

N° d'ordre

THESE



présentées à la
**FACULTE DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITE DE GRENOBLE**

pour obtenir le grade de

docteur - ingénieur

par

LÉ LONG

Master of Science in Civil Engineering, Purdue University (USA)



1^{ère} THESE

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROPRIETES
MECANIQUES DES SOLS SOUS FORTES PRESSIONS**

2^{ème} THESE

Propositions données par la Faculté



Soutenues le 20 DEC. 1968 **devant la commission d'examen**

MM. KRAVTCHENKO

Président

L. SANTON

P. ANGLES d'AURIAC

Examineurs

J. BIAREZ

TH-
GC20

26 FEV. 1976

CHAPITRE 1

ESSAIS TRIAXIAUX A FORTES PRESSIONS LATERALES EFFECTUES SUR DEUX SABLES SANS COHESION

En vue d'étudier les propriétés mécaniques de matériaux pulvérulents soumis à de fortes pressions, nous avons effectué, sur deux sables sans cohésion, des essais triaxiaux drainés dont la pression latérale maximum atteint 150 bars.

1.1. MATERIEL ET MODE D'ESSAI.

L'essentiel du matériel comprend, outre la cellule triaxiale (fig. 1.1) dans laquelle est placé l'échantillon de sol, un appareil de mesure de pression interstitielle (fig. 1.2) et deux burettes graduées (fig. 1.3) qui permettent la saturation de l'échantillon, la détermination de la variation de son volume, ainsi que la mesure de sa perméabilité.

Pour des pressions latérales jusqu'à 11 bars, on a utilisé directement l'installation d'air comprimé du Laboratoire : cet air comprimé est admis directement dans la cellule pour créer la pression isotrope σ_3 à laquelle on veut effectuer un essai donné ($\sigma_3 \leq 11$ bars).

Pour des pressions σ_3 entre 11 et 30 bars, cette pression d'air comprimé doit être amplifiée par un multiplicateur de pression. Le multiplicateur dont nous nous servons a un rapport théorique de 5/1. Le rapport vrai pour des pressions (après multiplication) de l'ordre de 30 bars est de 4/1 environ. Une bouteille métallique forte, contenant de l'eau à la partie

inférieure et de l'huile à la partie supérieure, est intercalée entre le multiplicateur et la cellule. Cette disposition est destinée à empêcher l'huile, qui est contenue dans le multiplicateur, d'entrer dans la cellule (prévention de l'attaque, par l'huile, de la capote en caoutchouc qui contient l'échantillon), et à éviter que l'eau de la cellule ne vienne dans le multiplicateur (diminution du risque de rouille).

Pour $G_3 \geq 30$ bars, la source de gaz comprimé utilisée n'est plus l'installation d'air comprimé, mais une bouteille d'azote comprimé dont la pression maximum atteint 150 bars. On utilise ici encore le multiplicateur de pression. Un détendeur de pression est intercalé entre la bouteille d'azote et le multiplicateur. Pour des pressions (après multiplication) de l'ordre de 100 - 150 bars, le rapport vrai du multiplicateur se rapproche de 5/1. Dans la figure 1.4 on peut voir la bouteille d'azote comprimé reliée au multiplicateur, ce dernier en liaison avec la bouteille métallique forte, et la communication entre cette dernière bouteille et la cellule triaxiale.

Dans tous les essais l'échantillon est entouré d'eau. Cette disposition non seulement réduit la consommation du gaz comprimé utilisé mais aussi -et surtout- atténue les dangers en cas d'incidents mécaniques en cours d'essais (éclatement éventuel de la cellule aux fortes pressions). Un autre avantage de la présence de l'eau nous est apparu incidemment, et ceci en raison des conditions dans lesquelles nous effectuons nos essais :

En vue de mesurer les déformations du matériau, nous fixons autour de l'échantillon trois colliers en clinquant de laiton (cf. fig. 1.5 et 1.6). Les colliers sont gradués et suivent les déformations transversales de l'échantillon lorsque le diamètre de ce dernier augmente au cours de l'essai. La lecture des graduations permet de calculer le diamètre de l'échantillon à chaque instant. Or il est apparu que lorsqu'un essai se fait à sec, les colliers suivent avec beaucoup de difficulté

les déformations de l'échantillon, ceci en raison du frottement. La présence de l'eau diminue le frottement, évite un resserrement excessif des colliers sur l'échantillon, et écarte ainsi un effort latéral supplémentaire qui pourra fausser la contrainte verticale exercée sur le matériau à une pression latérale déterminée.

En raison des pressions importantes mises en jeu, nous avons eu des incidents mécaniques au début de la série d'essais. Le chemisage de matière plastique garnissant l'intérieur du corps de la cellule ayant cédé à 87 bars, on a fait fabriquer un corps de cellule entièrement neuf, sans chemisage, et comportant seulement neuf hublots (au lieu de 32 comme sur l'ancienne cellule) afin de réduire le nombre de points susceptibles de causer des problèmes d'étanchéité.

L'étanchéité à la tête et à la base de la cellule a été obtenue grâce à un procédé de montage qui consiste à chauffer les huit barres verticales (cf. fig. 1.1) de la cellule pendant le serrage des écrous : en se refroidissant, les barres diminuent de longueur, tirent sur la tête et la base de la cellule, assurant un meilleur contact entre le corps cylindrique et les plaques de tête et de base. Un serrage antérieur sans chauffage des barres n'avait pas donné l'étanchéité voulue.

Les fuites se produisent le plus fréquemment aux raccords. L'étanchéité aux parties fixes de ces derniers est assurée par une colle spéciale, le "LOCTITE AUTOFORM", capable d'assurer l'étanchéité aux fortes pressions.

Pour les essais effectués à une pression latérale supérieure à 15 bars -et la grande majorité de nos essais se

située dans cette catégorie- , le contrôle de l'installation doit se faire constamment pendant l'essai, car une fuite accidentelle provenant de l'échantillon ou de certains raccords, non décelée à temps, pourrait provoquer une hausse de pression dangereuse dans l'appareil de mesure de pression interstitielle et les burettes en communication avec l'échantillon, qui sont faites pour supporter une pression de l'ordre de 15 bars, alors que la cellule est capable de résister à des pressions atteignant 150 bars.

L'écrasement de l'échantillon s'obtient par le mouvement ascendant du plateau d'une presse mécanique supportant la cellule. L'échantillon, en montant, appuie le piston de la cellule contre un anneau dynamométrique maintenu fixe par le bâti de la presse. Cf. fig. 1.2. Cet anneau mesure l'effort exercé sur l'échantillon. Un comparateur fixé sur l'anneau et appuyant sur le haut de la cellule donne la variation de la hauteur de l'échantillon à chaque instant. Un manomètre indique la pression isotrope à l'intérieur de la cellule.

1.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX SOUMIS AUX ESSAIS.

Les courbes "avant essai" des figures 1.7 et 1.8 donnent les granulométries des deux sables sur lesquels ont porté nos essais triaxiaux. Le sable n° 1 (fig. 1.7), $0,1 \text{ mm} < d < 2,0 \text{ mm}$, est à granulométrie uniforme, de coefficient de Hazen 1,62 ; le sable n° 2 (fig. 1.8), $0,1 \text{ mm} < d < 6,5 \text{ mm}$, est à granulométrie variée, de coefficient d'uniformité 3,01.

Nous avons effectué les opérations destinées à déterminer les densités les plus faibles et les plus fortes qu'on puisse obtenir au Laboratoire pour les deux sables, et avons

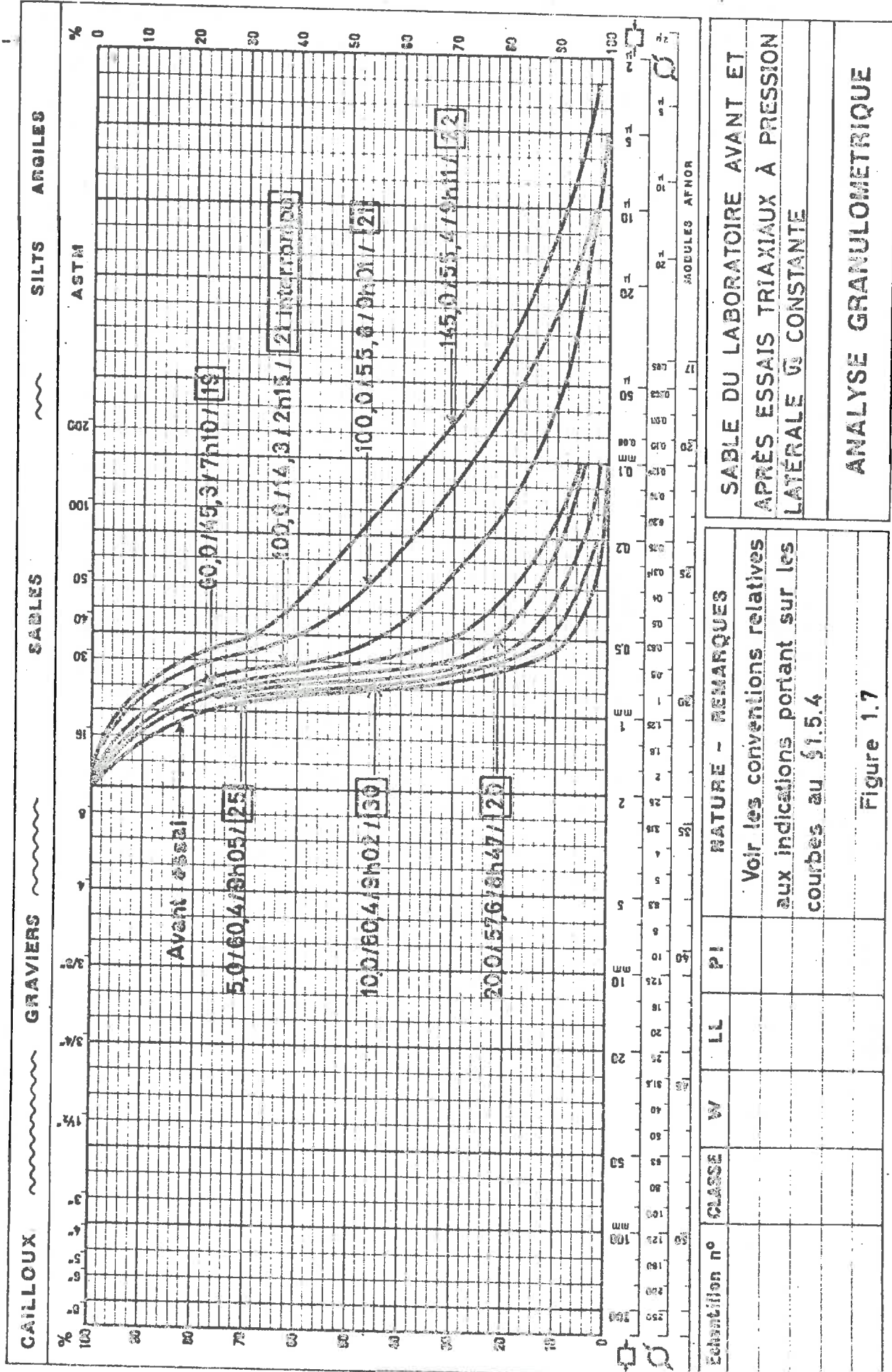
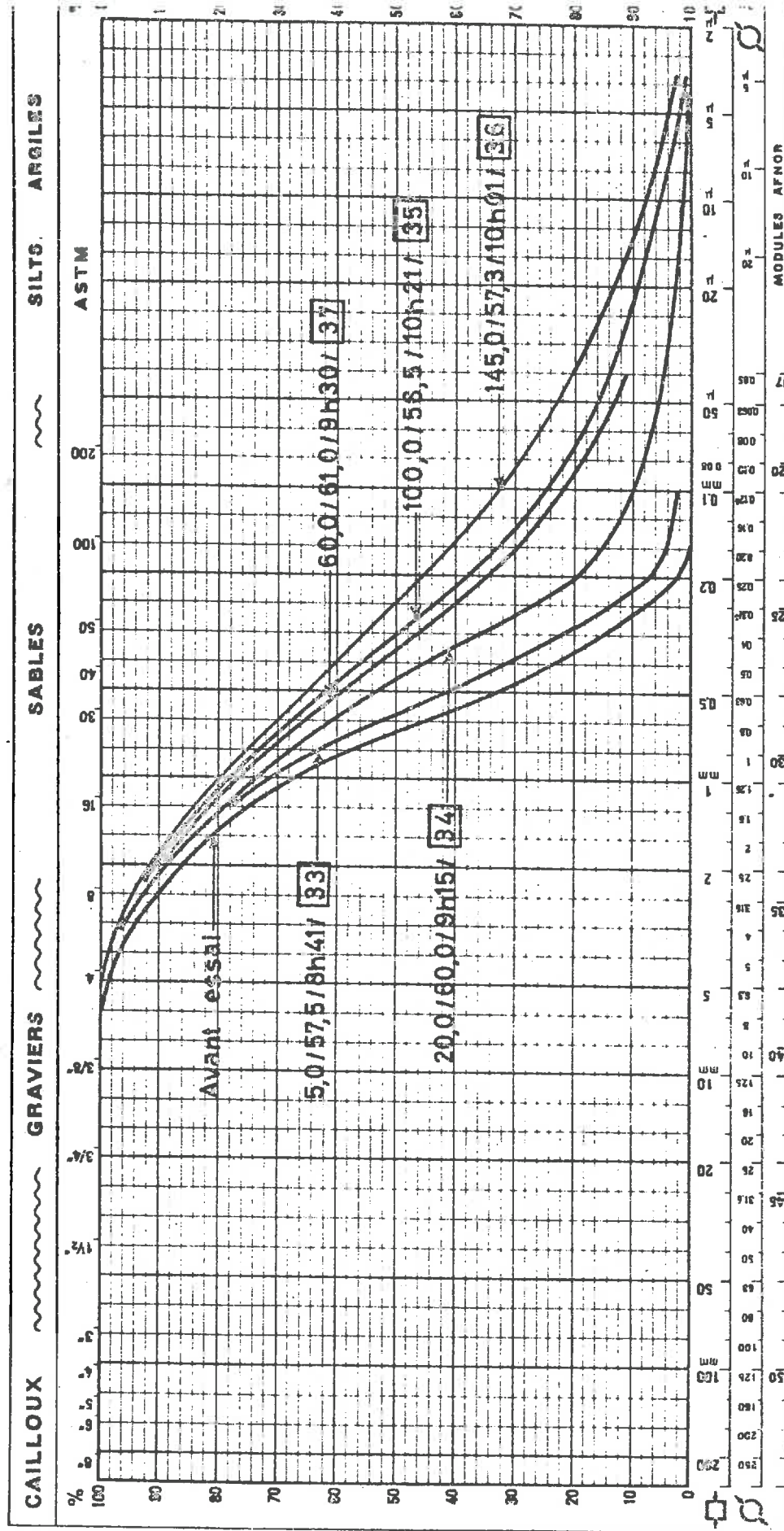


Figure 1.7



Echantillon n°	CLASSE	W	LL	PI	NATURE - REMARQUES
					Voir les conventions relatives aux indications portant sur les courbes au §1.5.4
Figure 1.8					

SABLE DE LOIRE AVANT ET APRES
ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

trouvé :

- pour le sable n° 1 (courbe "avant essai" de la figure 1.7) :
 - . densité la plus faible : 1,414 ; $n = 0,464$; $e = 0,866$;
 - . " " " forte : 1,672 ; $n = 0,367$; $e = 0,580$.

Lors de la mise en place des échantillons, nous avons pris pour ce sable une densité de 1,57, ce qui correspond à une porosité de 0,405, un indice des vides de 0,680, et une densité relative de 0,650.

- pour le sable n° 2 (courbe "avant essai" de la figure 1.8) :
 - . densité la plus faible : 1,485 ; $n = 0,440$; $e = 0,786$;
 - . " " " forte : 1,795 ; $n = 0,322$; $e = 0,475$.

Lors de la mise en place des échantillons, nous avons pris pour ce sable une densité de 1,67, ce qui correspond à une porosité de 0,370, un indice des vides de 0,588, et une densité relative de 0,637, soit pratiquement la même densité relative que pour le premier sable.

1.3. MISE EN PLACE DU SABLE ET PREPARATION POUR L'ESSAI.

Nos échantillons sont de forme cylindrique, de 50 mm de diamètre. La hauteur est, dans la quasi-totalité des cas, de 105 mm. A la mise en place du matériau, nous tâchons toujours d'avoir $\gamma = 1,57$ pour le sable n° 1 et $\gamma = 1,67$ pour le sable n° 2. Une même densité initiale permet de comparer les résultats des divers essais.

L'enveloppe de caoutchouc qui entoure l'échantillon a une épaisseur nominale de 1,5 mm. Pour les essais effectués à une pression latérale supérieure à 25 bars, nous utilisons

deux enveloppes au lieu d'une, afin d'éviter les risques de fuites dues au perçage de l'enveloppe par les grains de sable. Cette précaution a été justifiée par la constatation, au démontage de l'échantillon après les essais effectués à des pressions supérieures à 25 bars, de la présence d'empreintes permanentes créées par des grains de sable à la surface intérieure de la capote intérieure après certains essais effectués à 100 et à 150 bars de pression latérale. Nous pensons que l'utilisation de deux enveloppes de 1,5 mm d'épaisseur nominale chacune est meilleure que celle d'une seule enveloppe de 3 mm tant au point de vue de la diminution du risque de perçage du caoutchouc que celui de l'atténuation d'efforts parasites latéraux sur l'échantillon. En fait, l'épaisseur vraie des enveloppes diffère presque toujours de quelques dixièmes de millimètre de l'épaisseur nominale et nous avons tenu compte de ce fait dans nos calculs afin d'obtenir des résultats plus exacts.

Au sujet de la section de l'échantillon à laquelle on se rapporte pour calculer la contrainte que peut supporter l'échantillon à chaque instant, nous n'avons pas appliqué la formule habituelle donnant la section élargie correspondant à une déformation axiale déterminée, mais mesuré la section vraie du milieu de l'échantillon. Cette mesure se fait à l'aide d'un collier gradué en clinquant de laiton entourant l'échantillon en son milieu et disposé de telle façon qu'il s'applique constamment contre l'échantillon et suive les augmentations du diamètre de ce dernier (cf. § 1.1 et figs. 1.5 et 1.6). Au début de chaque essai, lors de l'application de la pression isotrope sur l'échantillon, ce dernier se comprime ; nous calculons la diminution correspondante de son diamètre à partir de celle de sa hauteur et du volume d'eau rejetée.

Pour faire la comparaison, au cours de chaque essai, entre l'augmentation du diamètre de l'échantillon en son milieu

et à ses extrémités (cf. § 1.5.5), nous avons disposé également un collier de mesure à chacune de ses extrémités (cf. figs. 1.5 et 1.6).

Afin que l'échantillon conserve autant que possible, tout au long de sa déformation, sa forme cylindrique initiale, nous avons cherché à diminuer le freinage à ses deux extrémités. A cet effet, nous mettons à chaque extrémité de l'échantillon, entre le matériau d'une part et la tête ou la base de compression d'autre part, une épaisseur de caoutchouc enduite de graisse graphitée du côté du métal. Cette disposition permet aux extrémités de l'échantillon, d'augmenter de diamètre lorsque sa hauteur diminue sous l'effet de l'écrasement. Avec nos échantillons, de dimensions indiquées au début de ce § 1.3, une épaisseur de caoutchouc de 0,8 mm donne les meilleurs résultats. La couche de graisse graphitée est de 0,3 mm environ. Avec du caoutchouc de 1,5 mm d'épaisseur il se produit un phénomène de contrefretage tel que lors de l'écrasement l'augmentation du diamètre de l'échantillon est plus importante à ses extrémités qu'en son milieu.

Le centrage de l'échantillon se fait à l'aide d'un tube d'acier placé en son centre, à chacune de ses deux extrémités. Ces tubes sont fermés à un bout, celui qui s'engage dans l'échantillon ; l'autre bout, ouvert, s'introduit dans un creux pratiqué dans la tête et la base de compression et qui le maintient solidement. Sur chacun des deux tubes, des trous latéraux de 0,5 mm de diamètre sont percés sur la partie qui s'engage dans l'échantillon pour assurer le drainage. Ces trous latéraux de 0,5 mm de diamètre ne provoquent pas une perte du matériau soumis à l'essai, bien que dans le cas du sable n° 1, vers la fin des essais à fortes pressions latérales ($G_3 \geq 100$ bars), la portion très fine constituée de grains de diamètre inférieur

à 0,1 mm dépasse 26 % du poids de l'échantillon. Cette disposition est celle que nous avons adoptée en vue d'éliminer certains inconvénients présentés par un système de centrage constitué par deux tubes percés de trous latéraux de 1 mm et entourés de coton pour éviter la fuite du matériau ; en effet, le coton rend incertain le calcul du volume de l'échantillon soumis à diverses pressions, et en outre obstrue les trous de drainage qu'il recouvre lorsque les pressions latérales atteignent des valeurs élevées.

Une fois l'échantillon monté, on applique le vide à son intérieur et on enlève le moule. La cellule est alors fermée et on la remplit d'eau. Une pression isotrope de 0,3 bar est appliquée à l'intérieur de la cellule et de l'eau désaérée introduite dans l'échantillon par sa base pour le saturer. Pendant la saturation, la pression dans la burette contenant de l'eau désaérée est augmentée progressivement, chaque fois de 0,5 bar, jusqu'à 5,0 bars, et on fait varier la pression isotrope à l'intérieur de la cellule de telle façon qu'elle est toujours de 0,5 bar supérieure à celle qui agit à l'intérieur de l'échantillon.

Quand la pression d'injection atteint 5,0 bars, et la pression isotrope dans la cellule 5,5 bars, nous faisons une circulation d'eau désaérée à travers l'échantillon en faisant communiquer sa tête avec une burette dans laquelle est maintenue une pression de 4,5 bars. Cette opération permet de parfaire la saturation et de calculer la perméabilité du matériau avant essai si le débit de l'écoulement est connu.

1.4. MESURES.

1.4.1. Perméabilité des matériaux avant et après les essais.

Avant l'écrasement de l'échantillon, pendant le temps de mise en pression, on peut mesurer les perméabilités du maté-

riau avant essai pour différents indices des vides. On fait varier l'indice des vides en faisant varier la pression latérale.

Dans le cas du sable n° 1, nous avons obtenu les valeurs suivantes du coefficient de perméabilité, que nous présentons concurremment avec d'autres données (indice des vides e , pression isotrope σ_3 exercée sur l'échantillon, pressions à la tête et à la base de l'échantillon, etc ...) pour montrer les caractéristiques particulières afférentes à chaque mesure :

N° de l'essai (2)	σ_3 , bars (3)	σ_{pied} , bars (4)	$\sigma_{\text{tête}}$, bars (5)	$\Delta\sigma$, (1) bars (6)	e (7)	K mesuré, cm/s (8)	K_c , (2) cm/s (9)	Observations (10)
22	150,0	5,0	4,5	145,0	0,568	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	Avant écrasement
"	144,3	"	0,5	139,3	0,343	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	Après triaxial à $\sigma_3' = 145,0$ bars
"	5,5	"	"	0,5	0,518	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	" "
32	"	"	4,78	"	0,680	$2,4 \cdot 10^{-4}$		Avant écrasement
38	"	"	4,5	"	"	"		" "
"	20,1	"	"	15,1	0,648	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	" "
"	27,1	"	"	22,1	0,642	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	" "
"	67,4	"	"	62,4	0,617	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	" "
"	104,9	"	"	99,9	0,598	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	" "
"	6,5	"	6,0	0,5	0,385	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$	Après triaxial à $\sigma_3' = 100,0$ bars

Tableau 1.1. Comparaison entre les valeurs mesurées K et celles calculées K_c du coefficient de perméabilité du sable n° 1.

$$(1) \quad \Delta \sigma = \sigma_3 - \sigma_+ \quad , \quad \text{avec} \quad \sigma_+ = \sigma_{\text{piéd}} \quad \text{si} \quad \sigma_{\text{piéd}} > \sigma_{\text{tête}} \\ \text{et} \quad \sigma_+ = \sigma_{\text{tête}} \quad \text{si} \quad \sigma_{\text{tête}} > \sigma_{\text{piéd}}$$

(2) K_c = coefficient de perméabilité calculé en partant de la valeur de base mesurée $K_{0,680} = 2,4 \cdot 10^{-4}$ cm/s, en se plaçant dans l'hypothèse d'après laquelle K est proportionnel à e^2 .

Casagrande a avancé la formule :

$$k = 1,4 k_{0,85} e^2 \quad (1.1)$$

dans laquelle K est le coefficient de perméabilité d'un sol correspondant à l'indice des vides e , et $K_{0,85}$ le coefficient de perméabilité du même sol lorsque l'indice des vides est égal à 0,85.

Cette formule suggère que le coefficient de perméabilité d'un sol est proportionnel au carré de son indice des vides. Pour vérifier cette propriété, nous avons pris comme valeur de départ le coefficient de perméabilité du sable n° 1 pour $e = 0,680$, mesuré lors de nos essais triaxiaux n° 32 et 38 ($K_{0,680} = 2,4 \cdot 10^{-4}$ cm/s), puis en déduire les valeurs de K correspondant à d'autres teneurs en eau, nous plaçant dans l'hypothèse d'après laquelle K est proportionnel à e^2 . Ces valeurs calculées de K sont ensuite comparées avec les valeurs mesurées.

Les résultats trouvés (cf. tableau 1.1) montrent que les valeurs calculées concordent assez bien avec celles données par les mesures, pour des pressions intergranulaires inférieures ou égales à 100 bars. Les quatre paires de valeurs indiquant cette concordance ont été soulignées pour mieux les faire ressortir des autres données du tableau.

Pour la pression intergranulaire de 145,0 bars, ainsi que pour le sable ayant subi des essais triaxiaux à $\sigma_3 > 100$ bars, il y a un écart considérable entre les valeurs K calculé et celles de K mesuré. Une des raisons en est que, dans ces cas, outre l'indice des vides, il y a la nouvelle granulométrie du matériau qui intervient ; la présence des particules fines diminue les valeurs de K mesuré, alors que le K calculé n'en est pas affecté (cf. formule (1.1)).

Pour le sable n° 1, on déduit de la formule de Casagrande $K_{0,85} = 3,8.10^{-4}$ cm/s.

Pour le sable n° 2, nous avons calculé de la même façon les perméabilités en partant de la valeur de base, le coefficient de perméabilité correspondant à $e = 0,588$, mesuré lors de notre essai triaxial n° 34 ($K_{0,588} = 2,1.10^{-4}$ cm/s), et en admettant que K est proportionnel à e^2 .

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant, qui contient en outre les valeurs mesurées de K pour permettre la comparaison entre ces dernières et celles données par le calcul, ainsi que les données relatant les conditions particulières auxquelles est soumis le matériau lors de la mesure ou du calcul du coefficient de perméabilité.

N° de l'essai (2)	σ_3 , bars (3)	σ_{pied} , bars (4)	$\sigma_{\text{tête}}$, bars (5)	(1) $\Delta\sigma$, bars (6)	e (7)	K mesuré, cm/s (8)	(2) K_{C_s} , gm/Cs (9)	Observations (10)
34	5,5	5,0	4,5	0,5	0,588	$2,1.10^{-4}$		Avant essai
36	105,0	"	4,0	100,0	0,498	$4,7.10^{-5}$	$1,5.10^{-4}$	" "
"	150,0	"	"	145,0	0,468	$3,3.10^{-5}$	$1,3.10^{-4}$	" "
"	6,0	"	4,5	1,0	0,411	$8,9.10^{-7}$	$1,0.10^{-4}$	Après triaxial à $\sigma'_3 = 145$ bars
37	64,8	"	"	59,8	0,523	$1,6.10^{-4}$	$1,7.10^{-4}$	Avant essai
"	5,5	"	4,0	0,5	0,458	$1,3.10^{-6}$	$1,3.10^{-4}$	Après triaxial à $\sigma'_3 = 60$ bars
39	10,0	"	4,5	5,0	0,573	$1,9.10^{-4}$	$2,0.10^{-4}$	Avant essai

Tableau 1.2. Comparaison entre les valeurs mesurées K et celles calculées K_c du coefficient de perméabilité du sable n° 2.

(1) $\Delta \bar{v} = \bar{v}_3 - \bar{v}_*$, avec $\bar{v}_* = \bar{v}_{\text{pied}}$ si $\bar{v}_{\text{pied}} > \bar{v}_{\text{tête}}$
et $\bar{v}_* = \bar{v}_{\text{tête}}$ si $\bar{v}_{\text{tête}} > \bar{v}_{\text{pied}}$.

(2) K_c = coefficient de perméabilité calculé en partant de la valeur de base mesuré $K_{0,588} = 2,1.10^{-4}$ cm/s, en se plaçant dans l'hypothèse d'après laquelle K est proportionnel à e^2 .

Le calcul donne pratiquement les mêmes valeurs que les mesures pour des pressions intergranulaires allant jusqu'à 60 bars ; au-delà, il y a un grand écart entre les 2 groupes de valeurs, dû à l'influence de la nouvelle granulométrie créée par les pressions élevées. Dans le tableau 1.2, les paires de valeurs comparables ont été soulignées.

De même, le calcul et les mesures ne donnent plus des résultats comparables après les essais à fortes pressions qui modifient profondément la granulométrie du matériau.

Pour le sable n° 2, on déduit de la formule de Casagrande $K_{0,85} = 4,4.10^{-4}$ cm/s.

1.4.2. Variation de la longueur de l'échantillon avec la pression \bar{v}'_3 .

Sous l'effet de la mise en pression de la cellule avant les écrasements, l'échantillon se raccourcit. Ce raccourcissement se traduit par le fait que lorsque nous mettons la presse en marche pour procéder à l'essai, le piston doit descen-

dre d'une distance supérieure à celle correspondant à la compression de l'anneau dynamométrique (compression due à la pression isotrope agissant à l'intérieur de la cellule) avant de reprendre contact avec la tête de l'échantillon. Cette reprise de contact est marquée par une brusque variation du volume de l'échantillon. Avant chaque mise en pression, nous avons mis le piston en contact avec la tête de l'échantillon.

La différence entre la distance parcourue par le piston avant de toucher de nouveau la tête de l'échantillon et la compression de l'anneau dynamométrique due à la pression dans la cellule donne le raccourcissement de l'échantillon. Pour chaque essai, nous avons donné ce raccourcissement en millimètres au début du diagramme effort-déformation (cf. figs. 1.14 à 1.19, par exemple).

Les figures 1.9 et 1.10 récapitulent l'ensemble des mesures et donnent respectivement pour le sable n°1 et le sable n° 2 la variation du raccourcissement de l'échantillon avec la pression σ'_3 . Pratiquement tous les échantillons ont la même hauteur initiale de 105 mm. La courbe de la figure 1.9 (sable n° 1) devient linéaire à partir de $\sigma'_3 = 30$ bars. La courbe de la figure 1.10 (sable n° 2) devient linéaire à partir de $\sigma'_3 = 20$ bars. Pour les faibles valeurs de σ'_3 (jusqu'à 30 bars) l'échantillon de sable n° 1 se raccourcit nettement plus que l'échantillon de sable n° 2. A partir de $\sigma'_3 = 30$ bars, la différence s'atténue peu à peu, et entre 100 et 145 bars, on a pratiquement le même raccourcissement pour les deux groupes d'échantillons.

1.4.3. Module de compressibilité isotrope E_i .

Lors des mises en pression de la cellule, les diminutions de volume du matériau ont pu être mesurées, qui permettent

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITE INITIALE 1,57
RACCOURCISSEMENT DE L'ÉCHANTILLON SOUS LA PRESSION σ'_3

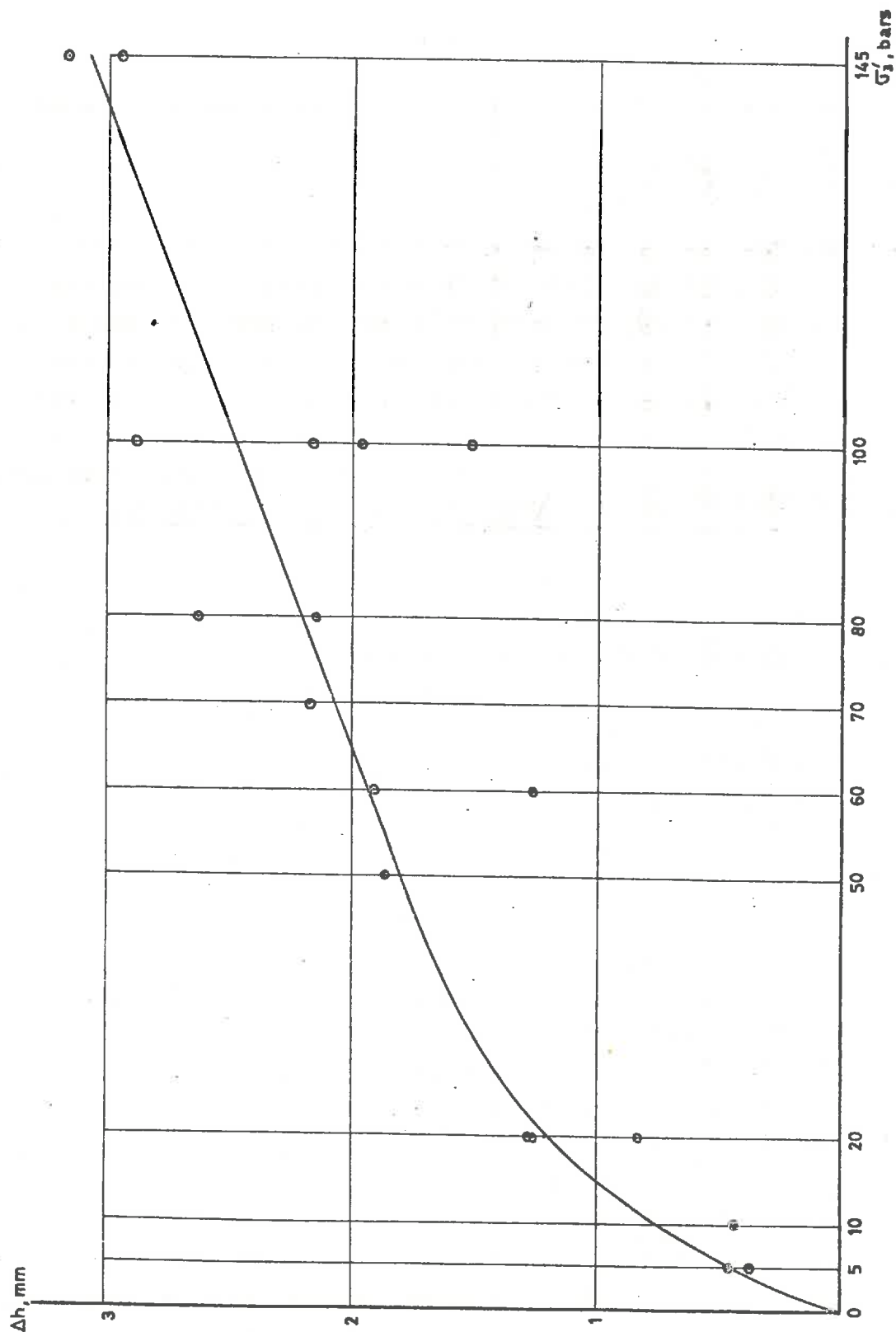


Figure 1.9

SABLE DE LOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,67
RACCOURCISSEMENT DE L'ÉCHANTILLON SOUS LA PRESSION σ'_3

- 26 -

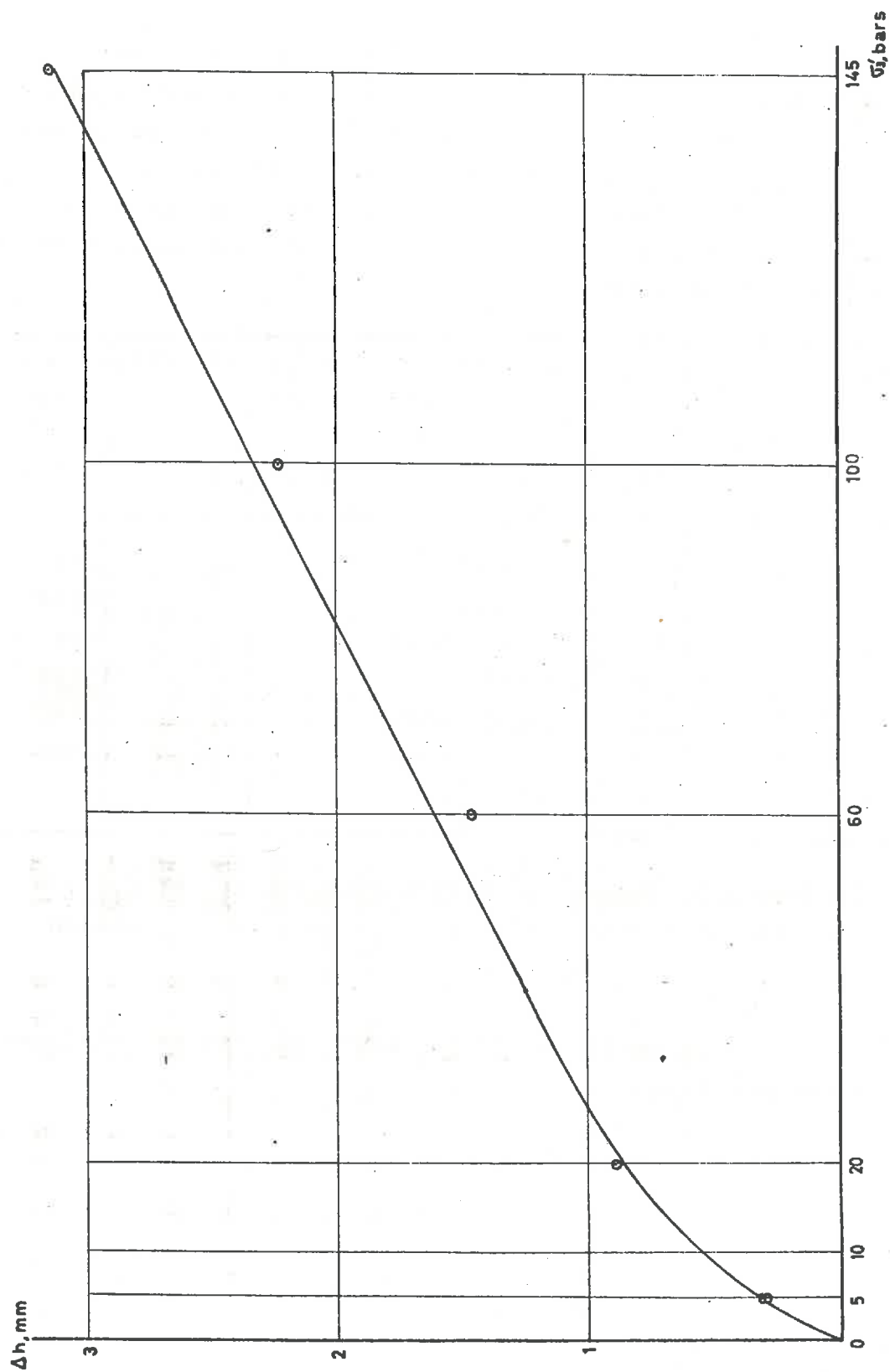


Figure 1.10

de déterminer le module de compressibilité isotrope E_i des matériaux d'après la relation

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3\sigma'_i}{E_i} \quad (1.2)$$

Le tableau suivant présente les variations relatives de volume $\Delta V/V$ de l'échantillon à diverses pressions appliquées et les valeurs correspondantes de E_i , pour le cas du sable n° 1. Nous avons calculé E_i de deux façons différentes : d'abord, pour une pression isotrope croissant de zéro à une certaine valeur (E_{i1}), et ensuite pour une pression isotrope variant entre deux valeurs données (E_{i2}).

N° de l'essai	γ lors de la mise en place	σ'_3 , bars	$\Delta V/V$, %	E_{i1} , bars	$\Delta \sigma'_i$, bars	$\Delta(\Delta V/V)$, %	E_{i2} , bars
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
25	1,57	5	- 1,082	1400	5	0,618	2425
30	"	10	- 1,700	1800	10	0,580	5175
20	"	20	- 2,280	2600	40	1,280	9380
27	"	60	- 3,560	5100	40	2,590	4638
21	"	100	- 6,150	4900	"	1,490	8050
28	"	"	- 5,050	6000	"	0,590	22880
22	"	145	- 6,740	6500	45	1,690	7990

Tableau 1.3. Modules de compressibilité E_{i1} et E_{i2} du sable n° 1 pour différentes valeurs de la pression intergranulaire σ'_3 .

La variation de E_{i1} avec σ'_3 est matérialisée sur la figure 1.11.



Le tableau 1.4 ci-après contient les données homologues du sable n° 2 :

N° de l'essai (1)	γ lors de la mise en place (2)	σ'_3 , bars (3)	$\Delta V/V$, % (4)	E_{i1} , bars (5)	$\Delta \sigma'_i$, bars (6)	$\Delta(\Delta V/V)$, % (7)	E_{i2} , bars (8)
33	1,67	5	- 1,080	1400	15	0,943	4800
34	"	20	- 2,023	3000	40	1,897	6300
37	"	60	- 3,920	4600	40	1,280	9400
35	"	100	- 5,200	5800	45	2,420	5600
36	"	145	- 7,620	5700			

Tableau 1.4. Modules de compressibilité E_{i1} et E_{i2} du sable n° 2 pour différentes valeurs de la pression intergranulaire σ'_3 .

Sur la figure 1.11 nous avons représenté E_{i1} en fonction de σ'_3 .

1.4.4. Variation de la densité des matériaux avec la pression σ'_3 .

Lors de la mise en pression de la cellule, la mesure des variations de volume nous a permis d'obtenir des éléments nécessaires pour le tracé des courbes représentatives de la densité en fonction de la pression intergranulaire σ'_3 . Ces courbes sont celle de la figure 1.12 (cas du sable n° 1) et celle de la figure 1.13 (cas du sable n° 2).

Le grand nombre de mesures faites nous a permis,

SABLE DU LABORATOIRE: VARIATION DE LA DENSITÉ AVEC LA PRESSION EFFECTIVE σ'_3

- 30 -

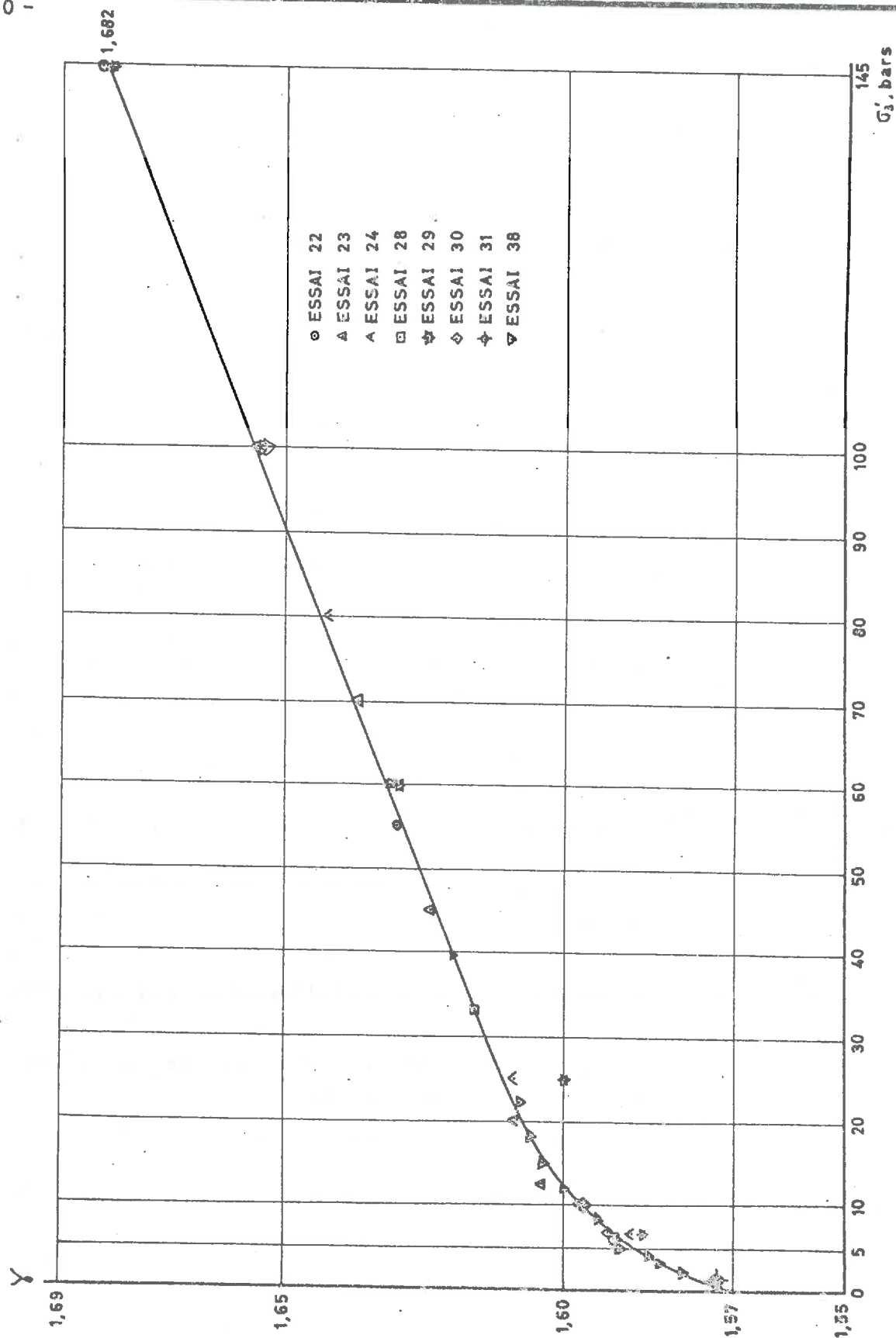


Figure 1.12

SABLE DE LOIRE: VARIATION DE LA DENSITÉ AVEC LA PRESSION EFFECTIVE σ'_s

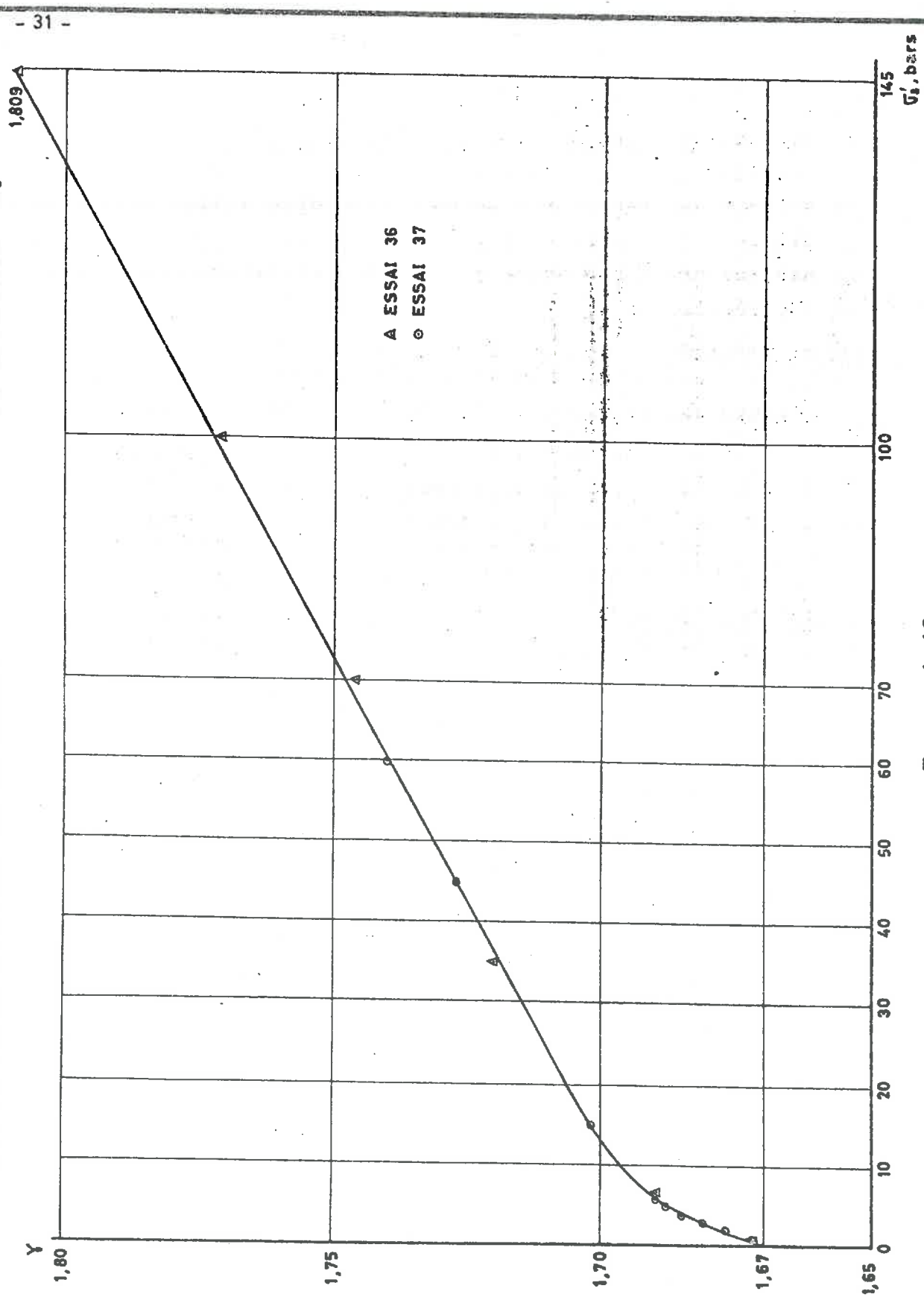


Figure 1.13

en particulier dans le cas du sable n° 1, (cf. fig. 1.12), de matérialiser de façon sûre la variation de la densité avec la pression intergranulaire. Le nombre de divergences -divergences d'ailleurs peu importantes- est insignifiant devant celui de points suggérant une bonne concordance et matérialisant une courbe régulière.

Sur les courbes nous avons matérialisé différemment les points obtenus lors d'essais différents, et chaque point fait ainsi connaître, par sa présentation, de quel essai il a été déduit.

Les mesures servant au tracé de la courbe correspondant au sable n° 2 (cf. fig. 1.13) sont moins nombreuses que celles relatives au sable n° 1 ; la courbe de la figure 1.13 a pu néanmoins être établie avec beaucoup de certitude, car il n'y a pas de divergences et l'allure générale de la courbe est connue grâce à la figure 1.12.

Les deux courbes de densité deviennent linéaires à partir de $\sigma'_3 = 20$ bars. A $\sigma'_3 = 145$ bars, les deux sables ont pratiquement la même augmentation de densité, en pour cents, par rapport à la densité initiale : 7,3 % dans le cas du sable n° 1 et 8,3 % dans le cas du sable n° 2.

1.5. ESSAIS TRIAXIAUX A PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE.

1.5.1. Courbes effort-déformation pendant l'écrasement de l'échantillon.

Sable n° 1 :

La première des trois courbes de chacune des figures 1.14 à 1.19 représente la contrainte $\sigma_1 - \sigma_3$ en fonction de la variation relative de longueur $\Delta h/h$ de l'échantillon au

cours d'essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante sur le sable n° 1. Les pressions latérales constantes pour ces essais étaient de 10 bars, 15 bars, 25 bars, 65 bars, 105 bars et 150 bars. Dans tous ces essais la contre pression créée à l'intérieur de l'échantillon est de 5 bars.

L'allure générale de ces courbes effort-déformation est la suivante : une pente positive allant en s'adoucissant jusqu'au maximum de la courbe, puis la décroissance et enfin un palier. Le maximum est plus net pour les courbes à $\sigma_3 = 5, 10$ et 20 bars que pour celles à pression σ_3 supérieure. L'abscisse $\Delta h/h$ correspondant au maximum de $\sigma_1 - \sigma_3$ augmente avec σ_3 jusqu'à $\sigma_3 = 125$ bars environ ; au-delà, cette abscisse décroît avec σ_3 (cf. fig. 1.20). Dans l'intervalle où cette abscisse augmente avec $(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum, elle croît moins vite que la contrainte maxima (cf. fig. 1.21).

L'abscisse $\Delta h/h$ à partir de laquelle on a le palier de $\sigma_1 - \sigma_3$ ne paraît pas changer avec σ_3 et est égale à 50 % environ.

Le rapport $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{palier}} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{maximum}}$ va en croissant avec σ_3 jusqu'à $\sigma_3 = 100$ bars environ, puis décroît ensuite (cf. fig. 1.22).

σ_3 , bars	10	15	25	65	105	150
$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{palier}}$, bars	8,15	15,9	32,4	100,4	174,8	235,6
$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{maximum}}$, bars	14,5	27,1	48,6	119,1	199,4	277,2
$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{pal.}} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{max.}}$	0,562	0,587	0,668	0,843	0,876	0,850

Tableau 1.5. Sable n° 1 : rapport $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{palier}} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{maximum}}$ pour différentes valeurs de σ_3 .

ESSAI TRIAXIAL À PRESSION LATÉRALE CONSTANTE $\bar{\sigma}_3 = 10$ BARS SUR LE SABLE N° 1.

TRIAxIAL N° 25.

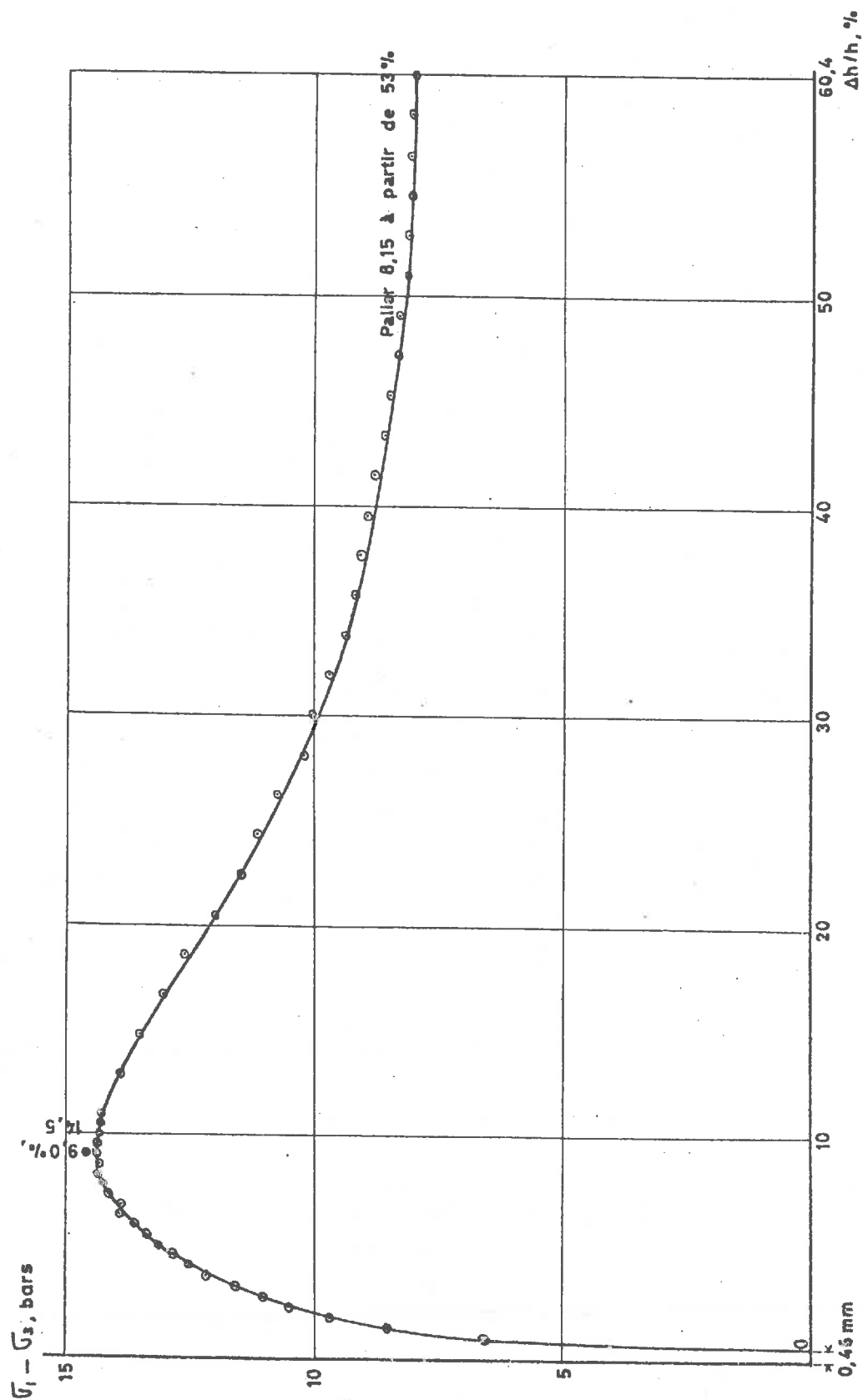


Figure 1.14 (a) Courbe effort - déformation

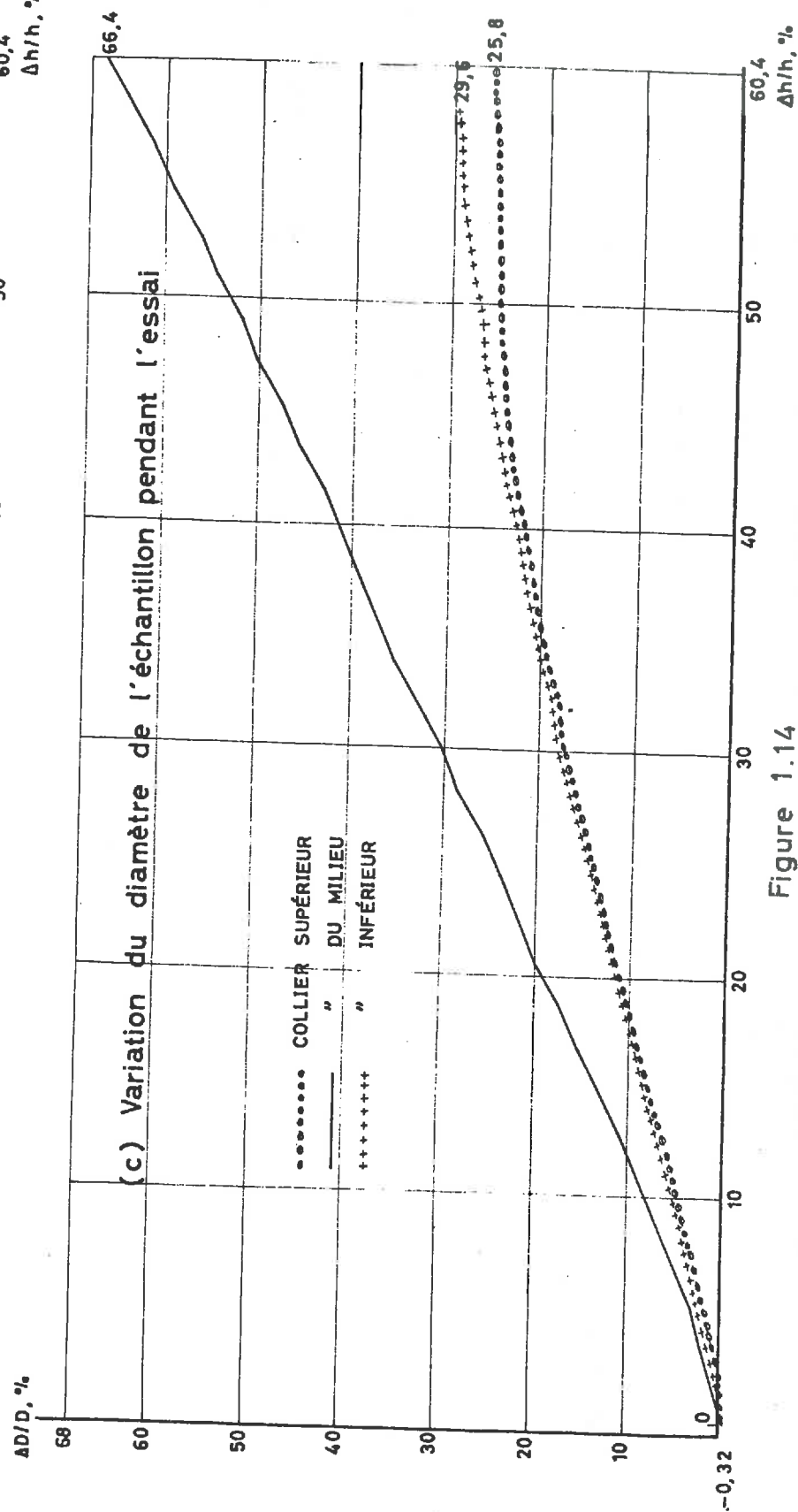
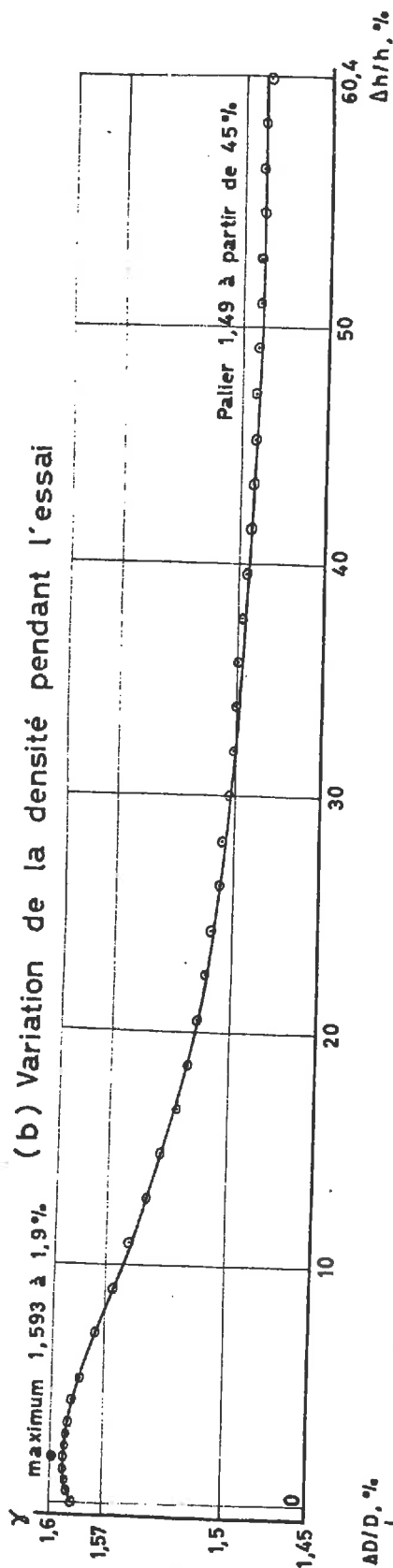


Figure 1.14

PREMIER ESSAI TRIAXIAL À PRESSION LATÉRALE CONSTANTE $\sigma_3 = 15$ BARS SUR LE SABLE N°1.

TRIAXIAL N° 30.

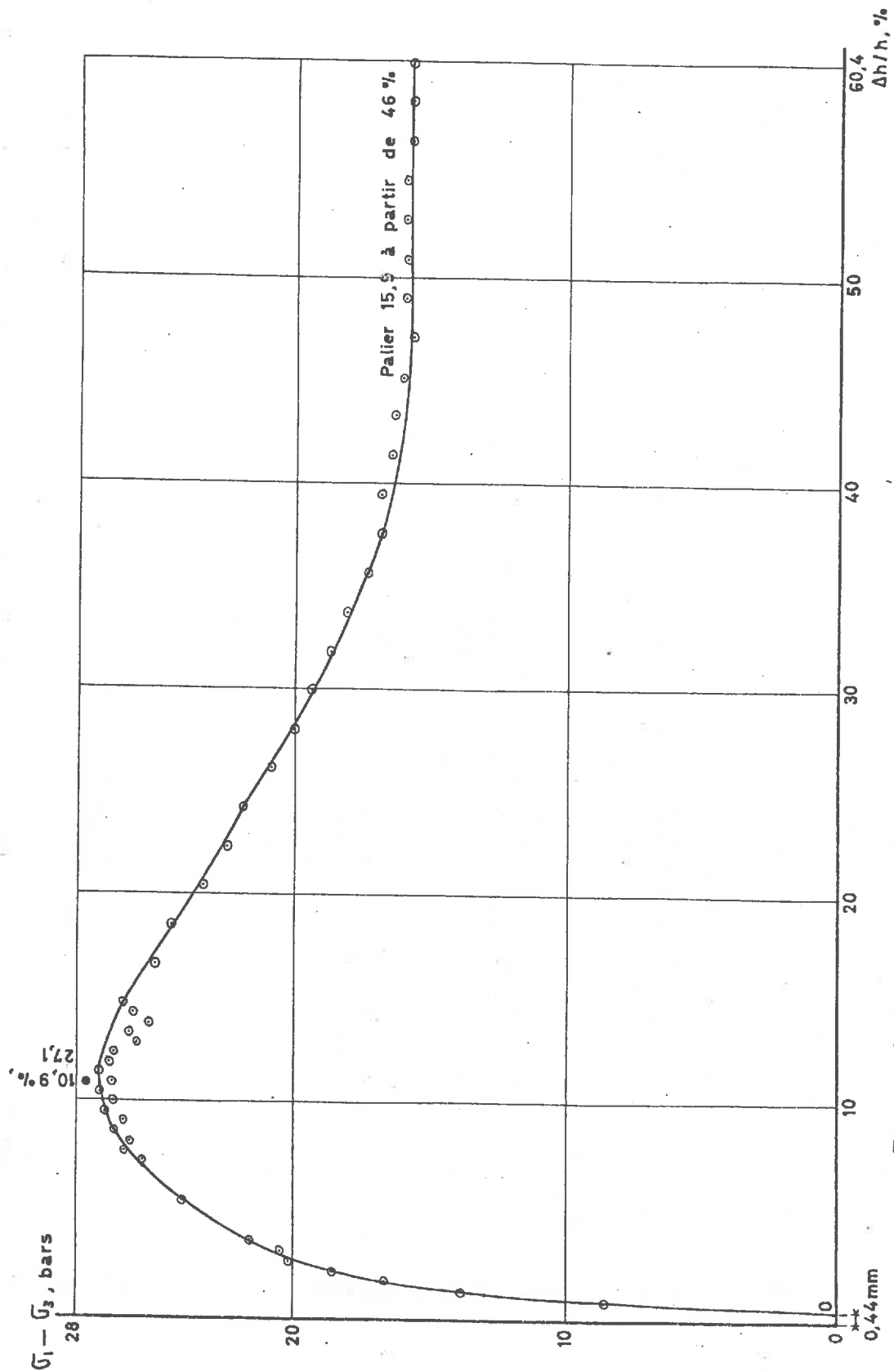
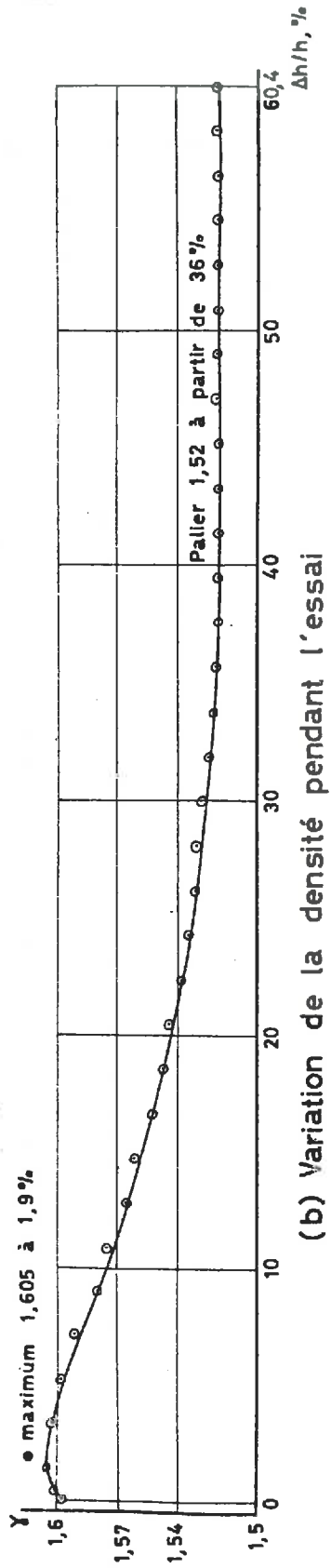
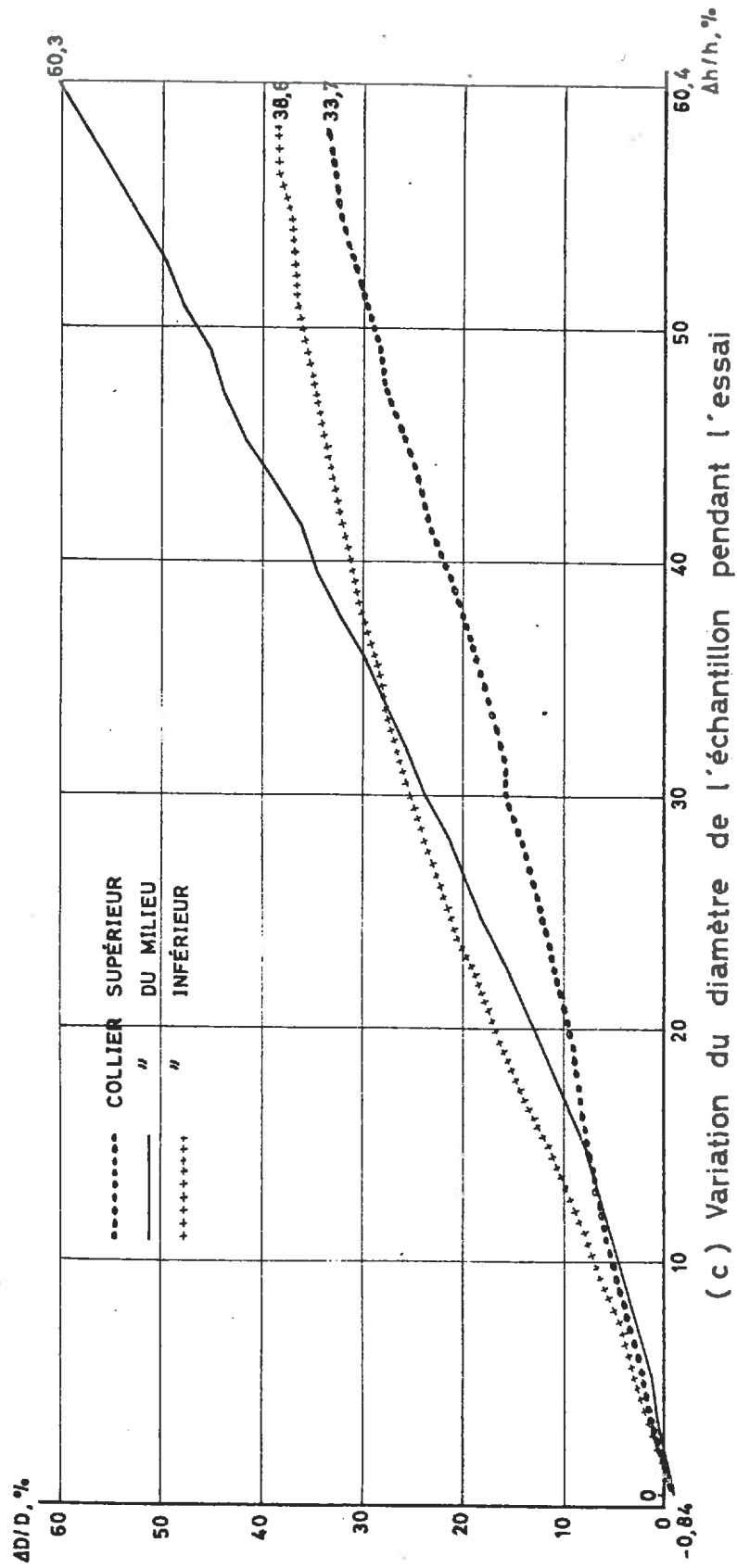


Figure 1.15 (a) Courbe effort - déformation



(b) Variation de la densité pendant l'essai



(c) Variation du diamètre de l'échantillon pendant l'essai

Figure 1.15

ESSAI TRIAXIAL À PRESSION LATÉRALE CONSTANTE $\sigma_3 = 25$ BARS SUR LE SABLE N° 1.

TRIAxIAL N° 20.

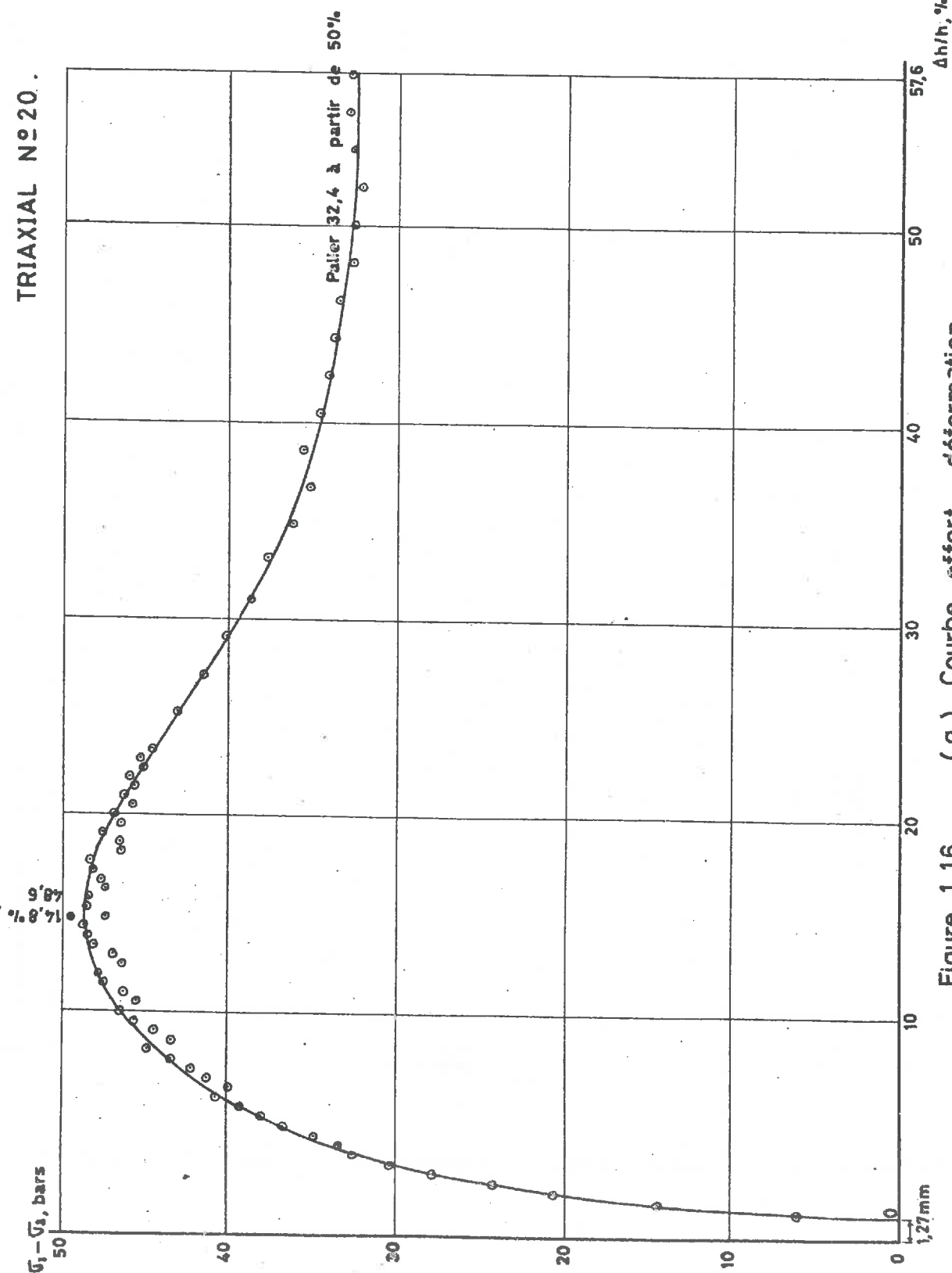
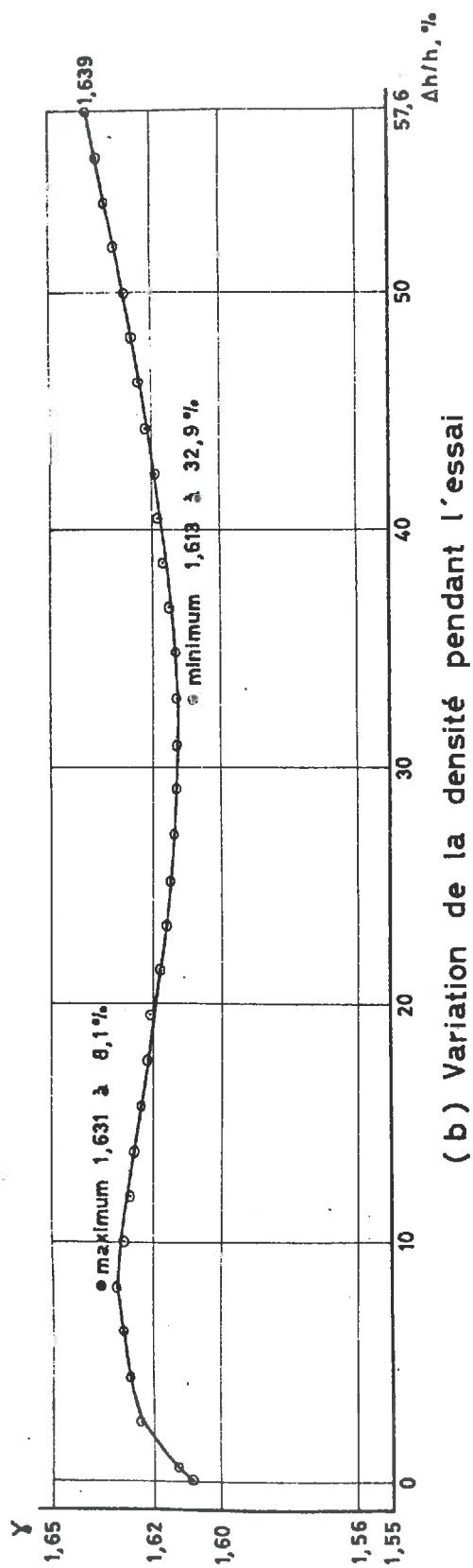
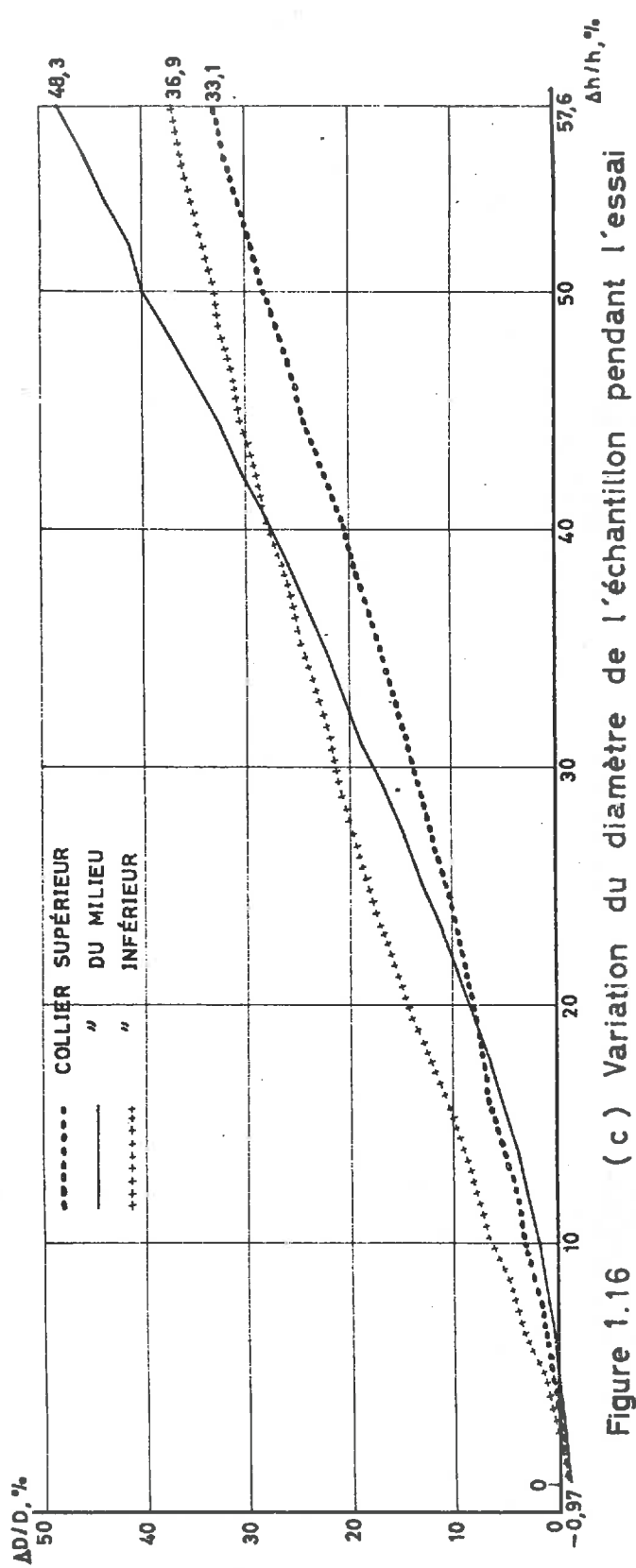


Figure 1.16 (a) Courbe effort - déformation



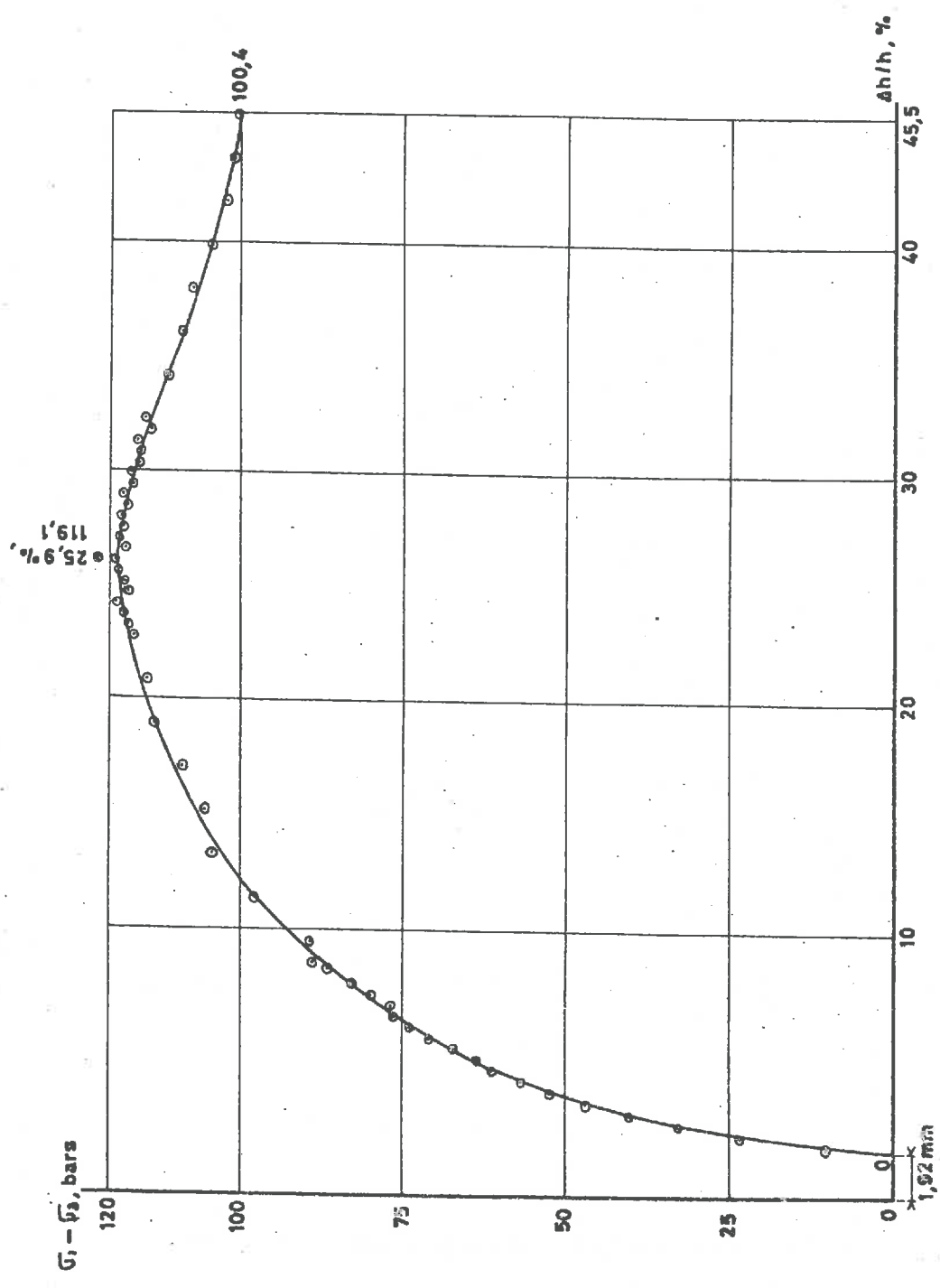
(b) Variation de la densité pendant l'essai



(c) Variation du diamètre de l'échantillon pendant l'essai

ESSAI TRIAXIAL À PRESSION LATÉRALE CONSTANTE $\sigma_3 = 65$ BARS SUR LE SABLE N°1.

TRIAxIAL N° 19.



(a) Courbe effort - déformation

Figure 1.17

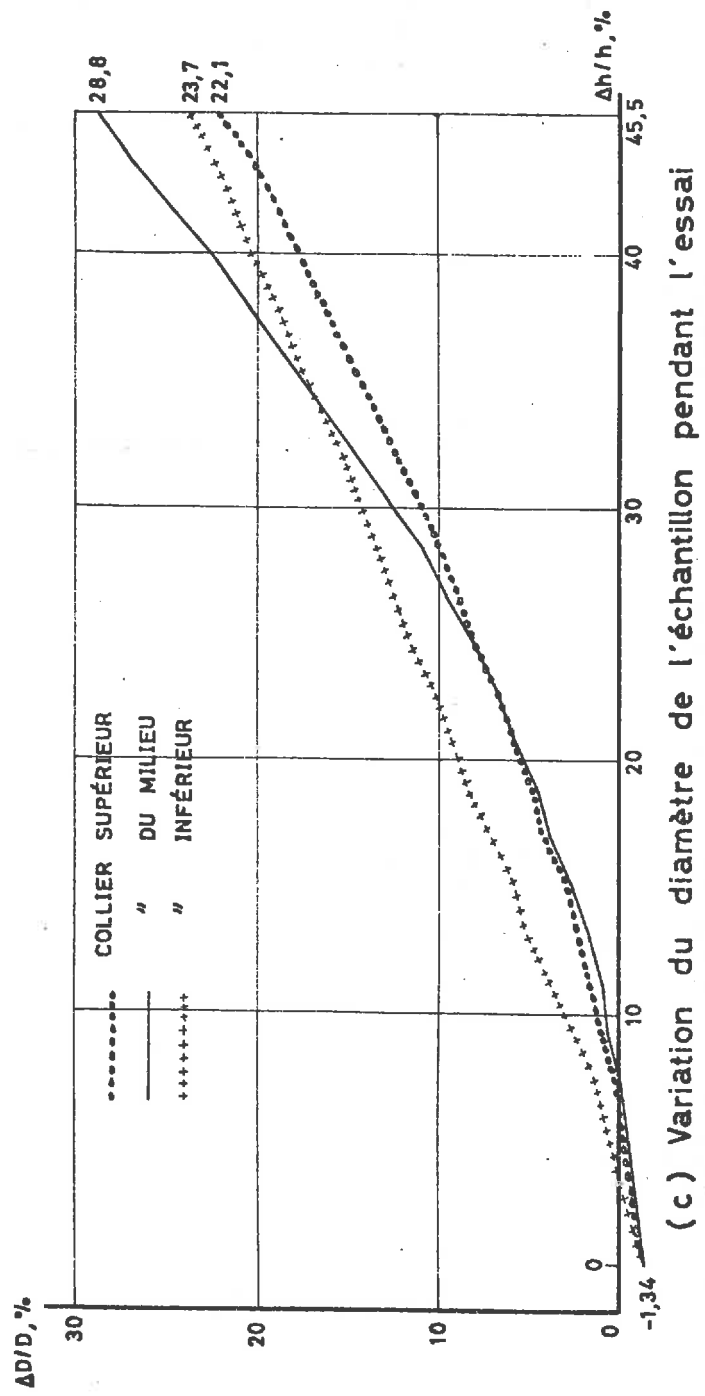
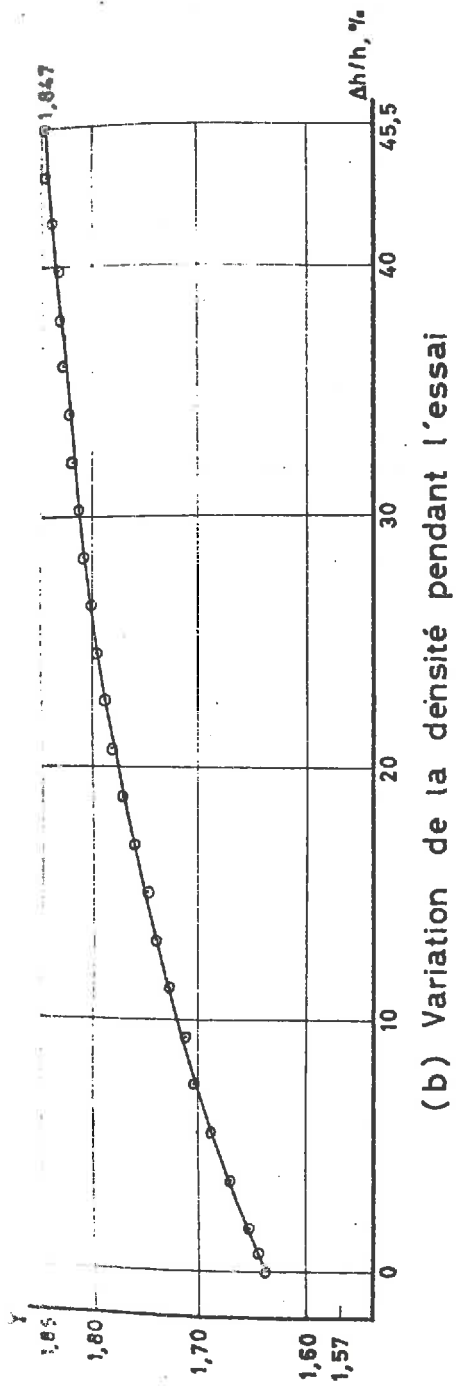
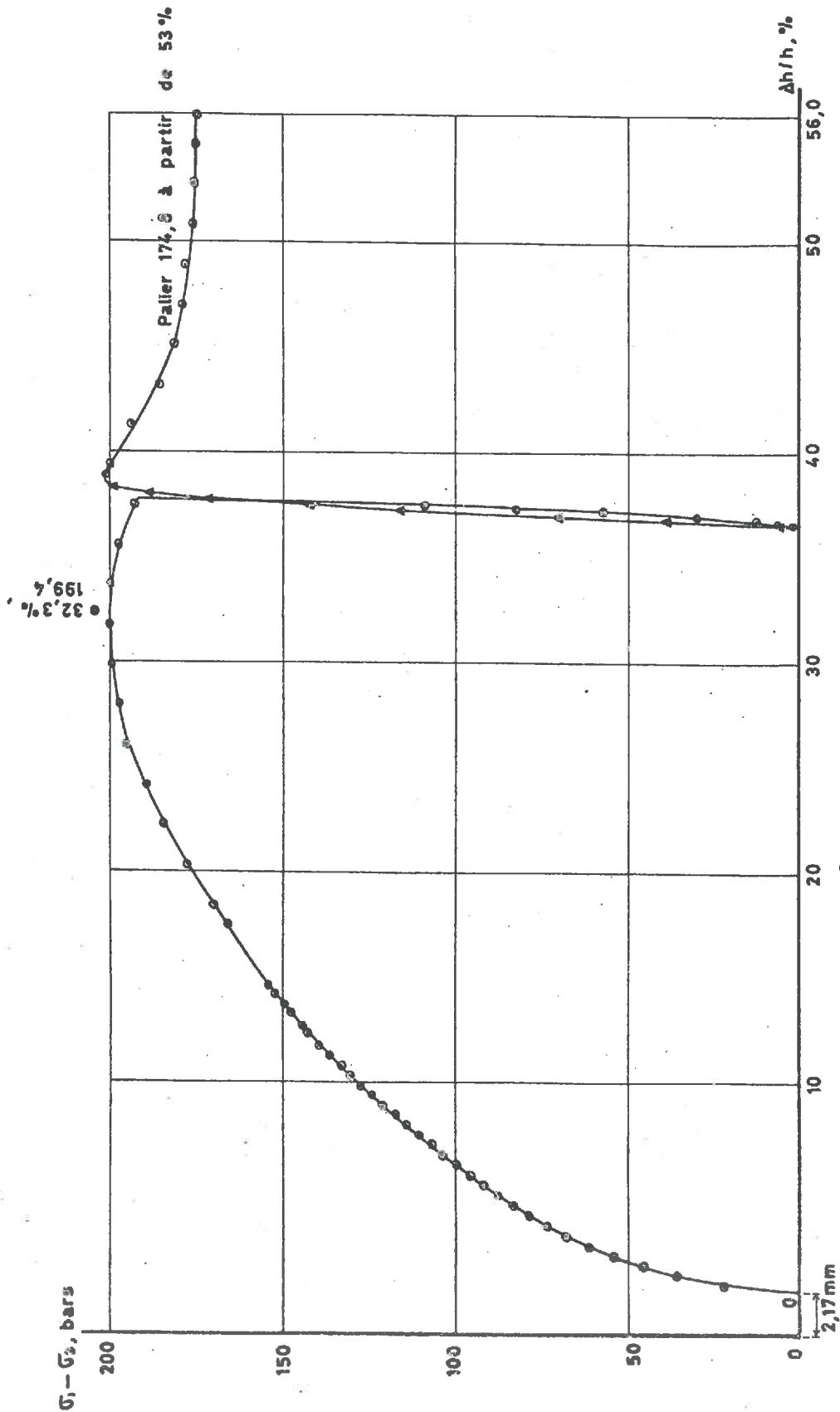


Figure 1.17

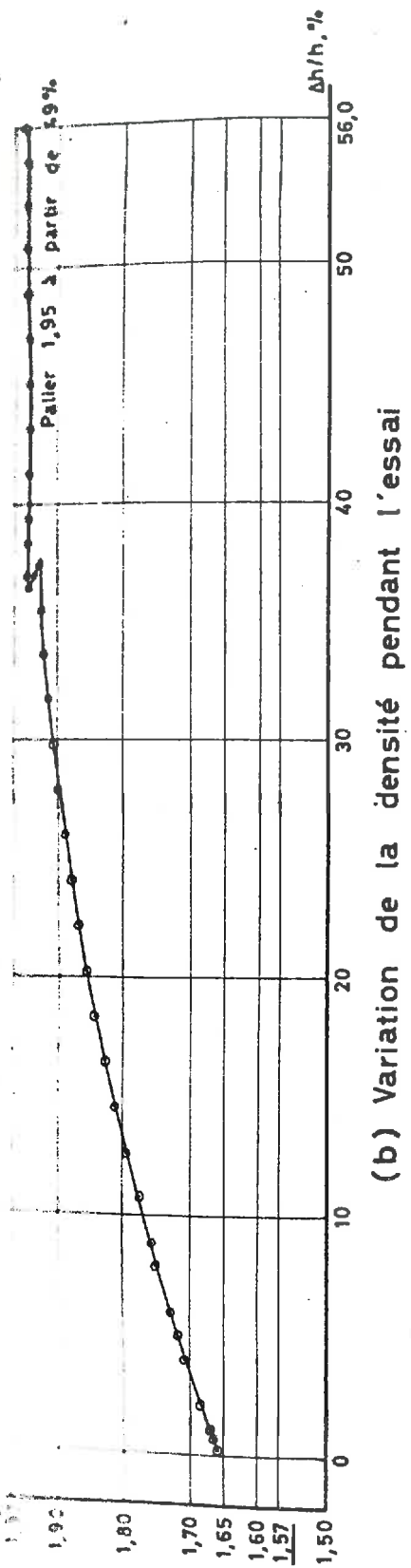
ESSAI TRIAXIAL À PRESSION LATÉRALE CONSTANTE $G_3 = 105$ BARS SUR LE SABLE N°1.

TRIAXIAL N°38.

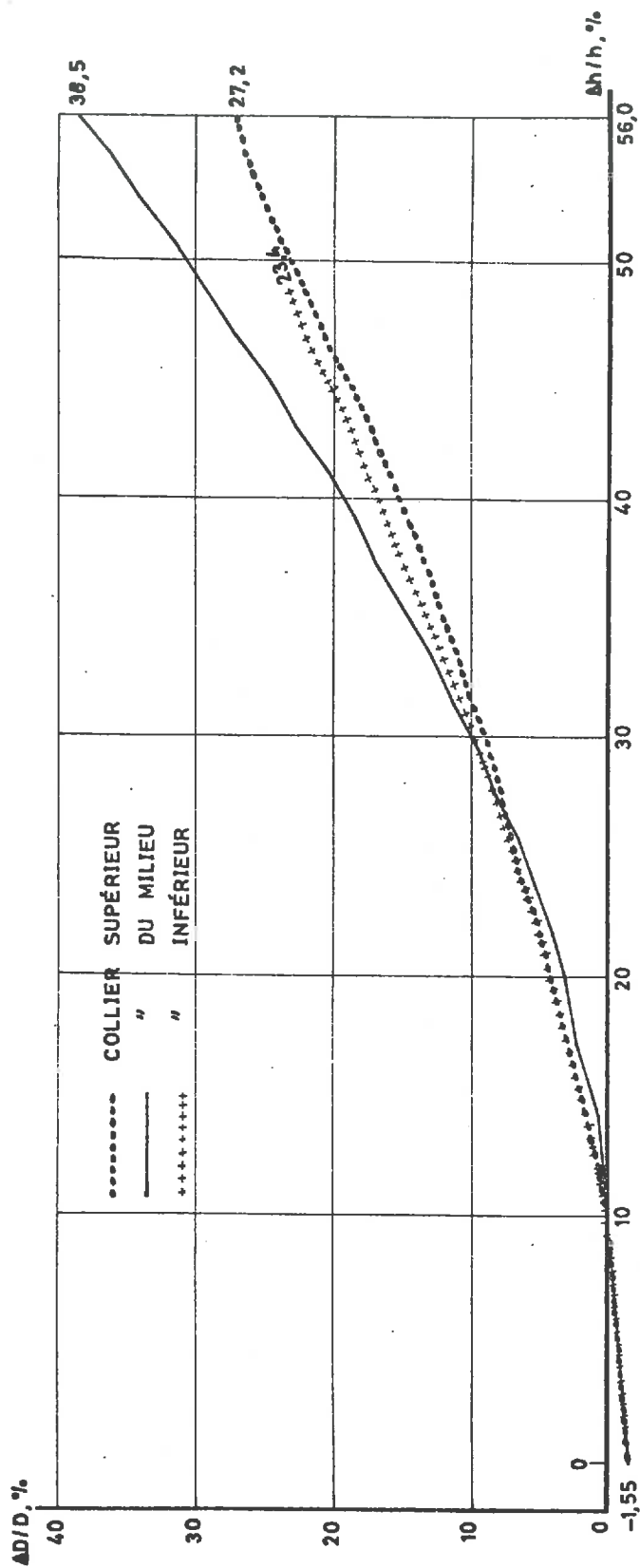


(a) Courbe effort - déformation

Figure 1.18



(b) Variation de la densité pendant l'essai



(c) Variation du diamètre de l'échantillon pendant l'essai

Figure 1.18

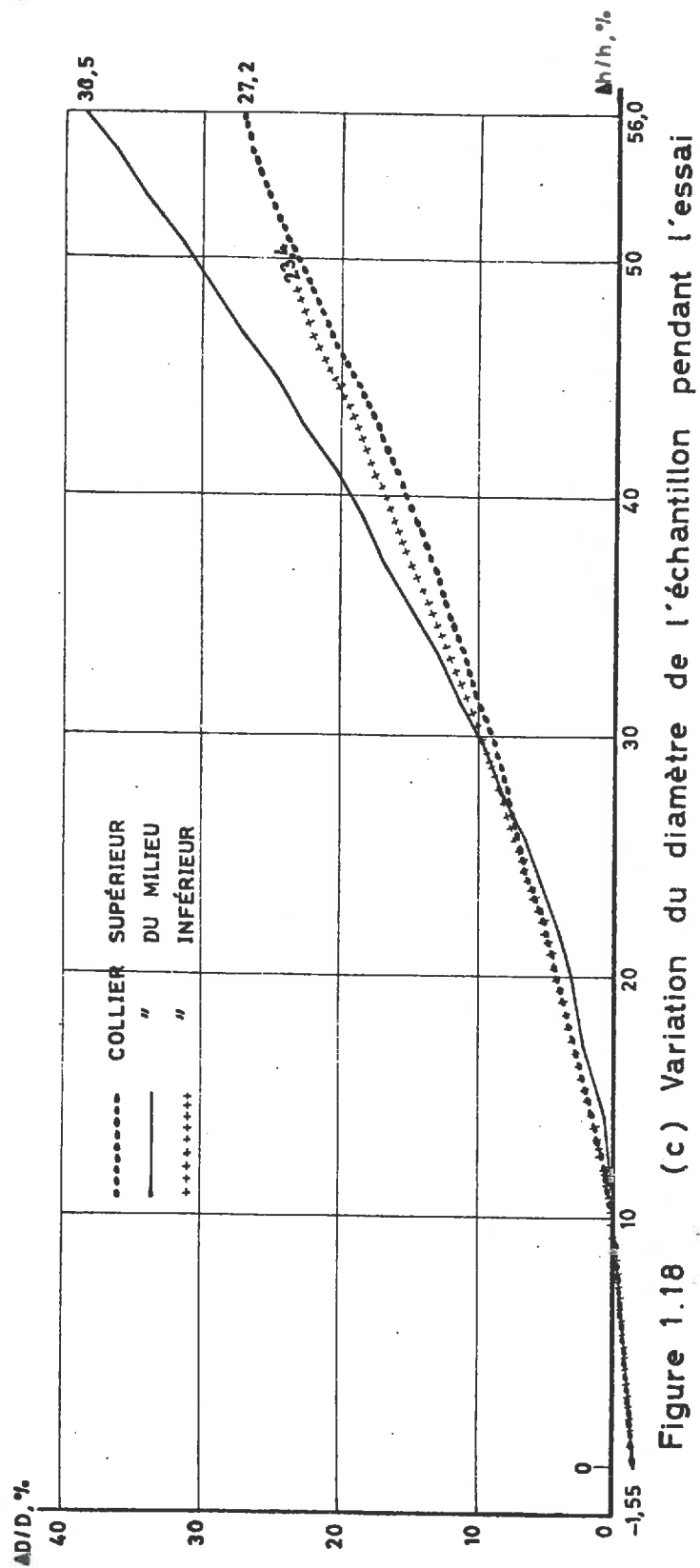
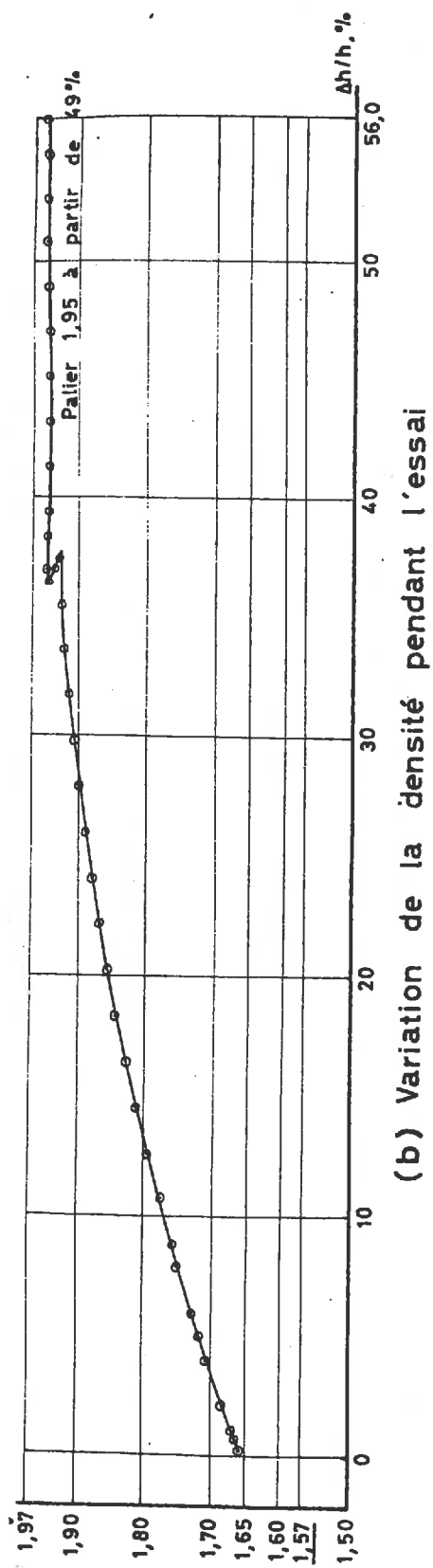
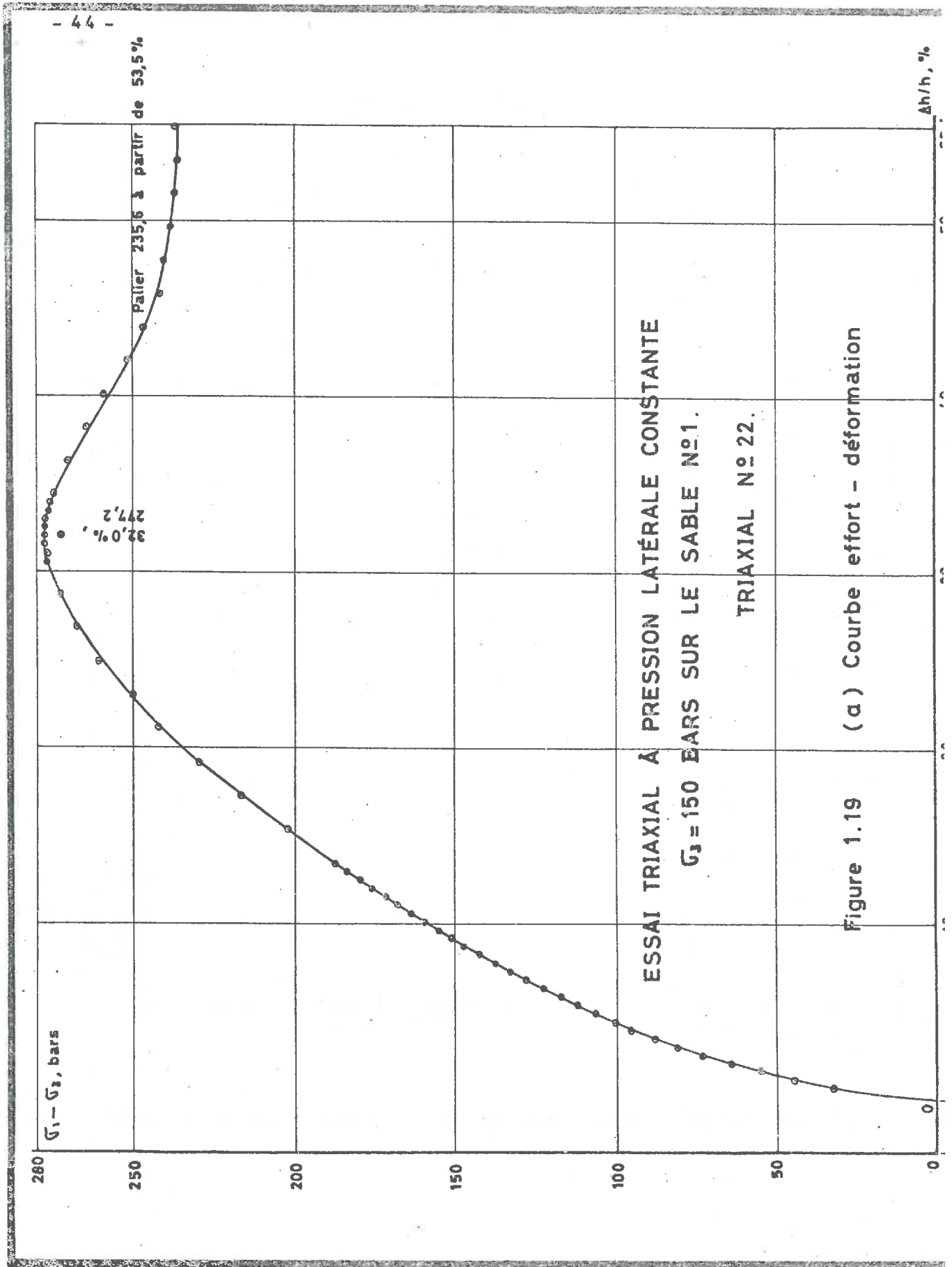
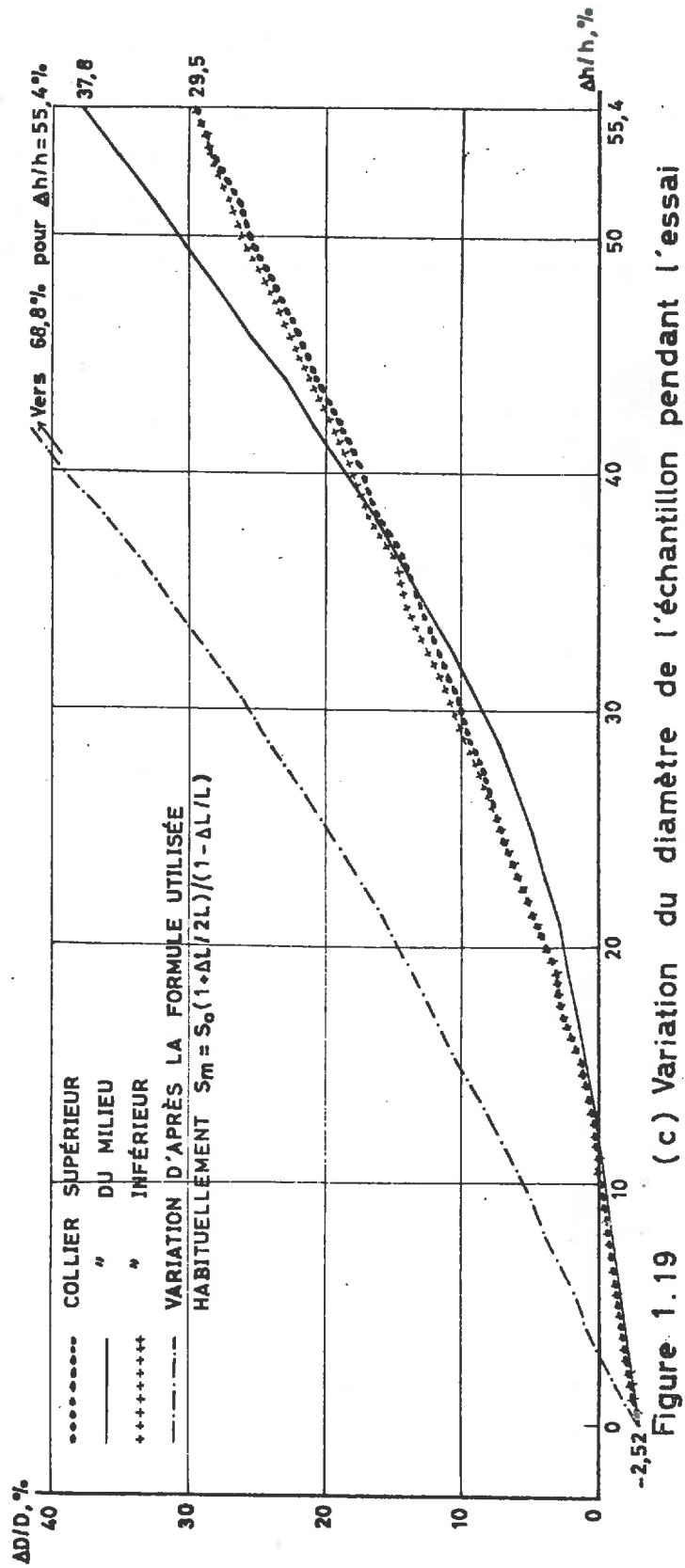
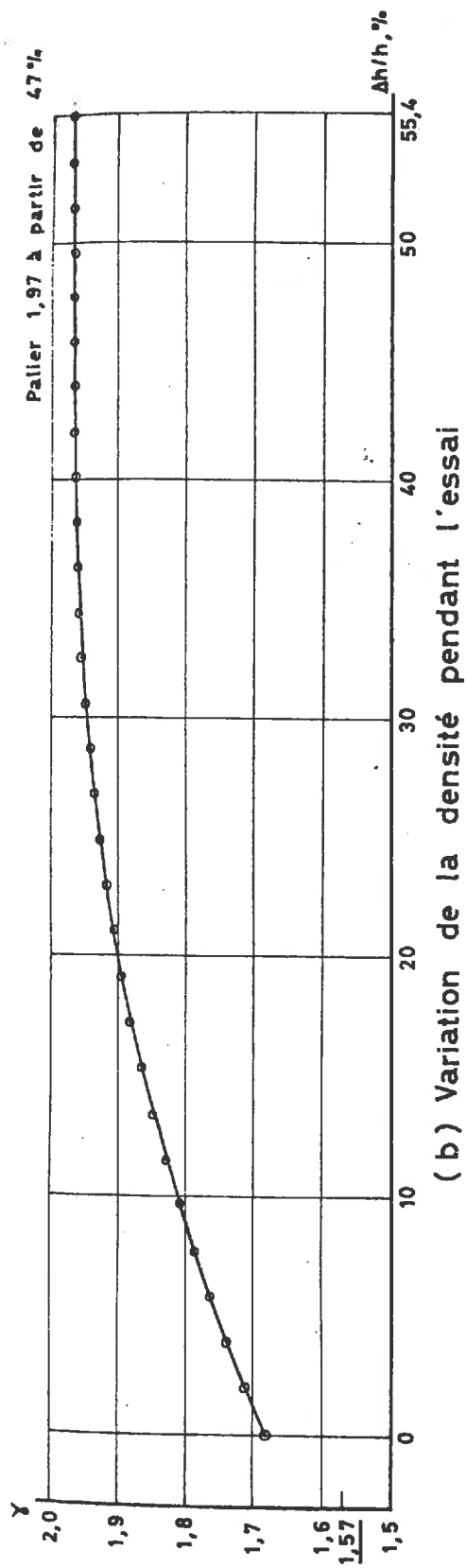


Figure 1.18





ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE SUR DEUX SABLES

Déformation axiale relative $\Delta h/h$ correspondant au maximum de $\sigma_1 - \sigma_3$
en fonction de σ_3

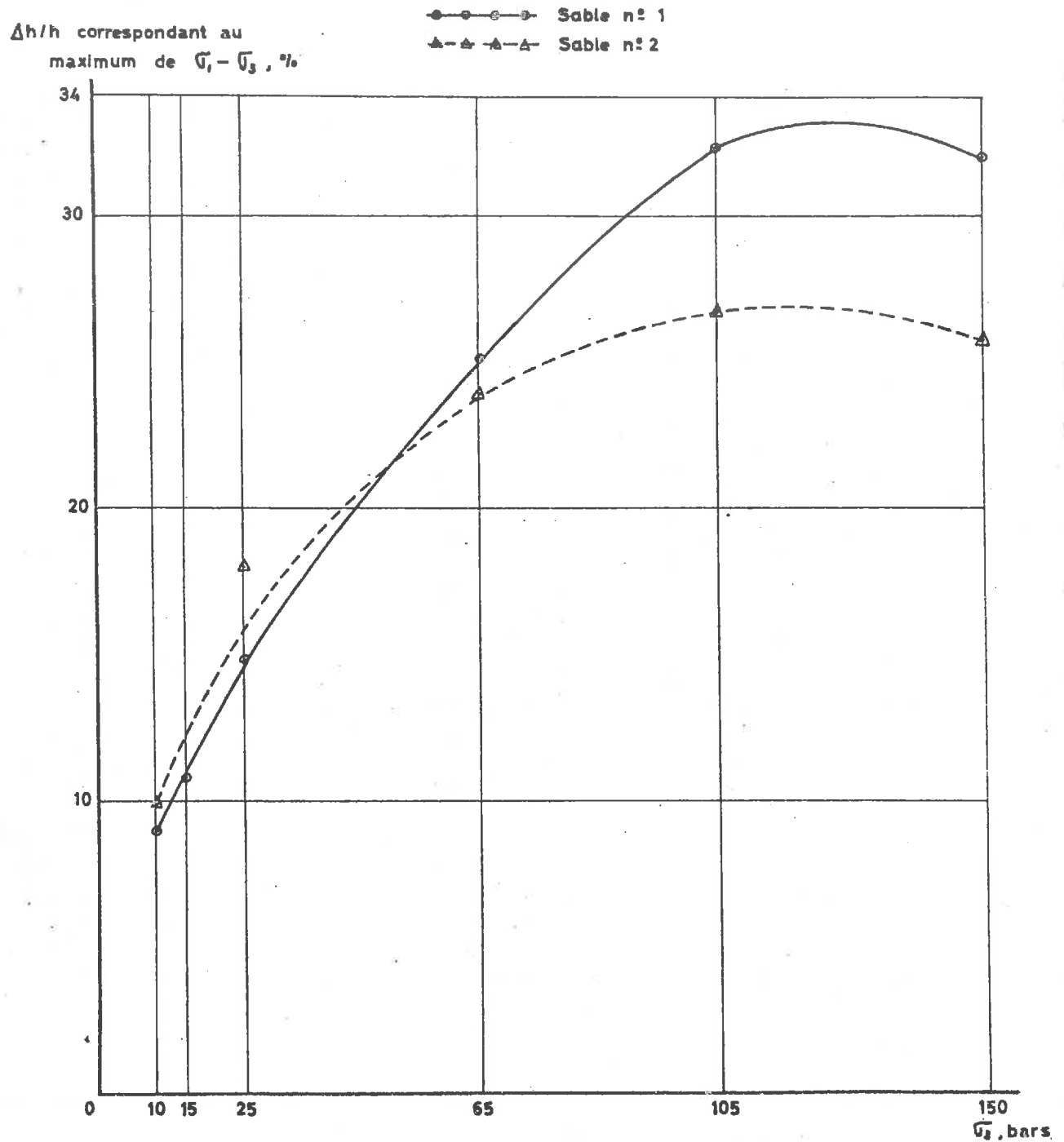


Figure 1.20

ESSAIS TRIAXIAUX SUR LE SABLE DU LABORATOIRE

Valeurs des $(\sigma_1 - \sigma_3)$ maxima et abscisses $\Delta h/h$
correspondant à ces maxima

- SABLE DU LABORATOIRE, ESSAIS A PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE
- △-△- " DE LOIRE, " " " " " "
- " DU LABORATOIRE, " " " MOYENNE σ_m " "

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum, bars

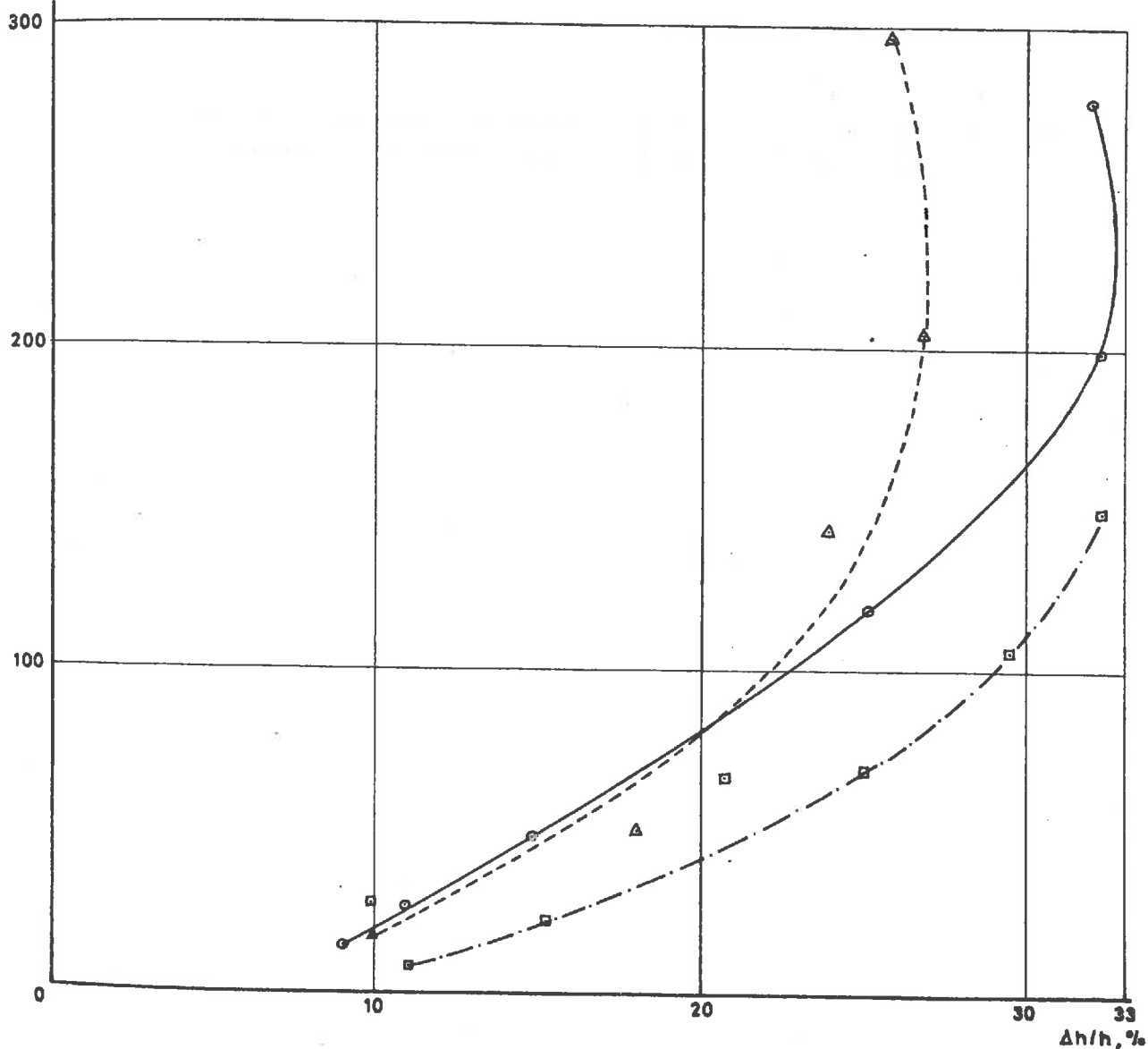


Figure 1.21

ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE SUR DEUX SABLES

Rapport $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{palier}} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{maximum}}$ en fonction de σ_3

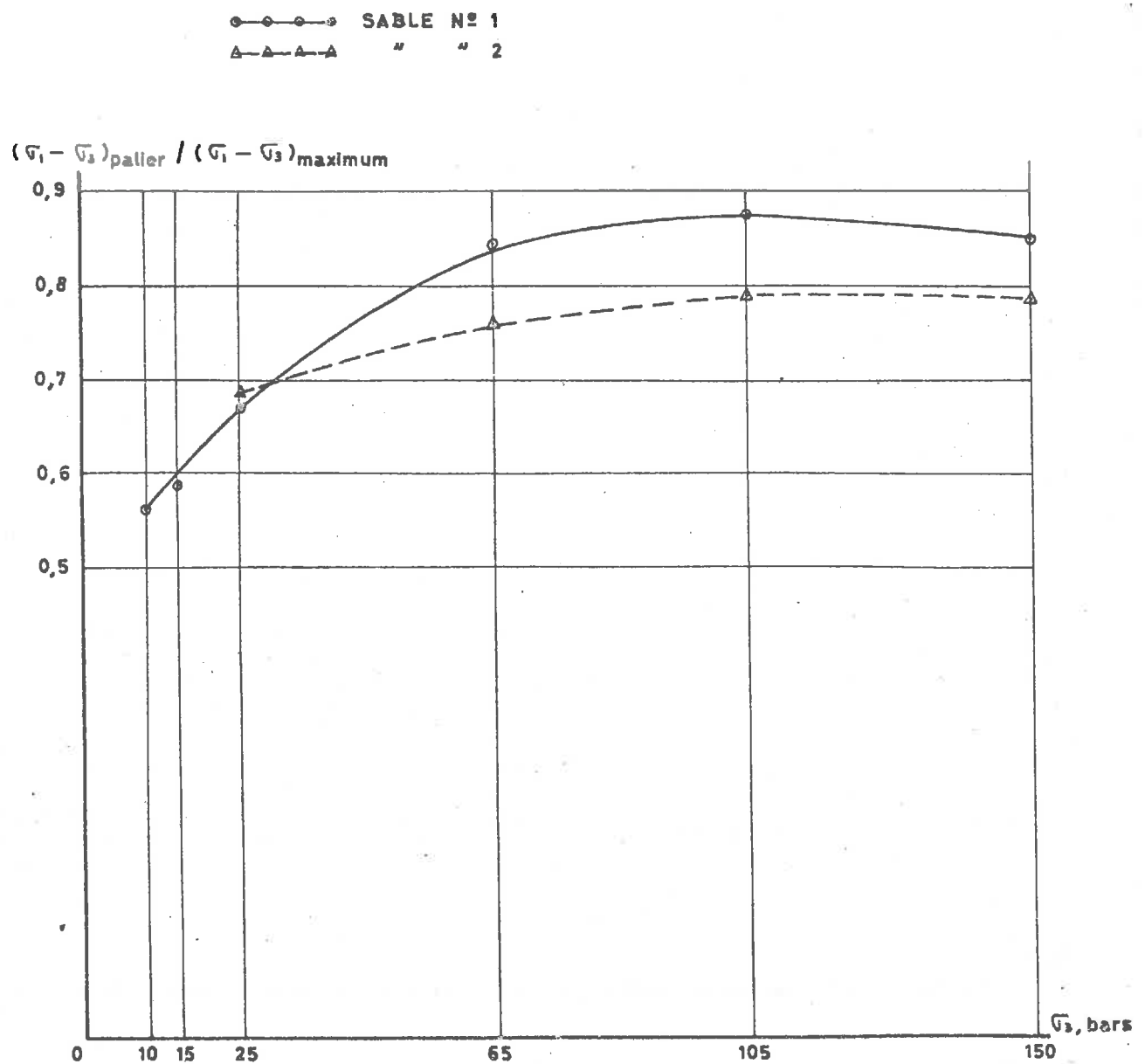


Figure 1.22

ESSAIS TRIAXIAUX SUR DEUX SABLES

- 49 -

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum en fonction de σ_3 (pour les essais à pression latérale σ_3 constante)

ou de σ_m (pour les essais à pression moyenne σ_m constante)

○—○—○—○	SABLE N° 1, ESSAIS À PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE
△—△—△—△	" " " " " MOYENNE σ_m "
□—□—□—□	" " 2, " " " LATÉRALE σ_3 "

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum, bars

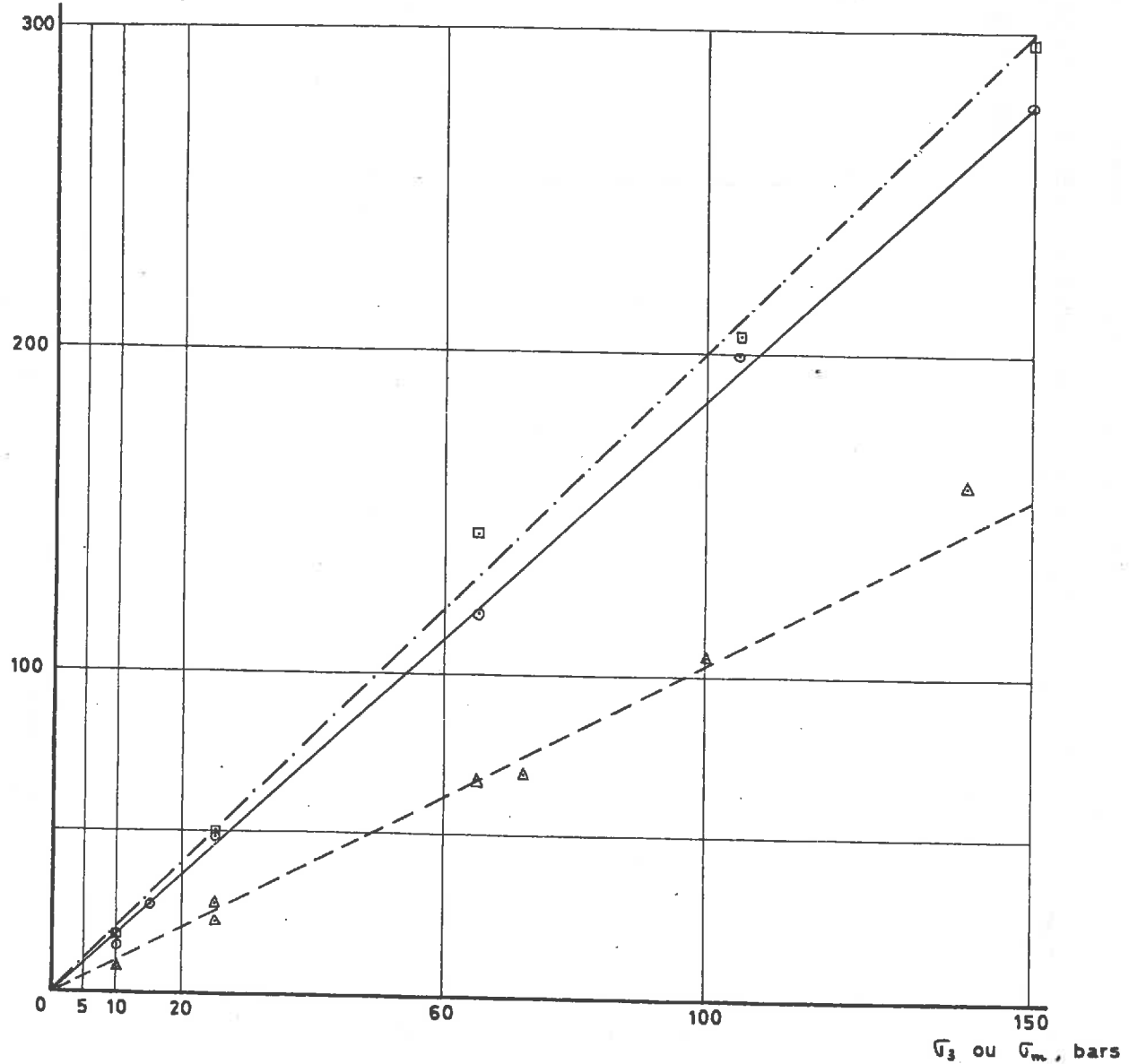


Figure 1.23

ESSAI TRIAXIAL A PRESSION LATÉRALE CONSTANTE $\sigma_3 = 10$ BARS SUR LE SABLE N°2.
 TRIAXIAL N° 33 .

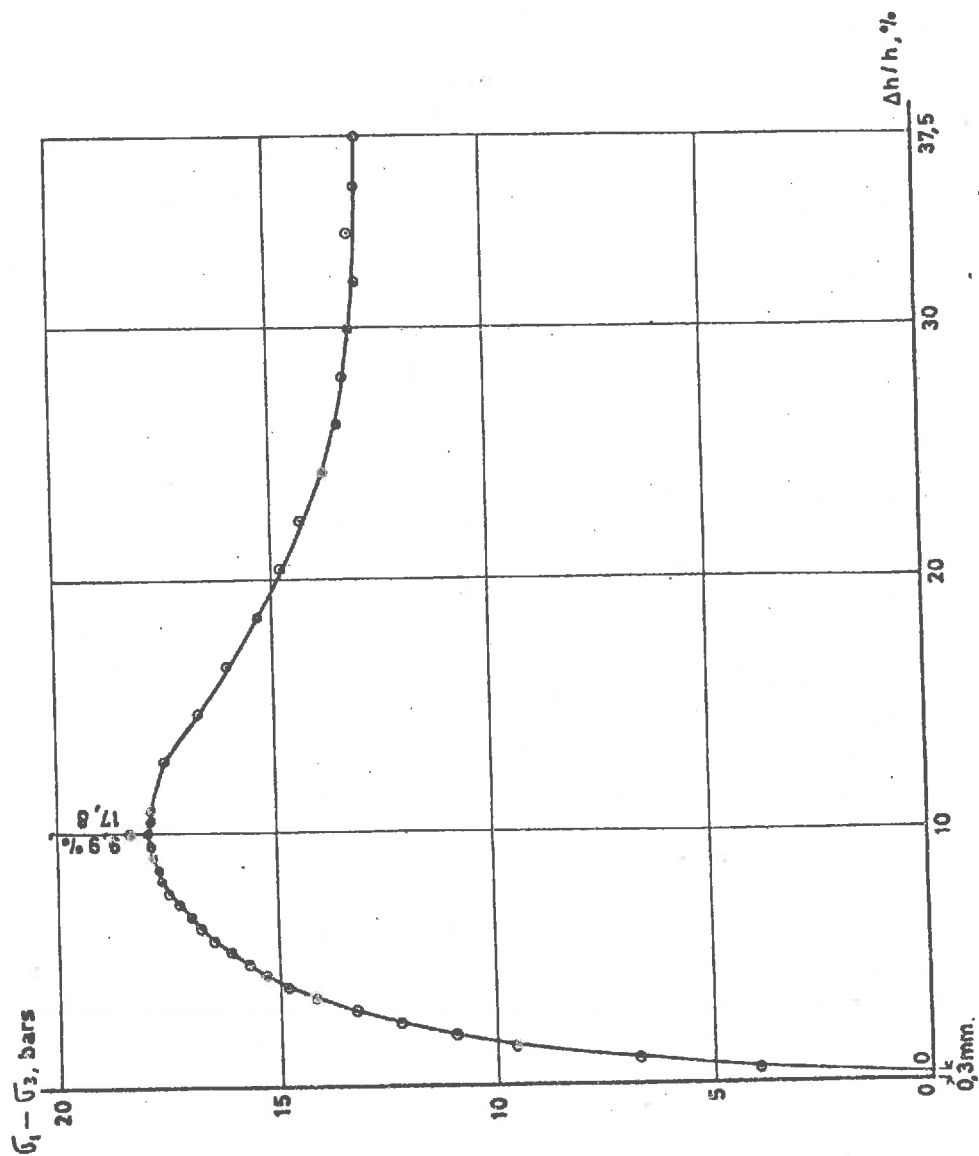
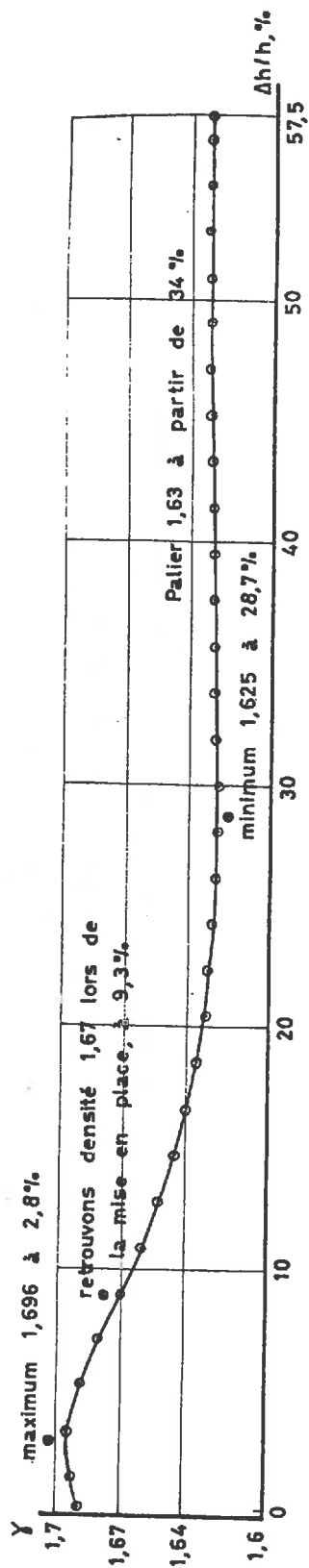


Figure 1.24 (a) Courbe effort - déformation



(b) Variation de la densité pendant l'essai

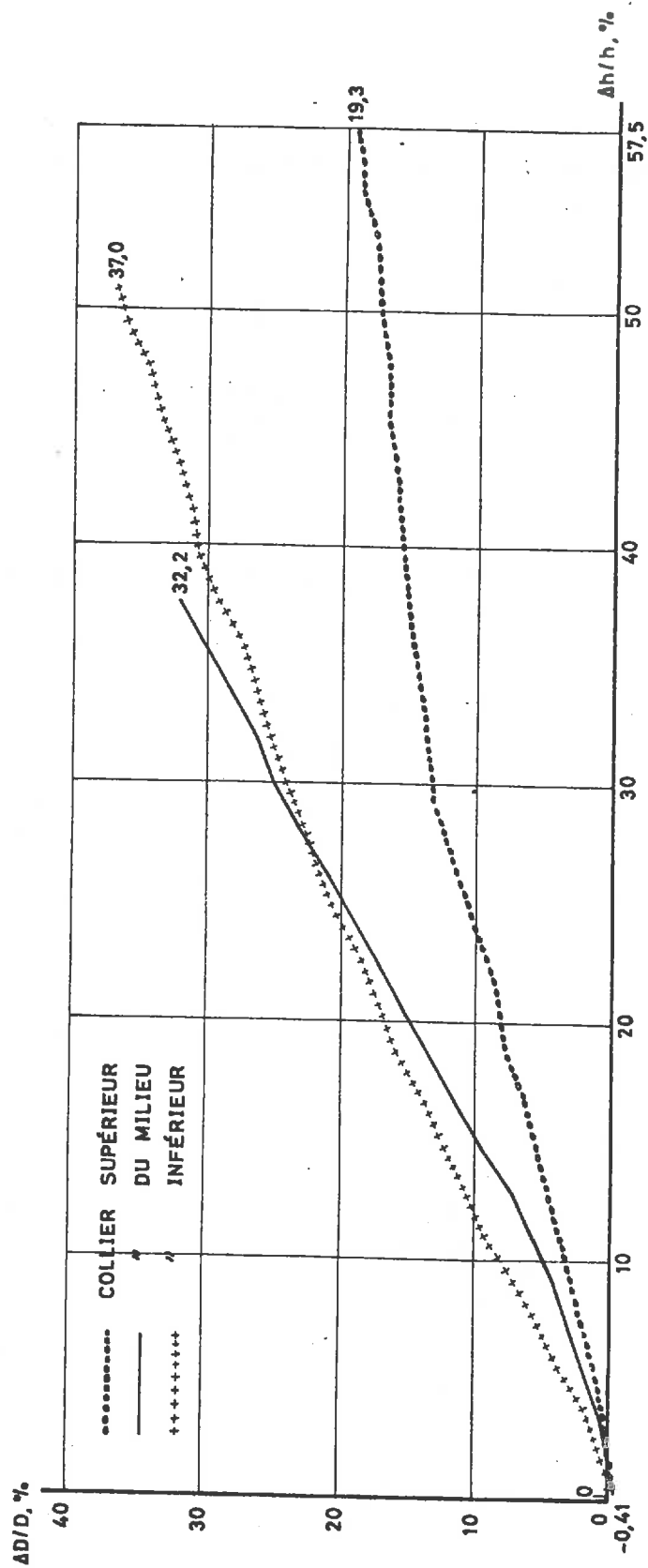


Figure 1.24 (c) Variation du diamètre de l'échantillon pendant l'essai

ESSAI TRIAXIAL A PRESSION LATÉRALE CONSTANTE $\sigma_3 = 25$ BARS SUR LE SABLE N°2.
 TRIAXIAL N° 34.

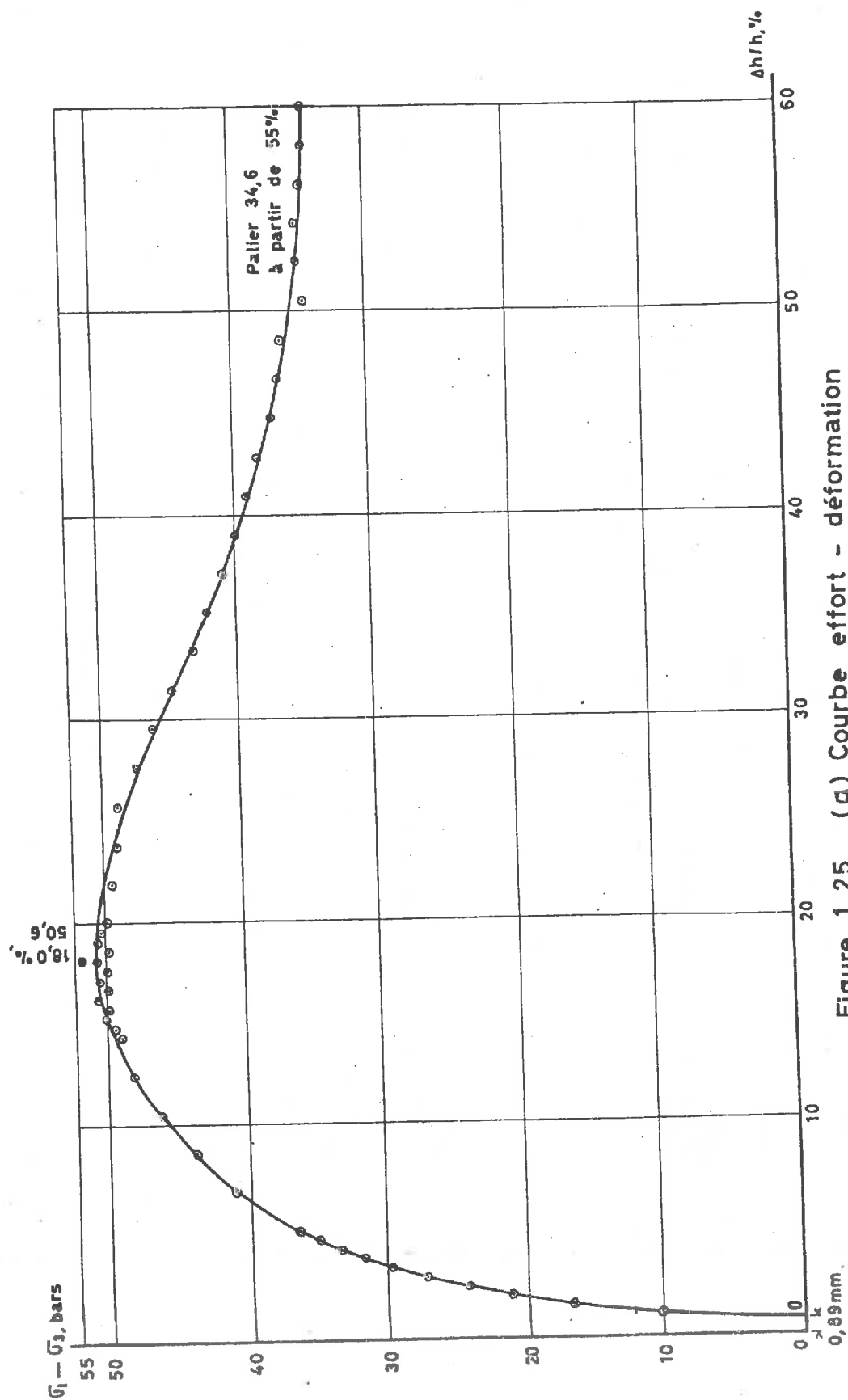


Figure 1.25 (a) Courbe effort - déformation

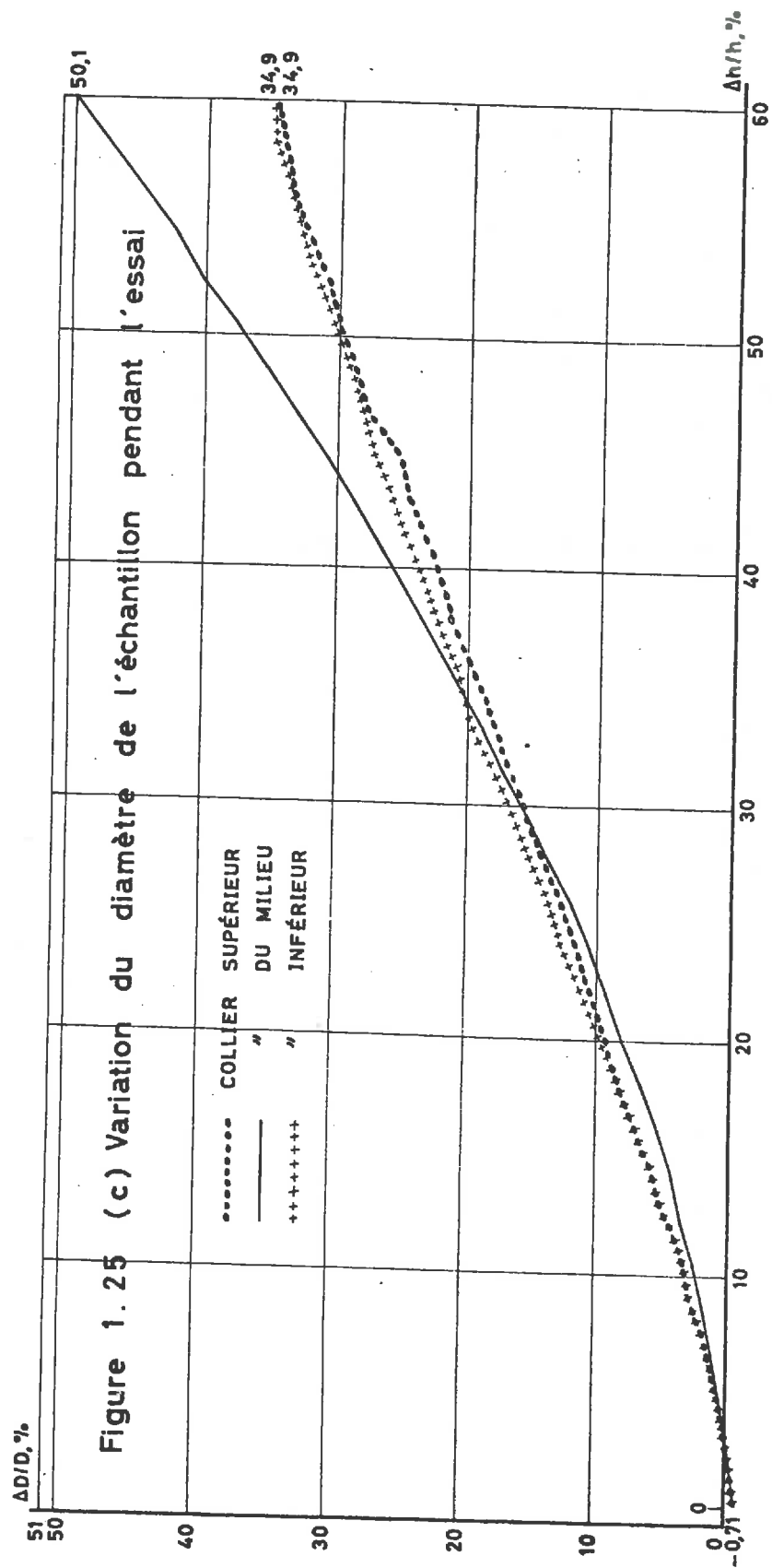
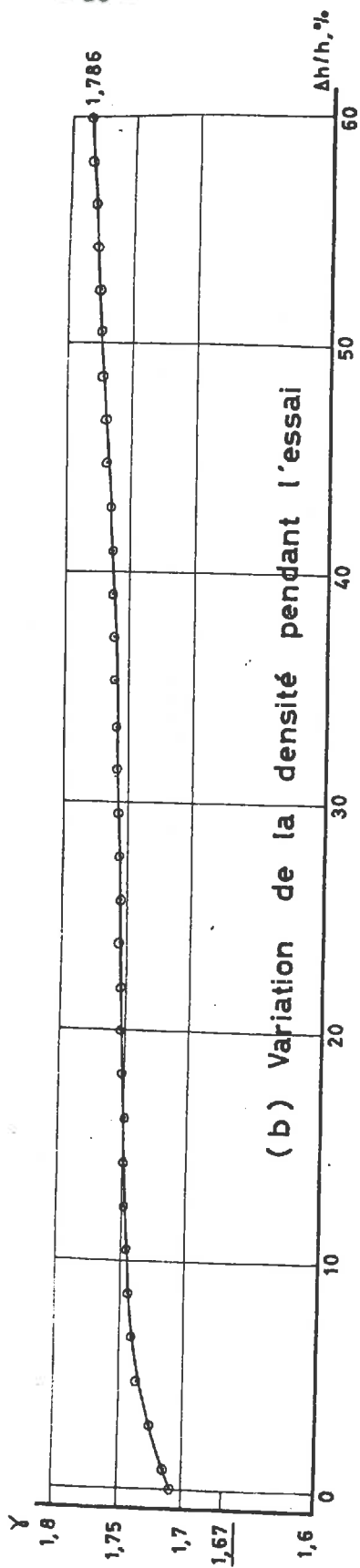


Figure 1.25 (c) Variation du diamètre de l'échantillon pendant l'essai

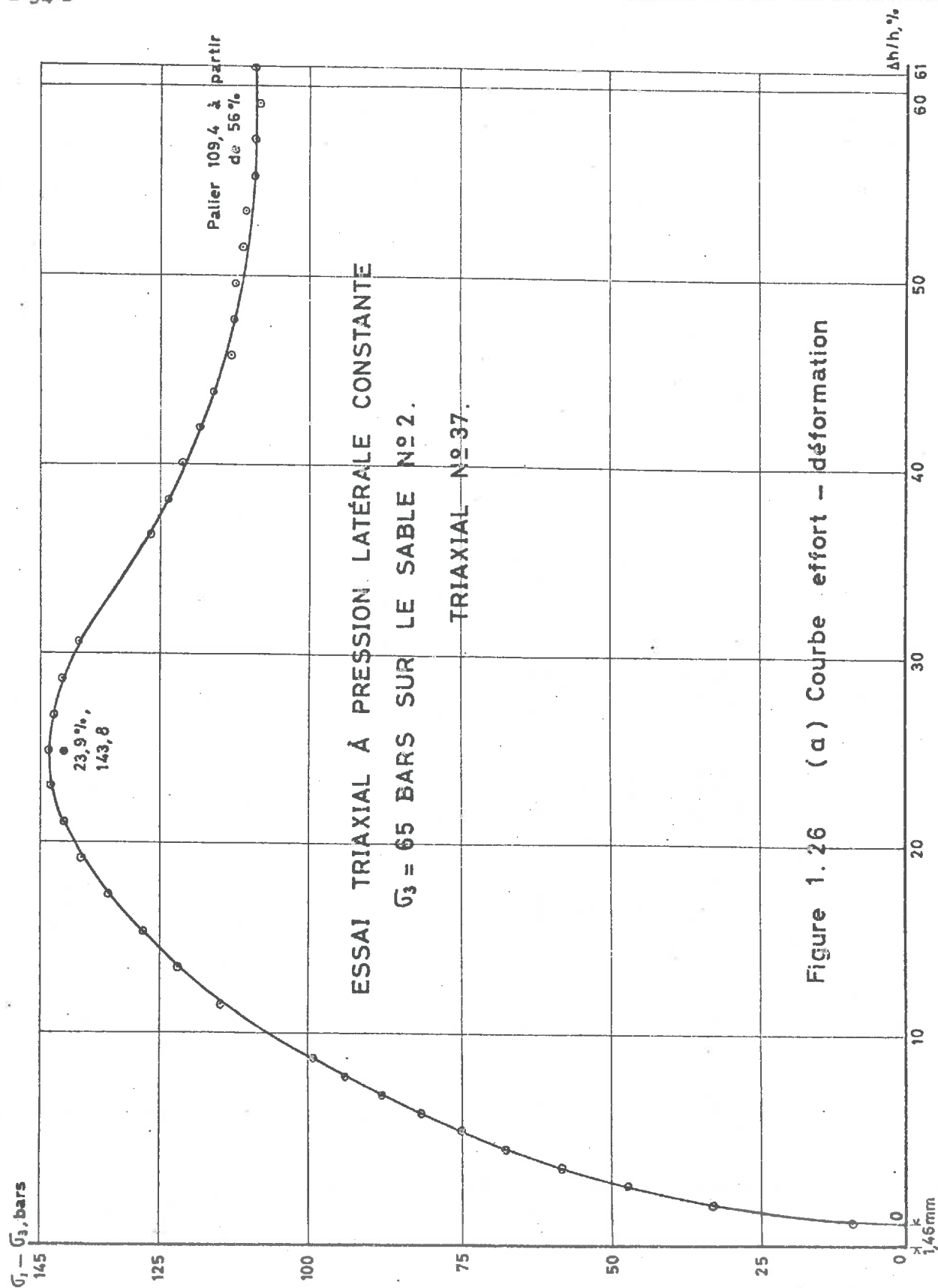


Figure 1.26 (a) Courbe effort - déformation

Pallier 1,97 à partir de 55%

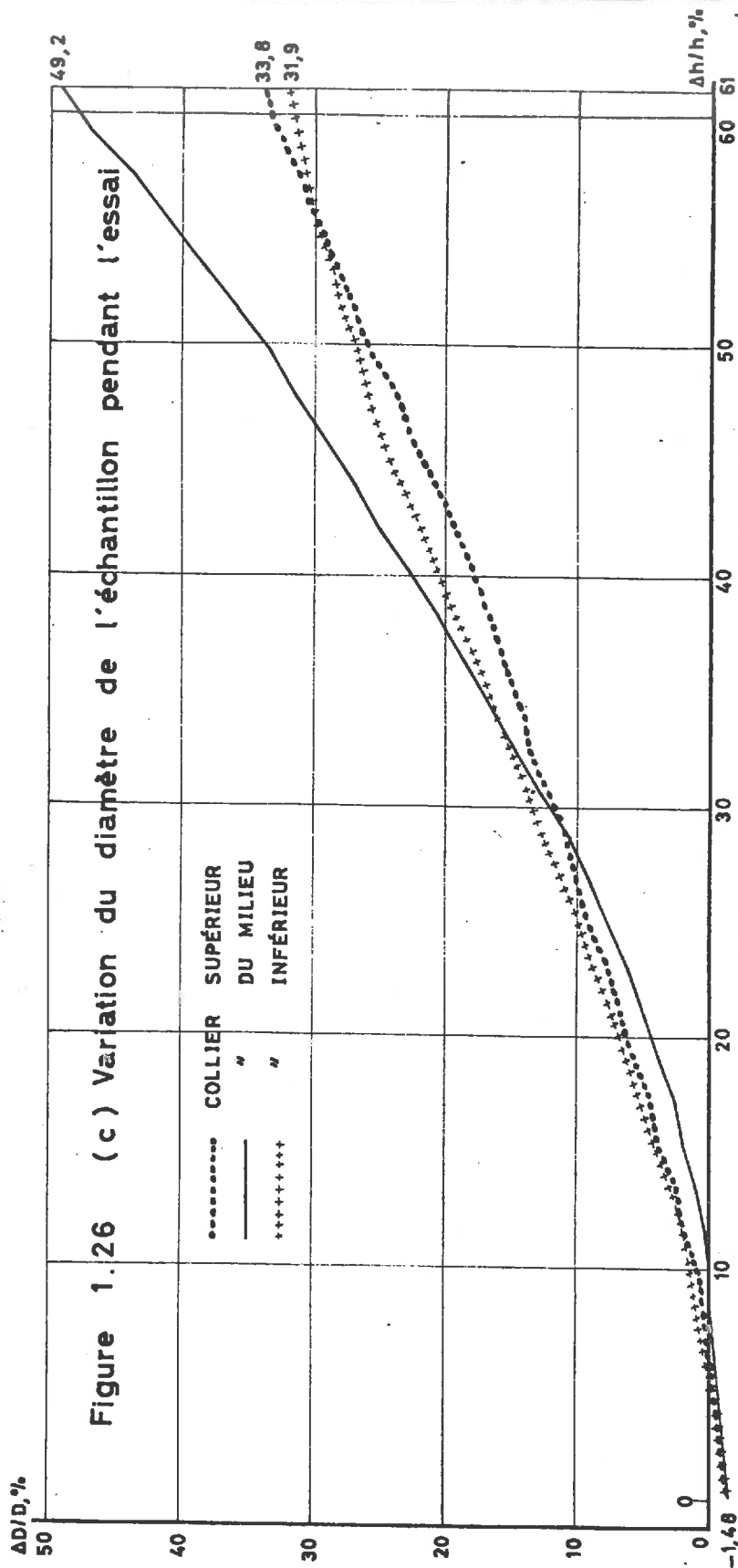
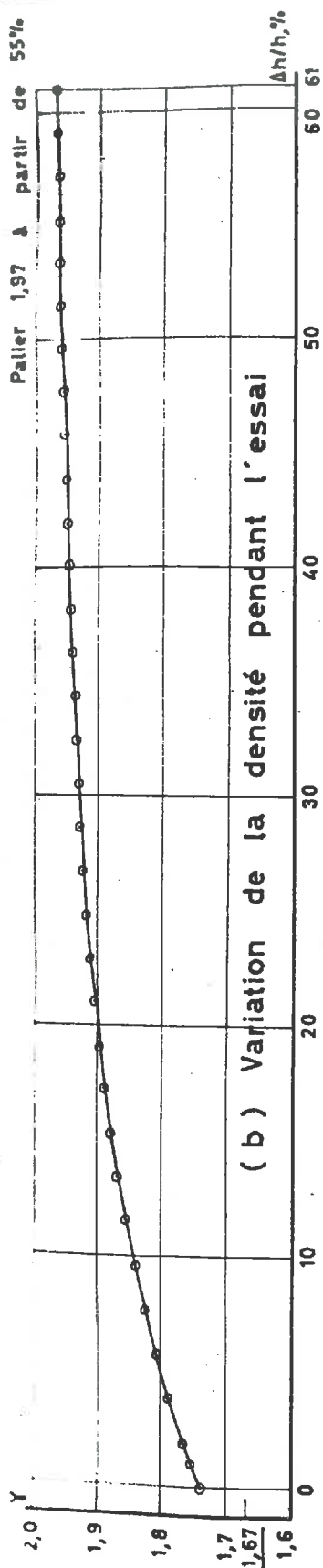


Figure 1.26

ESSAI TRIAXIAL À PRESSION LATÉRALE CONSTANTE $\bar{\sigma}_3 = 105$ BARS SUR LE SABLE N°2.

TRIAxIAL N°35.

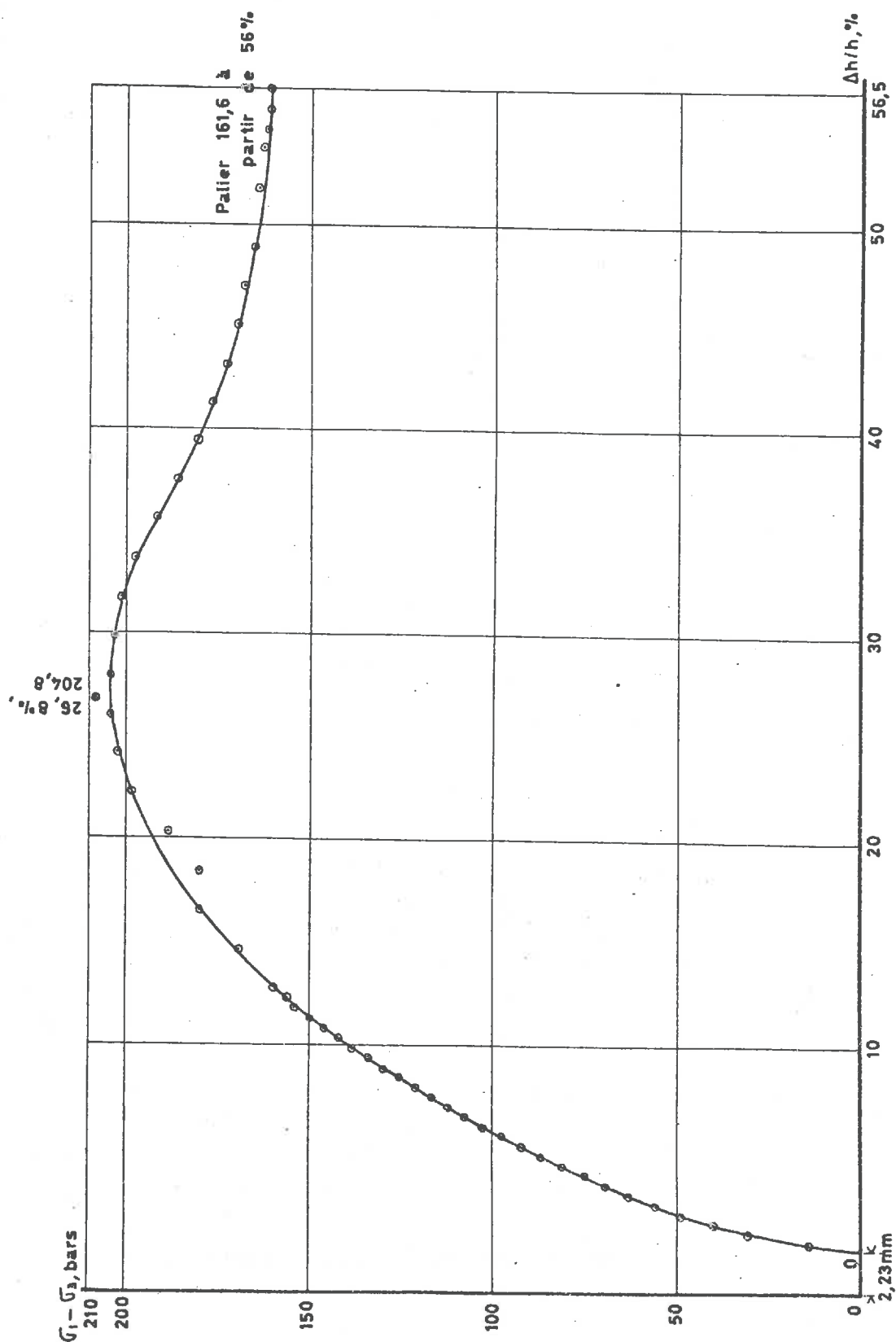


Figure 1.27 (a) COURBE EFFORT - DÉFORMATION

Passer 2,015 à partir de 50%

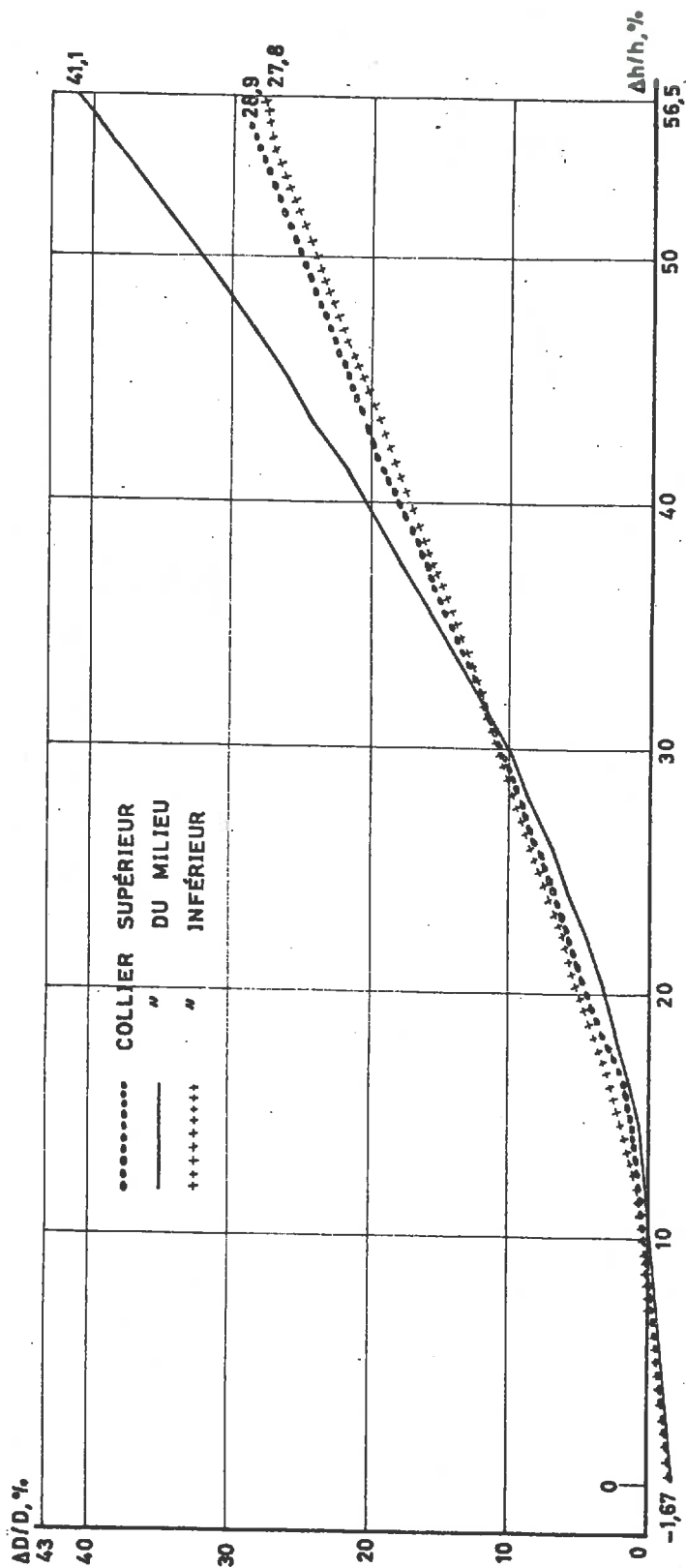
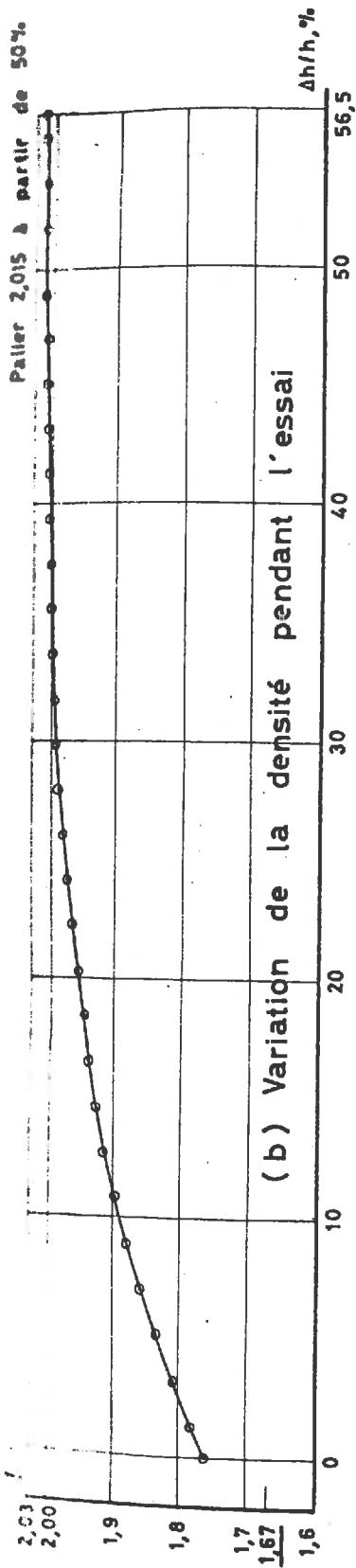
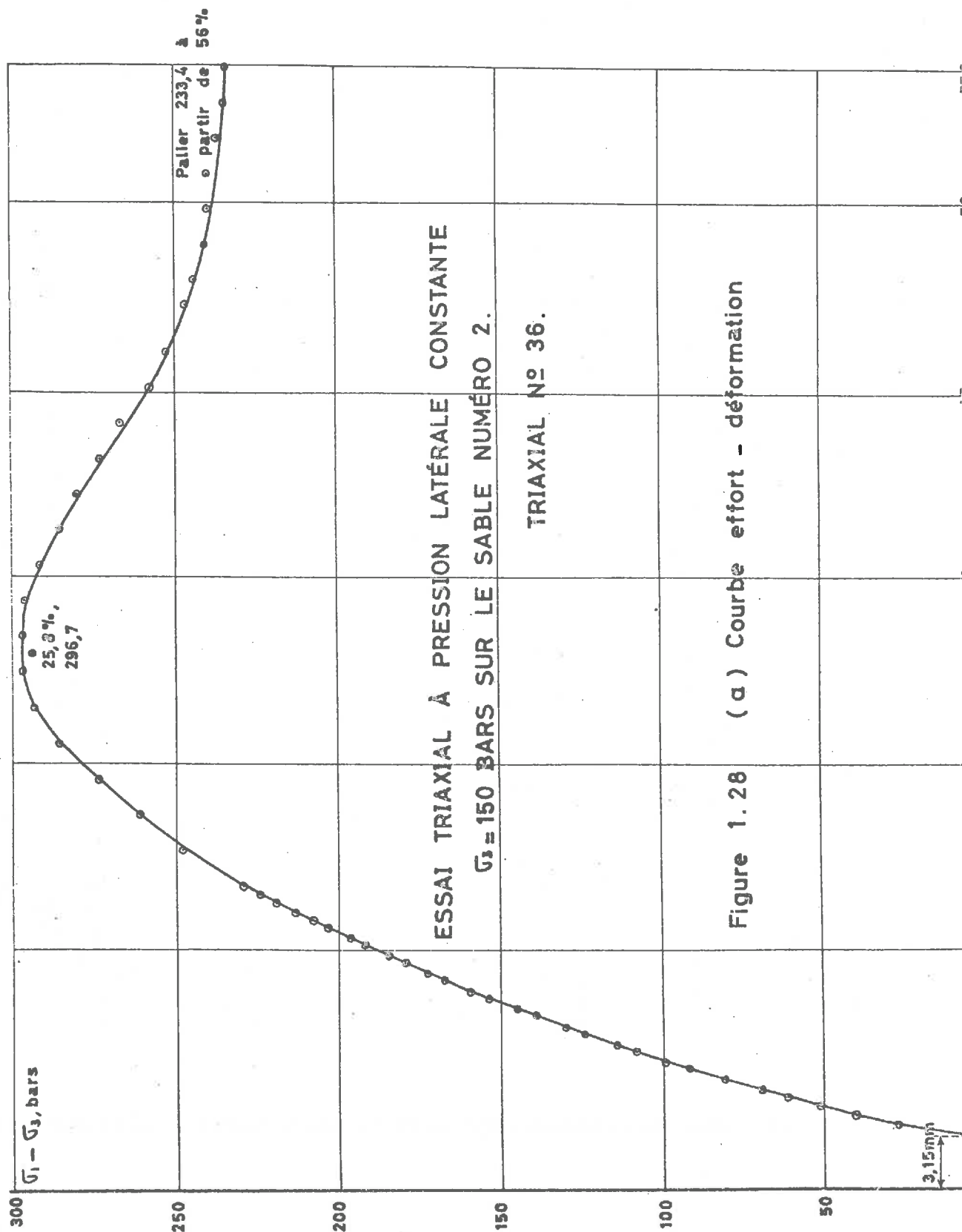
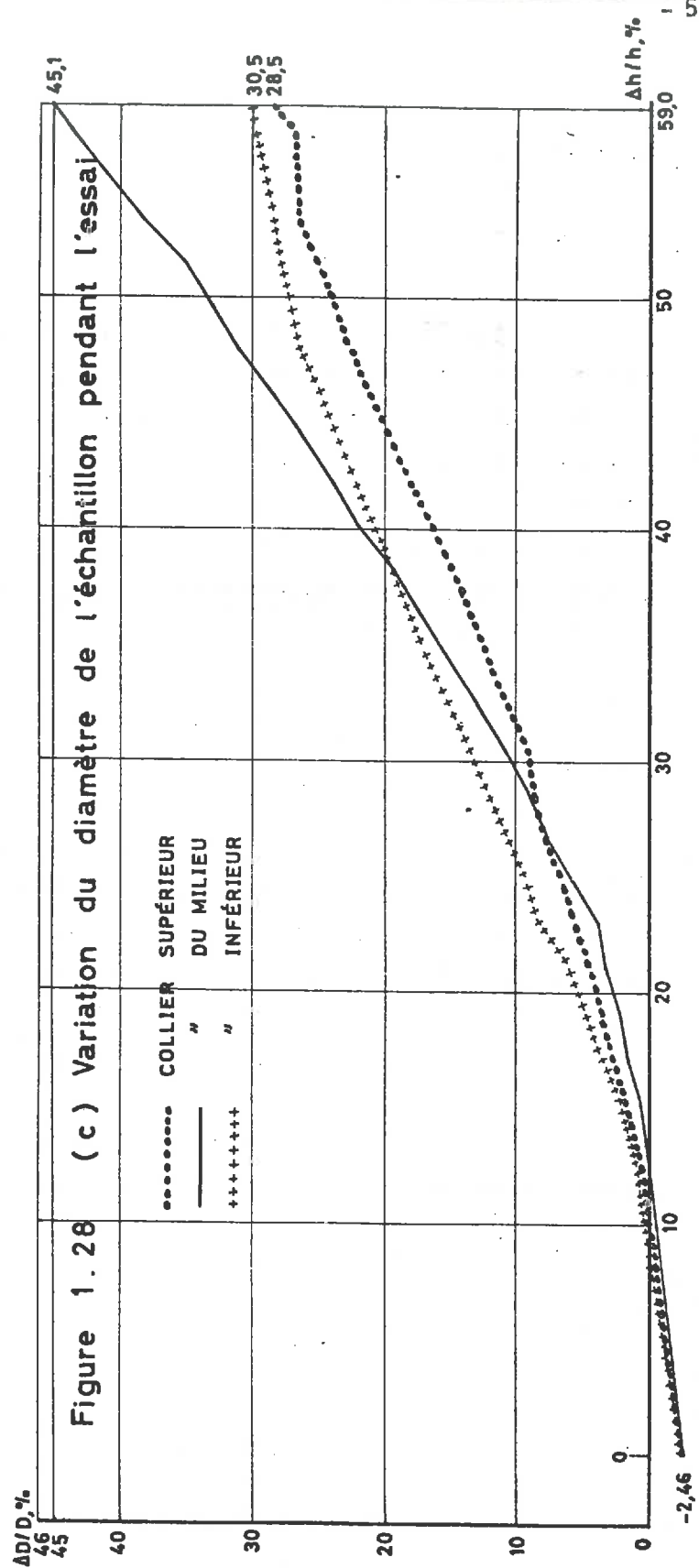
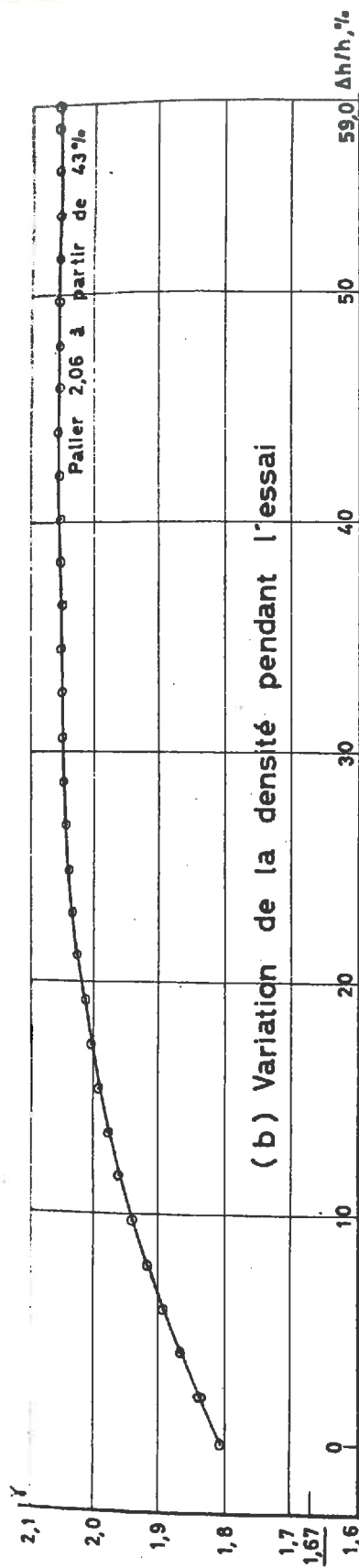


Figure 1.27 (c) Variation du diamètre de l'échantillon pendant l'essai





La figure 1.23 suggère que $(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum serait une fonction linéaire de σ_3 .

Sable n° 2 :

Les courbes (a) des figures 1.24 à 1.28 représentent la contrainte $\sigma_1 - \sigma_3$ en fonction de la variation relative de hauteur $\Delta h/h$ de l'échantillon au cours d'essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante sur le sable n° 2. Les pressions latérales constantes pour ces essais étaient de 10 bars, 25 bars, 65 bars, 105 bars et 150 bars. La contre-pression créée à l'intérieur de l'échantillon est de 5 bars. Le maximum des courbes est net. L'abscisse $\Delta h/h$ correspondant au maximum de $\sigma_1 - \sigma_3$ augmente avec σ_3 jusqu'à $\sigma_3 = 120$ bars environ ; au-delà, elle décroît avec σ_3 (cf. fig. 1.20). Dans l'intervalle où cette abscisse augmente avec $(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum, elle croît moins vite que la contrainte maxima (cf. fig. 1.21).

L'abscisse $\Delta h/h$ à partir de laquelle on a le palier de $\sigma_1 - \sigma_3$ est pratiquement la même pour ces essais, et est égale à 55 % environ, sauf pour l'essai à $\sigma_3 = 10$ bars, pour lequel ce palier paraît avoir lieu plus tôt (cf. fig. 1.24 (a)).

Le rapport $(\sigma_1 - \sigma_3)$ palier / $(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum va en croissant avec σ_3 jusqu'à $\sigma_3 = 100$ bars environ, puis décroît après (cf. fig. 1.22).

σ_3 , bars	25	65	105	150
$(\sigma_1 - \sigma_3)$ palier, bars	34,6	109,4	151,6	233,4
$(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum, bars	50,6	143,8	204,8	296,7
$(\sigma_1 - \sigma_3)$ pal./ $(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum	0,685	0,760	0,790	0,787

Tableau 1.6. Sable n° 2 : rapport $(\sigma_1 - \sigma_3)$ palier / $(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum pour différentes valeurs de σ_3 .

La figure 1.23 suggère que $(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum serait une fonction linéaire de σ_3 .

1.5.2. Courbes intrinsèques des matériaux.

Sable n° 1 :

La figure 1.29 montre les cercles de rupture relatifs aux maxima de $\sigma_1 - \sigma_3$ obtenus au cours d'essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante effectués sur le sable n° 1, ainsi que la courbe intrinsèque construite à partir de ces cercles.

Nous remarquons une diminution de l'angle de frottement interne φ du matériau avec la pression σ_3' de l'essai, cette décroissance s'effectuant de plus en plus lentement à mesure que σ_3' augmente :

σ_3' , bars	0	5	10	20	60	100	145
$(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum, bars		14,5	27,1	48,6	119,3	199,4	277,2
φ , degrés	40,0	36,0	34,0	31,5	30,0	29,0	28,2

Tableau 1.7. Données numériques relatives à la courbe intrinsèque du sable n° 1 pour les maxima de $\sigma_1 - \sigma_3$ dans les essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante.

La figure 1.30 présente les cercles de rupture relatifs aux paliers de $\sigma_1 - \sigma_3$ obtenus au cours d'essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante effectués sur le sable n° 1, et la courbe intrinsèque qui s'en déduit. L'angle de frottement interne φ du matériau est ici constant. Les données numériques servant au tracé de cette figure sont résumées dans le tableau suivant :

ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE Sable du laboratoire, densité initiale 1,57 Diagramme de rupture de Mohr aux maxima de $\sigma_1 - \sigma_3$

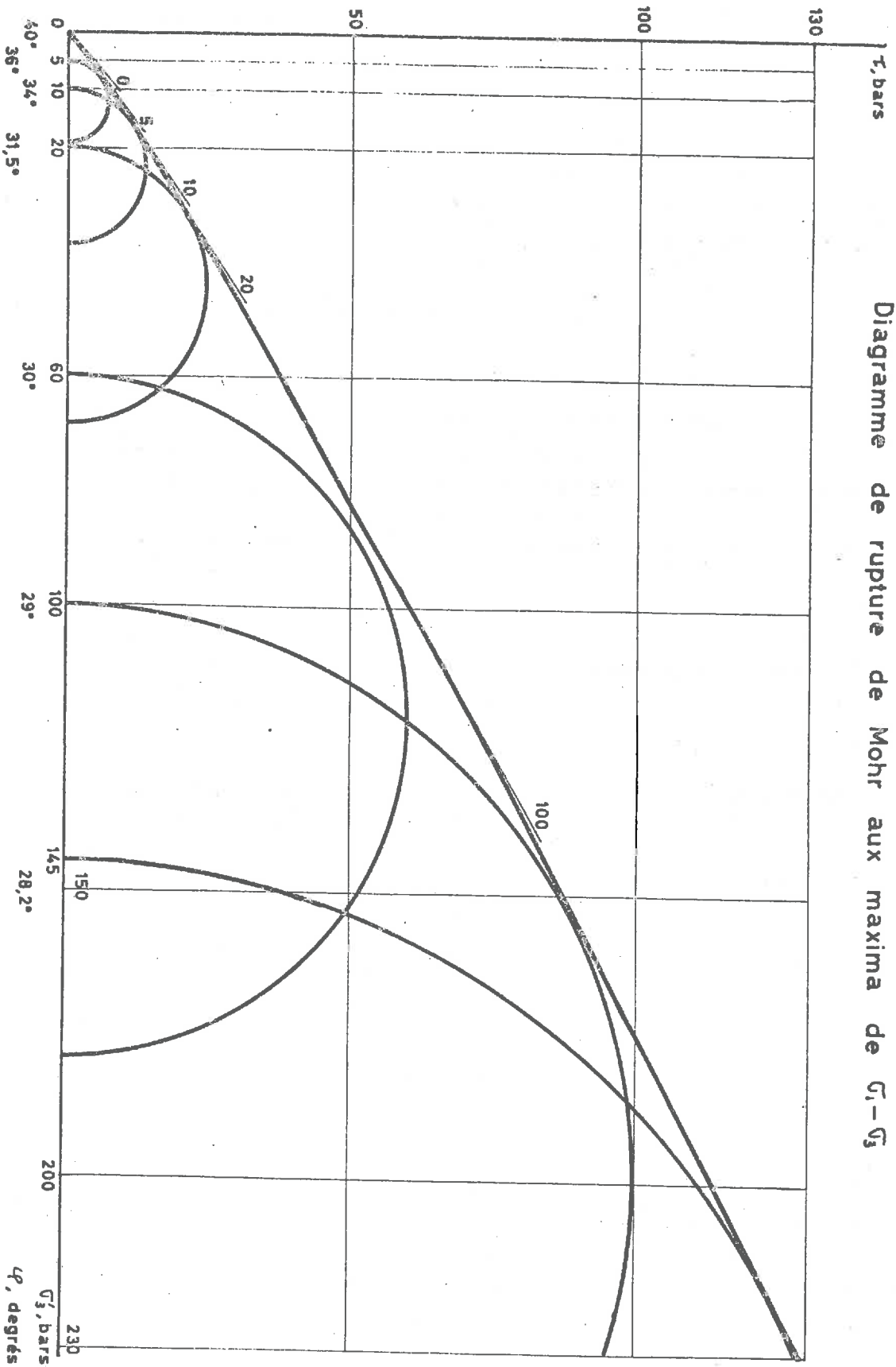
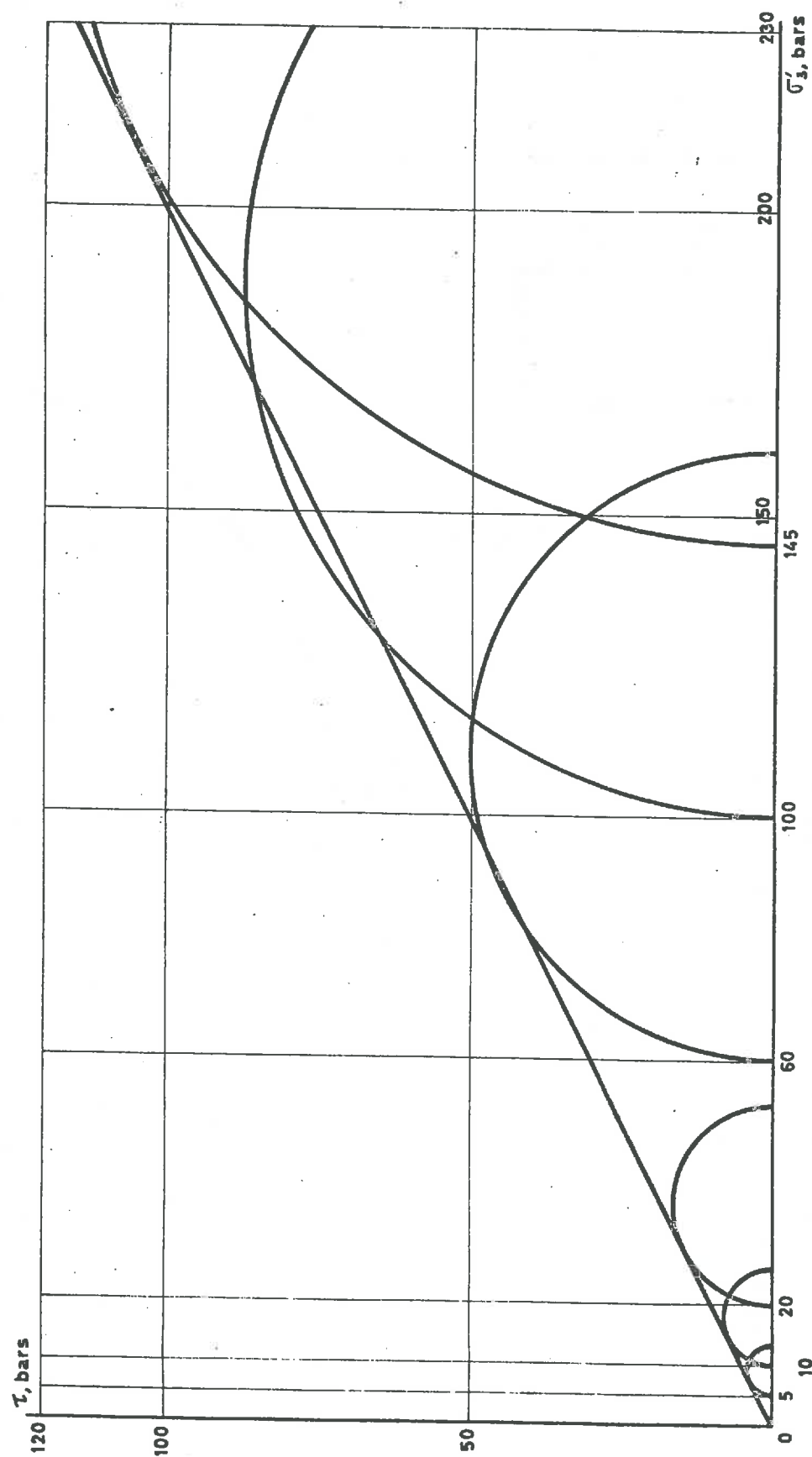


Figure 1.29

ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE

Sable du laboratoire, densité initiale 1,57

Diagramme de rupture de Mohr aux paliers de $\sigma_1 - \sigma_3$



ϕ CONSTANT = 26°

Figure 1.30

ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION LATÉRALE $\bar{\sigma}_3$ CONSTANCE

Sable de Loire, densité initiale 1,67

Diagramme de rupture de Mohr aux maxima de $\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3$

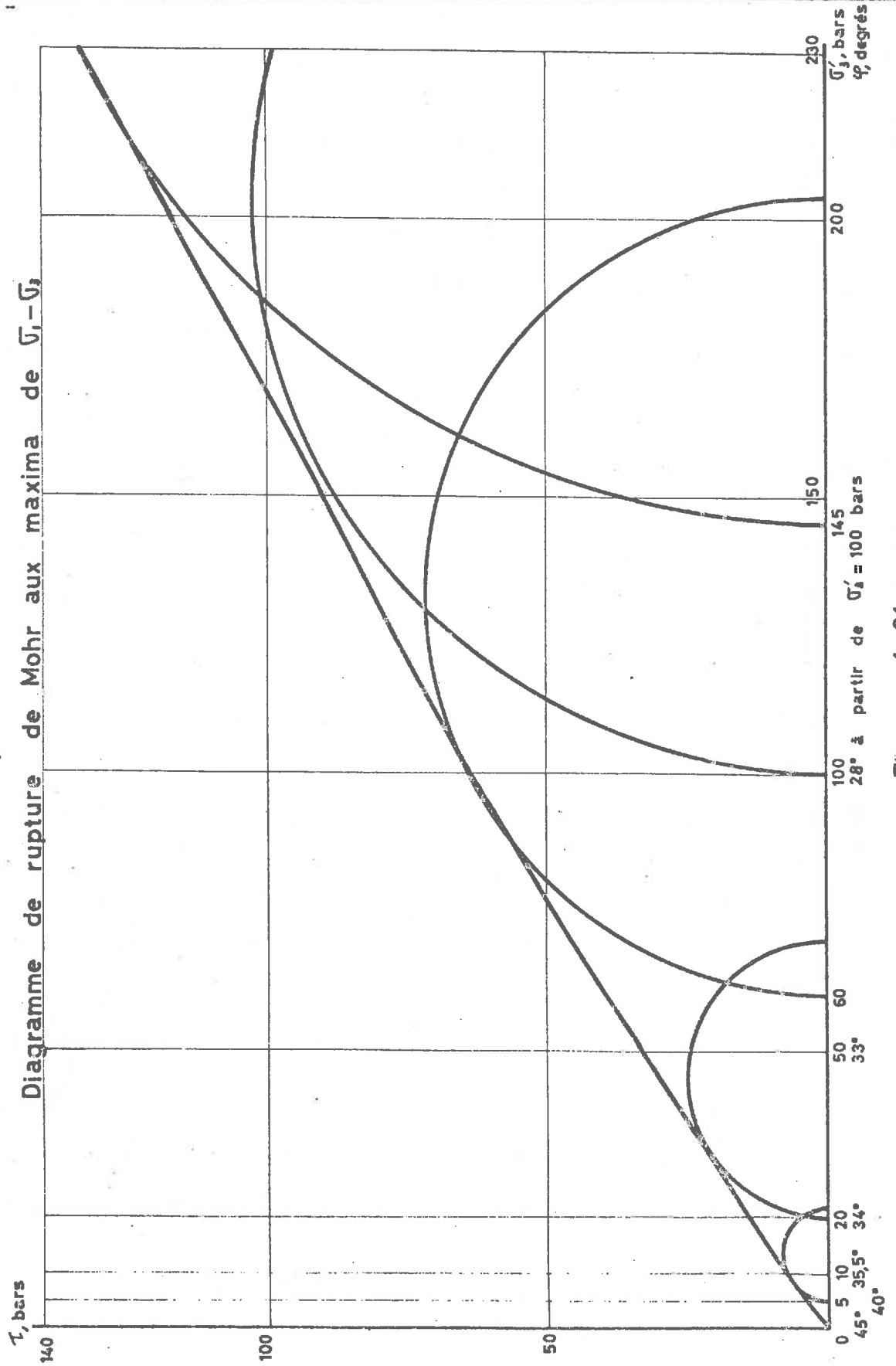


Figure 1.31

ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE

Sable de Loire, densité initiale 1,67

Diagramme de rupture de Mohr aux paliers de $\sigma_1 - \sigma_3$

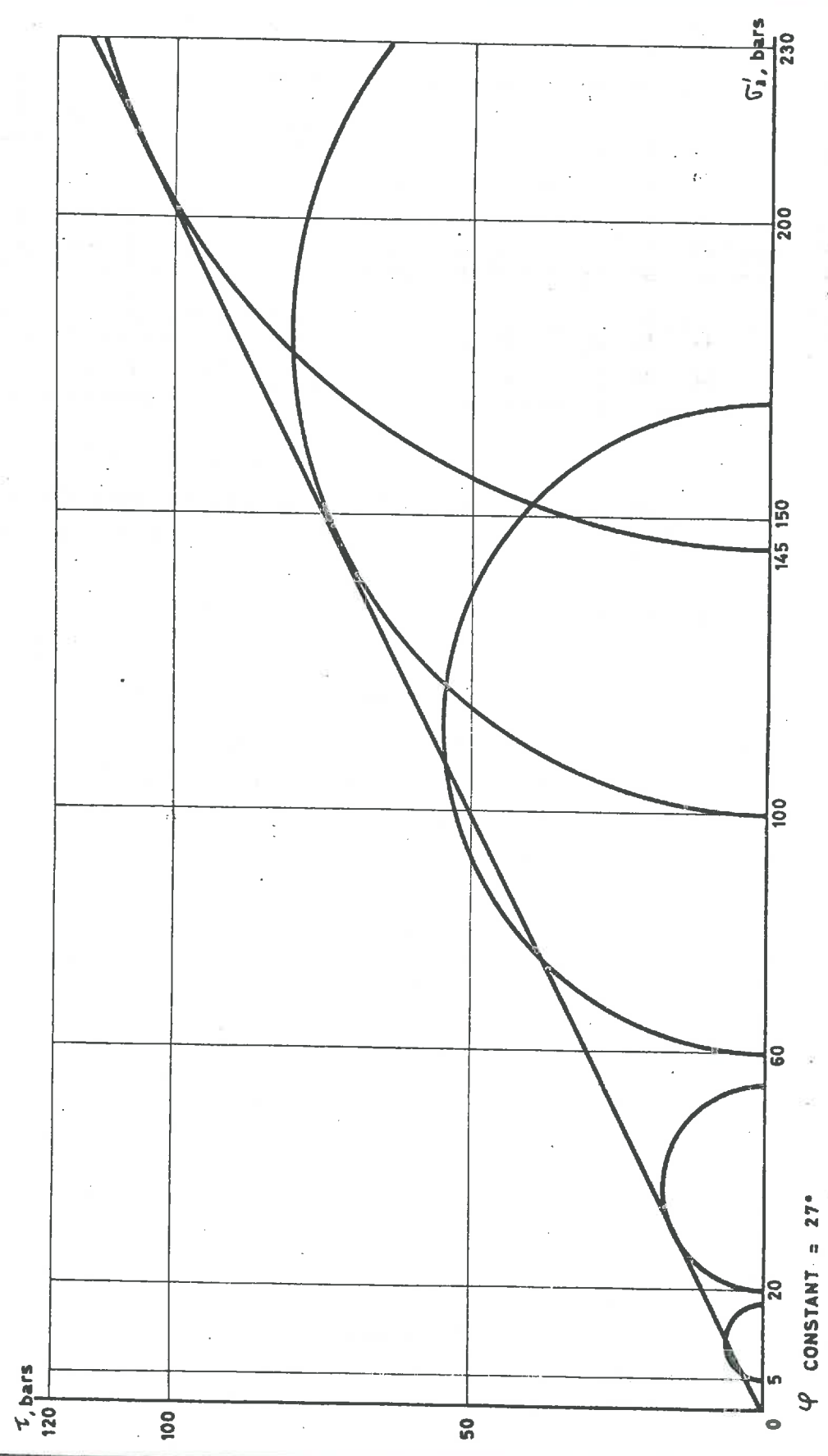


Figure 1.32

σ'_3 , bars	0	5	10	20	60	100	145
$(\sigma_1 - \sigma_3)$ palier, bars		8,2	15,9	32,4	100,4	174,8	235,6
φ , degrés	26	26	26	26	26	26	26

Tableau 1.8. Données numériques relatives à la courbe intrinsèque du sable n° 1 pour les paliers de $\sigma_1 - \sigma_3$ dans les essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante.

Sable n° 2 :

La figure 1.31 montre les cercles de rupture relatif aux maxima de $\sigma_1 - \sigma_3$ obtenus d'après nos essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante effectués sur le sable n° 2, ainsi que la courbe intrinsèque construite à partir de ces cercles.

Ici encore, on a une diminution de l'angle de frottement interne φ du matériau avec la pression σ'_3 de l'essai, cette décroissance s'effectuant de plus en plus lentement à mesure que σ'_3 augmente :

σ'_3 , bars	0	5	10	20	50	60	100	145
$(\sigma_1 - \sigma_3)$ maximum, bars		17,8		50,6		143,8	205,0	296,7
φ , degrés	45,0	40,0	35,5	34,0	33,0		28,0	28,0

Tableau 1.9. Données numériques relatives à la courbe intrinsèque du sable n° 2 pour les maxima de $\sigma_1 - \sigma_3$ dans les essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante.

Sur la figure 1.32 on peut voir les cercles de rupture relatifs aux paliers de $\sigma_1 - \sigma_3$ obtenus avec des essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante effectués sur le sable n° 2, ainsi que la courbe intrinsèque construite à partir de ces cercles. On remarquera la constance de l'angle de frottement interne φ , qui est ici égal à 27° .

Les données numériques relatives à ce cas sont présentées dans le tableau 1.10 ci-après :

σ_3' , bars	0	5	20	60	100	145
($\sigma_1 - \sigma_3$) palier, bars		12,8	34,6	109,4	174,8	233,4
φ , degrés	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0

Tableau 1.10. Données numériques relatives à la courbe intrinsèque du sable n° 2 pour les paliers de $\sigma_1 - \sigma_3$ dans les essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante.

1.5.3. Variation de la densité pendant les essais.

Sable n° 1 :

La variation de la densité du sable n° 1 pendant les essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante est représentée par les courbes (b) des figures 1.14 à 1.19. Pour tous ces essais la densité initiale lors de la mise en place du sable est de 1,57. La contre-pression créée à l'intérieur de l'échantillon est de 5,0 bars.

La densité tend toujours vers un palier vers la fin des essais, sauf pour l'essai à $\sigma_3 = 25$ bars (cf. fig. 1.16 (b)). Vers la fin de ce dernier essai, lorsque la contrainte

$\sigma_1 - \sigma_3$ devient constante, la densité continue encore à monter et nous n'obtenons pas un palier de la courbe densité à la fin de l'essai, qui est pourtant poussé jusqu'à la déformation axiale $\Delta h/h = 57,6 \%$. La densité atteint alors la valeur 1,639. C'est le seul essai où la courbe densité présente un minimum vers son milieu ; ce minimum a lieu à $\Delta h/h = 32,9 \%$ et a la valeur 1,613, supérieure à la densité de mise en place. Le maximum est égal à 1,631 et a lieu à $\Delta h/h = 8,1 \%$.

Pour les deux essais à $\sigma_3 = 10$ bars (cf. fig. 1.14 (b)) et $\sigma_3 = 15$ bars (cf. fig. 1.15 (b)), la densité croît pour atteindre un maximum avant de tendre vers le palier final. Le maximum a lieu vers le début de l'essai ($\Delta h/h = 1,9 \%$) et a la valeur 1,593 pour l'essai à $\sigma_3 = 10$ bars et 1,605 pour l'essai à $\sigma_3 = 15$ bars ; le palier final, de 1,490 pour l'essai à $\sigma_3 = 10$ bars et 1,520 pour celui à $\sigma_3 = 15$ bars, est inférieur à la densité de mise en place.

Pour les essais à $\sigma_3 \geq 65$ bars, la densité ne cesse de monter depuis le début de l'essai jusqu'à ce qu'elle atteigne un palier final. Ce palier est très peu supérieur à 1,847 pour l'essai à $\sigma_3 = 65$ bars (cf. fig. 1.17 (b)) ; il est égal à 1,95 pour l'essai à $\sigma_3 = 105$ bars (cf. fig. 1.18 (b)) et à 1,97 pour l'essai à $\sigma_3 = 150$ bars (cf. fig. 1.19 (b)).

Le maximum de la courbe de densité, lorsqu'il existe, ne correspond à aucune particularité de la courbe effort-déformation, et le maximum de cette dernière courbe ne correspond à aucune particularité de la première.

Nous avons présenté sur la figure 1.33 la densité du sable à la fin de chaque essai en fonction de la pression latérale σ_3 sous laquelle l'essai s'est effectué.

Sable n° 2 :

Les courbes (b) des figures 1.24 à 1.28 représentent la variation de la densité du sable n° 2 au cours des essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante. La densité initiale du sable lors de la mise en place est de 1,67. La contre-pression créée à l'intérieur de l'échantillon est de 5 bars.

Pour ce sable encore, la densité tend toujours vers un palier vers la fin des essais, sauf pour l'essai à $\sigma_3 = 25$ bars. L'allure générale de chaque courbe, sauf la courbe de l'essai à $\sigma_3 = 25$ bars, est la même que celle de la courbe relative au sable n° 1 et correspondant à la même pression latérale σ_3 . La courbe correspondant à $\sigma_3 = 25$ bars (fig. 1.25 (b)) est différente de celle relative au sable n° 1 (fig. 1.16 (b)) : alors qu'on observe une densité minimum au cours de l'essai dans le cas du sable n° 1, la densité du sable n° 2 ne cesse de croître tout au long de l'essai, et à la fin de l'essai l'augmentation de la densité est beaucoup plus rapide dans le cas du sable n° 1.

Pour l'essai à $\sigma_3 = 10$ bars (cf. fig. 1.24 (b)), la densité croît, atteint un maximum, puis décroît et tend vers un palier final. Ce palier, de valeur 1,63, est inférieur à la densité de mise en place.

Pour les essais à $\sigma_3 \geq 65$ bars, la densité monte jusqu'à ce qu'elle atteigne un palier final dont la valeur est d'autant plus élevée que la pression latérale à laquelle est soumis l'échantillon pendant l'essai est plus grande.

La figure 1.33 présente la densité du matériau à la fin de chaque essai en fonction de la pression latérale σ_3 à laquelle l'essai s'est effectué.

ESSAIS TRIAXIAUX SUR DEUX SABLES

Densités à la fin des essais

en fonction de σ_3 (pour les essais à pression
latérale σ_3 constante)

ou de σ_m (pour les essais à pression
moyenne σ_m constante)

○—○—○	SABLE N° 1	APRÈS	ESSAIS	À	PRESSION	LATÉRALE	σ_3	CONSTANTE
□—□—□	"	"	"	"	"	MOYENNE	σ_m	"
△—△—△	"	"	2	"	"	LATÉRALE	σ_3	"

Densités γ à la fin des essais

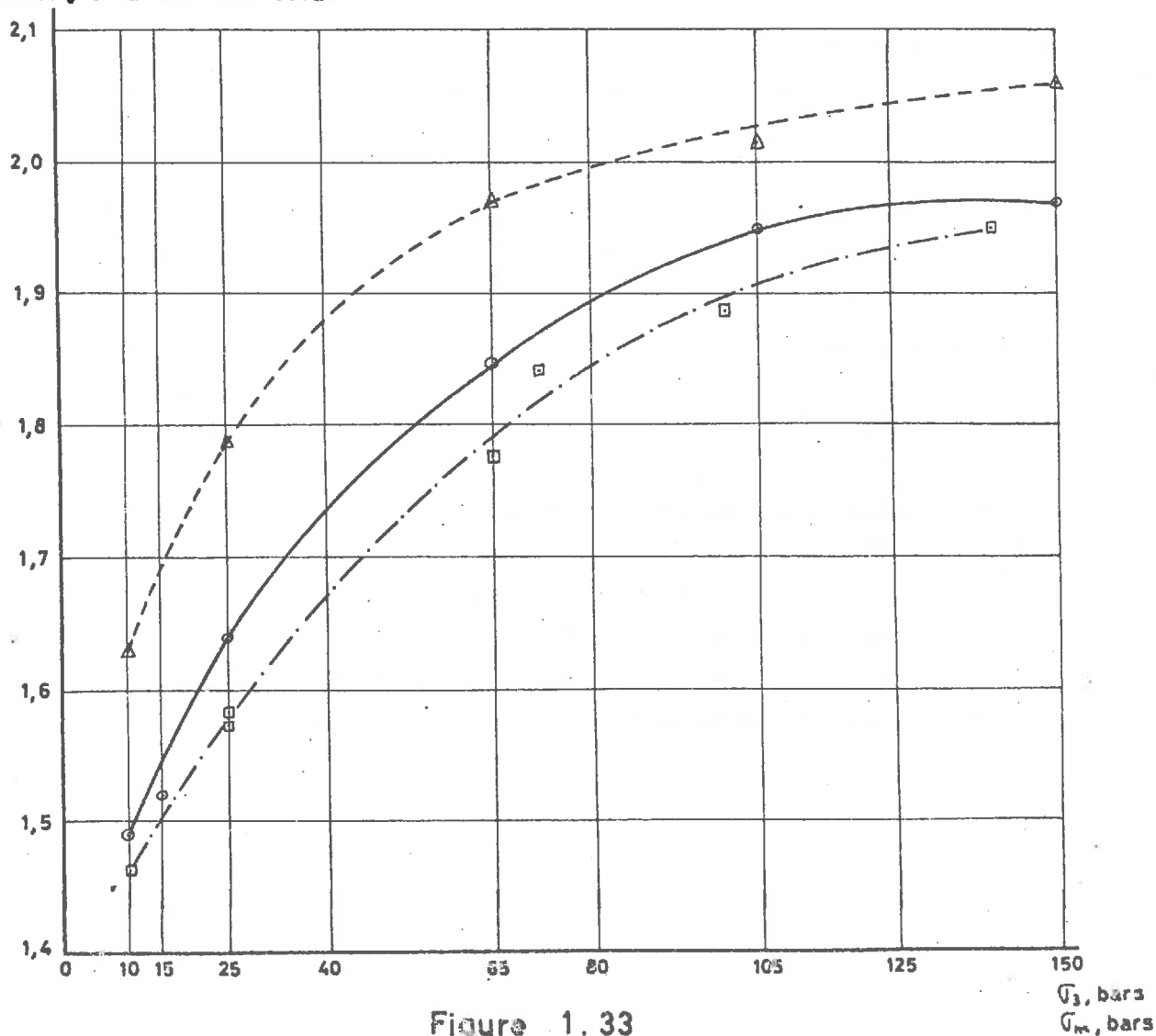


Figure 1.33

1.5.4. Modifications granulométriques dues aux essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante.

Sable n° 1 :

La figure 1.7 présente les courbes granulométriques du sable n° 1 dans les états suivants :

- avant d'être soumis aux essais ;

- après les essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante avec $\sigma'_3 = 5$ bars, 10 bars, 20 bars, 60 bars, 100 bars et 145 bars. Pour l'essai à $\sigma'_3 = 100$ bars, un incident mécanique nous a obligé d'arrêter l'essai 2 heures 15 minutes après le début de l'écrasement, au moment où la déformation axiale relative $\Delta h/h$ de l'échantillon atteint la valeur 14,3 %. Nous avons ensuite procédé à un deuxième essai à la même pression

$\sigma'_3 = 100$ bars et avons pu pourvoir l'essai jusqu'à une déformation axiale relative de 55,8 %, soit une déformation du même ordre de grandeur que pour nos autres essais. Cet incident nous a permis d'obtenir deux courbes granulométriques différentes pour l'essai à $\sigma'_3 = 100$ bars, l'une correspondant à une déformation axiale relative de 14,3 % et à un temps d'écrasement de 2 h 15 mn, et la deuxième correspondant à une déformation axiale relative de 55,8 % et à une durée d'écrasement de 9 h 01 mn.

Le tableau 1.11 ci-après présente les résultats numériques qui ont permis de tracer les courbes de la figure 1.7.

SABLE N° 1																
Après essai à pression latérale σ_3 constante de (bars)																
Avant essai																
Pourcentage pondéral de grains de diamètre inférieur à, (millimètres)																
2	1	0,5	0,2	0,1	0,08	0,05	0,04	0,026	0,018	0,01	0,008	0,005	0,003			
100,0	80,6	7,0	0,36	0,08	0											
5	84,5	10,1	2,3	0,84												
10	89,3	14,6	4,4	1,9												
20	89,5	20,5	8,4	4,3												
60	89,7	42,7	22,8	13,6	12,2	9,0	6,4	5,0	3,4	2,0	1,0	0,7	0,4			
100 (1)	85,9	29,2	10,7	5,1												
100 (2)	93,0	59,0	38,2	26,2	23,8	18,3	13,8	9,4	7,4	2,1			1,5			
145	94,4	67,0	47,7	34,8	33,0	27,1	22,0	16,5	12,5	7,7	5,5	4,0	2,9			

Tableau 1.11. Sable n° 1 : résultats granulométriques obtenus après des essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante.

(1) Durée de l'écrasement = 2 h 15 mn, $\Delta h/h = 14,3 \%$.

(2) Durée de l'écrasement = 9 h 01 mn, $\Delta h/h = 55,8 \%$.

On remarquera la profonde modification du diamètre des grains apportée par l'essai à $\sigma'_3 = 145$ bars : cet essai a créé 35 %, en poids, de grains de diamètre inférieur à 0,1 mm ; avant l'essai, il n'y avait pratiquement pas de ces grains dans l'échantillon. On remarquera en outre l'écart granulométrique entre les deux essais à $\sigma'_3 = 100$ bars dont les durées d'écrasement n'étaient pas la même. L'essai à $\sigma'_3 = 60$ bars, poursuivi pendant 7 h 10 mn, jusqu'à $\Delta h/h = 45,3$ %, modifie la granulométrie du matériau davantage que l'essai à $\sigma'_3 = 100$ bars, poursuivi pendant 2 h 15 mn, jusqu'à $\Delta h/h = 14,3$ %.

Sur la figure 1.7, les indications relatives à chaque courbe, sauf celles correspondant au sable avant essai, donnent, dans l'ordre, les renseignements suivants : σ'_3 , la valeur $\Delta h/h$ jusqu'à laquelle l'essai a été poussé, la durée de l'écrasement, le numéro d'ordre de l'essai. Exemple : 5,0/60,4/9 h 05/25 veut dire : essai n° 25, effectué à la pression $\sigma'_3 = 5,0$ bars, déformation axiale $\Delta h/h$ atteinte à la fin de l'essai = 60,4 %, durée de l'écrasement = 9 h 05 mn.

La figure 1.34 est encore relative à la granulométrie du sable n° 1. Elle montre le pourcentage pondéral obtenu des grains de diamètre inférieur à des valeurs déterminées après que le sable a été soumis à des essais triaxiaux. Les courbes en trait plein correspondent aux essais à pression latérale constante. Sur l'axe des ordonnées figurent les pressions des essais.

Une partie de la figure 1.35 montre les diamètres d_{10} et d_{60} du sable n° 1 avant qu'il ait été soumis aux essais et après les essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante, avec σ_3 maximum = 150 bars. On remarquera que les essais


 APRÈS ESSAIS À PRESSION MOYENNE \bar{v}_m CONSTANTE

 " " " " LATÉRALE \bar{v}_3 "

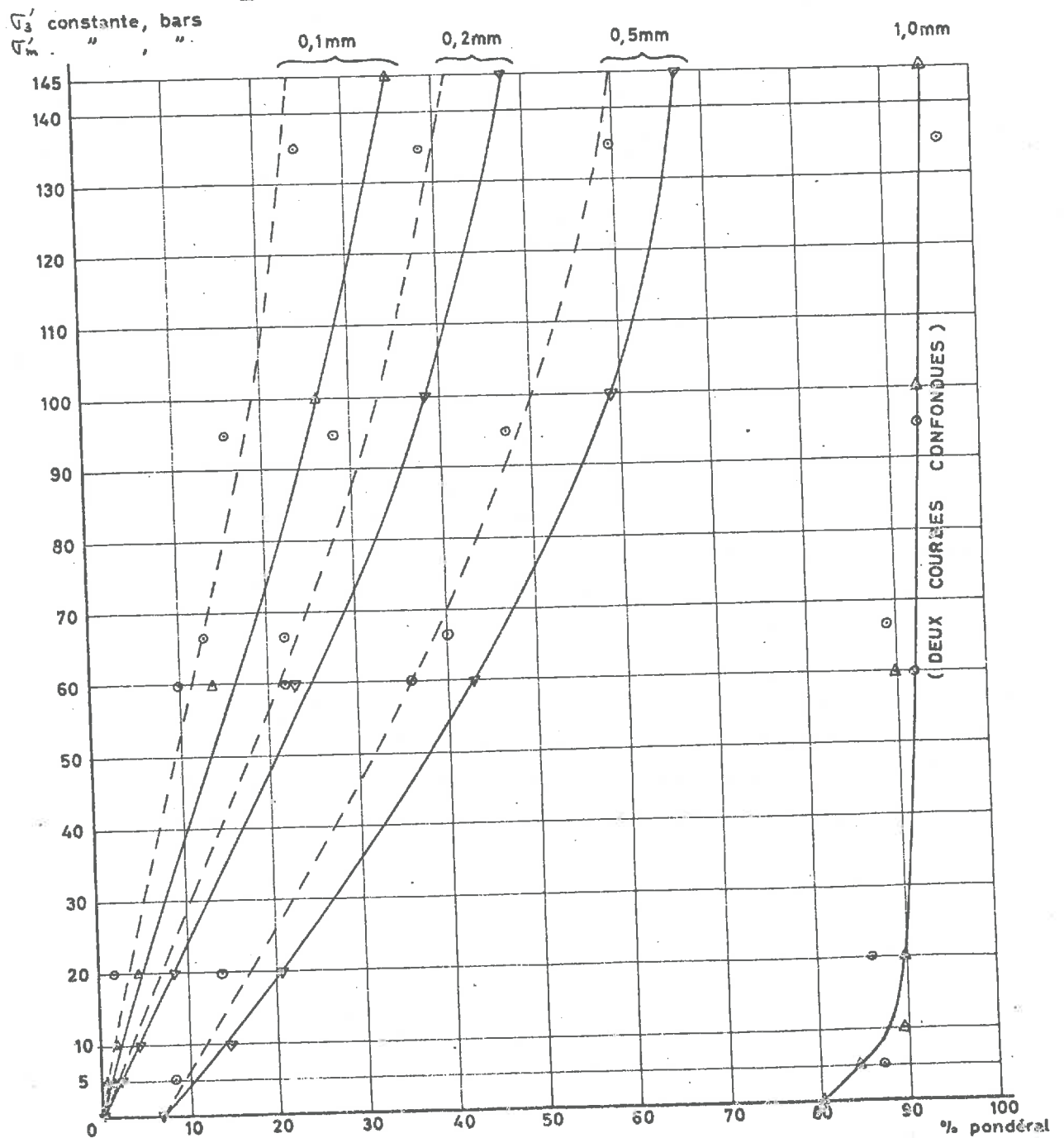


Figure 1. 34

SABLE DU LABORATOIRE

d_{10} et d_{60} avant essai et après des essais triaxiaux

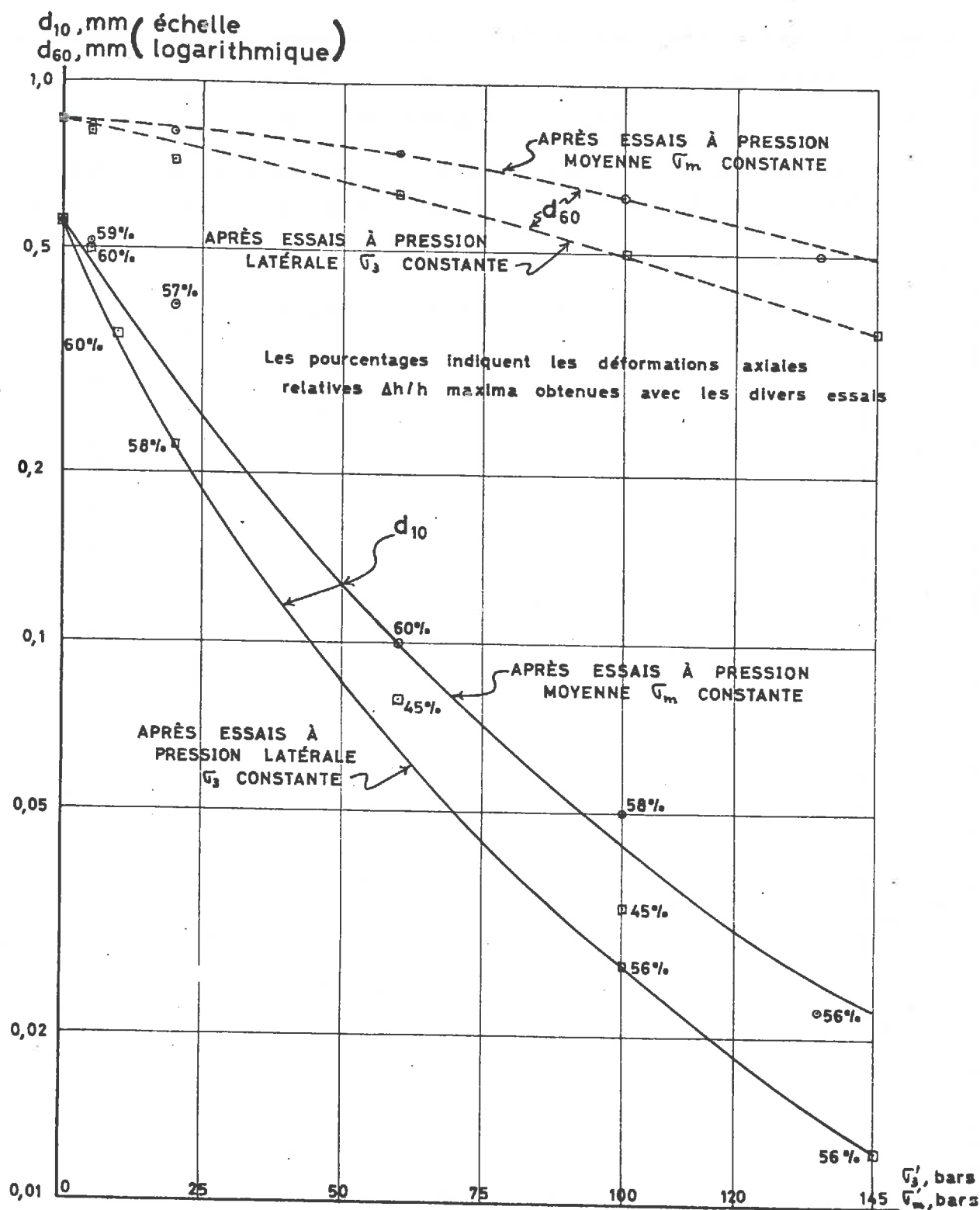


Figure 1. 35

ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE SUR LE SABLE DE LOIRE

Pourcentage pondéral des grains de diamètres d inférieurs à
0,1 , 0,2 , 0,5 , 1,0 et 2,0 mm avant et après les essais

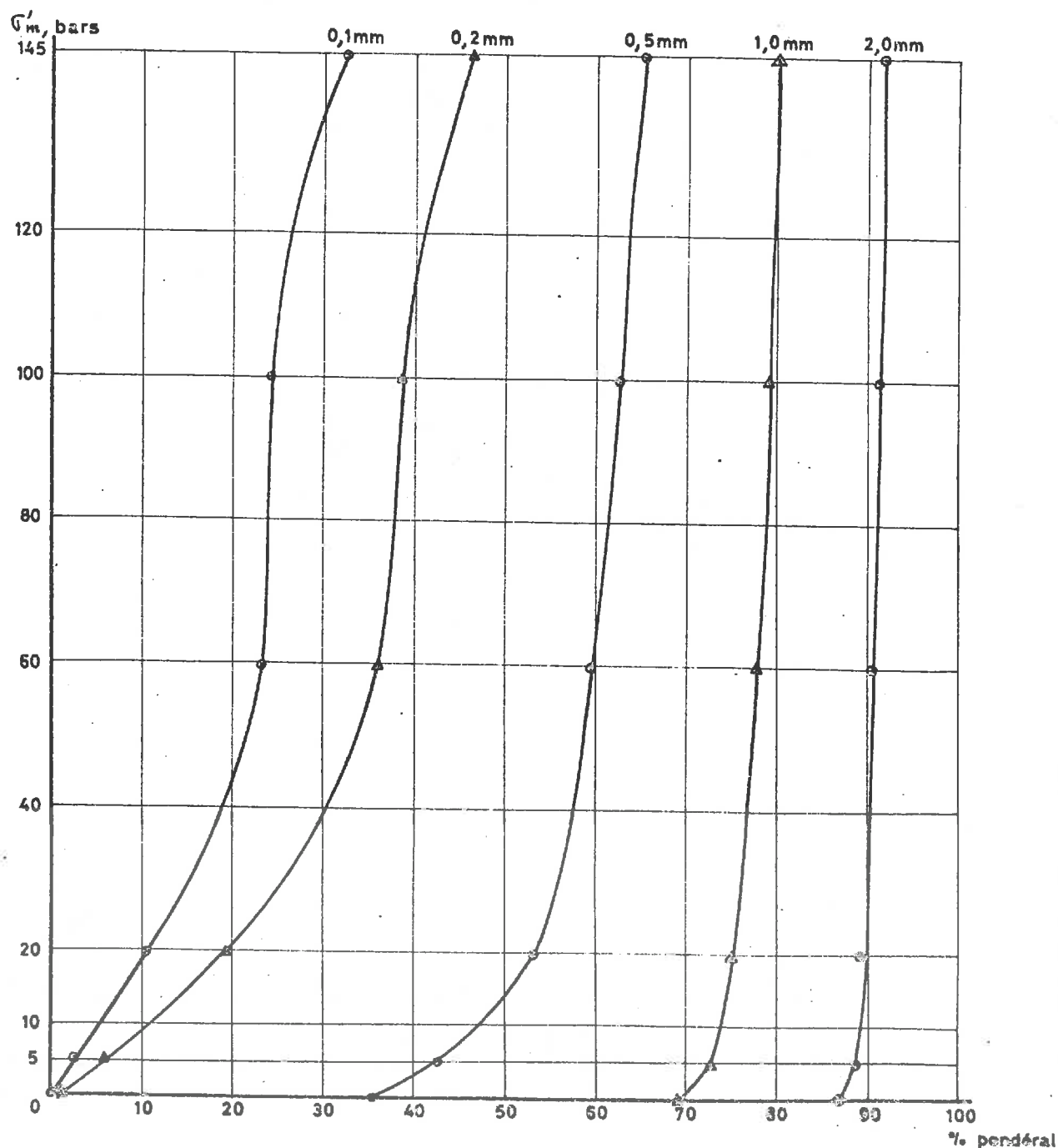


Figure 1.36

SABLE DE LOIRE

d_{10} et d_{60} avant essai et après des essais triaxiaux
à pression latérale σ_3 constante

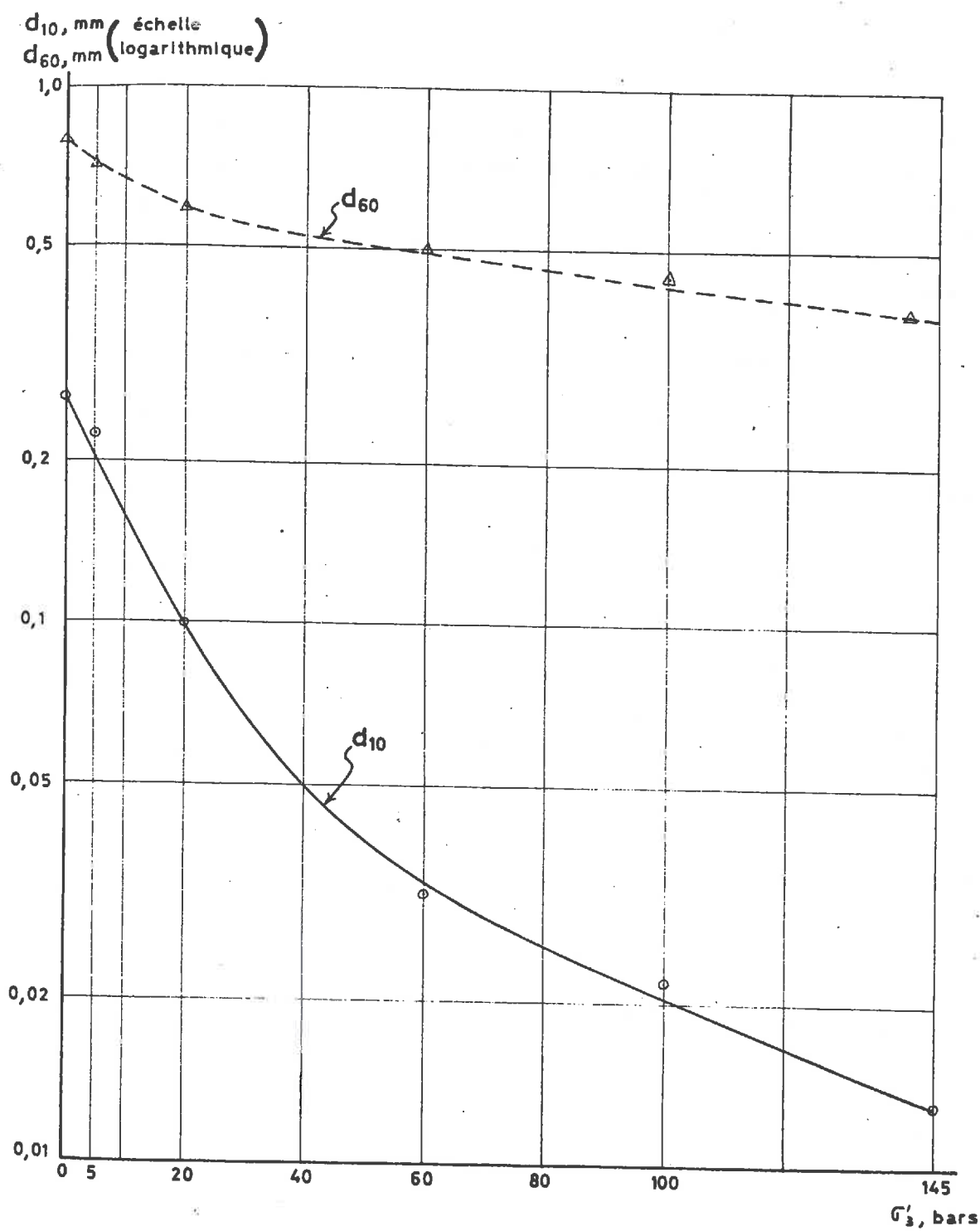


Figure 1.37

modifient beaucoup plus le d_{10} que le d_{60} . Après l'essai à

$\sigma_3 = 150$ bars, d_{10} est passé de 0,56 mm à 0,01 mm, et d_{60} de 0,87 mm à 0,37 mm. Ainsi ces essais tendent à transformer un sable à granulométrie uniforme en un sable à granulométrie variée.

Sable n° 2 :

La figure 1.8 présente les courbes granulométriques du sable n° 2 avant essai et après les essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante avec $\sigma'_3 = 5, 20, 60, 100$ et 145 bars.

Le tableau 1.12 qui suit contient les données numériques servant au tracé de la figure 1.8.

L'essai à $\sigma'_3 = 145,0$ bars a créé 32 %, en poids, de grains de diamètre inférieur à 0,1 mm ; avant l'essai, il n'y avait pratiquement pas de ces grains dans l'échantillon.

Sur la figure 1.8, les conventions relatives aux indications portant sur les courbes sont les mêmes que celles qui s'appliquent à la figure 1.7 et qui ont été exposées précédemment.

La figure 1.36 montre le pourcentage pondéral des grains de diamètre d inférieur à certaines valeurs après que le sable n° 2 a été soumis à des essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante. L'axe des ordonnées porte les pressions σ'_3 des essais.

La variation des diamètres d_{10} et d_{60} du sable n° 2 avec les pressions σ'_3 des essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante auxquels ce sable est soumis, est représentée graphiquement sur la figure 1.37 en coordonnées semi-logarithmiques

		Pourcentage pondéral de grains de diamètre inférieur à, (millimètres)															
SABLE N° 2	Avant essai	10	5	2	1	0,5	0,2	0,1	0,08	0,05	0,041	0,026	0,018	0,01	0,008	0,005	0,003
		100	99,3	86,9	69,0	35,2	1,3	0,17									
Après essai (Date)	5	"	99,5	88,5	72,5	42,4	5,9	2,5									
	20	"	99,7	89,0	74,7	52,8	19,1	10,3	9,3	7,7	5,5	4,2	3,0	1,6	1,1	0,9	0,5
	60	"	99,8	90,4	77,6	59,2	35,7	23,1	22,0	17,5	10,7						
	100	"	99,9	91,0	78,9	62,3	38,3	24,0	23,5	22,3	16,8	13,7	10,1	5,5	3,6	2,4	0,7
	145	"	100,0	91,5	79,7	55,0	46,1	32,3	30,8	26,7	22,0	17,6	13,2	7,65	6,75	4,4	2,9

Tableau 1.12. Sable n° 2 : résultats granulométriques obtenus après des essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante.

Ici encore, les essais modifient beaucoup plus le d_{10} que le d_{60} et transforment facilement un sable à granulométrie uniforme en un sable à granulométrie variée.

1.5.5. Variation du diamètre de l'échantillon pendant les essais.

Afin d'atténuer le frettage des têtes de l'échantillon pendant l'écrasement et de favoriser une déformation latérale uniforme de l'échantillon sur toute sa longueur au cours des essais, nous avons adopté le dispositif d'antifretage décrit au § 1.3. Avec ce dispositif, nous avons pu obtenir une bonne déformation latérale jusqu'à $\Delta h/h \approx 40\%$: dans tout cet intervalle, les diamètres du milieu et des extrémités de l'échantillon augmentent pratiquement de la même quantité (cf. fig. 1.5 et les courbes (c) des figures 1.14 à 1.19 et des figures 1.24 à 1.28). Au-delà, le diamètre du milieu tend à croître plus rapidement que celui des extrémités.

Les figures 1.38, 1.38 a, 1.39, 1.39 a, 1.40 et 1.40 a montrent trois échantillons tels qu'ils se présentent après un essai triaxial. Chaque échantillon est vu dans deux directions perpendiculaires. Le nombre porté par l'étiquette posée au pied de chaque échantillon indique le numéro de l'essai. Un carton portant un quadrillage de 5 x 5 cm est placé derrière chaque échantillon et donne une idée approchée des dimensions des échantillons.

Considérons le diagramme (c) de la figure 1.19 : dans le cas d'une déformation parfaitement cylindrique, la courbe $\Delta D/D$ serait contenue dans le domaine délimité par les deux courbes extrêmes des trois courbes correspondant aux trois colliers. Ce domaine étant assez réduit dans le cas présent, les

écarts entre la déformation théorique et celle obtenue avec notre dispositif d'antifretage sont peu importants.

Sur la figure 1.19 (c) nous avons tracé la courbe $\Delta D/D$ correspondant à la déformation dite en tonneau, déformation qu'on suppose réalisée dans les essais triaxiaux pour lesquels un dispositif d'antifretage n'a pas été prévu. On ne mesure pas le diamètre de l'échantillon à chaque instant, mais on se sert de la formule

$$S_m = S_0 \frac{1 + \Delta h/2h}{1 - \Delta h/h} \quad (1.3)$$

dans laquelle S_m = section maximum de l'échantillon correspondant à une déformation axiale de Δh ,

S_0 = section initiale de l'échantillon,

h = hauteur initiale de l'échantillon,

pour trouver la section à mettre dans les calculs.

Nous voyons que (cf. fig. 1.19 (c)) le diamètre donné par la formule précédente diffère de très loin des diamètres mesurés par nos colliers. Il est toujours plus grand que le diamètre mesuré du milieu de l'échantillon, et à la fin de l'essai l'écart entre les variations des deux diamètres est presque dans le rapport de 2/1 (68,8 % d'augmentation pour l'un et 37,8 % pour l'autre).

1.5.6. Module d'Young au début des essais.

Comme la pente de la courbe effort-déformation d'un matériau pulvérulent soumis à un essai triaxial ne cesse de varier durant l'essai, nous avons pris la convention suivante pour définir le module d'Young du matériau :

Pour un essai donné, nous prenons comme module d'Young la pente de la sécante issue de l'origine et passant par le

ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE SUR DEUX SABLES

Variation du module d'Young E avec la pression effective σ'_3

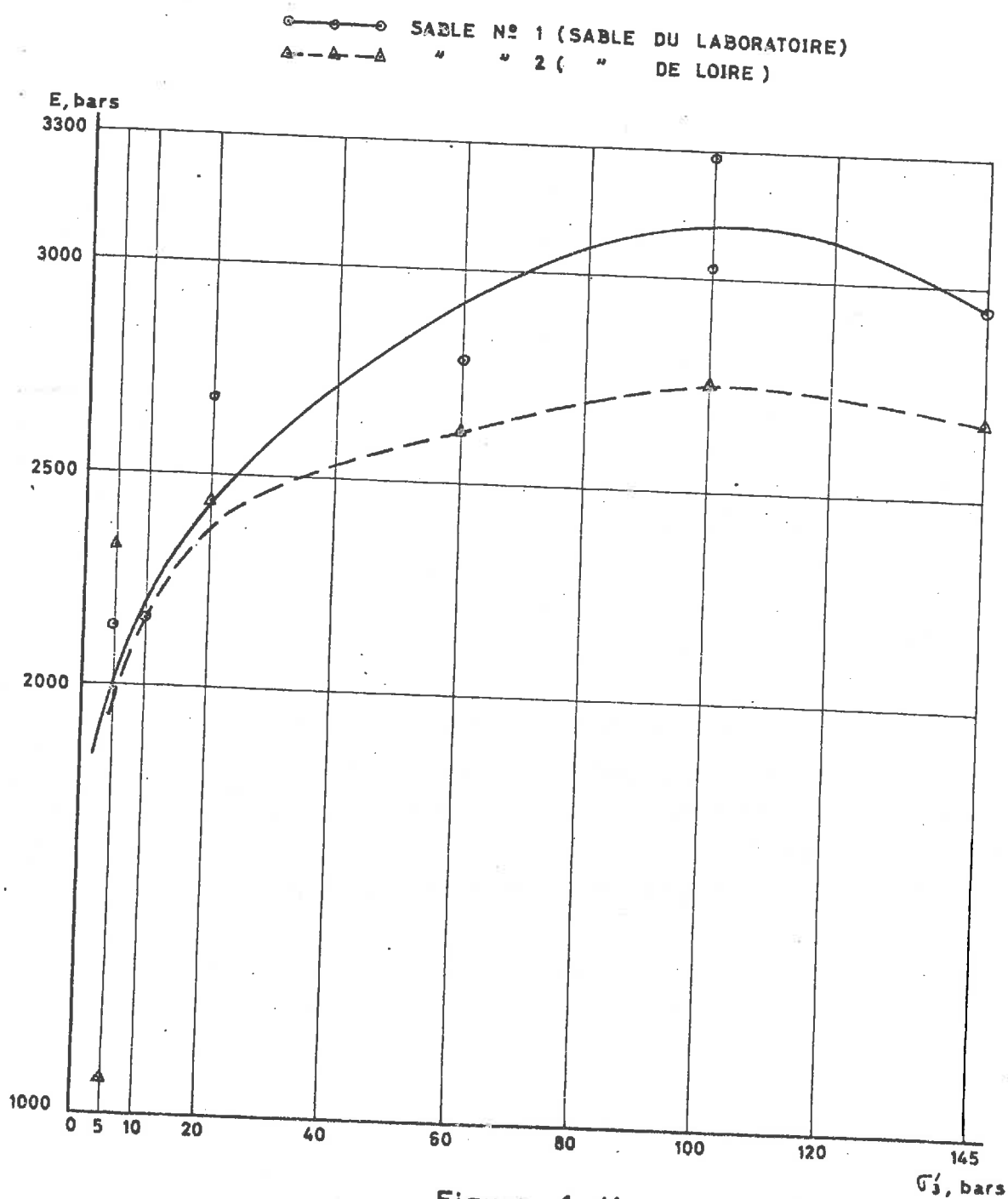


Figure 1.41

ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE SUR DEUX SABLES

Variation du coefficient de Poisson ν au début des essais
avec la pression effective σ'_3 (cf. § 1.5.7)

Le calcul est appliqué à l'intervalle $(\sigma_1 - \sigma_3 = 0, \sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max.}/4)$.

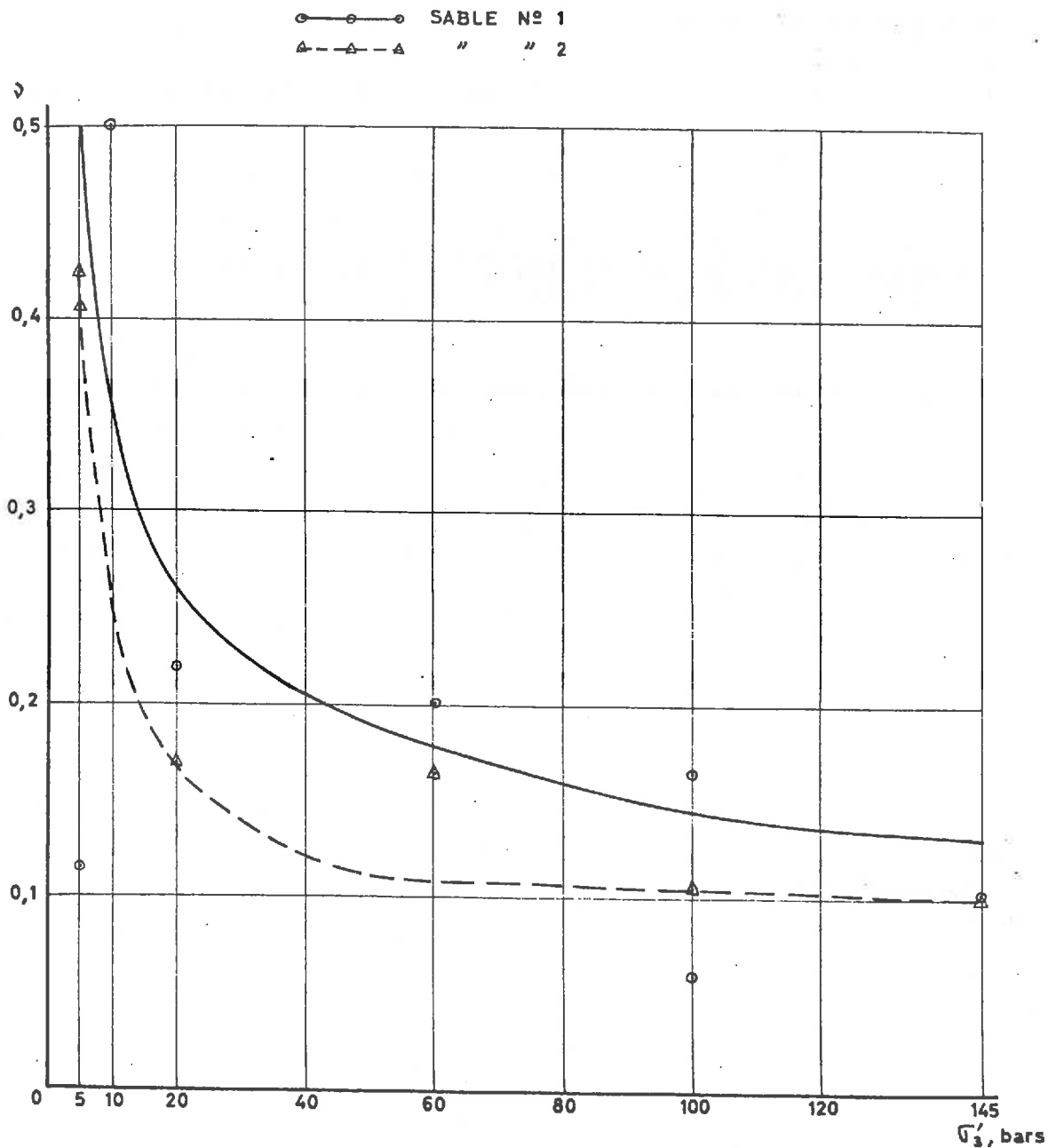


Figure 1.42

point d'ordonnée $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} / 4$ de la courbe effort-déformation.

La figure 1.41 montre la variation du module d'Young des 2 sables avec la pression effective σ'_3 des essais. Nous voyons que ce module croît avec la pression effective σ'_3 jusqu'à $\sigma'_3 = 100$ environ, et décroît par la suite.

1.5.7. Coefficient de Poisson au début des essais.

Le coefficient de Poisson ν des deux matériaux au début des essais est présenté sur la figure 1.42 en fonction de la pression effective σ'_3 des essais. Les déformations latérales nécessaires au calcul de ν ont été déduites des variations de volume et de la diminution de hauteur des échantillons. Le calcul est appliqué à l'intervalle $(\sigma_1 - \sigma_3 = 0, \sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} / 4)$.

1.5.8. Module déviatoire calculé E_{dc} .

La figure 1.43 montre le module déviatoire calculé des 2 sables soumis aux essais triaxiaux à pression latérale constante en fonction de la pression effective σ'_3 . Ce module croît avec σ'_3 jusqu'à $\sigma'_3 = 100$ bars environ, puis décroît par la suite.

1.5.9. Module oedométrique calculé E_{oc} .

Le module oedométrique calculé des deux sables soumis aux essais est présenté sur la figure 1.44 en fonction de la pression effective σ'_3 . Ce module croît avec la pression effective σ'_3 dans l'intervalle des pressions utilisées dans nos essais, la variation étant plus lente vers les pressions élevées qu'aux faibles pressions.

MODULE DÉVIATOIRE CALCULÉ E_{dc} DE DEUX SABLES en fonction de la pression effective σ'_3 exercée sur l'échantillon pendant les essais triaxiaux

Le calcul est appliqué à l'intervalle $(\sigma_1 - \sigma_3 = 0, \sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max.}/4)$.

○—○—○ SABLE N° 1 (SABLE DU LABORATOIRE)
△—△—△ " " 2 (" DE LOIRE)

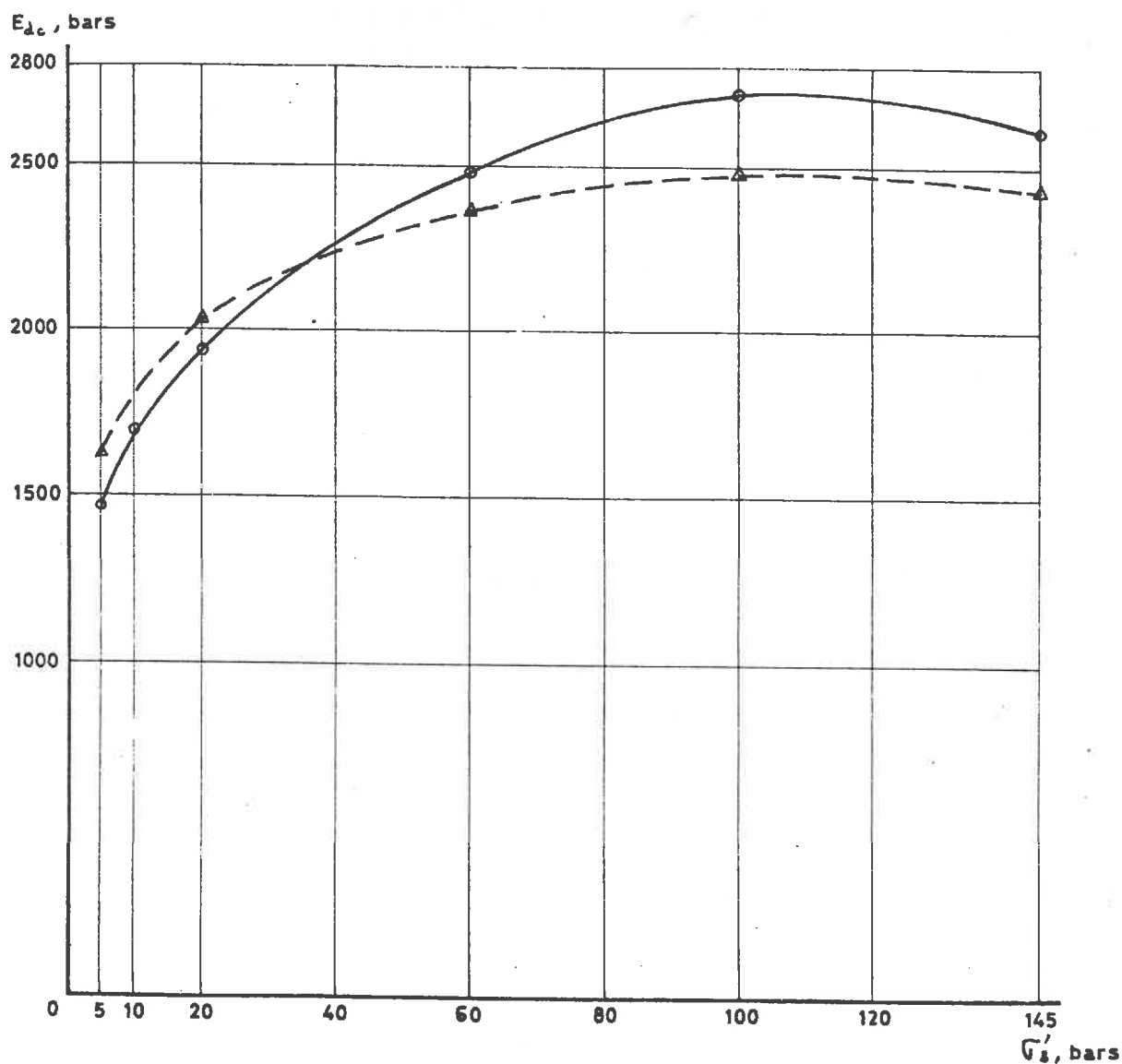


Figure 1.43

MODULE OEDOMÉTRIQUE CALCULÉ E_{oc} DE DEUX SABLES en fonction de la pression effective σ'_3 exercée sur l'échantillon pendant les essais triaxiaux.

Le calcul est appliqué à l'intervalle $(\sigma_1 - \sigma_3 = 0, \sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max.}/4)$.

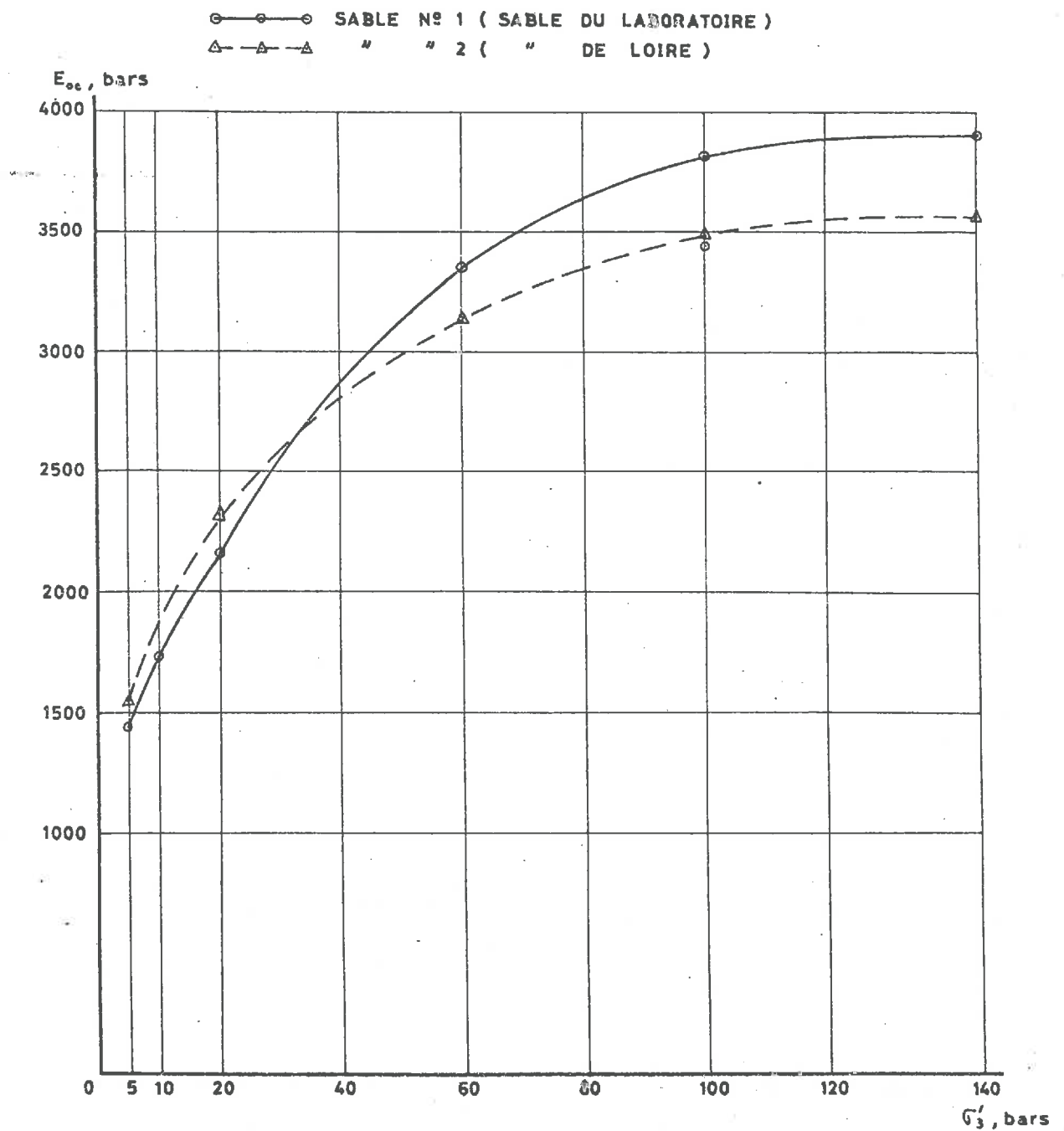


Figure 1.44

1.5.10. Variation du rapport déformation latérale/déformation axiale au cours d'un essai.

Pour l'essai triaxial à pression latérale σ_3 constante avec $\sigma_3 = 150$ bars effectué sur le sable n° 1 (cf. fig. 1.19), nous avons cherché à connaître le rapport

déformation latérale relative/déformation axiale relative de l'échantillon au cours de l'essai.

Ce rapport a été défini de deux façons différentes : d'abord il est appliqué à la déformation totale de l'échantillon depuis le début de l'essai (ϵ_1), ensuite nous avons évalué ce rapport au cours de l'essai, le calcul étant fait chaque fois pour une déformation axiale de 2 mm (ϵ_2).

Les détails des mesures et des calculs figurent au tableau 1.13 ci-après. Pour chaque rapport défini, les valeurs relatives à chacun des 3 colliers de mesure du diamètre de l'échantillon ont été calculées, puis la moyenne de ces 3 valeurs. Les notes à la fin du tableau définissent les grandeurs présentées, fournissent des renseignements complémentaires sur certaines d'entre elles, et donnent des détails du calcul. La figure 1.45 montre les courbes représentatives de ϵ_1 et de ϵ_2 en fonction de la déformation axiale relative $\epsilon_1 = \Delta h/h$.

1.6. ESSAI TRIAXIAL A PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE AVEC PRECONSOLIDATION.

Nous avons effectué un essai triaxial à pression latérale σ_3 constante dans lequel le matériau avait été préconsolidé avant l'écrasement. La préconsolidation consistait à appliquer sur l'échantillon une pression effective de 100,0 bars et à la soumettre à un écrasement qui est poursuivi jusqu'à ce qu'on obtienne $\sigma_1 - \sigma_3 = 100$ bars environ. (La pression $\sigma_1 - \sigma_3$

$\Delta h, \textcircled{1}$ mm	$\varepsilon_1, \% =$ $h/1,0083$	$\varepsilon_{21}, \textcircled{2}$ %	$\varepsilon_{22}, \textcircled{2}$ %	$\varepsilon_{23}, \textcircled{2}$ %	$\nu_{11}, \textcircled{3}$ $\varepsilon_{21}/\varepsilon_1$	$\nu_{12}, \textcircled{3}$ $\varepsilon_{22}/\varepsilon_1$	$\nu_{13}, \textcircled{3}$ $\varepsilon_{23}/\varepsilon_1$	$\Delta h, \textcircled{1}$ mm	$\pi \Delta \phi_1,$ cm	$\pi \phi_1,$ cm	$\pi \Delta \phi_2,$ cm	$\pi \phi_2,$ cm
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
6,1	6,05	0,66	0,66	0,66	0,11	0,11	0,11	2,0	0,07	15,20	0,07	15,20
10,1	10,02	1,52	1,52	1,52	0,15	0,15	0,15	2,0	0,08	15,33	0,08	15,33
16,1	15,98	3,91	3,58	3,91	0,24	0,22	0,24	2,0	0,20	15,68	0,10	15,68
20,1	19,94	5,90	4,90	5,90	0,29	0,24	0,29	2,0	0,20	15,98	0,10	15,80
26,1	25,90	9,87	7,55	9,87	0,38	0,29	0,38	2,0	0,15	16,58	0,20	16,20
30,1	29,86	12,20	10,20	12,50	0,40	0,34	0,41	2,0	0,15	16,93	0,25	16,60
36,1	35,80	15,80	15,50	16,50	0,44	0,43	0,46	2,0	0,20	17,48	0,30	17,40
40,1	39,80	19,10	19,50	19,80	0,48	0,49	0,49	2,0	0,20	17,98	0,33	18,00
46,1	45,75	23,60	26,10	24,20	0,51	0,57	0,53	2,0	0,22	18,66	0,40	19,00
52,1	51,70	28,80	33,60	29,10	0,56	0,65	0,56	2,0	0,20	19,38	0,36	20,10
56,1								2,0	0,18	19,86	0,40	20,90
58,1	57,60	32,80	41,30	32,90	0,57	0,72	0,57	2,0				

Tableau 1.13. Rapports déformation latérale relative
déformation axiale relative
 ν_1 et ν_2 de l'échantillon au cours de l'essai triaxial à
pression latérale G_2 constante avec $G_2 = 150$ bars.

- ① Δh = lecture comparateur - raccourcissement apparent 3,9 mm avant l'écrasement.
- ② 1,0083 = hauteur 104,0 mm de l'échantillon - raccourcissement vrai 3,17 mm.
- ③ variation totale du diamètre de chacun des 3 colliers.
diamètre moyen initial

$\pi \Delta \vartheta_1$, cm	$\pi \vartheta_1$, cm	$\Delta D_1/D_1$, %	$\Delta D_2/D_2$, %	$\Delta D_3/D_3$, %	$h_i =$ 104,0 - Δh , mm	$\varepsilon'_i =$ 2,0/ h_i	$\vartheta_{21}^{(6)} =$ $\frac{\Delta D_1/D_1}{\varepsilon'_i}$	$\vartheta_{22}^{(6)} =$ $\frac{\Delta D_2/D_2}{\varepsilon'_i}$	$\vartheta_{23}^{(6)} =$ $\frac{\Delta D_3/D_3}{\varepsilon'_i}$	$3 \vartheta_{1m}^{(7)}$	$\vartheta_{1m}^{(7)}$	$3 \vartheta_{2m}^{(8)}$	$\vartheta_{2m}^{(8)}$
(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)
0,07	15,20	0,46	0,46	0,46	97,9	0,020	0,22	0,22	0,22	0,33	0,11	0,67	0,22
0,08	15,33	0,52	0,52	0,52	93,9	0,021	0,24	0,24	0,24	0,46	0,15	0,73	0,24
0,20	15,72	1,28	0,64	1,27	87,9	0,022	0,56	0,28	0,56	0,71	0,24	1,40	0,47
0,20	16,02	1,25	0,63	1,25	83,9	0,024	0,52	0,26	0,52	0,84	0,28	1,31	0,44
0,20	16,62	0,91	1,23	1,20	77,9	0,026	0,36	0,48	0,47	1,05	0,35	1,30	0,43
0,20	17,02	0,89	1,51	1,18	73,9	0,027	0,33	0,56	0,44	1,17	0,39	1,33	0,44
0,20	17,62	1,14	1,72	1,14	67,9	0,030	0,39	0,58	0,39	1,34	0,45	1,36	0,45
0,20	18,12	1,11	1,83	1,10	63,9	0,031	0,36	0,59	0,35	1,47	0,49	1,29	0,43
0,24	18,78	1,18	2,10	1,28	57,9	0,035	0,34	0,61	0,37	1,62	0,54	1,32	0,44
0,20	19,52	1,03	1,79	1,03	51,9	0,039	0,27	0,47	0,27	1,77	0,59	1,00	0,33
0,18	19,92	0,91	1,91	0,90	47,9	0,042	0,22	0,46	0,22			0,89	0,30
										1,86	0,62		

⑤ ϑ au niveau de chacun des 3 colliers, considérant la déformation totale depuis le début de l'écrasement.

⑥ $\Delta h_p = \Delta h$ partiel.

⑥ ϑ au niveau de chacun des 3 colliers, considérant une petite déformation à chaque instant.

⑦ $\vartheta_{1m} = (\vartheta_{11} + \vartheta_{12} + \vartheta_{13}) / 3$.

⑧ $\vartheta_{2m} = (\vartheta_{21} + \vartheta_{22} + \vartheta_{23}) / 3$.

SABLE DU LABORATOIRE

Rapport $\gamma = (\text{déformation latérale relative } \Delta D/D) / (\text{déformation axiale relative } \Delta h/h)$
 lors de l'écrasement de l'essai triaxial à pression latérale $\bar{\sigma}_3$ constante
 avec $\bar{\sigma}_3 = 150$ bars, en fonction de $\Delta h/h$

$\circ - \circ - \circ$ γ_1 = RAPPORT APPLIQUÉ À LA DÉFORMATION TOTALE DEPUIS LE DÉBUT DE L'ESSAI
 $\Delta - \Delta - \Delta$ γ_2 = RAPPORT OBTENU AU COURS DE L'ESSAI POUR CHAQUE DÉFORMATION AXIALE

DE 2 MM

TRIAxIAL
 N° 22

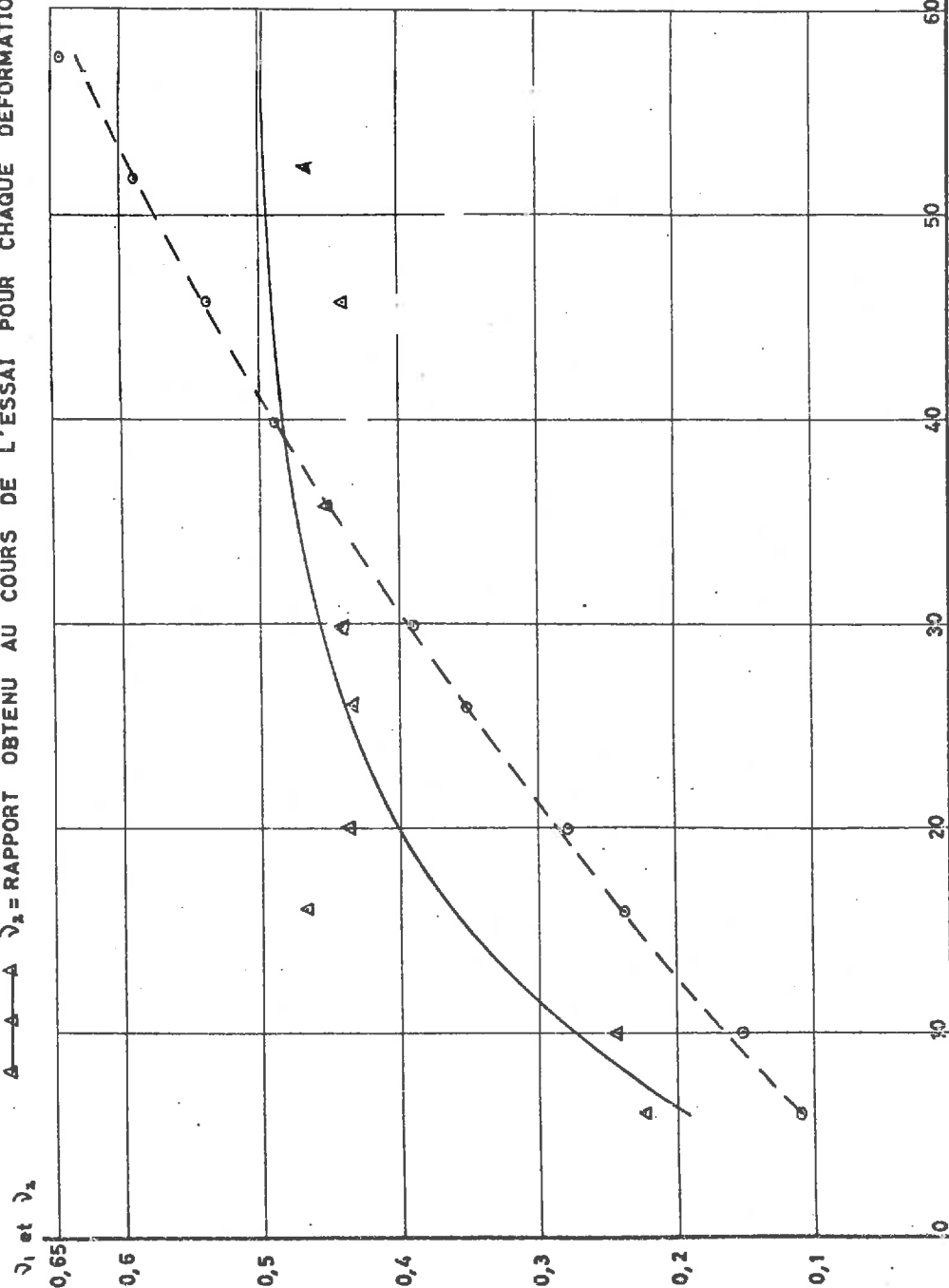


Figure
 1.45

effectivement atteinte a été de 91 bars). On effectue ensuite une détente pour avoir $\sigma_1 - \sigma_3 = 0$, on réduit la pression effective de 100,0 bars à 20,0 bars, et on écrase sous cette dernière pression maintenue constante.

La figure 1.46 donne les résultats de l'essai. Sur la figure effort-déformation, les chiffres mis à côté des points obtenus après la détente indiquent les pressions effectives atteintes lors de la décompression. L'abscisse $\Delta h/h$ correspondant au maximum de $\sigma_1 - \sigma_3$ est moins importante que celle relative à l'essai effectué sans préconsolidation (8,0 au lieu de 14,8 %) (cf. fig. 1.16 (a)). Le module d'Young E est par suite plus élevé que dans ce dernier essai. La contrainte ($\sigma_1 - \sigma_3$) maximum est peu différente de celle correspondant à l'essai sans préconsolidation (43,5 au lieu de 48,6 bars), de même que le palier à la fin de la courbe (28,8 au lieu de 32,4 bars). Le palier est atteint à peu près à la même abscisse $\Delta h/h$.

Sauf pour le pic à la fin de la phase de préconsolidation, l'allure de la courbe représentant la variation de la densité pendant l'essai est la même que celle de la courbe relative à l'essai effectué sans préconsolidation. Dans l'ensemble la densité est plus élevée, du fait de la préconsolidation. La densité minima est atteinte à peu près à la même abscisse

$\Delta h/h$. Abstraction faite du pic, on pourrait dire que la courbe de densité s'obtient par une translation de 0,05 dans le sens des ordonnées positives de la courbe de densité de l'essai effectué sans préconsolidation.

Les déformations latérales (augmentation du diamètre) sont comparables à celles correspondant à l'essai effectué sans préconsolidation.

LA COURBE EN POINTILLÉ $OA'B'C'D'E'F'$ EST UNE REPRÉSENTATION DE $OAB CDEF$, DANS LAQUELLE L'ÉCHELLE DES

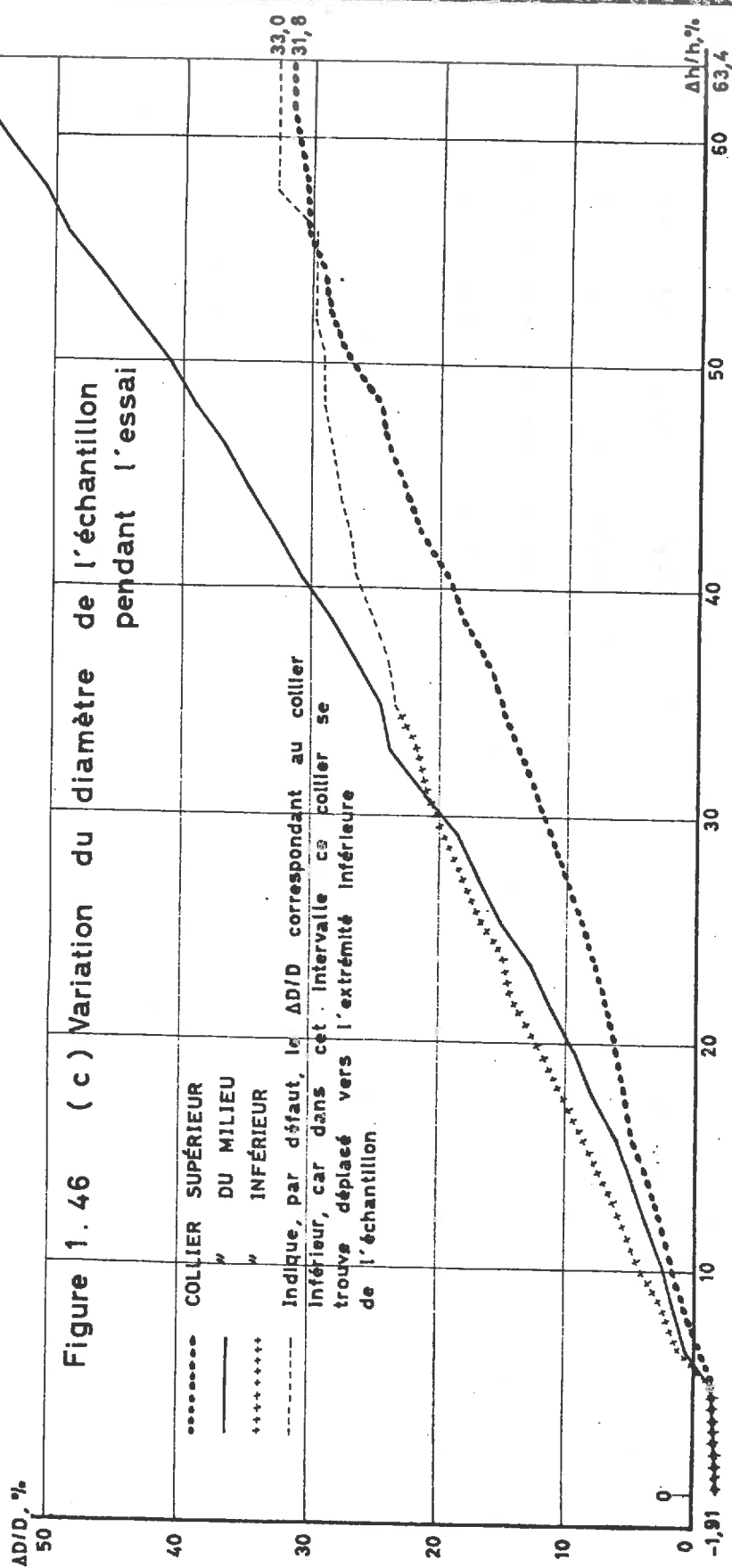
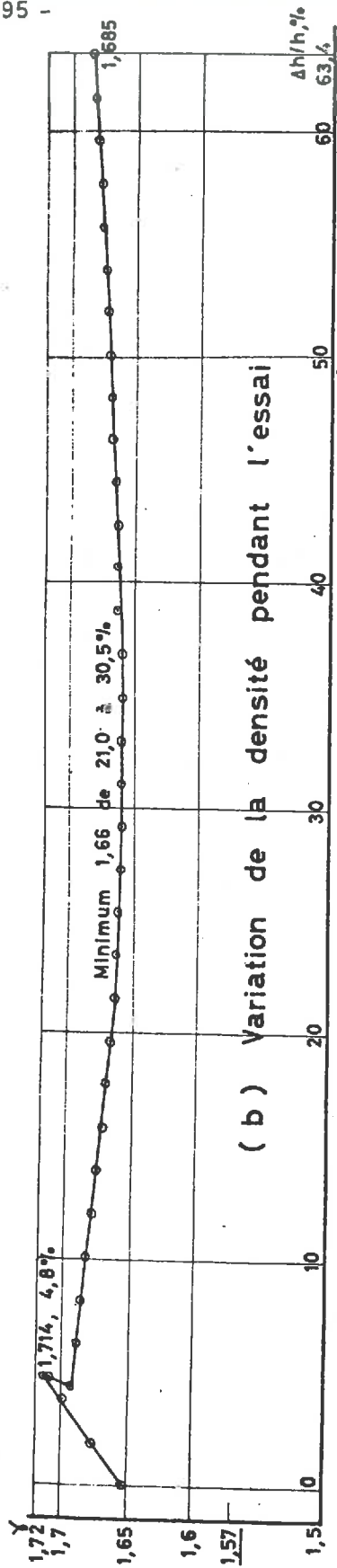


Figure 1.46

Les déformations latérales (augmentation du diamètre) sont comparables à celles correspondant à l'essai effectué sans préconsolidation.

La courbe granulométrique du matériau après essai se situe, comme on pouvait s'y attendre, (cf. fig. 1.47), entre les courbes granulométriques de l'essai effectué sans préconsolidation et de l'essai n° 38 relatif à un écrasement sous pression latérale $\sigma_3 = 105,0$ bars. Elle est identique (cf. fig. 1.7) à la courbe granulométrique correspondant à l'essai à $\sigma_3 = 105,0$ bars qui a été interrompu, et dont la déformation axiale relative atteint 14,3 %.

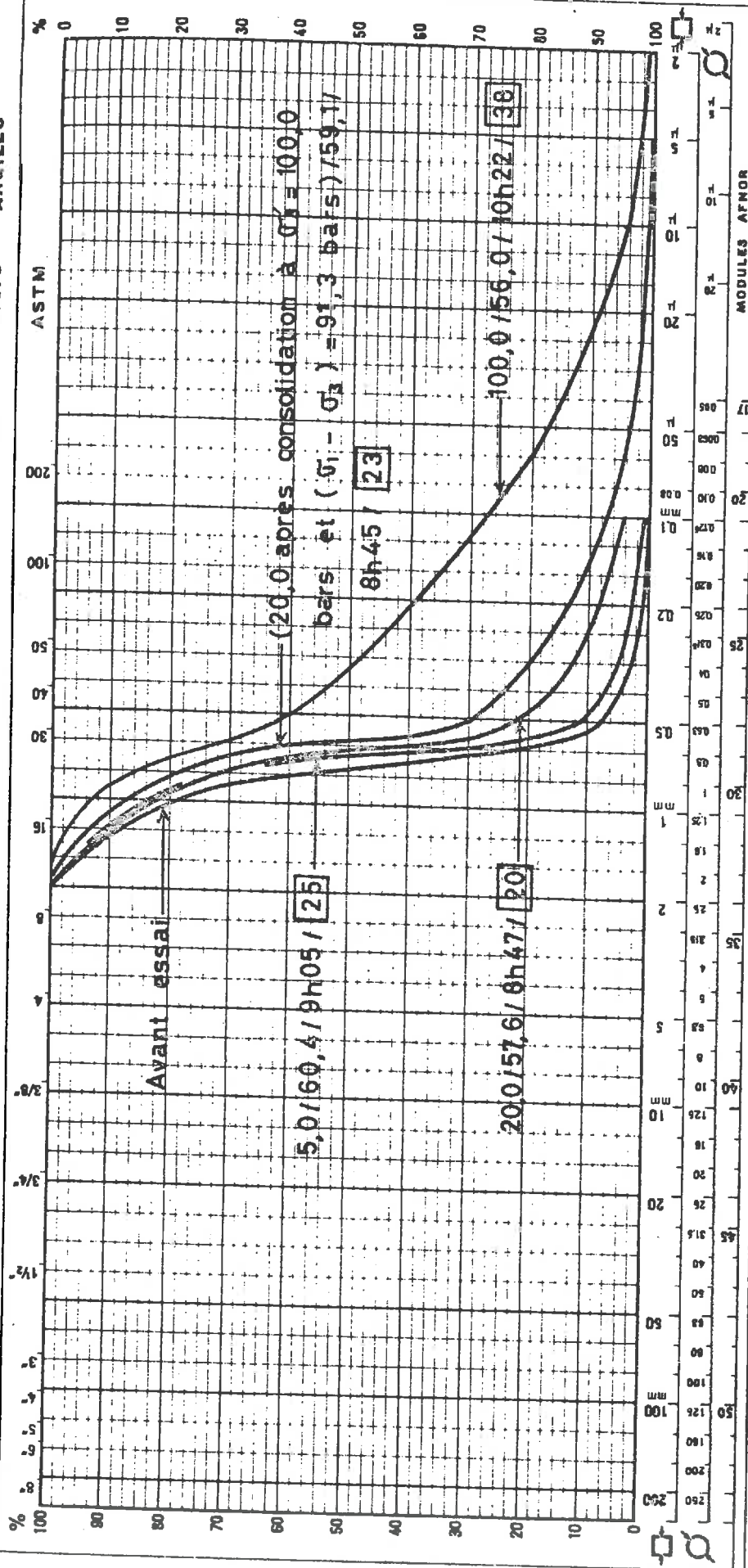
1.7. ESSAIS IDENTIQUES REPETES SUR UNE MEME QUANTITE DE MATERIAU.

Deux essais triaxiaux à pression latérale σ_3 constante avec $\sigma'_3 = 10$ bars ont été successivement effectués sur une même quantité de sable, en vue d'étudier les modifications éventuelles apportées par le premier essai aux propriétés du sable, ainsi que les modifications ultérieures dans la composition granulométrique du matériau du fait du deuxième essai. Les diagrammes résumant les résultats du deuxième essai sont présentés sur la figure 1.48 et ceux relatifs au premier essai sur la figure 1.15.

Lors de la mise en place du matériau pour le deuxième essai, la densité 1,57 voulue a été atteinte presque sans compactage : par suite de la modification dans la granulométrie occasionnée par le premier essai, le matériau est devenu plus serré.

Une comparaison entre la courbe effort-déformation de cet essai et celle relative au premier essai (fig. 1.15 (a)) montre peu de différence. Le maximum de $\sigma_1 - \sigma_3$ a lieu à la

CAILLOUX GRAVIERS SABLES SILTS ARGILES



Echantillon n°	CLASSE	W	LL	PI	MATURE - REMARQUES
					Voir les conventions relatives aux indications portant sur les courbes au § 1.5.4
					Figure 1.47
SABLE DU LABORATOIRE AVANT ET APRES ESSAIS TRIAXIAUX A PRESSION LATÉRALE σ_3 CONSTANTE (Cf. § 1.6)					
ANALYSE GRANULOMETRIQUE					

DEUXIÈME ESSAI TRIAXIAL À PRESSION LATÉRALE CONSTANTE

$\sigma_3 = 15$ BARS SUR LE SABLE N° 1

TRIAxIAL N° 32

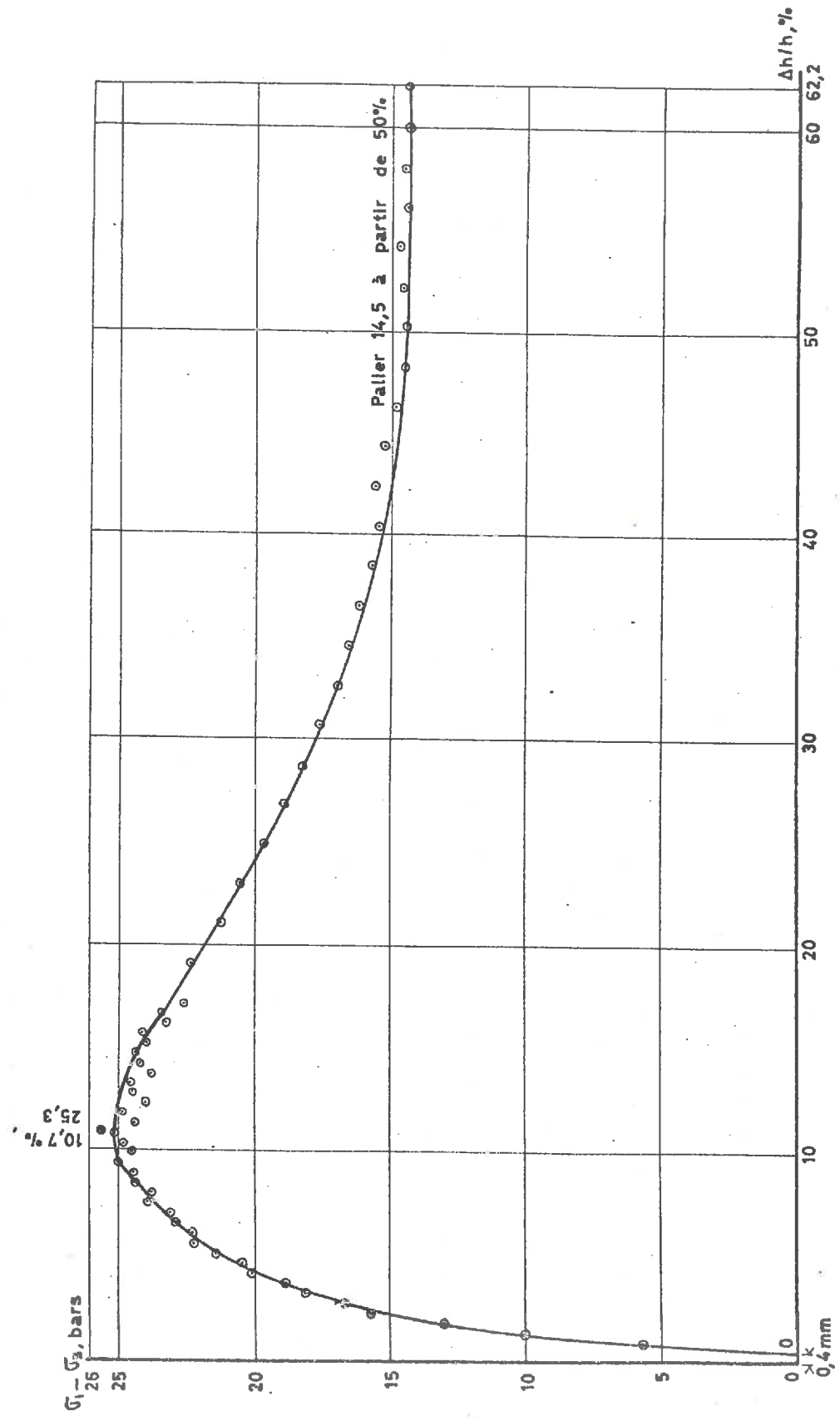
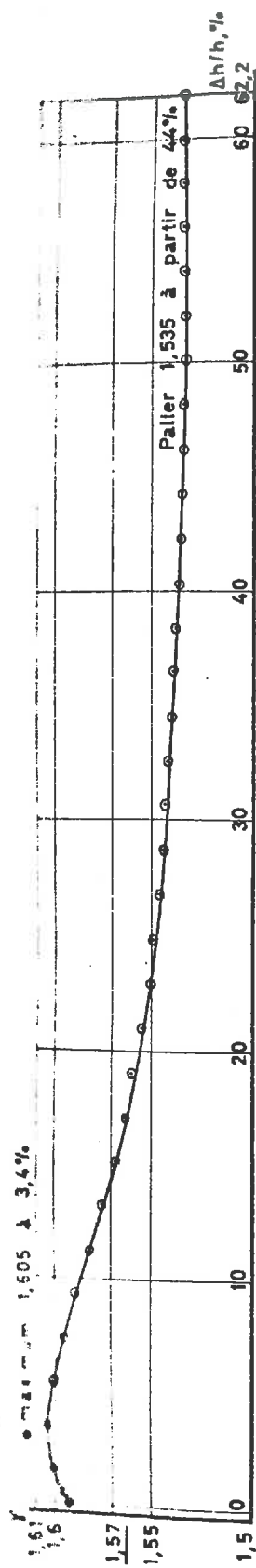
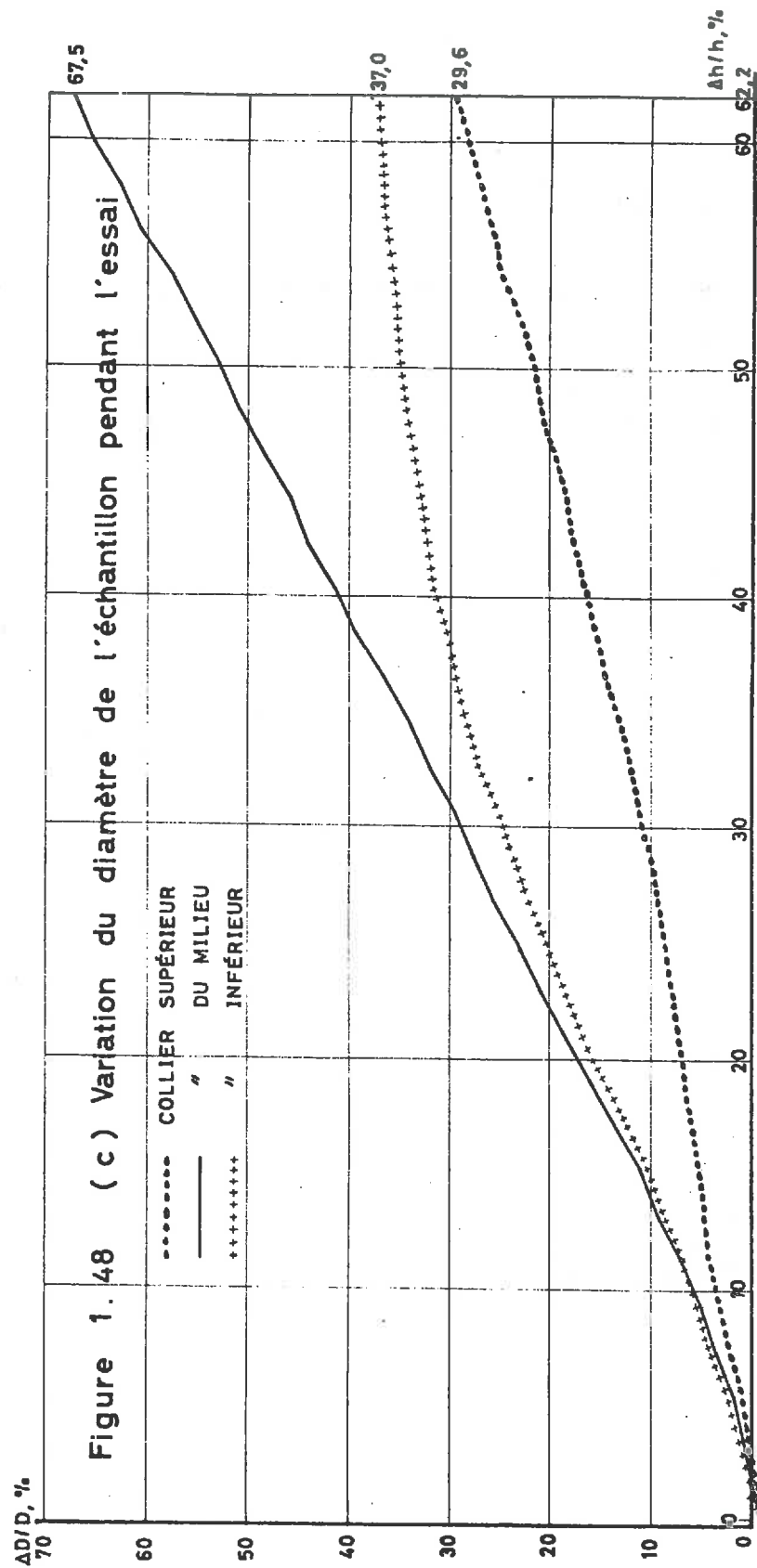


Figure 1.48 (a) Courbe effort - déformation



(b) Variation de la densité pendant l'essai



(c) Variation du diamètre de l'échantillon pendant l'essai

même abscisse $\Delta h/h$; il est réduit de 27,1 à 25,3 bars. De même, réduction de la valeur du palier final : 14,5 au lieu de 15,9 bars du premier essai. Ce palier est atteint à peu près à la même abscisse $\Delta h/h$: 50 au lieu de 46 %.

La densité maxima au cours de l'écrasement (1,605) est la même dans les 2 essais. Elle est atteinte un peu plus tard dans le deuxième essai que dans le premier : $\Delta h/h = 3,4$ % au lieu de 1,9 %. Le palier final de la densité est légèrement plus élevé : 1,535 au lieu de 1,52. L'abscisse $\Delta h/h$ correspondant au commencement de ce palier est plus grande : 44,0 au lieu de 36,0 %.

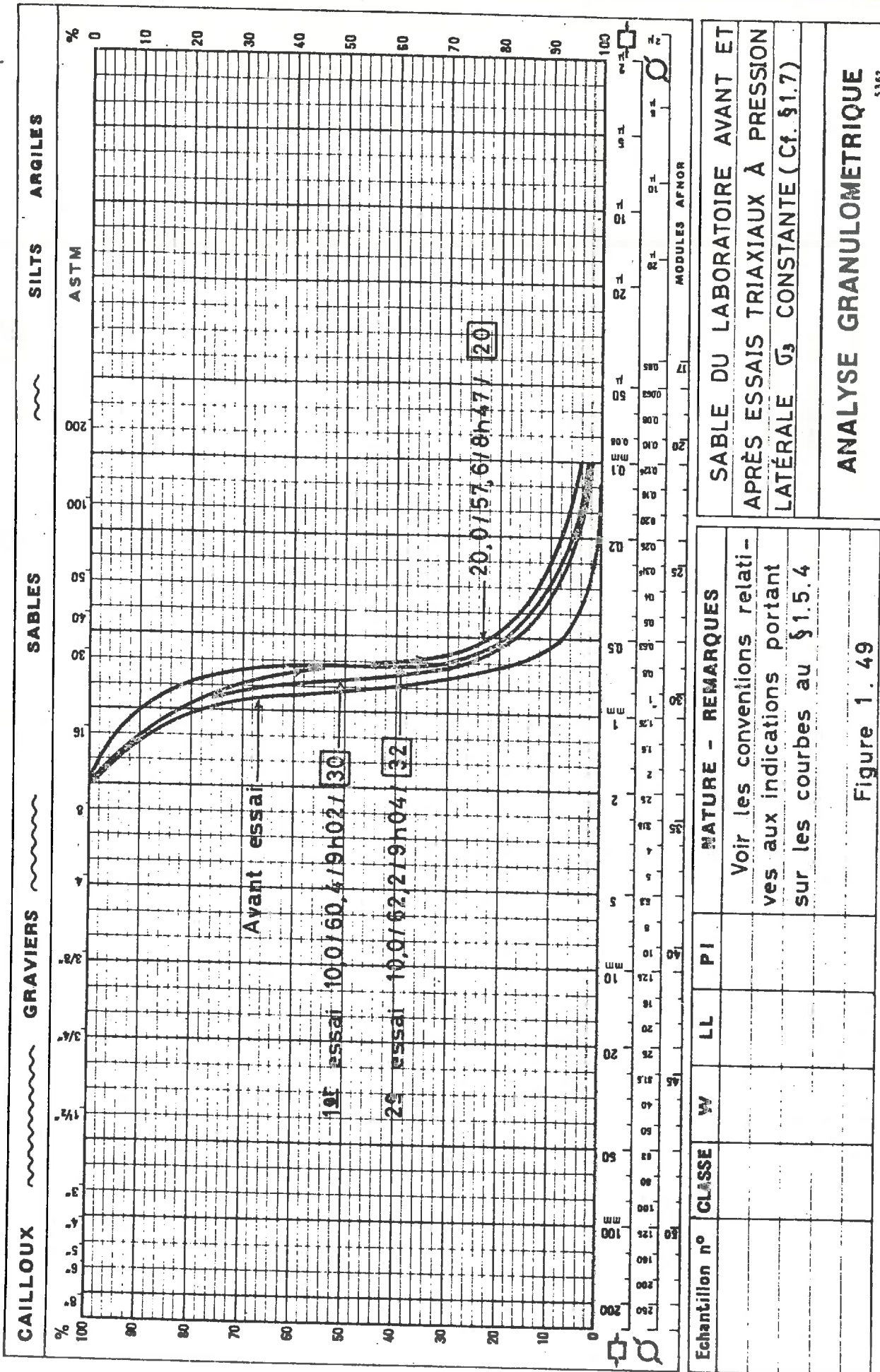
Il y a peu de différence entre les deux essais au point de vue des déformations latérales (variation du diamètre de l'échantillon).

La figure 1.49 résume l'étude comparative des granulométries du matériau avant essai, après le premier essai à

$\sigma'_3 = 10,0$ bars, après le deuxième essai à $\sigma'_3 = 10,0$ bars et après l'essai à $\sigma'_3 = 20,0$ bars. Dans l'intervalle compris entre les diamètres $d = 0,65$ et $d = 0,1$ mm, la courbe granulométrique correspondant au deuxième essai à $\sigma'_3 = 10,0$ bars est comprise entre celles relatives au premier essai à $\sigma'_3 = 10,0$ bars et à l'essai à $\sigma'_3 = 20,0$ bars.

1.8. ESSAIS TRIAXIAUX A PRESSION MOYENNE σ_m CONSTANTE.

Nous avons effectué sur le sable n° 1 des essais triaxiaux à pression moyenne σ_m constante, avec les pressions moyennes effectives σ'_m suivantes : 5, 20, 60, 67, 95 et 135 bars



ESSAI TRIAXIAL À PRESSION MOYENNE CONSTANTE $\sigma'_m = 5$ BARS SUR LE SABLE N° 1.
 TRIAXIAL N° 31.

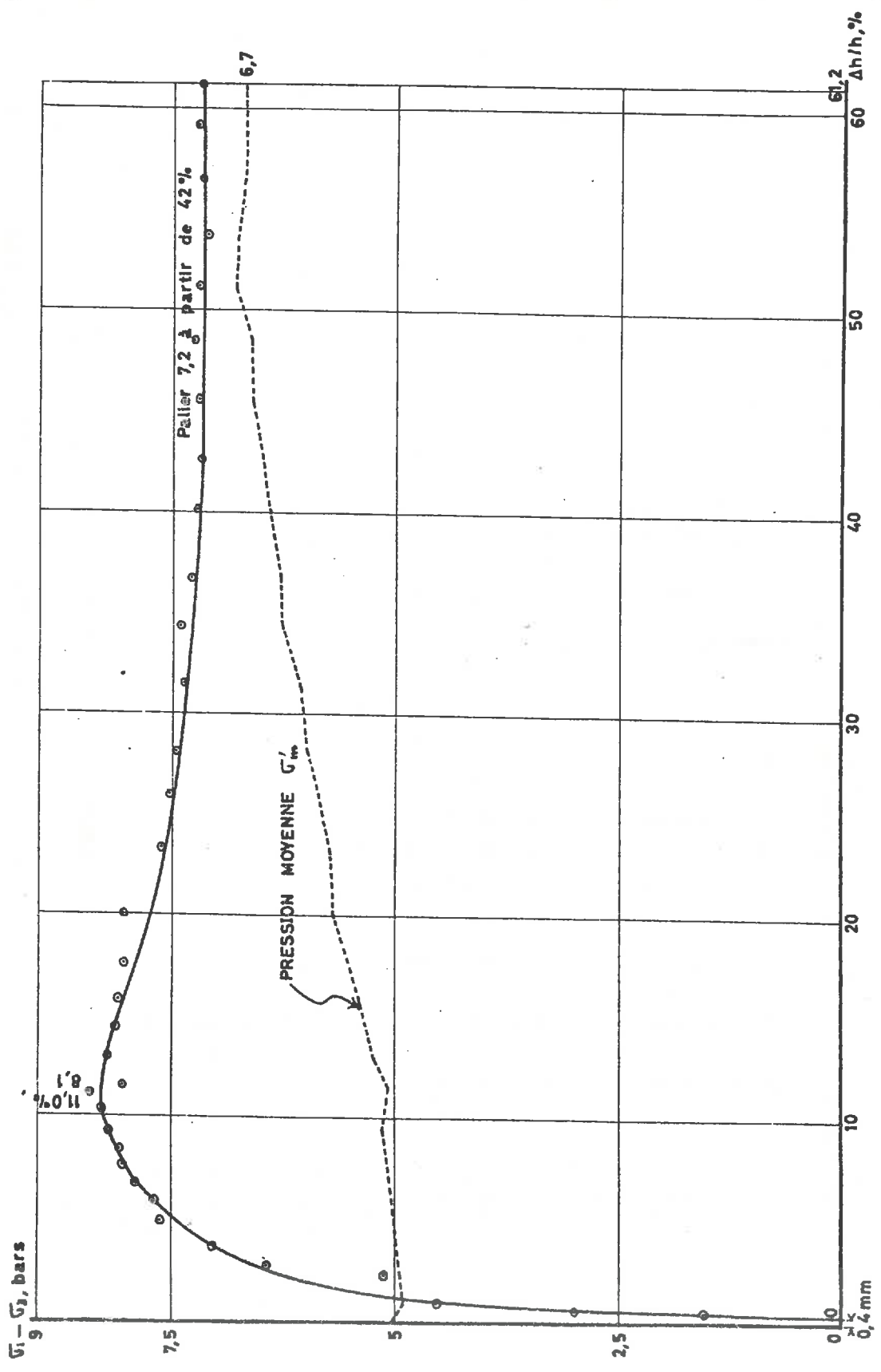


Figure 1.50 (a) Courbe effort - déformation

γ_{maximum} 1,53 au départ

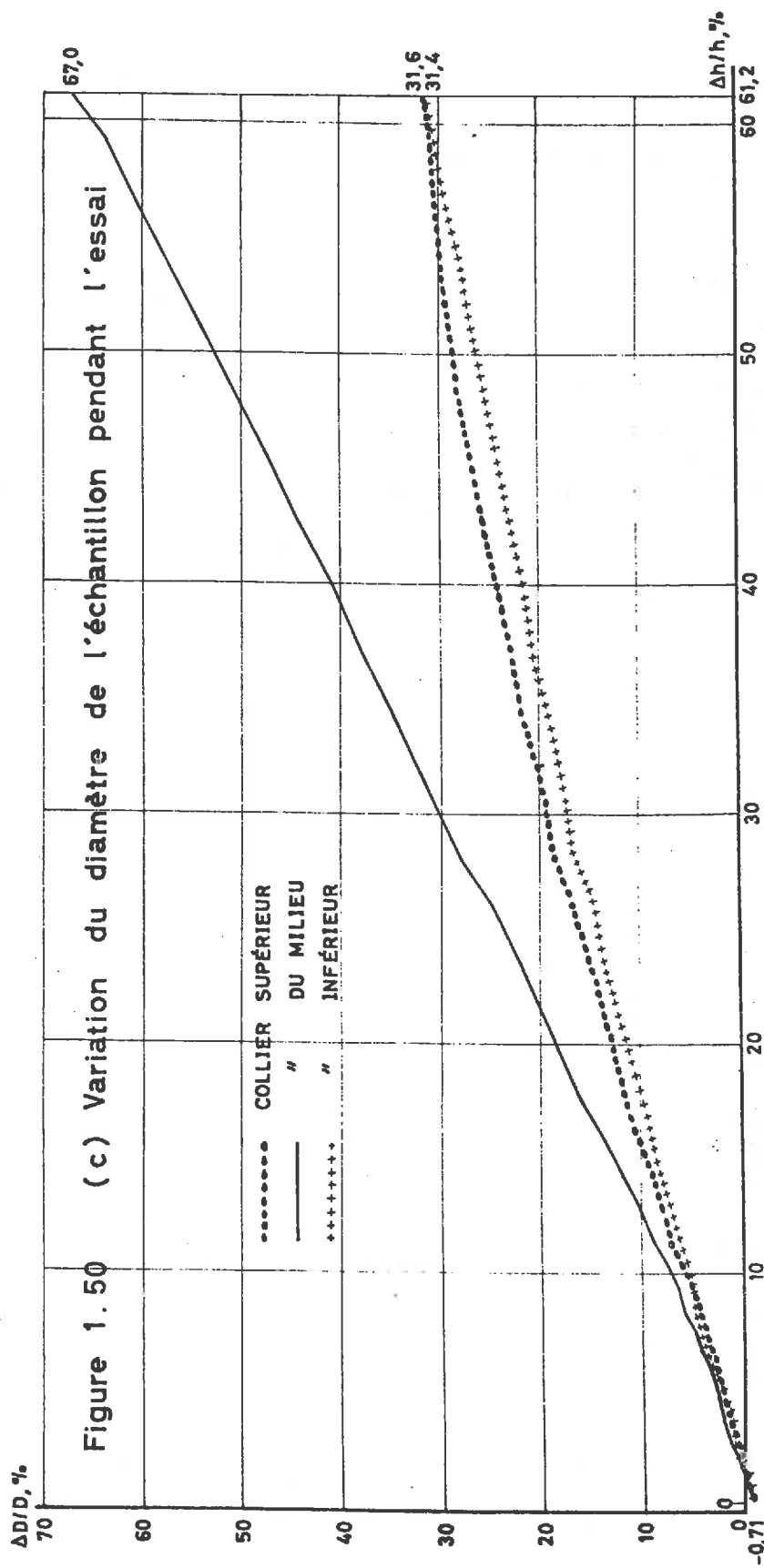
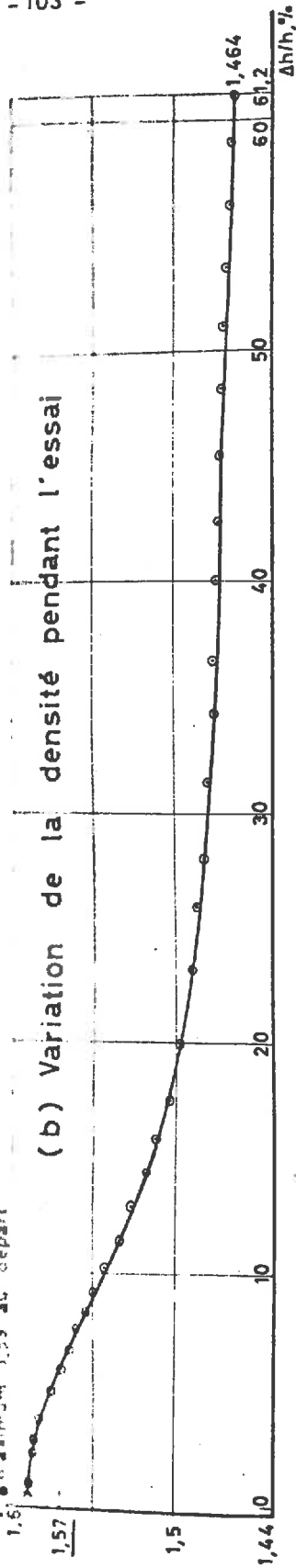


Figure 1.50 (c) Variation du diamètre de l'échantillon pendant l'essai

ESSAI TRIAXIAL À PRESSION MOYENNE CONSTANTE $\sigma'_m = 20$ BARS SUR LE SABLE N°1.

TRIAXIAL N°40.

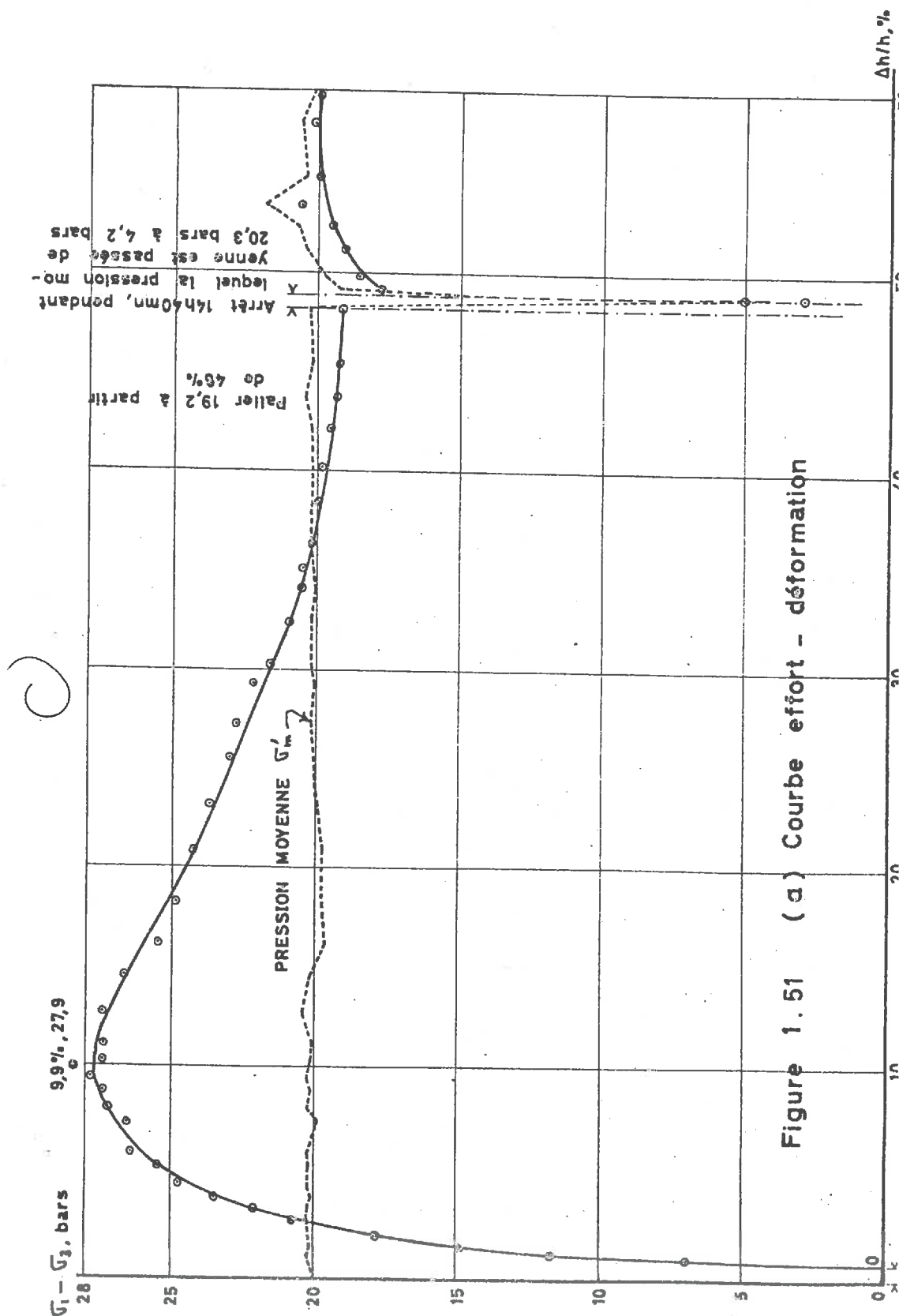
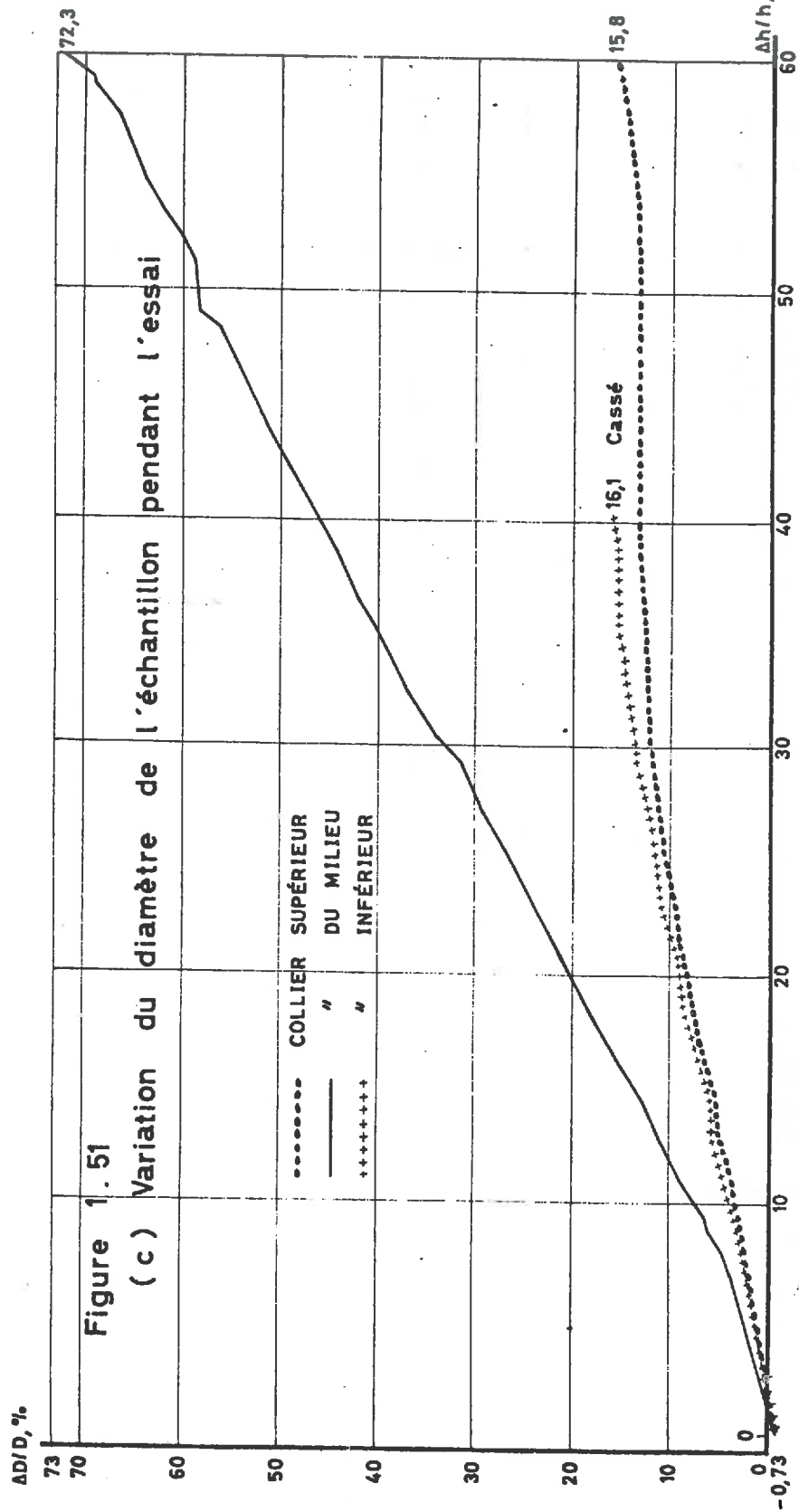
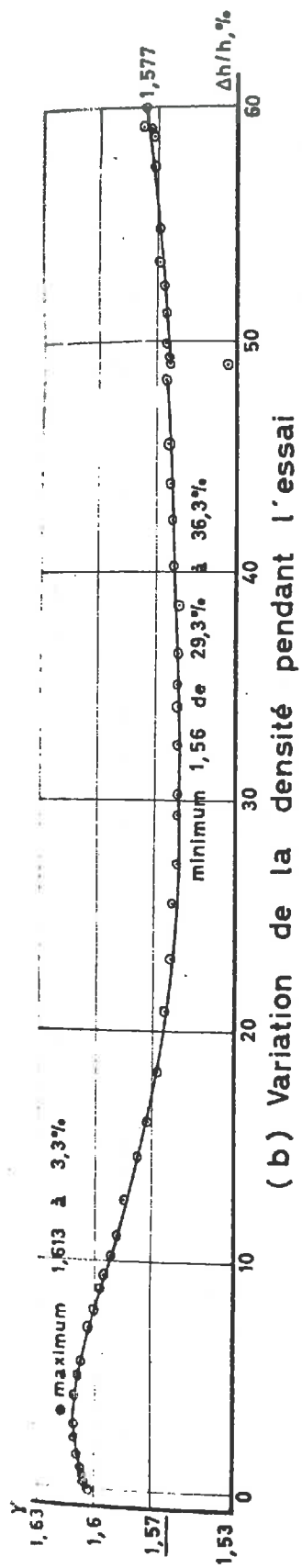


Figure 1.51 (a) Courbe effort - déformation



ESSAI TRIAXIAL À PRESSION MOYENNE CONSTANTE $\sigma'_m = 20$ BARS SUR LE SABLE N° 1.
 TRIAXIAL N° 26.

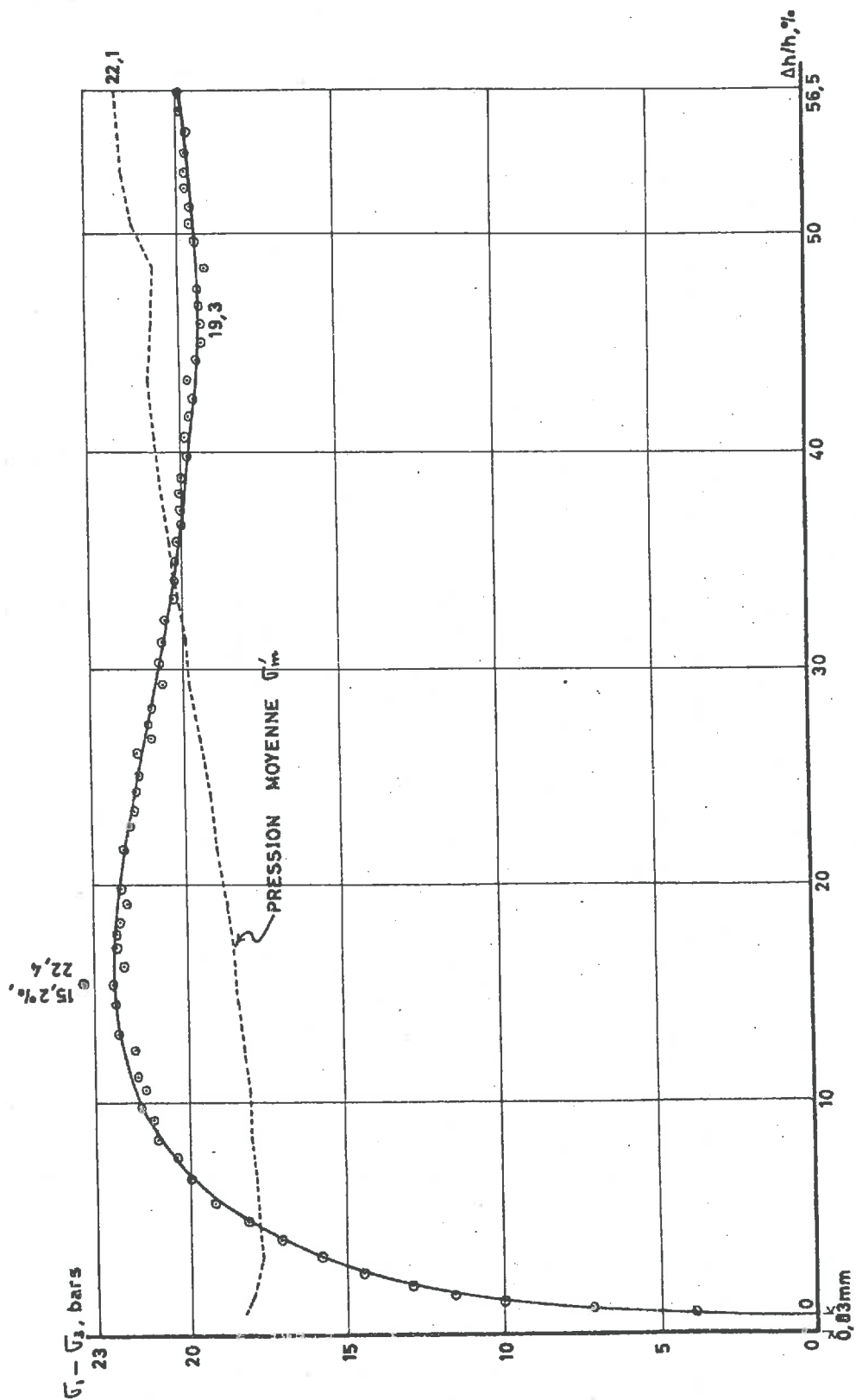
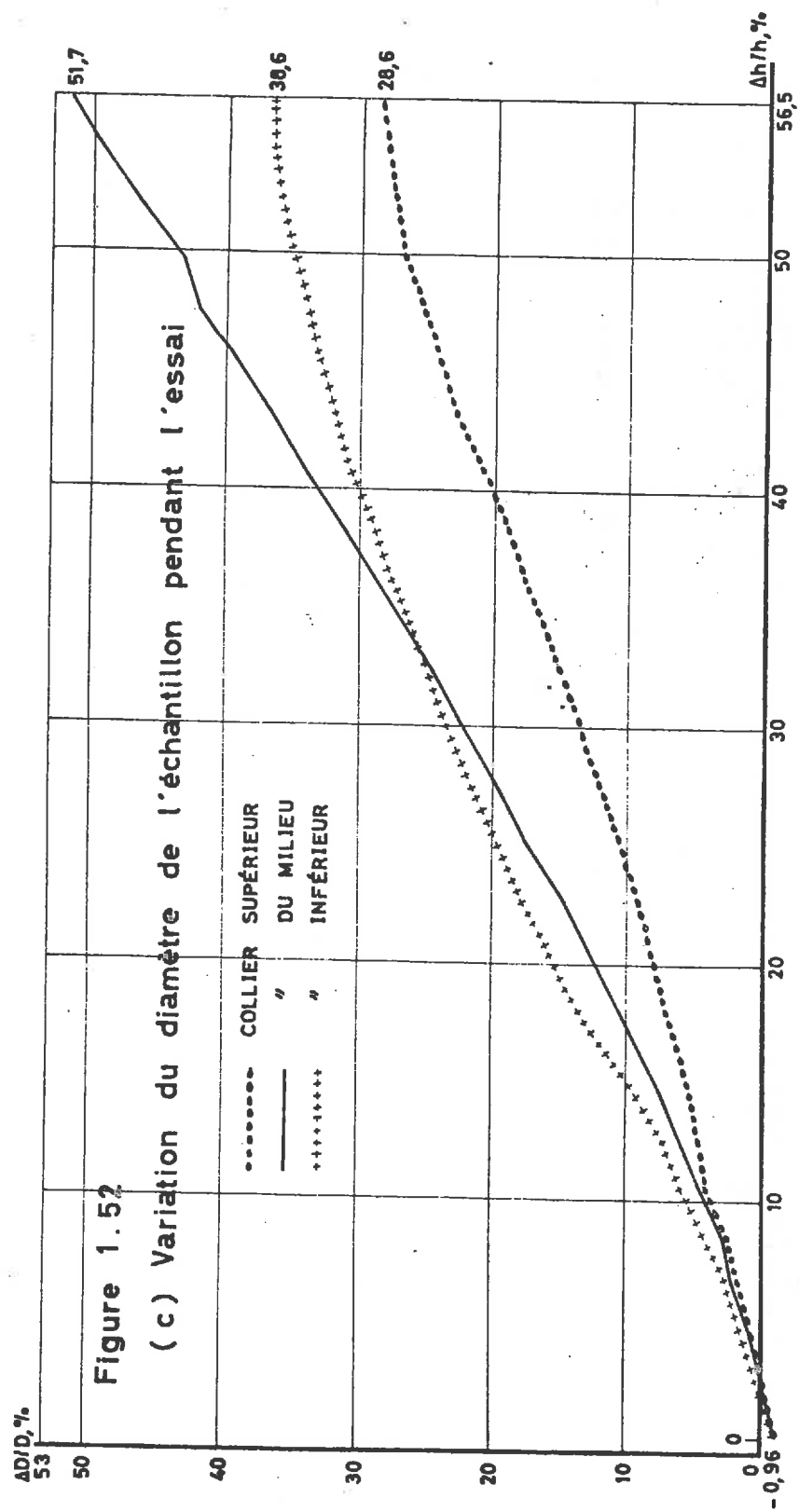
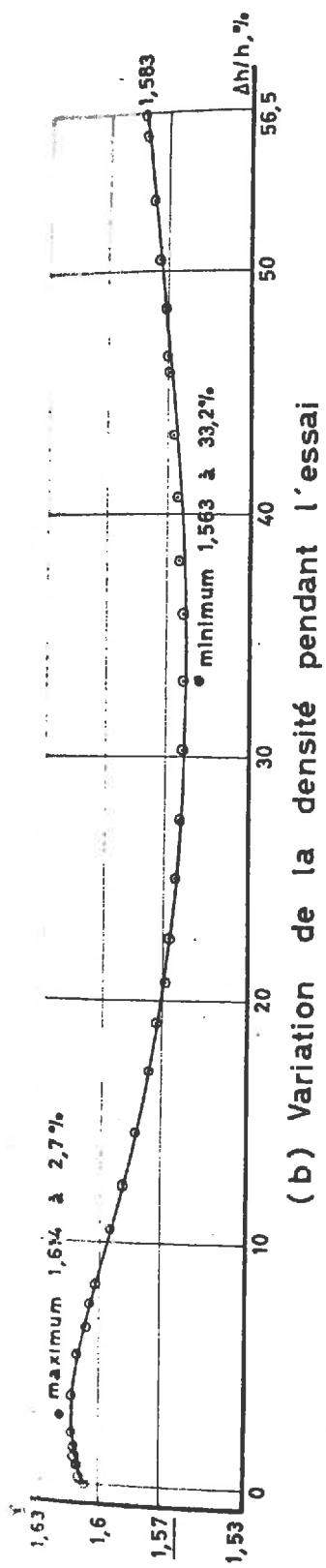


Figure 1.52 (a) Courbe effort - déformation



ESSAI TRIAXIAL À PRESSION MOYENNE CONSTANTE $\sigma'_m = 60$ BARS SUR LE SABLE N°1.

TRIAXIAL N°27.

108

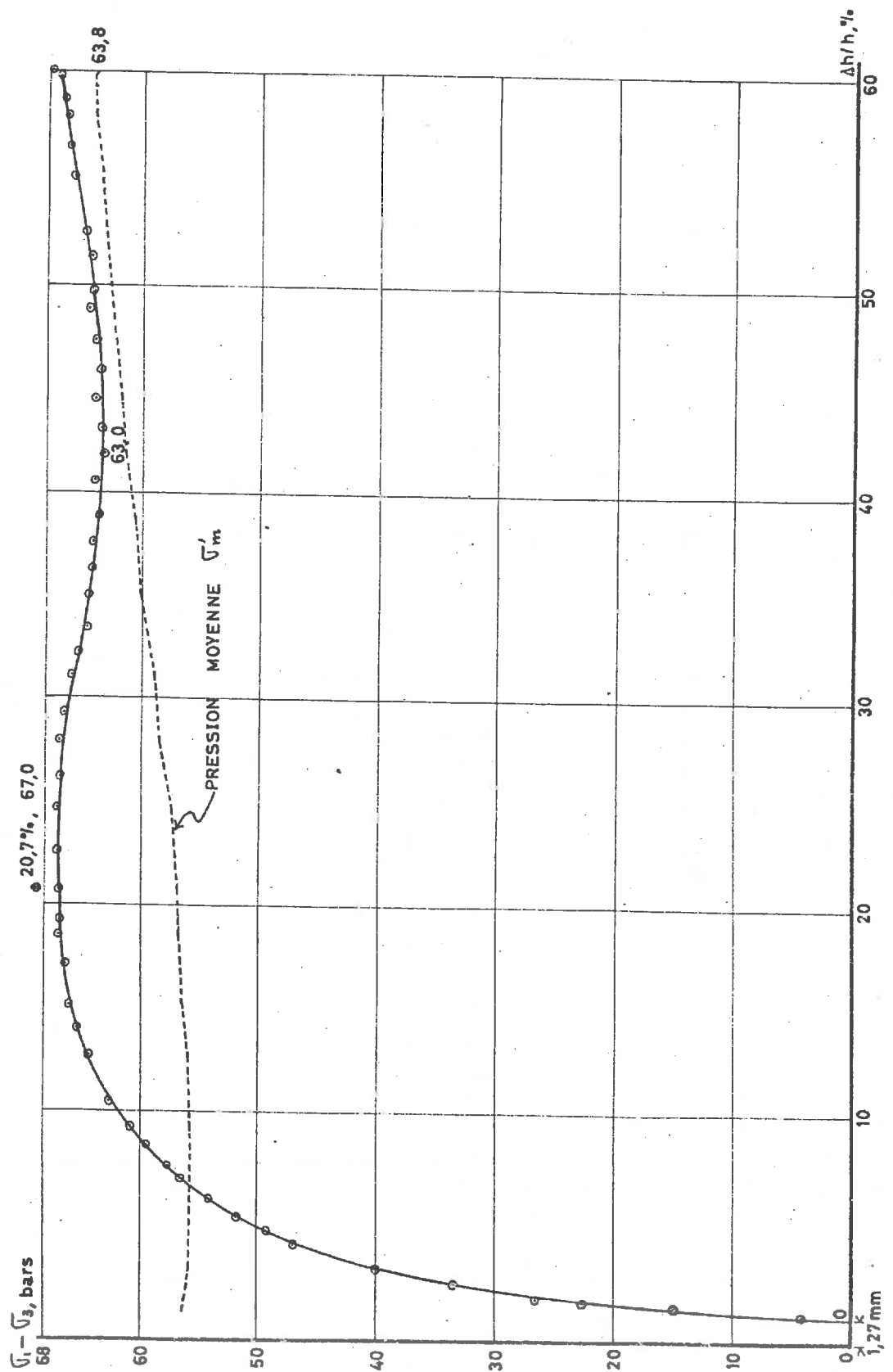
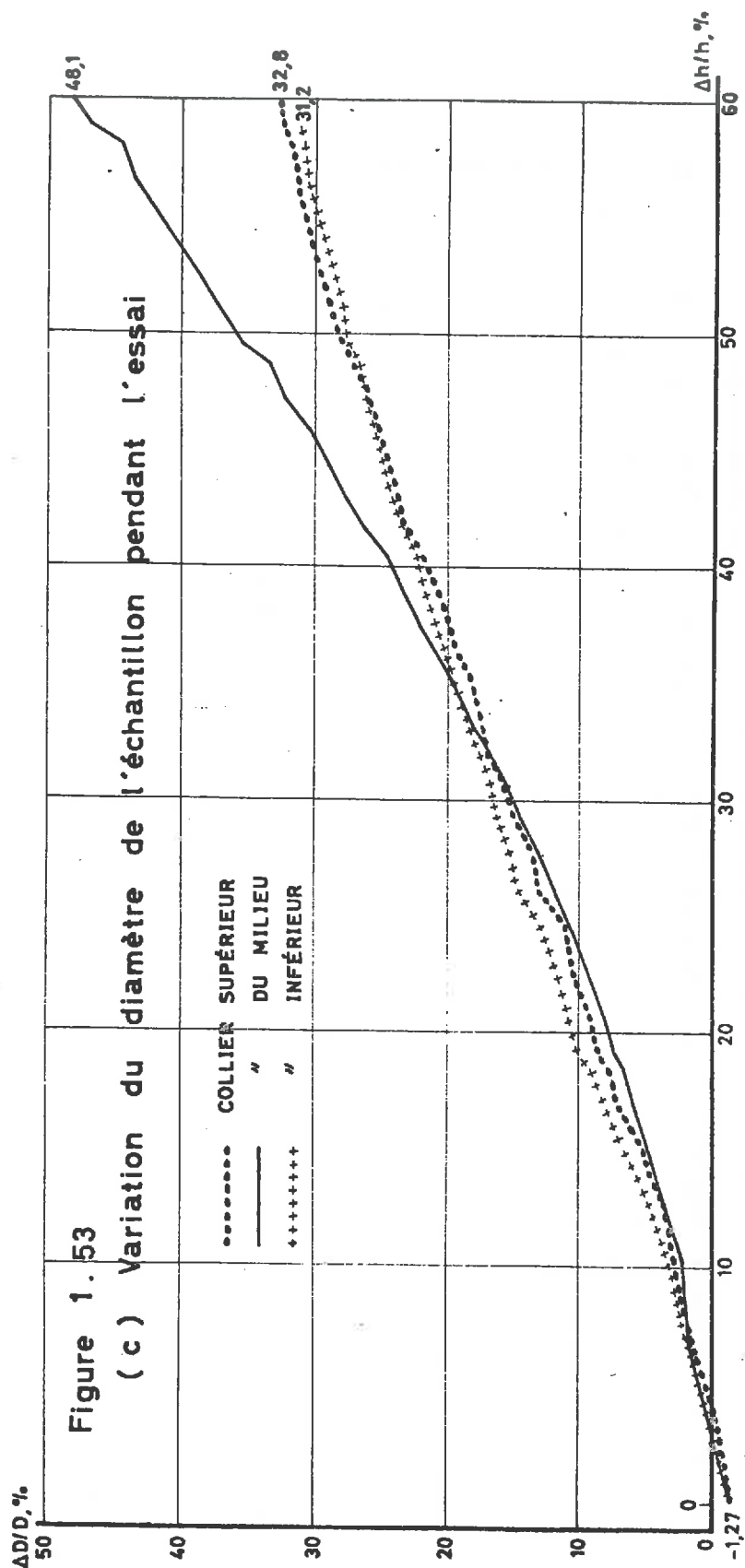
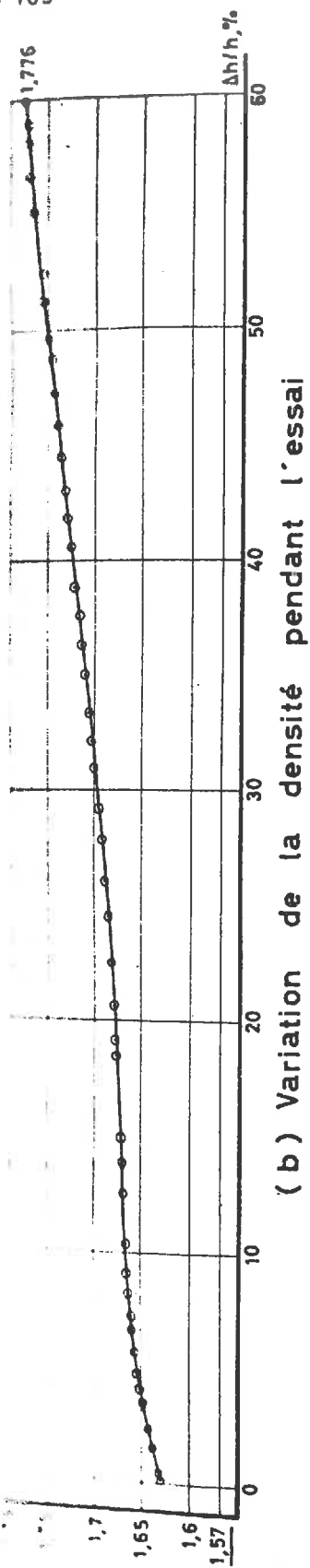


Figure 1.53 (a) Courbe effort - déformation



ESSAI TRIAXIAL A PRESSION MOYENNE CONSTANTE $\sigma'_m = 67$ BARS SUR LE SABLE

TRIAxIAL N° 24.

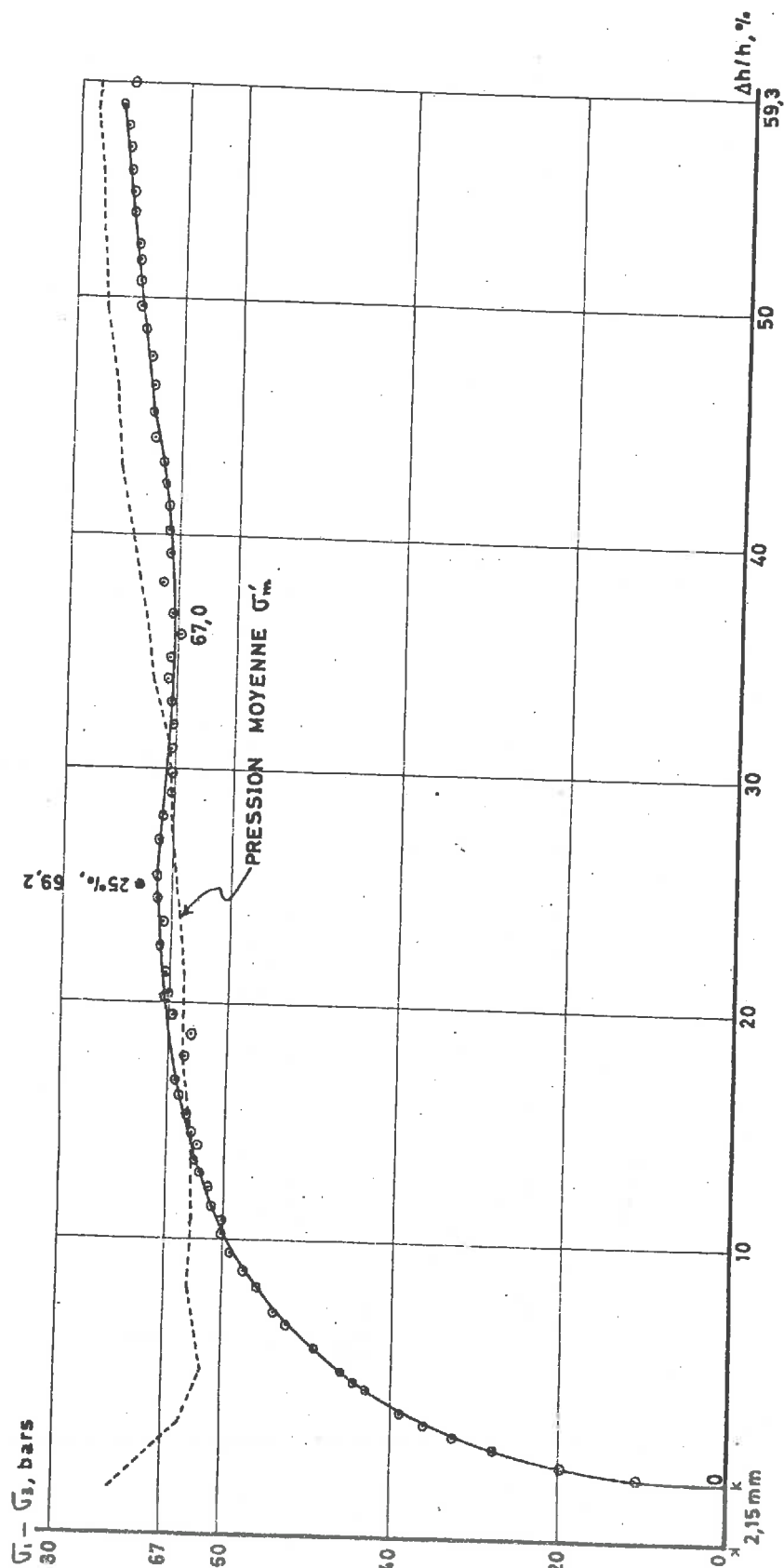
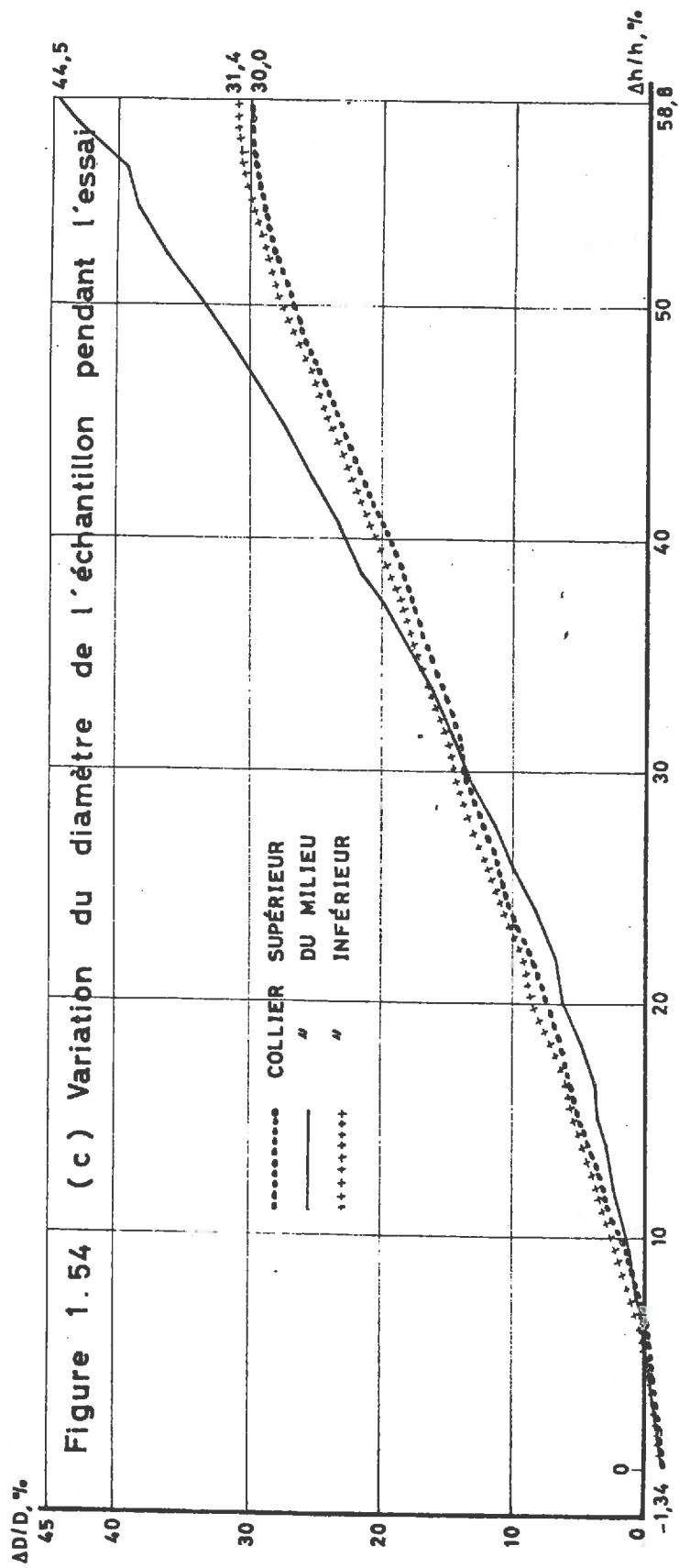
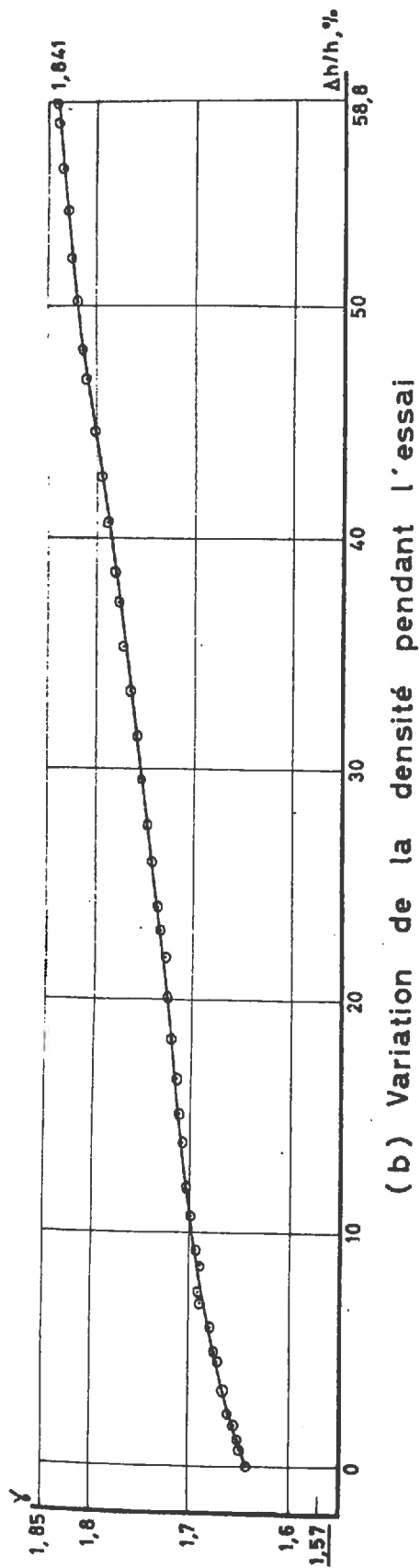


Figure 1.54(a) Courbe effort déformation



ESSAI TRIAXIAL A PRESSION MOYENNE CONSTANCE $\sigma'_m = 95$ BARS SUR LE SABLE N° 1.
 TRIAXIAL N° 28.

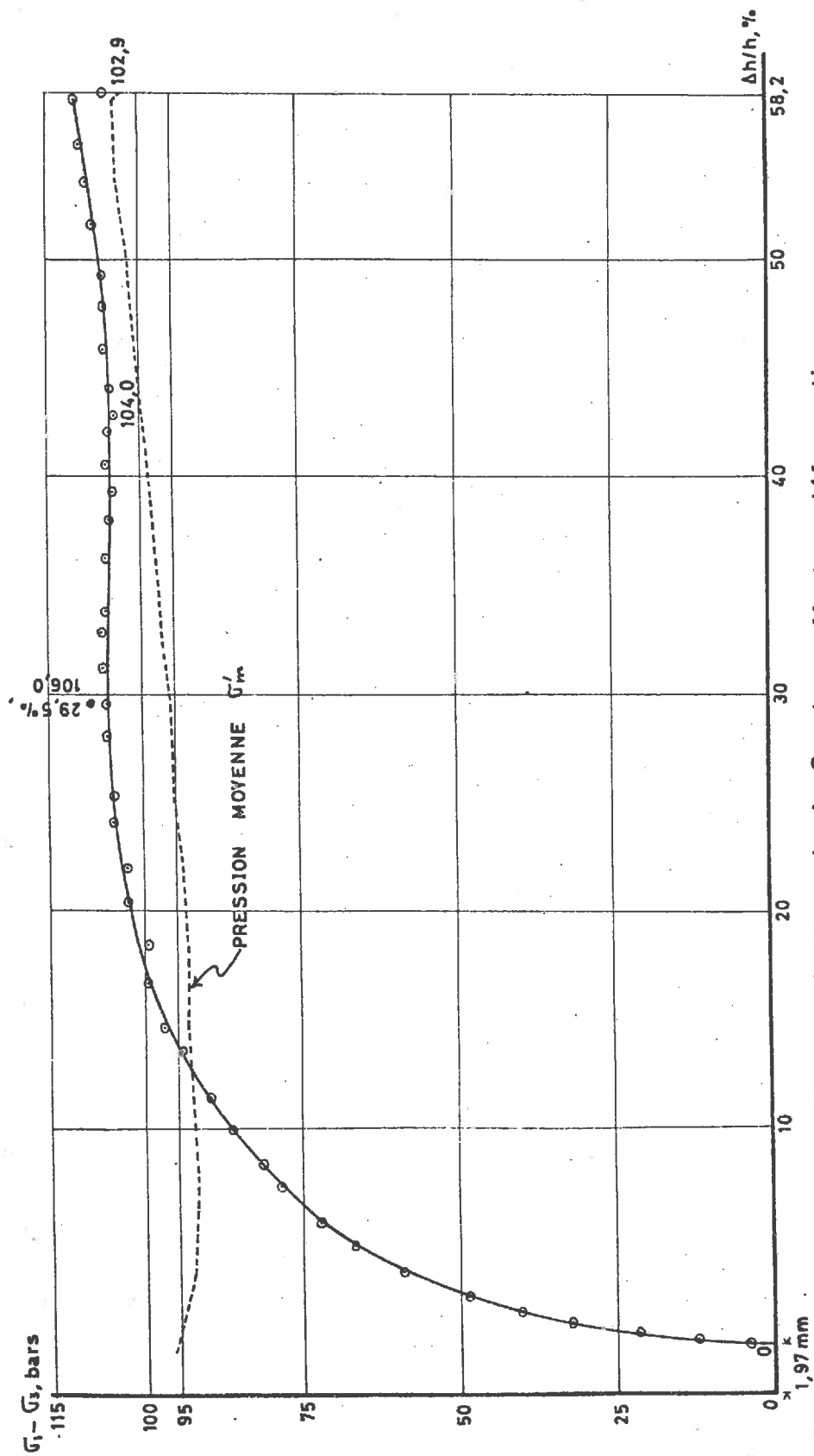
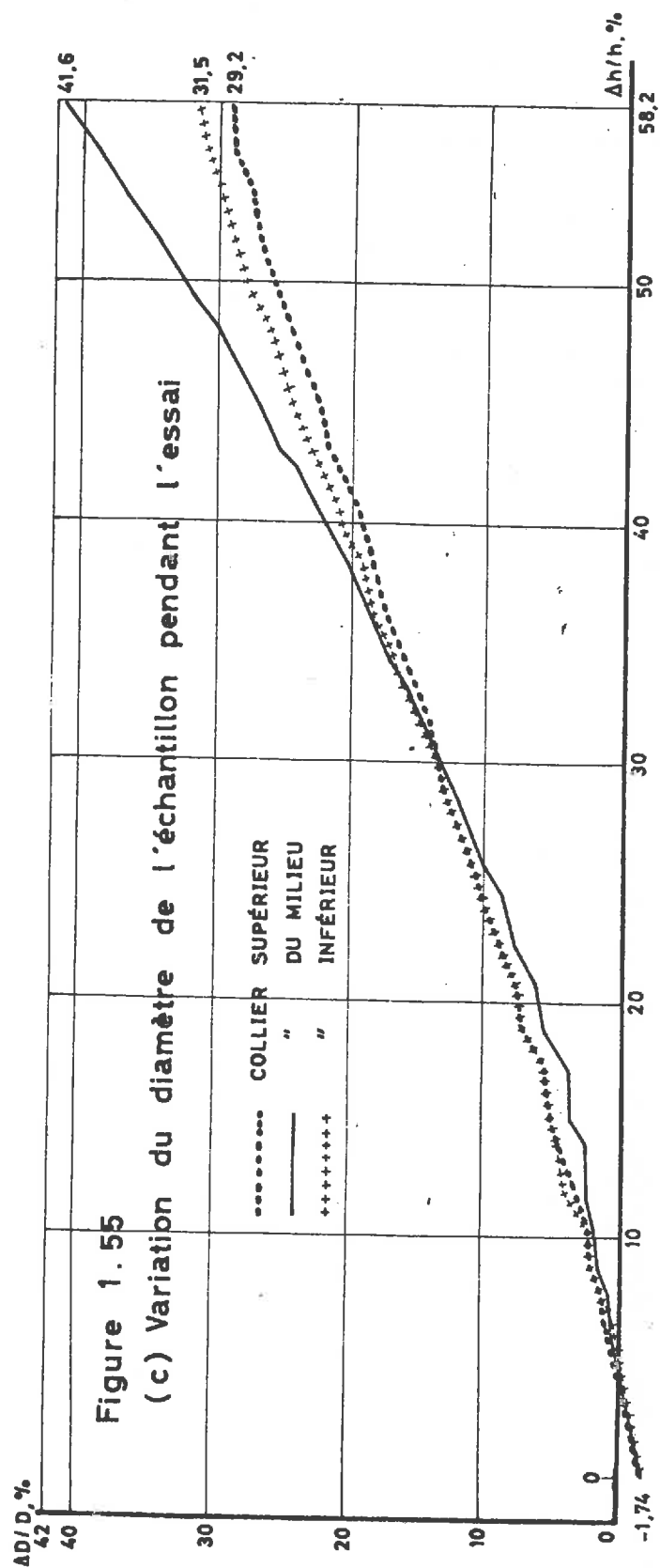
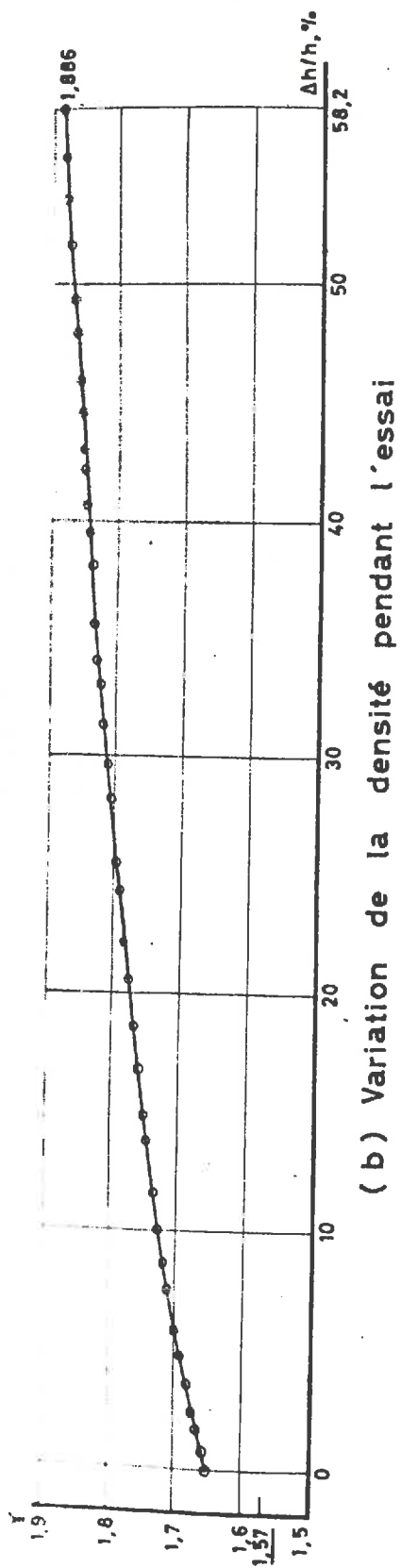


Figure 1.55 (a) Courbe effort - déformation



ESSAI TRIAXIAL À PRESSION MOYENNE CONSTANTE $\sigma'_m = 135$ BARS SUR LE SABLE N° 1.
 TRIAXIAL N° 29.

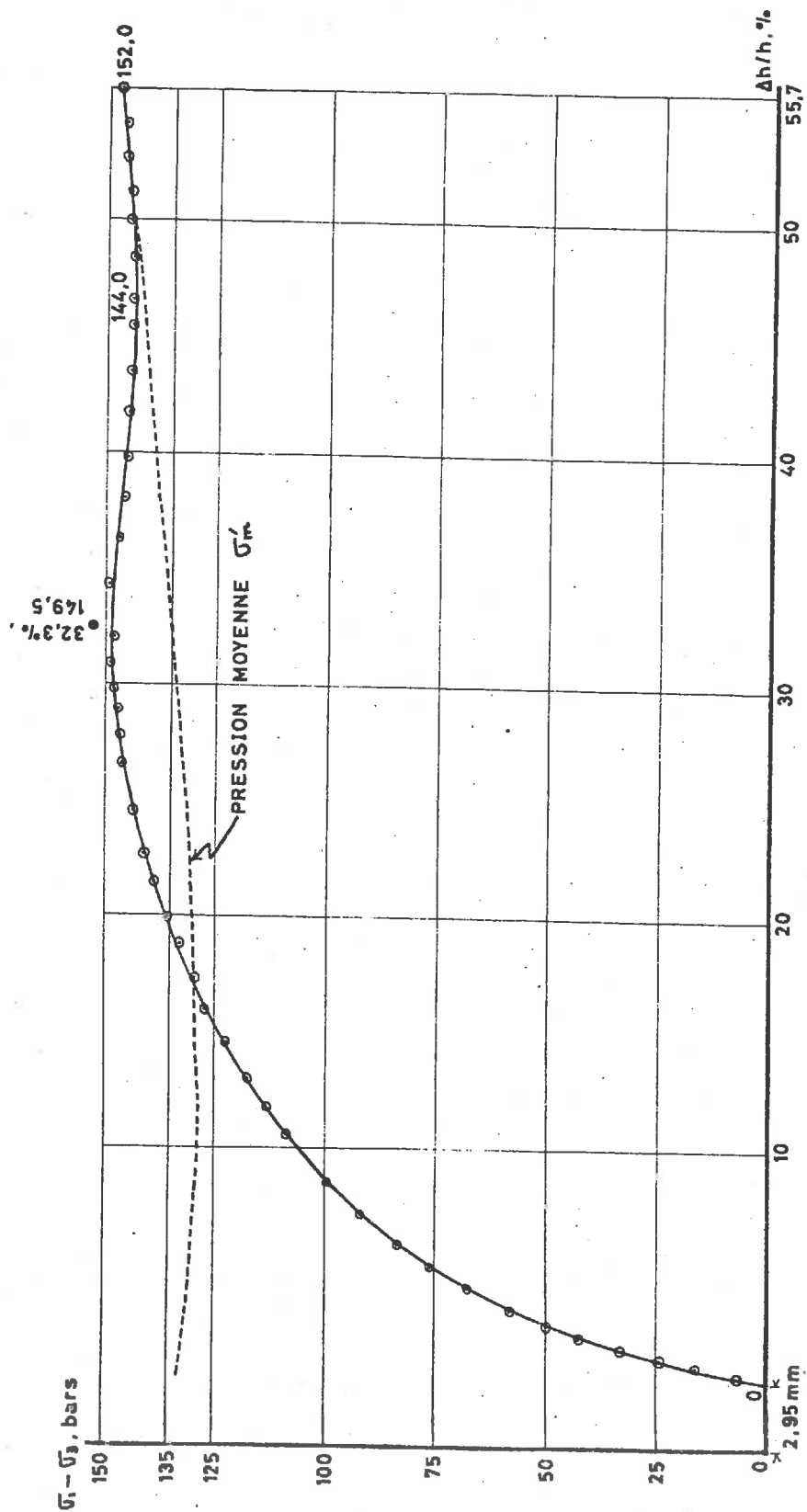
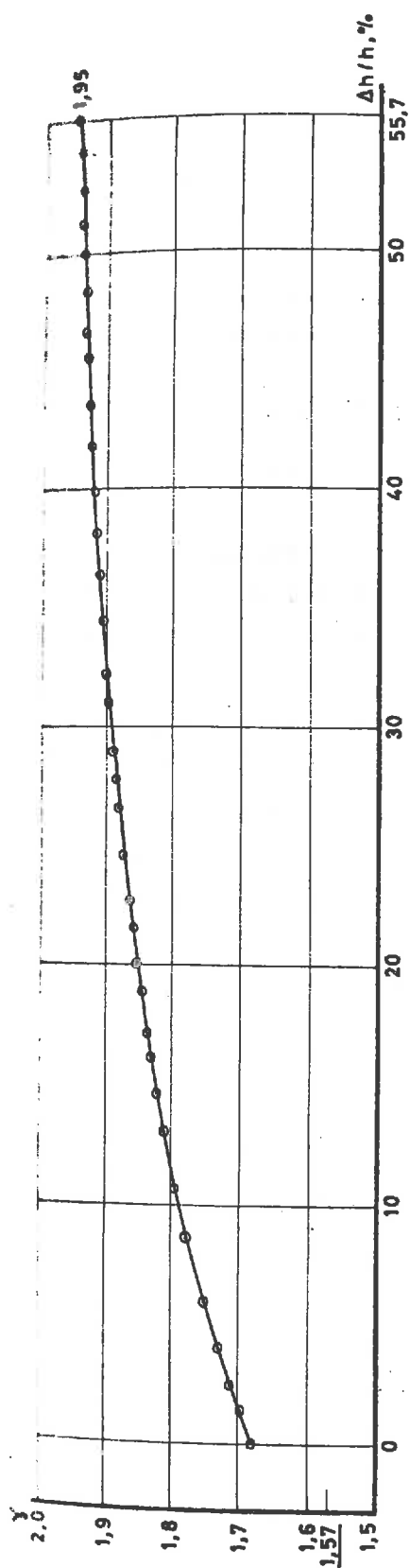


Figure 1.56 (a) Courbe effort - déformation



(b) Variation de la densité pendant l'essai

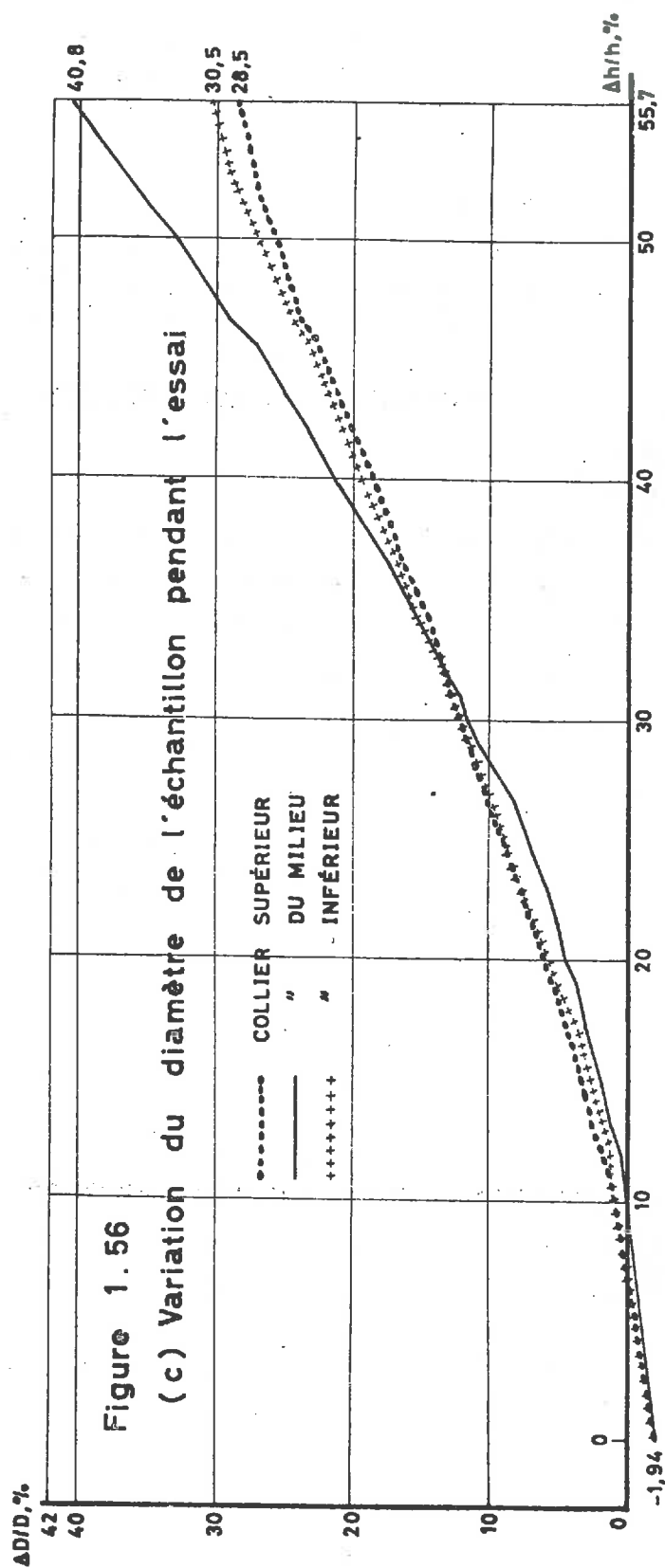


Figure 1.56

(c) Variation du diamètre de l'échantillon pendant l'essai

..... COLLIER SUPÉRIEUR
 — " DU MILIEU
 ++++++ " INFÉRIEUR

1.8.1. Courbes effort-déformation pendant l'écrasement de l'échantillon.

La première des 3 courbes de chacune des figures 1.50 à 1.56 montre la variation de $\sigma_1 - \sigma_3$ avec la déformation axiale relative de l'échantillon au cours des essais. Ces courbes ont la même allure que celles relatives aux essais à pression latérale constante, mais les valeurs sont plus faibles, du fait des pressions latérales moins importantes. Les courbes dont la partie finale se relève correspondent aux essais dans lesquels la pression moyenne σ_m n'a pu être maintenue parfaitement constante pendant toute la durée des essais. Sur les figures, nous avons montré la pression moyenne à chaque instant pendant la durée des écrasements. L'abscisse $\Delta h/h$ correspondant au maximum de $\sigma_1 - \sigma_3$ augmente avec σ_m (cf. fig. 1.57). Cette abscisse croît moins vite que $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{maximum}}$ (cf. fig. 1.21). La figure 1.23 suggère que $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{maximum}}$ serait une fonction linéaire de σ_m .

1.8.2. Courbe intrinsèque des matériaux.

La figure 1.58 montre les cercles de rupture relatifs aux maxima de $\sigma_1 - \sigma_3$ obtenus au cours d'essais triaxiaux à pression moyenne σ_m constante effectués sur le sable n° 1 et la courbe intrinsèque construite à partir de ces cercles. On remarque une diminution de l'angle de frottement interne φ du matériau avec la pression σ_m de l'essai, cette décroissance s'effectuant de plus en plus lentement à mesure que σ_m augmente.

1.8.3. Variation de la densité pendant les essais.

Les courbes (b) des figures 1.50 à 1.56 montrent la variation de la densité du sable n° 1 pendant les essais triaxiaux à pression moyenne σ_m constante. Pour tous ces essais la densité

ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION MOYENNE σ_m CONSTANTE SUR LE SABLE N° 1

Déformation axiale relative $\Delta h/h$ correspondant aux maxima de $\sigma_1 - \sigma_3$
en fonction de σ_m

$\Delta h/h$ correspondant aux maxima de $\sigma_1 - \sigma_3$, %

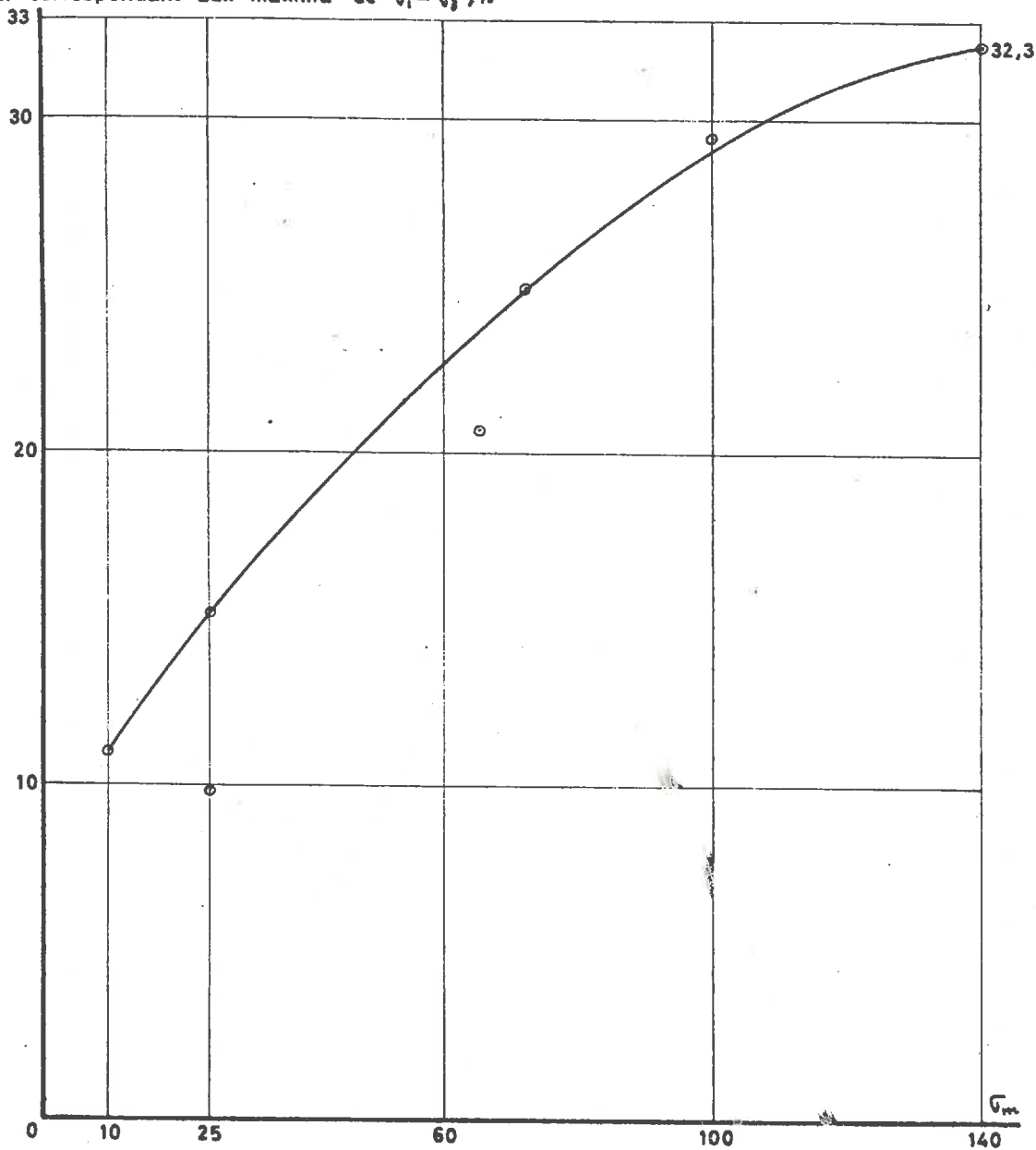


Figure 1.57

ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION MOYENNE $\bar{\sigma}_m$ CONSTANTE

Sable du laboratoire, densité initiale 1,57

Diagramme de rupture de Mohr aux maxima de $\sigma_1 - \sigma_3$

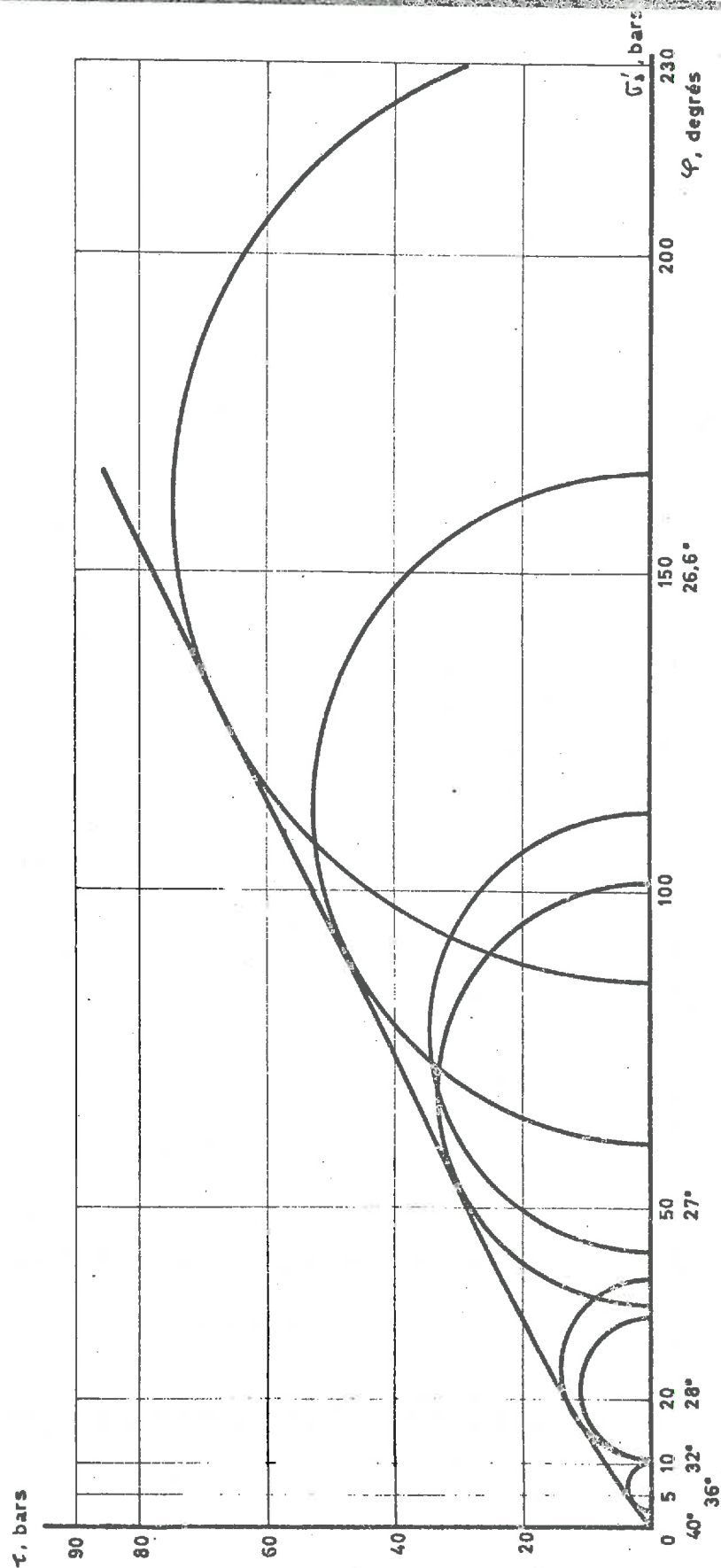


Figure 1.58

du sable lors de la mise en place est de 1,57. La contre-pres-
sion créée à l'intérieur de l'échantillon est de 5,0 bars.

Pour l'essai à $\sigma'_m = 5$ bars (fig. 1.50 (b)), la densi-
té ne fait que décroître pendant l'essai ; cette décroissance
est rapide au début de l'essai, et la densité se stabilise à la
fin de l'essai à la valeur 1,464.

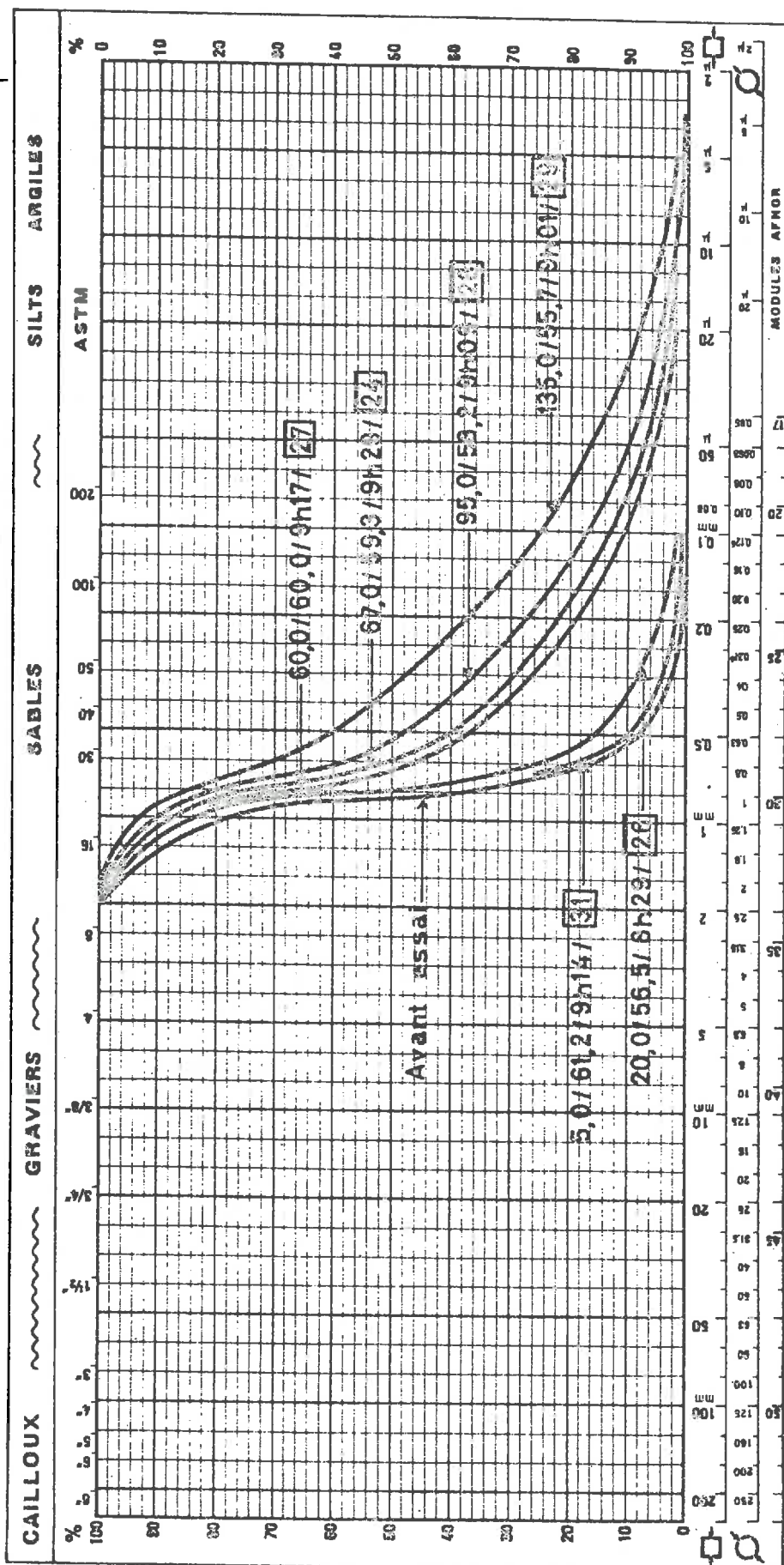
Seul l'essai à $\sigma'_m = 20$ bars donne un maximum et un
minimum de la densité. Nous avons effectué deux essais à
 $\sigma'_m = 20$ bars et la concordance entre les deux courbes de densi-
té (cf. figs. 1.51 (b) et 1.52 (b)) est parfaite. A la fin des
deux essais, poursuivis jusqu'à $Ah/h = 56,5$ et $59,0$ %, la den-
sité devient à peu près égale à la densité de mise en place
(1,583 et 1,573, par comparaison avec 1,57) et monte encore
légèrement.

Pour les essais à $\sigma'_m = 60$ à 95 bars (cf. figs. 1.53
à 1.55), la densité monte continuellement pendant toute la du-
rée des essais et ne se stabilise pas encore pour une déforma-
tion axiale relative supérieure à 58 %.

La densité croît régulièrement pendant toute la durée
de l'essai à $\sigma'_m = 135$ bars, cette croissance étant plus rapide
au début de l'essai. Vers la fin de l'essai la densité se sta-
bilise à la valeur 1,95.

Le maximum de la courbe de densité, lorsqu'il existe,
ne correspond à aucune particularité de la courbe effort-défor-
mation, et le maximum de cette dernière courbe ne correspond à
aucune particularité de la courbe de densité.

Sur la figure 1.33 on peut voir la densité du sable



SABLE DU LABORATOIRE AVANT ET
APRÈS ESSAIS TRIAXIAUX À PRESSION
MOYENNE σ_m CONSTANTE
ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Echantillon n°	CLASSE	W	LL	PI	NATURE - REMARQUES
					Voir les conventions relatives
					aux indications portant sur les
					courbes aux §§ 1.5.4 et 1.8.4
					Figure 1.59

à la fin de chaque essai en fonction de la pression moyenne sous laquelle l'essai s'est effectué.

1.8.4. Modifications granulométriques dues aux essais.

La figure 1.59 montre les courbes granulométriques du sable n° 1 dans les états suivants :

- avant d'être soumis aux essais ;
- après les essais triaxiaux à pression moyenne σ_m constante avec $\sigma'_m = 5, 20, 60, 67, 95$ et 135 bars.

L'essai à pression moyenne σ_m constante avec $\sigma'_m = 135$ bars crée 25 %, en poids, de grains de diamètre inférieur à 0,1 mm ; avant l'essai, il n'y avait pratiquement pas de ces grains fins dans le matériau.

Sur la figure 1.59, les indications relatives à chaque courbe, sauf celles correspondant au sable avant essai, suivent les mêmes conventions que celles exposées au § 1.5.4, avec la différence qu'ici le premier nombre de chaque groupe représente la pression moyenne σ'_m de l'essai et non plus la pression latérale σ'_3 .

Les lignes en pointillé de la figure 1.34 montrent le pourcentage pondéral obtenu des grains de diamètre inférieur à des valeurs déterminées après que le sable ait été soumis à des essais triaxiaux à pression moyenne σ'_m constante. Pour un diamètre déterminé, la courbe relative aux essais à pression moyenne σ'_m constante se trouve à gauche de la courbe correspondant aux essais à pression latérale σ'_3 constante, ce qui est bien normal. Pour le diamètre de 1 mm, les deux courbes sont pratiquement confondues ; les différences entre les deux catégories d'essais sont plus marquées dans le cas des grains fins que dans le cas des grains de grand diamètre.

Une partie de la figure 1.35 montre les diamètres d_{10} et d_{60} du sable n° 1 avant qu'il ait été soumis aux essais et après les essais triaxiaux à pression moyenne σ_m constante, avec σ'_m maximum = 135 bars. Les essais modifient beaucoup plus le d_{10} que le d_{60} . Ils tendent ainsi à transformer un sable à granulométrie uniforme en un sable à granulométrie variée.

1.8.5. Variation du diamètre de l'échantillon pendant les essais.

Avec le même dispositif d'antifretage décrit au § 1.3, nous trouvons dans cette série d'essais triaxiaux à pression moyenne σ_m constante des déformations latérales comparables à celles correspondant aux essais à pression latérale constante (cf. courbes (c) des figures 1.50 à 1.56).

CHAPITRE 2

COMPORTEMENT D'UN SABLE SOUS L'EFFET D'UNE TRES FORTE PRESSION ISOTROPE

2.1. GENERALITES.

Nous avons effectué quelques essais qui consistent à appliquer une pression isotrope de plus de 1000 bars sur un échantillon de sable. Le matériau utilisé dans ces essais est le sable n° 1 dont les propriétés caractéristiques ont été exposées au § 1.2. Les renseignements à tirer de cette série d'essais sont notamment les variations volumétriques du matériau et ses modifications granulométriques sous l'effet de la forte pression isotrope appliquée. Les essais sont relativement de courte durée (de l'ordre d'une heure) et en aucun cas n'approchent un intervalle de temps comparable à celui correspondant au temps d'écrasement des essais triaxiaux qui ont été rapportés au Chapitre 1. La durée des essais est déterminée ici par le temps que met le volume du matériau pour se stabiliser lors de chaque augmentation ou diminution de pression.

2.2. VARIATION DE LA DENSITE AVEC LA PRESSION APPLIQUEE.

Sur la figure 2.1 nous avons porté les variations de la densité du matériau sous l'effet de la pression isotrope effective σ'_1 , avec trois cycles de mise en pression. Le matériau est mis en place à la même densité (1,57) que celle réalisée lors des essais triaxiaux effectués sur le même sable et dont les résultats ont été exposés au Chapitre 1. Le matériau est saturé et les variations de volume sont mesurées par la

SABLE N° 1 (SABLE DU LABORATOIRE) SOUMIS À UNE TRÈS FORTE PRESSION ISOTROPE
 Variation de la densité sèche γ_d et de l'indice des vides e avec la pression isotrope appliquée

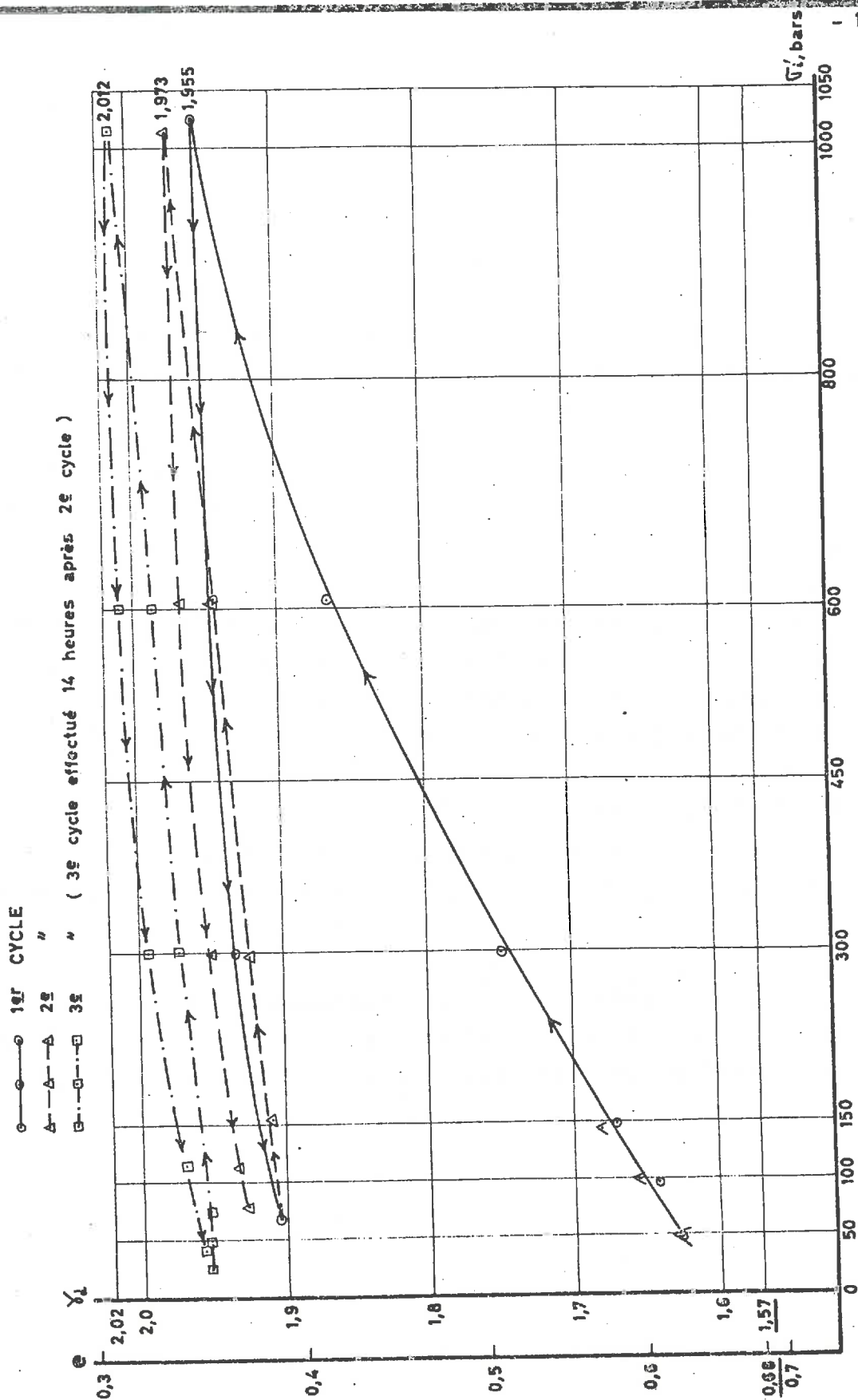


Figure 2.1

lecture de la quantité d'eau admise ou rejetée par l'échantillon. Une contre pression de 5,0 bars est créée dans l'échantillon. Sur la figure 2.1, les trois points $\Delta \Delta \Delta$ correspondent aux valeurs obtenues lors de la mise en pression au début de l'essai triaxial à $\sigma_3 = 150$ bars. Ils présentent la densité du matériau pour $\sigma'_1 = 50, 100$ et 145 bars et ont été transposés de la figure 1.12 à la figure 2.1 pour montrer leur position dans l'ensemble des points de cette dernière figure.

Lors du 1er cycle de chargement, la pression a atteint 1010 bars, lors du deuxième cycle, 1020 bars et lors du troisième cycle, 1000 bars. Le troisième cycle de chargement a été effectué 14 heures après la fin du deuxième cycle.

La densité monte beaucoup lors de la première mise en pression : elle passe de 1,570 à 1,955. A la décharge, elle ne varie pas de façon appréciable : quand la pression revient à 70 bars, la densité est encore de 1,905 (lors de la mise en pression, on a, pour $\sigma'_1 = 70$ bars, $\gamma = 1,636$). Lors des deux cycles suivants de mise en pression, il n'y a pas beaucoup de changement dans la densité ; elle se situe dans l'intervalle 1,905 - 2,012 durant les deux cycles complets, avec les variations partielles suivantes :

2ème cycle de chargement : une variation de la pression de 70 à 1020 bars fait passer la densité de 1,905 à 1,973. Lorsque la pression revient à 75 bars, on a $\gamma = 1,927$.

Le 3ème cycle de chargement a lieu 14 heures après la fin du 2ème cycle. Pendant cet intervalle de temps, la pression passe de 75 bars à 30 bars et la densité de 1,927 à 1,954. Lors du 3ème cycle, une variation de la pression de 30 bars à 1000 bars fait passer la densité de 1,954 à 2,012 et lorsque

SABLE N° 1 (SABLE DU LABORATOIRE) SOUMIS À UNE TRÈS FORTE PRESSION ISOTROPE
Variation du module de compressibilité isotherme E_i avec la pression isotherme σ'_i appliquée

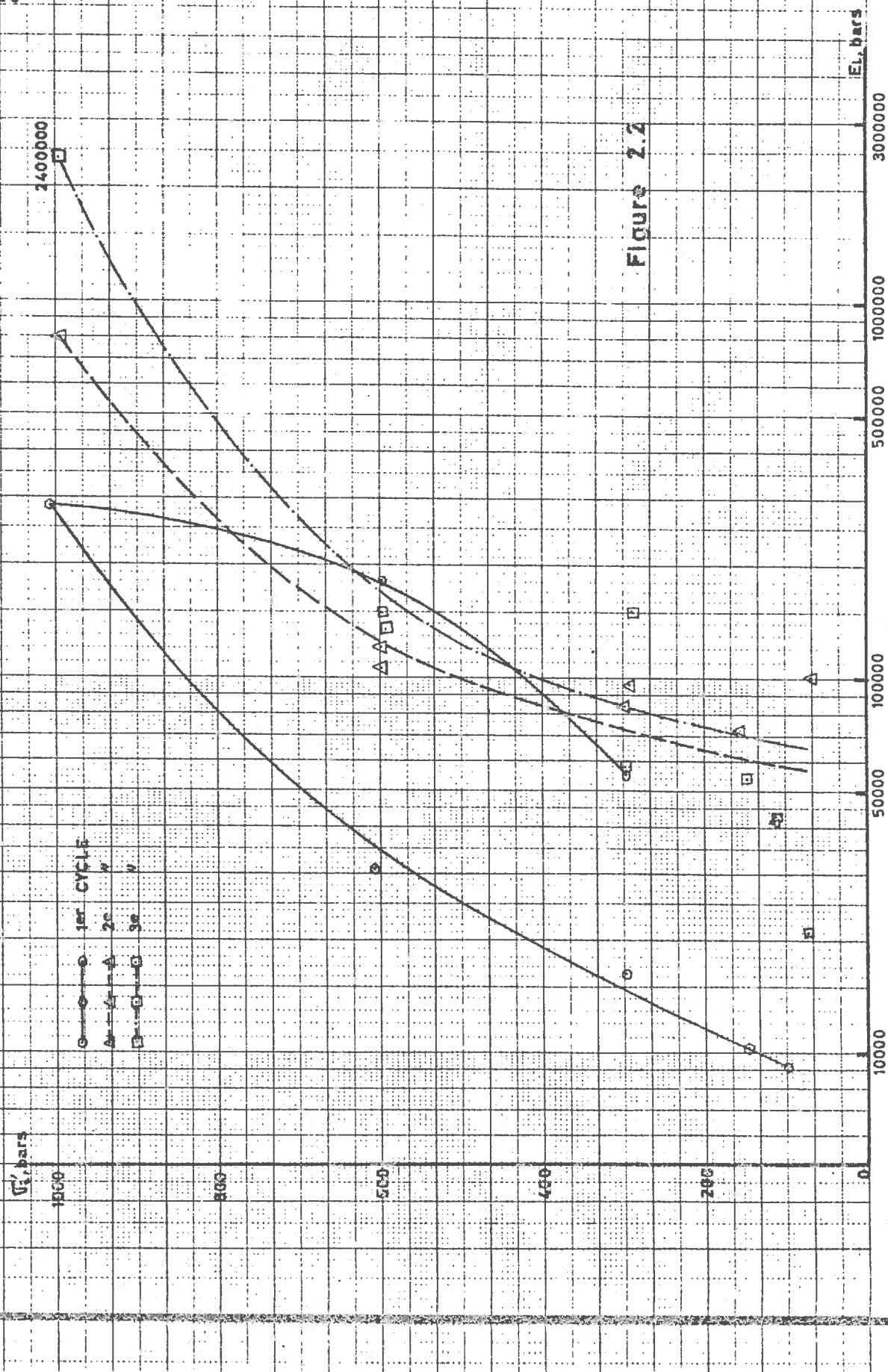


Figure 2.2

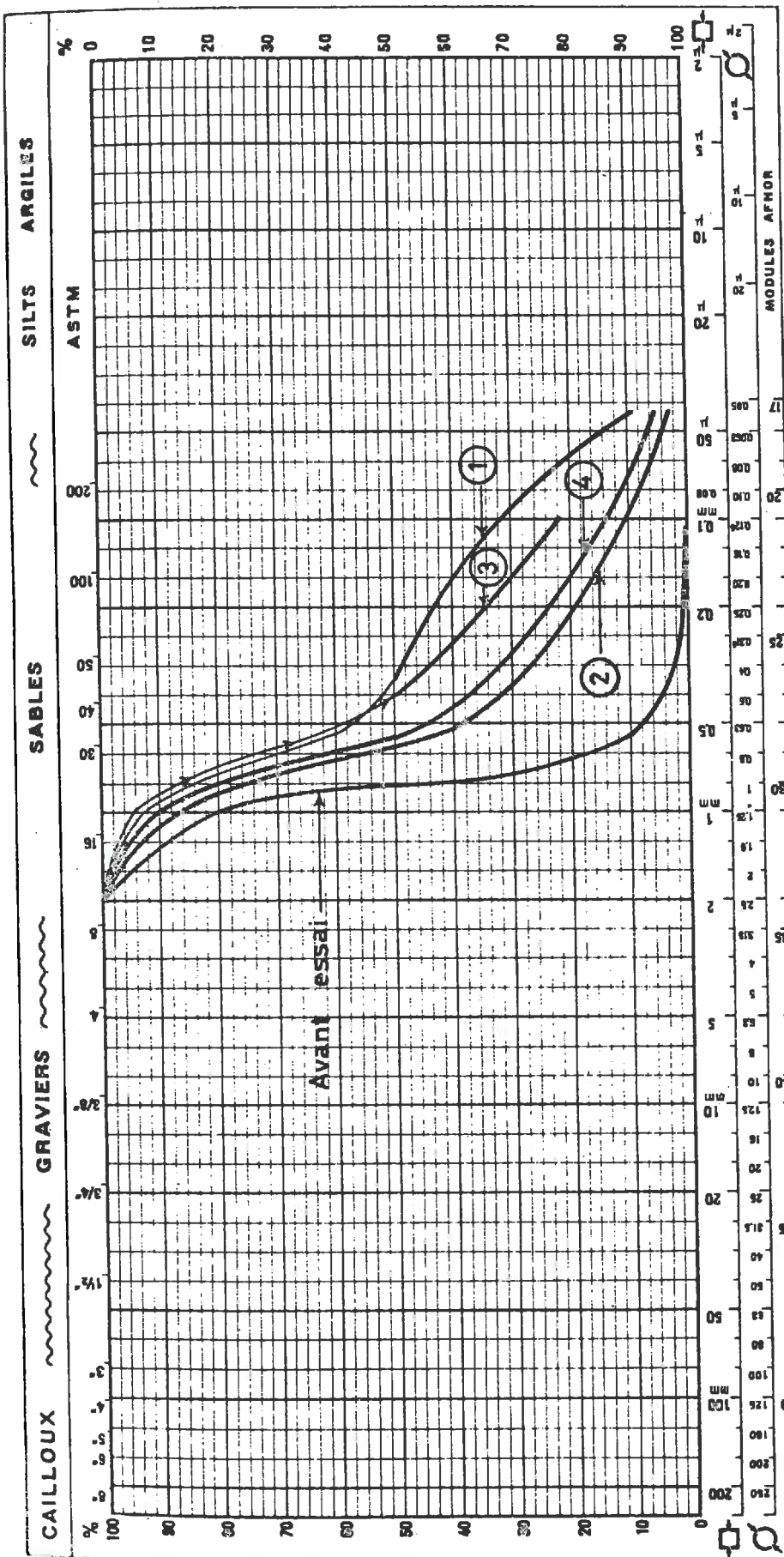


Figure 2.3

Cf. § 2.3

ANALYSE GRANULOMETRIQUE
AXIAL (courbe 3)

5302

Echantillon n°	CLASSE	W	LL	PI	NATURE - REMARQUES
					SABLE DU LABORATOIRE
					AVANT ESSAI ET APRÈS
					ÊTRE SOUMIS A DES PRES-
					SIONS ISOTROPES (courbes
					1, 2 et 4) ET UN ESSAI TRI-

la pression revient à 40 bars, la densité a la valeur 1,957.

La grande variation de la densité au cours de la première mise en pression suggère que la plus importante modification granulométrique aurait lieu dans cette première phase de l'essai ; les deux cycles de charge suivants n'ajouteraient que peu de changement dans la composition granulométrique du matériau telle qu'elle se présente à la fin de la première mise en pression.

2.3. MODULE DE COMPRESSIBILITE ISOTROPE E_i .

La figure 2.2 montre le module de compressibilité isotrope E_i du matériau, calculé en partant des variations volumétriques au cours des trois cycles de mise en pression.

La courbe de retour du premier cycle se distingue nettement de celle correspondant à la mise en charge. Pour les deux cycles suivants, les courbes charge et décharge sont confondues. Le module croît avec le nombre de cycles.

2.4. MODIFICATIONS GRANULOMETRIQUES DUES A LA PRESSION ISOTROPE.

La figure 2.3 présente les modifications apportées dans la granulométrie du matériau par trois essais consistant à le soumettre à des pressions isotropes et un essai triaxial dont la durée d'écrasement est plus courte que celle des essais triaxiaux exposés au Chapitre 1. Les courbes de la figure sont numérotées de 1 à 4 ; les détails des essais auxquels elles se rapportent, ainsi que les remarques relatives à chacune d'elles, sont présentés ci-après :

- courbe 1 : pression isotrope de 1000 bars, avec deux cycles de mise en pression. Courbe granulométrique complexe,

entièrement comprise entre les courbes granulométriques suivantes relatives au même sable :

a) courbe obtenue après l'essai triaxial à pression latérale σ_3 constante avec $\sigma'_3 = 60$ bars, déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) maximum 119,3 bars, durée de l'écrasement 7 h 10 mn,

b) courbe obtenue après l'essai triaxial à pression latérale σ_3 constante avec $\sigma'_3 = 145$ bars, déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) maximum 277,2 bars, durée de l'écrasement 9 h 11 mn.

- courbe 2 : 14 minutes au total sous une pression isotrope de 1000 bars, 3 cycles de mise en pression. Courbe granulométrique comprise entre les courbes suivantes relatives au même sable :

a) courbe obtenue après l'essai triaxial à pression latérale σ_3 constante avec $\sigma'_3 = 20$ bars, déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) maximum 48,6 bars, durée de l'écrasement 8 h 47 mn,

b) courbe obtenue après l'essai triaxial à pression latérale σ_3 constante avec $\sigma'_3 = 60$ bars, déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) maximum 119,3 bars, durée de l'écrasement 7 h 10 mn.

- courbe 3 : après un essai triaxial à pression latérale σ_3 constante, effectué sur le matériau sec, avec $\sigma_3 = 150$ bars, durée de l'écrasement 1 h 21 mn. Courbe granulométrique très proche, et à gauche de la courbe obtenue après l'essai triaxial à pression latérale constante avec $\sigma'_3 = 100$ bars, déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) maximum 184,8 bars, durée de l'écrasement 9 h 01 mn.

- courbe 4 : 21 minutes au total sous une pression isotrope de 1000 bars, 3 cycles de mise en pression. Courbe granulométrique pratiquement confondue avec la courbe obtenue après l'essai triaxial à pression latérale σ_3 constante avec $\sigma'_3 = 60$ bars, déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) maximum 119,3 bars, durée de l'écrasement 7 h 10 mn.

CHAPITRE 3

ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT SUR DES MATERIAUX PULVERULENTS

3.1. ESSAIS ET MATERIAUX.

Une série d'essais de cisaillement direct a été effectuée sur cinq matériaux pulvérulents différents. Sur ces 5 matériaux, deux ont été mis en place à deux densités différentes chacun, ce qui porte à sept le nombre de matériaux étudiés.

Font partie de ces matériaux les sables n° 1 et 2 étudiés au Chapitre 1. Ils ont été mis en place pour ces essais à la même densité que pour les essais triaxiaux (1,57 pour le sable n° 1 et 1,67 pour le sable n° 2), ce qui permet de comparer leur comportement dans les deux genres d'essais. Le sable n° 1 a en outre été mis en place à la densité 1,5. Les autres matériaux soumis aux essais sont :

- un sable de Rance, mis en place à la densité 1,45 ;
- du sable de Rance, mais dont la granulométrie a changé par suite d'essais mécaniques, mis en place à deux densités différentes : 1,391 et 1,45. Ce sable sera désigné dans la suite par "sable de Rance non intact". Le sable de Rance, constitué pour une bonne partie de coquillages, est très fragile et sa composition granulométrique change facilement.
- des petites billes de verre, de diamètre compris entre 0,2 et 0,5 mm, mises en place à la densité 1,85.

Les pressions normales sous lesquelles s'effectuent

les essais varient entre 0,11 et 20,0 bars. Dans l'évaluation de la résistance τ au cisaillement à un instant donné, il a été tenu compte de la variation de la section de l'échantillon correspondant à cet instant. La variation de la hauteur de l'échantillon -donnée de laquelle est déduite la densité moyenne γ de l'échantillon à chaque instant- a été mesurée au micron près.

3.2. INFLUENCE DE LA VITESSE DE CISAILLEMENT SUR LA RELATION DEPLACEMENT δ - RESISTANCE τ AU CISAILLEMENT.

Dans l'essai CD9 (cf. fig. 3.28) nous avons réalisé, à la main, le déplacement relatif δ des deux mâchoires de la boîte de cisaillement jusqu'à $\delta = 2$ mm environ. Ensuite l'essai a été poursuivi au moteur, le mouvement d'entraînement devenant beaucoup plus uniforme et s'effectuant à la vitesse de 0,1 mm/mn environ. Pendant la période d'entraînement à la main, la vitesse a été au moins de 5 fois plus grande. Or, sur la figure, nous voyons que les deux parties de la courbe déplacement δ - résistance τ au cisaillement ne présentent aucune discontinuité au point de leur jonction : la relation résistance τ au cisaillement - déplacement δ d'un matériau pulvérulent est indépendante de la vitesse de cisaillement.

3.3. COMPORTEMENT DES DIFFERENTS MATERIAUX.

Dans ce qui suit, nous allons exposer les propriétés de chacun des matériaux étudiés telles qu'elles ont été mises en évidence par les essais :

3.3.1. Sable n° 1, densité initiale 1,57.

3.3.1.1. Courbe effort-déformation.

Les figures 3.1 à 3.7 montrent la résistance τ au

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,57

Cisaillement direct, pression normale $p = 0,5$ bar

CD 2

○—○ RÉSISTANCE τ AU CISAILLEMENT
 ▲—▲ DENSITÉ γ

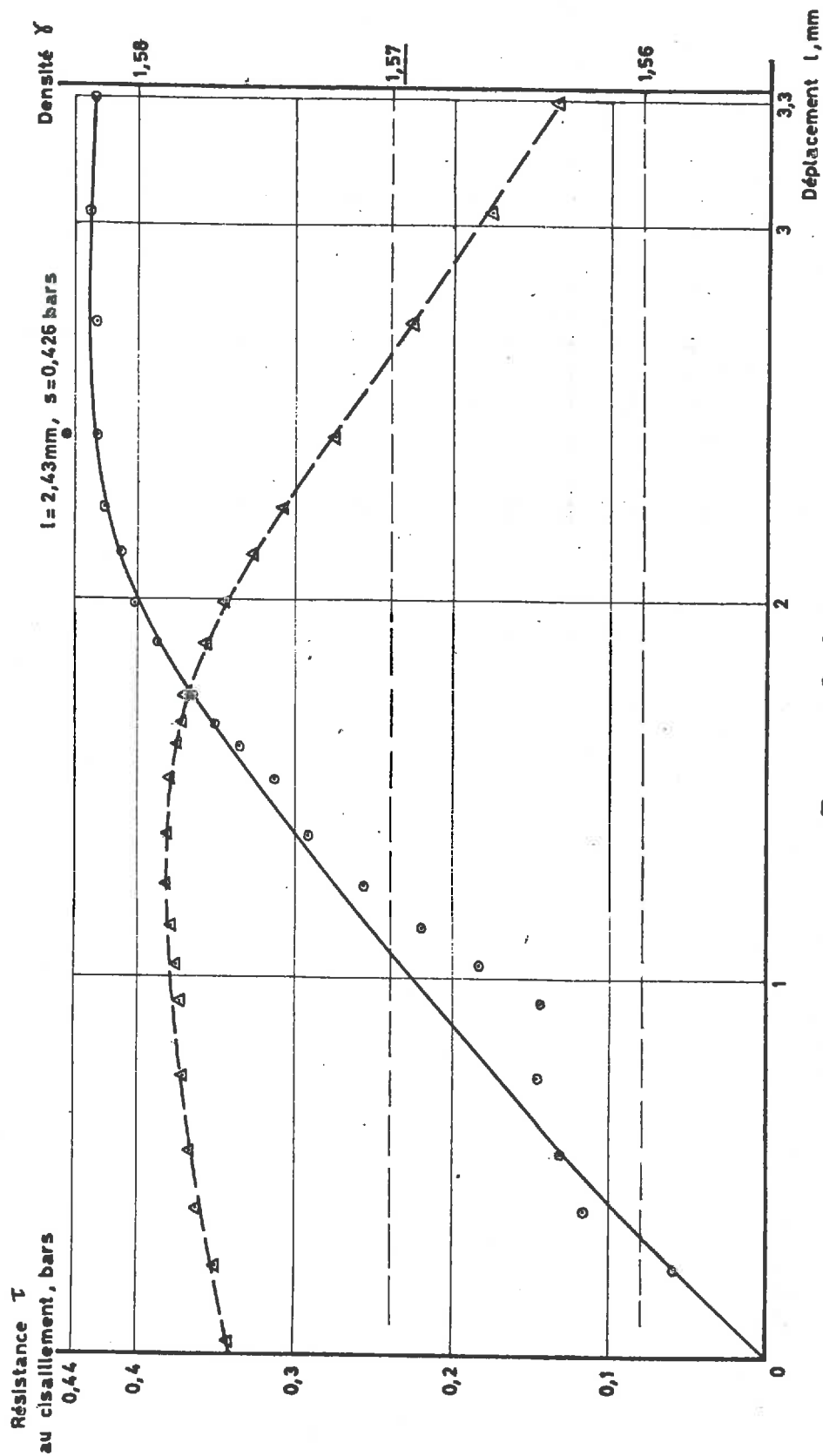


Figure 3.1

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,57
Cisaillement direct, pression normale $p = 1,0$ bar

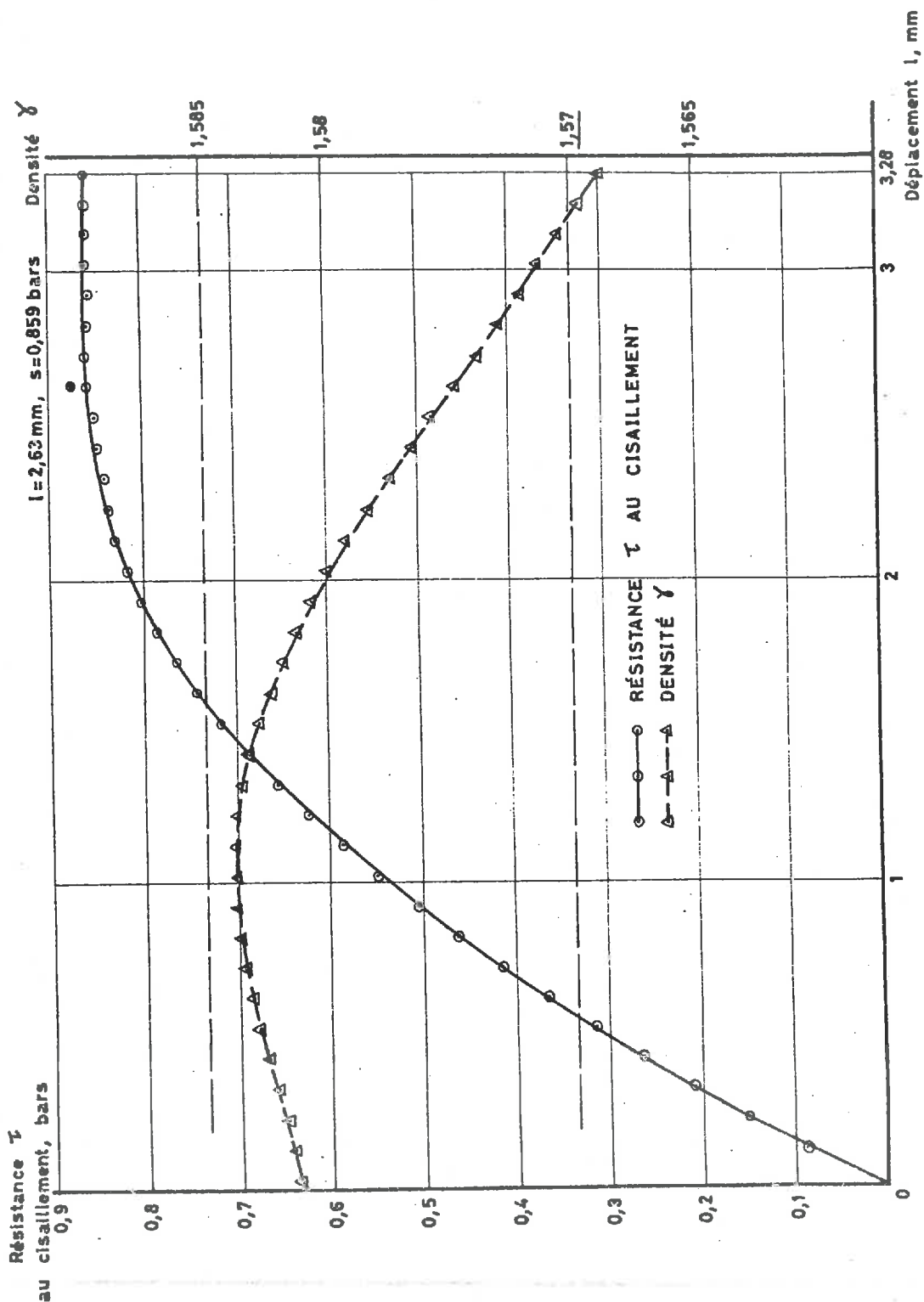


Figure 3.2

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,57

Cisaillement direct, pression normale $p = 2,0$ bars

CD 4

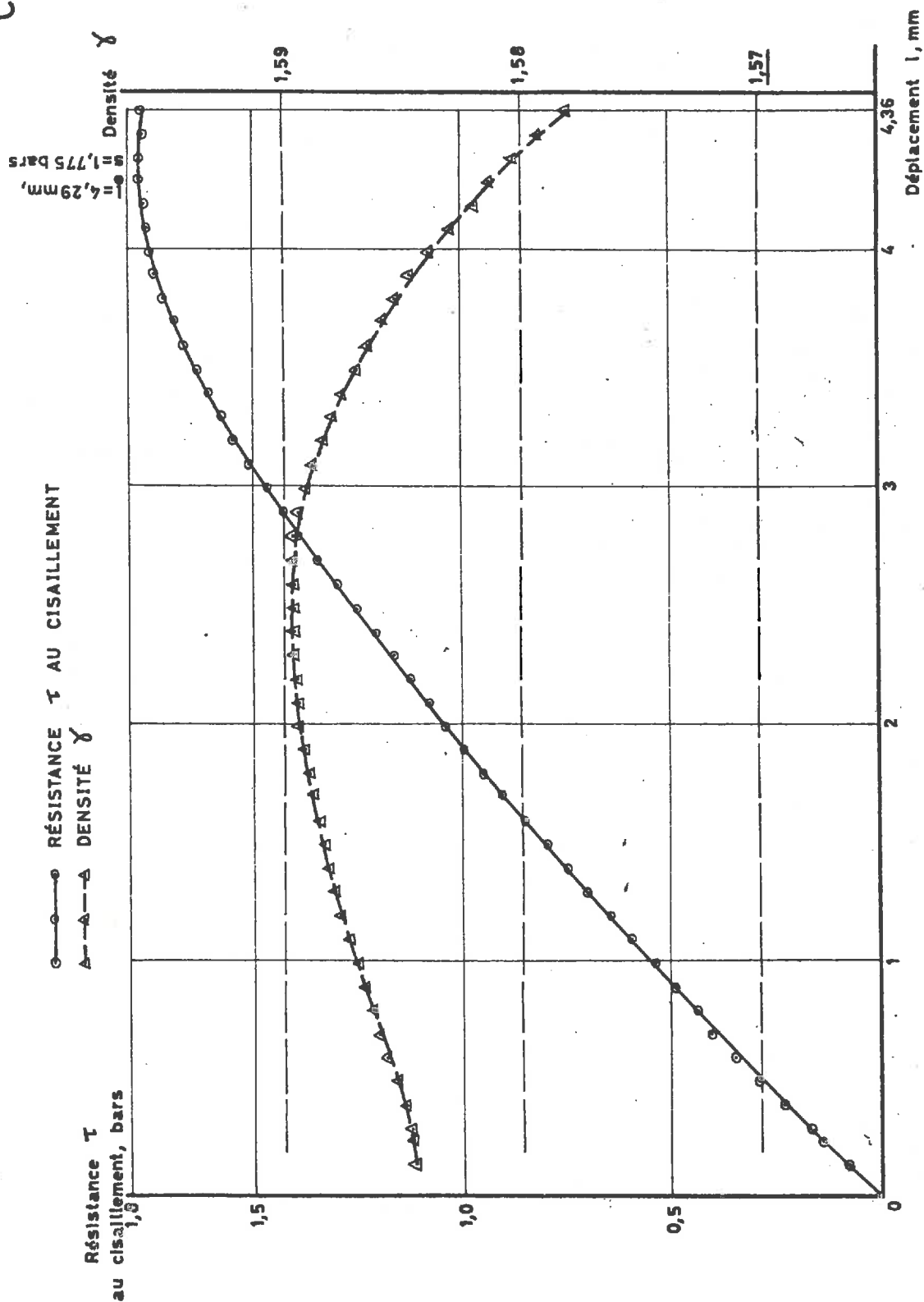


Figure 3.3

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,57 Cisaillement direct, pression normale $p = 2,61$ bars

CD 1

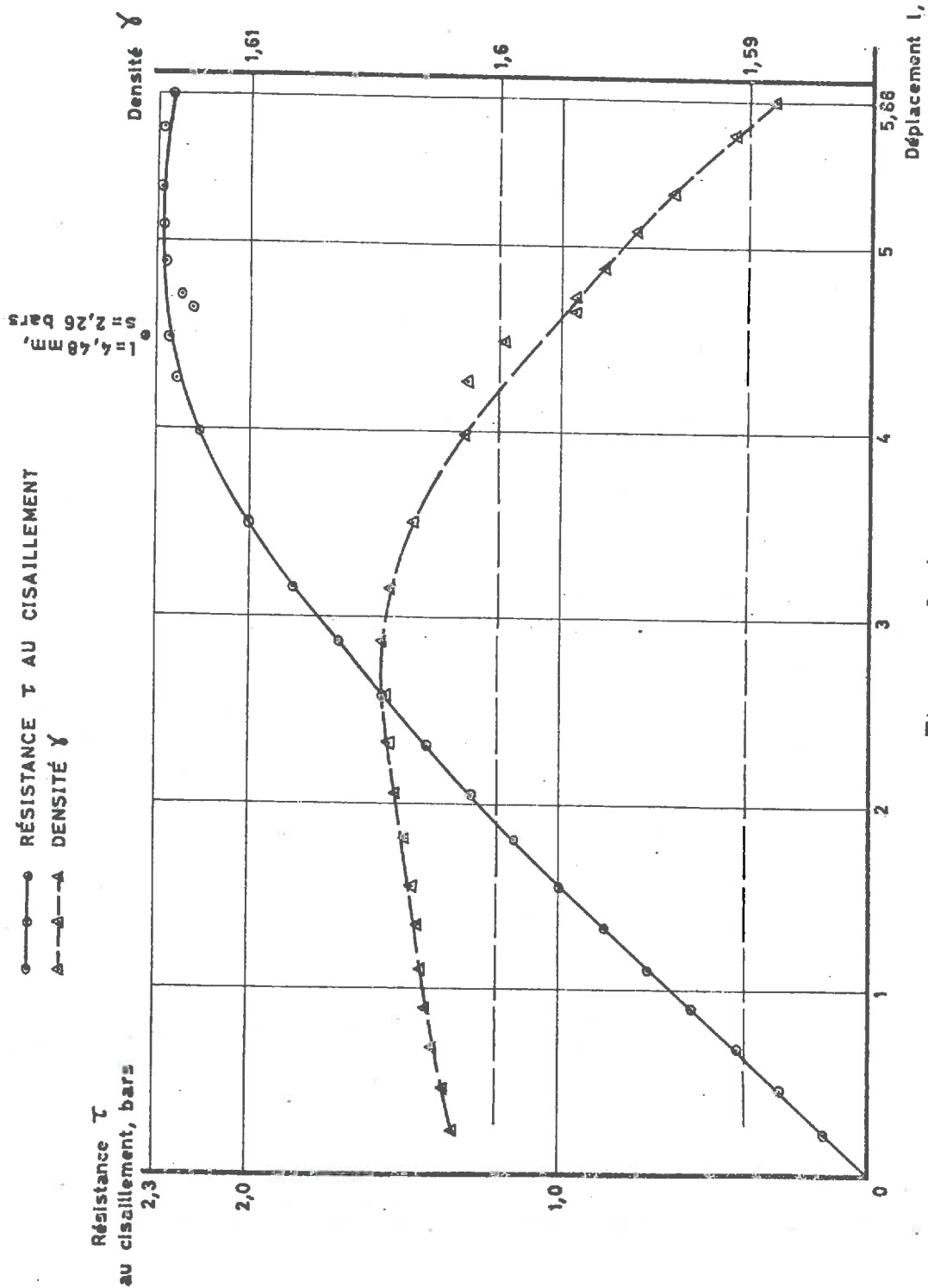


Figure 3.4

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,57 Cisaillement direct, pression normale $p = 5,0$ bars

CD 19

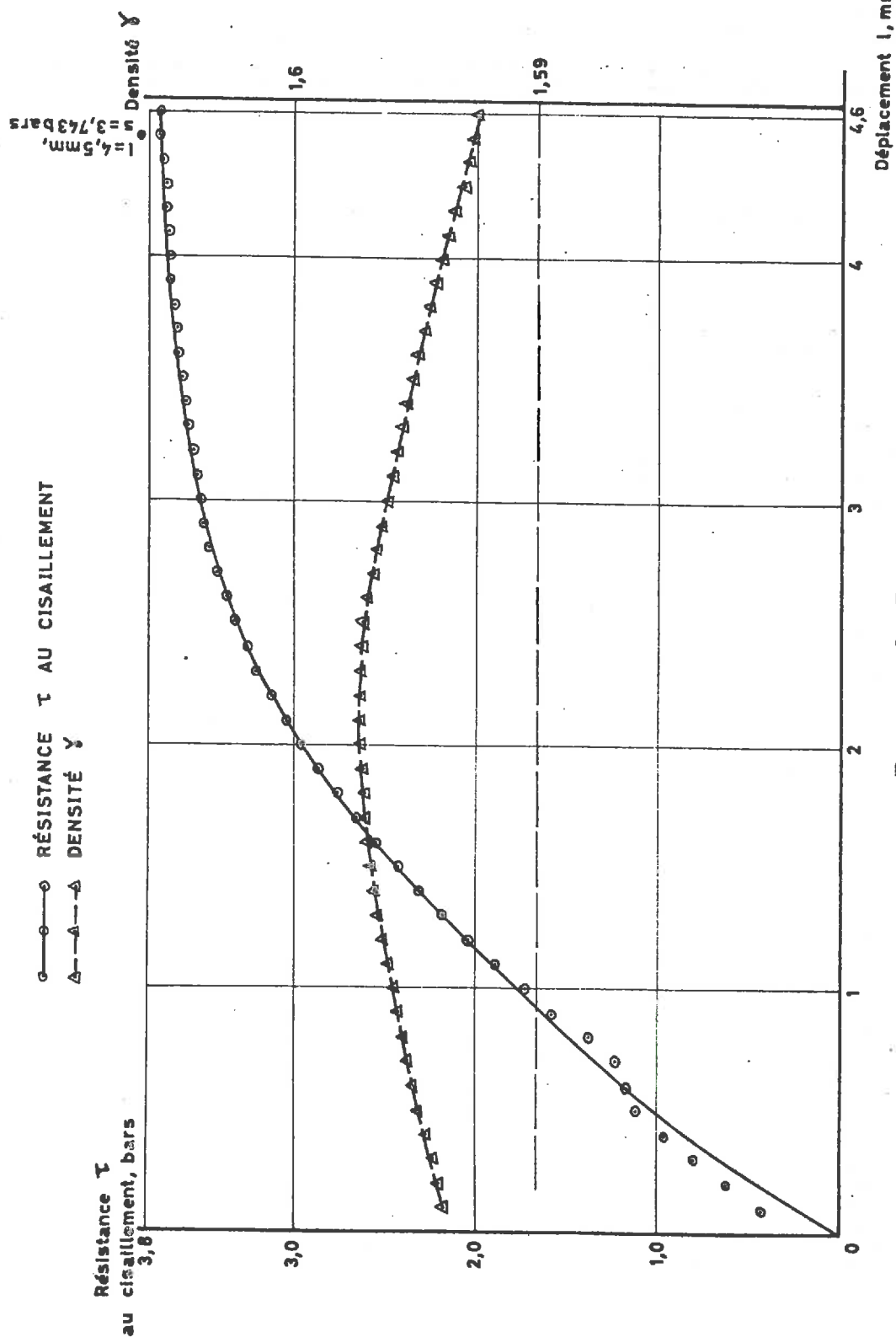


Figure 3.5

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,57 Cisaillement direct, pression normale $p = 10,0$ bars

CD 26

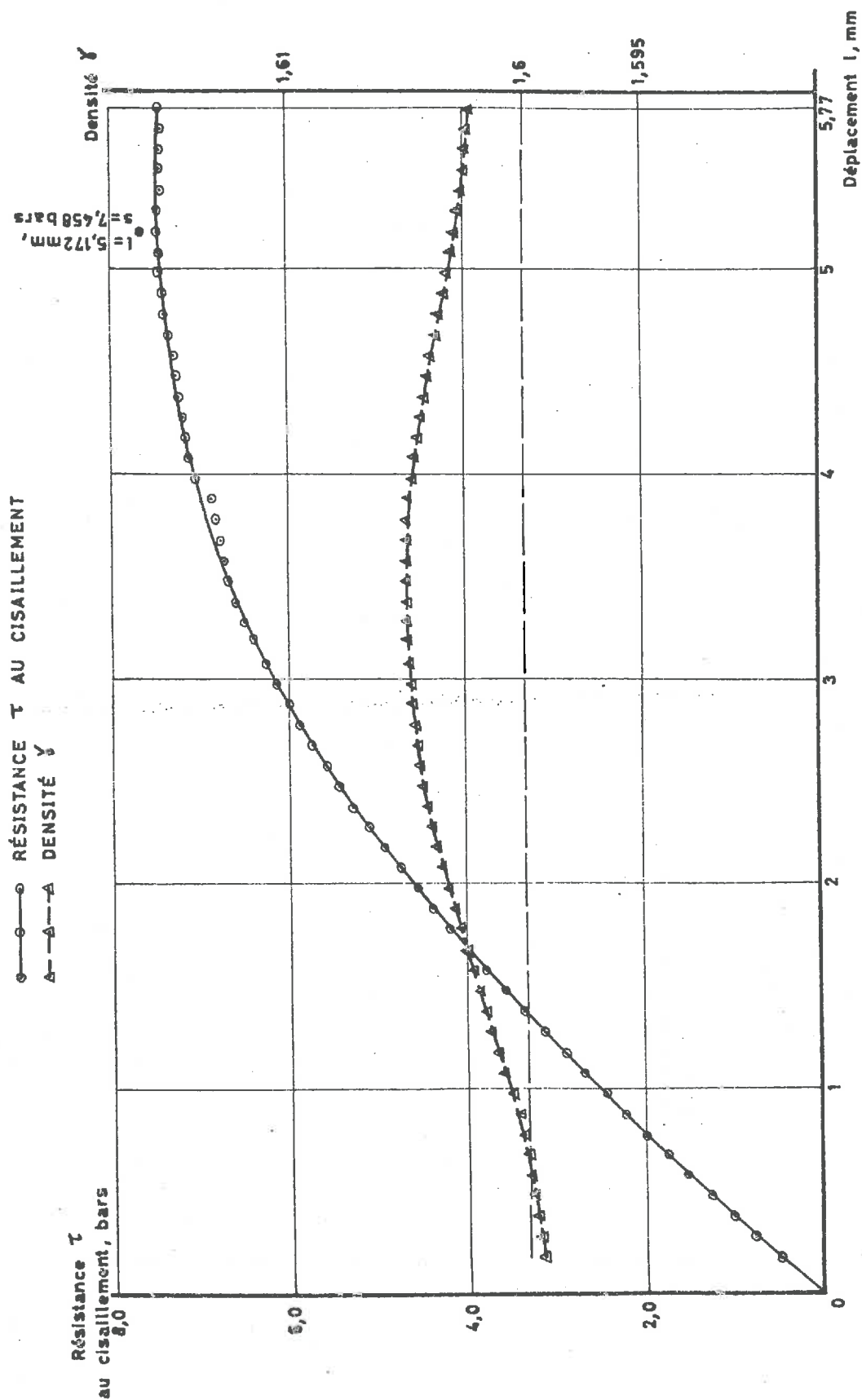


Figure 3.6

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,57

Cisaillement direct, pression normale $p = 20,0$ bars

CD 32

○—○ RÉSISTANCE τ AU CISAILEMENT
 ▲—▲ DENSITÉ γ

$l = 5,92$ mm,
 $s = 14,257$ bars

Résistance τ
 au cisaillement, bars

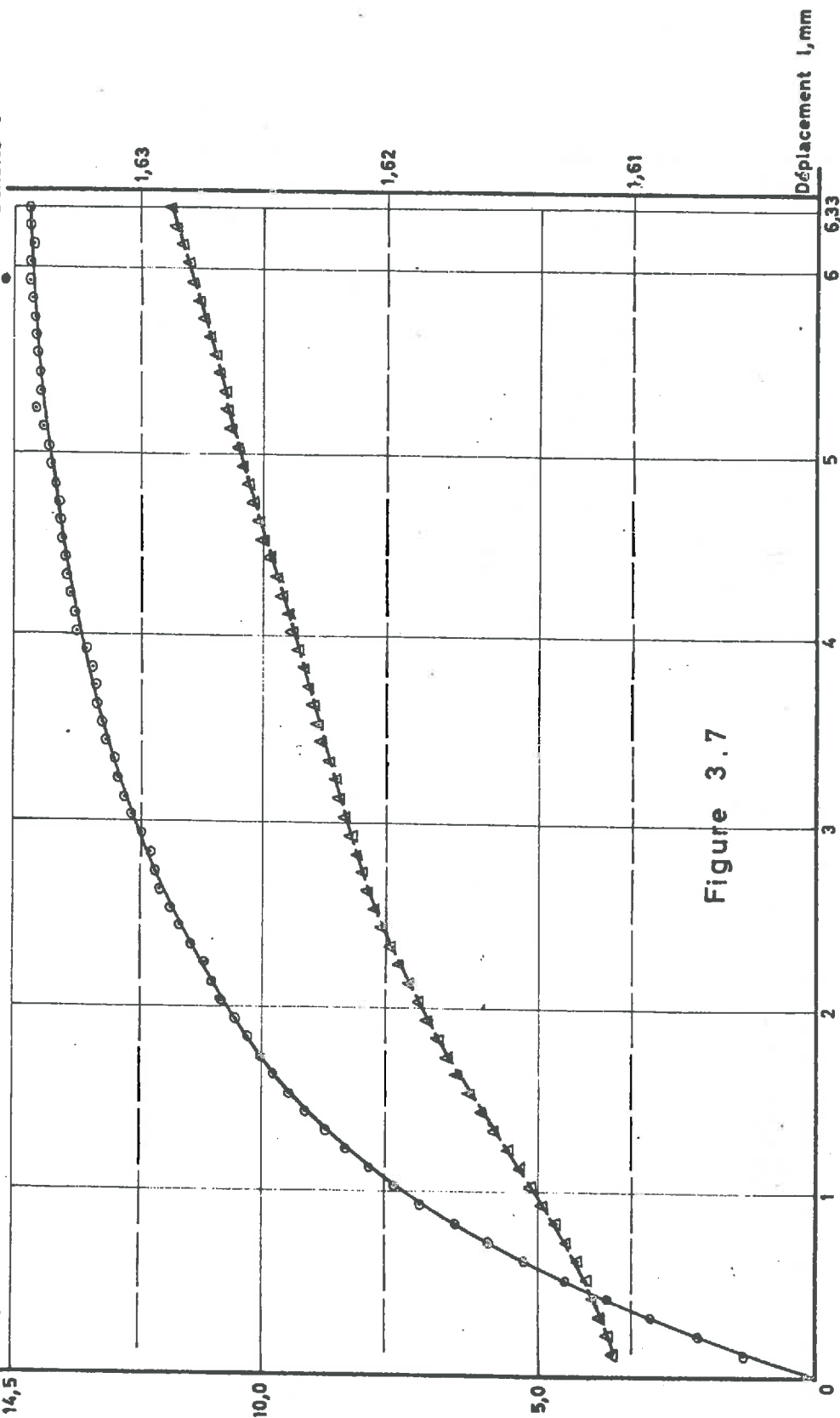


Figure 3.7

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,57 Cisaillement direct. Courbe intrinsèque

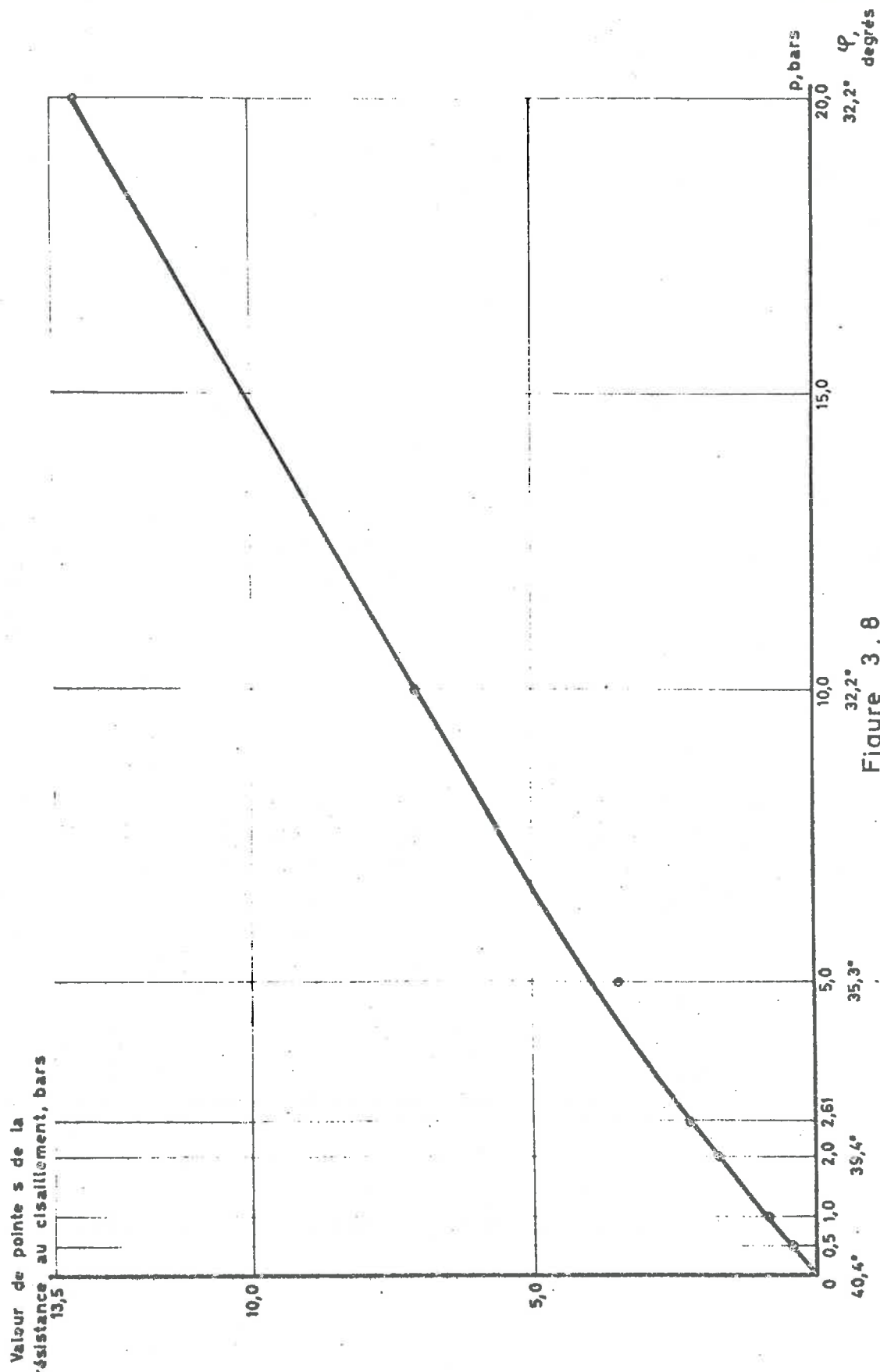


Figure 3.8

cisaillement en fonction du mouvement relatif δ des deux mâchoires de la boîte de cisaillement. Nous voyons que l'abscisse δ correspondant au maximum s du cisaillement augmente avec la pression verticale appliquée p . Ce résultat est analogue à celui observé au triaxial (cf. § 1.5.1).

3.3.1.2. Courbe intrinsèque.

La figure 3.8 présente la courbe intrinsèque du sable n° 1 construite d'après les résultats des essais de cisaillement direct effectués sous des pressions normales variant entre 0,5 bar et 20,0 bars. On remarque une décroissance de plus en plus lente de l'angle de frottement interne φ avec la pression normale p appliquée.

En comparant les valeurs de l'angle de frottement interne φ obtenues avec ces essais de cisaillement direct à celles données par les essais triaxiaux (cf. fig. 1.29), nous voyons que pour une même pression p ou σ_3 , l'angle de frottement interne φ est à peu près le même dans les deux cas. Or les essais triaxiaux ont été effectués sur du sable saturé alors que le cisaillement direct est appliqué sur du sable sec. Comme il est admis que l'angle de frottement interne d'un sable saturé est de 1 à 2 degrés inférieur à celui du même sable à l'état sec, nous pouvons conclure que les essais de cisaillement direct donnent au sable un angle de frottement interne de 1 à 2 degrés inférieur à celui obtenu avec des essais triaxiaux.

3.3.1.3. Courbes densité-déformation.

Pour des faibles valeurs de p , la densité monte, atteint un maximum, puis décroît (cf. figs 3.1 à 3.6). La deuxième partie de la courbe se relève à mesure que p

augmente. On n'observe pas de loi bien définie relative à la variation de l'abscisse correspondant au maximum de la densité avec la pression normale p appliquée. Jusqu'à $p = 1,0$ bar, la densité à la fin de l'essai est inférieure à la densité de mise en place, qui est de 1,57. Le maximum de la courbe de densité ne correspond à aucun point particulier de la courbe effort-déformation, et le maximum de cette dernière courbe ne correspond à aucun point particulier de la première. Pour l'essai à 20,0 bars, la densité ne cesse de croître pendant toute la durée de l'essai (fig. 3.7).

Ces résultats sont analogues à ceux relatifs aux courbes densité-déformation obtenues au cours des essais triaxiaux exposés au Chapitre 1 (cf. § 1.5.3).

3.3.1.4. Module oedométrique.

Lors de l'application des pressions normales sur le matériau avant de procéder au cisaillement, nous avons relevé le tassement du sable sous l'effet des charges et établi une courbe (cf. fig. 3.9) de la densité en fonction de la pression normale p . La densité varie de plus en plus lentement à mesure que les pressions augmentent. La courbe se compose essentiellement de deux portions rectilignes d'inclinaisons différentes, la pente de la première partie étant plus forte que celle de la partie finale de la courbe. Le raccordement se fait vers $p = 2$ bars.

A partir des tassements nous avons calculé le module oedométrique du sable. Dans le cas présent, ce module s'applique à un matériau mis en place dans une boîte de section carrée 60,0 x 60,0 mm. La hauteur initiale du matériau de 37,4 mm. La figure 3.10 présente le module oedométrique

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,57. ESSAIS DE CISAILEMENT DIRECT.
Densités correspondant aux diverses pressions p appliquées
à la surface du sable avant le cisaillement.

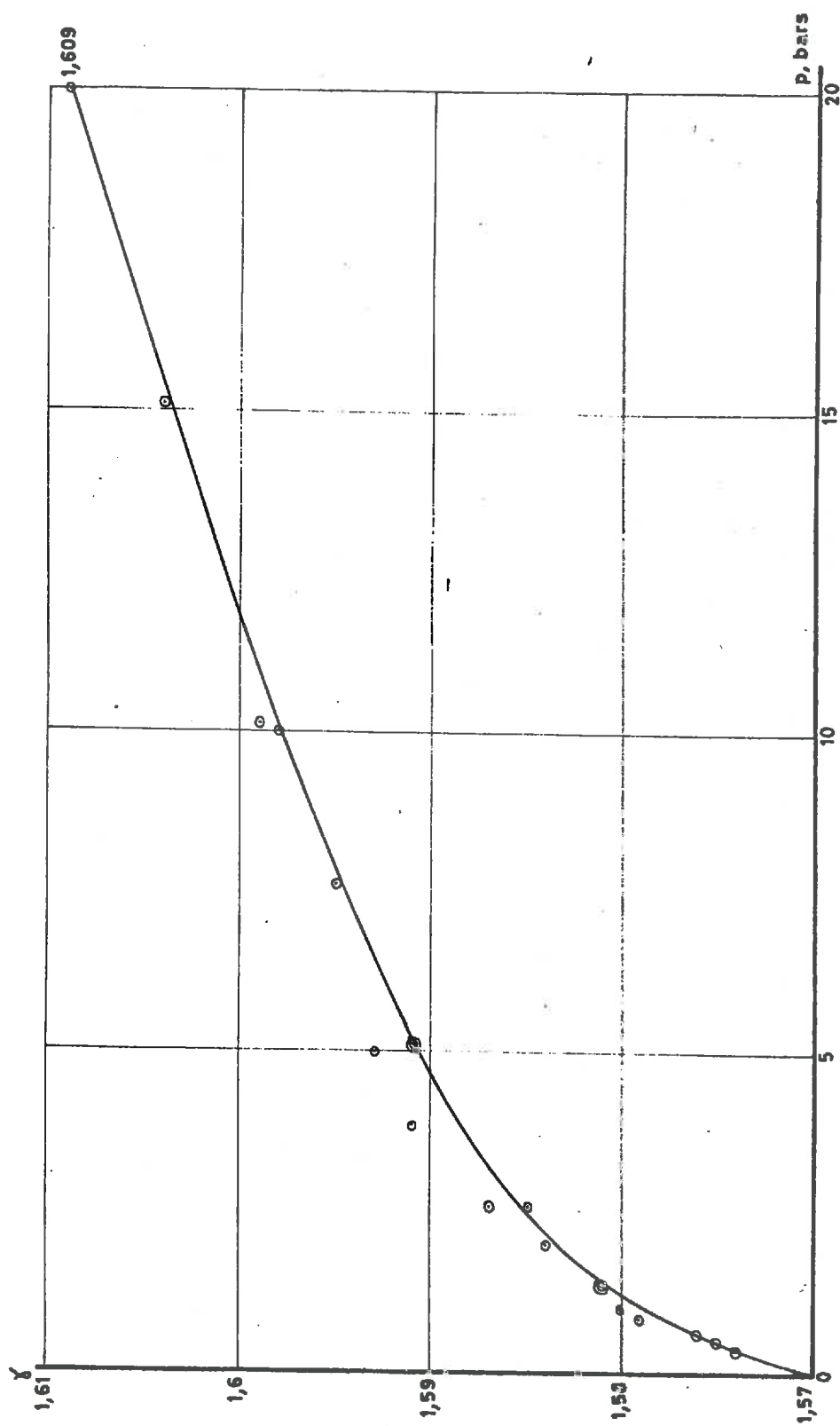


Figure 3.9

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉS INITIALES 1,50 ET 1,57. ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT.
Détermination du module oedométrique E_0 lors de l'application des charges avant le cisaillement.

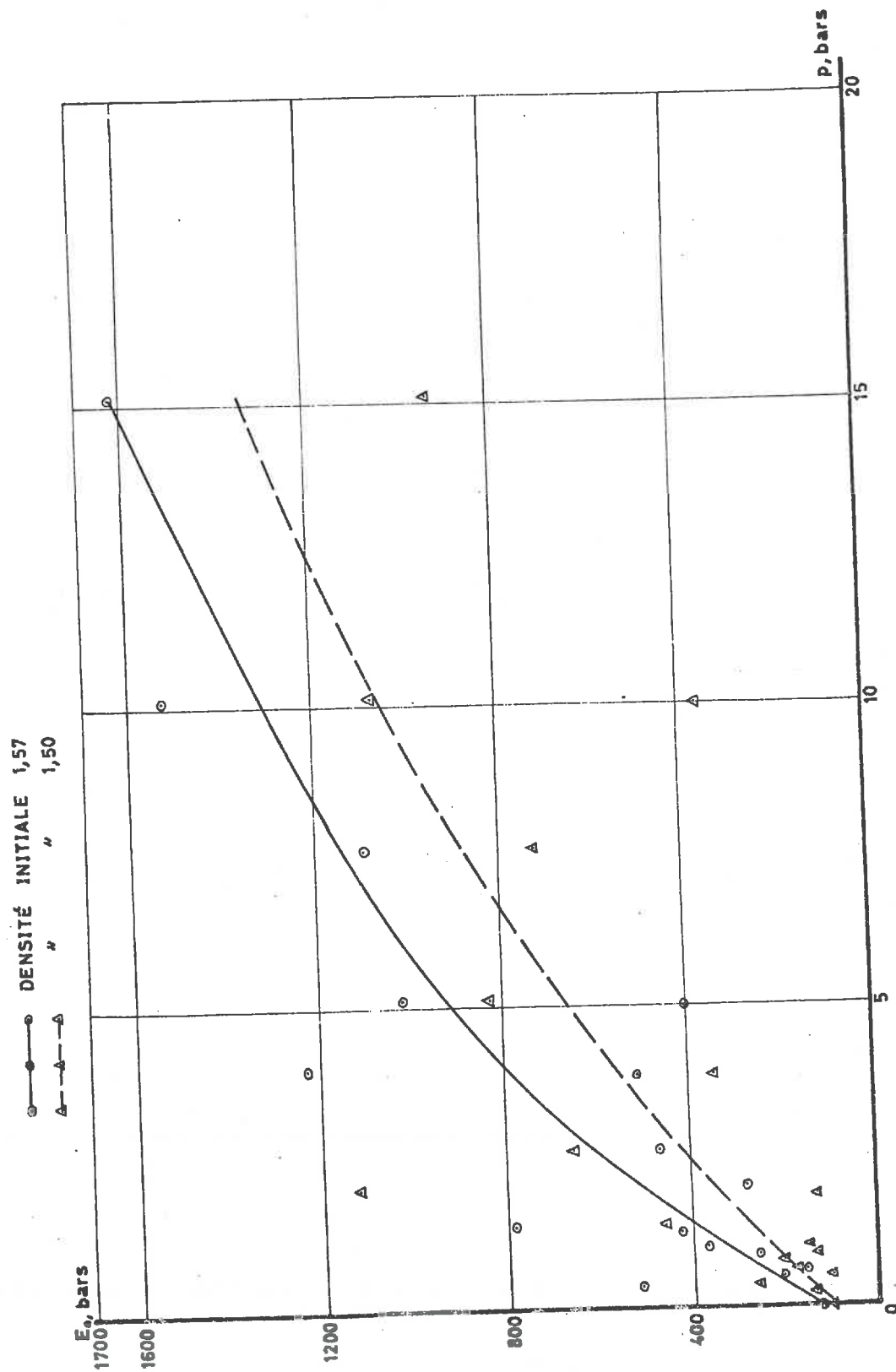


Figure 3.10

SABLE DE LOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,67
Cisaillement direct, pression normale $p = 0,5$ bars

CD 5

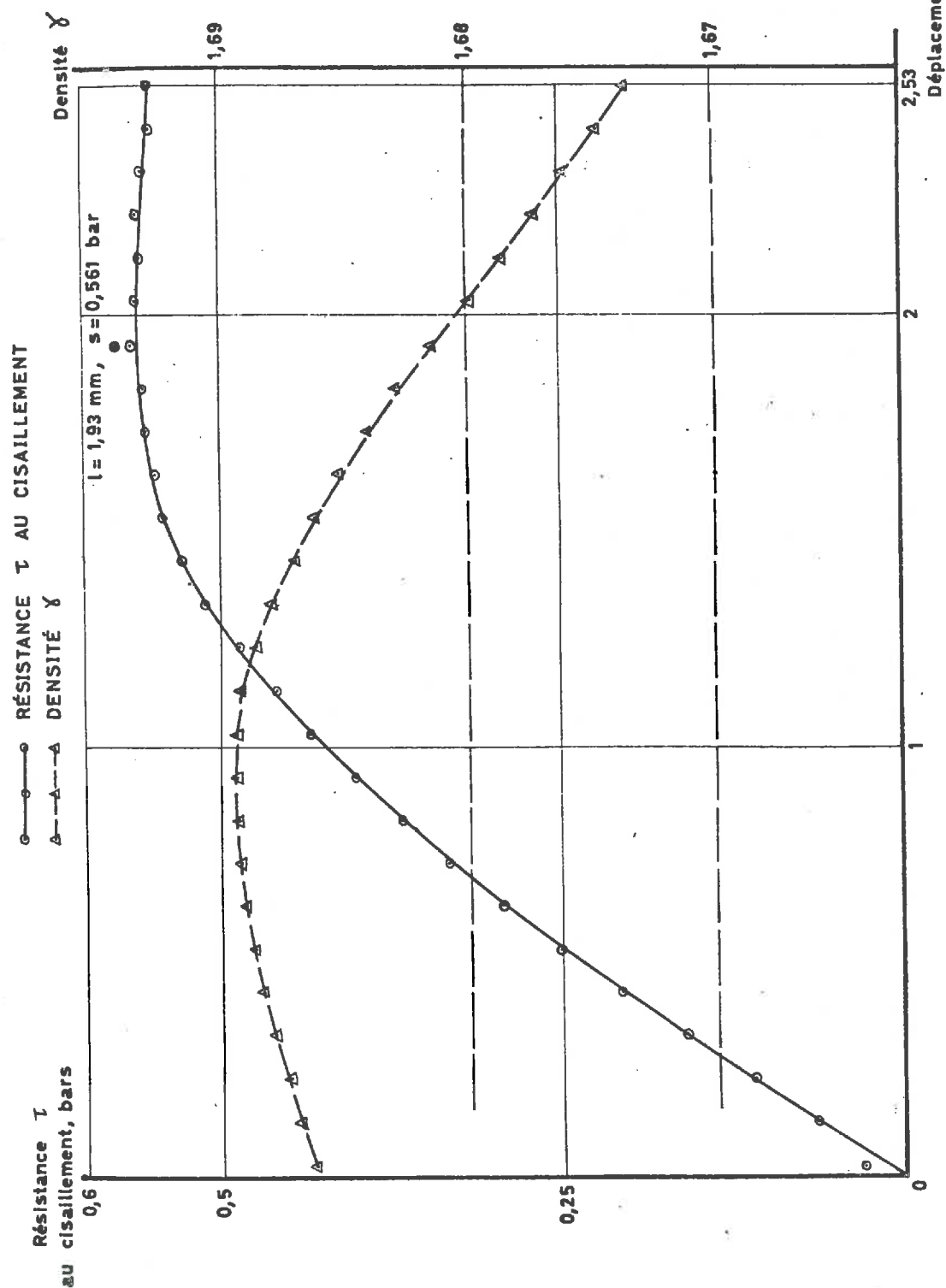


Figure 3.11

SABLE DE LOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,67 Cisaillement direct, pression normale $p = 1,0$ bar

- 146 -
CD 6 -

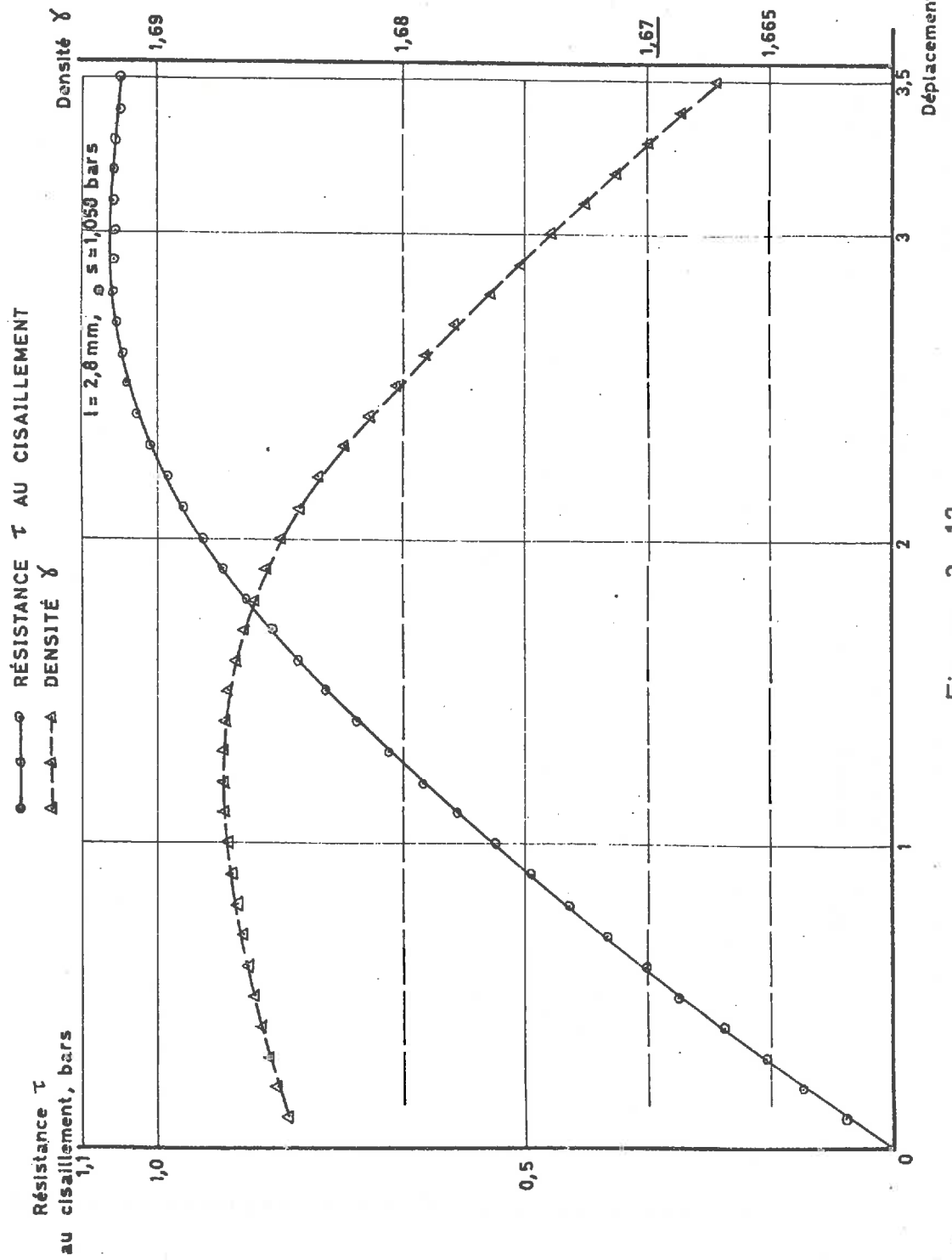


Figure 3 12

SABLE DE LOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,67

Cisaillement direct, pression normale $p = 2,0$ bars

CD 7

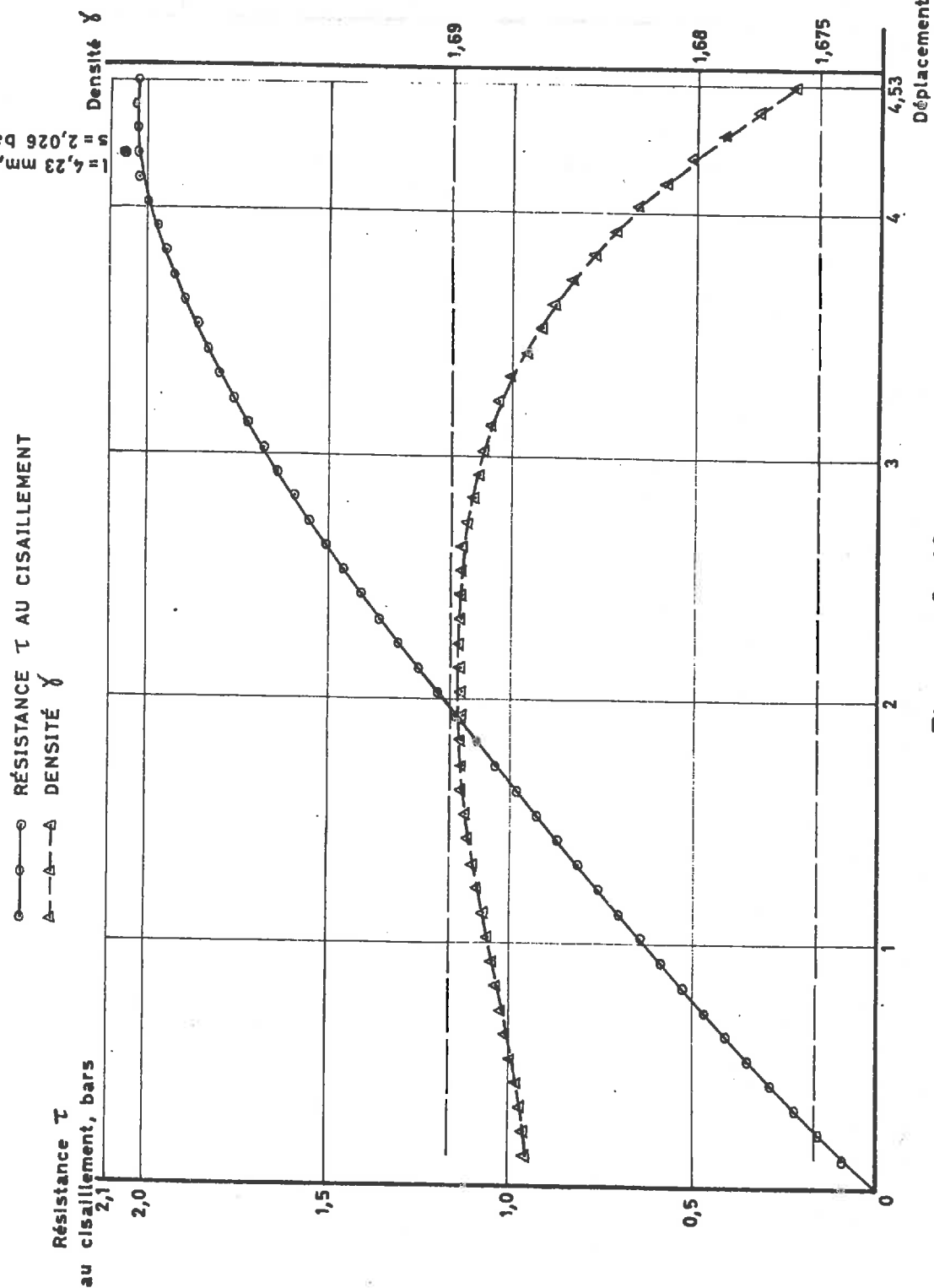


Figure 3.13

SABLE DE LOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,67 Cisaillement direct, pression normale $p = 3,0$ bars

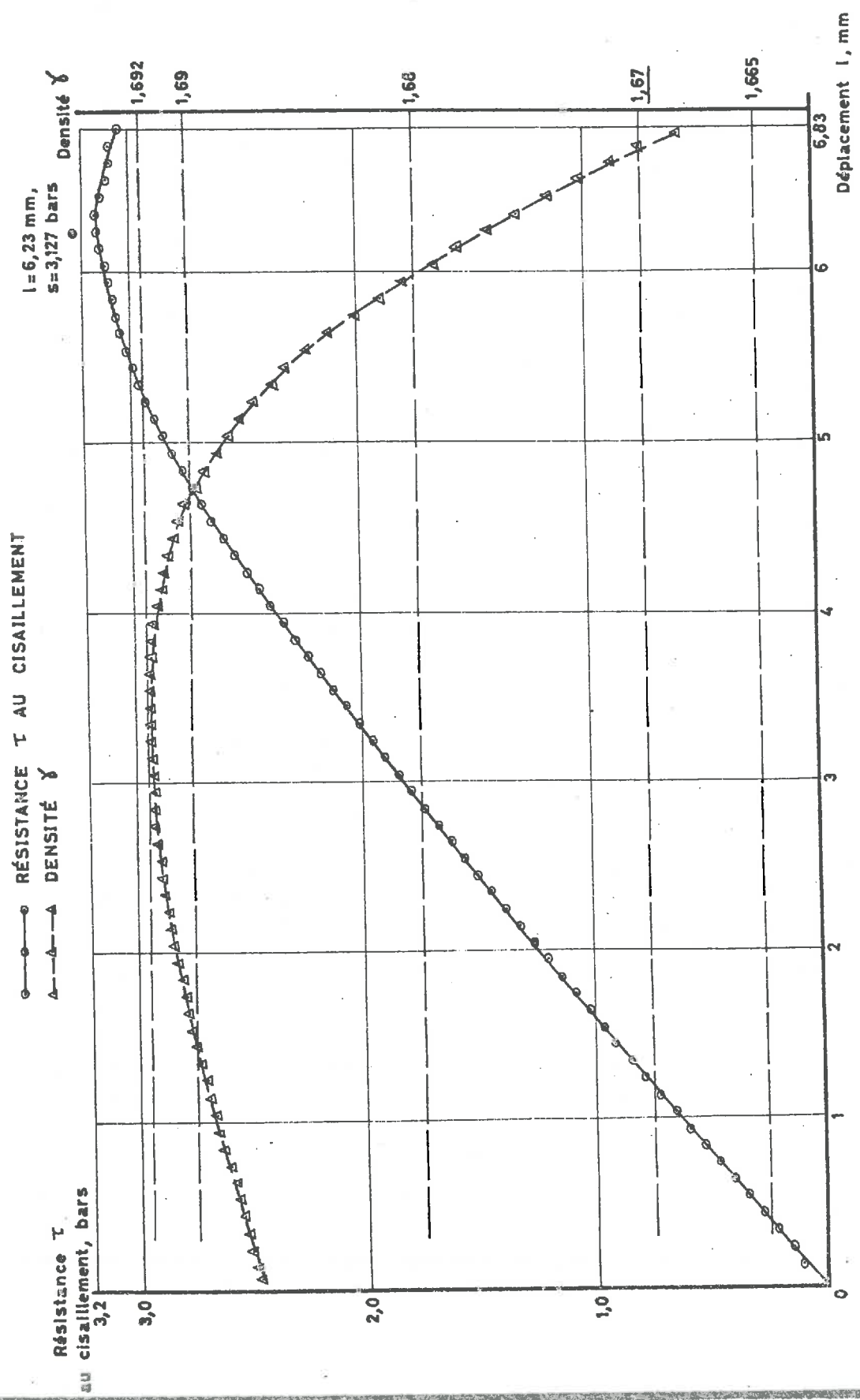


Figure 3.14

SABLE DE LOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,67 Cisaillement direct, pression normale $p = 5,0$ bars

CD 22

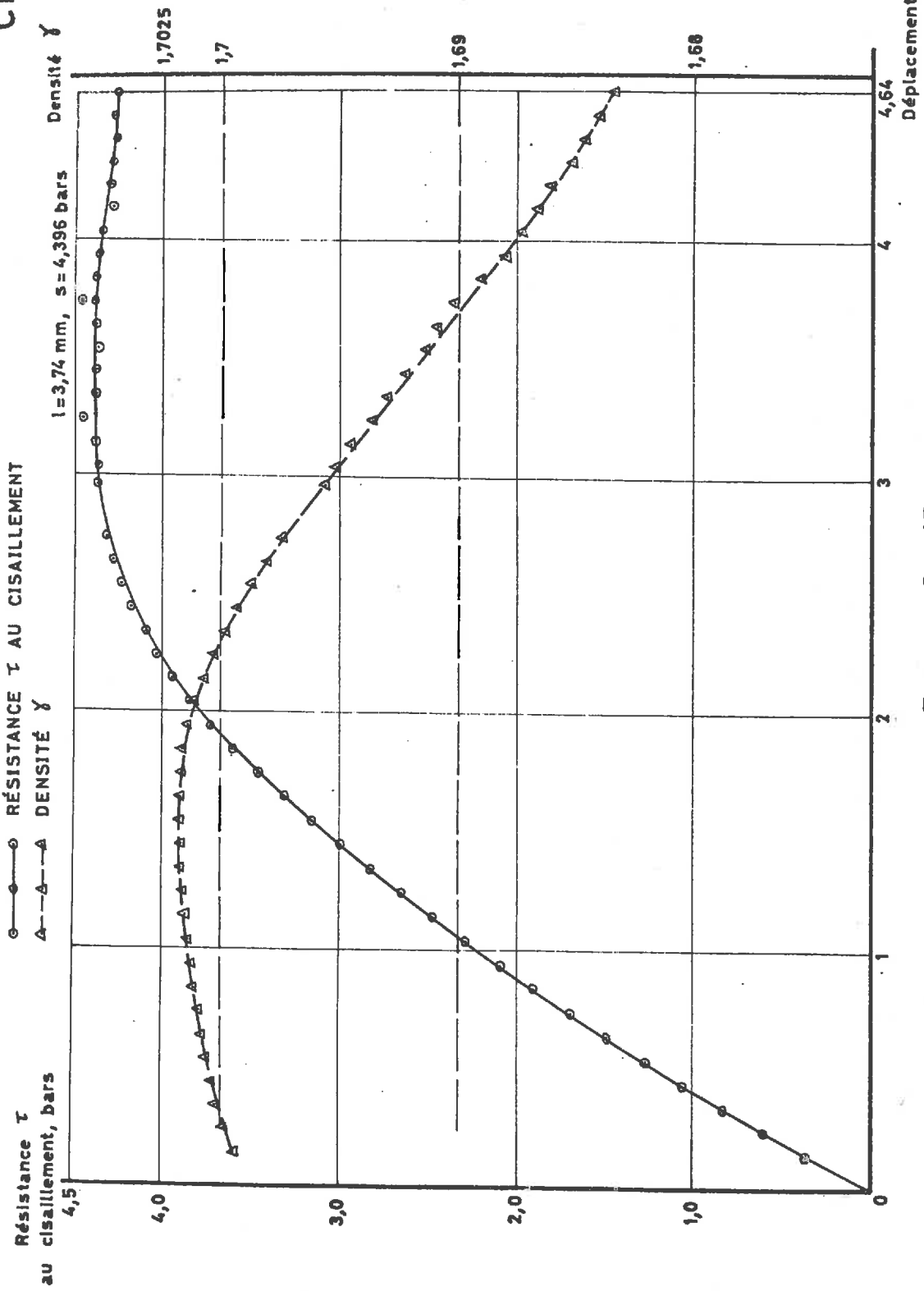


Figure 3.15

SABLE DE LOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,67 Cisaillement direct, pression normale $p = 20,0$ bars

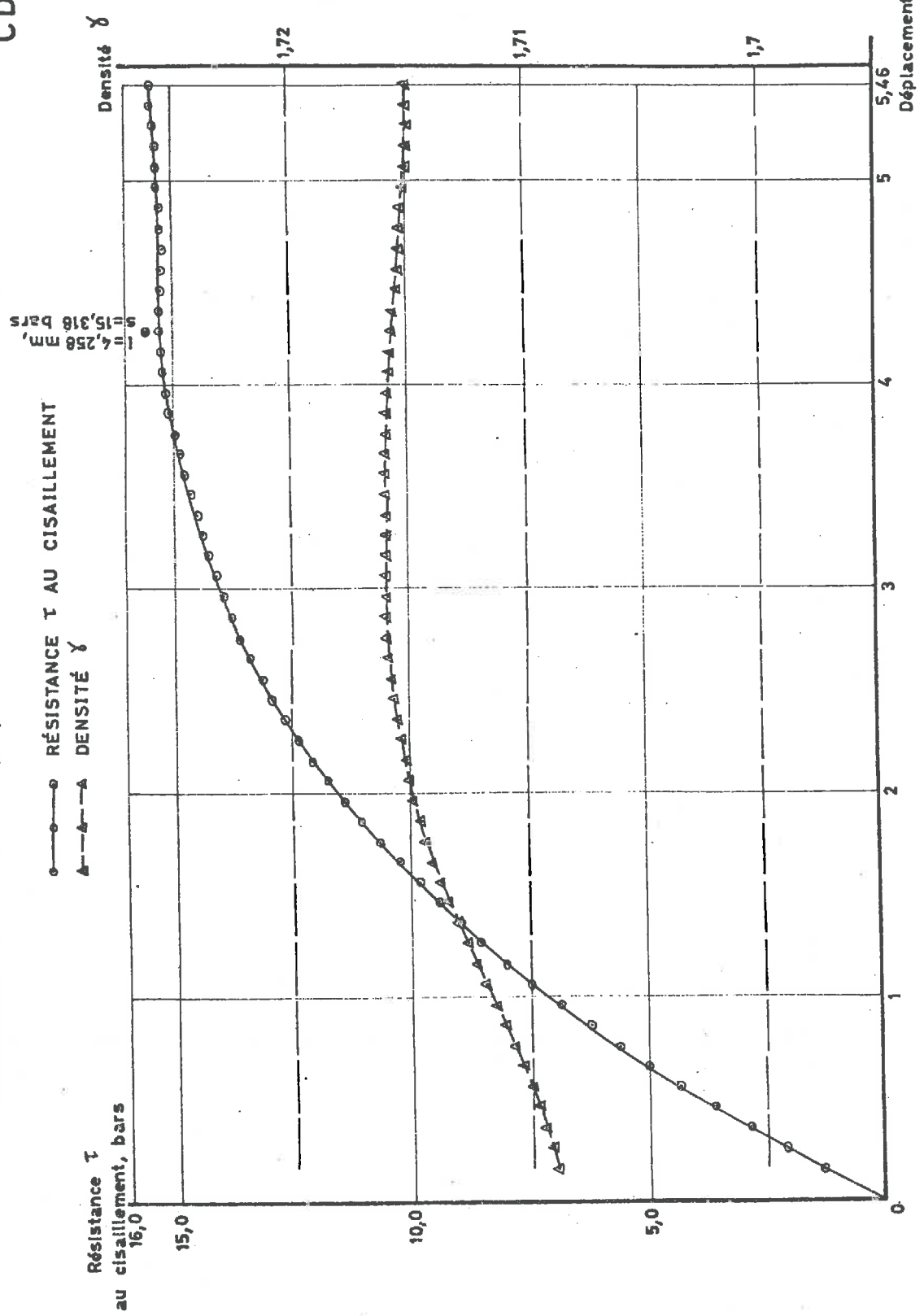
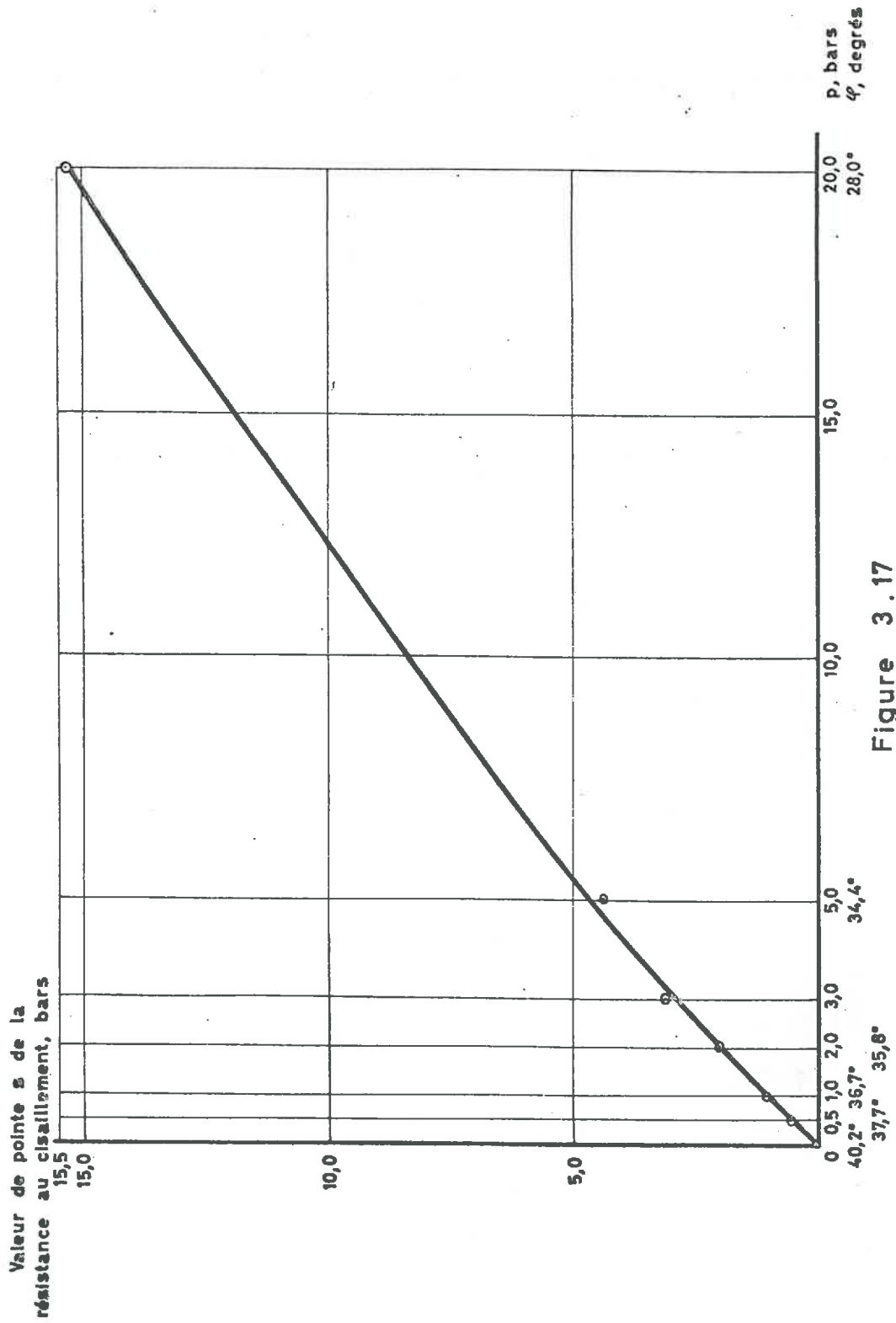


Figure 3.16

SABLE DE LOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,67 Cisaillement direct. Courbe intrinsèque



SABLE DE LOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,67. ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT.

Tassements correspondant aux diverses pressions p appliquées

à la surface du sable avant le cisaillement.

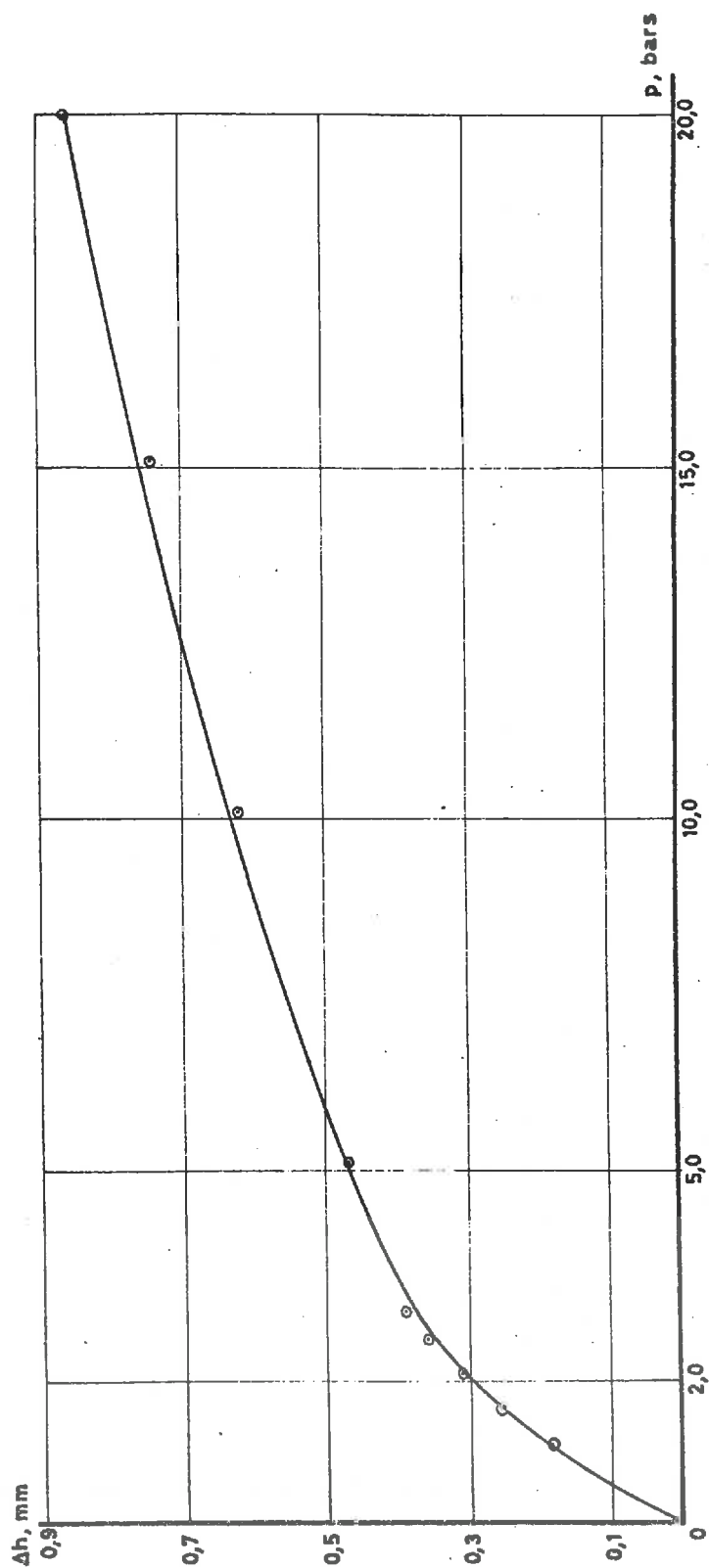


Figure 3.18

SABLE DE LOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,67. ESSAIS DE CISAILEMENT DIRECT.
Détermination du module oedométrique E_o lors de l'application
des charges avant le cisaillement.

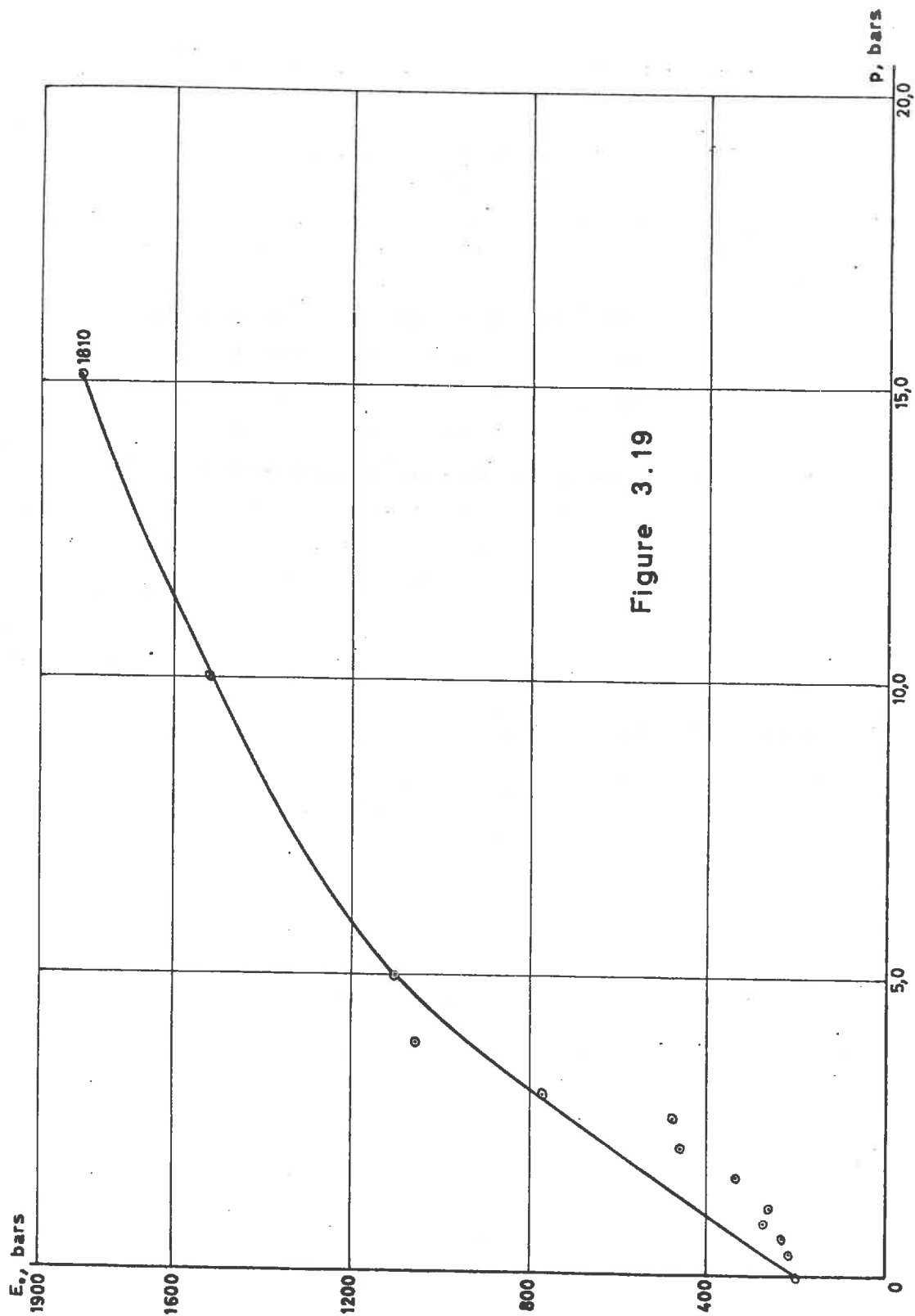


Figure 3.19

du matériau en fonction de la pression p appliquée.

3.3.2. Sable n° 2, densité initiale 1,67.

3.3.2.1. Courbe intrinsèque.

Les figures 3.11 à 3.16 présentent les courbes effort-déformation relatives aux essais de cisaillement direct sur le sable n° 2 et la figure 3.17 la courbe intrinsèque construite à partir de la loi résistance de pointe τ au cisaillement-pression normale p appliquée. Nous constatons un décalage appréciable entre les angles de frottement interne φ du matériau suivant qu'il est soumis aux essais triaxiaux ou aux essais de cisaillement direct, les angles obtenus avec ces derniers essais étant, à pression normale ou latérale égale, de 5° inférieur en moyenne aux angles donnés par les essais triaxiaux (cf. fig. 1.29). Il y a, comme nous avons vu jusqu'à présent, une décroissance de plus en plus lente de l'angle de frottement interne φ avec la pression normale p appliquée.

3.3.2.2. Variation de la densité du matériau au cours du cisaillement.

La variation de la densité avec le déplacement est présentée dans les figures 3.11 à 3.16. Il y a de moins en moins de foisonnement dans la dernière partie de l'essai à mesure que la pression normale p augmente.

3.3.2.3. Variation du module oedométrique avec la pression normale p appliquée.

La figure 3.18 montre le tassement du matériau sous l'effet des pressions normales appliquées à sa surface et la figure 3.19 le module oedométrique, déterminé d'après les tassements, en fonction de la pression normale. Le matériau a été mis en place dans une boîte de section carrée $60,0 \times 60,0$ mm et la hauteur initiale de l'échantillon est

Cisaillement direct, pression normale $p = 0,5 \text{ bar}$

RÉSISTANCE τ AU CISAILLEMENT

Résistance τ
au cisaillement, bars

DENSITÉ γ

Densité γ

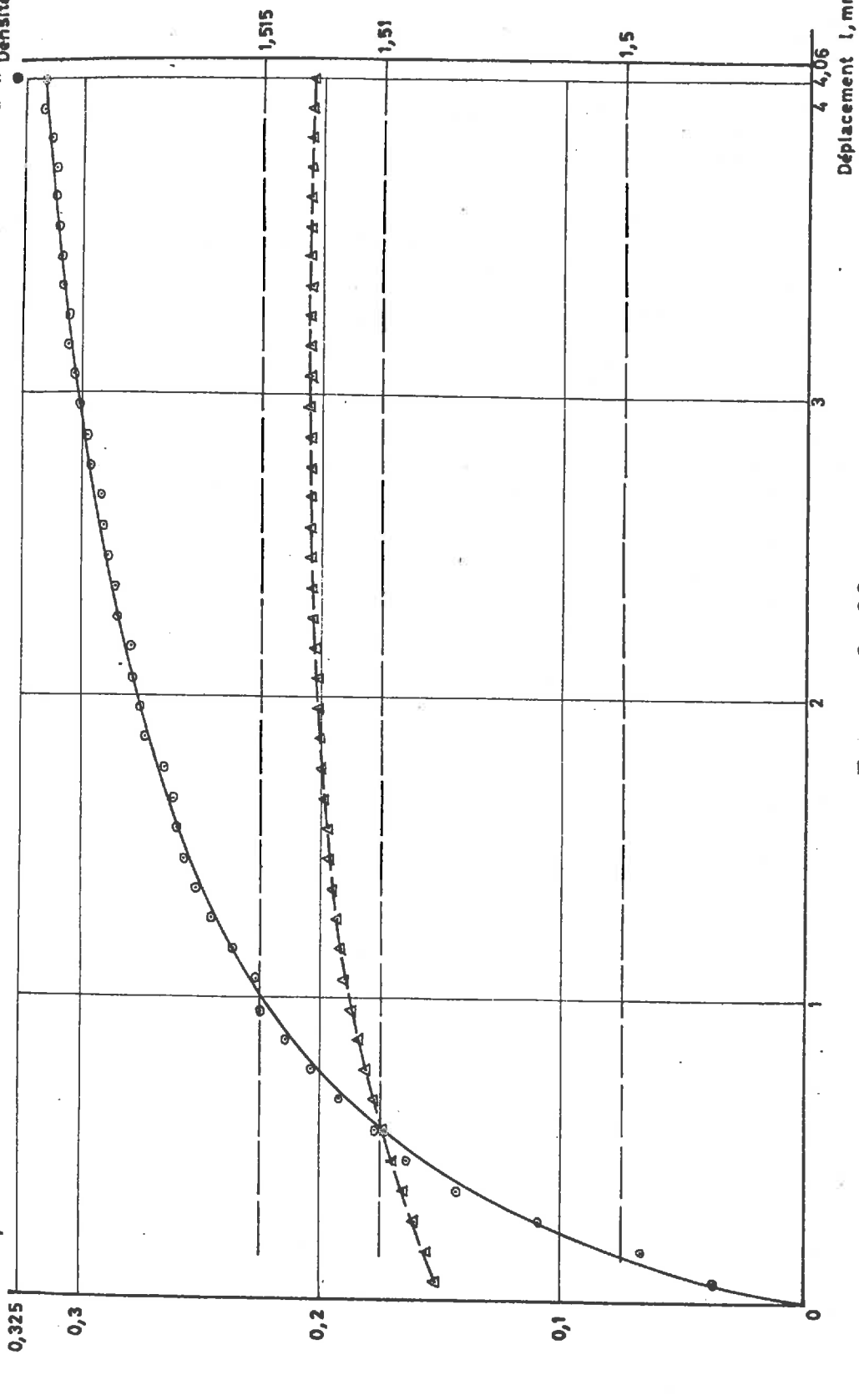


Figure 3. 20

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,50 Cisaillement direct, pression normale $p=1,0$ bar

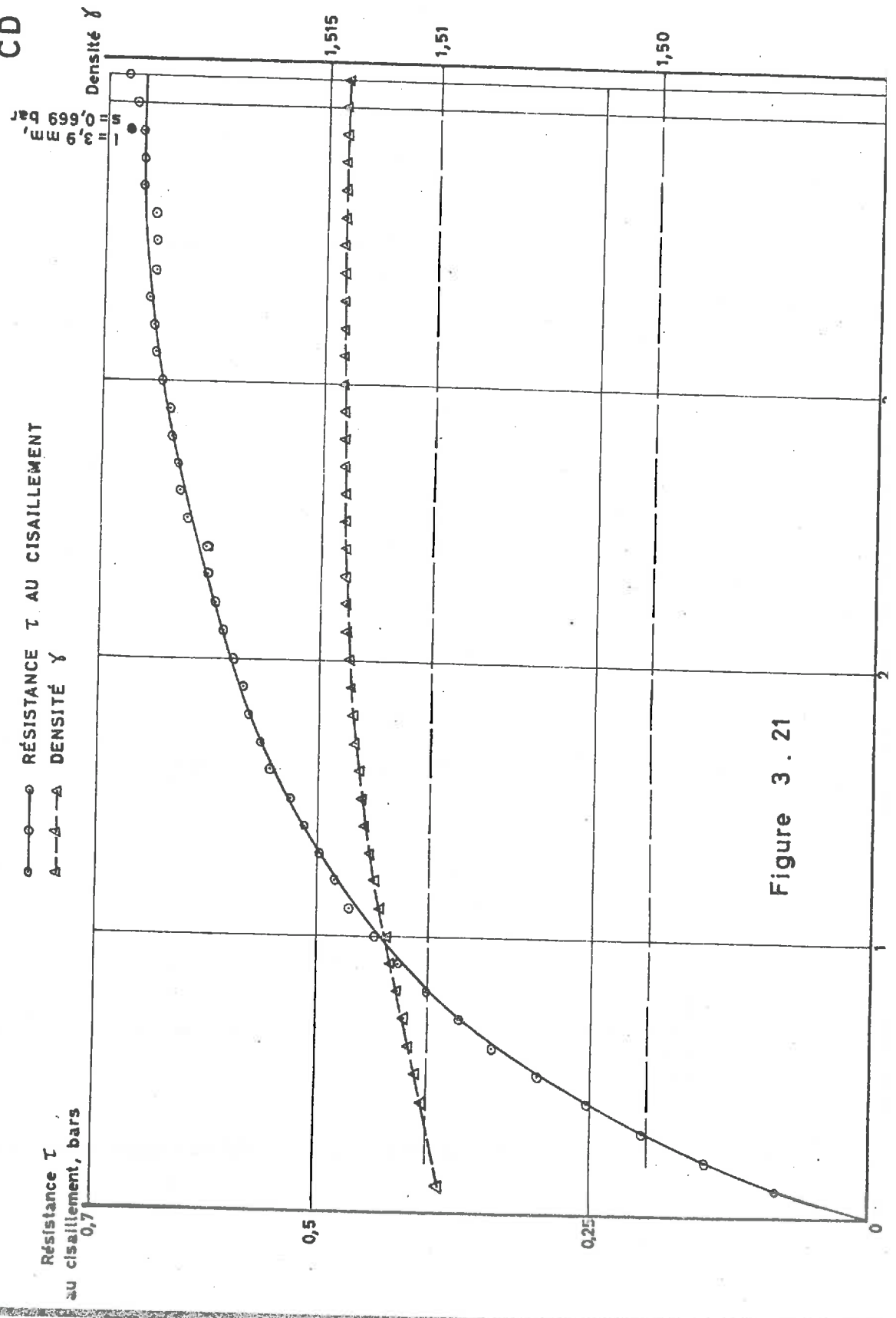


Figure 3 . 21

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,50

Cisaillement direct, pression normale $p = 2,0$ bars

CD 10

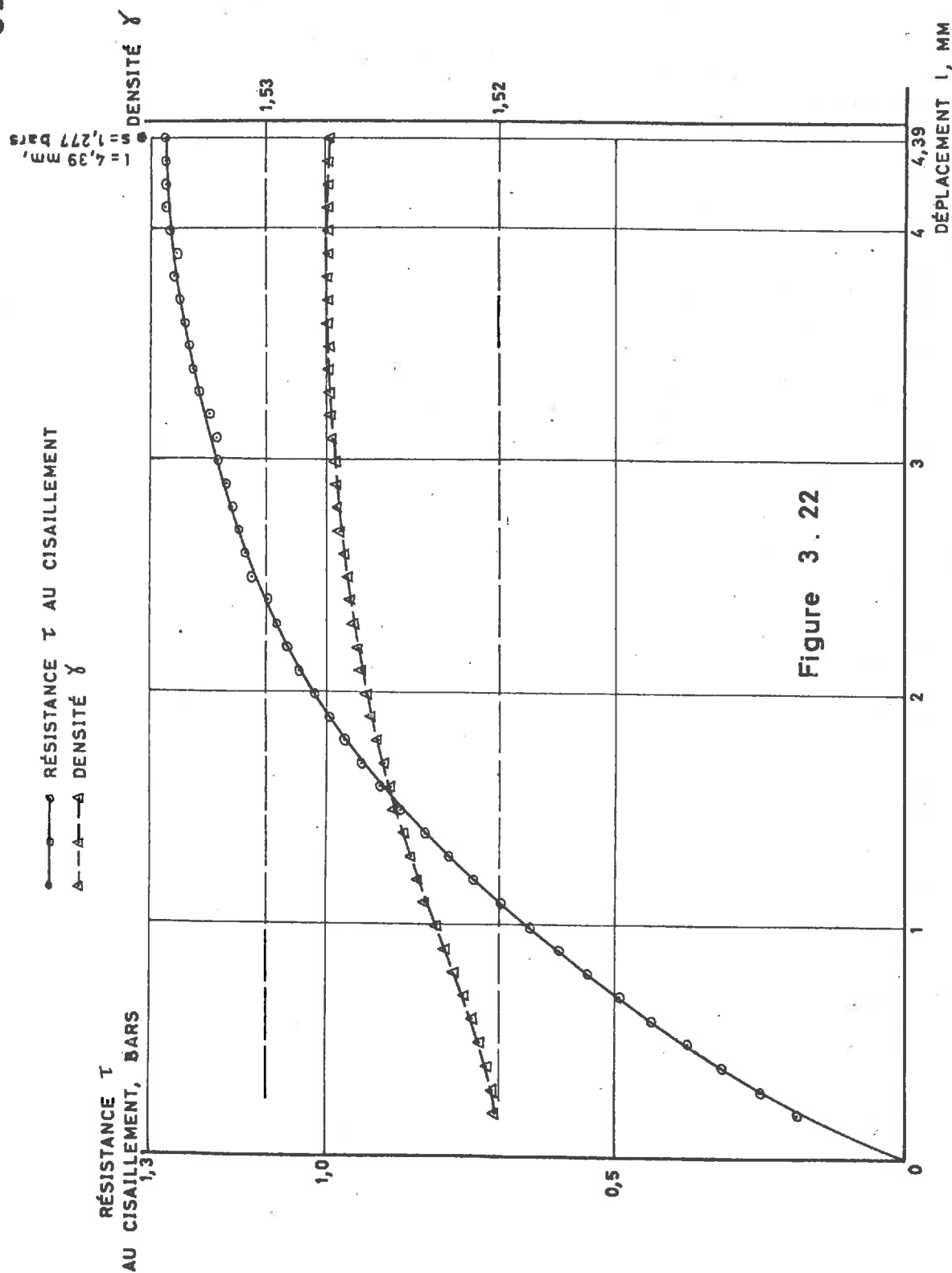


Figure 3.22

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,50
Cisaillement direct, pression normale $p = 5,0$ bars

- 158 -
CD 18.

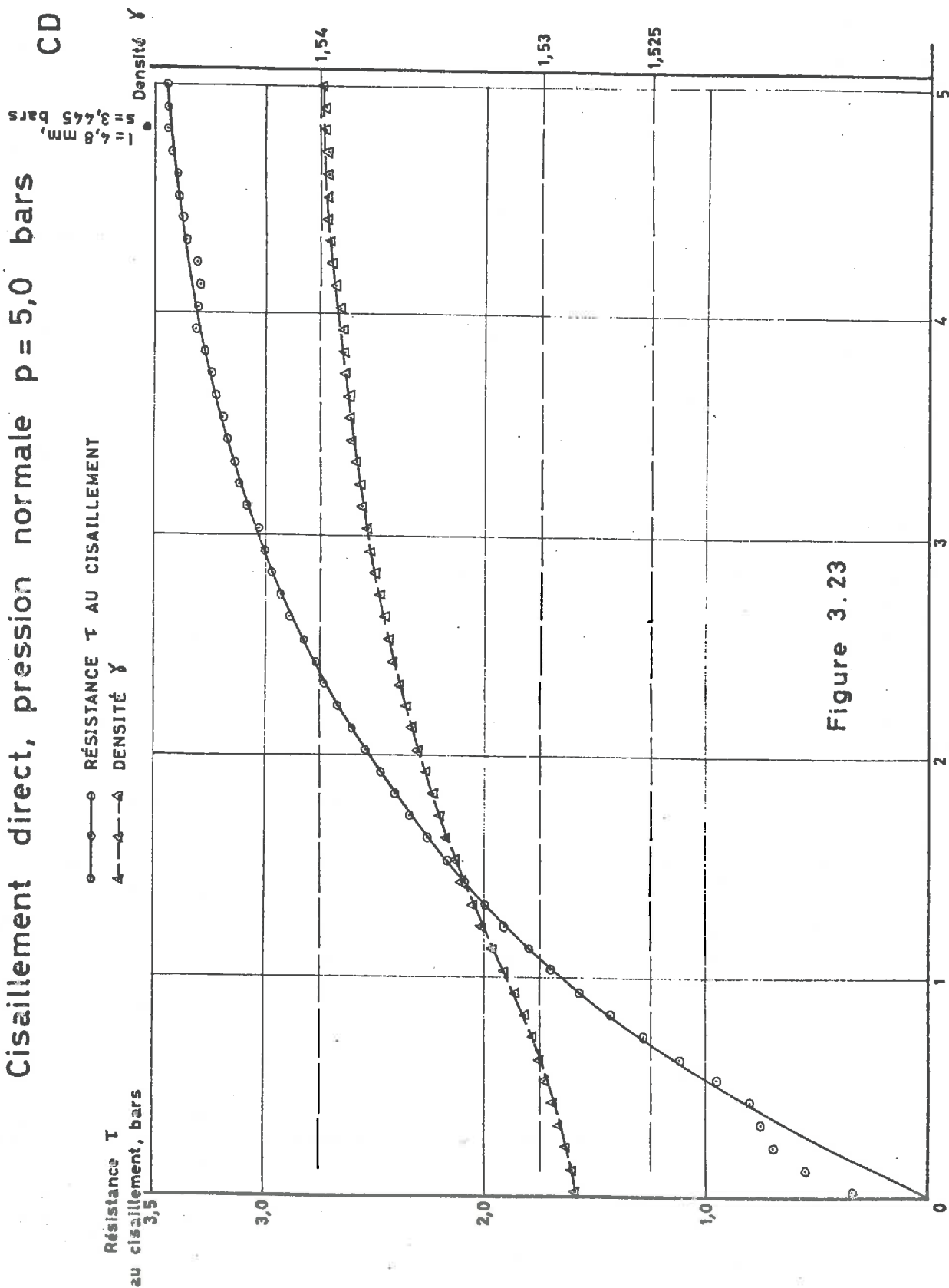


Figure 3.23

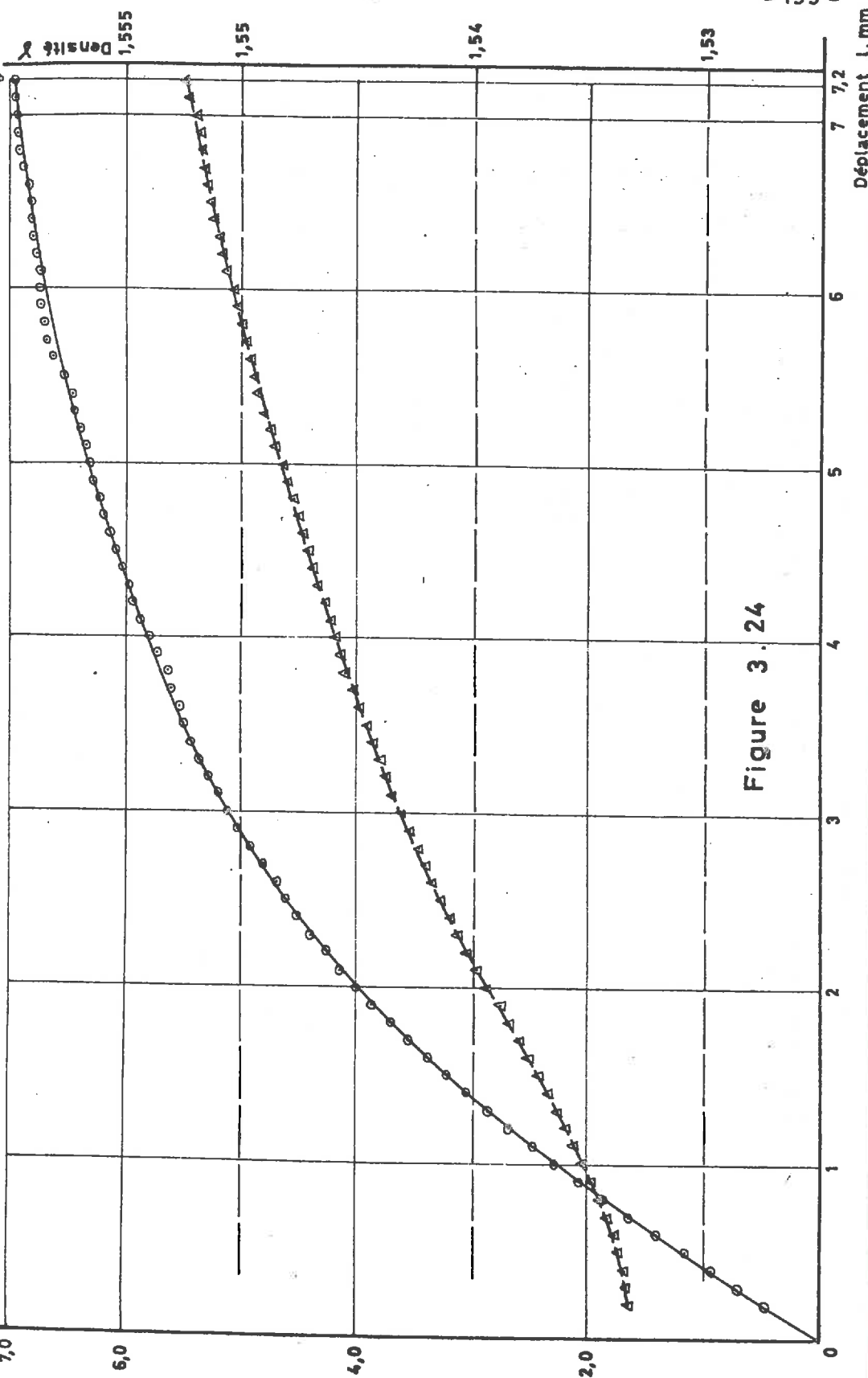
SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,50

Cisaillement direct, pression normale $p = 10,0$ bars

CD 25

○ — ○ RÉSISTANCE τ AU CISAILLEMENT
 ▲ — ▲ DENSITÉ γ

Résistance τ
 au cisaillement, bars



SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,50
 Cisaillement direct, pression normale $p = 20,0$ bars

- 160 -
 CD 31

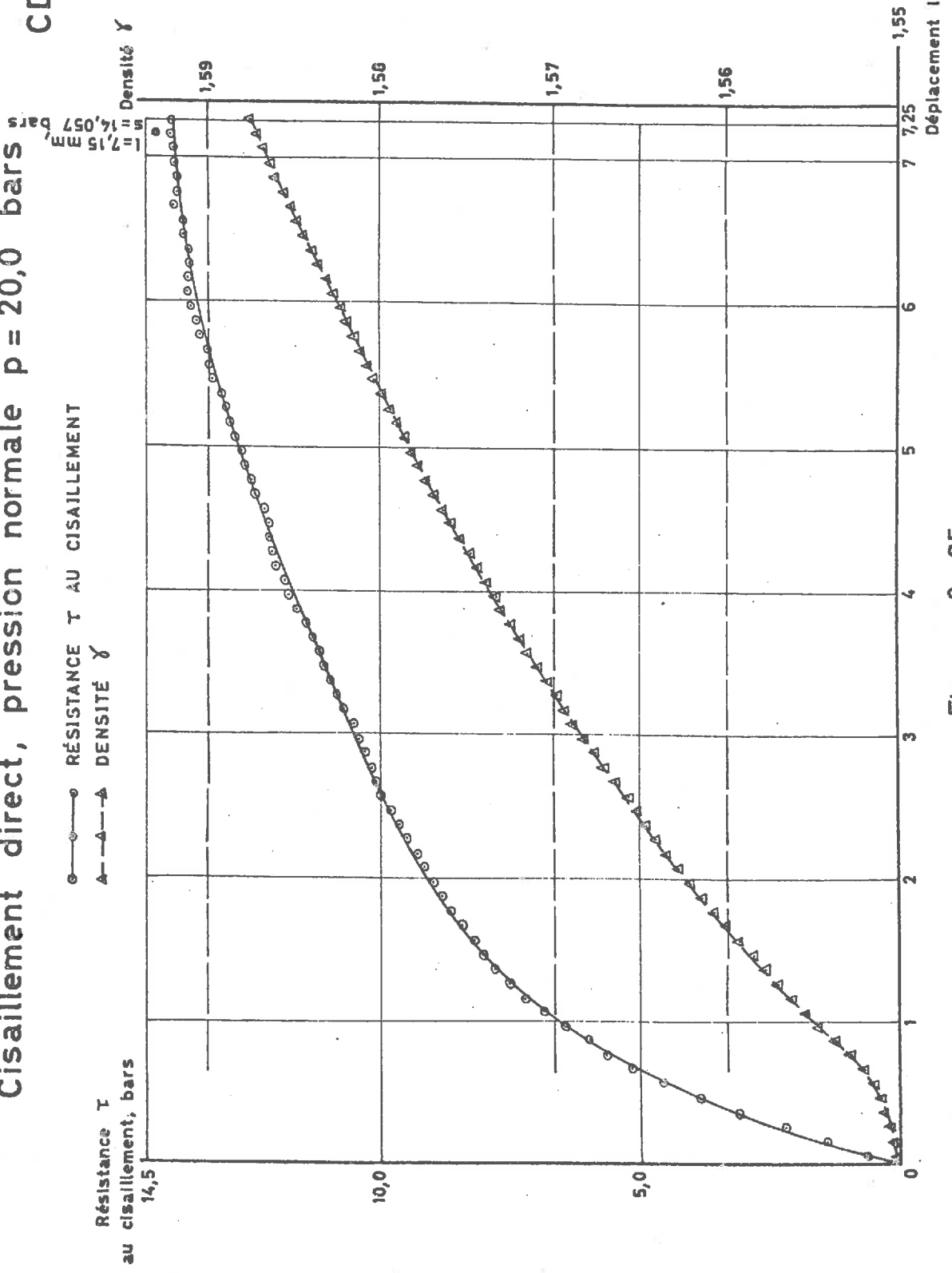


Figure 3.25

SABLE DU LABORATOIRE, DENSITÉ INITIALE 1,50

Cisaillement direct. Courbe intrinsèque

Valeur de pointe s de la
résistance au cisaillement, bars

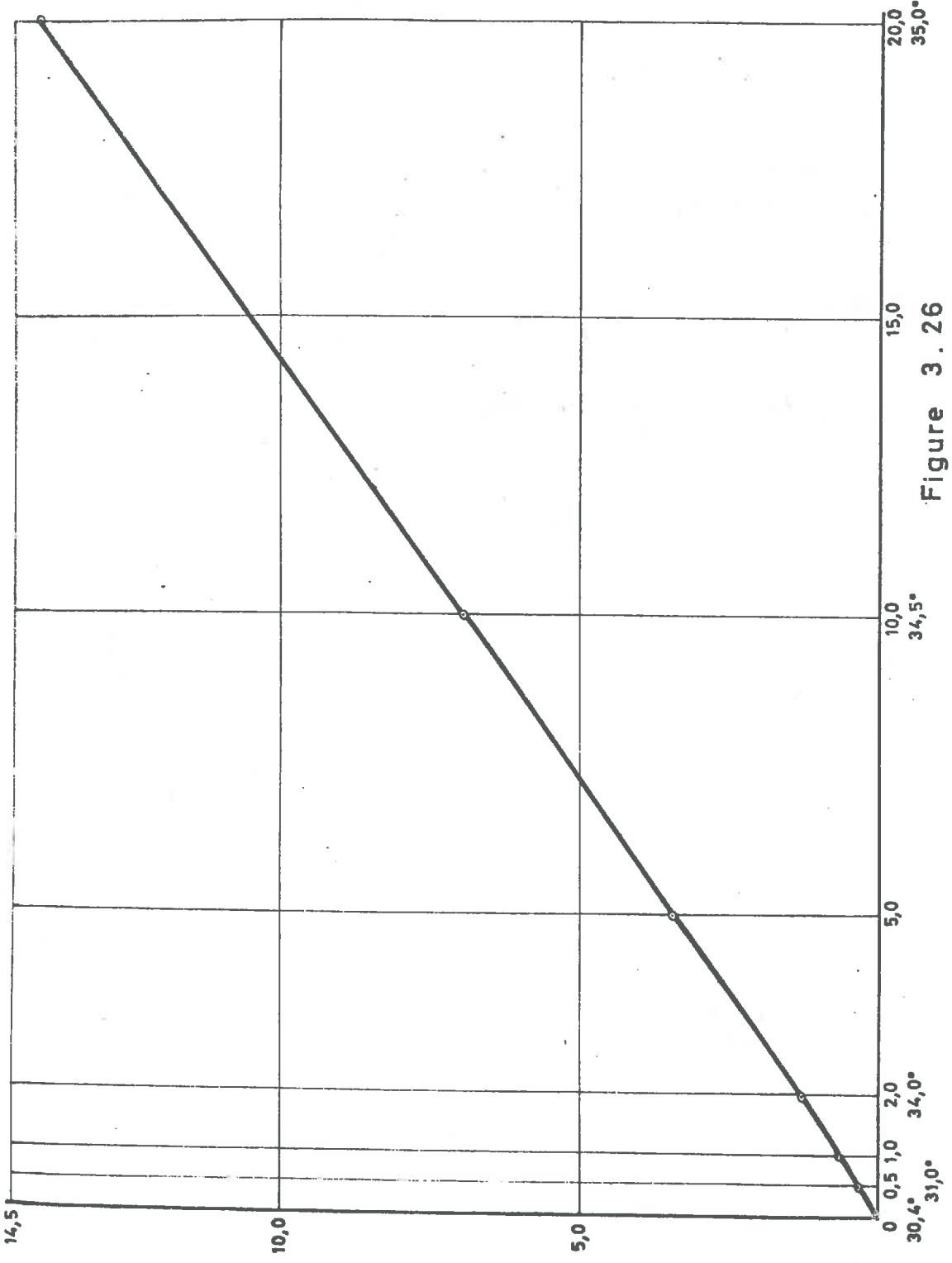


Figure 3. 26

de 37,4 mm.

3.3.3. Sable n° 1, densité initiale 1,5.

Outre la densité 1,57 (cf. §§ 3.3.1 à 3.3.1.4), nous avons pris pour ce sable la faible densité 1,50 pour voir son comportement à l'état peu serré.

3.3.3.1. Courbes effort-déformation.

Les figures 3.20 à 3.25 montrent les courbes effort-déformation du sable n° 1, densité initiale 1,50, soumis à des essais de cisaillement direct sous des pressions normales p entre 0,5 et 20,0 bars. Nous voyons que l'abscisse λ correspondant au maximum s du cisaillement augmente avec la pression normale p .

3.3.3.2. Courbe intrinsèque.

L'angle de frottement interne φ , dans le cas de ce sable très peu compact, augmente avec la pression normale p appliquée. Cf. fig. 3.26. Cette pression normale, en comprimant le matériau, améliore sa résistance au cisaillement. L'écart entre les angles de frottement interne des sables de densité 1,5 et 1,57 diminue à mesure que p augmente (cf. figs. 3.26 et 3.8).

3.3.3.3. Courbes densité-déformation.

Dans le cas de ce sable de faible compacité initiale, la densité augmente toujours pendant le cisaillement (cf. figs. 3.20 à 3.25), même dans les essais effectués sous des faibles pressions normales.

3.3.4 et 3.3.5. Sable de Rance non intact, densités initiales 1,391 et 1,45.

3.3.4.1 et 3.3.5.1. Courbes effort-déformation.

On voit encore, dans le cas de ce sable, étudié à

SABLE DE RANCE NON INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,391
Cisaillement direct, pression normale $p = 0,5$ bar

CD 12

RÉSISTANCE τ AU CISAILLEMENT

Résistance τ
au cisaillement, bars

DENSITÉ γ

$l = 3,2$ mm, $s = 0,328$ bar

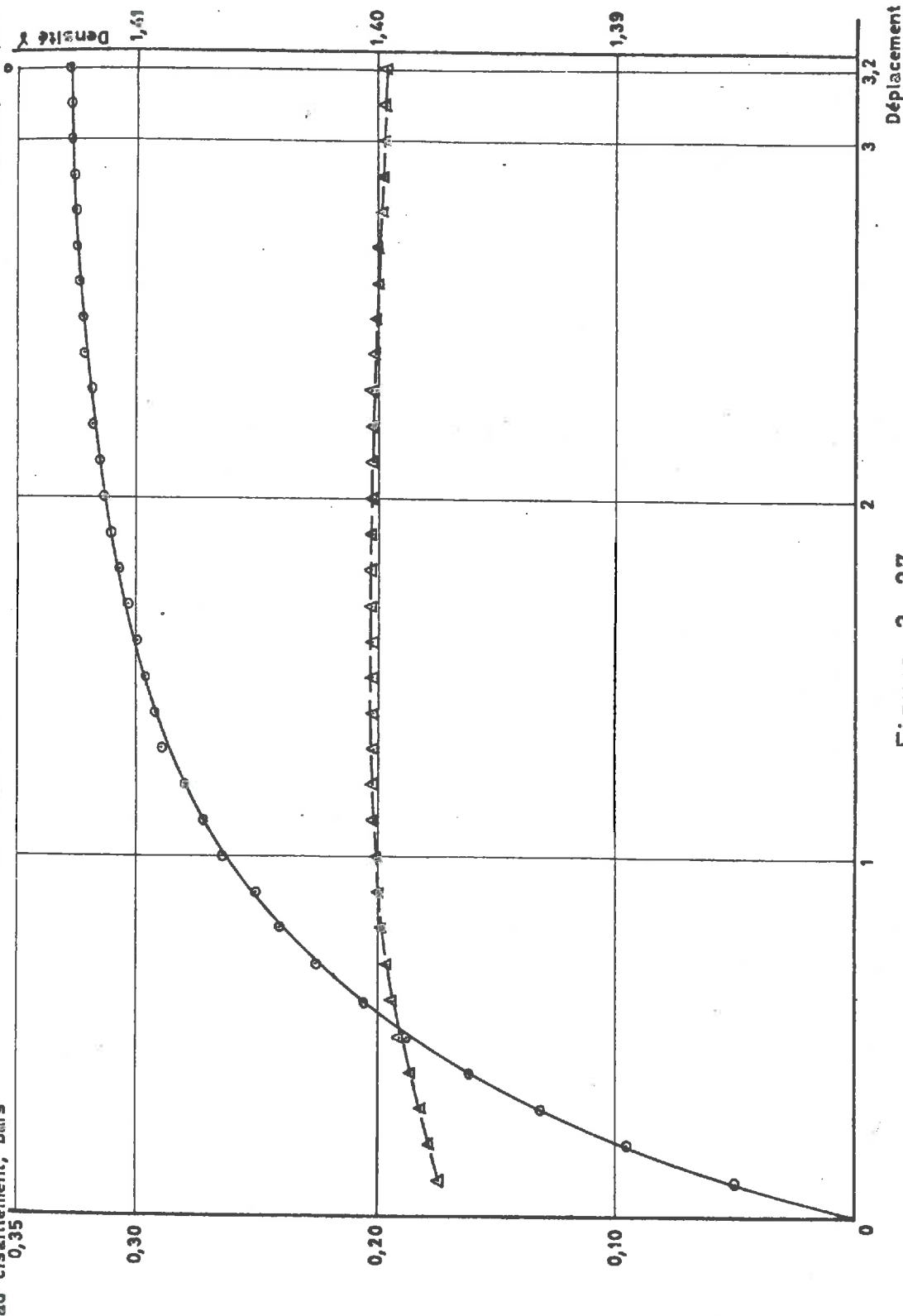


Figure 3.27

SABLE DE RANCE NON INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,391 Cisaillement direct, pression normale $p = 1,0$ bar

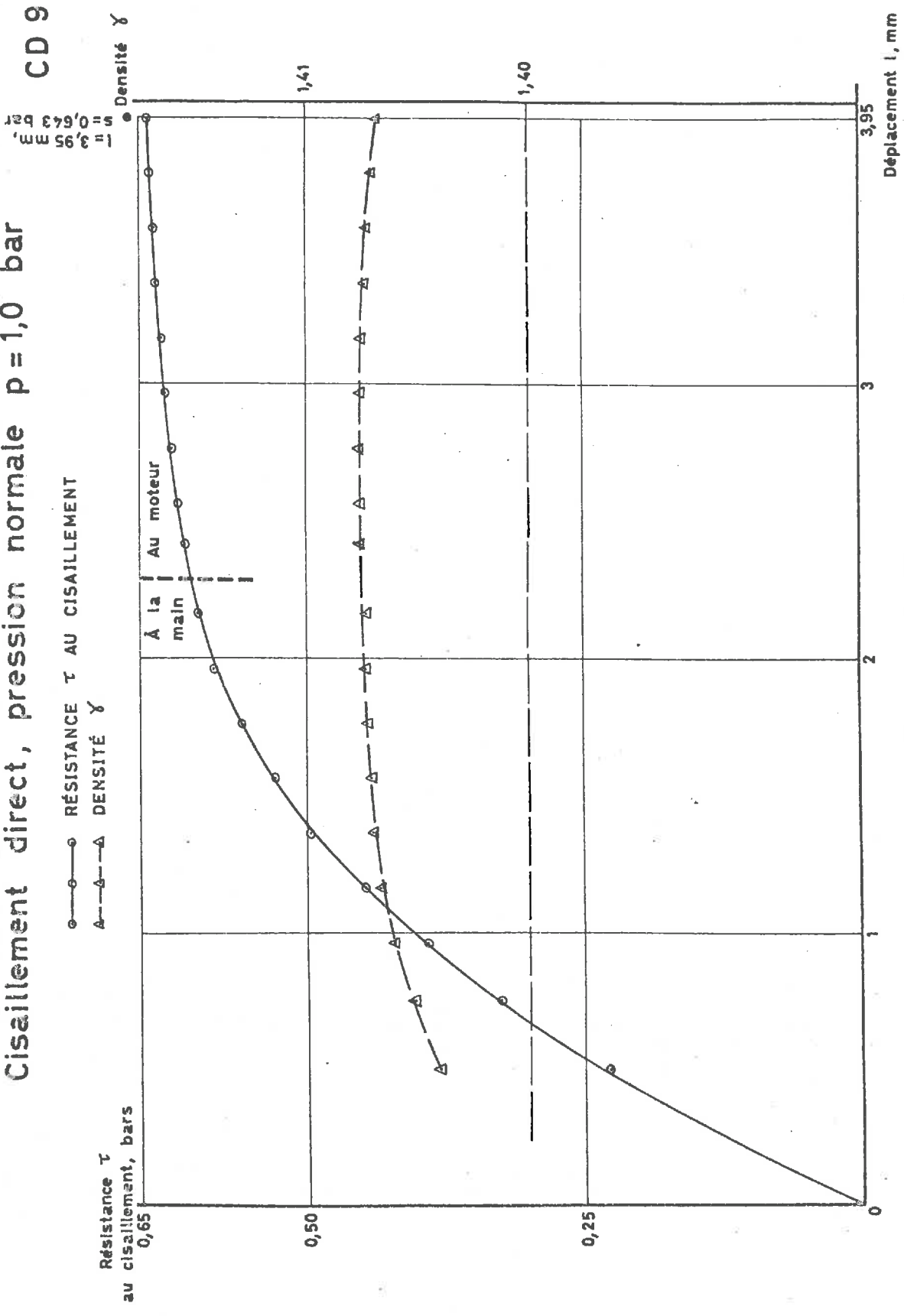


Figure 3.28

Cisaillement direct, pression normale $p = 2,0$ bars

CD 11

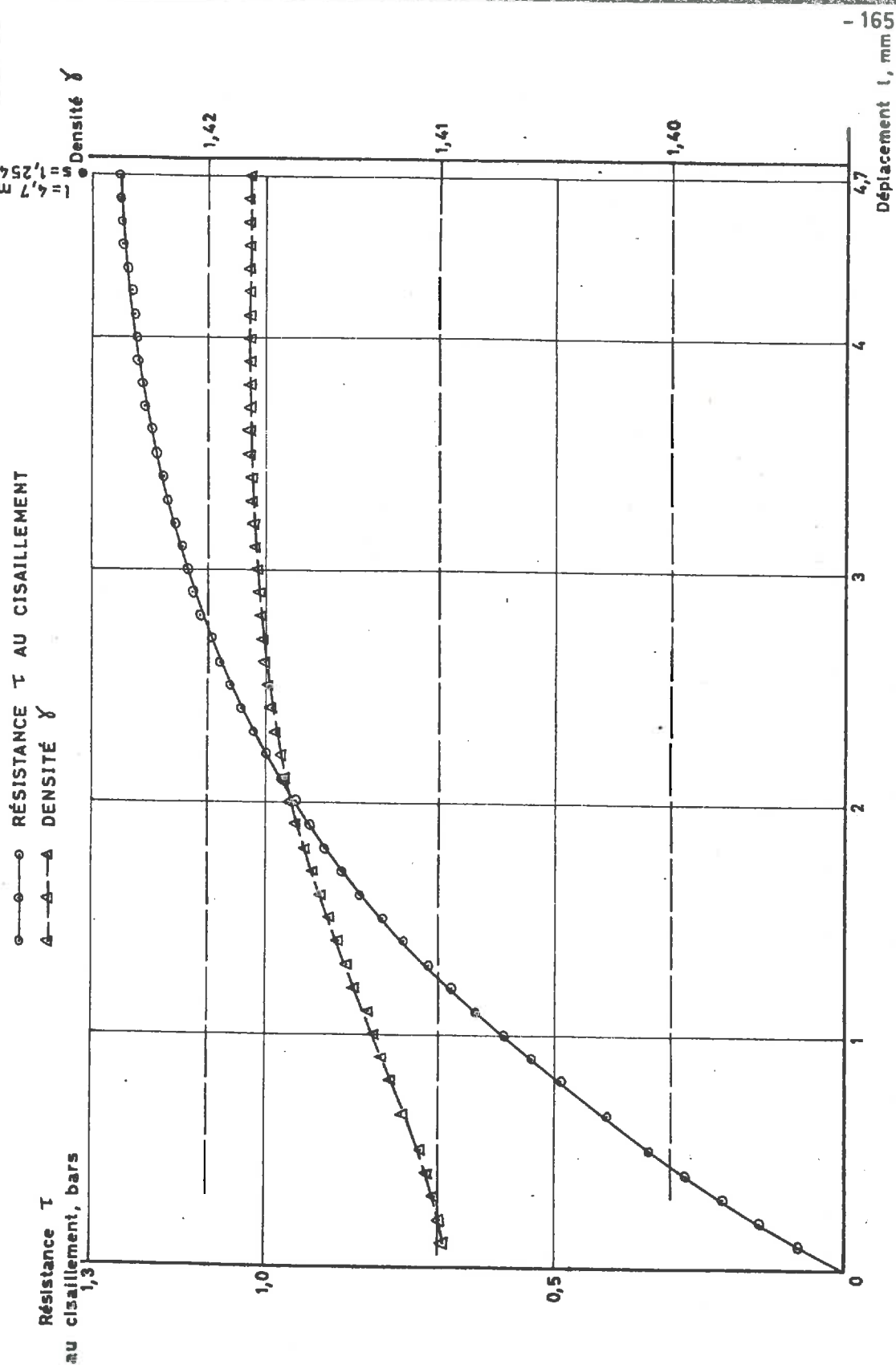


Figure 3.29

SABLE DE RANCE NON INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,391

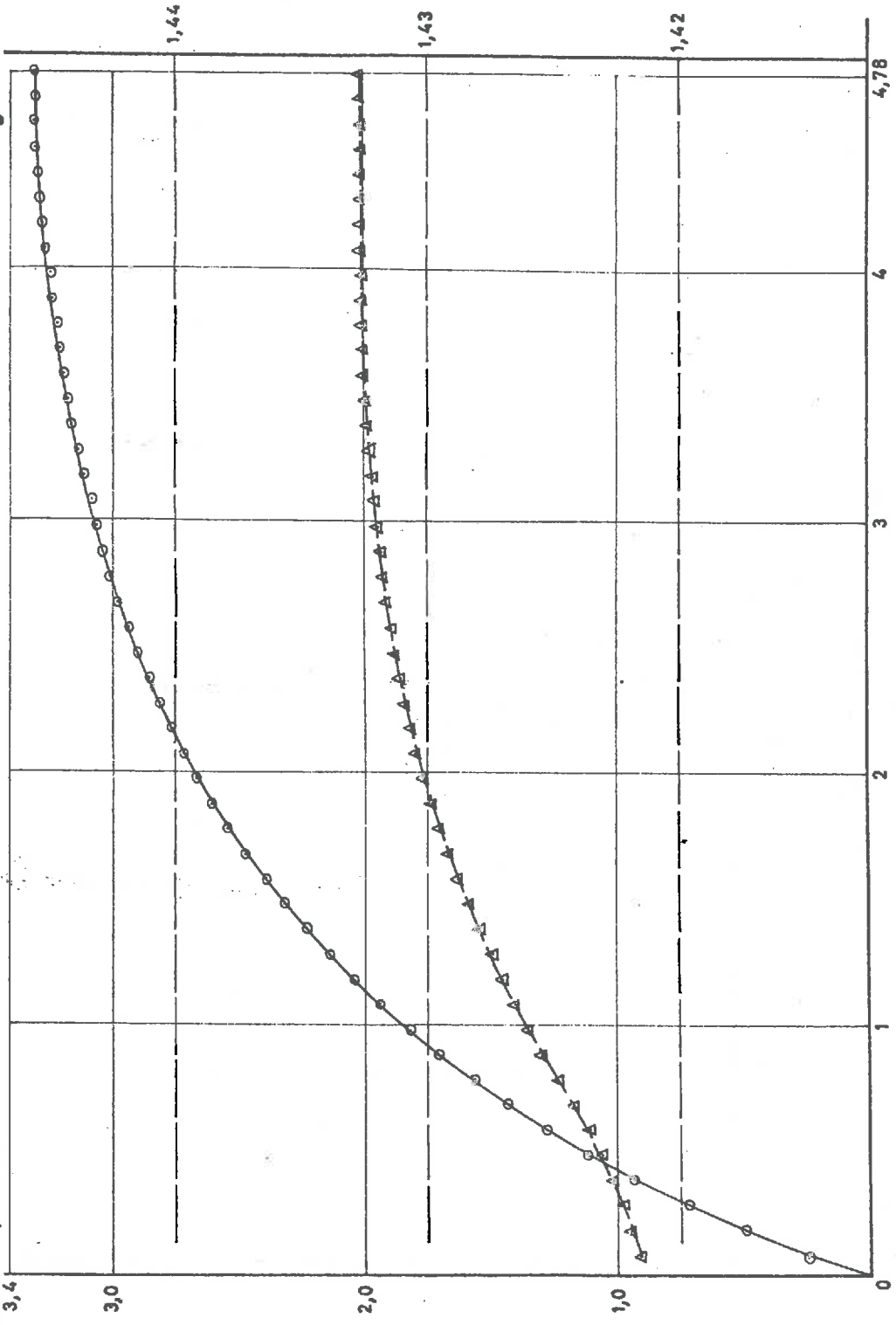
Cisaillement direct, pression normale $p = 5,0$ bars

CD 20

○ — ○ RÉSISTANCE τ AU CISAILLEMENT
 ▲ — ▲ DENSITÉ γ

Résistance τ
 au cisaillement, bars

Densité γ



Déplacement l , mm

Figure 3.30

SABLE DE RANCE NON INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,391 Cisaillement direct, pression normale $p = 20,0$ bars

CD 33

$\mu = 7,56$ M
 $\mu = 14,24$ bars

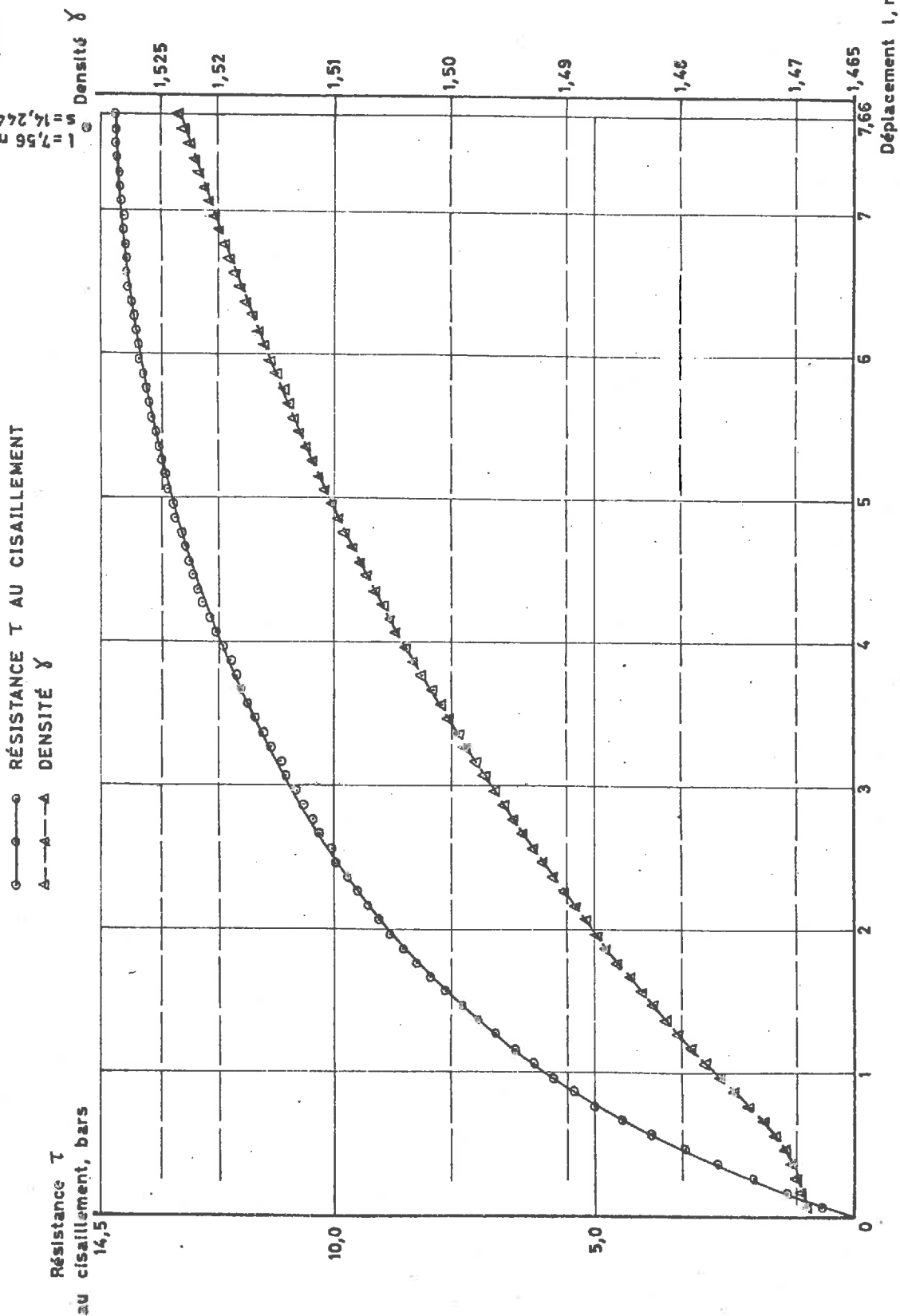


Figure 3. 32

SABLE DE RANCE NON INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,391
Cisaillement direct. Courbe intrinsèque

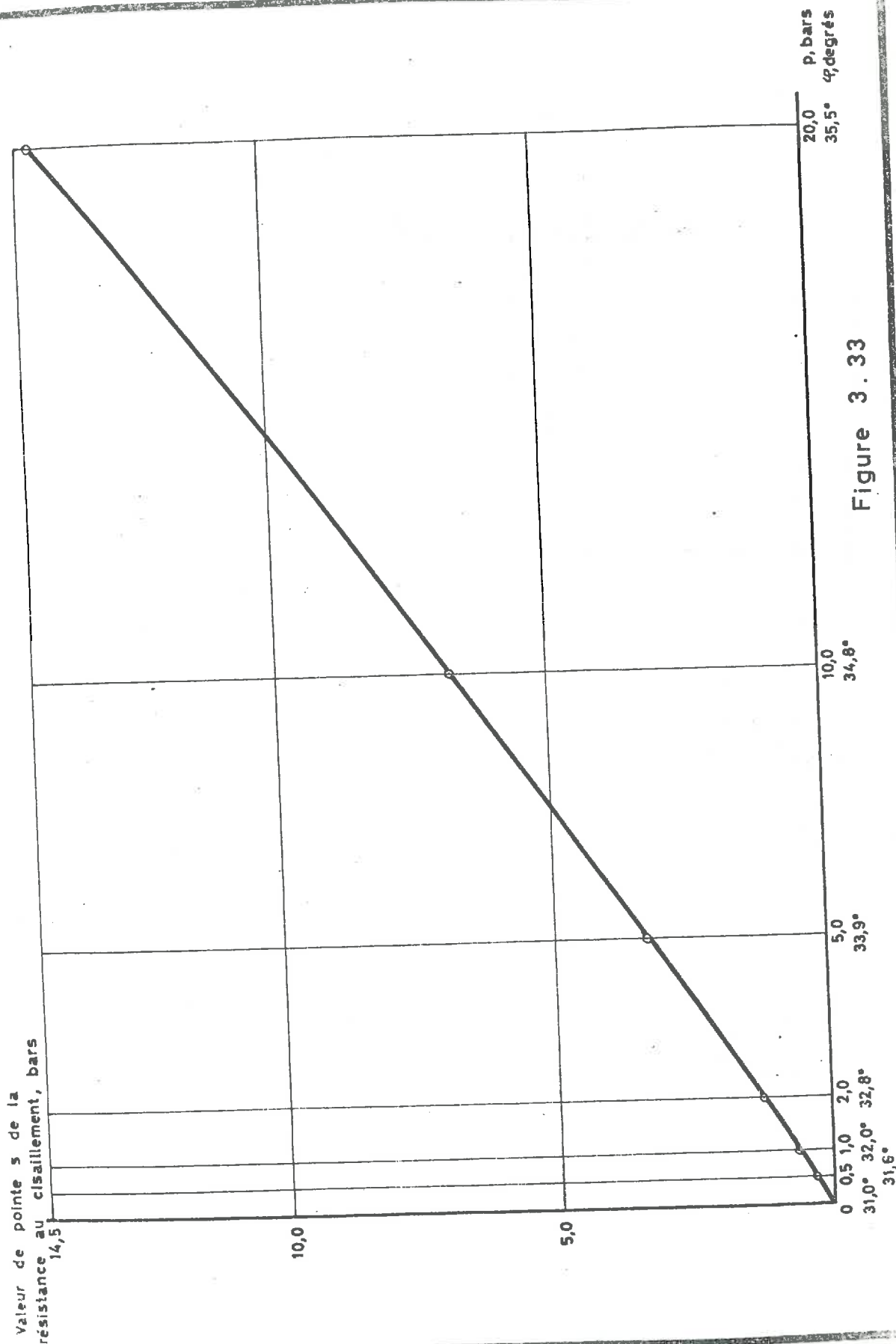


Figure 3.33

SABLE DE RANCE NON INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,45 Cisaillement direct, pression normale $p = 0,5$ bar

CD 14

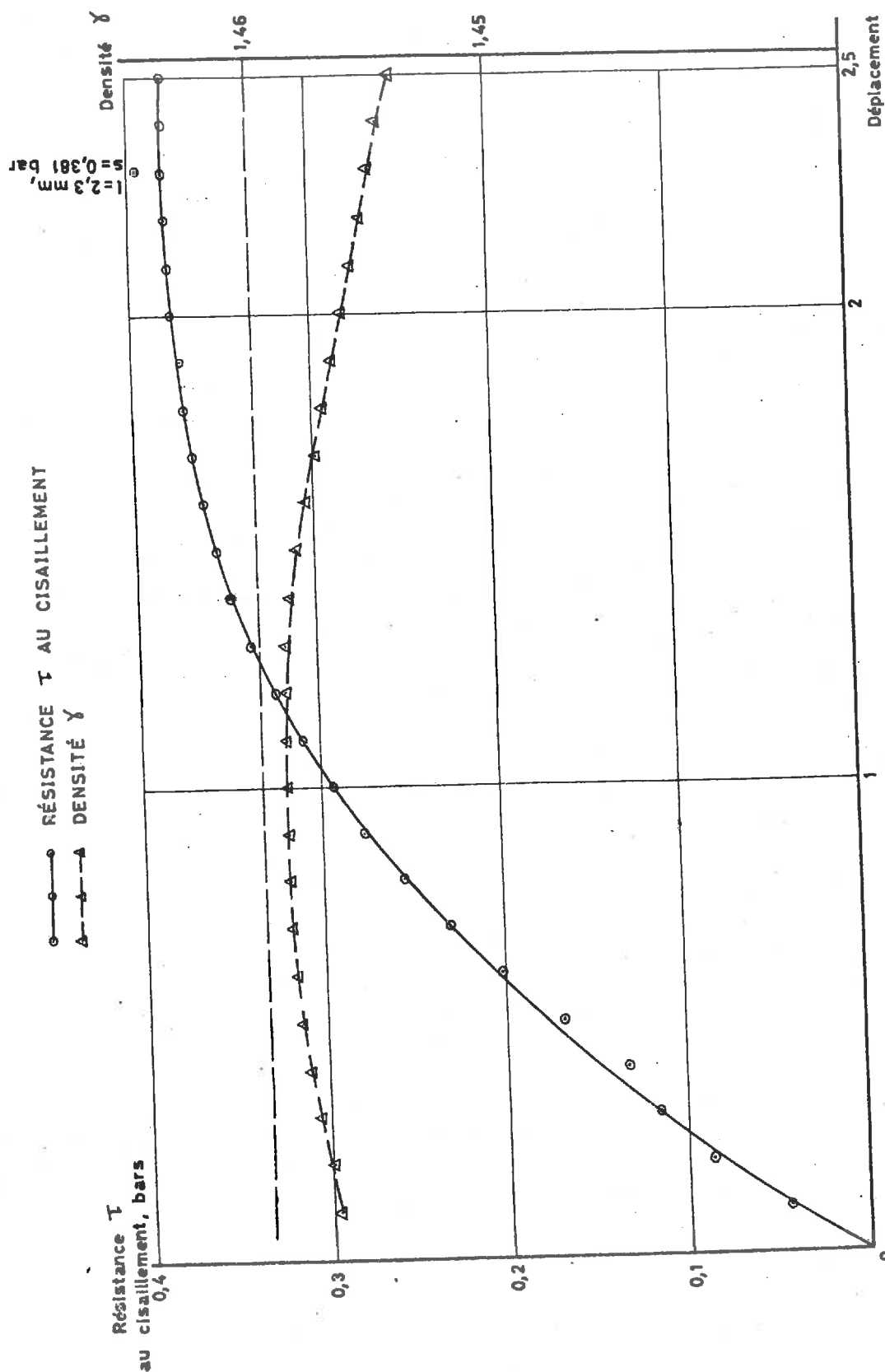


Figure 3.34

SABLE DE RANCE NON INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,45
Cisaillement direct, pression normale $p = 1,0$ bar

CD 15

$E = 3,0$
 $\mu = 0,712$

○ — ○ RÉSISTANCE τ AU CISAILEMENT
△ — △ DENSITÉ γ

Résistance τ
au cisaillement, bars

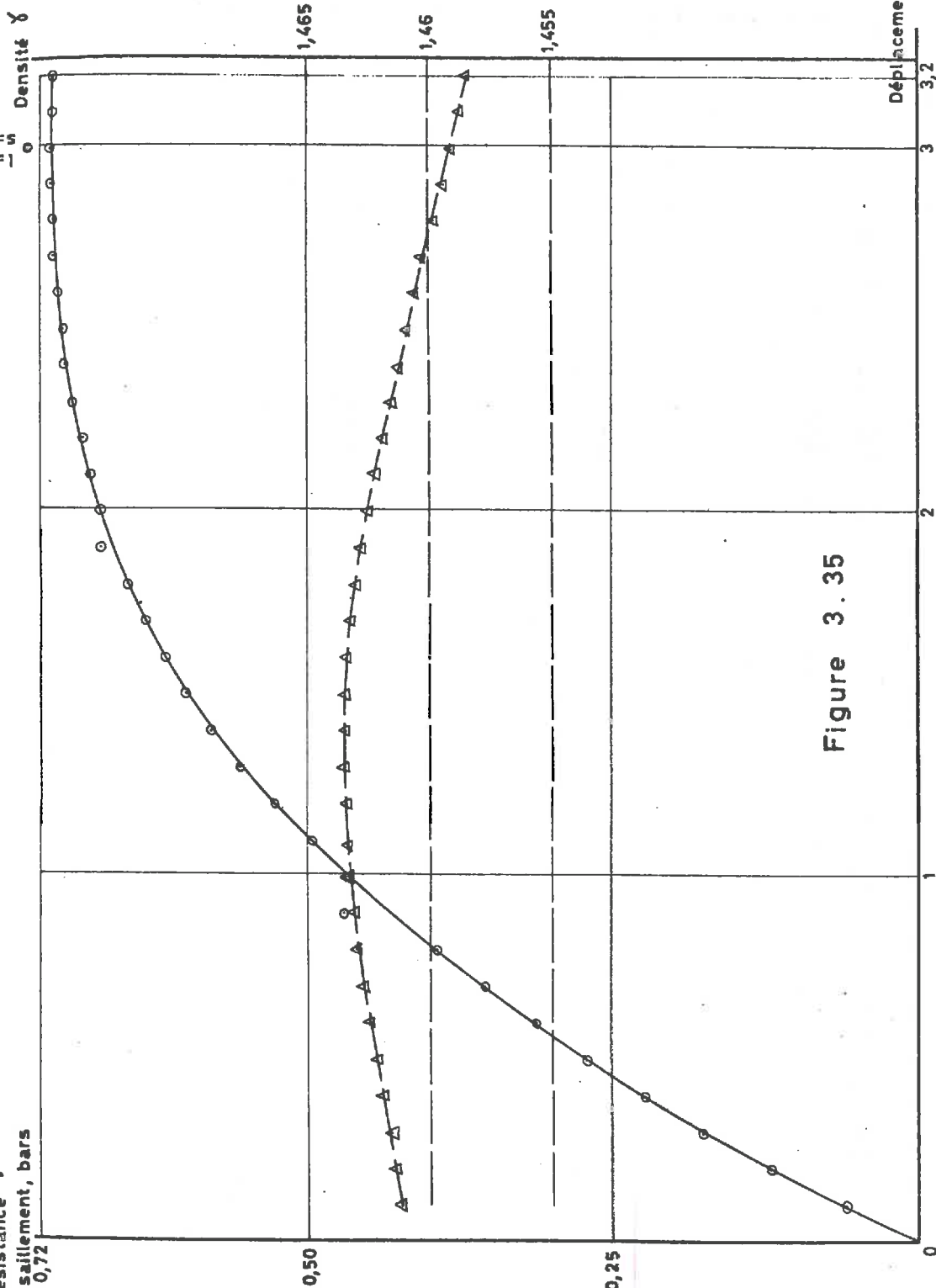


Figure 3.35

SABLE DE RANCE NON INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,45 Cisaillement direct, pression normale $p = 2,0$ bars

CD 17

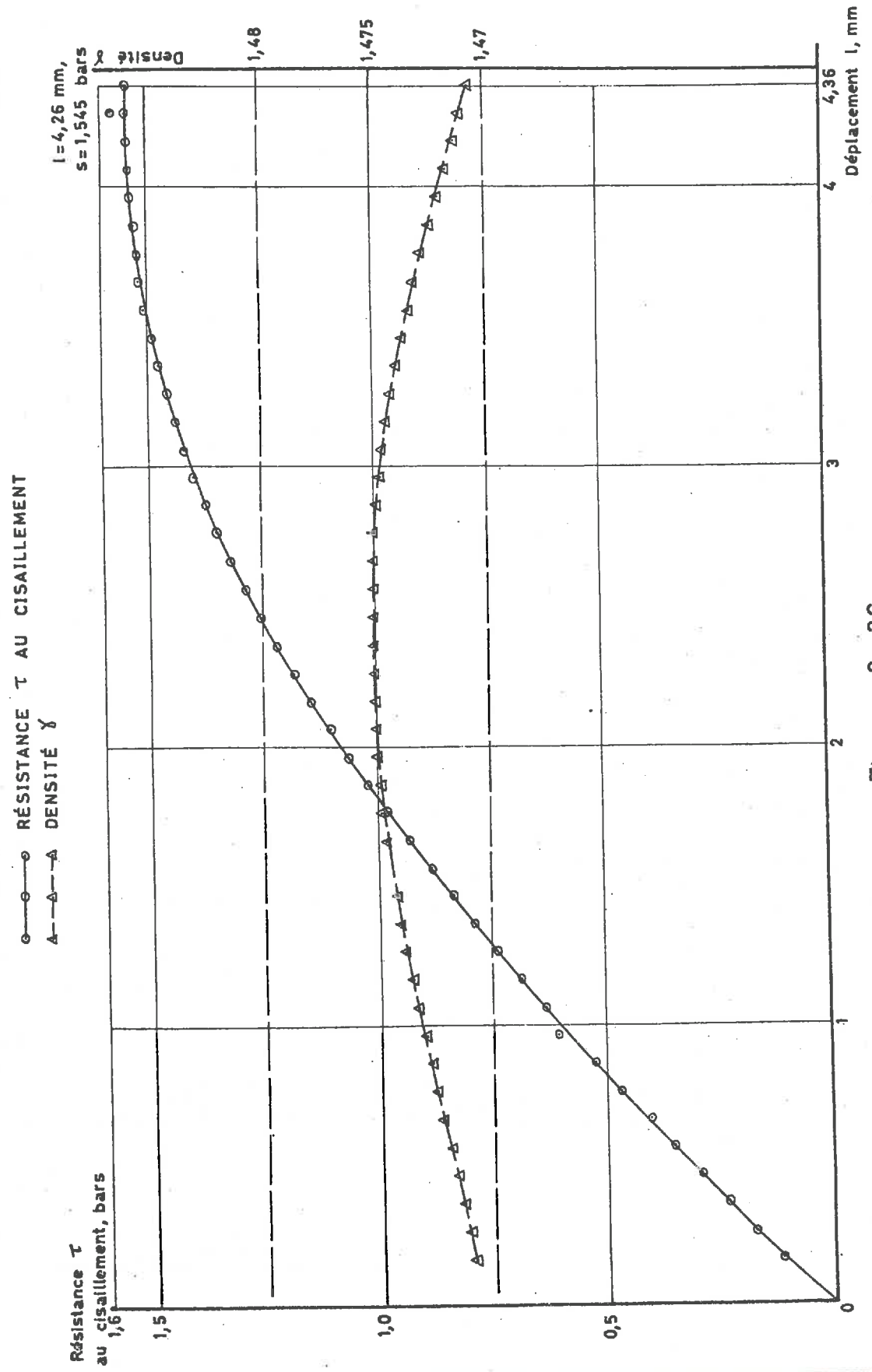


Figure 3.36

SABLE DE RANCE NON INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,45

Cisaillement direct, pression normale $p=5,0$ bars

CD 21

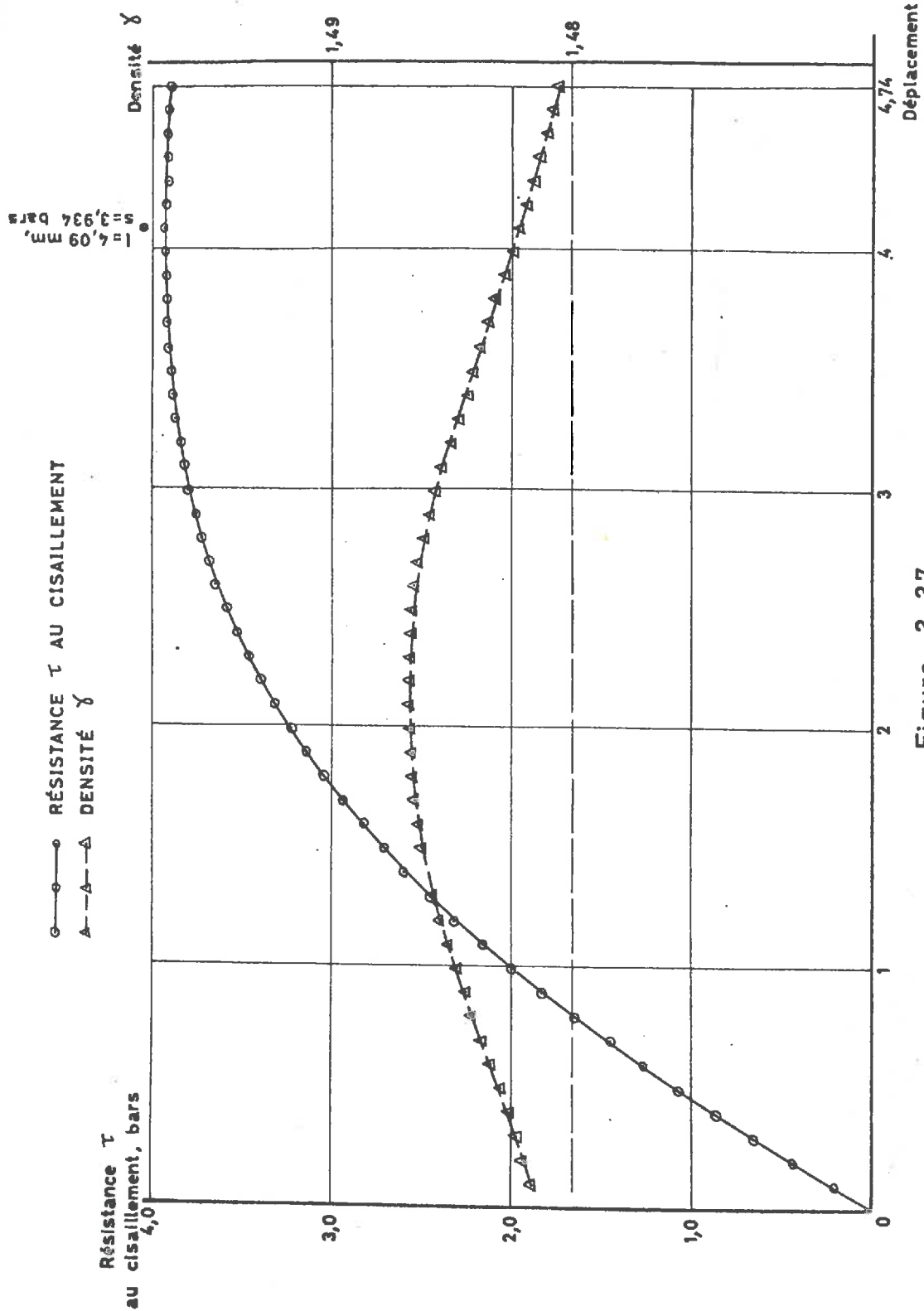


Figure 3.37

SABLE DE RANCE NON INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,45 Cisaillement direct, pression normale $p = 20,0$ bars

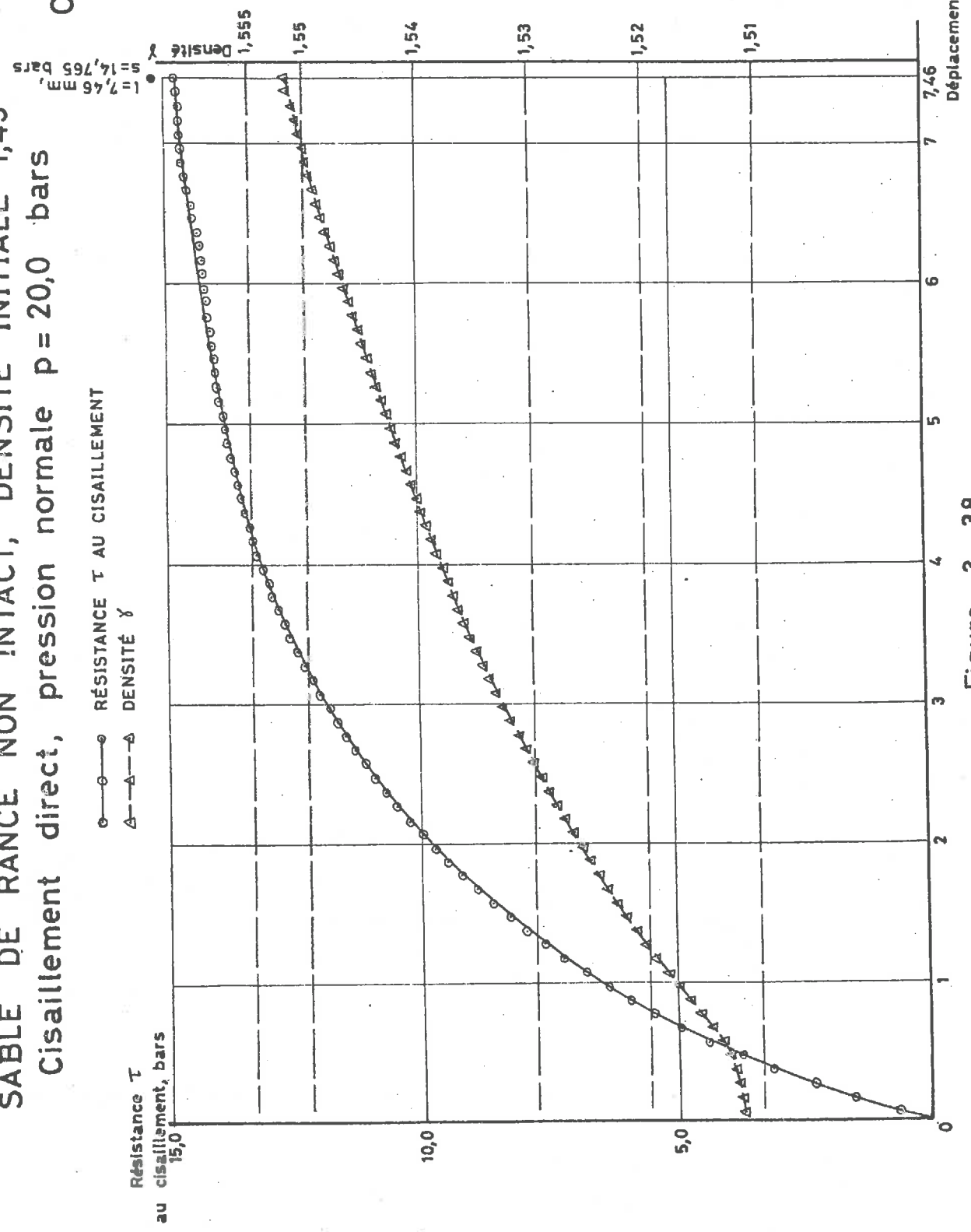


Figure 3.38

SABLE DE RANCE NON INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,45 Cisaillement direct. Courbe intrinsèque

Valeur de pointe s de la
résistance au cisaillement, bars

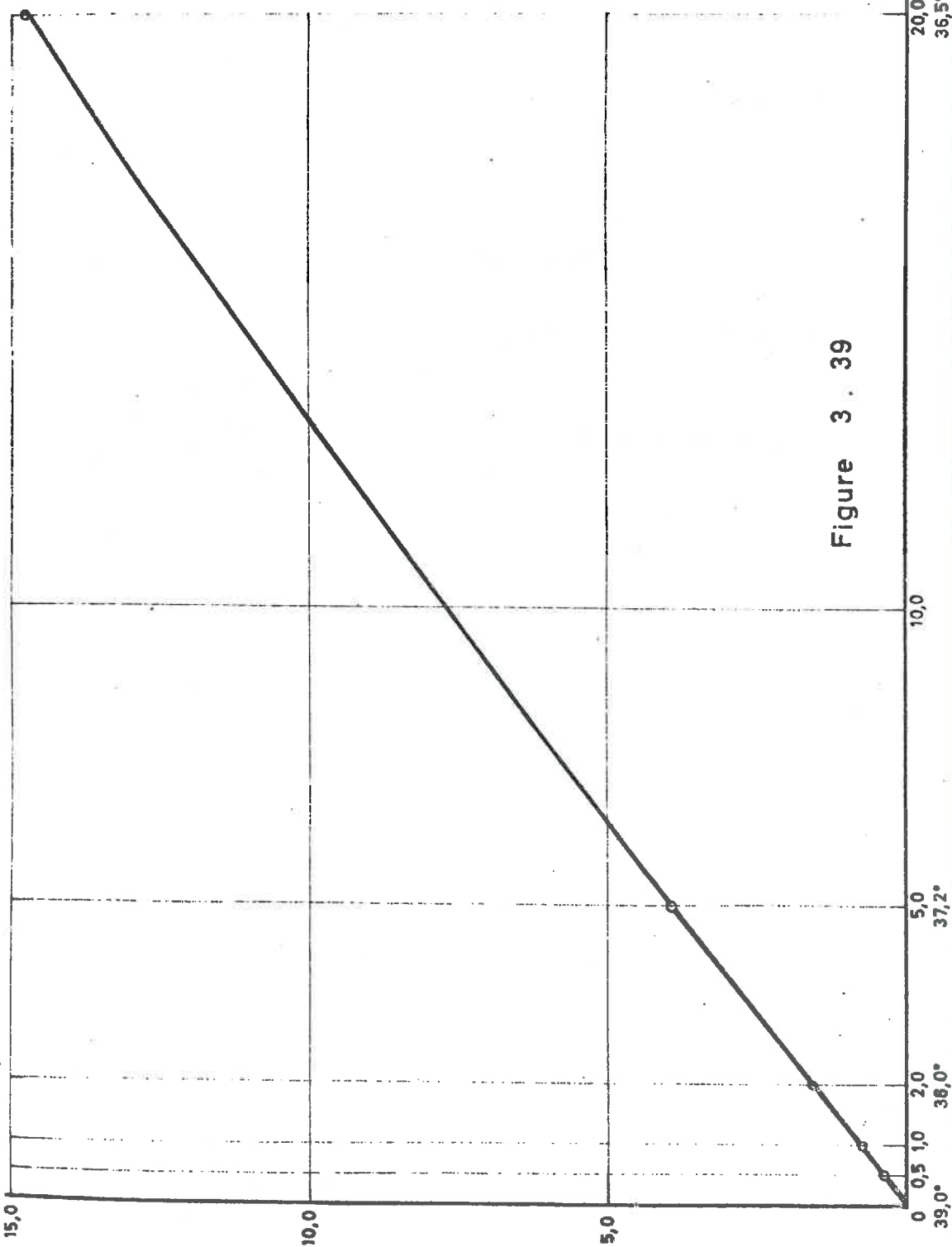


Figure 3 . 39

deux compacités différentes, l'abscisse λ correspondant à la valeur de pointe s de la résistance au cisaillement augmenter avec la pression normale p appliquée. Cf. figs. 3.27 à 3.32 pour la densité 1,391 et 3.34 à 3.38 pour la densité 1,45.

3.3.4.2 et 3.3.5.2. Courbes intrinsèques.

L'angle de frottement interne φ , dans le cas du sable très peu compact ($\gamma = 1,391$), augmente avec la pression normale p appliquée. Cf. fig. 3.33. L'écart entre les angles de frottement interne correspondant aux deux densités diminue à mesure que la pression normale p augmente. Cf. fig. 3.33 et 3.39.

3.3.4.3 et 3.3.5.3. Courbes densité-déformation.

Les courbes densité-déformation correspondant aux deux densités confirment la tendance générale de la variation de la densité d'un sable soumis au cisaillement : si sa compacité est très faible, le sable va se tasser pendant le cisaillement, même lorsque ce dernier s'effectue sous une faible pression normale ; s'il est compact, il se détend vers la fin des cisaillements qui se font sous une faible pression normale. Cf. figs. 3.27 à 3.32 et 3.34 à 3.38.

3.3.6. Sable de Rance, densité 1,45.

3.3.6.1. Courbes effort-déformation.

Les valeurs de pointe s de la résistance au cisaillement suggèrent, par leur nette supériorité par rapport aux valeurs correspondantes du sable non intact, que ce sable intact, mis en place à la même densité que le sable non intact, équivaut, au point de vue résistance, à un sable non intact de densité bien supérieure : cf. figs. 3.40 à 3.43 et 3.34 à 3.38.

SABLE DE RANCE INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,45
Cisaillement direct, pression normale $p = 0,5$ bar

CD 27

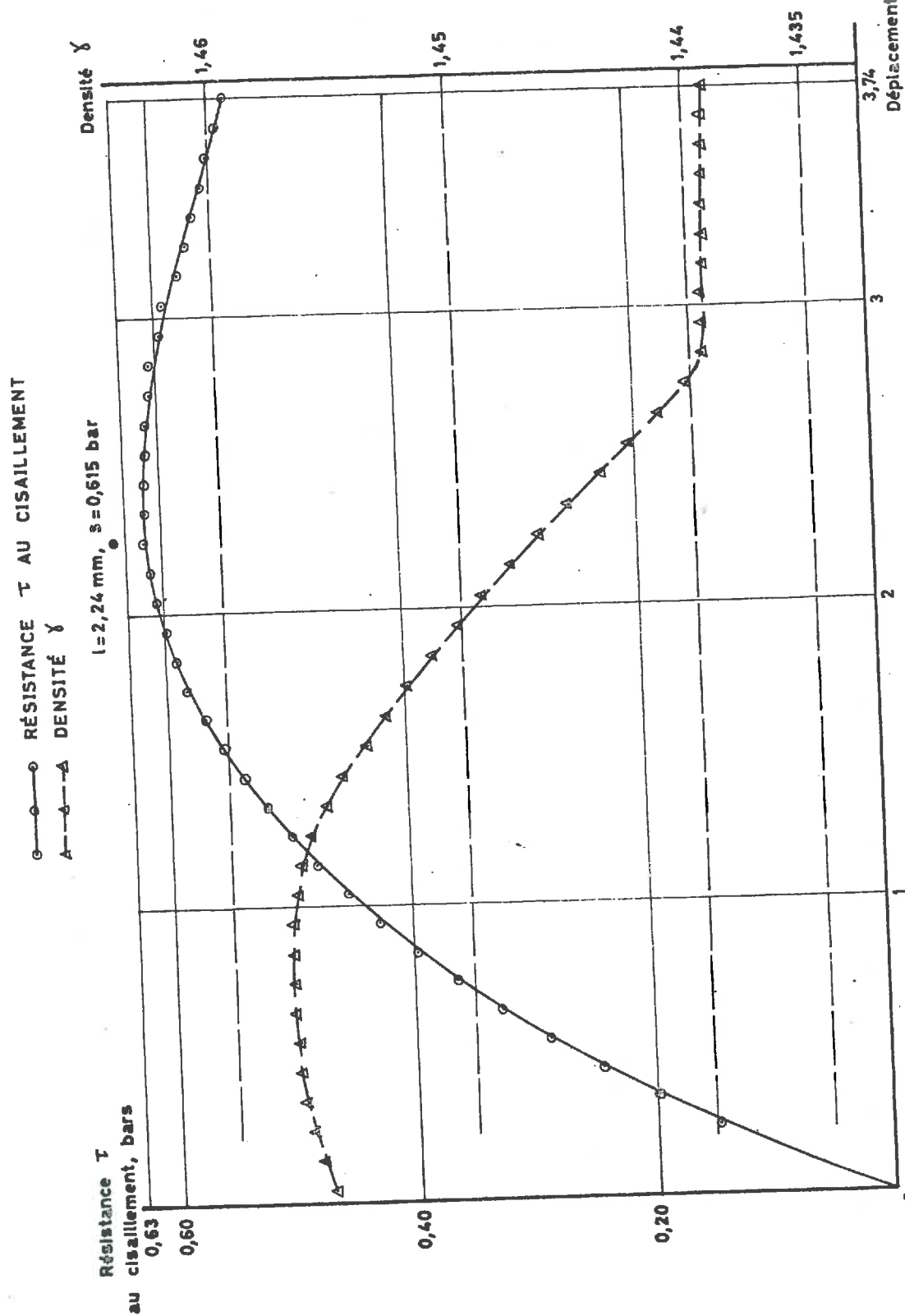


Figure 3.40

SABLE DE RANCE INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,45 Cisaillement direct, pression normale $p=1,0$ bar

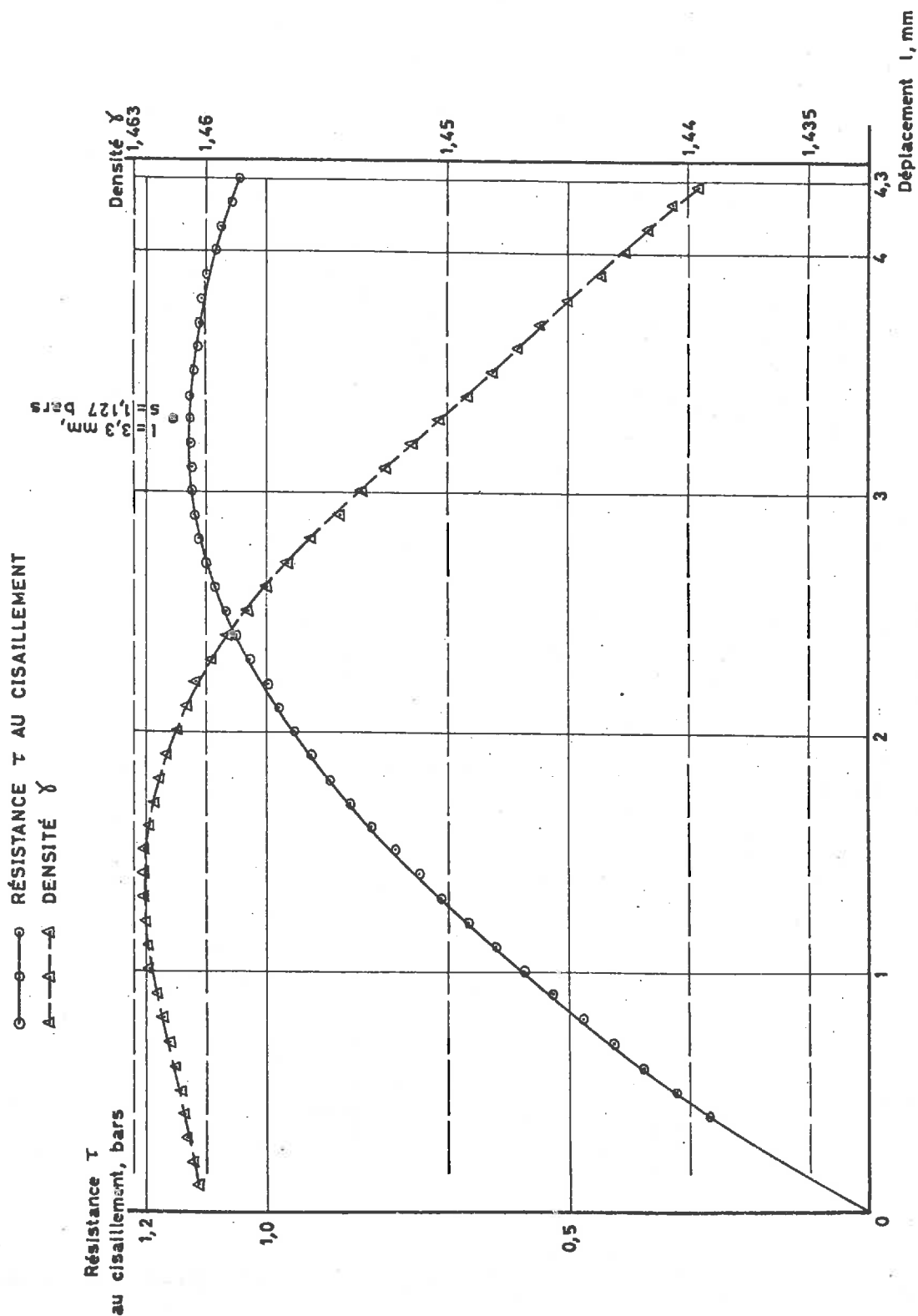


Figure 3.41

SABLE DE RANCE INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,45
Cisaillage direct, pression normale $p = 2,0$ bars

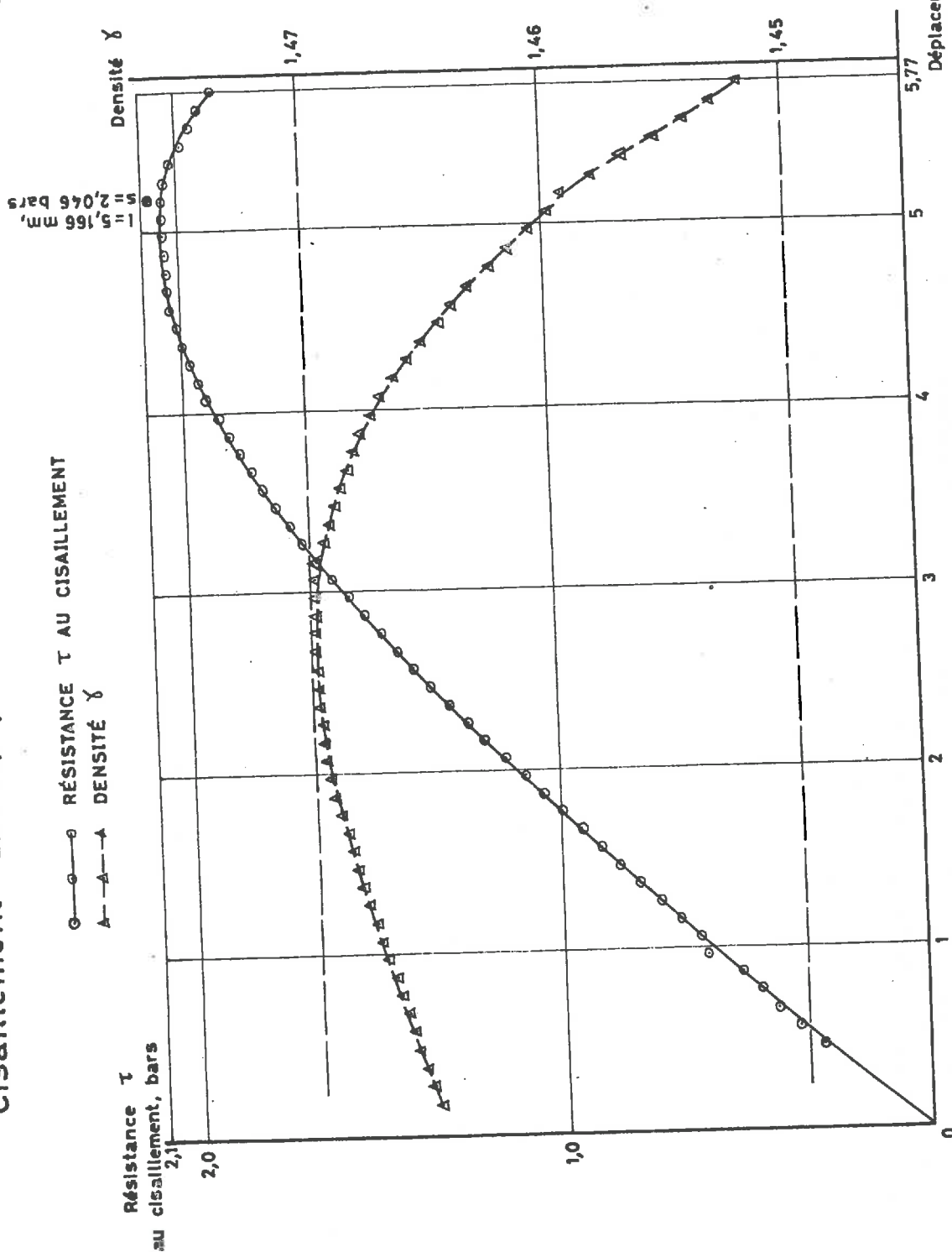


Figure 3.42

SABLE DE RANCE INTACT, DENSITÉ INITIALE 1,45 Cisaillement direct, pression normale $p = 5,0$ bars

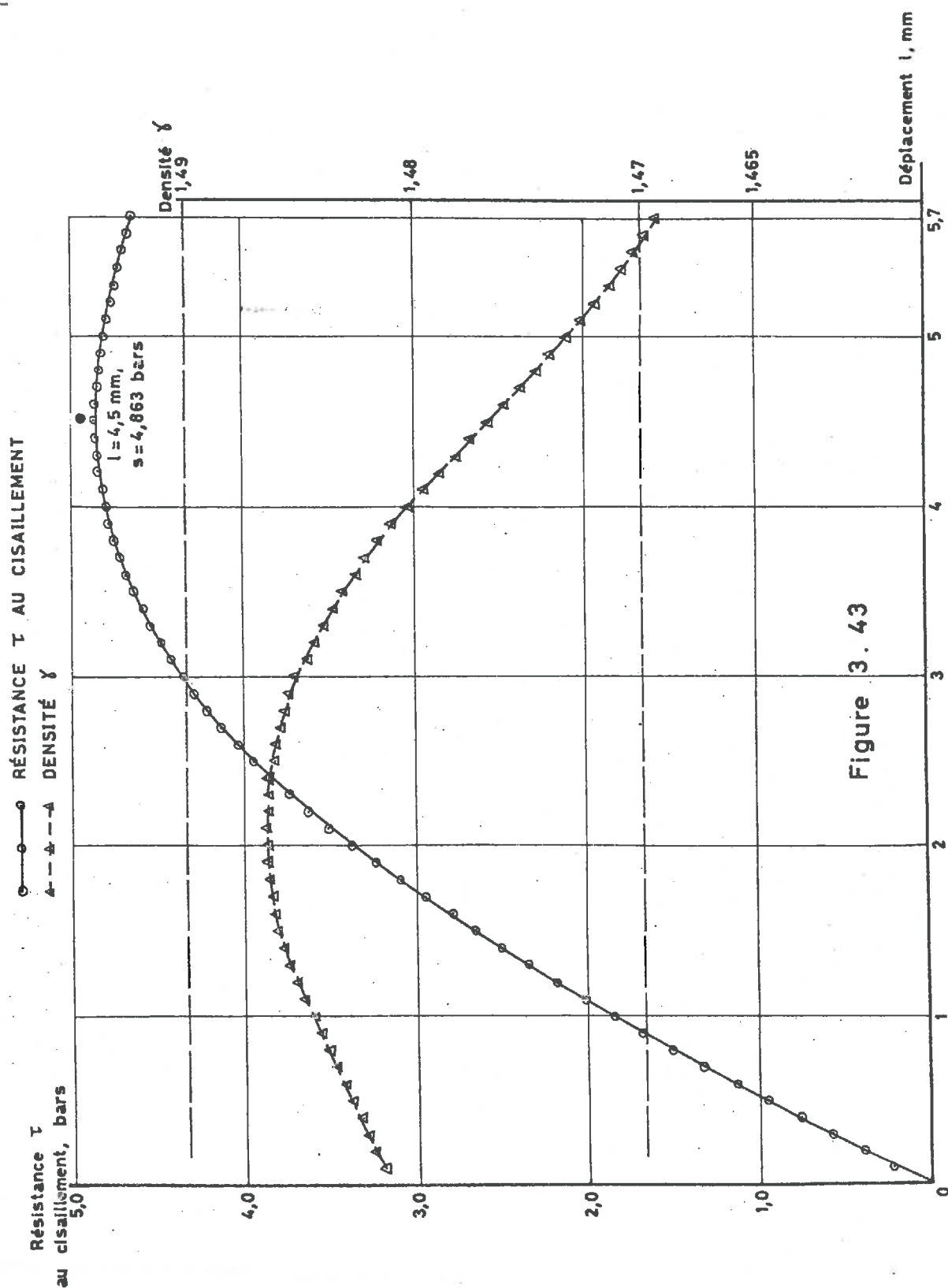


Figure 3. 43

PETITES BILLES DE VERRE, DENSITÉ INITIALE 1,85

Cisaillement direct, pression normale $p=0,11$ bar

CD 39

○—○ Résistance τ au cisaillement
 ▲—▲ Densité γ

Résistance τ
 au cisaillement, bars

$l=0,51$ mm, $s=0,051$ bar

Densité γ

1,855

1,85

1,84

Déplacement l , mm

2 2,11

Figure 3. 44

PETITES BILLES DE VERRE, DENSITÉ INITIALE 1,85 Cisaillement direct, pression normale $p = 0,2$ bar

CD 37

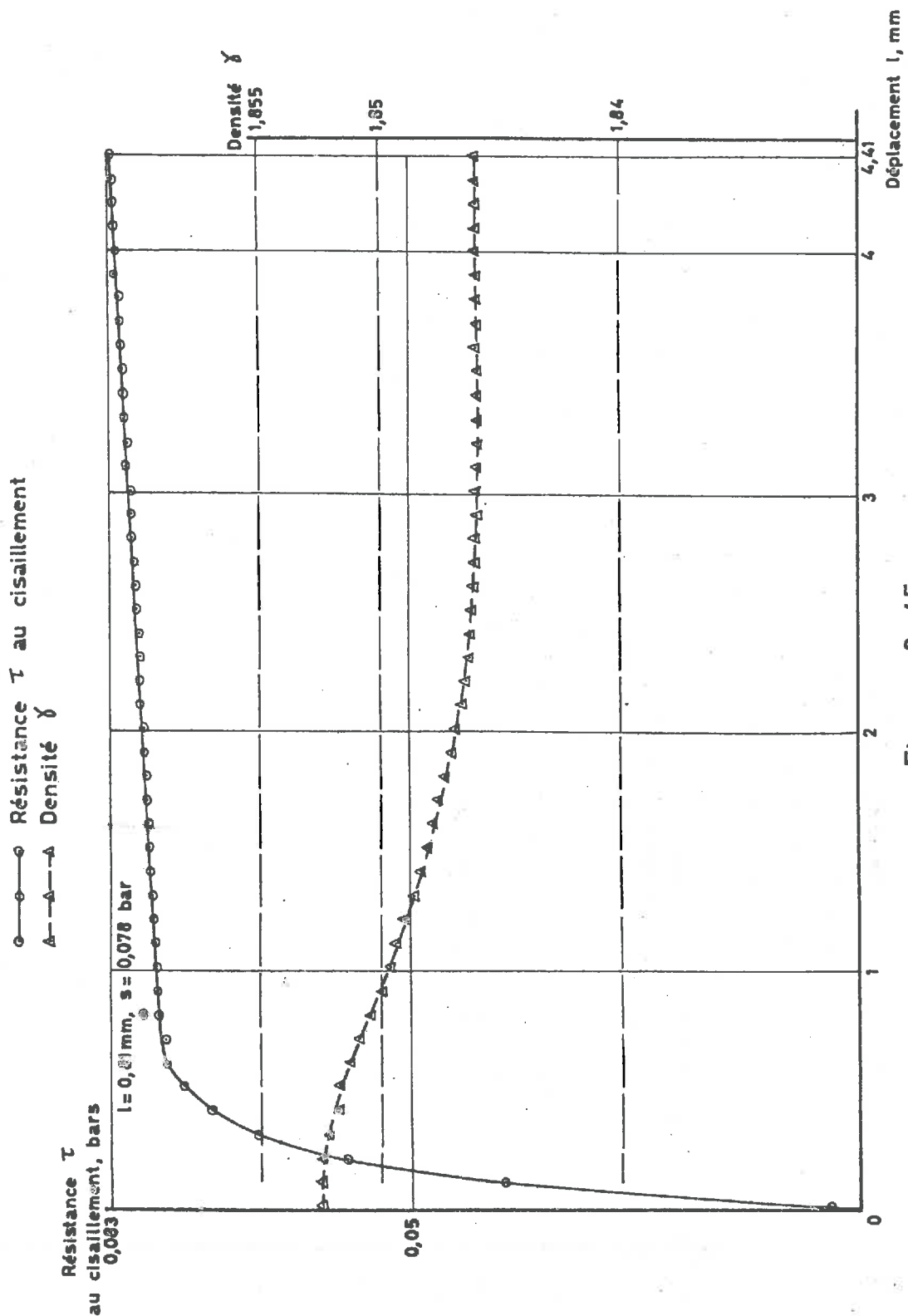


Figure 3.45

PETITES BILLES DE VERRE, DENSITÉ INITIALE 1,85

Cisaillement direct, pression normale $p=0,5$ bar

CD 38

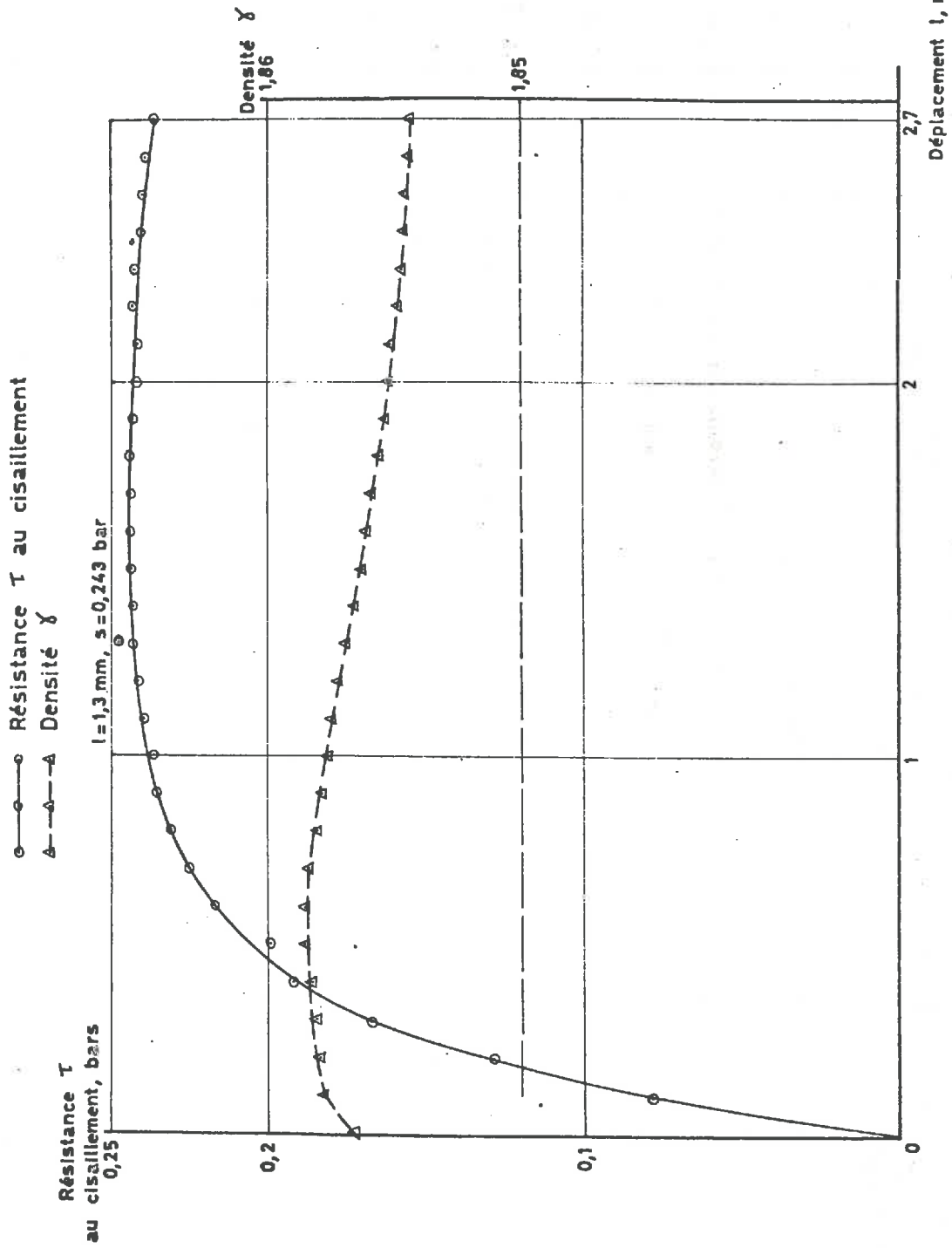


Figure 3. 46

PETITES BILLES DE VERRE, DENSITÉ INITIALE 1,85 Cisaillement direct, pression normale $p=1,0$ bar

CD 40

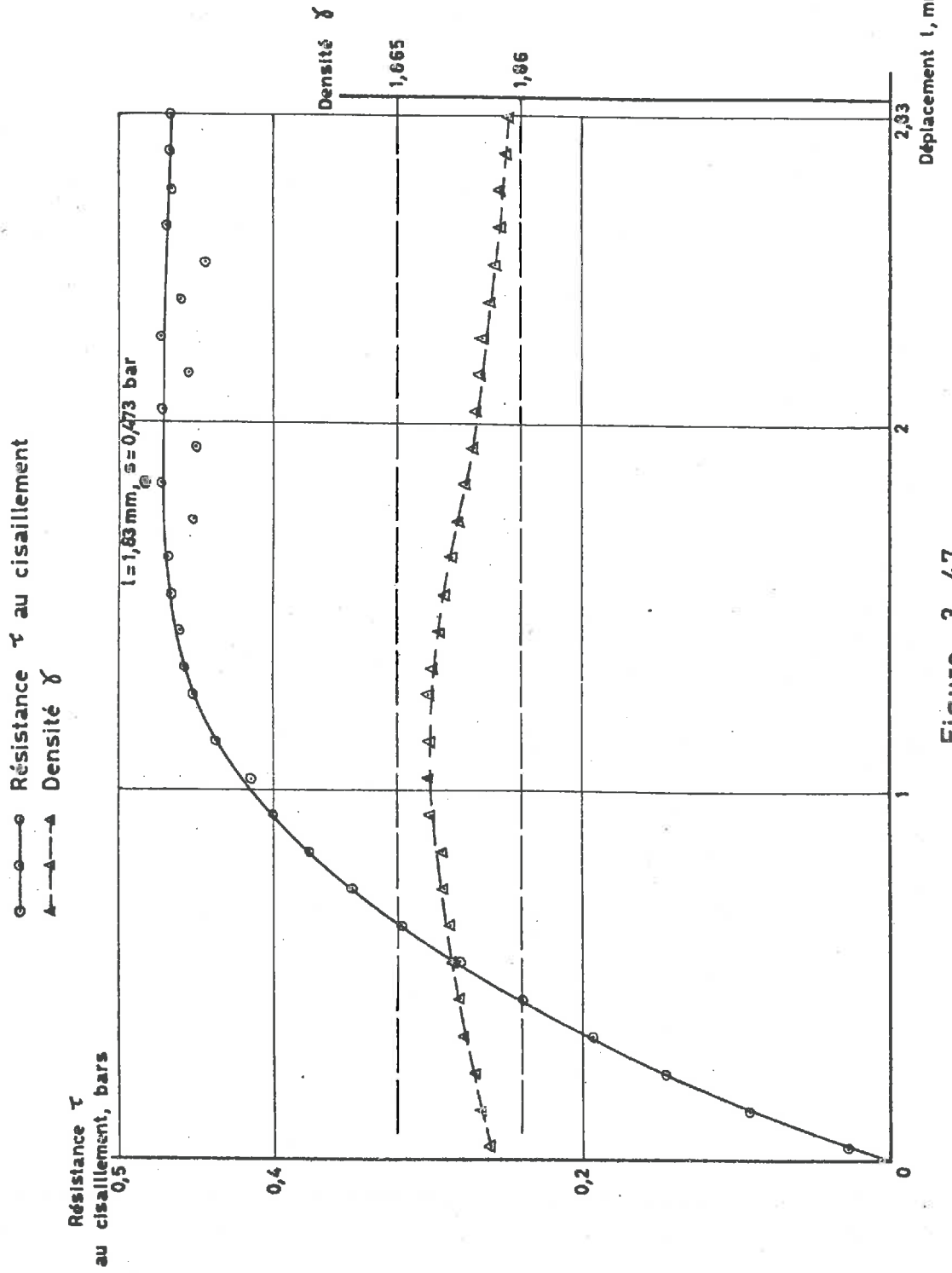


Figure 3.47

PETITES BILLES DE VERRE, DENSITÉ INITIALE 1,85
Cisaillement direct, pression normale $p = 2,0$ bars

CD 41

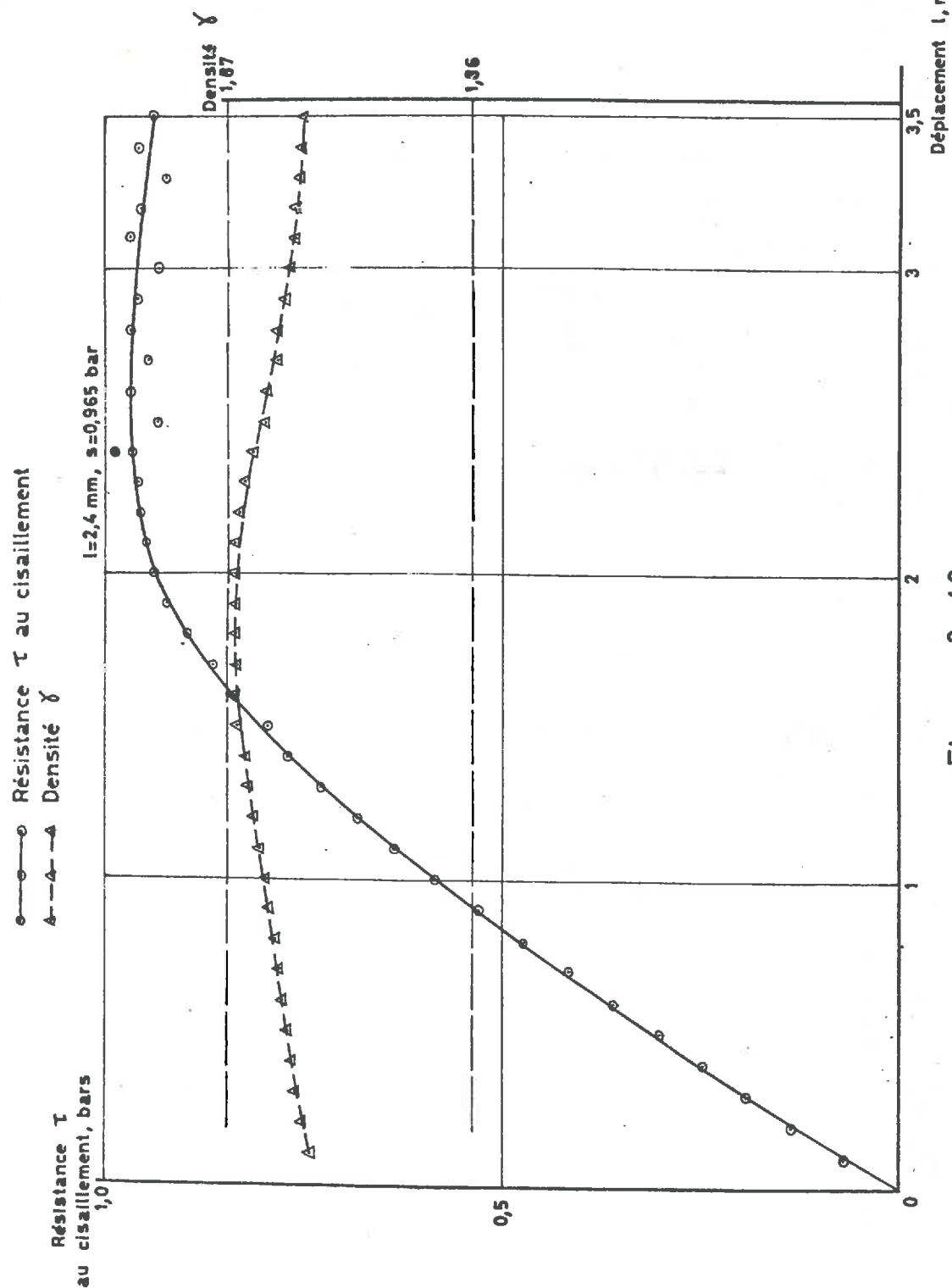


Figure 3.48

PETITES BILLES DE VERRE, DENSITÉ INITIALE 1,85

Cisaillement direct, pression normale $p=5,0$ bars

CD 42

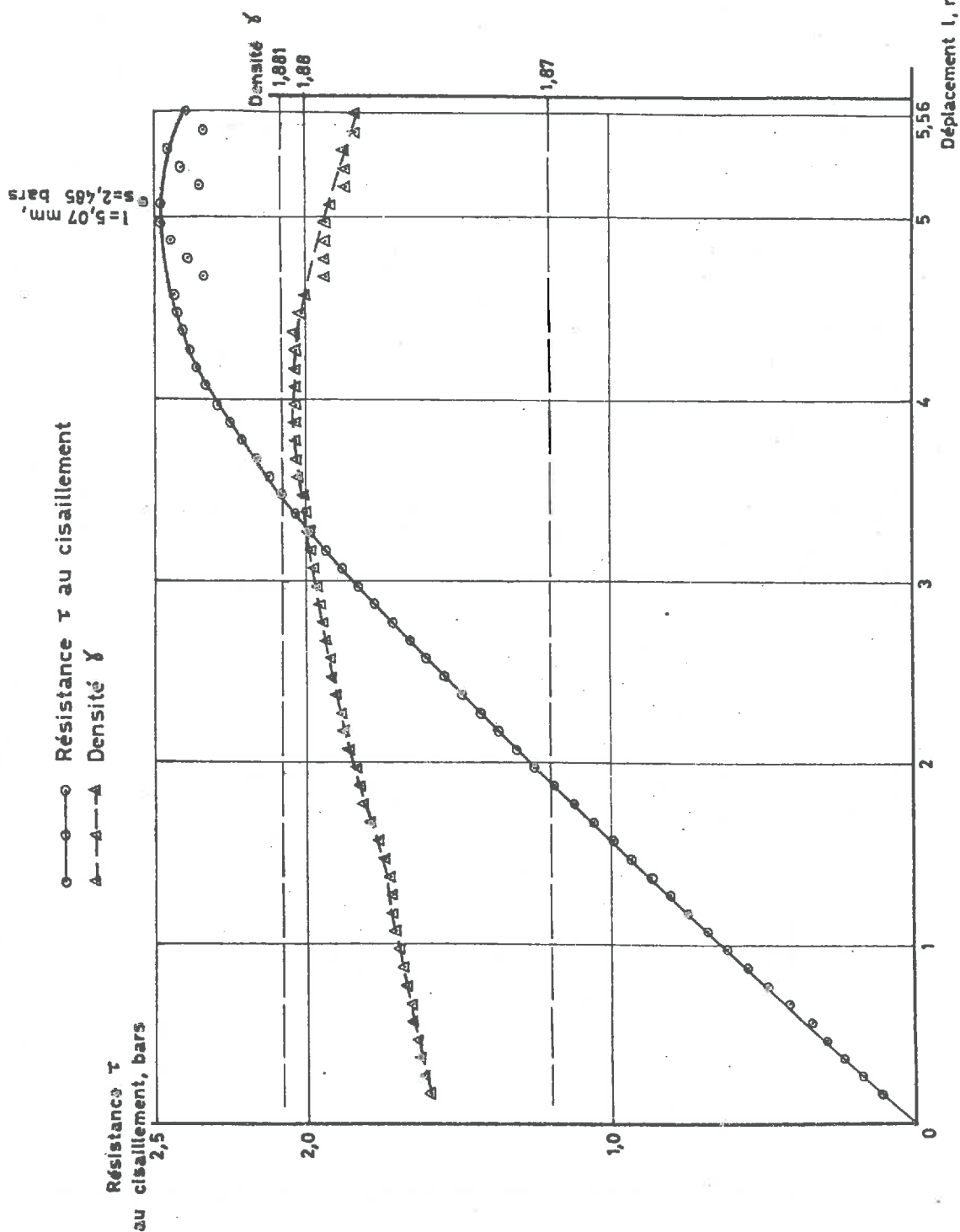
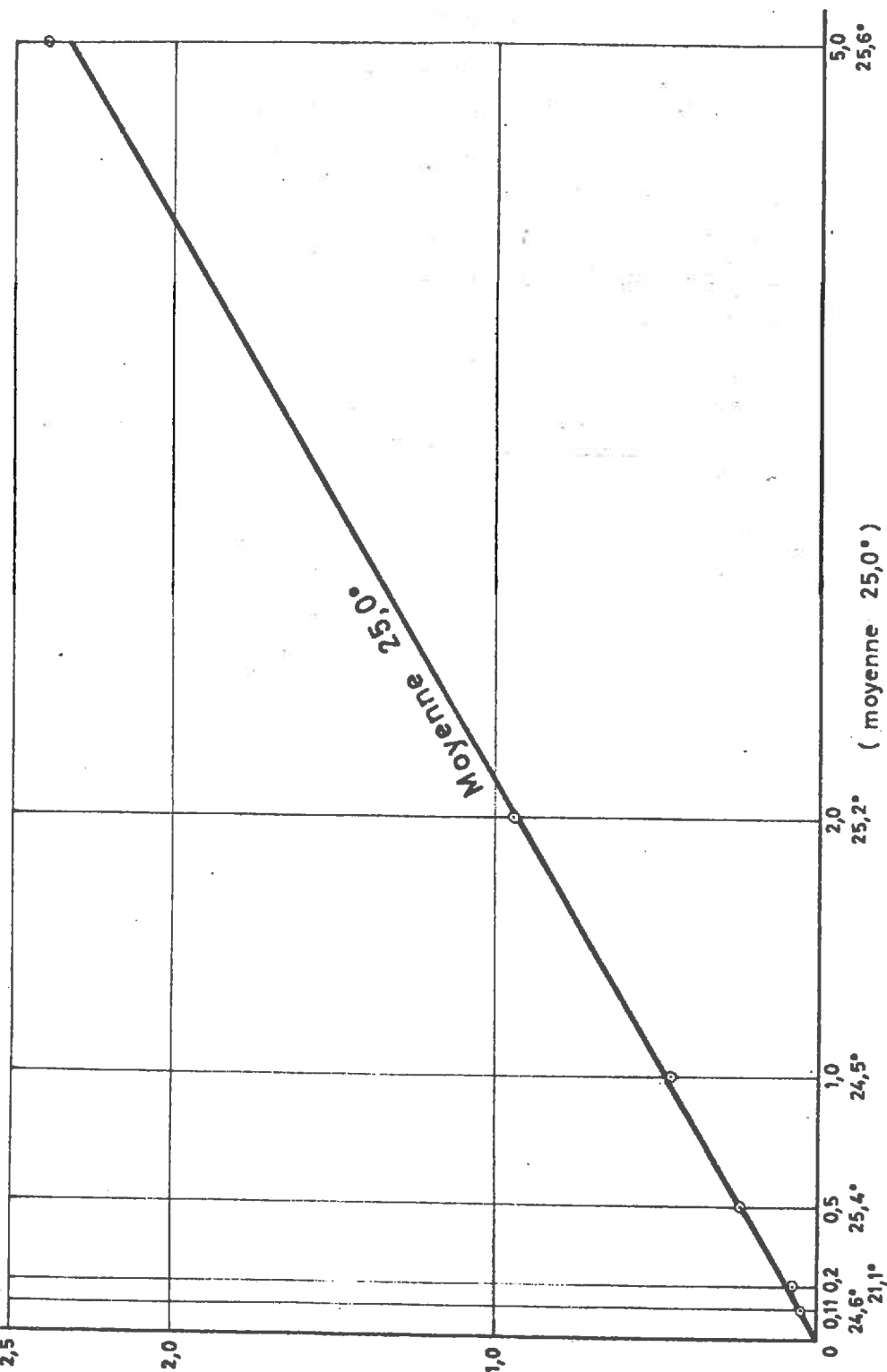


Figure 3.49

PETITES BILLES DE VERRE, DENSITÉ INITIALE 1,85 Cisaillement direct. Courbe intrinsèque

Valeur de pointe σ de la
résistance au cisaillement, bars



(moyenne 25,0°)

Figure 3.50

3.3.6.2. Courbes densité-déformation.

D'après la propriété énoncée au 3.3.4.3 et 3.3.5.3, l'allure des courbes densité-déformation de ce sable suggère, par comparaison avec celle des courbes correspondantes du sable non intact, que ce sable, mis en place à la même densité que le sable non intact, se comporte comme un sable non intact de densité bien supérieure. Cf. figs. 3.40 à 3.43 et 3.34 à 3.38.

3.3.7. Petites billes de verre de diamètre variant entre 0,2 à 0,5 mm, $\gamma = 1,85$.

L'angle de frottement interne φ est constant et égal à 25° pour p variant entre 0 et 5,0 bars. Cf. figs. 3.50 (courbe intrinsèque) et 3.44 à 3.49 (courbes effort-déformation à partir desquelles la courbe intrinsèque a été établie).

CHAPITRE 4

ETUDE OEDOMETRIQUE SUR UN MATERIAU COHERENT

4.1. DESCRIPTION DES ESSAIS.

Comme étude de matériau cohérent sous fortes pressions, nous avons examiné le comportement d'une argile soumise à deux essais oedométriques dans lesquels la pression maxima a atteint 76,5 bars. La durée des essais, effectués simultanément, a été de 111 jours.

Le matériau en question est une argile de Caillat. Des études antérieures avaient déterminé ses caractéristiques

limite de liquidité $w_L = 58 \%$,
" " plasticité $w_p = 29 \%$,
" " retrait $w_s = 25 \%$.

Les échantillons sont de forme cylindrique ; le diamètre est de 70 mm, la hauteur initiale 12 mm. La teneur en eau initiale w_i commune est de 70 %, soit 1,2 fois la limite de liquidité.

Les pressions verticales sont appliquées progressivement ; à chaque nouvelle pression appliquée des mesures de tassement sont faites au cours du temps, et en fin de tassement on mesure la perméabilité. Le plus souvent chaque charge est maintenue constante pendant trois jours au moins, et chaque perméabilité obtenue est toujours la moyenne de trois mesures.

Nous avons dû utiliser trois appareils différents de mise en pression, dont seul le premier permet l'application

instantanée de la pression et son maintien à une valeur rigoureusement constante. Mais nous n'avons pu dépasser 10 bars avec cet appareil, et cette dernière pression atteinte, nous avons dû, pour avoir des pressions plus fortes, déplacer les oedomètres et les mettre sur un vérin fonctionnant à l'air comprimé. Il y a eu alors des difficultés pour maintenir les pressions appliquées, et, après cinq jours, nous avons été obligé d'amener les oedomètres sur une presse avec laquelle les expériences ont été poursuivies jusqu'à leur achèvement. La presse ne permet pas une variation instantanée de la pression ; nous avons mesuré le temps nécessaire pour faire varier les pressions et avons vu que la durée maxima a été de 3 minutes 50 secondes, temps mis pour passer de 20,40 bars à 40,75 bars. Les autres valeurs sont inférieures à 3 minutes. Nous avons indiqué ces temps de mise en pression dans le tableau récapitulatif des principaux résultats et mesures se rapportant à ces essais oedométriques (tableau 4.1).

4.2. TASSEMENT EN FONCTION DES CHARGES.

La figure 4.1 présente, en coordonnées semi-logarithmiques, la variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction de la pression p appliquée, avec p indiqué sur l'échelle logarithmique. Sur cette figure nous avons la variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction de la pression p appliquée pour les charges et décharges suivantes :

croissance de la pression p de 0,045 bar à 10,2 bars
décharge de 10,2 à 0,0 bar ;
recharge de 0,0 à 76,5 bars ;
décharge de 76,5 bars à 0,0 bar.

Toutes les courbes, dont l'ensemble constitue deux

ARGILE DE CAILLAT. ESSAIS OEDOMÉTRIQUES, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i = 70\%$ Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction de la pression p appliquée

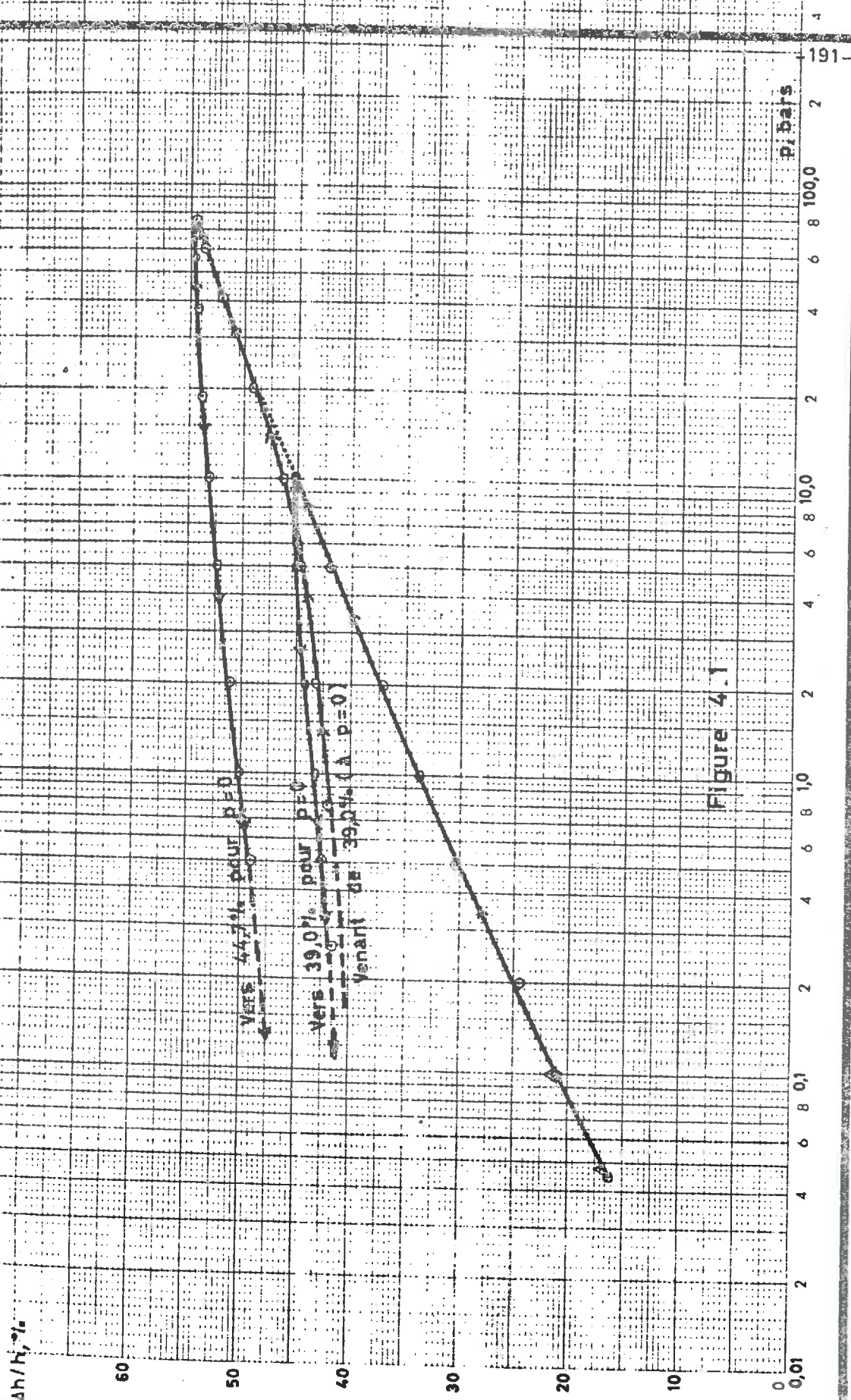


Figure 4.1

cycles de charge-décharge complets, sont d'allure presque linéaire. La courbe de charge initiale, et la portion $[p = 20,4 \text{ à } 76,5 \text{ bars}]$ de la courbe de recharge, sont pour ainsi dire dans le prolongement l'une de l'autre. Sur la figure nous avons rappelé cette propriété en reliant par une ligne discontinue la courbe de charge initiale et la portion au-delà de $p = 20,4$ bars de la courbe de recharge. La courbe entière (1er cycle + 2ème cycle) correspondant aux pressions croissantes peut être représentée approximativement par l'équation

$$\Delta h/h = 12 \log p + 33 \quad (4.1)$$

Toutes les courbes, sauf la portion qui va jusqu'à $p = 20,4$ bars de la courbe de recharge, ont leur concavité, très faible, tournée vers les ordonnées décroissantes.

La figure 4.2 montre encore, mais cette fois en coordonnées linéaires, la variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction de la pression p appliquée. Avec cette présentation en coordonnées linéaires, il a été possible de tracer les courbes de décharge jusqu'à $p = 0$.

En outre, une courbe $\Delta h/h - p$ en coordonnées linéaires, correspondant à la phase de charge initiale jusqu'à $p = 10,2$ bars, a été tracée, sur laquelle on remarque la bonne concordance des mesures effectuées dans les deux essais conduits simultanément et dans des conditions semblables. Cf. fig. 4.3.

4.3. TASSEMENT SOUS UNE PRESSION DONNÉE EN FONCTION DU TEMPS.

Pour chaque pression appliquée des mesures de tassement ont été effectuées au cours du temps et les diagrammes

ARGILE DE CAILLAT. ESSAIS OEDOMÉTRIQUES, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i=70\%$
 Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction de la pression p appliquée
 (COORDONNÉES LINÉAIRES)

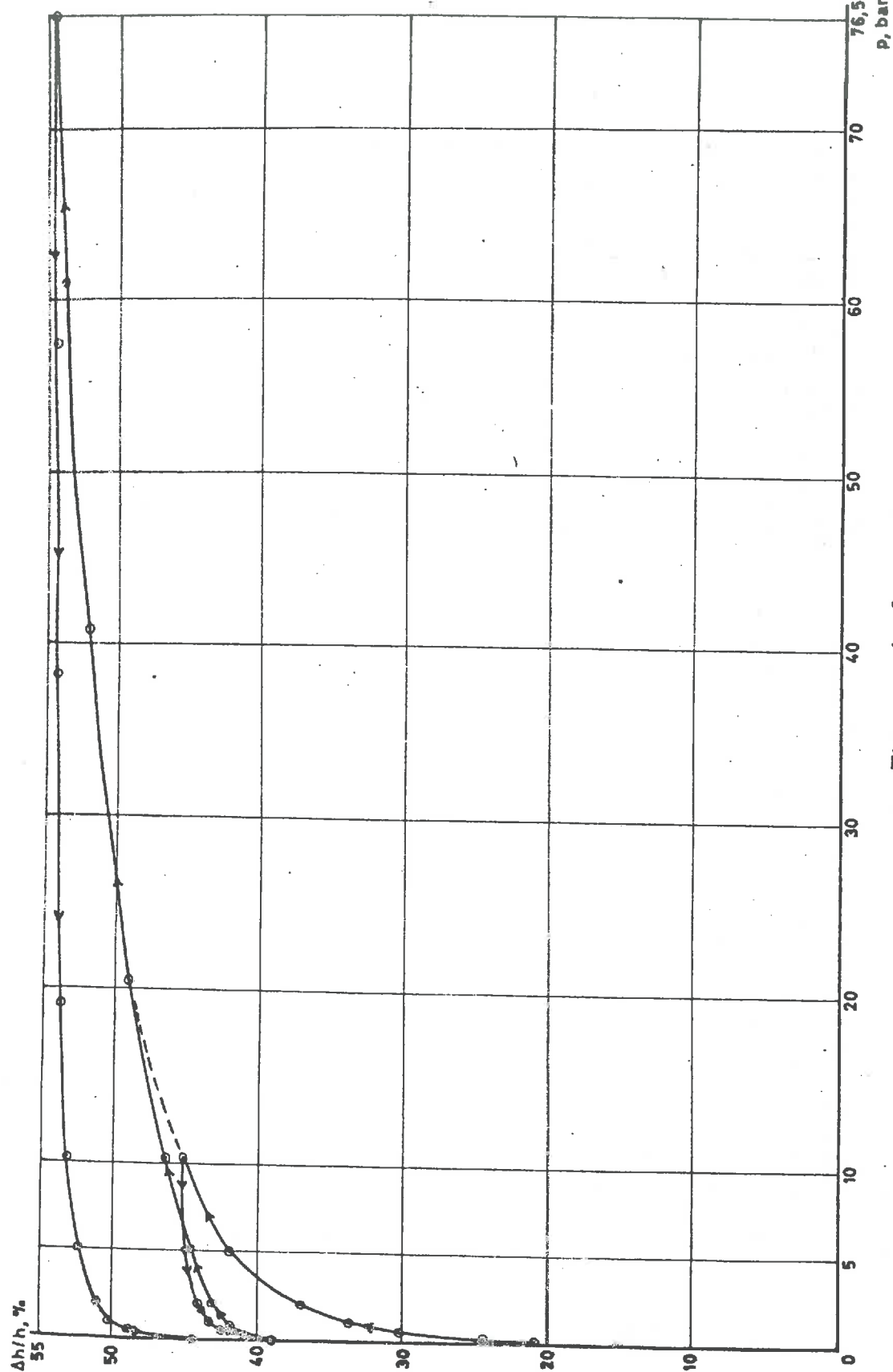


Figure 4.2

ARGILE DE CAILLAT. ESSAIS OEDOMÉTRIQUES, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i=70\%$

Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction de la pression p appliquée

(DIAGRAMME RELATIF À LA PREMIÈRE PARTIE DES DEUX ESSAIS, METTANT EN ÉVI-

DENCE LA CONCORDANCE DES RÉSULTATS MESURÉS)

○ Essai N°1
△ Essai N°2

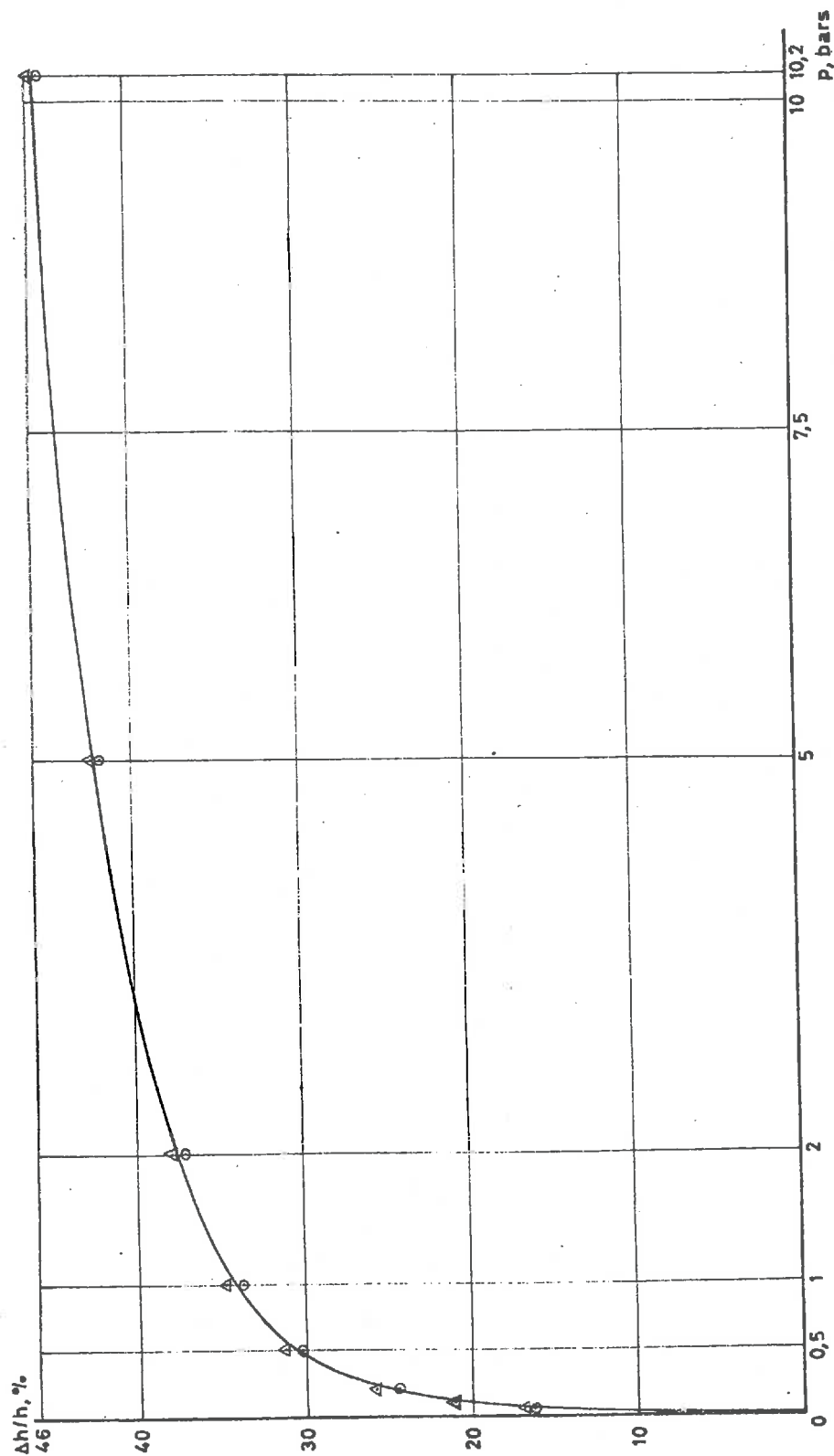


Figure 4.3

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i = 70\%$

Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps t

PRESSIION NORMALE $p = 0,1$ BAR, PRESSION ANTÉRIEURE 0,045 BAR

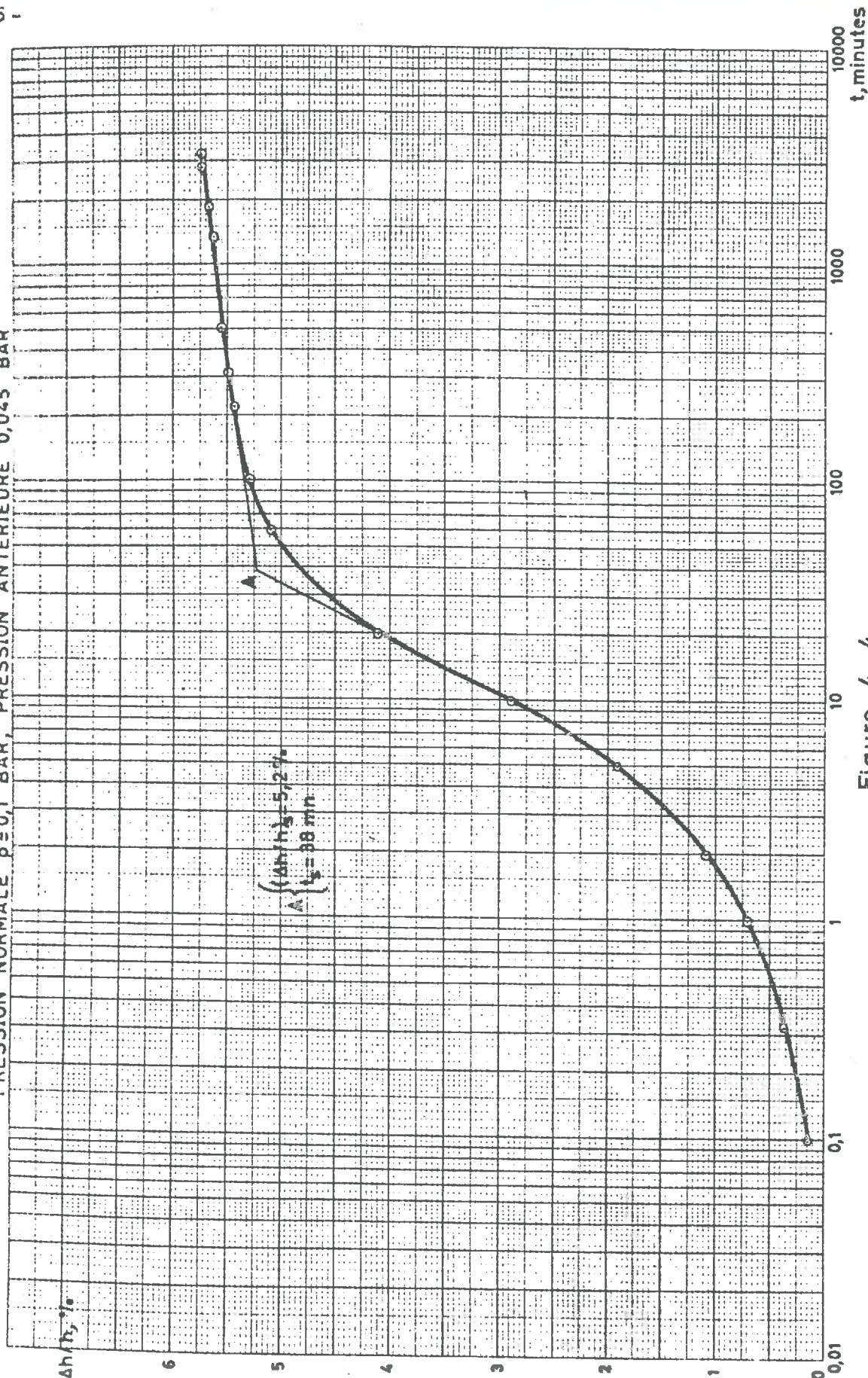


Figure 4. 4

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i = 70\%$

Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps t

PRESSIION NORMALE $p = 0,2$ BAR, PRESSIION ANTÉRIEURE $0,1$ BAR

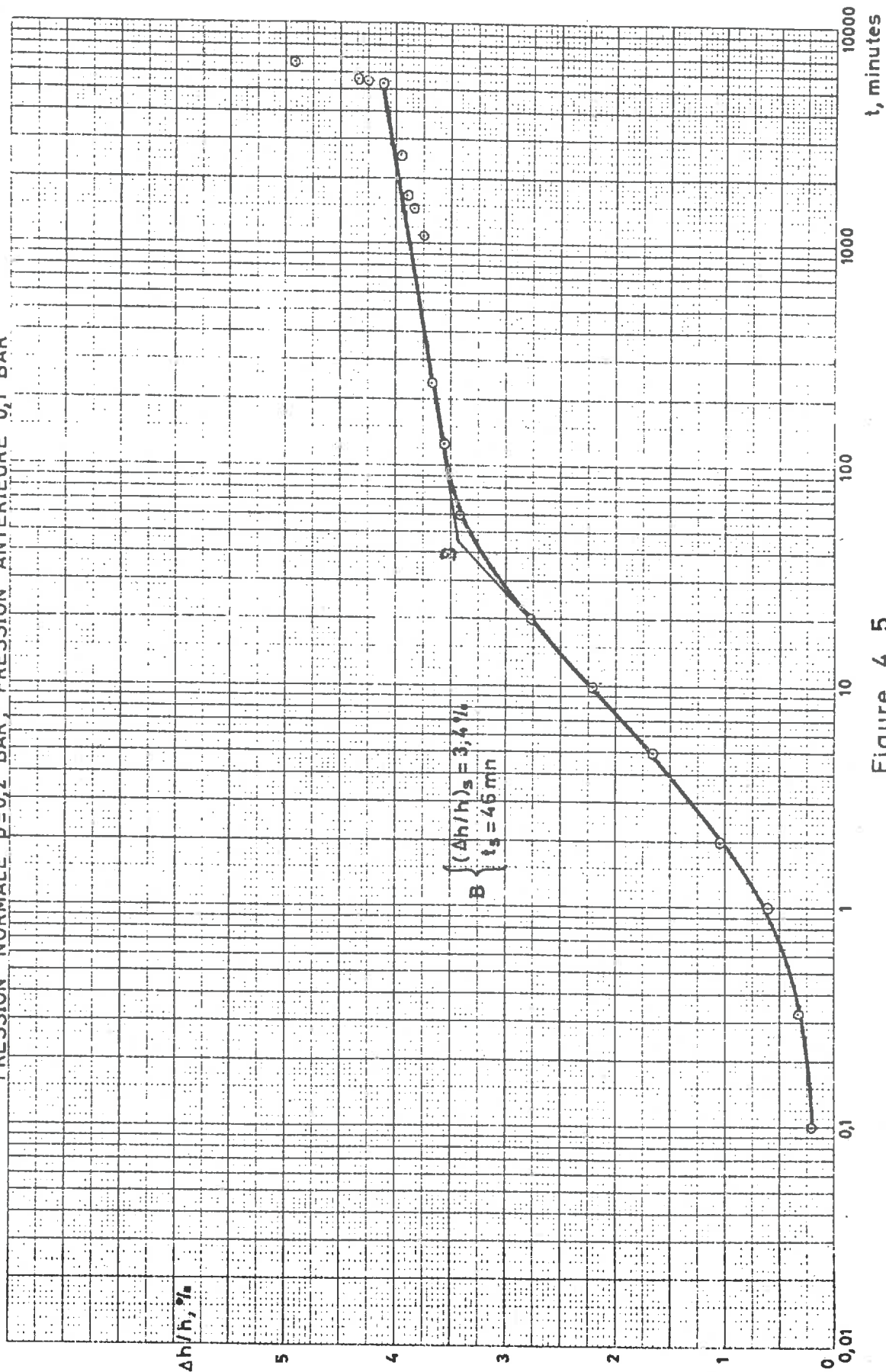


Figure 4.5

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i = 70\%$

$\Delta h/h, \%$ Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps t

PRESSIION NORMALE $P = 0,5$ BAR, PRESSIION ANTÉRIEURE $0,2$ BAR

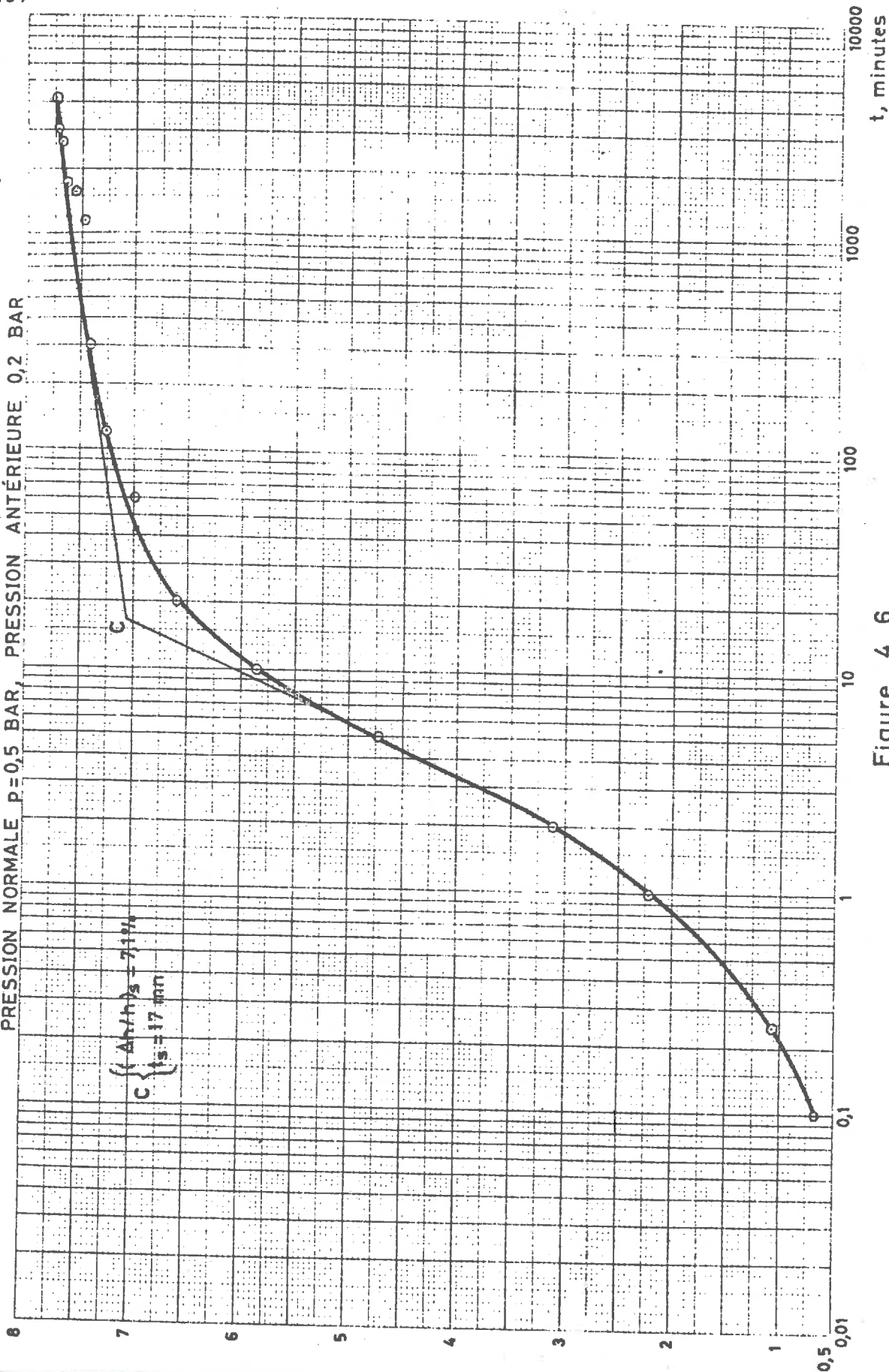


Figure 4.6

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i=70\%$

Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps t

PRESSION NORMALE $p=1,0$ BAR, PRESSION ANTÉRIEURE $0,5$ BAR

- 198 -

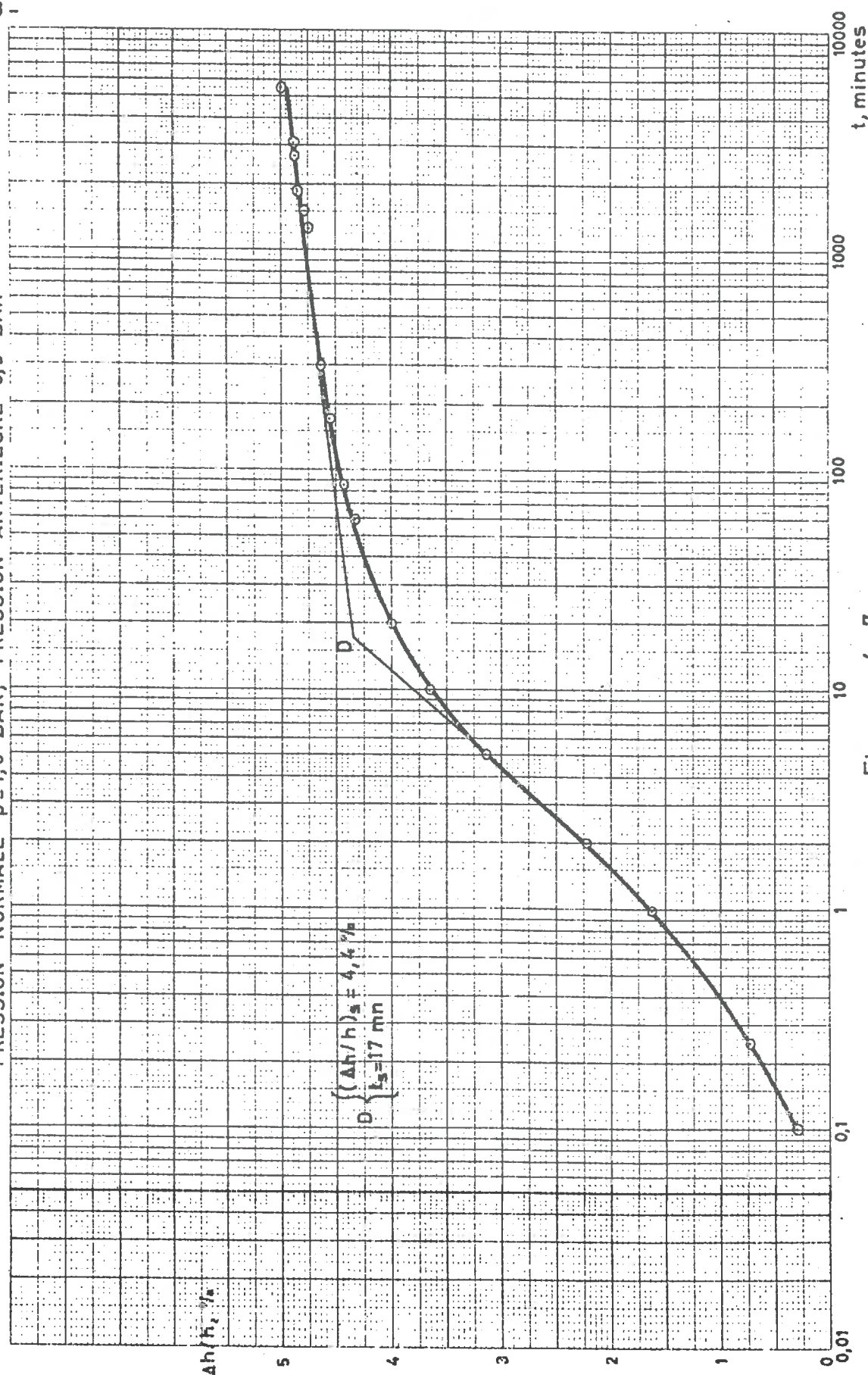


Figure 4.7

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i = 70\%$.

Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps t

PRESSION NORMALE $p = 2,0$ BARS, PRESSION ANTÉRIEURE $1,0$ BAR

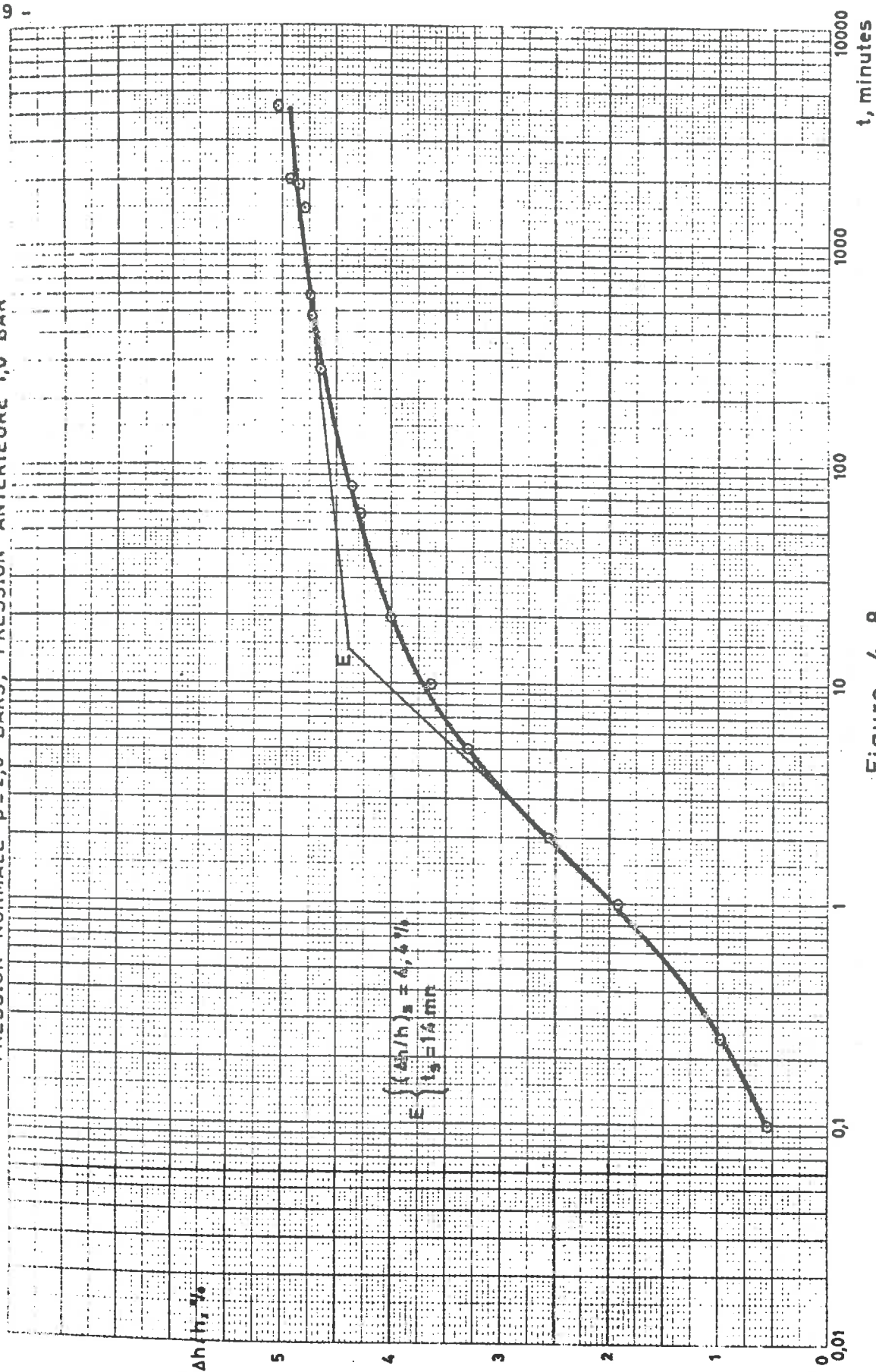


Figure 4.8

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i \approx 70\%$

$\Delta h/h, \%$ Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps t

PRESSIION NORMALE $p = 5,0$ BARS, PRESSION ANTÉRIEURE 2,0 BARS

- 200 -

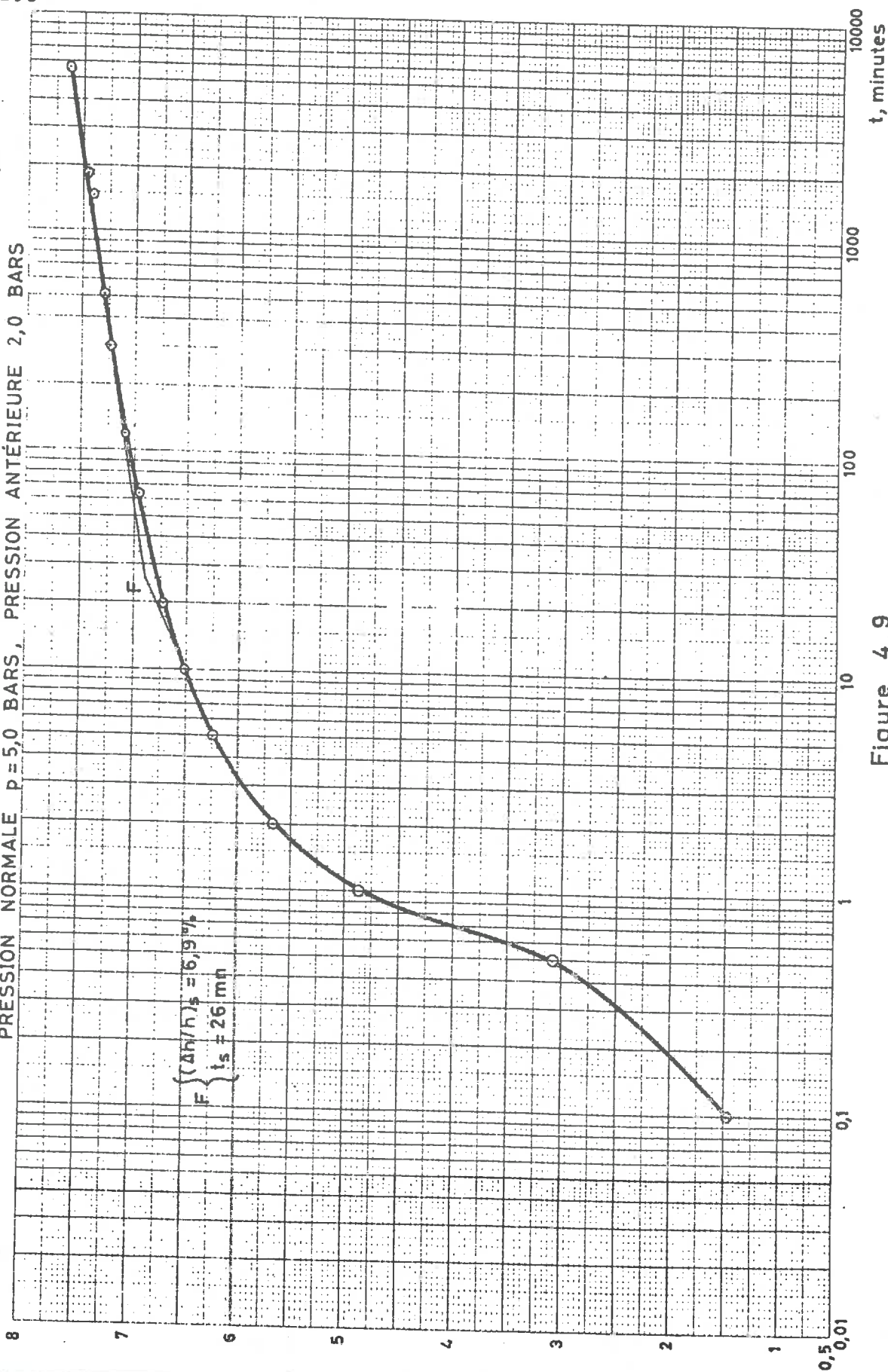


Figure 4.9

représentatifs tracés. Pour les pressions entre 0,1 bar et 5,0 bars les courbes présentent un point d'inflexion. Cf. figs. 4.4 à 4.9. Par une construction graphique, nous avons déterminé la valeur de $(\Delta h/h)_s$ correspondant à la fin du tassement primaire et au début du tassement secondaire ainsi que le temps t_s correspondant à ce $(\Delta h/h)_s$. Les valeurs de $(\Delta h/h)_s$ et de t_s pour une pression donnée sont indiquées sur les figures 4.4 à 4.9. Sur chaque figure est indiquée la pression à laquelle les tassements ont été mesurés et aussi la pression antérieure, car avec cette dernière pression on voit mieux les conditions se rapportant à chaque phase de l'expérience. Les $(\Delta h/h)_s$ varient entre 3,4 % et 7,1 % et les t_s entre 14 mn et 46 mn. Les mesures observées suggèrent que $(\Delta h/h)_s$ est d'autant plus grand que le rapport p/p_0 de la pression p à laquelle a lieu le tassement à la pression antérieure p_0 est plus important. Ainsi aux pressions $p = 0,5$ bar et 5,0 bars, pour lesquelles le rapport p/p_0 est de 2,5, on a $(\Delta h/h)_s = 7,1$ % et 6,9 % respectivement ; à la pression $p = 0,1$ bar, avec $p/p_0 = 2,2$, on a $(\Delta h/h)_s = 5,2$ % et aux autres pressions, pour lesquelles $p/p_0 = 2,0$, on a $(\Delta h/h)_s \leq 4,4$ %. Le tassement final est d'autant plus important que le rapport p/p_0 est plus grand.

Comme il a été dit au § 4.1, les variations de pression faites à la presse n'ont pu être instantanées, et pour les mises en pression ou les décharges effectuées avec cet instrument nous avons pris comme origines de temps l'instant qui correspond au milieu de l'intervalle de temps qui sépare le début et la fin de chaque variation de pression, intervalle dont la valeur maximale observée était de 3 mn 50 s. Les variations de pression étaient instantanées durant tout le premier cycle.

A partir de $p = 10,0$ bars, nous ne voyons plus de point d'inflexion sur la courbe $\Delta h/h - t$. Cf. figs. 4.10 à 4.12 relatives aux courbes correspondant à $p = 10,2$ bars et au-dessus, jusqu'à 76,5 bars. Ici encore, le tassement final croît avec le rapport p/p_0 . Cf. fig. 4.13. Sur la figure 4.13, chaque point représentatif est accompagné d'un nombre indiquant la pression p à laquelle a lieu le tassement final $(\Delta h/h)_f$. D'après cette figure, pour un même rapport p/p_0 , $\Delta h/h$ est d'autant plus important que p est plus grand. Ainsi, pour la même valeur 2,0 de p/p_0 nous avons quatre valeurs de $\Delta h/h$, variant entre 4,33 % et 5,71 % et croissant avec p .

Sur la figure 4.10 on peut voir les courbes $\Delta h/h - t$ à la pression 10,2 bars (pression antérieure 5,0 bars) correspondant au premier cycle et au deuxième cycle de chargement. L'écart entre les tassements des deux cycles augmente avec le temps. Le tassement final correspondant au 1er cycle est de 5,57 %, il est de 2,91 % pour le 2ème cycle, soit un rapport de 1,9 entre les deux tassements. Comme les hauteurs avant l'application de la charge sont différentes (7,01 mm pour le 1er cycle et 6,57 pour le 2ème cycle), les tassements absolus sont de 0,39 mm pour le 1er cycle et 0,19 mm pour le 2ème cycle, soit un rapport de 2,1.

Sur la figure 4.10 nous avons reporté l'augmentation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon lorsqu'on fait passer la pression p de 10,2 bars à 5,0 bars (1er cycle de charge). En coordonnées semi-logarithmiques la représentation est linéaire et la valeur finale est petite par rapport au tassement lors de la charge (0,54 % contre 5,57 %, et en valeur absolue 0,035 mm contre 0,49 mm). D'autre part,

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i = 70\%$

Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps :

PRESSION NORMALE $P = 10.2$ BARS, PRESSION ANTÉRIEURE 5.0 BARS (\circ 1^{er} CYCLE DE CHARGE, Δ 2^e)
 □ DÉCHARGE DE 10.2 BARS
 A 5.0 BARS DU 1^{er} CYCLE)

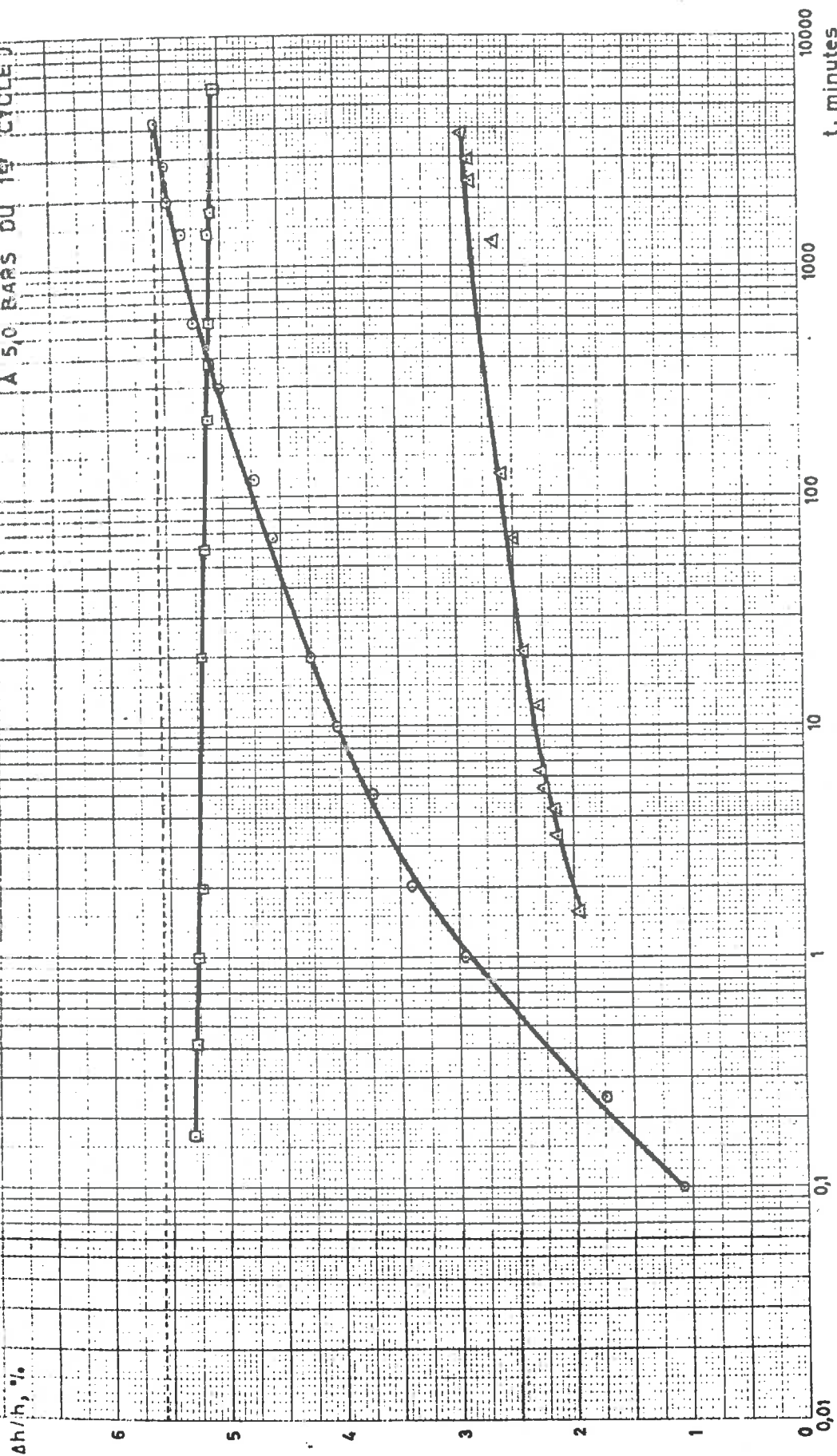


Figure 4.10

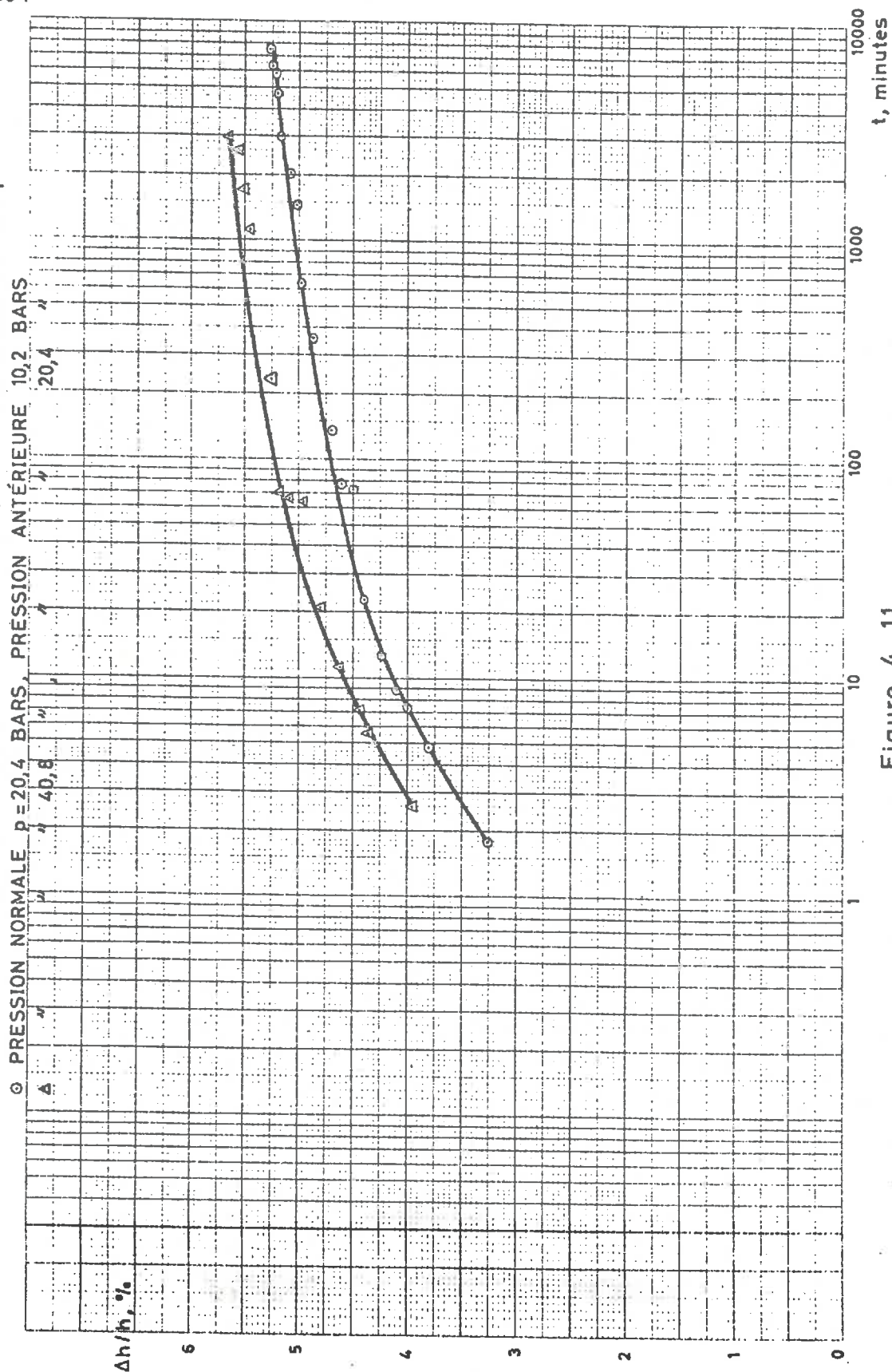
Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps t 

Figure 4.11

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i = 70\%$

Variation relative $\Delta h/h$ de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps t

° PRESSION NORMALE $P = 61,0$ BARS, PRESSION ANTÉRIEURE 40,8 BARS

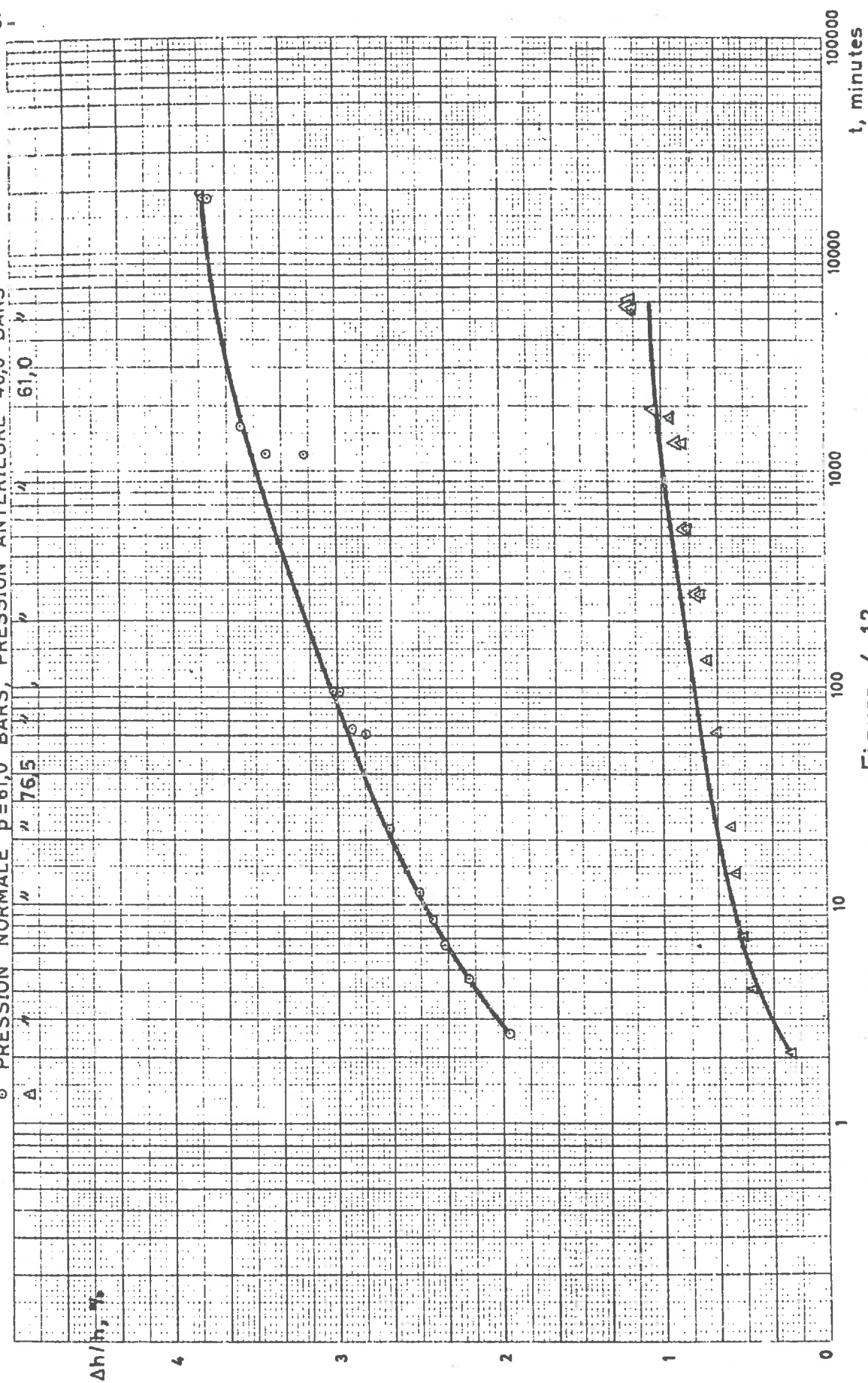


Figure 4.12

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i = 70\%$

Variation de la valeur finale $(\Delta h/h)_f$, de la variation relative de la hauteur de l'échantillon avec le rapport p/p_0 de la pression p à laquelle a lieu le tassement à la pression antérieure p_0 .

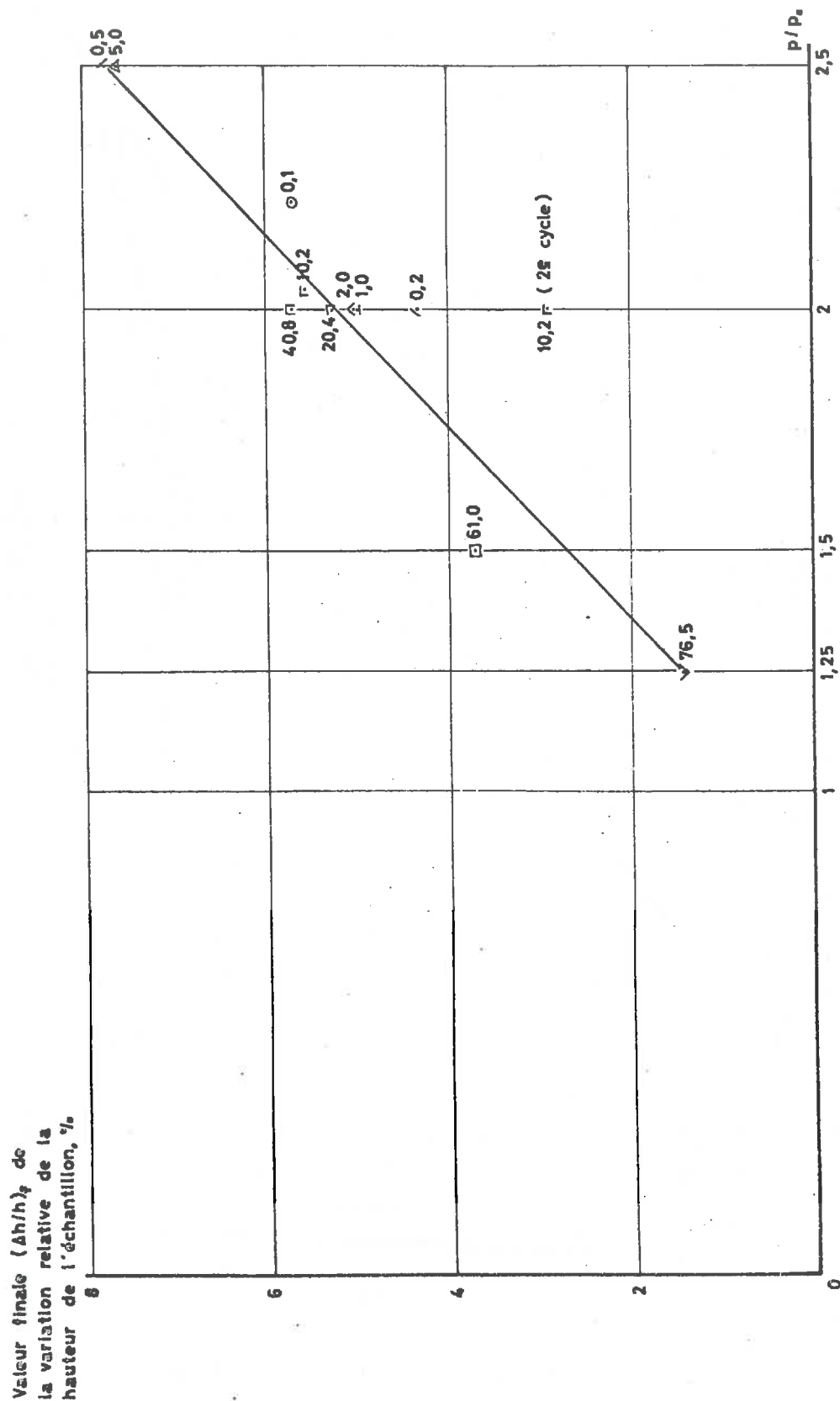


Figure 4.13

$w_i = 70\%$

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i = 70\%$
 Teneur en eau w , indice des vides e et densité sèche γ_d du matériau en
 fonction de la pression verticale p appliquée

γ_d et w, e

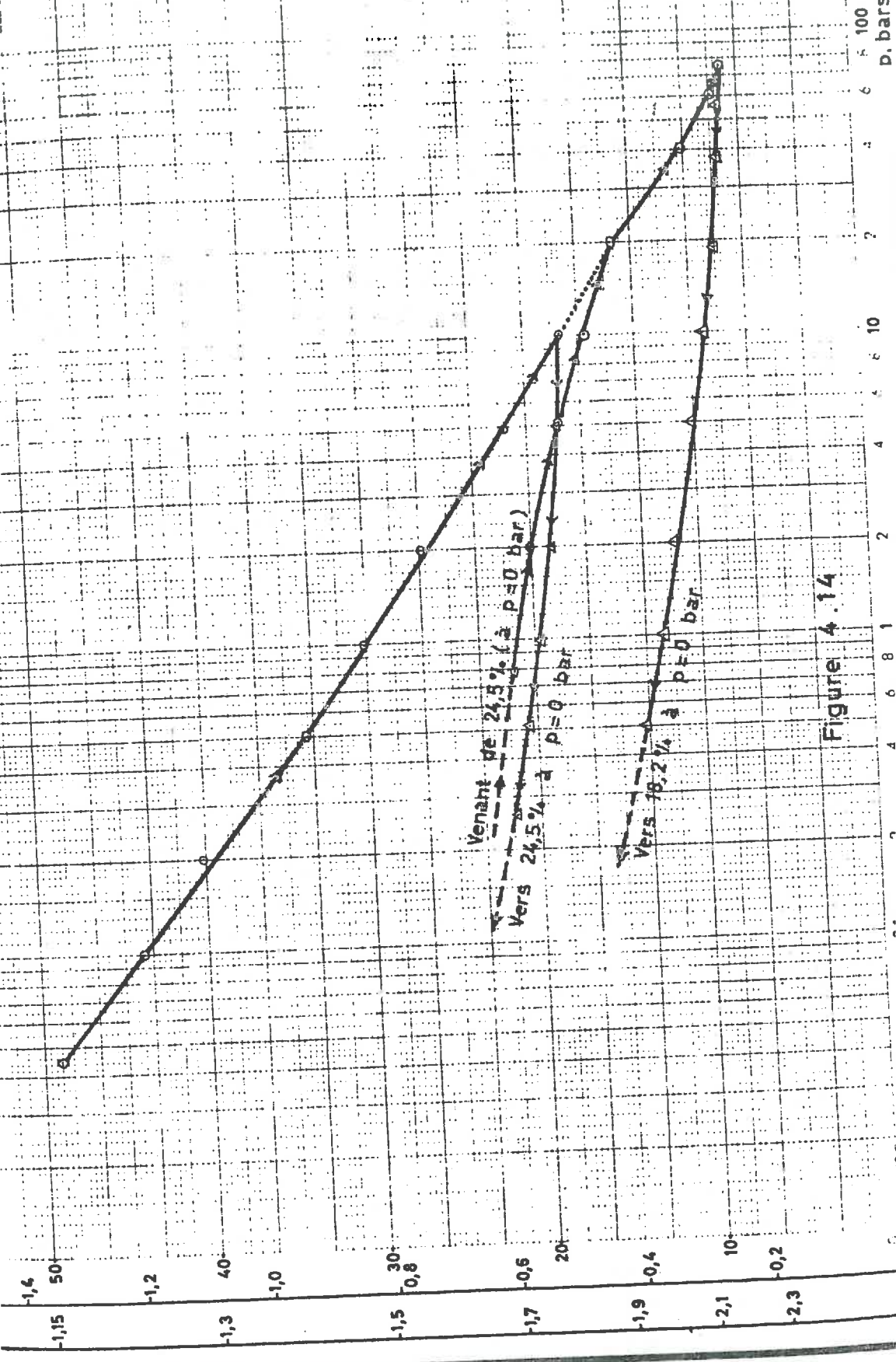


Figure 4.14

à la fin de la première minute plus de la moitié de cette augmentation de hauteur a déjà lieu, sur une valeur totale observée au bout de plus de 4 jours.

4.5. TENEUR EN EAU w .

L'échantillon a une teneur en eau initiale de 70 %. A chaque pression p appliquée nous avons déterminé la valeur correspondante de la teneur en eau w . En coordonnées semi-logarithmiques, avec p représenté sur l'échelle logarithmique, la courbe $w - p$ est à peu près linéaire. Cf. fig. 4.14. La courbe correspondant aux pressions croissantes (1er cycle + 2ème cycle) peut être représentée approximativement par l'équation

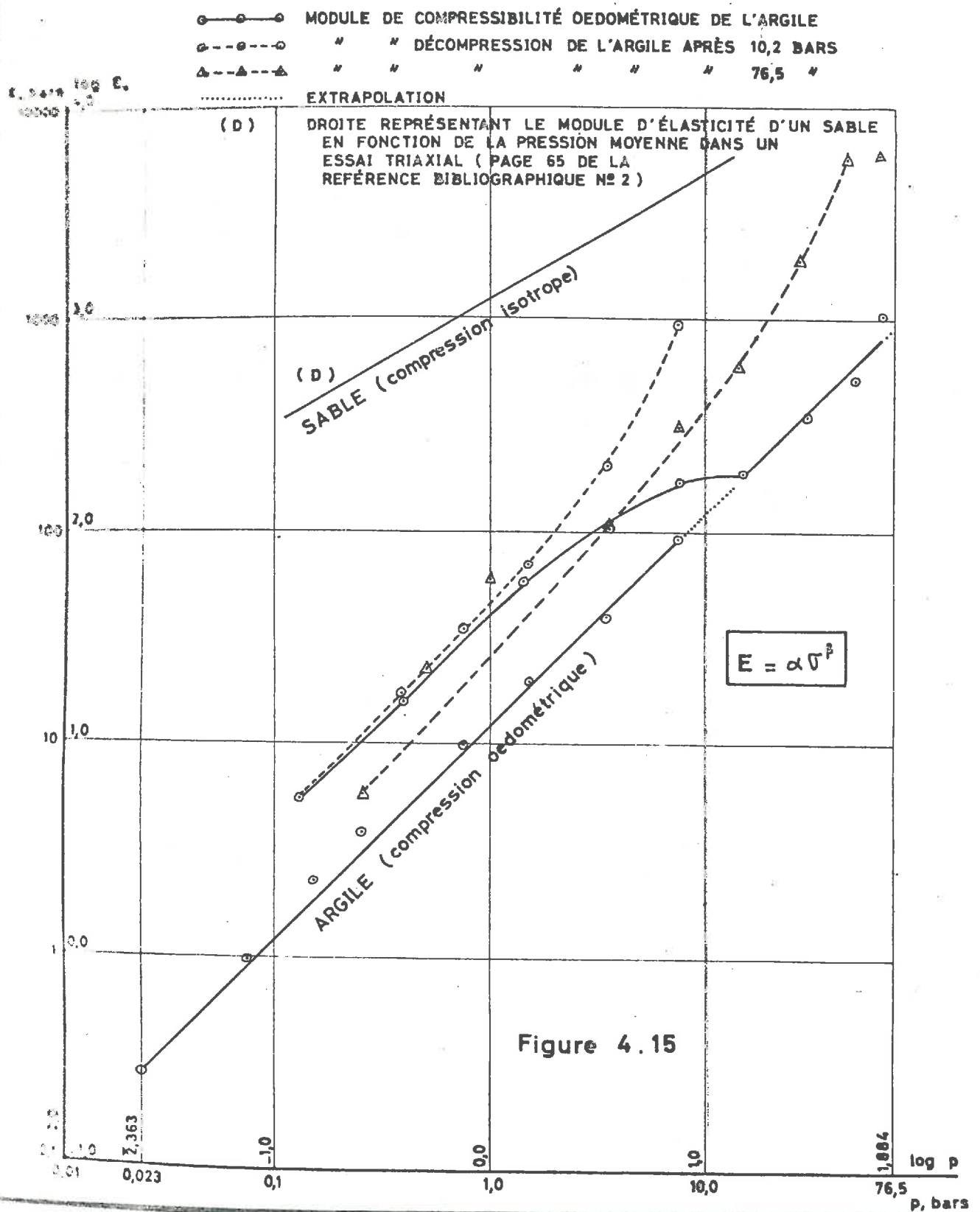
$$w = 13 \log p + 31$$

(4.2)

A la pression $p = 10,2$ bars nous avons effectué une réduction de la charge ; la courbe de retour est elle aussi presque linéaire. Sa faible concavité est orientée vers les ordonnées croissantes. Sa pente moyenne est beaucoup plus faible que celle de la branche de courbe correspondant aux pressions croissantes. Au rechargement, la courbe a une pente moyenne intermédiaire entre la branche de courbe correspondant aux pressions croissantes du 1er cycle et la courbe de déchargement ; elle présente une légère concavité vers les ordonnées décroissantes.

La courbe de chargement jusqu'à 10,2 bars et celle de rechargement à partir de 20,4 bars se présentent comme si elles étaient dans le prolongement l'une de l'autre. Sur la figure 4.14 nous avons souligné cette propriété en reliant par un trait discontinu la courbe de chargement initial et

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE = 70%.

Variation du module oedométrique E_o avec la contrainte verticale p appliquée

la partie de la courbe de rechargement à partir de $p = 20,4$ bars.

4.6. INDICE DES VIDES e ET POIDS SEC γ_d DU MATERIAU.

Sur la figure 4.14 nous avons également porté sur l'échelle des ordonnées les valeurs de l'indice des vides e et du poids sec γ_d du matériau.

Pour un matériau saturé, l'indice des vides e étant proportionnel à la teneur en eau w ,

$$e = Gw \quad (4.3)$$

avec G = poids spécifique des grains du matériau, nous avons, d'après la relation (4.2), pour le matériau étudié :

$$e = 34 \log p + 83 \quad (4.4)$$

Le poids spécifique du matériau sec étant

$$\gamma_d = \frac{1}{w + \frac{1}{G}} \quad (4.5),$$

nous déduisons de (4.2)

$$\gamma_d = \frac{1}{13 \log p + 31} \quad (4.6)$$

4.7. MODULE OEDOMETRIQUE E_o .

Des variations de la hauteur de l'échantillon sous l'effet des diverses pressions, nous avons déduit le module oedométrique E_o du matériau, en charge aussi bien qu'en décharge. La représentation graphique des résultats en coordonnées logarithmiques est donnée par la figure 4.15. On y voit le module oedométrique du matériau exprimé en fonction de la

pression p appliquée. Nous avons inscrit les résultats correspondant à deux cycles complets de charge :

p croissant jusqu'à 10,2 bars ;

décharge ;

p croissant de nouveau pour atteindre 76,5 bars ;

décharge.

En coordonnées logarithmiques la courbe $E_0 - p$ pour p croissant jusqu'à 10,2 bars est linéaire, et la partie de la courbe de rechargement à partir de 20,4 bars peut être considérée comme située sur son prolongement. La droite ainsi formée a pour équation

$$E_0 = 26 p^{0,8} \quad (4.7)$$

qui est de la forme

$$E_0 = \alpha p^\beta \quad (4.8)$$

Pour les deux cycles de charge le module de décompression est de loin supérieur au module de compression, et une grande partie des deux courbes de décharge est pratiquement parallèle à la courbe de charge.

Nous avons reporté sur la figure 4.15 une droite représentant le module isotrope d'élasticité linéaire d'un sable (compressions monoaxiales dans l'appareil triaxial, 3ème cycle de pression) (cf. page 65 de la référence 2). Nous trouvons que l'équation de cette droite est

$$E = 2227 p^{0,574} \quad (4.9)$$

L'auteur de la référence a trouvé que pour les

ARGILE DE CAILLAT. ESSAI OEDOMÉTRIQUE, TENEUR EN EAU INITIALE $w_i = 70\%$ Coefficient de perméabilité k en fonction de la pression normale p appliquée

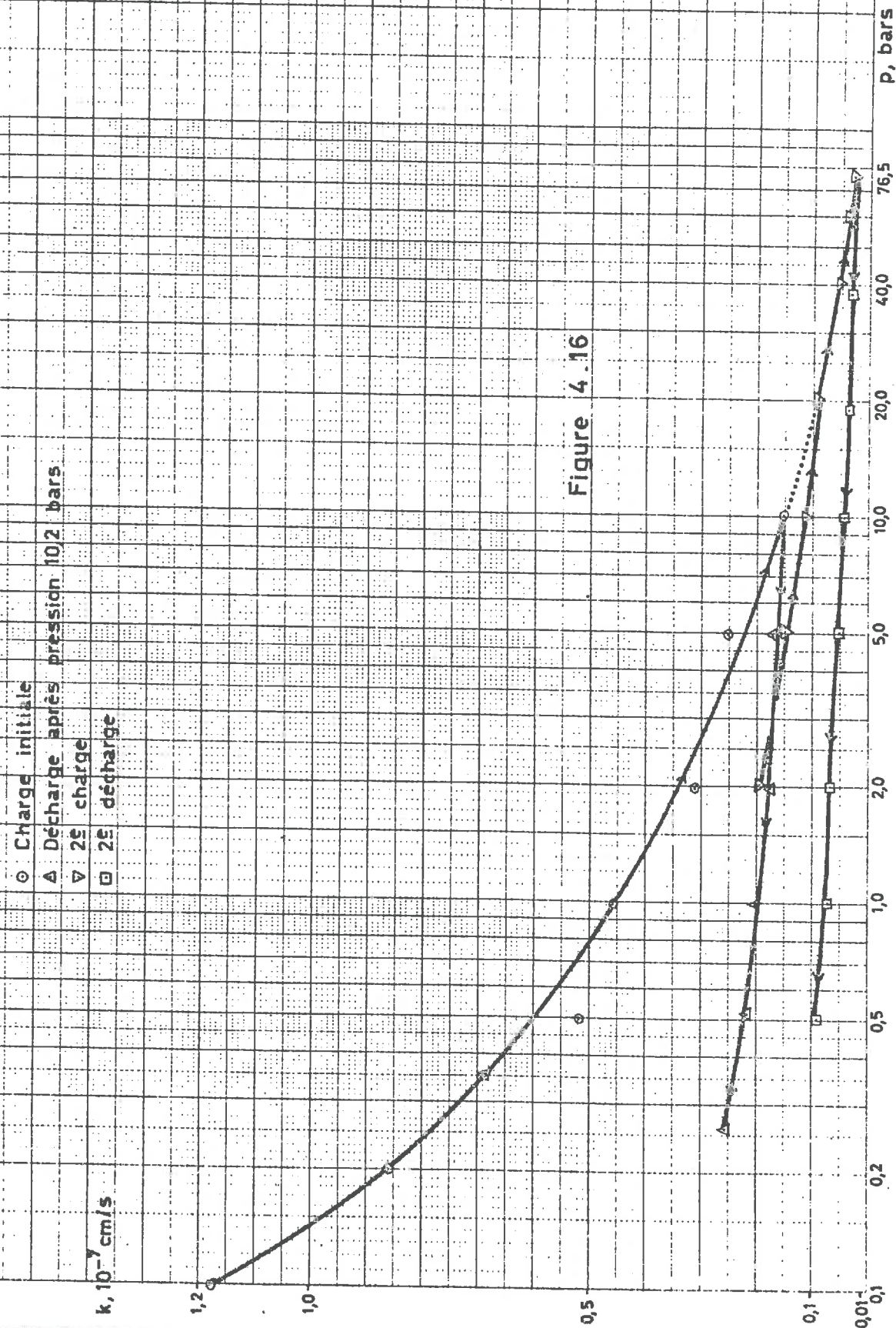


Figure 4.16

valeurs expérimentales du module d'élasticité obtenu après plusieurs cycles, l'exposant β affecté à p est compris entre 0,5 et 0,6.

4.9. AUTRES CARACTERISTIQUES DU MATERIAU DEDUITES DES MESURES DE TASSEMENT.

Les autres caractéristiques du matériau que nous avons pu déduire des mesures de tassement : le coefficient de compressibilité a_v , le coefficient de compressibilité volumétrique m_v , le coefficient de consolidation c_v , l'indice de compression C_c , sont présentées dans le tableau 4.1.

Dans ce tableau, on peut voir, outre les quatre caractéristiques sus-mentionnées et les détails des calculs permettant de les obtenir, la récapitulation des autres propriétés du matériau dont nous avons parlé précédemment ainsi que des détails se rapportant à nos essais faisant l'objet du présent chapitre.

4.9. COEFFICIENT DE PERMEABILITE k .

A la pression de consolidation de 0,1 bar le coefficient de perméabilité k de l'argile étudiée était de $1,18.10^{-7}$ cm/s. Ensuite la courbe perméabilité-pression appliquée se présente en coordonnées semi-logarithmiques comme indiqué sur la figure 4.16. A la décharge la courbure est plus faible, et la pente moyenne également. A la remise en pression, la pente moyenne se situe entre celle de la courbe de mise en charge initiale et celle de la courbe de décharge.

Au-delà de la pression 20,4 bars la courbe correspondant à la remise en charge peut être considérée comme le

Tableau 4.1. Argile de Caillat. Deux essais oedométriques
commencés le 11 Octobre 1967, terminés le 30 Janvier 1968 (durée

p, bars (1)	$\Delta h/h$, % (2)	$\Delta h_i/h_i$ (partiel), % (3)	w, % (4)	e (5)	γ_d (6)	e.-e (7)	Δp , bars (8)	a_v , cm ² /g (9)	m_v , cm ² /g (10)
0	0		69,6	1,88	0,938				
		16,3				0,56	0,045	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
0,045	16,3		49,0	1,32	1,164				
		5,71				0,13	0,055	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$
0,1	21,08		43,9	1,19	1,233				
		4,33				0,11	0,1	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$5,02 \cdot 10^{-4}$
0,2	24,5		40,1	1,08	1,3				
		7,75				0,17	0,3	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$
0,5	30,34		33,7	0,91	1,414				
		4,99				0,1	0,5	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$
1,0	33,8		30,1	0,81	1,492				
		5,03				0,09	1,0	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$4,97 \cdot 10^{-5}$
2,0	37,13		26,5	0,72	1,57				
		7,63				0,15	3,0	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$2,91 \cdot 10^{-5}$
5,0	42,0		21,2	0,57	1,72				
		5,57				0,09	5,2	$1,73 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
10,2	45,2		17,7	0,48	1,825				
		0,54				-0,01	-5,2		
5,0	45,0		18,0	0,49	1,813				
		1,48				-0,02	-3,0		
2,0	44,1		18,8	0,51	1,788				

① Valeur interpolée sur graphique k,p.

111 jours). Teneur en eau initiale commune $w_i = 70\%$.

k , cm/s (11)	C_v , $\frac{2}{\text{cm}^2/\text{s}}$ (12)	E_o , g/cm ² (13)	$\frac{p_o + \Delta p}{p_o}$ (14)	$\log \frac{p_o + \Delta p}{p_o}$ (15)	C_c (16)	Δh , mm (17)	h_j , mm (18)	Temps pour variation de pression (19)	p/p_o (20)
							11,9		
		276				1,941			
							9,959		∞
		965	2,22	0,347	0,375	0,568			
$1,18 \cdot 10^{-7}$							9,391		2,22
$9,8 \cdot 10^{-8}$ ①		2.310	2,0	0,302	0,364	0,406			
$8,61 \cdot 10^{-8}$							8,985		2,0
$6,9 \cdot 10^{-8}$ ①	$2,52 \cdot 10^{-4}$	3.870	2,5	0,399	0,426	0,697			
$5,97 \cdot 10^{-8}$ ②	$2,83 \cdot 10^{-4}$						8,288		2,5
$5,03 \cdot 10^{-8}$ ①	$4,8 \cdot 10^{-4}$	10.000	2,0	0,302	0,331	0,413			
$4,58 \cdot 10^{-8}$	$5,27 \cdot 10^{-4}$						7,875		2,0
$3,6 \cdot 10^{-8}$ ①	$7,65 \cdot 10^{-4}$	19.880	2,0	0,302	0,298	0,396			
$3,13 \cdot 10^{-8}$	$7,01 \cdot 10^{-4}$						7,479		
$2,65 \cdot 10^{-8}$ ①	$9,01 \cdot 10^{-4}$	39.400	2,5	0,399	0,376	0,471			
$2,53 \cdot 10^{-8}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$						7,008		2,5
$2,36 \cdot 10^{-8}$ ①	$1,62 \cdot 10^{-3}$	93.500	2,04	0,31	0,29	0,49			
$2,13 \cdot 10^{-8}$							6,518		2,04
$1,9 \cdot 10^{-8}$ ①		963.000				0,035			
$1,7 \cdot 10^{-8}$							6,553		0,49
$1,5 \cdot 10^{-8}$ ①		202.600				0,097			
$1,3 \cdot 10^{-8}$							6,65		0,4

② Valeur rectifiée d'après graphique k, p .

Tableau 4.1 (suite). Argile de Caillat. Deux essais oedométriques commencés le 11 Octobre 1967, terminés le 30 Janvier

p, bars (1)	$\Delta h/h$, % (2)	$\Delta h_i/h_i$ (partiel), % (3)	w, % (4)	e (5)	γ_d (6)	e, -e (7)	Δp , bars (8)	a_v , cm ² /g (9)	m_v , cm ² /g (10)
		1,43				-0,02	-1,0		
1,0	43,3		19,6	0,53	1,765				
		1,38				-0,02	-0,48		
0,52	42,5		20,5	0,55	1,743				
		1,52				-0,03	-0,26		
0,26	41,7		21,5	0,58	1,71				
		4,71				-0,08	-0,26		
0	39,0		24,5	0,66	1,627				
		4,98				0,09	0,79	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$6,87 \cdot 10^{-5}$
0,79 ^①	42,0		21,2	0,57	1,72				
		2,11				0,03	1,25	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$
2,04 ^②	43,2		20,0	0,54	1,754				
		2,87				0,05	3,06	$1,63 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$
5,1	44,8		18,0	0,49	1,813				
		2,91				0,05	5,1	$9,8 \cdot 10^{-6}$	$6,58 \cdot 10^{-6}$
10,2	46,4		16,3	0,44	1,876				
		5,27				0,08	10,2	$7,85 \cdot 10^{-6}$	$5,45 \cdot 10^{-6}$
20,4	49,2		13,3	0,36	1,986				
		5,71				0,09	20,35	$4,43 \cdot 10^{-6}$	$3,26 \cdot 10^{-6}$
40,75	52,1		10,1	0,27	2,126				
		3,72				0,05	20,25	$2,47 \cdot 10^{-6}$	$1,95 \cdot 10^{-6}$

① Sur vérin. Pression p appliquée pendant 24 heures seulement.

1968 (durée 111 jours). Teneur en eau initiale commune $w_i = 70\%$.

$k, \text{cm/s}$ (11)	$C_v, \text{cm}^2/\text{s}$ (12)	$E_o, \text{g/cm}^2$ (13)	$\frac{p_o + \Delta p}{p_o}$ (14)	$\log \frac{p_o + \Delta p}{p_o}$ (15)	C_c (16)	$\Delta h, \text{mm}$ (17)	h_j, mm (18)	Temps pour variation de pression (19)	p/p_o (20)
$1.57 \cdot 10^{-8}$		70.000				0,095			
$2.03 \cdot 10^{-8}$							6,745		0,5
$2.07 \cdot 10^{-8}$ ②		34.770				0,093			
$2.19 \cdot 10^{-8}$							6,838		0,52
$2.34 \cdot 10^{-8}$		17.100				0,104			
$2.55 \cdot 10^{-8}$							6,942		0,5
		5.520				0,327			
							7,269		0
		15.850				0,362			
							6,907		
		59.250	2,58	0,411	0,073	0,146			
$1.92 \cdot 10^{-8}$	$1,38 \cdot 10^{-3}$						6,761		2,58
$1.66 \cdot 10^{-8}$ ③	$1,59 \cdot 10^{-3}$	106.700	2,5	0,399	0,125	0,194		45s	
$1.48 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$						6,567		2,5
$1.19 \cdot 10^{-8}$ ③	$1,96 \cdot 10^{-3}$	175.000	2,0	0,302	0,166	0,191		1mn20s	
$1.14 \cdot 10^{-8}$	$1,84 \cdot 10^{-3}$						6,376		2,0
$1,0 \cdot 10^{-8}$ ③	$1,84 \cdot 10^{-3}$	193.500	2,0	0,302	0,265	0,336		2mn25s	
$0.35 \cdot 10^{-9}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$						6,04		2,0
$0.0 \cdot 10^{-9}$ ③	$2,15 \cdot 10^{-3}$	357.000	2,0	0,302	0,298	0,345		3mn50s	
$0.0 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$						5,695		2,0
$0.4 \cdot 10^{-9}$ ③	$2,26 \cdot 10^{-3}$	544.000	1,5	0,175	0,286	0,212		2mn50s	

② Sur presse à partir de ce point.

③ Valeur interpolée sur graphique k, p .

Tableau 4.1 (suite). Argile de Caillat. Deux essais oedométriques commencés le 11 Octobre 1967, terminés le 30 Janvier

p, bars (1)	$\Delta h/h$, % (2)	$\Delta h_i/h_i$ (partiel), % (3)	w, % (4)	e (5)	γ_d (6)	$e_s - e$ (7)	Δp , bars (8)	a_v , cm ² /g (9)	m_v , cm ² /g (10)
61,0	53,9		8,2	0,22	2,214				
		1,44				0,02	15,5	$1,29 \cdot 10^{-6}$	$1,06 \cdot 10^{-6}$
76,5	54,6		7,5	0,2	2,25				
		0,314				-0,01	-19,1		
57,4	54,4		7,8	0,21	2,232				
		0,332				-0,006	-19,2		
38,2	54,27		8,0	0,216	2,22				
		1,049				-0,008	-19,1		
19,1	53,81		8,3	0,224	2,206				
		1,455				-0,024	-8,9		
10,2	53,16		9,2	0,248	2,163				
		1,612				-0,022	-5,1		
5,1	52,4		10,0	0,27	2,126				
		2,82				-0,04	-3,06		
2,04	51,07		11,5	0,31	2,06				
		1,7				-0,02	-1,02		
1,02	50,24		12,2	0,33	2,03				
		2,244				-0,034	-0,51		
0,51	49,08		13,5	0,364	1,98				
		8,66				-0,127	-0,51		
0	44,69		18,2	0,491	1,812				

1968 (durée 111 jours). Teneur en eau initiale commune $w_i=70\%$.

$k, \text{cm/s}$ (11)	$C_v, \text{cm}^2/\text{s}$ (12)	$E_o, \text{g/cm}^2$ (13)	$\frac{p_o + \Delta p}{p_o}$ (14)	$\log \frac{p_o + \Delta p}{p_o}$ (15)	C_c (16)	$\Delta h, \text{mm}$ (17)	h_f, mm (18)	Temps pour variation de pression (19)	p/p_o (20)
$1,59 \cdot 10^{-9}$	$2,48 \cdot 10^{-3}$						5,483		1,5
$1,16 \cdot 10^{-9}$ ①	$3,1 \cdot 10^{-3}$	1.076.000	1,25	0,096	0,208	0,079		1mn48s	
$2,85 \cdot 10^{-9}$							5,404		1,25
$2,95 \cdot 10^{-9}$		6.077.000				0,017		2mn20s	
$3,04 \cdot 10^{-9}$							5,421		0,75
$3,23 \cdot 10^{-9}$		5.790.000				0,018		40s	
$3,41 \cdot 10^{-9}$							5,439		0,67
$3,46 \cdot 10^{-9}$		1.820.000				0,057		50s	
$3,51 \cdot 10^{-9}$							5,496		0,5
$3,92 \cdot 10^{-9}$		611.400				0,08		28s	
$4,33 \cdot 10^{-9}$							5,576		0,53
$4,68 \cdot 10^{-9}$		316.000				0,09		18s	
$5,02 \cdot 10^{-9}$							5,666		0,5
$5,77 \cdot 10^{-9}$		108.500				0,16		18s	
$6,51 \cdot 10^{-9}$							5,826		0,4
$6,75 \cdot 10^{-9}$		60.000				0,099		10s	
$6,98 \cdot 10^{-9}$							5,925		0,5
$7,96 \cdot 10^{-9}$		22.730				0,133		6s	
$8,93 \cdot 10^{-9}$							6,058		0,5
		5.900				0,524		5s	
							6,582		0

① Valeur interpolée sur graphique k, p .

prolongement normal de celle correspondant à la charge initiale. Sur la figure, nous soulignons cette propriété en reliant par un trait discontinu les deux courbes. A la décharge du 2ème cycle, la courbe est presque linéaire.

Lorsque la pression verticale p appliquée varie de 0,1 bar à 76,5 bars, le coefficient de perméabilité k passe de $1,18.10^{-7}$ cm/s à $2,85.10^{-9}$ cm/s, soit une valeur 41 fois moindre.