

TH-  
GC-19



T H E S E

Présentée  
à la Faculté des Sciences de l'Université  
de Grenoble

Pour obtenir le Grade de Docteur de Spécialités  
(Troisième Cycle de Mécanique des Solides)

par  
Jacques BELLIER  
Ingénieur des Arts et Manufactures

-----  
CONTRIBUTION A LA DEFINITION ET A L'ETUDE  
DE L'ECROUISSAGE D'UN MATERIAU COHERENT  
MODES DE RUPTURE  
APPLICATION AU PROBLEME DU COMPACTAGE DES SOLS  
-----

Soutenue le 3 Février 1968, devant la Commission d'Examen

MM. L. SANTON,                      Président  
P. ANGLES d'AURIAC,              Examineurs  
J. BIAREZ,

-----  
GRENOBLE

TH-  
GC19

26 FEV. 1976

## CHAPITRE III

### ETUDE EXPERIMENTALE

---

#### Sommaire :

---

#### Introduction.

#### III-A : Comportement d'une argile éarouie soumise à des "déformations modérées".

- 1 - Expériences, instruments et méthodes.
- 2 - Résultats et commentaires :
  - 2.a - déformabilité.
  - 2.b - limite du domaine des déformations modérées.
  - 2.C - limite du domaine des déformations réversibles.
- 3 - Conclusions partielles et critiques.

#### III-B : Comportement d'une argile soumise à de "grandes déformations".

- 1 - Instrumentation et méthode expérimentales.
- 2 - Résultats et commentaires.
  - 2.1 - Analyse expérimentale des différents comportements ; rupture fragile ou par extension ; rupture par cisaillement avec ou sans fissure ouverte ;
  - 2.2 - Analyse quantitative de l'influence des caractéristiques physiques d'un sol cohérent sur son comportement sous grandes déformations, à contrainte latérale constante.
- 3 - Conclusions partielles, critiques, réserves et perspectives pour des recherches futures.
- 4 - Essais complémentaires.

III-C : Degré d'irréversibilité des déformations imposées à une argile par l'application de charges oedométriques progressivement croissantes.

- 1 - Introduction.
  - 2 - Appareillage et mode opératoire.
  - 3 - Résultats et commentaires.
  - 4 - Critiques, conclusions et perspectives.
- 
-

## INTRODUCTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE

---

Les expériences réalisées au laboratoire avaient pour but lointain d'apporter quelques éléments de réponse au problème pratique qui a donné son thème au rapport et qui sera repris plus particulièrement au chapitre suivant. Selon l'intention émise en début d'exposé, il a paru intéressant de donner à cette étude un champ plus vaste et d'examiner de manière générale (dans les limites de l'expérience) l'effet d'un écrouissage imposé à un sol cohérent sur ses propriétés mécaniques. L'écrouissage est imposé au sol par un compactage variable : il se traduit par les valeurs que prennent alors certaines caractéristiques physiques telles que le degré de saturation, la densité sèche et éventuellement la structure (degré de dispersion ou de floculation). Le comportement mécanique auquel on s'intéresse, relève aussi bien du domaine des "déformations modérées" que de celui des "grandes déformations"; il s'exprime dans le premier cas par des grandeurs telles que la déformabilité, le degré d'irréversibilité des déformations, la limite du domaine réversible, les coefficients du fluage éventuel; dans le second cas, par un seuil de rupture ou d'écoulement plastique et par un schéma de comportement dans les mêmes conditions.

On essaiera de préciser tout au long du rapport, ce que le procédé expérimental peut avoir de spécifique, et dans quelles limites une "généralisation partielle" des résultats acquis peut être favorablement admise.

---

### III - A COMORTEMENT D'UNE ARGILE ECROUE, SOUS DEFORMATIONS MODEREES (EXPERIM.)

#### 1 - Expériences : Instrumentation et méthodes :

Le matériau cohérent utilisé pour les expériences provient de la région de Saint Georges de Commiers. C'est une argile silteuse moyennement plastique, dont les caractéristiques physiques (limites d'Atterberg, indice de plasticité, granulométrie) et les courbes "Proctor" sont données en annexe (référence III-A-1). Dans un premier stade, pour être suffisamment nombreux et susceptibles de produire quelque enseignement, les essais ont été limités à des procédés élémentaires : appareils triaxiaux, essais "non drainés", rapides même si on admet que la perméabilité de l'argile est environ de  $10^{-7}$  cm/s.

Une première série d'essais a été réalisée de la manière suivante : le sol, pris à différentes teneurs en eau, est compacté dans un moule Proctor de 101,6 mm de diamètre, à l'énergie "P. modifiée" soit  $275 \text{ tm/m}^3$  par la chute répétée d'une "dame" de 2,5 kg tombant d'une hauteur de 30,5 cm. Trois échantillons sont alors prélevés au moyen de tubes à trousseaux coupantes de 36 mm de diamètre. Retaillés à une hauteur de 70 mm, ils sont ensuite placés dans une cellule triaxiale, leur base et leur tête y étant maintenues par l'intermédiaire de deux rondelles métalliques.

- Pour les sols compactés à des teneurs en eau de 10 et 18 %, ces rondelles sont lisses et graissées. Les extrémités de l'échantillon sont donc théoriquement libres de se déplacer latéralement. En fait l'action de l'enveloppe plastique, jointe aux irrégularités de la lubrification appliquée, restreignent sans doute cette liberté de manière appréciable.

- Pour les sols compactés à 14,5 % de teneur en eau, les disques d'extrémités maintiennent l'échantillon centré au moyen d'aiguilles creuses de faible hauteur. Ceci afin de corriger le défaut d'assise observé dans le cas précédent et de maintenir les directions du champ des contraintes à l'intérieur de l'échantillon aussi constantes que possible.

On constate en effet, surtout lorsque le sol est très humide, que celui-ci se déforme beaucoup et que, lorsque sa tête et sa base glissent sur des extrémités lisses, son axe a tendance à s'incliner, ce qui rend problématique tout calcul de contraintes (cf. par exemple l'échantillon marqué P.M./w = 18 %,  $C_p = 0,01$  bar).

Des essais comparatifs montreront ultérieurement les différences de comportement que présentent les échantillons selon la forme des têtes employées (cf. annexe).

Le circuit de mesure des pressions interstitielles avait été monté pour les premiers essais. Mais ceux-ci se sont avérés trop rapides pour qu'on puisse tirer un enseignement quelconque des résultats obtenus : la vitesse d'écrasement était de 1 mm/mn, alors qu'un calcul approximatif montre qu'étant donné la perméabilité de l'argile et pour que la répartition des pressions interstitielles dans l'éprouvette soit homogène, il aurait fallu que cette vitesse ne dépasse pas 5 à 10  $\mu$  /mn (même ordre de grandeur pour qu'un essai puisse être considéré comme drainé). Il conviendra donc de se rappeler que les essais ne couvrent qu'un domaine limité du champ expérimental : celui des essais rapides, non drainés.

Les échantillons ainsi préparés sont donc soumis, dans la cellule triaxiale, à une certaine contrainte latérale (d'abord hydrostatique) puis à une déformation axiale à vitesse constante (1 mm/mn). Cette déformation est relevée régulièrement ainsi que la valeur du déviateur de contraintes qui lui correspond.

L'inconvénient de la manipulation qu'on vient de décrire rapidement, réside essentiellement dans le mode de prélèvement des échantillons. Ce prélèvement se faisant d'autant plus difficilement que le sol est sec et le compactage intense, les éprouvettes sont notablement modifiées par l'effort de pénétration appliqué aux tubes et leur extraction se fait rarement de manière convenable (cassures, déformations importantes sur les bords, etc...).

Une deuxième série d'essais, plus importante que la première, a donc été réalisée en faisant appel à un mode opératoire légèrement différent : les échantillons sont préparés directement dans un moule à leurs dimensions futures (90 mm x  $\phi$  36,2 mm), ce qui réduit au minimum les manipulations ultérieures. Le compactage se fait par chûtes répétées d'une "dame" de 1 kg tombant d'une hauteur de 15 cm. Inconvénient de la méthode : le compactage est évidemment moins homogène que dans le cas précédent et les parois ont vraisemblablement une influence prépondérante. Mais au moins peut-on manipuler les échantillons et les soumettre plus facilement aux essais.

La suite s'effectue comme précédemment : essais triaxiaux dans la cellule de 100 mm de diamètre, "non consolidés", "non drainés" ; vitesse d'écrasement, 1 mm/mn. Les têtes sont du troisième



type (cf. schéma en annexe III-A-1), conçus de telle sorte qu'un léger débatement latéral soit possible. Les contraintes appliquées sont relevées en fonction des déformations imposées.

L'argile que l'on a soumise aux essais était compactée aux quatre énergies suivantes :

36  $\text{tm/m}^3$  (6 couches x 4 coups, pour 92,6  $\text{cm}^3$ )

60  $\text{tm/m}^3$  (8 couches x 5 coups, pour 92,6  $\text{cm}^3$ )

270  $\text{tm/m}^3$  (9 couches x 20 " " )

600  $\text{tm/m}^3$  (20 " x 40 " " )

et aux teneurs en eau de

7.2 %, 12.4 %, 16.2 %, 19 % et 24,1 %.

Le compactage se faisant toujours de la même manière, par impacts, la structure du matériau n'était plus fonction que de la teneur en eau, et on n'a pu la faire varier indépendamment de celle-ci. Son influence ne transparaît donc que dans celle, analysée de manière globale, de cette teneur en eau qui formera avec la densité sèche du sol, les paramètres physiques de son état initial.

## 2 - Résultats et commentaires :

A l'état brut, les résultats de ces manipulations se traduisent par des courbes représentatives du comportement de l'argile sous un système de contraintes triaxiales, en fonction de sa densité sèche et de sa teneur en eau initiales ou de l'énergie du compactage qu'on lui a appliqué et de son degré de saturation, en fonction donc de son écoulement préalable.

Tout concourt à donner à ces essais mécaniques une valeur singulière (au sens mathématique du terme) qu'on ne peut étendre, à priori, à d'autres domaines de sollicitations. On admettra pourtant dans une première étape, que ces essais limités peuvent fournir des critères provisoires susceptibles de représenter les qualités mécaniques de l'argile. Relative pour le moment au seul domaine des déformations non déformées, l'étude s'intéressera plus particulièrement à trois d'entre elles :

- La déformabilité (ou inversement la rigidité).

Cf. Chapitre des définitions. Elle peut se traduire par un module "élastique" propre aux sollicitations choisies, si effectivement dans un domaine voisin de l'origine les déformations (axiales dans le cas présent) sont linéaires, et réversibles quand les contraintes s'annulent ; le module est alors la pente du segment de courbe rectiligne issu de l'origine. Dans le cas contraire on peut adopter pour définir la déformabilité, l'inverse de la pente de la tangente à l'origine à la courbe de comportement, ce qui revient à supposer que l'élasticité linéaire est réduite à un domaine infiniment petit autour de l'origine. On peut aussi, de manière plus arbitraire mais moins sensible aux fluctuations et imprécisions expérimentales, décider que la rigidité du matériau (inverse de cette déformabilité) s'exprimera par la valeur du rapport  $\sigma_1^1 / \sigma_2 / \epsilon = 5\%$  (certains auteurs prennent  $M_{50} = 1/2 (\sigma_{max}^1 - \sigma_e) / \epsilon$  correspondant),  $\sigma_1^1$  étant la contrainte principale majeure qui impose au sol une déformation axiale de 5 %. Ce dernier choix présente quelque inconvénient, notamment lorsque la valeur de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  maximum se situe en deçà de ces 5 % de déformation axiale, mais ce n'est le cas d'aucun des essais réalisés. Afin de faciliter les comparaisons que l'on pourra faire avec certains ouvrages (notamment Seed), on adoptera donc pour définition de la déformabilité (D), ou plutôt pour définition de la rigidité ( $R = 1/D$ ) la pente moyenne de la courbe " $(\sigma_1 - \sigma_2)$  = déformation axiale" entre 0 et 5 % de déformation. ( $M_{50}$  n'en diffère que de quelques pour cent). Cette définition n'est utilisable que si on précise bien l'état de contraintes considéré.

- La limite du domaine des déformations modérées (Idm) au seuil des grandes déformations. Sa définition est donnée au premier chapitre. Pratiquement, son utilité est d'exprimer de manière conventionnelle mais plus précise, cette qualité mécanique de l'argile qui est couramment et très vaguement désignée par le terme de résistance mécanique. On a vu qu'elle était représentée par la valeur maximale de la contrainte axiale qu'il faut imposer à l'échantillon pour lui faire subir un écrasement de 20 %, sous étreinte latérale constante. On a vu aussi qu'on pouvait aussi traduire cette limite dans l'espace des déformations ; mais il se trouve que cette représentation est beaucoup plus sensible que la précédente aux incertitudes expérimentales et à l'imprécision de certaines mesures, ainsi qu'on pourra le constater sur les graphiques correspondants en annexe.

- La limite du domaine des déformations réversibles (Idr). Une nouvelle référence au chapitre des définitions montre que l'intérêt de cette notion réside en sa corrélation fréquente avec la limite du domaine écroui, qu'il importe de connaître d'une manière ou d'une autre, si on veut prévoir au mieux les qualités et le comportement du sol soumis aux états de contraintes futures. Idr, comme Idm, peut être exprimée autant en déformation qu'en contrain-



tes, et les deux modes de représentation sont cette fois à peu près équivalents ; seul l'usage qu'on veut en faire peut finalement les départager.

Certaines autres propriétés mécaniques de l'argile dans le domaine des déformations modérées, ont été momentanément laissées de côté pour des raisons diverses :

- pour étudier le fluage et déterminer ses coefficients, les expériences manquaient... On a donc fait l'hypothèse qu'étant donné la faible plasticité du matériau argillo-silteux, l'aspect visco-élastique de son comportement était négligeable dans les conditions d'écrasement auxquelles il était soumis (!).
- le degré d'irréversibilité des déformations (important pour les routes, chaussées et pistes) pour être analysé, nécessitait un autre type d'essai. Les expériences correspondantes ont donc été réalisées indépendamment de celles-ci, sur un matériau différent du précédent d'ailleurs, et leurs résultats seront exposés brièvement en III-C.

Les résultats directs des mesures effectuées au cours des essais triaxiaux, et l'exploitation ultérieure qui en a été faite, sont rassemblés en annexe :

Une première série de courbes " $\sigma_1 - \epsilon_1$ ", paramétrées en  $\sigma_2$ , traduit les variations du comportement mécanique du matériau en fonction de sa teneur en eau et de la densité sèche que lui a donnée le compactage (témoin de son écrouissage), ou de l'intensité de celui-ci et du degré de saturation. cf. III-A-2.

Une deuxième série de courbes (III-A-2-a, b et c) tracées selon les définitions qu'on vient d'en donner, représente les variations des trois variables mécaniques ci-dessus, en fonction des mêmes paramètres. Les graphiques ont été relevés pour deux valeurs de la contrainte latérale :  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,2$  et 5 bars.

On pourrait en faire autant pour d'autres valeurs, par simple lecture de la première série de courbes, mais les points intéressants seraient sans doute moins nombreux. On notera cependant l'utilisation de ce troisième paramètre,  $\sigma_2$ , qui représentant à lui seul l'état de contraintes "biaxial" (ou cylindrique) auquel est soumis l'échantillon, vient compléter ses caractéristiques d'écrouissage ( $\gamma_d$  et  $w\%$  ou  $\sigma_r\%$ ) pour le "paramétrage" correct du problème.

D'autres graphiques ont été tracés en complément de ces deux séries de courbes. On en verra la justification et la

commentaire en cours d'exposé.

Certaines constatations peuvent être dégagées des résultats de ces essais. Résumons-en l'essentiel, relatif notamment aux propriétés mécaniques des échantillons :

2-a - La déformabilité. Les courbes (III-A-2 a) représentent plus souvent son inverse, la rigidité, qui a la dimension d'un module élastique, au sens où on l'entend en résistance des matériaux.

- A égale énergie de compactage courus à égale densité sèche, la déformabilité du matériau croît avec la teneur en eau.

- A égale teneur en eau, la rigidité croît en général avec l'énergie de compactage. Dans certains cas elle admet cependant un maximum après lequel elle décroît.

- Il en est de même pour les variations de la rigidité en fonction de  $\gamma_d$ , à égale teneur en eau.

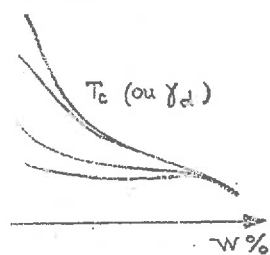
- Cet extrémum, maximum pour la rigidité, minimum pour la déformabilité, disparaît et la monotonie des variations de ces deux fonctions est établie quand la variable et le paramètre sont  $\gamma_d$  et  $S_r$  %. On notera d'ailleurs que ces deux grandeurs expriment mieux l'état d'un échantillon écorché que  $T_c$  et  $w$  % auxquelles elles sont liées, mais qu'il serait plus juste de qualifier de paramètres de chantier. Les résultats dont on dispose conduisent donc à la conclusion suivante :

à degré de saturation constant, la déformabilité d'un sol varie en raison inverse de sa densité sèche. Dans le domaine des expériences, si celle-ci est maintenue constante, la déformabilité croît avec le degré de saturation.

- Tout ceci ne s'applique qu'à la condition  $\sigma_l =$  constante (0,2 ou 5 bars). Tous les autres paramètres étant fixés, il semble que la déformabilité telle qu'elle est définie croît lorsque  $\sigma_l$  décroît. Il apparaît cependant que rigidité ou déformabilité ne dépendent plus de la valeur que l'on donne à cette contrainte latérale, lorsqu'on étudie leurs variations en fonction de la densité sèche à saturation (dans le domaine de sollicitations analysé).

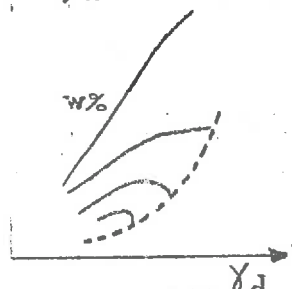
On peut remarquer qu'on obtiendrait les mêmes résultats qualitatifs, en donnant à la déformabilité les différentes définitions qu'on a relevées quelques pages plus haut.

$R = 1/D$



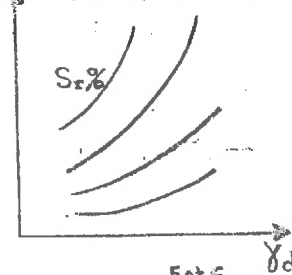
III-A.2a) 1,2 et 9

$R = 1/D$

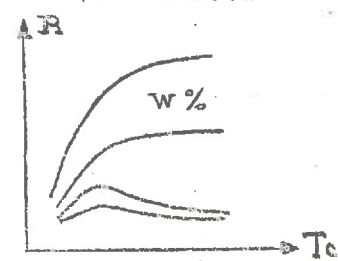


III-A.2a) 3 et 4

$R = 1/D$



(III-A.2a) 5 et 6



(III-A.2a) 7

2 b - La limite du domaine des déformations modérées (Ldm) ou seuil de grandes déformations. On se reportera aux courbes III-A-2 b, en vertu desquelles il semble que l'on puisse énoncer les propositions suivantes

en règle générale,

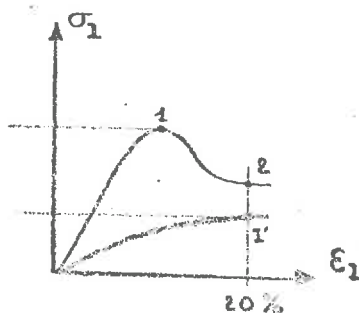
- à  $w\%$  constante, le domaine des déformations modérées s'accroît (la valeur de Ldm augmente) quand la densité sèche croît, jusqu'à une limite imposée par la saturation. Ce qui peut aussi se traduire sous une forme plus simple : à saturation constante, ce domaine s'accroît avec la densité sèche de l'échantillon.

- à  $\gamma_d$  constante, il semble que la limite du domaine en question est fonction inverse du degré de saturation (faute d'un nombre de points assez grand, les courbes ont été tracées en segments de droite adjacents par méconnaissance de leur allure véritable). Ce qui n'entraîne pas nécessairement qu'elle soit toujours fonction inverse de la teneur en eau. Aux faibles valeurs de  $\gamma_d$ , Ldm reste à peu près constante.

- si on considère maintenant les "variables de chantier",  $T_c$  et  $T_c$ , on constate qu'à teneur en eau constante, Ldm croît avec  $T_c$  jusqu'au palier défini par la saturation. Cette croissance n'est cependant pas régulière et on pourrait définir grâce aux courbes expérimentales une énergie de compactage optimale (pour cet aspect du comportement du sol) au delà de laquelle l'accroissement de Ldm est faible pour de forts accroissements de  $T_c$ .

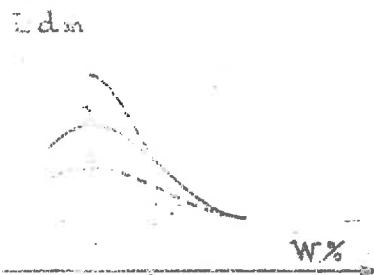
- à énergie de compactage,  $T_c$ , constante, Ldm décroît en général quand  $w\%$  croît ; mais il se peut qu'un maximum puisse apparaître néanmoins vers les faibles teneurs en eau, et plus précisément aux environs de "l'optimum Proctor".

Ldm étant définie en  $\sigma_1$  (contrainte axiale principale majeure), on peut s'interroger sur l'influence qu'a sur elle la contrainte latérale  $\sigma_2$ . Il semble, comme on pouvait le prévoir, que Ldm croît avec  $\sigma_2$ . On précisera ce point un peu plus loin, en traçant les "courbes intrinsèques"  $\sigma_1 = \sigma_2$ .



Remarques : Tracées en déformations ( $\epsilon_1$ ), la limite du domaine présente, en fonction des variables  $\gamma_d$  et  $w\%$ , des variations assez peu cohérentes. Ceci est dû au fait que la précision sur le sommet de la courbe (ou le début du palier) est beaucoup plus importante en déformation qu'en contrainte. Les courbes de comportement présentent d'autre part deux formes possibles : avec ou sans maximum. Pour les premières, d'après la définition donnée, Ldm est l'ordonnée du sommet (point 1). Pour les secondes, Ldm est la valeur de  $\sigma_1$  pour  $\epsilon_1 = 20\%$  (point 1'). A titre de curiosité et pour palier





en partie l'hétérogénéité de la définition ( $L_{dm}$  ne correspond pas au même état physique, bien qu'elle représente dans les deux cas la valeur qui intéresse l'utilisateur), on a représenté sur certains graphiques, lorsque les courbes de comportement étaient de la première catégorie, le lieu des points (2) représentant  $\sigma_1$  pour  $\epsilon_1 = 20\%$ . Pour les courbes du deuxième type 1 et 2 sont confondus en 1'. On notera enfin que si  $L_{dm}$  croît avec  $\gamma_d$  ou  $\sigma_d$  (à saturation constante), cette croissance ne préjuge en rien du mode de comportement de l'échantillon dans le domaine des grandes déformations, rupture ou écoulement plastique, que l'on prendra en considération dans le paragraphe suivant (III-B).

2 c - la limite du domaine des déformations réversibles ( $L_{dr}$ ) : à titre indicatif seulement vu les réserves qu'on a pu faire antérieurement sur la définition de  $L_{dr}$  et les données dont on dispose, on notera qu'en fonction des mêmes paramètres,  $w\%$  et  $T_c$  ou  $Sr\%$  et  $\gamma_d$ ,  $L_{dr}$  varie globalement comme  $L_{dm}$  et  $1/D = R$ , cf courbes III-A-23. Cette similitude de variations de ces trois grandeurs mécaniques est d'ailleurs intéressante et bénéfique puisqu'on leur demandera le plus souvent d'avoir simultanément des valeurs maximales. Exprimée en déformations ( $L_{dr\epsilon}$ ), la limite prend des valeurs dont il est difficile de dégager la tendance. On constate cependant que  $L_{dr\epsilon}$  reste dans le voisinage de 1 % et ne dépasse jamais 2 % ; On se servira de cela au moment des applications, chapitre IV.

Il convient de préciser qu'étant donné la définition adoptée et l'imprécision de certains points des courbes expérimentales,  $L_{dr}$  n'est guère déterminée à mieux de 10 ou 15 % près. Il a semblé néanmoins justifié de lui donner sa place ici, comme à toutes les qualités qu'on pouvait être amené techniquement à demander au sol.

### 3 - Conclusions partielles et critiques, points restant à préciser :

Il a semblé superflu de décrire en détails la forme des courbes obtenues. Pour analyser l'une ou l'autre d'entre elles de manière approfondie, il sera plus judicieux de s'y reporter directement, s'en trop s'attacher au texte. Celui-ci n'a pour but que de proposer une synthèse dont on puisse se servir rapidement, notamment en vue du chapitre suivant. C'est donc par lecture directe des courbes qu'on pourra voir que  $L_{dm}$  décroît quand  $w\%$  croît, d'autant plus rapide-

ment avant saturation que le compactage a été intense ; que cette limite reste à peu près constante pour les faibles contraintes latérales et les compactages réduits ; que, pour les faibles densités, ldm ne croît pratiquement pas avec la saturation ; etc... Autant de remarques dont l'importance est précisément fonction du cas dont on s'occupe, et qu'il vaut donc mieux, au stade des généralités, laisser en forme de courbes.

Il serait utile de préciser maintenant les limites de cette étude expérimentale :

- Son ampleur d'abord : l'analyse ne porte que sur une argile, de caractéristiques physiques bien précises. Son compactage ne varie qu'en intensité, le mode d'action de l'instrument restant toujours le même (impacts). La structure est donc déterminée par la teneur en eau et le travail appliqué au sol ; elle ne peut varier indépendamment d'elle. Les contraintes de compactage qui imposent au sol son écrasement ont d'autre part toujours la même forme ; leurs répartition, orientations, intensités ne peuvent être modifiées et sont bien "adaptées" aux sollicitations qu'on imposera ultérieurement à l'échantillon au cours de l'essai triaxial. Ce type d'essai soumet d'ailleurs le matériau à un champ de contraintes bien particulier : cylindrique, à étreinte latérale (principale mineure) constante et contrainte principale majeure parallèle à l'axe, il ne permet qu'un écrasement axial, en compression dans toutes les directions et à vitesse donnée. On ne peut donc explorer dans l'espace des contraintes, que le quart de plan  $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_l > 0$  et  $\sigma_1 > 0$ , au dépens des états véritablement triaxiaux ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) et des champs de compressions-traction ( $\sigma_1 > \sigma_2 > 0$  et  $\sigma_3 < 0$ ). L'échantillon enfin avait une géométrie bien précise, son mode de fixation était toujours le même (têtes, capots) et son écrasement se faisait aussi toujours à la même vitesse ; l'importance des conditions aux limites et celle de la visco-élasticité du matériau conduisent à penser qu'avec d'autres dimensions et sous d'autres conditions cinématiques, on aurait obtenu des résultats légèrement différents (cf. bibliographie de Whikman, Sred et Chen).

- A ces limites imposées au domaine expérimental, doivent s'ajouter d'autres restrictions, relatives aux erreurs ou incertitudes inhérentes à la manipulation, aux calculs et à l'exploitation qui en a faite : on ne saurait nier ainsi que le compactage ne donnait pas toujours une homogénéité parfaite aux échantillons. Parallèlement à l'anisotropie de son action, il faut remarquer que les liaisons entre couches laissaient parfois à désirer, malgré toutes les précautions (suffisamment notament) qu'on pouvait prendre. L'effet s'en est fait sentir surtout aux fortes densités. Lorsque le compactage était peu intense, en revanche, l'argile avait tendance à se mettre en grumeaux, d'autant plus gros que l'humidité était élevée, et les propriétés mécaniques du sol sous déformations modérées s'en ressentaient probablement. Sur le po-



des contraintes, les pressions interstitielles n'ayant pu être mesurées (essais rapides, échantillons de faible taille), on ne dispose que de leurs valeurs totales. Le champ des contraintes à l'intérieur de l'échantillon est d'ailleurs incertain. On a admis que les directions principales restaient parallèle et perpendiculaires à la déformation imposée, dite "axiale" ; que  $\sigma_2 = \sigma_3$  restaient constamment égales à  $\sigma_2$ , la pression hydrostatique imposée latéralement ; que  $\sigma_1 = F$  (mesurée au dynamomètre), la section de l'échantillon, étant évaluée  $s$  corrigée approximativement en prêtant à celui-ci un type de déformation régulier (en "tonneau" ou en "cylindre"). L'échantillon ne se déformant pas toujours de manière symétrique et parallèlement à lui-même, son homogénéité laissant parfois à désirer, il est probable que le champ de contraintes est très hétérogène à partir d'un certain niveau de déformation, et que les hypothèses précédentes ne valent que dans un domaine proche de l'origine. Au delà, on considérera que les résultats proposés ne sont que des estimations, des valeurs moyennes des véritables contraintes régnant en fait dans l'éprouvette.

Des expériences complémentaires ont été faites pour juger de l'influence de certains paramètres (têtes, membranes, hauteur de l'échantillon) sur le comportement du matériau. Les résultats en sont réunis en annexe, référence III-A-3.

La réalisation de cent vingt essais prend du temps, même quand ces essais ne couvrent qu'un champ restreint du domaine expérimental. Quand on veut faire varier simultanément trois paramètres, cela ne suffit pourtant pas pour déterminer plus de trois ou quatre points par courbe. Leur tracé ne sera donc mené le plus souvent qu'avec prudence et il se peut très bien que les lois qualitatives que l'on a énoncées ne se trouvent plus vérifiées à l'extérieur du domaine exploré.

Toutes ces remarques (et celles qu'on a pu oublier) viennent évidemment restreindre la portée des résultats proposés, auxquels on ne saurait en aucun cas attacher une valeur absolue. Ils n'en conservent pas moins un rôle pour le domaine des déformations modérées, où ils viennent compléter d'une certaine manière les rapports de Seed et Chan (cf. bibliographie) sur le comportement des argiles, en en proposant notamment un éclairage nouveau. L'énumération des insuffisances avouées ci-dessus pourrait être l'annonce d'un nouveau programme de manipulations qui viendraient mieux étayer les propositions auxquelles on aboutit, et souligner plus nettement l'influence de l'écroutissage sur les propriétés mécaniques d'un sol cohérent.

Les déformations "modérées" précédant inévitablement les "grandes" déformations, on ne pouvait manquer de s'arrêter un instant aux premières, avant d'entrer dans le domaine des secondes !.

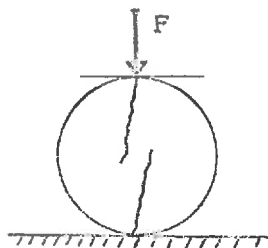
III-B COMPOURTEMENT D'UNE ARGILE SOUMISE  
A DE GRANDES DEFORMATIONS  
RUPTURES, ECOULEMENT PLASTIQUE  
(OU DEFORMATION CONTINUE)

1 - Instrumentation et méthodes expérimentales :

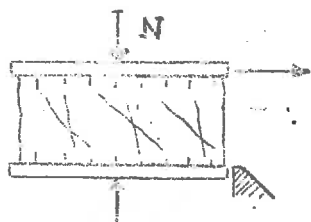
Au point de vue expérimental, cette analyse est le prolongement, côté grandes déformations, de l'étude sous déformations modérées du comportement d'une argile en fonction de son écrouissage. Les essais seront par conséquent les mêmes qu'à la section précédente, mais le domaine qui importe maintenant est celui qui se situe au delà de la limite des déformations modérées, celui qu'on a appelé "domaine des grandes déformations" (cf. chap. I).

Il n'est donc pas utile de revenir sur les instruments employés et les méthodes utilisées au cours de ces essais triaxiaux. L'observation directe du comportement des éprouvettes viendrait compléter néanmoins l'enregistrement des déformations et des contraintes appliquées.

On a joint à ces essais classiques dans l'appareil triaxial, d'autres types d'essais en nombre réduit, dont le but était essentiellement de constituer à la prospection de voies nouvelles pour cette étude expérimentale de la rupture ou de l'écoulement d'une argile :



- L'essai Brésilien consiste à soumettre un échantillon cylindrique, préparé selon les méthodes déjà décrites (compactage) à une compression simple s'exerçant le long d'une génératrice. On note l'apparition et la forme des fissures éventuelles, ou le mode de déformation plastique du sol ; et on relève les variations de la contrainte appliquée en fonction de la déformation latérale imposée.



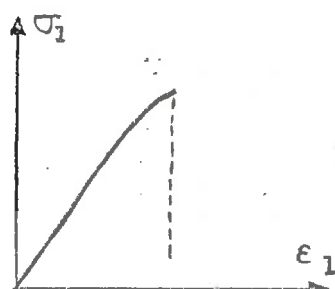
- L'essai de cisaillement se pratique de la manière suivante : un échantillon d'argile compactée, taillé en forme de parallélépipède, est serré entre deux plaques rectangulaires, munies de canelures afin d'empêcher tout glissement du sol sur le métal. Une des plaques se déplace, se déformant et parallèlement à l'autre, on note la manière dont se fait le cisaillement du matériau et notamment la forme et l'évolution de la fissuration. Purement qualitatif, l'essai n'a encore pour objectif que de permettre l'observation de la "génèse" des fissures en fonction des paramètres mécaniques et cinématiques imposés ( $N$  : géométrie, vitesse du cisaillement) et des caractéristiques physiques de l'argile compactée ( $\gamma_a$  et  $S_r$  %).

## 2 - Résultats et Commentaires :

### 2.1 - Analyse expérimentale des différents comportements :

Soumis aux états de contraintes maximum qu'il peut supporter, l'échantillon se comporte de différentes manières, selon ses caractéristiques physiques, structure,  $\gamma_a$  et  $S_r$  %, ou son écrouissage antérieur, et selon le type de sollicitations auquel il est soumis. Dans un souci de clarification, ces comportements ont été classés en trois types principaux, auxquels on a attribué des noms génériques permettant de les désigner plus commodément. Les photographies d'échantillons jointes en annexe permettront de soutenir concrètement les descriptions suivantes :

#### DIFFERENTS TYPES DE COMPORTEMENT SOUS GRANDES DEFORMATIONS



a - Rupture fragile ou rupture par extension : dans ce type de comportement, l'échantillon soumis à des contraintes croissantes se déforme peu et rompt brutalement sans déformation plastique appréciable. Il est donc rigide en même temps que fragile. Sur le diagramme  $\sigma_1 - \epsilon_1$ , cela se traduit par une portion de courbe presque rectiligne qui s'interrompt brutalement au moment de la rupture. De manière générale la rupture se fait par surfaces normales à la contrainte principale mineure, donc parallèles à la contrainte principale majeure, et à l'axe de l'éprouvette dans le cas de l'essai triaxial. Ces fissures parallèles à la direction de l'écrasement sont le caractère principal de ce type de rupture, qui se rapproche d'ailleurs de celui du verre ou de la pierre dans des conditions bien précises. Exemple : un tube de verre placé dans un manchon cylin-



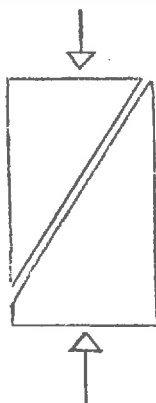
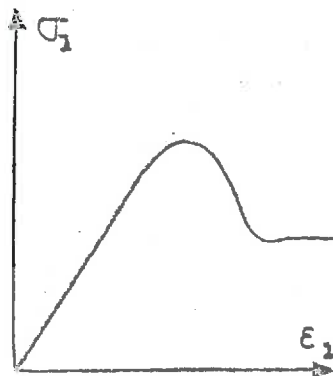


drique se rompt, à pression appropriée, selon une section circulaire, donc perpendiculaire à la contrainte principale mineure. On dit aussi de cette rupture qu'elle se produit par extension (cf. Sinays. Thèse de doctorat. Grenoble 1966).

Ce type de rupture n'a été obtenu nettement en fait que sur un échantillon fortement compacté ( $T_c = 270$ ,  $w = 12,4\%$ ) puis desséché, donc porté artificiellement à une faible teneur en eau pour une forte densité (1,96). On en retrouve les traces dans les échantillons de forte densité et de teneur en eau plus élevée, préparés selon la méthode habituelle, c'est-à-dire sans dessiccation. Exemples, les échantillons suivants :

$T_c = 600 \text{ tm/m}^3$	$w = 7,2\%$	$\sigma_l = 0,2 \text{ bars}$
$T_c = 600 \text{ tm/m}^3$	$w = 12,4\%$	$\sigma_l = 0,2 \text{ bars}$
$T_c = 600 \text{ tm/m}^3$	$w = 16,2\%$	$\sigma_l = 0,2 \text{ bars}$

Mais le phénomène est moins net et peut être interprété (peut-être) de différentes façons. On retiendra donc que dans le domaine des expériences réalisées la rupture fragile est le plus souvent un cas limite correspondant à de très fortes densités et à des pressions latérales en cours d'essai faibles.



b - Rupture par cisaillement : l'expression est condensée (ou imagée) pour désigner un mode de rupture se manifestant par l'apparition de surfaces de grandes déformations inclinées par rapport aux contraintes principales, avec ou sans discontinuité matérielle, c'est-à-dire avec ou sans fissure ouverte. Pour mieux préciser cette description, on distinguera deux sous-groupes, dont on ne verra vraiment l'importance qu'au chapitre des applications.

b-1 - Rupture par cisaillement avec fissures ouvertes : L'échantillon est coupé en deux ou plusieurs parties qui glissent les unes sur les autres. Il y a bien à proprement parler rupture de la matière, même si les différents morceaux que l'on obtient restent en contact dans leur déplacement relatif et les fissures que l'on observe sont nettement ouvertes. En général la courbe  $\epsilon_1 - \sigma_l$  est de pente accentuée, moindre toutefois que dans le cas précédent et s'infléchit avant son maximum pour retomber, après un "pic" souvent bien marqué, en un palier qui correspond sans doute au frottement dû au glissement des deux morceaux de l'échantillon l'un sur l'autre ; la cohésion n'intervient alors plus (cf. bibliographie). La rupture peut se produire le long d'une ou de plusieurs surfa-

ces de glissement, et les fissures de ce type ont en général, pour un matériau et un essai donné, la même orientation (ou sa symétrique) par rapport à l'axe de l'échantillon.

Les échantillons suivants donnent des exemples de ce comportement de loin le plus fréquent :

$T_0 = 35 \text{ tm/m}^3$	$\sigma_1 = 0,2 \text{ bars}$	$w = 16,2 \%$
$T_0 = 60 \text{ tm/m}^3$	$\sigma_1 = 1 \text{ bar}$	$w = 16,2 \%$
$T_0 = 270 \text{ tm/m}^3$	$\sigma_1 = 5 \text{ bars}$	$w = 12,4 \%$
$T_0 = 600 \text{ tm/m}^3$	$\sigma_1 = 5 \text{ bars}$	$w = 7,2 \%$
etc...		

b-2 - Rupture par cisaillement sans fissure ouverte : parler ici de rupture procède peut-être d'une extension de langage, car en fait le solide sur lequel on exerce les contraintes ne se sépare pas matériellement en deux morceaux. Il n'y a pas rupture de la continuité physique du matériau. Cependant, et c'est ce qui rapproche suffisamment ce comportement du précédent pour qu'on les place ensemble dans le même groupe générique, on observe une surface de très grandes déformations inclinée sur les directions principales. Il y a encore déplacement relatif de la partie supérieure de l'échantillon sur la partie inférieure, et l'une comme l'autre ne subit que des déformations réduites. Il semble que l'essentiel du glissement provienne de déformations élevées localisées sur une faible épaisseur le long d'une (ou plusieurs, mais rarement plus de deux) surface inclinée sur l'axe de l'échantillon. Puisqu'il n'y a pas de fissure ouverte, donc pas de discontinuité matérielle, le voisinage de chaque point resterait toujours le même, y compris le long de cette surface qui subirait néanmoins sur une faible épaisseur des distorsions notables.

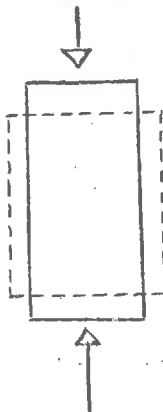
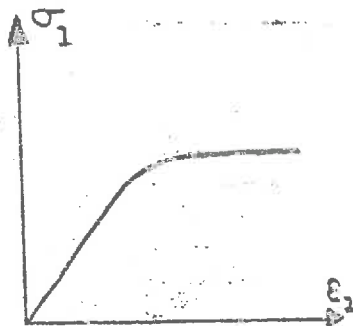


Le comportement des deux parties de l'éprouvette ainsi délimitées par la surface de grandes déformations peut se présenter de différentes manières : elles peuvent se déformer modérément, comme on vient de le dire, restant dans le domaine élastique ou plastique où se trouvait le matériau avant sa rupture ; l'une d'elles peut aussi se boursoufler et subir des déformations plastiques appréciables, doublées d'un ramaniement interne important dont les lois sont difficiles à déterminer et sortent certainement du domaine précédent. La surface des déformations importantes à la lisière des deux parties de l'échantillon n'en reste pas moins nettement visible de l'extérieur.



Ce mode de rupture assez peu fréquent, se rencontre essentiellement pour des sols secs et peu denses, que leur faible cohésion rapprocherait sans doute de matériaux pulvérulents. On le trouve aussi dans les essais portant sur certains sols denses mais très humides, ou pour des sols quelconques mais avec une contrainte latérale d'essai élevée, de telle manière que les fissures restent fermées.

Dans les axes  $\epsilon_1$  -  $\sigma_1$  le comportement de l'argile se traduit par une courbe qui se rapproche nettement de celle que l'on rencontrera dans le cas suivant. Le maximum est peu marqué et le palier des contraintes résiduelles ( $\sigma_1$ ) a une ordonnée qui ne lui est que faiblement inférieure. Il n'est pas question de pic.



c - Écoulement plastique : Le mot est pris dans le sens où l'entendent les rhéologues (cf. chapitre I). La loi de comportement s'exprime dans ce cas par un palier de contraintes sans maximum. Le matériau souvent très déformable présente à partir de ce palier une déformation "parfaitement" plastique, continue et homogène, sans variation de volume notable. Il est rare cependant que l'échantillon conserve une forme cylindrique, où une déformation latérale homogène viendrait à chaque instant compenser exactement la déformation longitudinale. Cela provient, semble-t-il, du freinage des têtes qui, quelles que soient les précautions prises, restreignent les déplacements latéraux aux extrémités de l'éprouvette. Le matériau reste en principe homogène et continu, même lors de son écoulement plastique. En fait, les défauts de la manipulation lui imposent souvent des boursouflures ou des plis qui pourraient faire douter de cette homogénéité. Il faut donc parfois pratiquer une "interpolation" faisant abstraction de toutes les erreurs d'ordre expérimental, pour pouvoir classer tel ou tel comportement dans cet "écoulement plastique". Exemples :

$T_c = 36 \text{ tm/m}^3$	$w = 24,1 \%$	$\sigma_1 = 0,2 \text{ ou } 5 \text{ bars}$
$T_c = 270 \text{ tm/m}^3$	$w = 19 \%$	$\sigma_1 = 6 \text{ bars}$

Remarque complémentaire : ce type de comportement se rencontre dans des conditions très différentes, qui justifieront peut-être un nouveau classement en sous-groupes :

- 1 -  $w$  % très élevé (saturation)  $\gamma_d$  modérée et  $\sigma_1$  que ce que. C'est le cas le plus fréquent.
- 2 -  $w$  % faible,  $\gamma_d$  quelconque à l'origine,  $\sigma_1$  très élevés. On constate alors une déformation plastique

sans fissuration, au moins dans un premier stade ; car ensuite, et notamment lorsqu'on laisse l'échantillon à l'état neutre et à l'air libre, un réseau dense de fissures fermées apparaît tout autour de sa surface.

#### OUTERS D'ERREURS OU INCERTITUDES DANS LE CLASSEMENT DES COMPORTE- MENTS LA RUPTURE

Des termes génériques désignant les principaux modes de grandes déformations ayant été ainsi définis, il reste à voir comment on peut les appliquer aux différents échantillons que l'on a soumis aux essais.

On notera tout d'abord que l'on rencontre rarement des formes de ruptures (ou de déformation continue) correspondant exactement et clairement à l'un des trois types précédemment définis : il y a presque toujours des fissures parasites, des plis, des distorsions, des déformations localisées dont il est parfois difficile de tirer le trait essentiel qui permettra de caractériser le comportement du matériau. Le classement serait aussi plus facile et plus sûr si le montage expérimental et la manipulation n'introduisaient des sources d'erreurs supplémentaires. Les réserves faites au chapitre précédent pour les déformations modérées conservent leur valeur. Mais certaines observations prennent une importance plus grande dans le domaine de grandes déformations :

- l'influence des conditions aux limites devient ainsi prépondérante. Les têtes notamment imposent au système une certaine cinématique, et viennent restreindre aux deux extrémités les déplacements latéraux de l'échantillon. Ce freinage a certainement une influence notable sur la rupture : si une fissure se crée en un point de l'éprouvette, elle se développera jusqu'à ce qu'elle atteigne une des extrémités. Le frottement métal - sol sera le plus souvent suffisant (même si on graisse les têtes) pour empêcher la fissure de s'ouvrir plus. Elle sera en quelque sorte neutralisée et la rupture de l'échantillon ne pourra se poursuivre que par l'ouverture de nouvelles fissures. Ce qui explique l'apparition de réseaux de fissures multiples dans la plupart des échantillons, ainsi que les " creux " que l'on peut observer dans certains diagrammes  $\sigma - \epsilon$ . Il est fort possible d'imaginer ainsi que ce freinage des têtes, dans un cas particulièrement tangent, puisse transformer pour l'observateur une rupture fragile en rupture

par cisaillement.

On notera aussi, une nouvelle fois, l'importance des hétérogénéités du sol. La nature argileuse de l'échantillon, son humidification variable, ainsi que son compactage en couches multiples ne peuvent manquer d'en créer au sein du matériau. Celles-ci sont plus marquées aux faibles densités : il se forme des granulés d'autant plus importants que la teneur en eau est élevée, et les faibles compactages ne suffisent pas à les faire disparaître. Cela se voit très nettement sur les échantillons compactés à  $T_c = 36 \text{ tm/m}^3$ . De telles hétérogénéités ne peuvent manquer d'influer sur l'aptitude du sol à se fissurer.

On précisera enfin, pour une analyse objective des schémas et des photos, que les déformations d'échantillons n'ont pas toutes été menées jusqu'au même point. Les comparaisons, à faire pour un même état de déformation axiale, ne pourront donc se fonder sur les reproductions photographiques rassemblées en annexe.

#### LISIERES PEU NETTES ENTRE LES DIFFERENTS TYPES DE COMPORTEMENT

Ces réserves étant faites, on comprendra qu'il serait ambitieux de vouloir faire un classement précis et détaillé des différents types de ruptures ou d'écoulements plastiques observés. D'où les trois grandes classes de comportement sous grandes déformations, telles qu'on les a définies ci-dessus. On ne comptera pas le nombre de fissures qu'on aura pu observer mais on classera la rupture dans tel ou tel type de cisaillement, avec ou sans fissures ouvertes, par exemple. Même avec ce souci de simplification, le problème reste d'ailleurs complexe car il est parfois difficile de faire une séparation nette entre les différents modes de rupture. Exemple : l'échantillon de caractéristiques  $T_c = 600 \text{ tm/m}^3$ ,  $w = 12,4 \%$ , écrasé sous une étreinte latérale de 0,2 bars, présente en même temps des fissures inclinées et des fissures verticales, donc deux types de rupture : rupture fragile et rupture par cisaillement avec fissures ouvertes. D'autre part certaines fissures ouvertes peu inclinées sur l'axe vertical, direction de la contrainte principale majeure, peuvent procéder du même type de rupture "par extension" que des fissures réellement verticales. Il suffirait que, pour une raison ou une autre, le trièdre principal ait subi une légère rotation et qu'un de ses axes ne soit plus parallèle à cette direction. L'échantillon marqué  $T_c = 600 \text{ tm/m}^3$ ,  $w = 19 \%$  et  $\sigma_3 = 0 \text{ bar}$ , en est peut-être un exemple.

Il se trouve aussi des éprouvettes dont le comportement initial est très nettement plastique, dans lesquelles il



apparaît ensuite une zone de grandes déformations, nettement marquée mais sans fissures ouvertes, si ce n'est ultérieurement sous l'influence de la dessiccation et du retrait. On ne note aucune chute de "résistance mécanique" et la courbe  $\epsilon_1 \sim \sigma_1$  présente un palier continu, au moins dans les limites de l'expérience. Un exemple, l'échantillon dont les paramètres sont :  $T_c = 270 \text{ tm/m}^3$ ,  $w = 16,2 \%$  et  $\sigma_1 = 5$  bars. On proposera ultérieurement une interprétation de ce phénomène.

On a donc indiqué pour chaque échantillon, et en première approximation, la classe dans laquelle il paraissait raisonnable de ranger son comportement sous grandes déformations. On trouvera ce classement en annexe (III-B-2), présenté sous la forme d'une série de tableaux à double entrée ( $\sigma_1$  et  $w \%$ ) correspondant chacun à une énergie de compactage donnée. Des photos d'échantillons en fin d'essais y sont jointes, qui viennent compléter ces tableaux et inspirer les commentaires suivants, d'ordre purement descriptif pour le moment :

#### COMMENTAIRES DE SYNTHESE

(1) - Les trois paramètres utilisés ont apparemment chacun une influence notable sur le mode de rupture des échantillons, et ceci quelle que soit la forme sous laquelle on les considère : densité sèche ou énergie de compactage, et teneur en eau ou degré de saturation pour préciser l'état physique du sol et l'écroutissage qu'on lui a antérieurement imposé, contrainte latérale en cours d'essai pour représenter la sollicitation à laquelle on le soumet. Il est douteux, si l'on en croit Seed et Chan, que la structure du matériau intervienne ici indépendamment de ses autres caractéristiques physiques ; car pour les grandes déformations, et la zone intéressante en est précisément le siège, qu'il y ait rupture ou écoulement, la structure tend à s'uniformiser en un état dispersé.

(2) - La rupture fragile, ou par extension, est relativement peu fréquente. Hormis le cas "artificiel" signalé ci-dessus, on la rencontre le plus souvent conjuguée avec des fissures de cisaillement, sur des échantillons d'argile très dense et peu humide, soumis à une contrainte latérale faible. C'est le cas des échantillons suivants :

$T_c = 600 \text{ tm/m}^3$	$w = 12,4 \%$	$\sigma_1 = 0,2 \text{ bar}$
	$w = 16,2 \%$	$\sigma_1 = 0,2 \text{ bar}$
	$w = 19 \%$	$\sigma_1 = 0 \text{ bar}$


$T_c = 270 \text{ tm/m}^3$	$w = 7 \%$	$\sigma_i = 0,5 \text{ bar}$
	$w = 7 \%$	$\sigma_i = 1 \text{ bar}$
	$w = 19 \%$	$\sigma_i = 0 \text{ bar}$

On a vu que l'association de ce type de rupture avec des fissures de cisaillement pouvait provenir du frettage des têtes ; celles-ci empêchant le développement des éventuelles fissures verticales, peuvent assurer à l'échantillon une "résistance mécanique" supérieure à ce qu'elle serait si les extrémités étaient libres, ce qui le conduit à rompre selon le mode de comportement possible suivant, par cisaillement. L'hétérogénéité des contraintes ou de l'échantillon fait donc apparaître en certains endroits une rupture par extension alors qu'ailleurs c'est le cisaillement qui prédomine. Inversant la proposition qu'on avait avancée il y a quelques pages, on pourrait imaginer ainsi qu'il n'y ait aucunement de rupture fragile dans ces cas litigieux, et que les variations dans l'orientation des fissures soient dues à d'éventuelles variations dans l'orientation du tenseur des contraintes.

(3) - Les ruptures par cisaillement sont de loin les plus fréquentes, dans le cadre de l'étude expérimentale. Il est important, ne serait-ce que pour les applications ultérieures, de distinguer les ruptures avec ou sans fissures ouvertes.

(a) - les ruptures sans fissure ouverte sont en général le fait des sols les moins denses et les moins humides, soumis à des contraintes latérales faibles. Exemples :

$T_c = 36 \text{ tm/m}^3$	$w = 7,2 \%$	$\sigma_i = 0,8 \text{ ou } 2 \text{ bars}$
$T_c = 60 \text{ tm/m}^3$	$w = 7,2 \%$	$\sigma_i = 1 \text{ ou } 2 \text{ bars}$



Cela arrive aussi pour des sols peu denses mais plus humides, soumis à des étreintes latérales plus élevées. Les surfaces de grandes déformations, sans discontinuité matérielle, se manifestent alors par une série de plis de courte longueur, orientés parallèlement, et alignés le long de ces surfaces de cisaillement (dont les directions ne se confondent presque jamais avec leur propre orientation). Il arrive que, par dessiccation à l'air, les zones ou les surfaces de grandes déformations se dissocient en fissures ouvertes. Comme on l'a déjà signalé, la courbe de comportement présente un palier de contraintes. Exemples :

$T_c = 36 \text{ tm/m}^3$	$w = 19 \%$	$\sigma_i = 5 \text{ ou } 10 \text{ bars}$
---------------------------	-------------	--



$T_c = 60 \text{ tm/m}^3$	$w = 16,2 \%$	$\sigma_i = 1 \text{ bar}$
$T_c = 270 \text{ tm/m}^3$	$w = 16,2 \%$	$\sigma_i = 5 \text{ bars}$

Il peut enfin se produire qu'une contrainte latérale très forte empêche des fissures de cisaillement nettement dessinées de s'ouvrir comme elles le feraient sous des  $\sigma_i$  plus faibles. Ce cas s'apparenterait plutôt au suivant (exemple :  $T_c = 600 \text{ tm/m}^3$ ,  $w = 7,2 \%$ ,  $\sigma_i = 10 \text{ bars}$ ).

(b) - les sols moyennement ou très denses admettent le plus souvent, quel que soit leur degré de saturation et pour des contraintes latérales modérées à nulles, un mode de rupture à fissures inclinées ouvertes. Leur inclinaison sur la verticale varie de 30 à 40°, la majorité (et la moyenne) se situant à 35°. Exemples :

$T_c = 600 \text{ tm/m}^3$	$w = 7,2 \%$	$\sigma_i = 1 \text{ ou } 5 \text{ bars}$
	$w = 12,4 \%$	$\sigma_i = 1 \text{ ou } 5 \text{ bars}$
	$w = 16,2 \%$	$\sigma_i = 0,2 \text{ bar}$
	$w = 19 \%$	$\sigma_i = 0 - 0,3 - 0,5 - 1 \text{ bar}$
$T_c = 270 \text{ tm/m}^3$	$w = 7,2 \%$	$\sigma_i = 0,5 \text{ ou } 5 \text{ bars}$
	$w = 12,4 \%$	$\sigma_i = 0,2 - 1 - 5 \text{ bars}$
	$w = 16,2 \%$	$\sigma_i = 1 \text{ bar}$
	$w = 19 \%$	$\sigma_i = 0,3 - 0,6 - 0,9 - 1 - 1,5 \text{ bar}$
$T_c = 60 \text{ tm/m}^3$	$w = 16,2 \%$	$\sigma_i = 1 \text{ bar}$
	$w = 19 \%$	$\sigma_i = 0 \text{ ou } 0,5 \text{ bar}$
$T_c = 36 \text{ tm/m}^3$	$w = 16,2 \%$	$\sigma_i = 0,2 \text{ bar}$
	$w = 19 \%$	$\sigma_i = 0,5 \text{ ou } 1 \text{ bar}$

(4) - On n'a pratiquement pas réussi à obtenir un "écoulement plastique" qu'illustre parfaitement la définition qu'on en a donnée quelques pages plus haut. Une explication en a été proposée en même temps : les têtes imposent à l'échantillon des contraintes tangentielles  $\tau_{xz}$  différentes de 0. On a donc classé dans cette catégorie

les grandes déformations qui laissent pratiquement homogènes les échantillons, sans apparition de fissures ou de lignes de déplacements privilégiés. L'espèce de "flambement" qu'on constate sur certains d'entre eux provient de la latitude laissée aux têtes de s'incliner légèrement sur le côté (afin précisément de diminuer leur influence sur le mode de rupture), mais n'altère pas, semble-t-il, la nature "plastique" de leur comportement. Celui-ci se rencontre surtout dans les sols saturés, à forte teneur en eau, c'est-à-dire à densité sèche modérée. La contrainte latérale intervient alors très peu. Exemples:

$$w = 25 \% \quad T_c = 270, 60 \text{ ou } 36 \text{ tm/m}^3.$$

Un comportement semblable apparaît aussi pour des sols non saturés mais soumis à des contraintes latérales élevées. Exemples :

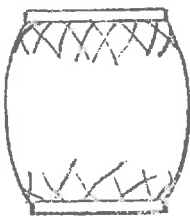
$$T_c = 60 \text{ tm/m}^3 \quad \sigma_t = 5 \text{ bars} \quad w = 7,2 - 12,4 - 16,2 - 19 \text{ et } 24,1 \%$$

Dans ce dernier cas, plus le sol est dense et sec, plus la contrainte latérale doit être importante, pour que son comportement puisse être assimilé à un écoulement plastique, par l'homogénéité que semble conserver le matériau et l'allure de sa courbe

$\epsilon_1 / \sigma_1$

Exemple :

$$T_c = 270 \text{ tm/m}^3 \quad w = 7,2 \% \quad \sigma_t = 10 \text{ bars}$$

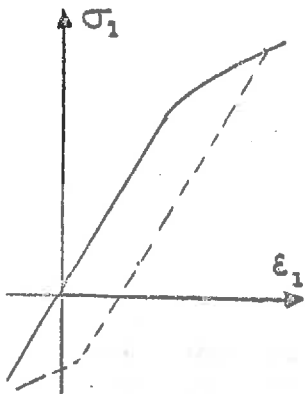


(5) - Lorsqu'on ressort de l'appareil triaxial des échantillons non saturés ayant subi sous contrainte latérale élevée cette déformation qualifiée, peut-être abusivement, d'écoulement plastique, on repère parfois un double réseau de micro-fissures fermées, inclinées symétriquement par rapport à leur axe, naissant au contact de leurs têtes et se développant surtout en surface. Laissés à l'air ambiant, ces échantillons se dessèchent naturellement et, sous l'effet du retrait, les fissures d'abord très fines s'élargissent et s'étendent en profondeur comme en longueur. Le matériau tend à se morceler et à perdre son homogénéité initiale (apparente). Son comportement en cours d'essai, avec palier de contraintes et déformation homogène le rapproche des matériaux plus humides soumis à des contraintes latérales modérées. Mais ces microfissures et son aptitude à se dissocier sous l'effet de la dessiccation, exigent peut-être qu'on le range dans une catégorie spéciale. D'où la séparation du groupe de sols susceptibles de subir un "écoulement plastique" en deux sous-groupes tels qu'on les

a définis au début de cette section. La distinction peut s'avérer utile dans la suite, surtout sur le plan des applications.

On a renoncé à assimiler ces fissures à des fissures de cisaillement, en constatant que pour des déformations axiales importantes, leurs lèvres ne subissaient pas de déplacement relatif appréciable.

L'interprétation de ces fissures fines et nombreuses, qui ne semblent pas diminuer les propriétés mécaniques du sol (pas de chute de contraintes lors de leur formation), paraît délicate. Faut-il incriminer la seule influence des têtes ; ou faut-il supposer que l'écoulement plastique se fait au sein de l'échantillon le long de courbes ou de surfaces d'orientations déterminées. En ce cas, le sol porté à l'état plastique en compression, se trouverait soumis le long de ces trajectoires à un effet comparable à celui de Bauschinger en métallurgie et verrait sa résistance à la traction notablement réduite. Les fissures de retrait se développeraient donc de manière préférentielle le long de ces courbes qui apparaissent parfois légèrement tracées en surface avant même la dessiccation.



(6) - On a pu constater l'influence relative des trois paramètres relevés au début :

- densité sèche (ou énergie du compactage) du sol.
- degré de saturation (ou teneur en eau) du sol.
- contrainte latérale d'essai (ou contrainte isotrope).

L'effet du dernier n'est pas dissociable de celui des deux autres. On pourrait ainsi imaginer un matériau très sec et très dense (genre brique), auquel on saurait imposer une grande déformation continue, sans aucune fissure, donc un "écoulement plastique" : il suffirait de le soumettre en cours d'écrasement à une contrainte latérale ou isotrope très élevée. C'est d'ailleurs vrai aussi des roches. On ne peut donc pas classer simplement le comportement d'un sol sous grandes déformations en fonction seulement de ses caractéristiques physiques, densité et humidité, ou de son écrasement préalable. Le type des contraintes d'essai qui mènent le sol à cet état de grandes déformations est lui aussi un paramètre essentiel. On entendait implicitement dans les pages précédentes, qu'on avait affaire à un écrasement sous pression latérale constante, se décomposant en l'application d'une pression isotrope suivie de l'exercice d'un déviateur de contraintes.

Mais dans le cas général, le trajet suivi par les contraintes pour mener le sol à ce stade de comportement, peut importer autant que l'état ou la répartition des contraintes lors de la rupture ou de l'écoulement plastique. Au cas où ce trajet n'aurait qu'une importance négligeable, on pourrait délimiter sur la surface limite représentative, dans l'espace  $\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3$ , des états de contraintes maximaux que peut supporter un matériau éroulé, de caractéristiques données, des nappes correspondant aux différents types de ruptures ou d'écoulements possibles. Ainsi, du côté des contraintes négatives, ou pour l'une d'entre elles tout au moins, on peut supposer qu'à la surface limite correspondra une rupture fragile, ou par cisaillement avec fissures ouvertes. Du côté des compressions, au contraire et pour une forte contrainte principale mineure, il y a de fortes chances que le matériau se déforme beaucoup, sans rupture ni fissure, suivant le schéma "d'écoulement plastique" qu'on vient de voir.

A chaque couple de valeurs données aux paramètres physiques  $\gamma_d$  et  $Sr \%$ , correspond donc non seulement, comme on l'a vu au chapitre précédent, une surface limite (dans  $\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3$ ) particulière mais aussi sur cette surface, un découpage particulier en nappes correspondant aux différents types de comportements : ruptures ou déformations continues.

(7) - Pour de faibles compactages et des pressions d'essai latérales fortes, la pression isotrope d'abord appliquée augmente fortement la densité de l'échantillon et peut entraîner une rupture franche qui n'existerait pas à mêmes  $\gamma_d$  et  $Sr \%$ , pour une  $\sigma_1$  plus faible. Exemple :

$$\sigma = 36 \text{ tn/m}^3 \quad w = 12,4 \% \quad \sigma_1 = 2 \text{ bars}$$

Mais la plupart du temps pour les teneurs en eau considérées, la contrainte latérale est trop faible pour modifier notablement la densité sèche obtenue à l'issue du compactage.

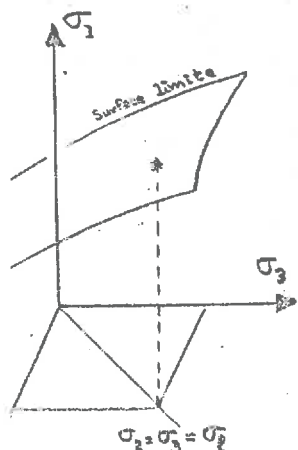
(8) - L'observation directe du comportement des échantillons en cours d'essais permet donc d'avoir une idée générale des conditions, en caractéristiques physiques initiales et en contraintes exercées, favorables à tel ou tel type de rupture ou de déformation continue. On voit ainsi qu'un matériau dont la densité sèche est assez élevée, risque fortement de rompre quand on le soumettra à un état de contraintes triaxial dont la composante principale mineure sera faible (bien que toujours positive). La teneur en eau, en ce cas, n'a qu'une influence limitée, lorsqu'on reste en deçà de la saturation. Inversement un échantillon saturé et de densité moyenne soumis à une contrainte latérale quelconque, se déformera selon un schéma d'écoulement plasti-



que. Il en sera de même, selon un processus différent, pour les échantillons de densité quelconque soumis à des pressions latérales très élevées. On pourrait donc ainsi multiplier les notations qualitatives sur le comportement d'un sol donné lorsqu'on le soumet à un état de "grandes déformations". Il est utile cependant, ne serait-ce que pour les applications qu'on pourra en faire, de sortir du qualitatif pour mieux définir (quantitativement par conséquent) les limites des différents domaines de comportement, sachant que les paramètres en jeu sont, répétons-le :

- l'état physique du sol après son compactage (écrasement) représenté dans le cas présent par deux paramètres :  $\gamma_d$  et  $Sr \%$  ou  $w \%$  (faute de coefficient indépendant pour la structure).
- la contrainte latérale à laquelle on le soumet au cours de l'essai d'écrasement (qui pourrait être la contrainte moyenne ou la contrainte isotrope).

## 2.2 - Analyse quantitative de l'influence des caractéristiques physiques d'un sol cohérent sur son comportement sous grandes déformations, à contrainte latérale constante.



Exprimé "dans l'espace des contraintes" ( $\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3$ ) le problème s'énonce de la manière suivante :

- étant donnée une valeur de  $\sigma_l$ , contrainte latérale à laquelle est soumis l'échantillon d'argile au cours de son essai d'écrasement, sur quelle nappe de la surface limite arrive-t-on, selon les valeurs données à  $\gamma_d$  et à  $Sr \%$ , lorsque  $\sigma_1 = Ldm$  seuil du domaine des grandes déformations ? Ou encore, à  $\sigma_l$ ,  $\gamma_d$  et  $Sr \%$  données, la nappe de la surface limite sur laquelle se trouve le point représentatif des contraintes "à la rupture" (par abus de langage) correspond-elle à une rupture fragile, une rupture par cisaillement ou une déformation continue ?



RECHERCHES D'UN CRITERE  
PERMETTANT DE DEFINIR LE  
COMPORTEMENT SOUS GRANDES  
DEFORMATIONS.

Il s'agit avant tout de trouver un critère propre à définir ces différents types de comportement.

(1) - La "limite du domaine des déformations modérées",  $L_{dm}$ , est aussi pour le mode de sollicitation choisi, le seuil de rupture ou d'écoulement plastique exprimé en contraintes. Elle représente de manière plus précise ce qu'on appelle couramment la "résistance mécanique" du matériau dans l'état de contraintes particulier qui lui est imposé par l'essai triaxial :  $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1$  fixée ;  $\sigma_1$  croissant jusqu'à la surface limite donc jusqu'à cette valeur " $L_{dm}$ ".

$L_{dm}$  peut donc fournir une information sur le niveau de la rupture ou de l'écoulement plastique (en contraintes), mais ne semble pas permettre de faire la distinction entre ces différents comportements sous grandes déformations. Tout au plus peut-on déterminer sur les courbes (III-A-2b) donnant les variations de  $L_{dm}$  en fonction de  $\gamma_d$  ou  $T_c$ ,  $S_r$  % ou  $w$  %, des sections correspondant à tel ou tel comportement constaté auparavant expérimentalement ; mais il ne semble pas qu'une inflexion marquée ou un point de courbure plus accentué vienne souligner le passage de l'un à l'autre des types de rupture ou d'écoulement.

Exprimées en fonction de  $\sigma_1$  ( $= \sigma_2 = \sigma_3$ ), pour un sol de  $\gamma_d$  et  $w$  % donnés, les variations de  $L_{dm}$  sont représentées par ce qu'on appelle la courbe intrinsèque, et qui est plus précisément la section de la surface limite dans l'espace des contraintes ( $\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3$ ) par un plan  $\sigma_2 = \sigma_3$ . Si on rapproche les observations faites sur l'échantillon au cours de son écrasement, des courbes limites ainsi définies (cf. III-B-2), on remarque que le changement de comportement se traduit sur le diagramme  $\sigma_1 / \sigma_2$  par un changement de courbure assez faiblement marqué.

Exemple : la partie rectiligne des courbes  $w = 19$  % correspond à une rupture avec cisaillement sans fissure ouverte ou, à la limite, à un écoulement plastique, tandis que la première section, pour de plus faibles  $\sigma_1$ , correspond à une rupture franche avec fissures ouvertes. Il en est de même pour  $w = 7,2$  %. Mais il faudrait disposer d'un plus grand nombre de résultats pour pouvoir généraliser cette remarque et donner valeur de critère à la courbure de la courbe limite.

On pourrait aussi attribuer ce rôle à la pente de la même courbe, ou aux variations élémentaires de  $L_{dm}$  en fon-

tion de  $\sigma_2$ . On aurait ainsi  $d\sigma_1/d\sigma_2 = f(\sigma_2)$  pour les ruptures franches et  $d\sigma_1/d\sigma_2 = \text{cte}$  pour une rupture sans fissure ouverte ou un écoulement plastique. Là encore, on ne dispose pas d'un nombre suffisant de points, notamment dans les valeurs intermédiaires de  $w$  %, pour préciser ces idées et étudier, ne serait-ce qu'approximativement les variations de ces éventuels critères en fonction des paramètres  $\gamma_d$  et  $S_r$  % en  $w$  %.

Remarques : Si la discontinuité des pentes ou des courbures de la courbe limite  $\sigma_1/\sigma_2$  est peu marquée quand on passe d'une "rupture par cisaillement" à un "écoulement plastique", elle semble beaucoup plus importante lorsqu'on entre dans le domaine des ruptures fragiles. Ce qui vérifierait, pour les argiles, ce que Sirieys a trouvé sur les roches. Si des essais ultérieurs venaient montrer que la courbure ne marque pas de discontinuité quand on passe de la rupture par cisaillement à l'écoulement plastique (ce qui n'enlèverait rien au deuxième critère proposé), on pourrait supposer qu'ils procèdent du même phénomène physique, mettant en jeu la cohésion et le frottement ; la première les ferait intervenir le long d'une ou de quelques surfaces privilégiées, le second le long d'une infinité de surfaces de même orientation (réalité physique des caractéristiques ?). La rupture fragile qui marque, elle, une discontinuité indéniable dans la courbe  $\sigma_1/\sigma_2$  procéderait d'un phénomène différent, celui qui lui donne précisément son nom de rupture par extension.

Il peut être intéressant de noter enfin que si l'on reporte dans les mêmes axes  $\sigma_1/\sigma_2$  la limite du domaine des déformations réversibles, celle-ci est parfaitement continue, quel que soit le comportement que suivra ultérieurement le sol sous un état de grandes déformations.

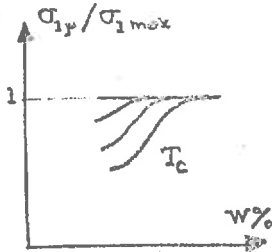
(2) -  $\sigma_{1p}/\sigma_{1\max}$  est le rapport des contraintes principales majeures au maximum de la courbe et au niveau du palier. La valeur de ce rapport permet d'avoir une idée de la chute des propriétés mécaniques entraînée par le "dépassement de la résistance" du matériau.

Il se trouve d'ailleurs que ce rapport prend une valeur sensiblement égale à l'unité pour les grandes déformations sans rupture franche (écoulement plastique ou cisaillement sans fissure ouverte), tandis qu'il devient inférieur à 1 pour un cisaillement avec fissures ouvertes ou une rupture fragile.  $\sigma_{1p}/\sigma_{1\max}$  est d'autant plus faible que la rupture est franche et s'annule évidemment lorsque l'échantillon, très sec et très dense, soumis à une contrainte latérale très faible, éclate sous l'effet de la pression axiale qu'on lui impose.

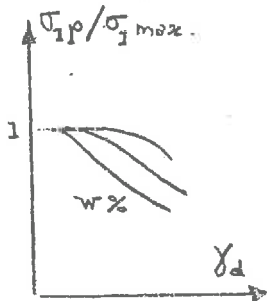
On a donc tracé sur les graphiques (III-B-2),

les variations de ce rapport en fonction des variables  $T_c$  ou  $\gamma_d$ ,  $w\%$  ou  $S_r\%$  (il arrive qu'on ne puisse en déterminer les valeurs à moins de 10 % près).

L'observation des courbes obtenues conduit aux résultats suivants :



- à égales  $T_c$  et  $\sigma_2$ ,  $\sigma_{1p}/\sigma_{1max}$  croît avec  $w\%$ . Une exception  $T_c$  faible ( $36 \text{ tn/m}^3$ ) pour laquelle le rapport admet un minimum vers 16 de teneur en eau. Ceci provient du comportement des échantillons de densité et d'humidité faibles, déjà signalé : le matériau se déforme vite et beaucoup pour de faibles contraintes axiales, souvent le long d'une surface privilégiée, mais sans fissure ouverte ni chute des contraintes. Dans ce cas,  $\sigma_{1p}/\sigma_{1max}$  sera donc initialement égal à 1 mais diminuera par la suite pour des teneurs en eau plus élevées et des modes de rupture plus francs, avant de croître pour rejoindre à nouveau le palier unité qui correspond alors à un cisaillement sans fissure ouverte ou à un écoulement plastique.



On peut donc noter à cette occasion, que le palier  $\sigma_{1p}/\sigma_{1max} = 1$  correspond soit à un écoulement plastique soit à un cisaillement sans fissure ouverte, donc, en général à une déformation continue et que, de manière générale, les valeurs du rapport inférieures à 1 (à 5 % près environ) correspondent à des ruptures franches.

- A égales  $w\%$  et  $\sigma_2$ ,  $\sigma_{1p}/\sigma_{1max}$  décroît en général avec  $\gamma_d$ . Les exceptions proviennent encore du mode de rupture, par cisaillement sans fissure ouverte, des échantillons de teneur en eau et densité faibles.

- L'étude des variations du même rapport en fonction de la contrainte latérale  $\sigma_2$ ,  $w\%$  et  $\gamma_d$  étant maintenues constantes, montre que même pour des ruptures franches,  $\sigma_{1p}/\sigma_{1max}$  tend vers 1 quand  $\sigma_2$  croît. Pour les fortes contraintes latérales d'essai, l'imprécision de certaines mesures rend donc problématique la distinction entre les différents types de comportement du matériau, à partir des valeurs que présente ce rapport. Ceci revient-il à dire que pour des  $\sigma_2$  élevées, une rupture franche n'entraîne qu'une faible chute de la qualité mécanique de l'argile ? L'aptitude de l'échantillon à se fissurer ou à rompre, ne pourra plus se reconnaître, en tout cas, que par l'observation directe de son comportement au moment de l'expérience.

Cette remarque précise bien les limites de l'emploi de " $\sigma_{1p}/\sigma_{1max}$ " comme critère de comportement. On dira donc en conclusion :

$\sigma_{1p}/\sigma_{1max} = 1$ , en règle générale, pour une grande déformation sans discontinuité physique (écoulement plastique ou cisaillement sans fissure ouverte).



$\sigma_p / \sigma_1 \max < 1$  pour une rupture (cisaillement avec fissures ou rupture par extension.

La valeur du critère sera d'autant meilleure que la contrainte latérale à laquelle est soumis le sol, sera faible.

(3) - L'inclinaison des fissures que l'on observe sur l'échantillon peut être considérée d'une certaine manière comme un critère numérique de la rupture. Elle permet en effet de distinguer la rupture par extension de la rupture par cisaillement. Les fissures de la première sont parallèles à la contrainte principale majeure alors que celles de la seconde sont inclinées d'un angle certain. A une inclinaison dans un sens correspond presque toujours d'ailleurs l'inclinaison symétrique par rapport à l'axe de l'échantillon (direction principale majeure). On obtient ainsi lorsque la surface de rupture n'est pas unique un double réseau de fissures symétriques. On a relevé, sur les tableaux récapitulatifs des différents comportements sous grandes déformations, les angles des fissures éventuelles mesurés après écrasement. Pas nécessairement égaux à l'angle que fait la normale à la surface de rupture avec la direction principale majeure, ils semblent cependant n'en différer que modérément. On constate que leur valeur reste comprise entre 60 et 70°, la majorité se situant aux alentours de 65° (mesures faites à 3 ou 4° près).

L'angle que font les surfaces de grandes déformations dans les cisaillements sans fissure ouverte, est plus difficile à déterminer de manière précise. Il semble cependant que les valeurs qu'il prend se situent à peu près dans la même fourchette de 60 à 70°.

Si l'ébauche d'analyse théorique est correcte (cf. annexe), on aura  $\pi/4 - \phi/2 = 20$  à  $30^\circ$ , c'est-à-dire  $\phi$  (angle de frottement apparent) = 15 à  $20^\circ$ . La borne inférieure de l'intervalle semble un peu forte si on pense qu'il doit aussi inclure les angles de frottement apparent relatifs aux échantillons saturés.

(4) - Si les hypothèses afférentes à la représentation d'une courbe intrinsèque dans le plan de Mohr sont licites (indépendance de la contrainte principale intermédiaire, confondu ici avec la mineure; rectitude de la courbe tangente aux cercles extérieurs représentatifs des états de contraintes), la traduction d'un critère de rupture s'en trouve simplifiée puisqu'il suffit de l'exprimer au moyen des deux paramètres de la droite limite ainsi obtenue : angle (de frottement) et coordonnée à l'origine (cohésion). Cette représentation admet pour limites celles de ses hypothèses : on ne peut plus définir un angle de frottement, notamment, si la courbe enveloppe des cercles de Mohr n'est



pas linéaire ; ce qui arrive pour un tiers des essais au plus. On a donc relevé en annexe (III-B-2) les différentes valeurs de  $c$  et  $t_{\phi} \phi$  lorsqu'elles étaient accessibles, puis on en a tracé les variations en fonction des paramètres de l'écroutissage (ou du compactage). L'analyse de ces courbes fournit peu de conclusions vraiment nettes et sûres :

- la cohésion croît avec la densité. Elle semble admettre un maximum quand on l'exprime en fonction de la teneur en eau.

- l'angle de frottement (apparent) décroît avec la teneur en eau, et semble croître avec la densité sèche.

On remarquera que les sols saturés présentent des angles de frottement faibles mais encore supérieurs à 0 : ne s'annule qu'à partir de  $w = 24 \%$ . Cette anomalie provient certainement de l'incertitude inhérente à la mesure de l'angle de frottement, et montre bien l'erreur que l'on doit admettre sur le tracé de ces courbes expérimentales. On a reporté dans le même tableau (III-B-2) les valeurs présumées de  $c$  et  $t_{\phi} \phi$  non plus pour le maximum des contraintes, donc au moment de la rupture ou de l'écoulement plastique, mais pour le palier éventuel. Les résultats sont malheureusement là encore, trop marginaux, donc incertains et peu nombreux, pour qu'on puisse étudier les variations des rapports  $c_p / c_{\max}$  et  $t_{\phi} \phi_p / t_{\phi} \phi_{\max}$ , en fonction des paramètres  $\gamma_d$  et  $S_r \%$ . Il semble, à priori, que ces rapports pourraient en effet jouer le même rôle que  $\sigma_1 p / \sigma_1 \max$ , dans les limites de validité de leur définition, pour traduire les différents comportements du sol sous grandes déformations.

Remarque : L'importance de  $\sigma_2$  (contrainte latérale) pour le comportement d'un matériau argileux soumis à un état de grandes déformations sera encore souligné au chapitre suivant, à propos des applications qu'on peut en faire pour le compactage des terres de barrages. On verra ainsi qu'on peut définir dans le plan Proctor des courbes paramétrées en  $\sigma_2$ , définissant deux domaines de  $\gamma_d$  et  $w \%$  : le matériau dont les caractéristiques physiques appartiendraient au premier, serait susceptible de rompre sous un état de contraintes triaxial d'étreinte latérale  $\sigma_2$  ; alors que pour le second, il ne ferait que s'écouler plastiquement ou se cisailier sans fissure ouverte. Pour plus de détails, on se reportera au chapitre IV.

3 - Conclusions partielles ; critiques, réserves et perspectives pour des recherches futures :

CONCLUSION - SYNTHESE

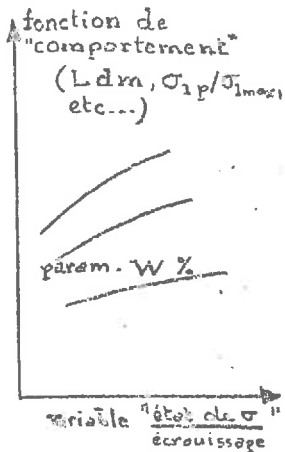
Les variables qui commandent le comportement d'un matériau cohérent peuvent être regroupées sous deux titres :

- "L'état d'écroutissage" du matériau, c'est-à-dire ses caractéristiques physiques après le compactage :  $\gamma_d$ ,  $S_r$  % (ou  $w$  %).
- "L'état de contraintes" auquel il est soumis en cours d'essai. Une fois précisé le fait que cet essai est biaxial (ou "cylindrique"), on peut se satisfaire, pour le définir, de la valeur de sa contrainte principale mineure, ou de la contrainte isotrope, ou encore de la contrainte moyenne (dont l'inconvénient est d'être variables).

Par son comportement dans le domaine des grandes déformations (au moins dans le secteur qu'on a analysé) l'argile a des propriétés qui s'étagent entre elles d'un milieu pulvérulent et celles d'une roche, en passant par celles d'un milieu cohérent plus ou moins visqueux et plus ou moins déformable :

- à  $w$  % et  $\gamma_d$  faibles, sous  $\sigma_1$  modérée, le matériau se comporte extérieurement comme un sol pulvérulent : cisaillement sans fissure ouverte.
- à  $w$  % faible et  $\gamma_d$  très élevée, sous  $\sigma_1$  modérée, l'argile rompt comme une roche : rupture fragile, ou par extension.
- à  $w$  % faible ou moyenne,  $\gamma_d$  élevée et sous forte  $\sigma_1$ , le matériau se déformerait de manière homogène sans l'apparition fréquente de fissures multiples et fines, dont les lèvres subissent rarement des déplacements relatifs notables.
- à forte  $w$  % ( $S_r = 100$  % notamment),  $\gamma_d$  modérée et sous  $\sigma_1$  quelconque, le sol se déforme plastiquement sans aucune fissure.
- à  $w$  %,  $\gamma_d$  et  $\sigma_1$  "intermédiaires", l'argile se cisaille selon une ou plusieurs surfaces bien marquées ; d'où l'apparition de fissures nettement ouvertes.

POSSIBILITE DE TROUVER DE  
MEILLEURES REPRESENTATIONS  
DES VARIATIONS DE FONCTIONS ?



(ex:  $\gamma_d/\sigma_2$ ,  $\frac{\sigma_c}{\sigma_{ie}}$ , etc...)

De manière élémentaire, mais qui s'imposait dans une première étape, on a tracé les variations des fonctions de comportement ( $Ldm$ ,  $\sigma_{1p}/\sigma_{1max}$ , etc...) en fonction des variables ou paramètres essentiels qui semblaient intervenir dans le problème. Pour tout exprimer à la fois, et compte tenu de ce qu'on s'était limité à trois paramètres ( $\gamma_d$ , Sr % ou w % et  $\sigma_2$ ), il eût fallu disposer d'un espace à quatre dimensions. On pourrait sans doute simplifier cette représentation et diminuer d'une unité le nombre des paramètres en utilisant comme variable une fonction relative de l'écrouissage et de l'état de contraintes d'essai. La fonction "comportement" s'exprimerait ainsi en fonction de la variable "état de contraintes", le seul

écrouissage

paramètre restant la teneur en eau du sol. Exemple : on étudierait les variations de " $\sigma_{1p}/\sigma_{1max}$ " ou de " $Ldm$ " ou de " $C_p/C_{max}$ ", en fonction de " $\sigma_2$  (essais) /  $\sigma_2$  (écrouissage)", ou de " $\gamma_d/\sigma_2$ " etc...

Les tentatives faites dans cette direction n'ont, pour le moment, pas encore abouti. Faute sans doute de trouver la meilleure manière d'écrire cette variable fonction simultanée de l'écrouissage et de l'état des contraintes d'essai.

RESERVES PROVENANT DES  
ERREURS OU INCERTITUDES  
EXPERIMENTALES

On a déjà vu au chapitre précédent les erreurs ou inexactitudes qui s'attachaient à l'expérience. On peut cependant souligner ici à nouveau ce qui semble avoir le plus de conséquence sur le comportement des échantillons soumis aux grandes déformations :

- influence prépondérante des têtes, qui imposent une certaine cinématique à la rupture.
- hétérogénéité des échantillons malgré toutes les précautions prises.
- vitesse d'écrasement imposée
- géométrie unique de l'éprouvette.

Ces imperfections et insuffisances influent vraisemblablement sur le niveau de la contrainte maximale, donc de la rupture ou de l'écoulement, mais aussi sur la forme que l'une ou l'autre peut prendre. On est donc conduit naturellement à esquisser un programme de recherches complémentaires, dans lequel on chercherait à mieux comprendre l'influence générale des conditions aux limites et autres sources d'incertitudes, et à éliminer du classement des grandes déformations les erreurs d'origine expérimentale dont on vient de signaler l'éventualité. Cela permettrait peut-être de se faire une idée plus précise de l'origine de ces microfissures dans le cas d'un échantillon soumis à une contrainte latérale élevée, de la multiplicité des surfaces de cisaillement lorsque ce genre de rupture se produit, etc... etc...

Remarquons que les expériences se limitent aux états de contraintes positifs et "biaxiaux". A supposer, hypothèse gratuite, que la contrainte principale intermédiaire n'a pas d'influence sur le mode de rupture, pas plus que sur son niveau, on pourrait se satisfaire de cet état dans lequel les deux contraintes sont égales. Mais il serait souhaitable, ne serait-ce que pour les applications, que l'on sache définir aussi la surface limite du côté des contraintes négatives, ainsi que sa répartition en nappes différentes, selon les différents comportements auxquels elles correspondent.

Il reste à trouver le moyen de soumettre un sol à une contrainte négative déterminée, les autres restant positives !

Deuxième remarque : il serait intéressant, dans une campagne d'essai future, de réaliser un montage permettant d'observer la naissance et la propagation des fissures éventuelles. Cela permettrait de mieux comprendre leur mécanisme, leur cinématique, ainsi que l'importance pour leur développement, des "conditions aux limites" déjà signalées.

#### 4 - Essais complémentaires :

a) - Afin d'essayer de voir, précisément, la manière dont naissent et se propagent les fissures, on a placé un échantillon parallélépipédique de sol, préparé à une teneur en eau de 15 % et une densité sèche de  $1,9 \text{ g/cm}^3$ , entre deux plaques horizontales striées et chargées, de telle manière que le sol ne puisse pas glisser à leur contact. La plaque inférieure étant maintenue fixe, on déplace latéralement la plaque supérieure tout en lui imposant une certaine pression verticale. L'échantillon se cisaille et on constate qu'il apparaît un double réseau de fissures inclinées les unes à  $35^\circ$ , les autres à  $75^\circ$  sur la verticale. Photographie en annexe.



b) - L'essai Brésilien s'inspire de ceux qui sont couramment pratiqués sur les roches, afin de provoquer une rupture par extension le long d'un plan diamétral parallèle à la contrainte principale majeure. On n'a obtenu en fait une telle rupture que pour un matériau particulièrement dense et peu humide. L'essai triaxial donnait le même résultat. Pour tous les autres échantillons, la rupture intervenait le long de deux surfaces inclinées par rapport à la direction de l'écrasement, au terme d'une déformation plus ou moins importante, qui rendait en tout cas illusoire tout calcul de contraintes. A titre documentaire on a joint en annexe un graphique donnant l'évolution de la force verticale appliquée en fonction de la déformation enregistrée.

c) - Afin de sonder l'influence de la géométrie et de la cinématique imposées au système, quelques essais complémentaires ont été réalisés. Le premier exprime l'influence de la hauteur de l'échantillon sur la forme et le niveau de la rupture (le matériau a été choisi de telle manière que son comportement soit particulièrement net :  $w = 12\%$ ,  $T_0 = 270 \text{ tm/m}^3$ ,  $\sigma_\ell = 0$ ). Des différences notables observées, on conclut naturellement que l'influence des extrémités sur le comportement de l'échantillon s'accroît nettement quand leur espacement diminue relativement à son rayon (cf en annexe III-B-4). On pourrait en déduire une méthode pour repérer la qualité des têtes d'échantillons : moins leur hauteur relative interviendrait dans leur comportement, meilleure serait la tête.

L'étude présente s'est affranchie d'une certaine manière de ces conditions expérimentales, en se fondant sur une série d'essais identiques, où se retrouvent donc toujours les mêmes sources d'erreurs et d'incertitudes. Les résultats proposés le sont donc sous-entendu, "à essais constants".

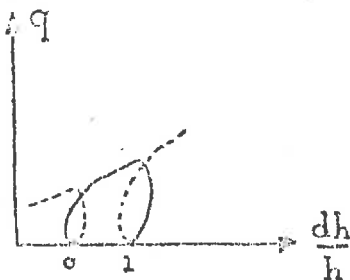
---

### III - C DEGRE D'IRREVERSIBILITE DES DEFORMATIONS IMPOSEES A UNE ARGILE PAR L'APPLICATION DE CHARGES OEDOMETRIQUES PROGRESSIVEMENT CROISSANTES.

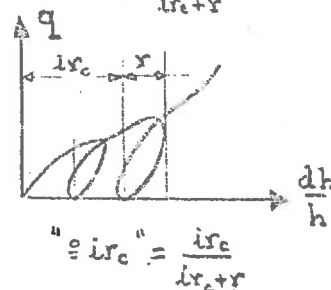
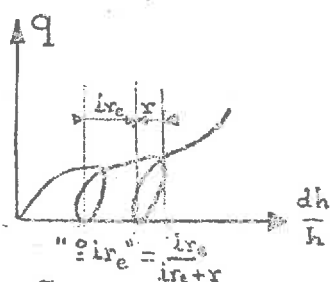
#### I - Introduction :

L'objectif de cette section est de préciser l'influence de l'écroutissage préalable d'un matériau argileux sur l'irréversibilité de ses déformations futures. Cette irréversibilité est évidemment fonction de la valeur relative que prend le tenseur d'essai (ou "d'état futur") par rapport au tenseur d'écroutissage ; valeur relative à chaque instant, car le chemin suivi par les contraintes importe autant que leur intensité maximale.

La méthode expérimentale classique, telle qu'on l'a décrite dans la section précédente (compactage par impacts suivi d'un essai triaxial), ne permet en cette direction, que des investigations limitées : on ne connaît guère, a-t-on déjà vu, les contraintes imposées au sol par un compactage dynamique, et encore moins leur évolution dans le temps. Tout au plus peut-on affirmer que l'essai triaxial soumet le matériau à des contraintes dont le chemin n'est certainement pas confondu avec celui de ce compactage. Or on ne sait pas encore analyser l'influence de ce chemin des contraintes sur l'écroutissage que l'on obtient. On devra par conséquent se libérer de cette variable en donnant aux contraintes d'écroutissage et d'essai des formes identiques dans le temps. Ce que ne permet pas la méthode de compactage et d'essai triaxial employée précédemment.



On a envisagé, dans cette perspective, un système dynamique simple, dans lequel écroutissage et analyse de comportement prennent la même forme simplifiée : celle de compressions oedométriques se succédant en cycles progressivement croissants. Chaque cycle est alors compactage vis-à-vis du cycle suivant, et essai de comportement vis-à-vis du précédent, la charge s'accroissant de cycle en cycle jusqu'au palier de fin d'essai.



L'écroutissage dans ce profil de contraintes bien déterminé n'est plus fonction que du niveau de la charge atteinte, et éventuellement du nombre de cycles imposés, à ce stade. Le matériau expérimenté étant une argile de faible teneur en eau et la mise en pression se faisant à vitesse relativement lente, on est en droit de penser que sa visco-élasticité n'intervient pas en cours de chargement.

On trouvera ci-contre un rappel schématique des définitions données en fin de premier chapitre et concernant le degré d'irréversibilité, élémentaire ou cumulée, d'une déformation. La fin d'un cycle correspond à la fin de la relaxation du sol quand on supprime la charge.

## 2 - Appareillage et mode opératoire :

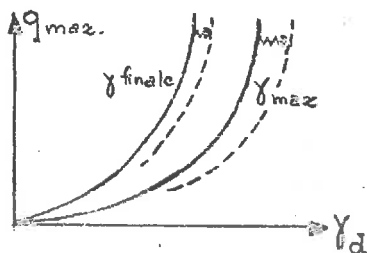
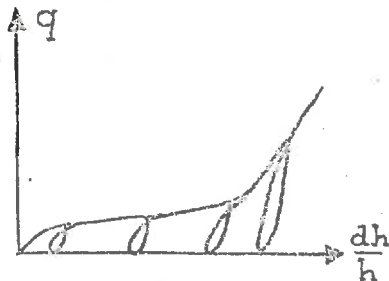
L'appareillage est donc très simple puisqu'il se compose uniquement d'un oedomètre placé sur une presse à montées lente. Le circuit de mesure des pressions interstitielles a été jugé inopérant pour les teneurs en eau "pratiques". Le cylindre oedométrique a 7 cm de diamètre et 2 cm de hauteur, soit 38,5 cm<sup>2</sup> de section et 77 cm<sup>3</sup> de volume.

Les premiers essais portaient sur une argile jaune très sensible disposée dans le moule oedométrique sans compactage préalable, à 0 puis à 8 % de teneur en eau. Une deuxième série d'essais a ensuite été menée sur une argile grise semblable à celle du chapitre précédent, prise à des teneurs en eau de 11 et 14 %, et compactée avant l'essai dans un moule Proctor d'où l'on extrayait l'échantillon de 2 cm x  $\phi$  7 cm.

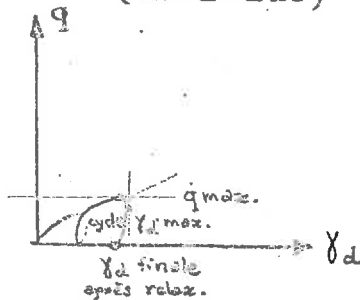
On notera qu'après suppression de la charge oedométrique, donc en fin de cycle, le matériau repose pendant un temps suffisamment long pour que se produise l'essentiel de la "recouvrance différée". Divers essais ont montré que cela se produisait dans un temps relativement court, de l'ordre de 15 minutes.

### 3 - Résultats et Commentaires :

Les résultats de la première série d'essais (cf. en annexe III-C-a) ont été traduits sous forme de courbes exprimant d'abord les variations de hauteur relative de l'échantillon, puis celles de sa densité sèche, en fonction de la charge imposée par cycles successifs. Lorsque la teneur en eau était de 8 %, on a aussi tracé les variations des deux degrés d'irréversibilité en fonction de la contrainte maximale au sommet de chaque cycle. Les données et les valeurs numériques intéressantes ont été reportées en marge de ces graphiques.



(III-C-a & b) 1, 2, 3

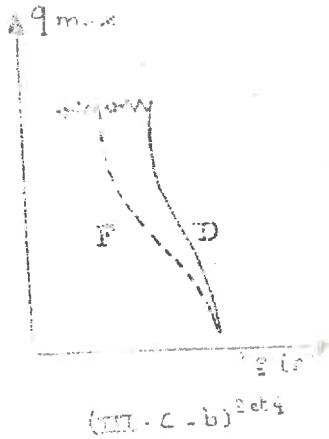


La deuxième série d'essais portant sur l'argile grise précompactée, a donné lieu à des tracés identiques (III-C-b), les variations de la densité sèche étant relevées en fonction de la contrainte maximale en cours de cycle, d'abord au maximum de ce cycle puis après annulation de la contrainte et relaxation (plus exactement recourance). On remarque que les deux courbes, croissantes évidemment, s'écartent l'une de l'autre quand  $q_{max}$  croît ; chacune des deux admet une asymptote qui correspond : pour l'une à la densité maximum qu'on obtiendrait (vu la teneur en eau) sous une charge infinie, pour l'autre à la densité après suppression de cette charge infinie. On conçoit que leur écart admette lui aussi, vers les très grandes valeurs de  $q$ , une valeur limite qui correspondrait au maximum de la rigidité (ou minimum de la déformabilité) du matériau. Cet écart ayant été reporté en tiretés sur les mêmes graphiques, il est intéressant de constater que sa valeur se stabilise très vite quand  $q$  croît, et ne tend plus alors que très lentement vers sa valeur limite.

La série des essais se terminant sur une suite de cycles qui se succèdent à charge égale, on peut juger de son effet sur la densité ou la déformation du matériau : c'est ainsi que la densité sèche s'accroît quand le nombre de cycles augmente, mais elle tend rapidement vers une limite. On pourrait imaginer ainsi de tracer deux courbes qui viendraient compléter les précédentes en traduisant les variations des densités maximales et en fin du dernier cycle, à l'issue d'un grand nombre de cycles identiques, en fonction de la charge maximum imposée (courbes en tiretés en III-C-b, sur les graphiques  $\gamma_d - q_{max}$ ).



Si l'on veut donner au sol une certaine densité sèche, on peut ainsi comprendre qu'une série de cycles identiques sans charge reliée donnera le même résultat qu'une charge plus importante mais unique. Ce qui est vrai de la densité ne l'est pas forcément pour toutes les propriétés mécaniques du sol, et rien ne permet encore d'affirmer que l'équivalence vaut aussi pour l'écrasement d'un matériau, dans son sens le plus général.



Sur les mêmes graphiques (III-C-b) et dans des axes "  $q$  -  $q_{max}$  ", ont été tracés les variations des deux degrés d'irréversibilité élémentaire ou cumulé, en fonction de la charge maximale ou sommet du cycle. Le degré d'irréversibilité élémentaire décroît de manière continue vers 0, alors que le degré d'irréversibilité cumulée semblerait osciller faiblement avec une amplitude décroissante et sur une longue période autour d'une position moyenne limite correspondant aux formes caractéristiques. Deux systèmes de courbes ont été tracés : en trait fort, marqués D; celles qui correspondent à la fin du cycle aussitôt que la charge a été supprimée et avant que la recouvrance différée n'ait cours au temps de  $\sigma_1$  premier en tirée, marqués F, celles qui donnent les variations du degré d'irréversibilité, après recouvrement complet de la recouvrance. On peut faire la même constatation en montrant sur l'importance d'une succession de cycles : les courbes à leur effet sur le degré d'irréversibilité de formation est le même que celui d'un seul cycle, de valeur un peu plus élevée.

On peut aussi se demander si la densité sèche du sol, en fonction de la charge maximale ou de la magnitude du cycle, en la même le même effet sur le degré d'irréversibilité de formation de la contrainte d'écrasement. On a vu que la densité sèche varie avec l'importance de la charge maximale, mais on ne sait pas si elle varie aussi avec la magnitude du cycle. On peut se demander si la densité sèche est la même pour un cycle de charge maximale donnée, quelle que soit la magnitude du cycle. On peut aussi se demander si la densité sèche est la même pour un cycle de charge maximale donnée, quelle que soit la magnitude du cycle.

#### 4. Critiques, Conclusions et Perspectives

Les réserves que l'on peut faire portent essentiellement sur l'état très particulier des contraintes appliquées (une seule dimension suffit à traduire la charge odométrique) et sur l'hypothèse simplificatrice selon laquelle la viscosité n'intervenait que de manière négligeable dans la loi de comportement du matériau. Le problème réel est beaucoup plus complexe si l'on veut exprimer le "° d'irréversibilité" des déformations imposées à un sol compacté selon les méthodes habituelles, par un état de contraintes comparable à ceux qu'il rencontrera dans son avenir. Le nombre des variables et paramètres intervenant dans son expression devient en effet trop important pour qu'on puisse "s'en sortir" sans donner aux contraintes "d'écroutissage" et "d'état futur" la même forme ou le même chemin dans le temps (Cf. Chapitre I).

On imagine bien cependant le parti qu'on peut tirer de cette notion d'irréversibilité des déformations pour la définition de l'écroutissage d'un sol. En supposant que l'on connaisse les directions et intensités des déformations futures (éventuellement déduites des contraintes correspondantes si on les connaît et si on sait écrire la loi rhéologique du matériau), on pourrait chercher à définir un champ de contraintes "d'écroutissage", c'est-à-dire un compactage, tel que le degré d'irréversibilité des déformations (pour chacun des termes du tenseur) soit minimal.

Le degré d'irréversibilité accèderait ainsi au rang de critère d'écroutissage : l'écroutissage sera parfait dans la direction considérée, si dans cette direction  $\frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} = 0$  ; partiel, si  $\frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \neq 0$  ; nul, si  $\frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} = 1$ . Il resterait à vérifier le postulat qu'on admet alors implicitement, et selon lequel l'optimum des propriétés mécaniques d'un sol coïncide, pour une sollicitation donnée, avec le maximum de la réversibilité de déformations imposées par cet état de contraintes (ou minimum de l'irréversibilité). La seule exception semble concerner, pour le moment, le mode de rupture ou le comportement du matériau sous grandes déformations qui ne s'améliore pas nécessairement en même temps que la rigidité, la "résistance mécanique", la limite "élastique", ou autres qualités mécaniques (cf. III-B).



VOLUME ANNEXE A LA THESE

"CONTRIBUTION A LA DEFINITION ET A L'ETUDE  
DE L'ECROUISSAGE D'UN MATERIAU COHERENT. MODES DE RUPTURE.  
APPLICATION AU PROBLEME DU COMPACTAGE D'UN SOL."

par Jacques BELLIER

-----

I - GRAPHIQUES.

II - PHOTOGRAPHIES.

-oOo-

1



(III-A-1)<sup>1</sup>

Nature du matériau : ARGILE SILTEUSE INORGANIQUE

Lieu d'emprunt : Notre Dame de Commiers .

Limites d'ATTERBERG :

L I = 39,5 %

L P = 17,8 %

I P = 21,7 %

L R = 18,8 %

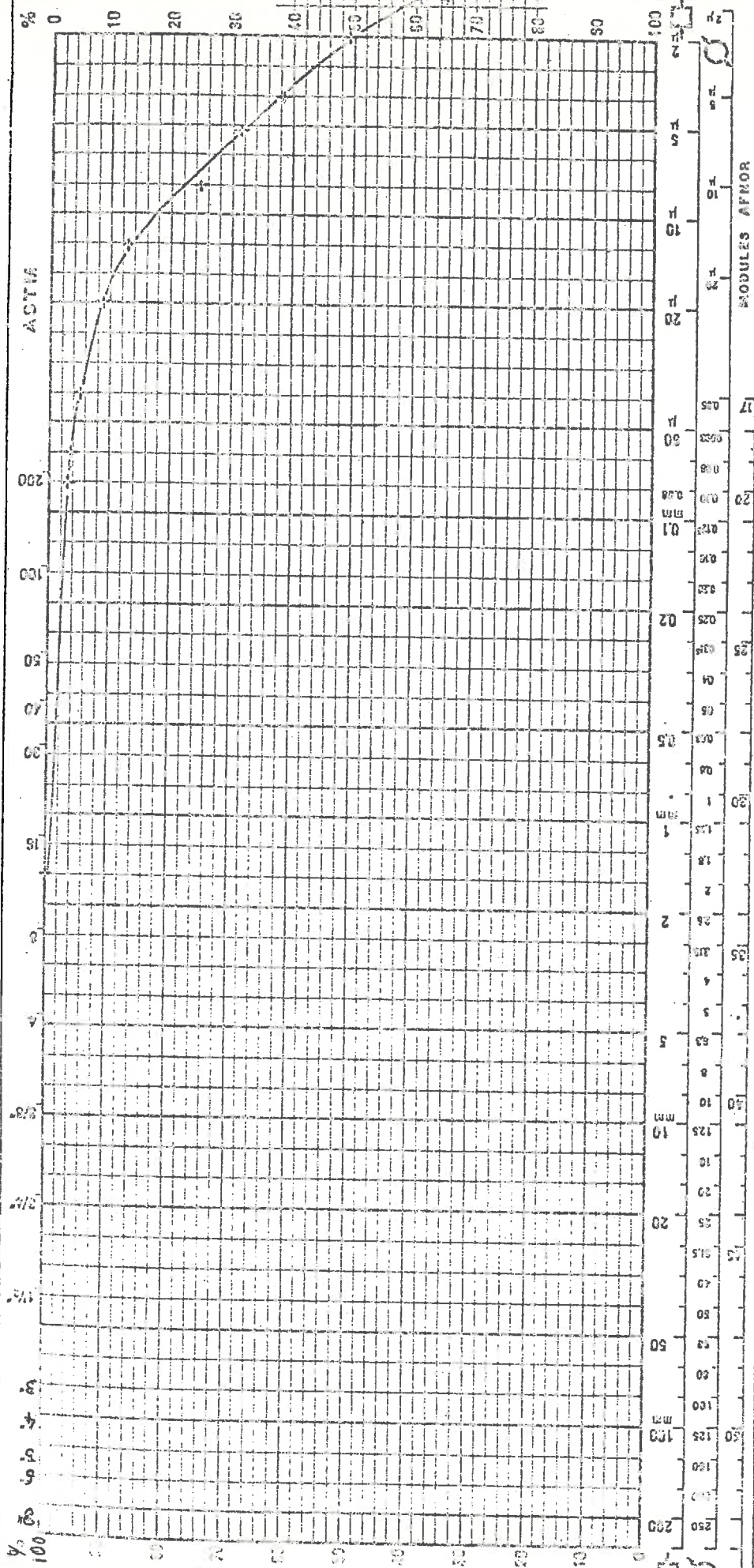
(III-A-1)<sup>2</sup>

ARGILES

SILTS

SABLES

GRAVIERES



Identification n°	CLASSE	W	LL	PI	NATURE - REMARQUES
Argile	Arg. Dune de				
					2,2 g de résidu sur 100 g
					de solution tamisé à 80 µm
					1,5 g de 1 à 2 mm
					Remarque en note 12

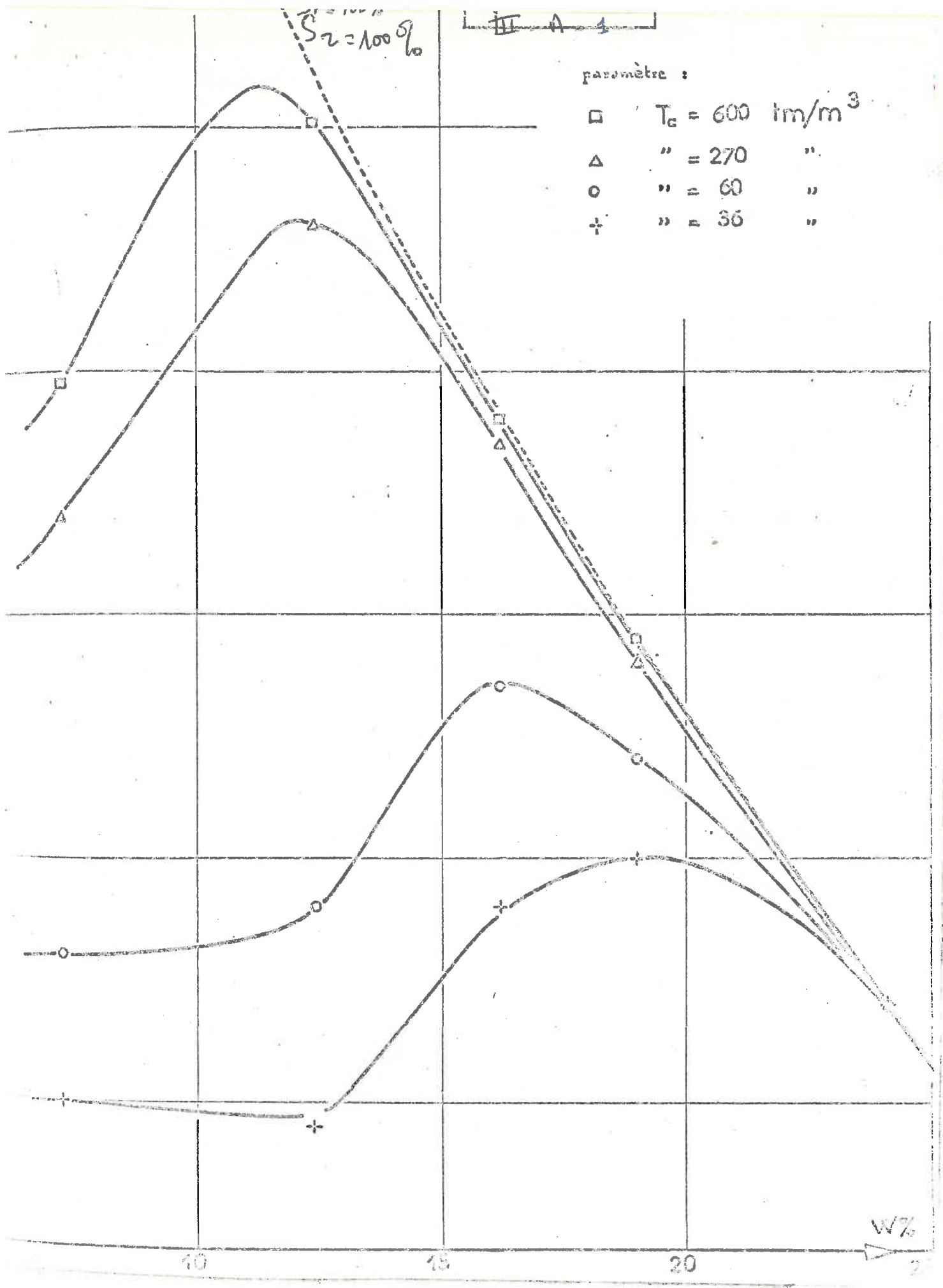
100% < 4.5 mm
ANALYSE GRANULOMETRIQUE
5352

$S_2 = 100\%$

III A 1

paramètre :

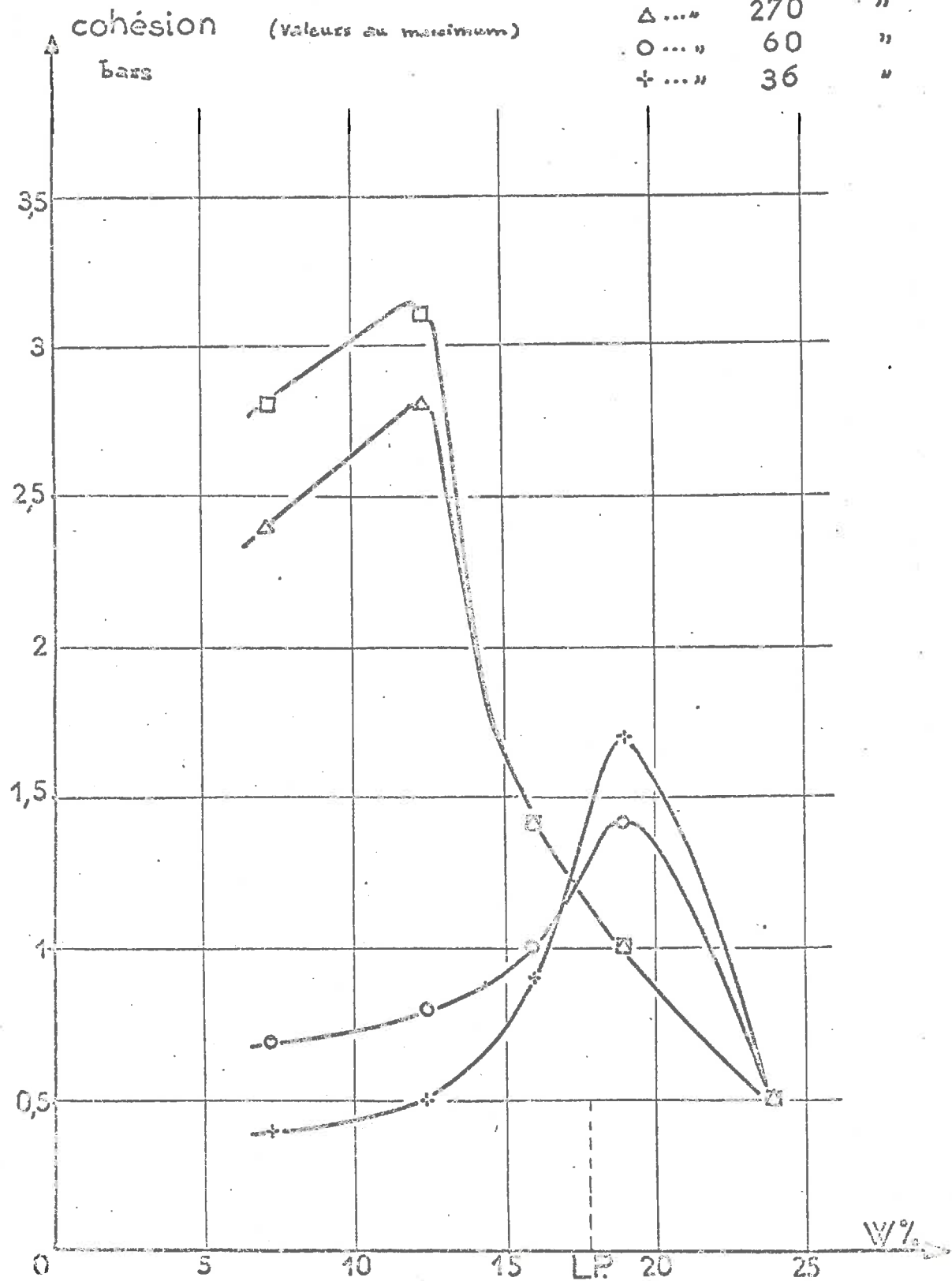
- $T_c = 600 \text{ tm/m}^3$
- △ " = 270 "
- " = 60 "
- ÷ " = 36 "



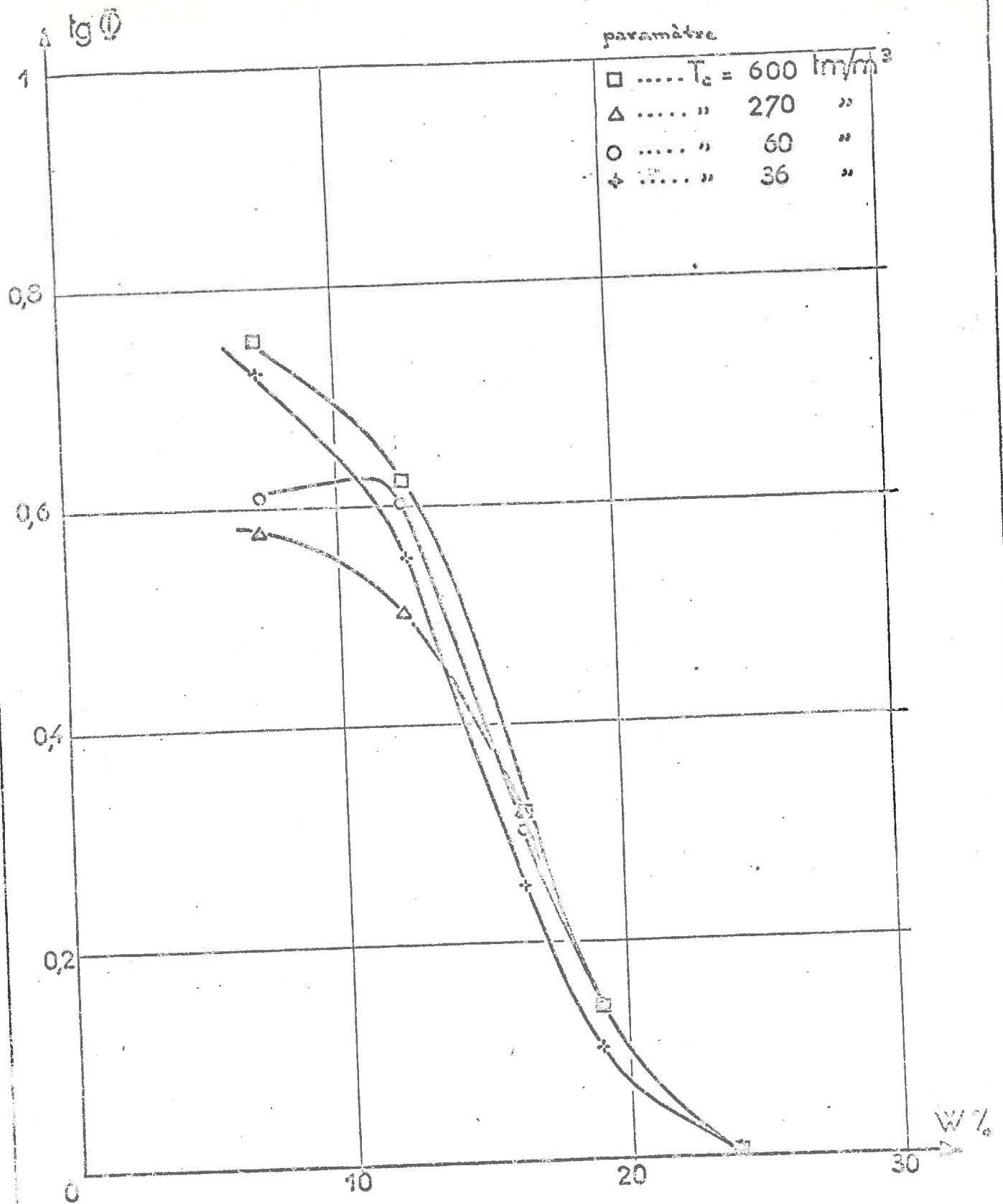
(III-B-2)<sup>11</sup>

paramètre

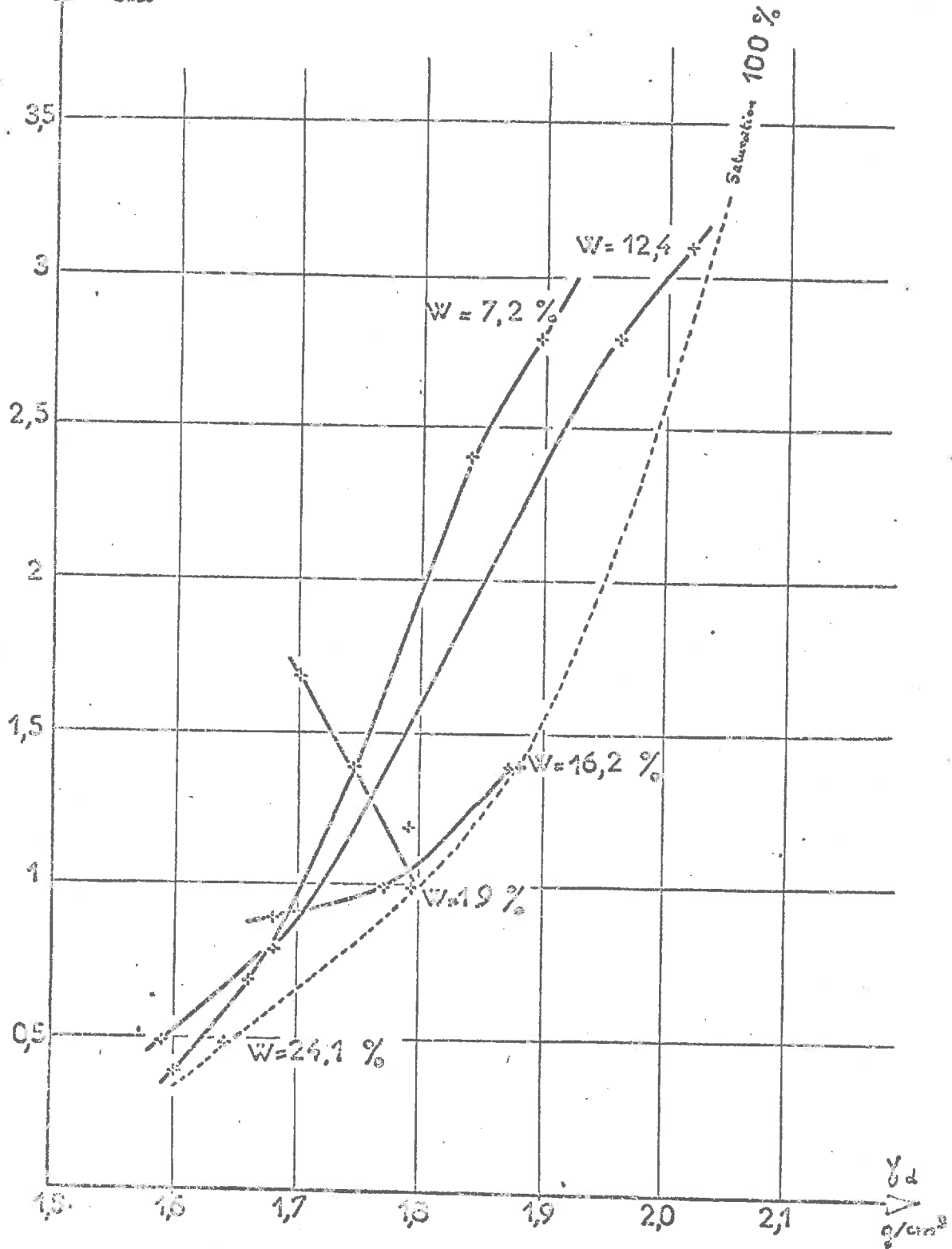
□ ...  $T_c = 600$   $\text{lm/m}^3$   
△ ... " 270 "  
○ ... " 60 "  
+ ... " 36 "







cohésion (au niveau du maximum)  
bass



tm/m <sup>3</sup>		To = 36		Tc = 60		Tc = 270		Tc = 600	
		maxi.	résid.	maxi.	résid.	maxi.	résid.	maxi.	résid.
=7,2	Y <sub>d</sub>	1,6		1,66		1,84		1,89	
	c	0,4	0,4	0,7	0,35	2,2	1,8	2,4	1,4
	tgφ	0,72	0,60	0,60	0,60	0,55	0,60	0,75	0,65
	Sr	27,8 %		31%		40%		44%	
=12,4%	Y <sub>d</sub>	1,59		1,68		1,96		2,02	
	c	0,5	0,5	0,70	0,70	2,3	0,75	3,1	0,80
	tgφ	0,49	0,49	0,55	0,55	0,52	0,70	0,62	0,70
	Sr	48%		55%		90%		99,5%	
=16,2%	Y <sub>d</sub>	1,63		1,77		1,88		1,83	
	c	0,9	0,9	1	1	1,4	0,6	1,4	
	tgφ	0,25	0,32	0,32	0,32	0,30	0,36	0,33	0,33
	Sr	72%		83,5%		100%		100%	
=19%	Y <sub>d</sub>	1,70		1,74		1,78		1,78	
	c	1,7	1,7	1,4	1,4	1	1	1	1
	tgφ	0,11	0,11	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	Sr	86,5%		94,5%		100%		100%	
=24,1%	Y <sub>d</sub>	1,64		1,64		1,64		1,64	
	c	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	tgφ	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sr	100%		100%		100%		100%	

Y<sub>d</sub>=densité sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; c=cohésion (g/cm<sup>2</sup>) ; Sr=degré de saturation (%)

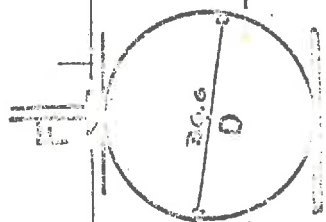
W=teneur en eau (%) ; Tc=énergie de compactage (kg/cm<sup>2</sup>)

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES ÉCHANTILLONS D'ARCTEN

(III-B-4)<sup>1</sup>

"Essai Brésilien"

W = 12,4 %



$T_c = 270$

$T_c = 600 \text{ tmm/m}^2$

$T_c = 60 \text{ tmm/m}^2$

$T_c = 36 \text{ tmm/m}^2$

$\Delta D, \text{ mm}$

2

1,5

1

0,5

0

$P, \text{ N}$

80

70

60

50

40

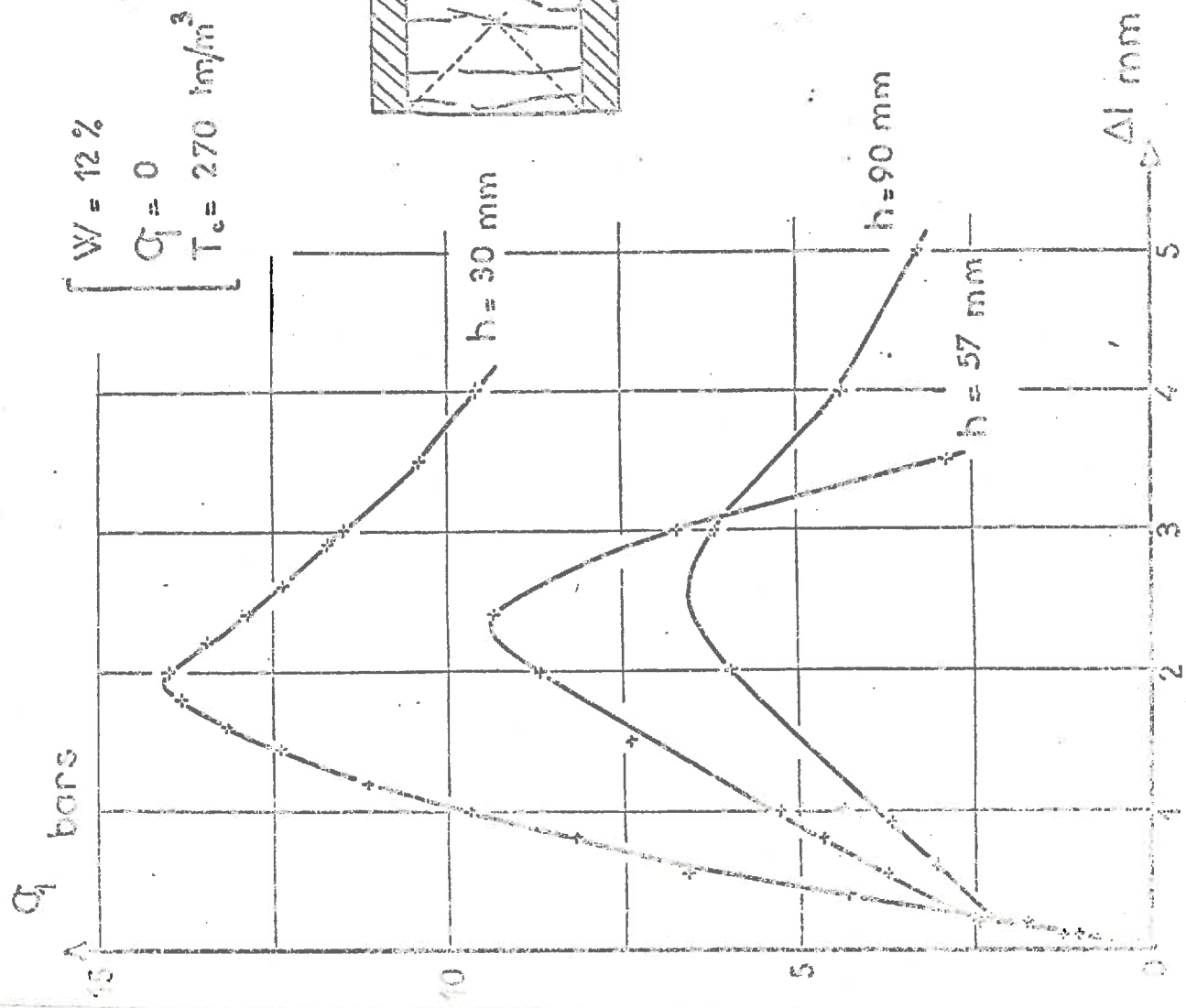
30

20

10

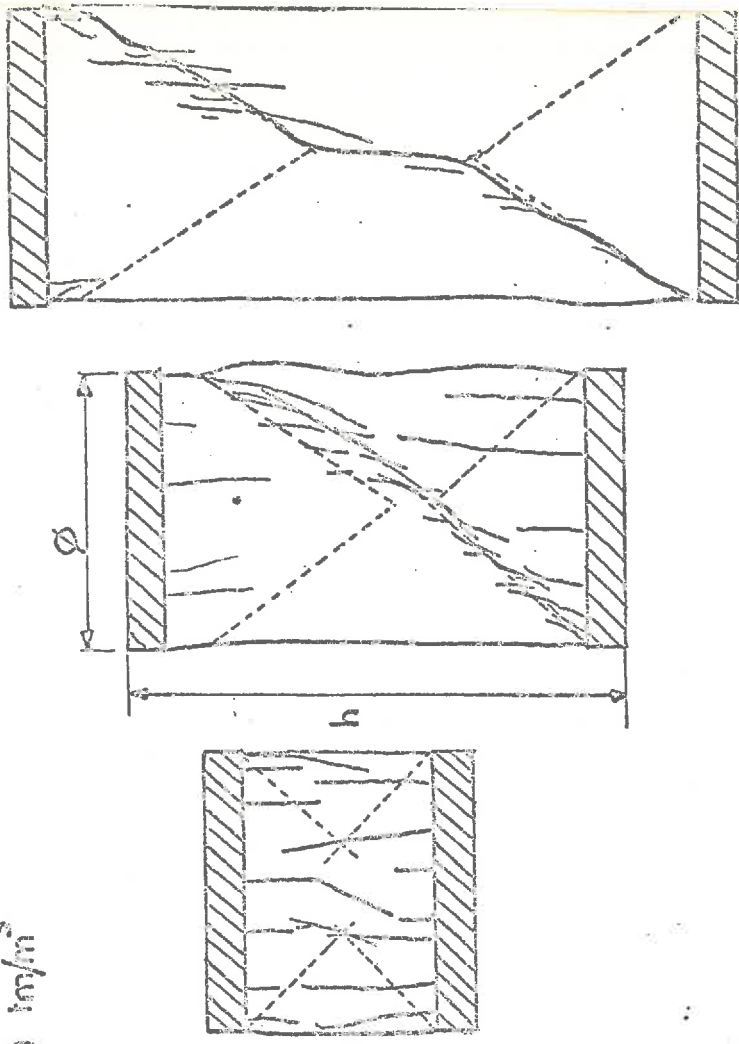
0





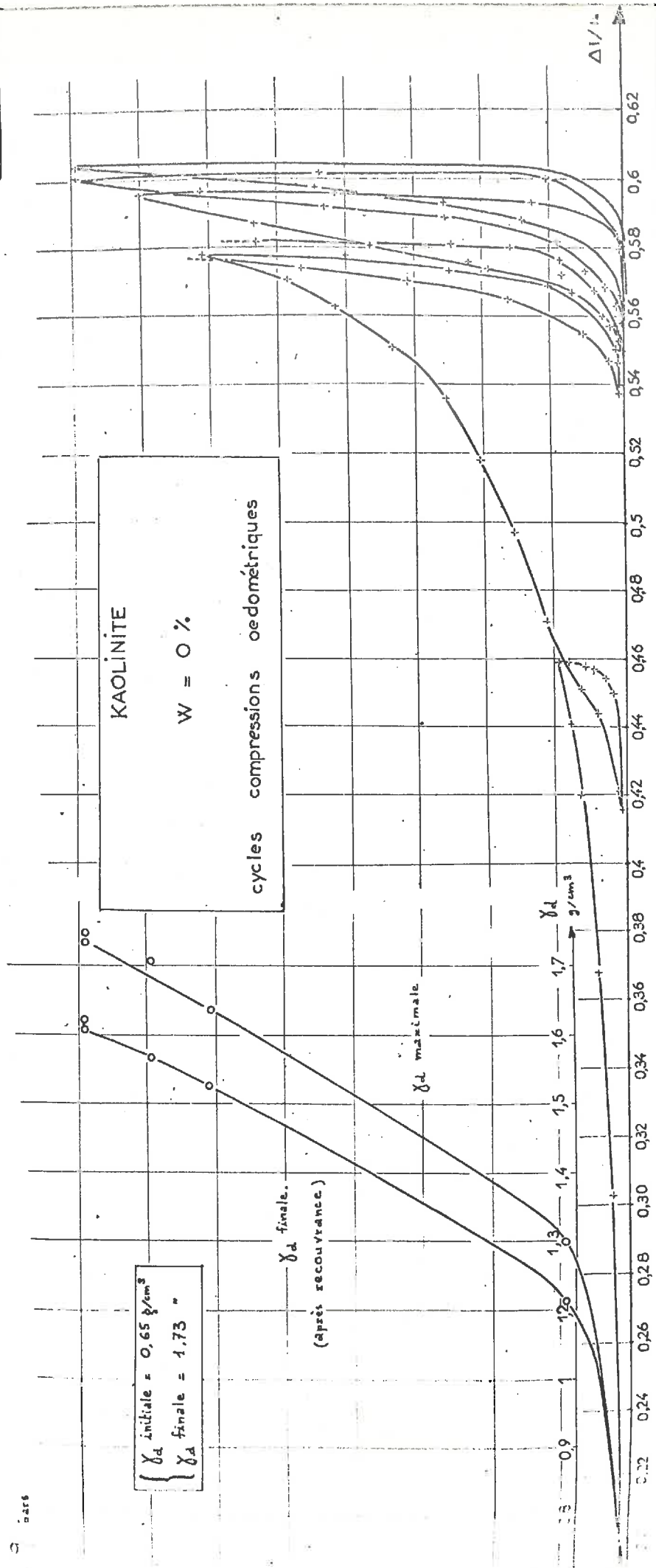
$W = 12\%$   
 $Q_f = 0$   
 $T_c = 270 \text{ kg/m}^3$

$\phi = 36,2 \text{ mm}$   
 $h$  variable



On note l'importance prépondérante  
 de l'effet des têtes sur le schéma de rupture.  
 (les têtes étaient épaissies pour réduire le frottement)

(III-C-a)



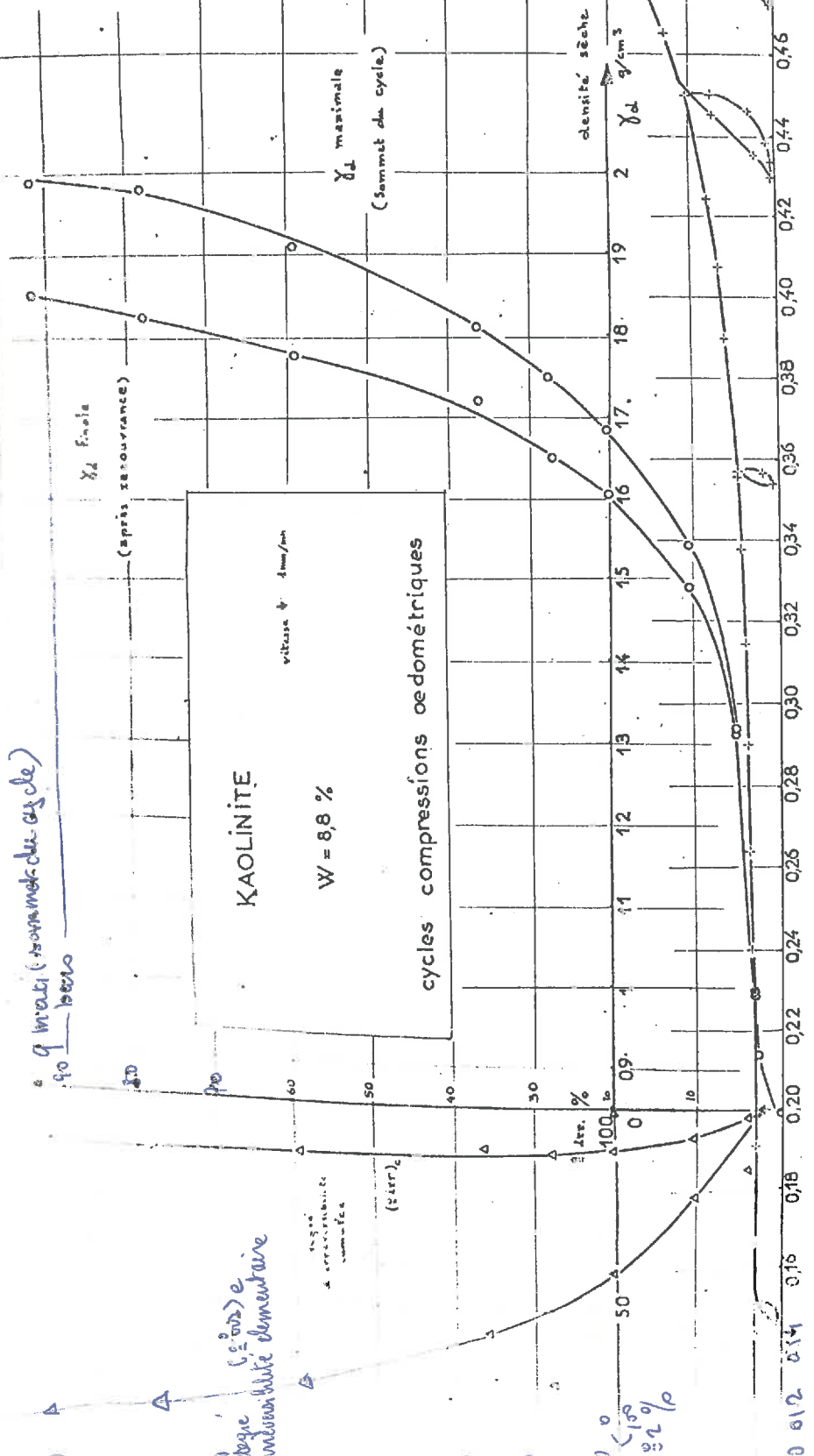
(III c. a. d.)

90 bars  
90 bars (sommet du cycle)

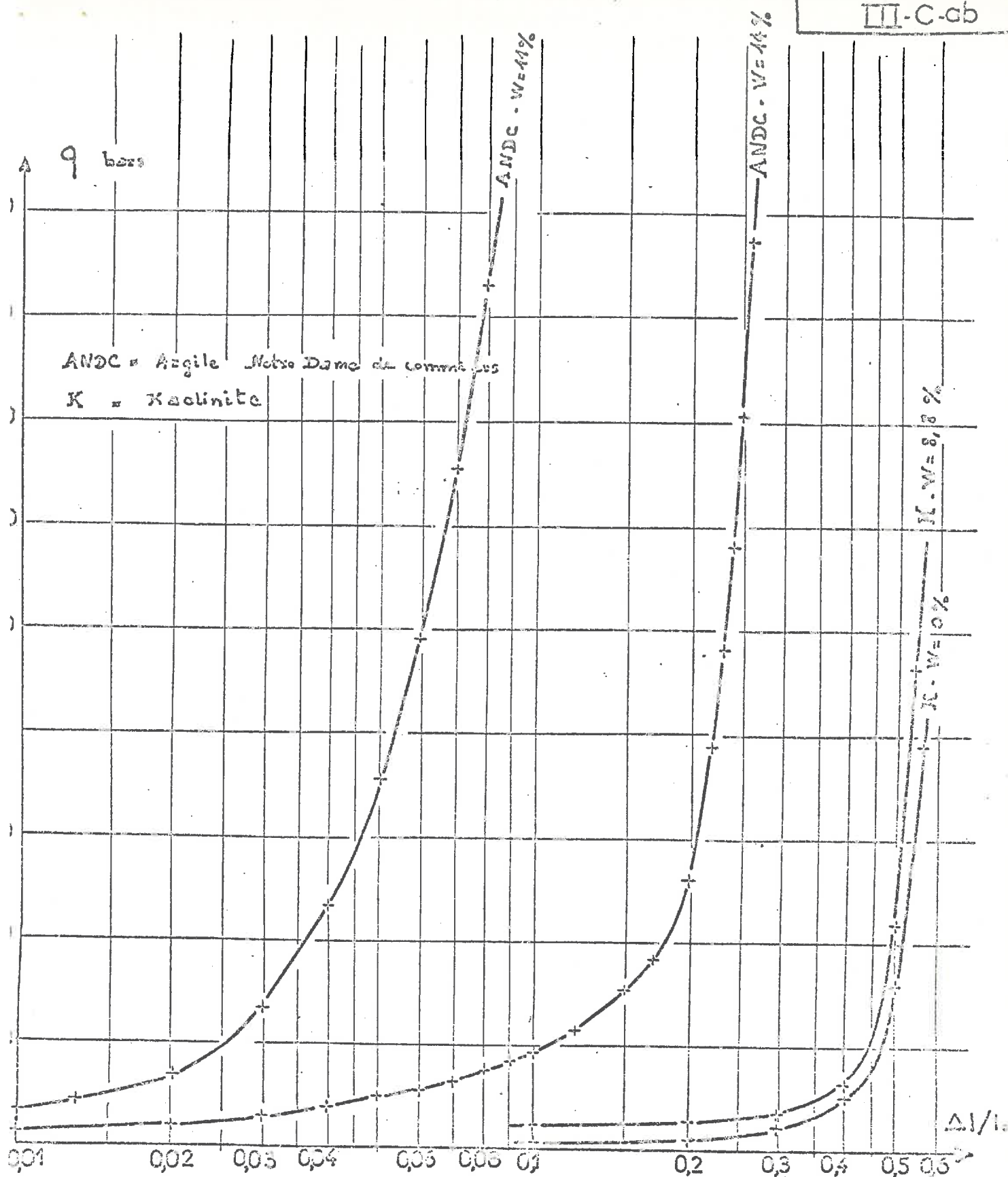
logue  
niveau de  
démontre

KAOLINITE  
W = 8,8 %  
vitesse de 4 mm/min  
cycles compressions oedométriques

$\gamma_d$  initiale = 0,85 g/cm<sup>3</sup>  
 $\gamma_d$  finale = 1,85 "  
 $\gamma_d$  maxi = 1,99 "



411



enveloppes des courbes de tassement oedométrique - Déformations (circulaires)  
En coordonnées logarithmiques.



10-6

Argile grise

Notre Dame de Commeny

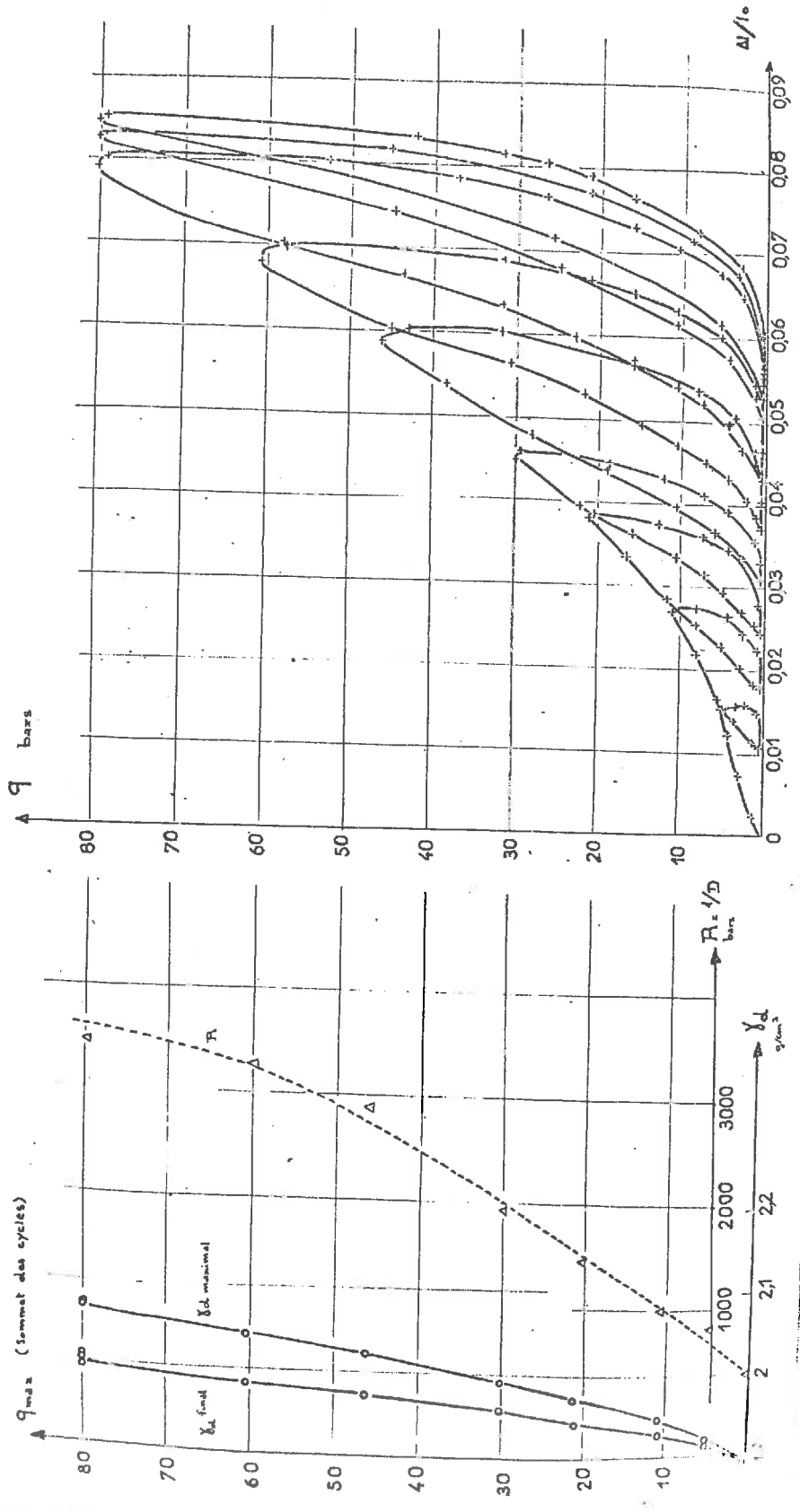
$W = 11\%$

Compacité préalable:  $R_{10}$   
(état initial)

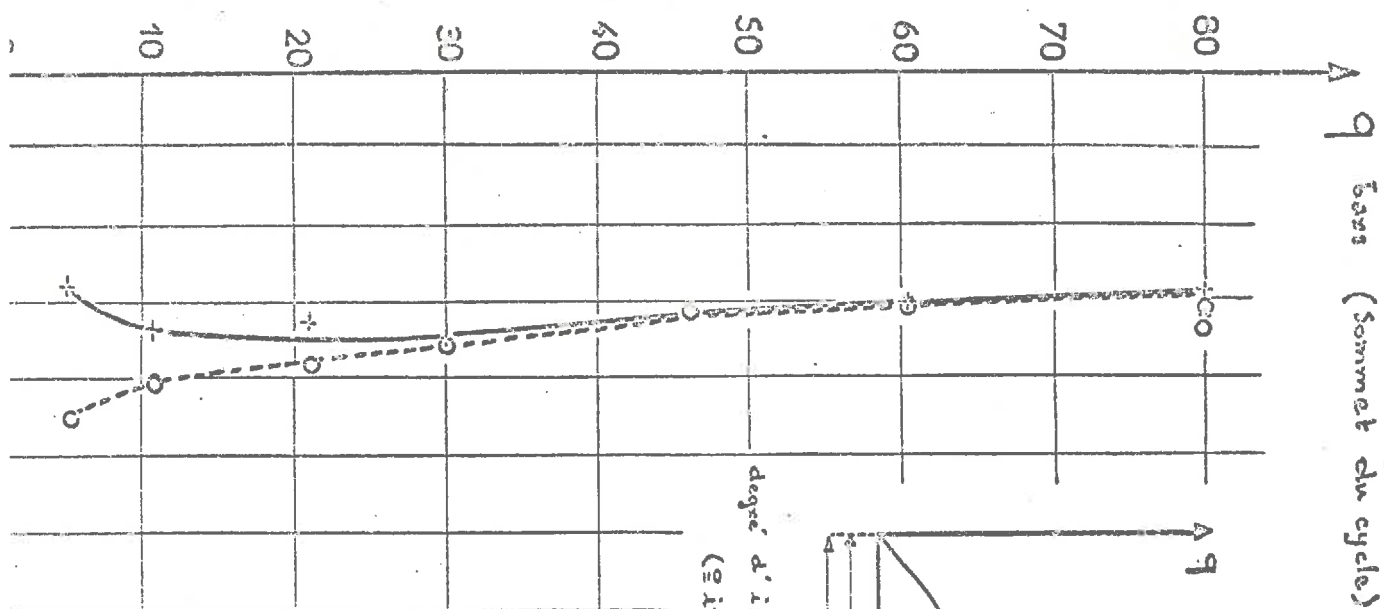
$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_d \text{ initiale} = 1.99 \text{ g/cm}^3 \\ \gamma_d \text{ finale} = 2.11 \text{ g/cm}^3 \\ \gamma_d \text{ max.} = 2.12 \text{ g/cm}^3 \end{array} \right.$

cycles compressions  
oedométriques

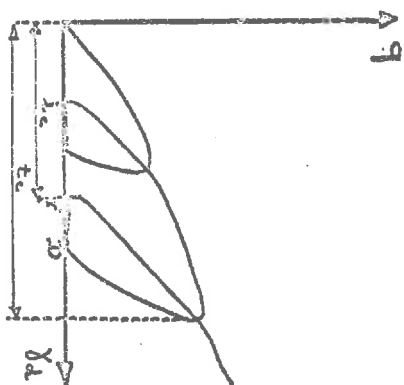
(vit. 0.5 mm/min)



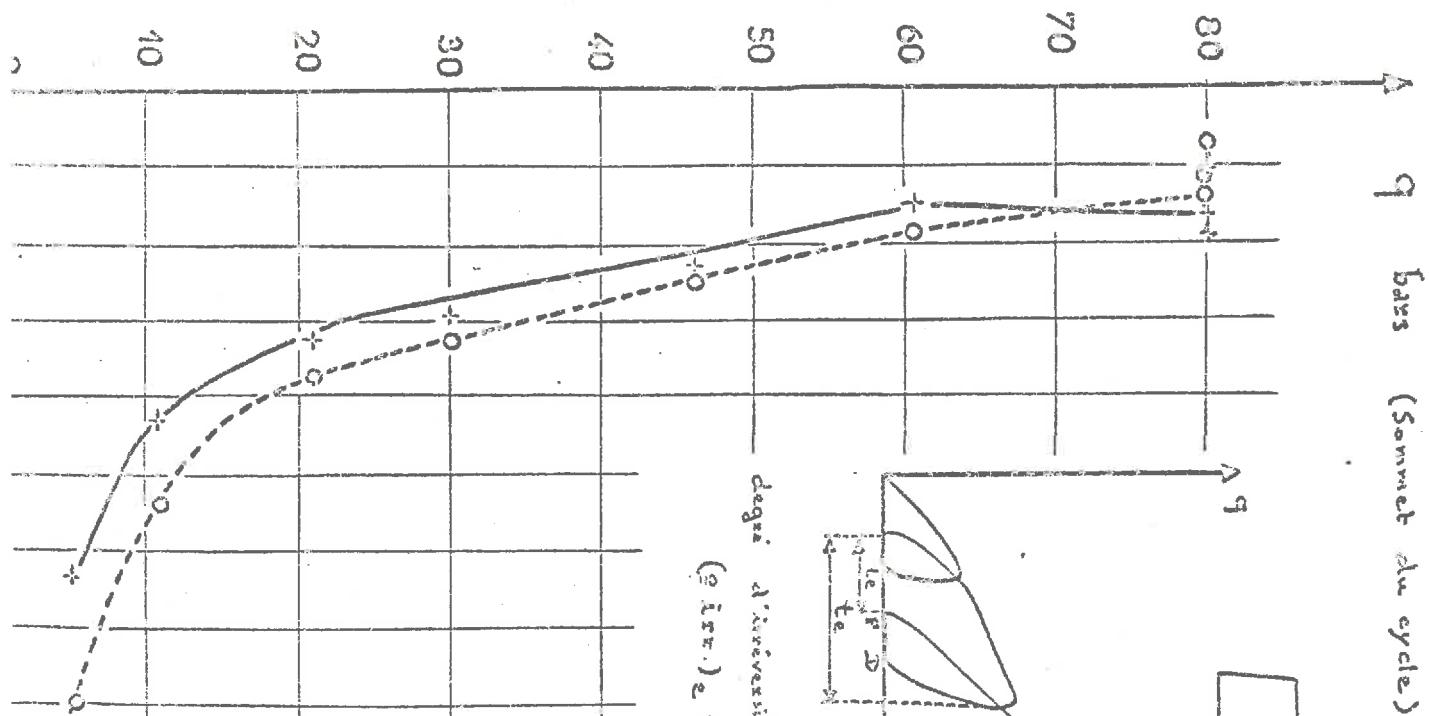
# Argile Notre Dame de Commieres $w = 41\%$



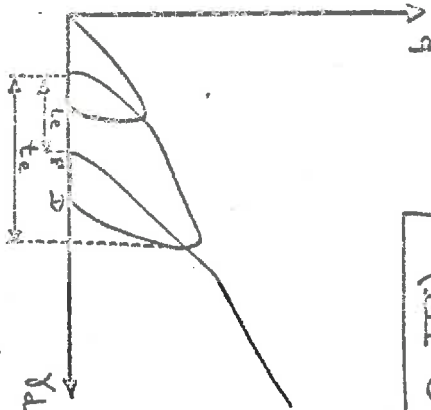
degré d'irréversibilité cumulative  
 $(\Sigma irr.)_e = \frac{I_e}{t_e}$



$(\Sigma irr.)_e$



degré d'irréversibilité élémentaire  
 $(\Sigma irr.)_e = \frac{I_e}{t_e}$



$(III-C-b)^2$

$(\Sigma irr.)_e$

$\Delta \sigma$  sommet du cycle  
(q max.)

$\gamma_d$  finale  
(après recouvenance)

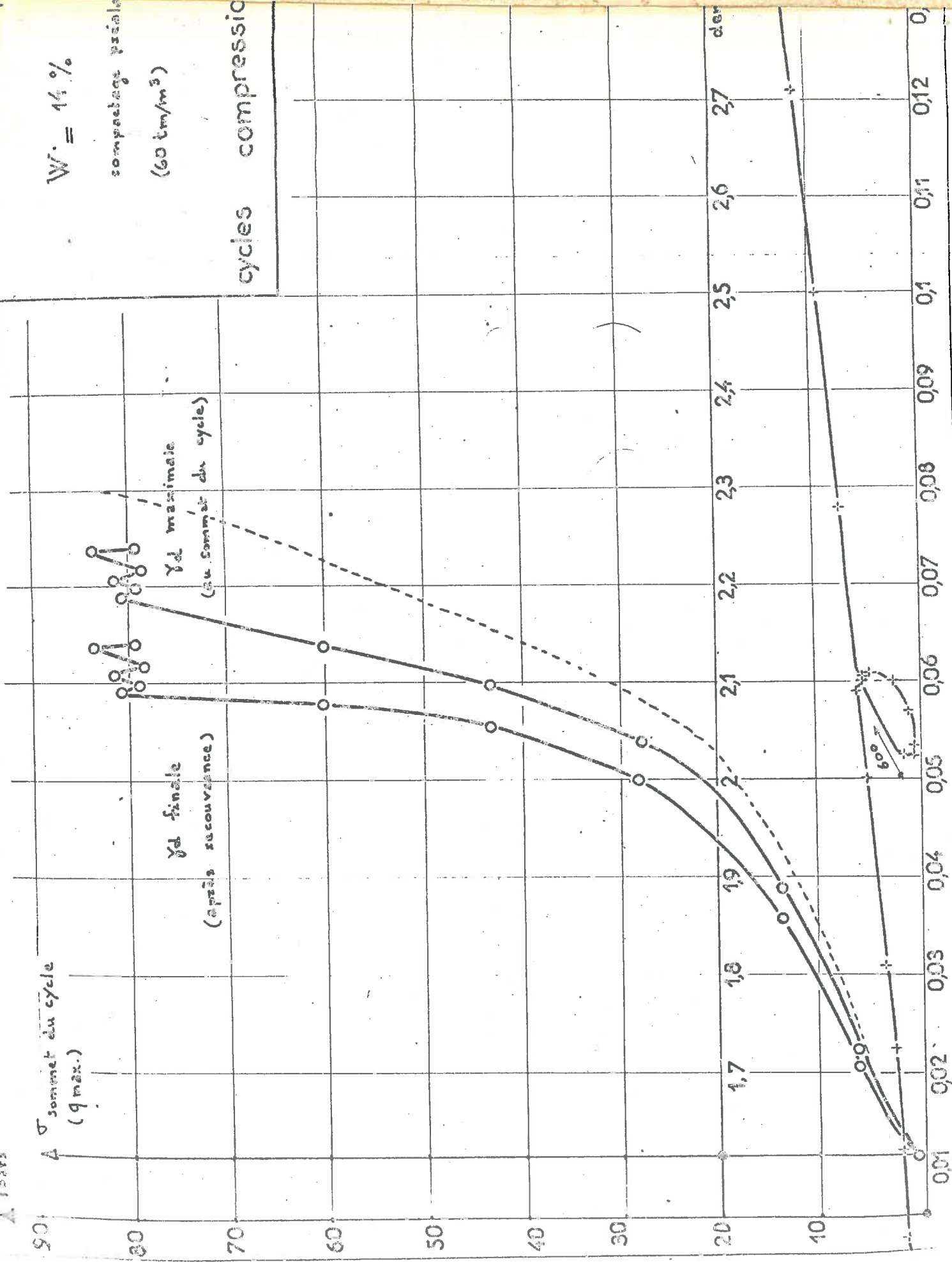
$\gamma_d$  maximale  
(au sommet du cycle)

$W = 14\%$

compaction préalable

(60 t/m<sup>3</sup>)

cycles compressio

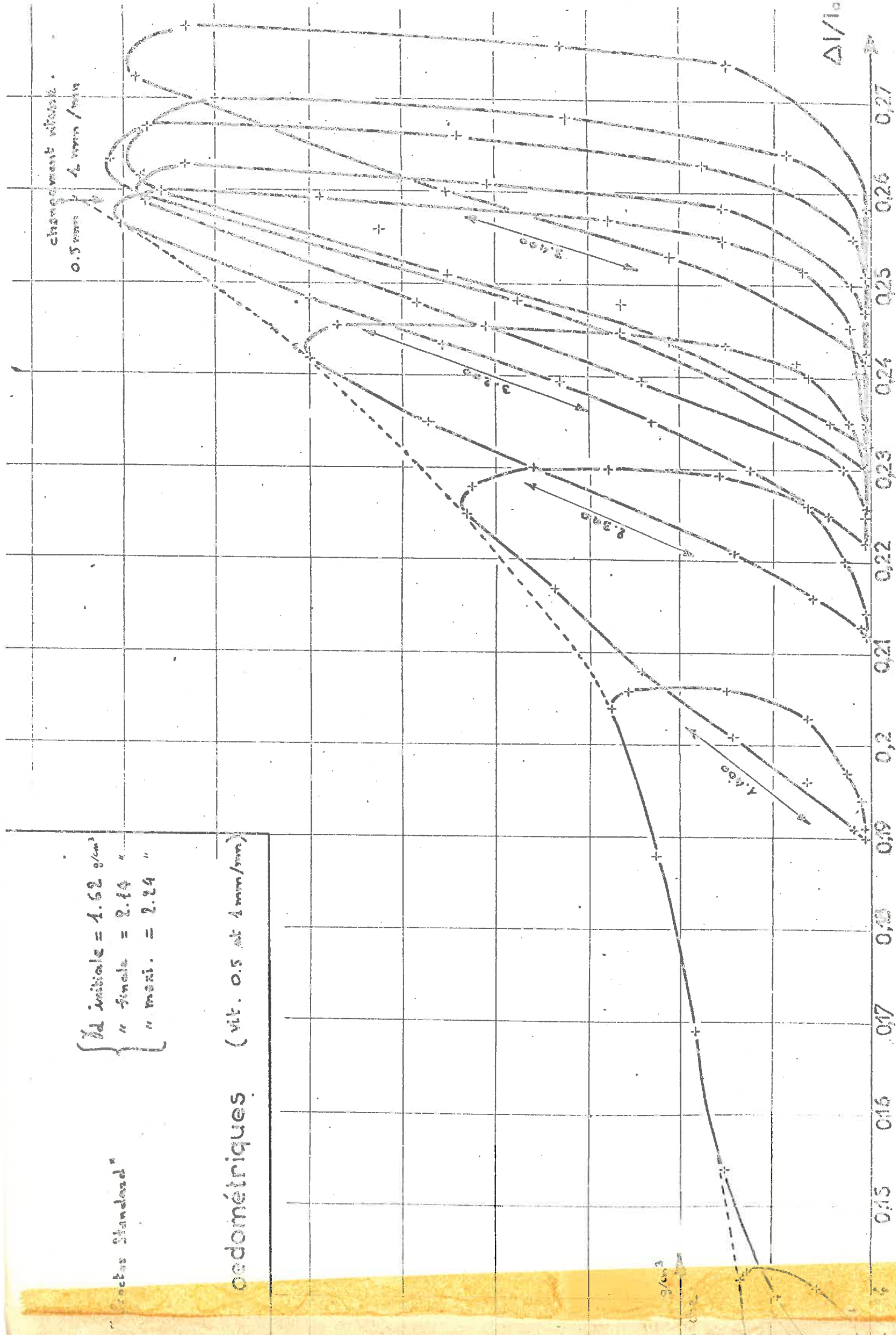


$\left\{ \begin{array}{l} \delta d_{\text{initiale}} = 1.52 \text{ g/cm}^3 \\ \text{" finale} = 2.14 \text{ " } \\ \text{" maxi.} = 2.24 \text{ " } \end{array} \right.$

Rock Standard

oedométriques (vit. 0.5 at 1 mm/min)

changement vitesse  
0.5 mm/min





Arçile Notre Dame  
de Comniers

14%

