section
 - c - Démontage et récupération du reste de l'échantillon
- 13 - Essais d'extrusion, fin d'essais
 - a - Découpage de l'échantillon restant en rondelles, St-Léon, 75% de réduction de section
 - b - Mesure de la résistance au cisaillement dans la partie tronconique restante, St-Hilaire 11,4 m, 50% de réduction de section
 - c - Mesure de la résistance au cisaillement dans la partie tronconique restante, St-Léon 4,8 m, 75% de réduction de section
- 14 - Essais de cisaillement simple
 - a - Appareillage
 - b - Boîte de cisaillement simple, poussée
 - c - Boîte de cisaillement simple, butée
- 15 - Essais de cisaillement simple
 - a - Position verticale de la boîte, fissuration et trous
 - b - Position inclinée de la boîte, fissuration et trous
 - c - Mesure de la résistance au cisaillement au scissomètre de laboratoire

- 16 - Essais de cisaillement simple
 - a - Découpage de l'échantillon
 - b - Mise en place de l'échantillon dans la boîte
 - c - Démoulage de l'échantillon, St-Thuribe 12 m
- 17 - Essais de cisaillement simple, fin d'essai
 - a - Mesure de la résistance au cisaillement au cône tombant
 - b - Découpage de l'échantillon en tranches horizontales
 - c - Mesure de la résistance au cisaillement, dernière tranche

Site	γ kN/m ³	G	Sédimentation				w Chantier	w _L (cône)	w _p (cône)	I _L (cône)	I _p (cône)	Act. (I _p /<2μ)	$\frac{V}{m}$
			Sable %	Silt %	Argile %	w Labo							
St-Léon 4,8 m	15,3	2,79	0	24	76	79	75	73	27	1,1	46	0,60	2,0
9,3 m	15,8	2,75	0	30	70	70	70	68	26	1,0	42	0,60	2,0
Louiseville 6 m	15,5	2,78	0	23	77	76	75	73	27	1,1	46	0,60	0,6
St-Hilaire 5,6 m	15,5	2,8	0	15	85	72	73	60	25	1,3	35	0,41	2,1
11,4 m	16,0	2,79	0	21	79	71	70	49	23	2,0	26	0,33	2,1
St-Thuribe 6 m	16,75	2,76	2	55	43	50	50	42	22	1,6	20	0,46	1,2
12 m	17,6	2,77	3	67	30	40	43	25	20	>4,0	5	0,17	1,2
Mascouche 9 m	16,4	2,78	1	34	65	58	52	54	24	1,2	30	0,46	1,2
St-Alban 6,6 m	15,8	2,75	5	37	58	67	66	41	22	2,4	19	0,33	0,6
St-Jean Vianney 30 m	17,7		4	40	56	36	45	34,5	21,3	1,1	13,2	0,24	
				1971		1981	1971				1981		

Tableau n° 1 - Propriétés physiques moyennes des sites étudiés

Site	e initial	σ_v kPa	σ_p kPa	cu scis- somètre kPa	cu cône chantier kPa	cu cône labo kPa	cu cône remanié kPa	St labo	St chantier	Cc
St-Léon 4,8 m	2,08	50	100	31	23	30	1,1	27	20	1,6
9,3 m	1,82	80	180	43	36	49,5	2,1	24	17	2,3
Louiseville 6,0 m	2,10	40	125	37	35	39	1,3	30	23	4,5
St-Hilaire										
5,6 m	2,10	54	115	35	30	35	0,8	44	32	2,4
11,4 m	1,89	90,5	115	37	27	32	0,3	106	70	2,0
St-Thuribe 6,0 m	1,38	42,5	175	39	37	55	0,4	137	77	1,1
12,0 m	1,14	115	195	31	31	42	<0,07	>600	>410	0,8
Mascouche 9,0 m	1,65	72	400	105	130*	135	1,3	104	100	2,3
St-Alban 6,6 m	1,95	36	85	20	19	21	0,2	105	95	1,3
St-Jean Vianney 30,0 m			1000	190		320	1,2	260		
			1971				1981			

* Valeur de Gilles Marchand corrigée (85 kPa $\times$ 1,5)

Tableau n° 2 - Propriétés mécaniques moyennes des sites étudiés

Site		CHU	PIL	EXT	CIS	Moyenne
St-Léon	4,8 m	79	79	78	76	78
	9,3 m	70,5		69,5	74	71
Louiseville	6,0 m	75	76	82 (?)	74	76
St-Hilaire	5,6 m			74,5	76	75
	11,4 m	71	72	70	64 (?)	70
St-Thuribe	6,0 m			49	52	50,5
	12,0 m	45	42	37,5 (?)	44,5	42
Mascouche	9,0 m	62,5	56	58,5	60	59
St-Alban	6,6 m	67	65	68	52 (?)	65
St-Jean Vianney	30,0 m				36	36

Tableau n° 3 - w, teneur en eau, %

Terminologie	Rosenquist 1953	S. Leroueil 1979	P. Flon 1982 (présente étude)
Faible S_t	8 à 16 (peu "quick")	1 à 5	1 à 16
S_t moyen	16 à 32 (moyennement "quick")	5 à 10	16 à 32
Grand S_t	32 à 64 (très "quick")	10 à 20	32 à 64
Très grand S_t		20 à 50	64 à 128
S_t extrêmement élevé	> 64 (extra "quick")	> 50	> 128

Tableau n° 4 - Classification de la sensibilité S_t

Site	Mg (ppm)	Ca (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Cl (ppm)	Salinité (gr/l)	$\frac{\text{Na+K}}{\text{Na+K+Ca+Mg}}$
St-Léon	84	62	640	16	1250	2,1	0,82
	175	88	1660	49	3820	5,5	0,87
Louiseville	315	105	2300	48	4970	7,6	0,85
St-Hilaire	27	21	120	4	61	0,4	0,72
	13	8	290	4	134	1,0	0,93
St-Thuribe	29	21	140	22	74	0,5	0,76
	6	12	325	17	115	1,1	0,95
Mascouche	64	31	1240	47	1580	4,1	0,93
St-Alban	20	39	60	19	12	0,2	0,57
St-Jean Vianney (1971)	30,0 m					$\approx 1,0$	

Tableau n° 5 - Analyses chimiques de l'eau interstitielle des argiles étudiées

	Variations	Valeur caractéristique	Valeur de l'échantillon testé (cisaillement simple)
Teneur en eau naturelle (%)	35-45	40	36
Limite liquide (%)	25-35	30	34,5
Limite plastique (%)	18-23	22	21,3
Indice de liquidité	2-8	3	1,1
Indice de plasticité	6-20	10	13,2
Poids unitaire total (kN/m ³)	17-18	17,7	
Teneur en argile (%)	51-62	56	
Teneur en silt (%)	36-42	40	
Teneur en sel (gr/l)	0,152-4,73	1,4	
Pression de préconsolidation (kPa)	250-1000	600	
Résistance au cisaillement non drainé (kPa)	140-240 (scissomètre)	190	320 (cône)
Résistance remaniée (kPa)	0-50 (scissomètre)		1,2 (cône)
Sensibilité	200-∞ (scissomètre)	∞	260 (cône)

Tableau n° 6 - Propriétés caractéristiques de l'argile de St-Jean Vianney (partie supérieure du profil)
(D'après La Rochelle 1974, Lasalle-Tremblay 1978)

Site	Profondeur (m)	Identifi- cation	σ_p^1	CHU	PIL	GAL	EXT	CIS
<u>St-Léon</u>								
F1T6E2	4,60 à 4,72							x
E3	4,72 à 4,85							x
F1T7E1	5,03 à 5,16			x	x			
E2	5,16 à 5,28	x	x				x	
E3	5,28 à 5,41				x			
F1T8E1	5,59 à 5,72			x				
E3	5,84 à 5,97					x		
F1T14E3	9,04 à 9,17							x
F1T15E1	9,37 à 9,50			x				
E2	9,50 à 9,62			x			x	
E3	9,62 à 9,75	x			x		x	
F1T16E1	9,91 à 10,04	x	x					
E3	10,16 à 10,29	x		x				
<u>Louiseville</u>								
F1T10E1	5,51 à 5,64				x			
E2	5,64 à 5,92			x				
F1T11E1	6,07 à 6,20	x					x	
E2	6,20 à 6,48			x	x			x
F1T13E1	7,19 à 7,32				x			
<u>St-Hilaire</u>								
F1T3E2	5,61 à 5,73	x	x				x	
E3	5,73 à 5,86							x
F1T7E1	11,05 à 11,18							x
E2	11,18 à 11,30			x				
E3	11,30 à 11,43				x			
F1T8E1	11,46 à 11,58	x	x	x	x			
E2	11,58 à 11,71						x	
E3	11,71 à 11,83							x

Tableau n° 7 - Profondeur des échantillons utilisés

Site	Profondeur (m)	Identifi- cation	σ_p^1	CHU	PIL	GAL	EXT	CIS
<u>St-Thuribe</u>								
FlT2E2	6,25 à 6,38	x	x				x	
E3	6,38 à 6,50							x
FlT5E3	12,12 à 12,24			x				
FlT6E1	12,40 à 12,53			x	x			
E2	12,53 à 12,65	x	x				x	
E3	12,65 à 12,78				x			
FlT7E1	12,96 à 13,09							x
E2	13,09 à 13,21							x
E3	13,21 à 13,34					x		
<u>Mascouche</u>								
FlT15E1	8,58 à 8,71					x		
E2	8,71 à 8,83			x				
E3	8,83 à 8,96							x
FlT16E1	9,12 à 9,25	x					x	
E2	9,25 à 9,37				x			
E3	9,37 à 9,50				x			
<u>St-Alban</u>								
Fl1T8E1	6,60 à 6,73	x	x	x	x		x	
E2	6,73 à 6,85			x				
E3	6,85 à 6,98							x

Tableau n° 7 (suite) - Profondeur des échantillons utilisés

Site	CHU 5cm	CHU 10cm	CHU gal	PIL 5cm	PIL 10cm	EXT 10%	EXT 25%	EXT 50%	EXT 75%	G	SED	op	Cis. simple	Scisso- mètre	Piézo- pénétr.	Minéra- logie
St-Léon																
4,8 m	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9,3 m	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Louiseville																
6 m	x	x		x	x	x	x	x	x	x*	x*	x	x	x*	x*	x
St-Hilaire																
5,6 m					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
11,4 m	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
St-Thuribe						x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6 m																
12 m	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mascouche																
9 m		x	x	x	x	x	x	x	x	x*	x	x*	x*	x*	x*	x
St-Alban																
6,6 m	x	x			x		x	x	x	x*	x	x	x	x*	x*	x

x* Essais réalisés en dehors du cadre de cette étude

Tableau no 8 des essais effectués

Site	w % moyen avant essai	w % moyen pendant l'essai	cu intact moyen (kPa) avant essai	cu "intermédiaire" moyen (kPa)	cu remanié moyen (kPa) (w)	S _t	I _L
St-Léon 4,8 m	81,4	80,3	30,2	15,8	1,3 (78,9)	23	1,1
St-Léon 9,3 m	69,3	68,0	49,2	25,8	2,2 (64,5)	22	0,9
Louiseville 6,0 m	72,2	69,4	42,7	17,6	1,4 (70,3)	30	1,0
St-Hilaire 11,4 m	71,4	72,2	33,1	12,2	0,3 (71,4)	110	2,0
St-Thuribe 12,0 m	44,4	42,1	44,0	12,6	<0,07 (42,2)	>628	>4,0
Mascouche 9,0 m			125		1,2	104	1,1
St-Alban 6,6 m	68,4	65,7	22,5	8,7	0,18 (68,0)	125	2,6

Tableau n° 9 - Essais de chute libre, échantillon 5 cm × 5 cm

Site	Teneur en eau, w, %				Résistance au cisaillement (kPa)						
	Avant essai		Pendant l'essai		cu intact		cu "intermédiaire"				
Sorte d'échantillon	10x10cm	10x10cm	Galette	10x10cm	10x10cm	10x10cm	10x10cm	10x10cm	10x10cm	Galette	5x5cm
Hauteur de chute	3 m	7 m	10 m	3 m	7 m	10 m	3 m	7 m	3 m	7 m	10 m
											1à3 m
St-Léon 4,8 m	75,0	76,6	79,0	77,4	73,1	72,8	36,2	31,6	15,4	12,3	13,7
											15,8
St-Léon 9,3 m	72,8	72,1	71,0	72,5	72,5	47,3	52,2	22,0	20,4	25,8	
Louiseville 6,0 m	78,3	77,5	76,2	76,5	39,7	37,0	14,0	13,2	17,6		
St-Hilaire 11,4 m	70,8	70,7	68,1	70,9	34,0	33,0	9,2	7,6	12,2		
St-Thuribe 12,0 m	47,2	47,1	41,9	45,5	45,7	41,7	38,7	34,0	8,9	6,6	4,9
											12,6
Mascouché 9 m	60,8	63,9	58,2	61,4	145	48,4	48,4				
St-Alban 6,6 m	66,4	66,3	62,8	62,0	19,8	22,6	8,0	6,3	8,7		

Tableau no 10 - Essais de chute libre, échantillon 10 cm x 10 cm et galette entière

Site	w % moyen avant essai	w % moyen pendant l'essai	c _u intact moyen (kPa)	"c _u intermédiaire" (kPa) face supérieure sup. moy. inf.	c _u remanié moyen (kPa) (w)	St	IL
St-Léon 4,8 m	81,8	81,2	28,8	21 16 15	1,3 (78,9)	22	1,1
Louiseville 6,0 m	78,2	77,2	42,7	39 17 16	1,4 (70,3)	30	1,0
St-Hilaire 11,4 m	72,6	69,8	32,6	26 12 10	0,3 (71,4)	108	2,0
St-Thuribe 12,0 m	44,8	42,3	45,9	22 10 7	<0,07 (42,2)	>655	>4,0
Mascouche 9,0 m	57,4	54,5	125	64 48 45	1,2 (57,6)	104	1,1

Tableau n° 11 - Essais de pilonnage, échantillon 5 cm x 5 cm

Site	Teneur en eau (%)			Résistance au cisaillement (kPa)										
	Avant essai		Pendant l'essai	cu intact		cu intermédiaire		cu re- cu inter- manié médiaire		5 x 5 cm	(D'après cu remanié)	w _L	w	
	1er PIL	2e PIL		1er PIL	2e PIL	1er PIL	2e PIL	1er PIL	2e PIL					moyen
St-Léon	Pourtour													
4,8 m	centre													
	moyenne	75,5	75,0	74,9	69,4	29,1	28,5	11,3	8,2	0,9	16	1,2	62,9	71,7
	Poids du pilon	5,35 kg	8,07 kg											
Louise-	Pourtour													
ville	centre			76,4				13,1						
	moyenne	75,4	76,2	75,8				15,2						
	Poids du pilon	5,35 kg	8,07 kg	76,1	76,0	38,7	35,9	14,2	12,6	1,4	17	1,0	73,9	77,4
St-Hi-	Pourtour													
laire	centre							9,8						
	moyenne	71,0	70,7	72,5	73,1	29,6	32,4	10,6	10,3	0,4	12	1,8	51,9	73,1
	Poids du pilon	5,35 kg	7,17 kg											
St-Thu-	Pourtour													
ribe	centre							7,5						
	moyenne	40,0	40,1	38,5	40,3	41,8	41,3	8,9	4,5	0,0	10			
	Poids du pilon	5,35 kg	7,17 kg					8,2						
Mascou-	Pourtour													
che	centre			53,1	52,8			57,2	36,7					
	moyenne	56,2	56,2	53,6	54,1			71,6	45,3					
	Poids du pilon	6,26 kg	10,34 kg	53,3	53,4	139,8	133,4	64,4	41,0	1,1	48	1,2	49,0	53,5
St-Alban	Pourtour													
6,6 m	centre			61,5	61,9			6,4	6,2					
	moyenne	65,0	63,9	60,3	62,3			8,3	7,2					
	Poids du pilon	3,08 kg	4,44 kg	60,9	62,1	18,9	18,5	7,4	6,7	0,3	8,7	2,0	44,0	64,3
											(CHU)			

Tableau n° 12 - Essais de pilonnage, échantillon 10 cm x 10 cm horizontal, hauteur de chute: 2 m, face d'impact supérieure.

Site	Teneur en eau				Résistance au cisaillement (kPa)						
	Avant essai		Pendant l'essai		Cu intact		Cu intermédiaire		Cu remanié		Cu inter- médiaire 5 x 5 cm
	1er PIL	2e PIL	1er PIL	2e PIL	1er PIL	2e PIL	1er PIL	2e PIL	moyen		
St-Léon Pourtour 4,8 m centre moyenne Poids du pilon	75,5 5,35 kg	8,07 kg	68,2		29,1		11,7		0,9		16
Louiseville Pourtour 6,0 m centre moyenne Poids du pilon	75,4 5,35 kg	8,07 kg	75,1		38,7		14,4 22,3 18,3		1,4		17
St-Hilaire Pourtour 11,4 m centre moyenne Poids du pilon	71,0 5,35 kg	7,17 kg	72,0		29,6		10,1 19,2 14,6		0,4		12
St-Thuribe Pourtour 12,0 m centre moyenne Poids du pilon	40,0 5,35 kg	7,17 kg	40,0		41,8		7,4 12,1 9,7		0,0		10
Mascouche Pourtour 9,0 m centre moyenne Poids du pilon	56,2 6,26 kg	10,34 kg	53,4	52,5 55,5 54,0	139,8		60,8 88,8 74,8	41,9 58,2 50,0	1,1		48
St-Alban Pourtour 6,6 m centre moyenne Poids du pilon	65,0 3,08 kg	4,44 kg	63,2 63,5 63,4		18,9		7,2 9,1 8,1		0,3		8,7 (CHU)

Tableau n° 13 - Essais de pilonnage, échantillon 10 cm x 10 cm horizontal, hauteur de chute: 2 m, face d'impact inférieure.

Cu "intermédiaire" (kPa)																
Site	Cu intact moyen	PIL				CHU				Moyen éch. 5 cm	Moyen éch. 10 cm	I ₁	Cu remanié moyen	I ₂	I ₃	I ₄
		éch. 5 cm	éch. 10 cm	éch. 5 cm	éch. 10 cm	éch. 5 cm	éch. 10 cm									
St-Léon 4,8 m	30,1	16	8,2	15,8	12,3	15,9	10,2	13,0	1,1	0,43	0,13	0,59				
9,3 m	49,5			25,8	20,4	25,8	20,4	23,1	2,2	0,46 ⁵	0,12 ⁸	0,56				
Louiseville 6,0 m	40,3	17	12,6	17,6	13,2	17,3	12,9	15,1	1,3	0,37	0,12 ¹	0,64				
St-Hilaire 11,4 m	32,6	12	10,3	12,2	7,6	12,1	8,9	10,5	0,3	0,32	0,09 ¹	0,68				
St-Thuribe 12,0 m	43,0	10	4,5	12,6	6,6	11,3	5,5	8,4	<0,07	0,19 ⁵	0,04 ³	0,80				
Mascouche 9,0 m	130	48	41	48,4	48,4	48	44,7	46,3	1,1	0,35 ⁵	0,11 ⁵	0,65				
St-Alban 6,6 m	21,2		6,7	8,7	6,3	8,7	6,5	7,6	0,2	0,36	0,08 ⁹	0,65				

I₁ = Cu intermédiaire moyen

I₂ = Cu intermédiaire / Cu intact

I₃ = Cu intermédiaire / σ'_p

I₄ = $\frac{\text{Cu intact} - \text{Cu intermédiaire}}{\text{Cu intact} - \text{Cu remanié}}$

Tableau n° 14 - Calculs des "indices de remaniement", essais en chute libre et de pilonnage.

Site	Dimension de l'échantillon (cm)	Poids (gr)	Hauteur de chute (m)	Energie (joules)	W _N , énergie normalisée	c _u moyen (kPa)
St-Léon						
4,8 m	5 × 5	160	1,50	2,3	18,0	28,3
(F1T7E1)	5 × 5	162	2,50	4,0	31,4	31,0
V ₁ =98,2 cm ³	5 × 5	158	3,25	5,0	39,2	29,6
St-Léon						
4,8 m	10 × 10	1305	3,00	38,4	37,6	36,2
(F1T8E1)						
V ₂ =785,4 cm ³	10 × 10	1305	7,05	90,2	88,4	31,6
St-Léon						
4,8 m	20 × 15	6472	10,08	640	104,5	13,7
(F1T8E3)	(GAL)					
V ₃ =4712,4 cm ³						
St-Thuribe						
12,0 m	5 × 5	180	1,00	1,8	7,2	44,4
(F1T6E1)	5 × 5	184	2,00	3,6	14,5	42,2
V ₁ =98,2 cm ³	5 × 5	182	3,00	5,4	21,7	41,3
St-Thuribe						
12,0 m	10 × 10	1447	3,00	42,6	21,4	38,7
(F1T5E3)						
V ₂ =785,4 cm ³	10 × 10	1462	7,05	101,1	50,8	34,0
St-Thuribe						
12,0 m	20 × 15	7110	10,08	703	58,8	4,9
(F1T7E3)	(GAL)					
V ₃ =4712,4 cm ³						
Mascouche						
(F1T15E2)	10 × 10	1720	7,05	118,9	29,1	145 (?)
V ₂ =785,4 cm ³						
Mascouche						
(F1T15E1)	20 × 15	6395	10,08	632,4	25,8	48,4
V ₃ =4712,4 cm ³	(GAL)					
St-Alban						
5 × 5		162	1,00	1,6	14,7	28,6
(F1T8E1)	5 × 5	163	2,00	3,2	29,5	20,9
V ₁ =98,2 cm ³	5 × 5	168	3,00	4,9	45,1	24,4
St-Alban						
10 × 10		1335	3,00	39,3	45,3	19,8
(F1T8E2)						
V ₂ =785,4 cm ³	10 × 10	1332	5,53	72,3	83,3	22,6

Tableau n° 15 - Essais en chute libre, énergies impliquées

Site	Dimension de l'échantillon (cm)	Poids du pi- lon (gr)	Hauteur de chute (m)	Energie (joules)	W _N , énergie normalisée	c _u moyen (kPa)
St-Léon						
4,8 m	5 × 5	1772	0,30	5,2	40,7	20,3
(FlT7E1)	5 × 5	1772	0,70	12,2	95,6	15,5
V ₁ =98,2 cm ³	5 × 5	1772	1,00	17,4	136,3	18,3
St-Léon						
4,8 m	10 × 10	5352	2,00	105	102,8	11,3
(FlT7E3)						
V ₂ =785,4 cm ³	10 × 10	8073	2,00	158,4	155,1	8,2
St-Hilaire						
11,4 m	5 × 5	1772	0,25	4,3	29,3	20,1
(FlT8E1)	5 × 5	1772	0,50	8,7	59,3	10,2
V ₁ =98,2 cm ³	5 × 5	1772	0,75	13,0	88,6	11,6
St-Hilaire						
11,4 m	10 × 10	5352	2,00	105	89,4	10,5
(FlT7E3)						
V ₂ =785,4 cm ³	10 × 10	7166	2,00	140,6	119,7	10,3
St-Thuribe						
12,0 m	5 × 5	1772	0,30	5,2	20,9	22,1
(FlT6E1)	5 × 5	1772	0,75	13,0	52,2	8,7
V ₁ =98,2 cm ³	5 × 5	1772	1,10	19,1	76,7	7,1
St-Thuribe						
12,0 m	10 × 10	5352	2,00	105	52,7	8,2
(FlT6E3)						
V ₂ =785,4 cm ³	10 × 10	7166	2,00	140,6	70,6	
Mascouche	5 × 5	1772	0,50	8,7	17,0	56,9
(FlT16E2)	5 × 5	1772	1,00	17,4	34,1	45,1
V ₁ = 98,2 cm ³	5 × 5	1772	1,50	26,1	51,1	46,3
Mascouche	10 × 10	6259	2,00	122,8	30,1	64,4
(FlT16E3)						
V ₂ =785,4 cm ³	10 × 10	10341	2,00	202,9	49,7	45,3
St-Alban	10 × 10	3084	2,00	60,5	69,7	6,7
(FlT8E1)						
V ₂ =785,4 cm ³	10 × 10	4445	2,00	87,2	100,5	7,4

Tableau n° 16 - Essais de pilonnage, énergies impliquées

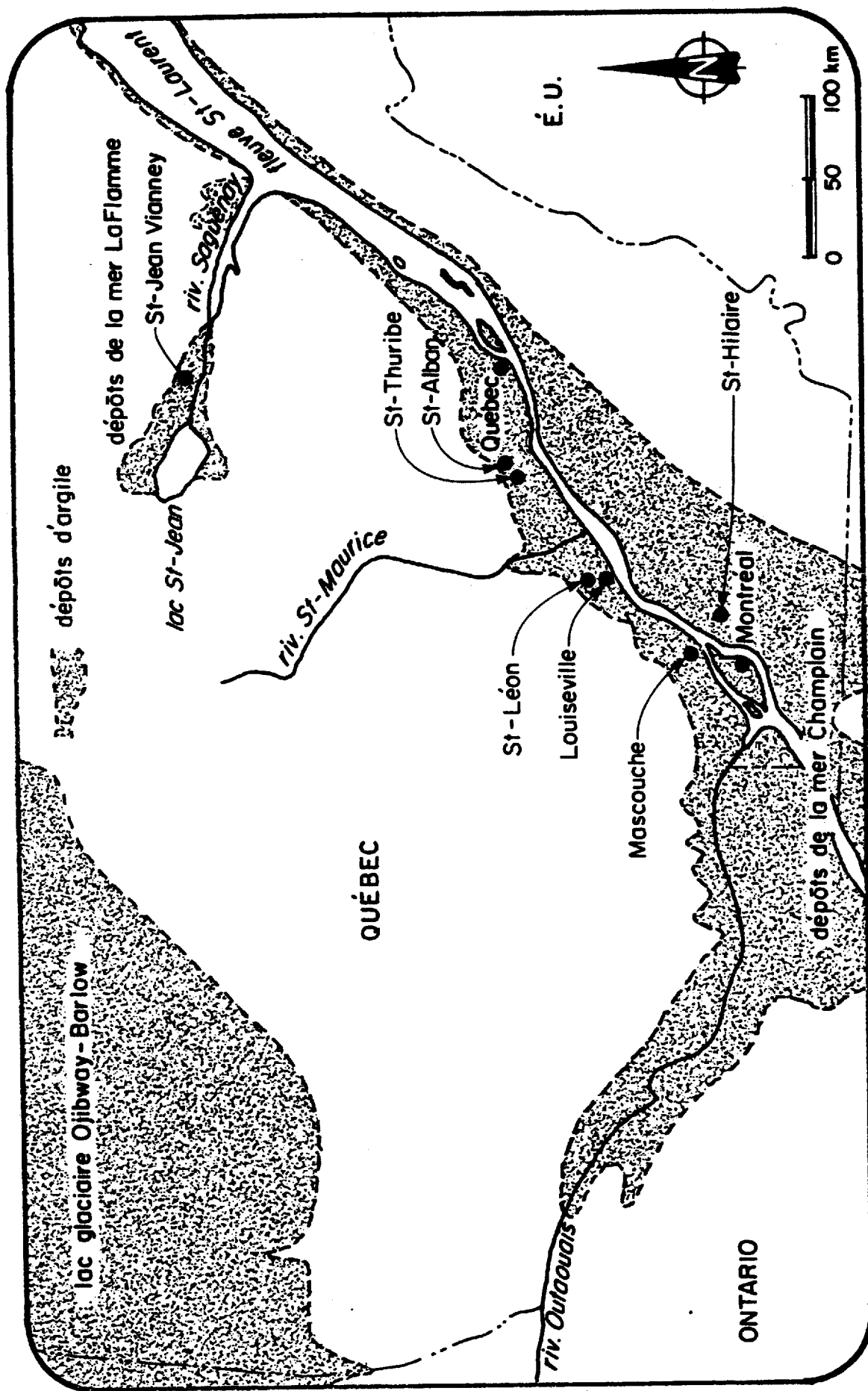


Fig. 1 — Localisation des dépôts d'argile étudiés.

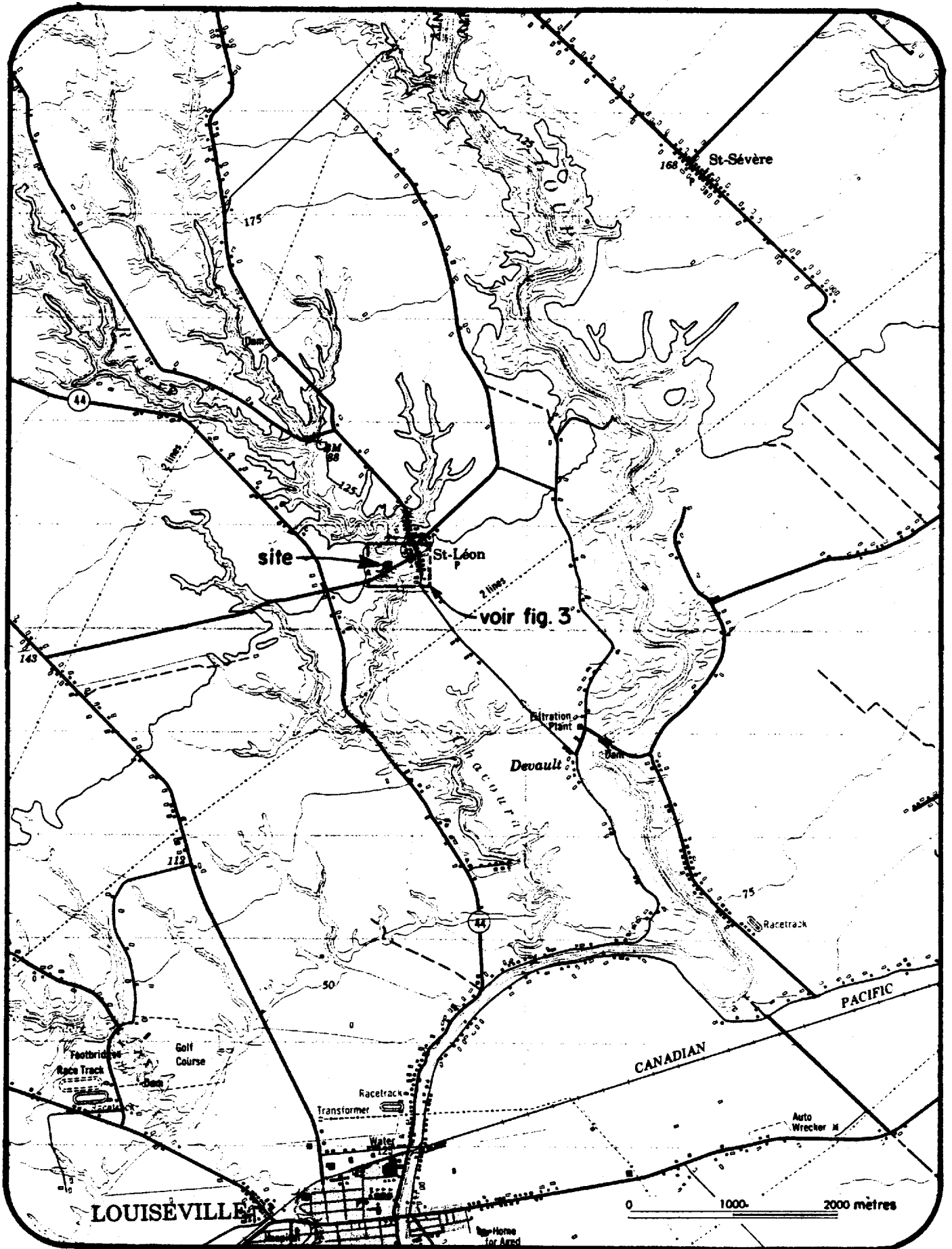


Fig. 2 — LOCALISATION DE ST-LÉON.

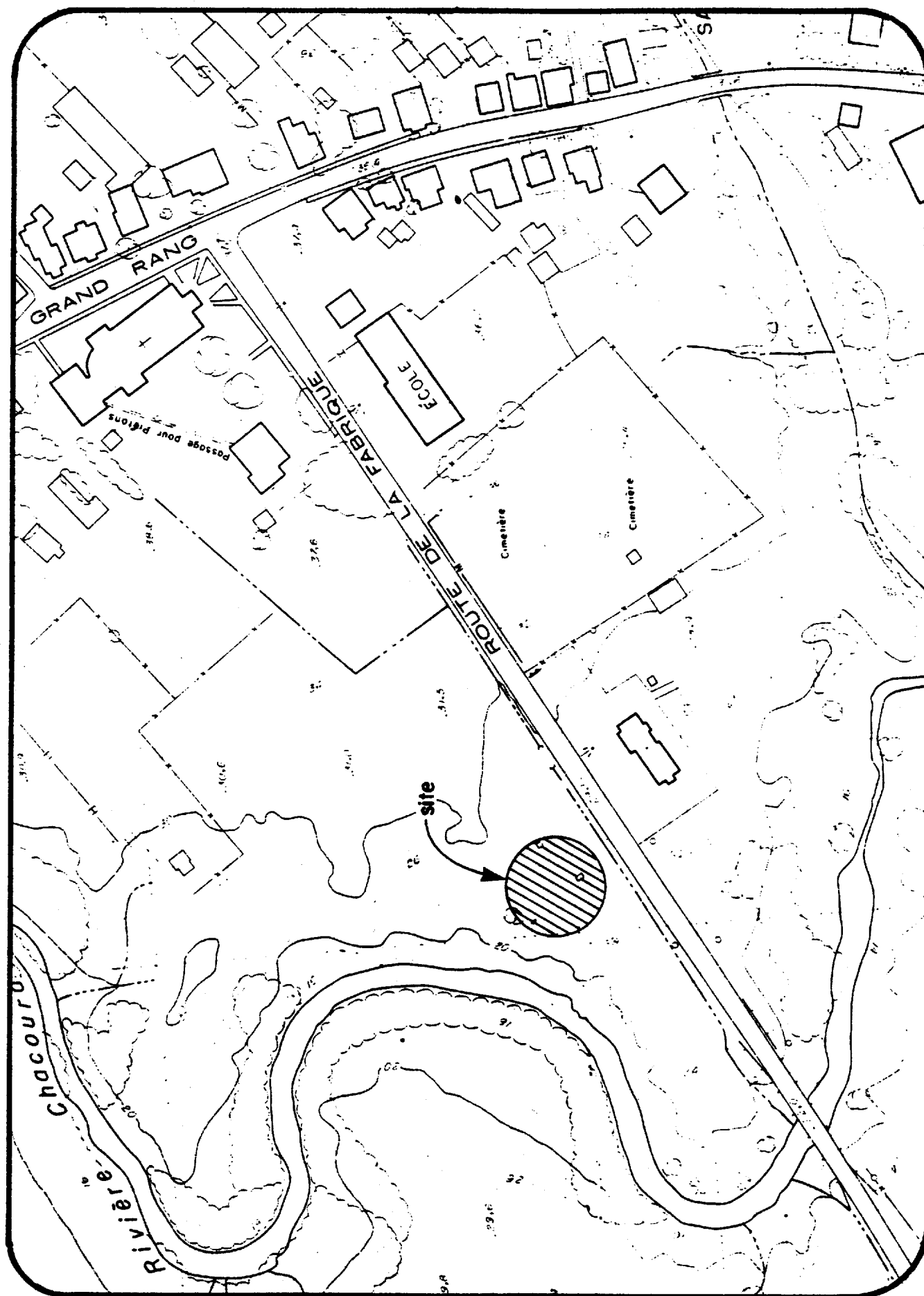


Fig. 3 — LOCALISATION DU SITE À ST-LÉON.

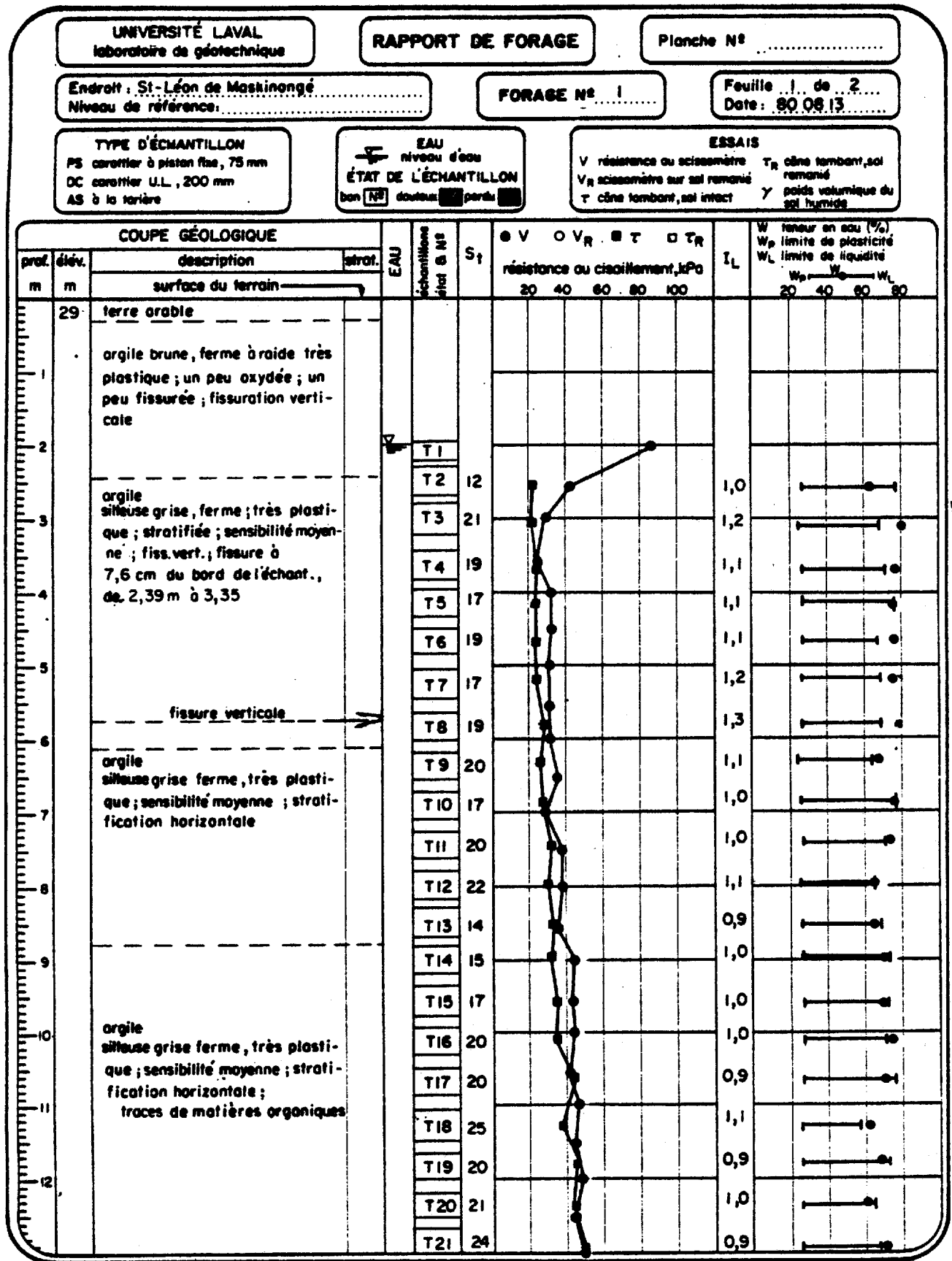


Fig. 4 — RAPPORT DE FORAGE N°1.
ST-LÉON

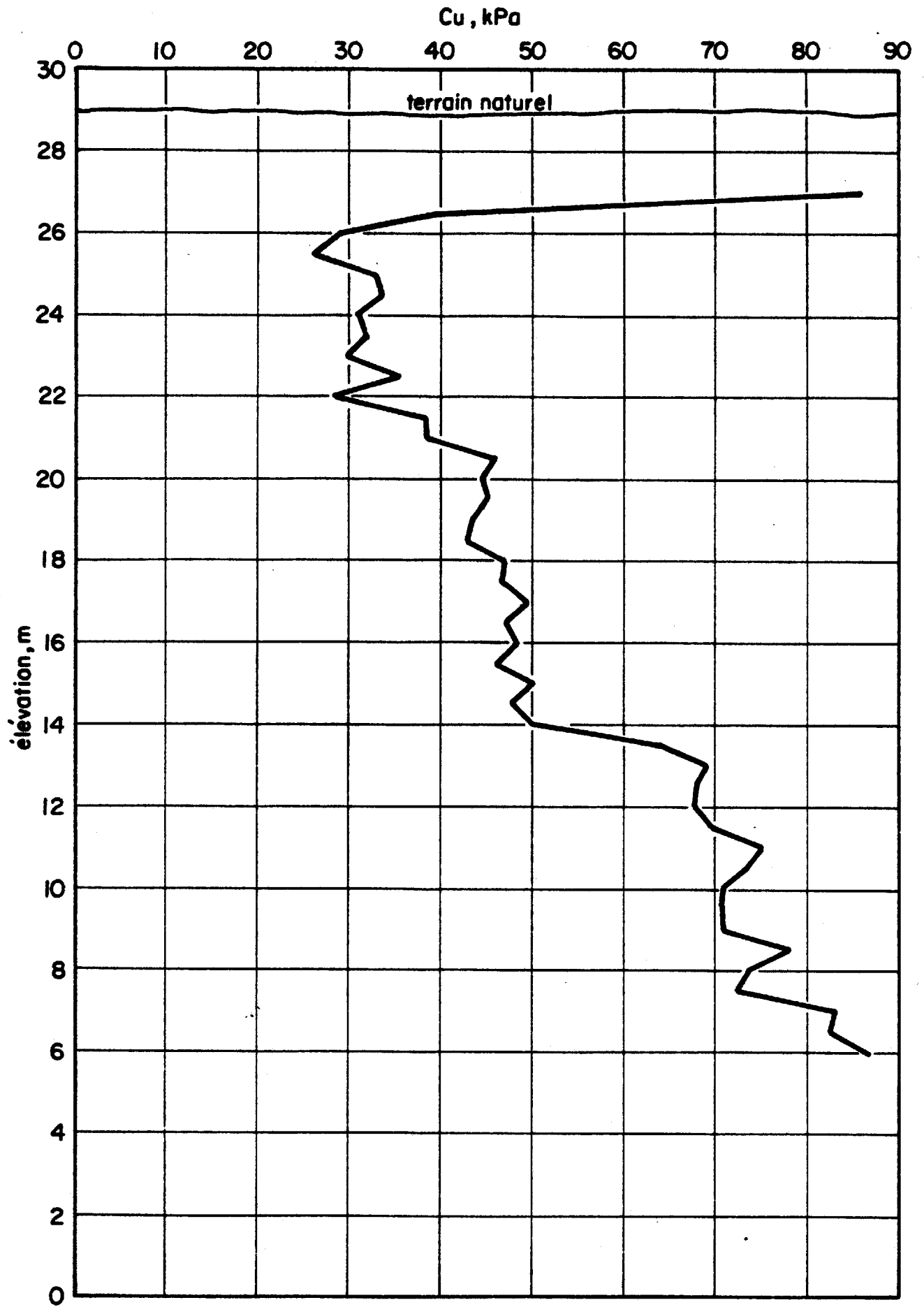


Fig. 6 — PROFIL SCISSOMÉTRIQUE DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT, ST-LÉON.

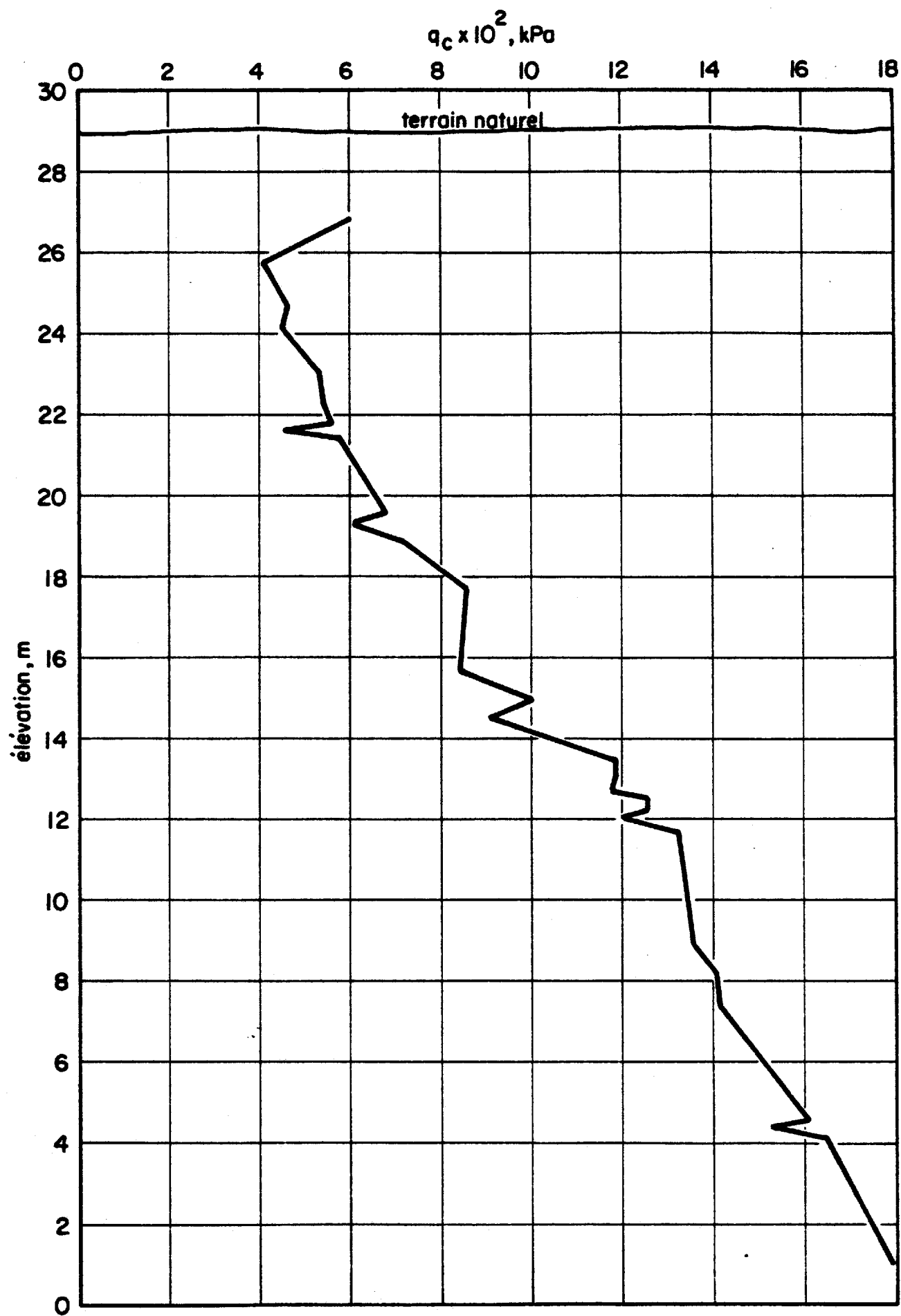


Fig. 7 — PROFIL DE q_c , ST-LÉON, PIÉZOCÔNE N° 1.

$$N_k = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{C_u}$$

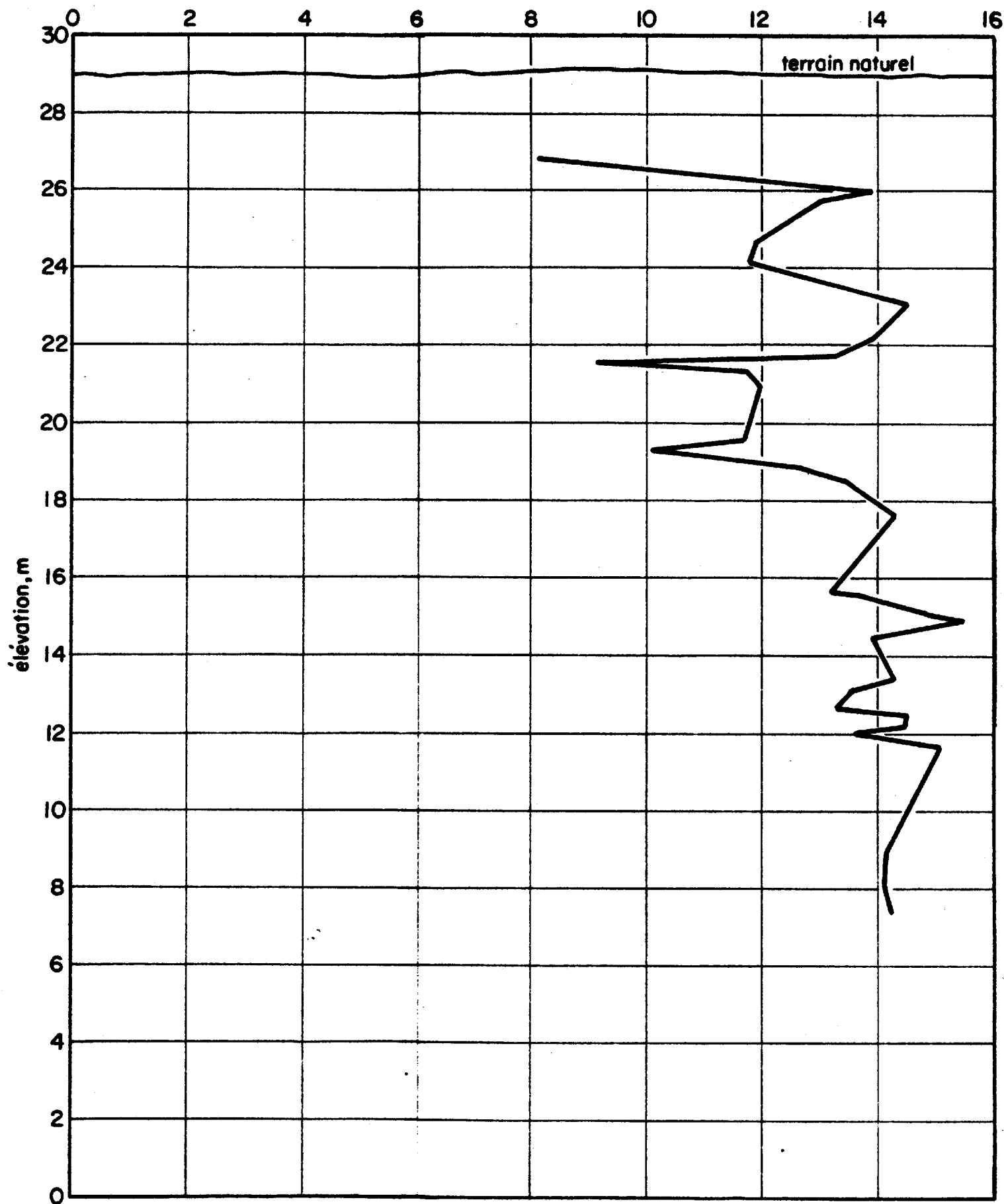


Fig. 8 — PROFIL DE N_k , ST-LÉON, PIÉZOCONE N° 1.



Fig. 9 — PROFIL DE u_T , ST-LÉON, PIÉZOCÔNE N° 1.

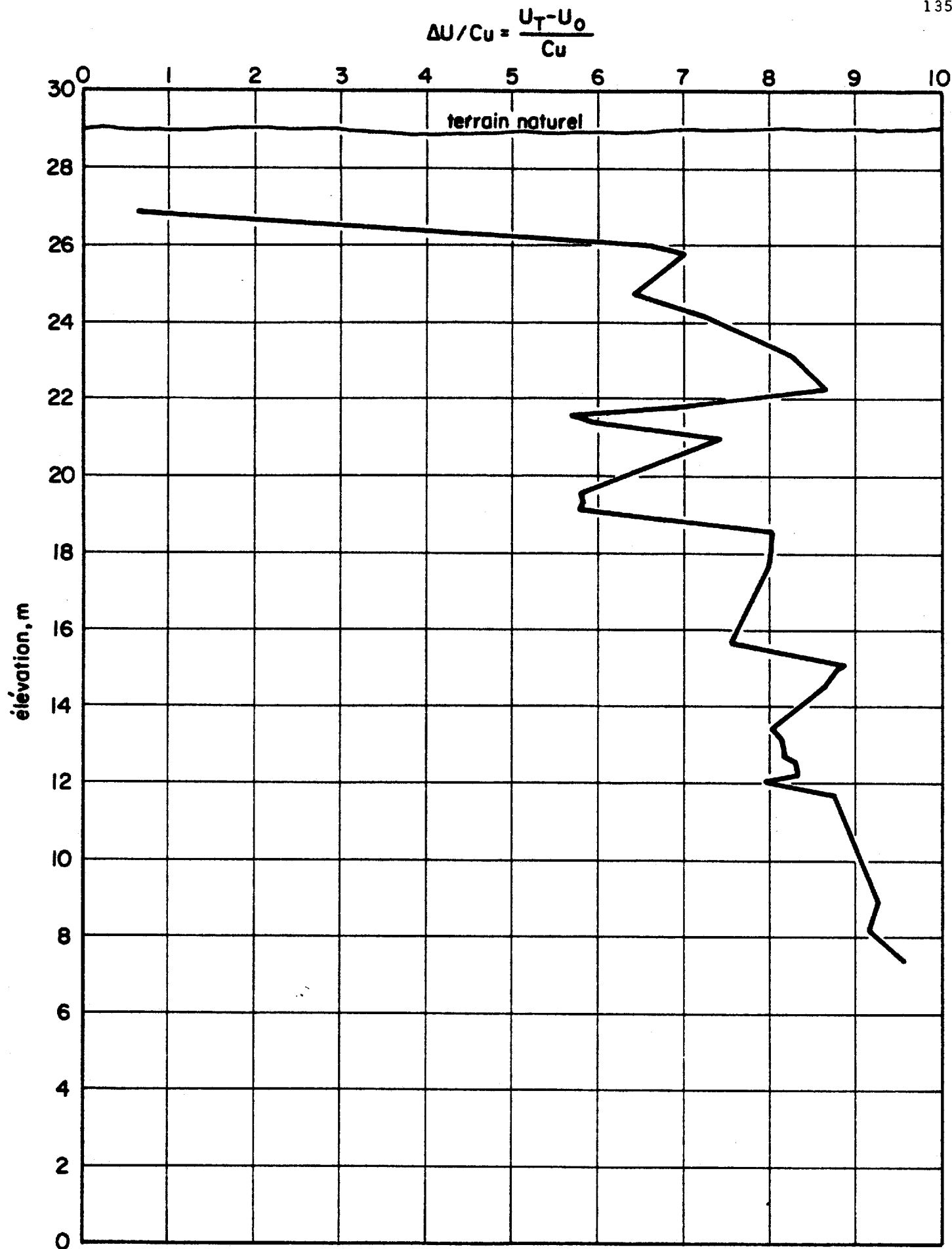


Fig.10 — PROFIL DE $\Delta U / C_u$, ST-LÉON , PIÉZOCÔNE N° 1.

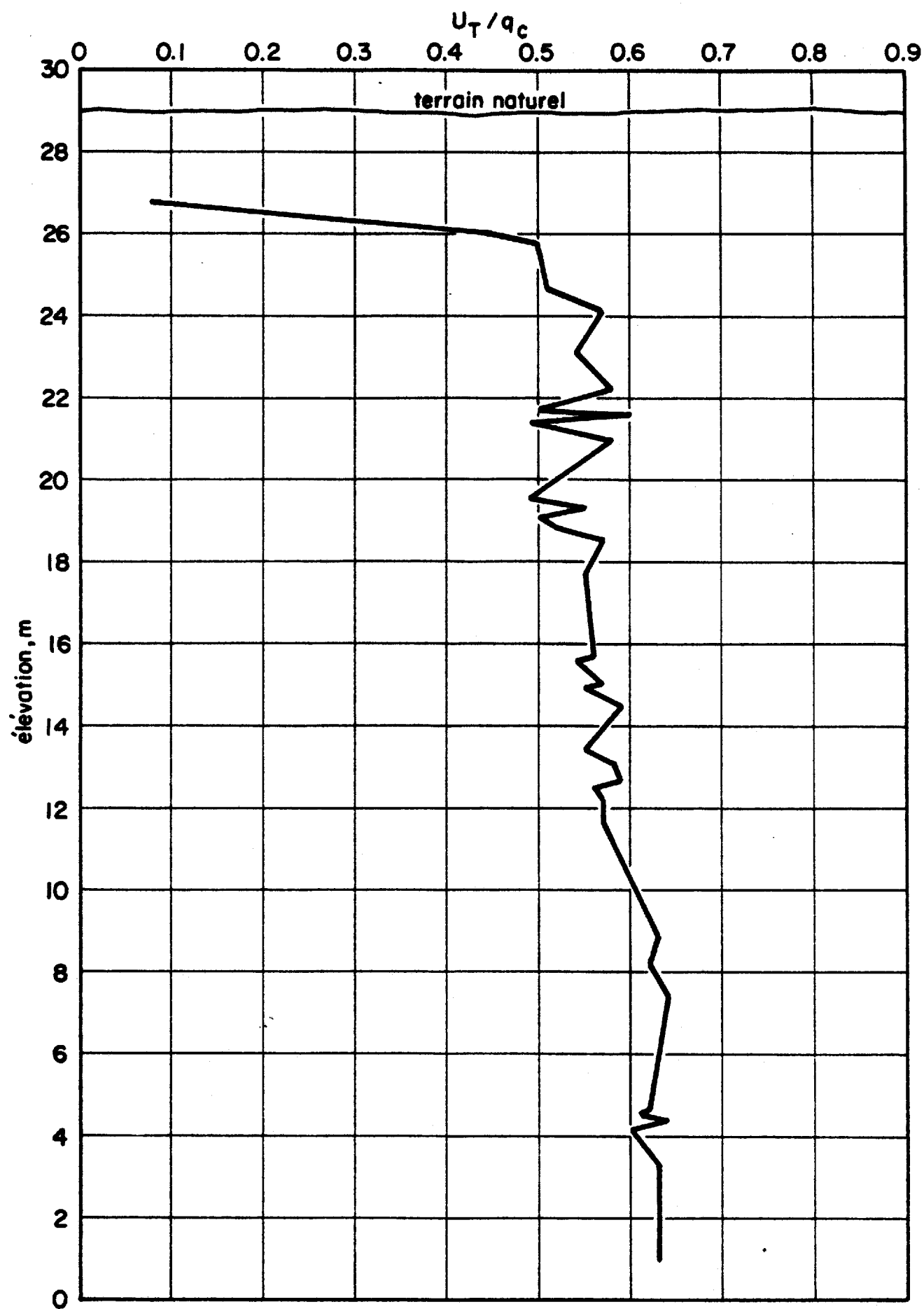
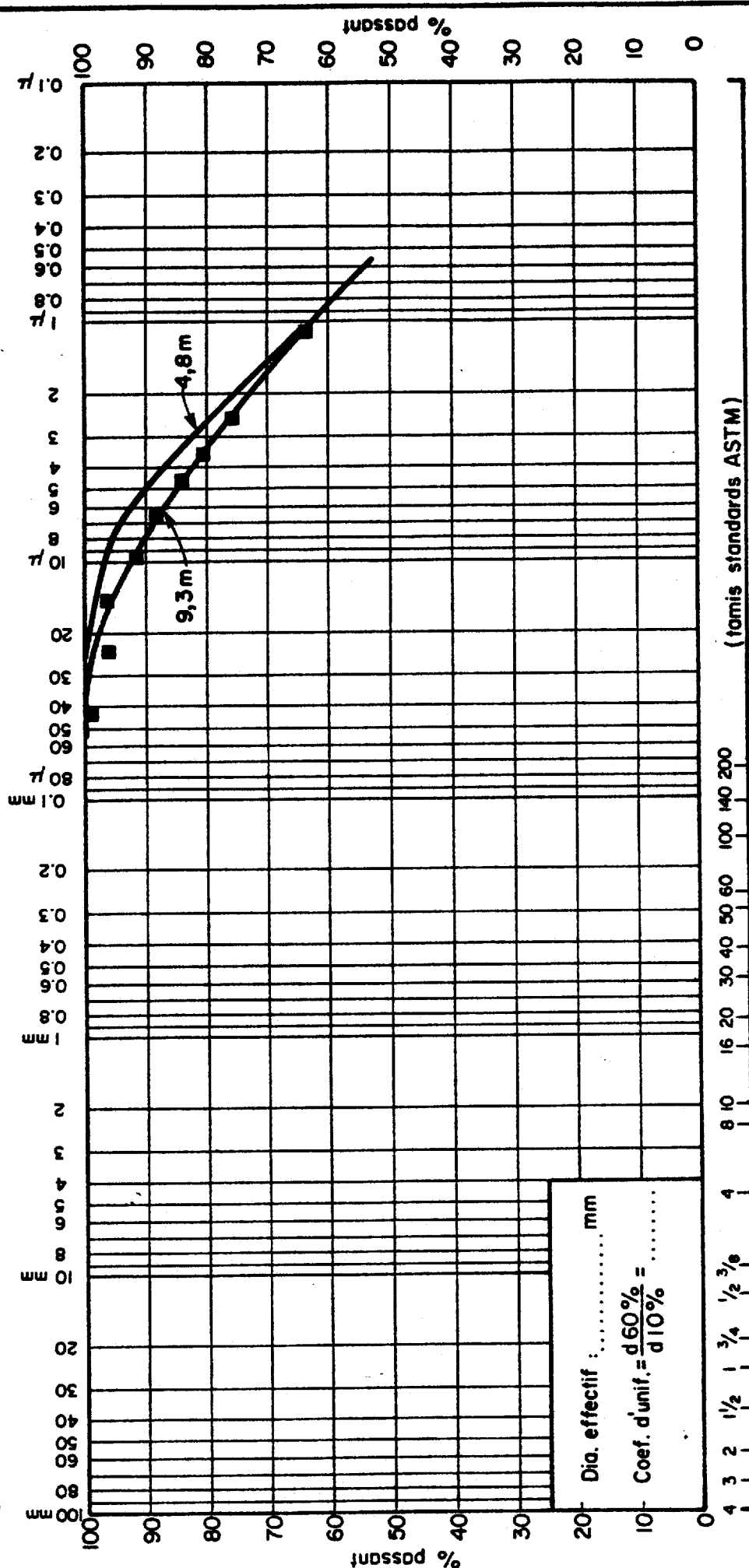


Fig. II — PROFIL DE U_T/q_c , ST-LÉON, PIÉZOCÔNE N°1.

Provenance : St-Léon
Échantillon N° F1-T16-E2, F1-T7-E2
Profondeur : 10,03 à 10,16 m ; 5,16 à 5,28 m

UNIVERSITÉ LAVAL
laboratoire de géotechnique
GRANULOMÉTRIE

Responsable : SLE... 80 SL SED I
Technicien : P.F.
Date : Décembre 80



gravier		sable		silt		argile	
grossier	moyen	grossier	moyen	grossier	moyen	grossier	moyen
fin		fin		fin		fin	

Fig. 12 — SÉDIMÉNTOMÉTRIE, ST-LÉON.

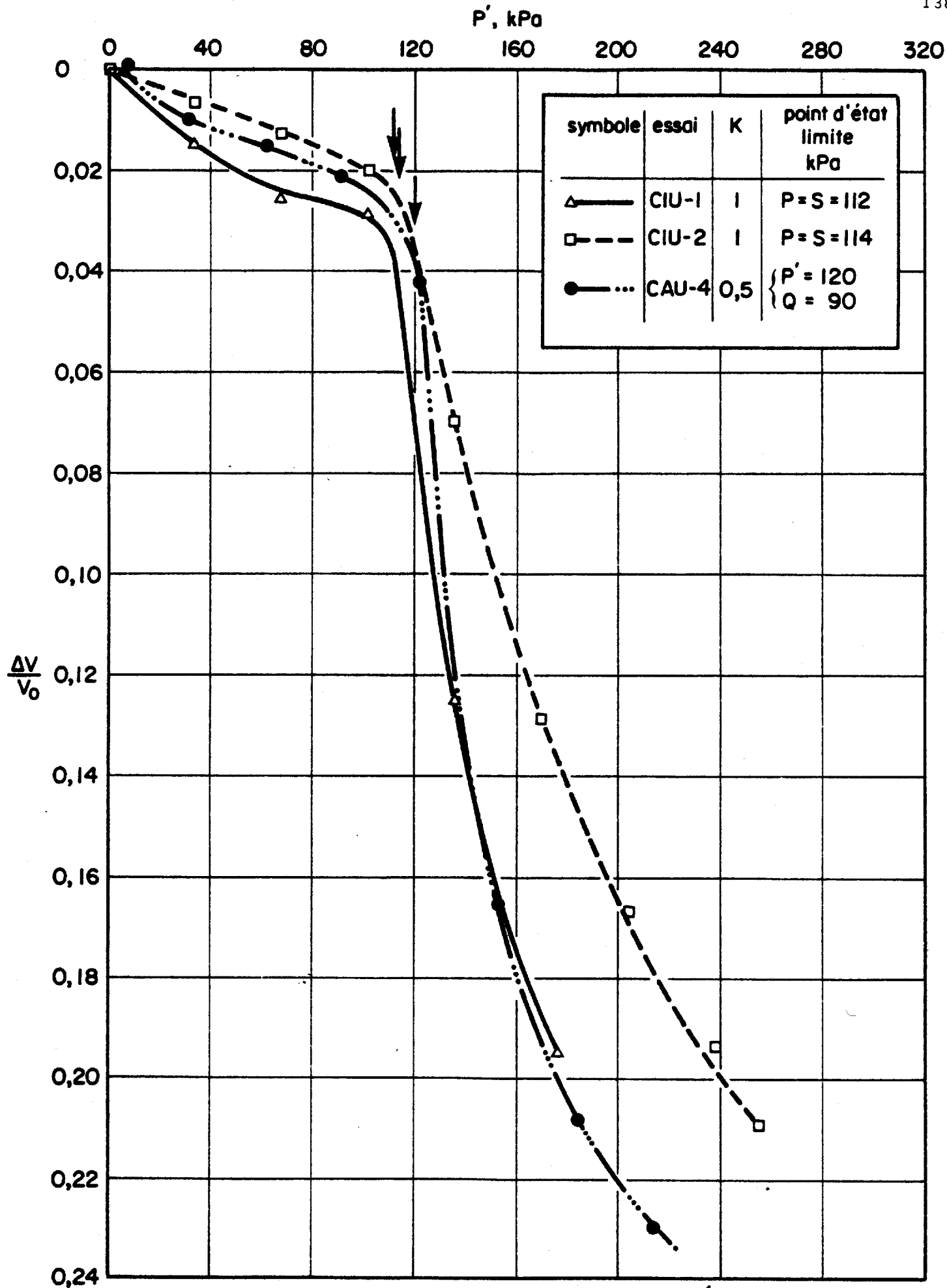


Fig. 13 — CONSOLIDATION TRIAXIALE ($\Delta V / V_0$) vs P' , ST-LÉON, PROFONDEUR: 10m.

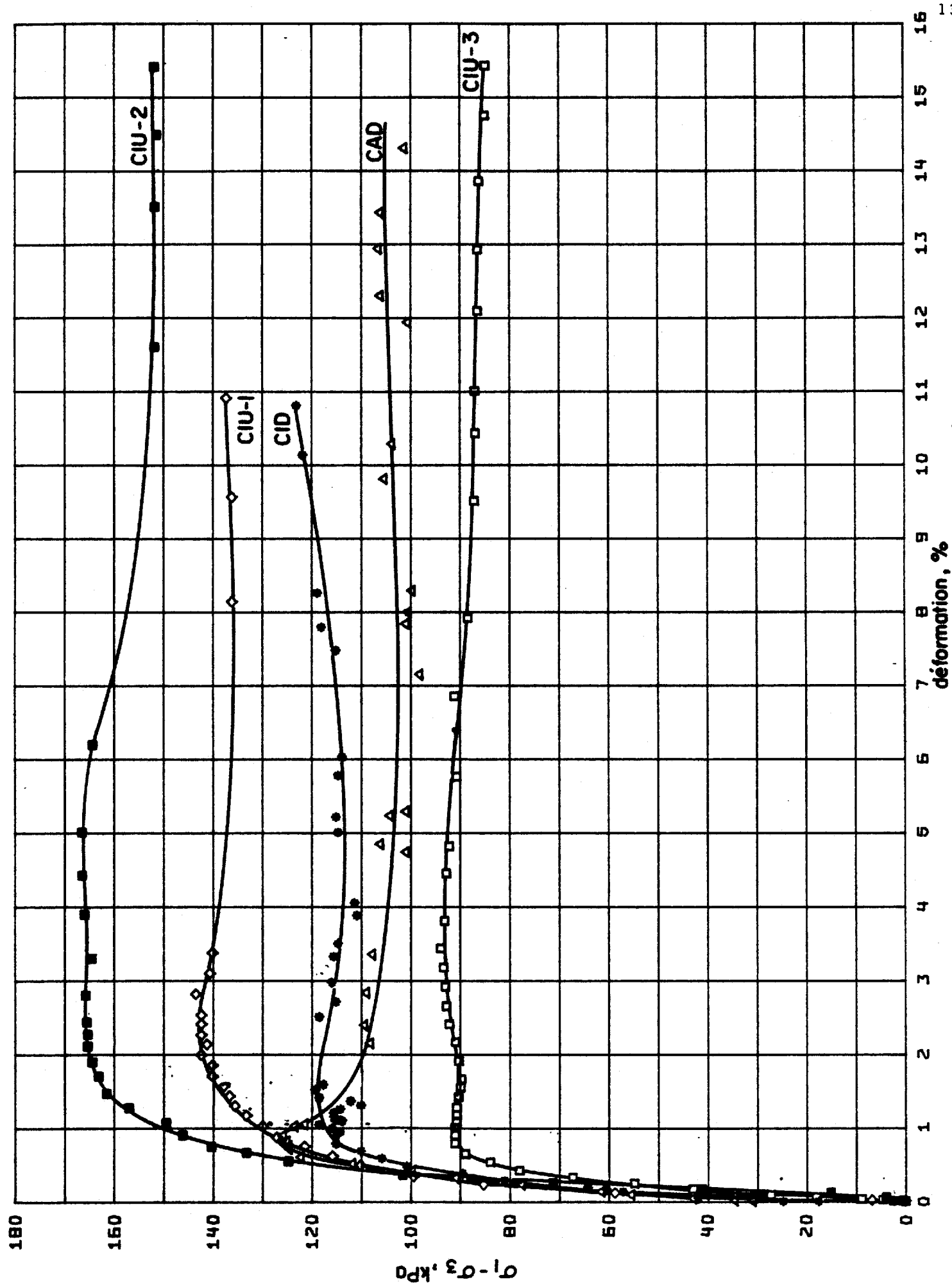


Fig. 14 — CISAILLEMENT TRIAXIAL $\sigma_1 - \sigma_3$ vs DÉFORMATION, ST-LÉON, PROFONDEUR : 10 m.

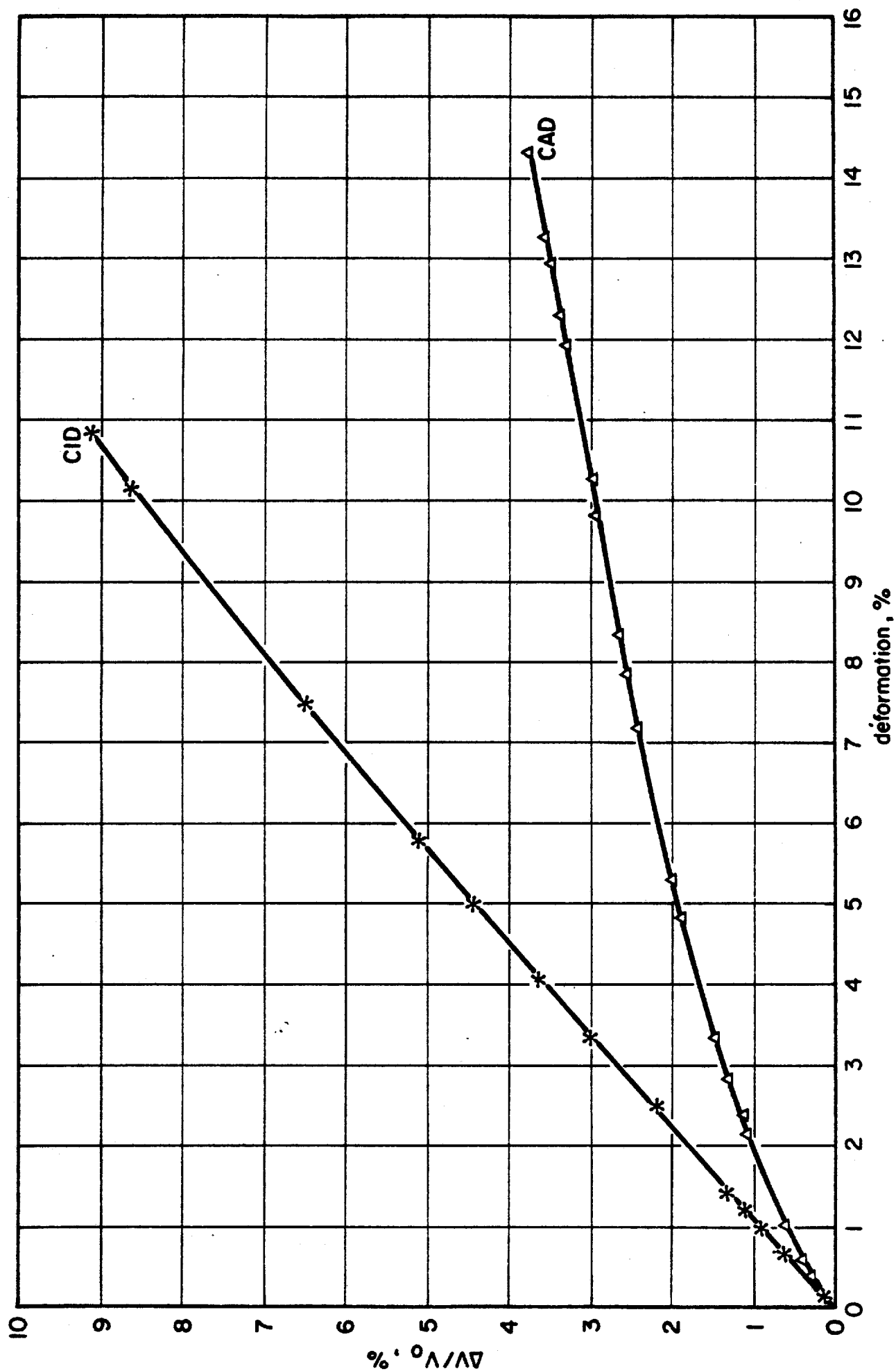


Fig.15 — ESSAIS TRIAXIAUX DRAINÉS: $\Delta V/V_0$ vs DÉFORMATION, ST-LÉON, PROFONDEUR: 10 m.

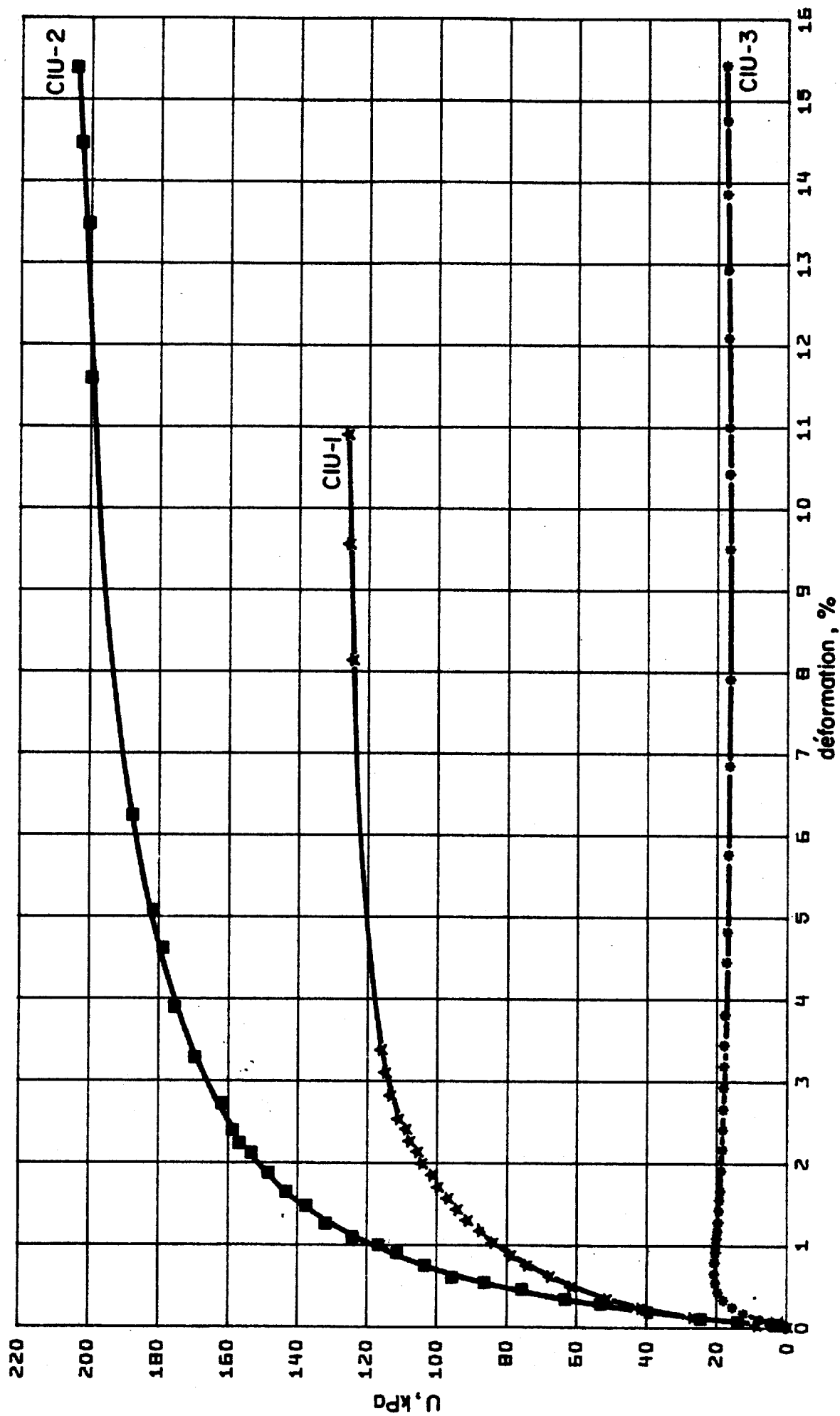


Fig.16 — CISAILEMENT TRIAXIAL: U vs DÉFORMATION, ST-LÉON, PROFONDEUR: 10 m.

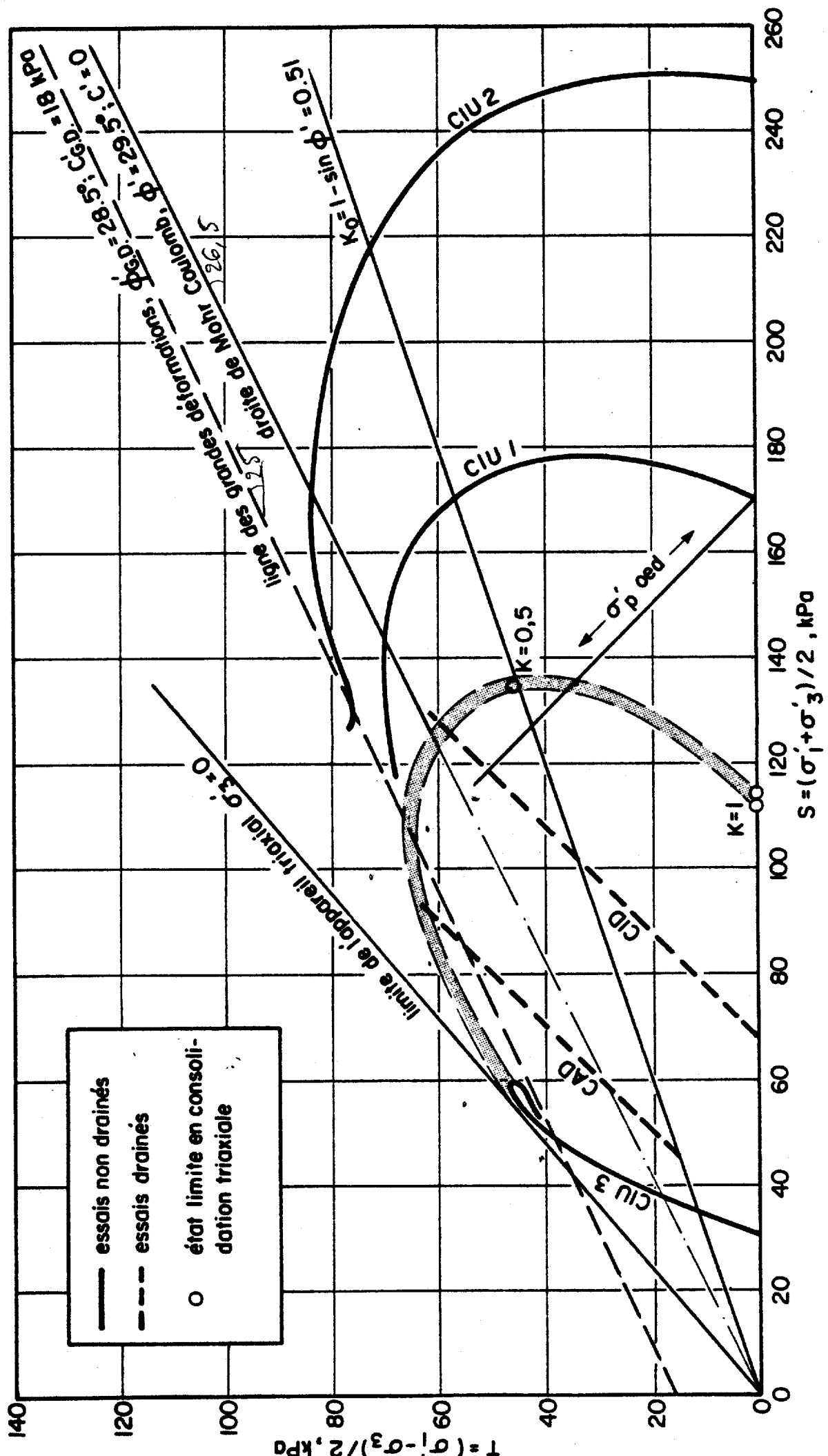


Fig. 17 — CHEMINEMENTS DE CONTRAINTE, COURBE D'ÉTAT LIMITE, ST-LÉON, PROFONDEUR: 10 m.

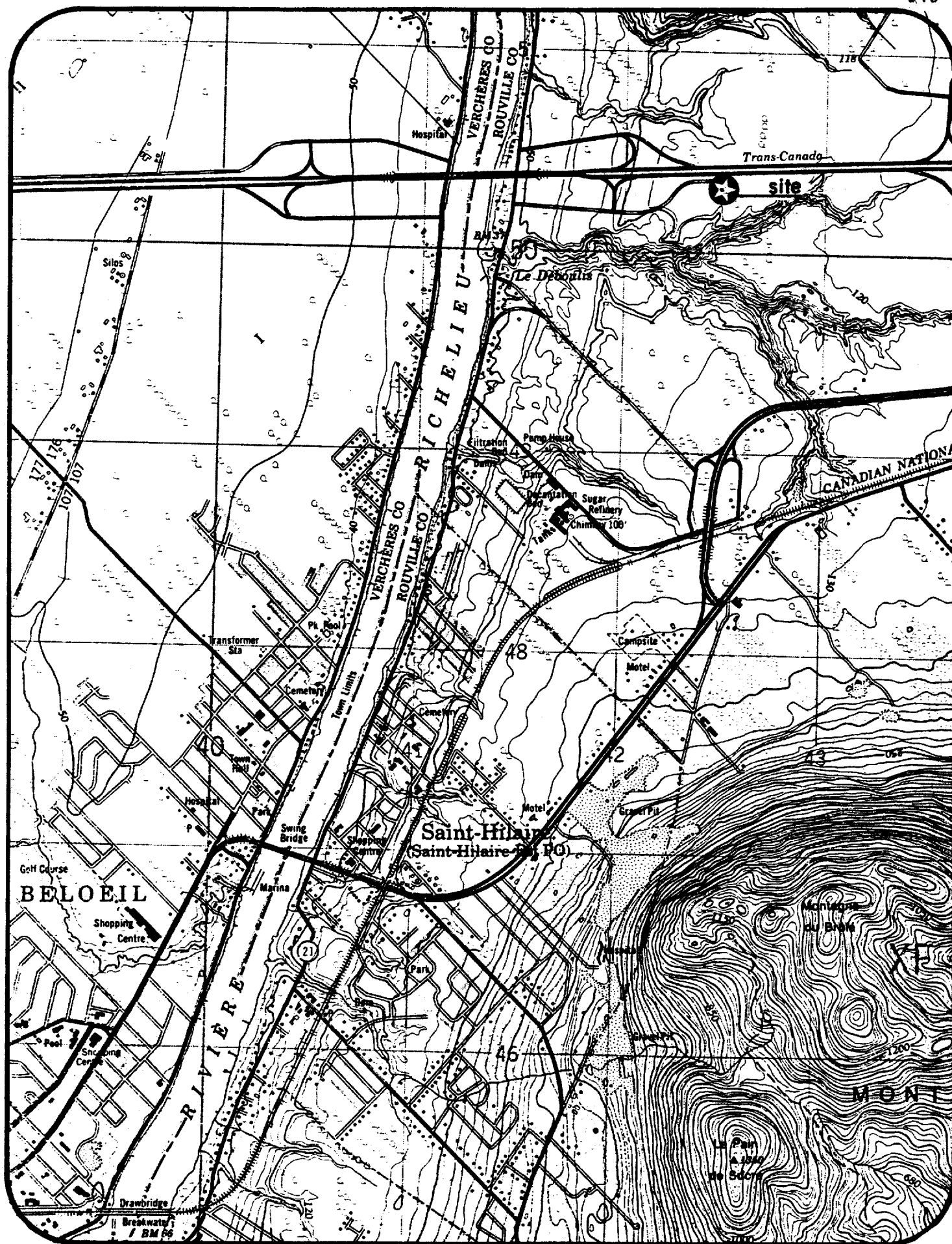


Fig. 18—Localisation du site à St-Hilaire.

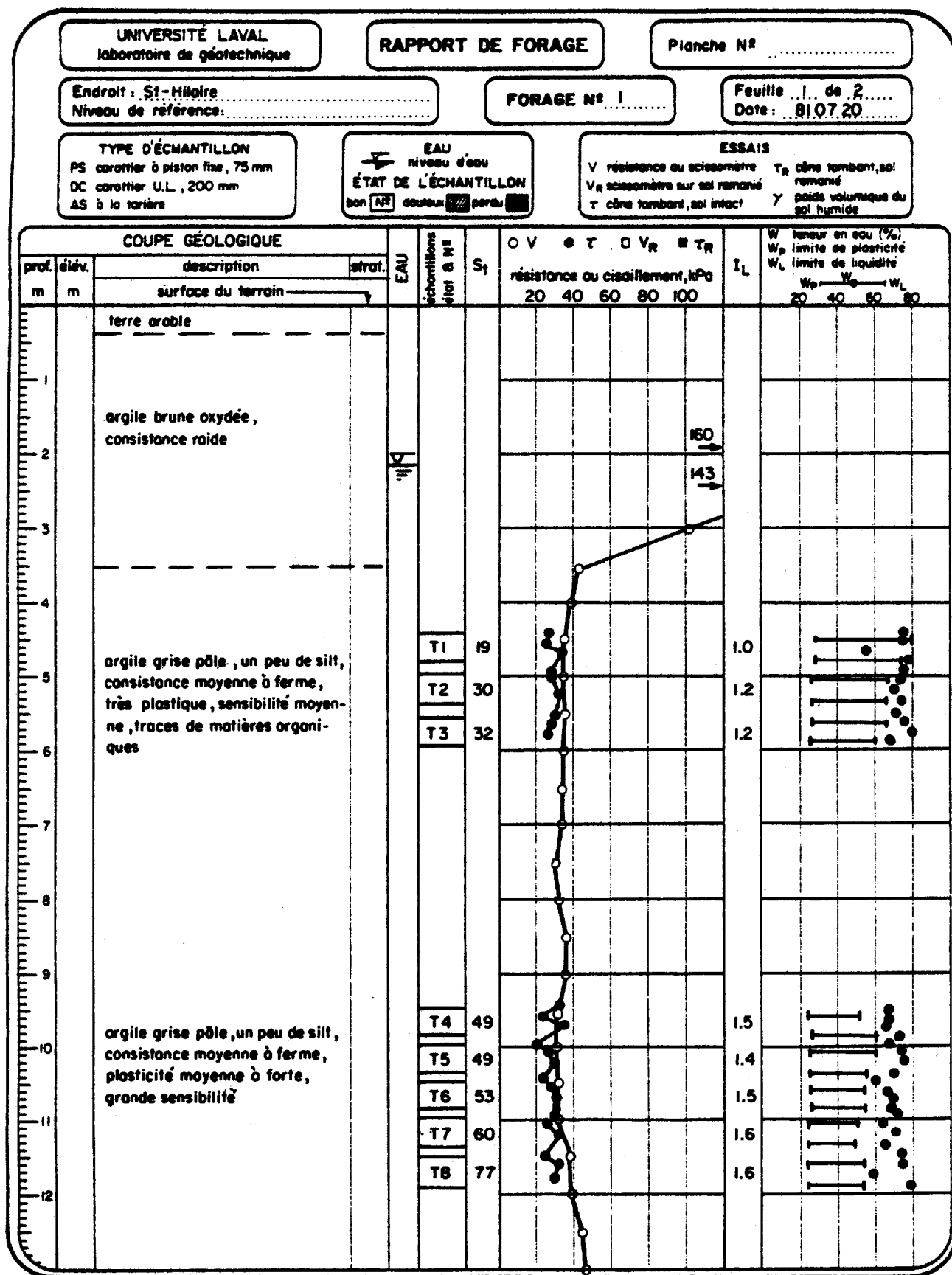
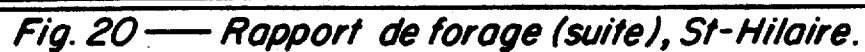


Fig. 19 — Rapport de forage, St-Hilaire:

Date: 80 07 20



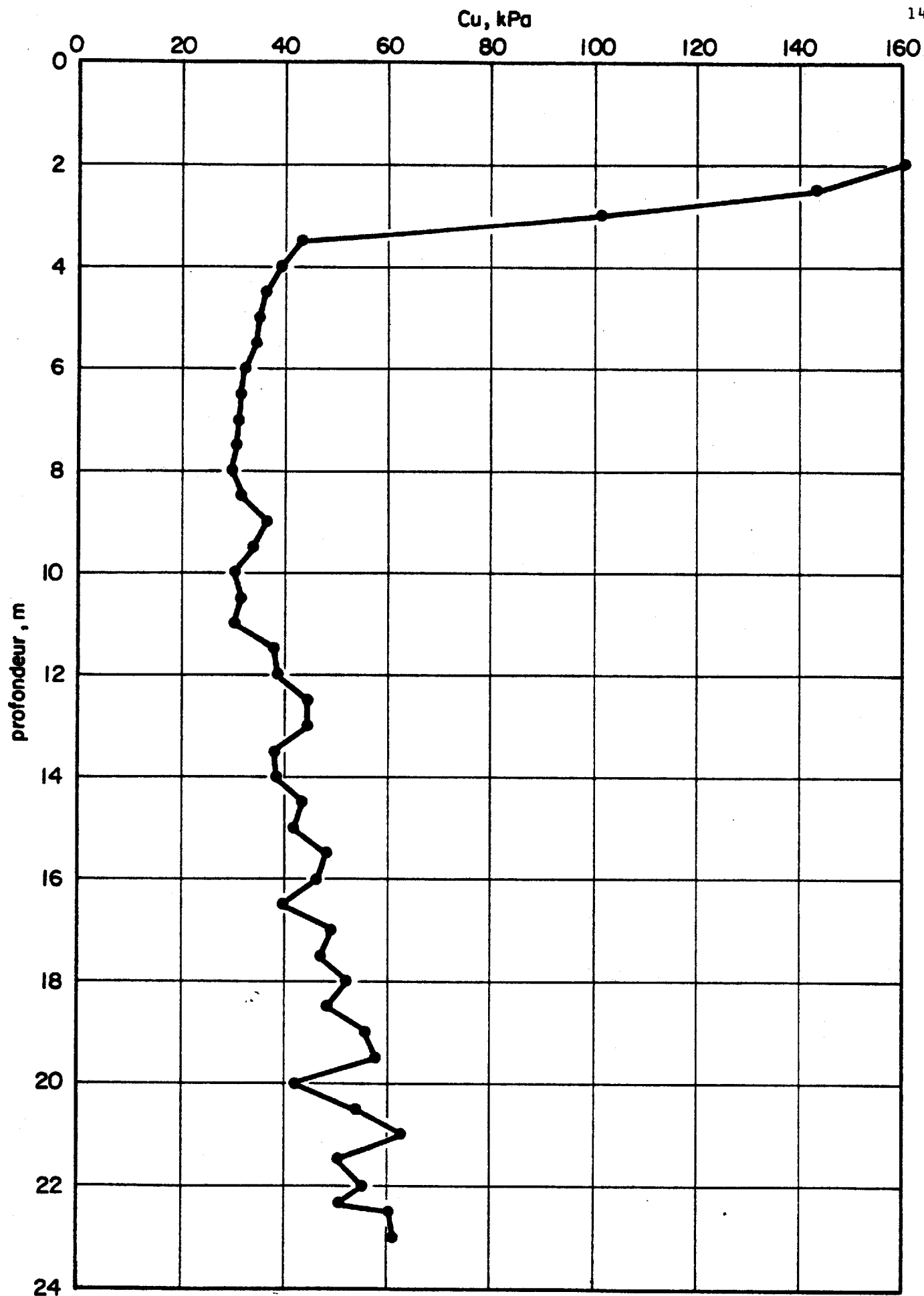


Fig. 21 — Profil scissométrique de la résistance au cisaillement, St-Hilaire.

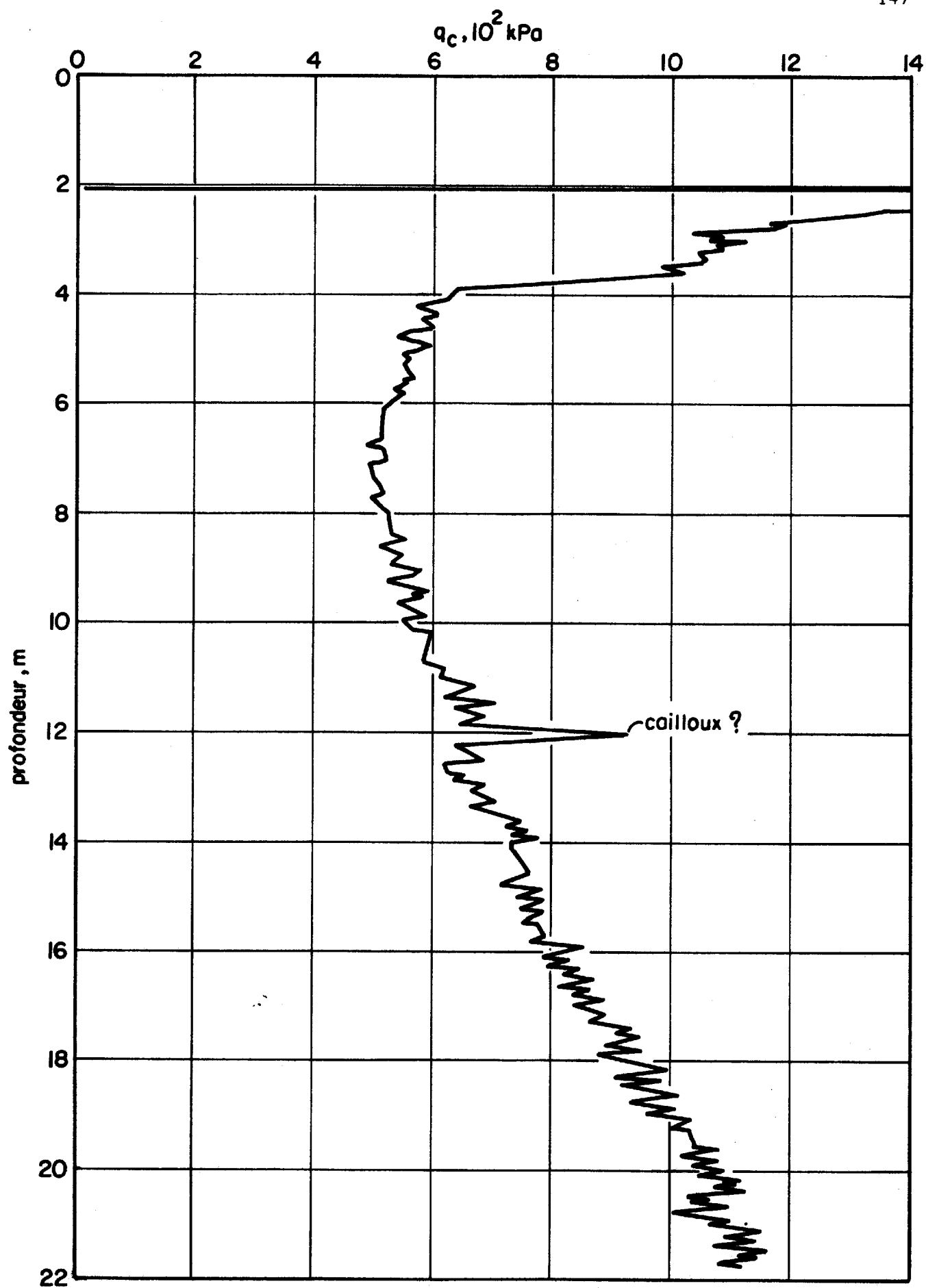


Fig. 22 — Profil de q_c , St-Hilaire.

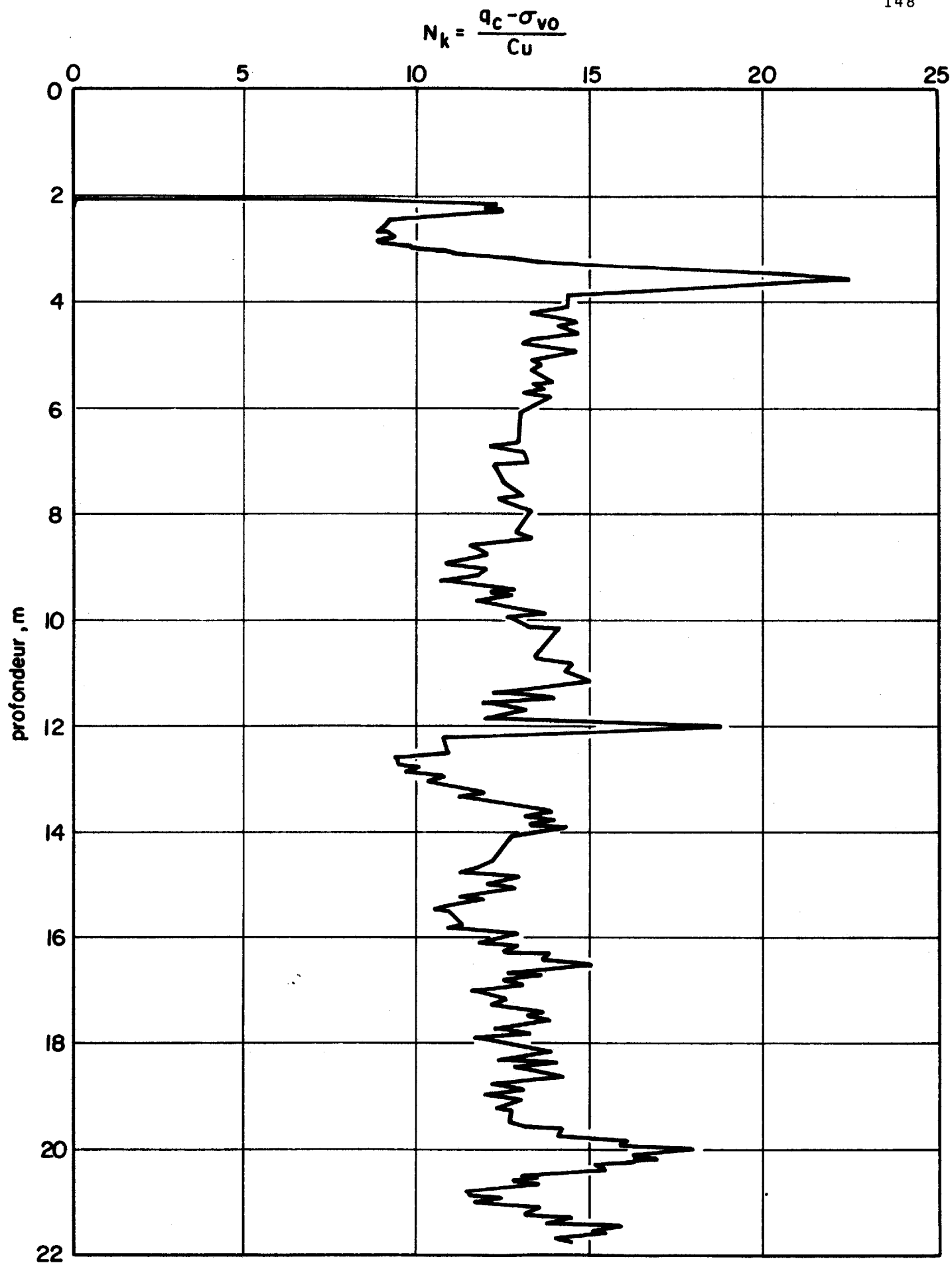


Fig. 23 — Profil de N_k , St-Hilaire.

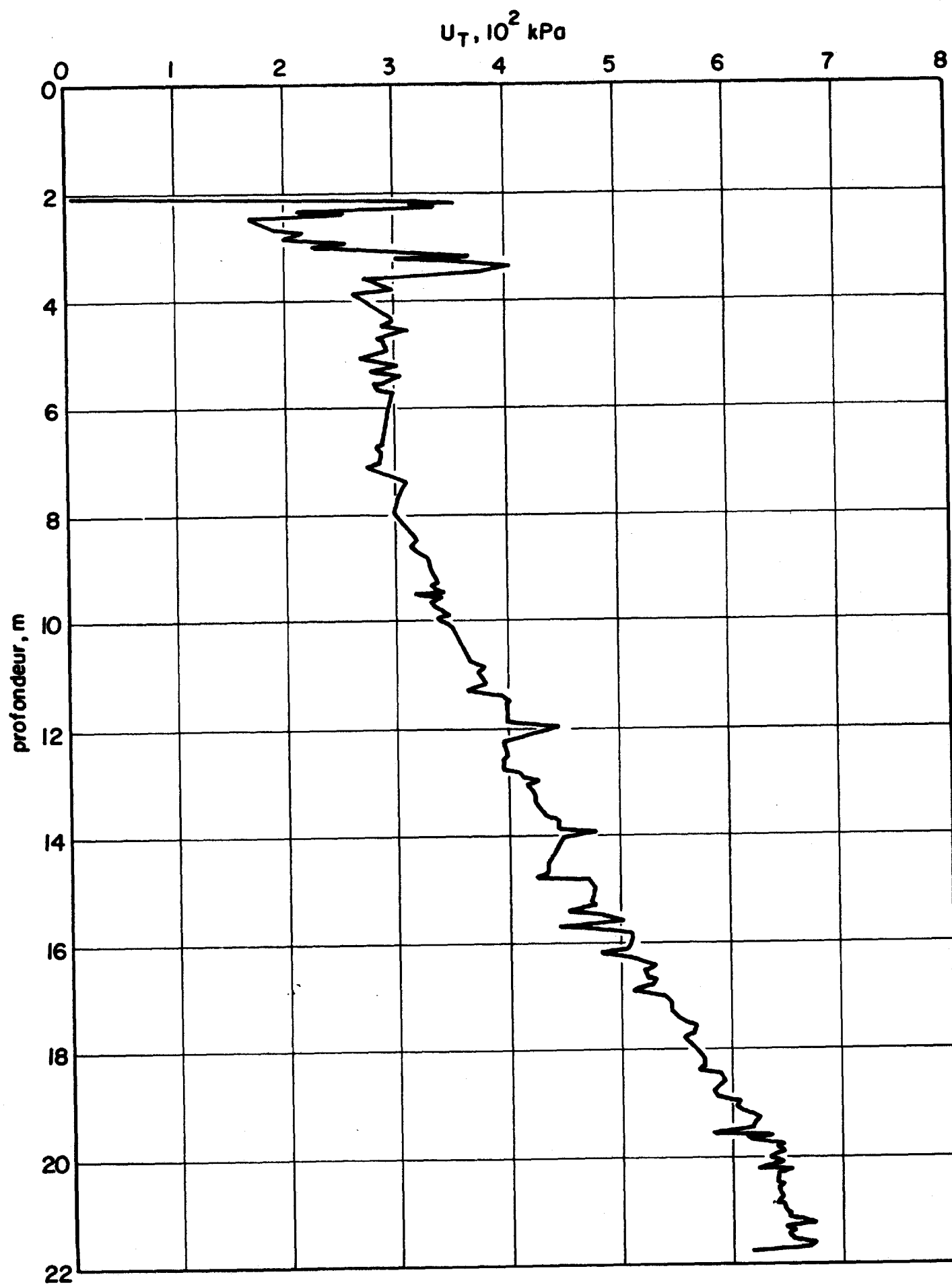


Fig. 24 — Profil de U_T , St-Hilaire.

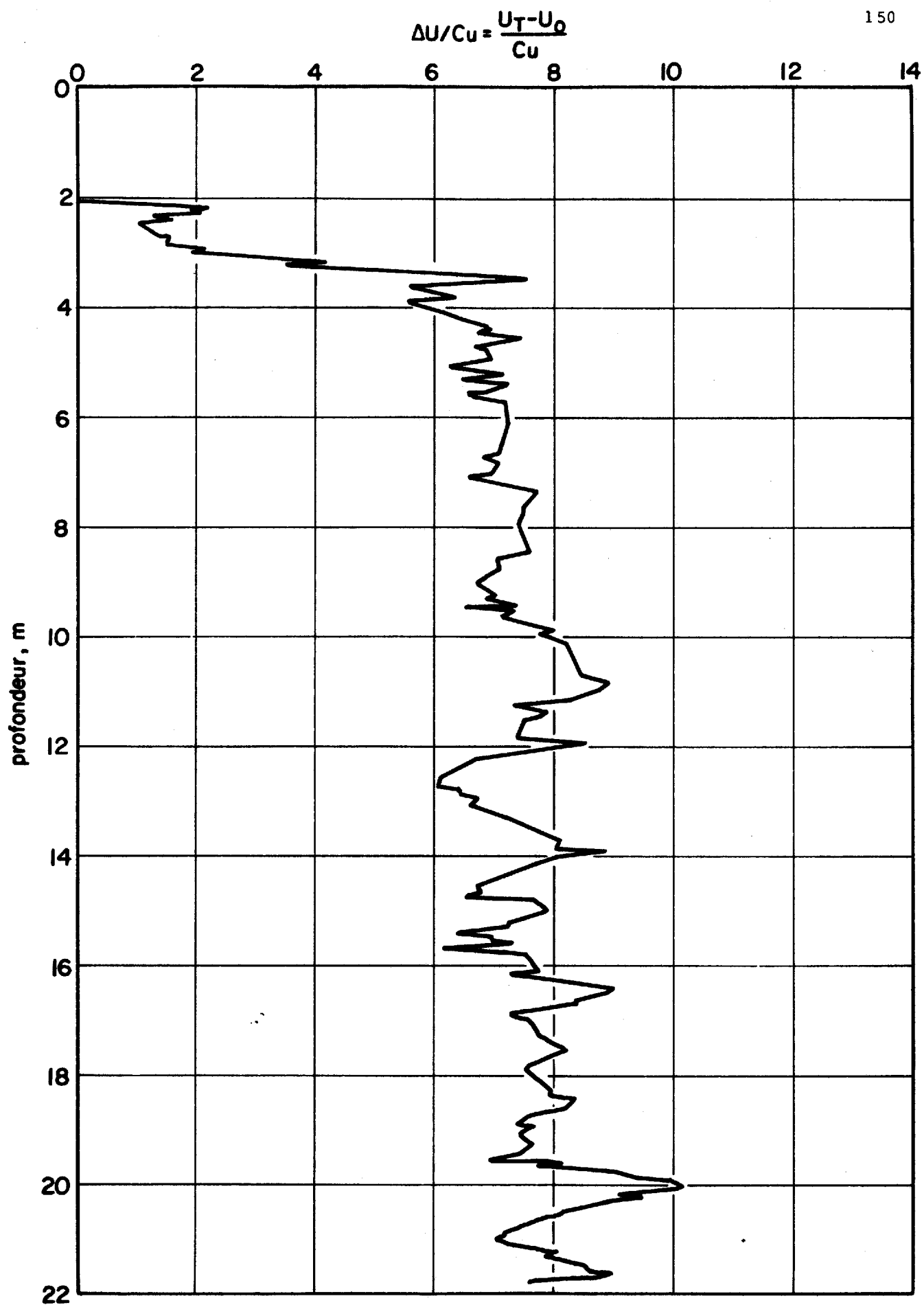


Fig. 25 — Profil de $\Delta U/C_u$, St-Hilaire.

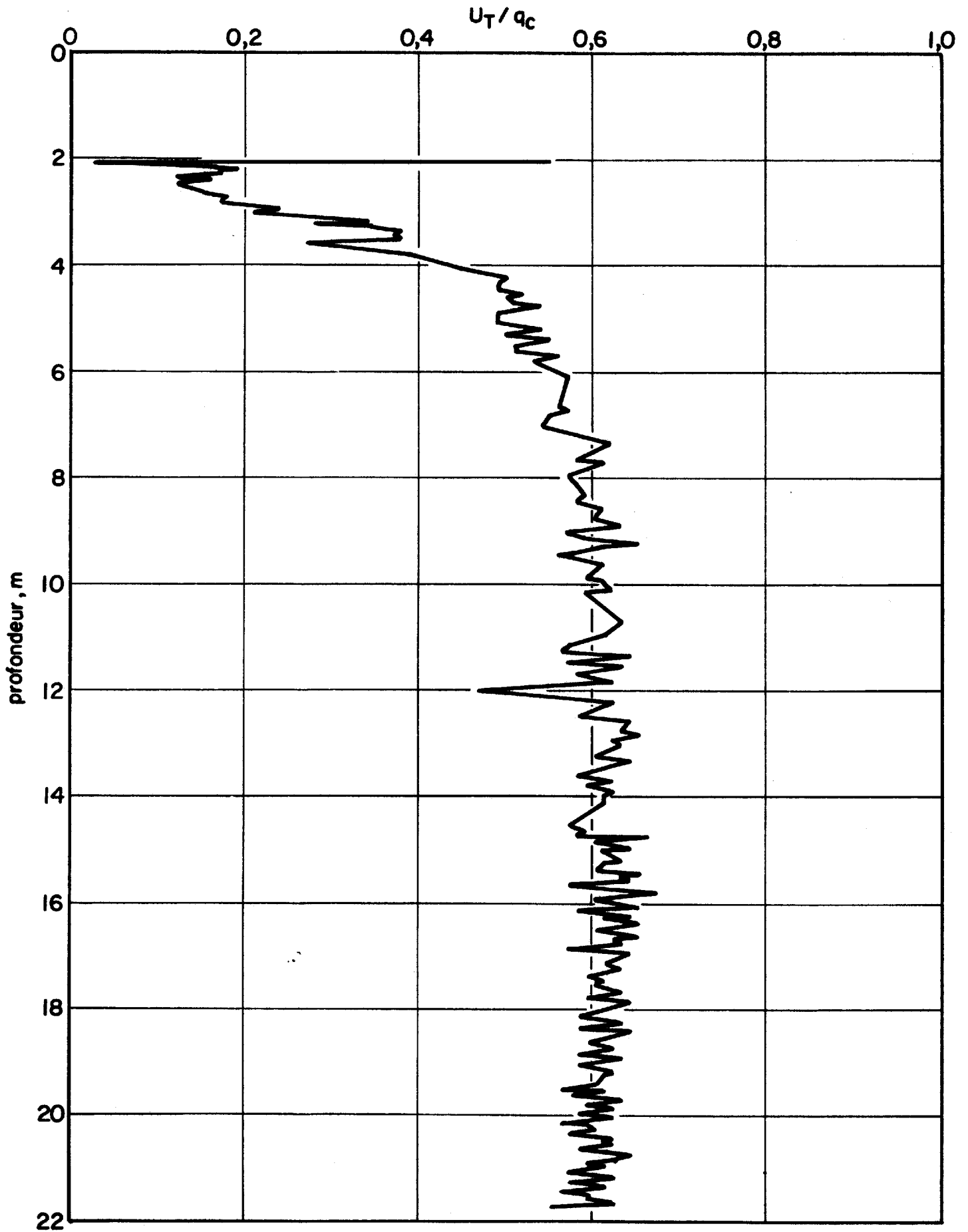


Fig. 26 — Profil de U_T/q_c , St-Hilaire.

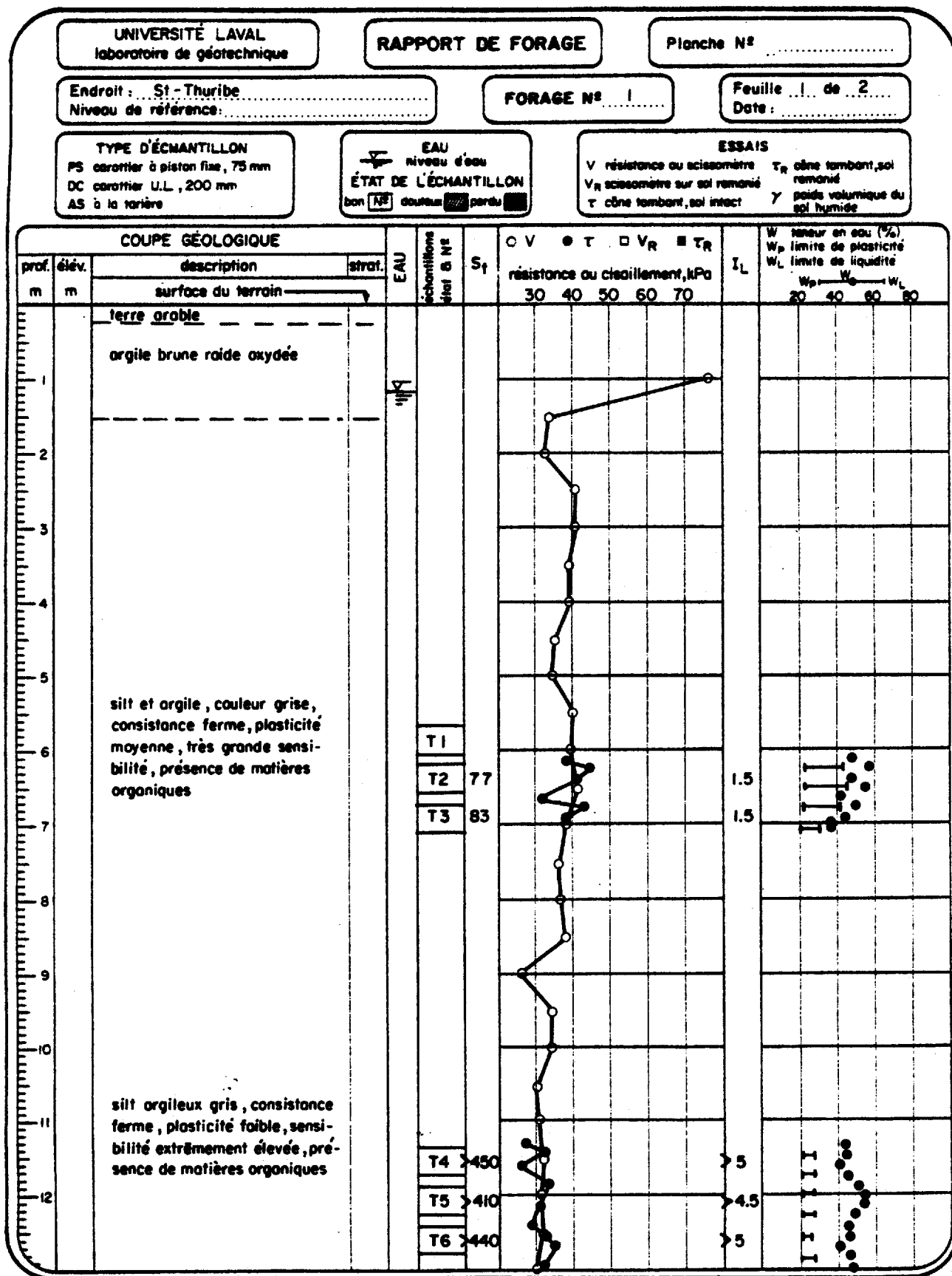


Fig. 28 — Rapport de forage.

St-Thuribe

Endroit : St-Thuribe
Niveau de référence:

FORAGE N° 1

Feuille 2. de 2...
Date:

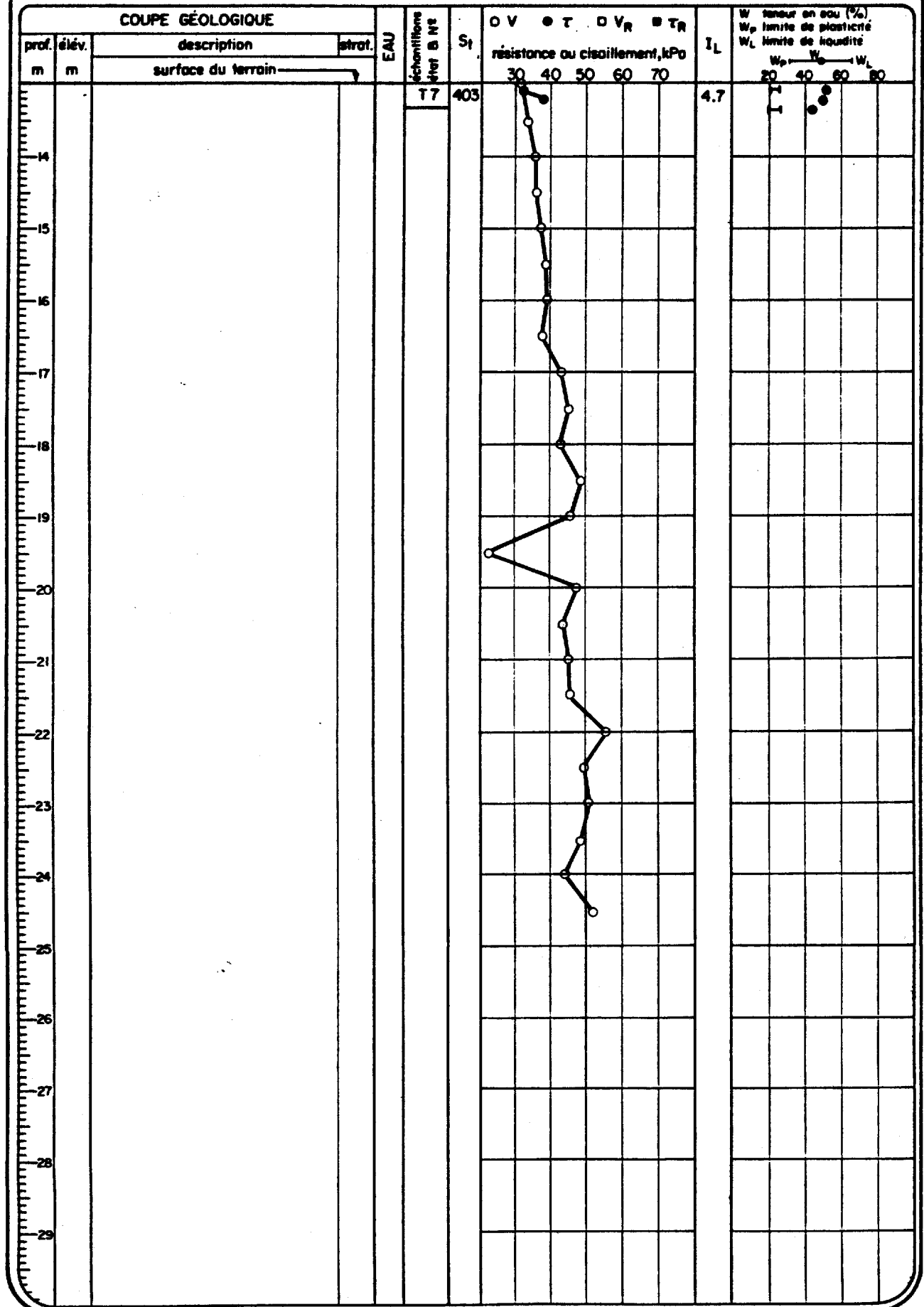


Fig. 29 — Rapport de forage (suite).

St-Thuribe

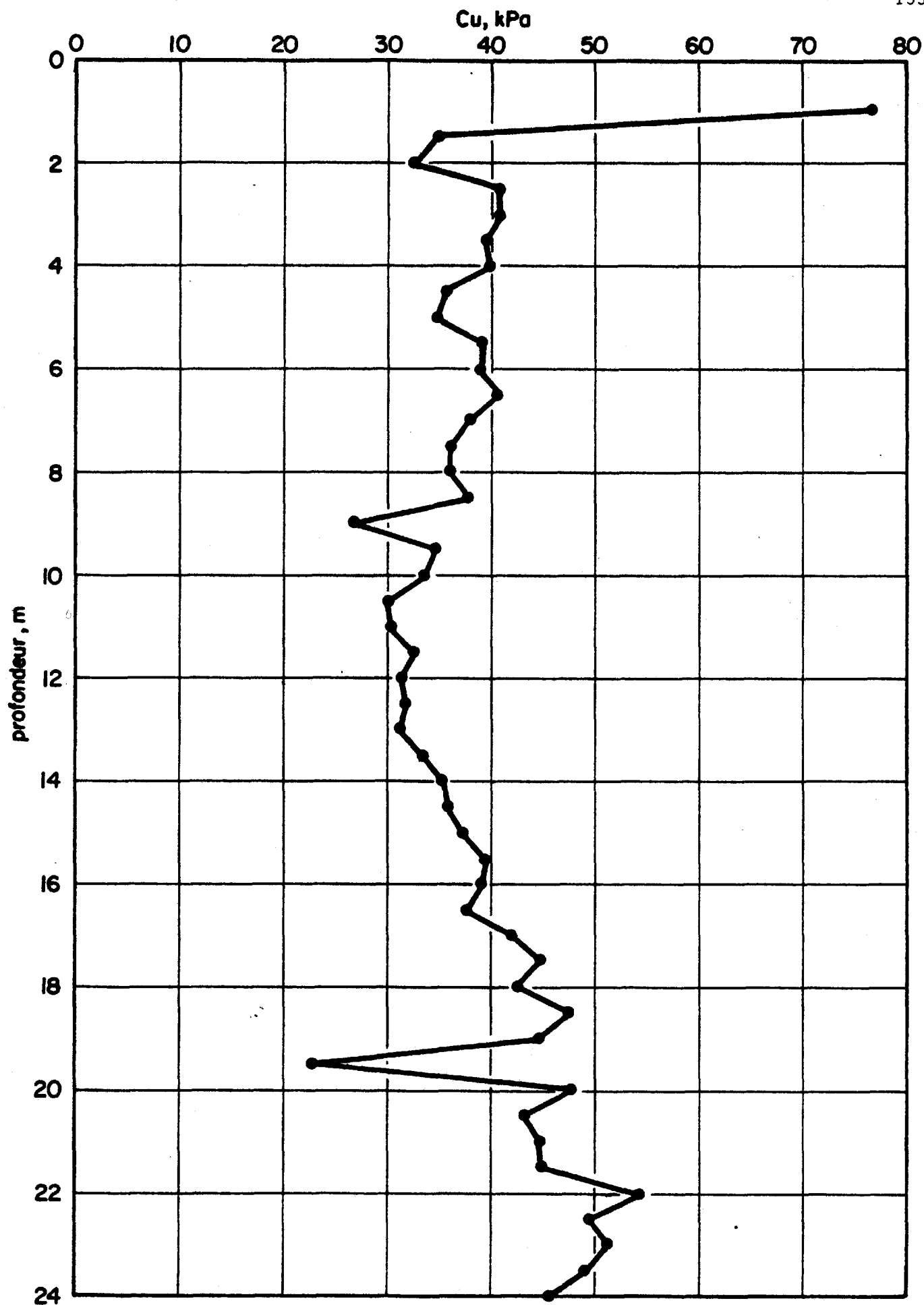


Fig. 30 — Profil scissométrique de la résistance au cisaillement, St-Thuribe.

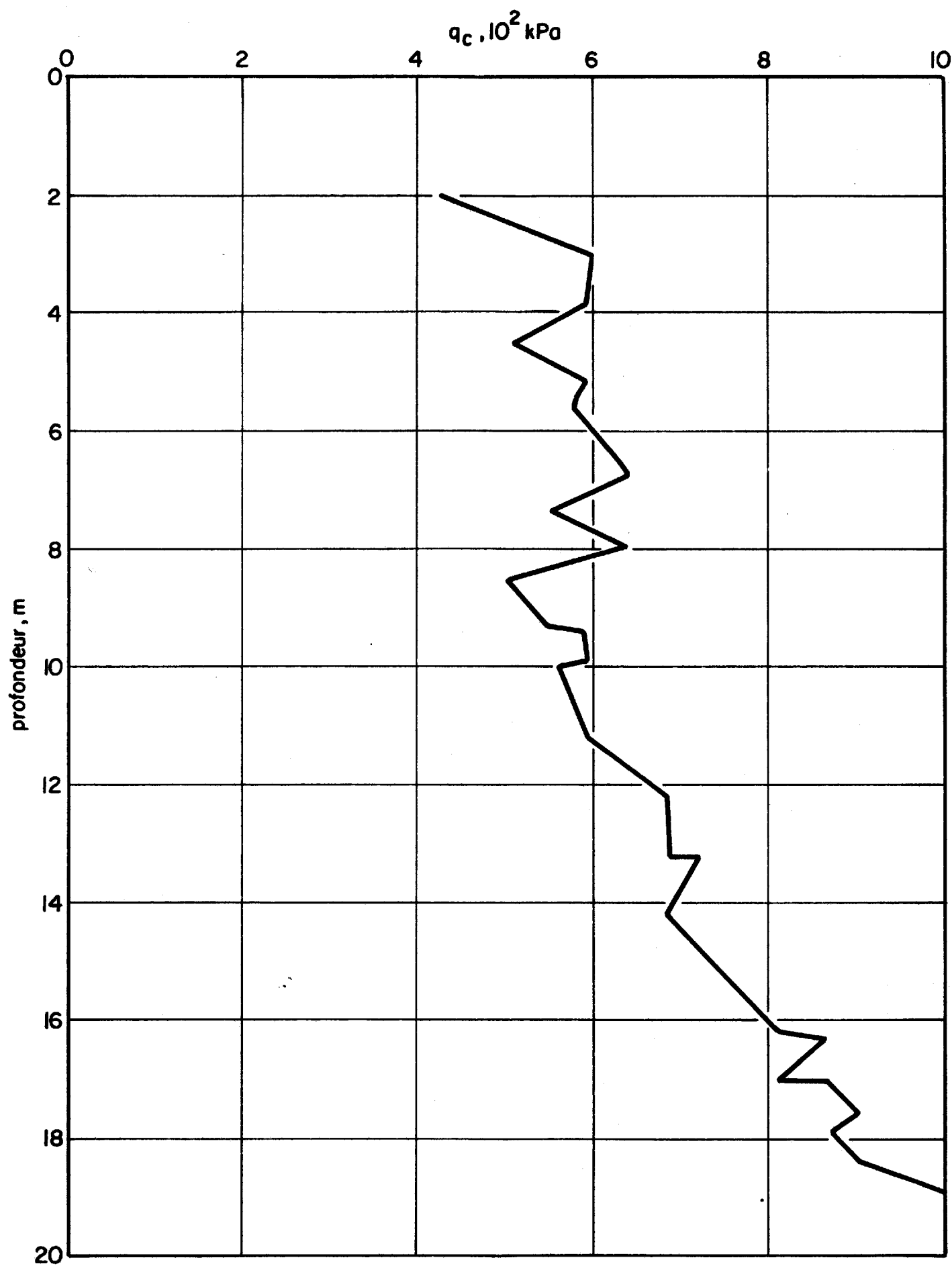


Fig. 31 — Profil de q_c , St-Thuribe.

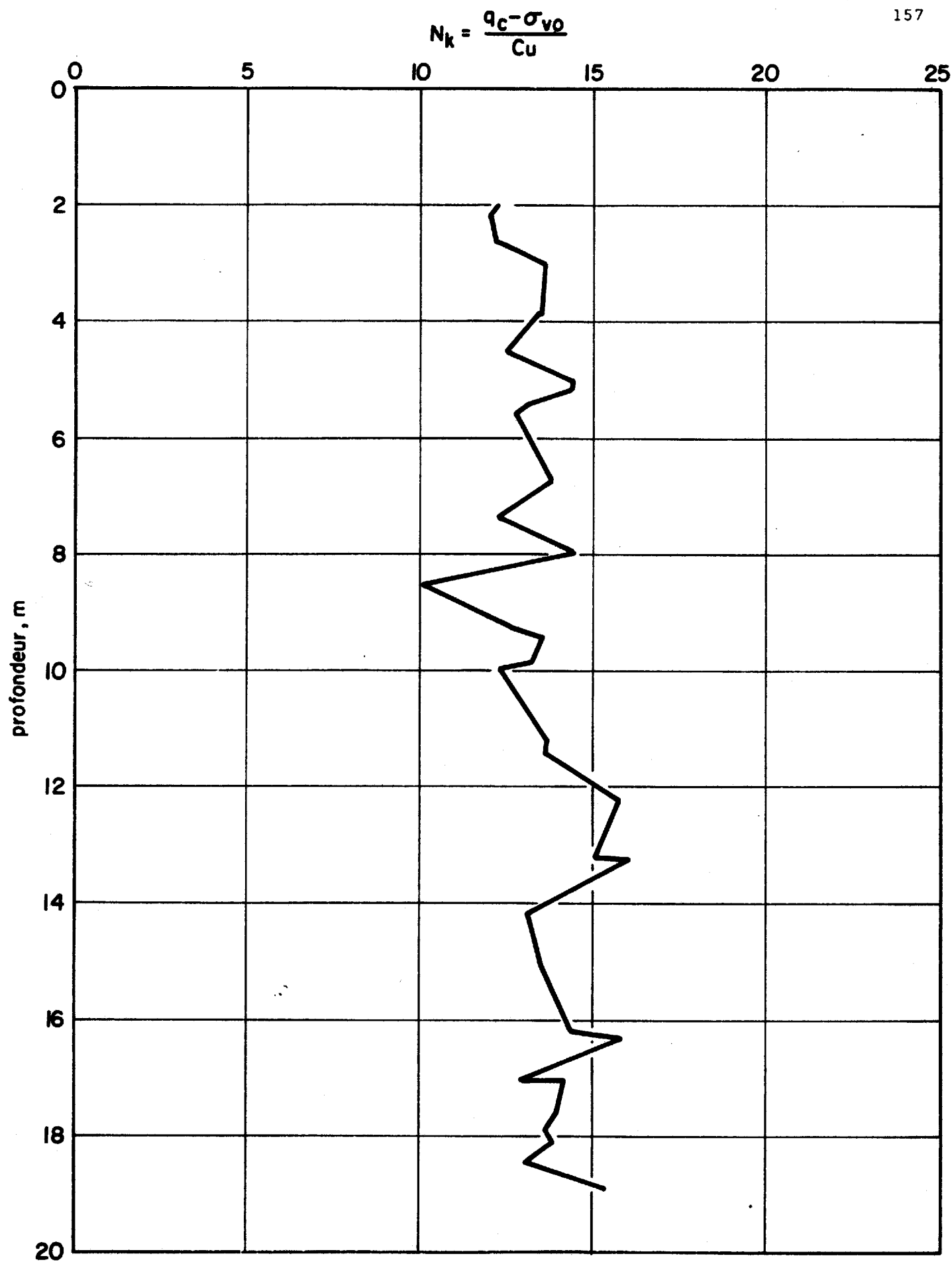


Fig. 32 — Profil de N_k , St-Thuribe.

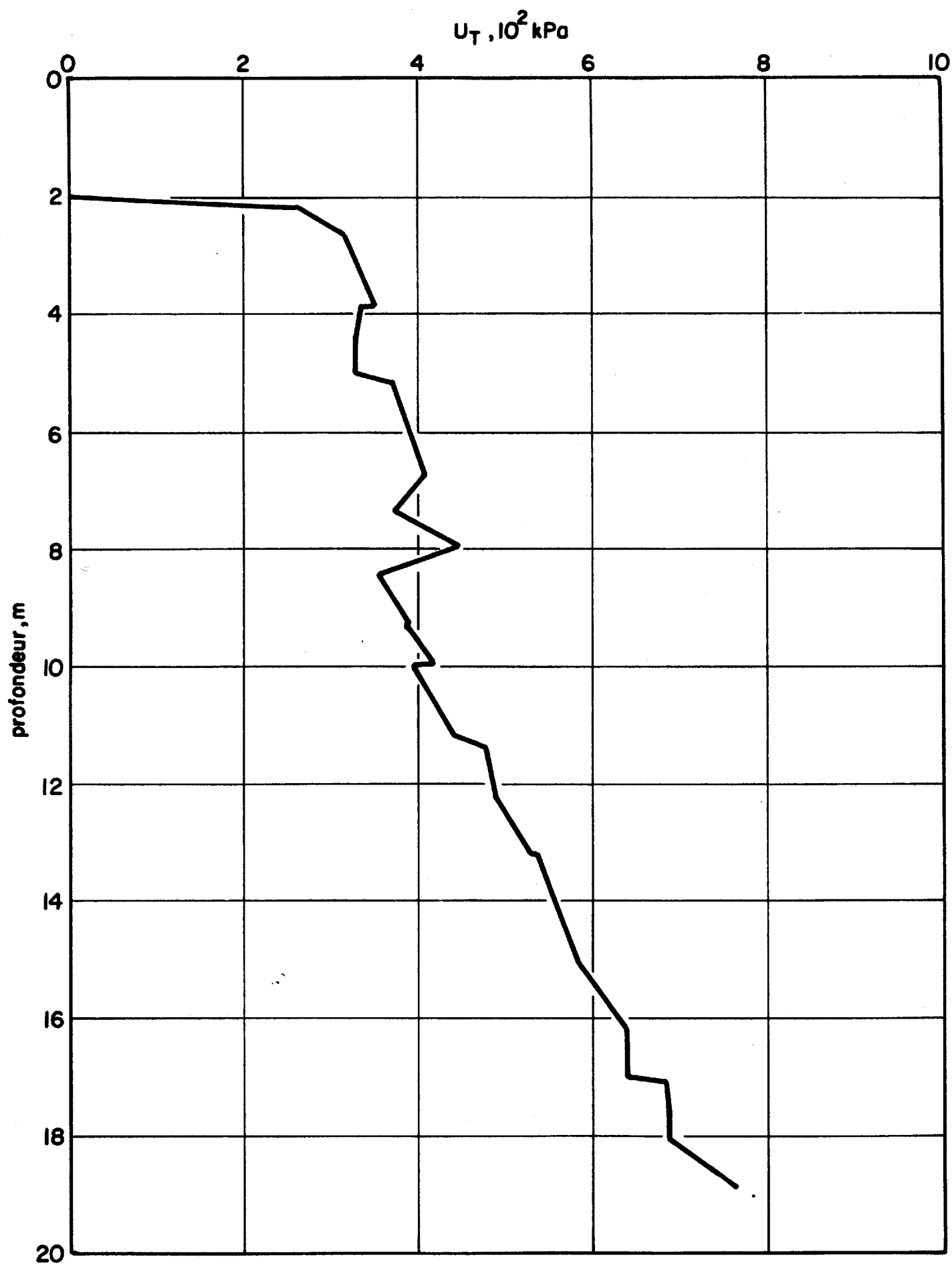


Fig. 33 — Profil de U_T , St-Thuribe.

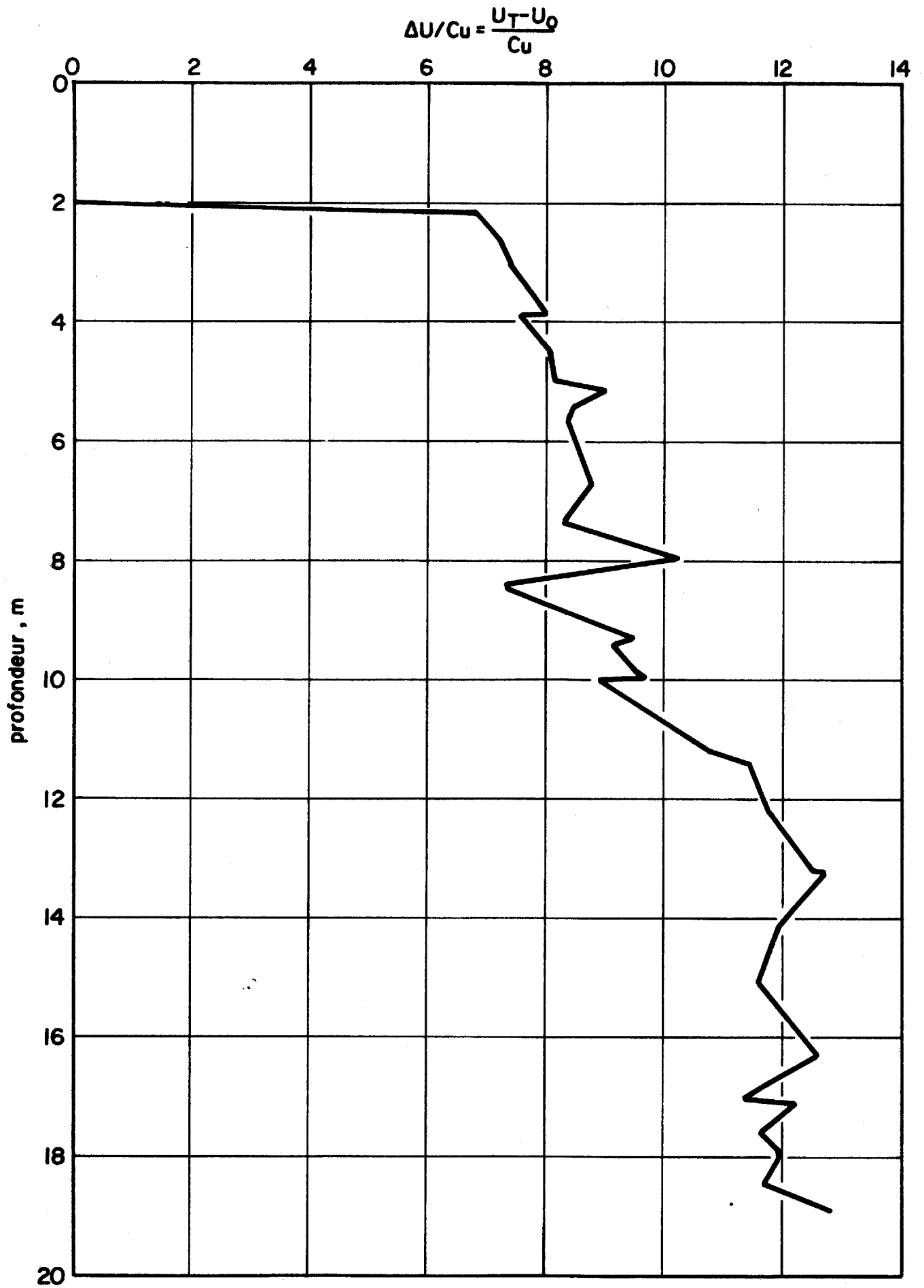


Fig. 34 — Profil de $\Delta U/C_u$, St-Thuribe.

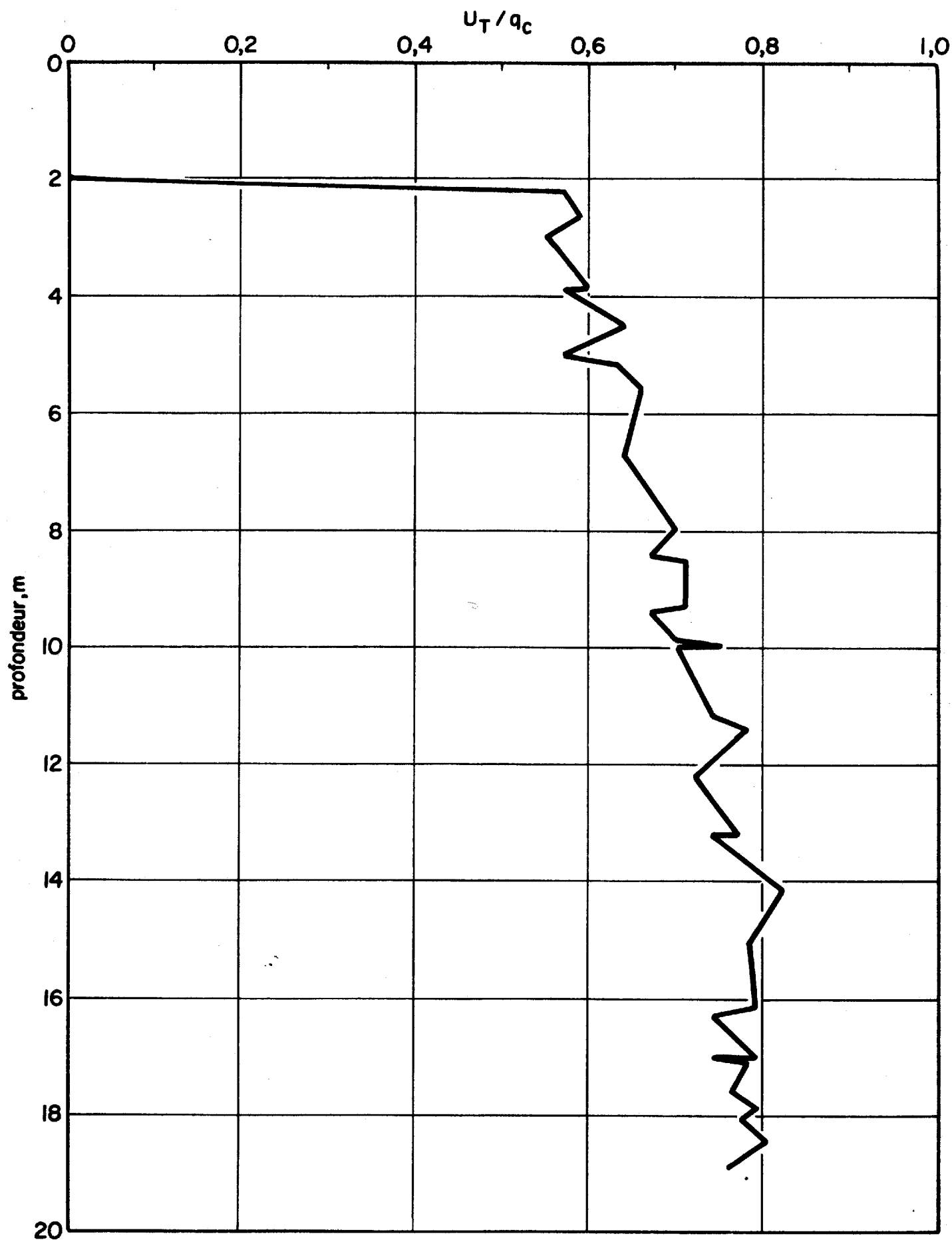


Fig. 35— Profil de U_T/q_c , St-Thuribe.

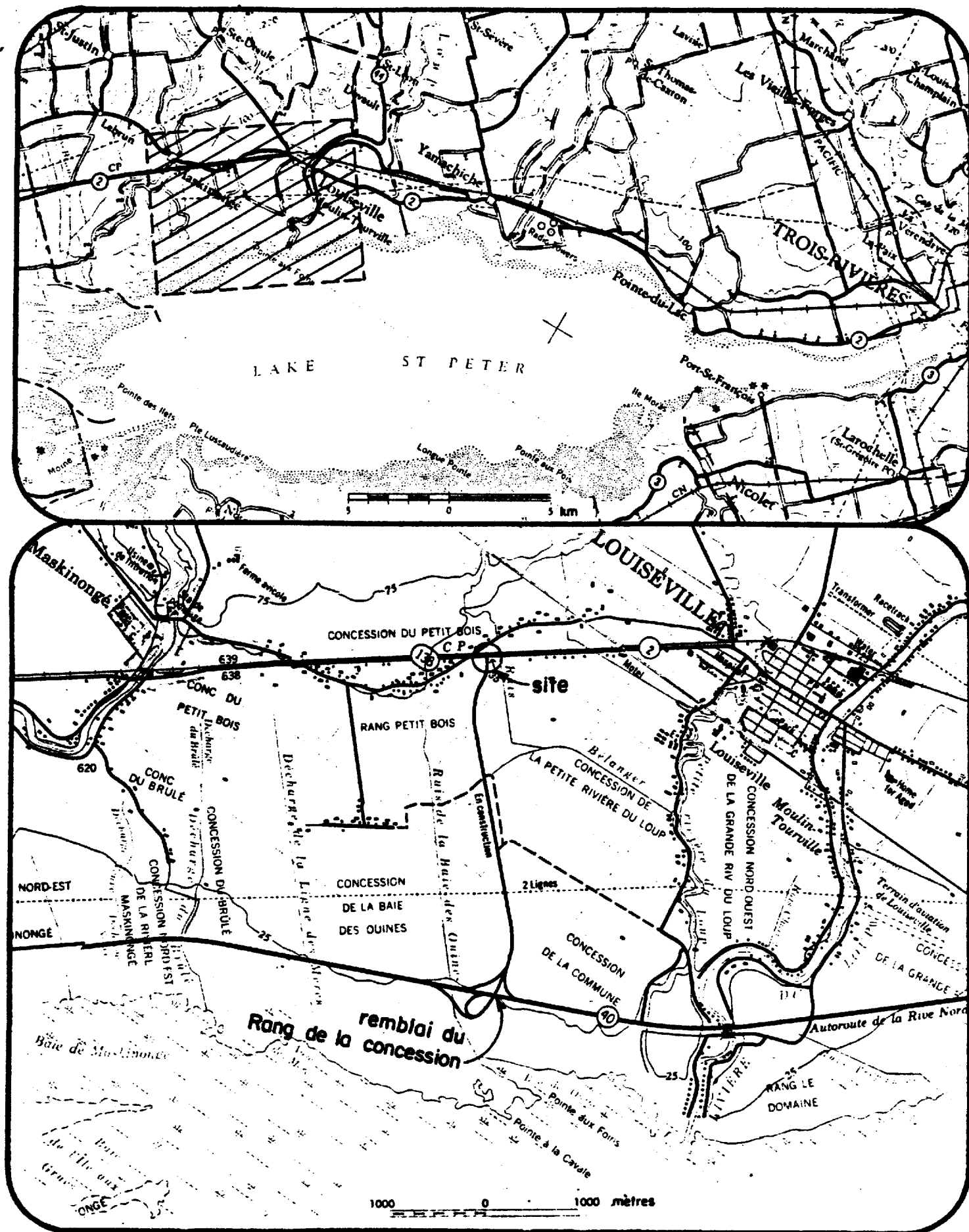
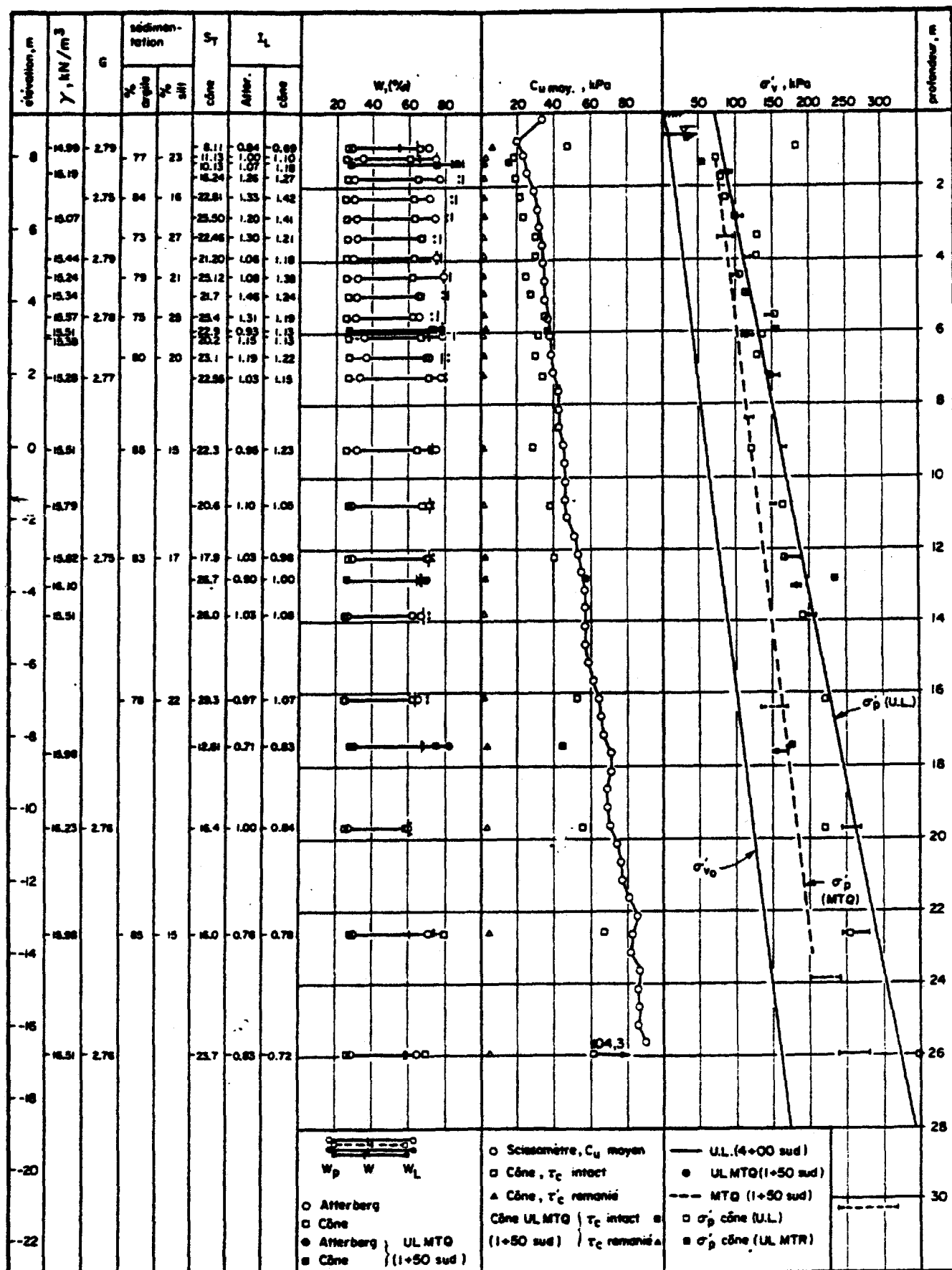


Fig. 36 — Localisation du site à Louiseville.



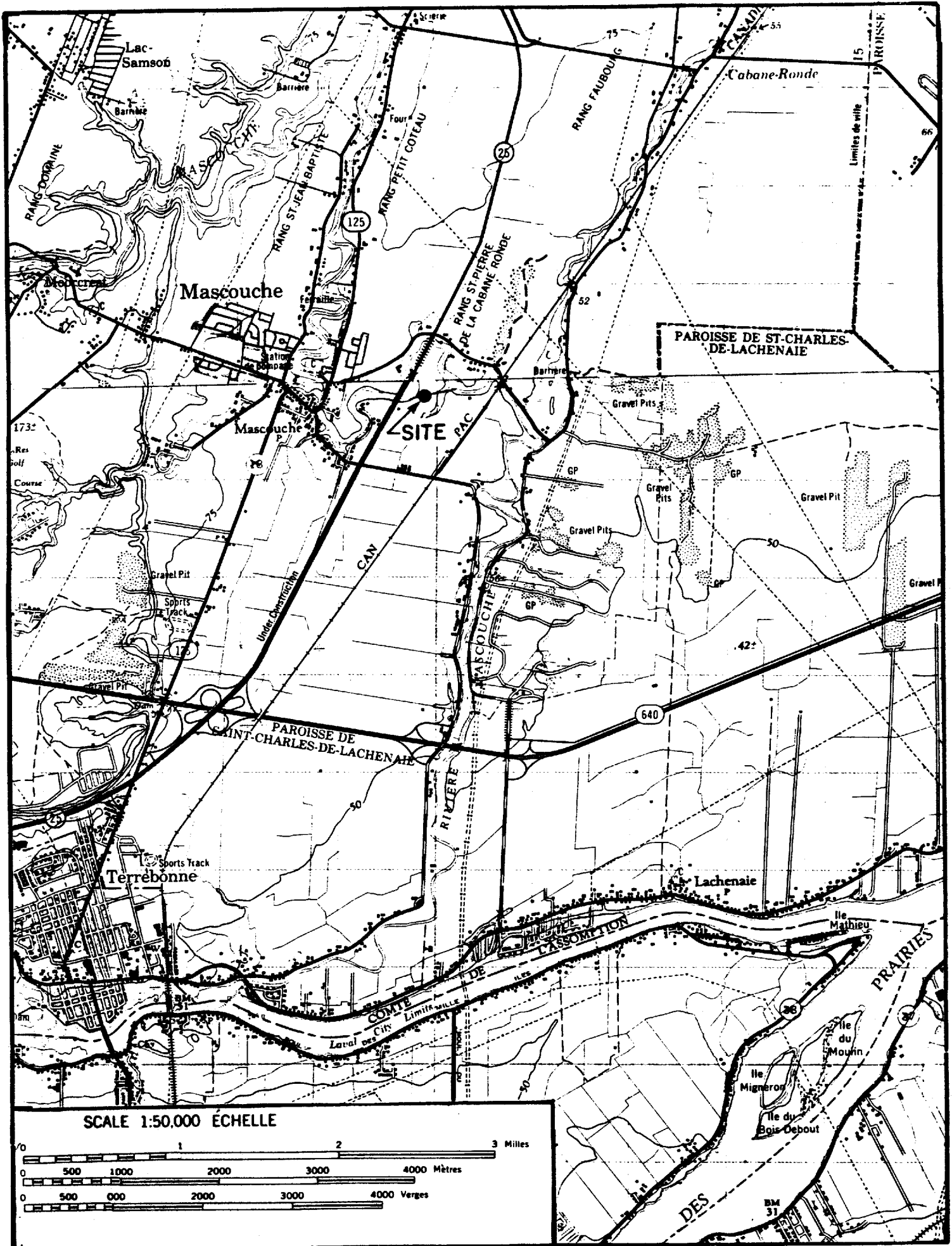


Fig. 38 — Localisation du site à Mascouche.

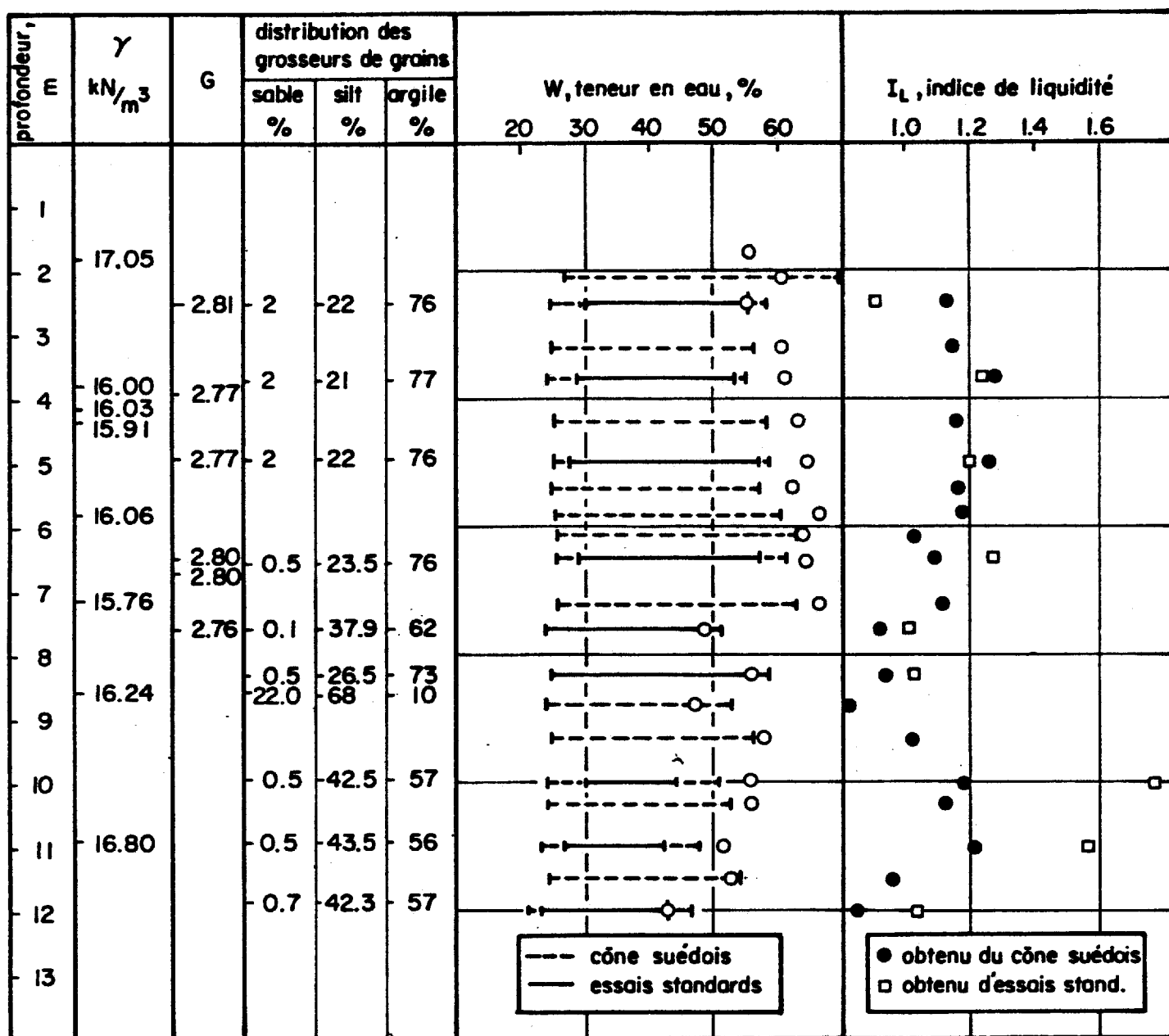


Fig. 39 — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'ARGILE DE MASCOUCHE.

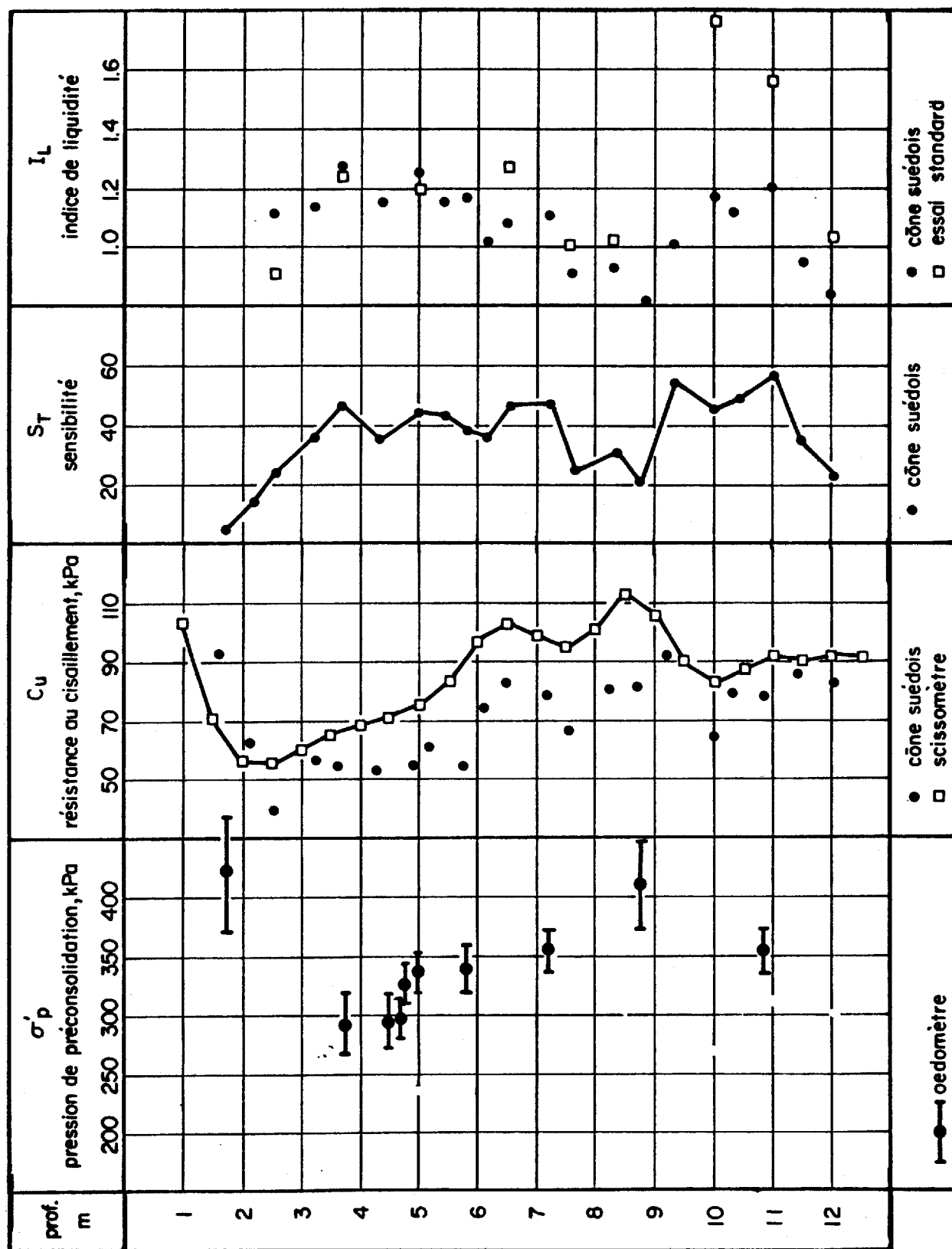


Fig. 40 — PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE L'ARGILE DE MASCOUCHE.

(d'après Marchand et al, 1980)

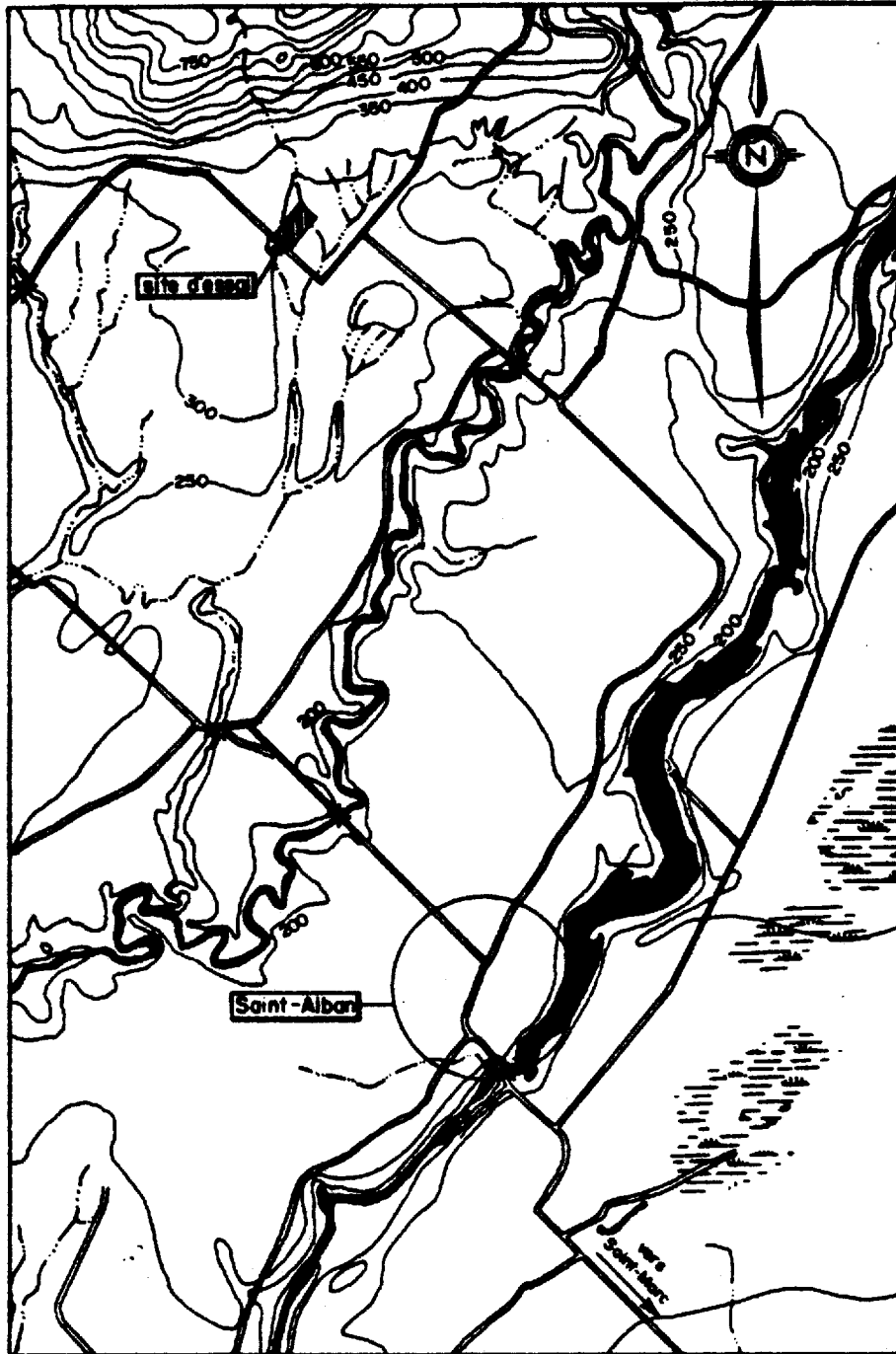


Fig. 41 — Localisation du site à St-Alban.

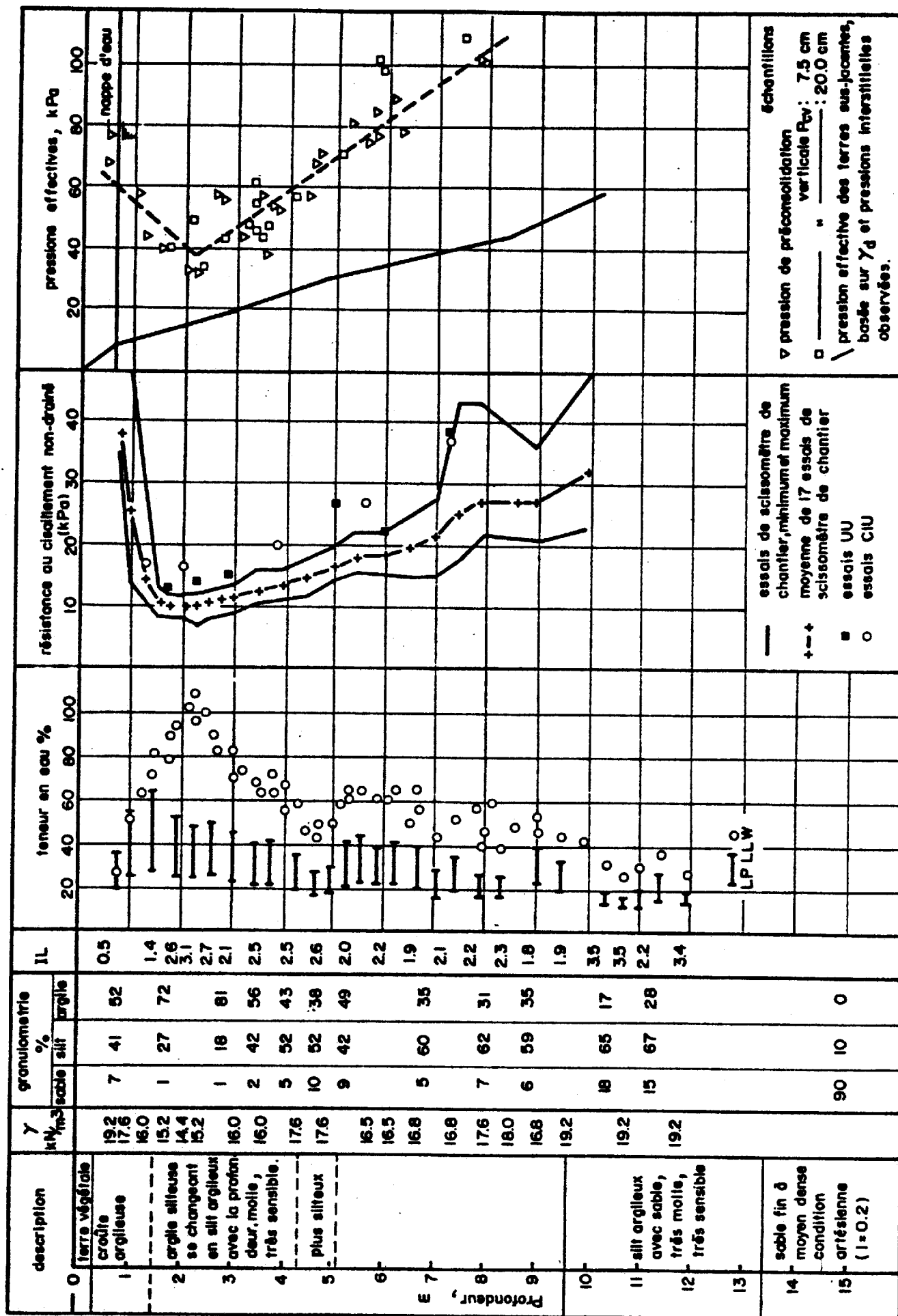


Fig. 42—PROFIL DES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DU SOL À ST-ALBAN.

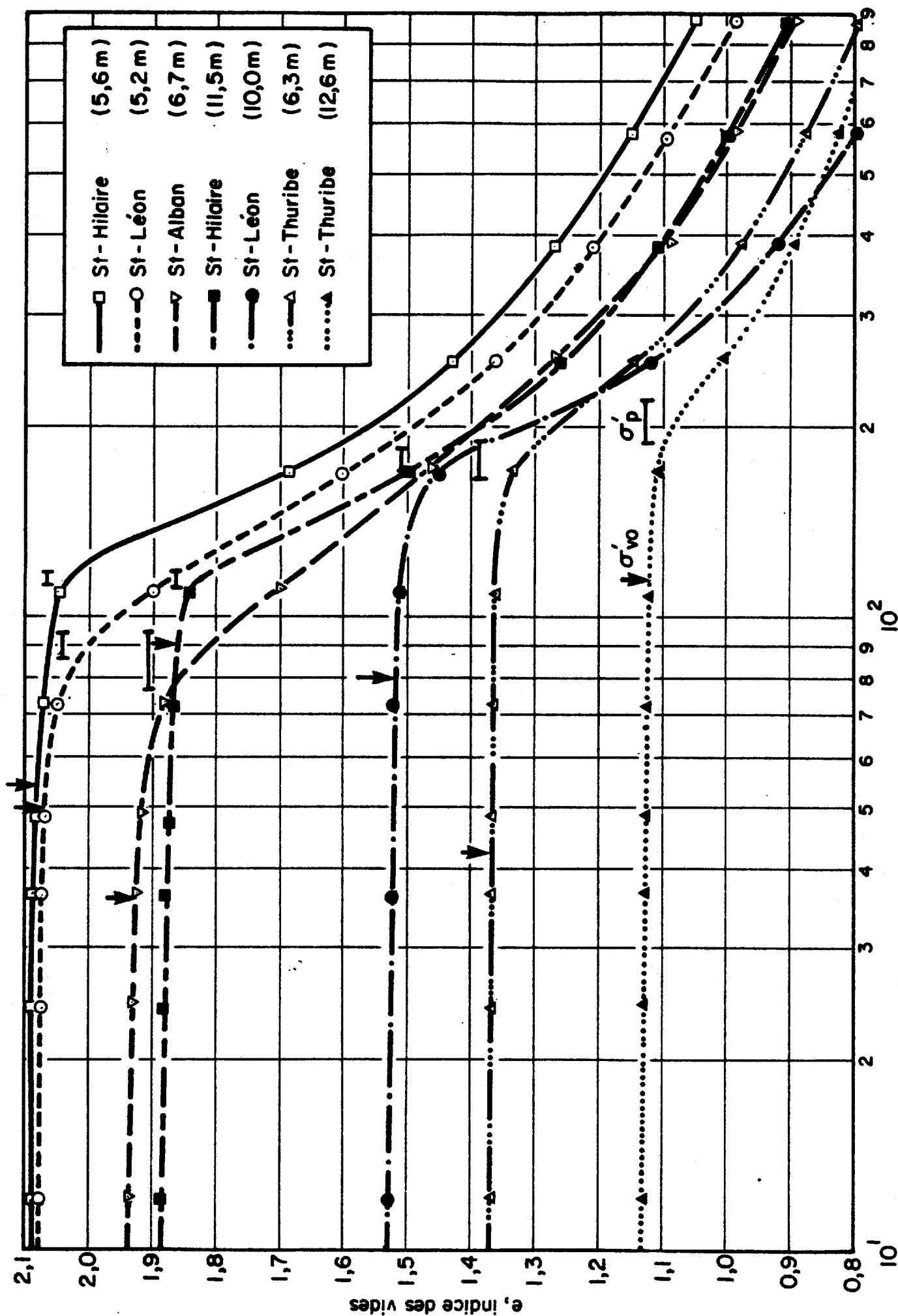


Fig. 43 — Consolidation oedométrique : e vs $\lg \sigma'_v$.

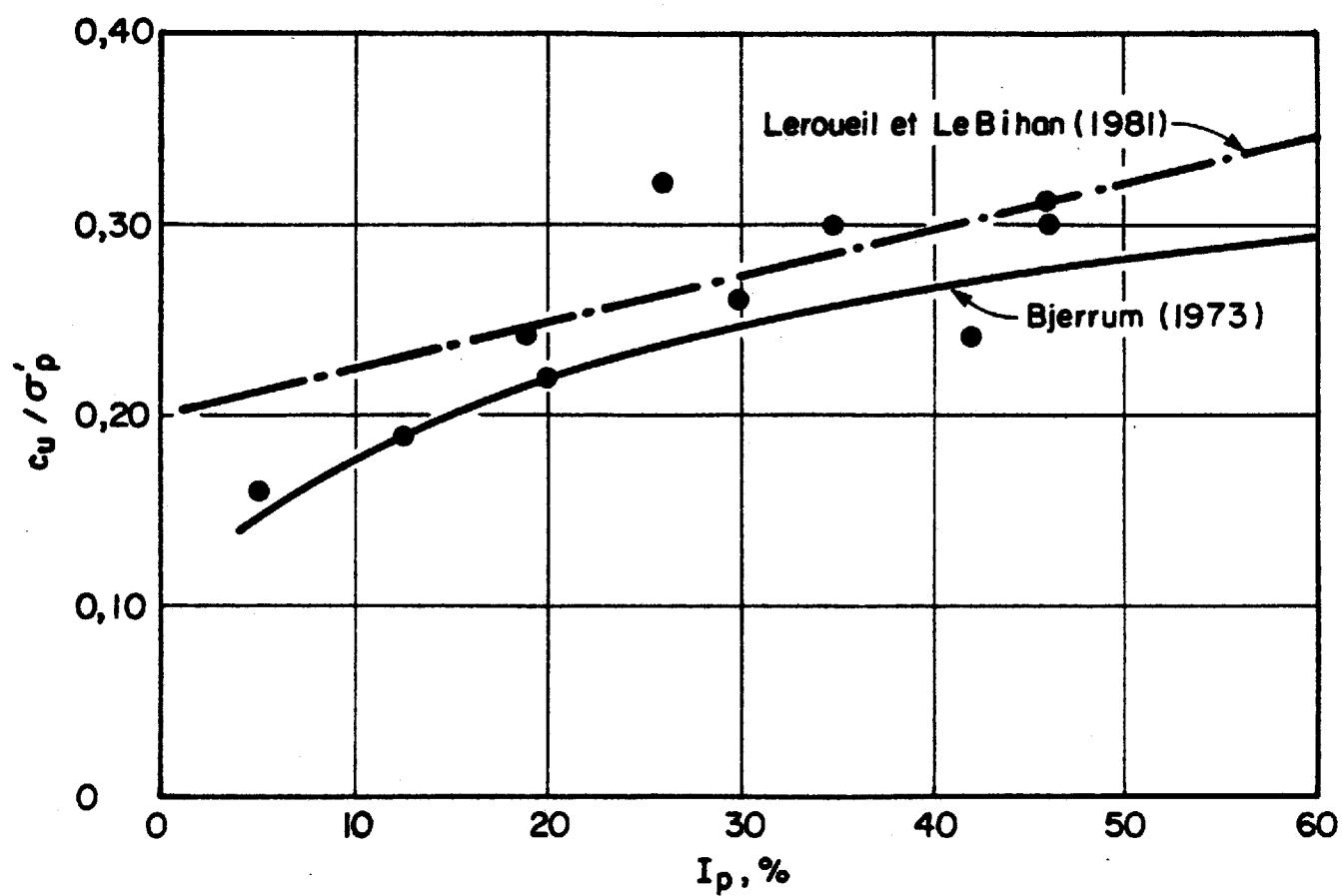


Fig. 44 — Rapports c_u sciss./ σ'_p en fonction de I_p pour les argiles étudiées.

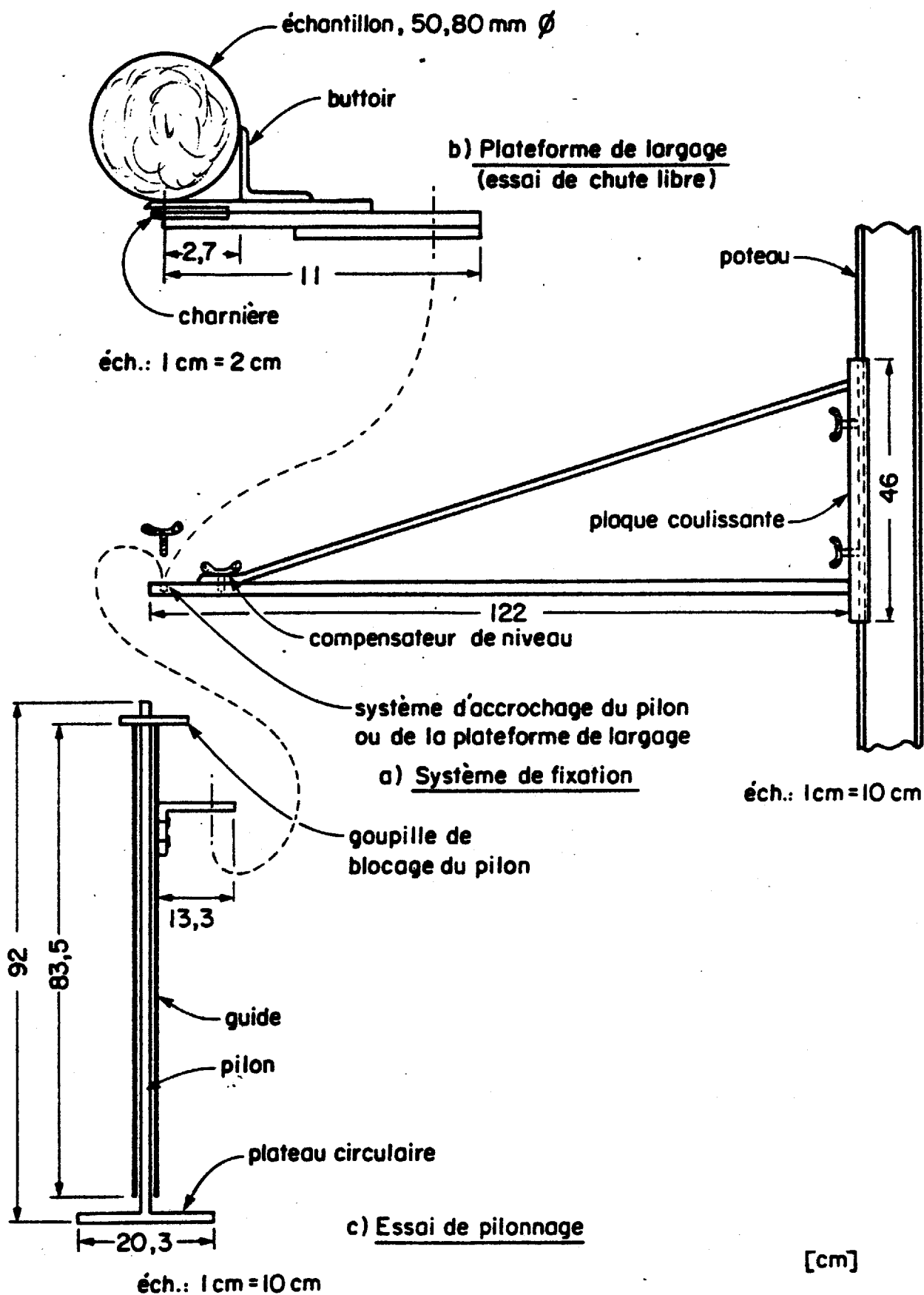


Fig. 45 — ESSAIS DE CHUTE LIBRE ET DE PILONNAGE.

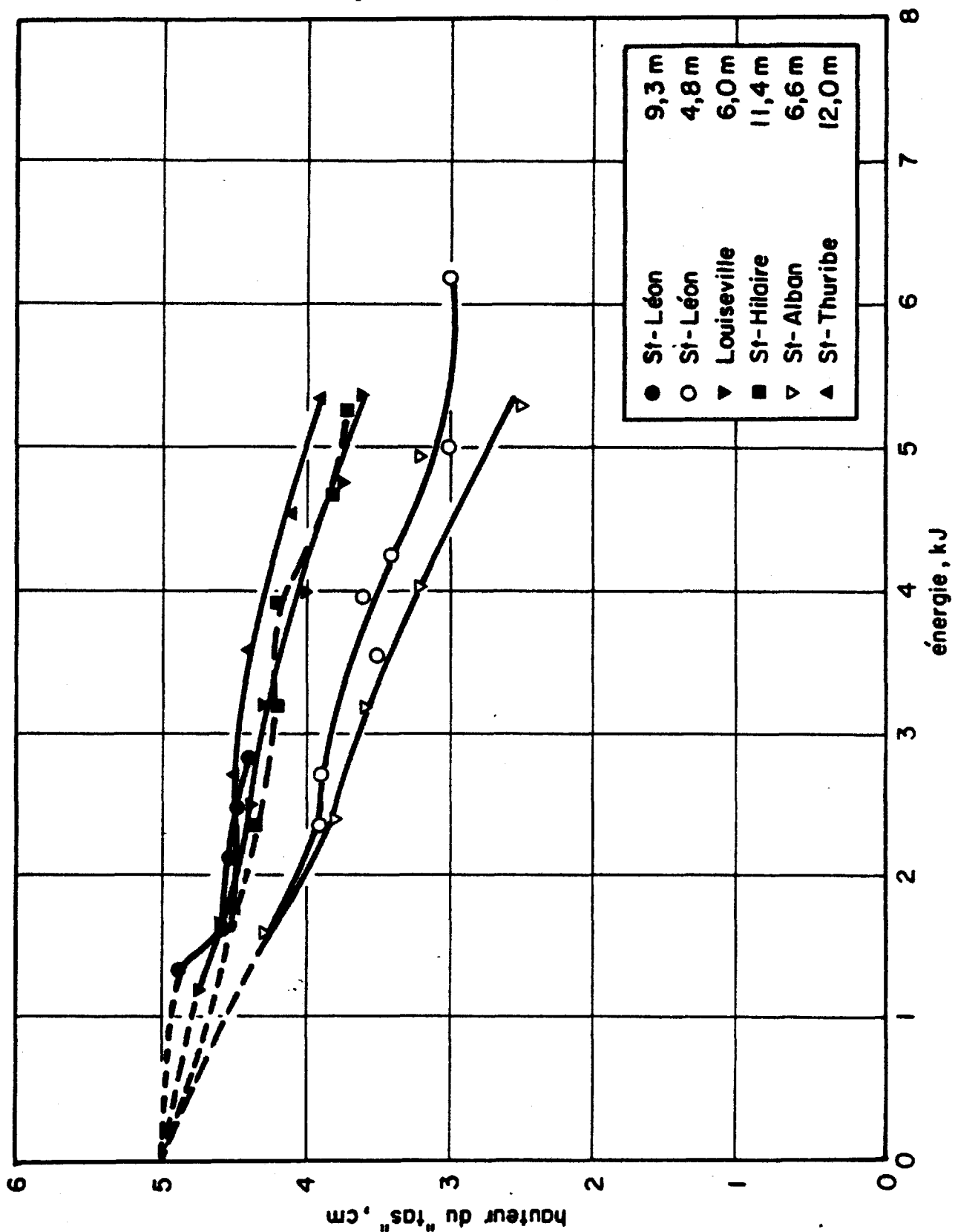


Fig. 46 — Essais de chute libre (CHU), échantillon 5cm x 5cm.

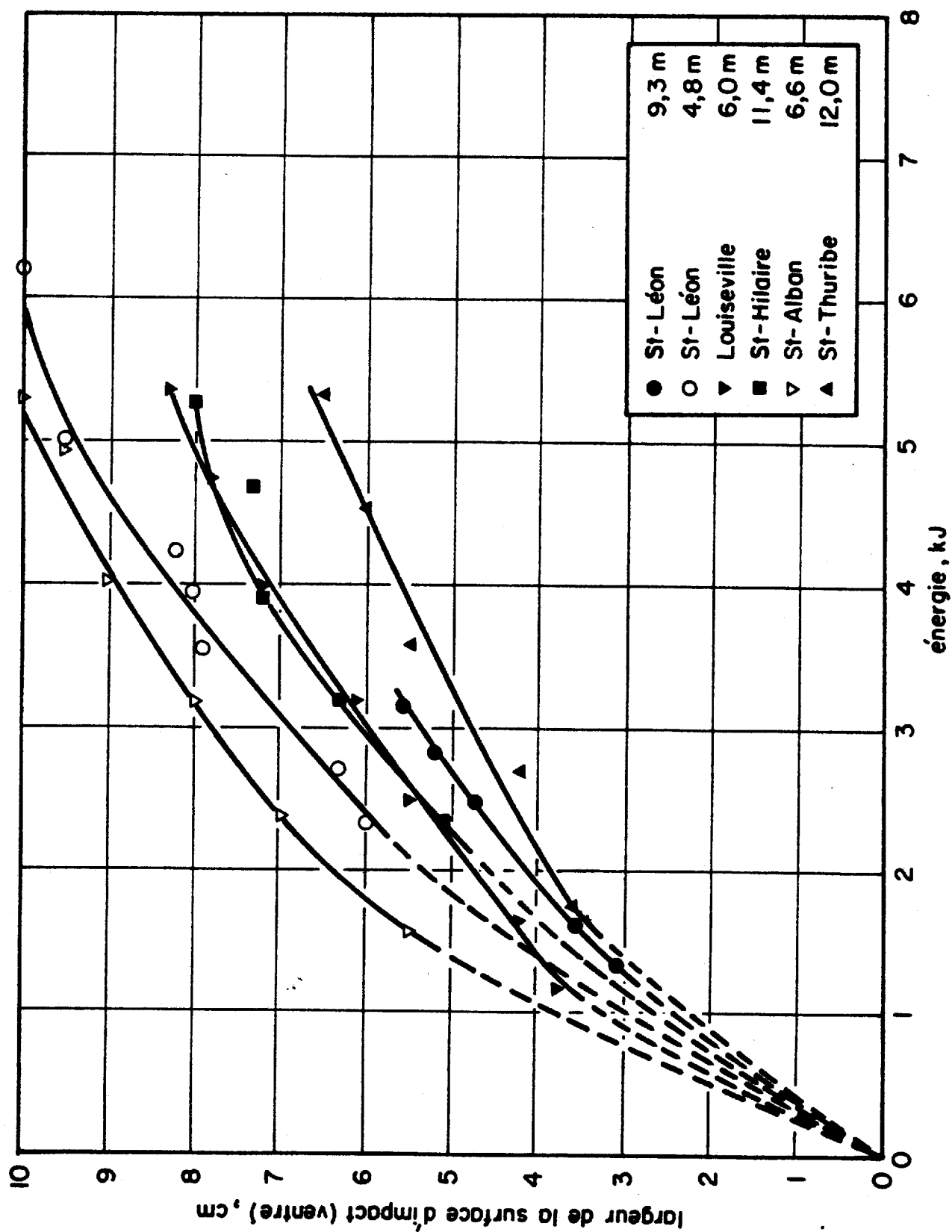


Fig. 47 — Essais de chute libre (CHU), échantillon 5cm x 5cm.

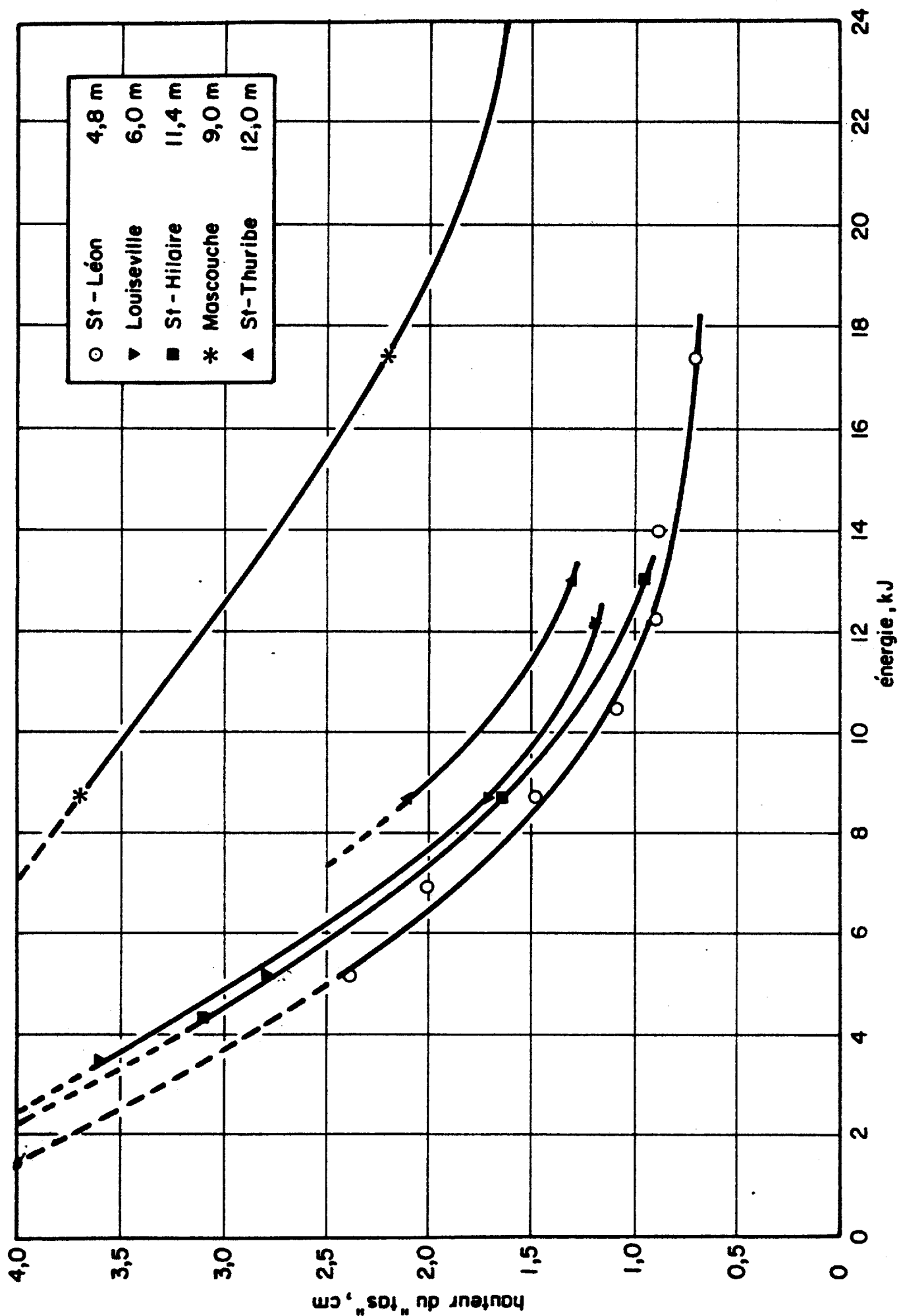


Fig. 48 — Essais de pilonnage (PIL), échantillon vertical (5 cm x 5 cm).

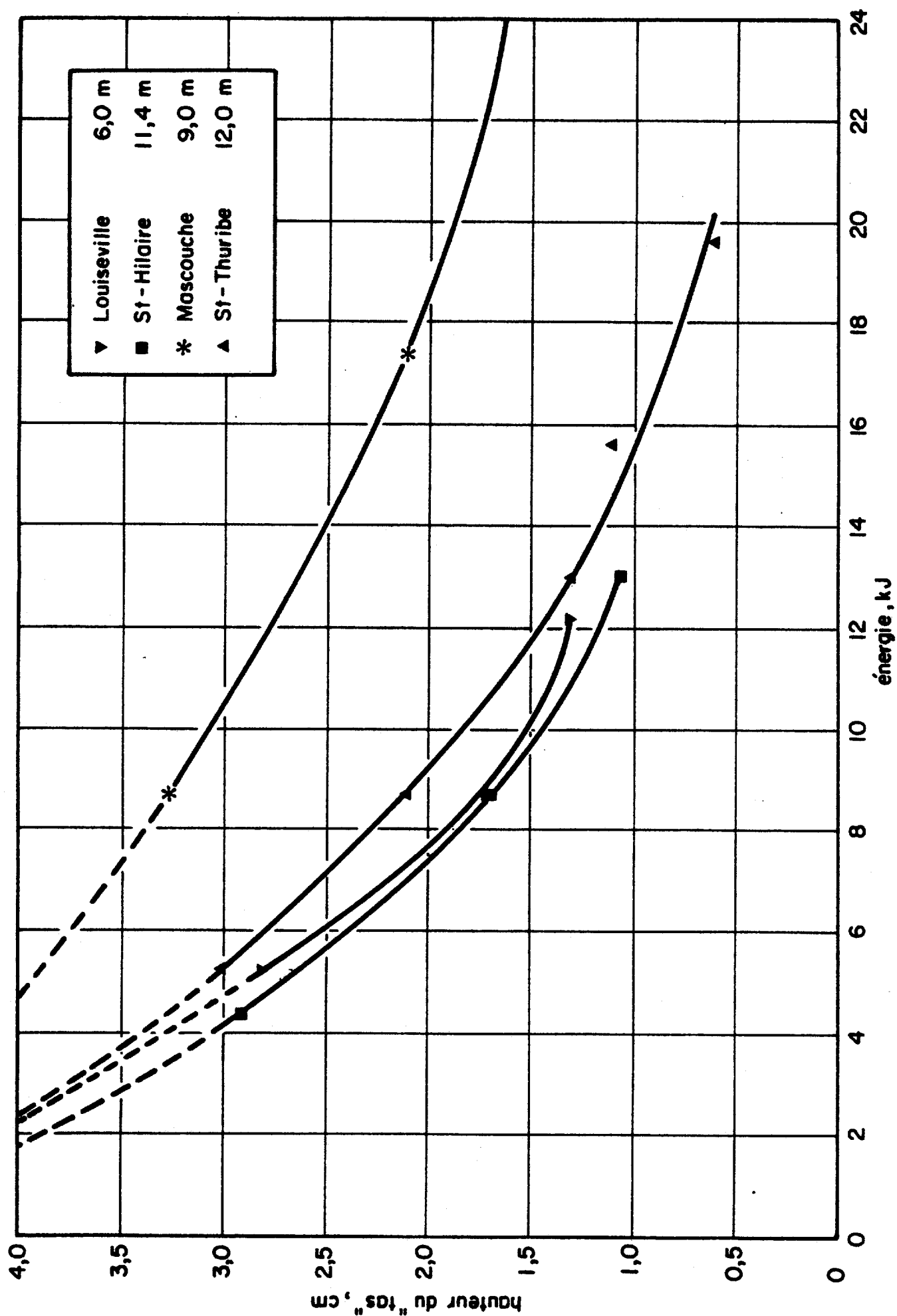


Fig. 49 — Essais de pilonnage (PIL), échantillon horizontal (5 cm x 5 cm).

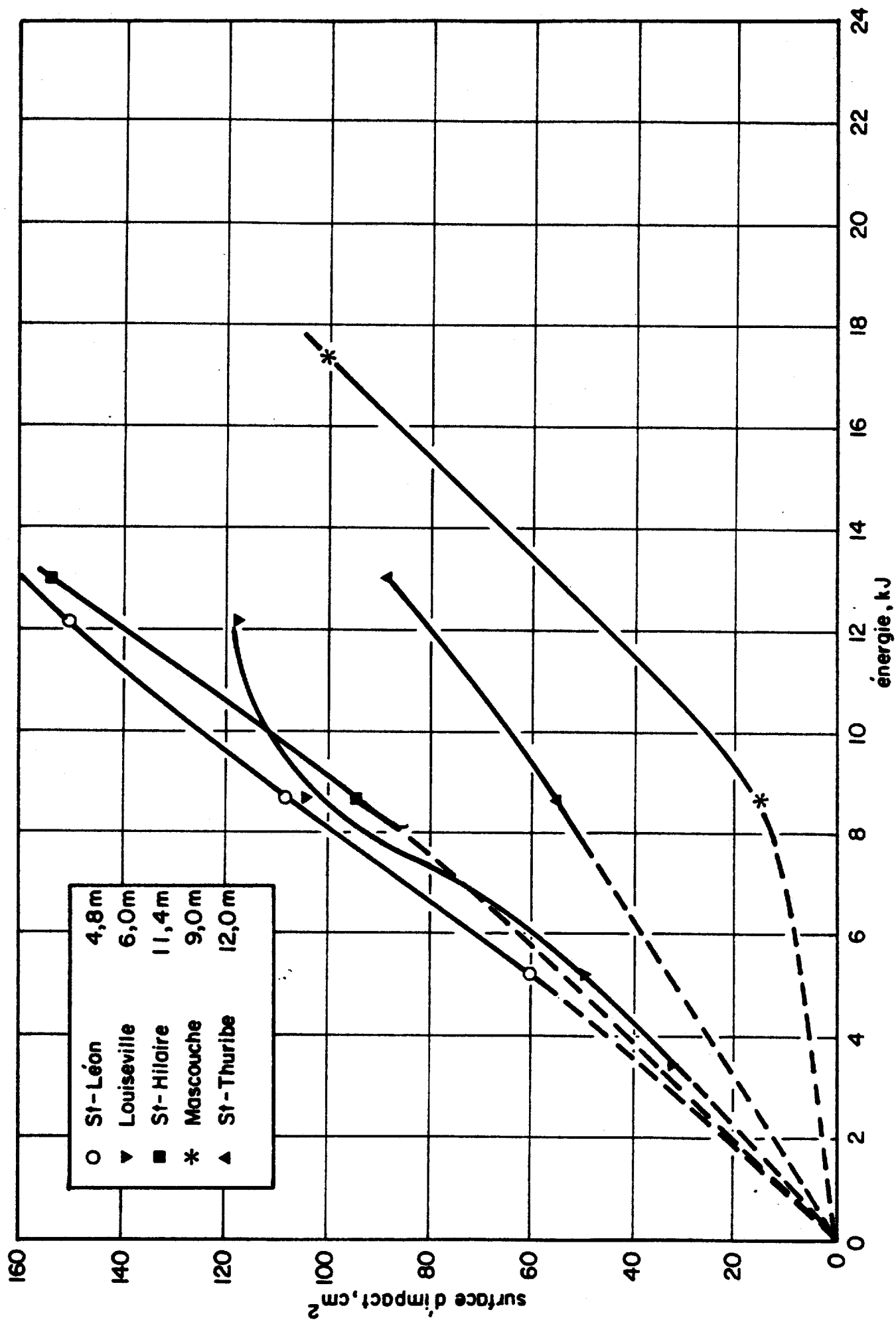


Fig. 50 — Essais de pilonnage (PIL), échantillon vertical (5 cm x 5 cm).

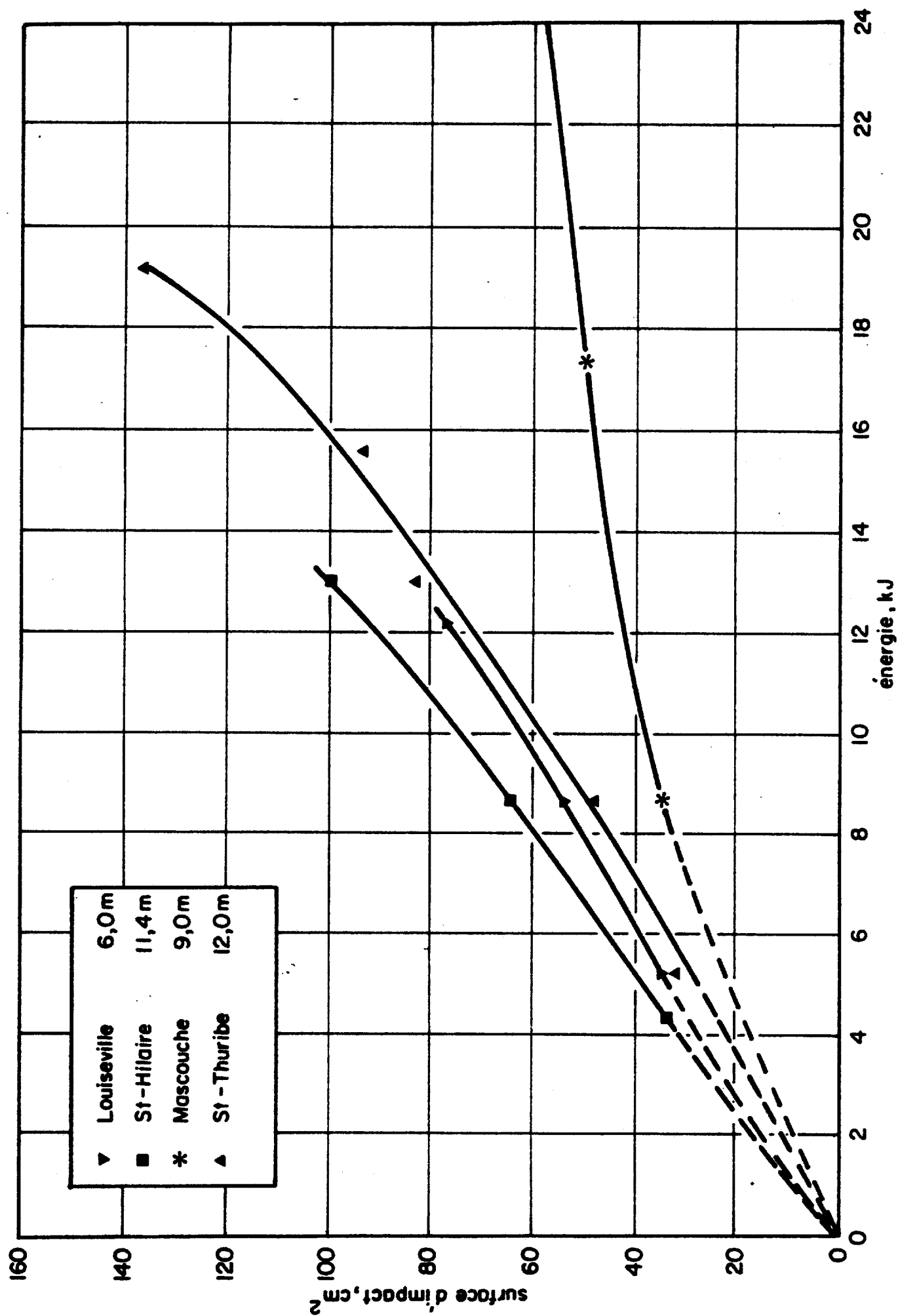


Fig. 51 — Essais de pilonnage (PIL), échantillon horizontal (5 cm x 5 cm).

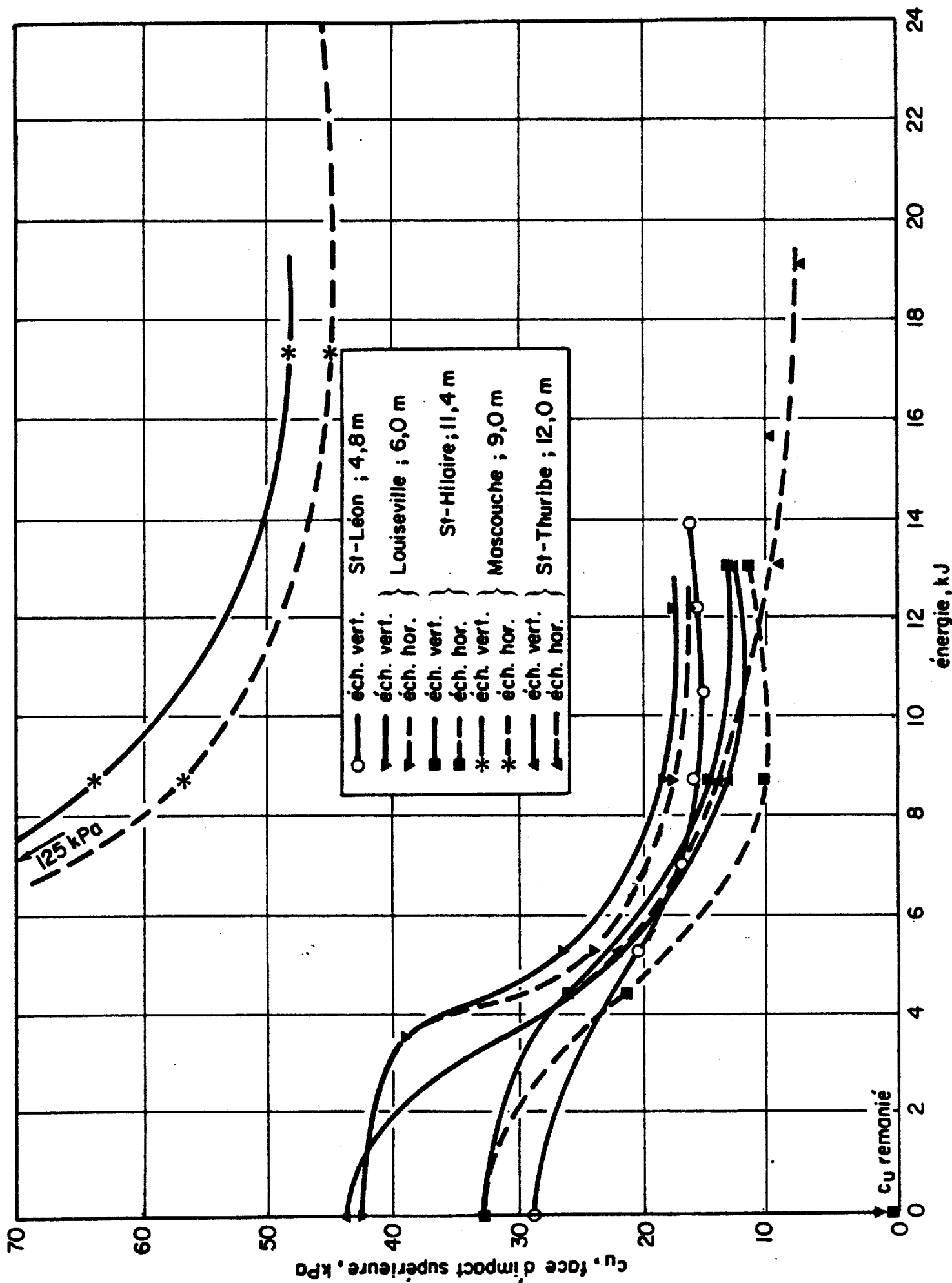


Fig. 52 — Essais de pilonnage (PIL), échantillon 5 cm x 5 cm.

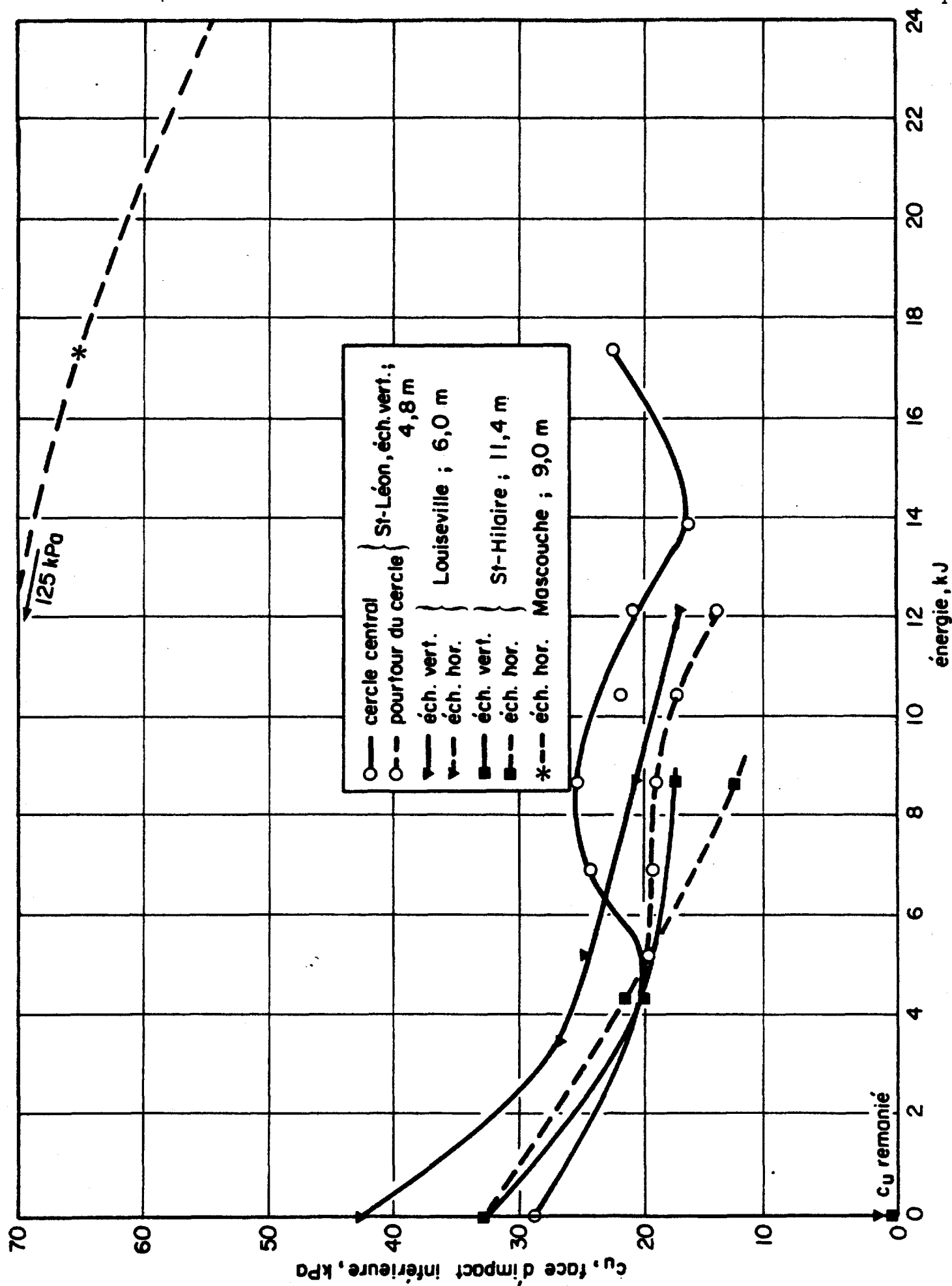


Fig. 53 — Essais de pilonnage (PIL), échantillon 5 cm x 5 cm.

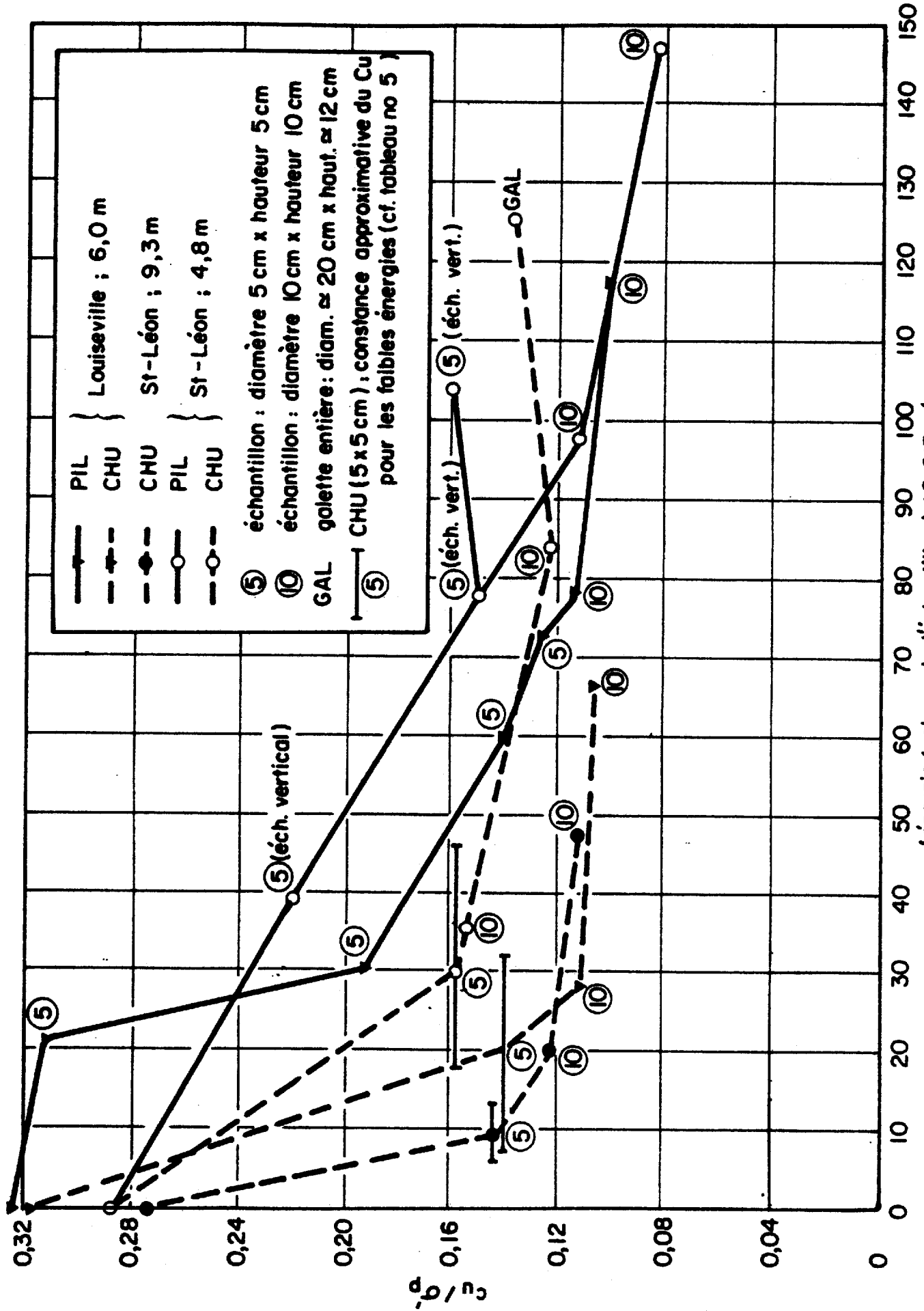


Fig. 54 — Essais de pilonnage (PIL) et de chute libre (CHU), échantillon horizontal.
St-Léon et Louiseville.

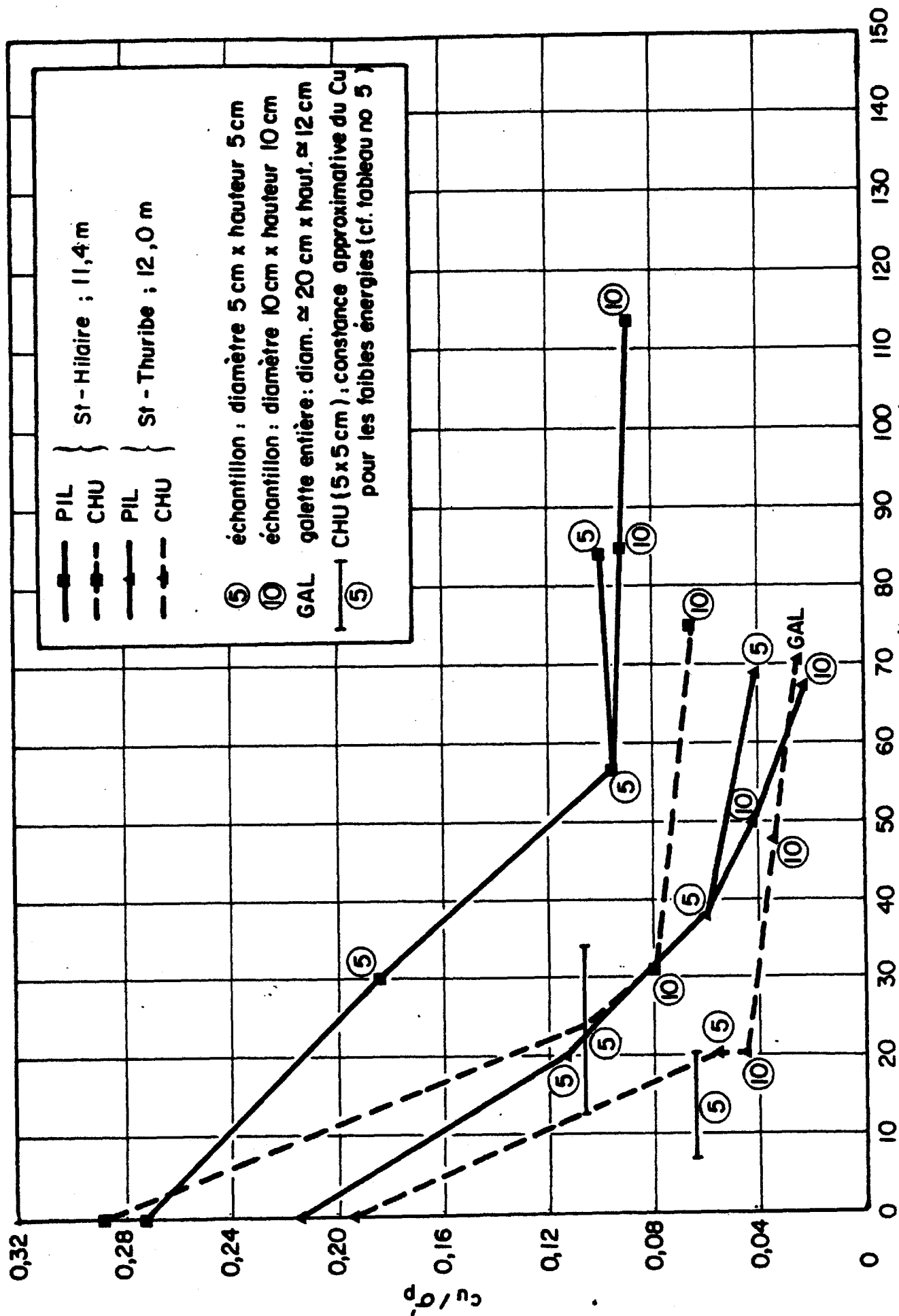


Fig. 55 — Essais de pilonnage (PIL) et de chute libre (CHU), échantillon horizontal.
 St-Hilaire et St-Thuribe.

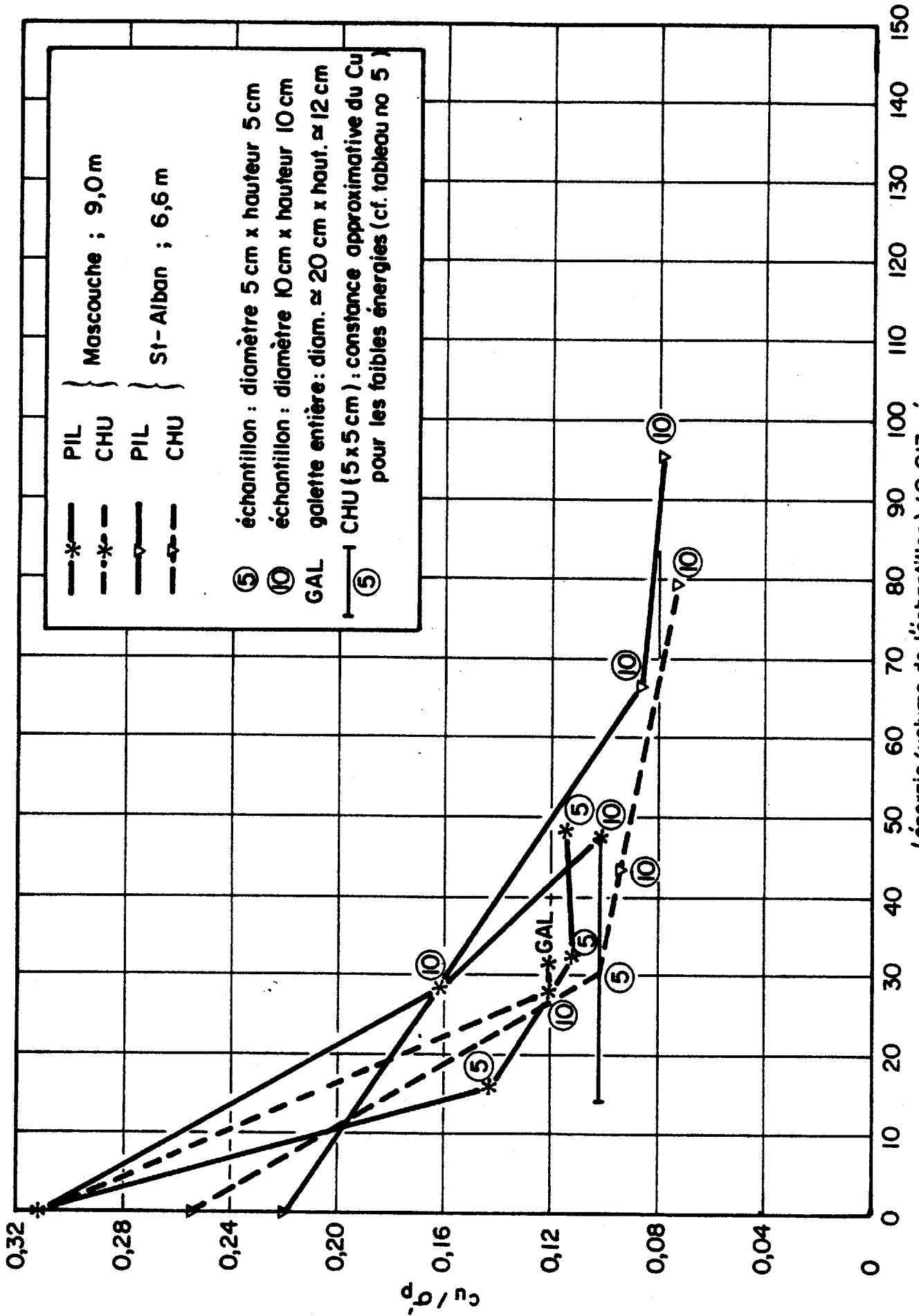


Fig. 56 — Essais de pilonnage (PIL) et de chute libre (CHU), échantillon horizontal.
Mascouche et St-Alban.

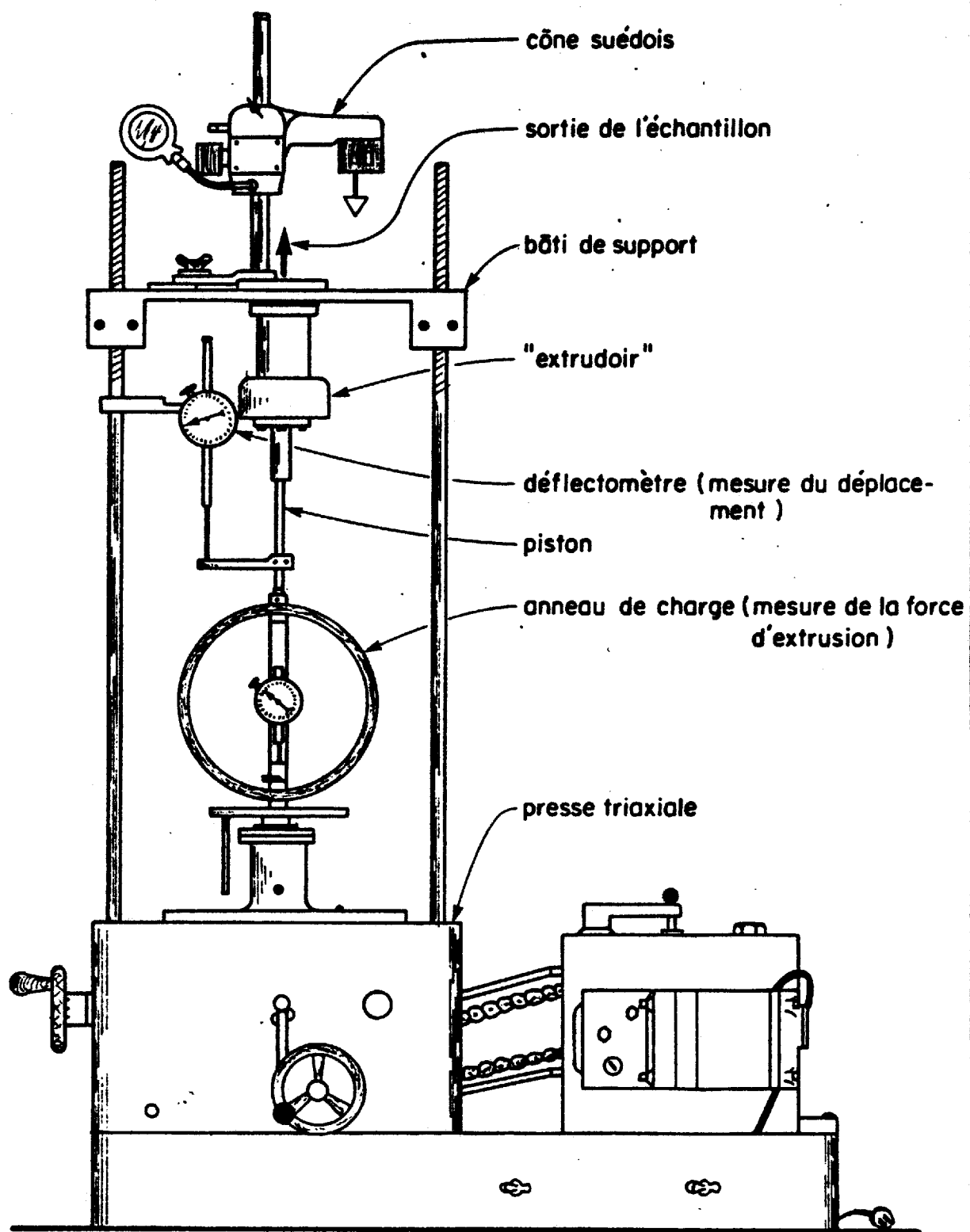


Fig. 58 — APPAREILLAGE À EXTRUSION.

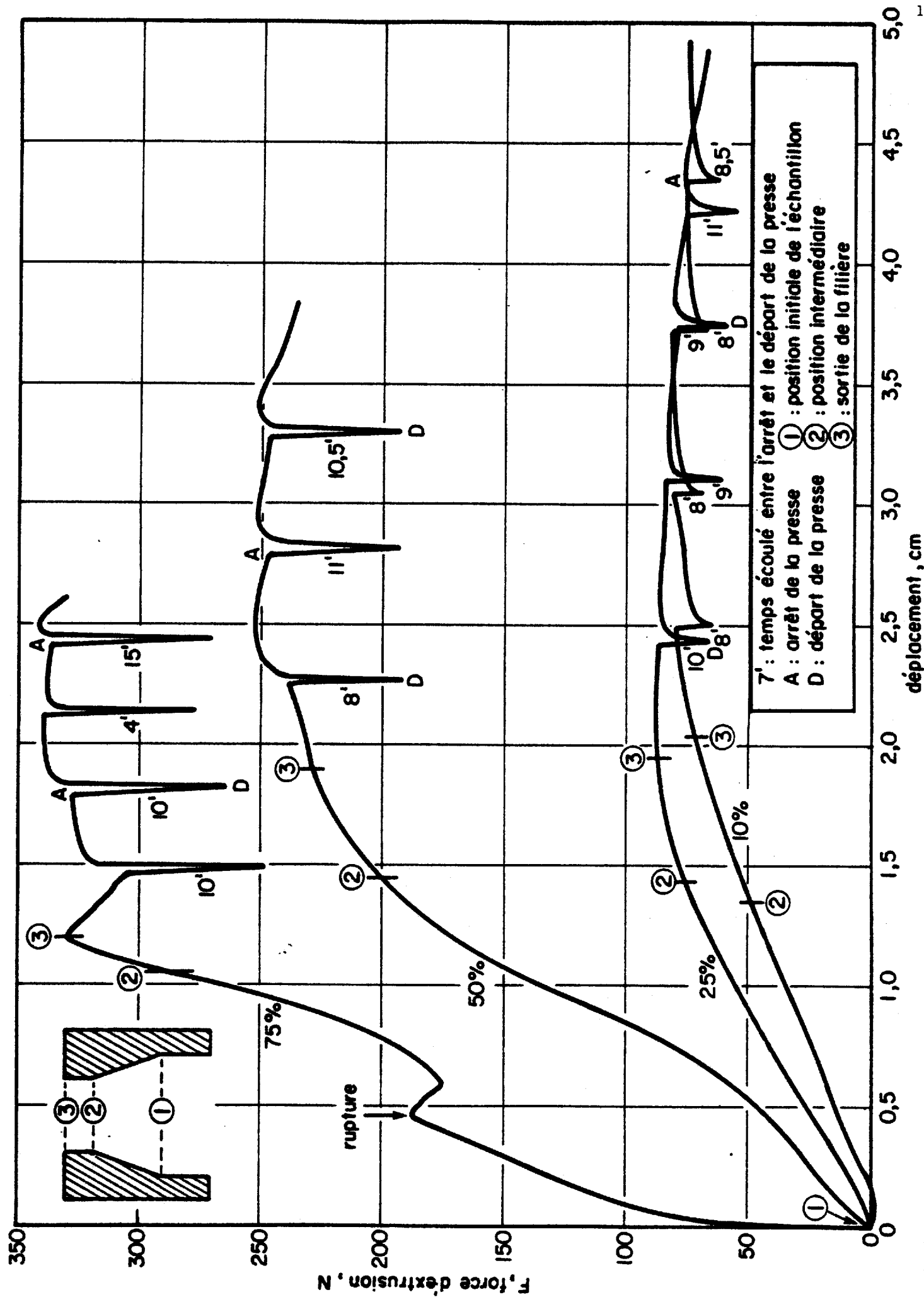


Fig. 59 — Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur : 4,8 m.

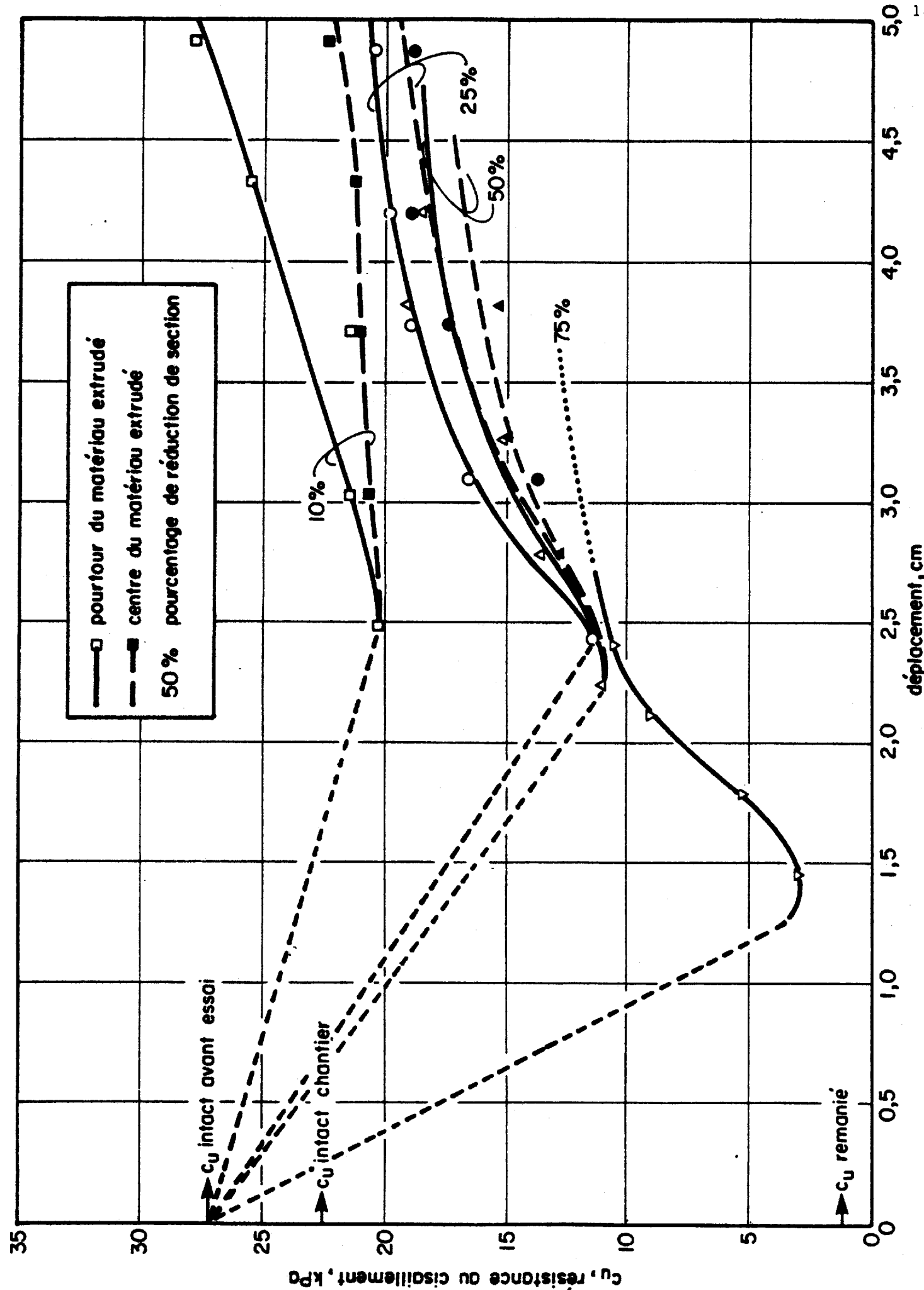


Fig. 60 — Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur : 4,8 m.

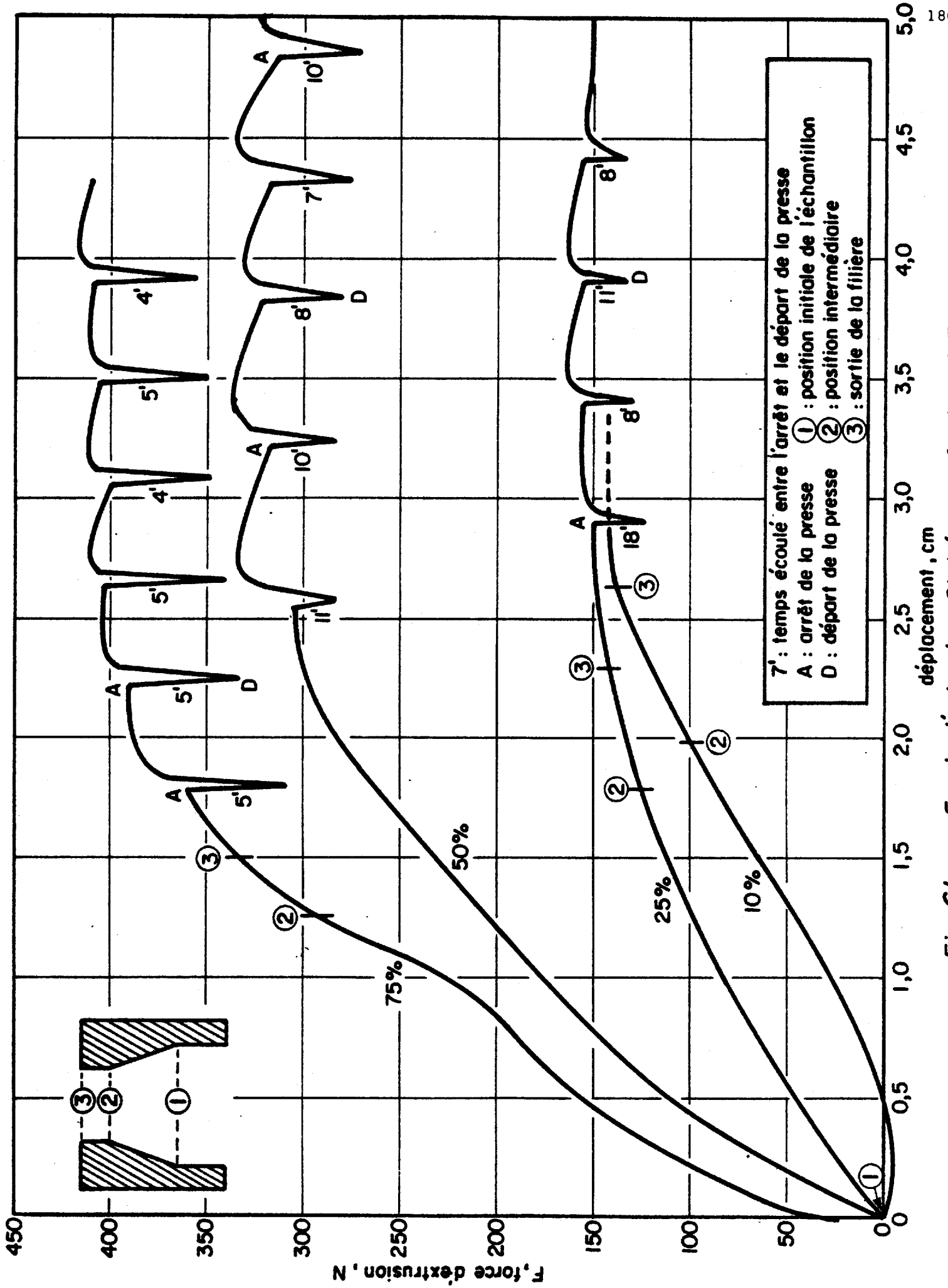


Fig. 61 — Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur : 9,3 m.

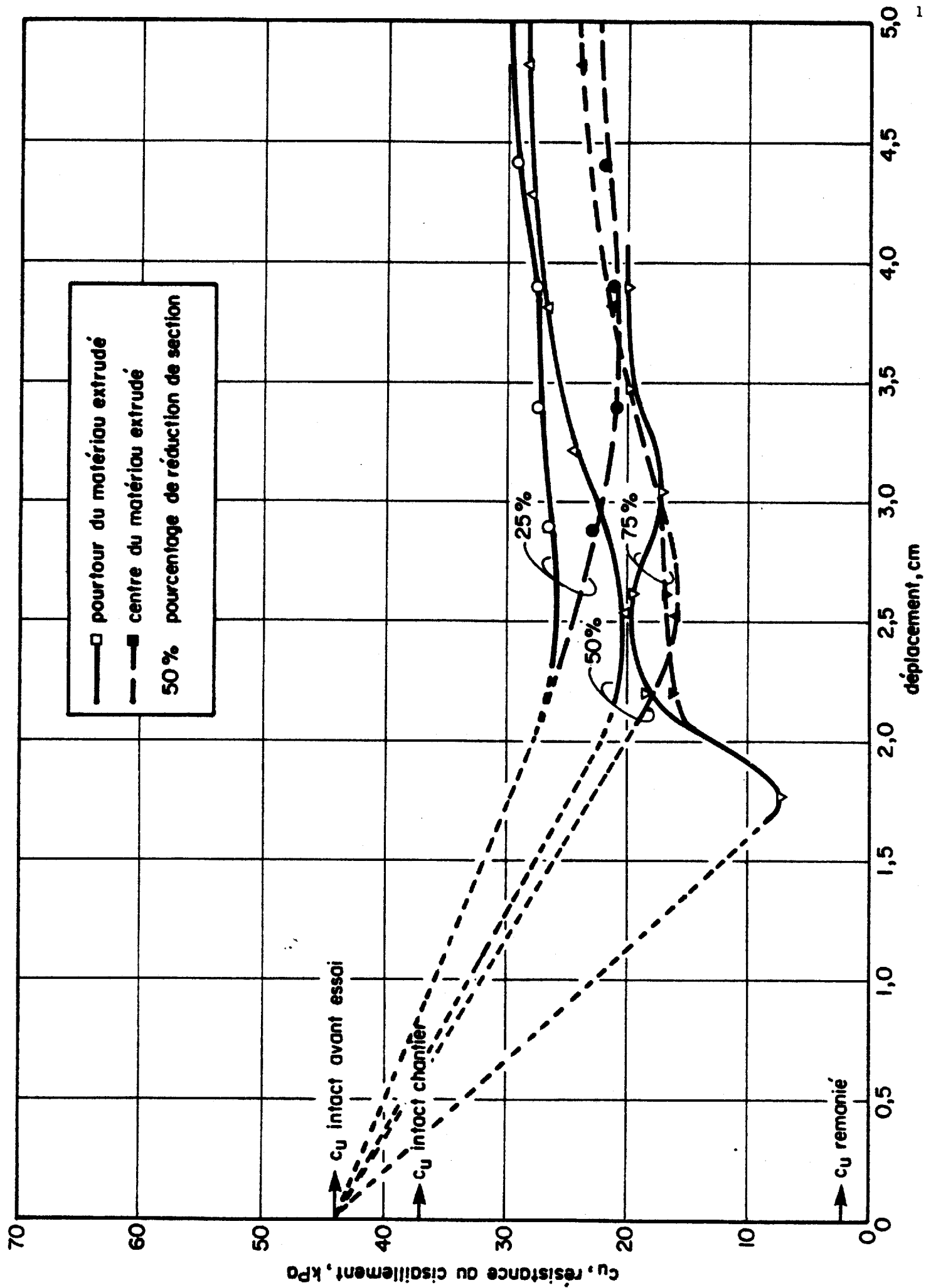


Fig. 62 — Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur : 9,3 m.

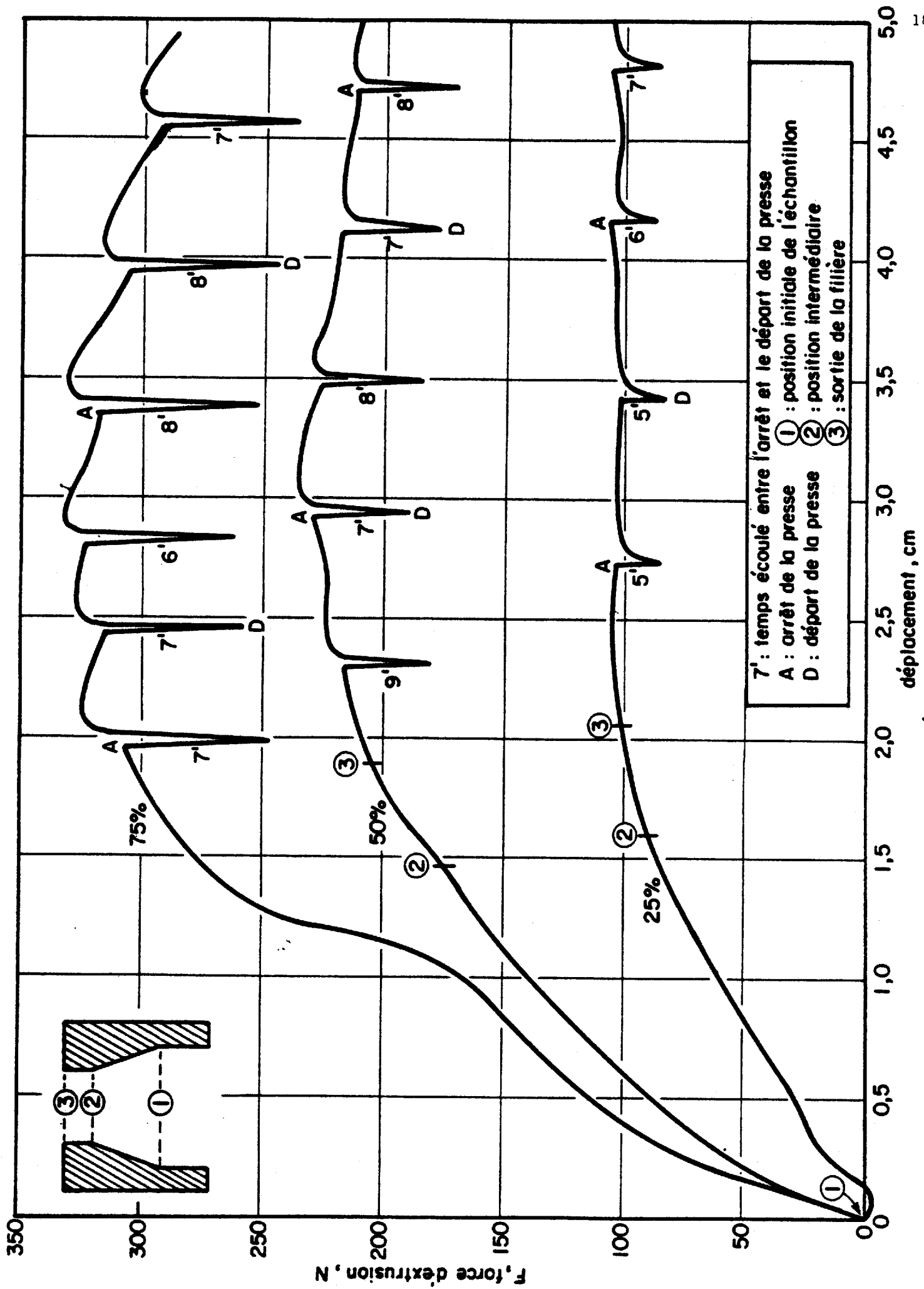


Fig. 63 — Essais d'extrusion, Louiseville, profondeur : 6,0 m.

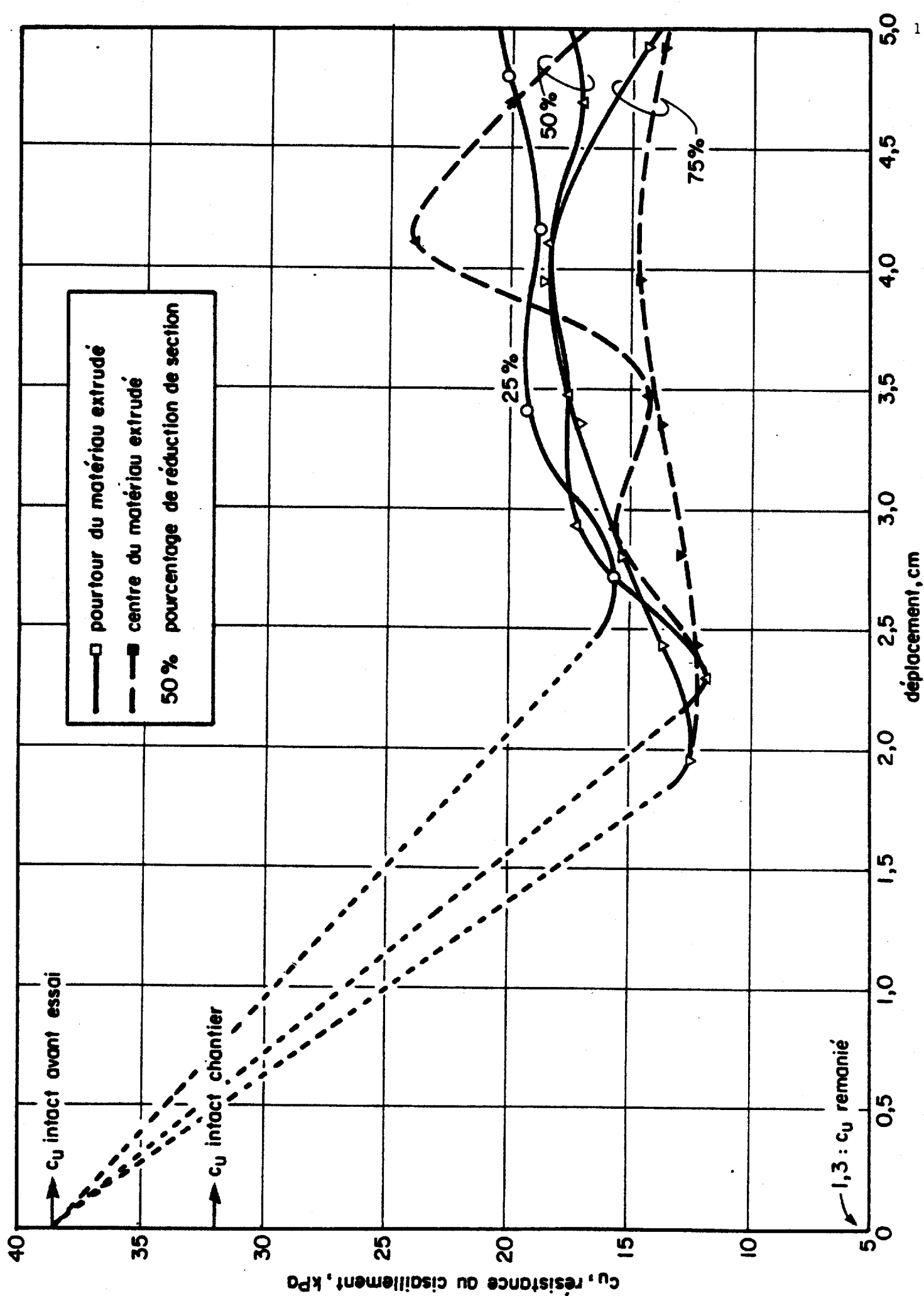


Fig. 64 — Essais d'extrusion, Louiseville, profondeur: 6,0 m.

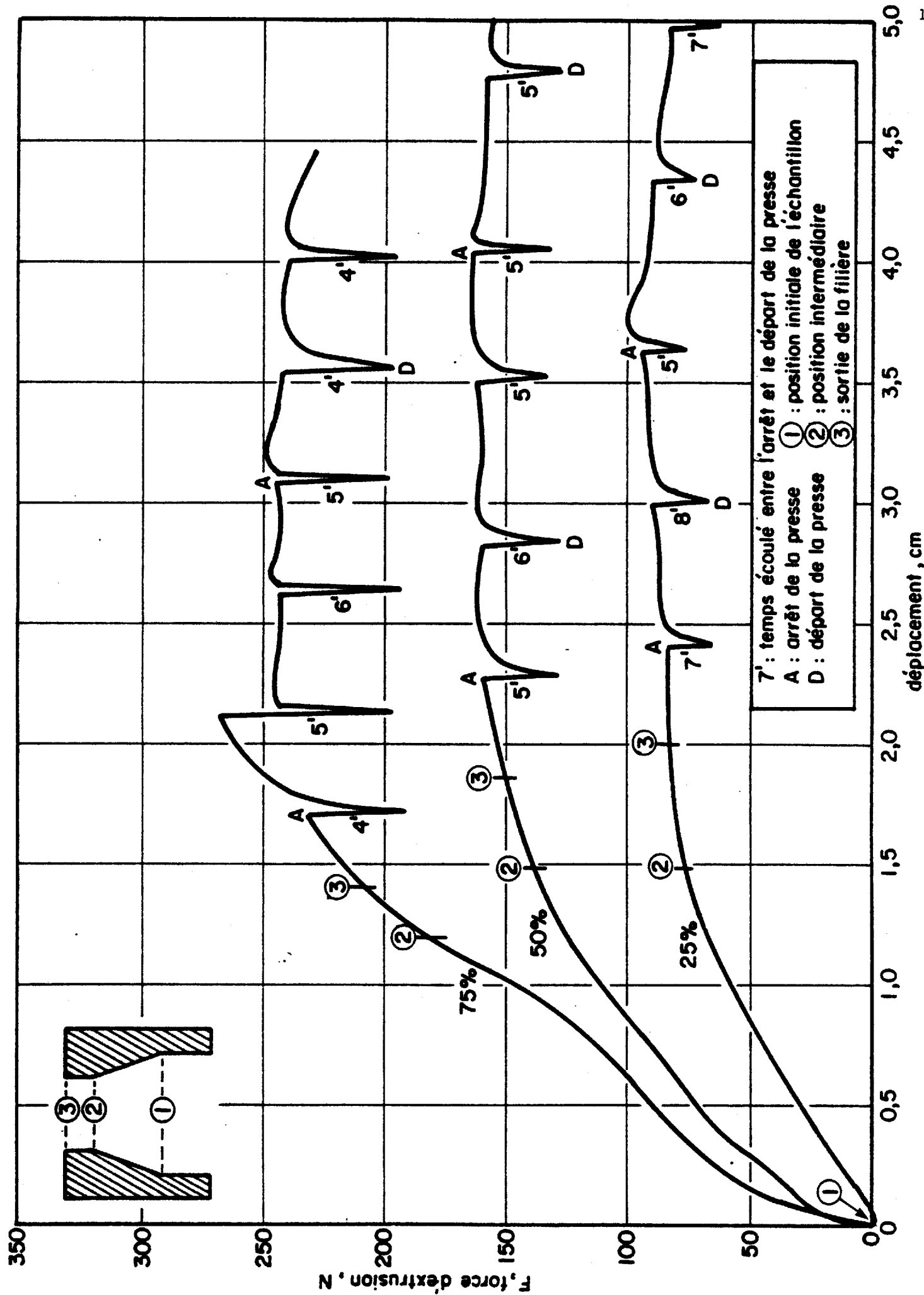


Fig. 65 — Essais d'extrusion — St-Hilaire, profondeur: 5,6 m.

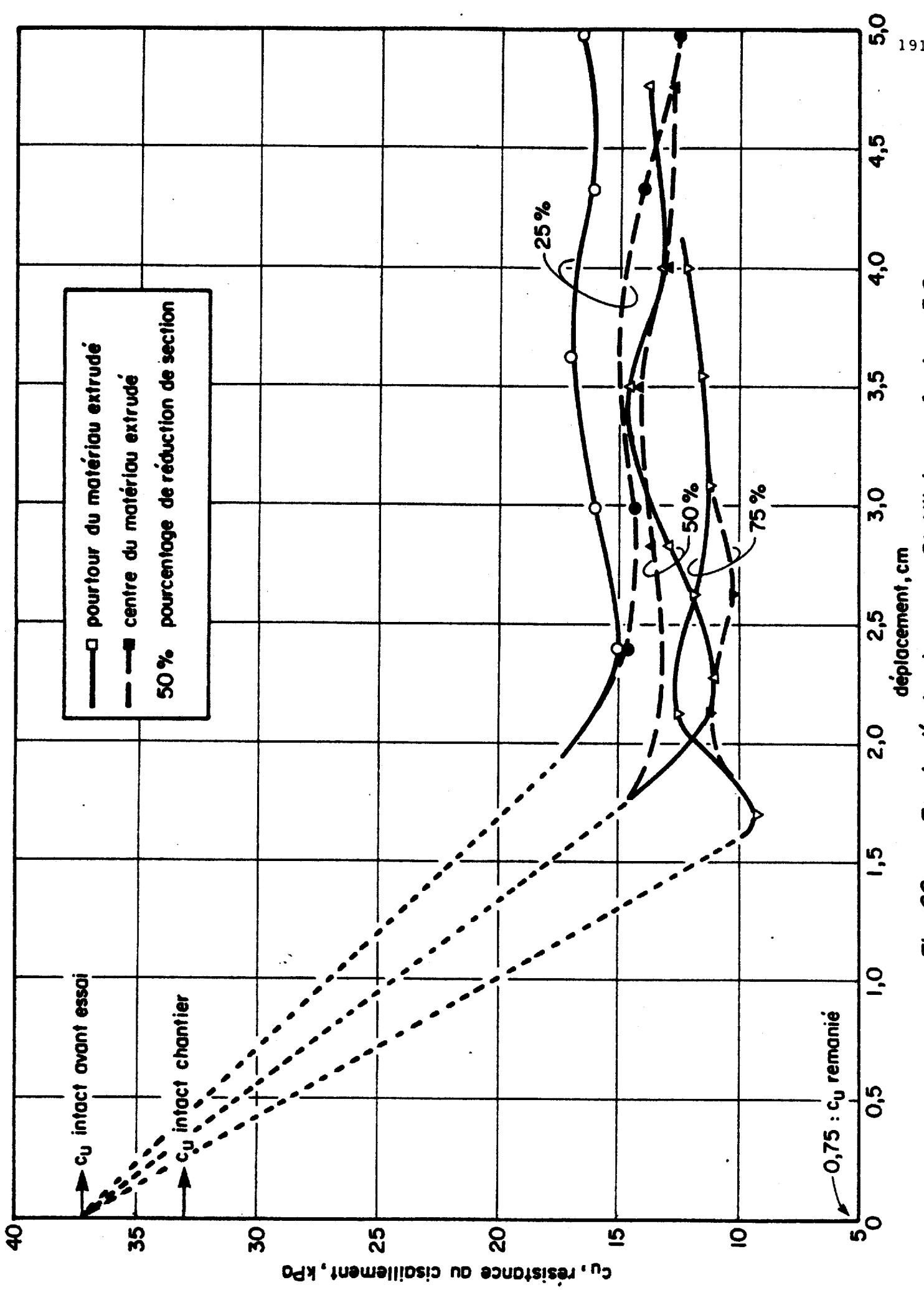


Fig. 66 — Essais d'extrusion — St-Hilaire, profondeur : 5,6 m.

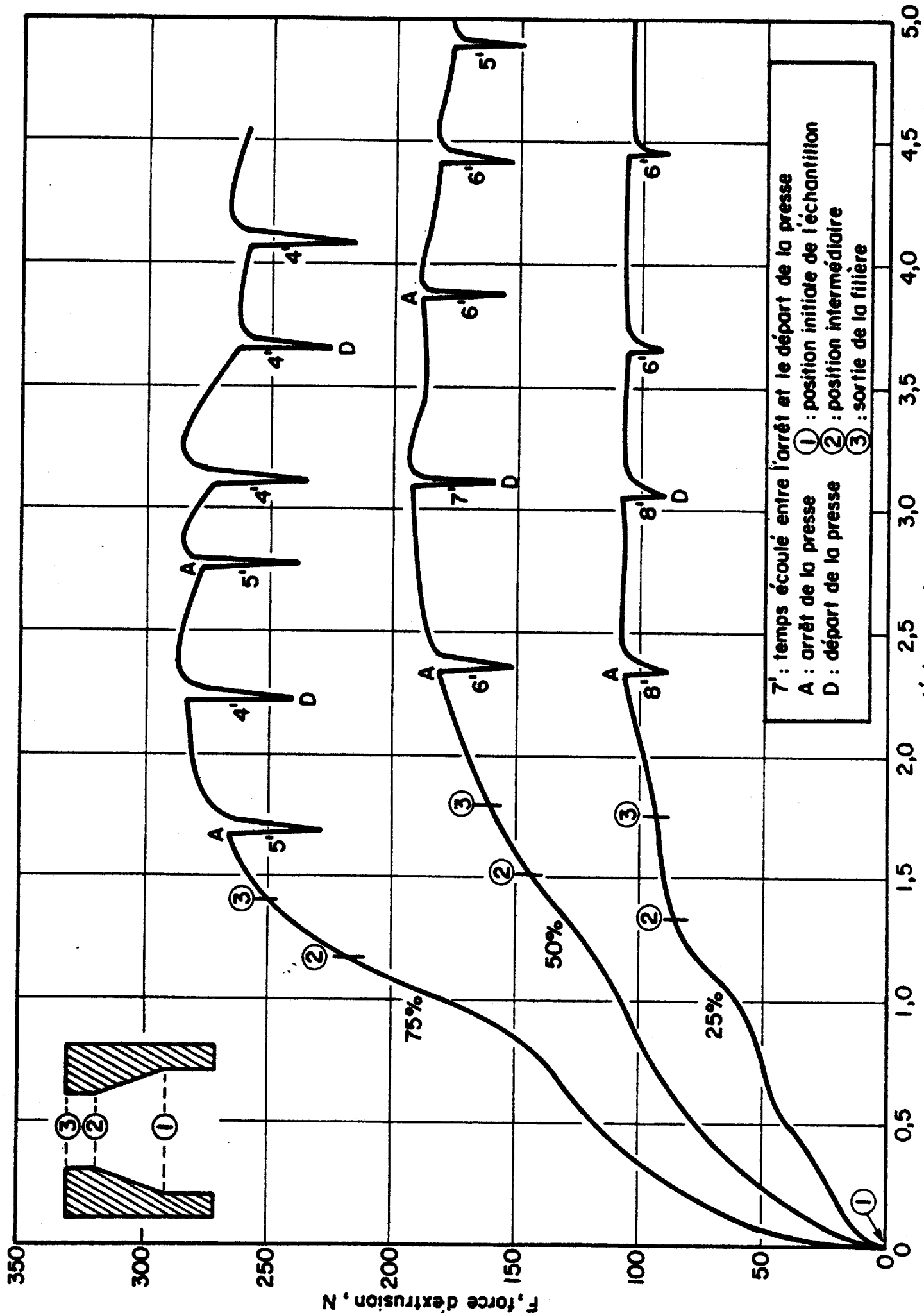


Fig. 67 — Essais d'extrusion — St-Hilaire, profondeur: 11,4 m.

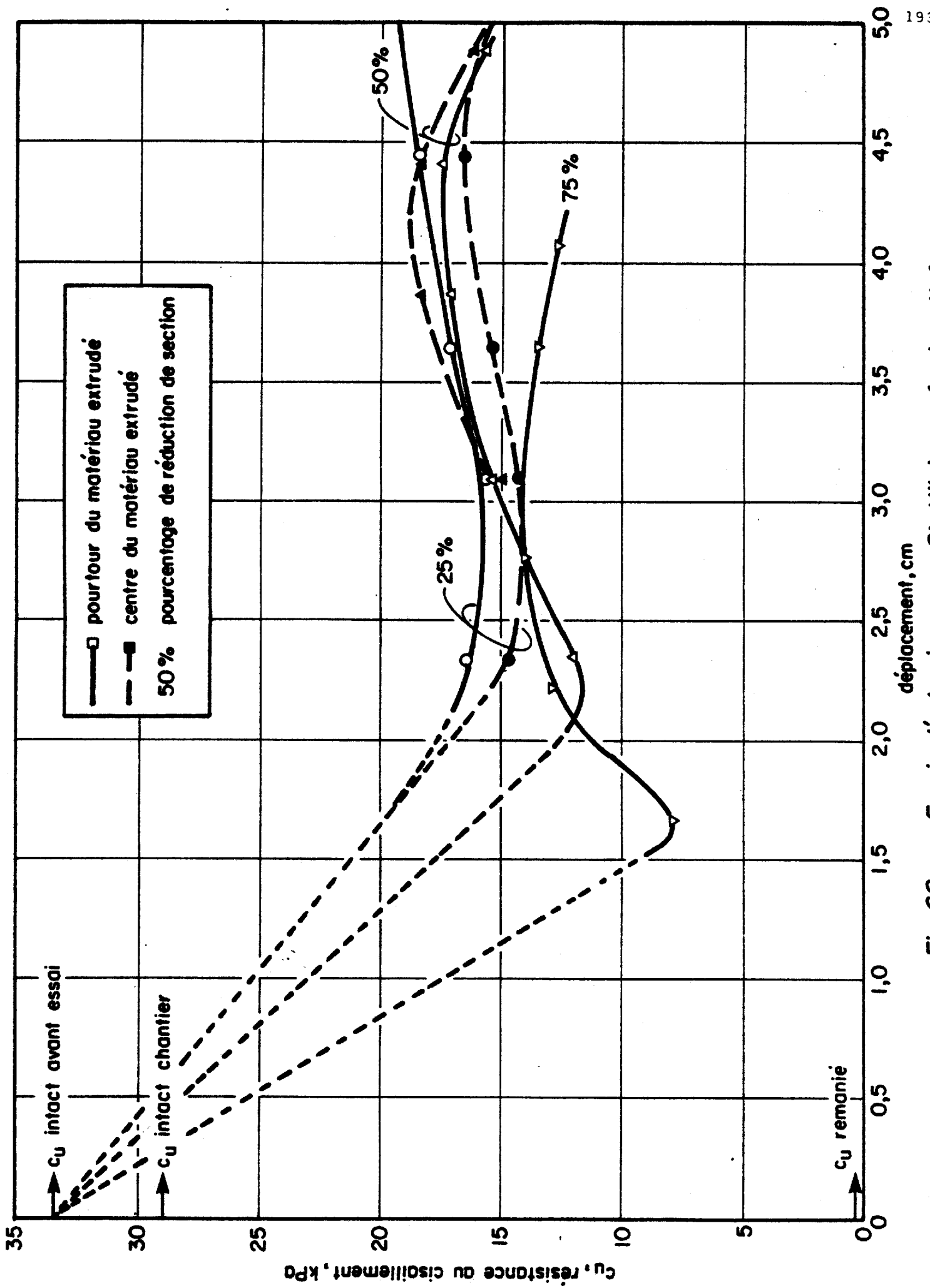


Fig. 68 — Essais d'extrusion — St-Hilaire, profondeur. 11, 4 m.

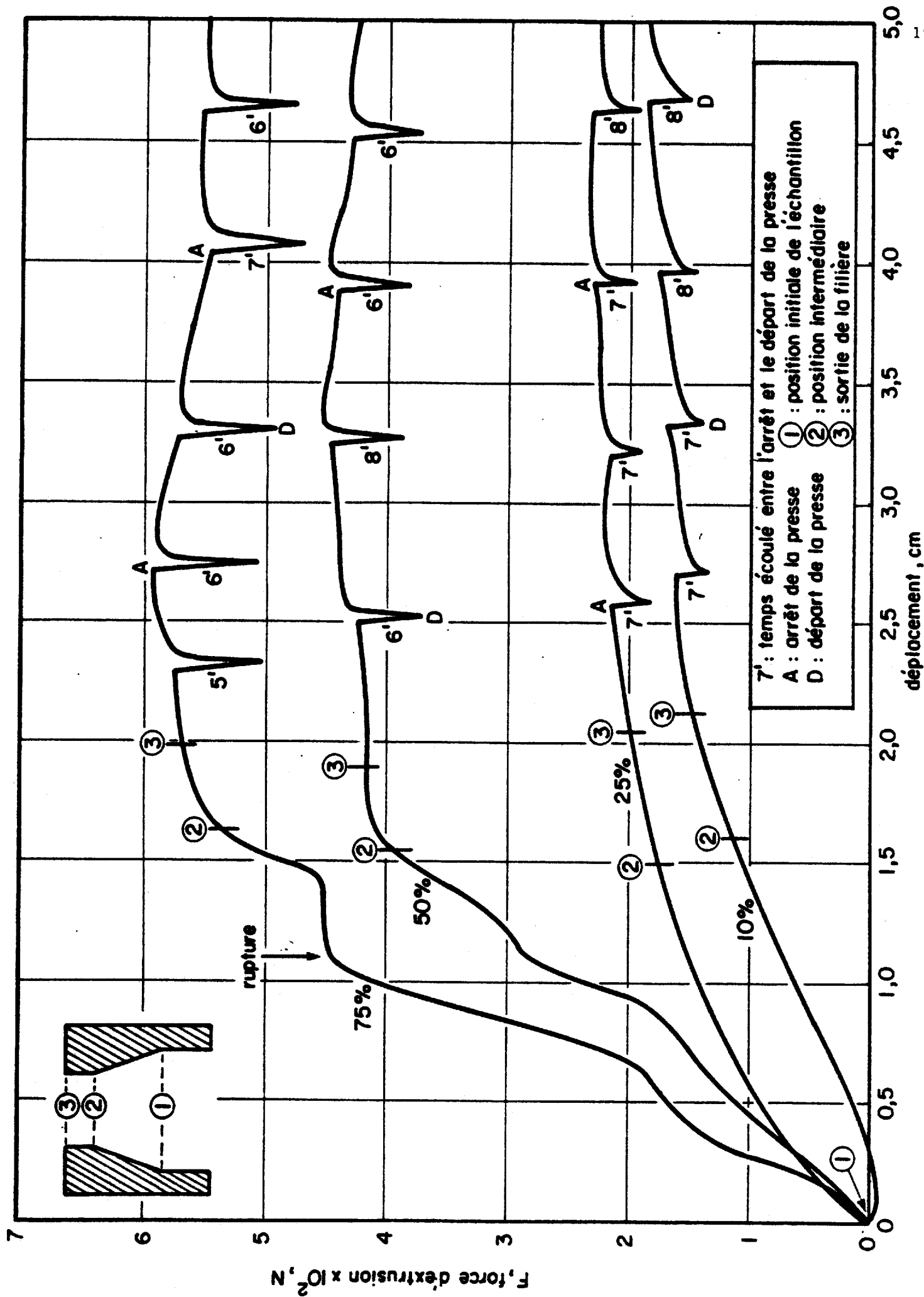


Fig. 69 — Essais d'extrusion, St - Thuribe, profondeur: 6,0 m.

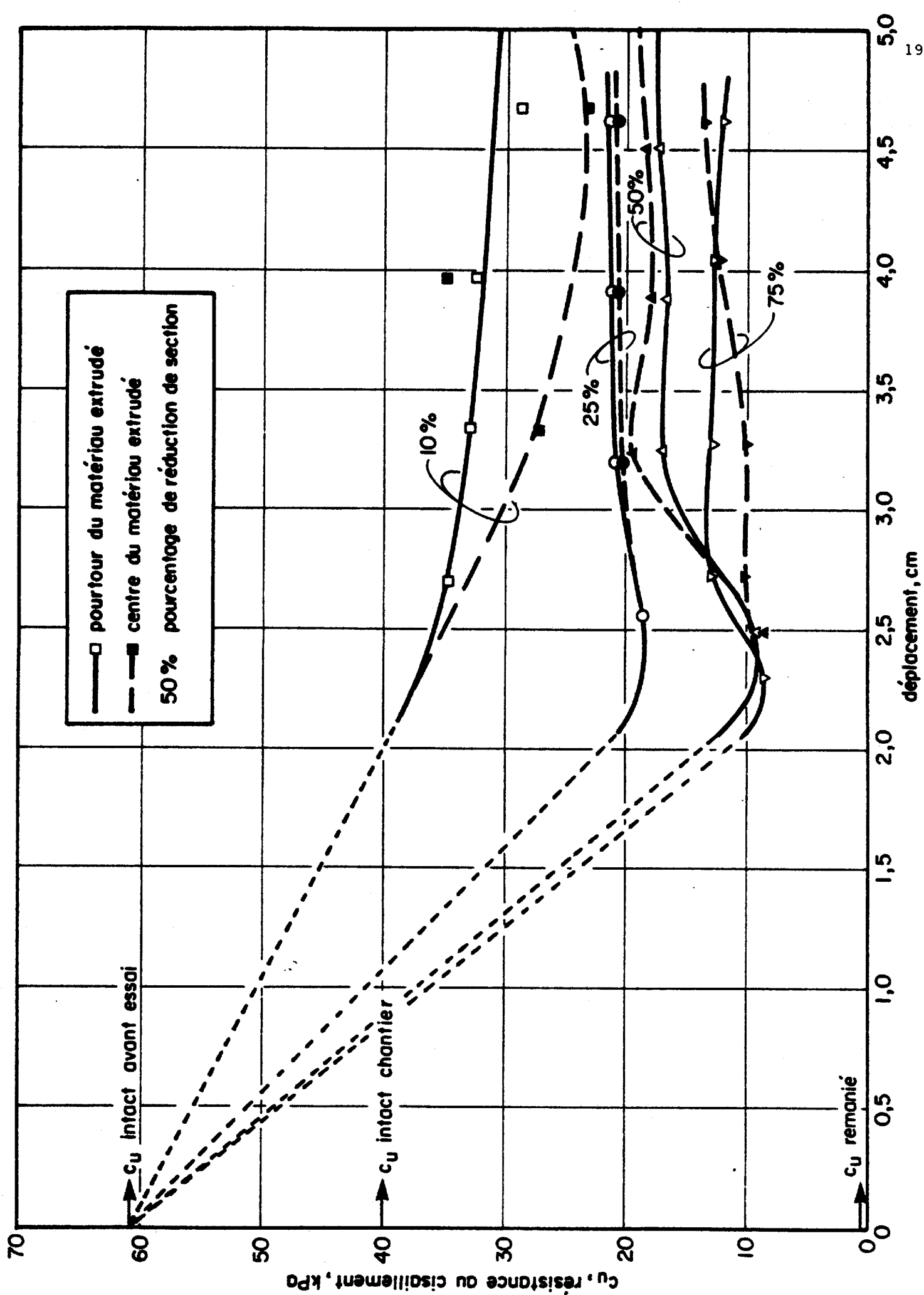


Fig. 70 — Essais d'extrusion, St-Thuribe, profondeur : 6,0 m.

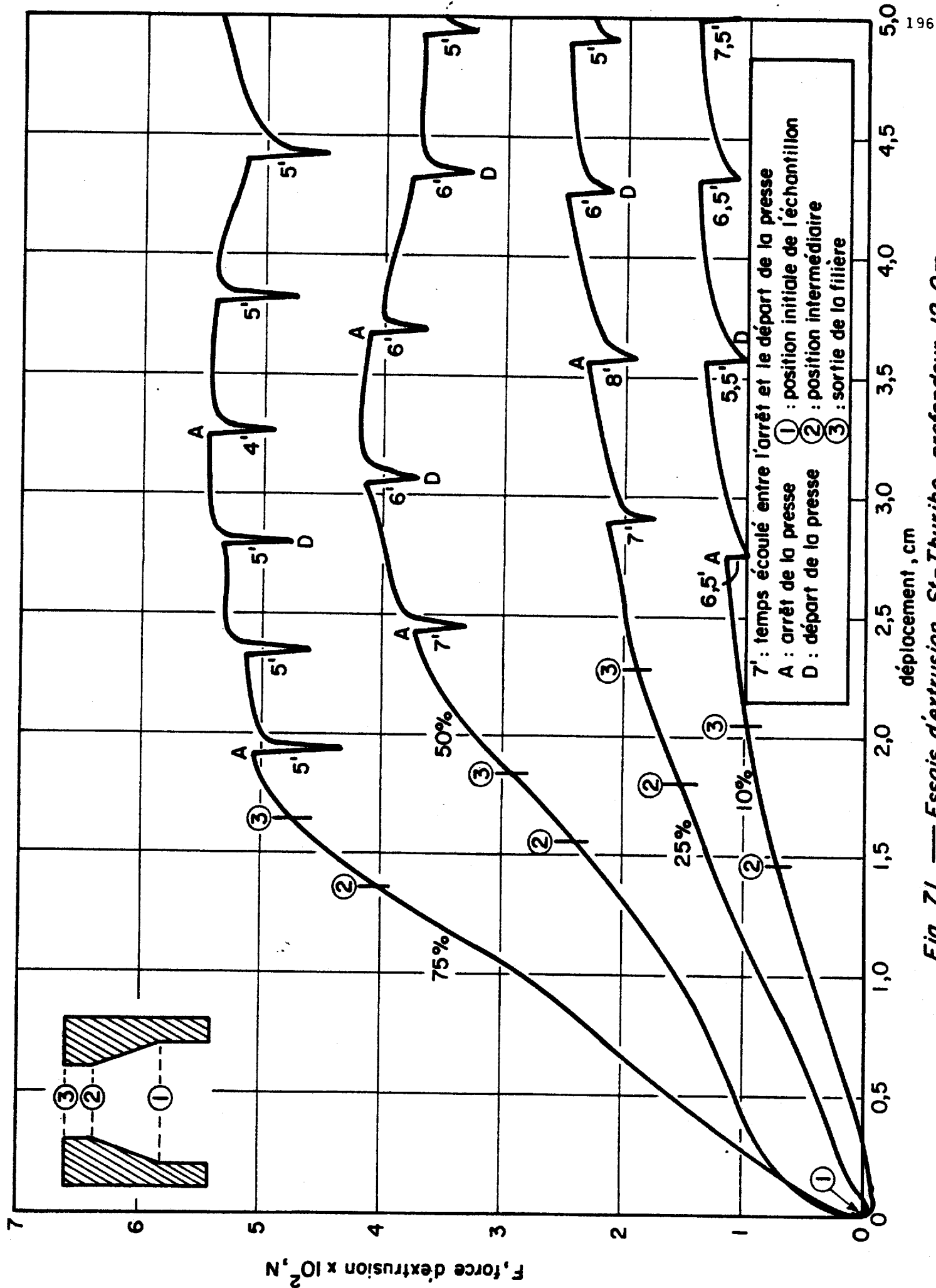


Fig. 71 — Essais d'extrusion, St-Thuribe, profondeur: 12,0m.

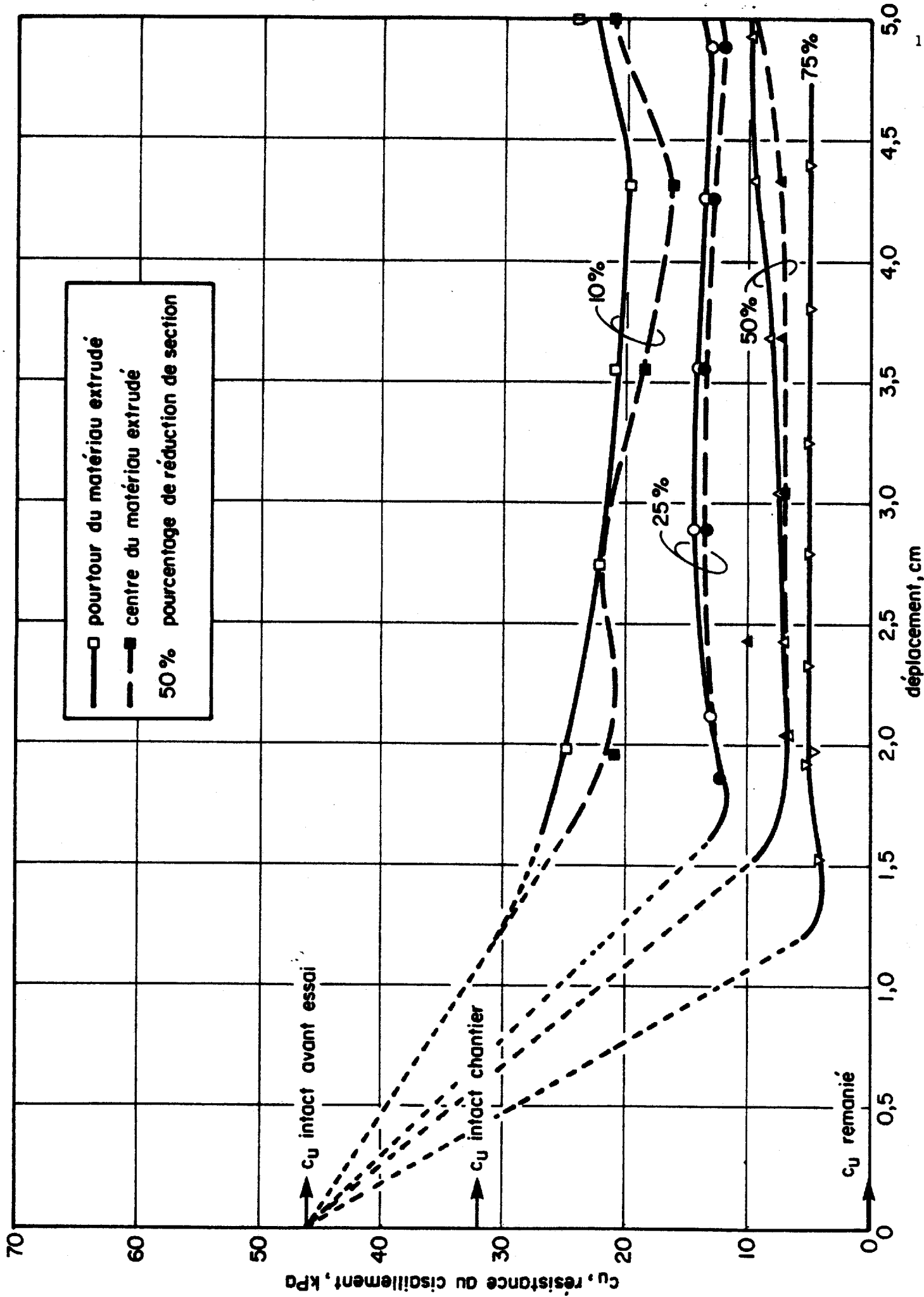


Fig. 72 — Essais d'extrusion, St-Thuribe, profondeur: 12,0 m.

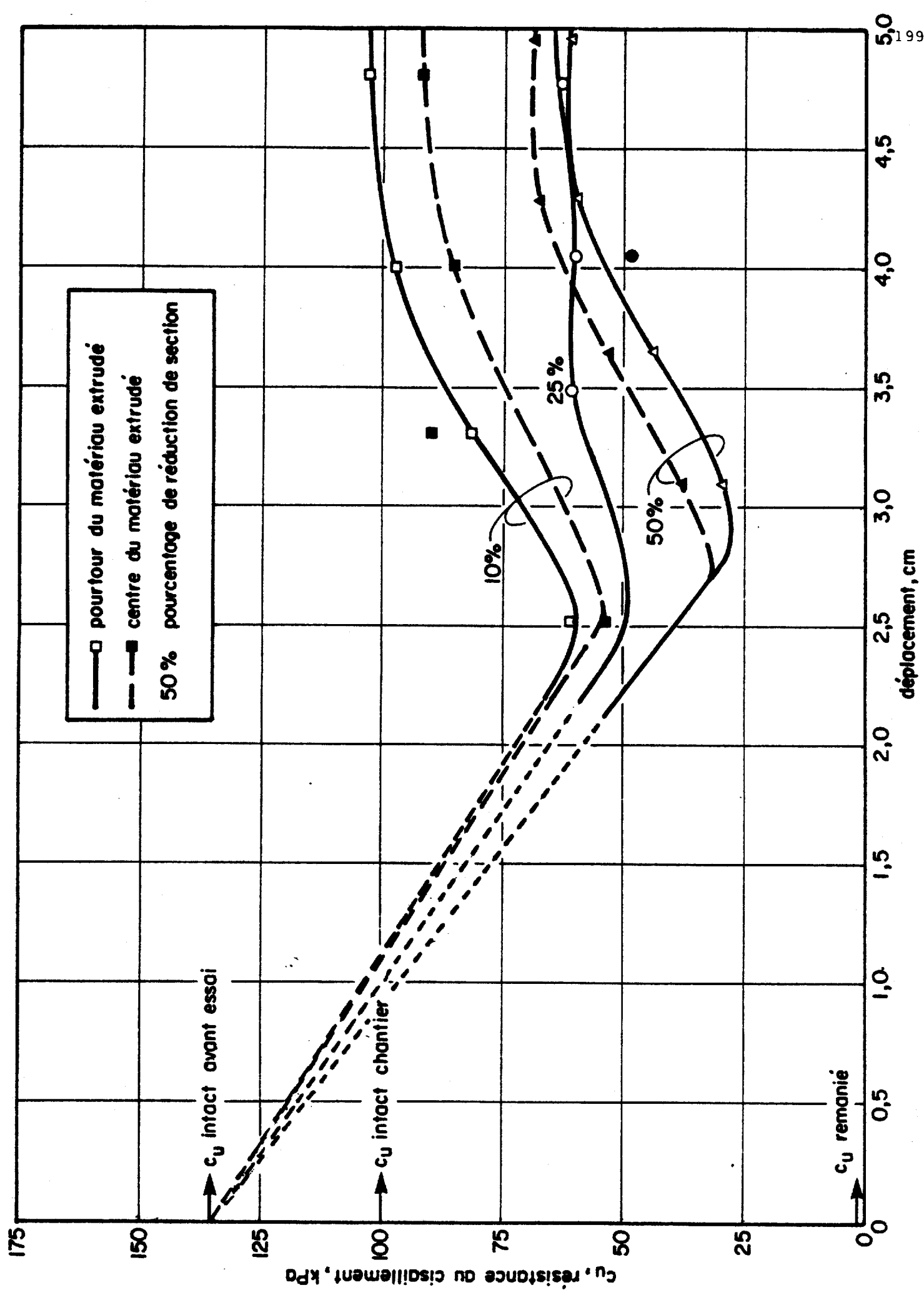


Fig. 74 — Essais d'extrusion, Mascouche, profondeur: 9,0 m.

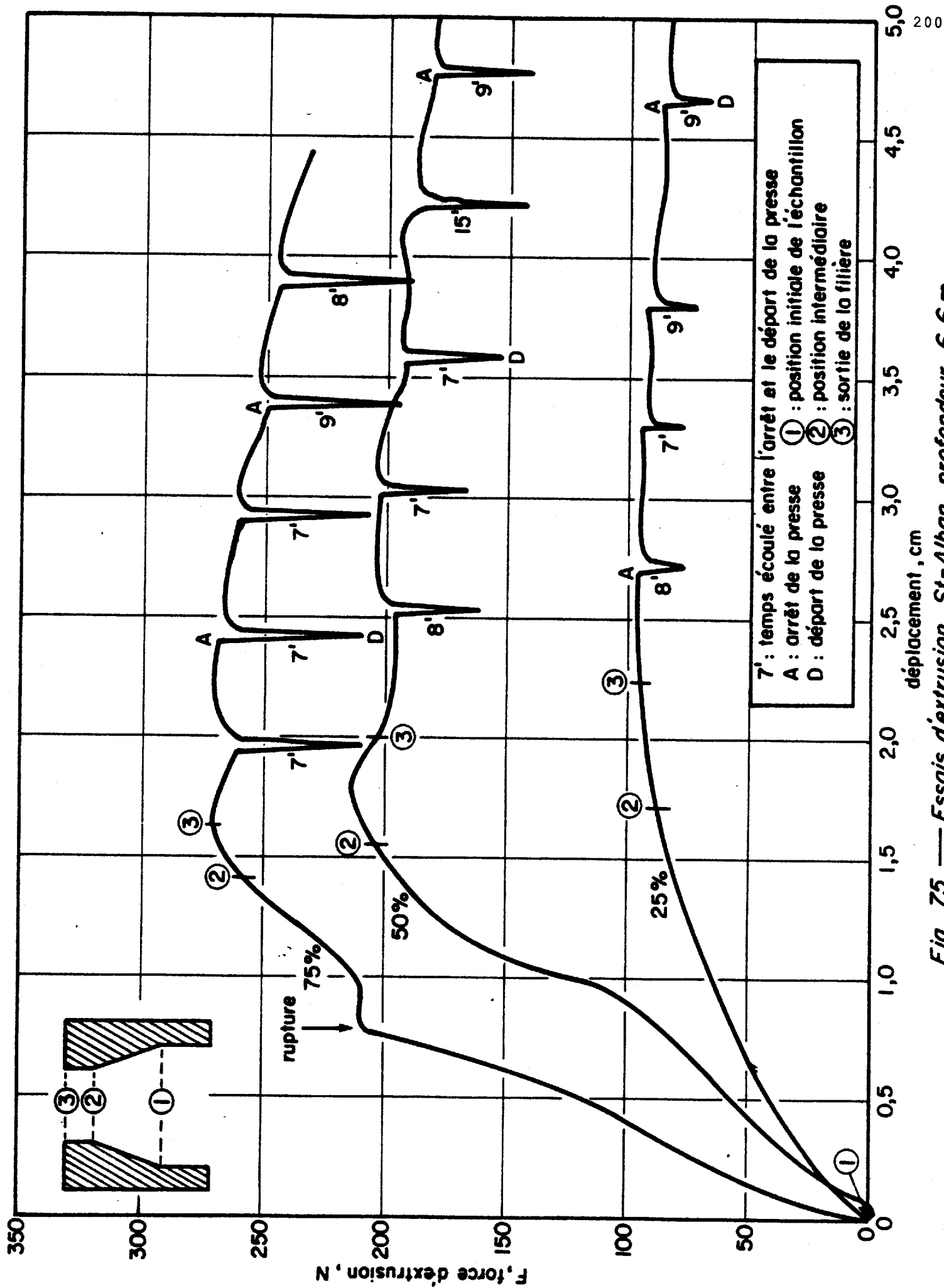


Fig. 75 — Essais d'extrusion, St-Alban, profondeur : 6,6 m.

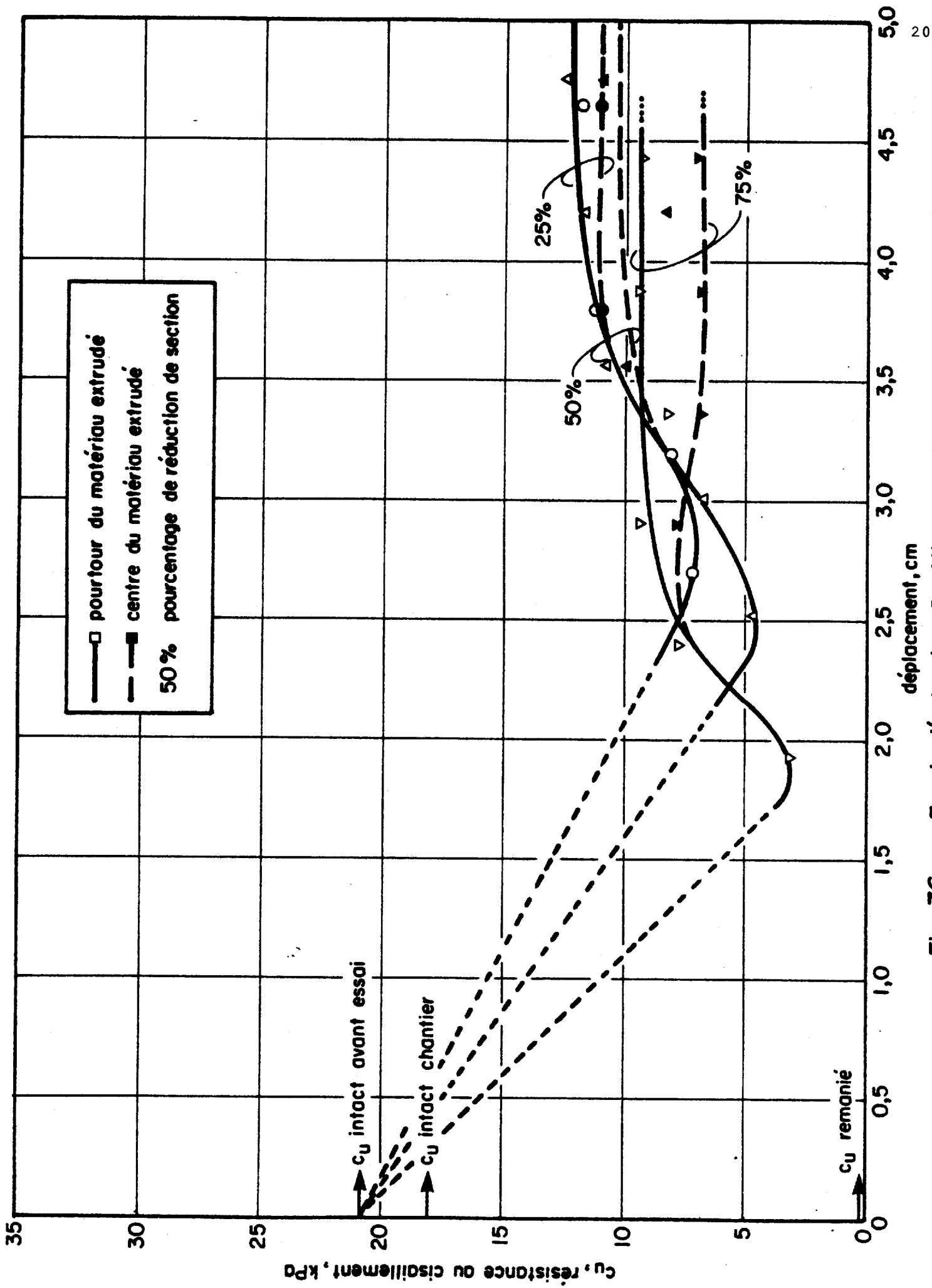


Fig. 76 — Essais d'extrusion, St-Alban, profondeur : 6,6 m.

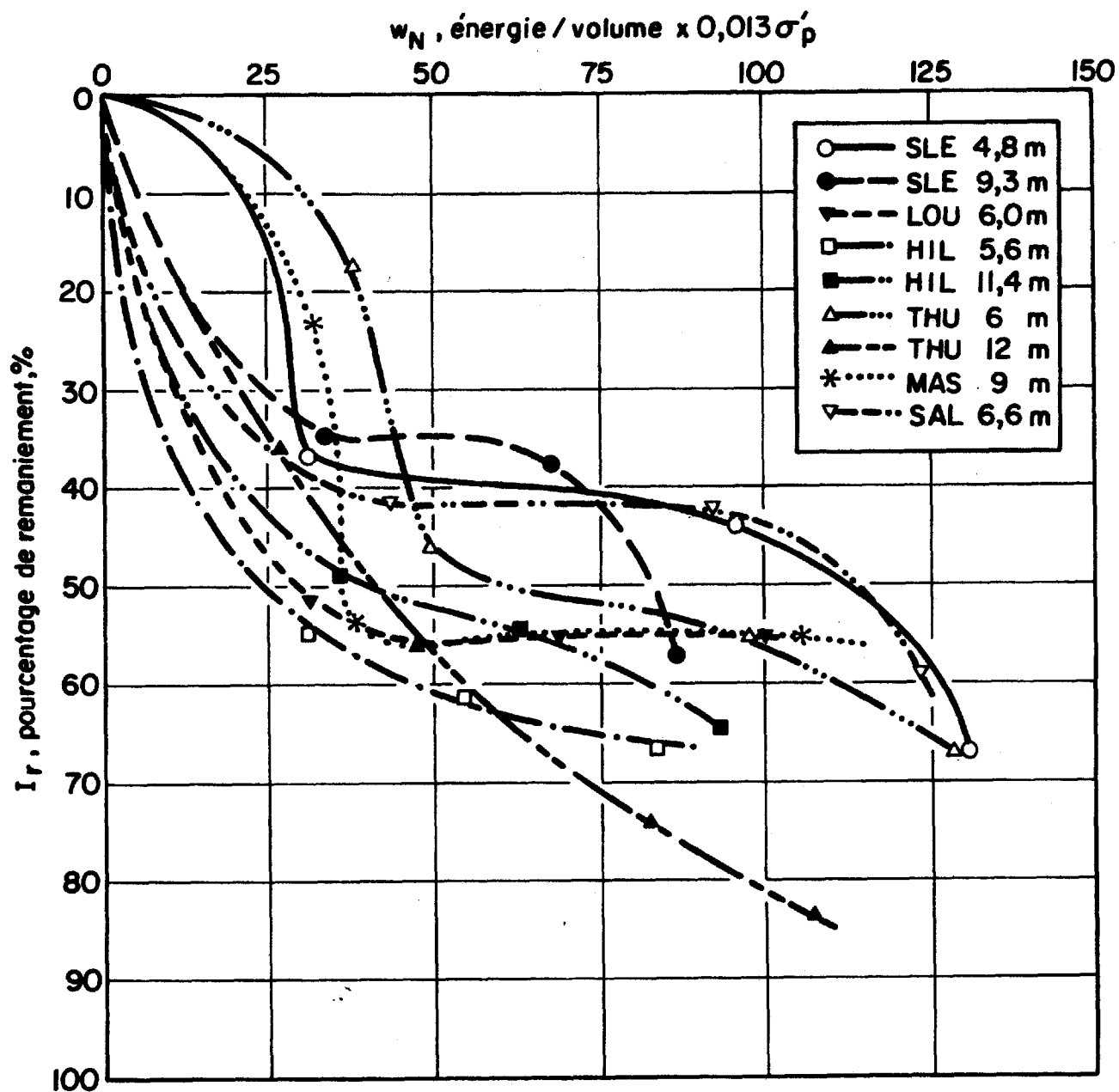


Fig. 77 — Essais d'extrusion.

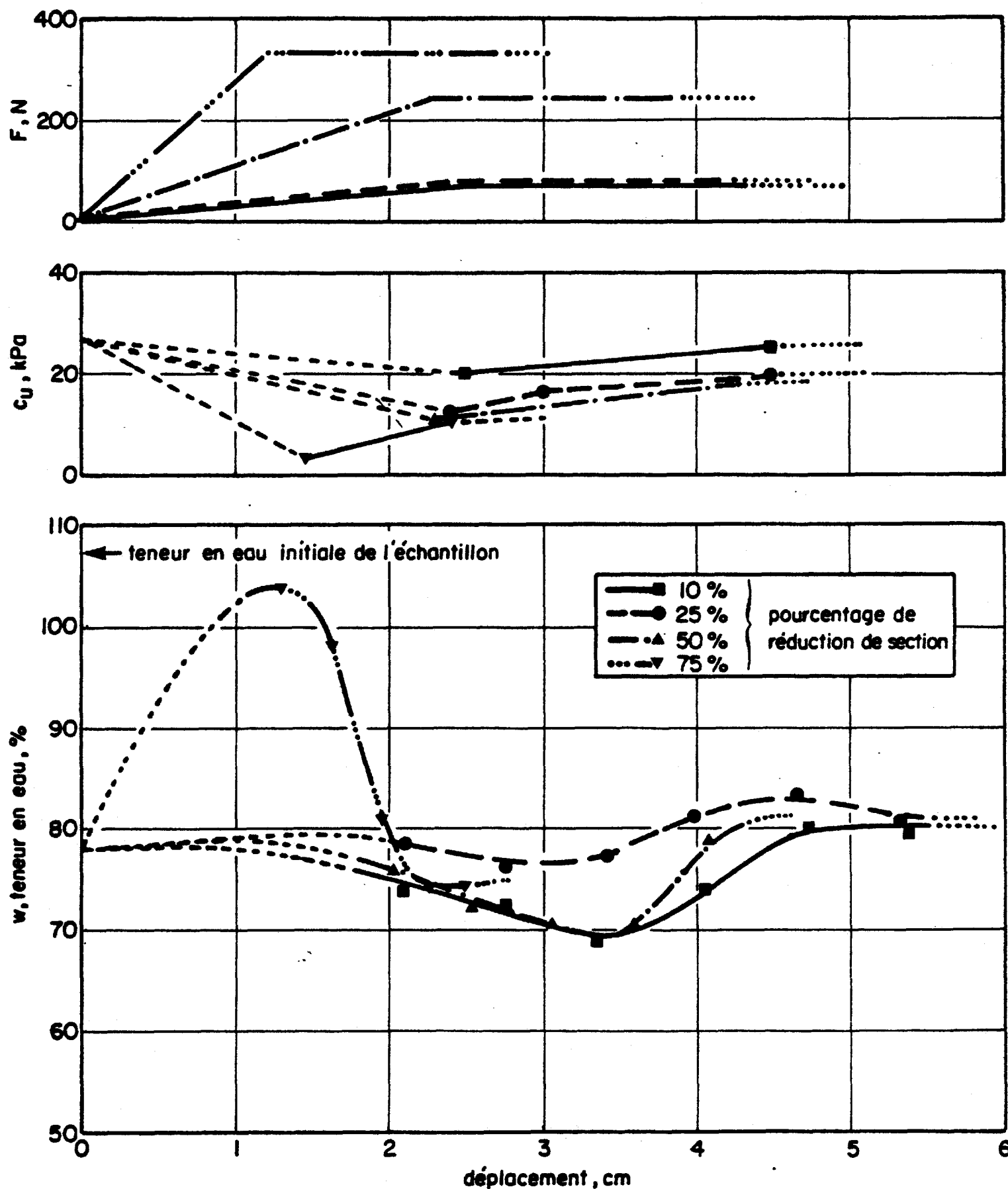


Fig. 78 — Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur : 4,8 m.

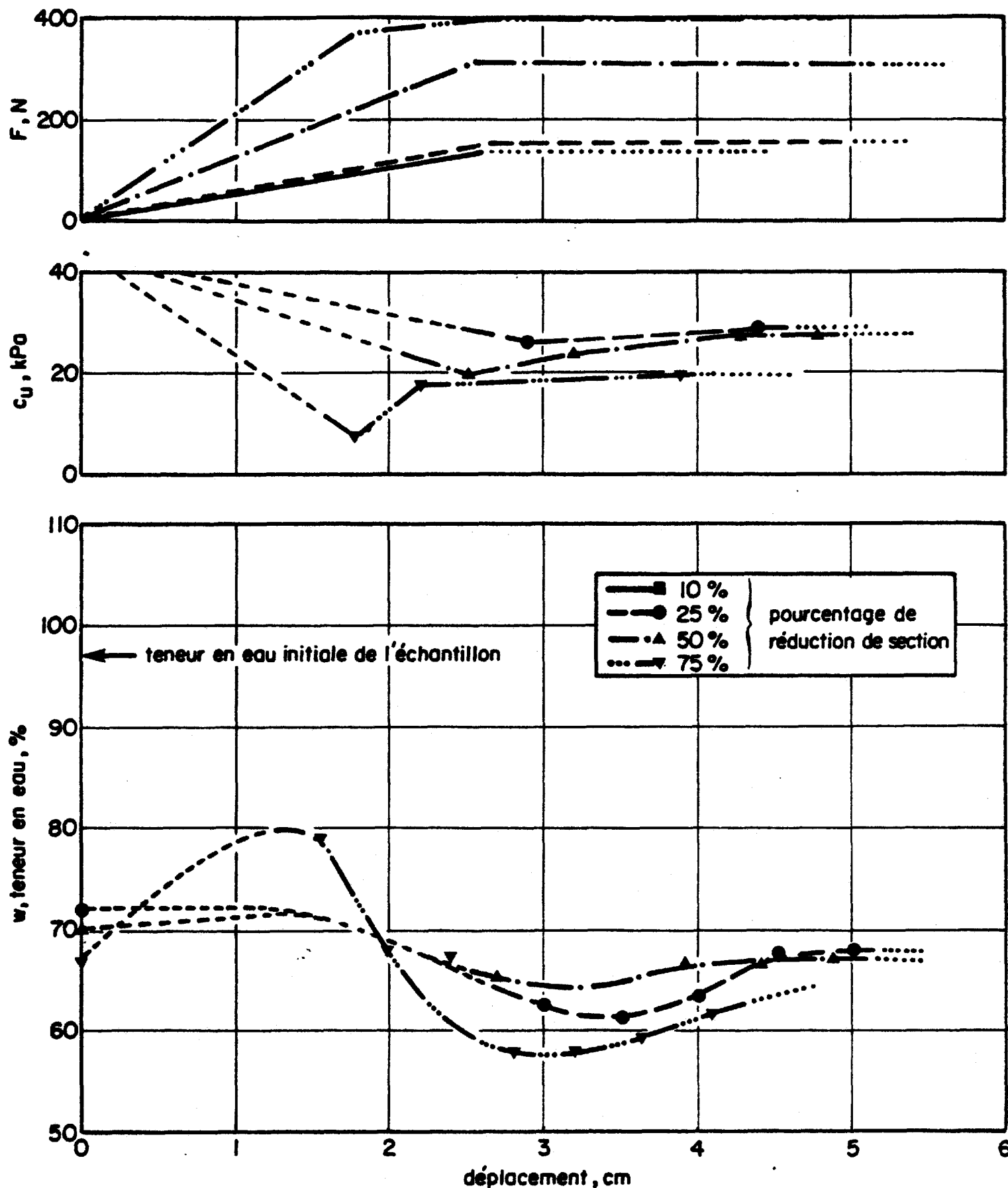


Fig. 79 — Essais d'extrusion, St-Léon, profondeur : 9,3 m.

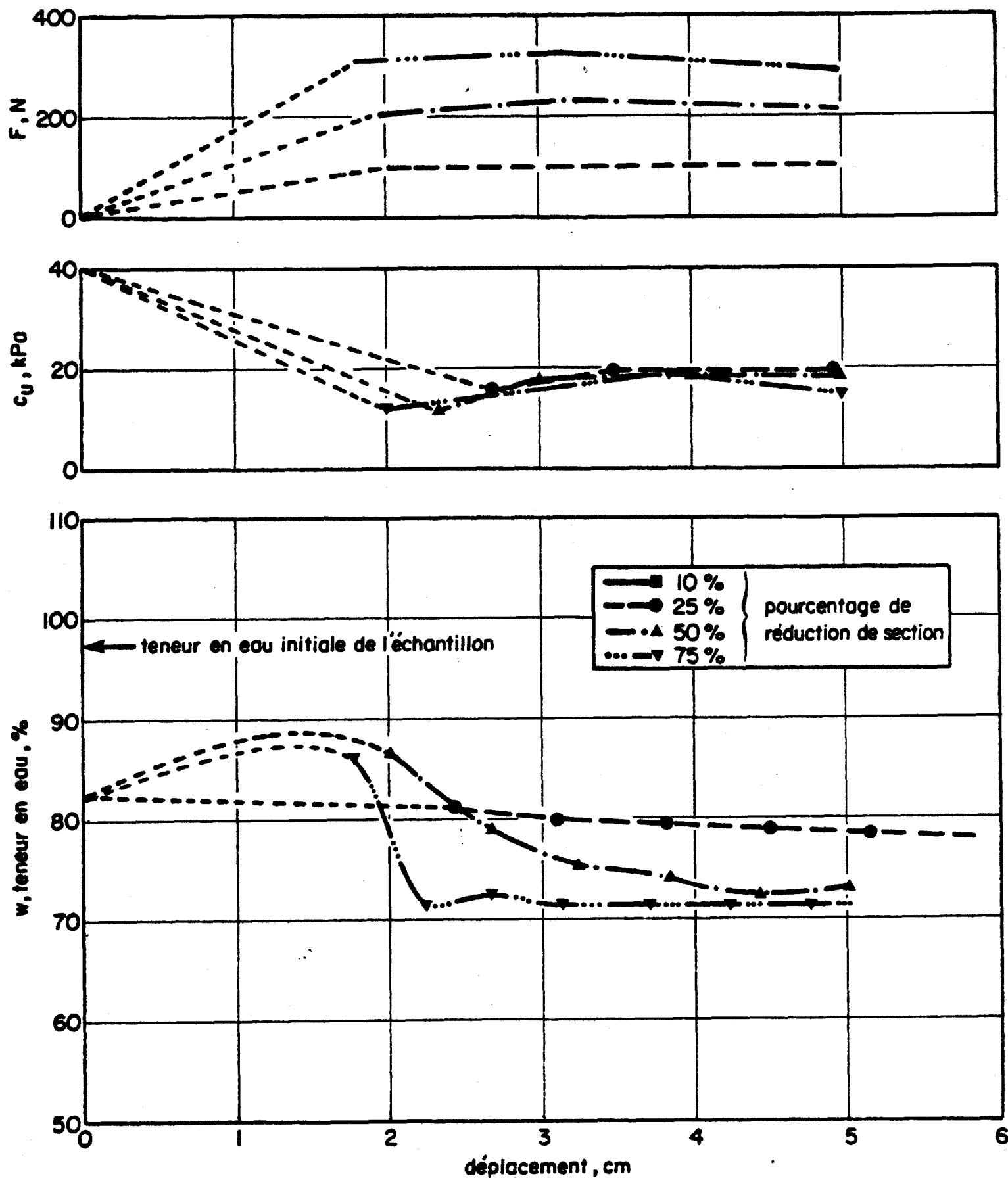


Fig. 80 — Essais d'extrusion, Louiseville, profondeur: 6,0 m.

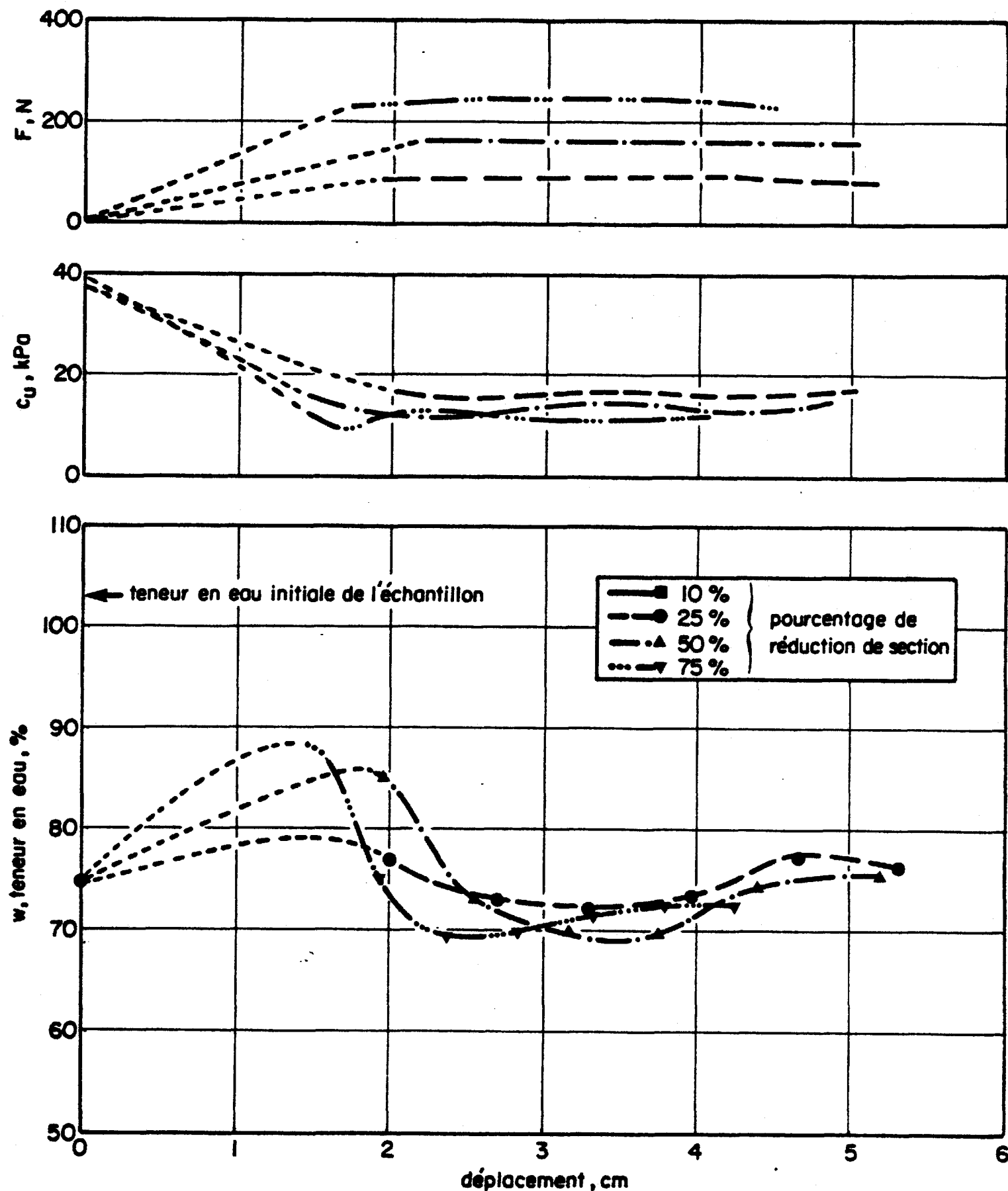


Fig. 81 — Essais d'extrusion — St-Hilaire, profondeur : 5,6 m.

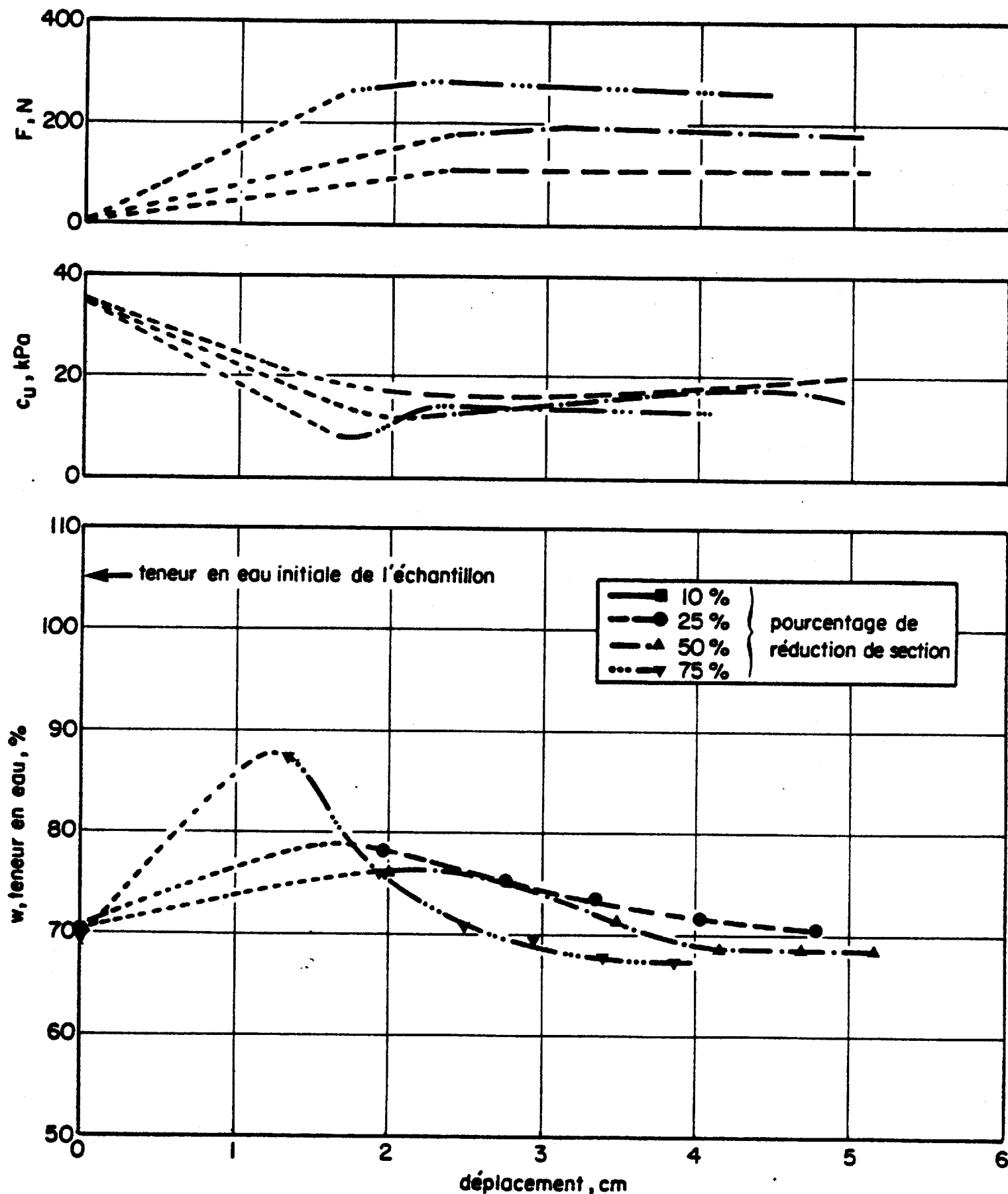


Fig. 82 — Essais d'extrusion — St-Hilaire, profondeur: 11,4 m.

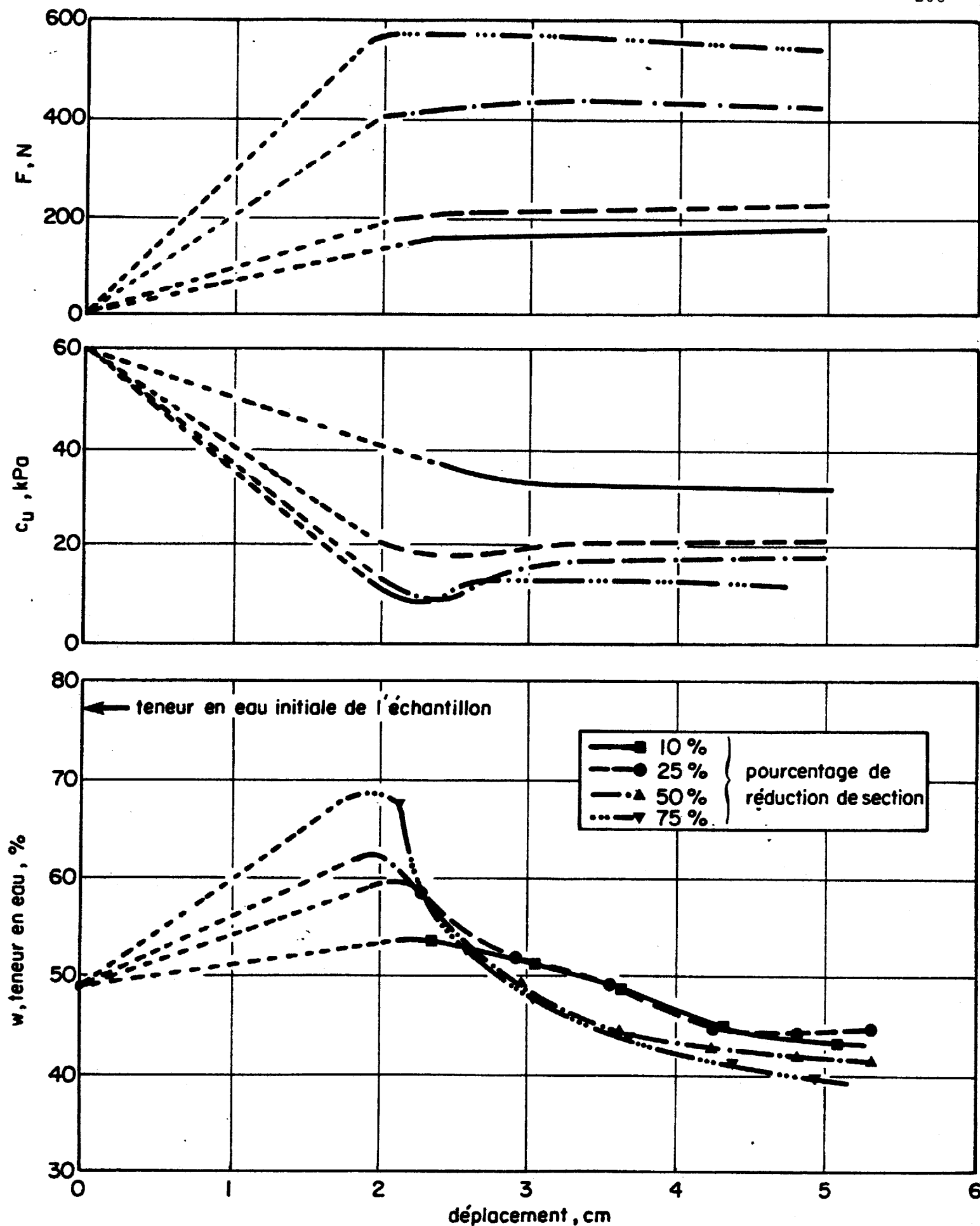


Fig. 83 — Essais d'extrusion, St-Thuribe, profondeur : 6,0 m.

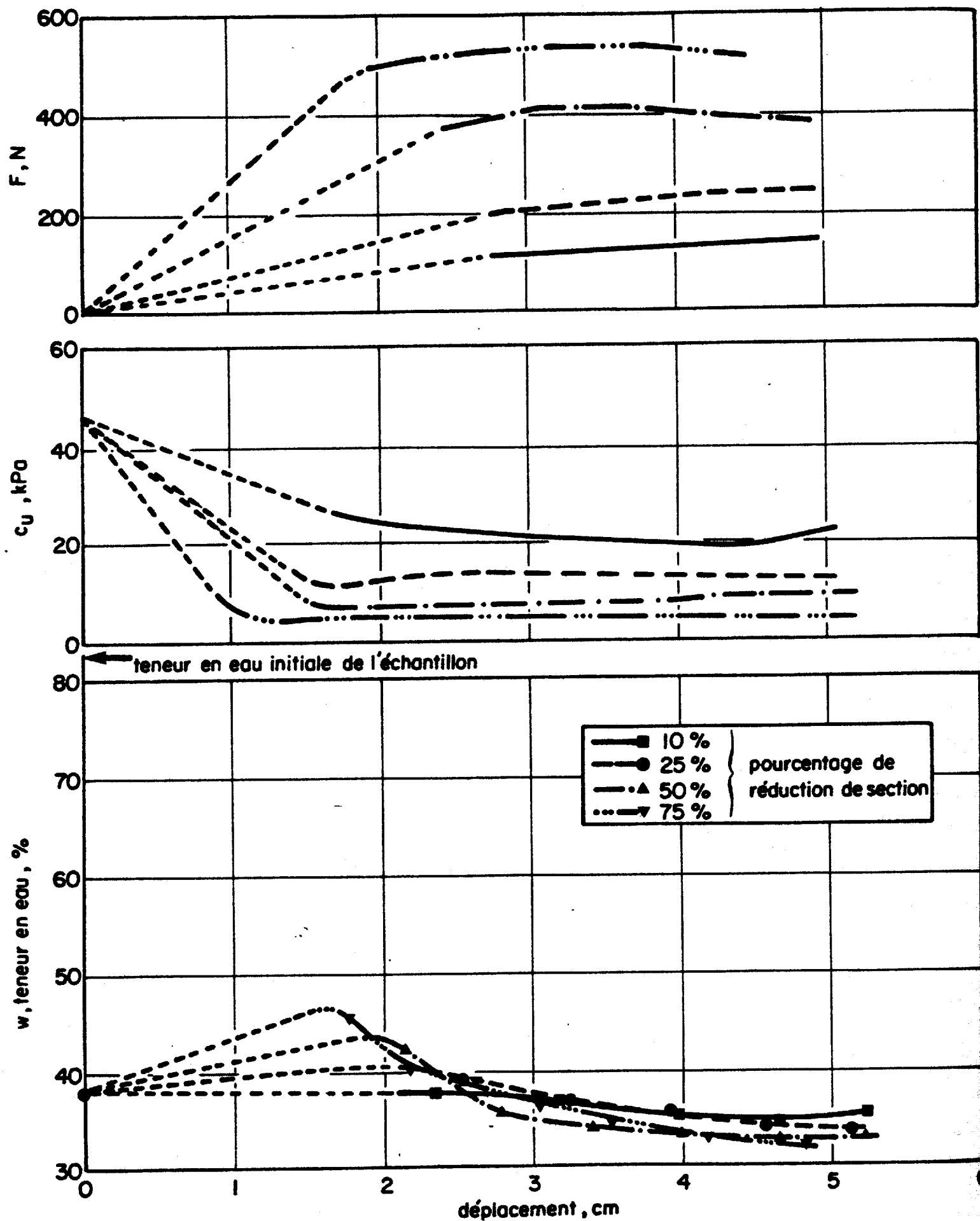


Fig. 84 — Essais d'extrusion, St-Thuribe, profondeur : 12,0 m.

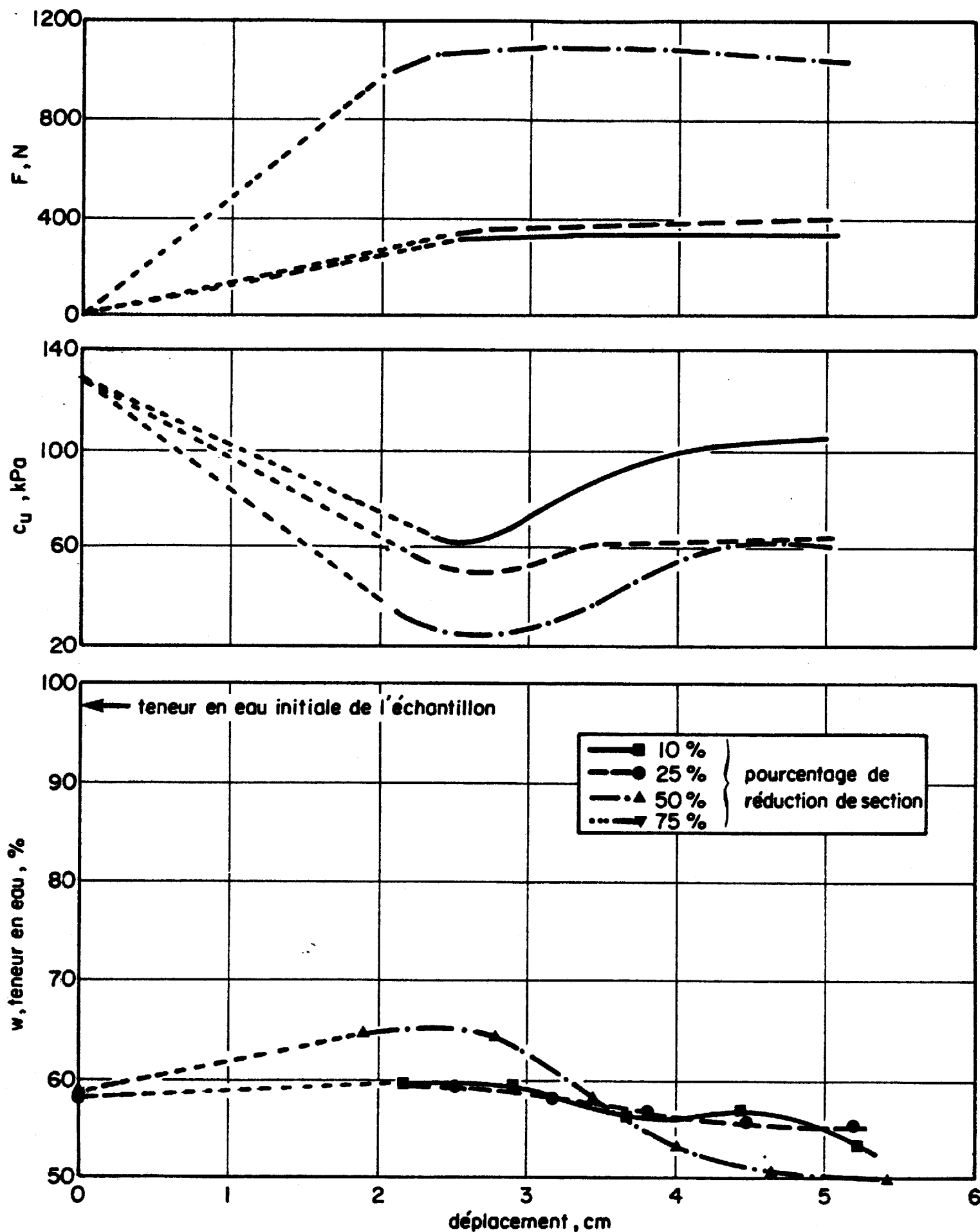


Fig. 85 — Essais d'extrusion, Mascouche, profondeur : 9,0 m.

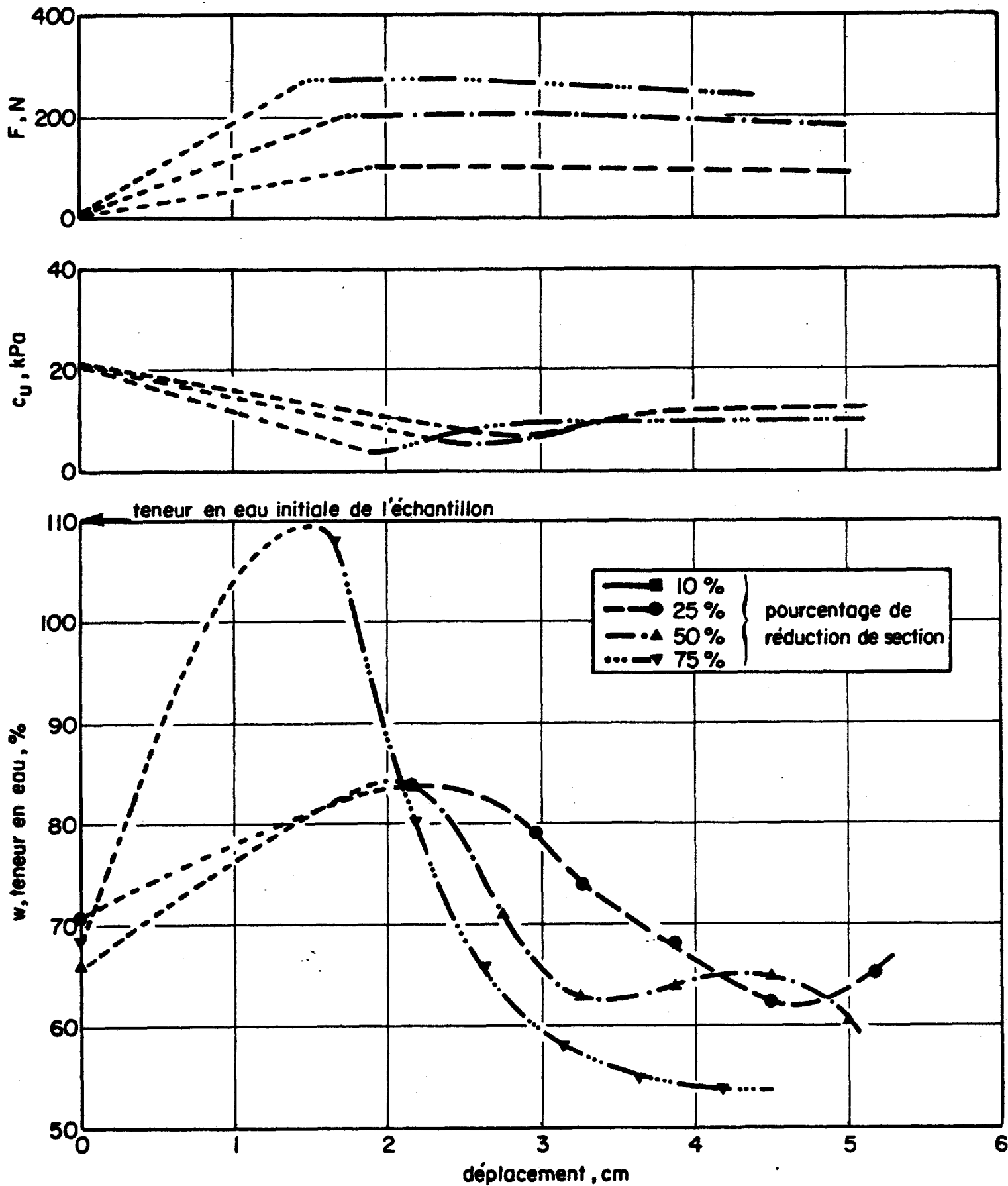


Fig. 86 — Essais d'extrusion, St-Alban, profondeur : 6,6 m.

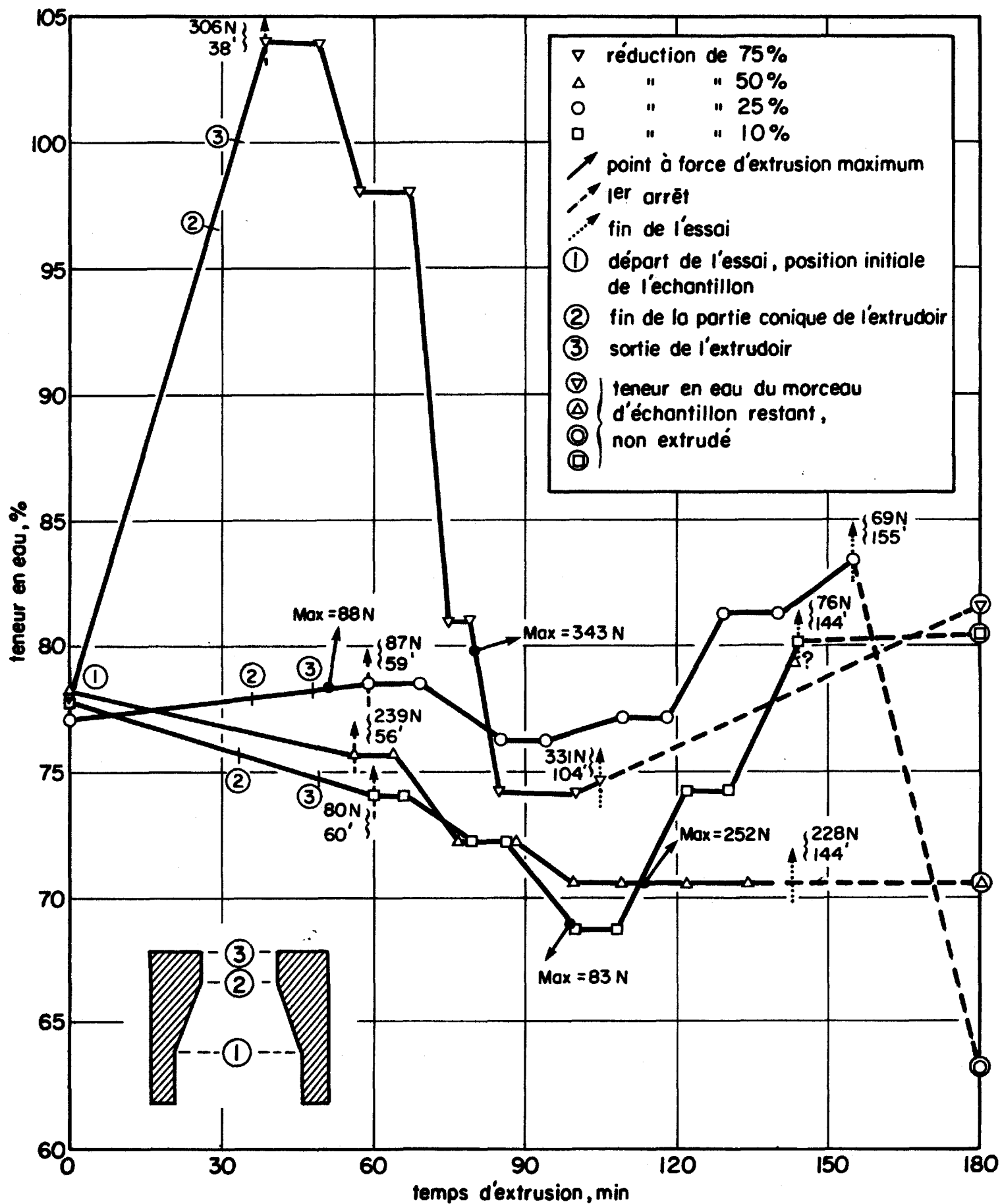


Fig. 87 — Essais d'extrusion, teneur en eau vs temps d'extrusion.

St-Léon (4,8m)

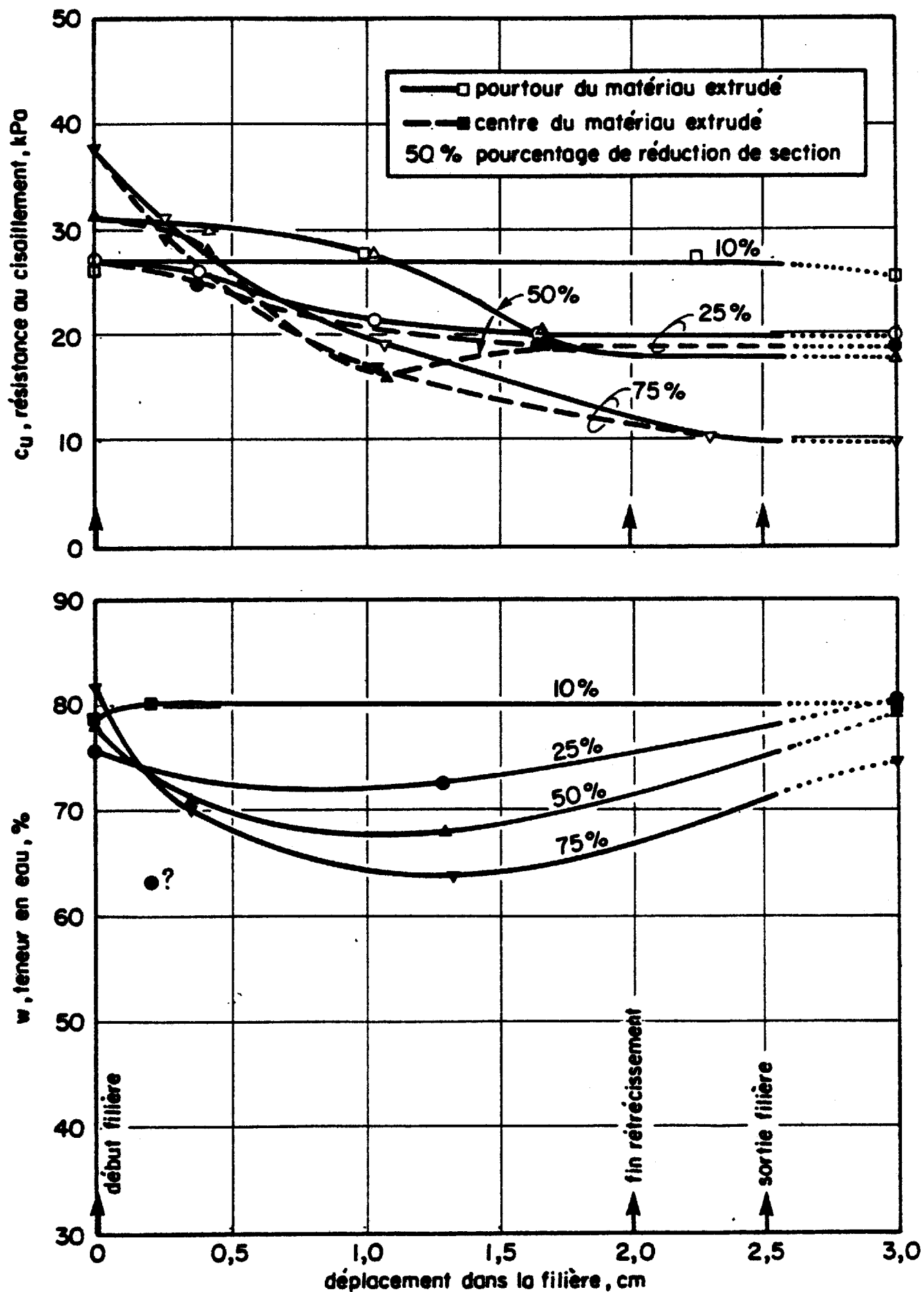


Fig. 88 — Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Léon, profondeur : 4,8 m.

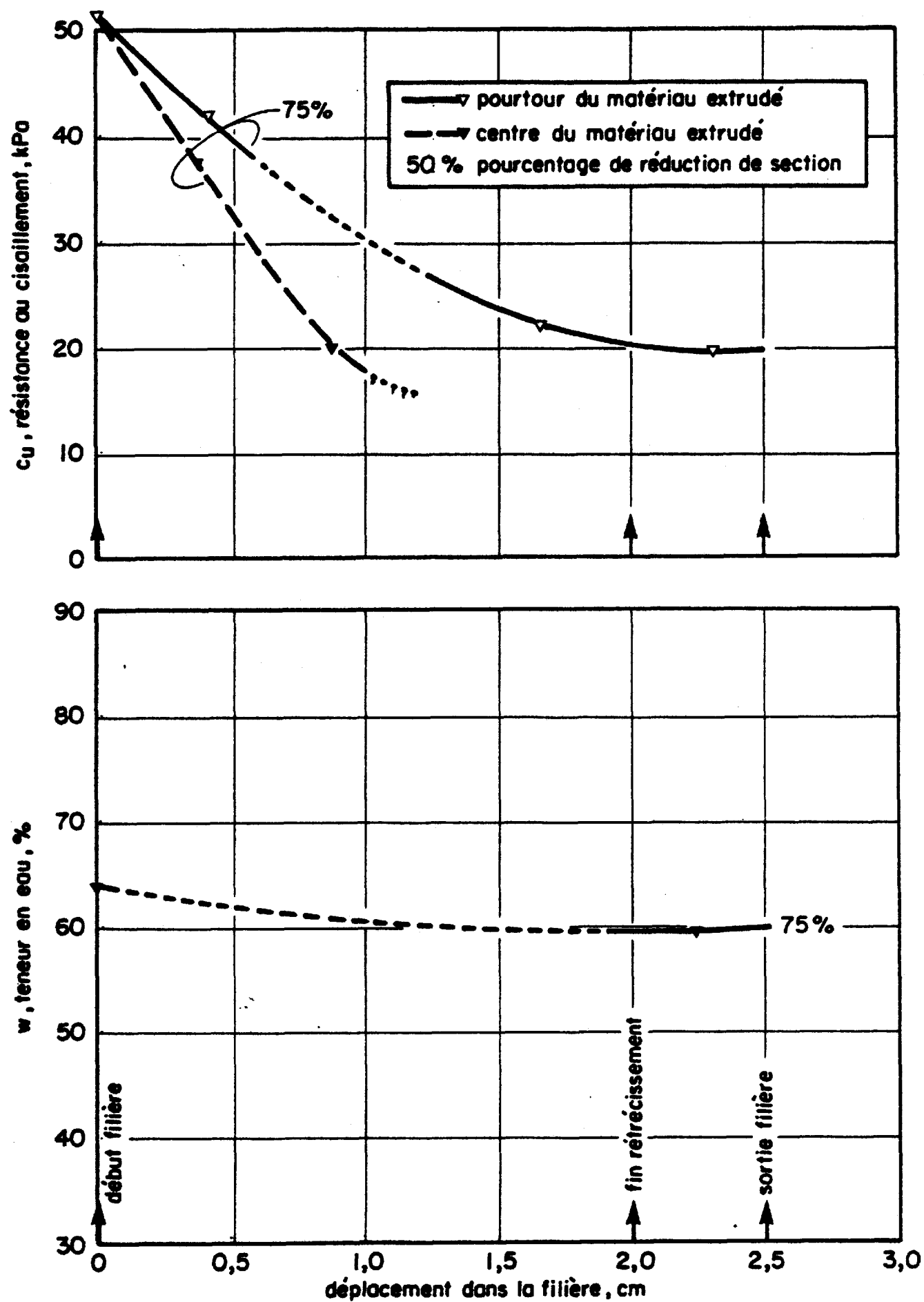


Fig. 89 — Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, S1-Léon, profondeur : 9,3 m.

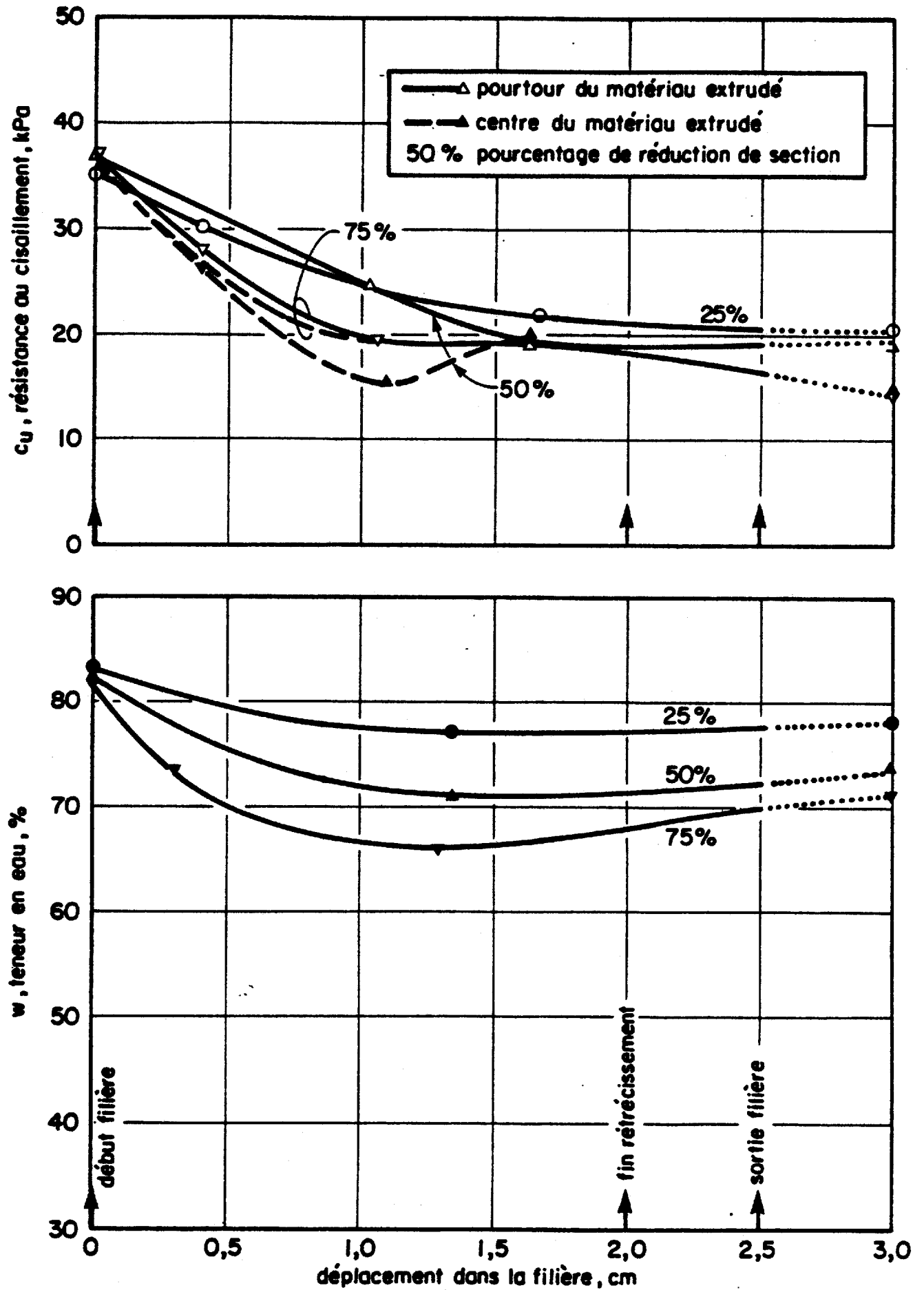


Fig. 90 — Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, Louiseville, profondeur: 6 m.

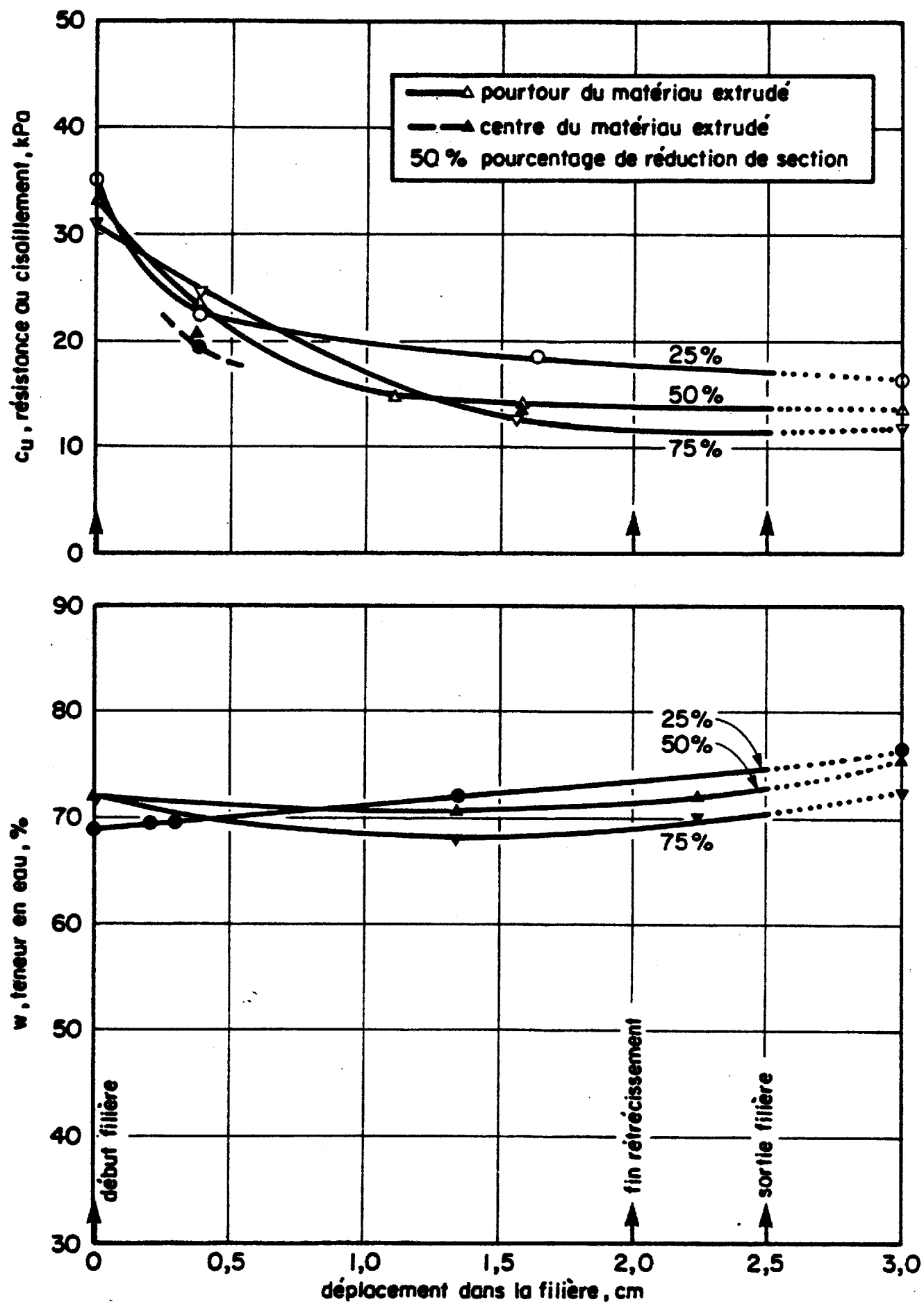


Fig. 91 — Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Hilaire, profondeur: 5,6 m.

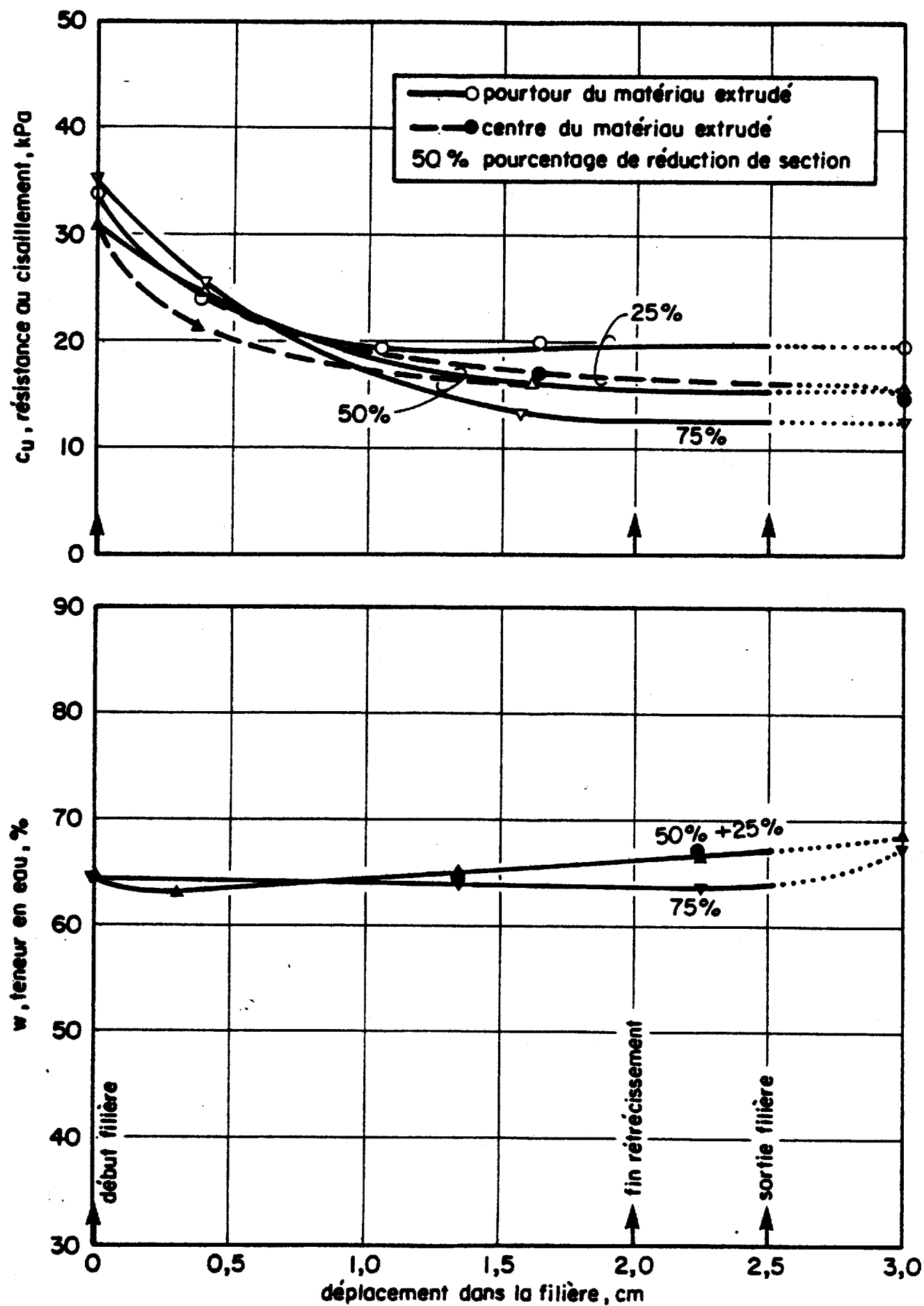


Fig. 92 — Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Hilaire, profondeur : 11,4 m.

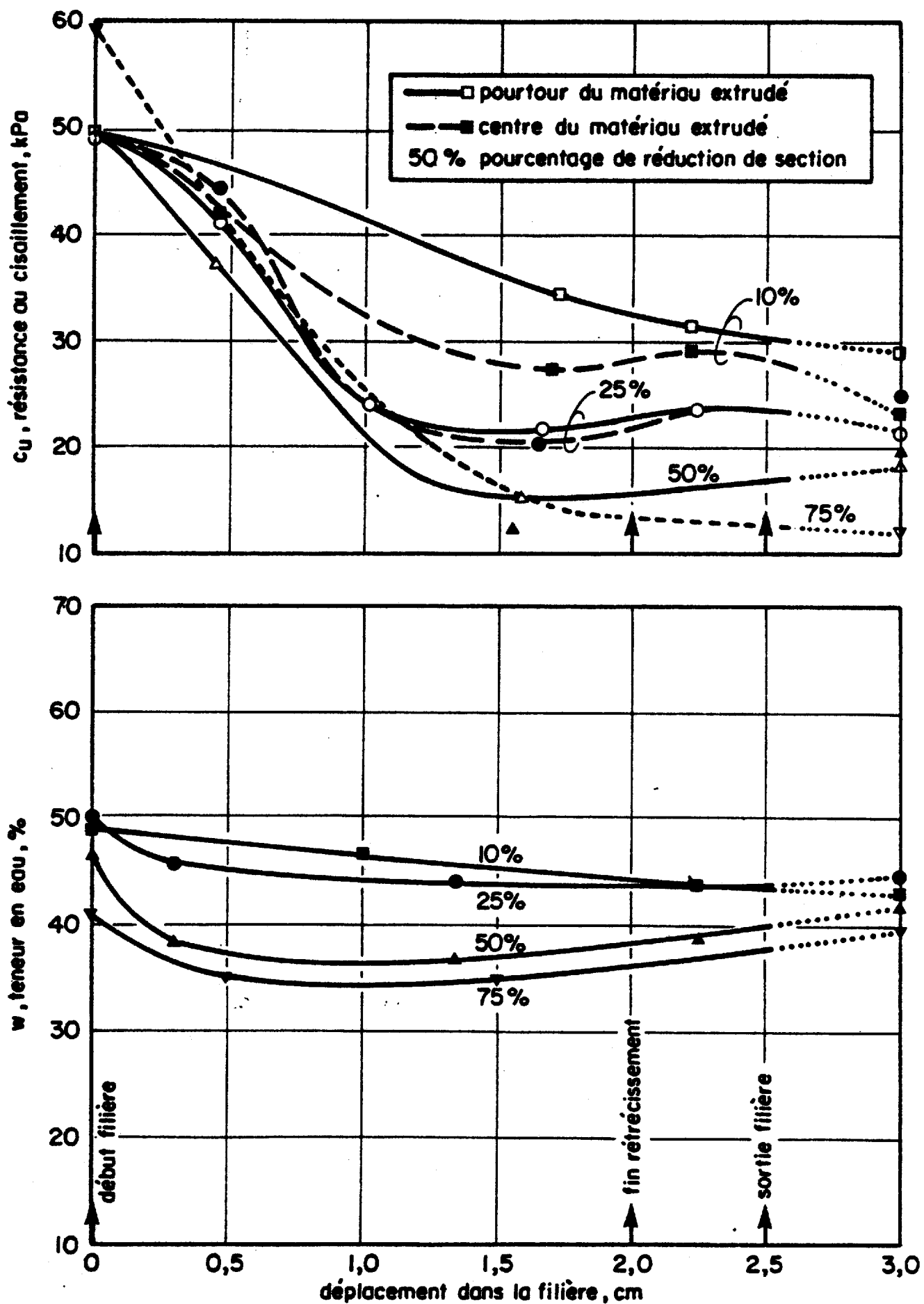


Fig. 93 — Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Thuribe, profondeur : 6,0 m.

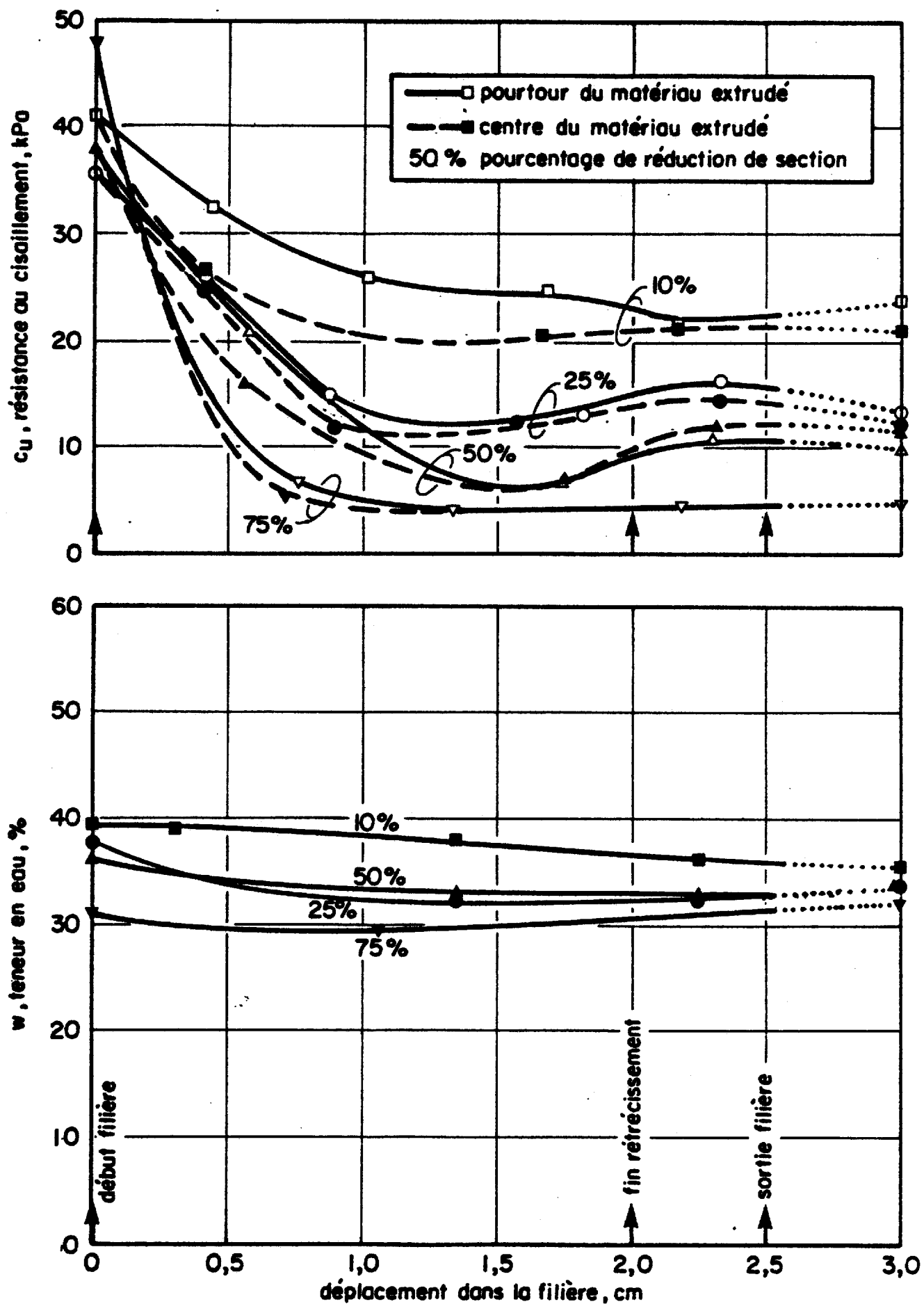


Fig. 94 — Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Thuribe, profondeur : 12,0 m.

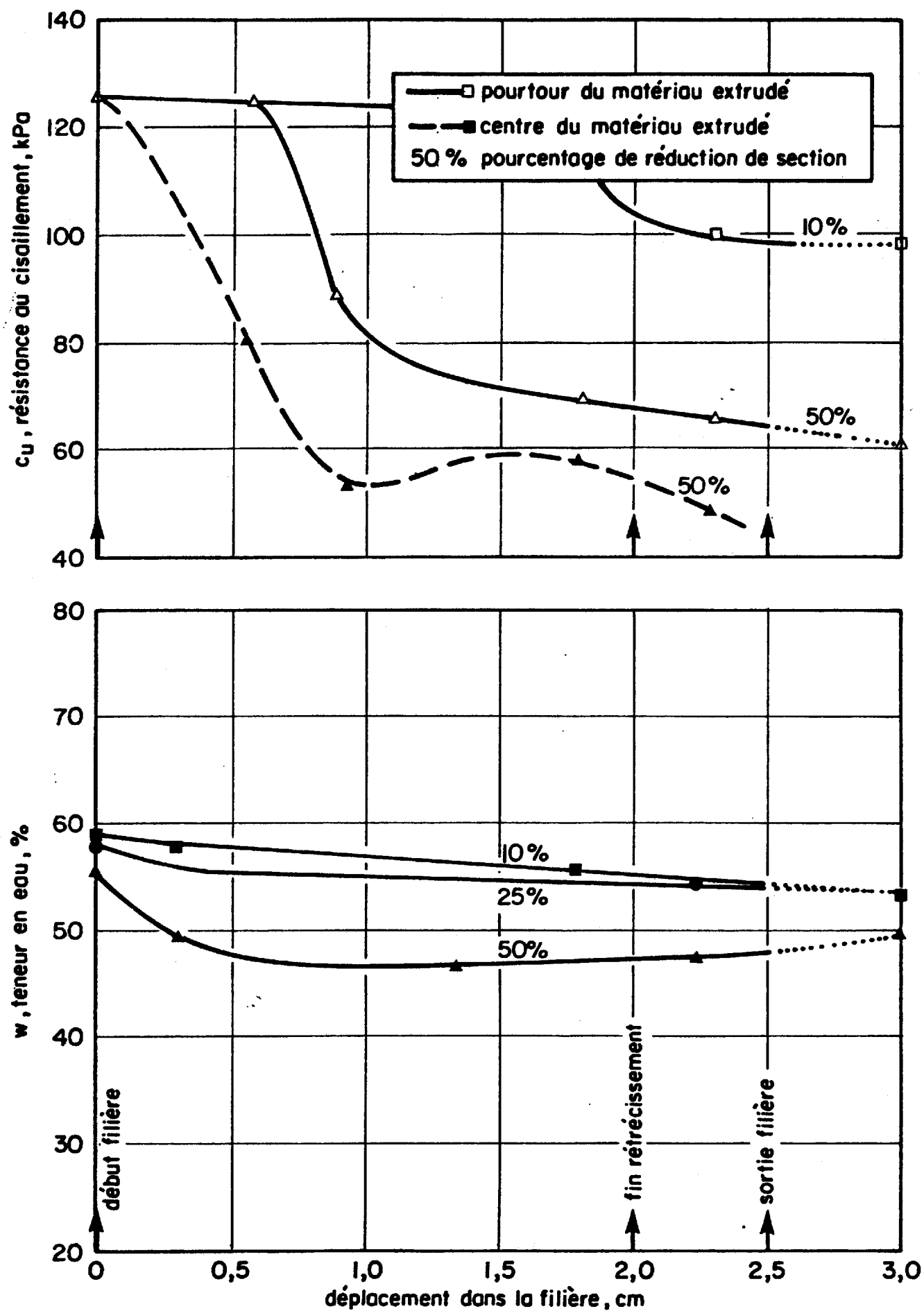


Fig. 95 — Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, Mascouche, profondeur : 9 m.

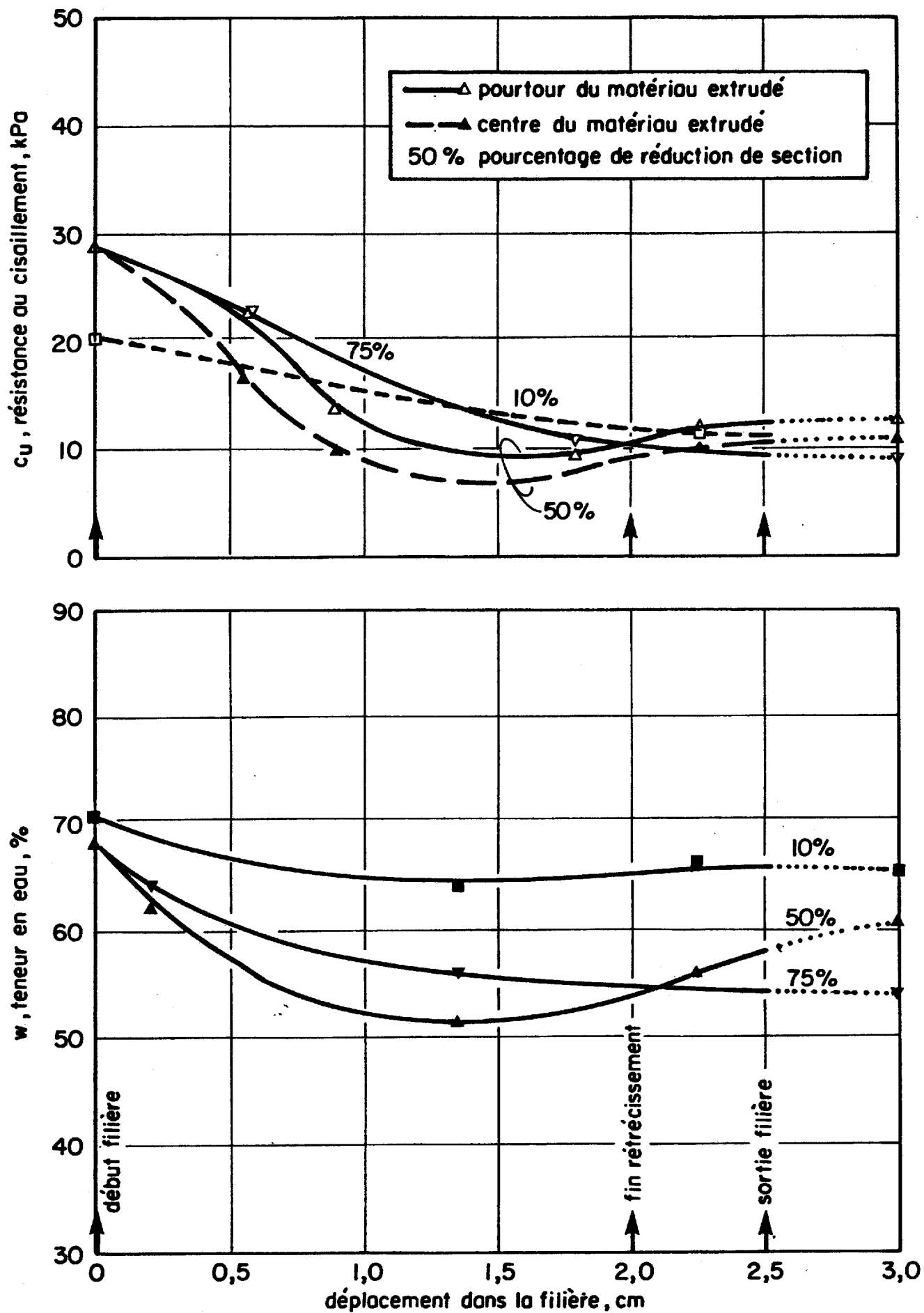
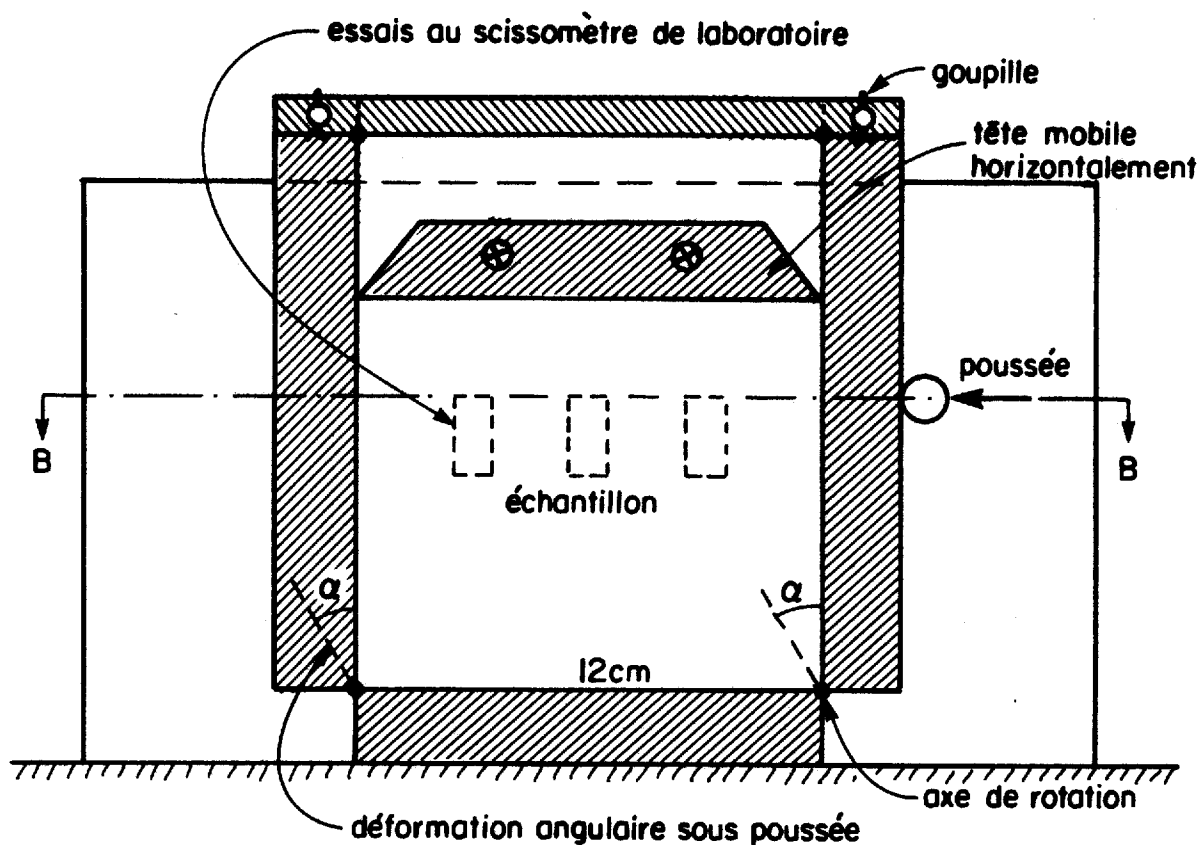
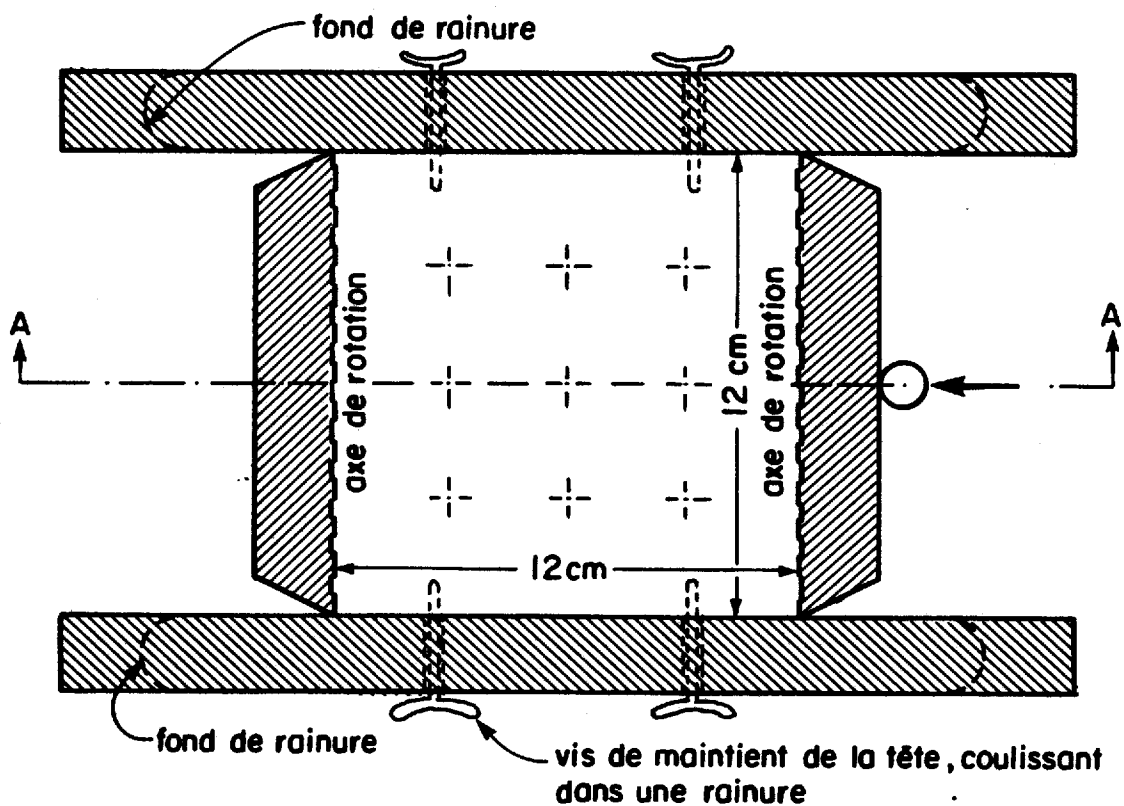


Fig. 96 — Essais d'extrusion, état de remaniement dans la filière, St-Alban, profondeur: 6,6 m.

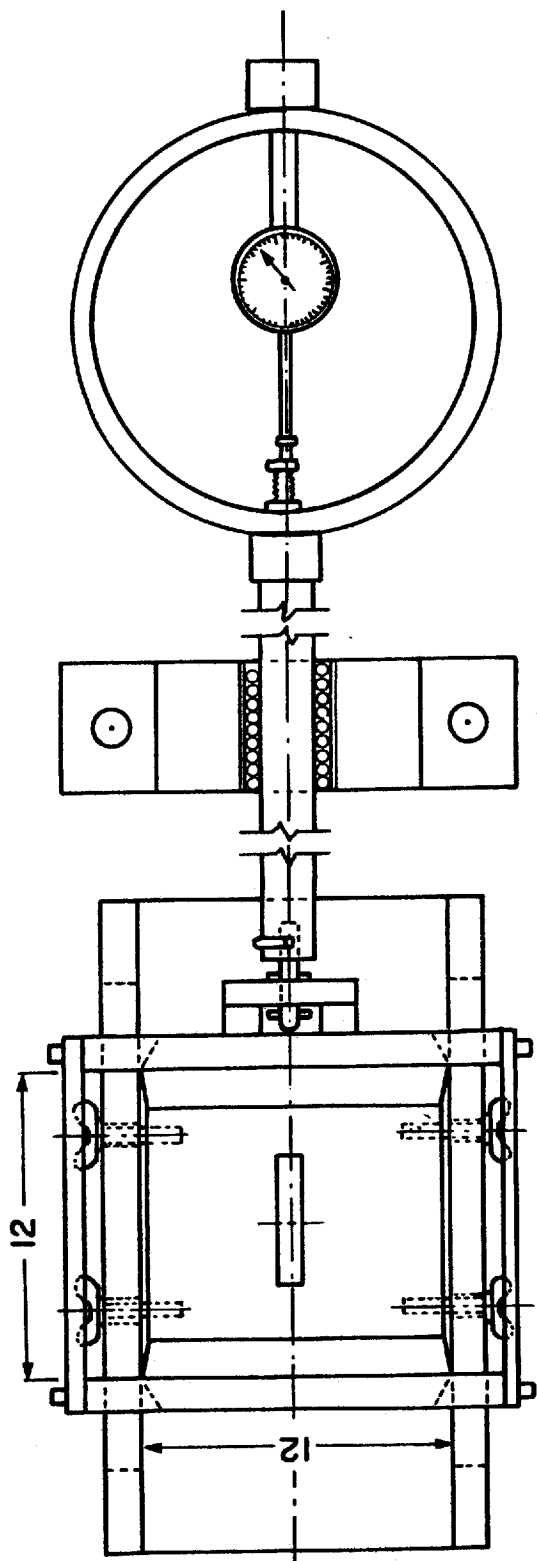


Coupe A-A



Coupe B-B

Fig.97 — Schéma de l'appareil de cisaillement simple.



[cm]

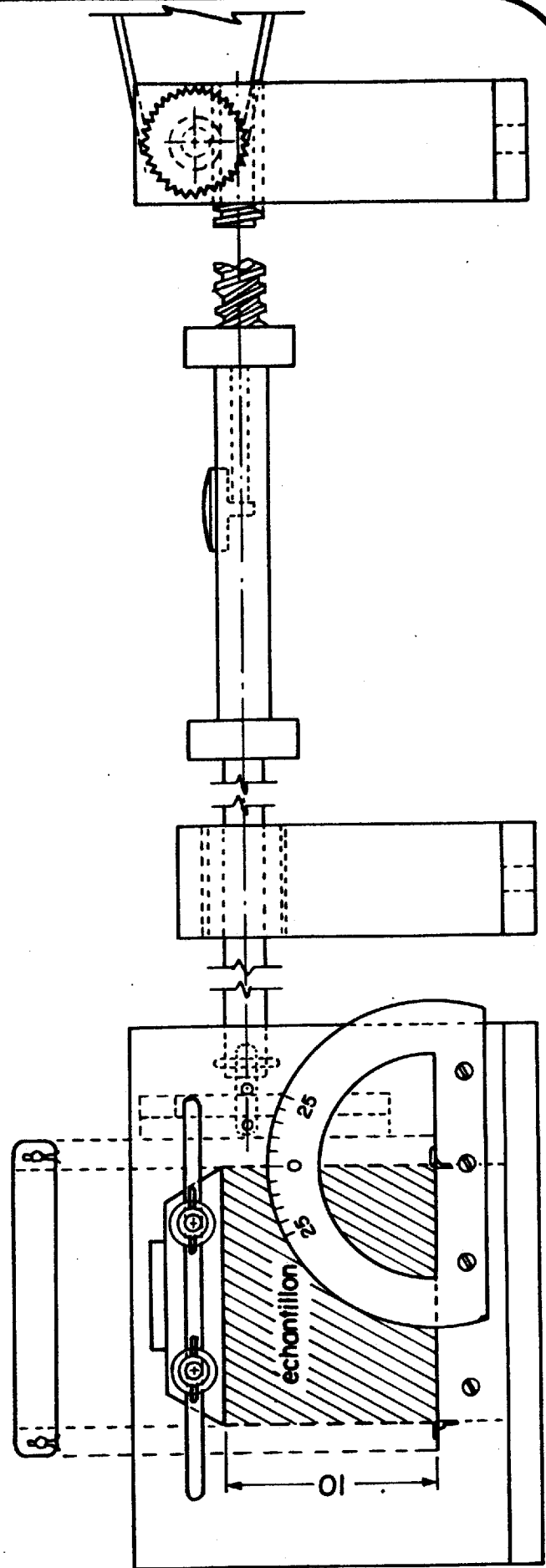
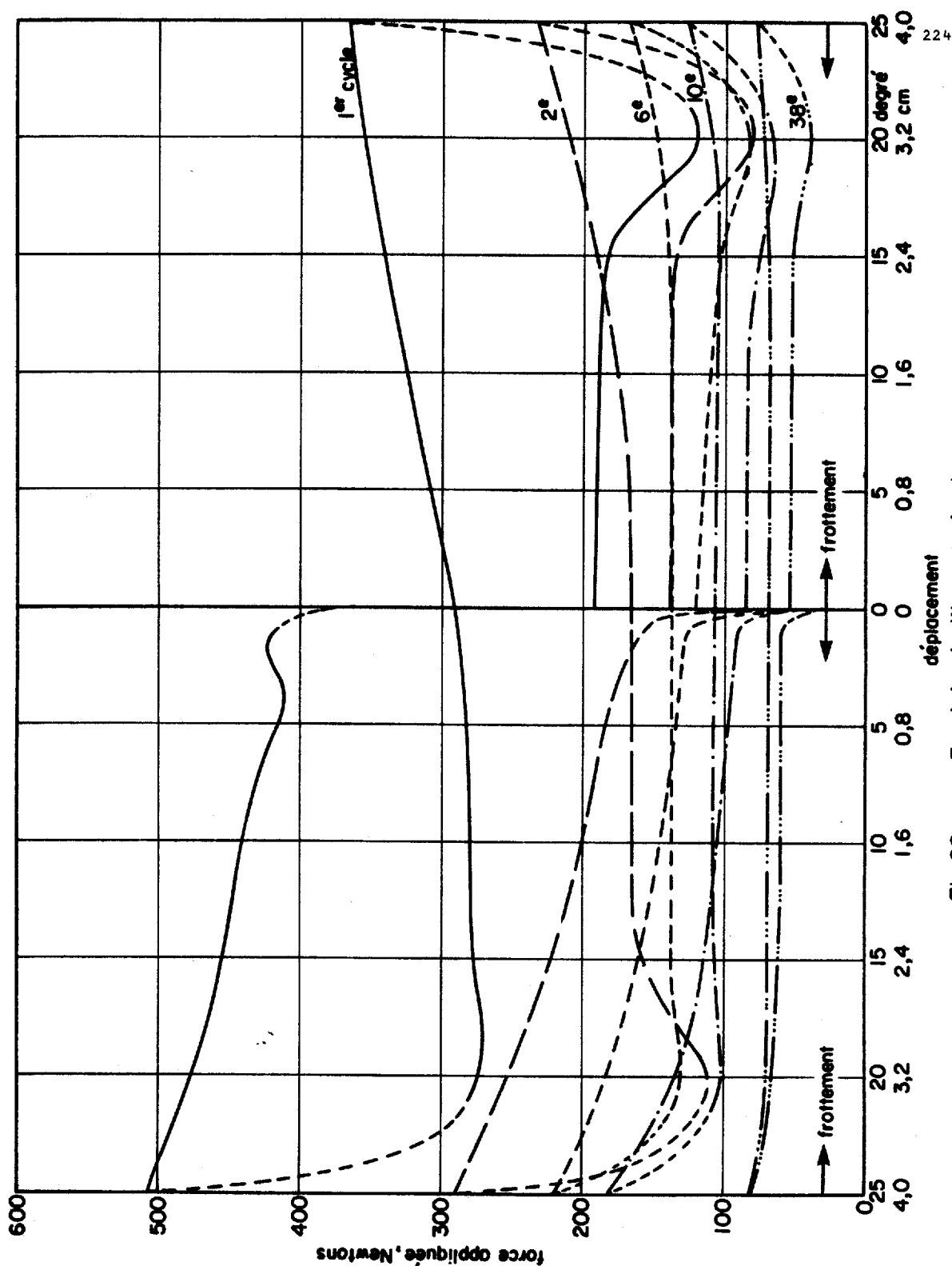
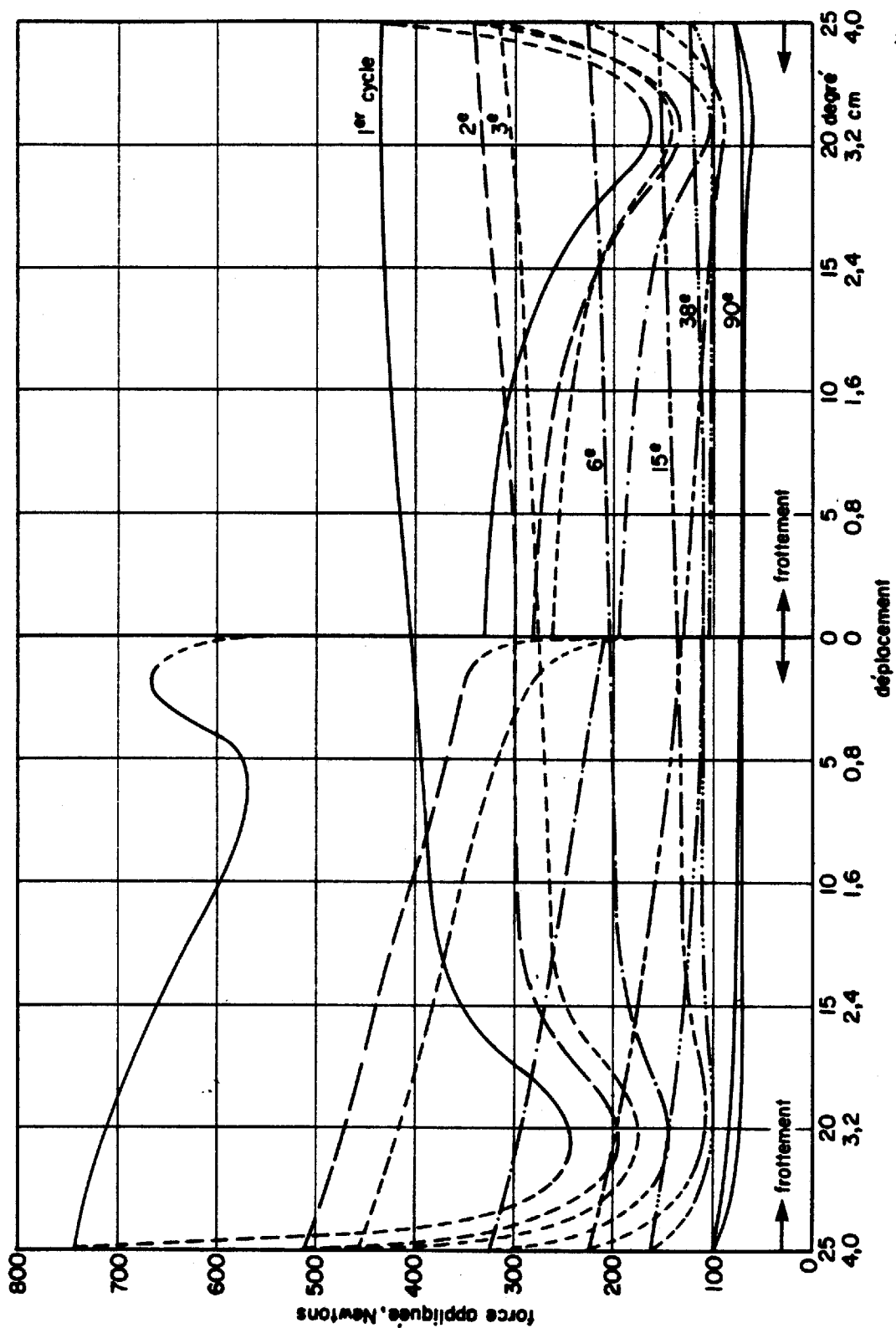


Fig. 98 — Boite de cisaillement simple.



St-Léon (4,8 m)

Fig. 99 — Essai de cisaillement simple.



225

Fig. 100 — Essai de cisaillement simple.

St-Léon (9,3 m)

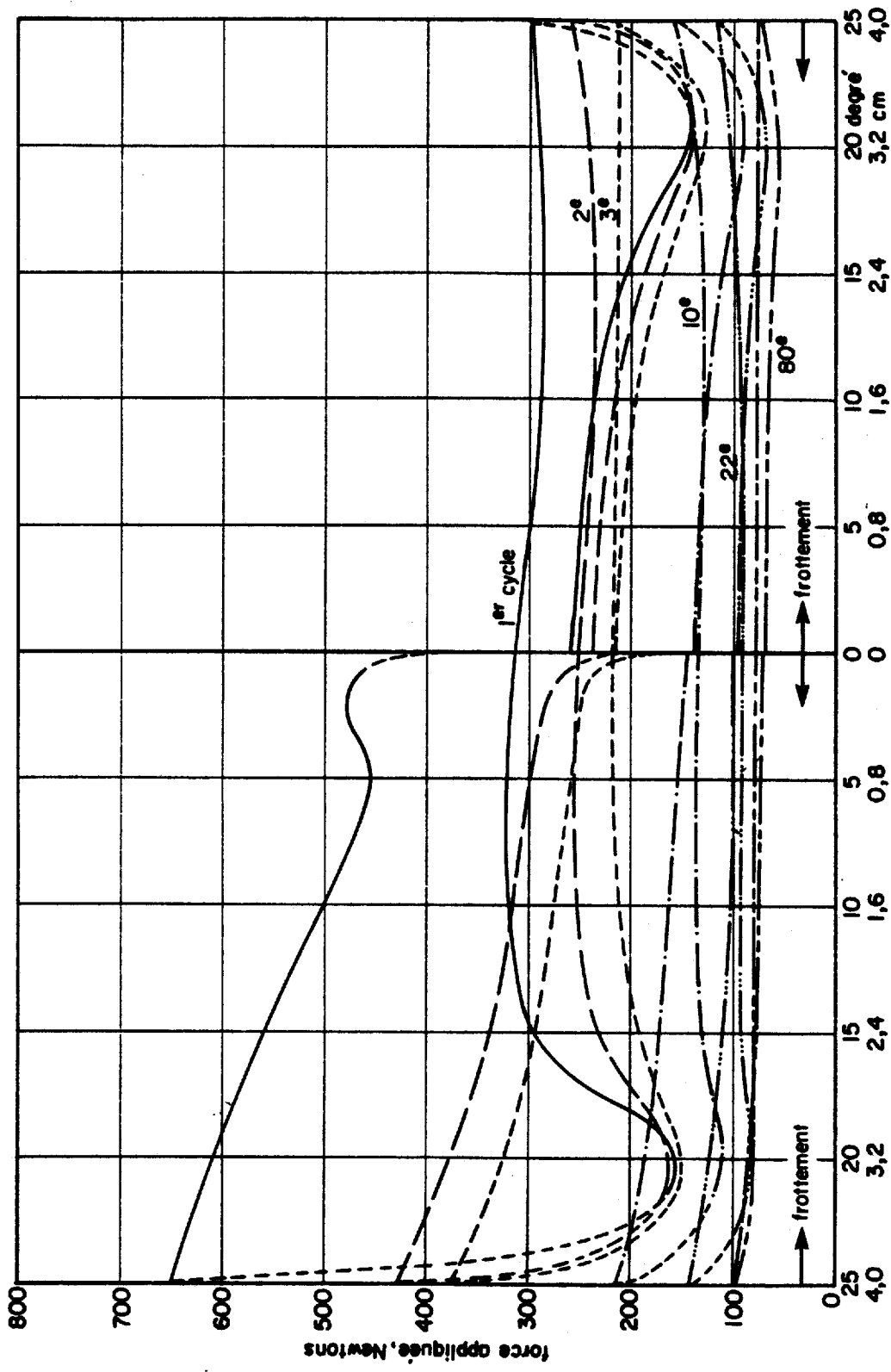


Fig.10/ — Essai de cisaillement simple.

Louiseville (6m)

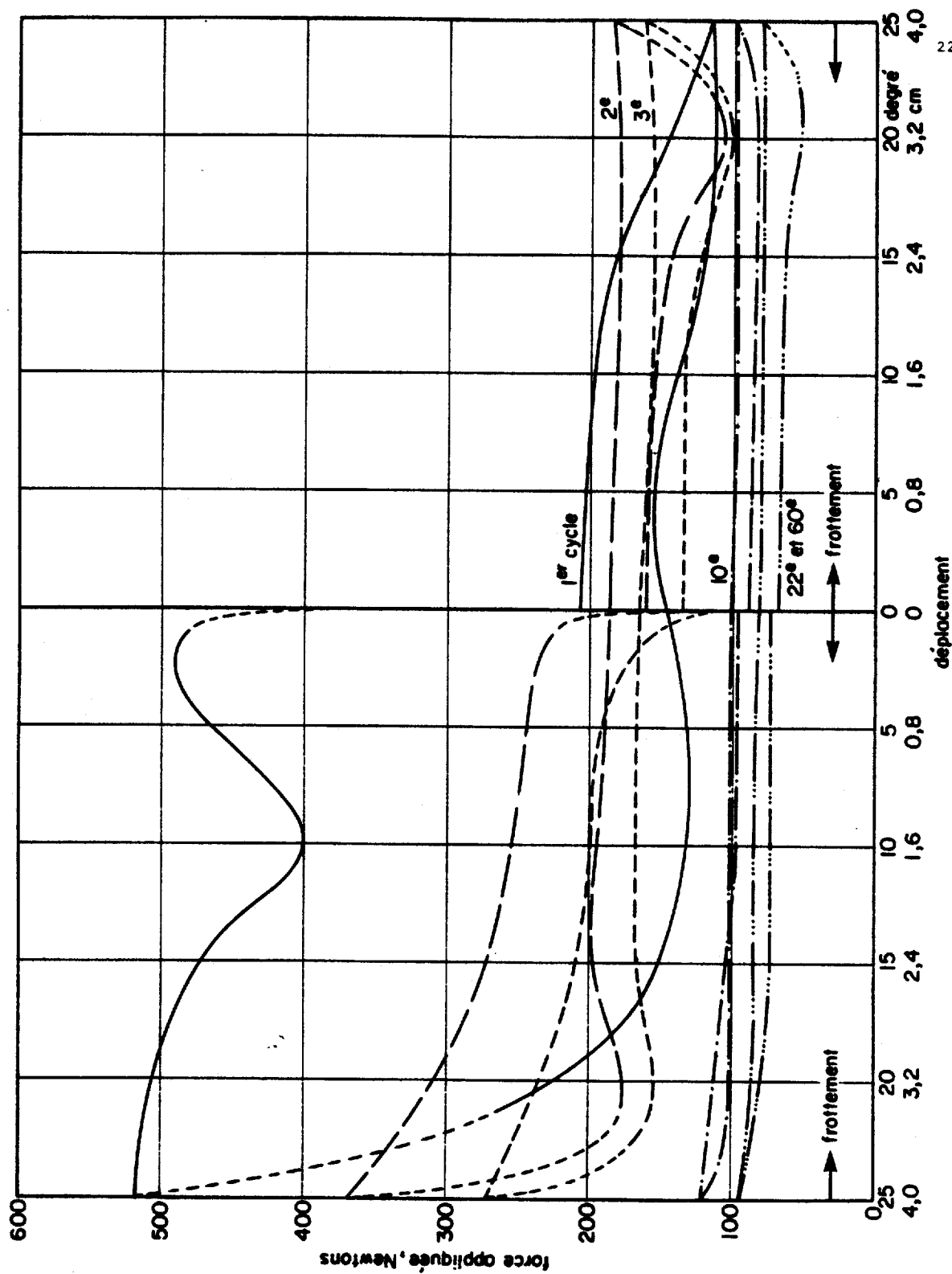


Fig. 102 — Essai de cisaillement simple.

St-Hilaire (5,6 m)

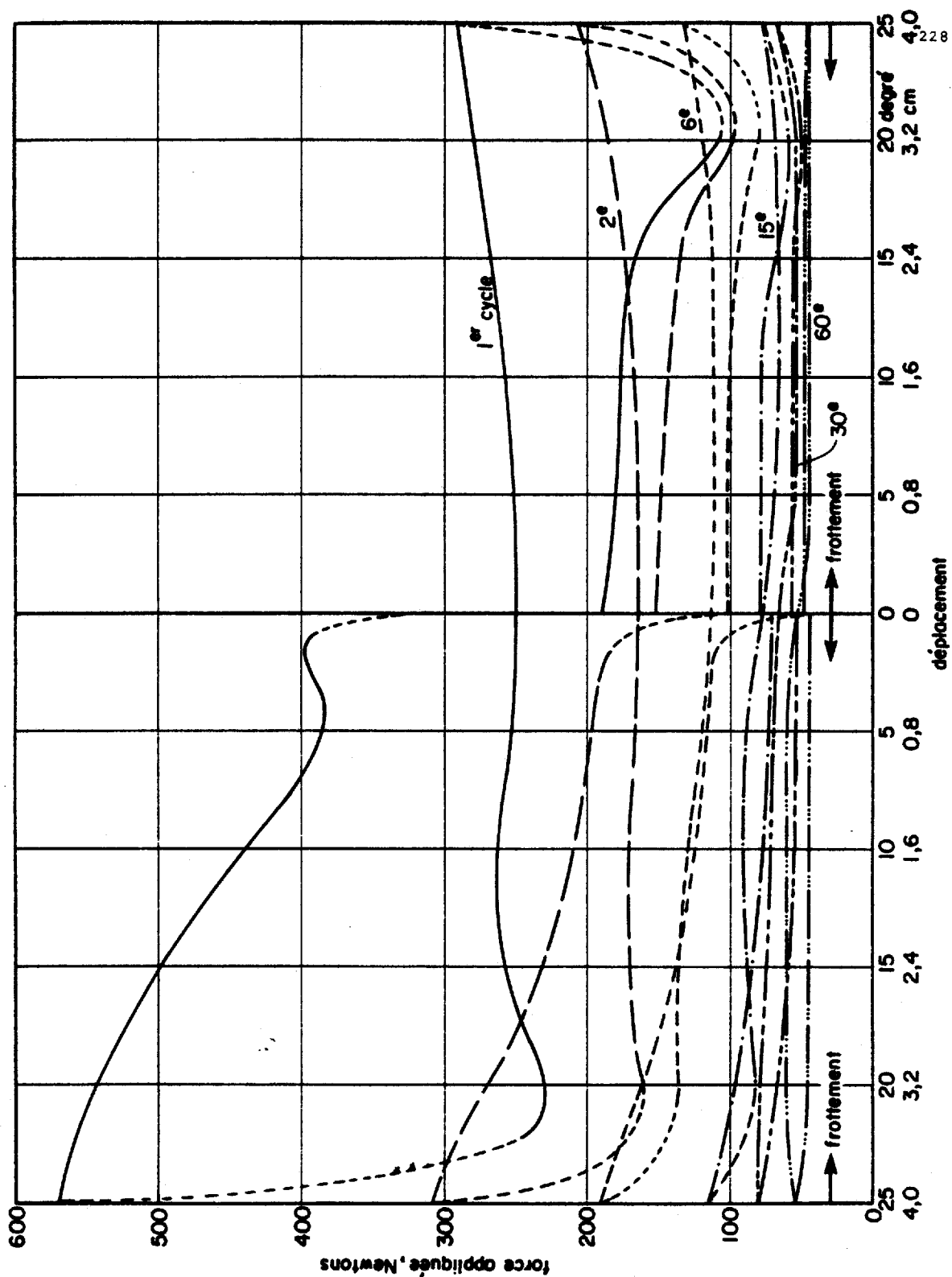


Fig. 103 — Essai de cisaillement simple.

St-Hilaire (11, 4 m)

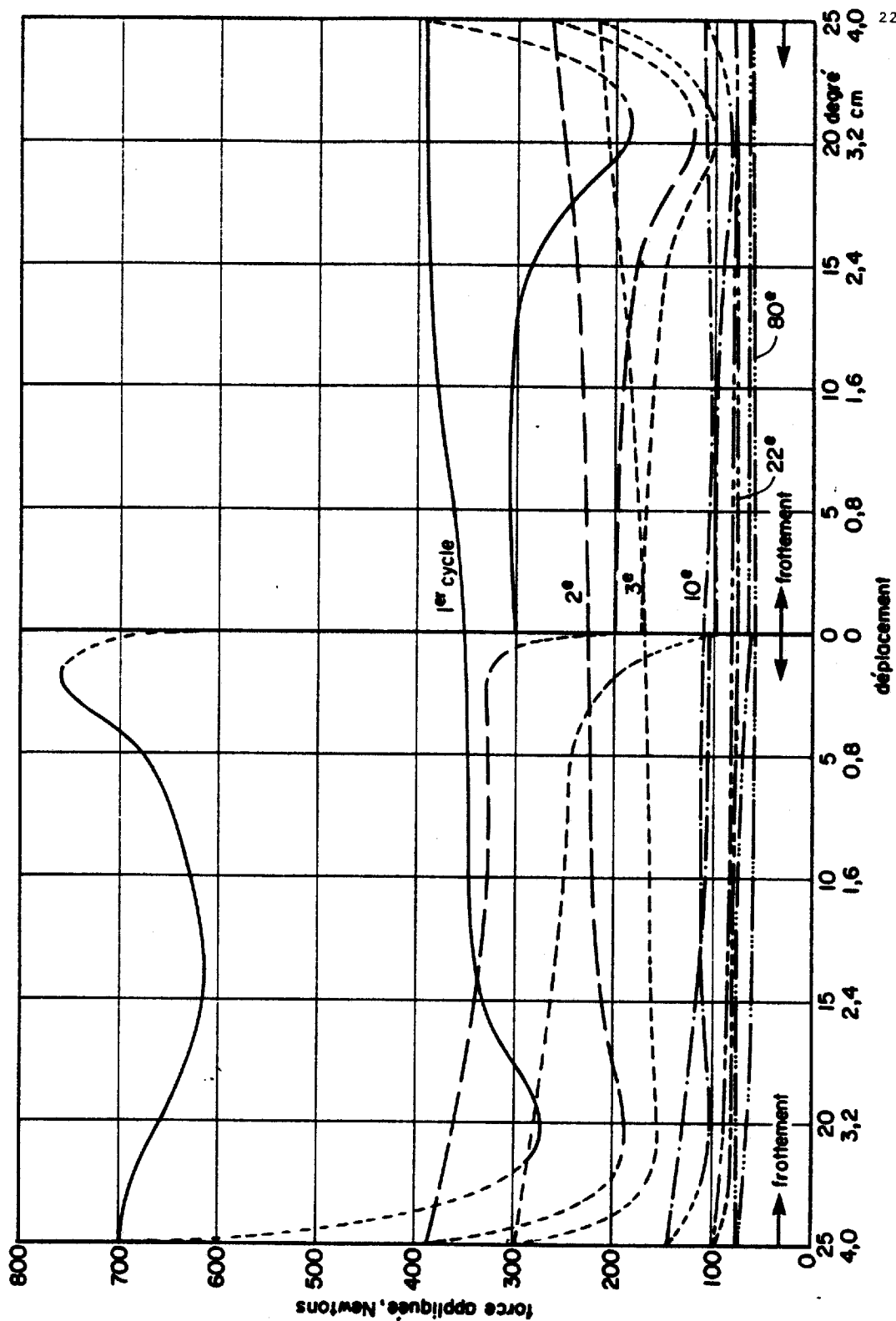


Fig. 104 — Essai de cisaillement simple.

SI - Thuribe (6 m)

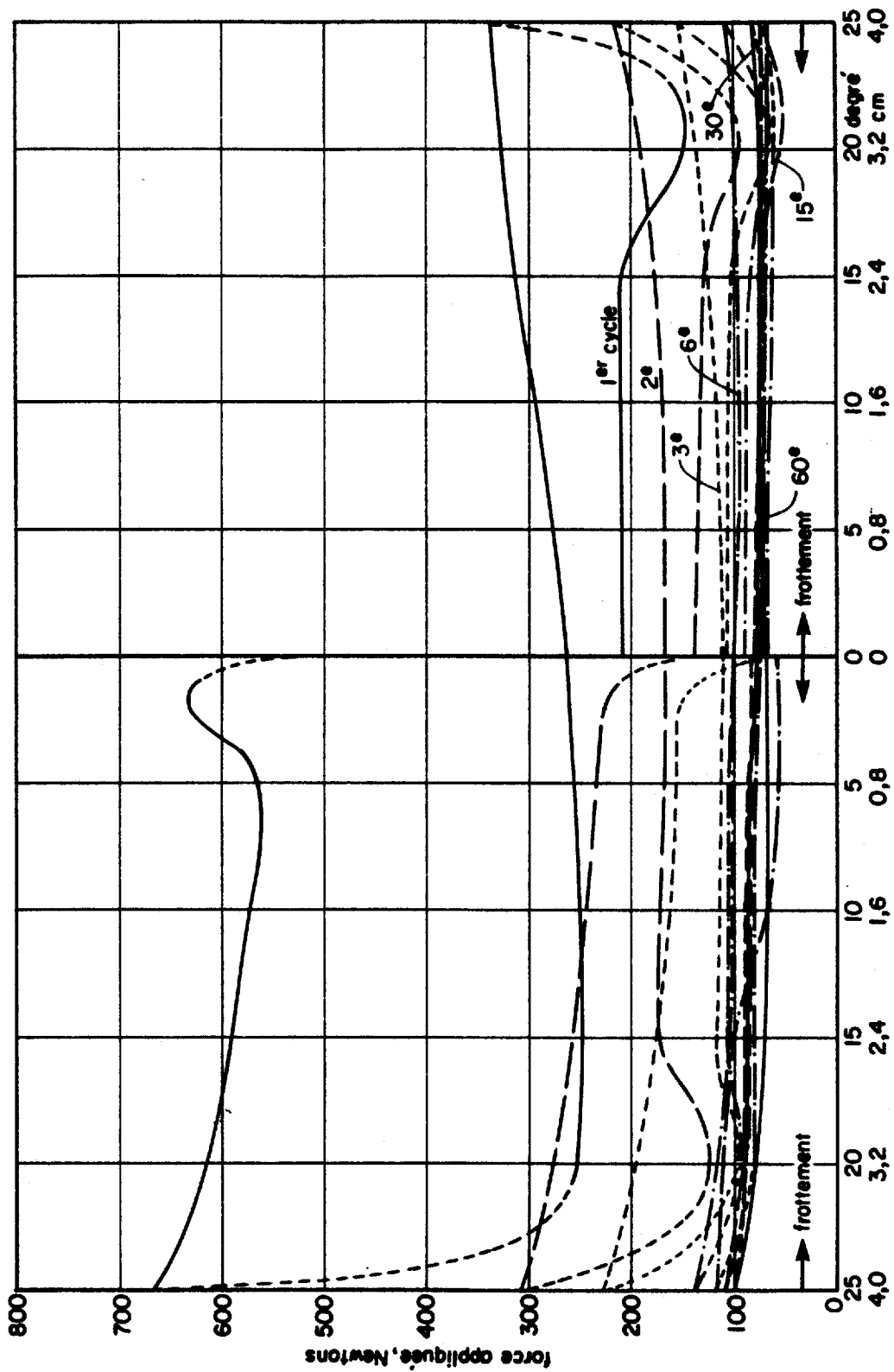


Fig.105 — Essai de cisaillement simple.

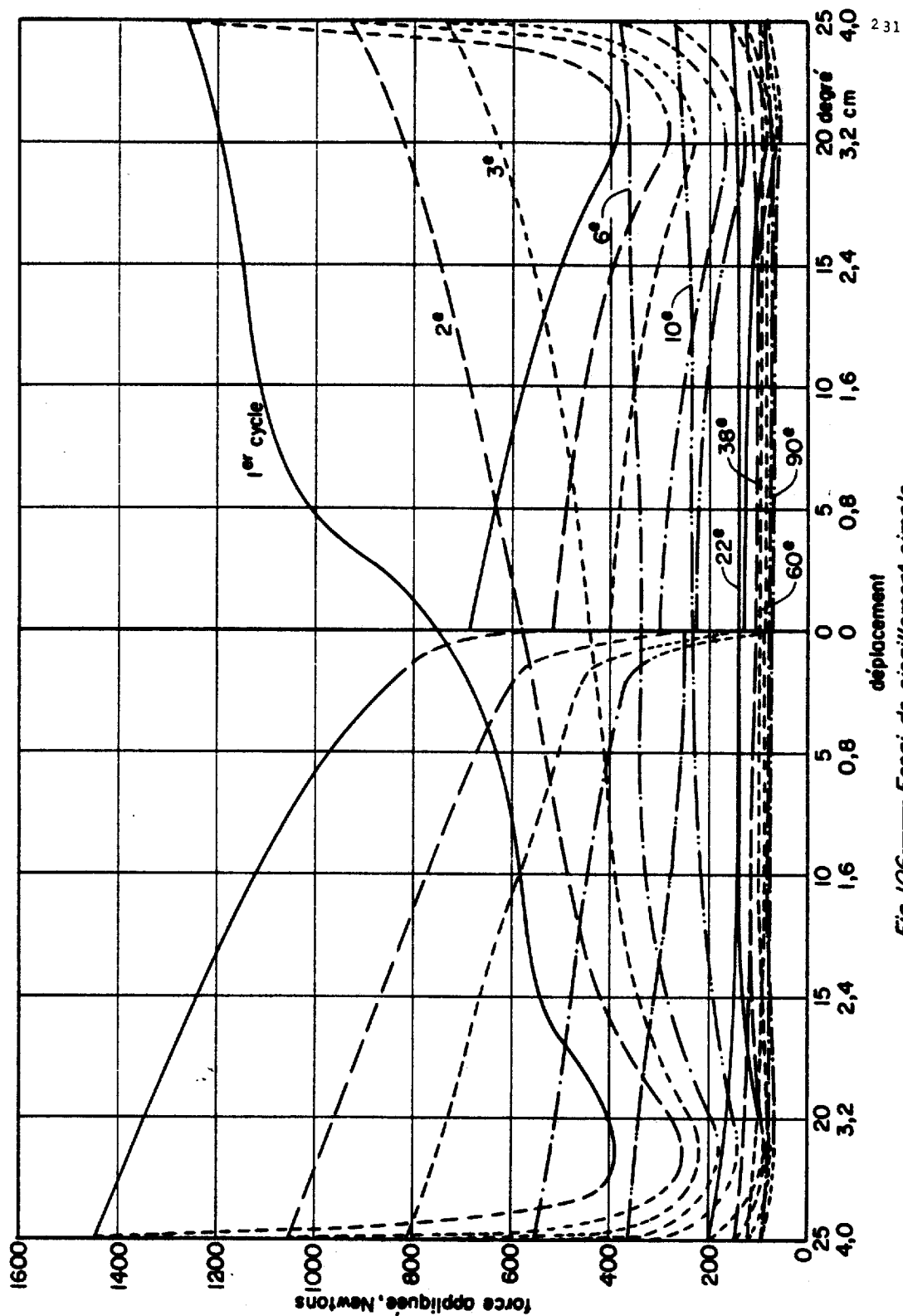


Fig. 106 — Essai de cisaillement simple.

Mascouche (9m)

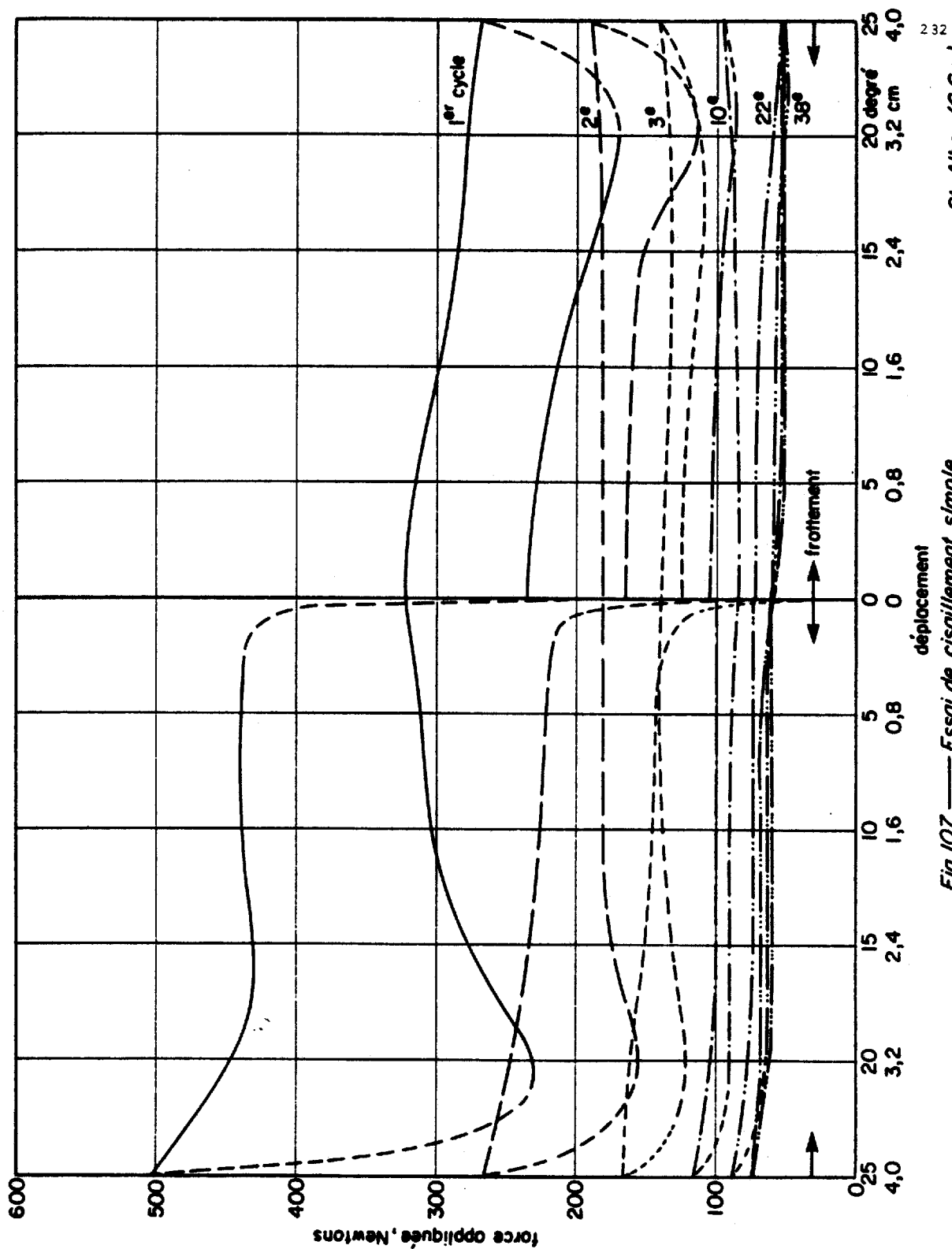


Fig.107 — Essai de cisaillement simple.

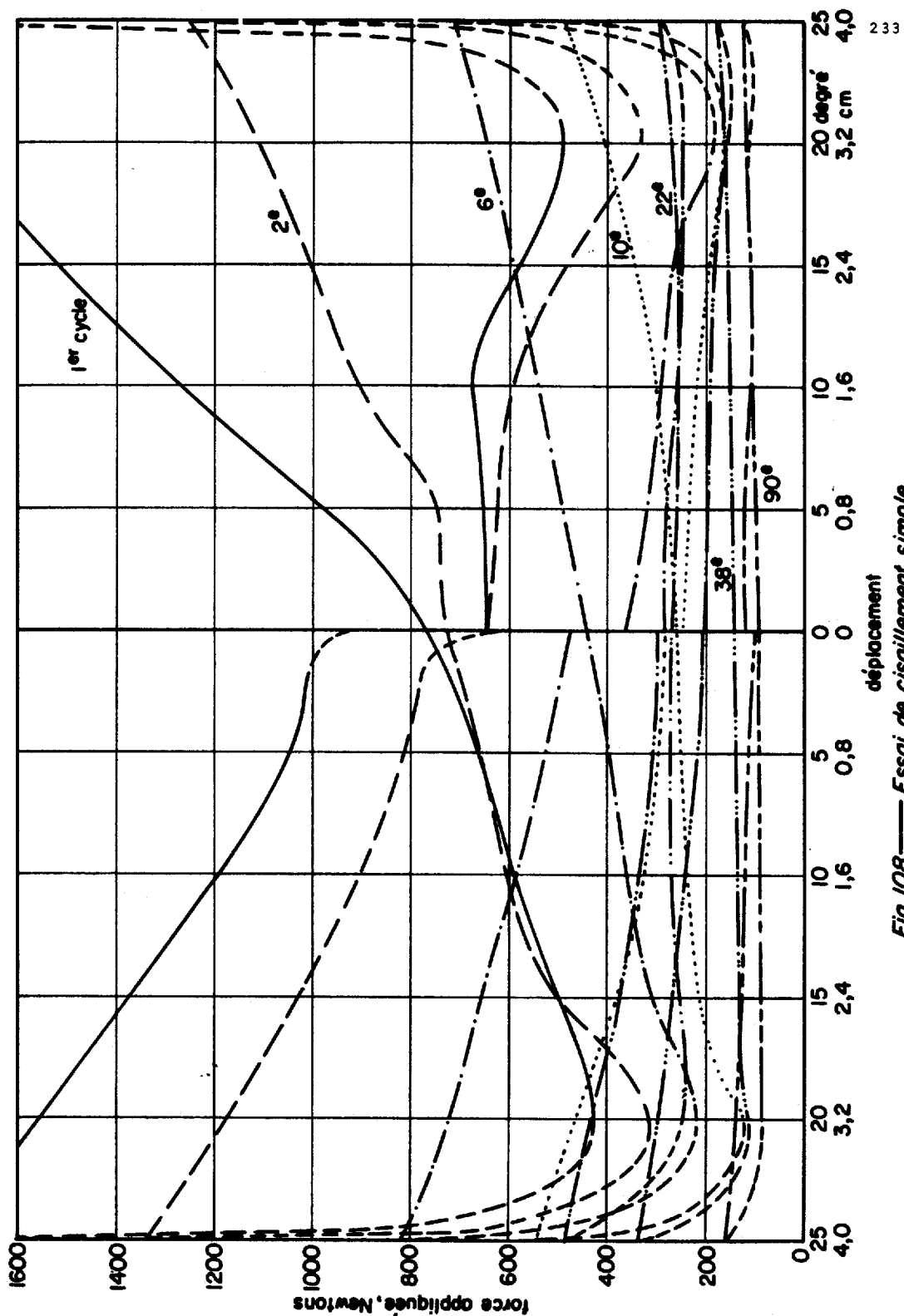


Fig. 108 — Essai de cisaillement simple.

St-Jean-Vianney (30 m)

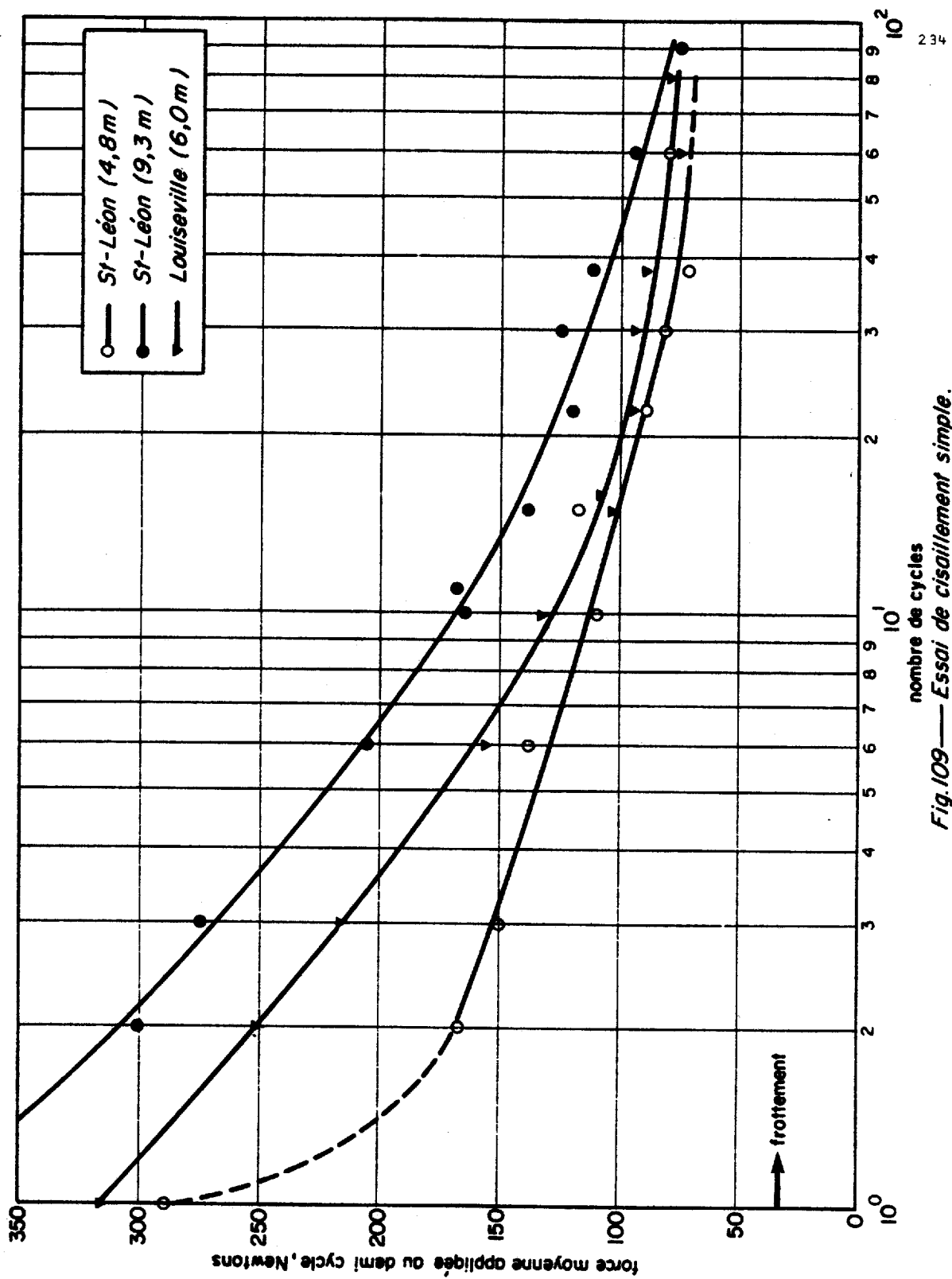


Fig.109 — Essai de cisaillement simple.

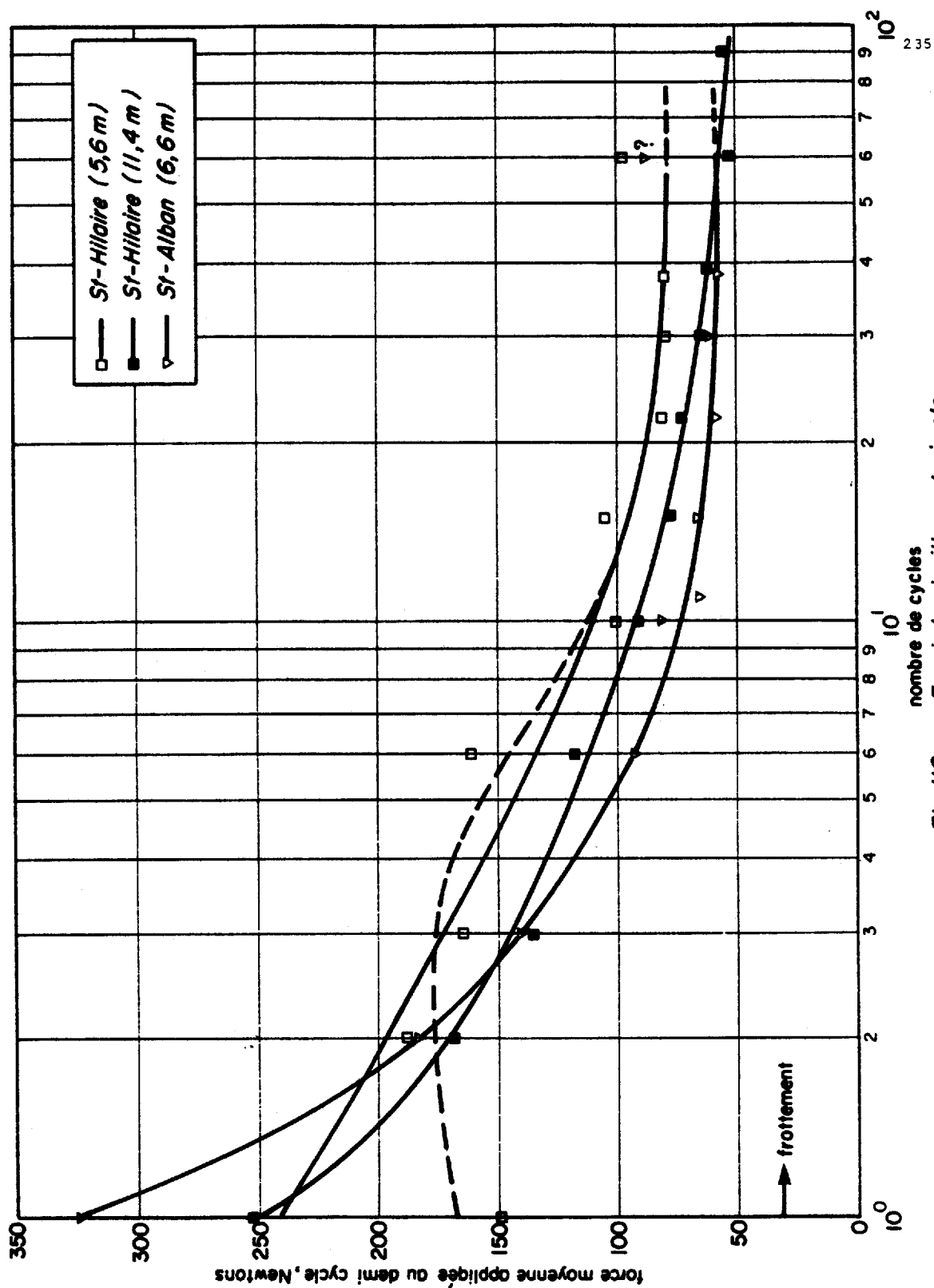


Fig. 110 — Essai de cisaillement simple.

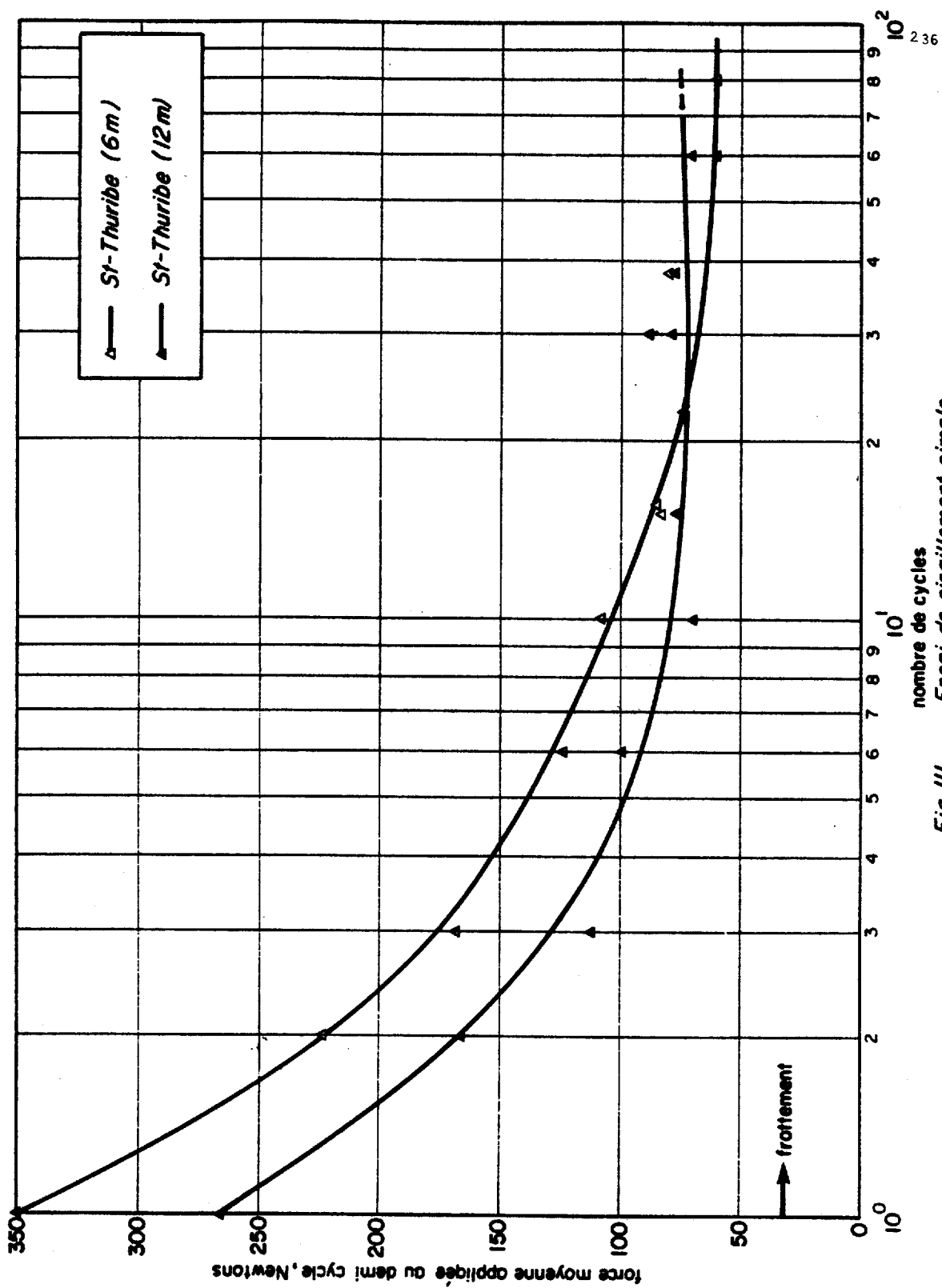


Fig. III — Essai de cisaillement simple.

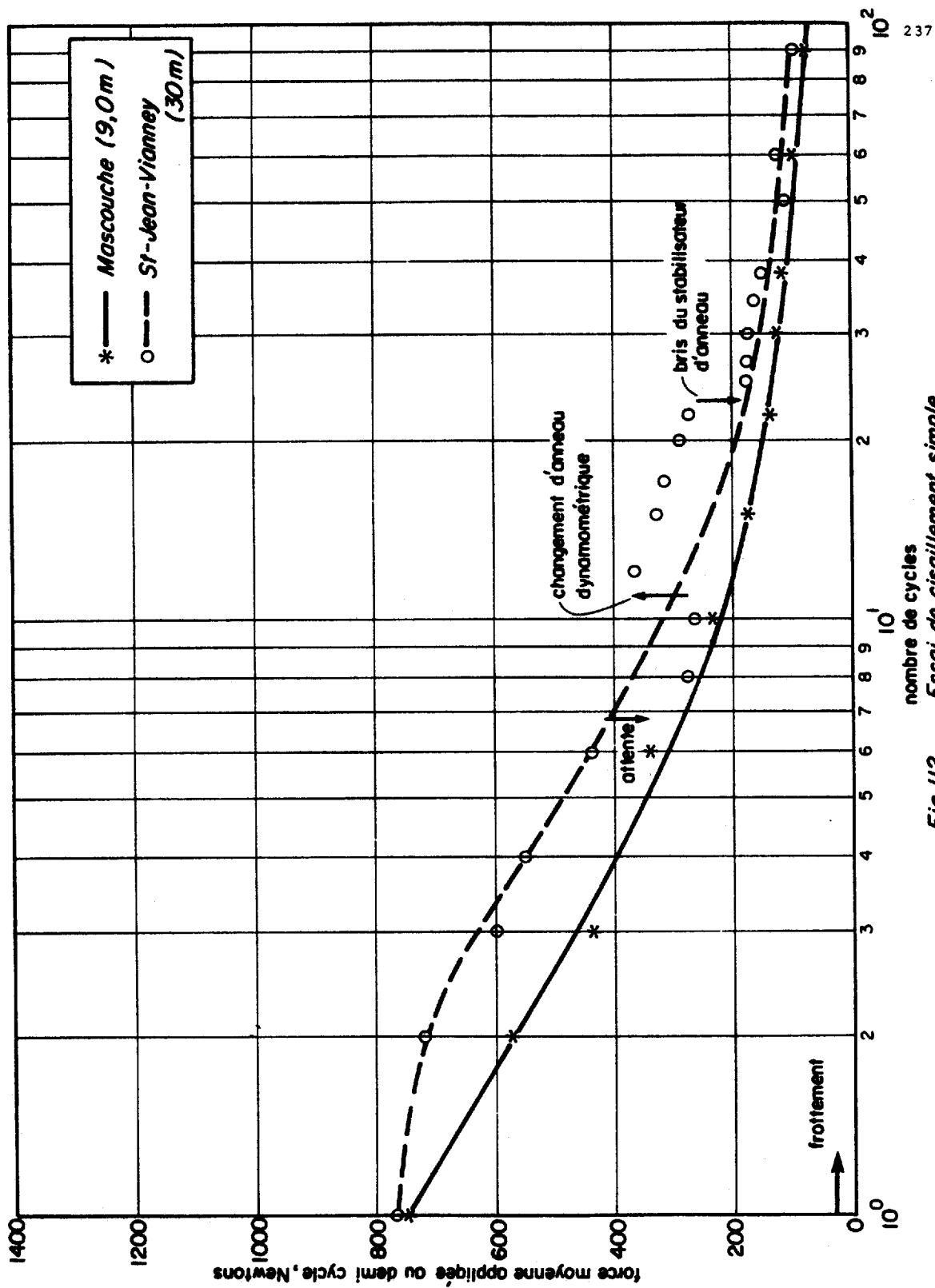


Fig. 112 — Essai de cisaillement simple.

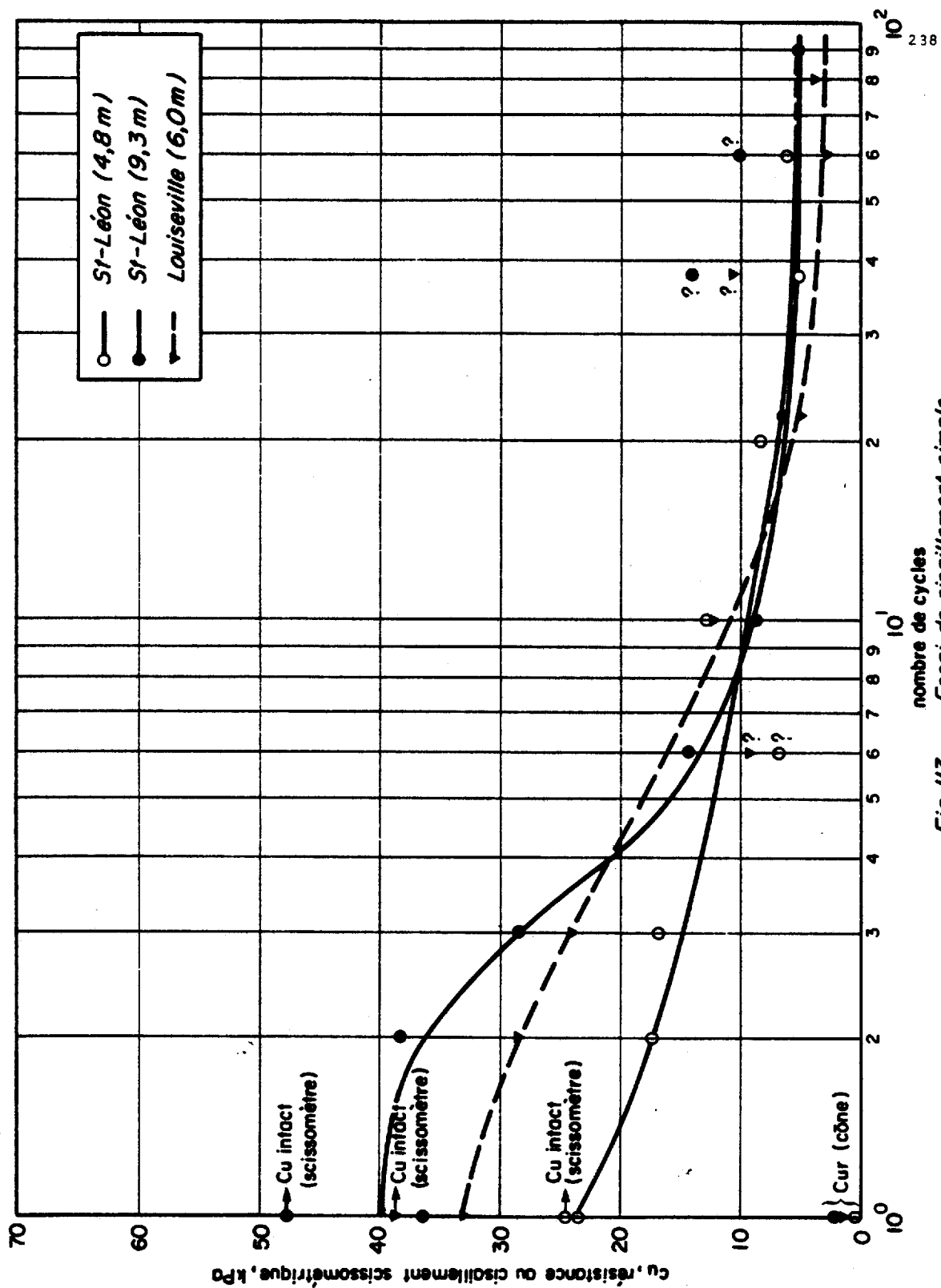
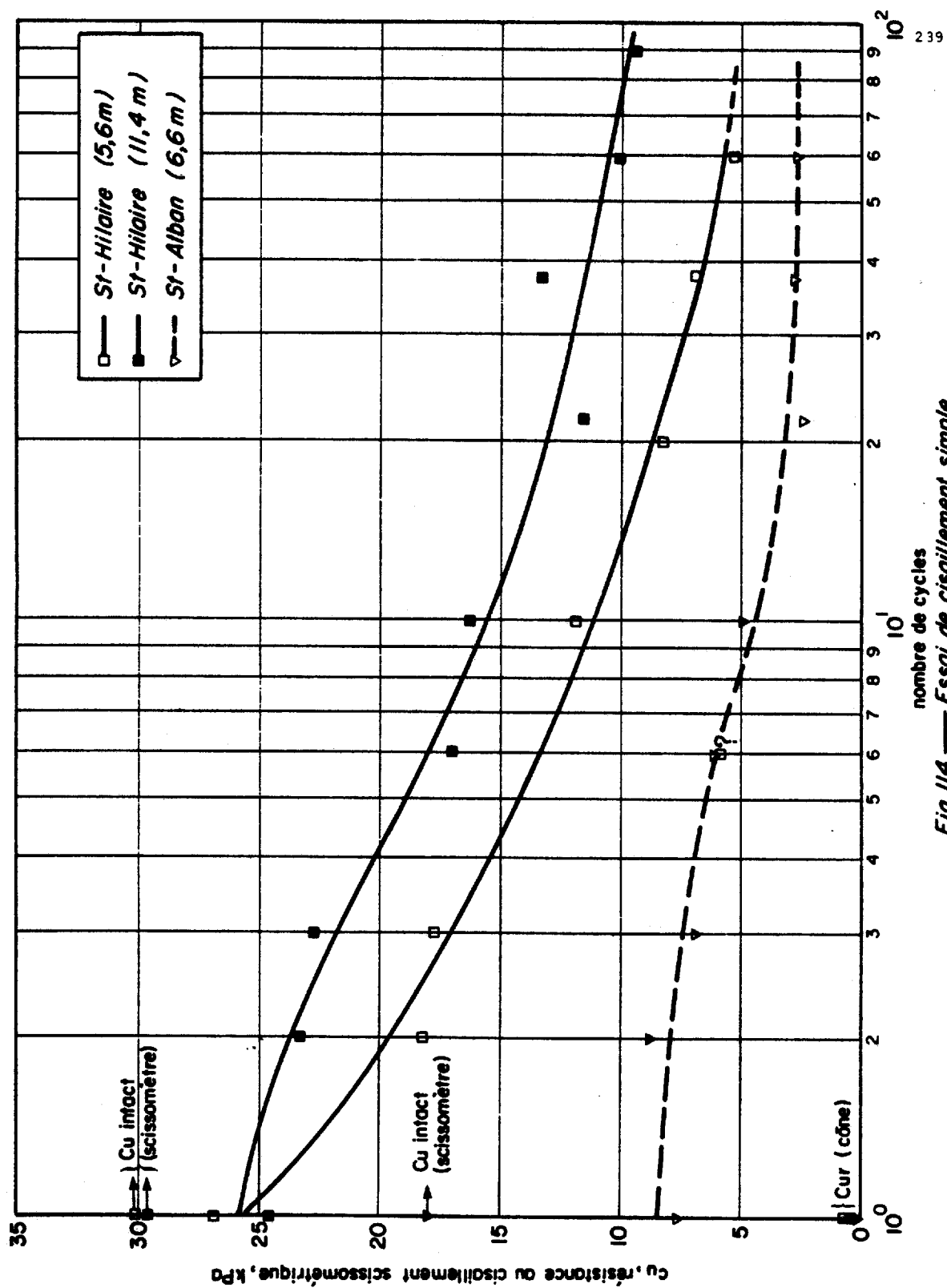


Fig. 113 — Essai de cisaillement simple.



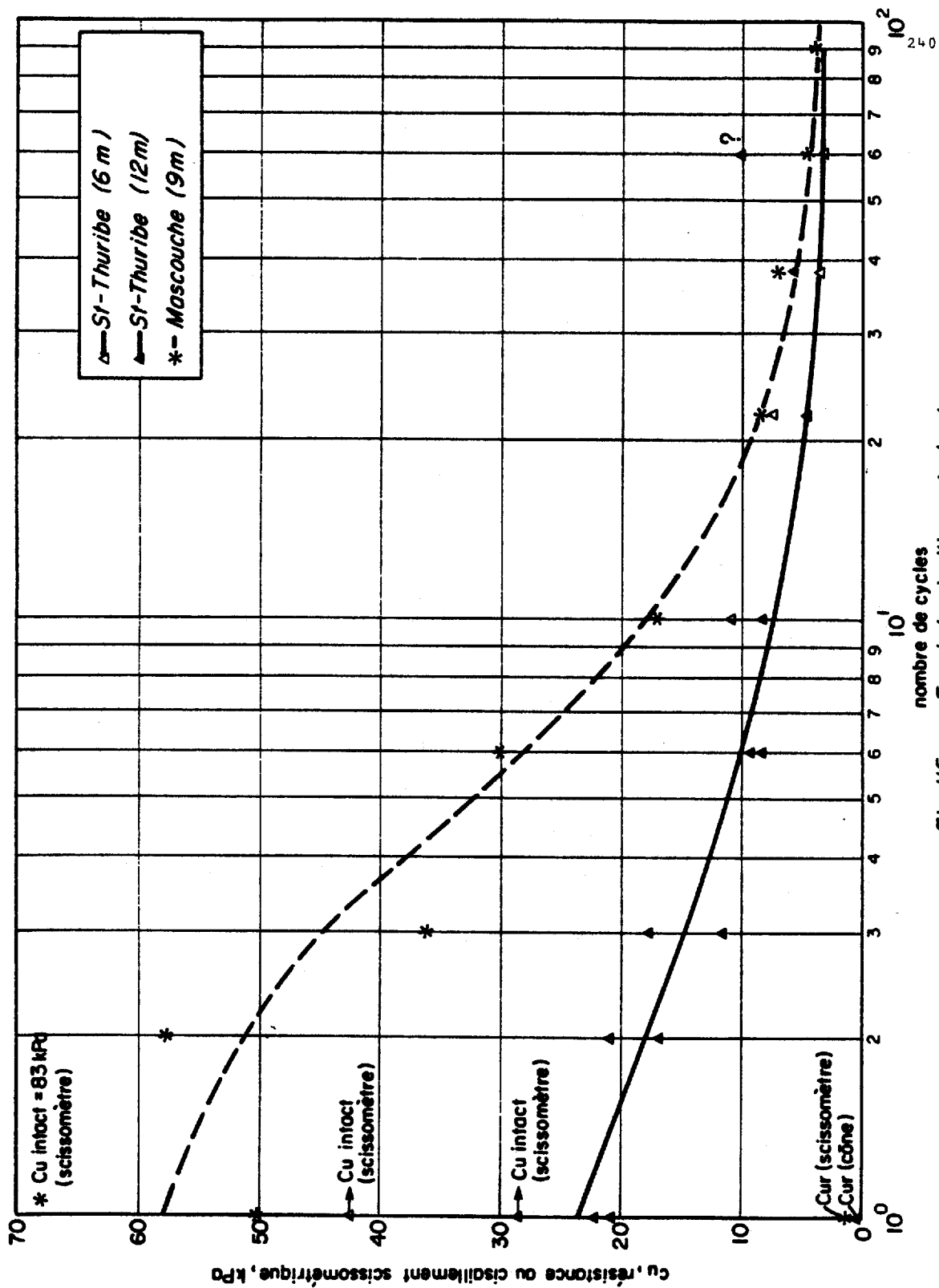


Fig. 115 — Essai de cisaillement simple.

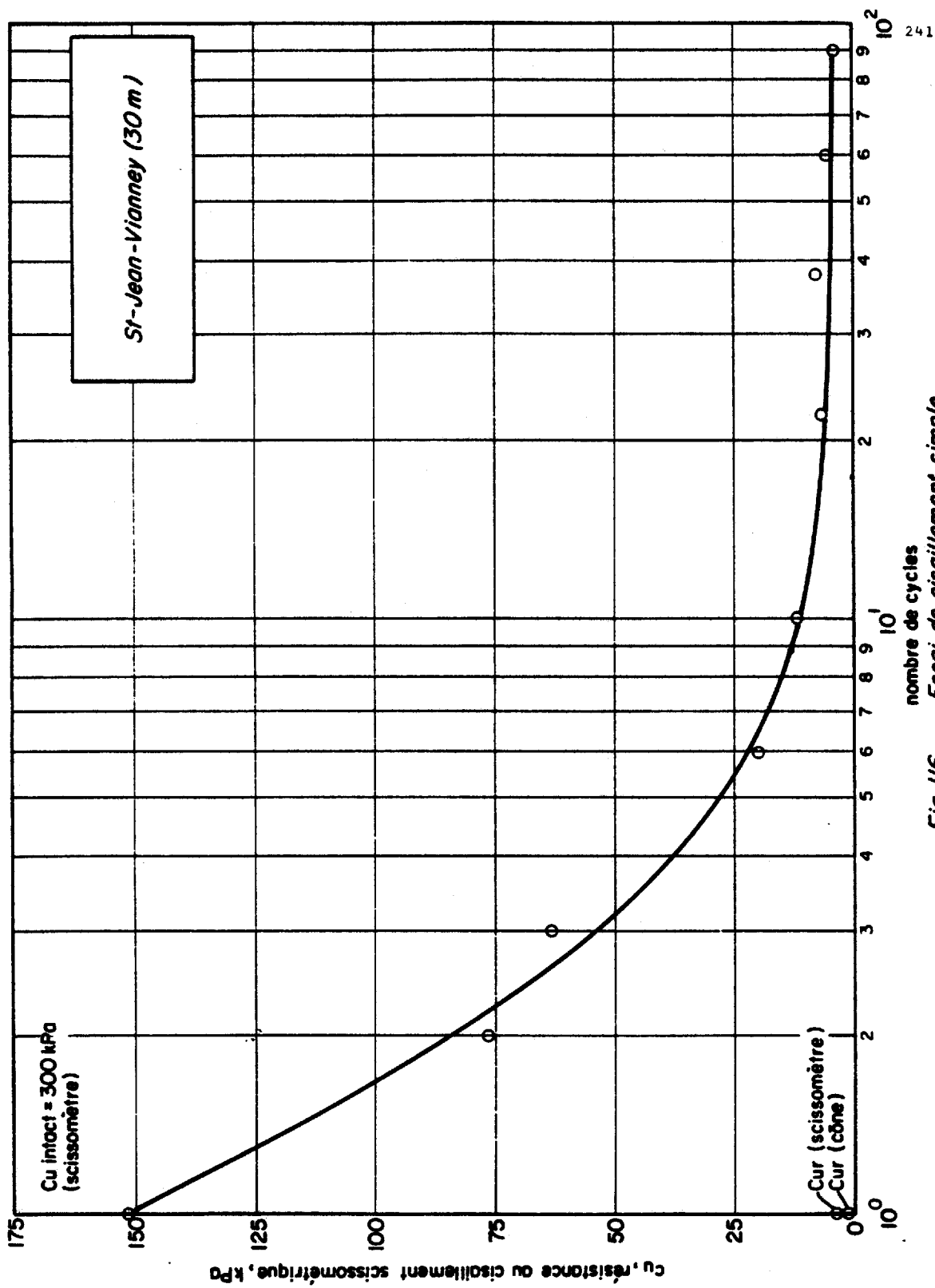


Fig. 116 — Essai de cisaillement simple.

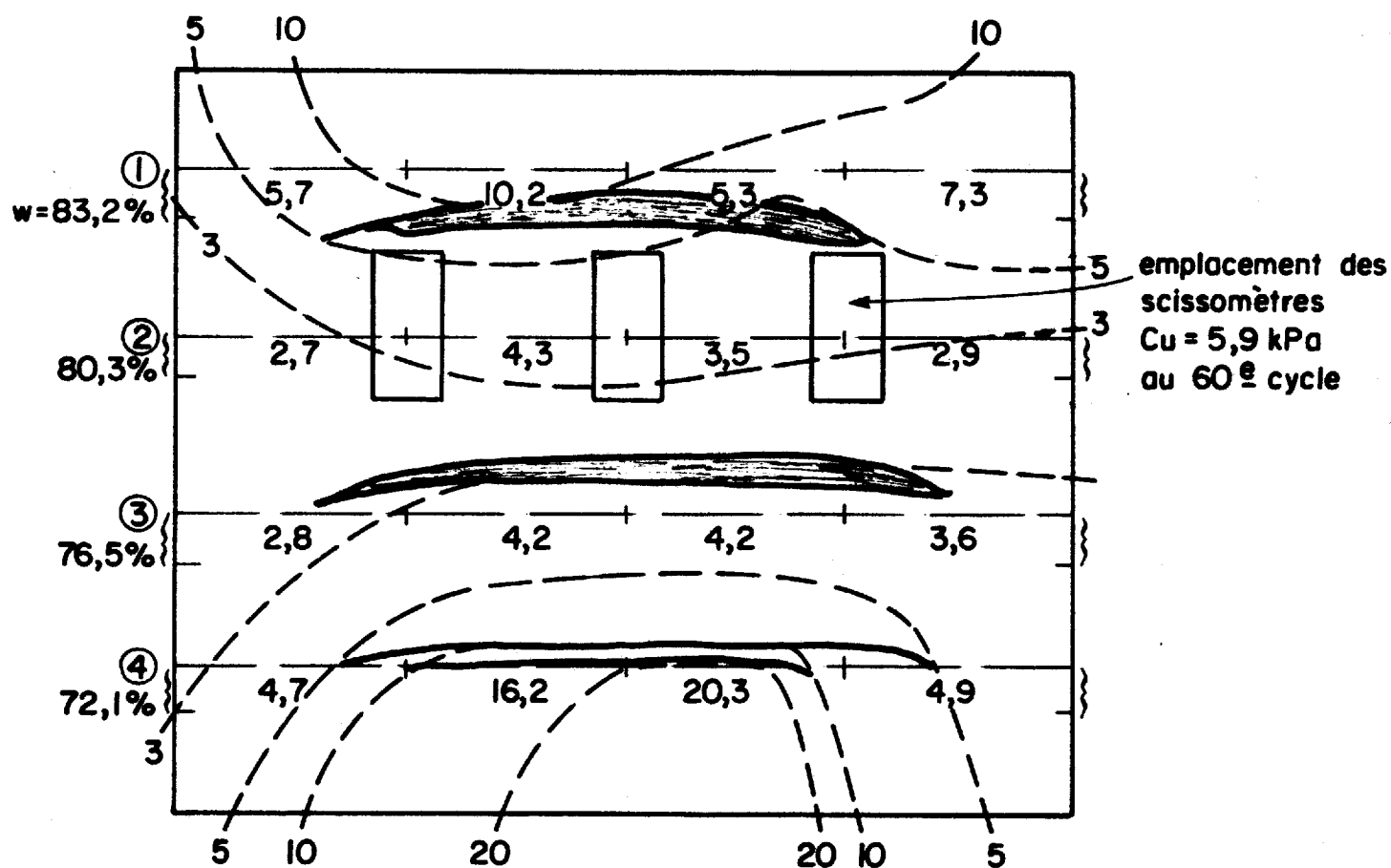


Fig. 117 — Essai de cisaillement simple : zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai.

St-Léon (4,8m)

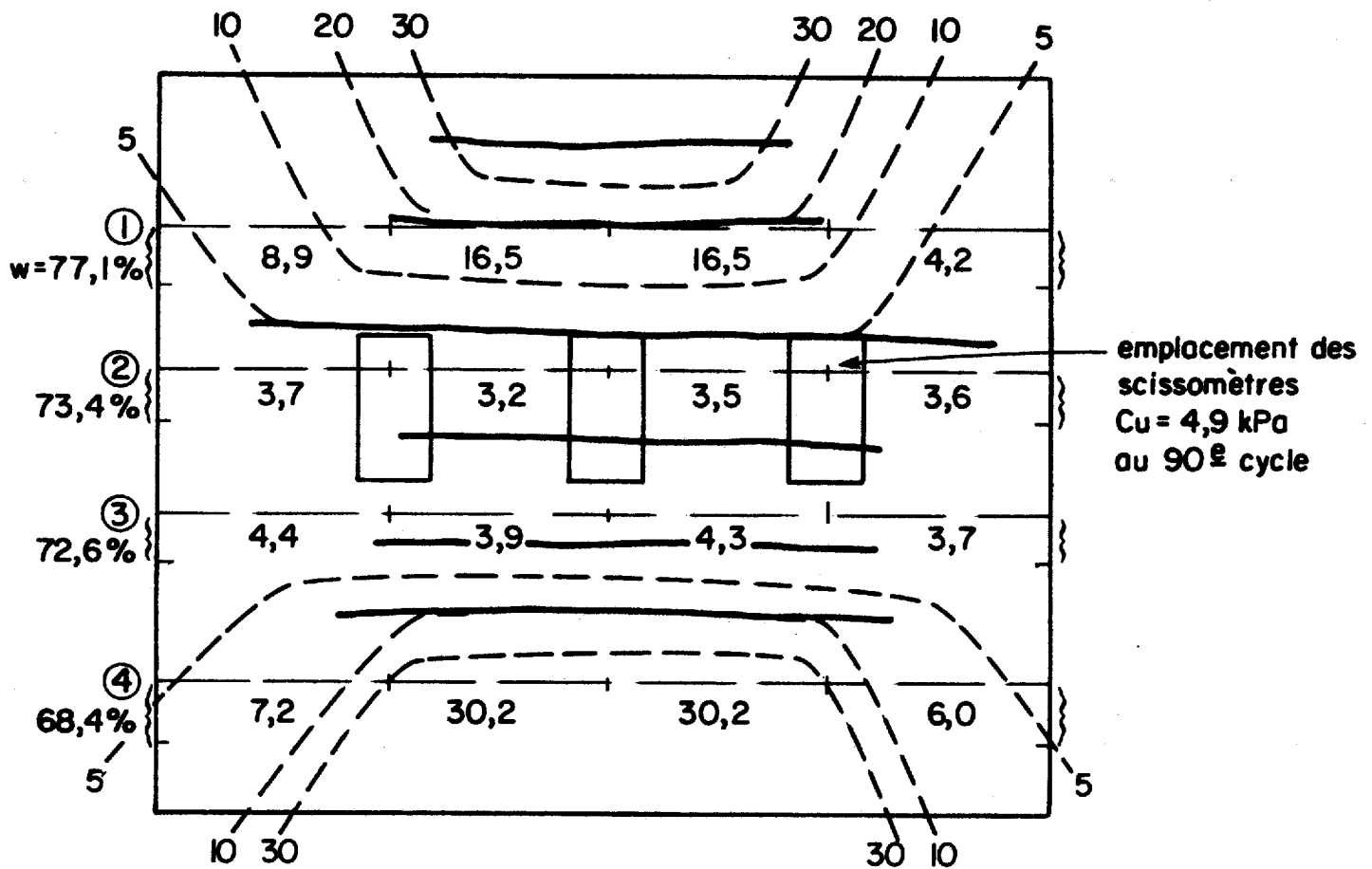
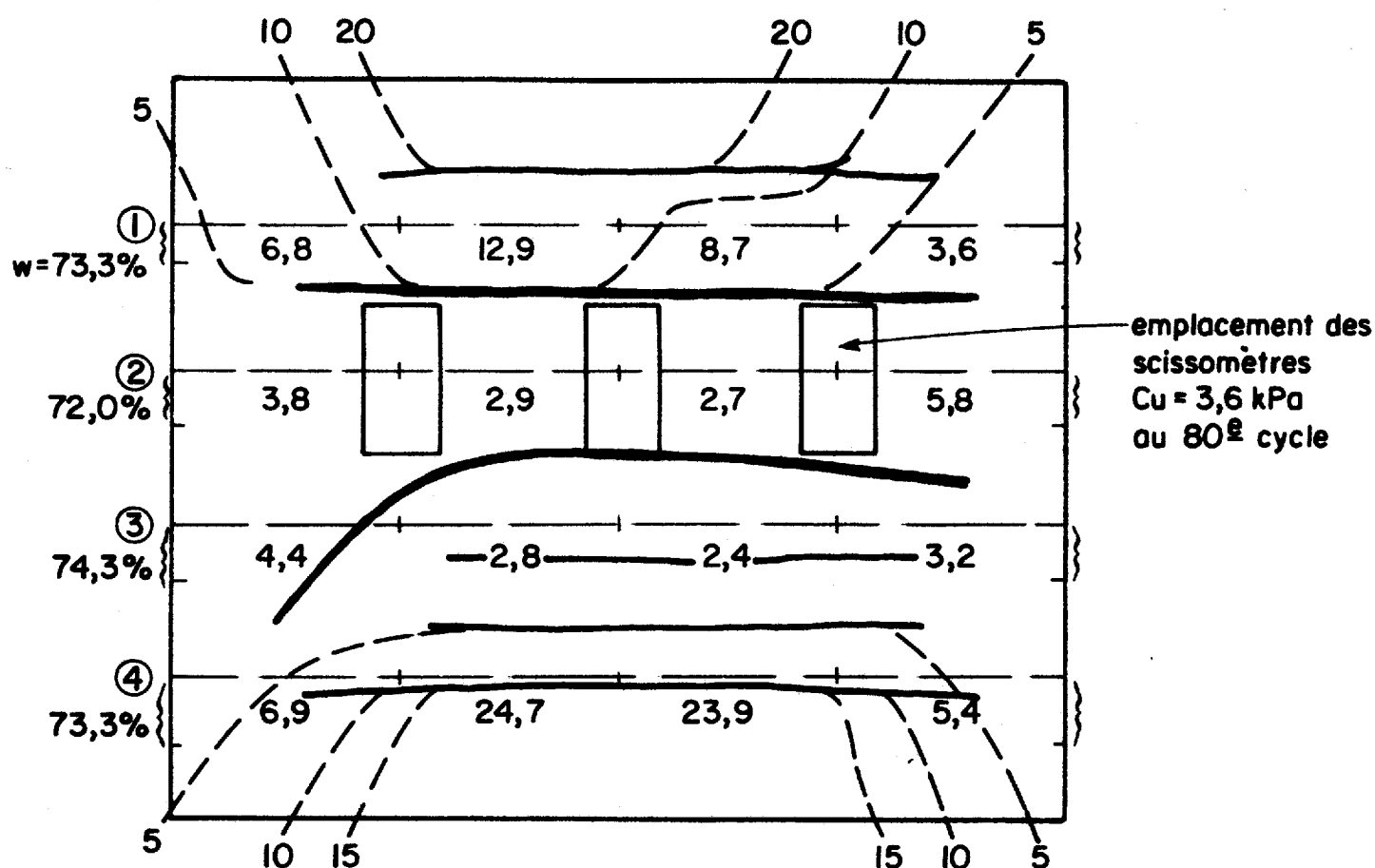


Fig. 118 — Essai de cisaillement simple : zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai.

St-Léon (9,3m)



Légende :

- ① ② ③ ④ : lignes de découpage de l'échantillon en tranches horizontales
- { } : zone de pénétration approximative du cône
- : zone de fort remaniement ou d'un plan de cisaillement majeur
- 20 --- 20 : ligne d'égale résistance, kPa

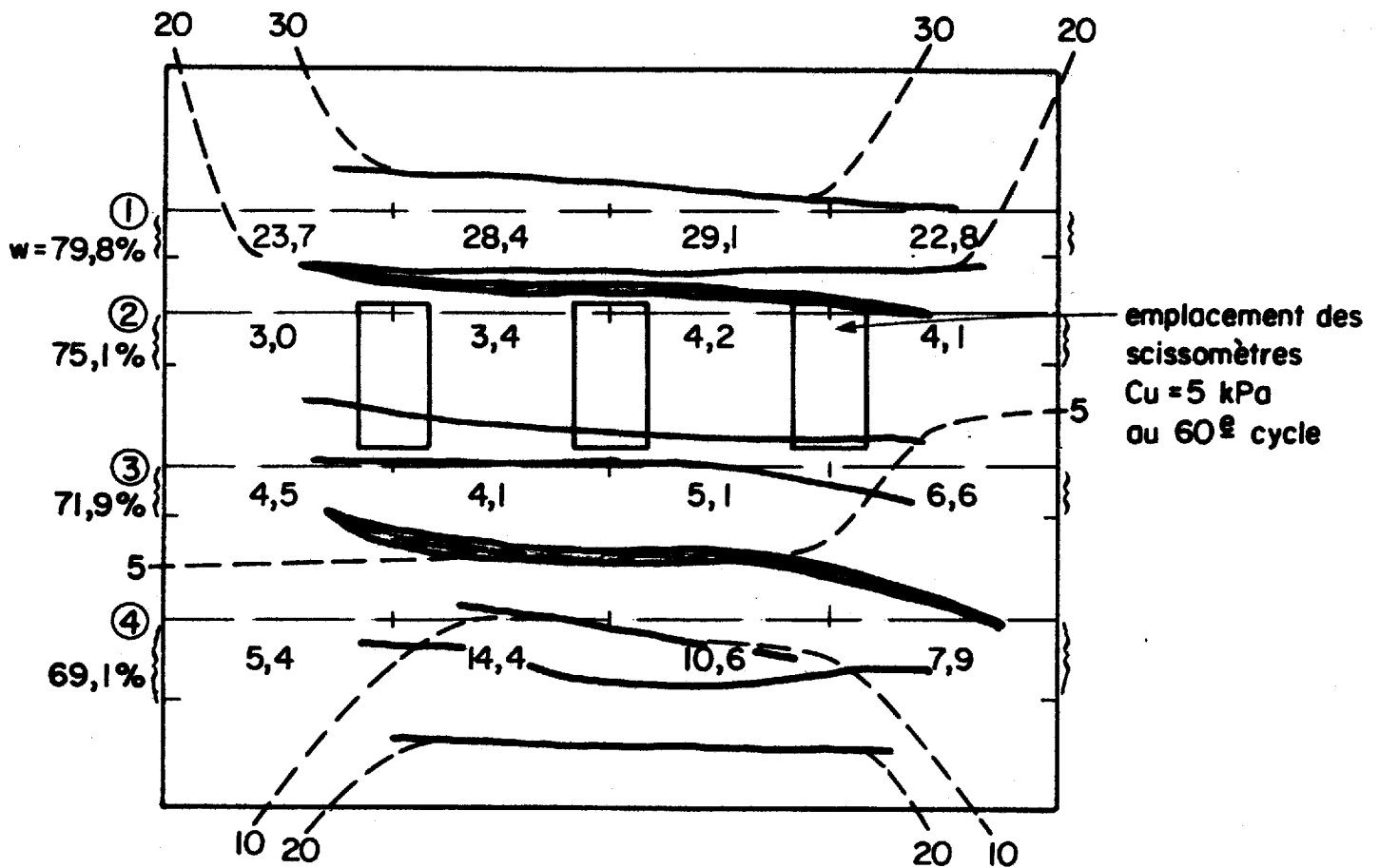
c_u intact = 46,1 kPa

c_u remanié moyen = 1,3 kPa

w initial de l'échantillon = 74,2 %

Fig. 119 — Essai de cisaillement simple : zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai.

Louiseville (6m)



Légende :

- ① ② ③ ④ : lignes de découpage de l'échantillon en tranches horizontales
- { } : zone de pénétration approximative du cône
- : zone de fort remaniement ou d'un plan de cisaillement majeur
- 20---20 : ligne d'égale résistance, kPa

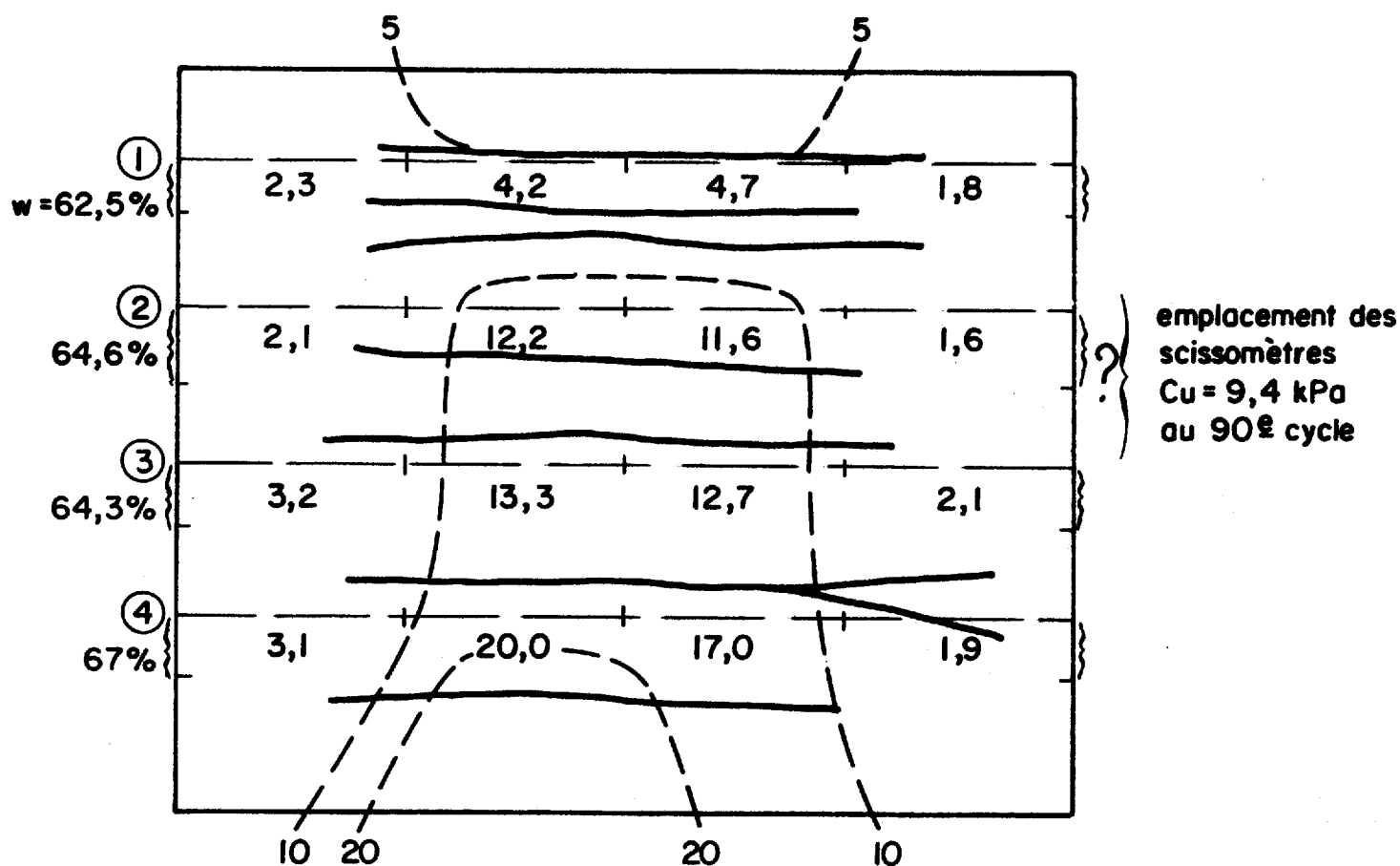
c_u intact = 38,2 kPa ($w = 77,9 \%$)

c_u remanié moyen = 0,8 kPa

w initial de l'échantillon = 76 %

Fig.120 — Essai de cisaillement simple : zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai.

St-Hilaire (5,6m)



Légende :

- ① ② ③ ④ : lignes de découpage de l'échantillon en tranches horizontales
- { } : zone de pénétration approximative du cône
- : zone de fort remaniement ou d'un plan de cisaillement majeur
- 20---20 : ligne d'égale résistance, kPa

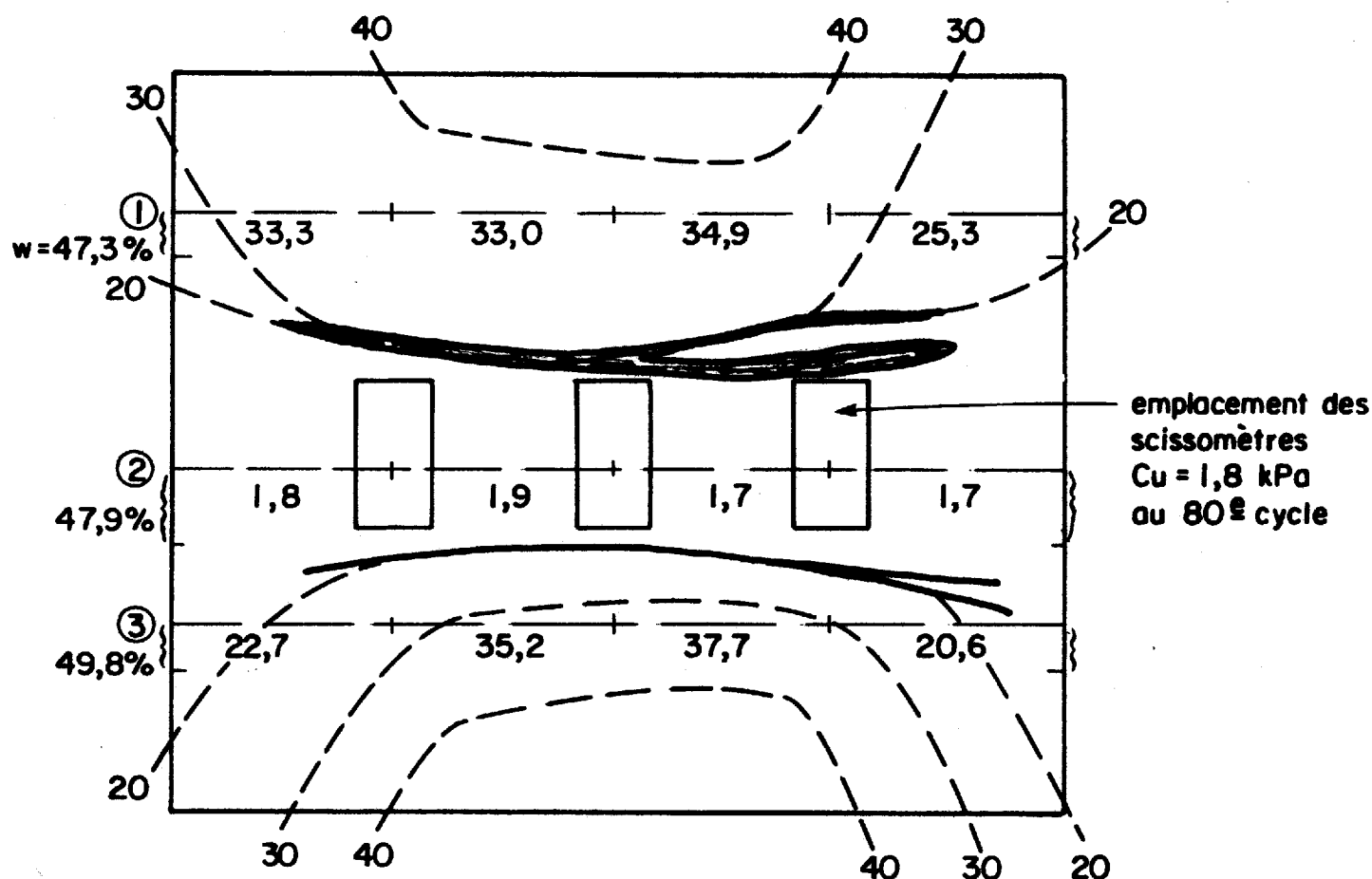
c_u intact = 41,5 kPa ($w = 62,0\%$)

c_u remanié moyen = 0,3 kPa

w initial de l'échantillon = 64,1 %

Fig. 121 — Essai de cisaillement simple : zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai.

St-Hilaire (11,4 m)



Légende :

- ① ② ③ : lignes de découpage de l'échantillon en tranches horizontales
- { } : zone de pénétration approximative du cône
- : zone de fort remaniement ou d'un plan de cisaillement majeur
- 20----20 : ligne d'égale résistance, kPa

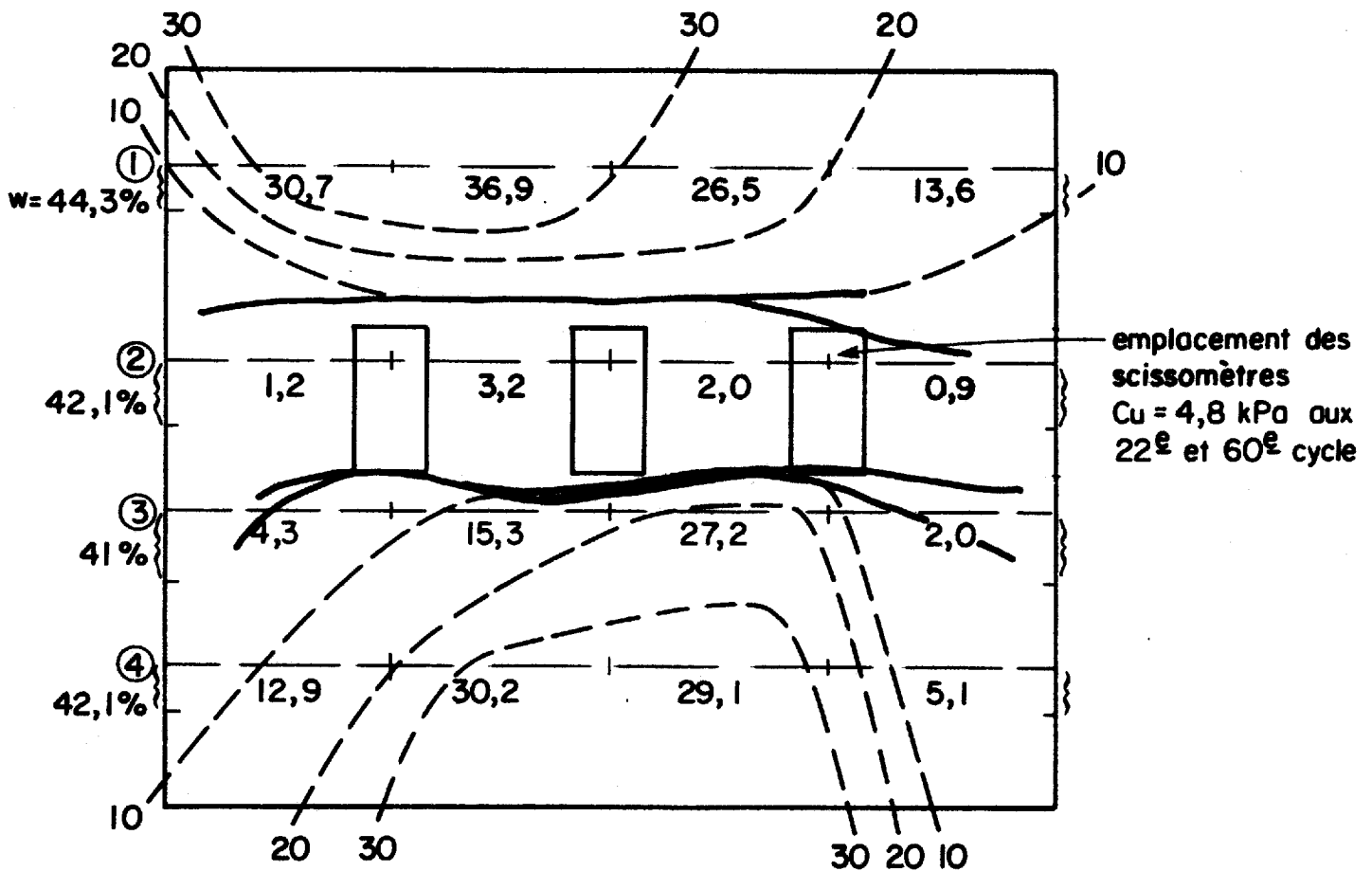
c_u intact = 55,0 kPa ($w = 44,9\%$)

c_u remanié moyen = 0,4 kPa

w initial de l'échantillon = 52 %

Fig. 122 — Essai de cisaillement simple : zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai.

St-Thuribe (6 m)



Légende :

- ① ② ③ ④ : lignes de découpage de l'échantillon en tranches horizontales
- { } : zone de pénétration approximative du cône
- : zone de fort remaniement ou d'un plan de cisaillement majeur
- 20---20 : ligne d'égale résistance, kPa

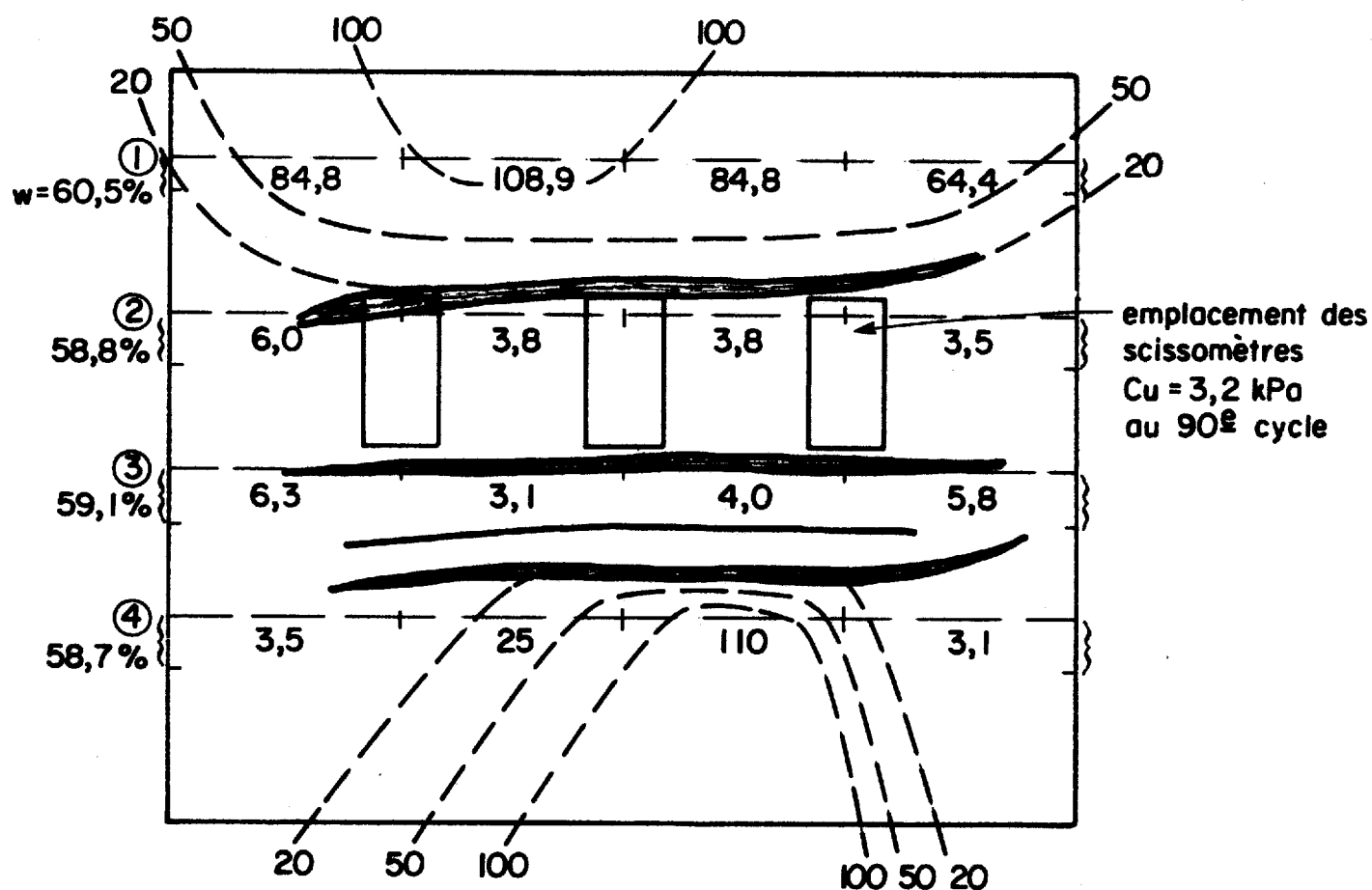
c_u intact = 45,9 kPa ($w = 44,8\%$)

c_u remanié moyen < 0,07 kPa

w initial de l'échantillon = 44,5 %

Fig. 123 — Essai de cisaillement simple : zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai.

St-Thuribe (12 m)



Légende :

- ① ② ③ ④ : lignes de découpage de l'échantillon en tranches horizontales
- { } : zone de pénétration approximative du cône
- : zone de fort remaniement ou d'un plan de cisaillement majeur
- 20---20 : ligne d'égale résistance, kPa

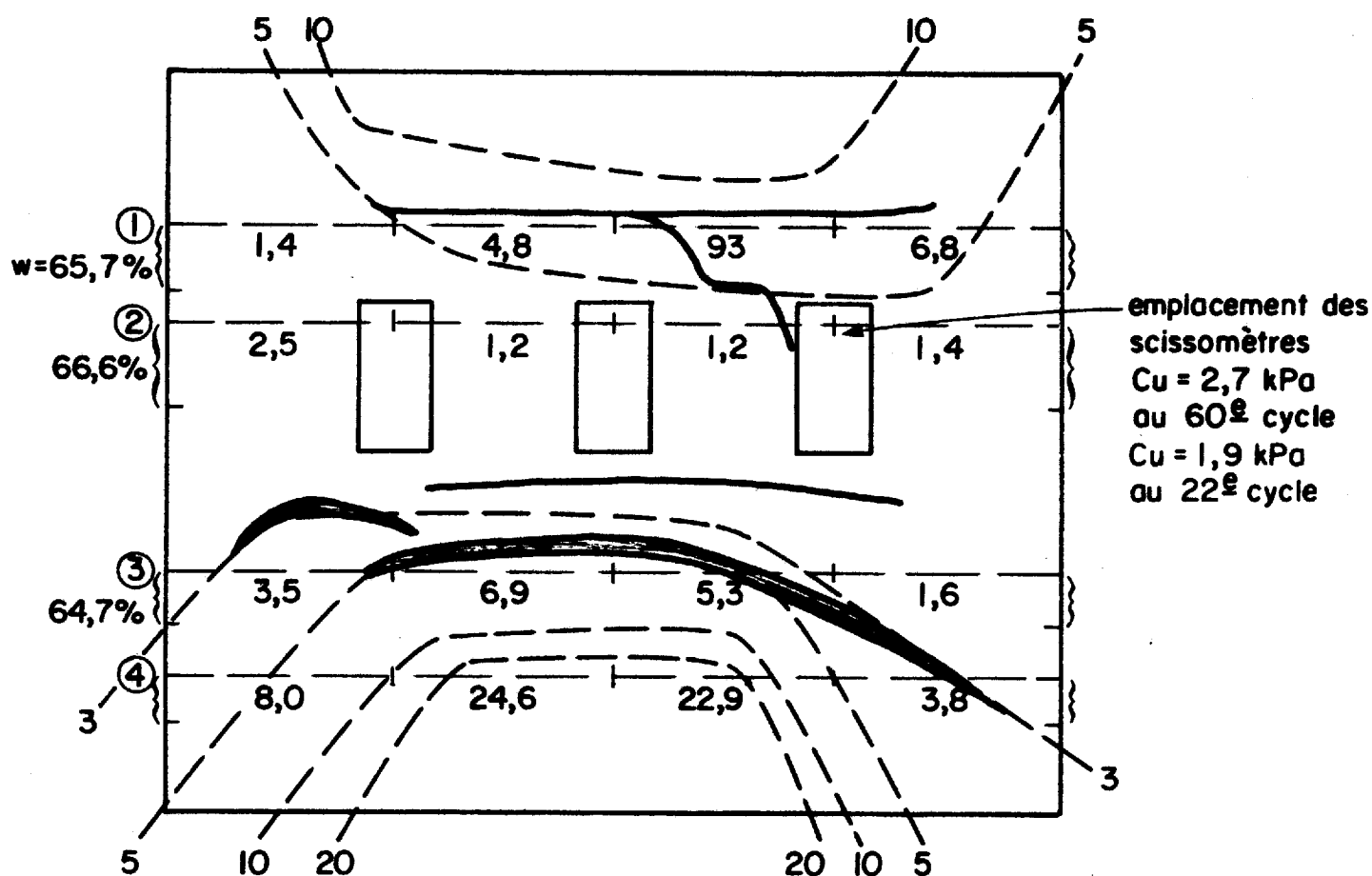
c_u intact = 142 kPa ($w = 59,8\%$)

c_u remanié moyen = 1,3 kPa

w initial de l'échantillon = 59,9%

Fig. 124 — Essai de cisaillement simple : zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai.

Mascouche (9 m)



Légende :

- ① ② ③ ④ : lignes de découpage de l'échantillon en tranches horizontales
 { } : zone de pénétration approximative du cône
 ——— : zone de fort remaniement ou d'un plan de cisaillement majeur
 20-----20 : ligne d'égale résistance, kPa

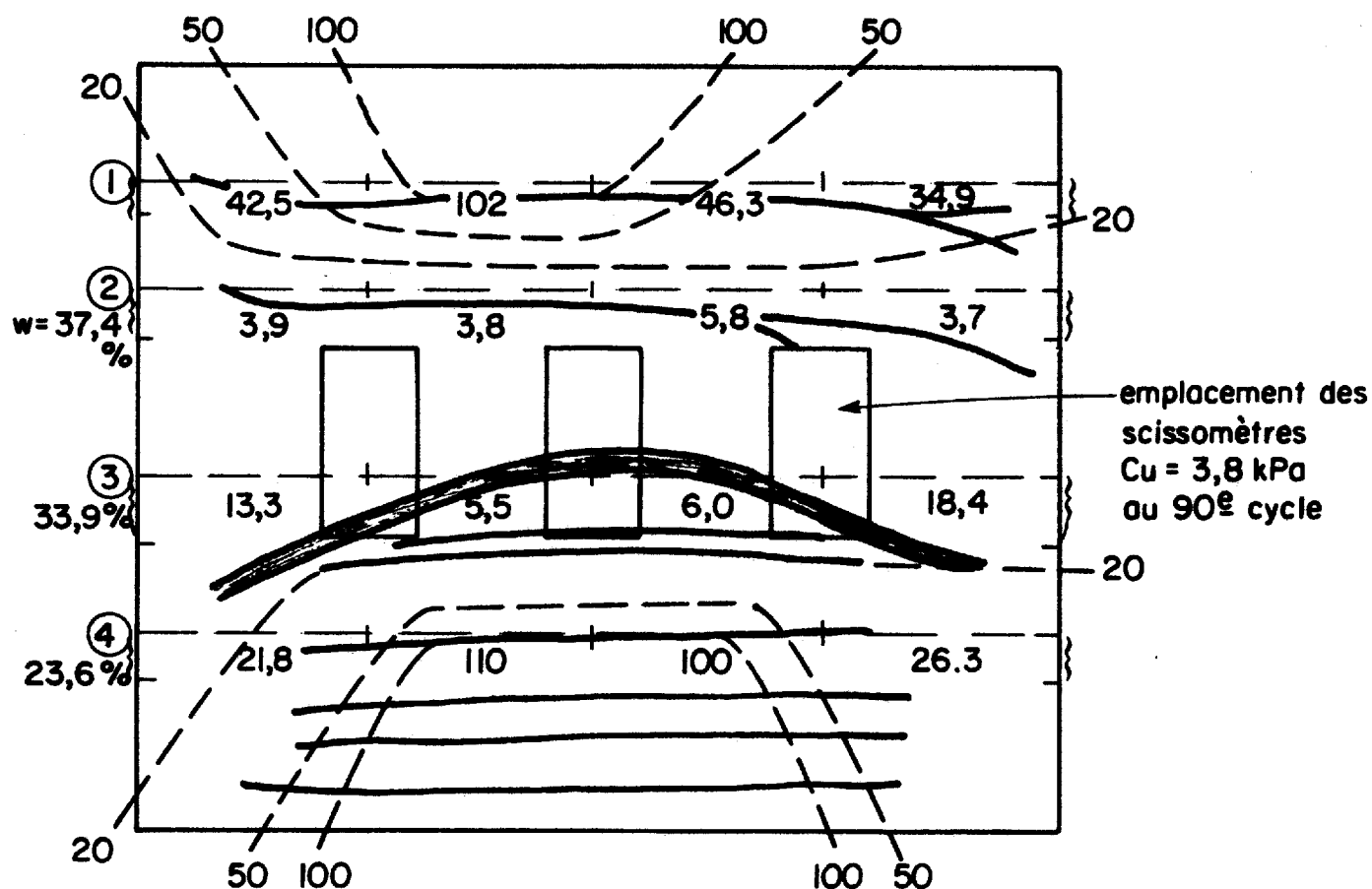
c_u intact = 22,6 kPa ($w = 64,7\%$)

c_u remanié moyen = 0,2 kPa

w initial de l'échantillon = 62,6 %

Fig. 125 — Essai de cisaillement simple : zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai.

St-Alban (6,6 m)



Légende :

- ① ② ③ ④ : lignes de découpage de l'échantillon en tranches horizontales
- { } : zone de pénétration approximative du cône
- : zone de fort remaniement ou d'un plan de cisaillement majeur
- 20---20 : ligne d'égale résistance, kPa

c_u intact = 319 kPa ($w = 37,4\%$)

c_u remanié moyen = 1,3 kPa

w initial de l'échantillon = 36 %

Fig. 126 — Essai de cisaillement simple : zones d'égales résistances déterminées au cône en fin d'essai.

St-Jean-Vianney (30 m)

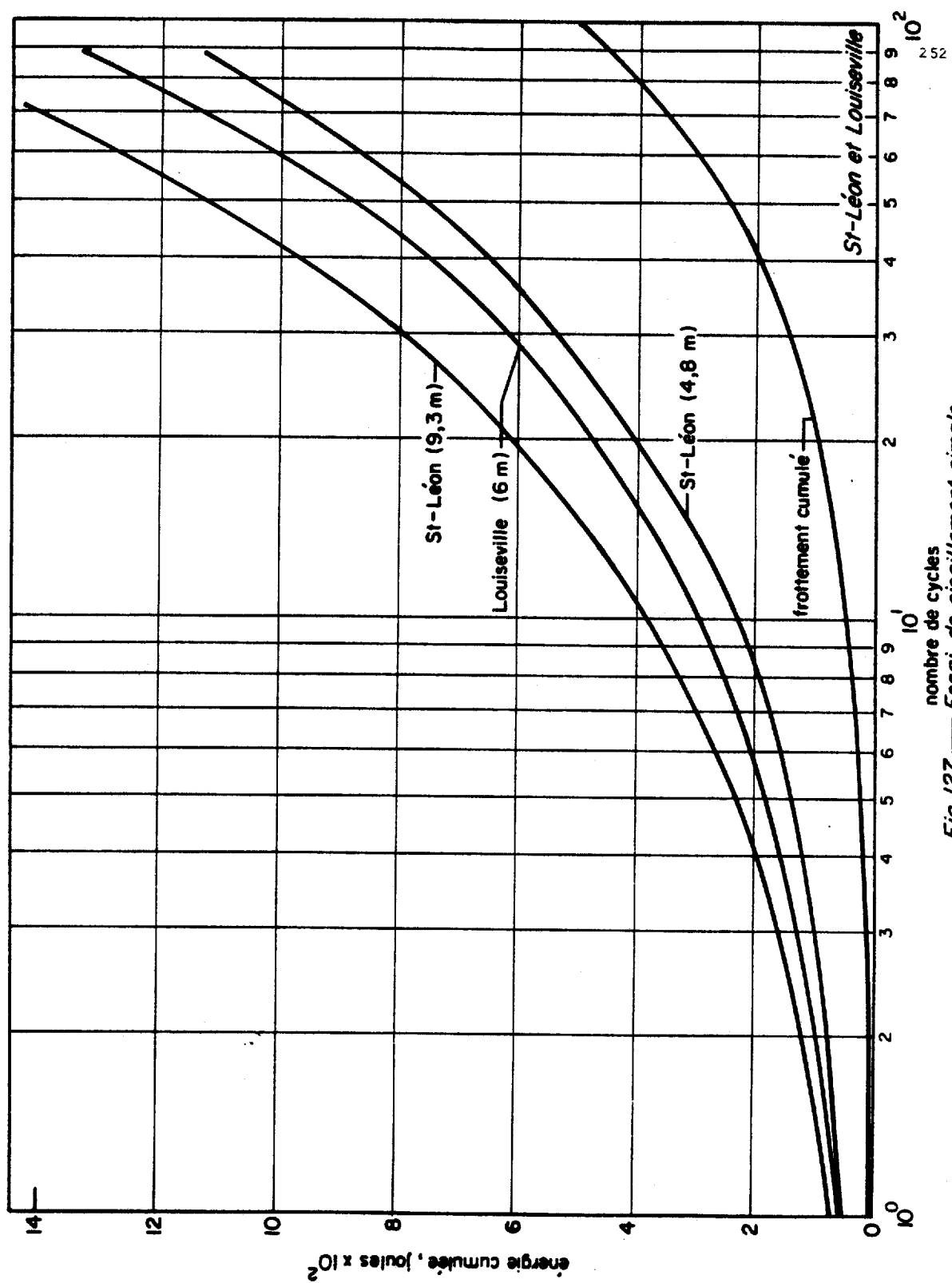


Fig. 127 — Essai de cisaillement simple.

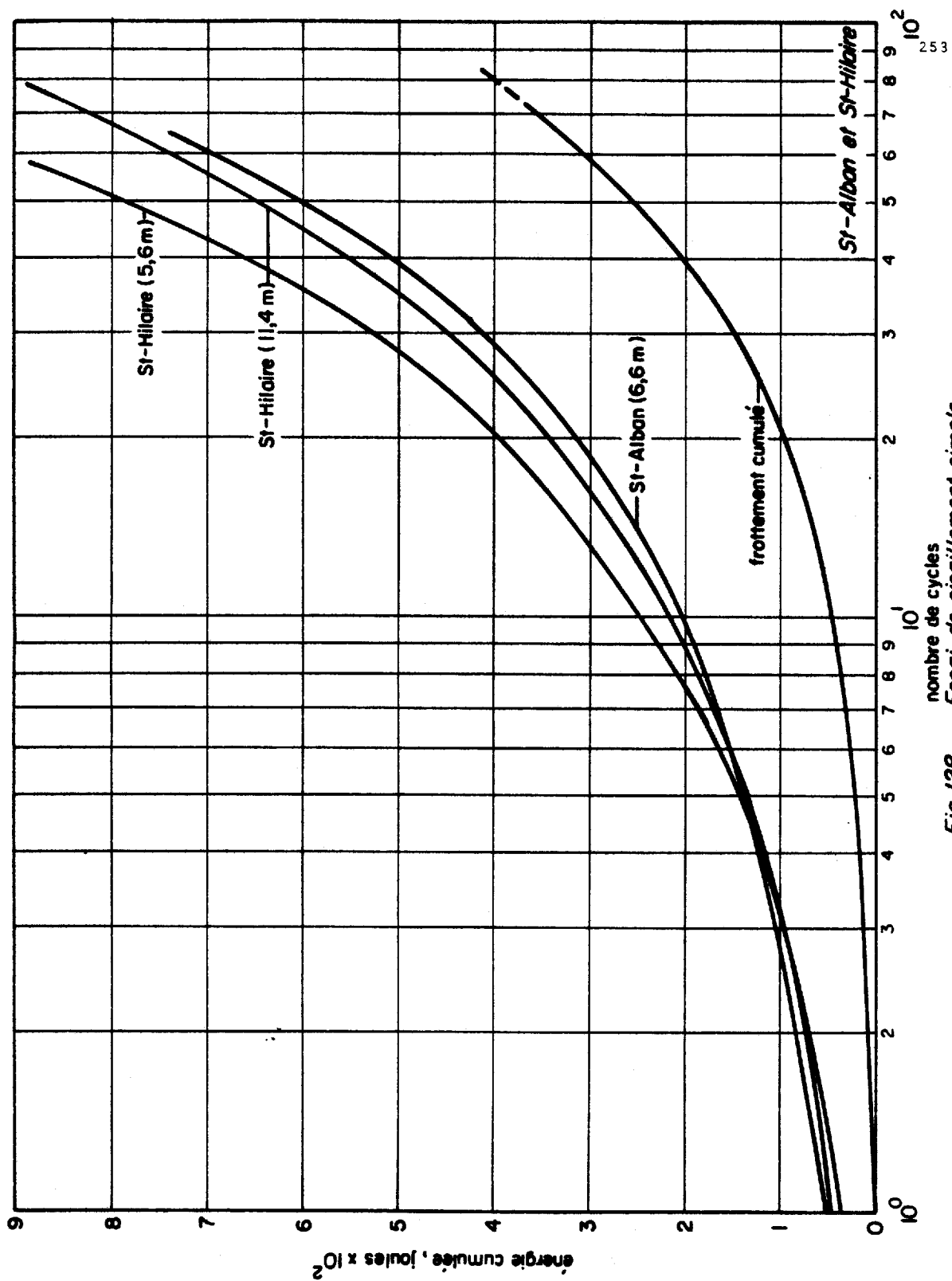


Fig. 128 — Essai de cisaillement simple.

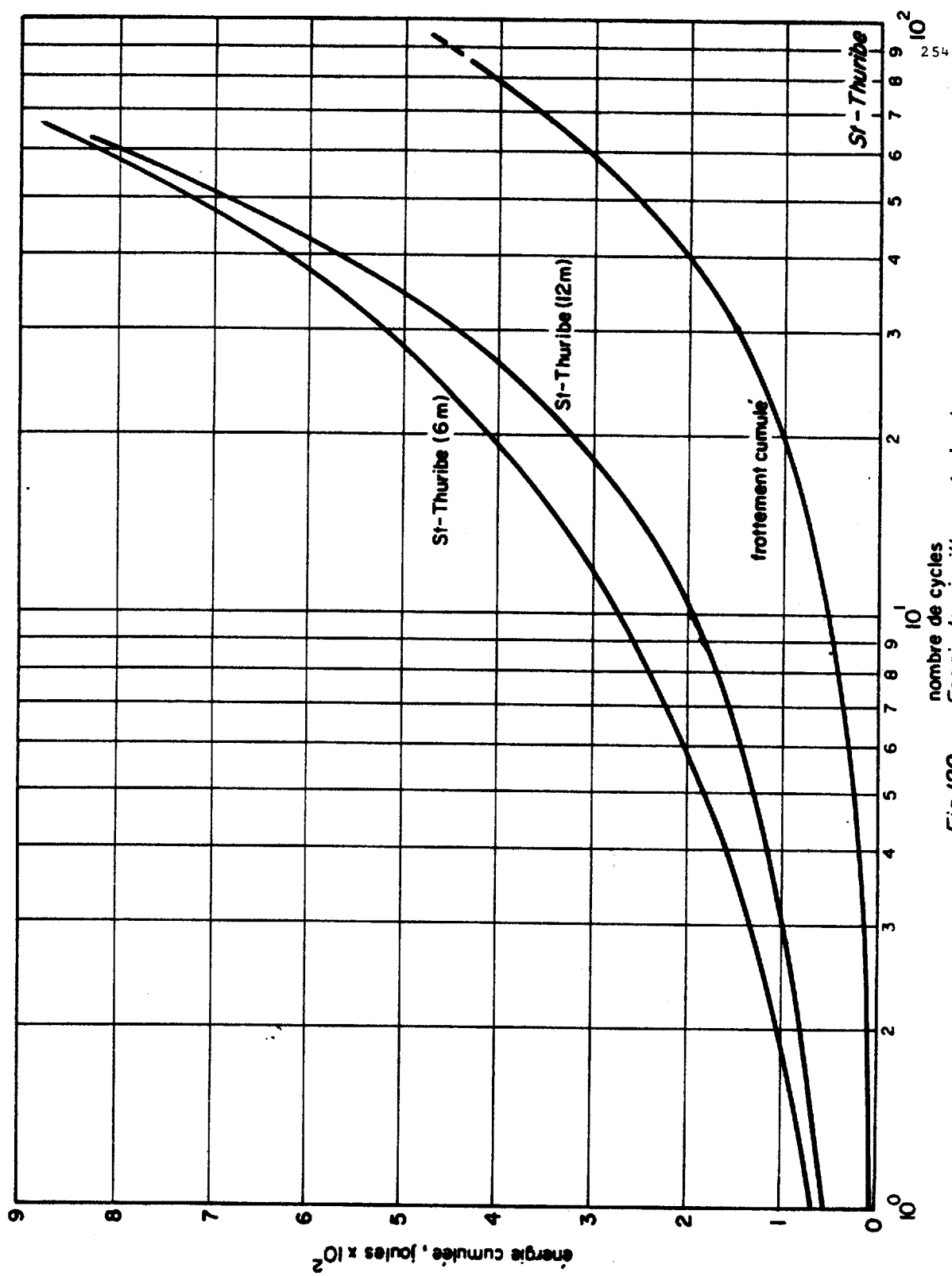


Fig.129 — Essai de cisaillement simple.

nombre de cycles

254

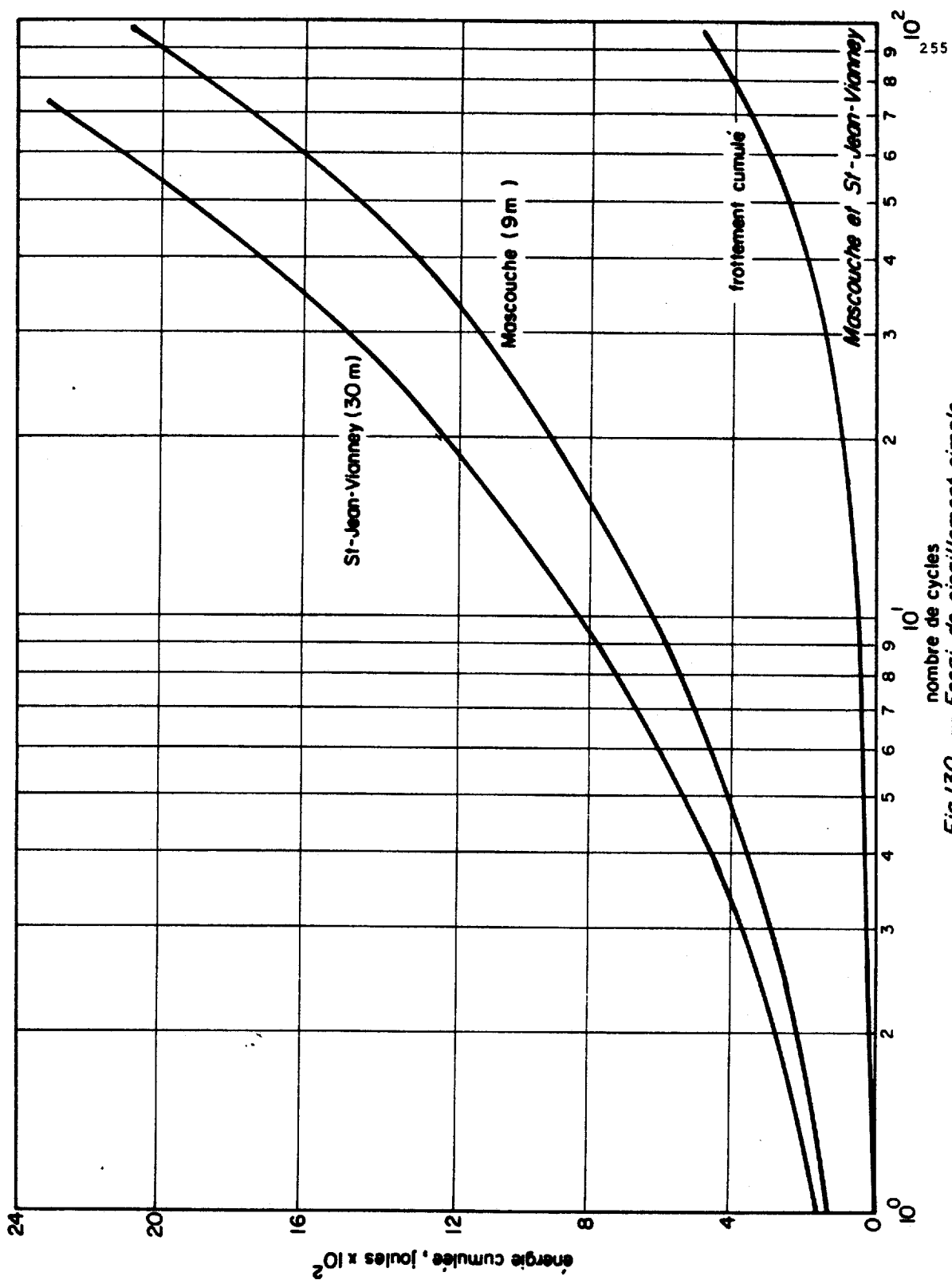


Fig.130 — Essai de cisaillement simple.

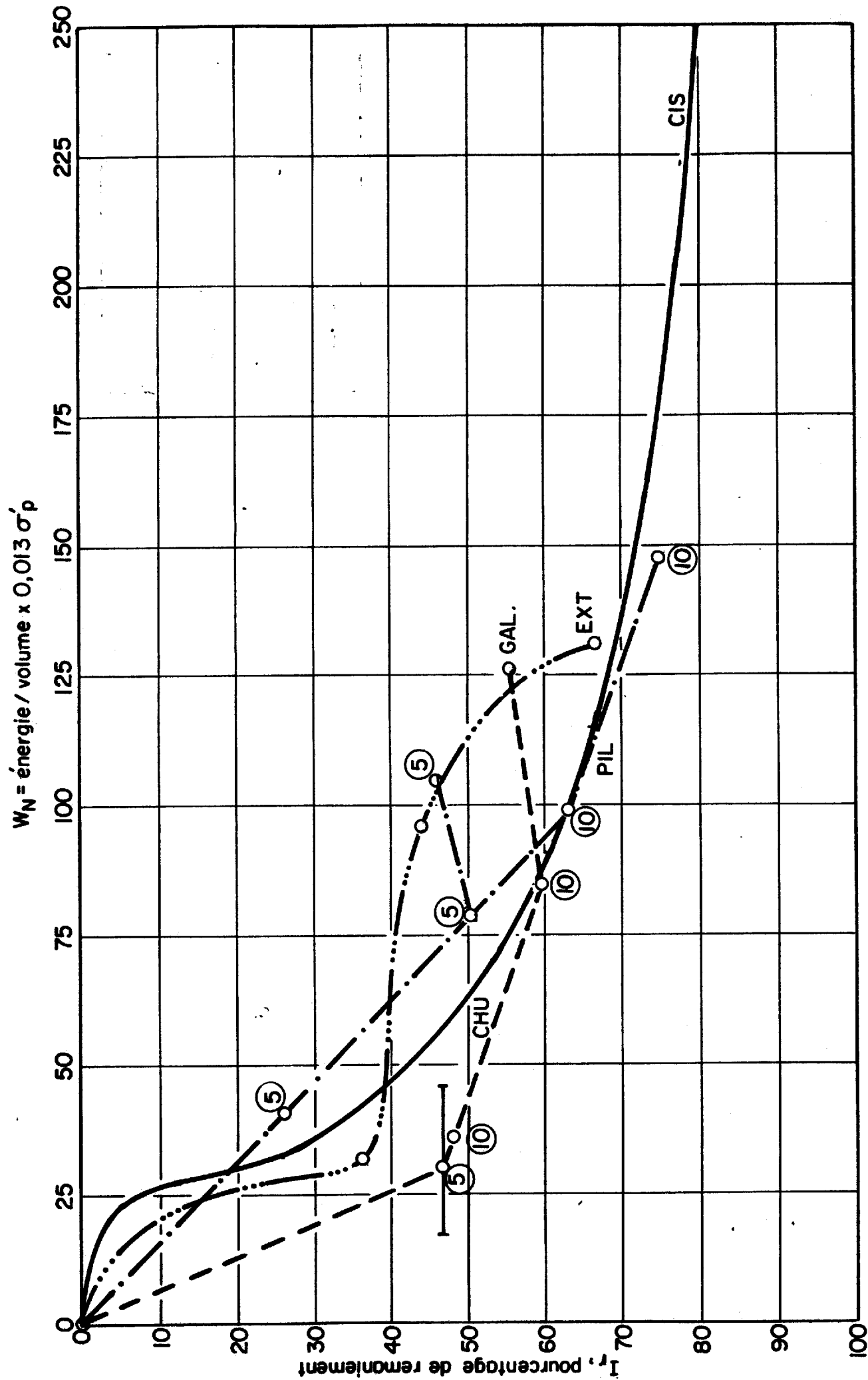


Fig. 131 — Essais d'énergie.

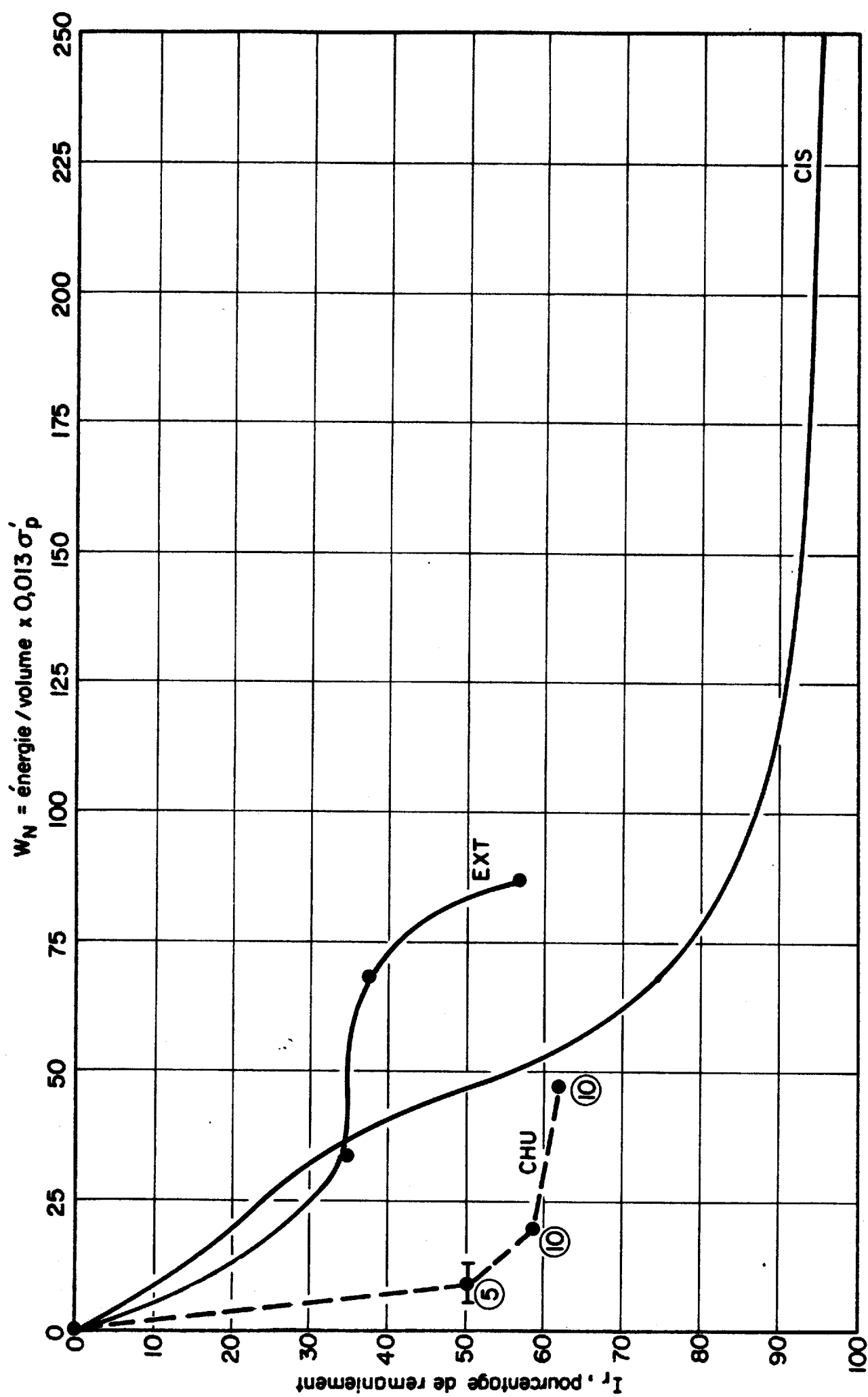


Fig. 132 — Essais d'énergie.

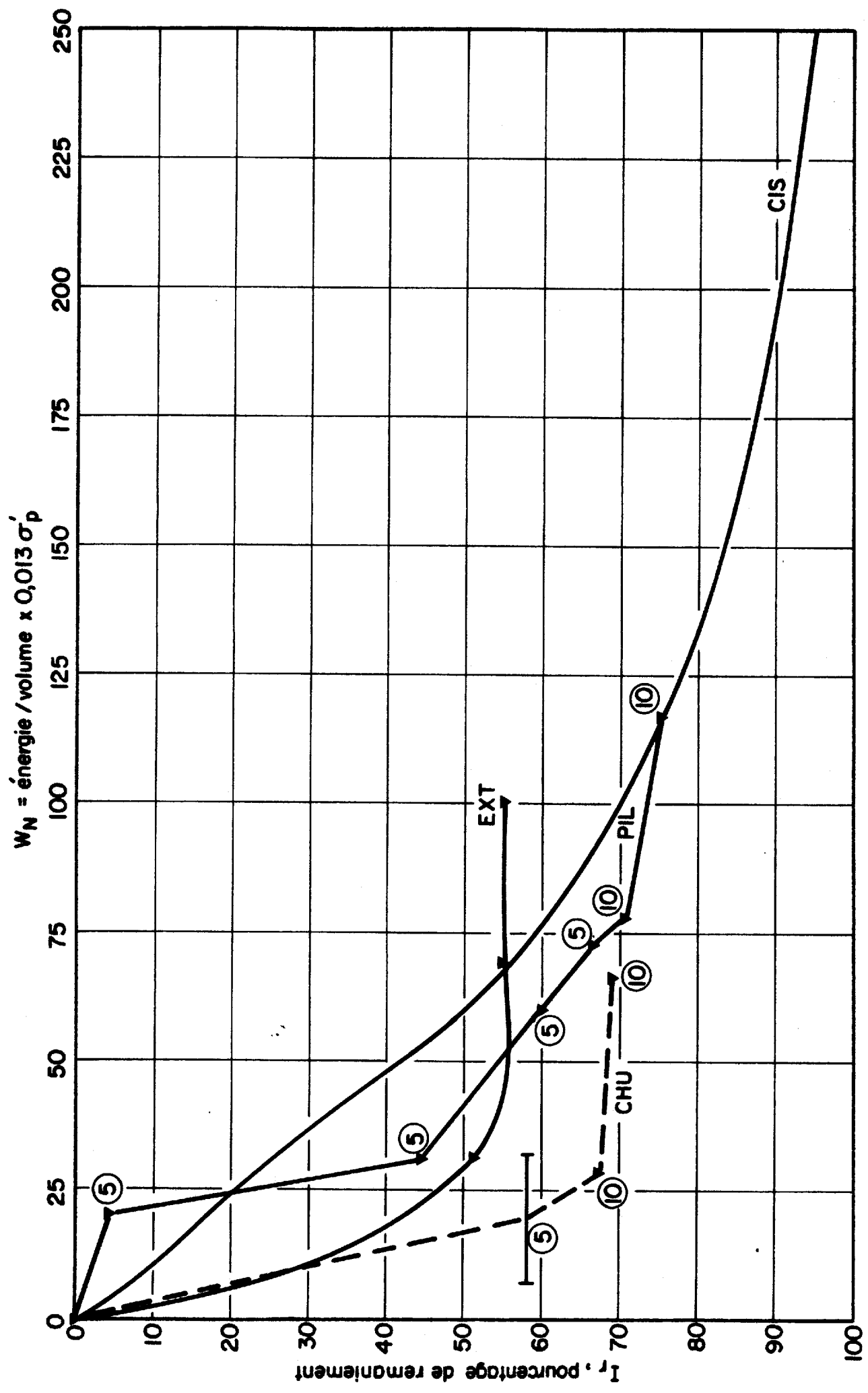


Fig.133 — Essais d'énergie.

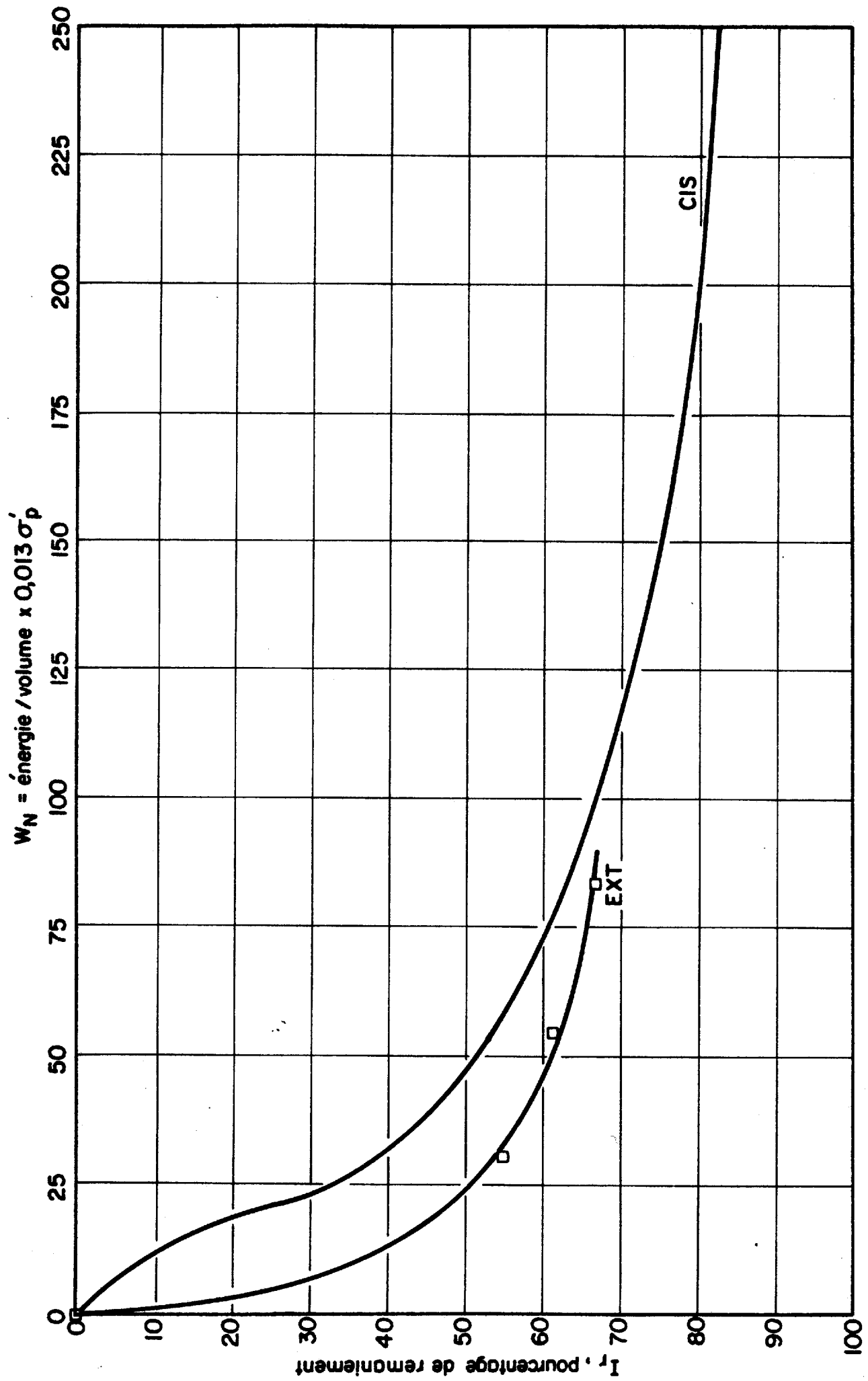


Fig. 134 — Essais d'énergie.

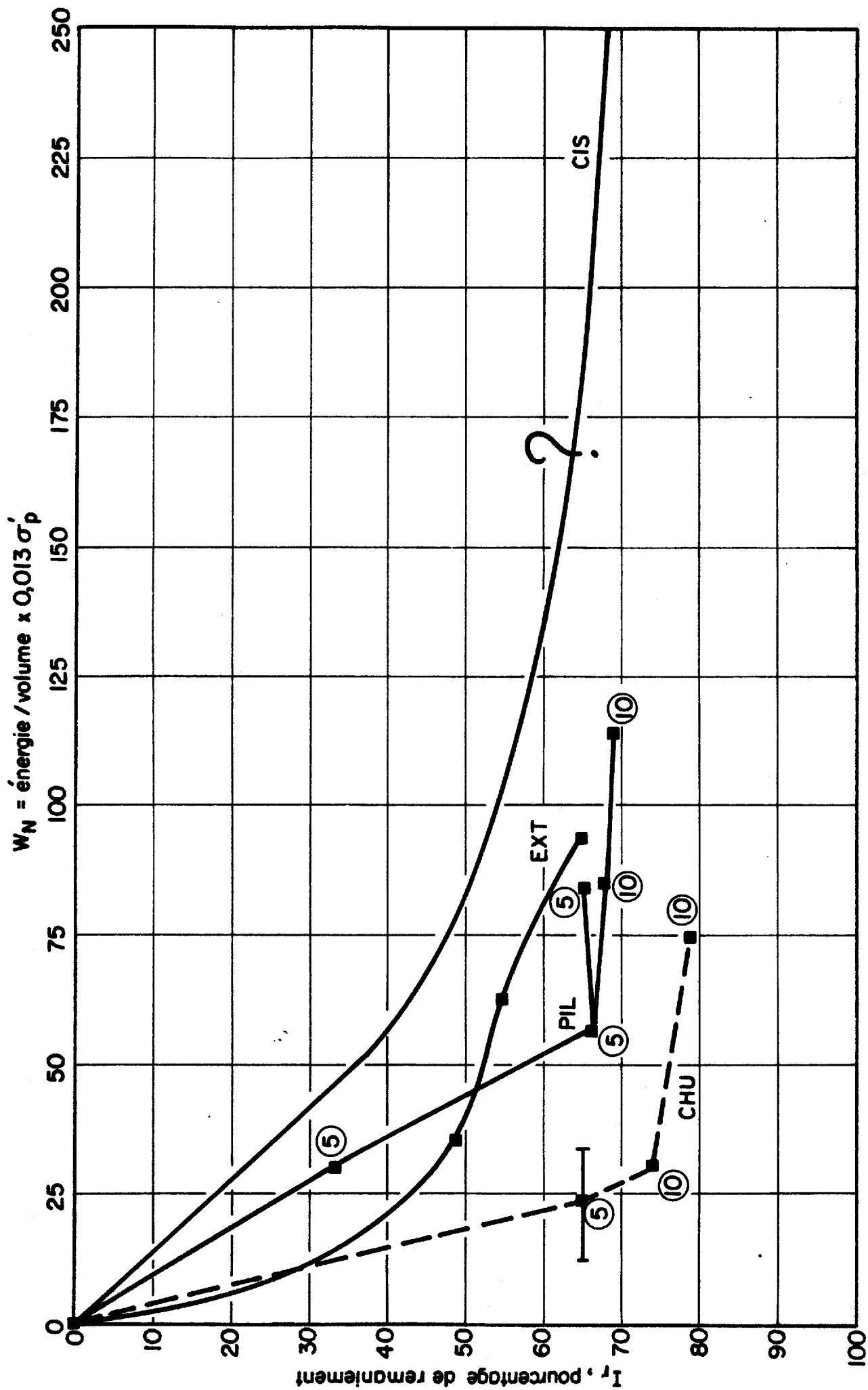


Fig. 135 — Essais d'énergie.

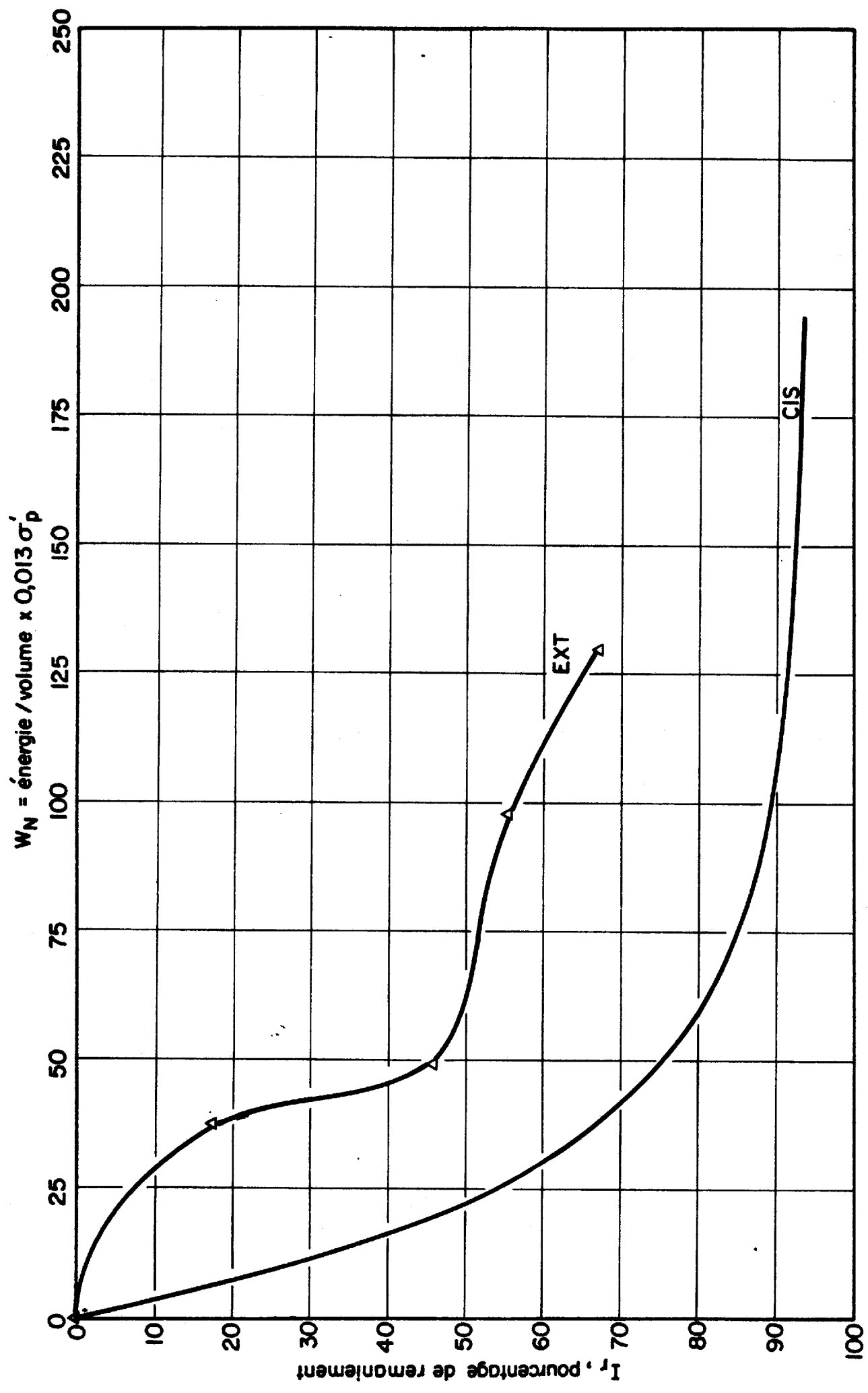


Fig. 136 — Essais d'énergie.

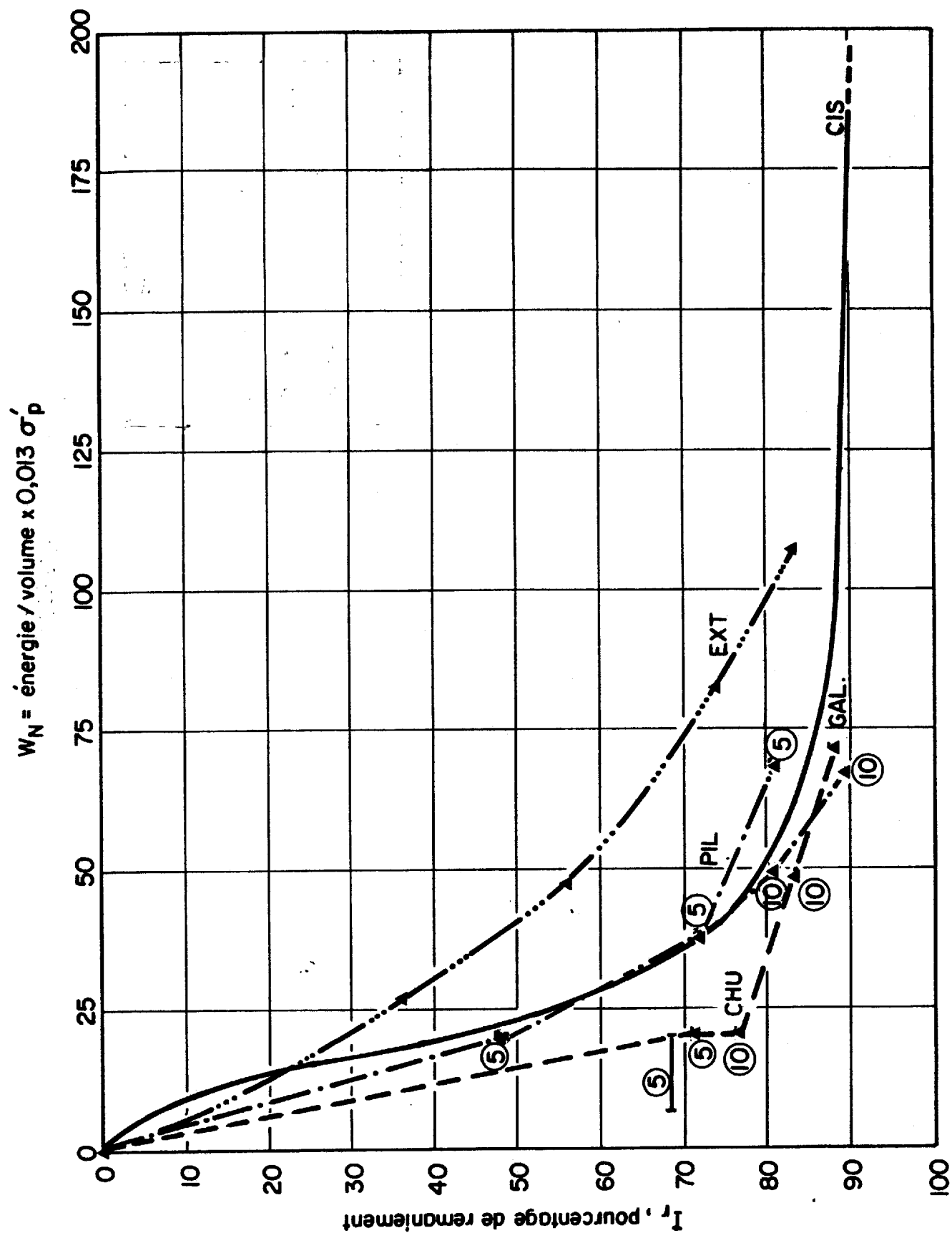


Fig. 137 — Essais d'énergie.

St - Thuride 12 m

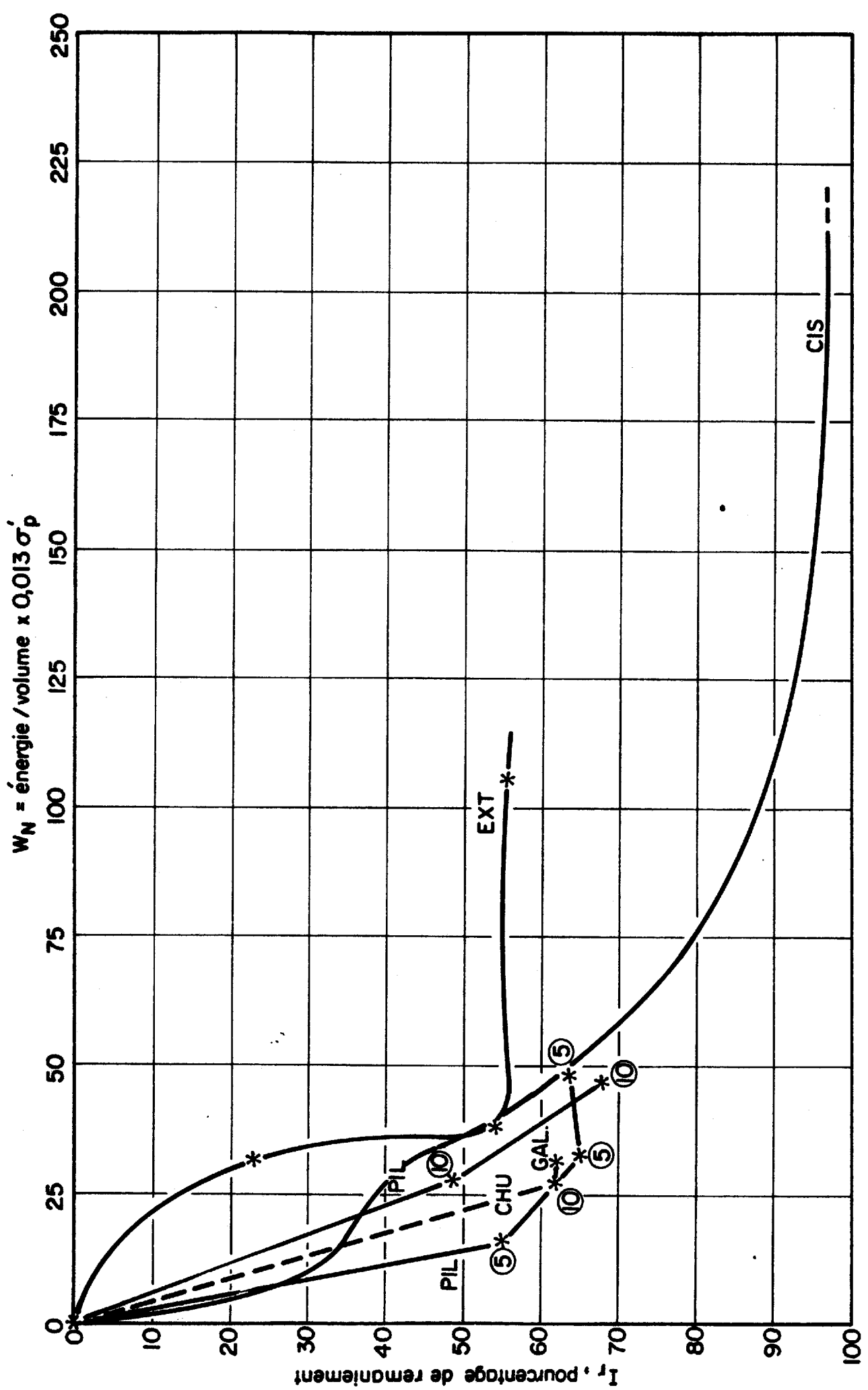


Fig. 138 — Essais d'énergie.

Mascouche 9 m

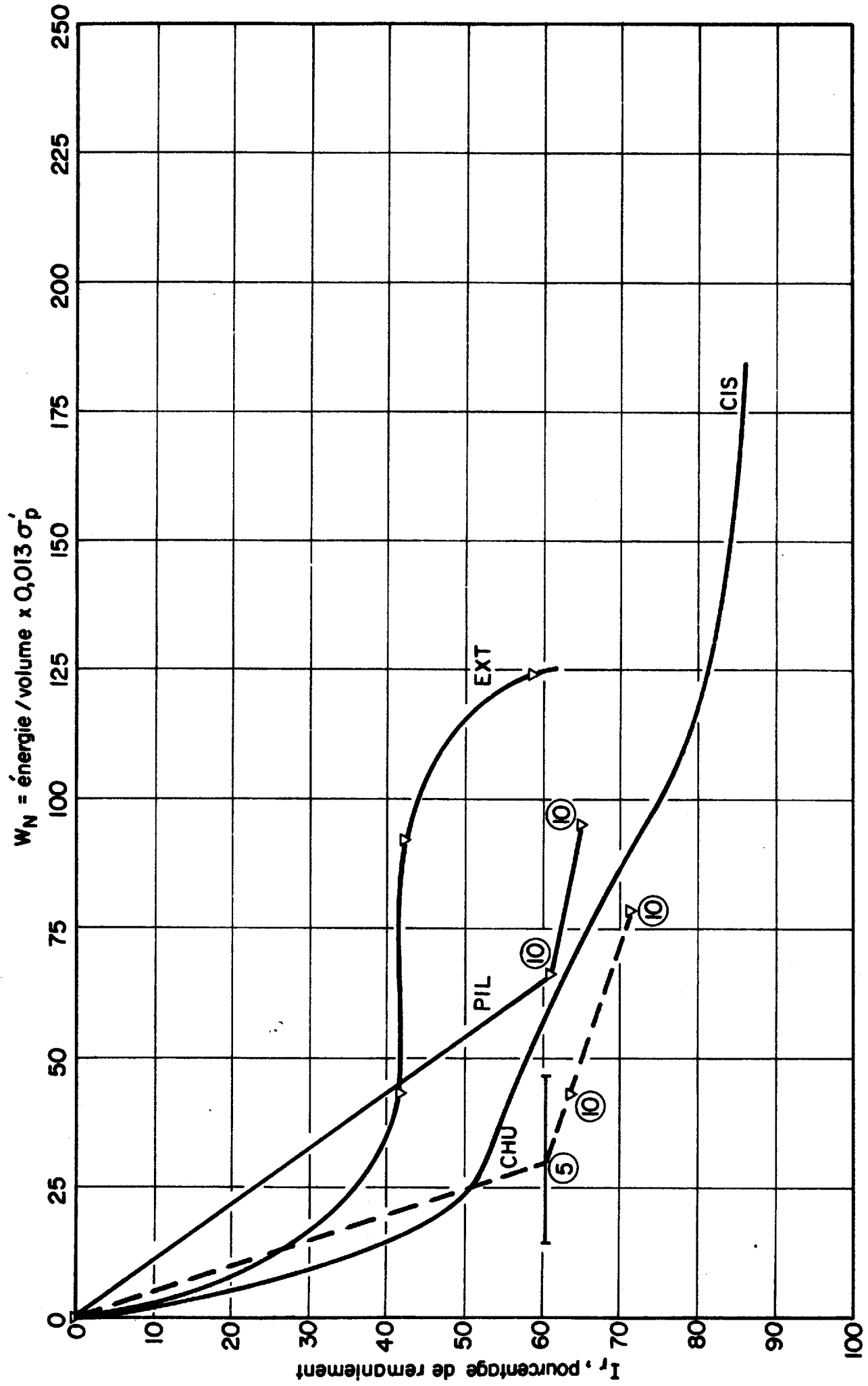


Fig. 139 — Essais d'énergie.

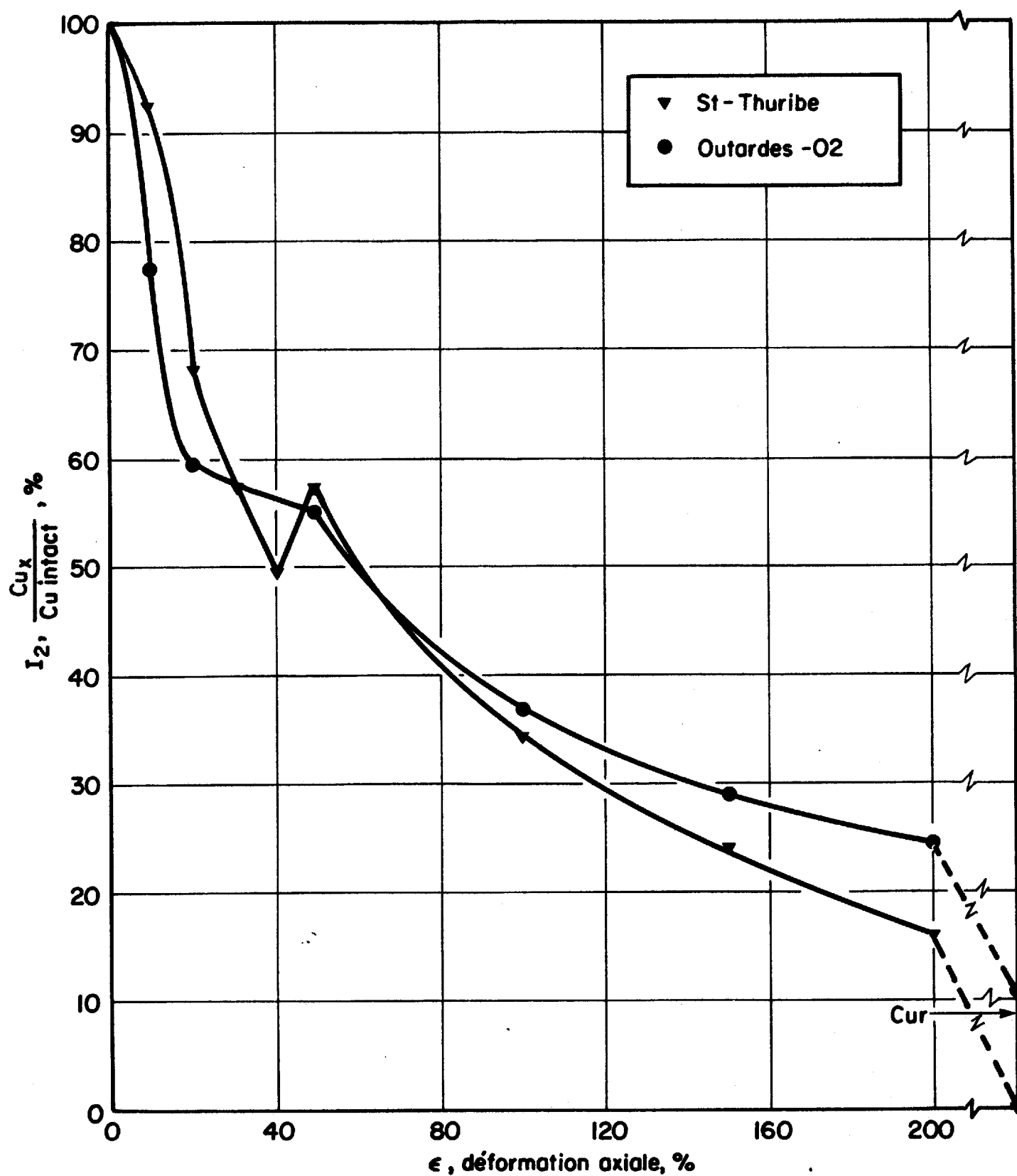


Fig. 140 — Indice de remaniement I_2 vs déformation ϵ .

(d'après Ladanyi et al, 1971)

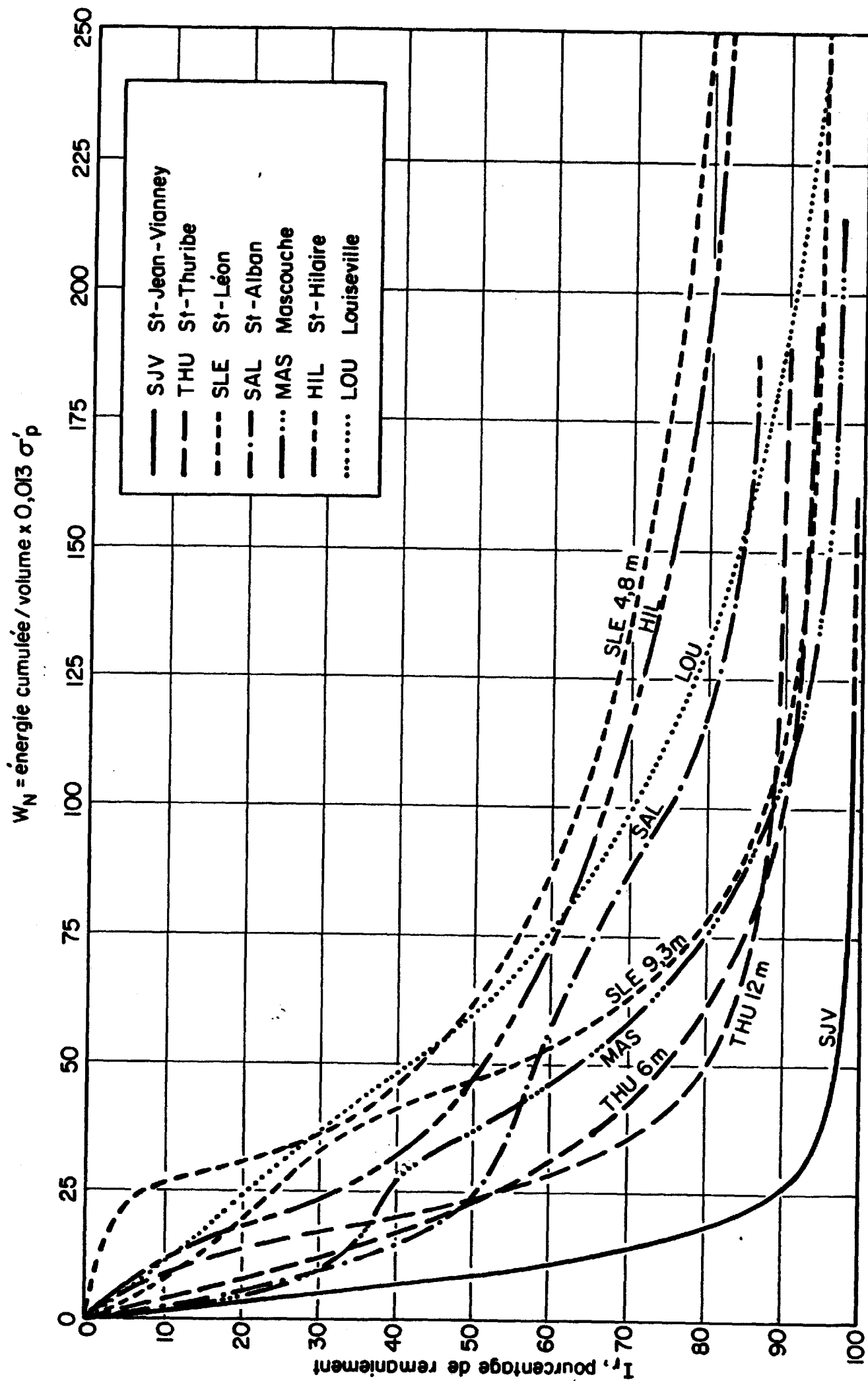


Fig. 141 — Essai de cisaillement simple.

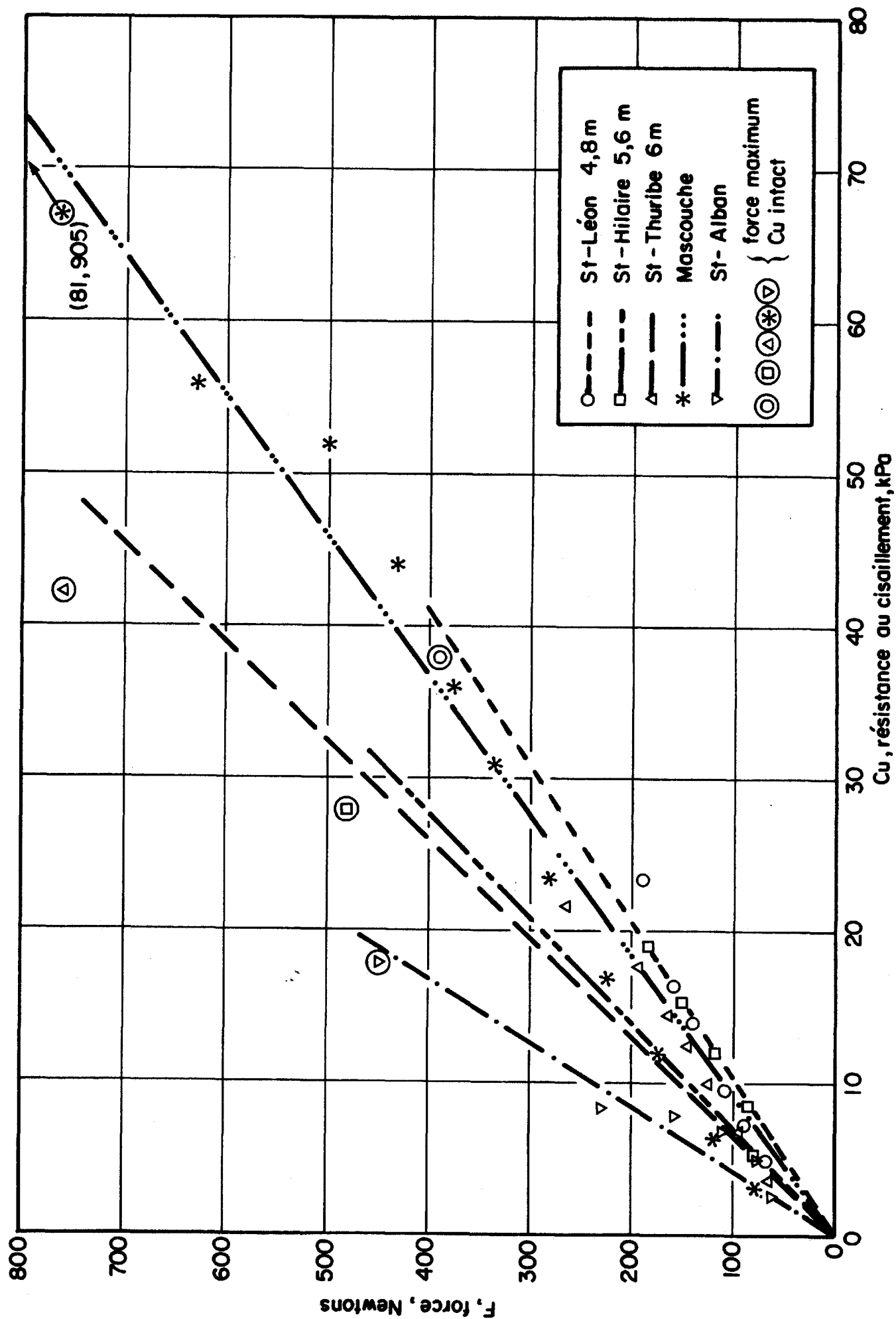


Fig. 142 — Essai de cisaillement simple, F vs C_u .

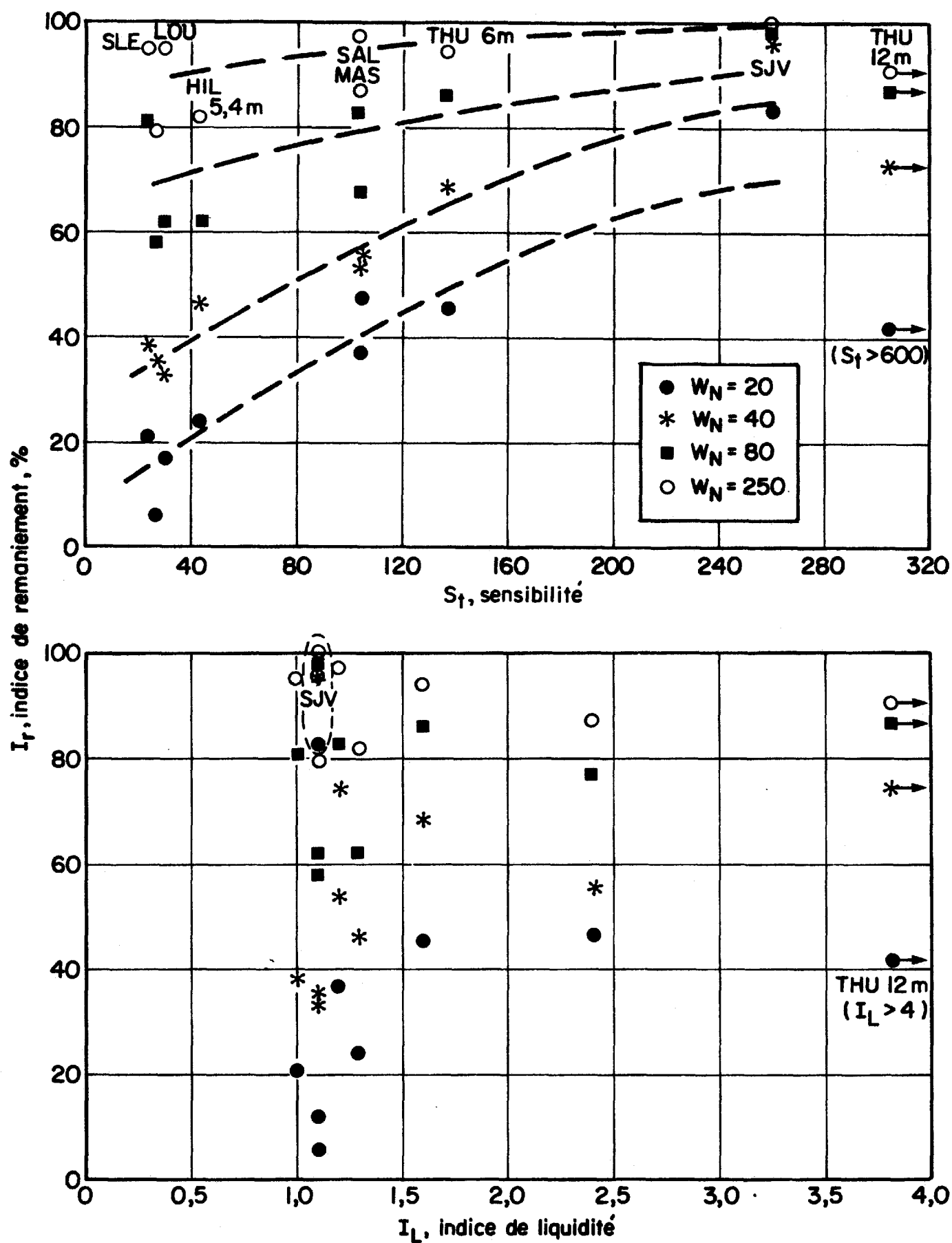


Fig. 143 — Essai de cisaillement simple.

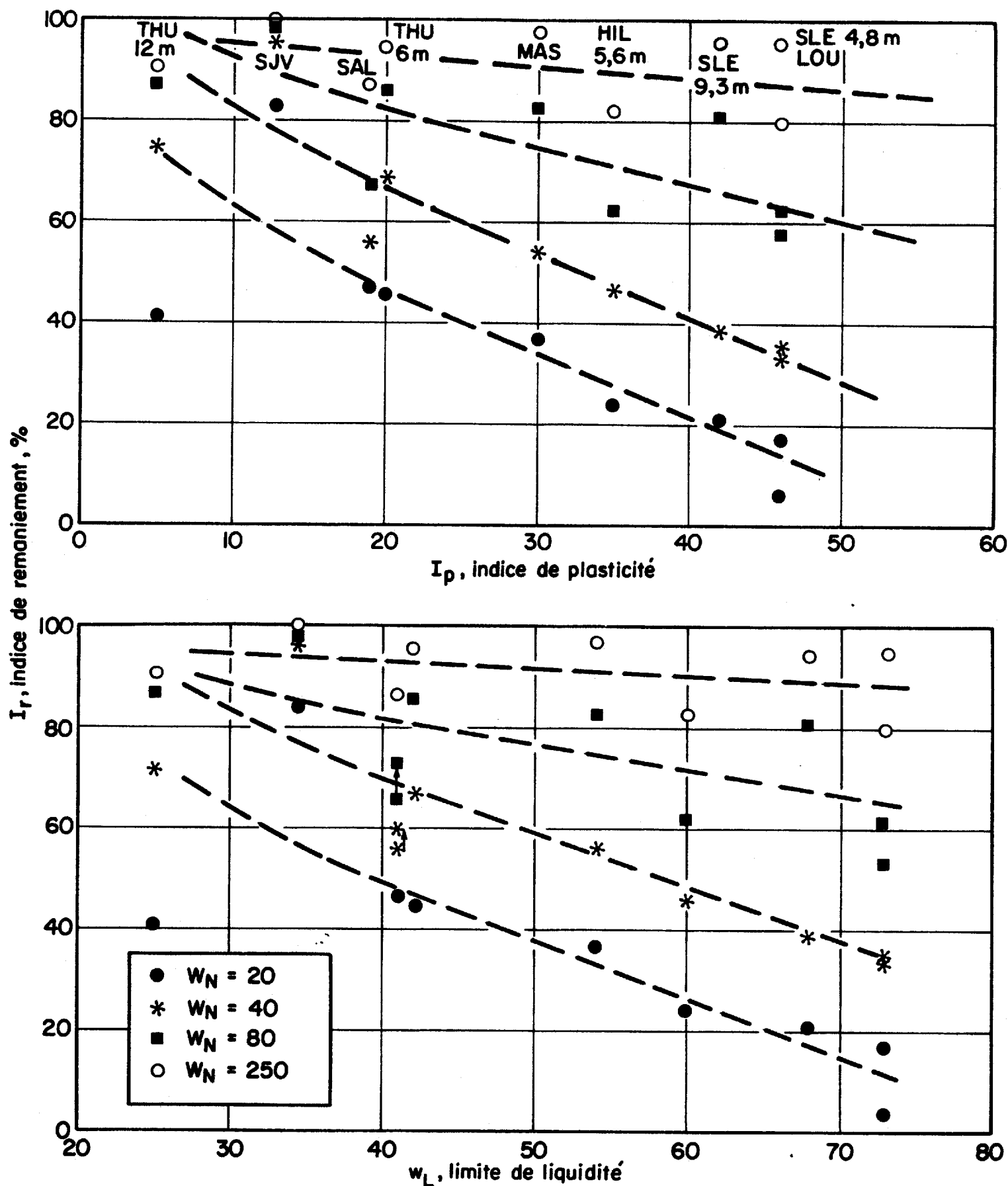


Fig. 144 — Essai de cisaillement simple.

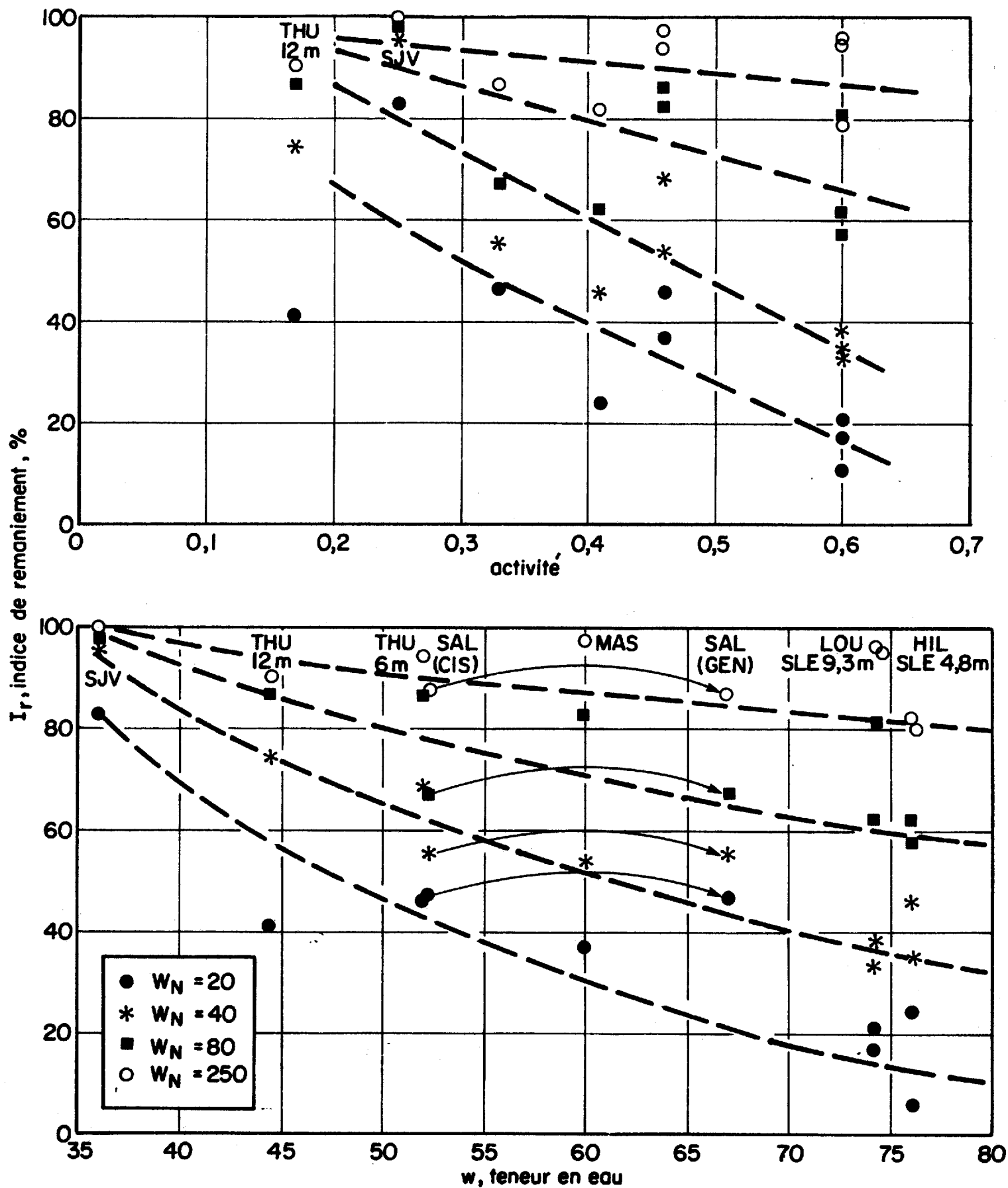
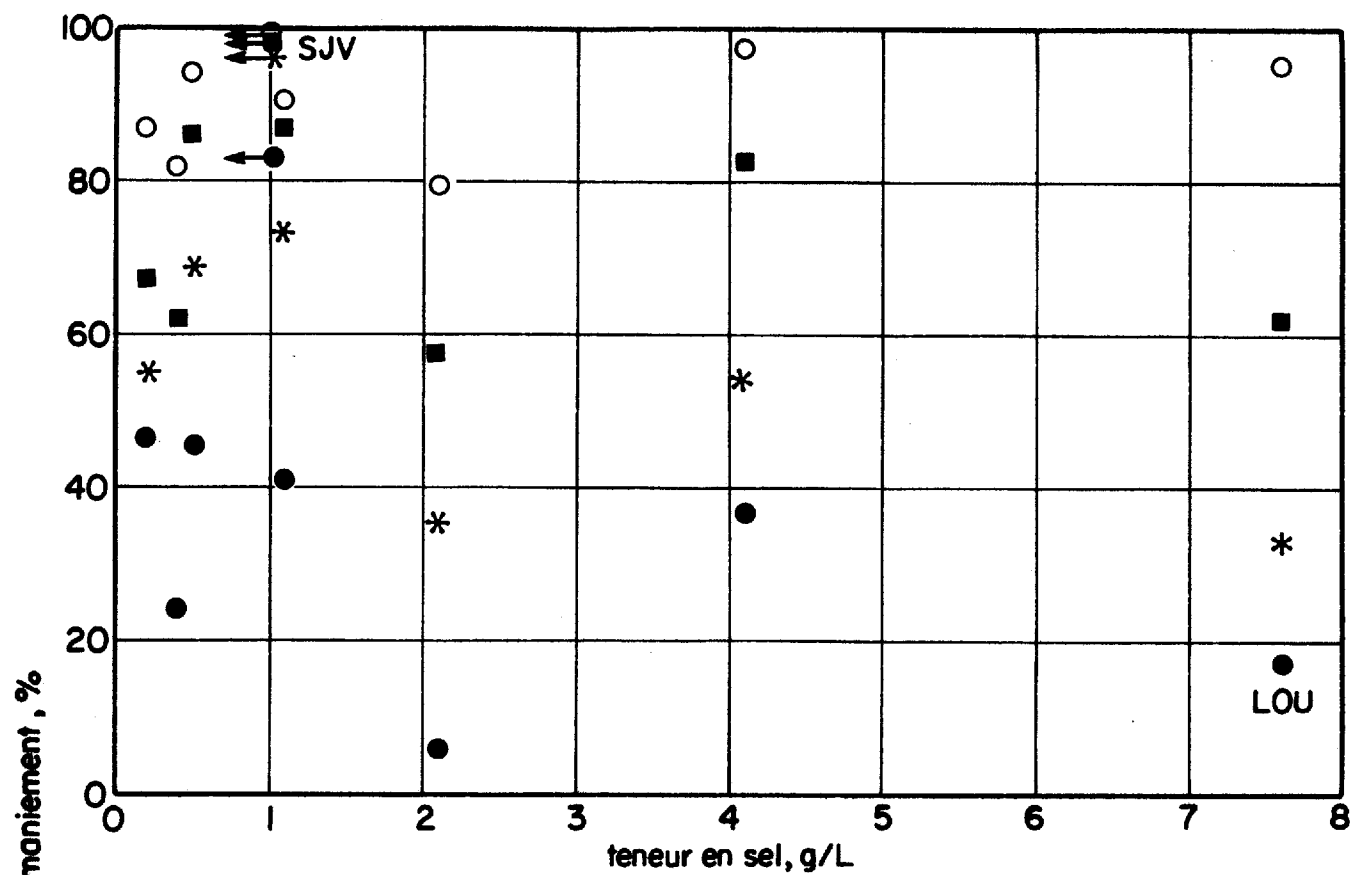


Fig. 145—Essai de cisaillement simple.



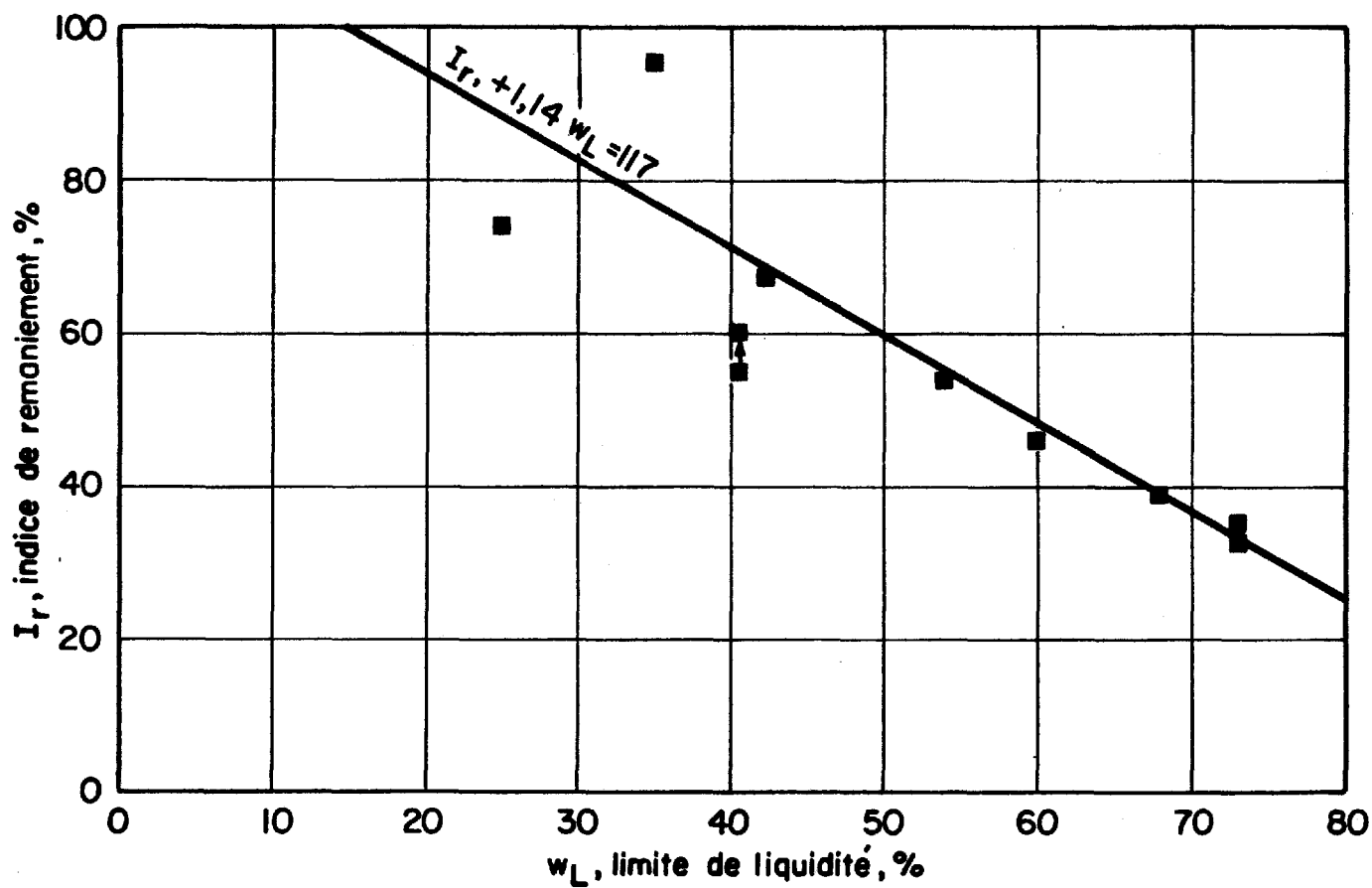


Fig. 147 — Essai de cisaillement simple, corrélation I_r vs w_L pour $W_N = 40$.

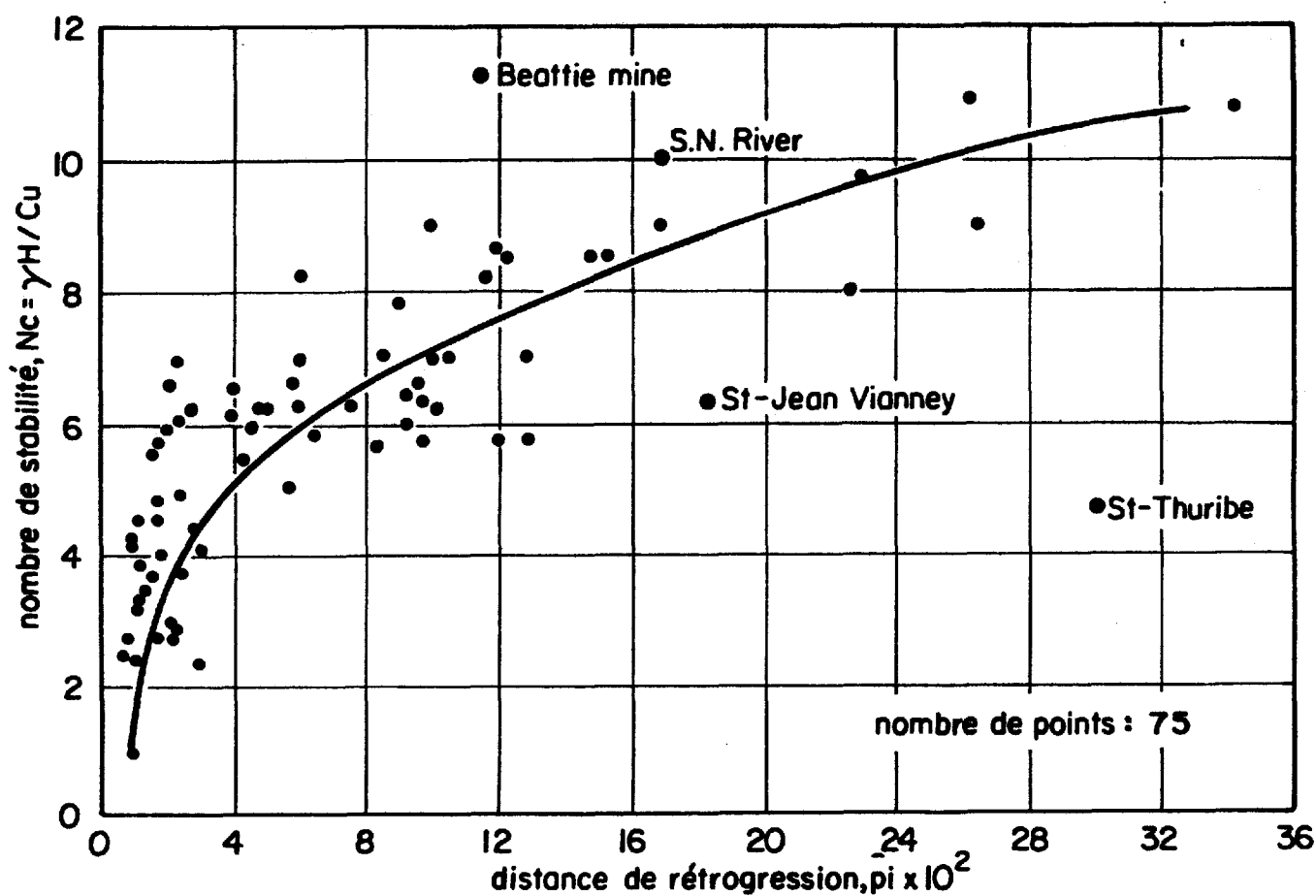


Fig. 148 — Relation entre le nombre de stabilité et la distance de rétrogression des glissements dans l'est du Canada.

(d'après Mitchell et Markell, 1974)

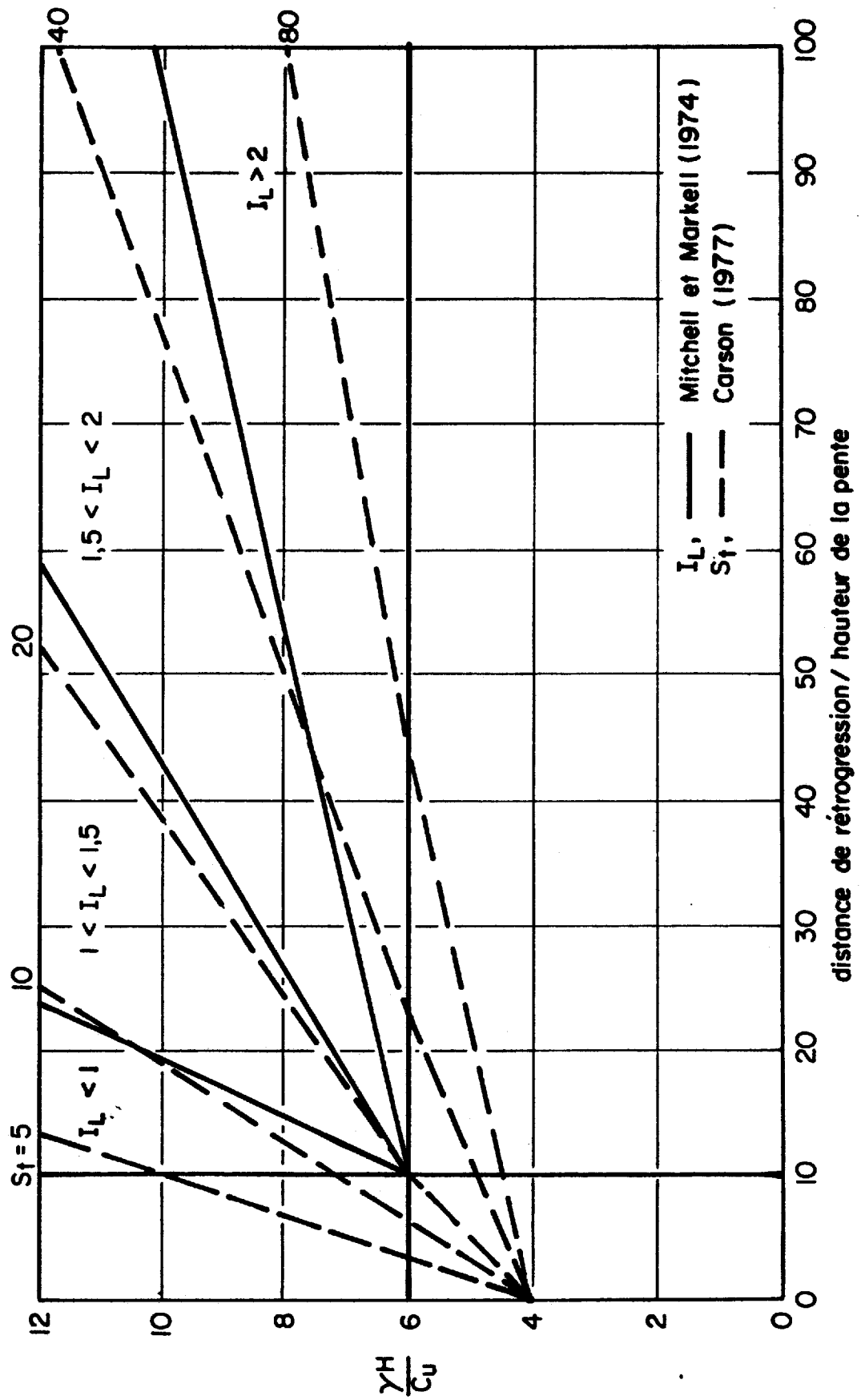


Fig. 49 — Méthodes de prédiction de la rétrogression.

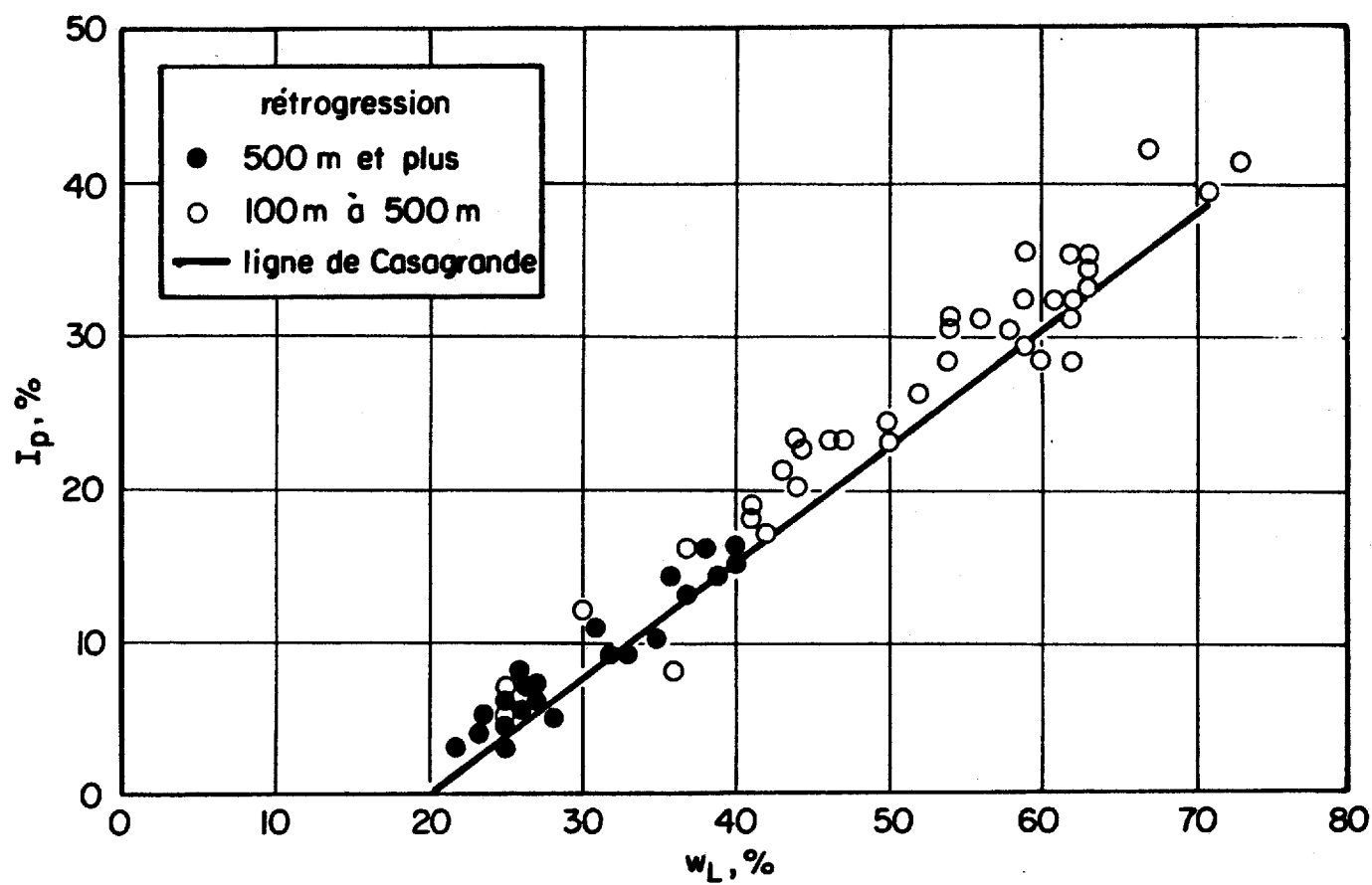
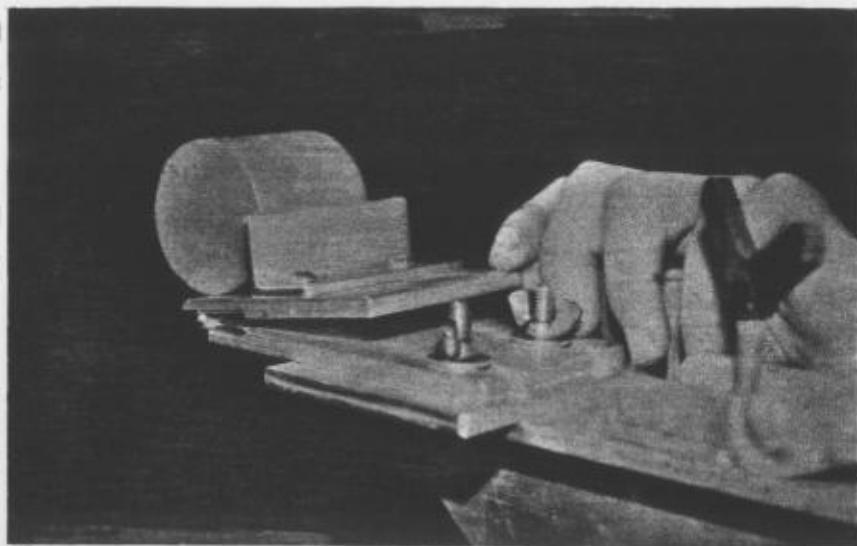


Fig. 150 — Relation I_p vs w_L pour les argiles sujettes à coulées.

(d'après Lebuïs et Rissmann, 1979)



a - Dispositif de largage

b - Mesure de la résistance
au cisaillement



c - Chute d'un échantillon
de 10 × 10 cm

Photos 1: essais en chute libre



a - Saint-Thuribe 12 m,
 $W_N = 21,4$



b - Saint-Alban 6,6 m,
 $W_N = 83,3$



c - Saint-Thuribe 12 m,
 $W_N = 50,8$



a - Saint-Léon 4,8 m, $W_N = 88,4$



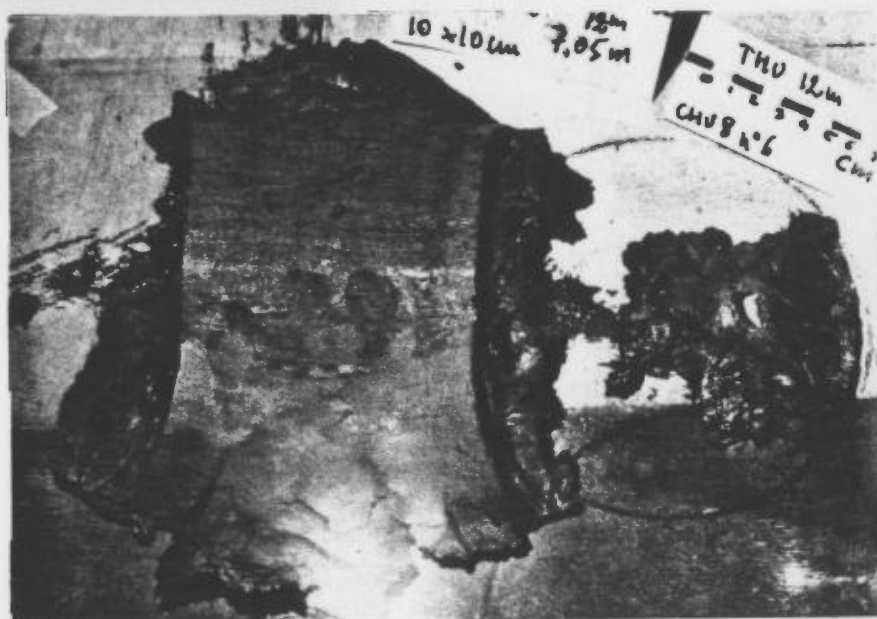
b - Saint-Léon 9,3 m, $W_N = 49,6$



c - Louisville 6 m, $W_N = 69,9$



a - Saint-Hilaire 11,4 m,
 $W_N = 78,2$



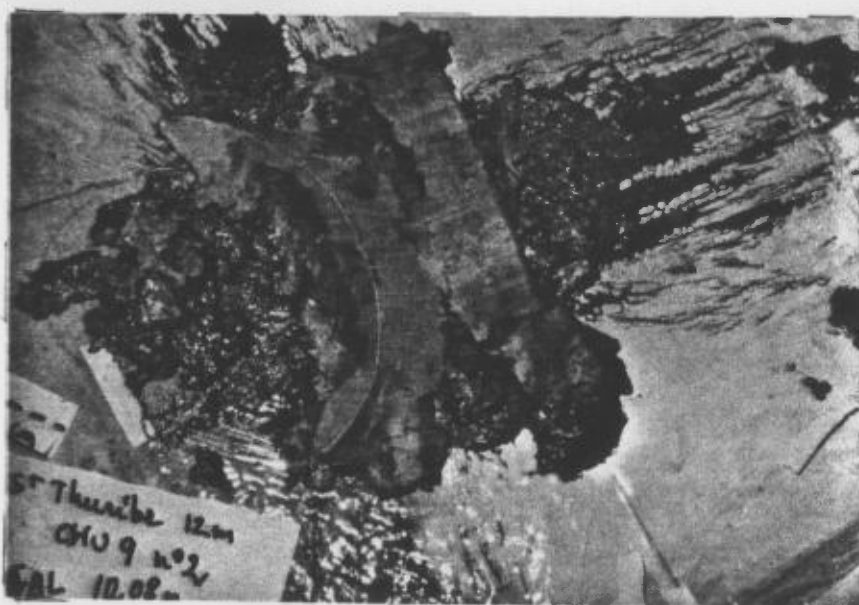
b - Saint-Thuribe 12 m,
 $W_N = 50,8$



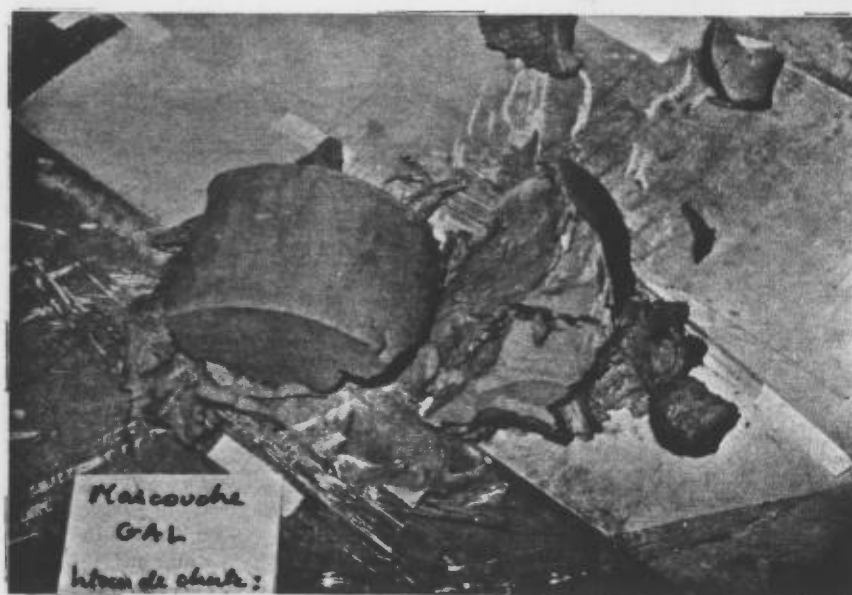
c - Mascouche 9 m, $W_N = 29,1$



a - Saint-Léon 4,8 m, $W_N = 104,5$



b - Saint-Thuribe 12 m,
 $W_N = 58,8$



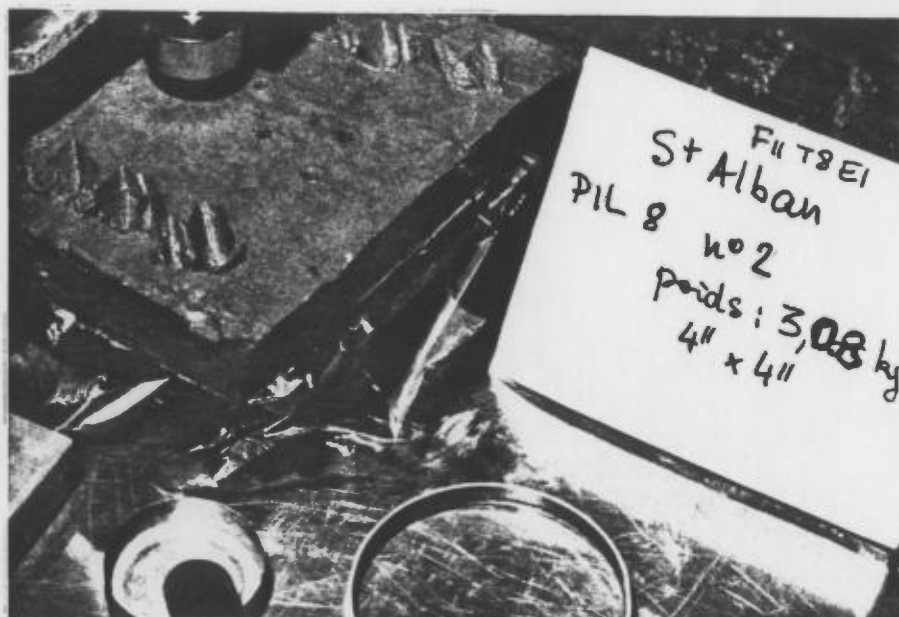
c - Mascouche 9 m, $W_N = 25,8$



a - Chute du pilon



b - Exemple de "tas" obtenu

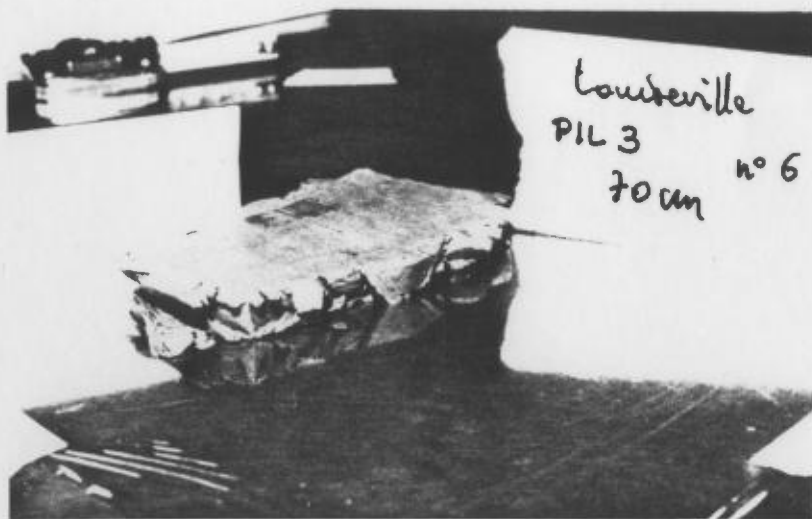
c - Mesure de la résistance
au cisaillement



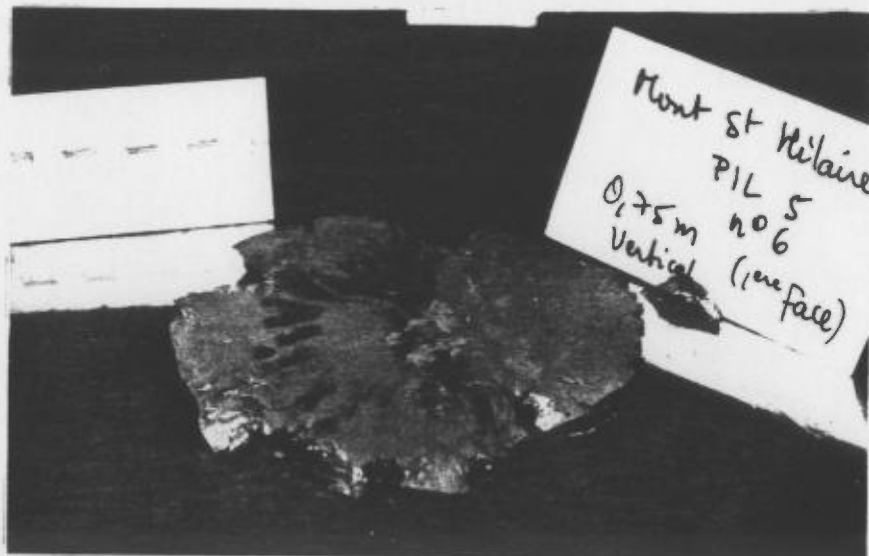
a - Echantillon 5 × 5 cm vertical,
 $W_N = 32,6$



b - Echantillon 5 × 5 cm horizontal
 $W_N = 32,6$

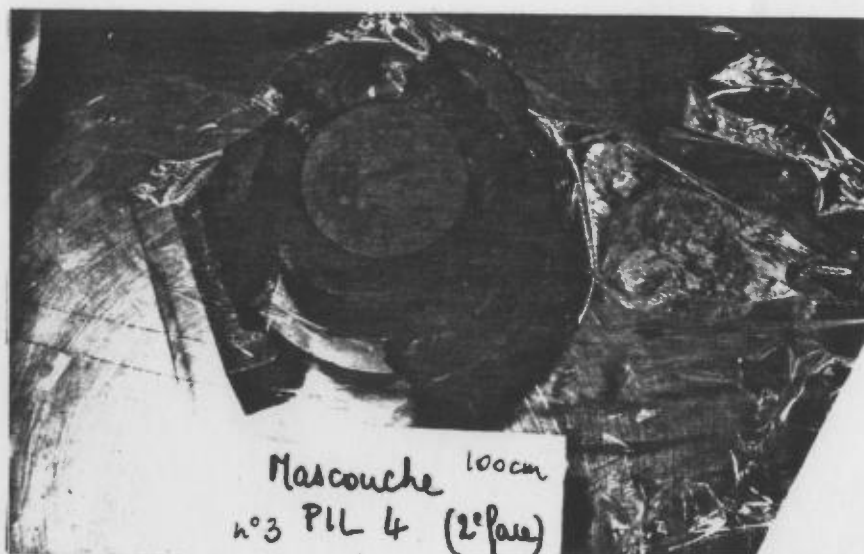


c - Echantillon 5 × 5 cm vertical,
 $W_N = 76,4$

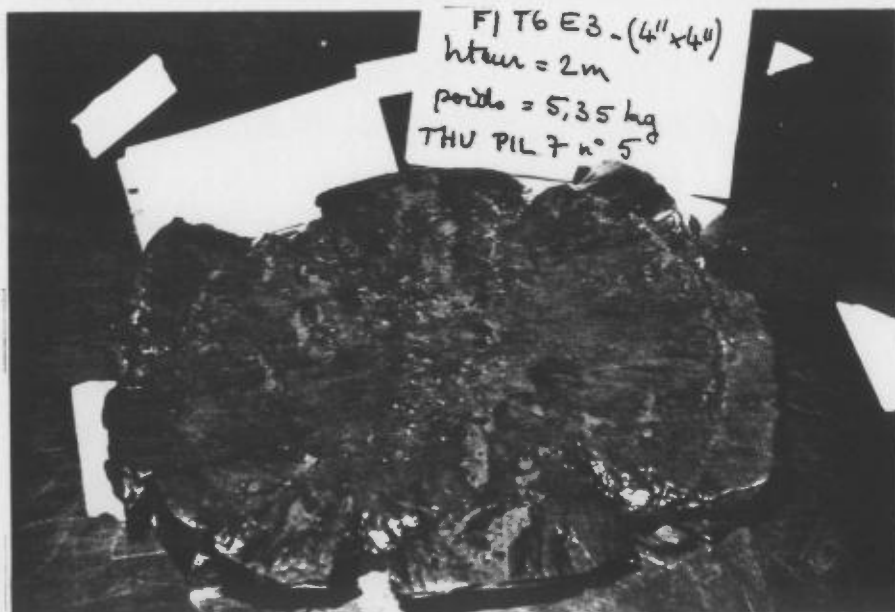


a - Echantillon 5 × 5 cm vertical (face supérieure), Saint-Hilaire 11,4 m, $W_N = 88,6$

b - Echantillon 5 × 5 cm horizontal (face supérieure), Saint-Thuribe 12 m, $W_N = 20,9$



c - Echantillon 5 × 5 cm vertical (face inférieure), Mascouche 9 m, $W_N = 34,1$



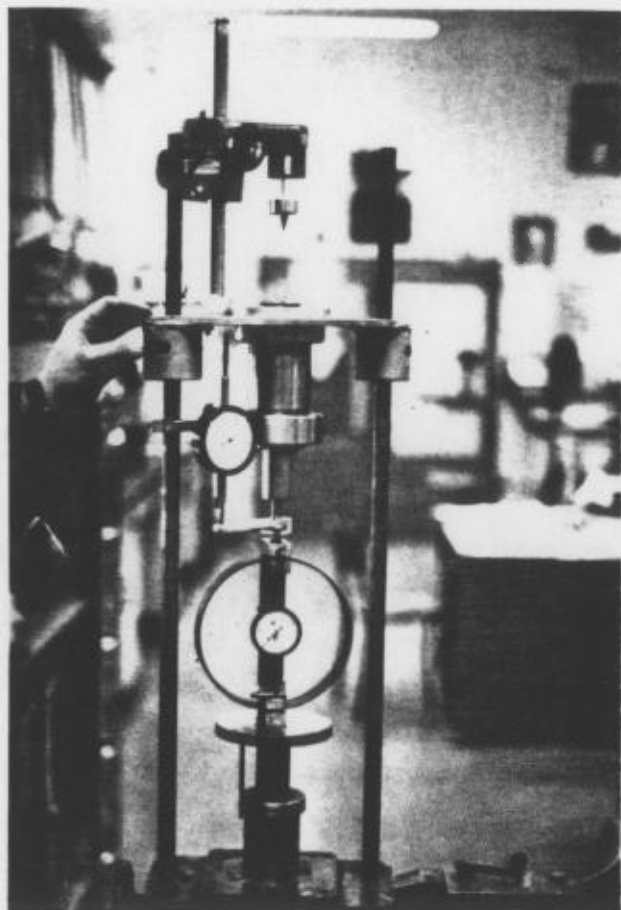
a - Saint-Thuribe 12 m,
 $W_N = 52,7$



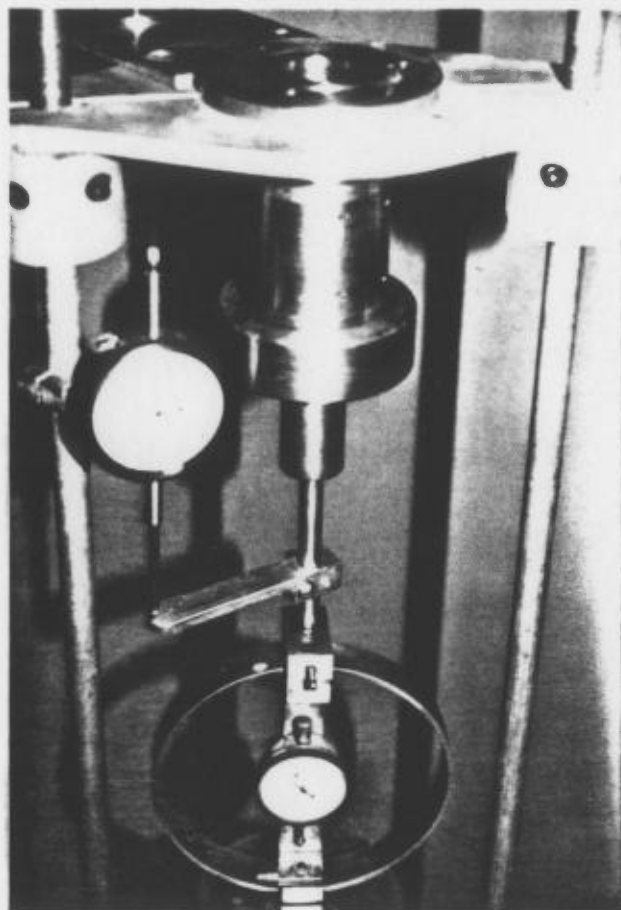
b - Saint-Thuribe 12 m,
 $W_N = 70,6$



c - Saint-Thuribe 12 m, $W_N = 70,6$,
mesure de la résistance au cisaillement



a - Appareillage

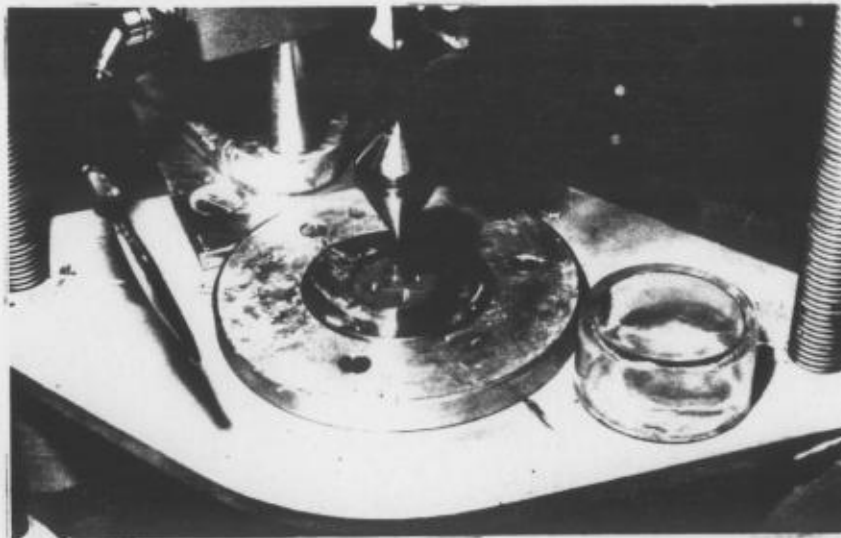


b - Extrudeur

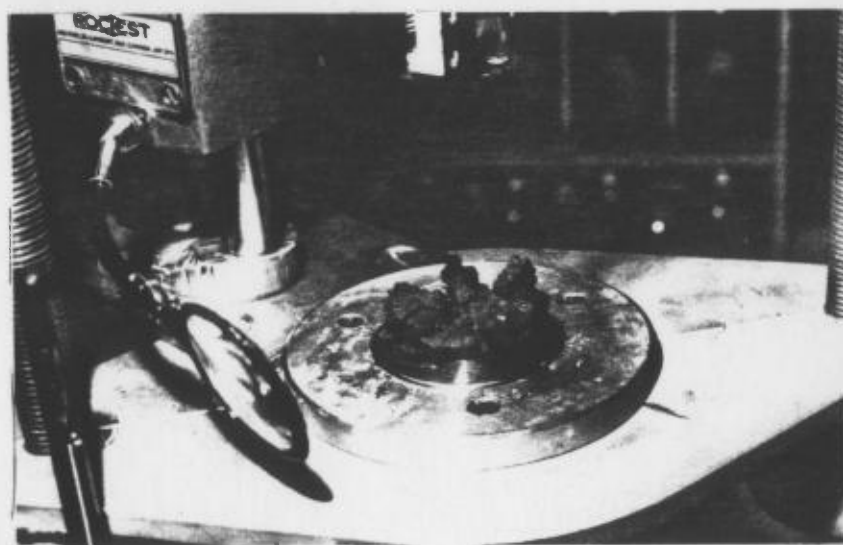


c - Mesure de la résistance au cisaillement

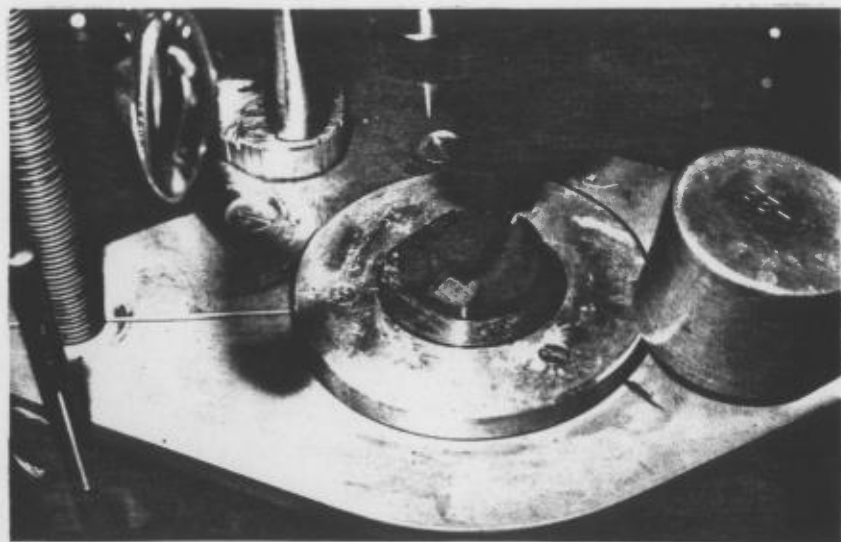
Photos 10: essais d'extrusion



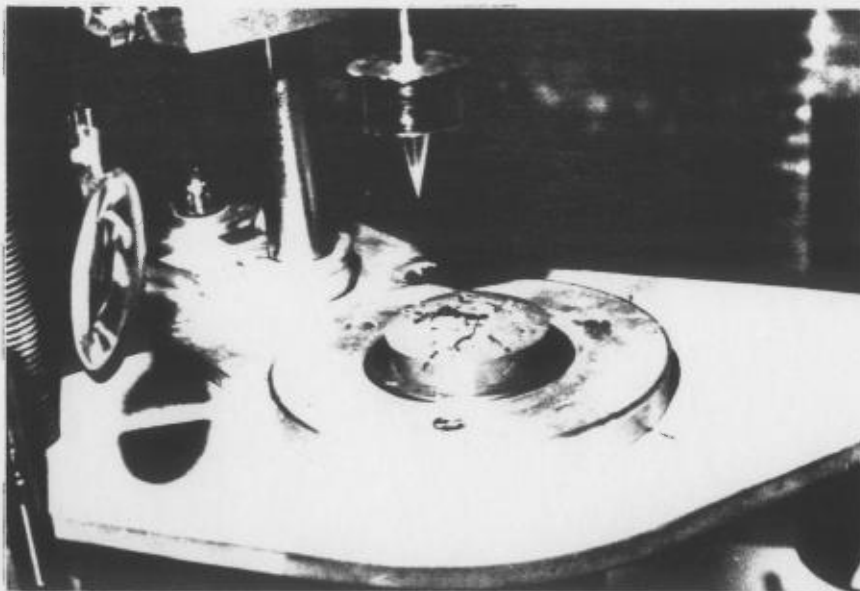
a - Saint-Alban 6,6 m, 75% de réduction de section, surfacage et mesures de la résistance



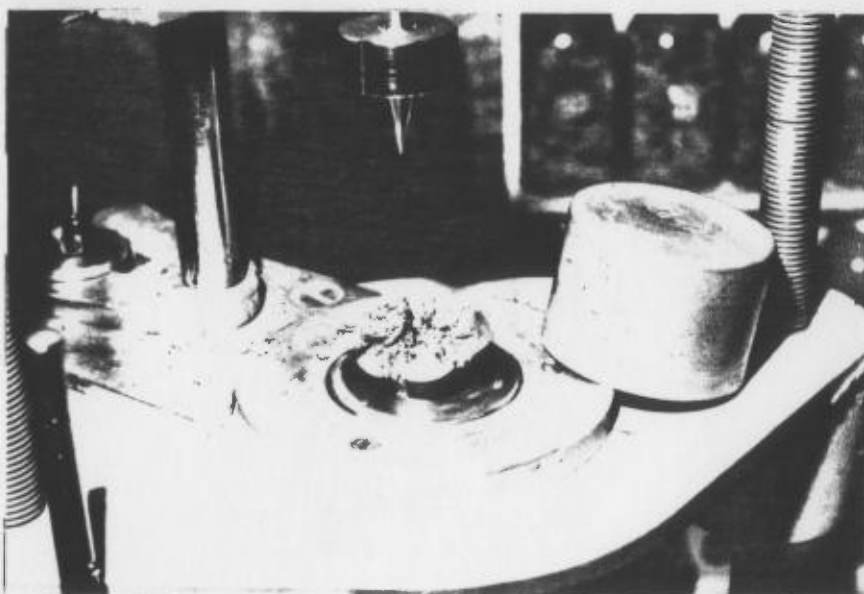
b - Saint-Alban 6,6 m, 75% de réduction de section, fin d'extrusion



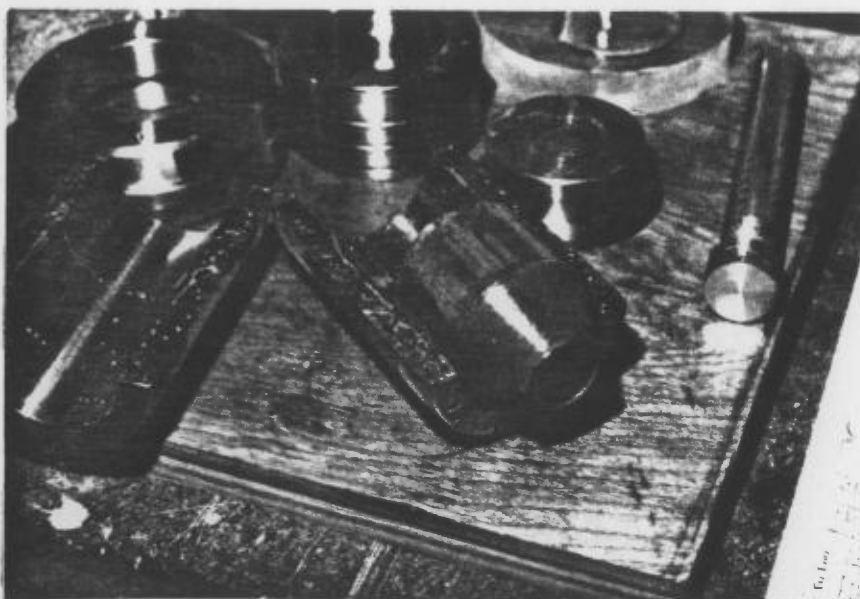
c - Mascouche 9 m, 50% de réduction de section, début d'extrusion



a - 25% de réduction de section



b - 75% de réduction de section

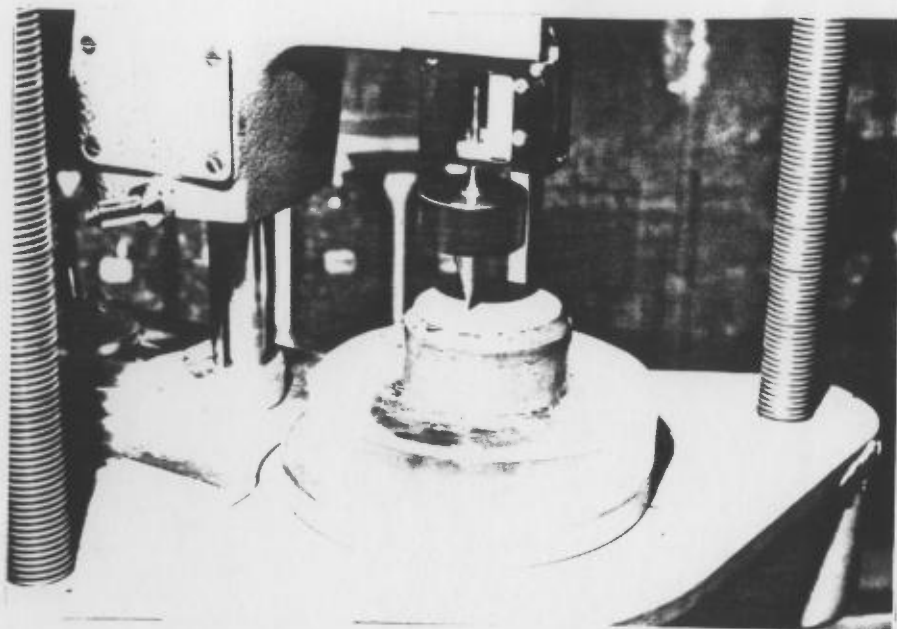
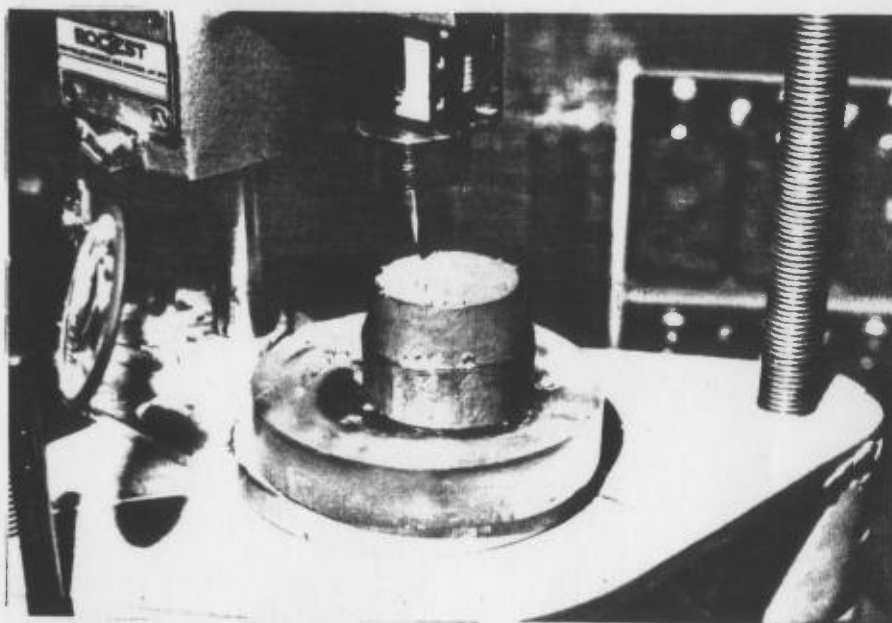


c - Démontage et récupération du reste de l'échantillon

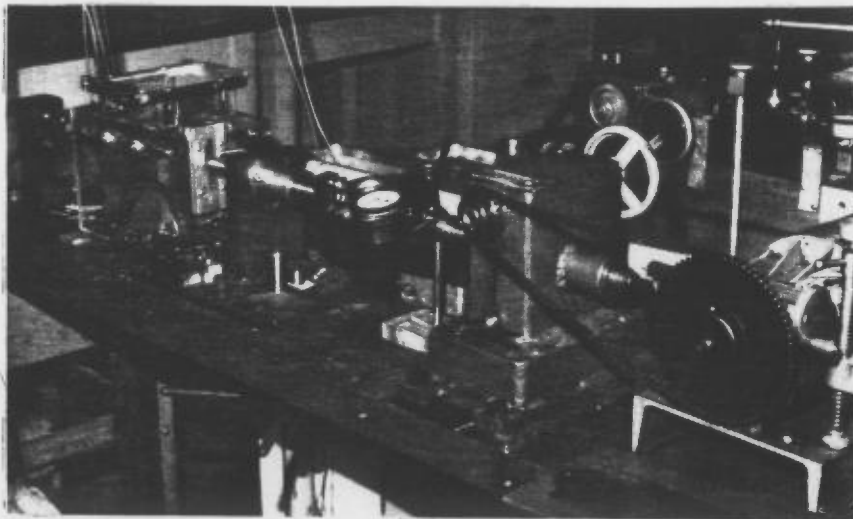


a - Découpage de l'échantillon restant en rondelles, Saint-Léon, 75% de réduction de section

b - Mesure de la résistance au cisaillement dans la partie tronconique restante, Saint-Hilaire 11,4 m, 50% de réduction de section

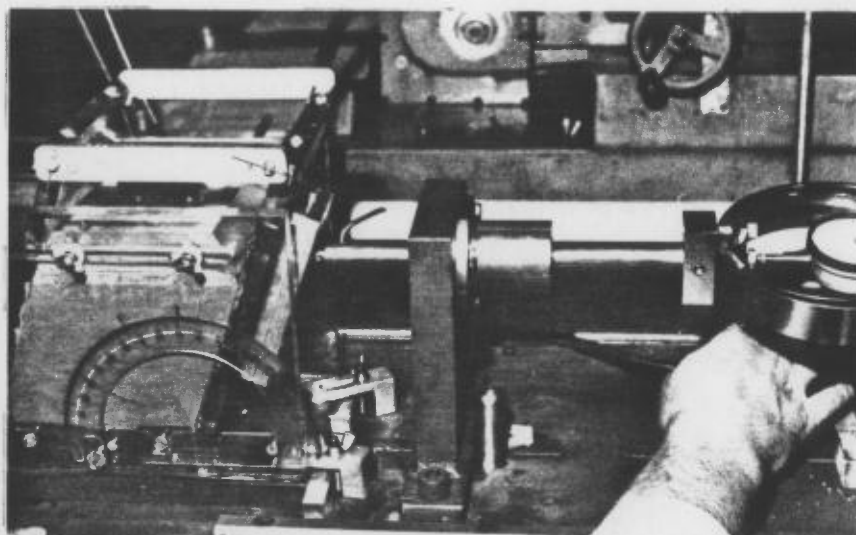
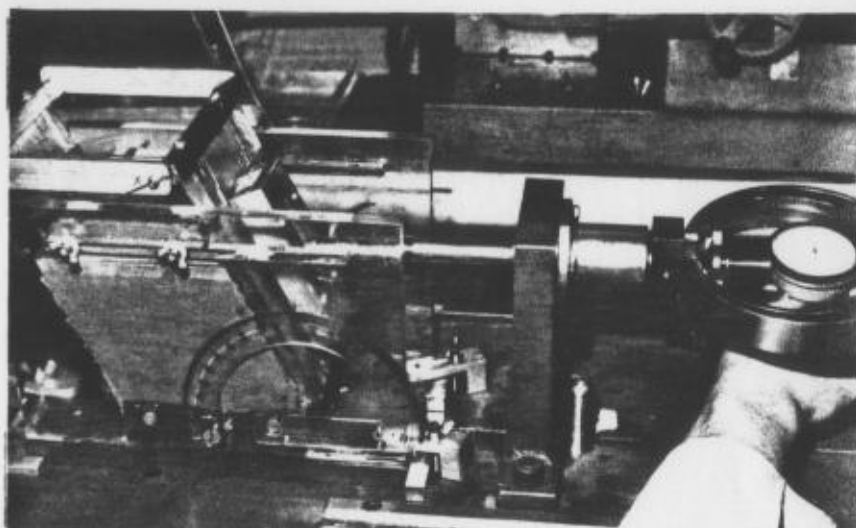


c - Mesure de la résistance au cisaillement dans la partie tronconique restante, Saint-Léon 4,8 m, 75% de réduction de section

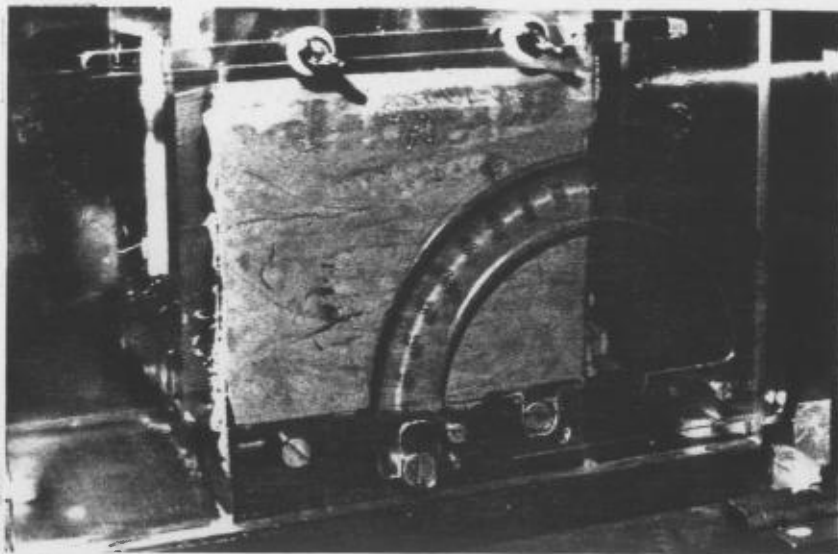


a - Appareillage

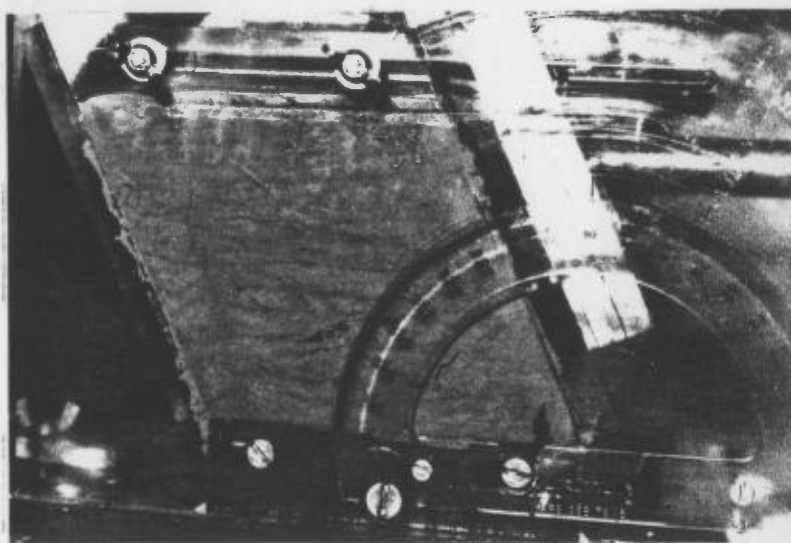
b - Boîte de cisaillement simple, poussée



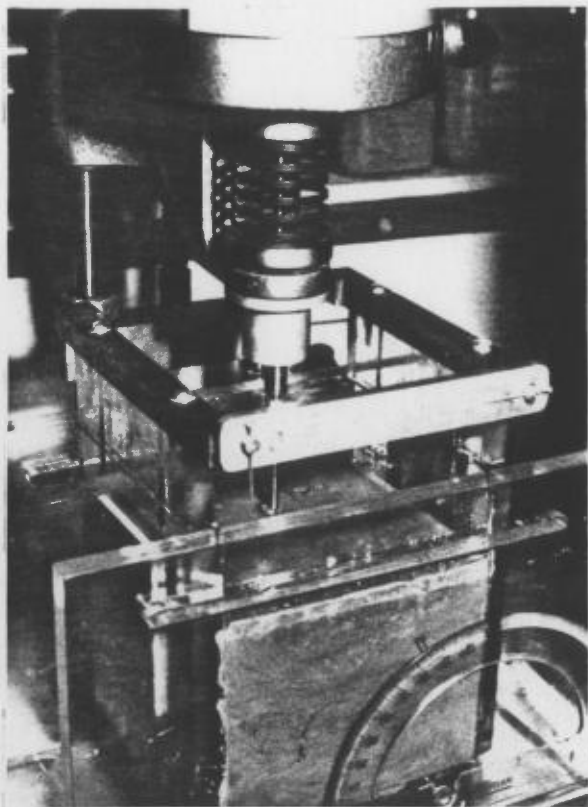
c - Boîte de cisaillement simple, butée



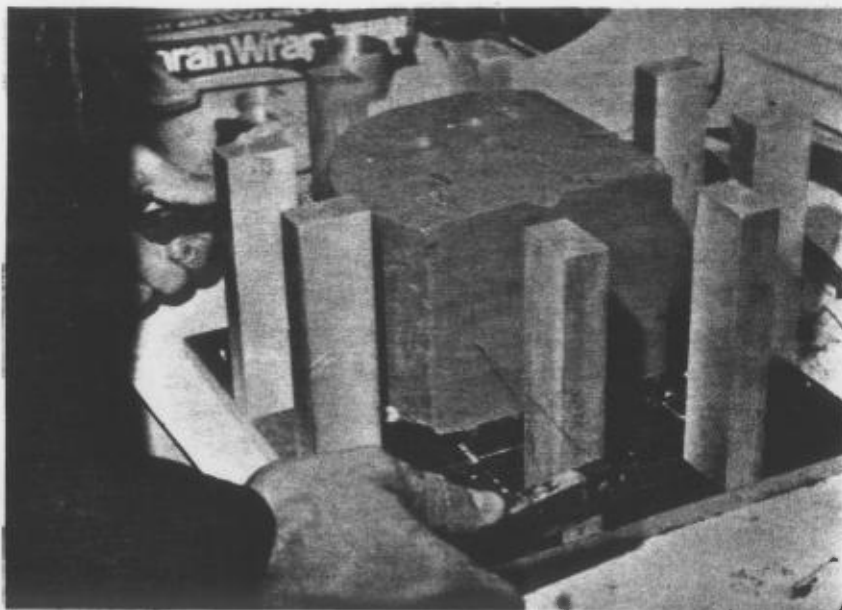
a - Position verticale de la boîte,
fissuration et trous



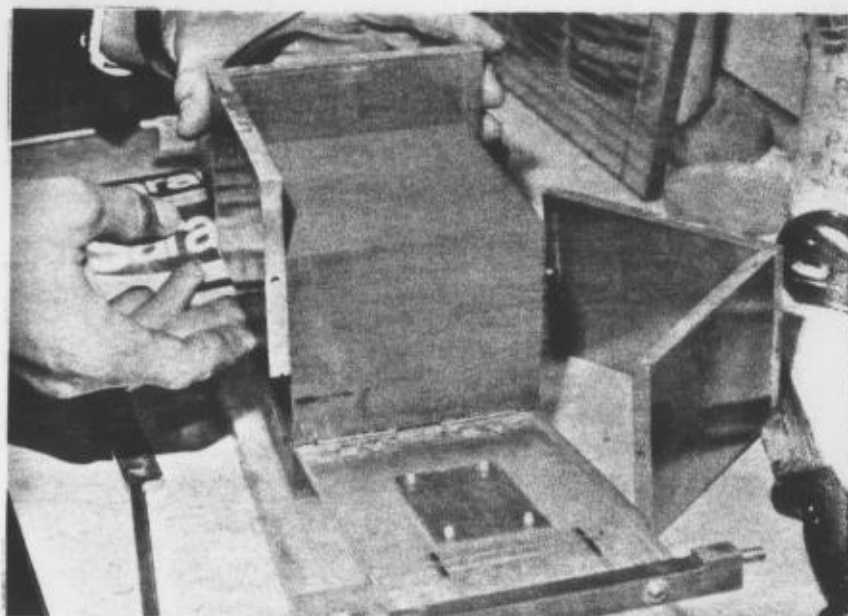
b - Position inclinée de la boîte,
fissuration et trous



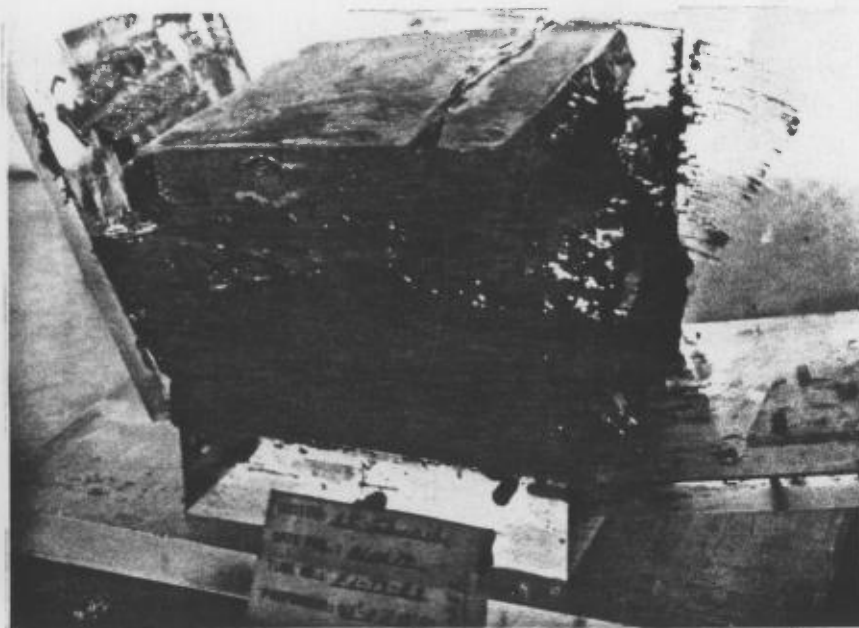
c - Mesure de la résistance au cisaillement au
scissomètre de laboratoire



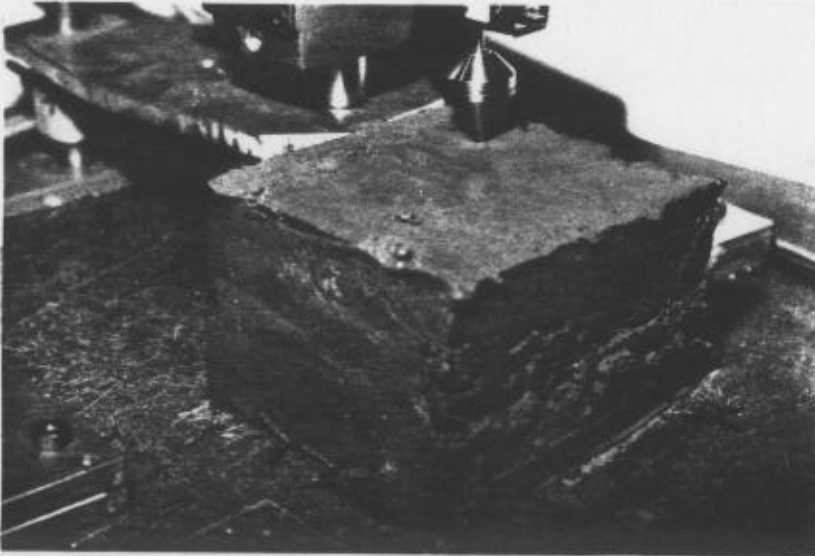
a - Découpage de l'échantillon



b - Mise en place de l'échantillon dans la boîte



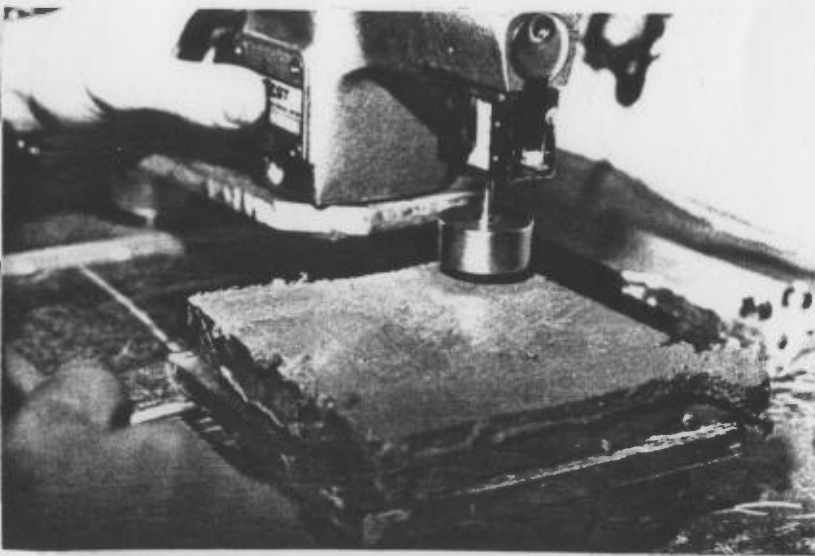
c - Démoulage de l'échantillon,
Saint-Thuribe 12 m



a - Mesure de la résistance au cisaillement au cône tombant



b - Découpage de l'échantillon en tranches horizontales



c - Mesure de la résistance au cisaillement, dernière tranche