



**HAL**  
open science

# Un nouvel essai de retrait : facteurs influençant le phénomène de retrait

Pascal Robiquet

► **To cite this version:**

Pascal Robiquet. Un nouvel essai de retrait : facteurs influençant le phénomène de retrait. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1983. Français. NNT : . tel-00520677

**HAL Id: tel-00520677**

**<https://pastel.hal.science/tel-00520677>**

Submitted on 24 Sep 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

1708

NS 11610(3)  
X  
NS 11610(3)

THÈSE

présentée

A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

pour obtenir le diplôme de

DOCTEUR-INGÉNIEUR EN GÉNIE CIVIL DE L'ENPC

par

PASCAL ROBIQUET

Ingénieur EUDIL

SUJET DE LA THÈSE :

UN NOUVEL ESSAI DE RETRAIT  
FACTEURS INFLUENÇANT LE PHÉNOMÈNE DE RETRAIT

soutenu le 1er décembre 1983

devant le Jury composé de :

M. SAUTEREY	<i>Président</i>
M. PUIATTI	<i>Rapporteur</i>
M. AUTRET	} <i>Examineurs</i>
M. BOCQUIER	
M. RAT	
M. PARRIAUD	<i>Invité</i>

15

15





Nous remercions tout particulièrement :

- Monsieur RAT, Directeur technique au L.C.P.C., pour avoir dirigé ces travaux et nous avoir conseillé sur les orientations à suivre durant la recherche.
- Monsieur AUTRET, sans qui cette thèse n'aurait pas vu le jour car c'est à la suite des conclusions de ces travaux qu'il a été décidé d'étudier le phénomène de retrait.
- Monsieur SAUTEREY, Directeur adjoint au SETRA, pour avoir bien voulu présider le jury, ainsi que Monsieur PUIATTI, le Rapporteur et tous les autres membres du jury, Monsieur PARRIAUD, Directeur du L.C.P.C. et Monsieur BOCQUIER, Professeur de pédologie à Paris VII.
- L'E.N.P.C. qui m'a accordé quatre mois de bourse pour terminer ce rapport.
- L'Etat Gabonais et, plus précisément, la Direction de l'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE d'INGENIEURS de LIBREVILLE qui a laissé à notre disposition son laboratoire de Génie civil.

Nous remercions également :

- Tout le personnel du département de "géotechnique" du LCPC Paris qui a apporté un soutien technique à tous les stades des travaux par une liaison constante entre la France et le Gabon durant les deux années passées sur le continent africain.
- Madame Millet pour avoir réalisé les études aux rayons X sur nos échantillons.
- Monsieur LEROUX et Mademoiselle CADOR pour les photos réalisées au M.E.B.
- Au L.C.P.C. de Nantes, le département de "mécanique" pour la fabrication du moule permettant la réalisation des essais de retrait sur des graveleux, et Monsieur RAIMBAULT pour avoir effectué des essais de succion.
- Le L.B.P.T., la Mission de Contrôle du Transgabonais et EUROTRAG pour m'avoir facilité les déplacements sur les chantiers gabonais et conseillé lors des prélèvements de matériaux.



## SOMMAIRE

	pages
RESUME	1
INTRODUCTION	2
CHAPITRE I : LES SOLS	
1 les sols étudiés	3
CHAPITRE II : UN NOUVEL ESSAI DE RETRAIT	
1 les essais existants	7
2 essai de retrait proposé	9
3 reproductibilité de l'essai de retrait	19
4 conclusions	22
CHAPITRE III : INTERPRETATIONS ET FACTEURS INFLUENCANT LE RETRAIT	
1 travaux antérieurs	23
2 influences; de la minéralogie, de la quantité d'argile et de la granularité sur le retrait	28
3 influence du compactage sur le retrait	39
4 relations entre les paramètres de retrait et les paramètres d'identifications	44
CHAPITRE IV : ESSAI SUR GRAVELEUX - APPLICATIONS	
1 essai de retrait sur fraction (0-10mm)	47
2 résultats obtenus à partir de l'essai	51
3 critères d'essai de retrait	57
4 conclusions	58
CONCLUSIONS GENERALES	59
ANNEXES	
annexe I matériels utilisés	61
annexe II échantillons	62
minéralogie	63
identifications et résultats des essais de retrait	64
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	101



## RESUME

Le présent rapport synthétise l'étude du retrait réalisée sur des sols équatoriaux africains.

Nous décrivons les différents types de sols étudiés et situons les lieux de prélèvements.

Nous expliquons comment nous avons été amenés à établir un nouvel essai de retrait et décrivons le mode opératoire de l'essai réalisé sur la fraction (0-1 mm). Les résultats obtenus permettent :

- . de tracer les courbes de retrait des sols, qui rendent compte de l'évolution des variations de longueur d'une éprouvette, en fonction de la perte d'eau,
- . de comparer les potentiels de retrait des sols,
- . et de définir une limite de retrait.

Nous présentons une synthèse bibliographique sur le retrait de travaux réalisés sur des argiles et sur des sols fins. Nous confirmons et avons tenté, lorsque cela était possible, d'expliquer les influences des facteurs intervenant sur le retrait, à savoir : la granularité, la densité sèche, l'intensité de compactage, la minéralogie et la teneur en argile.

Les essais réalisés sur la fraction (0-10 mm) montrent que pour rendre compte du potentiel de retrait d'un graveleux, il est nécessaire de réaliser des essais sur la fraction totale du matériau. Les résultats obtenus sur la matrice (0-1 mm) ne permettent pas de déduire le potentiel de retrait du graveleux correspondant.

Mots clés : sols et graveleux argileux - essai de retrait - limite de retrait - pourcentage de retrait (comparaison des retraits) - granularité - minéralogie.

## I N T R O D U C T I O N

De plus en plus sollicités en Afrique, les géotechniciens se trouvent confrontés aux sols tropicaux et, en particulier, aux sols latéritiques. Parmi les nombreux auteurs qui ont publié sur les graveleux latéritiques, citons Messieurs (P. AUTRET 1980) et (M. MESSOUS 1980), qui ont constaté sur divers chantiers routiers africains des conséquences fâcheuses dues au retrait des sols. Le retrait provoque des réseaux de fissurations qui engendrent des discontinuités, provoquant ainsi des chutes de résistances mécaniques et des voies d'infiltration rapide d'eau.

Afin de ralentir la dégradation des chaussées, il est généralement mis en place un système d'entretien chargé de les renforcer et de reboucher les fissures par des coulis sableux. Mais ceci n'est pas suffisant pour empêcher la fissuration ni éviter la propagation du phénomène.

Une attention constante et un entretien sérieux s'avèrent très onéreux pour les pays en voie de développement. C'est pourquoi il est souhaitable que les géotechniciens aient un essai de retrait qui permette de mieux sélectionner les sols. Jusqu'à présent, le seul essai normalisé est celui défini par Atterberg. Cependant, les résultats déduits ne sont pas intrinsèques et, par conséquent, ne permettent pas de comparer les potentiels de retrait de sols différents.

Nous avons donc élaboré un nouvel essai de retrait avec lequel on peut travailler, soit sur la fraction (0-1mm), soit sur la fraction (0-10mm) du sol considéré. Les résultats enregistrés permettent de comparer les sols en fonction de leur potentiel de retrait

Ensuite, nous étudions les paramètres qui influencent le retrait, tels que la nature minéralogique des argiles et la granulométrie. Nous verrons que les résultats obtenus apportent des solutions pratiques applicables sur les chantiers pour diminuer le retrait.

## CHAPITRE I

## LES SOLS

## 1 - LES SOLS ETUDIÉS

1.1. Les latérites

Le Gabon est un pays relativement pauvre en gisements latéritiques. Les principaux se situent à proximité de Libreville et au sud du pays. Les autres régions en sont dépourvues ou bien en possèdent de faibles (fig. : 1) (LCPC mars 1981)

Cette pauvreté en gisement latéritique est due à deux phénomènes :

- le premier est lié au type d'alternance entre les saisons. En effet, les concrétions latéritiques se développent plus volontiers durant les saisons sèches. Au Gabon, ces saisons ne sont pas suffisamment marquées pour favoriser la formation de telles concrétions.
- le second est lié à la végétation. Le territoire gabonnais est recouvert à 85% de forêt, ce qui ralenti considérablement le processus de latérisation.

Contrairement au pays de savane, nous avons des sols essentiellement ferrallitiques. La fraction argileuse est très souvent de la kaolinite plus ou moins bien cristallisée.

Une forte proportion des latérites est fossile. Actuellement, le phénomène de latérisation est réduit.

Les sols latéritiques se rencontrent sous trois types de gisements différents :

- La cuirasse latéritique" en bancs compacts quelquefois brisés sous la forme de blocs de latérite, de couleur brun rouge et d'un volume d'un quart de mètre cube.
- En morceaux de cuirasse latéritique de dimensions comprises entre 15 mm et plusieurs décimètres, mélangés à la latérite granuleuse en proportion variable. Cette forme est désignée sous le nom de "graveleux latéritiques".
- La dernière, "la latérite granuleuse" est constituée de nodules de 1 à 20 mm de diamètre, noyés dans une gangue argileuse. La proportion de chacun pouvant être variable.

Les latérites utilisées pour la présente

étude proviennent de "graveleux latéritiques" et essentiellement de "latérites granuleuses".

La pauvreté en matériaux latéritiques entraîne de sérieuses difficultés lors de terrassements routiers ou ferroviaires. En effet, lorsqu'arrive la réalisation des chaussées ou supports de ballast, il se trouve rarement de gisements latéritiques de bonne qualité à proximité des chantiers. Bien souvent il faut ouvrir des carrières de matériaux sains ou bien employer des matériaux qui seraient rejetés ailleurs si le coût est trop élevé.

1.2. Lieux de prélèvement

Pour réaliser cette étude, différents types de sols ont été prélevés sur des chantiers en cours ou récemment terminés au Gabon. Ils ont tous été utilisés lors de terrassements.

Notre plus grand champ d'action était le transgabonais, le plus grand chantier ferroviaire actuel en Afrique. Ce gigantesque ouvrage est contrôlé par la Mission de contrôle du Transgabonais (MCT).

Cette voie ferrée reliera Libreville, capitale du Gabon, à Franceville, lieu économique stratégique (fig. 2). En effet, non loin de là, dans les mines de Moanda et Mounana, sont extraits respectivement du manganèse et de l'uranium. De plus, ce chemin de fer facilitera le transport des habitants et celui des grumes.

Les travaux ont débuté en janvier 1975. Le premier tronçon Libreville-Booué est terminé depuis début mars 1983. Les terrassements du deuxième tronçon commencent. Ce projet devrait se terminer vers 1986-87.

Nous avons prélevé de Ndjolé à Booué toutes catégories de sols. Ce secteur correspond à la fin du premier tronçon, sur lequel se réalisaient les terrassements en 1982.

Au Nord-Ouest, sur la route N'toum-Cocobeach, nous avons prélevé des latérites, des limons et une argile. Ce chantier fait une quarantaine de kilomètres. Il présente peu de difficultés car il y a suffisamment de gisements latéritiques le long du tracé. La surveillance des travaux est assurée par le L.B.T.B. (Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics). A Libreville, nous avons

prélevé trois latérites dans les déblais de la voie rapide à la hauteur de la cité du 12 mars.

Quelques échantillons prélevés sur les pistes construites pour le transport du minerai de manganèse de Moanda, nous ont été fournis par le GERI : en français (Société pour le Développement, la planification régionale et l'infrastructure).

### 1.3. Natures et classement des sols étudiés

Les examens aux rayons x réalisés au L.C.P.C. montrent que la kaolinite et l'illite sont les deux argiles majeures identifiées dans les sols étudiés.

Le quartz est présent dans tous les échantillons.

Les hydroxydes de fer apparaissent sous forme de goéthite pratiquement dans tous les échantillons, accompagnée quelquefois d'un peu d'hématite ( $Fe_2O_3$ ).

Tous ces résultats confirment ce qui avait déjà été mis en évidence sur les sols gabonais; à savoir leur nature ferrallitique.

Nous avons classé les sols en cinq catégories chacune désignée par un symbole :

- Si, A et L pour les sols fins,
- G et g pour les sols graveleux.

#### 1.3.1 Les sols fins

Ces sols appartiennent à la catégorie A définie dans les Recommandations pour les Terrassements Routiers (RTR).

Le diamètre maximum des grains est inférieur à 1 mm et les passants à  $80 \mu m$  sont supérieurs à 35%.

Les sols répertoriés par le symbole (Si) sont fins et très silteux. Les indices de plasticité sont souvent inférieurs à 10. Ils sont classés  $A_1$  suivant la RTR. Ils ont la particularité d'engendrer très peu de retrait car l'eau se draine très bien durant le compactage.

Les sols répertoriés par la lettre (A) sont fins et argileux. Les passants à  $80 \mu m$  sont supérieurs à 70%.

Les indices de plasticité sont supérieurs à 20. Ils appartiennent aux catégories  $A_3$  suivant la classification RTR.

Les sols répertoriés par la lettre (L) sont des limons.

#### 1.3.2 Les sols graveleux

Le passant à un millimètre est inférieur à 100%. Ils sont répertoriés par la lettre (g). Ceux qui ont ce passant inférieur à 50% sont repérés par la lettre (G).

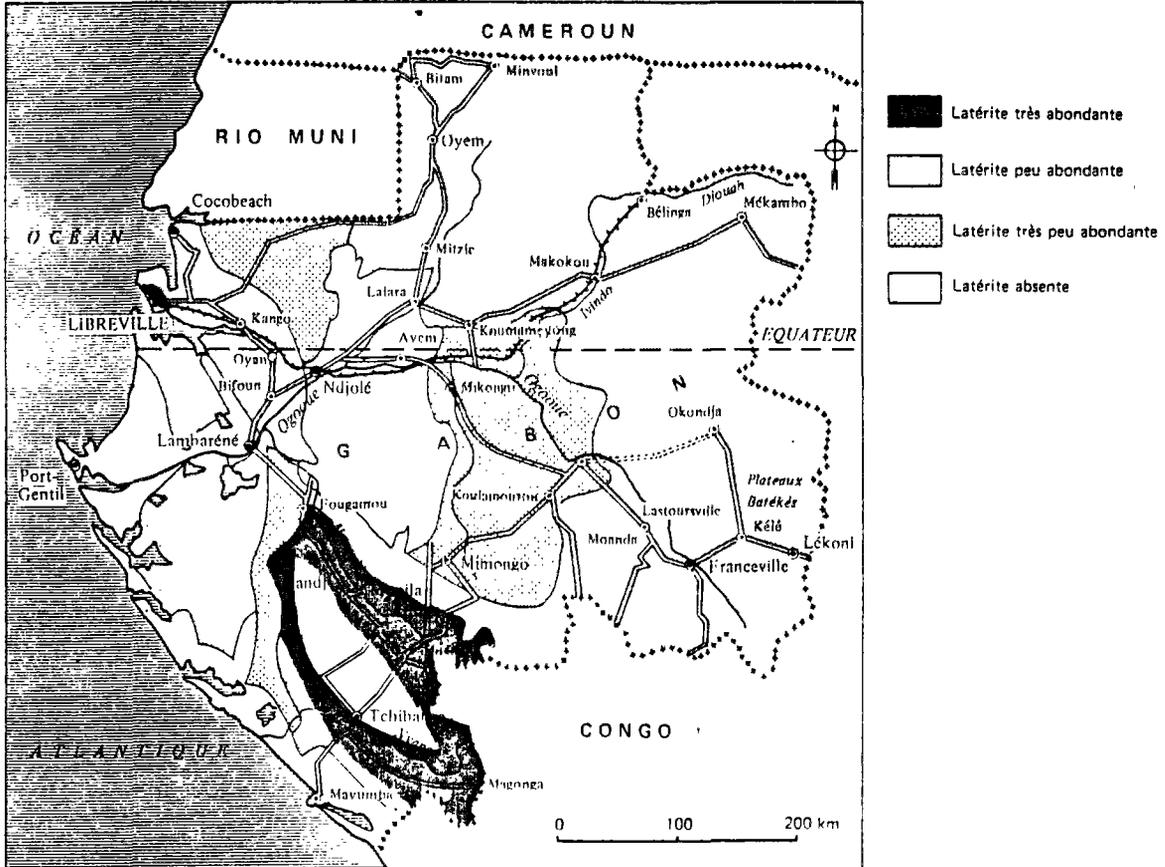


Fig. 1 - Situation des latérites au Gabon.

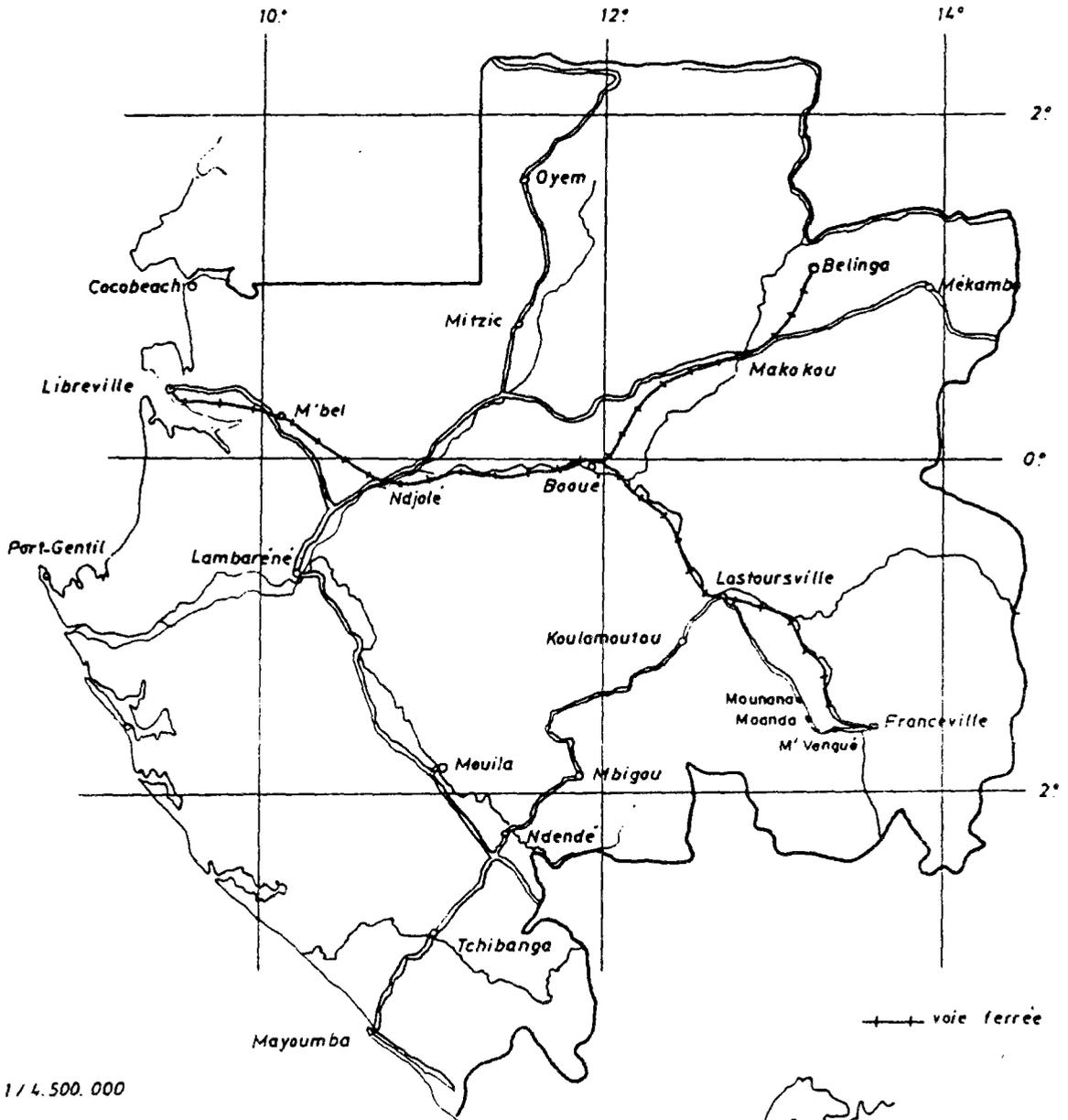


FIG. 1

## CHAPITRE 11

## UN NOUVEL ESSAI DE RETRAIT

## 1 - LES ESSAIS EXISTANTS

Jusqu'à présent, les principaux industriels qui se sont intéressés au phénomène de retrait sont les fabricants de briques, tuiles et les céramistes. Les matériaux utilisés pour réaliser ces produits finis sont fins et argileux. Ces industriels ont élaboré un appareil de mesure appelé barélatographe.

Quelques chercheurs ont étudié le retrait. Certains ont travaillé sur des mortiers de graves traitées aux liants hydrauliques (TOKLU). D'autres, que nous citerons au moment opportun, ont travaillé sur des argiles; aussi, les appareillages sont adaptés à des pâtes dont la taille des grains est inférieure à  $400\ \mu\text{m}$ , voir même à  $2\ \mu\text{m}$ . Ces appareillages ne sont pas conçus pour des laboratoires de chantier.

L'essai normalisé, utilisé dans les laboratoires des ponts et chaussées et décrit dans le manuel d'essais routiers a été établi par Atterberg. Cet essai n'est pratiquement jamais utilisé.

1.1. Le barélatographe

Cet appareil enregistre automatiquement et simultanément, par un système de balancier et de ressorts, la perte de poids et les variations de longueur de deux éprouvettes réalisées avec la fraction (0-400  $\mu\text{m}$ ) d'une pâte [ISA].

Cet essai permet de déterminer la teneur en eau optimale de travail correspondante à chaque matériau. Ainsi, il y a compatibilité entre la malléabilité nécessaire au modelage des produits finis et le taux de retrait correspondant.

Nous n'avons pas utilisé cet appareil pour les raisons suivantes :

- Il ne supporterait pas les déplacements imposés par l'avancement des laboratoires de chantiers.

- La fraction (0-400  $\mu\text{m}$ ) nous semble trop réduite.

- Les conditions de préparation de l'éprouvette ne conviennent pas à ce que l'on souhaite; en effet, aucun compactage n'est pré-

vu pour celle-ci.

- La durée de l'essai est longue car elle dépasse souvent les huit heures.

1.2. Essai de retrait volumique d'ATTERBERG1.2.1 But

Cet essai détermine une valeur de limite de retrait et un pourcentage volumique de retrait

- Définitions de la limite de retrait et du pourcentage volumique de retrait.

(PELTIER, 1969) définit ainsi la limite de retrait WR :

"La limite de retrait est mesurée en suivant la variation de volume d'un échantillon de sol en fonction de sa teneur en eau. Quand la teneur en eau diminue, le volume de l'échantillon décroît linéairement. Puis, brusquement, à partir d'une certaine teneur en eau, au moment où les grains entrent en contact, le volume cesse de décroître quand la dessiccation se poursuit. Réciproquement, quand on part de l'échantillon sec qu'on humidifie progressivement, son volume reste d'abord constant, puis brusquement, à partir de la même teneur en eau, l'échantillon commence à gonfler".

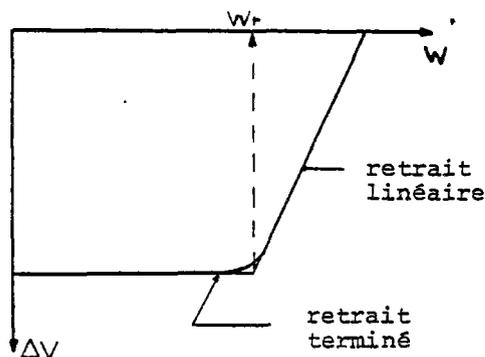


Fig. 3 : Courbe théorique du retrait

W : teneur en eau en pourcent

V : variation volumique de l'éprouvette en  $\text{cm}^3$ .

Le pourcentage volumique de retrait ( $V_s$ ) est défini comme étant le rapport entre, la variation totale de volume sur le volume final de l'éprouvette.

$$V_s = \frac{V_i - V_f}{V_f} = \frac{\Delta V \text{ totale}}{V_f}$$

$V_i$  : volume initial de l'éprouvette

$V_f$  : volume final de l'éprouvette

### 1.2.2. Principe

Le principe consiste à dessécher complètement un échantillon de matériau.

L'échantillon est préparé avec la fraction (0-400  $\mu$ m) du sol considéré. A l'origine, sa teneur en eau est proche de sa limite de liquidité.

Il est ensuite placé à l'étuve dans une coupelle dont le volume et le poids sont connus. L'ensemble est pesé et mis à l'étuve, lorsque l'éprouvette est sèche, son poids et son volume final sont déduits.

### 1.2.3. Dépouillement de l'essai

La limite de retrait (WR) obtenue est calculée de la façon suivante :

WR = (la teneur en eau initiale) - (la variation de la teneur en eau correspondant au domaine de retrait).

$$(1) WR = \frac{E_i - E_p}{P_f} \cdot 100 = \frac{(P_i - P_f)}{P_f} - \frac{(V_i - V_f)}{P_f} \cdot \gamma_w \cdot 100$$

$V_i$  et  $P_i$  : volumes et poids initiaux

$V_f$  et  $P_f$  : volumes et poids après dessiccation

$E_i$  : l'eau initialement contenue dans l'échantillon est égale à  $P_i - P_f$

$E_p$  : l'eau perdue durant la phase de retrait. On admet que l'échantillon est saturé, donc sur la partie linéaire, à toute diminution de volume correspond une perte d'eau. Au total, la masse d'eau est égale à :

$$(V_i - V_f) \cdot \gamma_w ; \gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$$

### 1.2.4. Remarques sur les résultats obtenus par l'essai d'ATTERBERG

Dès le début de nos essais réalisés avec notre nouvel appareillage de retrait, nous nous sommes rendu compte que l'hypothèse simple théorique utilisée pour tracer la courbe de retrait n'est pas toujours vérifiée.

Les courbes de retrait ne se réduisent pas toujours aux deux droites théoriques (figure 3). Nous avons répertorié quatre types de courbes (fig. 4).

Pour la courbe (B), il ne semble pas évident de déterminer une limite de retrait précise car il y a rupture de pente en fin de retrait dans la partie linéaire. Lors d'un retrait

volumique, la limite de retrait obtenue par l'expression (1) correspondrait à l'abscisse de l'intersection des droites (a) et (b).

Ceci nous amène aux remarques suivantes :

- Il y a décalage entre la limite de retrait réelle et celle obtenue en théorie.

- Ce décalage ne peut que maximiser la valeur réelle. Nous verrons au "2.5.2" que l'erreur peut atteindre neuf points.

Pour la courbe (D), nous remarquons qu'il y a également un décalage entre la valeur réelle de la limite et celle que l'on obtiendrait par l'expression (1).

En effet, si l'on se rapporte à l'expression (1), la limite de retrait égale :

$$WR_1 = W_1 - \Delta WP$$

$\Delta WP$  : la variation de teneur en eau correspondant à la perte d'eau durant le retrait.

Le décalage entre WR réelle et  $WR_1$  est le même que celui entre  $W_1$  et  $W_2$ .

$W_2$  : teneur en eau initiale correspondant à l'abscisse du prolongement de la partie linéaire du retrait sur l'axe des teneurs en eau.

Une fois encore la limite de retrait obtenue par le calcul est supérieure à la valeur réelle

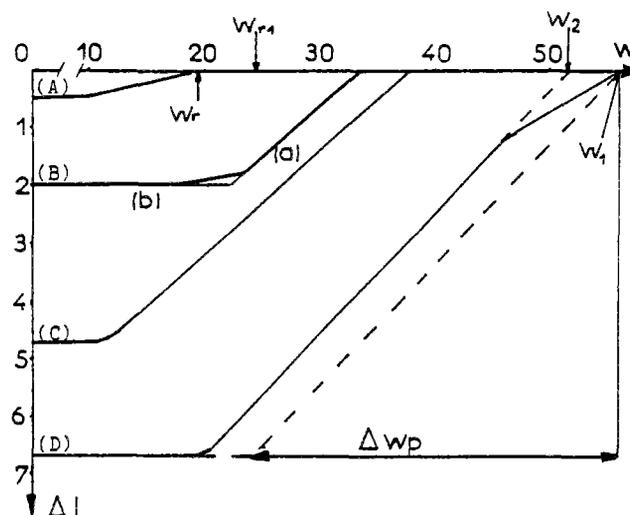


Fig. 4 Quatre types de courbe de retrait

$\Delta l$  (mm) : variation de longueur de l'éprouvette durant le séchage.

La longueur initiale de l'éprouvette est de 60 mm.

(A) Une courbe de retrait du sol S14

(B) Une courbe de retrait du sol G8

(C) Une courbe de retrait du sol G3

(D) Une courbe de retrait du sol A2

Nous avons également vite mis en évidence (fig.5) l'importance de la teneur en eau initiale de l'échantillon sur la valeur de la limite de retrait précédemment définie et sur

l'amplitude de retrait. Ces deux paramètres sont fonction croissante de la teneur en eau initiale

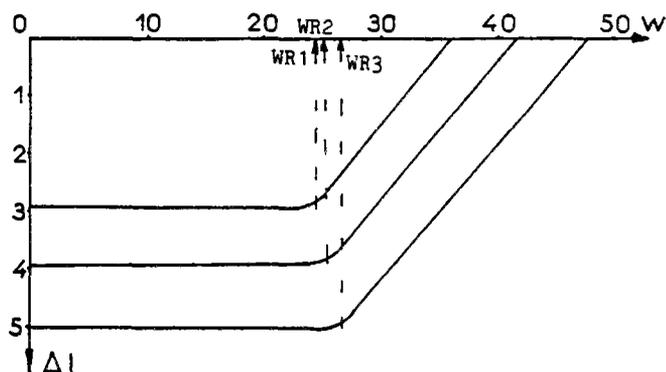


Fig. 5 Trois courbes de retrait du sol G9

Nous avons également montré que l'intensité de l'énergie de compactage influence la valeur du pourcentage de retrait et, par conséquent, la limite de retrait. Ceci sera montré au chapitre III.

### 1.3. Conclusions

L'essai de retrait défini par ATTERBERG, tel qu'il est pratiqué actuellement n'est pas entièrement satisfaisant. Il ne permet pas, sur la fraction (0-400  $\mu$ m), de comparer l'aptitude entre différents sols, ni de déterminer une limite de retrait suffisamment précise, de plus elle n'est pas une caractéristique intrinsèque du sol.

Pour comparer les paramètres de retrait entre différents sols, il est nécessaire d'établir un essai reproductible, auquel il faut imposer les contraintes d'exécution suivantes:

- Appliquer une énergie déterminée lors du compactage de l'éprouvette.
- Réaliser plusieurs essais sur un même matériau à des teneurs en eau initiale différentes, afin de rendre compte de l'évolution du pourcentage et de la limite de retrait en fonction de celles-ci.

## 2. ESSAI DE RETRAIT PROPOSE

### 2.1. Essai

#### 2.1.1 Principe

En tenant compte des conclusions précédentes, déduites des premières mises au point, nous nous sommes attachés à résoudre une à une les conditions d'essai imposées par chaque paramètre intervenant dans le processus de retrait.

Nous avons mis au point une série d'appareillages qui permet d'enregistrer simultanément les valeurs de perte de poids et de variation de longueur d'une éprouvette. Ceci, en imposant une énergie de compactage, un dimensionnement de l'éprouvette et un nombre d'essais minimum à effectuer sur un même sol à des teneurs en eau initiales différentes. Le type d'essai choisi est le suivant :

- L'éprouvette est réalisée avec la fraction (0-1mm) du sol à étudier, lorsque l'échantillon est à la teneur en eau souhaitée, nous compactons statiquement l'éprouvette dans un moule cylindrique à une contrainte de 1,2MPa

Après démoulage nous la plaçons horizontalement sur un support muni d'une plaque de verre. A chaque extrémité de l'éprouvette nous ajoutons une plaquette d'aluminium destinée chacune à recevoir une tige de comparateur.

L'ensemble de l'appareillage est compact, léger et transportable, ce qui permet de le peser et d'en déduire la variation de poids de l'éprouvette. Quant aux compacteurs, ils mesurent en permanence la variation de longueur de l'échantillon.

### 2.2. Mode opératoire de l'essai

#### 2.2.1. Préparation du sol

Tamiser le sol intéressé par voie humide, afin de prélever la fraction (0-1mm). Il y a deux avantages à procéder par voie humide :

- Le premier est du au fait que le matériau est parfaitement et régulièrement imbibé d'eau.
- Le deuxième est que l'on est certain qu'il ne reste plus de fines sur les granulats.

Laisser sécher la fraction ainsi prélevée jusqu'à obtenir une pâte, sans oublier de malaxer de temps en temps pour garder l'homogénéité de teneur en eau et de la granulométrie au sein du matériau. A partir de cette pâte, prélever six échantillons de cinquante grammes environ et les porter à des teneurs différentes. Si ceux-ci ne sont pas utilisés immédiatement, il est nécessaire de les conserver chacun séparément dans un flacon, de

sorte que les teneurs en eau respectives restent constantes et que les échantillons soient prêts à subir l'essai de retrait au moment opportun.

Pour des essais complémentaires, il est déconseillé de réutiliser des éprouvettes déjà passées à l'étuve. Nous nous sommes aperçus que ceci provoquait des dispersions dans les résultats. L'étuvage modifie parfois la capacité d'absorption de certains sols. Par mesure de sécurité, il vaut mieux prévoir du matériau supplémentaire, que de réutiliser des éprouvettes ayant déjà subies l'étuvage.

### 2.2.2 Préparation de l'éprouvette

Moulage et compactage de l'éprouvette.

Assembler le moule et la réhausse à l'aide du serre-joint. Placer l'ensemble sur le fond du mécanisme de serrage, sur lequel a été déposé un papier filtre. Ce papier facilite le drainage de l'eau soumise à la contrainte de compactage. Ajuster la partie supérieure du mécanisme de serrage sur la réhausse et serrer le tout par l'intermédiaire des deux tiges filetées et des deux écrous (photo n° 1).

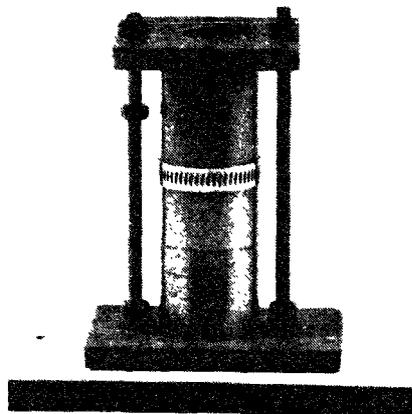


photo n° 1

Introduire une quantité d'échantillon dans le moule, de telle sorte que celui-ci soit à moitié plein après le compactage de la première couche. Suivant les sols il faut 14 à 16 grammes.

Placer le piston dans le moule et poser l'ensemble sur une presse CBR. Appliquer une contrainte de 0,6 MPa pendant une minute.

Avant d'introduire la deuxième couche dans le moule, il faut scarifier la face supérieure de la première préalablement compactée, afin d'améliorer l'adhérence entre les deux couches. La deuxième est tout d'abord faiblement compactée dynamiquement à l'aide du piston et d'une petite massette, pour que les deux faces adhèrent le mieux possible.

Pour libérer les éventuelles bulles d'air emprisonnées entre les deux couches, il est préférable de piquer l'éprouvette jusqu'à l'interface avec une fine aiguille. Enfin, compacter l'ensemble à 1,2 MPa pendant une minute trente (photo n° 2).

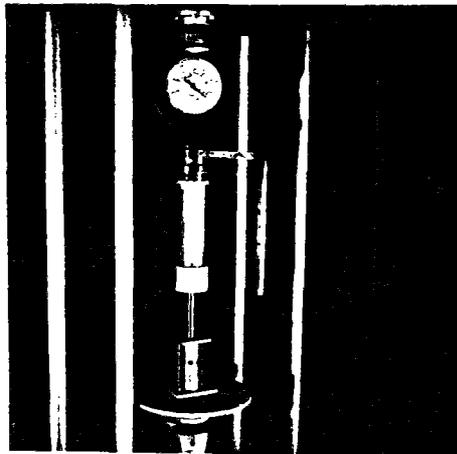


photo n° 2

Araser l'échantillon dans le moule après avoir démonté la réhausse.

Peser l'éprouvette ainsi obtenue afin de déterminer son poids humide pour déduire sa densité humide et sa teneur en eau initiale.

### 2.2.3 Essai de retrait proprement dit

Placer l'éprouvette sur la plaque de verre de l'équipage de mesure. Auparavant, il est souhaitable d'étendre un film d'huile sur la plaque afin d'éliminer toute possibilité d'adhérence entre ces deux éléments. Ajouter à chaque extrémité de l'éprouvette une plaque et appliquer une tige de comparateur sur chacune d'elles. Les comparateurs mis à zéro, l'équipage de mesure est prêt (photo 3).

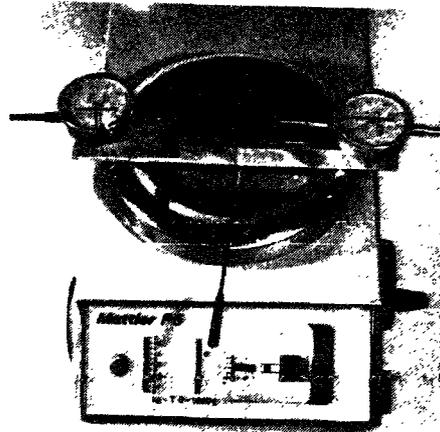


photo n° 3

Le phénomène de retrait commence. Peser l'équipage et relever simultanément la valeur de chaque comparateur à intervalles réguliers afin d'enregistrer les variations de longueur de l'éprouvette en fonction de sa perte d'eau.

Lorsqu'il n'y a plus de variation de longueur, enlever l'éprouvette de l'équipage et mesurer sa longueur finale au pied à coulisse. Enfin, la placer à l'étuve puis peser son poids sec afin de calculer sa teneur en eau initiale et sa densité sèche.

#### Remarque

-----

- Avant d'utiliser une contrainte de 0,6MPa, un temps d'une minute pour le compactage de la première couche et une minute pour la deuxième couche, nous avons effectué plusieurs essais. De façon empirique, nous avons choisi ces critères car ils permettent d'obtenir une éprouvette relativement homogène, tant du point de vue de la teneur en eau que de l'aspect, pour une courte durée de compactage.
- Les six échantillons ainsi préparés permettent de déduire la courbe de densité sèche en fonction de la teneur en eau initiale, pour le mode opératoire adopté. Il y a analogie avec l'essai PROCTOR.

Pour connaître la densité sèche de chaque éprouvette, nous pesons celle-ci après le démoulage.

Lorsque l'essai de retrait est terminé, nous pesons à nouveau l'éprouvette après étuvage. Nous obtenons le poids sec et, par conséquent, la teneur en eau initiale et la densité sèche initiale de celle-ci.

### 2.3. Interprétation de l'essai

Tracer les trois courbes :

- de densité sèche initiale du matériau fonction de la teneur en eau initiale.
- de retrait :  
variation de la longueur de l'éprouvette fonction de la teneur en eau de celle-ci.
- la courbe intrinsèque de retrait, lorsqu'il y a plusieurs essais effectués sur un même sol à des teneurs en eau initiales différentes.

En ordonnée le pourcentage de retrait fonction de la teneur en eau initiale.

Si on recherche la seule courbe, il n'est pas nécessaire de réaliser les mesures intermédiaires de pesées et de variation de longueur qui ne sont plus utiles. Cette méthode a l'avantage de ne pas mobiliser un technicien en permanence.

Les matériels utilisés pour le moulage et l'essai de retrait sont récapitulés à l'Annexe I.

#### 2.3.1. Remarques sur l'influence des variations de température sur le comportement des sols au retrait.

Au Gabon règne un climat équatorial chaud et humide. Les sols sèchent moins rapidement que dans les pays plus chauds et secs. C'est pourquoi nous avons fait subir à nos éprouvettes des variations de températures pour savoir si les résultats de nos essais de retrait sont utilisables quelles que soient les conditions climatiques dans lesquelles ils sont réalisés c'est-à-dire quelle que soit la rapidité du séchage.

Le taux d'humidité de l'ordre de 80 à 90 % étant pratiquement constant, n'ayant pas le matériel nécessaire pour le modifier, nous n'avons pas utilisé ce facteur pour augmenter la rapidité du séchage. Nous avons travaillé seulement avec les variations de température.

Nous avons fait subir aux éprouvettes des variations brusques de température de l'ordre de 25°C. Nous ne pouvions descendre en dessous de 25°C car cette température est celle que l'on obtient dans un laboratoire climatisé, la plus élevée que nous pouvions obtenir sans perturber la sensibilité du système de mesure est 50°C. La cadence des à-coups de température était tout-à-fait aléatoire quelque soit le type de matériau. Parallèlement, nous suivions sur un graphique les variations de longueur de l'éprouvette en fonction de la perte d'eau.

Durant les variations de températures, nous n'avons remarqué sur chaque matériau aucune modification sur :

l'allure des courbes de retrait, ni sur l'amplitude ou le pourcentage de retrait. Ceci avait déjà été constaté à Paris au LCPC lors des premières mises au point de l'essai.

Nous donnons un exemple de temps nécessaire, pour suivre un essai de retrait, jusqu'à ce que l'on ne remarque plus de variation de longueur de l'éprouvette. Ces valeurs ont été établies avec un degré hygrométrique moyen de 80%. Pour un sol relativement argileux à une teneur en eau de 40%, l'expérience montre qu'en réalisant l'essai entre 38°C et 42°C, il dure en moyenne cinq heures. Il est donc possible durant une journée, d'obtenir l'enregistrement de la courbe de retrait de n'importe quel type de sol.

Nous ne concluons pas que l'augmentation de température ne provoque pas de fissuration ou de désordre au sein des matériaux, mais seulement que la pente de la courbe de retrait et le pourcentage de retrait ne sont pas modifiés. Cette augmentation accroît la vitesse de séchage.

#### 2.4. Justification du choix de l'essai

- Nous avons utilisé la fraction (0-1mm) pour les raisons suivantes :

Cette fraction est plus facile à obtenir et, très souvent, est plus représentative que la fraction (0-400  $\mu$ m) préconisée par ATTERBERG. Elle contient tous les éléments intervenant dans le processus de retrait, c'est-à-dire les minéraux argileux et la partie fine du squelette. C'est cette fraction qui enrobe les plus gros éléments du squelette.

L'essai de retrait réalisé sur la fraction (0-1 mm) rend compte du potentiel de retrait des sols fins et de la matrice des graveleux. Il était cependant nécessaire de vérifier les conséquences sur le retrait de l'écroulement du matériau à 1 mm. Pour cela, nous avons réalisé un appareil permettant de travailler sur la fraction (0-10 mm). Les résultats de ces essais sont présentés au chapitre IV.

- Le compactage est statique car les dimensions de l'éprouvette ne permettent pas d'envisager un compactage dynamique comme dans le cas du proctor. Le compactage statique présente l'avantage d'être simple et rapide, mais l'éprouvette est soumise à un gradient de contrainte. Afin de réduire celui-ci, l'éprouvette est compactée en deux couches.

- Le volume de l'éprouvette est cylindrique car il offre la plus grande surface d'évaporation et une seule génératrice au support de l'éprouvette lors du séchage.

Le diamètre du cylindre est de 18mm. Les essais effectués sur des diamètres inférieurs ne permettaient pas d'obtenir une belle éprouvette cohérente et homogène. Les diamètres supérieurs augmentaient trop le gradient de teneur en eau sur la section de l'éprouvette. Le centre de celle-ci restait toujours plus humide que la zone extérieure et les bases seombaient au cours du séchage.

Le diamètre étant fixé, il fallait déterminer la longueur optimum de l'éprouvette. Il s'avère que c'est soixante millimètres. Nous aurions souhaité augmenter cette longueur pour obtenir une amplitude de retrait plus sensible, mais il fallait se limiter à une longueur inférieure à celle provoquant le fluage, sous l'effet pourtant très faible des contraintes longitudinales dues aux ressorts des comparateurs. Ce phénomène est sensible aux teneurs en eau élevées.

En augmentant trop la longueur, nous aurions également accentué l'hétérogénéité des contraintes dans l'éprouvette lors du compactage.

- Pour déterminer la valeur de la contrainte de compactage, nous avons réalisé plusieurs essais aux contraintes suivantes : 0,4, 1,2 et 2 MPa.

Lors du démoulage, les éprouvettes compactées à 0,4 MPa n'ont pas suffisamment de tenue aux teneurs en eau élevées et ne sont pas utilisables. Aux teneurs en eau faibles, l'énergie n'est pas assez élevée pour compacter convenablement l'éprouvette, il reste des vides.

Celles compactées à 2 MPa se comportent très bien. Mais nous avons cherché une contrainte plus faible qui permette d'obtenir une éprouvette homogène, même pour des teneurs en eau relativement basses qui ne facilitent pas la mise en place des matériaux.

Nous montrons au chapitre III que l'intensité de compactage n'influence pas le potentiel de retrait suivant une loi.

Empiriquement, il s'avère que la valeur moyenne de 1,2 MPa donne satisfaction, tant du point de vue de la tenue de l'éprouvette que du potentiel de retrait engendré. Cette valeur est utilisée dans les laboratoires des ponts et chaussées, pour tester à l'écrasement des éprouvettes de sols destinés à être mis en couche de forme.

#### 2.5. Dépouillement et interprétation des résultats

##### 2.5.1. Dépouillements d'essais de retrait

Dépouillons les essais effectués sur le sol g7. Nous utilisons le tableau simple d'enregistrement pour tracer une des courbes de retrait de ce sol. Pour ce faire, nous reportons successivement sur un repère (fig. 6) les points représentés par le couple ( $\Delta l$ ; Poids) correspondant à chaque mesure.

$\Delta l$  (en mm) : somme des variations de longueur de l'éprouvette, relevées sur les deux comparateurs.

Poids (en g) : poids de l'équipage de mesure muni de l'éprouvette en train de sécher.

Ce tracé durant l'essai permet de repérer sur la courbe le moment où l'éprouvette ne varie plus de longueur, de relever des anomalies ou des changements de pente et, par conséquent, de multiplier les mesures à ces moments, si cela s'avère nécessaire pour obtenir plus de précision sur le tracé de la courbe.

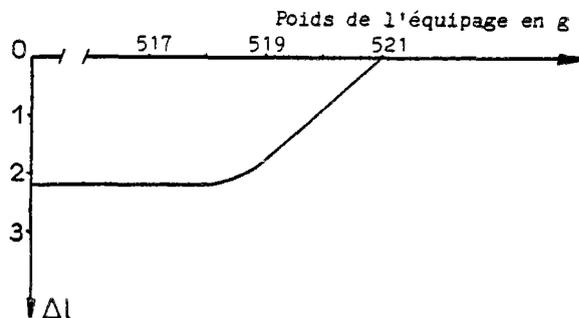


Fig. 6. Courbe d'enregistrement de la variation de longueur en fonction de la perte de poids du sol g7

On effectue les mesures jusqu'à ce que l'on n'enregistre plus de variations de longueur.

Lorsqu'à la fin de l'essai, le poids sec de l'éprouvette est connu, calculer la teneur en eau de chaque point, afin de tracer la courbe de retrait définitive, représentant la variation de longueur de l'éprouvette en fonction de la teneur en eau (fig. 7).

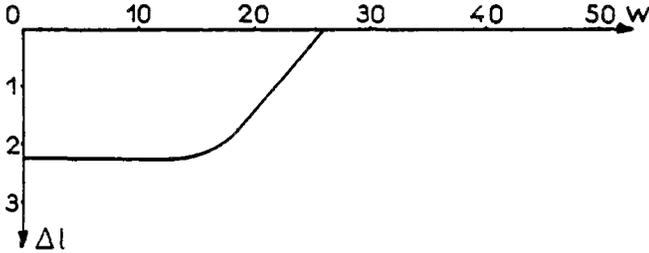


Fig. 7 Courbe de retrait du sol g7

Les courbes de retrait (fig. 8) rendent compte du comportement au séchage du matériau; c'est-à-dire de la modification de l'arrangement morphologique de l'édifice granulaire. En effet, nous verrons au chapitre III, qui traite de l'influence de la minéralogie et de la granulométrie sur les courbes de retrait, que les ruptures de pentes enregistrées sur certaines de ces courbes sont dues à ce phénomène d'arrangement au sein du matériau.

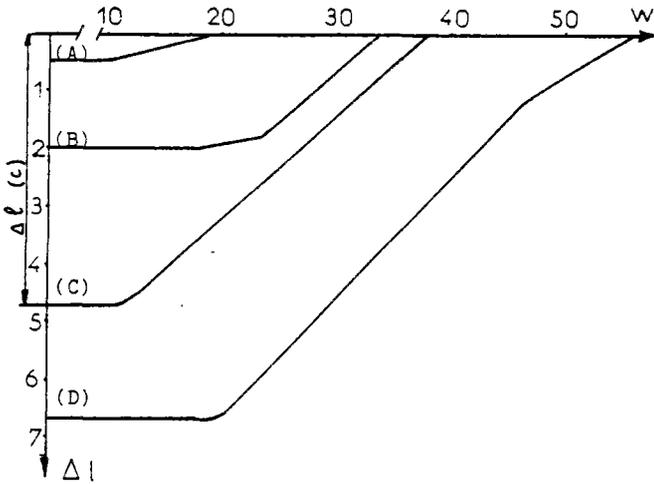


Fig. 8 Les quatre types de courbe de retrait

Pour obtenir la courbe intrinsèque de retrait, il suffit pour chaque éprouvette de relever dans le "tableau simple" les valeurs correspondantes de  $L_s$  et de reporter dans un repère chaque point de couple ( $L_{Sj}; W(j)$ ).

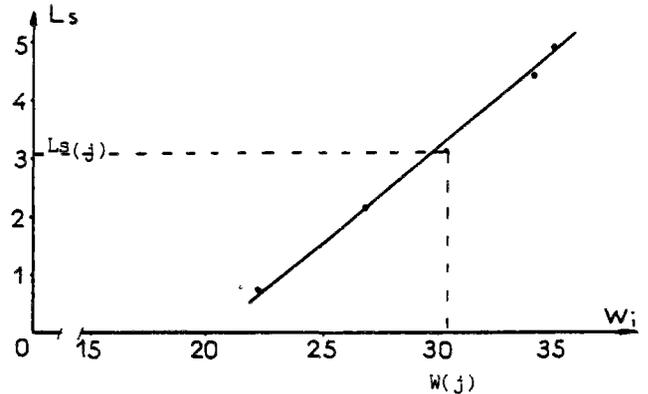


Fig. 9 Droite intrinsèque du sol L5

$W_i$  : teneur en eau initiale

$L_s$  : pourcentage de retrait

$$L_s = \frac{L_i - L_f}{L_i} = \frac{\Delta l(\text{totale})}{L_i}$$

$L_i$  : longueur initiale de l'éprouvette

$L_f$  : longueur finale

Le pourcentage de retrait ( $L_s$ ) est défini comme étant le rapport entre la variation totale de longueur et la longueur initiale de l'éprouvette ( $L_i$ ).

Pour obtenir la courbe de densité sèche, il faut, pour chaque éprouvette, procéder de la même façon que précédemment, en reportant dans un repère les valeurs correspondantes de densité sèche et de teneur en eau initiale de chaque éprouvette.

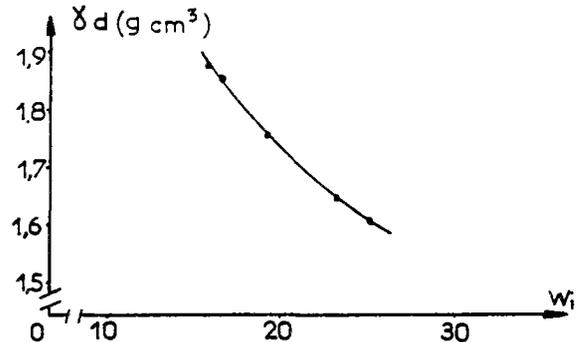


Fig. 10 Courbe de densité sèche du sol g7

Remarques sur le tableau d'enregistrement.

Au début de l'étude, nous notions dans le tableau d'enregistrement, le temps à chaque mesure de retrait. Ceci permettait de tracer la courbe représentant la teneur en eau de l'éprouvette en fonction du temps de séchage. Nous l'appellerons pour l'occasion "courbe de vitesse de séchage".

Nous pensions qu'il pouvait y avoir correspondance entre la ou les ruptures de pente de la courbe de retrait et celles de la courbe de séchage correspondante. En fait il n'en est rien.

# FEUILLE DE MESURE

## TABLEAU D'ENREGISTREMENT

$\Delta l$ (mm) gauche	$\Delta l$ (mm) droit	$\Sigma \Delta l$ (mm)	Poids en (g)	W %	remar- ques	
2	1 3	2	0	521	25,8	
0,05	0,2	0,25	520,7	24,6		
0,16	0,45	0,61	520,3	22,9		
0,22	0,74	0,96	519,9	21,3		
0,22	1,43	1,65	519,3	18,8		
0,21	1,76	1,97	518,9	17,1		
0,18	1,95	2,12	518,5	15,4		
0,12	2,06	2,18	518,1	13,8		
0,08	2,12	2,2	517,8	12,5		
0,05	2,15	2,2	517,5	11,3		

échantillon: 87 N° 7
Poids de l'équipage: 490,8 (g)
poids sec (éprouvette): 24 (g)
poids humide: 30,2 (g)
teneur en eau initiale: 25,8 %
longueur finale: $L_f$ 57,74 (mm)
$\Delta l_t$ (mm) : 2,20
longueur initiale: $L_i$ 59,94 (mm)
$L_s = \Delta l_t / L_i$ 3,7 %
$\gamma_d$ : 1,57 g/cm <sup>3</sup>



Généralement, si la température est constante, la courbe de vitesse de séchage est une droite. Pour certains sols, il arrive qu'il y ait diminution de la vitesse de séchage à des teneurs en eau très souvent inférieures à la limite de retrait.

L'indication précise que nous apporte le temps est la durée nécessaire pour qu'une éprouvette passe d'une teneur en eau initiale à la limite de retrait correspondante.

Ayant montré que le comportement au retrait des matériaux n'est pas modifié pour des variations de température entre 25 et 50°C, nous soumettions les éprouvettes à des températures différentes qui permettaient d'obtenir le retrait total de chaque éprouvette en moins de cinq heures.

Les températures étant variables pendant le séchage des éprouvettes et la courbe de vitesse de séchage n'apportant pas d'informations directes sur le comportement au retrait, il ne nous a pas semblé indispensable de noter le temps sur le tableau d'enregistrement.

### 2.5.2. Limites de retrait

Nous avons vu dans "Remarques sur les résultats obtenus par l'essai d'ATTERBERG" que la limite de retrait est une valeur obtenue à partir d'un échantillon dont la teneur en eau initiale est proche de celle de la limite de liquidité.

Suivant l'allure de la courbe de retrait, nous avons vu que la limite de retrait est parfois obtenue avec peu de précision.

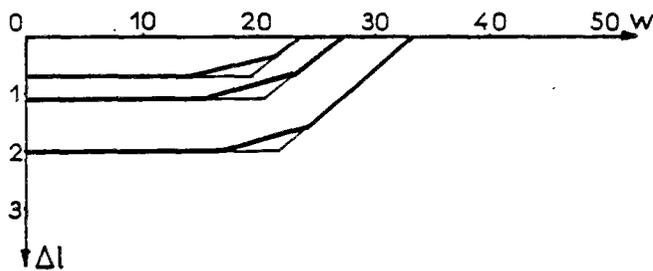


Fig. 11 Courbes de retrait du sol G8

En étudiant les différentes courbes de retrait du sol G8 (fig. 11), nous remarquons que :

- la limite de retrait dépend de la teneur en eau initiale, donc à priori il ne semble pas évident de définir une teneur en eau à partir de laquelle ce sol n'a plus de retrait,

- sur la figure 12, il est difficile de déterminer sur certaines courbes de retrait la limite de retrait correspondante. Sur la courbe I il est facile de déduire cette limite, sur la II cela devient moins précis et sur la courbe III, nous pouvons estimer une erreur de neuf points entre la valeur de la limite de retrait généralement définie  $WR_2$  et la teneur en eau  $WR_1$  pour laquelle il n'y a effectivement plus de retrait.

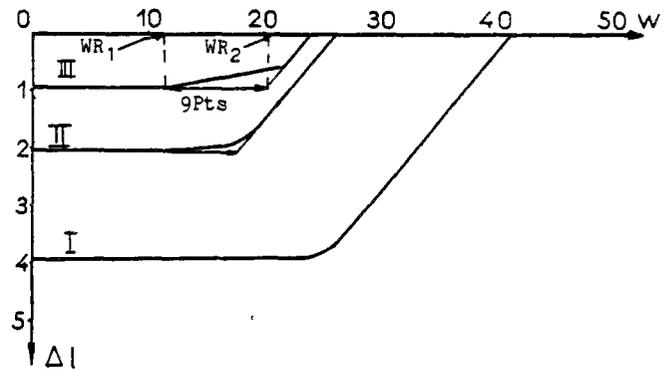


Fig. 12 Courbes de retrait de trois sols différents

La courbe I est une courbe de retrait du sol G9  
La courbe II est une courbe de retrait du sol g11  
La courbe III est une courbe de retrait du sol g2

Nous venons de montrer que ce qu'on définit jusqu'à présent comme limite de retrait dépend de deux paramètres :

- la teneur en eau initiale,
- l'allure de la courbe de retrait.

Il faut maintenant rechercher effectivement la teneur en eau la plus élevée à partir de laquelle nous n'enregistrons plus de retrait.

Une solution consisterait à utiliser la courbe ( $\Delta$ ) (fig. 13) passant par tous les points de couple  $WR(j) ; \Delta l(j)$ . La limite de retrait serait représentée par la valeur de l'abscisse du point d'intersection de la courbe avec l'axe des teneurs en eau (WR). Ceci présente deux inconvénients majeurs :

- le premier est dû à la difficulté de déterminer avec exactitude les points de couple  $WR(j) ; \Delta l(j)$  nous avons expliqué pourquoi précédemment.
- Le second est dû à la perte de temps. En effet, si l'on veut obtenir différents points de couple  $(WR(j) ; \Delta l(j))$ , il nous faut tracer trois à quatre courbes de retrait. Ceci impose de suivre trois à quatre éprouvettes pendant le séchage, donc de monopoliser un technicien en permanence.

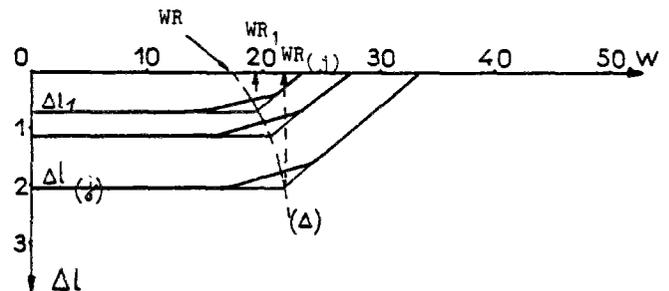


Fig. 13 Courbes de retrait du sol G8

$WR(j)$  : limite de retrait de l'éprouvette j  
 $\Delta l(j)$  : variation totale de l'éprouvette j

Afin d'éviter ces problèmes, nous avons choisi de travailler, non plus avec les courbes de retrait mais avec la courbe intrinsèque. Cette courbe relie les points de couple  $(W(j), Ls(j))$ .

Nous définissons conventionnellement la limite de retrait (WR) comme étant l'abscisse à l'origine du prolongement de la courbe intrinsèque. La direction de ce prolongement étant tangent à la fin de la courbe intrinsèque de retrait. Ainsi, nous obtenons la teneur en eau initiale la plus élevée pour laquelle nous n'enregistrons plus de retrait. Pratiquement, ce point n'a pu être atteint pour des raisons techniques dues au compactage des éprouvettes aux teneurs en eau faible.

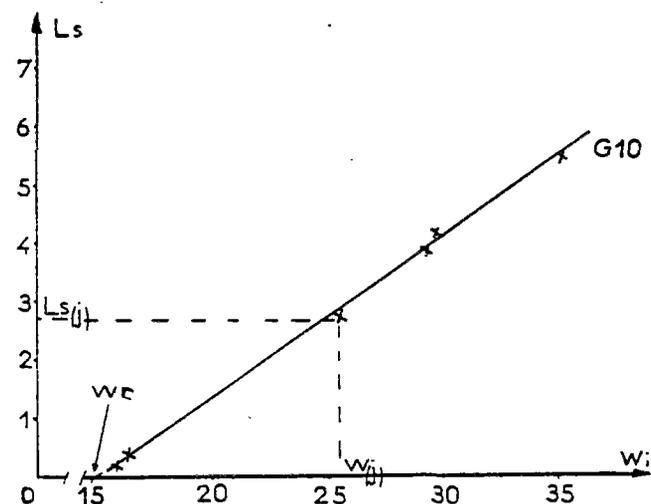


Fig. 14 : Courbe intrinsèque du sol G10

### 2.5.3. Droite intrinsèque de retrait

Les courbes de retrait effectuées sur un même sol, à des teneurs en eau initiales différentes (fig.15) ne semblent pas directement exploitables pour déterminer et comparer le potentiel des sols au retrait. Il faudrait superposer sur papier calque les séries de courbes de retrait de chacun des sols intéressés et que ces courbes soient réalisées à des teneurs en eau initiales sensiblement identiques pour comparer les amplitudes de retrait correspondantes.

Pour simplifier ce laborieux travail, nous reportons sur un graphique la teneur en eau initiale en abscisse et le pourcentage de retrait en ordonnée (fig.16). Les points obtenus sont alignés sur une droite que nous appellerons droite intrinsèque de retrait car elle est propre à chaque sol. Cet alignement des points est vérifié quelle que soit la nature du sol.

Nous venons de franchir un pas car la courbe intrinsèque devient droite intrinsèque. En effet, nous avons constaté que toutes les courbes sont en fait des droites. Déjà (NELSON et ANDREWS, 1959) en étudiant sur

des argiles la variation du couple de cisaillement et du pourcentage de retrait linéaire en fonction de la teneur en eau (fig. 17) avaient constaté que le pourcentage de retrait était fonction linéaire de la teneur en eau. Par conséquent, les droites intrinsèques obtenues sur nos matériaux confirment les travaux de NELSON et ANDREWS. Nous verrons dans la remarque qui suit que cette linéarité est liée à la forme des courbes de retrait.

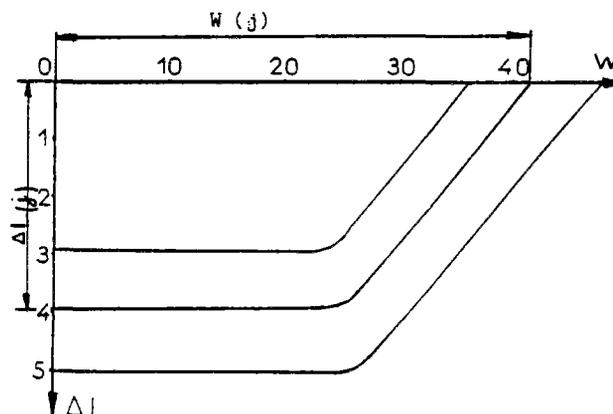


Fig. 15 Trois courbes de retrait du sol G9

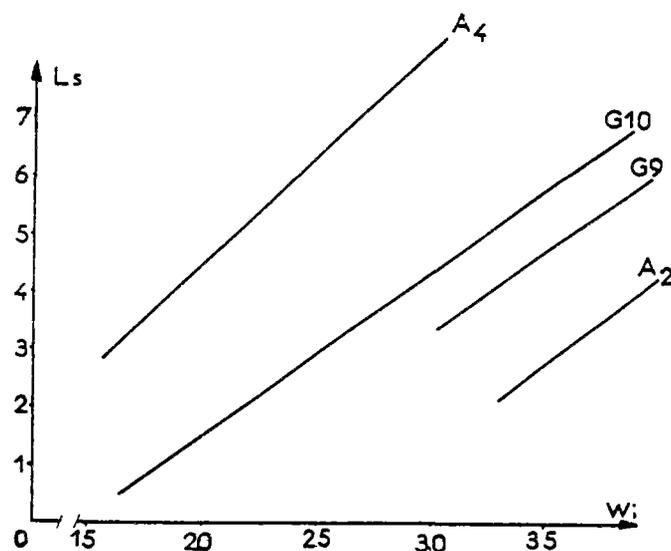


Fig.16

La droite intrinsèque de retrait peut être définie par son abscisse à l'origine et sa pente. Suivant les sols, les valeurs de pente peuvent varier de 0,15 à 0,4. Pour obtenir la pente avec précision, il est nécessaire de réaliser un certain nombre d'essais de retrait à des teneurs en eau initiales différentes pour chaque sol. Il s'avère par expérience que six points suffisent.

Sur la figure 18 sont représentées les droites intrinsèques de quelques sols étudiés. C'est à l'aide de ces droites que nous allons comparer l'aptitude au retrait. En effet,

quelle que soit la teneur en eau initiale, le sol G1 représenté par la droite G1 a le potentiel de retrait le plus élevé et G8 le plus faible. Les sols G1 et G8 sont respectivement le plus et le moins aptes au retrait des quatre sols en présence.

A présent étudions entre 20% et 40% de teneur en eau initiale les cas des sols L5 et g1. Entre 20% et la teneur en eau critique ( $W_c$ ), g1 possède un potentiel de retrait plus élevé que L5, au-delà de  $W_c$  nous avons le phénomène inverse.

Ceci montre une fois de plus l'intérêt sur un chantier de bien connaître la teneur en eau des matériaux disponibles, afin de mettre en oeuvre celui qui engendrera le moins de désordre possible.

Ces exemples illustrent le système de comparaison d'aptitude au retrait entre différents sols par l'intermédiaire des droites intrinsèques de retrait.

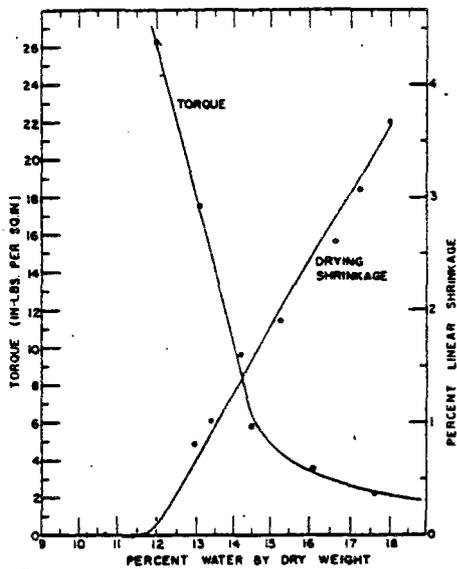


Fig: 17

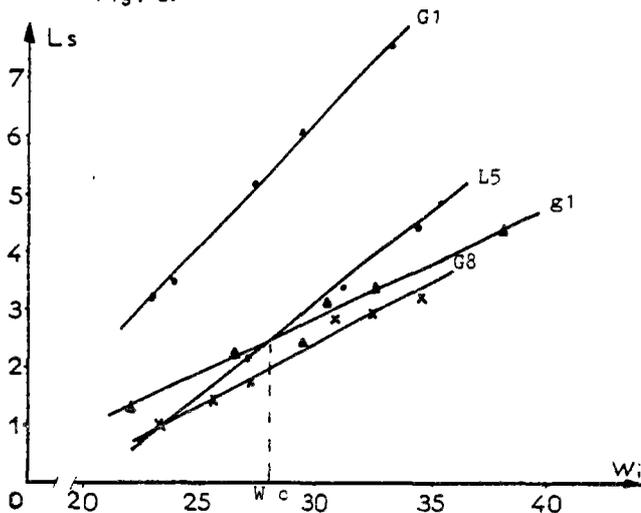


Fig.18 Droites intrinseques de quelques sols

2.5.4. Remarques sur la limite de retrait et justification de la droite intrinsèque.

Nous venons de voir que la courbe intrinsèque est une droite. Ceci permet de définir la limite de retrait comme étant l'abscisse à l'origine de la droite intrinsèque. Signalons toutefois que pour des raisons techniques nous n'avons pas pu atteindre sur les fractions (0-1 mm) les pourcentages de retrait nuls; nous sommes donc obligés de prolonger la droite pour déduire (WR).

Nous estimons que cette extrapolation est justifiée car :

- Nous avons vu à la figure 17 que la droite déterminée par (NELSON et ANDREWS) est linéaire jusqu'au pourcentage de retrait nul.
- Nous verrons aussi au chapitre IV que les essais réalisés sur les matériaux de fraction (0-10mm) permettent d'obtenir plus facilement la droite intrinsèque jusqu'aux pourcentages de retrait très faibles à nuls.

Même si nous imaginons (fig. 19) que la droite intrinsèque d'un sol s'incurve ceci engendrerait un écart ( $\epsilon$ ) très faible entre le pourcentage de retrait correspondant à l'abscisse à l'origine (WR) et le pourcentage nul correspondant à la limite retrait hypothétique réelle (WRr).

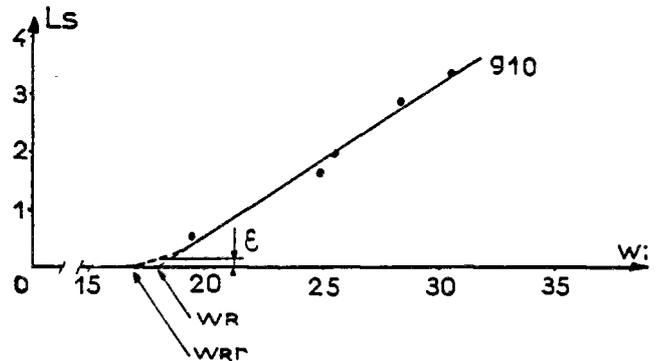


Fig.19 Droite intrinsèque du sol g10

Pour définir la droite intrinsèque, nous avons considéré le rapport  $\Delta l/Li$ . On pourrait aussi définir  $\Delta l/Lf$  par rapport à la teneur en eau. Il est facile de voir que dans l'hypothèse d'Atterberg cette courbe ( $\Delta$ ) est une droite, car les essais montrent que la pente de  $\Delta l$ , fonction de la teneur en eau est indépendante de la teneur en eau initiale (fig. 20).

La première définition a été adoptée pour les raisons suivantes :

Il est plus facile de tracer la droite intrinsèque que la droite ( $\Delta$ ), car dans le premier cas on a besoin de connaître seulement l'état initial de l'état final des éprouvettes, alors que dans le

second il faut tracer plusieurs courbes de retrait qui, de plus, ne donneront pas forcément un tracé précis de  $(\Delta)$ , les limites de retrait étant peu précises.

La question posée sur un chantier est : le sol mis en place à une certaine teneur en eau aura quel retrait ? La réponse à cette question est la droite intrinsèque.

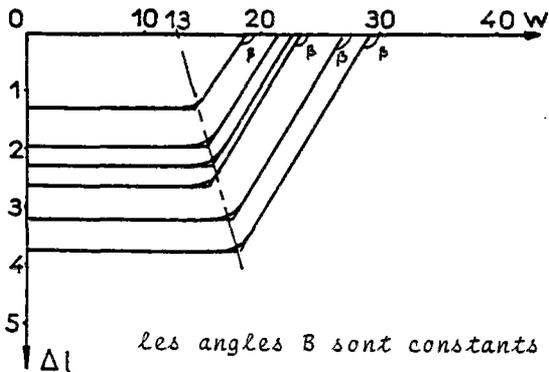


Fig. 20 : Courbes de retrait du matériau I 60

I 60 : constitué de 60% d'illite de Puy, 40% de sable siliceux insensible à l'eau et la taille maximum des grains est de 1 mm

## 2.6. Conclusions

La limite de retrait ainsi définie ne permet pas de déduire le potentiel de retrait des sols. En effet, ce n'est pas parce qu'un sol a une valeur de limite de retrait plus ou moins élevée qu'un autre sol que celui-ci est plus ou moins apte au retrait. Nous avons vu que pour une teneur en eau initiale donnée, le retrait dépend de cette valeur limite, mais aussi de la pente de la droite intrinsèque.

Le potentiel de retrait d'un sol est caractérisé par sa droite intrinsèque de retrait.

La connaissance de la limite de retrait est surtout intéressante lors de la mise en oeuvre des matériaux sur chantier car il est bon de connaître, pour des raisons de stabilité d'ouvrages routiers la teneur en eau pour laquelle le sol mis en place n'est plus sensible à la perte d'eau.

Toutefois, cette valeur sera représentative uniquement pour les sols fins. Nous verrons au chapitre III qu'il n'est pas possible de faire une correction de teneur en eau, à partir des résultats obtenus sur la fraction 0-1mm, pour en déduire la limite de retrait de matériaux graveleux, il est nécessaire de réaliser un essai de retrait spécifique.

## 3. REPRODUCTIBILITE DE L'ESSAI DE RETRAIT

Avant de poursuivre l'étude de retrait à l'aide de cet essai, nous avons montré qu'il est reproductible et que les erreurs de mesures sont acceptables.

Nous avons entrepris des calculs d'erreurs sur les trois paramètres essentiels (le pourcentage de retrait, la densité sèche et la teneur en eau), afin de rendre compte de l'erreur relative obtenue et de l'erreur graphique. Pour chacun de ces paramètres, les erreurs réalisées sont faibles, elles apparaissent à peine graphiquement.

Nous allons illustrer ces commentaires en utilisant le sol g7. Il est parmi les sols dont le potentiel est le plus élevé. Donc il risque d'engendrer des erreurs de retrait plus conséquentes qu'un sol à potentiel de retrait plus faible car les déformations des éprouvettes sont plus importantes.

calculs d'erreurs :

### 3.1. Erreurs relatives réalisées sur la teneur en eau ( $\bar{W}$ )

$$W = \frac{Ph - Ps}{Ps}$$

Ph : poids humide de l'éprouvette.  
Ps : poids sec de l'éprouvette.

En passant par les dérivées logarithmiques, on obtient :

$$\frac{dW}{W} = \frac{d(Ph - Ps)}{Ph - Ps} - \frac{dPs}{Ps}$$

$$\frac{dW}{W} = \frac{dPh}{Ph - Ps} - \frac{dPs}{Ph - Ps} - \frac{dPs}{Ps}$$

$$\frac{dW}{W} = \frac{Ph}{Ph - Ps} \left[ \frac{dPh}{Ph} - \frac{dPs}{Ps} \right]$$

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{Ph}{Ph - Ps} \left[ \frac{\Delta Ph}{Ph} + \frac{\Delta Ps}{Ps} \right]$$

l'erreur absolue de la balance est de :

$$\pm 0,05g = \Delta Ph = \Delta Ps$$

Appliquons ceci au sol g7 pour les deux teneurs en eau extrêmes

$$W = 25,8\% ; Ph = 30,2g ; Ps = 24g$$

$$\frac{\Delta W}{W} = \pm 0,0073 ; \Delta W = \pm 0,19\%$$

$$W = 15,8\% ; Ph = 33,25g ; Ps = 28,71g$$

$$\frac{\Delta W}{W} = \pm 0,0095 ; \Delta W = \pm 0,15\%$$

3.2. Erreurs relatives sur la densité sèche

$$\delta d = \frac{\delta h}{W+100} \cdot 100 ; \delta h = \frac{Ph}{V}$$

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot H$$

h : densité humide de l'éprouvette en g/cm<sup>3</sup>

d : densité sèche de l'éprouvette en g/cm<sup>3</sup>

Ph : masse humide de l'éprouvette en g

V : volume du moule en cm<sup>3</sup>

R : rayon du moule en cm

H : hauteur du moule en cm

Les dimensions du moule sont mesurées au pied à coulisse précis au 2/100 de millimètre.

Donc  $\Delta H = \Delta R = 0,02$  mm ; R = 0,9cm ; H = 6cm

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot H$$

$$\frac{dv}{v} = 2 \frac{dR}{R} + \frac{dH}{H}$$

$$\frac{dv}{v} = \frac{2H \cdot dR + R \cdot dH}{R \cdot H} \quad \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta R(2H+R)}{R \cdot H} = 0,0048$$

$$\delta h = \frac{Ph}{v}$$

$$\frac{\Delta \delta h}{\delta h} = \frac{\Delta Ph}{Ph} + \frac{\Delta v}{v}$$

traitons comme précédemment les deux points extrêmes.

W%	Ph(g)	$\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
15,8	33,25	2,18	1,88
25,8	30,2	1,987	1,57

$$W = 15,8 ; \frac{\Delta \delta h}{\delta h} = 0,0063$$

$$W = 25,8 ; \frac{\Delta \delta h}{\delta h} = 0,00645$$

$$\frac{\Delta \gamma_d}{\gamma_d} = \frac{\Delta \delta h}{\delta h} + \frac{\Delta W}{W+100}$$

$$W = 15,8 ; \frac{\Delta \gamma_d}{\gamma_d} = 0,0095$$

$$W = 25,8 ; \frac{\Delta \gamma_d}{\gamma_d} = 0,01$$

Il apparaît clairement que les écarts de chaque point par rapport à la courbe sont faibles. Les domaines d'incertitude pourtant petits seraient tous coupés par la courbe. Nous pouvons conclure que ce type de courbe est obtenu avec une bonne précision.

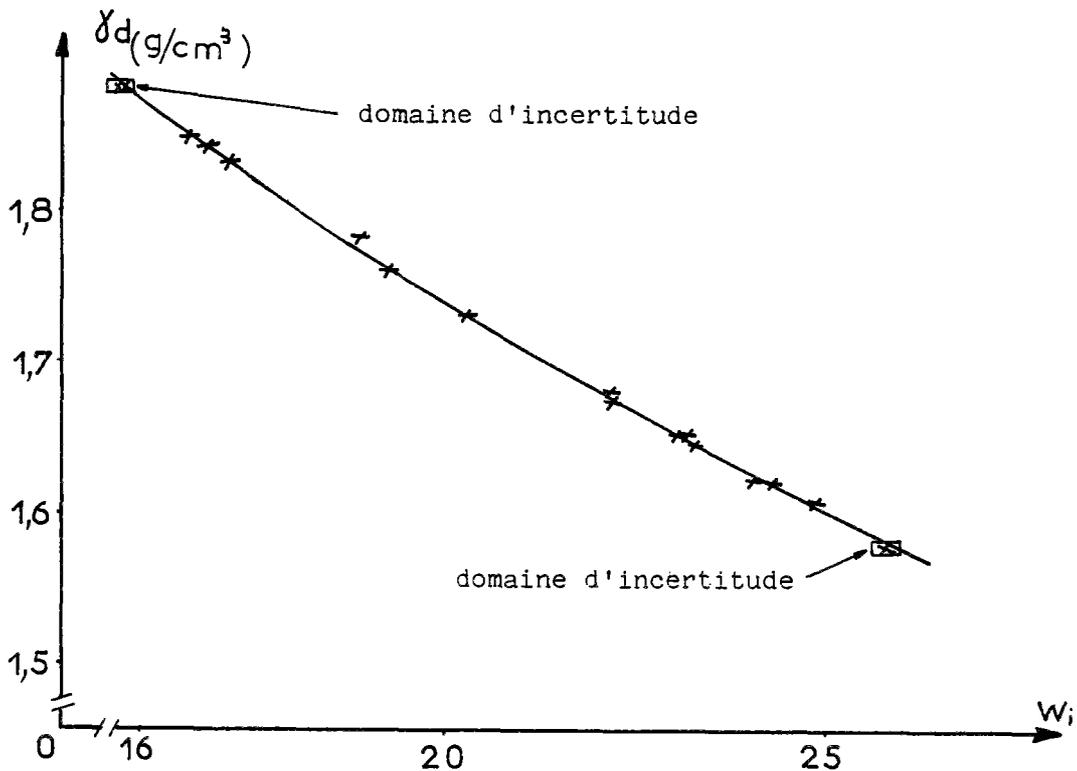


Fig.21 Courbe de densité sèche du sol g7

### 3.3. Erreurs relatives sur le pourcentage de retrait

$$L_s = \frac{\Delta l(t)}{L_f + \Delta l(t)} \cdot 100$$

$L_s$  : pourcentage de retrait en pourcentage

$\Delta l(t)$  : variation totale de longueur en mm

$L_f$  : longueur finale en mm

$$dL_s = \frac{L_f + \Delta l(t) - \Delta l(t)}{[L_f + \Delta l(t)]^2} \cdot d\Delta l + \frac{-\Delta l(t)}{[L_f + \Delta l(t)]^2} \cdot dL_f$$

$$\frac{dL_s}{L_s} = \frac{L_f}{L_f + \Delta l(t)} \left[ \frac{d\Delta l}{\Delta l(t)} - \frac{dL_f}{L_f} \right]$$

$$\frac{\Delta L_s}{L_s} = \frac{L_f}{L_f + \Delta l(t)} \left[ \frac{\Delta(\Delta l(t))}{\Delta l(t)} + \frac{\Delta L_f}{L_f} \right]$$

traitons une fois encore les deux points extrêmes.

$$\Delta l(t) = 0,02 \text{ mm}$$

$L_f = 0,1 \text{ mm}$  ;  $L_f$  est mesuré au pied à coulisse précis à deux centièmes de millimètre, mais les surfaces extrêmes des éprouvettes n'étant jamais très parallèles, il s'avère par expérience que  $L_f$  est de  $0,1 \text{ mm}$ .

W%	Ls%	Lfmm	l(t)mm
15,8	0,7	59,5	0,36
25,8	3,7	57,74	2,2

$$W = 15,8 ; \frac{L_s}{L_s} = 0,057 ; L_s = \pm 0,039\%$$

$$W = 25,8 ; \frac{L_s}{L_s} = 0,01 ; L_s = \pm 0,039\%$$

Sur la fig. 22 sont représentées deux droites intrinsèques, obtenues par régression linéaire des moindres carrés, à partir des résultats du sol g7.

La droite  $Y_1$  a été tracée avec dix-sept points. Nous avons représenté les domaines d'incertitudes correspondant à chaque point extrême, afin de visualiser l'ordre de grandeur graphique de l'ensemble des domaines. On constate qu'il n'y a que cinq points, dont les domaines d'incertitudes ne passeraient pas sur la droite. Ceci est satisfaisant car ces points sont toutefois peu éloignés de celle-ci.

Notons que le coefficient de corrélation est de 97%. Ceci confirme la propriété de linéarité de la fonction liant le pourcentage de retrait à la teneur en eau initiale de l'éprouvette.

Imaginons que nous n'ayons réalisé que huit essais, dont les points résultants sont représentés par des triangles (fig. 22). Ils sont reliés par la seconde droite  $Y_2$ . Nous avons choisi ces huit points car ils constituent l'ensemble engendrant la droite qui a la plus forte différence de pente avec la pente moyenne de  $Y_1$ .

Les pentes de  $Y_2$  et  $Y_1$  sont respectivement de 0,38 et 0,33, la différence est de 0,05. Ceci entraîne, sur la plage de teneur en eau de l'étude, des écarts négligeables sur les pourcentages de retrait.

La limite de retrait obtenue à partir de  $Y_2$  est 15%, elle est d'un point plus élevée que celle obtenue à partir de  $Y_1$ . Chacun sait que les teneurs en eau in situ dans un même sol peuvent varier de trois à quatre points d'un lieu à un autre. Les géotechniciens essaieront cependant de mettre en place les sols, à une teneur en eau se rapprochant le plus possible de la limite de retrait, sans jamais vraiment l'atteindre.

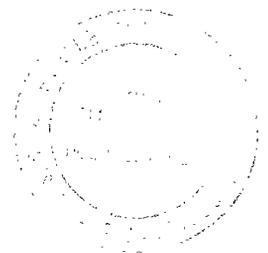
Empiriquement, nous estimons que l'erreur commise sur la limite de retrait est de plus ou moins 1,5 points de teneur en eau. Cette amplitude d'erreur est acceptable avec les conditions de chantier. Le cas du sol g7 est compatible avec ce que nous venons de définir.

### Conclusions

Cet essai de retrait linéaire est simple et reproductible. Nous avons vu que les résultats sont sensiblement identiques avec dix-sept ou dix-huit points. L'expérience acquise par les nombreux essais réalisés en eau. Les quarante sols a montré qu'il fallait exécuter six essais à des teneurs en eau initiales différentes, pour obtenir une courbe de densité sèche et une droite intrinsèque suffisamment précises.

Notons que tout l'appareillage nécessaire à cet essai est simple et peu coûteux. Il est donc adapté aux conditions de laboratoire de chantier.

Tous les paramètres mesurés ou calculés sont affectés d'erreurs dont les valeurs sont toujours inférieures à celles que l'on enregistrerait in situ dues aux hétérogénéités des sols.



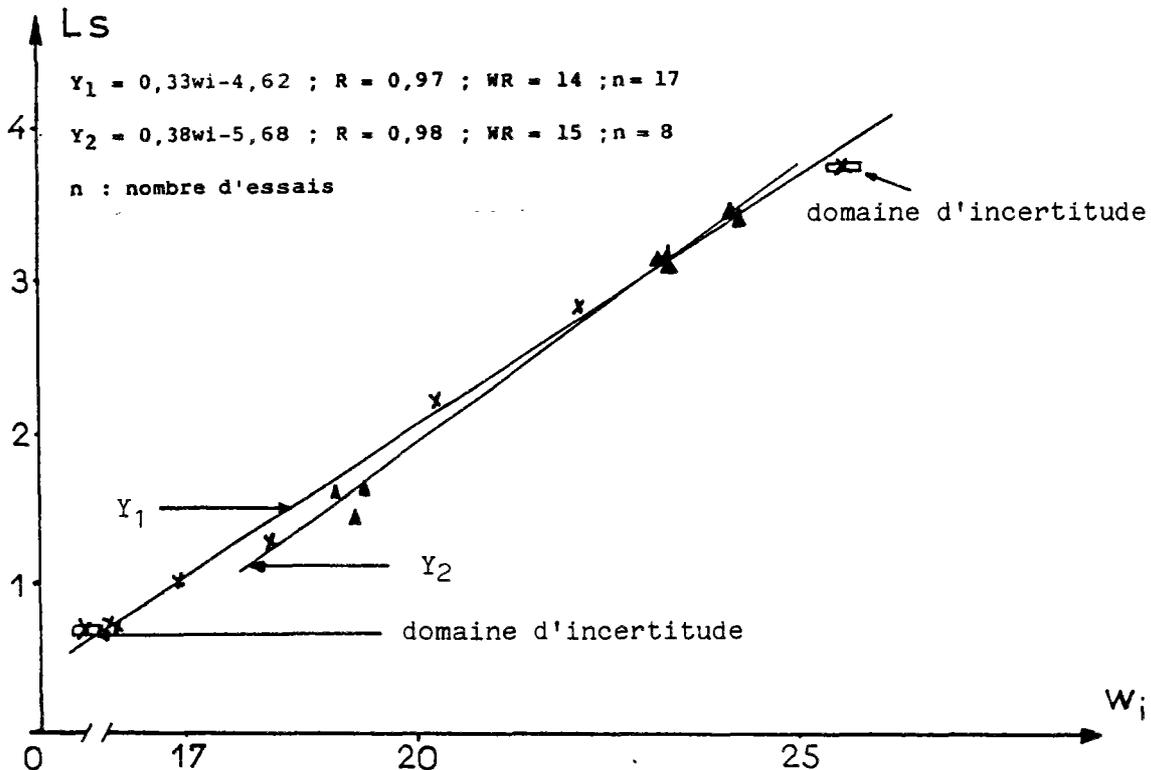


Fig. 22

#### 4 CONCLUSIONS

Nous avons montré que l'essai de retrait volumique défini par ATTERBERG n'est pas satisfaisant. Les raisons sont les suivantes :

- L'éprouvette n'est pas compactée, alors que l'intensité de compactage influence les résultats de l'essai.
- La précision de la limite de retrait dépend de l'allure de la courbe de retrait.
- Un seul essai de retrait réalisé sur une éprouvette préparée à une teneur en eau initiale proche de la limite de liquidité, ne suffit pas à caractériser la capacité d'un sol au retrait. Il faut réaliser plusieurs essais à des teneurs en eau initiales différentes.

L'essai de retrait linéaire proposé est simple et reproductible. Il est utilisable en laboratoire de chantier. Il permet d'obtenir les trois courbes suivantes.:

- La courbe de retrait, qui est l'enregistrement de la variation de longueur de l'éprouvette en fonction de la perte d'eau. Elle est représentative du comportement au retrait des matériaux, quatre types ont été mis en évidence.

- La droite intrinsèque, reliant les points de couple ( $L_s$ ,  $W_i$ ) permet de classer et comparer les potentiels de retrait entre différents sols sur la fraction (0-1mm). Ceci devrait rendre service aux géotechniciens travaillant dans les régions où se succèdent les saisons sèches et les pluies. Cet essai leur permettra de mieux sélectionner les différents matériaux disponibles à mettre en oeuvre, suivant leur potentiel de retrait

- La courbe de densité sèche représente la densité initiale du matériau en fonction de la teneur en eau initiale de celui-ci.

La limite de retrait  $WR$  est définie conventionnellement comme étant la valeur à l'origine de la droite intrinsèque de retrait.

## CHAPITRE III

### INTERPRETATIONS ET

### FACTEURS INFLUENCANT LE RETRAIT

#### 1 - TRAVAUX ANTERIEURS

##### 1.1. Généralités

Dans ce chapitre nous étudions l'importance, sur le comportement à la dessiccation des sols, des paramètres suivants :

- nature minéralogique des argiles,
- structure de l'édifice argileux,
- granularité,
- intensité de compactage.

Dans un premier temps, nous présenterons les travaux de différents chercheurs réalisés sur des argiles pures ou sur des sols fins. Ensuite, nous présenterons nos résultats avec ceux déjà établis et apporterons notre contribution.

##### 1.2. Etudes des différents types de comportements à la dessiccation

###### 1.2.1. Présentations

Nous présentons une synthèse de travaux récents de Tessier réalisés sur différents types d'argiles. Toutes ces études ont pour but d'expliquer l'étape transitoire, entre la partie linéaire du retrait et la limite de retrait, qui est appelée "seconde phase de dessiccation".

- La première étape a été de montrer que l'assemblage de particules primaires intervient directement sur la constitution des unités morphologiques et détermine en grande partie l'hétérogénéité granulométrique du matériau. On appelle unités morphologiques les assemblages de particules argileuses jouant le rôle stérique primordial dans l'organisation des matériaux, les paramètres stériques étant la taille et la forme des assemblages (TESSIER, 1978). Une étude a été réalisée sur les trois argiles suivantes :

- une kaolinite,
- une Illite,
- une montmorillonite.

- Chaque argile a été saturée avec du sodium avant d'être dispersée par agitation mécanique dans une solution à PH 9 à l'aide de soude. Après séparation, l'argile a été rendue homogène sous forme calcique. Le cation calcium a été choisi car il constitue en général l'élément prédominant des complexes d'échange des argiles dans les sols.

L'unité morphologique de la kaolinite (fig. 23) est composée de cristallites élémentaires. Les cristallites ne peuvent s'agréger entre eux pour constituer des ensembles plus larges. Dans ce cas, la taille des unités morphologiques est commandée par l'intensité de l'opération de dispersion au moment de la préparation du matériau.

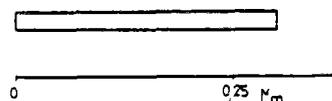


fig:23 unité morphologique de la kaolinite

La montmorillonite possède des assemblages en extension bidimensionnelle très importante à l'épaisseur limitée. Ils sont de grande dimension et donc constitués par un grand nombre de particules primaires accolées bord à bord (fig.24).

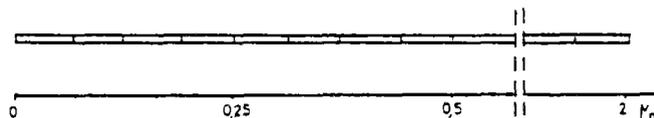


fig:24 unité morphologique de montmorillonite

Les unités morphologiques de l'Illite sont constituées de particules conduisant à un arrangement du type bord-bord et face-face (fig. 25).

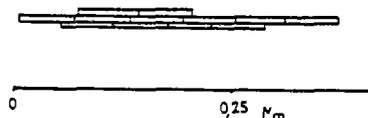


fig:25 unité morphologique d'illite

#### 1.2.2. Evolutions des unités morphologiques durant la dessiccation

A la figure 26 sont représentés les schémas qui montrent l'évolution de l'organisation des trois types d'assemblages d'unités morphologiques en cours de dessiccation. Il apparaît clairement que la kaolinite montre déjà une orientation préférentielle des cristallites sur la pâte de départ. Celle-ci s'accroît durant la dessiccation.

L'organisation du matériau consiste en une simple juxtaposition d'unités morphologiques indépendantes les unes des autres.

Les éléments de kaolinite ne s'associent pas, ils se juxtaposent seulement.

Par contre, pour l'illite et la montmorillonite, on ne perçoit pas d'orientation préférentielle dans la pâte de départ ni dans la première phase du retrait. Ceci amène à penser que l'organisation entre les unités morphologiques repose sur des interactions du type bord-face.

Pour l'illite, il faut atteindre un PF 2,5 pour que les unités morphologiques se rompent afin qu'une orientation apparaisse.

Pour la montmorillonite, il faut atteindre des PF élevés pour qu'une orientation apparaisse. Ceci est expliqué par le pouvoir de déformabilité des unités morphologiques qui sont longues et minces. Ce phénomène a été constaté au microscope électronique à balayage.

Cette déformabilité sans rupture est due aux liaisons bord face. Ce type de liaison est conservé jusqu'à la phase ultime de retrait.

Après avoir montré l'influence de l'unité morphologique (TESSIER, septembre 1980) s'est intéressé à la relation entre l'épaisseur des particules argileuses et la contrainte de type succion pour laquelle la limite de retrait apparaît. Pour ce faire, il a tracé la courbe représentant l'indice des vides en fonction de PF (fig. 27) pour une kaolinite et une smectite.

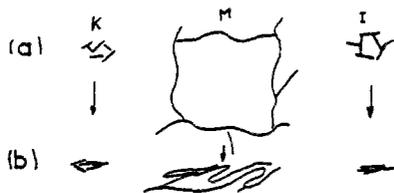


Fig. 26 (a) forte teneur en eau  
(b) évolution au cours du retrait

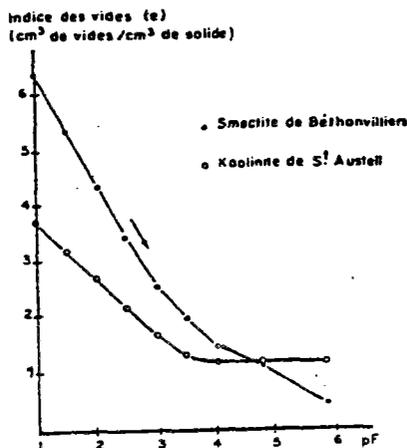


fig:27

Cette figure montre deux comportements bien distincts à la dessiccation, correspondant chacun à une des deux argiles. Il a été fait les trois commentaires suivants :

- Dans la première phase linéaire, tout départ d'eau est accompagné par une diminution égale de volume. L'échantillon est saturé.
- Dans la seconde phase, la variation de volume est inférieure au départ d'eau. L'air entre alors au sein de l'échantillon. Durant cette phase, on remarque sur les courbes, une rupture de pente voire même pour la kaolinite un arrêt total du retrait.
- La troisième phase commence à la limite de retrait. Les particules sont en contact maximum, le volume ne varie plus malgré le départ de l'eau.

Dans le cas de la kaolinite, la limite de retrait est atteinte dès PF4 et correspond à un indice des vides de 1,1. Alors que la smectite nécessite une énergie bien supérieure, puisqu'il faut atteindre PF 5,8.

L'indice des vides correspondant à la limite de retrait est de 0,42.

Analyse des phénomènes et signification

La kaolinite est constituée de cristallites épais (environ 60 nm) constitués de feuillets régulièrement empilés (TESSIER 5mai 1980)

Ainsi, lorsque les cristallites sont en contact, la distance maximum les séparant est voisine d'un ou deux cristallites coincés. Dès que tous les cristallites sont en contact, le volume de l'échantillon ne varie plus.

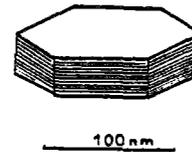


Fig. 28: cristallite de kaolinite

On sait que la microorganisation de la smectite calcique préparée à l'état de pâte prend la forme d'un réseau dont les éléments constitutifs sont en fait des "quasi cristaux".

Au PF 4,4, seule l'eau interparticulaire s'élimine. L'épaisseur apparente des feuillets reste constante.

Au-delà de PF 4,4 jusqu'à des PF voisins de 6 on élimine l'eau située entre les mailles du réseau et entre les feuillets. A ce stade, on se trouve donc en présence d'un matériau au sein duquel la distance maximale entre particules est nécessairement très limitée. Le calcul aboutit à une valeur de  $d \leq 15 \text{ \AA}$ .

Pour aboutir à cette structure, il faut que les feuillets se déforiment. Donc aux PF élevés tout se passe comme si chaque feuillet de smectite était une unité indépendante séparée de sa voisine par un mince film d'eau.

Les phénomènes de départ d'eau interfoliaire et de déformation des feuillets expliquent la longueur de la seconde phase ainsi que la possibilité d'atteindre des porosités très faibles avec ce type de matériau.

Lors de la réhumectation (TESSIER, mai 1980), il résulte que :

- La kaolinite retrouve des teneurs en eau comparables quelle que soit la contrainte de dessiccation précédente.
- La smectite se réhumecte d'autant moins que le PF de dessiccation aura été élevé.

### 1.2.3. Conclusions

Les résultats des études de TESSIER montrent que la nature minéralogique des argiles joue un rôle très important lors du processus de dessiccation. La seconde phase est conditionnée par l'épaisseur des particules argileuses et par le type d'unités morphologiques.

Plus les particules sont épaisses plus la largeur des pores résiduels existant à la limite de retrait sera grande et plus la limite de retrait sera obtenue à une contrainte hydrique faible.

Les argiles à feuillets expansibles nécessitent un PF élevé pour obtenir la limite de retrait.

Si les cristallites sont épais (type kaolinite), ils se rapprochent (face-face) durant la dessiccation et se stabilisent lorsqu'ils sont en contact.

Les cristallites type Illite ou Montmorillonite constituent des unités morphologiques plus longues qui vont, durant la dessiccation :

- soit se rompre, facilitant ainsi l'apparition d'une orientation,
- soit, se déformer sans rupture, pour permettre à la porosité de diminuer jusqu'au retrait ultime.

### 1.3. Niveaux d'organisation d'un matériau ferrallitique

(CAMBIER et PROST, 1981) ont étudié des associations argile-oxyde et l'organisation des constituants d'un matériau ferrallitique de CASAMANCE au Sénégal. Les observations sur l'organisation des constituants ont été réalisées sur des clichés pris au microscope électronique à balayage ou à transmission.

L'élément le plus petit (100  $\mu\text{m}$  environ) est le cristallite de kaolinite, résultant de l'empilement régulier de dizaines de feuillets (fig. 28).

Les particules sont constituées par la juxtaposition face contre face de quelques cristallites. Il a été montré que de très faibles quantités de fer pouvaient assurer la cohésion de l'ensemble aux points de contact entre les particules (fig. 29).

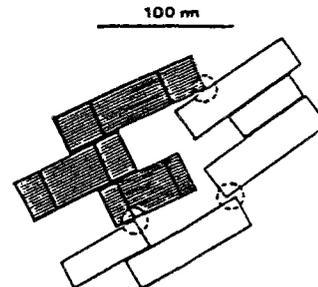


Fig. 29 : Particules formées par la juxtaposition face contre face de quelques cristallites (point de contact par l'intermédiaire de composés du fer)

Le domaine anisotrope à l'intérieur duquel les particules sont orientées est lié par des composés de fer. Les cristallites se répartissent de manière homogène ainsi que les oxyhydroxydes de fer. Il est actuellement impossible de dire si les cristallites de kaolinite sont recouverts d'une couche uniforme d'oxyhydroxydes, ou s'ils sont partiellement ou en totalité sous formes de petits amas disséminés régulièrement dans les domaines considérés (fig.30).

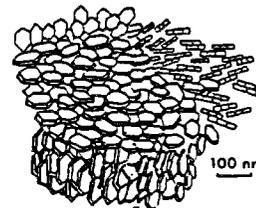


Fig.30 : Domaine anisotrope constitué par des ensembles de particules

Le plasma est constitué de micronodules et de grains de quartz. Les micronodules contiennent les domaines arrangés de manière désordonnée.

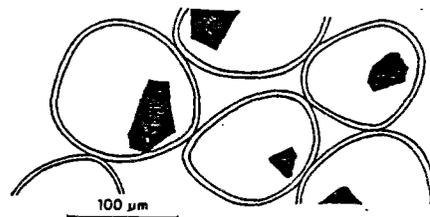


Fig. 31 : Plasma constitué de micronodules et de grains de quartz.

Il faut noter la différence de liaison entre les éléments du type particule et cristallite avec celle constituant les interdomaines et interparticules.

Dans le premier cas, nous avons à faire à des surfaces de contact, alors que dans le second cas il a été constaté des liaisons par joints ou lignes par l'intermédiaire de composés de fer.

Ces deux types d'empilements induisent deux types de porosité au sein des matériaux ferrallitiques :

- La porosité intramicronodulaire induit une forte dispersion hydrodynamique et une grande capacité d'adsorption. Ceci est dû à l'organisation face-face des constituants qui délimite des pores étroits.
- La porosité intermicronodulaire est constituée de vides résultant de l'assemblage d'éléments dont le volume se rapproche de celui de la sphère. Par conséquent, la taille des pores ainsi formés est supérieure et donne une bonne perméabilité.

#### 1.4. Etudes du retrait sur remblai

Ces études ont été réalisées au Mexique. Ce pays possède peu de matériaux sains. Dans la plupart des cas les géotechniciens doivent utiliser des sols fins argileux, par conséquent ils ont été amenés à réaliser des études afin de mieux sélectionner les matériaux vis-à-vis du phénomène "retrait-gonflement" et prévoir la réaction des remblais vis-à-vis de la fissuration.

pour résoudre le problème de la sélection des matériaux au niveau des projets, les études suivantes ont été réalisées. (A.R. RODRIGUEZ mai 1982)

- Ils ont sélectionné deux sols, le premier est une argile fortement compressible (type A4, RTR) et l'autre un sable argileux (type A2, RTR). Des essais de gonflements ont été réalisés avec le dilatomètre Hveem. Ils ont permis de déterminer ce qu'on appelle "évolution de la densité en fonction de la teneur en eau". Ces courbes sont construites comme suit :
- A partir de la densité sèche maximale PROCTOR prise comme état de référence, on calcule les taux de densité en faisant le rapport entre la masse volumique à un instant donné et la valeur de la référence.

Différents échantillons de sable et d'argile ont été compactés "côté sec", puis placés dans le dilatomètre en les laissant se dilater librement jusqu'à saturation. L'évolution volumique a été observée en fonction des variations de teneur en eau.

Pour le sable argileux et l'argile, les évolutions sont représentées par des droites (fig. 32).

La masse volumique ( $\gamma_d$ ) et le degré de compactage (G) étant égaux à :

$$\gamma_d = \frac{\text{masse}}{\text{volume}} \text{ et } G = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d \text{ opN}}}$$

Il est clair que plus la courbe est aplatie moins le sol est sensible aux variations volumiques puisque la masse sèche est constante pour un échantillon donné.

L'expression (1) exprime les variations volumiques du sol en fonction des degrés de compactage (initial  $G_i$  et final  $G_f$ ). Le taux de densité final est exprimé par rapport à la densité sèche maximale PROCTOR.

De l'expression (1) on obtient la (2) dans laquelle W est la teneur en eau maximale prévue pour le remblai étudié et  $W_i$  la teneur en eau optimale de compactage in situ; K est un paramètre adimensionnel qui dépend de la pente du chemin d'évolution envisagé et du taux de densité initiale du sol.

Cette expression a l'intérêt de donner un critère de projet pour déterminer le taux de densité et la teneur en eau, pour qu'un sol devant être placé en remblai, minimise sa sensibilité aux changements volumiques.

Des essais in situ ont été réalisés. Ils confirment les résultats obtenus en laboratoire à partir de l'expression (2).

- Les deux études suivantes ont été également réalisées sur des sols fins. L'une consistait à mesurer in situ les variations volumiques et de teneurs en eau d'un remblai ainsi que du sol d'assise sous les effets de variations climatiques. L'autre avait pour but d'établir un modèle mathématique pour étudier le phénomène de fissuration longitudinale dans les remblais à l'aide des résultats mesurés in situ.

Le sol d'assise est de l'argile, le noyau du remblai est composé de cette même argile et le reste du remblai est construit avec un sable argileux (fig. 33).

Le remblai a subi les variations climatiques et l'on a mesuré à chaque saison les teneurs en eau et les variations volumiques.

Il a été constaté que le coeur du remblai gardait une teneur en eau sensiblement constante pendant chaque saison, alors que les teneurs en eau au sein des talus chutaient fortement en saisons sèches et augmentaient aux saisons pluvieuses. Par conséquent, les talus sont soumis aux variations volumiques alors que le noyau du remblai reste relativement stable.

Les auteurs pensent que la constance de la teneur en eau dans le noyau du remblai est due à la remontée par capillarité de l'eau de l'assise.

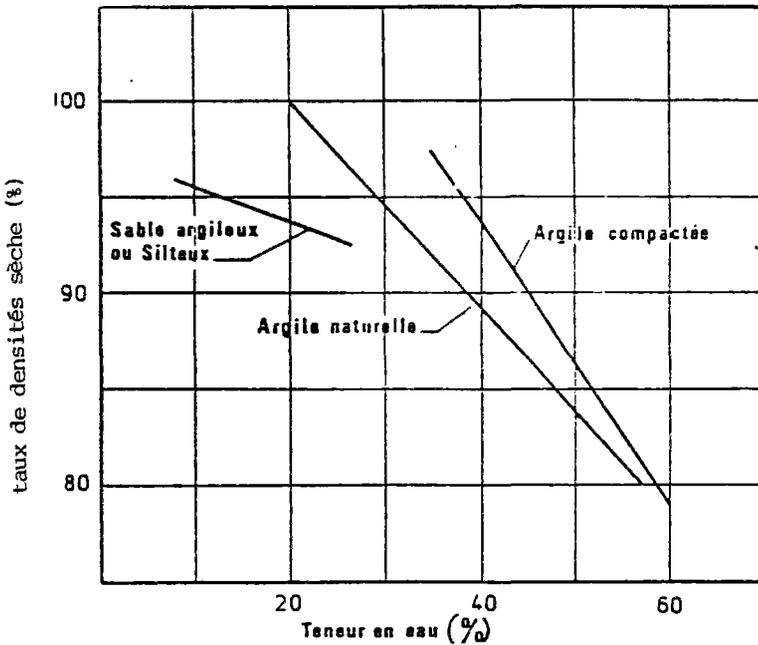


Fig. 32

$$\frac{\Delta V}{V_i} = 1 - \frac{G_i}{G_f} \dots 1$$

$$\frac{\Delta V}{V_i} = \frac{1}{1 + \frac{K}{W - W_i}} \dots 2$$

Equations du changement de volume

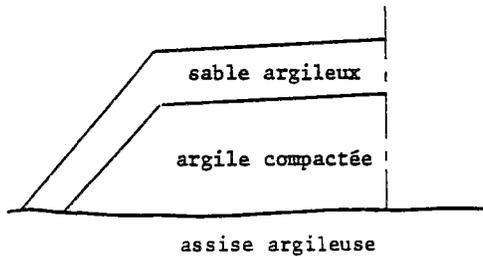


Fig. 33 : Ce cas correspond à un élargissement de chaussée.

Le programme de calcul du modèle mathématique basé sur la méthode des éléments finis permet, d'après les gonflements et les retraits des matériaux, de rendre compte de la répartition des contraintes de traction au sein du remblai. Après l'étude in situ, le programme de calcul pouvait alors être lancé en introduisant les mesures.

Les résultats théoriques et mesurés in situ ont montré que la fissuration longitudinale apparaissait dans les zones où les contraintes de traction sont maximales, c'est-à-dire là où les variations volumiques différentielles sont les plus importantes.

D'après le modèle, il apparaît que le maximum du retrait a plus d'influence que le maximum de gonflement pour le développement de la fissuration. Mais, quel que soit le taux de contraction par rapport au taux de dilatation, il apparaît clairement qu'une zone de contraction maximum, donc zone favorable à la fissuration, se situe en tête du talus (fig. 34).

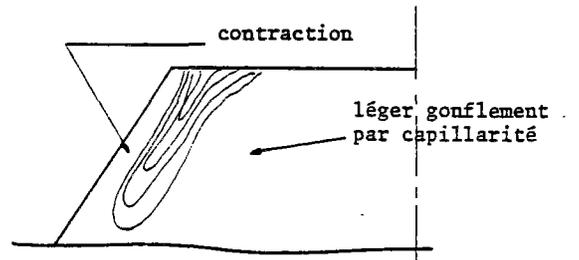


Fig. : 34

Les Mexicains ont proposé les solutions suivantes au problème de la fissuration :

- Le meilleur remède qui allie l'économie à l'efficacité pour les remblais déjà fissurés consiste à protéger le remblai en superposant des talus sur ceux qui existent, mais avec une plus grande pente de 3/1 à 5/1 et en utilisant des matériaux moins sensibles au retrait.
- Pour les nouveaux remblais, une solution immédiate consiste à les protéger avec des matériaux non sensibles aux dilatations volumiques. Ou bien, une autre solution assez fiable est de mettre en place une couche très poreuse en base de remblai pour couper la capillarité.
- Enfin, stabiliser les sols au moyen d'additions en faibles pourcentages de divers types de sols. Ces résultats sont confirmés, comme nous le verrons dans ce chapitre, par ceux que nous avons obtenus à l'aide de notre essai de retrait, en étudiant les influences de la granularité et de la quantité d'argile contenue dans un matériau sur l'aptitude au retrait.

## 2 - INFLUENCES DE LA MINÉRALOGIE DE LA QUANTITÉ D'ARGILE ET DE LA GRANULARITÉ SUR LE RETRAIT

### 2.1. Termes granulométriques et nomenclature utilisés

#### Termes granulométriques

On dit qu'un matériau est bien gradué lorsque la répartition des diamètres est régulière du plus gros au plus petit (fig. 35, courbe 1).

Par contre, un sol est dit mal gradué lorsque la répartition des grains de diamètres intermédiaires est irrégulière. Il y a deux cas :

- Le matériau est mal gradué par excès d'éléments fins (fig. 35, courbe 2).
- Le matériau est mal gradué par excès de gros éléments (fig. 35, courbe 3).

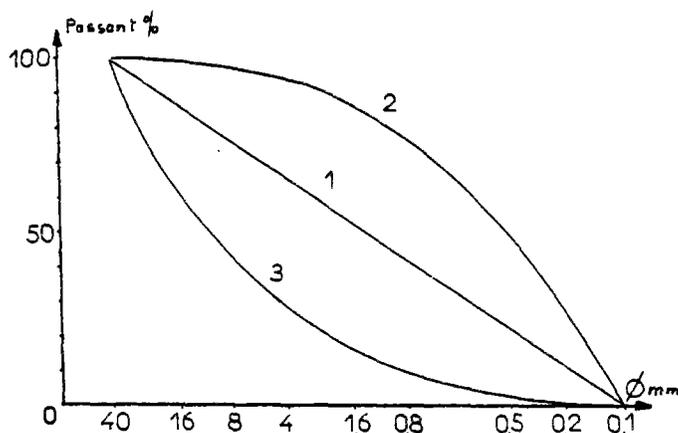


Fig. 35 : Représentations de trois types de courbes granulométriques.

#### Nomenclature

Cette nomenclature permet d'identifier les matériaux de fraction (0-1mm) reconstitués.

La première lettre majuscule symbolise la nature de l'argile.

K = kaolinite  
B = bentonite (Montmorillonite)

Le chiffre qui suit représente la valeur du pourcentage d'argile contenue dans le matériau.

La deuxième lettre qui est minuscule indique si le matériau est bien ou mal gradué.

b : pour bien gradué  
m : mal gradué

Le deuxième chiffre indique en millimètres le diamètre des plus gros grains.

Enfin, pour les matériaux mal gradués, on spécifie s'il y a dominance des gros ou des fins éléments.

- f : pour une forte proportion d'éléments fins
- g : pour une forte proportion de gros éléments.

exemple :

B 30 m2g

Ce matériau contient 30% de bentonite, il est mal gradué avec une forte proportion de gros éléments; la taille maximum des grains est de deux millimètres.

### 2.2. Influences de la minéralogie des argiles

Afin de rendre compte des influences de la nature minéralogique, nous avons reconstitué trois matériaux bien gradués :

- B 30 b<sub>1</sub>, contient 30% de bentonite qui est une argile active de la famille des montmorillonites.
- K 40 b<sub>1</sub>, contient 40% de kaolinite. Nous avons dû mettre cette teneur car elle est très peu plastique et n'empêchait pas le drainage des éprouvettes à teneur de 30% lors du compactage.
- B 20 K 10 b<sub>1</sub> contient 20% de bentonite et 10% de kaolinite.

Les courbes granulométriques et les droites intrinsèques de ces matériaux sont représentées aux figures 36 et 37.

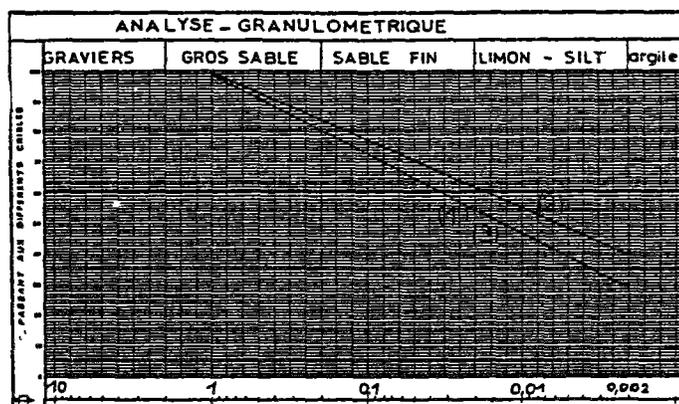


Fig. 36 : Courbes granulométriques de :  
B30b<sub>1</sub> (1); K40b<sub>1</sub> (2) et B20K10b<sub>1</sub> (3)

Nous constatons les phénomènes suivants :

- Le potentiel de retrait de B30b<sub>1</sub> est supérieur à celui de K40b<sub>1</sub>, ce qui signifie que le matériau qui contient l'argile la plus active est plus sensible au retrait.

Le potentiel de retrait est le pourcentage de retrait que peut engendrer un sol à une teneur en eau donnée, si celui-ci est séché au moins jusqu'à la limite de retrait. Ce potentiel varie en fonction de la teneur en eau initiale d'un sol. La droite intrinsèque représente l'ensemble du potentiel de retrait.

- Les fourchettes de teneurs en eau sont très différentes suivant la nature de l'argile contenue dans le matériau.

K40b<sub>1</sub>, a une fourchette très réduite. Ceci est dû au drainage important que subit l'échantillon pendant le compactage. L'eau se draine jusqu'à ce qu'un équilibre entre les diverses contraintes s'établisse au sein de l'éprouvette. Cet équilibre se situe à une teneur en eau voisine de 15%, la limite du retrait est égale à 12,9%; il reste donc une fourchette très réduite pour les essais.

B30b<sub>1</sub> a la fourchette de teneur en eau la plus étendue car plus plastique il peut absorber plus d'eau. Mais cette plasticité induit une hétérogénéité de teneur en eau pendant le séchage. En effet, l'échantillon sèche plus rapidement en surface, l'eau située à l'intérieur de celui-ci n'a pas le temps de migrer vers la surface pour homogénéiser la teneur en eau au sein du matériau.

Ceci explique le fait que l'on ne puisse plus obtenir d'éprouvette cohérente pour des teneurs en eau inférieures à 16% car les parties trop sèches dans l'éprouvette n'ont plus la cohésion suffisante pour assurer l'homogénéité de celle-ci après le démontage. Pour préparer des éprouvettes homogènes à des teneurs en eau faibles, il aurait fallu attendre trop longtemps. Quant à la fourchette de B20K10b<sub>1</sub>, elle est plus faible que celle de B30b<sub>1</sub>, mais a l'avantage de contenir des teneurs en eau situées près de la limite de retrait.

- Sur la fourchette de teneur en eau allant de 10 à 20%, le mélange de bentonite et de kaolinite donne à B20K10b<sub>1</sub> un potentiel de retrait légèrement supérieur à celui de B30b<sub>1</sub>, qui contient pourtant une argile plus active.

Nous pensons que l'apport de kaolinite dans la bentonite permet un arrangement final plus étroit de la pâte, de ce fait l'amplitude de retrait pour une teneur en eau initiale donnée est plus importante.

Cependant, sur chantier, l'essentiel est de connaître la teneur en eau initiale in situ pour déduire à l'aide de la droite intrinsèque le potentiel de retrait.

En effet, un matériau comme B30b<sub>1</sub> pourrait avoir un potentiel beaucoup plus élevé que celui de B20K10b<sub>1</sub> car ce matériau possède une matrice qui peut emmagasiner plus d'eau que B20K10b<sub>1</sub>.

Par exemple, considérons que la teneur en eau d'équilibre des matériaux in situ est environ égale à la moyenne des teneurs en eau de la fourchette de chaque échantillon. On obtient une valeur de 15% pour B20K10b<sub>1</sub> et de 24% pour B30b<sub>1</sub>. Il en résulte que le pourcentage de retrait de B30b<sub>1</sub> est très supérieur à celui de B20K10b<sub>1</sub>.

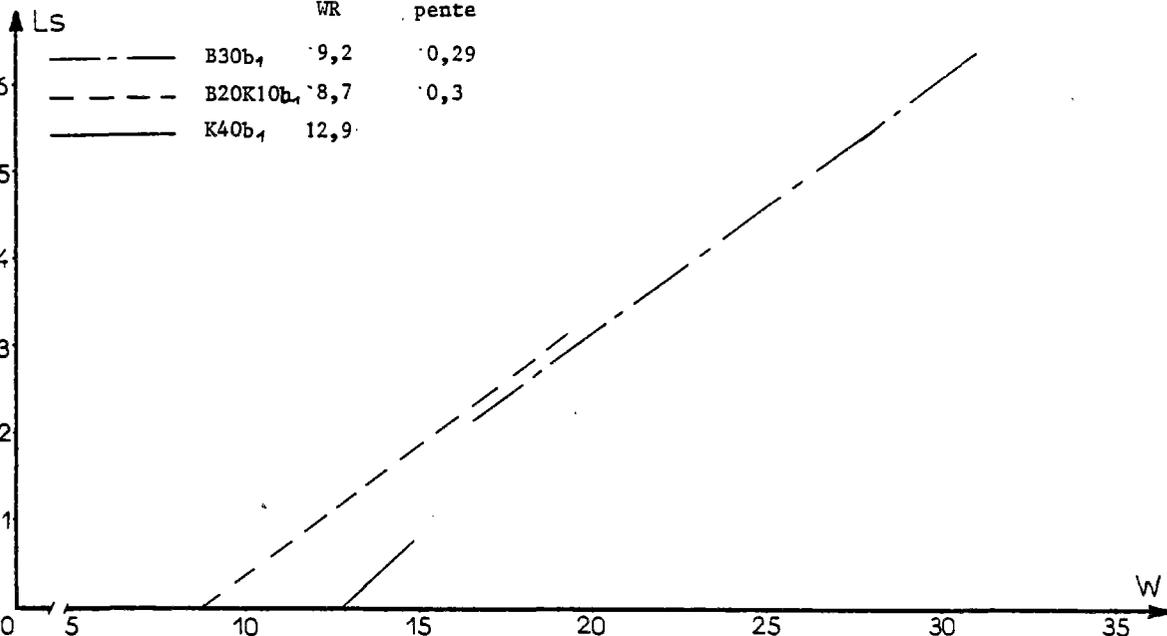


Fig. : 3.7 droites intrinsèques des matériaux : B 30b.; K40b1 et B20 K10 b1

Nous pensons que ceci est dû à la présence de kaolinite peu plastique qui favorise la migration de l'eau et diminue la plasticité engendrant une meilleure homogénéisation de la teneur en eau au sein du matériau. Ainsi, on peut obtenir des éprouvettes à des teneurs en eau plus faibles que celles de B30b<sub>1</sub>.

Nous venons de voir que la nature minéralogique de l'argile intervient pour une part importante dans le potentiel de retrait car elle conditionne la capacité d'adsorption, de migration et de départ de l'eau au sein d'un matériau. Ajoutons que cette influence se manifeste au niveau des courbes de retrait. Nous allons présenter les quatre types de courbes :

- Le type A (fig. 38) représente le comportement au retrait des sols fins silteux très micacés. Nous ne l'avons rencontré dans aucune autre catégorie de sol. D'après les photos réalisées au MEB, nous pensons que les feuillets de micas et les aiguilles aciculaires mêlées régulièrement à l'argile, qui est dans tous ces cas en faible quantité, constituent un réseau de drainage efficace et atténue fortement la cohésion et l'imperméabilité de l'argile, facilitant ainsi l'écoulement de l'eau.

Effectivement, lors du compactage, ces sols se drainent très facilement même sous la très faible contrainte de 0.4 MPa. Par conséquent, à la fin du compactage les éprouvettes ne possèdent plus que l'eau nécessaire et suffisante à la lubrification qui permet de réaliser l'arrangement optimum des particules. La plupart des particules sont déjà en contact maximum. Par conséquent, l'éprouvette au début de l'essai se trouve déjà dans la seconde phase du retrait pendant laquelle s'effectuent les derniers arrangements maximum, qui aboutiront à la limite de retrait.

Il conviendrait de dire que, pour les sols argileux silteux, un essai de gonflement serait plus adapté qu'un essai de retrait. En effet, nous ne pouvons pas conclure que pour ce type de sol le retrait est nul car il s'est effectué pendant le compactage. Les sols ne sont pas insensibles à l'eau, car si l'eau s'écoule facilement, elle peut y pénétrer rapidement.

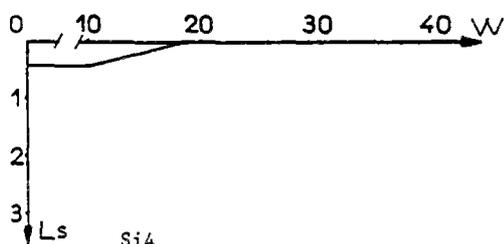


Fig. 38



photo n° 4 grossissement : 10K; sol Si4

Le type C (fig. 39) est le comportement le plus fréquent. Il est caractérisé par une première phase linéaire à laquelle succède une seconde phase brève et la troisième commence lorsque le volume ne varie plus malgré le départ de l'eau.

Pour la première phase, il convient de nuancer les résultats de TESSIER. Nous avons déjà constaté au chapitre II que les pentes des droites des courbes de retrait ne sont pas identiques ce qui prouve que pour un même départ d'eau la variation de longueur n'est pas la même dans chaque sol. Par conséquent, dans nos sols de fraction (0-1 mm) chaque départ d'eau n'est pas accompagné par une diminution égale de longueur. Le squelette fin mélangé à l'argile intervient sur l'arrangement du sol et donc sur la variation de volume.

Il est clair que les éprouvettes compactées à des teneurs en eau faibles ne sont pas saturées, l'air est déjà au sein de l'échantillon, celui-ci est nécessaire à la formation des forces de capillarité qui engendrent la contraction du matériau simultanément au départ de l'eau. L'amplitude du phénomène dépend de la nature minéralogique mais aussi de son mélange avec le squelette. Ce mélange conditionne la pente et l'étendue de la droite intrinsèque.

La seconde phase est l'étape intermédiaire pendant laquelle les différents éléments constituant le matériau entrent en contact. En général, elle est rapide car la plupart des sols contiennent de la kaolinite.

Nous avons vu au "1.2." de ce chapitre que dans le cas des kaolins, la seconde phase

du retrait est très rapide. Dès que les cristallites sont en contact le retrait est terminé, il n'y a pas de déformations ou de ruptures d'unités morphologiques qui interviennent. La limite de retrait est atteinte.

Lors de la troisième phase, les contacts sont maximum, donc le volume est invariant bien que l'eau s'évapore encore.

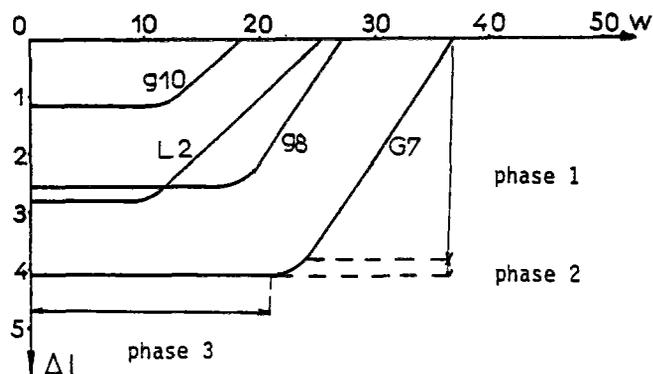


Fig. 39 : Courbes du type C

rapidement, augmentant ainsi la seconde phase par rapport à celle des matériaux bien cristallisés.

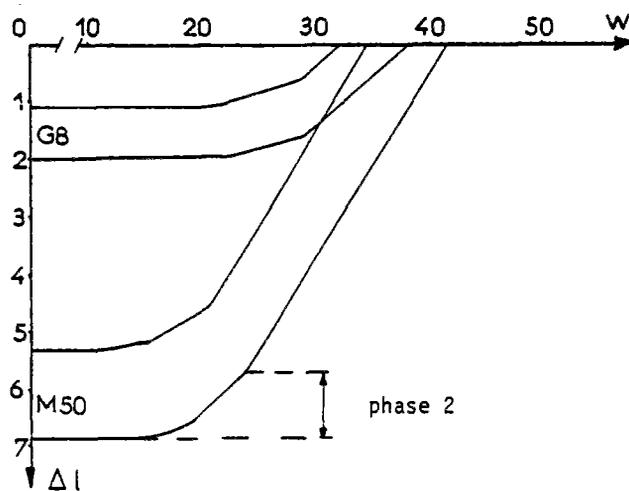


Fig. 40 : Courbes du type B

- Le type B est un comportement plus rarement rencontré. Il se caractérise par une étendue importante de la seconde phase; la première et la troisième étant identiques au type C (fig. 40).

M50 est un matériau reconstitué avec 50% de Montmorillonite et de sable siliceux, G8 contient un interstratifié illite-montmorillonite. Il serait donc possible que les unités morphologiques se déforment ou se brisent.

Suivant l'étendue, la seconde phase peut être linéaire ou constituée par un arc de cercle de très grand rayon.

Les résultats de TESSIER présentés au début du chapitre n'ont pas été constatés.

En effet, sur les photos n° 5 et 6 nous ne remarquons pas de déformations ou de ruptures des unités morphologiques. Nous pensons que ces résultats ne s'appliquent qu'à des matériaux dont les particules argileuses ont été préalablement dispersées. Nos matériaux ne possédaient pas les conditions initiales des argiles utilisées par TESSIER, les indices des vides étaient probablement très inférieurs à 6. Par conséquent, les unités morphologiques n'avaient pas la même liberté et amplitude de déformation.

Cependant, nous n'avons pas de solutions à apporter pour expliquer la partie linéaire de la seconde phase de la courbe de retrait des sols. Par contre, les arcs de cercle de grand rayon se rencontrent plutôt dans les sols à argiles mal cristallisées car la juxtaposition des cristallites ne s'effectue pas toujours simplement plan sur plan, comme pour les cristallites et kaolinite bien cristallisés. Par conséquent, la mise en place des groupes de cristallites se réalise moins

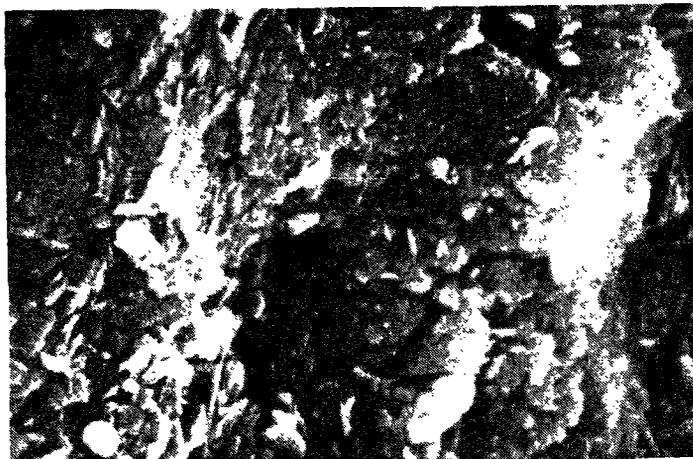


photo n° 5 : photo de G8 réalisée au MEB  
grossissement : 10 K

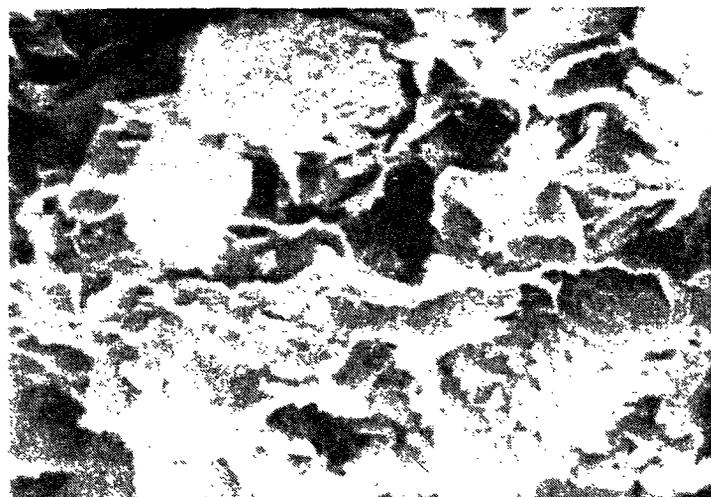


photo n° 6 : photo de M50 réalisée au MEB  
grossissement : 10 K

- Le type D est sensiblement identique au type C; cependant, la courbe de retrait, plus faible au début de la première phase, s'accroît ensuite après une perte de quelques points de teneurs en eau. Nous pensons que ce comportement est dû à deux phénomènes conjugués.

Le premier est lié à la circulation de l'eau. En effet, au début de l'essai de retrait linéaire, nous avons constaté que certaines éprouvettes séchaient plus rapidement sur la section externe qu'au centre, tant que la migration de l'eau au sein du matériau ne s'était pas établie de façon régulière. Nous avons remarqué que pour une certaine quantité d'eau évaporée, le retrait longitudinal au sein de l'éprouvette est différentiel. Il est d'autant plus important que l'on s'éloigne du centre, provoquant ainsi le bombement des deux faces de l'éprouvette. Les plaquettes qui reçoivent les tiges des comparateurs s'appuient au centre des faces, par conséquent ces derniers enregistrent un retrait partiel longitudinal et non le retrait mentionné à la figure 41. L'enregistrement du retrait s'effectue à nouveau normalement lorsque la teneur en eau au sein de l'éprouvette n'est plus différentielle.

Si ce comportement apparaît seulement aux teneurs en eau élevées, nous pensons que le phénomène est lié au compactage. Lorsque l'échantillon est saturé et soumis à une contrainte, l'eau cherche à s'écouler vers l'extérieur de l'éprouvette pour dissiper des pressions interstitielles. Les matériaux contenant beaucoup de fines subissent ce processus d'écoulement. Cependant, le temps de compactage est trop court pour que le drainage soit efficace, mais suffisant pour qu'une concentration d'eau apparaisse à la surface externe de l'éprouvette. Au début de l'essai, les comparateurs enregistrent le retrait longitudinal alors que l'eau accumulée sur la paroi du cylindre s'évapore très vite. Donc, pour un retrait longitudinal donné, on enregistre une quantité d'eau évaporée plus importante, tant que l'évaporation n'est pas homogène au sein de l'éprouvette.

Les deux phénomènes expliqués ci-dessus peuvent s'additionner et augmenter la différence de pente entre les deux droites de la première phase de retrait. Nous constatons que si l'enregistrement linéaire de retrait est très simple d'emploi il présente toutefois l'inconvénient aux teneurs en eau élevées et pour les matériaux riches en fines, de ne pas pouvoir enregistrer tout le retrait longitudinal. Mais notons que cet  $\xi$  non enregistré est suffisamment faible pour ne pas diminuer sensiblement le retrait longitudinal total, car on ne remarque aucune perturbation sur la droite intrinsèque.

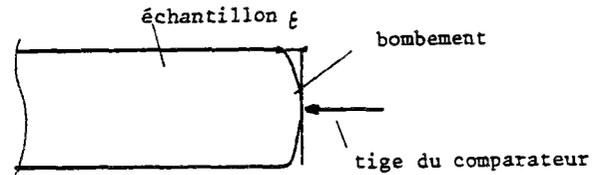


Fig. 41 : Déformation de l'extrémité de l'éprouvette

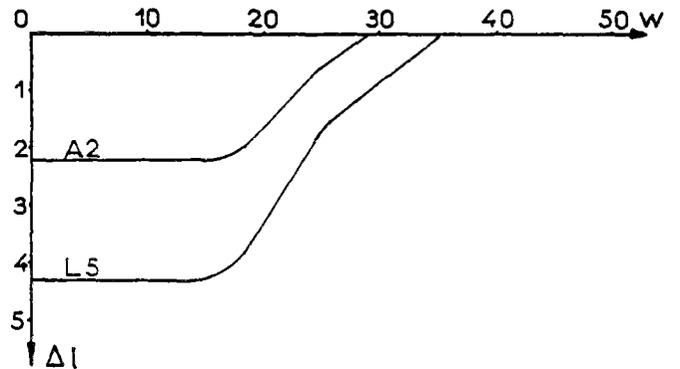


Fig. 42 : Deux courbes de retrait du type D

#### Remarque :

Nous avons commenté les différents types de courbes de retrait et tenté d'expliquer la particularité de chacun. Afin d'approfondir le sujet et voir si nous pouvions remarquer des liens entre les variations de succion en fonction de la teneur en eau et les ruptures des pentes de retrait, nous avons réalisé des essais de succion sur des matériaux caractéristiques de chaque type de comportement.

Nous constatons que la succion maximale de PF3 appliquée au sol est trop faible car la fourchette de teneur en eau de l'essai est contenue dans celle des teneurs en eau de la partie linéaire de la courbe de retrait. La succion n'est pas suffisante pour atteindre les teneurs en eau voisines de la limite de retrait. Ce fait est constaté aux figures 43 et 44

Par conséquent, nos résultats n'apportent pas d'informations sur les variations de la succion tout au long du retrait. Il s'avère nécessaire d'utiliser des succions pouvant atteindre PF6 ou plus d'après les travaux de TESSIER.

essai de succion (B.KIBKALO juin 1980)

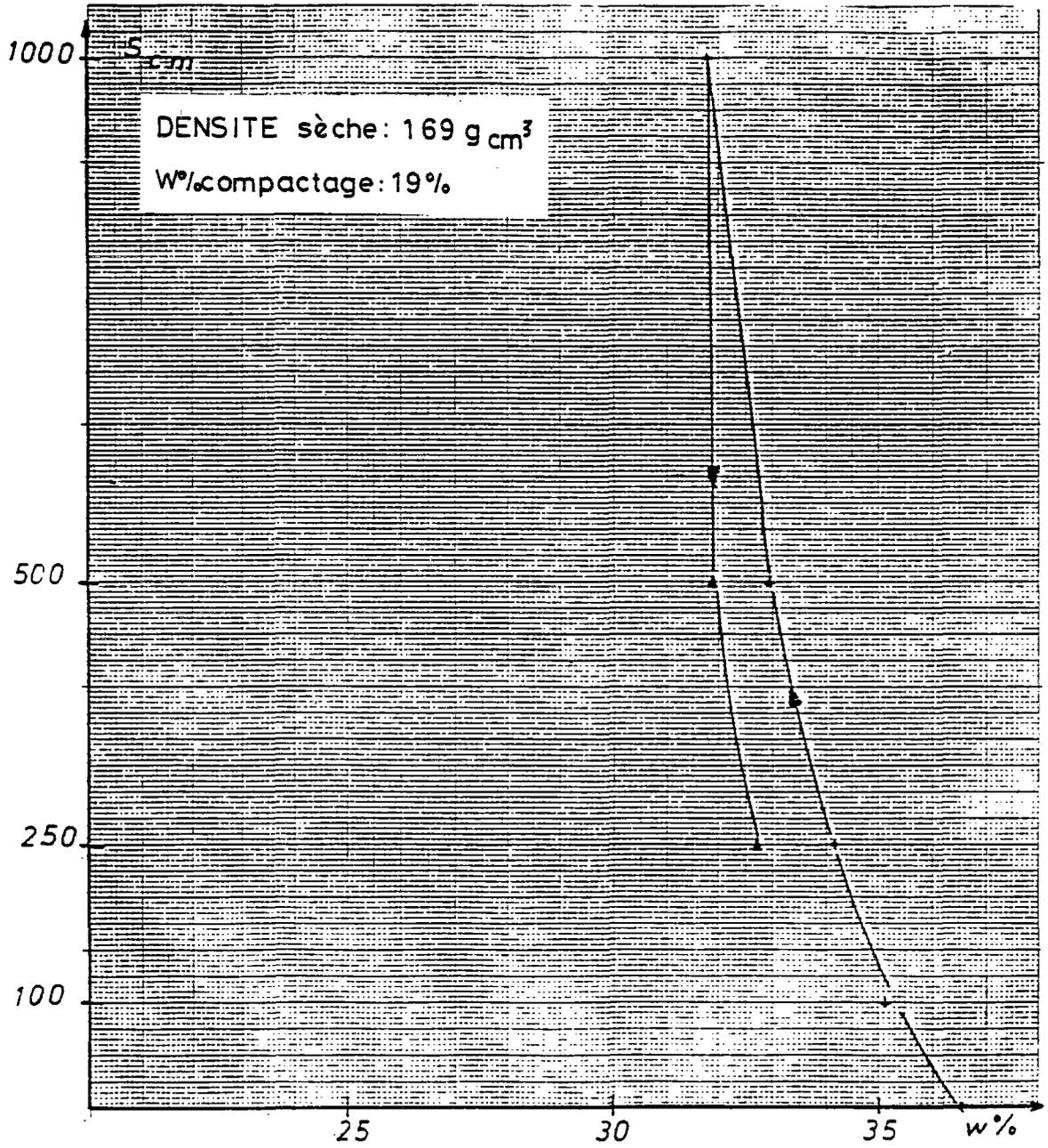


fig:43 courbe de succion du sol G8

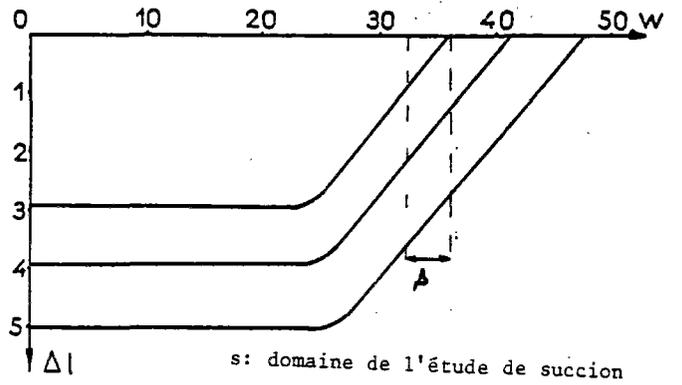


fig:44 courbe de retrait du sol G8

2.3. Influences de la quantité d'argile

Pour montrer l'influence de la quantité d'argile sur le retrait, nous avons reconstitué trois échantillons contenant le même type de squelette siliceux, mais pas la même teneur en argile.

Les trois échantillons (B40b<sub>1</sub>, B30b<sub>1</sub> et B20 b<sub>1</sub>) sont bien gradués et le diamètre maximum des grains est d'un millimètre. Les teneurs en argile sont respectivement de quarante, trente et vingt pour-cent.

L'argile utilisée est une bentonite car les amplitudes de retrait sont importantes. En effet, plus l'argile est sensible à l'eau plus il est aisé de remarquer des variations sur les paramètres de retrait .

Les résultats des essais de retrait de ces trois matériaux sont représentés par les droites intrinsèques à la figure 46

Il apparaît clairement que les droites sont différentes. Plus la teneur en argile augmente, plus la pente de la droite intrinsèque et la limite de retrait croissent. Parallèlement, si l'on trace les droites ( $\Delta$ ) respectives à chaque matériau sur les courbes de retrait en prenant comme abscisse à l'origine la limite de retrait obtenue par les droites intrinsèques, on constate sur la figure 47 que les angles  $\beta.40$ ,  $\beta.30$  et  $\beta.20$  correspondant aux matériaux B40b<sub>1</sub>, B30b<sub>1</sub> et B20b<sub>1</sub> décroissent respectivement, de la même façon que les pentes des droites intrinsèques.

Ceci signifie que plus il y a d'éléments très fins argileux dans un même matériau, plus la variation de la limite de retrait en fonction de la teneur en eau initiale est faible. Pour B40b<sub>1</sub>, l'arrangement maximal des grains est pratiquement constant quelle que soit la teneur en eau initiale de l'échantillon.

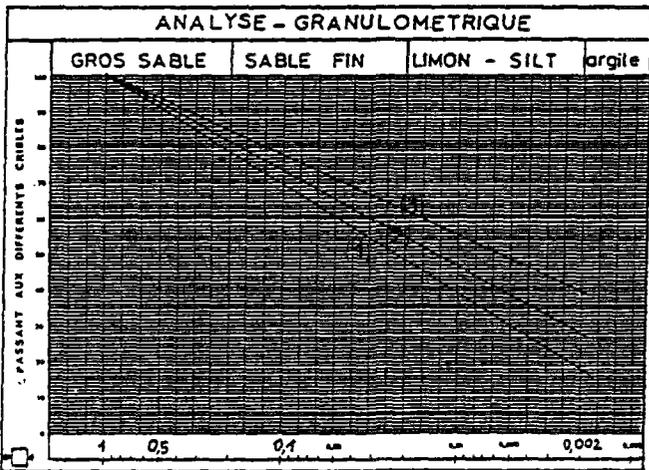


fig:45 courbes granulométriques de : (B40b<sub>1</sub>) (B30b<sub>1</sub>) (B20b<sub>1</sub>)

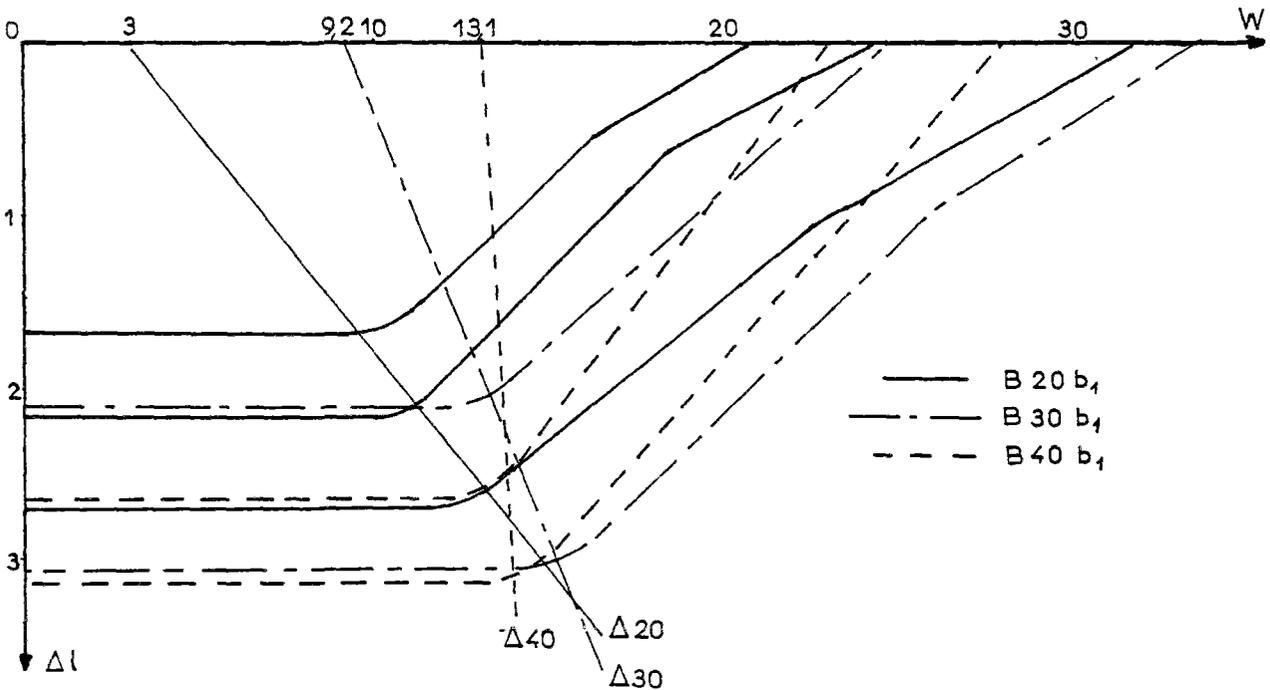


Fig. : 47 Courbes de retrait des matériaux B40b<sub>1</sub>, B30b<sub>1</sub> et B20b<sub>1</sub>

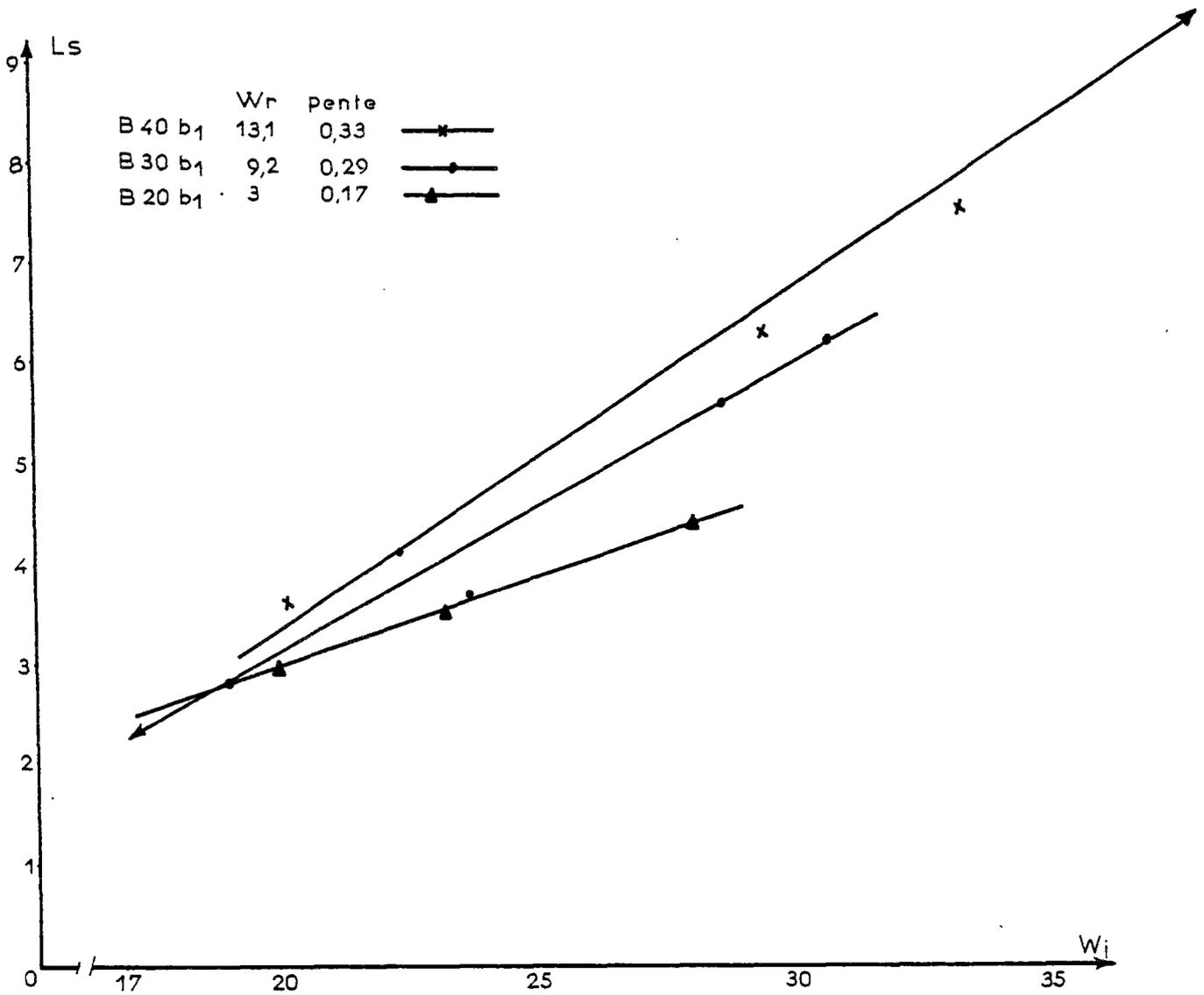


Fig. :46 droites intrinsèques des sols, B40b1, B30b1 et B20b1

#### 2.4. Influences de la granularité

##### 2.4.1. Influences de la répartition

Nous avons reconstitué cinq matériaux :

- Trois ont une teneur en bentonite de trente pour-cent. Le diamètre des plus gros grains est de 2 mm. B30m2g, dont la courbe granulométrique (1) est constitué par un squelette siliceux contenant surtout de gros éléments, B30m2f est constitué par un squelette essentiellement formé d'éléments fins inertes (fig. 48 (3) et B30b<sub>2</sub> est bien gradué (fig. 48(2)).

- Les deux derniers ont une teneur en bentonite de vingt pour-cent. Le diamètre maximum des grains est de 1 mm.; B20b<sub>1</sub> est bien gradué alors que B20m<sub>1</sub> est constitué par un squelette contenant surtout de gros éléments (fig. 49 (1))

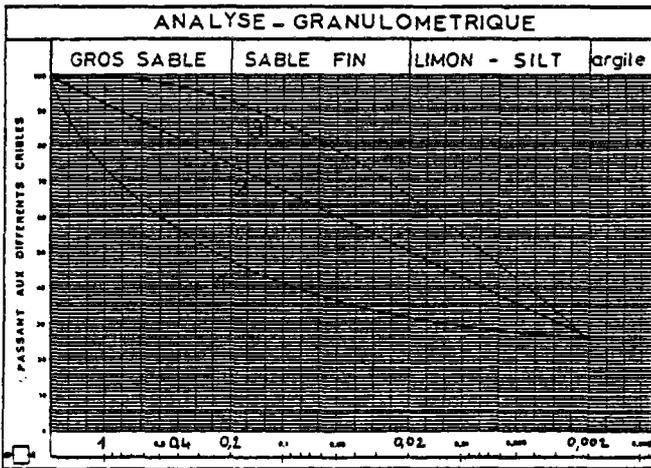


Fig. 48 : Courbes granulométriques des matériaux :

(1) B30m<sub>2g</sub>; (2) B30b<sub>2</sub> et B30m<sub>2f</sub>

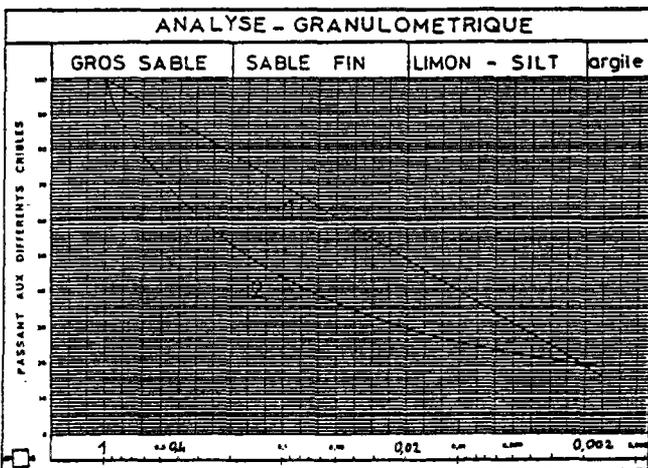


Fig. 49 : Courbes granulométriques des matériaux :

(1) B20b<sub>1</sub> et B20m<sub>1g</sub>

Les droites intrinsèques de ces cinq matériaux sont représentées à la figure 50. Pour les deux types de matériaux à teneur en bentonite différente, nous constatons entre les matériaux mal gradués à forte proportion de gros éléments et les matériaux correspondants bien gradués les phénomènes suivants :

- La pente de la droite intrinsèque des matériaux mal gradués est sensiblement identique à celle du matériau correspondant bien gradué.
- Dans le cas des échantillons à trente pour-cent de bentonite, ce phénomène est dû à une combinaison adéquate entre  $\beta_g$ , la pente  $\Delta g$  et  $\beta_b$ , la pente  $\Delta b$  (fig. 52). C'est pourquoi on ne peut généraliser à tous les sols la propriété de parallélisme entre les deux droites intrinsèques.
- Les deux amplitudes de retrait des matériaux mal gradués sont nettement plus faibles que celles des matériaux correspondants bien gradués.

Afin de savoir si ces phénomènes sont liés à la densité ou à la porosité du matériau, nous avons reporté sur la figure 50, les densités sèches initiales en fonction de la teneur en eau de chaque éprouvette pour réaliser les éventuelles variations de densité des matériaux à 30% de bentonite. Nous avons également mesuré la porosité de ces mêmes échantillons sur la fraction (0,08-2 mm), la fraction inférieure étant considérée comme faisant partie de la pâte. Pour mesurer les porosités, nous avons mélangé chaque fraction (0,08-2mm) et les avons versés dans une éprouvette graduée. Pour obtenir le volume des vides, nous avons versé de l'eau dans l'éprouvette à l'aide d'une burette graduée jusqu'au ras des granulats. Ainsi, nous obtenions le volume des vides par lecture directe sur la burette et le volume total de l'échantillon par lecture directe sur l'éprouvette.

La porosité  $n$  est égale à :

$$n = \frac{V_v}{V_T}$$

$V_v$  : volume des vides contenus dans l'échantillon.

$V_T$  : volume total de l'échantillon.

Nous constatons que la différence de potentiel de retrait entre chaque sol n'est pas due aux densités sèches initiales des fractions totales. En effet, nous constatons à la figure 51 que les densités sont sensiblement identiques sur la fourchette de teneur en eau des essais pour une même teneur en eau initiale.

Par contre les porosités des échantillons B30b<sub>2</sub> et B30m<sub>2g</sub> sont respectivement de 0,25 et de 0,35. Il faut donc plus de pâte et par conséquent d'argile, pour remplir les vides dans les échantillons mal gradués, que pour les échantillons bien gradués. Le retrait de la pâte située dans les pores ne s'ajoute pas totalement à celui de la pâte située aux droits des contacts entre les grains. Globalement il en résulte que sur la longueur de l'éprouvette, l'amplitude totale de retrait d'un matériau mal gradué à forte porosité est inférieure à celui d'un matériau bien gradué à porosité inférieure.

Les arrangements finaux des édifices granulaires des matériaux mal gradués s'effectuent à des teneurs en eau supérieures à celles des matériaux correspondants bien gradués. Pour B30m<sub>2g</sub>, nous pouvons ajouter que la teneur en eau d'arrangement final varie moins en fonction de la teneur en eau initiale que pour B30b<sub>2</sub> (fig. 52).

En revanche, nous constatons que pour le matériau B30m<sub>2f</sub> contenant une forte proportion d'éléments fins, que la pente intrinsèque est plus élevée que celle de B30b<sub>2</sub>. Une fois encore, il semble que plus il y a d'éléments très fins même inertes plus la pente de la droite intrinsèque est élevée et moins sensible est la variation de la limite de retrait en fonction de la teneur en eau initiale de l'échantillon. Ceci signifie que la teneur en eau d'arrangement final de l'édifice granulaire est pratiquement constante.

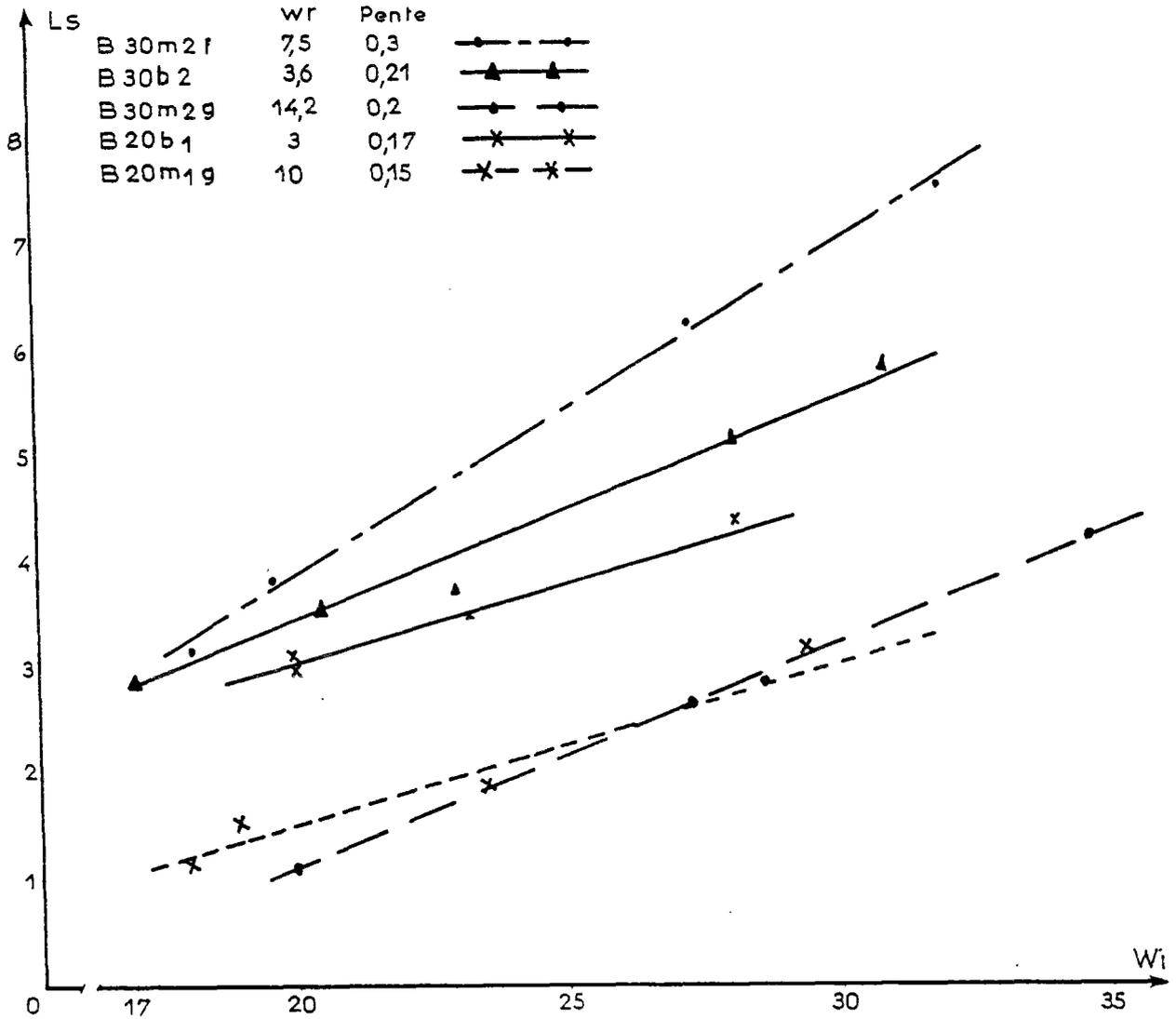


Fig. : 50 droites intrinsèques des sols : B30m2f; B30b2, B30m2g, B20b1 et B20m1g

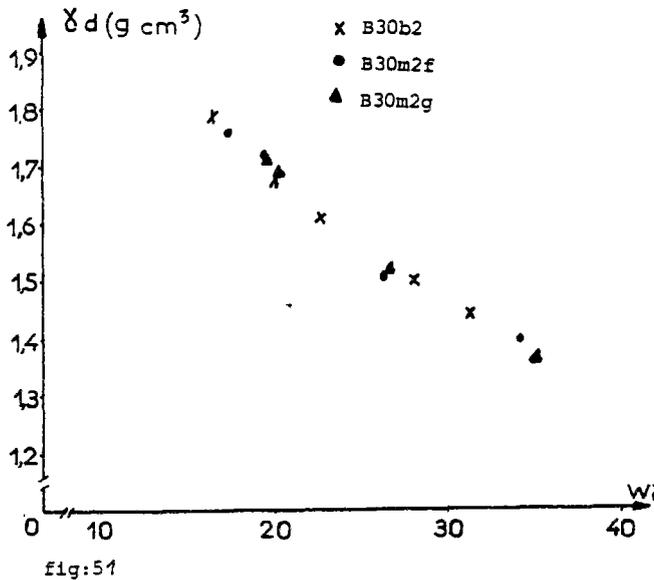


Fig. 5-2 : Répartition des points de densité sèche initiale des sols B30b<sub>2</sub>; B30m<sub>2</sub>f; B30m<sub>2</sub>g. Ces densités sont très sensiblement identiques sur la fourchette de teneurs en eau des essais.

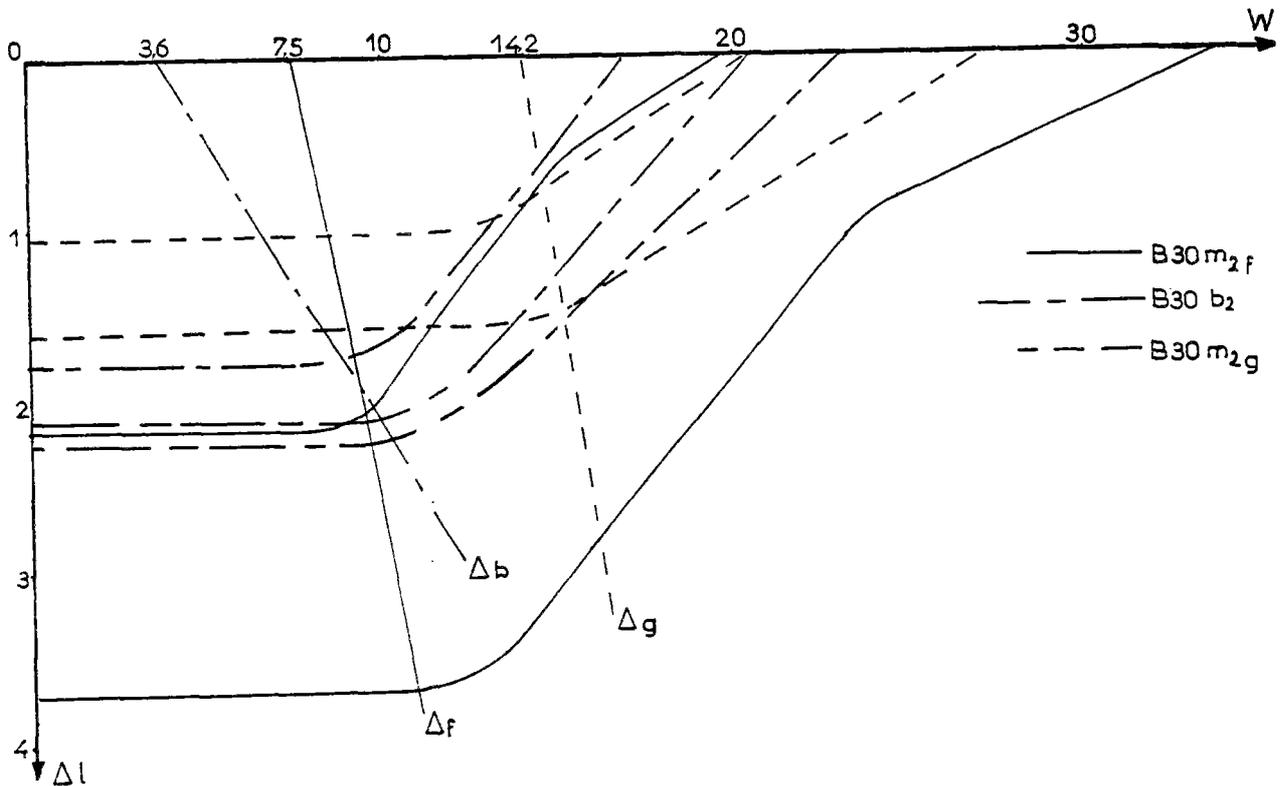


Fig. : 52 Courbes de retrait des sols : B30m2f; B30b2 et B30m2g

2.4.2. Etendue de la granularité sur matériaux bien gradués

Nous avons reconstitué quatre échantillons B30b0,5, B30b1, B30b2 et B30b3 contenant la même teneur en bentonite. Le paramètre variable est la taille des plus gros grains. Chaque matériau a sa courbe granulométrique représentée sur la figure 53.

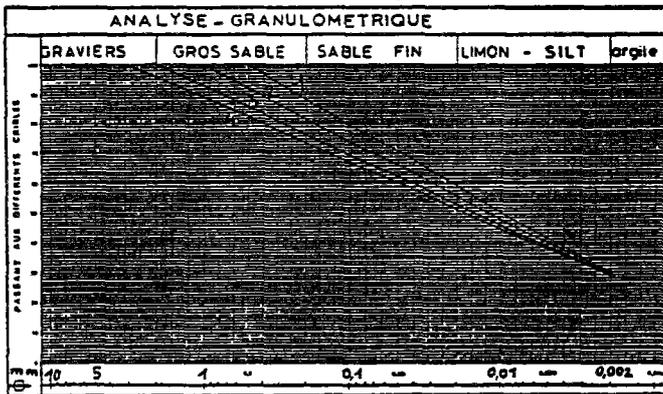


Fig. 53 courbes granulométriques de

- (1) B30b0,5 ; (2) B30b1
- (3) B30b2 ; (4) B30b3

Les droites intrinsèques sont représentées sur la figure 54. Nous constatons qu'elles sont peu distinctes mais suffisamment pour être différentes entre elles. Rappelons que les pourcentages de retrait sont obtenus en moyenne à + 0,04% près. Seule la pente de la droite du matériau B30b2 est plus faible, mais les amplitudes de retrait ne sont pas sensiblement différentes sur la fourchette de teneurs en eau de l'étude.

Nous n'avons pas mesuré les porosités des fractions (0,08-1 mm), mais étant bien graduées et constituées par les mêmes matériaux, les porosités correspondantes devraient être sensiblement identiques.

L'étendue de la fraction (0-D) n'influence que faiblement la droite intrinsèque tant que les variations d'étendue sont faibles. Nous verrons au chapitre IV qu'il n'en est pas de même lorsque l'on s'étend aux graveleux.

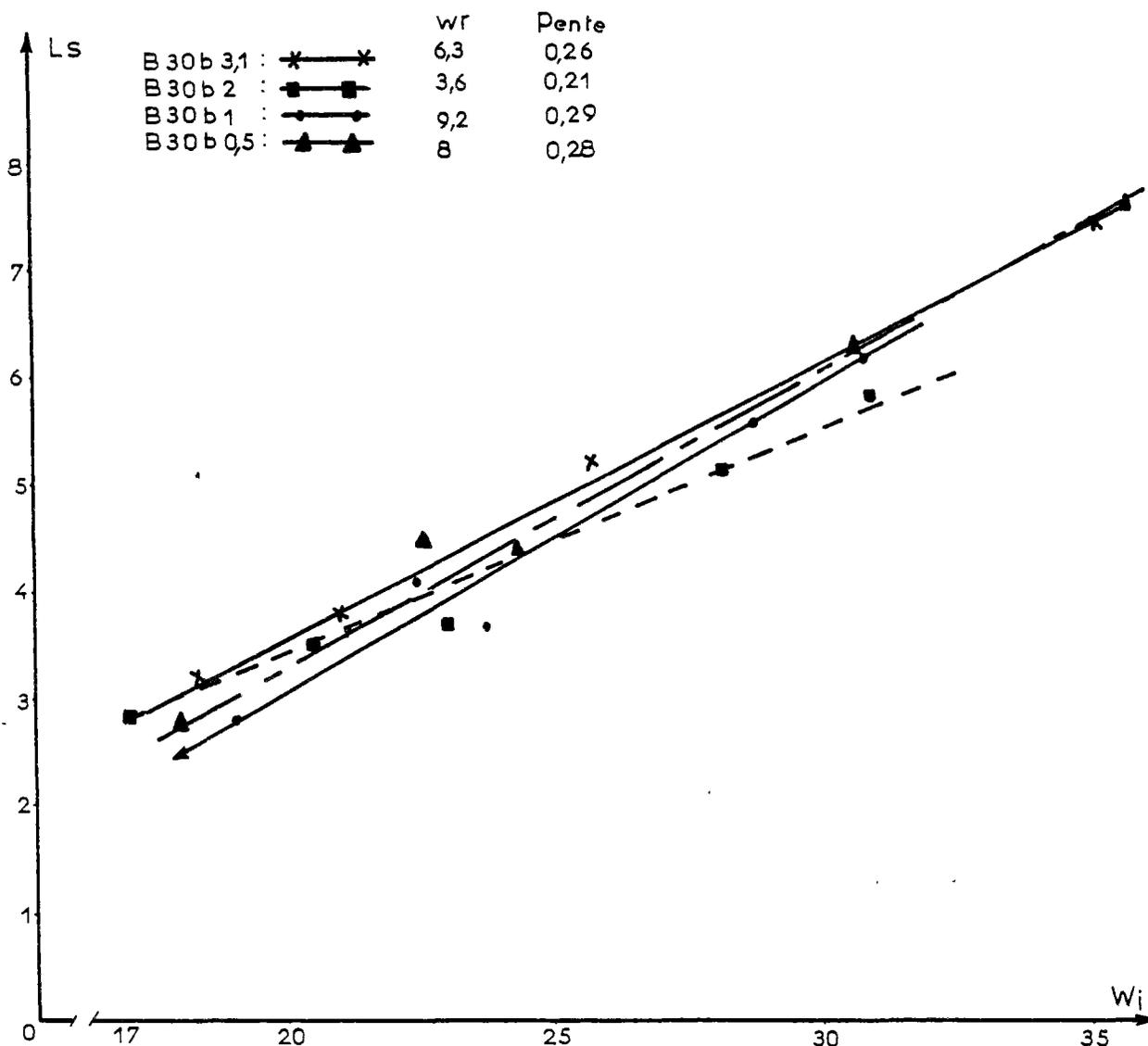


Fig.: 54 droites intrinsèques des sols : B30b3,1; B30b2; B30b1 et B30b0,5

### 3. INFLUENCES DU COMPACTAGE SUR LE RETRAIT

#### 3.1. Généralités

Pour rendre compte de l'influence du compactage sur la droite intrinsèque, nous avons sélectionné sept sols. Ils sont différents, tant par leur granularité que par l'activité de leur fraction et de leur comportement au retrait. Cependant, certains sols ont l'un de ces paramètres en commun. Chaque sol a été compacté aux trois contraintes suivantes : 0,4; 1,2 et 2MPa. Avec cet essai, nous ne sommes pas en mesure d'imposer une densité sèche initiale à l'éprouvette. Nous appliquons un mode de compactage avec lequel on obtient une éprouvette avec une certaine densité sèche.

Afin de voir si l'intensité de compactage et les densités sèches ont une influence sur le retrait, nous avons reporté sur chaque droite (fig.55-58) chacune de ces valeurs lorsque cela était possible.

Nous avons également représenté quelques courbes de retrait pour montrer les modifications que peut apporter le compactage sur les allures de ces courbes.

#### 3.2. Commentaires

Les variations d'intensités de compactage ne modifient pas le type de comportement au retrait, mais modifient les pentes des droites des courbes de retrait et celle de la droite ( $\Delta$ ). Par exemple, dans le cas de sol g3 (fig. 60), nous remarquons que l'angle  $\beta_{0,4}$  est supérieur à l'angle  $\beta_{1,2}$ , ce qui signifie que, pour une même perte d'eau, l'éprouvette compactée à 0,4MPa varie plus en longueur que celle compactée à 1,2MPa. La pente de ( $\Delta_{0,4}$ ) est plus faible que celle de ( $\Delta_{1,2}$ ). Mais sur la fourchette de teneurs en eau initiale des essais ( $\Delta_{0,4}$ ) est située à gauche de ( $\Delta_{1,2}$ ). L'ensemble des conditions sur les angles ( $\beta$ ) et droites ( $\Delta$ ) font que les éprouvettes compactées à 0,4 MPa ont logiquement un

potentiel de retrait plus élevé que celles compactées à 1,2MPa.

Pour chaque droite intrinsèque on constate que la densité sèche initiale décroît lorsque le pourcentage de retrait et la teneur en eau initiale augmentent.

On retrouve ce phénomène sur les sols L3 et L6. En effet, les droites intrinsèques (à 0,4MPa pour L6 et à 1,2 MPa pour L3) dont les éprouvettes ont les densités les plus fortes ont les potentiels de retrait les plus faibles.

Notons qu'au niveau du chantier, le compactage a un rôle essentiel puisque le potentiel de retrait est modifié, parfois très sensiblement. Il ne semble pas qu'il soit toujours judicieux de vouloir compacter intensément, car le potentiel de retrait de certains sols fins, comme L5 par exemple, est sensible aux augmentations d'intensités de compactage. Par contre, il pourrait être judicieux de compacter énergiquement certains sols.

Cependant, on sait également qu'un sol fin argileux gonfle d'autant plus que sa densité sèche est élevée.<sup>(1)</sup> Par conséquent, il s'avèrerait intéressant, pour des sols soumis au cycle "retrait gonflement" après leur mise en oeuvre, de réaliser des essais de gonflements sur les éprouvettes qui auront subi l'essai de retrait, afin de s'assurer que les désordres dus au gonflement ne seront pas plus importants que ceux dus au retrait.

La logique nous amènerait à compléter les remarques ci-dessus de la façon suivante :

- Pour une même teneur en eau, plus l'intensité de compactage est élevée plus la densité devrait être importante et, par conséquent, plus le pourcentage de retrait devrait chuter.

Mais nous constatons des anomalies auxquelles nous n'avons pas d'explications scientifiques à fournir :

- Par exemple (fig. 56) pour la teneur en eau initiale de 29%, la densité sèche initiale à 2MPa est inférieure à celles de 0,4 et 1,2MPa.
- (fig.57 ). Les densités sèches initiales sont sensiblement identiques pour chaque intensité de compactage et plus l'intensité est élevée plus le potentiel de retrait l'est également.

Nous avons constaté, sur les courbes de retrait et sur les droites intrinsèques, que l'intensité de compactage influence sensiblement le phénomène de retrait. Cependant, nous ne pouvons pas établir de loi pour préciser les effets de cette influence. La seule tendance enregistrée pour chaque droite intrinsèque est que la densité sèche initiale décroît lorsque le pourcentage de retrait augmente

### 3.3. Pourquoi avoir utilisé 1,2MPa pour compacter les éprouvettes.

Nous avons décidé d'utiliser la contrainte de 1,2 MPa pour compacter les éprouvettes destinées à l'essai de retrait pour les trois raisons suivantes :

- la valeur de 1,2 MPa est utilisée dans les Laboratoires des Ponts et Chaussées comme contrainte d'écrasement sur des éprouvettes de sols destinés à être mis en couche de forme. Ceci signifie que l'on estime que les sols peuvent encaisser une telle contrainte lors du compactage ou durant la mise en service de la chaussée.
- nous avons vu (au chapitre II) que pour des raisons de tenue de l'éprouvette, sur une fourchette de teneur en eau suffisamment étendue, nous devons utiliser au moins 1,2 MPa.
- aucune des trois valeurs 0,4, 1,2 et 2 MPa n'est plus représentative du sol considéré qu'une autre. Il fallait donc en choisir une, les deux critères ci-dessus nous ont fait opter pour 1,2 MPa.

(1)A.R. RODRIGUEZ, mai 1982

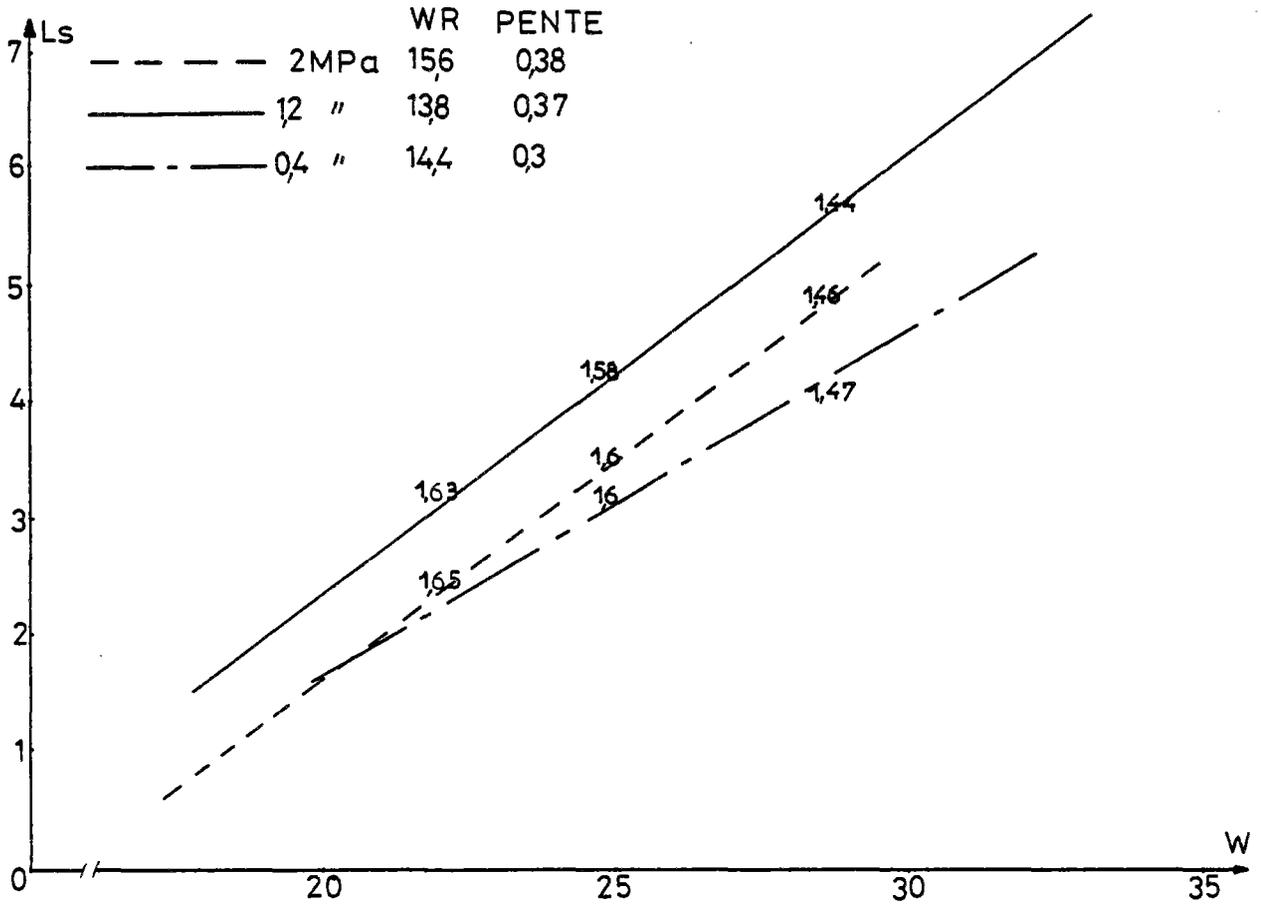


fig:55 droites intrinsèques de L6 aux contraintes de 2;1,2 et 0,4 MPa  
 les valeurs inscrites sur les droites sont les densités sèches en g/cm<sup>3</sup> de l'éprouvette correspondante

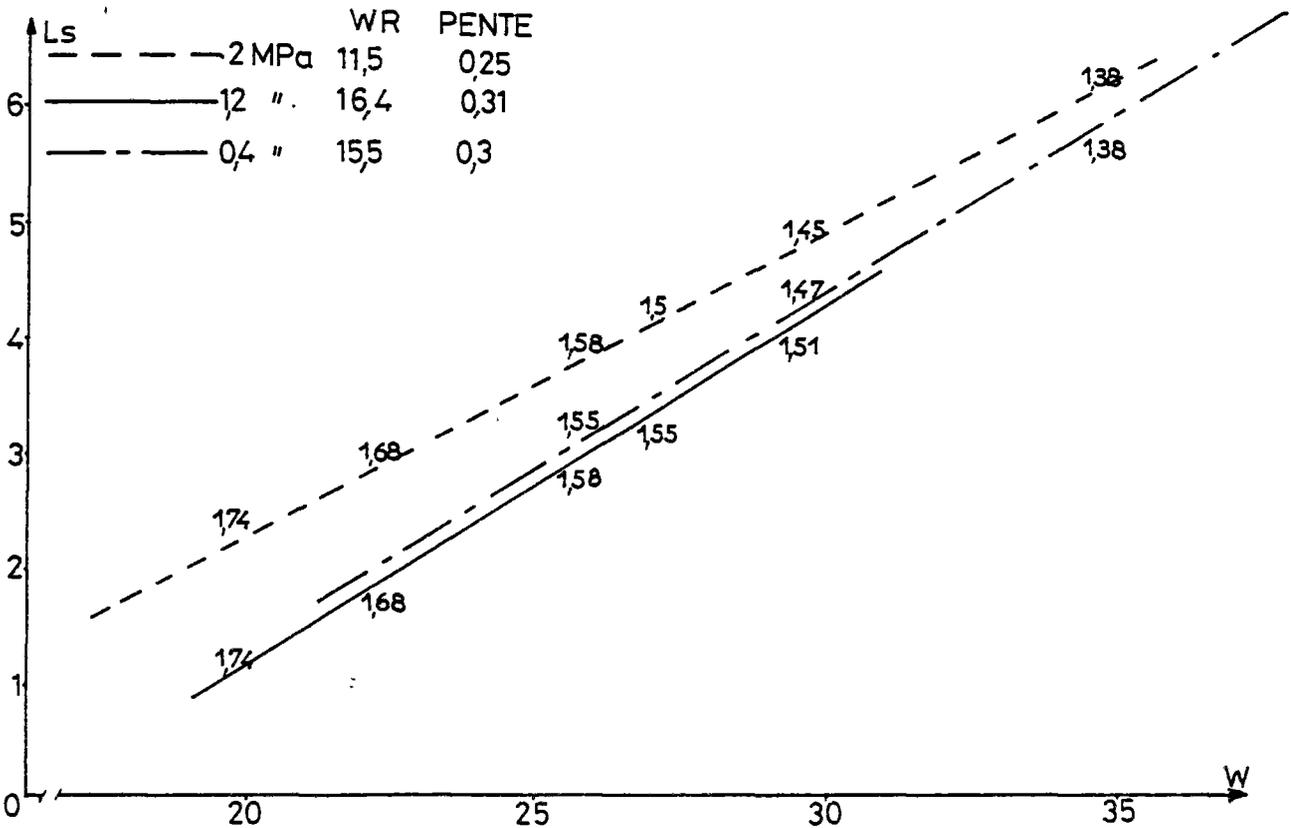


fig:56 droites intrinsèques de L3 aux contraintes de 2;1,2 et 0,4 MPa  
 les valeurs inscrites sur les droites sont les densités sèches en g/cm<sup>3</sup> de l'éprouvette correspondante

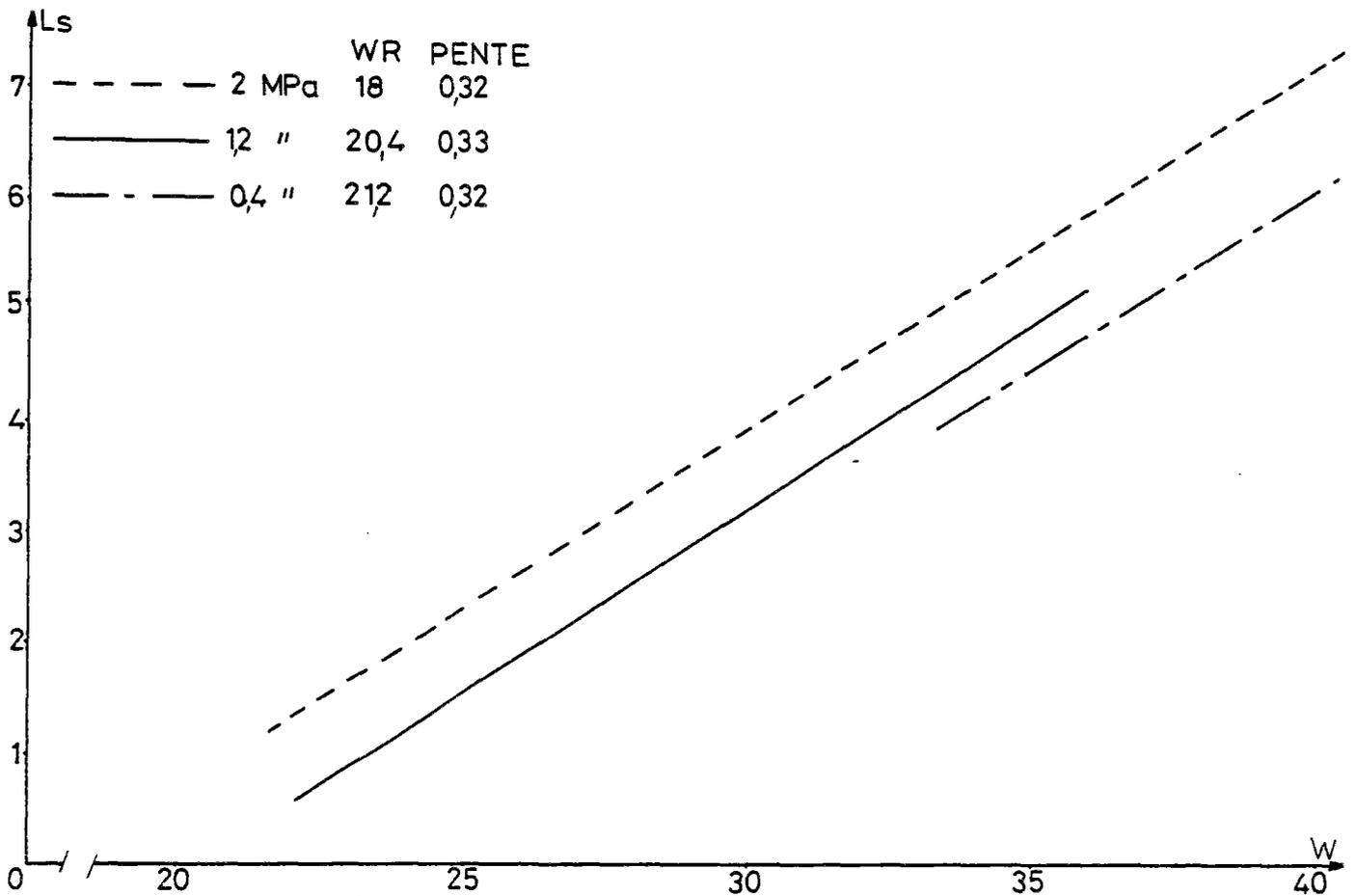


fig:57 droites intrinsèques de L5, aux contraintes de 2,1,2 et 0,4 MPa les densités sèches initiales sont très sensiblement les meme à chaque contrainte

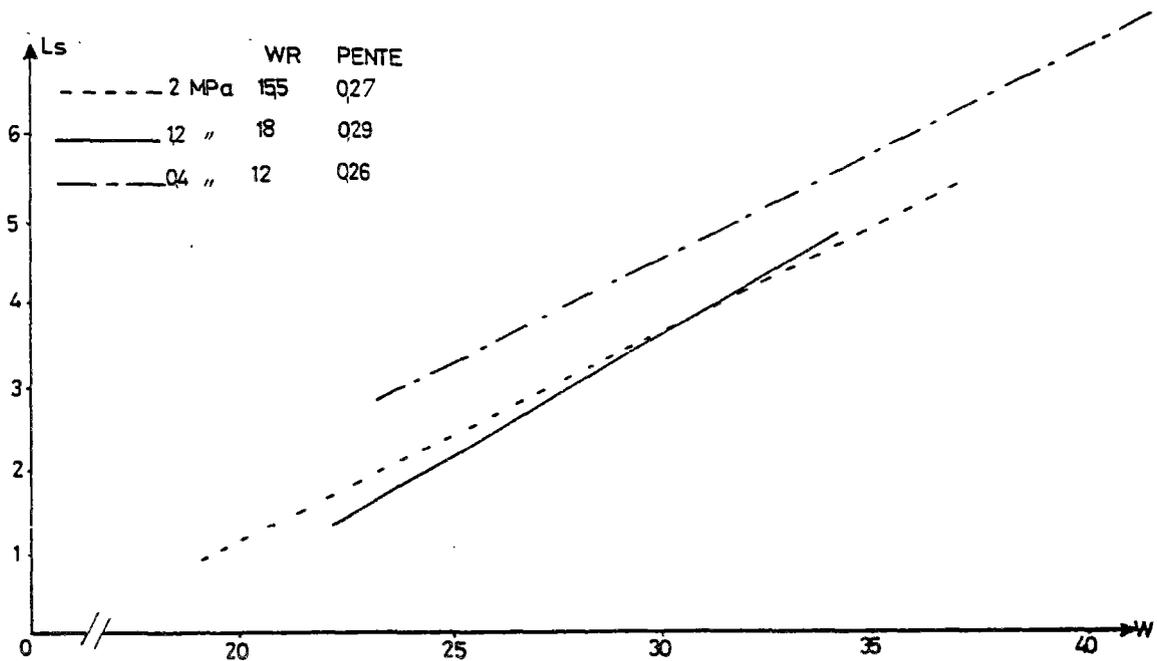


fig:58 droites intrinsèques de g3, aux contraintes de 2;1,2 et 0,4 MPa , les densités sèches sont identiques pour chaque état de contrainte

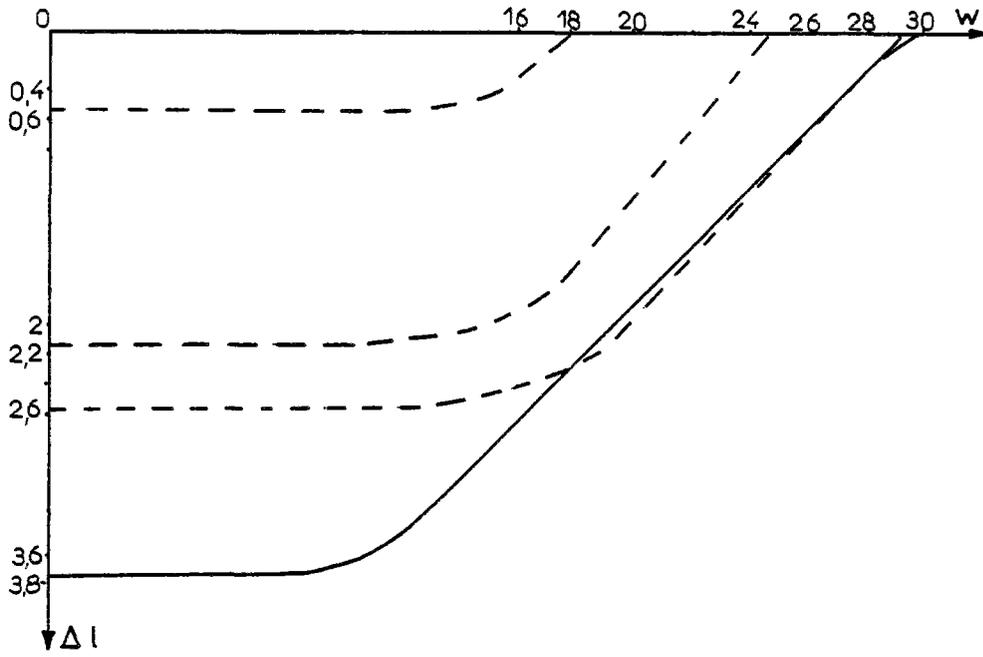


fig:59 courbes de retrait deL6 aux contraintes de 2 et 1,2 MPa

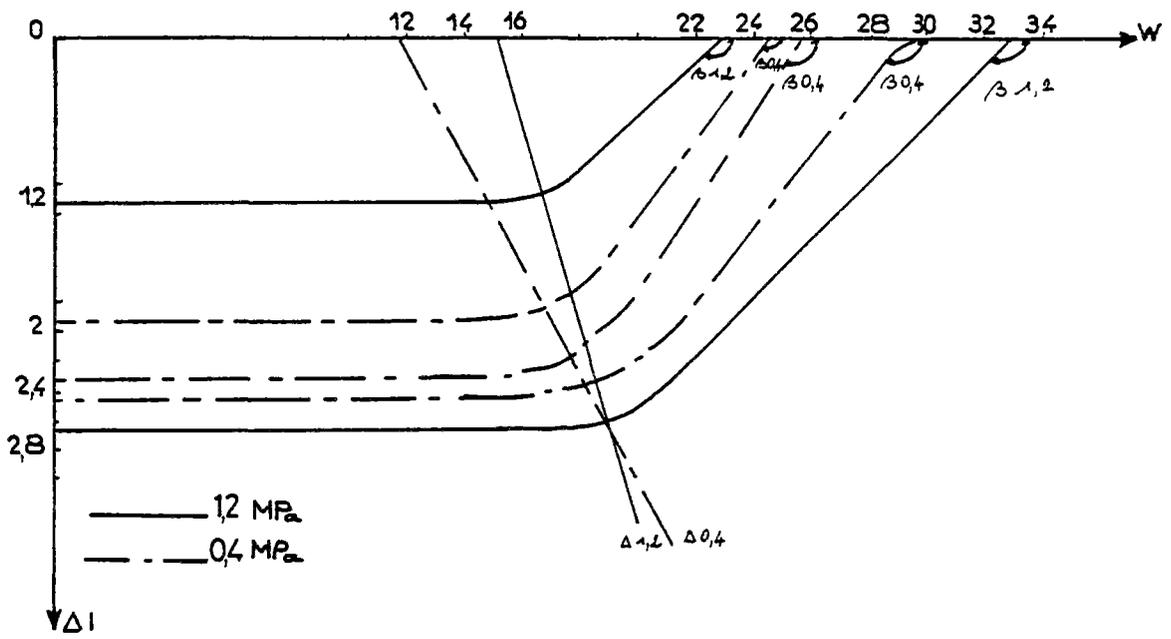


fig:60 courbes de retrait de g3 aux contraintes de 0,4 et 1,2 MPa

#### 4 - RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES DE RETRAIT ET LES PARAMETRES D'IDENTIFICATION

##### 4.1. Principe et but

Le principe est de rechercher une ou des relations simples entre des paramètres d'identification courants, obtenus lors d'étude de terrassement et les paramètres caractéristiques d'aptitude au retrait tels que :

- La limite de retrait (WR),
- la pente de la droite intrinsèque.

Le but souhaité serait d'utiliser les résultats des relations trouvées, si elles existent, afin de déduire l'ordre de grandeur de l'aptitude de retrait des sols, pour décider s'il y a lieu d'exécuter des essais de retrait sur les matériaux considérés.

##### 4.2. Relations étudiées

(Autret 1980) a déjà recherché d'éventuelles relations entre la limite de retrait (WR) définie par Atterberg et les paramètres d'identification suivants :

- Limites d'Atterberg, WL, WP et IP,
- Passant à 2  $\mu\text{m}$ / 400  $\mu\text{m}$ ,
- Passant à 80  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$ ,
- Valeur au bleu de méthylène / 400  $\mu\text{m}$ ,
- Le coefficient d'activité VB/2  $\mu\text{m}$ ,
- le coefficient de skempton =  $\frac{IP}{P_2 \mu\text{m}}$

Une seule relation aurait été remarquée, celle entre la limite de retrait et la limite de plasticité. Toutefois, elle n'apparaît pas suffisamment nettement pour être retenue. Il a été conclu qu'aucune des relations citées ci-dessus n'est satisfaisante.

Afin de confirmer et de compléter les résultats d'Autret, nous avons tracé les graphiques représentés aux fig:61-67. Cependant, notre essai de retrait s'effectue sur la fraction (0-1mm), c'est pourquoi les passants et les valeurs au bleu ne sont plus donnés par rapport à la fraction (0-400  $\mu\text{m}$ ), mais par rapport à la fraction (0-1 mm). Ajoutons que nous tentons également de remarquer d'éventuelles relations entre les paramètres cités ci-avant et la pente de la droite intrinsèque.

A priori, il serait raisonnable d'espérer voir apparaître des relations entre le passant à 2  $\mu\text{m}$ , puis la VB1mm et l'un des paramètres de retrait. En effet, nous avons constaté dans ce chapitre que :

- la granularité influence le retrait par l'intermédiaire de la porosité, qui conditionne les espaces dans lesquels la pâte peut engendrer du retrait sans modifier le retrait global,

- la quantité d'argile contenue dans un matériau modifie sensiblement la valeur de la pente de la droite intrinsèque,
- la nature minéralogique et par conséquent la surface spécifique des argiles influencent sensiblement le potentiel de retrait des sols. En effet, la capacité d'adsorption d'eau d'un sol dépend de sa minéralogie.

Pour rendre compte de la capacité d'adsorption ionique des argiles dans un sol, on utilise l'essai au bleu de méthylène (Tran 1981). Le but est de caractériser la surface globale de la fraction argileuse. Le principe consiste à déterminer la quantité de bleu nécessaire pour recouvrir les surfaces externes et internes des particules argileuses, en précisant la fraction sur laquelle l'essai a été réalisé.

Le coefficient d'activité est le rapport de la valeur de bleu adsorbée d'une certaine fraction sur le passant à 2  $\mu\text{m}$  par rapport à cette même fraction.

Il apparaît clairement aux figures 61-67, que la répartition des points sur chaque graphique constitue un nuage et rien de plus. Par conséquent, aucun des essais habituels d'identification pris séparément peut rendre compte de l'aptitude au retrait.

En effet, nous avons vu que si chacun des paramètres suivants : granulométrie, nature minéralogique des argiles et quantité d'argile intervient dans le processus de retrait, il n'est pourtant pas possible, avec un seul d'entre eux d'établir une relation avec les paramètres de retrait. le potentiel de retrait dépend des influences conjuguées des trois facteurs cités ci-dessus.

L'essai de retrait n'est pas un essai d'identification, mais de comportement. Il rend compte d'un phénomène bien précis, qui est le départ d'eau contenue dans un matériau. Il ne peut être substitué par aucun autre essai, ni être mis en relation avec un essai d'identification, qui rend seulement compte des caractéristiques du matériau considéré.

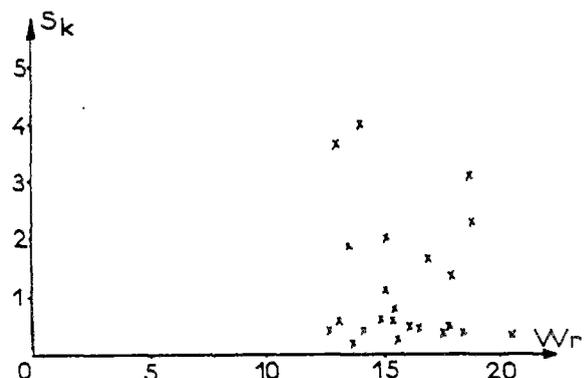


fig:67 coefficient de skempton en fonction de la limite de retrait

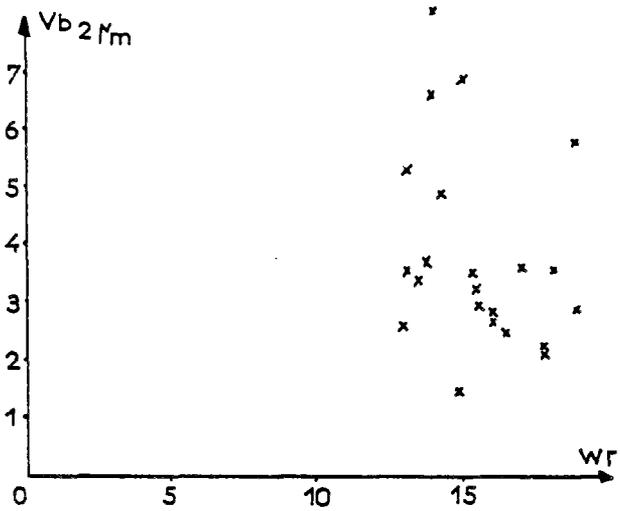


Fig. : 61 Coefficient d'activité en fonction de la limite de retrait

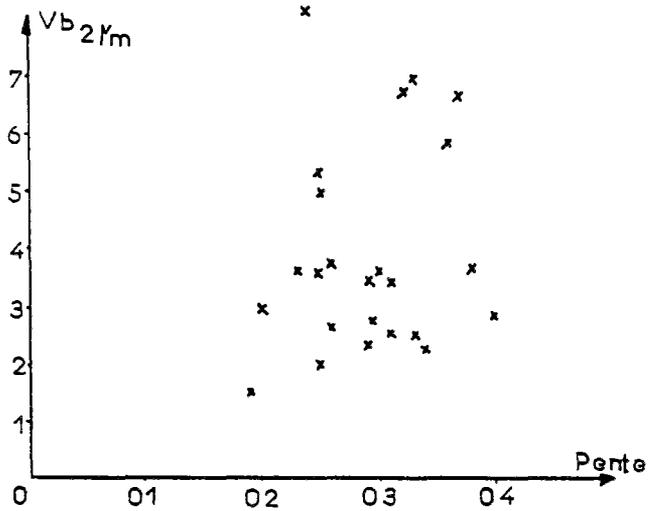


Fig. : 62 Coefficient d'activité en fonction de la pente de la droite intrinsèque de retrait

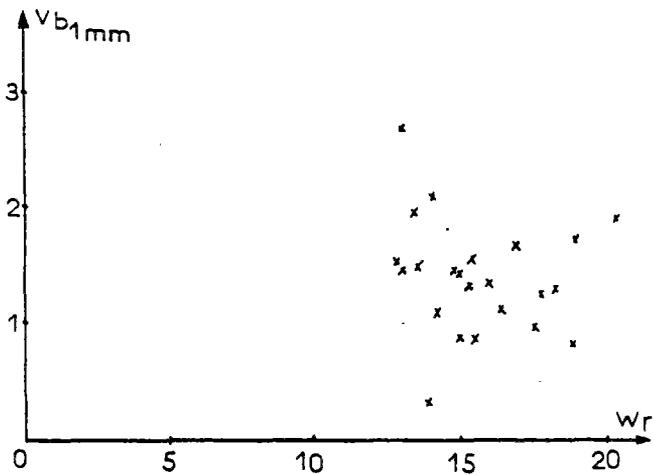


Fig. : 63 valeur au bleu sur la fraction 0-1mm en fonction de la limite du retrait

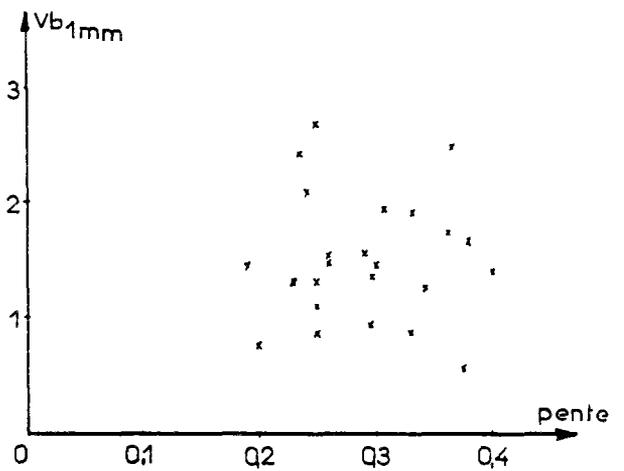


Fig. : 64 valeur au bleu sur la fraction 0-1 mm en fonction de la pente de la droite intrinsèque de retrait

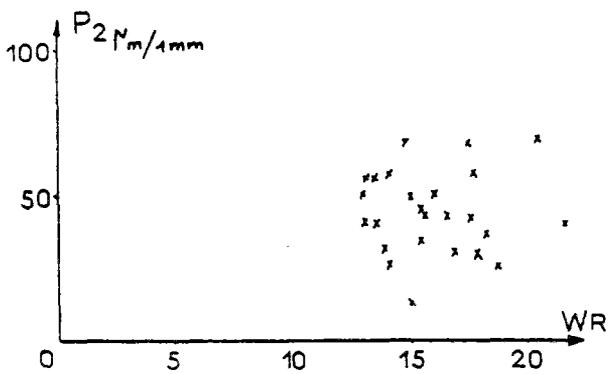


Fig. : 65 valeur du passant à 2mm par rapport à la fraction 0-1mm en fonction de WR

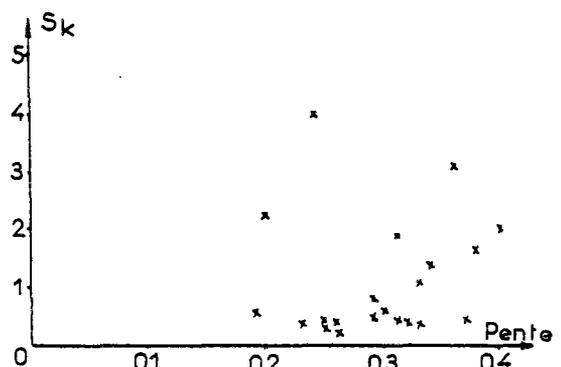


fig:66 coefficient de s'empton en fonction de la pente

## CONCLUSIONS

Les trois paramètres qui influencent le plus les droites intrinsèques, donc l'aptitude au retrait des sols sont :

- la nature minéralogique des argiles, qui conditionnent la capacité d'adsorption et de migration de l'eau au sein du matériau, ainsi que l'arrangement final de l'édifice morphologique,
- la quantité d'argile, pour un même type de matériau ; plus la teneur en argile est élevée, plus la pente de la droite intrinsèque est forte.
- la porosité ; plus celle-ci est importante, moins il y a d'argile entre les grains du squelette. Par conséquent, le retrait global de l'échantillon est moindre.

Les droites intrinsèques réalisées sur un même matériau sont très généralement différentes, lorsque l'on fait varier l'intensité de compactage lors de la fabrication de l'éprouvette. Mais, dans l'état actuel de la recherche, on n'a pu mettre en évidence aucun paramètre qui pourrait éclairer sur le sens de variation de la pente ou de l'amplitude de la droite intrinsèque en fonction du sens de variation de l'intensité de compactage.

Aucun essai habituel d'identification (limites d'Atterberg, passants à différents tamis, valeur au bleu de méthylène, etc...) ne peut rendre compte réellement de l'aptitude au retrait d'un sol. En effet, la granularité, la nature minéralogique et la quantité d'argile interviennent dans l'aptitude au retrait des sols. Cependant, il n'est pas possible avec une de ces caractéristiques d'identification, d'établir une relation avec les paramètres de retrait.

CHAPITRE IV  
ESSAI SUR GRAVELEUX  
APPLICATIONS

1. ESSAI DE RETRAIT SUR FRACTION (0-10 mm)

1.1. Buts et principe

1.1.1. Buts

L'essai de retrait réalisé sur la fraction (0-1mm) est rapide et facile à exécuter. Mais nous sommes amenés à poser les questions suivantes :

- La droite intrinsèque qui permet de rendre compte de l'amplitude du retrait de la matrice d'un sol en fonction de la teneur en eau initiale existe-t-elle encore pour les fractions supérieures?

Si oui, est-il sérieux d'envisager une relation, du type règle de trois par exemple, pour déduire à partir des résultats obtenus sur la matrice (0-1mm) la droite intrinsèque de l'échantillon total?

- Ne vaut-il pas mieux prévoir des essais différents pour des sols de granularités différentes?
- Enfin, si les essais permettent d'obtenir des résultats intéressants, nous cherchons des types de granularité pour lesquels il ne serait pas nécessaire de réaliser d'essais de retrait car nous serions sûrs que les retraits seraient négligeables.

1.1.2. Principe

Pour répondre à ces questions, nous reprendrons le même type d'essais que celui utilisé pour la matrice, en modifiant les dimensions du moule afin de travailler sur la fraction (0-10mm). Le principe est de mesurer les variations totales de longueurs de plusieurs éprouvettes d'un même sol à des teneurs en eau initiales différentes. Le compactage est statique et l'énergie est toujours de 1,2 MPa. Pour la mesure du retrait, l'éprouvette est placée verticalement sur un support. On lui applique sur la face supérieure une tige de comparateur; celui-ci enregistre la variation de longueur de l'éprouvette.

1.2 mode opératoire

1.2.1 Préparation des échantillons

Tamiser par voie humide le sol intéressé afin de prélever la fraction (0-10 mm). Les avantages du tamisage par voie humide sont les mêmes que ceux cités au chapitre II pour l'essai réalisé avec la fraction (0-1 mm). Il faut prévoir environ 5.500 g de matériau sec tamisé.

Laisser sécher la fraction ainsi tamisée jusqu'à ce que le sol devienne mou, puis le malaxer afin d'obtenir l'homogénéité granulométrique au sein du mélange.

Lorsque le matériau est suffisamment consistant; c'est-à-dire qu'il ne se déforme pas sous son propre poids, prélever six à sept échantillons de 780 grammes environ pour les porter à des teneurs en eau initiales différentes. Si certains échantillons ne sont pas utilisés de suite, il faut les conserver dans des sachets plastiques pour maintenir la teneur en eau de ceux-ci.

1.2.2. Assemblage du moule

Tous les matériels utilisés sont répertoriés à l'annexe I. Tout d'abord, assembler les deux demi-coquilles métalliques. Le centrage de celles-ci est assuré par l'emboîtement de quatre demi-cylindres d'une coquille dans l'autre. Dans un premier temps on placera seulement les quatre vis situées à chaque extrémité du cylindre en les bloquant légèrement puis on les dévisera d'un tour. Ceci permet d'obtenir le jeu nécessaire pour introduire les deux demi-coquilles en téflon qui constituent le moule à l'intérieur du cylindre métallique. Si le sol est très plastique et que la teneur en eau est relativement élevée, prévoir un léger huilage des parois en téflon qui facilitera le démontage de l'éprouvette.

A chaque extrémité du moule en téflon on ajoute deux demi-coquilles en laiton qui constituent deux réhausse.

Lorsque l'ensemble est assemblé, il reste à

introduire les quatre dernières vis et à serrer fortement le tout.

### 1.2.3. Compactage de l'éprouvette

Lorsque le sol et le moule sont prêts, il faut procéder au compactage de l'éprouvette. Pour se faire, placer un piston du moule à une extrémité de celui-ci en positionnant trois plots entre la base du piston et le moule dressé verticalement. Ceci permet de créer dans la réhausse une réserve de matériau équivalente en hauteur à celle des plots. Cette réserve sera utilisée lors du compactage.

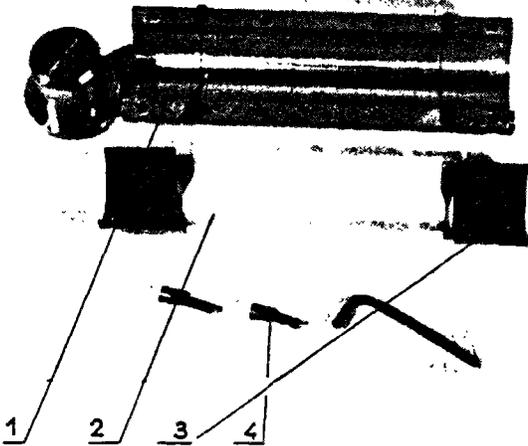


Photo n° 7 : Les composants du moule

- 1 : deux demi-coquilles en acier  
 2 : deux demi-coquilles en téflon, elles constituent le moule  
     diamètre = 50,6 mm  
     longueur = 168 mm  
 3 : quatre demi-réhaussements  
 4 : huit vis de serrage

A présent, introduire successivement l'équivalent d'une poignée de matériau dans le moule. Chacune d'elles est mise en place manuellement à l'aide d'un piston de 20 mm de diamètre. Ce compactage répartit le sol, chasse l'air emprisonné et assure l'adhérence entre chaque quantité de sol introduite.

Le remplissage est ainsi effectué jusqu'à 1,5 cm du haut de la réhausse supérieure. Introduire enfin le second piston dans la partie supérieure du moule et placer celui-ci sur la presse CBR.

Il suffit d'effectuer la mise en contrainte à 1,2 MPa et de la maintenir pendant une minute trente. Cette durée suffit pour obtenir la stabilisation de la contrainte sans avoir à poursuivre le déplacement du plateau

### 1.2.4. Démoulage et arasage de l'éprouvette

Le démoulage se déroule de la façon suivante :

- Dévisage des huit vis et ouverture des deux demi-coquilles en acier. On obtient l'assemblage représenté à la photo n° 8
- Extraction en un seul bloc du moule en téflon, des réhaussements et des pistons, de la coquille en acier.

Il est nécessaire d'enlever précautionneusement les réhaussements car elles adhèrent parfois à l'éprouvette, ce qui peut entraîner un arrachement de celle-ci à ses extrémités.



Photo n° 8 : Le moule après compactage

De chaque côté du moule dépasse du matériau. Il faut l'araser de telle sorte qu'aucun granulat ne dépasse de la surface du moule. En effet, chaque aspérité provoque sur les faces de l'éprouvette des défauts de planéité qui entraînent des perturbations sur la mesure de variation de longueur.

Cependant, l'arasage provoque l'apparition de vides en surface dus au départ de gros grains. Il faut les boucher avec de plus fins granulats, puis surfacer l'ensemble avec une pâte (0-1 mm). Nous donnerons des informations sur les qualités de la pâte dans la suite du texte. Il faut éviter de mettre trop de pâte, car si la couche est relativement épaisse (1 mm environ), il y a variation différentielle de retrait entre la pâte et l'éprouvette. Ceci entraîne la fissuration puis la déformation de la pâte durant le séchage. Le type de déformation est représenté à la figure 61

L'erreur de mesure sur le retrait total est équivalente à la déformation  $\epsilon$  de la pâte. Nous avons mesuré les déformations maximum de l'ordre du dixième de millimètres, ce qui est important lorsque l'on travaille à des teneurs en eau initiale proches de la limite de retrait.

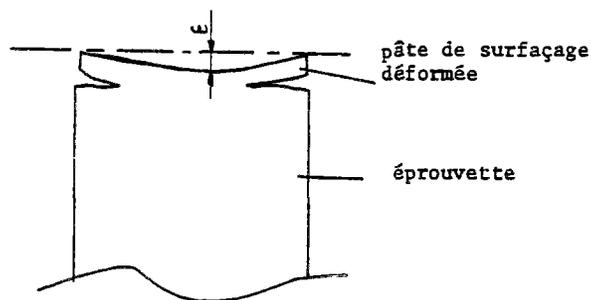


Fig. :61 Représentation schématique de la déformation de surface après séchage

Pour limiter  $\epsilon$ , il est conseillé d'employer une pâte peu sensible au retrait. Elle peut être la même pour tous les sols car la quantité est si faible par rapport à l'ensemble de l'éprouvette qu'elle ne modifie ni la variation totale de longueur ni la masse totale.

Lorsque l'arasage est terminé on ôte les deux demi-coquilles en téflon pour obtenir l'éprouvette.

#### 1.2.5. Mise en station de l'éprouvette et mesures

Tout d'abord, peser l'éprouvette humide puis la placer entre deux plaques métalliques parallèles. La plaquette supérieure peut être réduite à  $1 \text{ cm}^2$  et placée au centre de la face supérieure. Ainsi, s'il y a des déformations périphériques de la pâte dues au séchage, elles perturbent moins la mesure.

Glisser l'ensemble entre le support de l'appareillage de mesure et la tige du compacteur positionné verticalement (photo n° 9 Mettre le compacteur à zéro.

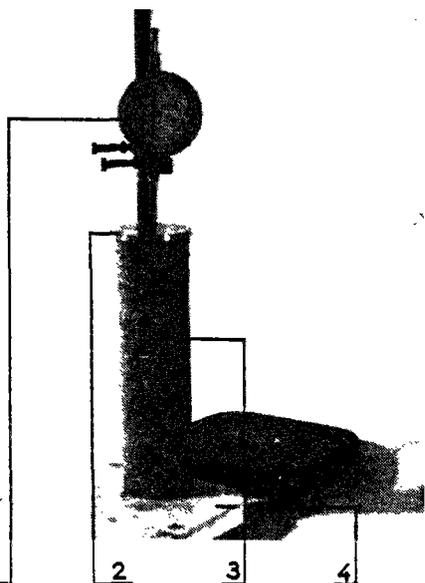


Photo n°9 : L'éprouvette en station

- 1 : comparateur
- 2 : plaques métalliques
- 3 : éprouvettes
- 4 : Support de l'appareillage de mesure

Lorsque le retrait est terminé il n'y a qu'à enregistrer la variation totale de longueur de l'éprouvette

Nous n'avons pas l'appareillage nécessaire pour effectuer des mesures en continue pendant le séchage, c'est pourquoi nous n'obtenons pas de courbes de retrait avec cet essai. Ceci n'a que peu d'importance puisque l'aptitude au retrait est donnée par la droite intrinsèque

Comme pour la fraction (0-1 mm), nous pouvons tracer la courbe de densité sèche initiale en fonction de la teneur en eau. Sur la fraction (0-10 mm), les conditions de fabrication de l'éprouvette permettant d'atteindre de faibles teneurs en eau, on obtient par conséquent l'optimum.

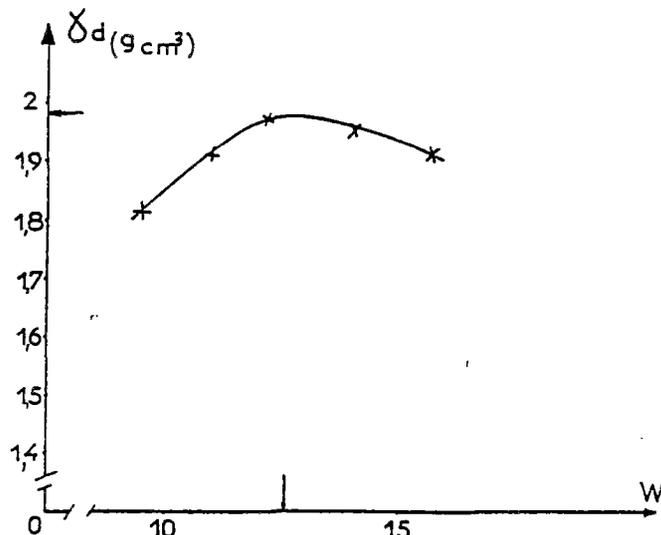


Fig. 62 : Courbe de densité sèche du sol G 21.40.b10

#### 1.2.6. Reproductibilité

Comme pour la fraction (0-1 mm), nous avons entrepris des calculs d'erreurs sur les trois paramètres essentiels que sont le pourcentage de retrait, la densité sèche optimum et la teneur en eau, afin de rendre compte graphiquement et numériquement de la précision avec laquelle on obtient ces différents résultats.

Nous avons décidé de réaliser cette étude sur le sol G 22.40.b10 car sa fourchette de teneur en eau initiale est une des plus étendue. Nous calculerons les valeurs absolues pour les deux points extrêmes de la droite intrinsèque. Ceci pour avoir un ordre de grandeur de la fourchette des valeurs absolues.

Erreurs absolues commises sur les teneurs en eau.

Nous avons montré au chapitre II que l'erreur relative était donnée par :

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta Ph}{Ph - Ps} + \frac{\Delta Ps}{Ps}$$

Lorsque la masse à peser est supérieure à 100 g, la précision de la mesure est de :

$$\Delta P = \pm 0,1 \text{ g} = \Delta Ph = \Delta Ps$$

Les valeurs absolues sur la teneur en eau sont inscrites dans le tableau ci-dessous :

W%	Ph (g)	Ps (g)	$\Delta W$ %
13,9	733,8	644,5	$\pm 0,03$
22,1	709,1	580,6	$\pm 0,04$

Les erreurs absolues dues aux appareillages de mesures sont inférieures à la précision graphique que l'on peut obtenir avec l'échelle et le matériel de dessin utilisés. En effet, nous estimons la précision graphique à plus ou moins 0,05%. Mais surtout, les erreurs sont très inférieures à celles que l'on obtient en réalisant des mesures sur chantier car, comme nous l'avons déjà dit, les teneurs en eau initiale varient d'un lieu à un autre de plusieurs points pour un même sol.

Au niveau des teneurs en eau, la précision est grandement suffisante.

Erreurs absolues commises sur les densités sèches.

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta Ph}{Ph} + \frac{\Delta V}{V}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta R \cdot 2 + R \cdot \Delta H}{R \cdot H}$$

$$\Delta R = 0,002 \text{ cm (mesuré au pied à coulisse)}$$

La hauteur (H) de l'éprouvette est égale à Li qui est la somme de la longueur finale et de la variation de longueur. Nous estimons l'erreur (absolue) globale sur Li égale à 0,15 mm

$$\Delta H = 0,15 \text{ mm}$$

Nous obtenons :

W%	H (mm)	R (mm)	Ph (g)	V (cm <sup>3</sup> )	g/cm <sup>3</sup>
13,9	169,7	5,06	733,8	341,1	$\pm 0,0041$
22,1	170,26	5,06	709,1	342,3	$\pm 0,0034$

Les erreurs dues aux mesures sont également inférieures à celles dues à la construction que l'on estime à  $\pm 0,005 \text{ g/cm}^3$  et inférieures aux variations de densité pour un même sol in situ, l'homogénéité n'est jamais parfaite. Lors de contrôle de terrassements, on note des variations de densité qui atteignent  $0,1 \text{ g/cm}^3$ .

Erreurs absolues commises sur les pourcentages de retrait.

$$\frac{\Delta Ls}{Ls} = \frac{\Delta Lf}{Lf} \left[ \frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta l} + \frac{\Delta Lf}{Lf} \right]$$

Si la plaquette placée sur la face supérieure de l'éprouvette qui reçoit la tige du comparateur a une surface de  $1 \text{ cm}^2$  environ, on minimise l'enregistrement de la déformation de la pâte de surfacage et l'on estime l'erreur absolue à plus ou moins 0,05 mm.

$$\Delta(\Delta l) = \pm 0,05 \text{ mm}$$

$$\Delta Lf = 0,1 \text{ mm}$$

Nous obtenons :

Ls	Lf	$\Delta l$	$\Delta Ls$
0,1	169,5	0,19	0,025 %
1,3	168	2,26	0,029%

Encore une fois, les erreurs dues aux mesures sont inférieures à la précision de construction estimée à  $\pm 0,05\%$ . Nous n'avons pas une grande expérience des mesures de retrait in situ, c'est pourquoi nous ne pouvons pas affirmer que les erreurs inhérentes à l'essai sont inférieures à celles que l'on obtiendrait in situ. Cependant, nous estimons que cet ordre de grandeur est grandement suffisant.

Comme les erreurs absolues dues aux mesures sont légèrement inférieures à la précision graphique avec l'échelle utilisée, nous voulions savoir si les points placés à l'aide de cette échelle permettraient de tracer les droites intrinsèques avec une précision suffisante. C'est pourquoi toutes les droites ont été tracées manuellement et nous avons ensuite calculé leur équation par régression linéaire. Nous constatons que la précision graphique plus le jugement humain sont suffisants pour obtenir des résultats sensiblement identiques à ceux obtenus par calcul. Notons que tous les résultats utilisés (pente, limite de retrait, etc ...) dans ce présent travail ont été déduits d'après les tracés manuels.

Nous avons tout lieu d'être satisfaits des appareillages et des instruments de mesures utilisés pour cet essai car toutes les erreurs absolues liées aux diverses mesures permettant de calculer les trois paramètres cités ci-avant, sont plus faibles que les variations rencontrées in situ de ces trois mêmes paramètres.

### 1.2.7. Durée de l'essai

L'éprouvette est plus volumineuse que pour l'essai réalisé sur la fraction (0-1mm), par conséquent le temps de séchage est plus long.

L'encombrement de l'appareillage ne permettait pas de monter un système pour augmenter la température ambiante de séchage. Nous opérons en laboratoire climatisé à une température moyenne de 26 à 27°C avec un degré hygrométrique moyen de 0,65.

Ainsi, pour des sols à pâte très argileuse, nous atteignons des durées de séchage qui dépassaient douze heures; c'est pourquoi il est déconseillé de mettre les éprouvettes en station dans la matinée pour obtenir le retrait total en fin d'après-midi, dans le meilleur des cas, ou bien le lendemain matin.

Il ne semble pas souhaitable d'accélérer la vitesse de séchage car ceci risquerait d'augmenter l'apparition de fissures superficielles à la surface des éprouvettes. En effet, plus il y a hétérogénéité de teneur en eau sur la section, plus les propagations des fissures sont facilitées par les variations différentielles de retrait.

Au cas où l'on souhaiterait obtenir la courbe de retrait, il serait nécessaire de concevoir un système automatique d'enregistrement pour mesurer simultanément la perte de poids et la variation de longueur de l'éprouvette. Les temps de séchage sont souvent trop longs pour envisager d'effectuer ces mesures par un technicien.

### 1.3. Nomenclatures des matériaux

Tous les matériaux étudiés ont été reconstitués à partir du sol naturel correspondant. Ils sont répertoriés de la façon suivante :

- L'ensemble constitué par la première lettre suivie d'un chiffre correspond à la nature du sol considéré dont on a prélevé la fraction (0-1mm).
- Le second chiffre situé entre les deux tracés signifie la valeur du pourcentage du passant à un millimètre.
- Le dernier ensemble est constitué par une ou deux lettres et un chiffre.

La première minuscule est "b" si le matériau est bien gradué ou "m" s'il est mal gradué. Le chiffre qui suit indique la taille maximum des grains. La dernière lettre intervient si le matériau est mal gradué. Elle indique s'il y a dominance de gros éléments, dans ce cas on utilise la lettre "g", ou bien s'il y a dominance des plus fins éléments il y a la lettre "f".

## 2. RESULTATS OBTENUS A PARTIR DE L'ESSAI

### 2.1. Comparaisons entre les résultats obtenus sur 0-1mm et 0-10 mm

#### 2;1.1 La droite intrinsèque et la limite de retrait

Nous souhaitons savoir si, quelle que soit l'étendue de la fraction granulométrique, le pourcentage de retrait est toujours fonction linéaire de la teneur en eau initiale des matériaux et si les résultats déduits des droites intrinsèques réalisées sur la fraction (0-1mm) sont représentatifs des graveleux. Pour se faire, nous avons utilisé les fractions (0-1mm) des matériaux déjà étudiés, auxquelles nous avons mélangé une fraction (1-10mm) de granulats latéritiques. Les fractions (0-1mm) étaient constituées par celles des matériaux A4; G10 et g10. Les graveleux obtenus sont :

- A4 - 55b10 qui contient 55% de passant à 1mm de A4
- A4 - 40b10 qui contient 40 % de passant à 1 mm de A4
- G10 - 40-b10 qui contient 40% de passant à 1 mm de G10
- g10 - 40-b10 qui contient 40% de passant à 1 mm de g10

leur granularité est continue et la taille des plus gros grains est de 10 mm.

A la figure 64 nous constatons tout d'abord que le pourcentage de retrait est fonction linéaire de la teneur en eau initiale, quelle que soit la nature et la granularité des matériaux. Nous avons étudié une dizaine de graveleux et avons constaté un coefficient moyen de corrélation pour les droites intrinsèques de 0,96. Il est donc possible, par l'intermédiaire des droites, de comparer les potentiels de retrait des sols pour chaque fraction. Nous constatons également que les potentiels de retrait et les fourchettes de teneurs en eau initiales des essais réalisés sur les fractions (0-10mm) sont sensiblement plus faibles que ceux des matrices (0-1mm) correspondantes.

Sur la fraction (0-10mm), le compactage s'effectue facilement, même aux teneurs en eau faibles voisines de 11 à 12%. Ceci permet d'obtenir des éprouvettes homogènes et cohérentes sur lesquelles on peut réaliser l'essai de retrait.

Ainsi, nous avons pu mettre en évidence la linéarité de la droite intrinsèque jusqu'à l'axe des abscisses. On détermine donc avec précision l'abscisse à l'origine de la droite intrinsèque que nous considérons comme la limite de retrait (fig. 63).

Le graveleux A4-25-b10 est à la limite de la sensibilité au retrait; il contient juste assez de pâte pour que celle-ci saturée puisse combler un peu plus que la totalité des pores engendrés par les granulats. C'est pourquoi nous avons pu enregistrer un très faible retrait qui a permis d'obtenir la limite de retrait.

En supposant que ce graveleux ait encore moins de fine, nous n'aurions pas pu déterminer la limite de retrait, car nous aurions été dans l'incapacité de fabriquer une éprouvette. Ceci ne signifie pas que la limite de retrait est nulle, mais qu'elle n'est pas mesurable.

Il y a analogie avec la limite de plasticité d'ATTERBERG pour les sols fins peu plastiques. La plasticité existe, mais elle n'est pas mesurable.

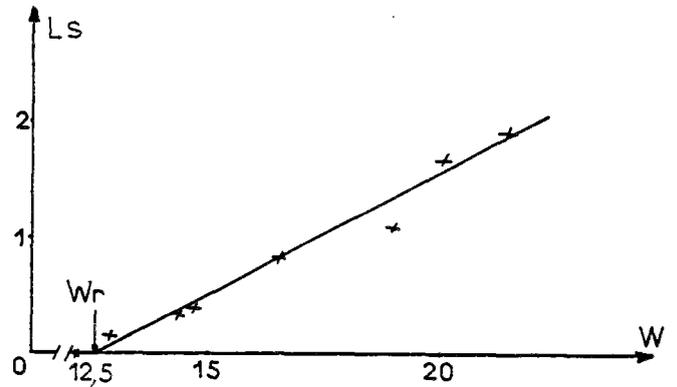


Fig.: 63 droite intrinsèque du sol A4.40.b10

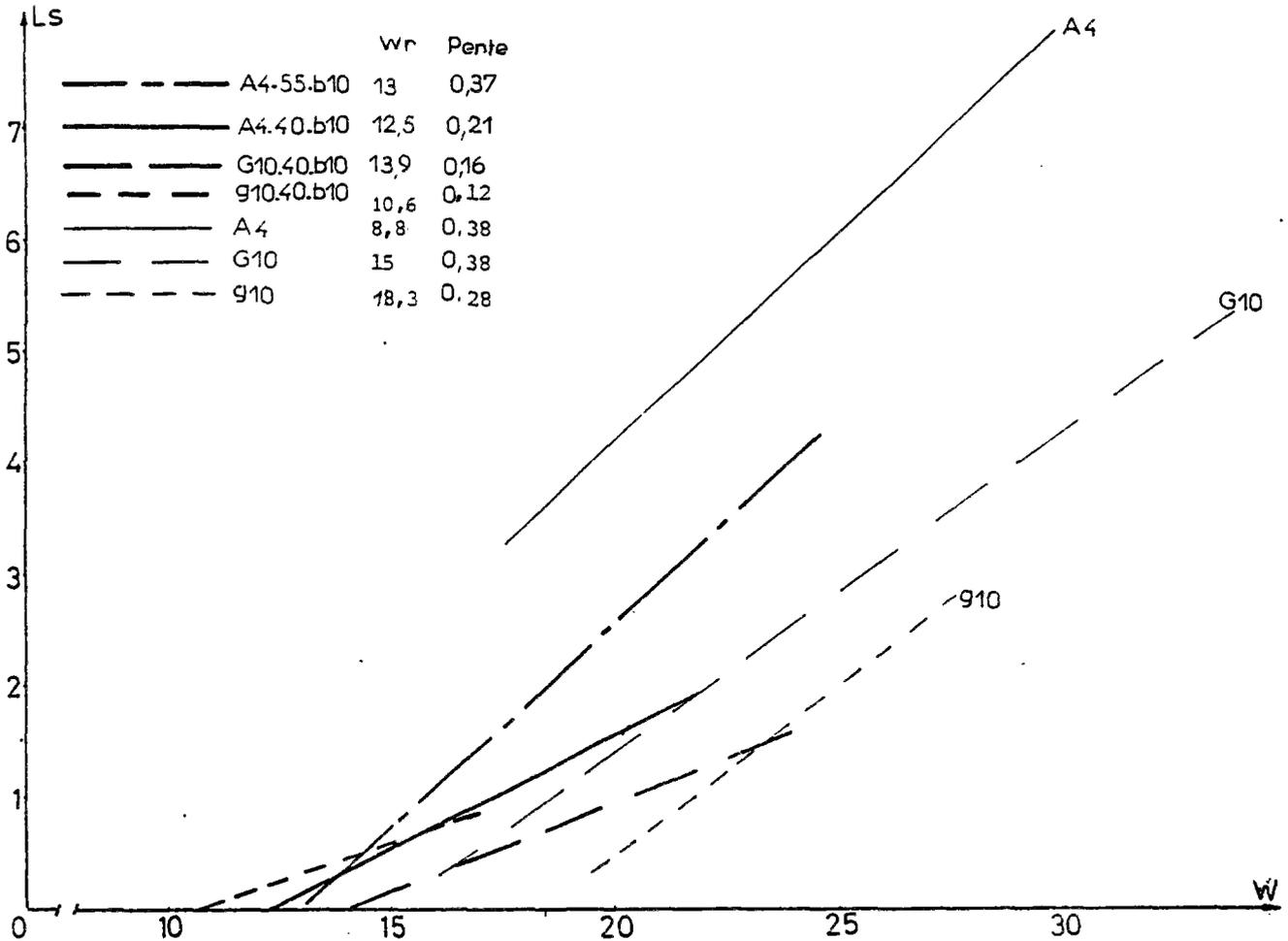


fig : 64

### 2.1.2. INFLUENCES DE LA QUANTITE D'ARGILE ET DE LA GRANULARITE SUR LE POTENTIEL DE RETRAIT

Considérons à la figure 65 les sols A4; A455b10 et A4-40-b10, les teneurs en ar-

giles sont respectivement de 62; 34 et 25%. On constate :

- D'une part, qu'à partir d'une droite intrinsèque obtenue sur la fraction (0-1mm) on obtient deux droites distinctes dépendantes de la teneur en argile.

- D'autre part, une croissance des potentiels de retrait en fonction des augmentations des teneurs en argile.

D'après les droites A4-55-b10 et A4-40-b10, puis G10-40-b10 et G10-30-b10, on constate également que plus la teneur en argile diminue plus la pente des droites intrinsèques et les fourchettes de teneurs en eau de l'essai diminuent.

Ces remarques s'expliquent très bien par les différences de teneur en argile. Considérons, par exemple; les graveleux A4-55-b10 et A4-40-b10 :

- En considérant que les porosités des squelettes sont sensiblement les mêmes, on en déduit qu'il y a moins d'argile entre les grains de A4-40-b10 que ceux de A4-55-b10. Sachant que le retrait est dû au départ de l'eau contenue dans les argiles, il est clair que le potentiel de retrait est plus faible pour A4-40-b10 que pour A4-55-b10.

- A4-40-b10 a besoin de moins d'eau que A4-55-b10 pour obtenir la limite de liquidité des argiles, puisqu'il y en a moins à saturer. Par conséquent, la fourchette de teneur en eau de l'essai est d'autant plus faible que la teneur en argile diminue car la faisabilité de l'éprouvette dépend de la plasticité de la pâte. Nous aurions pu faire le même raisonnement pour G10-40-b10 et G10-30-b10.

Toutefois, il faut signaler que g10-40-b10 a un potentiel de retrait supérieur à celui de g10, bien que celui-ci contienne plus d'argile. Ceci signifie qu'un graveleux peut avoir un potentiel de retrait plus élevé que celui de sa matrice (0-1mm).

Nous n'avons pas d'explications rationnelles pour comprendre ce cas. Il faudrait réaliser des essais sur d'autres échantillons afin de voir si ce phénomène se reproduit ou s'il est le résultat d'une erreur quelconque.

Par contre, remarquons que ce cas abonde dans le sens de l'hypothèse de la règle de trois qui consisterait à déduire la limite de retrait de la fraction (0-10mm) à partir de WR (0-1mm).

$$WR (0-10) = WR (0-1) \times \text{Passant à 1 mm}$$

En résumé, nous dirons que pour un graveleux, dont les passants à 1 mm peuvent varier de 30 à 60%, il se dégage la tendance suivante :

- Les pentes des droites intrinsèques varient dans le même sens que celui de la teneur en argile.

Enfin, nous constatons que le potentiel de retrait de G10 est supérieur à celui de g10. Cependant, le potentiel de G10-40-b10 est inférieur à celui de g10-40-b10, bien que ces deux graveleux aient la même granularité

sur (1-10mm). Les droites sont sensiblement parallèles sur la fraction (0-1mm) et le restent sur la fraction (0-10mm), bien que la valeur des pentes soit diminuée. Nous pensons que l'inversion de l'ordre du potentiel de retrait est lié aux arrangements des édifices granulaires durant le retrait, qui pour g10-40-b10 s'effectuent à des teneurs en eau plus faibles que celle de G10-40-b10. En effet, sa limite de retrait est de 10,6%, alors qu'elle est de 14% pour G10-40-b10. Pour confirmer cette explication, il aurait fallu les courbes de retrait de ces graveleux pour comparer les pentes des droites ( $\Delta$ ) et les droites correspondant au retrait.

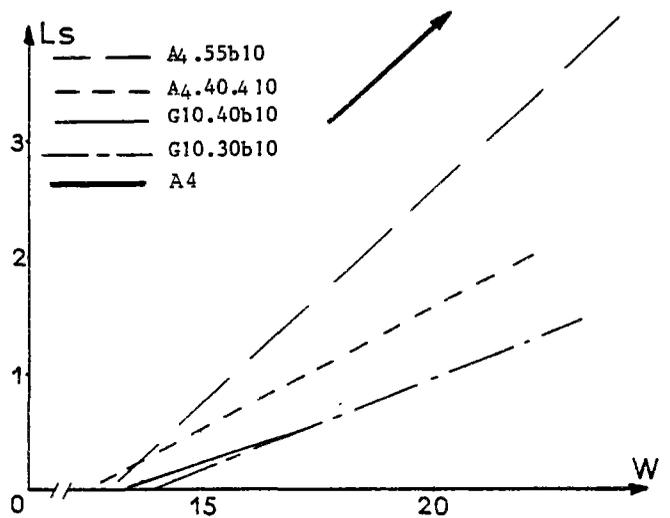


Fig. 65 : droites intrinsèques des sols :

A4; A4-55-b10; A4-40-b10; G10-40-b10 et G10-30-b10

sols	WR	Pente
A4	8,8	0,38
A4-55-b10	13	0,37
A4-40-b10	12,5	0,21
G10-40-b10	13,9	0,16
G10-30-b10	13,4	0,12

#### La granularité

Afin de rendre compte de l'influence de la granularité nous avons utilisé des sols A4 et G10 pour constituer les fractions (0-1mm) auxquelles nous avons ajouté des granulats de fraction (0-10mm), de telle sorte que le passant à 1 mm soit égal à 40%.

Nous faisons varier la granularité de la fraction (1-10 mm) car celle de (0-1mm) est constituée des sols de base A4 et G10 qui ont chacun leur propre granularité sur laquelle nous ne pouvons pas intervenir au niveau du chantier. Les sols reconstitués sont les suivants :

- Lorsque nous parlerons de graveleux bien ou mal gradués, il s'agira exclusivement de la

fraction (1-10mm), la fraction (0-1mm) reste celle d'origine

- Sols bien gradués : A4-40-b10 et G10-40-b10.
- Sols mal gradués à forte teneur en gros éléments : A4-40-m10g et G10-40-m10g.
- Sols mal gradués à forte teneur en éléments fins G10-40m10f

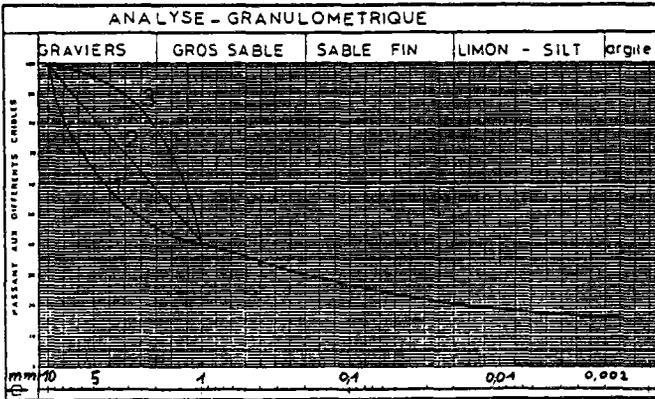


Fig. 66 : courbes granulométriques des sols :

G10-40-m10g (1); G10-40-b10 (2)  
G10-40-m10f (3)

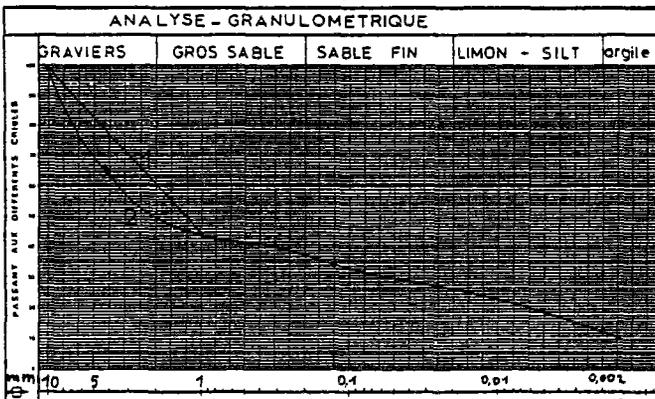


Fig. 67 : courbes granulométriques des sols :

A4-40-b10 (1) et A4-40-m10g (2)

Quel que soit le type de granularité, nous constatons que les graveleux constitués par une teneur identique de la matrice (0-1mm) ont des valeurs de pentes de droites intrinsèques sensiblement identiques. Rappelons que pour les fractions (0-1mm), les pentes varient en fonction de la granularité. Les graveleux mal gradués à dominance de gros grains ont des amplitudes de retrait égales ou plus faibles que celles des graveleux bien gradués correspondants. Comme nous l'avions déjà montré, ceci est lié à la porosité du squelette. Pour les graveleux, nous le considérons de fraction (1-10mm), puisque nous avons choisi la matrice (0-1mm) comme pâte. La mesure de la porosité est expliquée au chapitre III. Les porosités mesurées sont les suivantes :

- bien gradué  $n = 0,36$  sur (1-10mm)
- mal gradué  $n = 0,38$  " "

Par contre, G10-40-m10f a des amplitudes de retrait plus importantes que G10-40-b10. Ceci s'explique une fois encore par la porosité :

- bien gradué  $n = 0,36$
- mal gradué  $n = 0,32$

Nous constatons que la granularité a les mêmes conséquences que celles observées sur la fraction (0-1mm). Les pourcentages de retrait ont tendance à être d'autant plus élevés que la porosité est faible et inversement. L'explication de ce phénomène est également donnée au chapitre III.

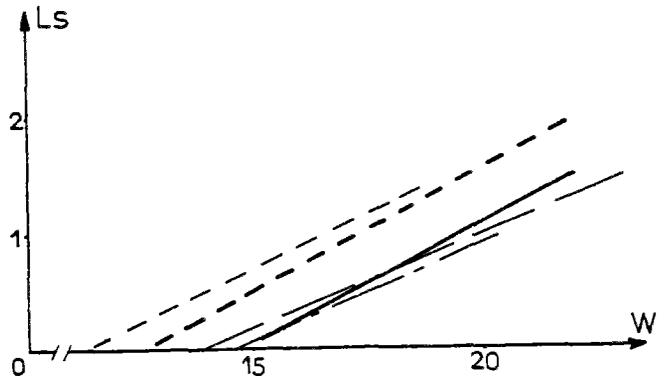


Fig. 68 : droites intrinsèques des sols :

sols	WR	pente
G10-40-m10f	11,5	0,185
G10-40-b10	13,5	0,16
G10-40-m10g	14,5	0,19
A4-40-m10g	14,7	0,2
44-40-b10	12,5	0,21

Etendue de la granularité

Montrons que l'étendue de la taille des grains influence aussi le potentiel de retrait. Considérons les sols A4-40-b10 et A4-40-b5. Ils ont tous deux sensiblement la même porosité. Pour la fraction (1-10mm), elles sont égales à 0,36 pour A4-40-b10 et à 0,37 pour A4-40-b5. Les matrices (0-1mm) sont identiques pour les deux sols, aussi bien en nature (A4) et en teneur (40%). La taille des plus gros grains de A4-40-b10 est de 10 cm, celle de A4-40-b5 est de 5 cm.

On constate à la figure 69 que les deux droites intrinsèques sont distinctes. Ceci signifie que l'étendue granulométrique qui est le seul paramètre distinct entre les graveleux considérés, influence le potentiel de retrait.

Il semblerait que, deux sols de même nature minéralogique, de même porosité et de même teneur en argile devraient avoir la même droite intrinsèque de retrait. En fait, la différence des étendues (0-D) entraîne également des différences de formes et de tailles des pores pour chaque graveleux.

Au niveau du retrait global, les amplitudes de retrait des argiles situées dans les pores sont moins importantes que celles des argiles situées aux droits des contacts. Cependant, la déformation des pores durant le séchage intervient directement au niveau de l'arrangement de l'édifice granulaire en conditionnant les espaces aux droits entre les grains.

Rappelons que pour les sols fins, l'étendue de la granularité a peu de conséquences sur les droites intrinsèques. Nous pensons que les tailles et formes des pores ne varient pas suffisamment pour que des fractions allant de (0-0,5) à (0-3mm) aient des droites intrinsèques sensiblement différentes.

Au niveau du chantier, il est important d'insister sur les rôles de la porosité et de l'étendue de la granularité sur le retrait. A présent, pour les graveleux, il devient possible de diminuer très sensiblement les amplitudes de retrait par un apport judicieux de granulats, dont l'optimisation aura été déterminée par des essais de retrait.

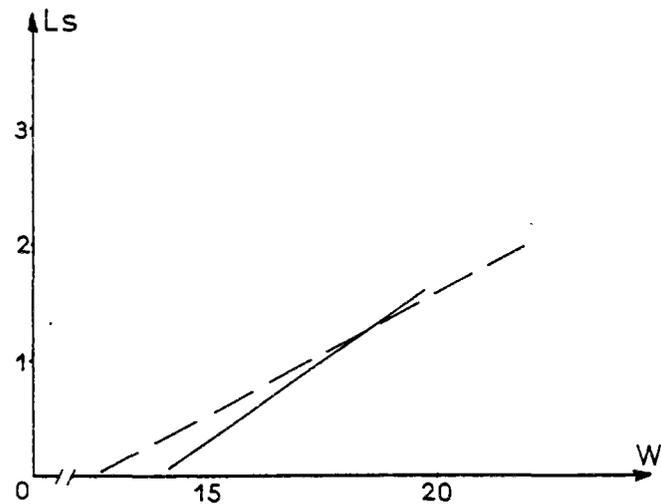


Fig. 69 : droites intrinsèques des sols :

	WR	Pente
A4 - 40 - b10	12,5	0,21
A4 - 40 - b5	14	0,275

### 2.1.3. Les résultats obtenus sur la fraction (0-1mm) sont-ils représentatifs d'un graveleux?

Nous avons vu que plusieurs paramètres influencent le retrait et qu'à partir d'une matrice (0-1mm) on obtient plusieurs droites intrinsèques correspondant chacune à des graveleux distincts (fig. 70). Par conséquent, les résultats obtenus sur la fraction

(0-1mm) ne sont pas directement représentatifs. Cependant, voyons s'il est possible d'estimer la répartition du pourcentage de retrait d'un graveleux à partir de la droite intrinsèque de la matrice.

Soit, l'équation de la droite intrinsèque de la matrice :

$$L_s = a (w - w_r)$$

On souhaiterait que le pourcentage de retrait du graveleux ( $L_s$ ) soit une fonction de celui de la matrice ( $L_a$ )

$$L_s : (\alpha + \lambda) L_a = (\alpha + \lambda) \left( \frac{W}{x} - w_r \right) \quad (1)$$

W : teneur en eau du graveleux

w : teneur en eau de la matrice

w<sub>r</sub> : limite de retrait de la matrice

a : pente de la droite intrinsèque de la matrice

x : passant à 1 mm du graveleux

$\alpha$  : serait un facteur pondérateur lié au passant à 1 mm, donc à la quantité d'argile.

$\lambda$  : serait lié à la granularité.

A la figure 71 est tracée la répartition du rapport des pentes des droites intrinsèques obtenues sur (0-10mm) sur celles obtenues sur (0-1mm) en fonction du passant à 1 mm. Nous constatons que la répartition est très sensible car on passe d'un rapport de 0,2 pour un passant de 25% au rapport de 1 pour un passant de 100%. Lorsque les graveleux sont bien gradués, il semble que l'on puisse faire passer une courbe par l'ensemble des points. Cependant, dès que l'on place les graveleux mal gradués, on ne distingue plus de relations avec l'ensemble des points. Notons qu'il y a une asymptote verticale vers 23% de passant à 1 mm, car à partir de cette valeur on n'enregistre plus de retrait, la quantité de matrice étant trop faible pour remplir les pores des graveleux

A la figure 72 est tracée la répartition du rapport WR (0-10mm) sur WR (0-1). Il est clair que l'on ne distingue aucune orientation préférentielle de l'ensemble des points. Par conséquent, il est exclu de déterminer un ordre de grandeur de WR (0-10mm) à partir de WR (0-1mm). Il est beaucoup plus intéressant d'utiliser l'expression qui relie WR (0-10mm) à la teneur en eau optimum de compactage, comme nous le verrons ci-après.

Nous venons de montrer que les paramètres  $\alpha$  et  $\lambda$  n'existent pas. Par conséquent, il ne peut pas y avoir de correspondance entre les résultats de la matrice et ceux des graveleux.

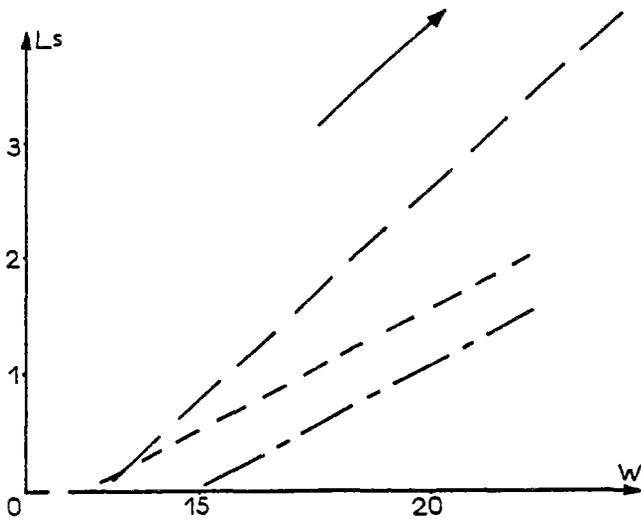


Fig. 70 : droites intrinsèques des sols:

— A4; — A4 - 55 - b10  
 - - - A4 - 40 - b10 et — - - A - 40 - m10g

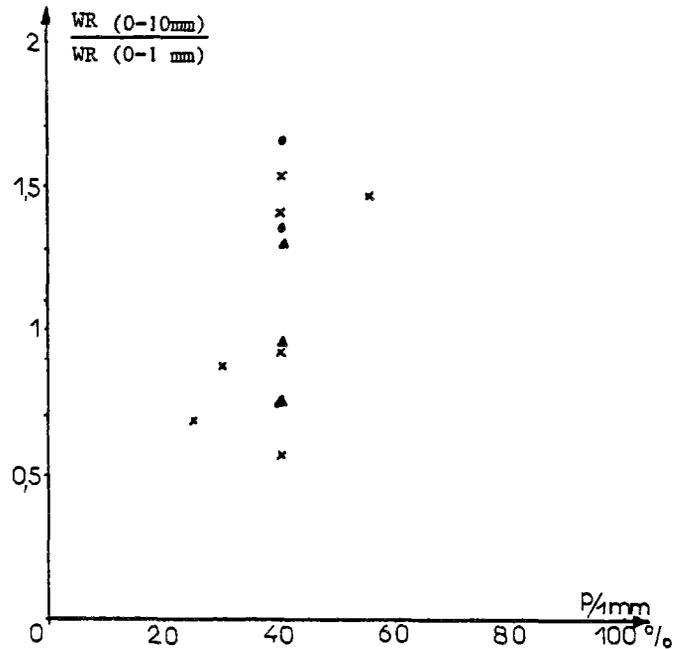


Fig. 72

### 2.2. Relation entre la limite de retrait et la teneur en eau optimum de densité sèche

Nous avons vu, au chapitre III, que nous ne pouvions pas établir de relations entre les paramètres et les différents critères d'identification.

Nous n'avons pas pu rechercher une éventuelle relation entre la limite de retrait et la teneur en eau optimum de densité sèche ( $W_{op}$ ) sur les fractions (0-1mm). Nous ne pouvions pas atteindre les teneurs en eau permettant d'obtenir  $\gamma_{d op}$ , les éprouvettes ne pouvaient pas être fabriquées.

Sur la fraction (0-10 mm), nous atteignons des teneurs en eau inférieures à  $W_{op}$ , ce qui offre la possibilité de rechercher une relation entre ces deux paramètres. Il est raisonnable d'envisager une telle relation car ces deux teneurs en eau caractérisent des états optimums :

- La limite de retrait est la teneur en eau pour laquelle on obtient le confinement maximal de l'édifice morphologique et granulaire.
  - $W_{op}$  est la teneur en eau qui permet de concentrer le maximum de matériau sec dans le volume du moule.
- Si la densité est maximale, la teneur en eau correspondante devrait être proche de celle qui procure le confinement morphologique et granulaire le plus étroit.

Nous avons reporté à la figure 73 les points de couple ( $WR$ ,  $W_{op}$ ) correspondants aux sept sols de fraction (0-10mm) étudiés. Nous

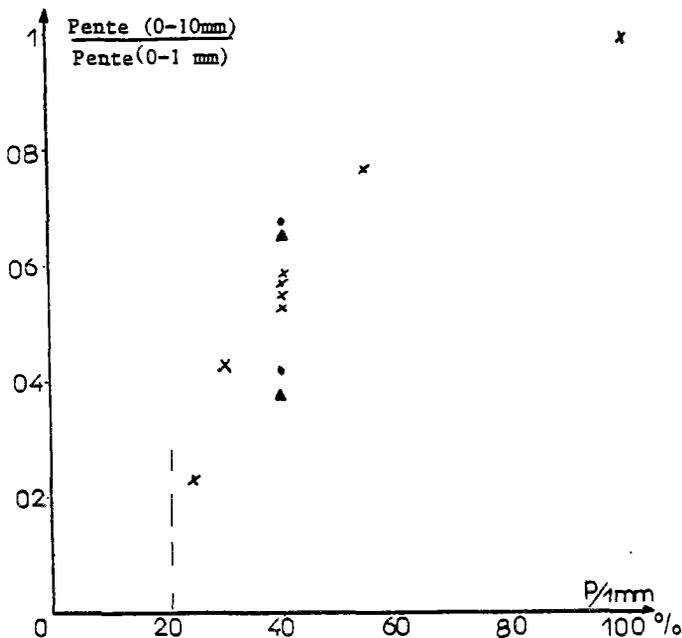


Fig. 71

avons essayé de relier ces points par une droite de régression en utilisant la méthode "des moindres carrés".

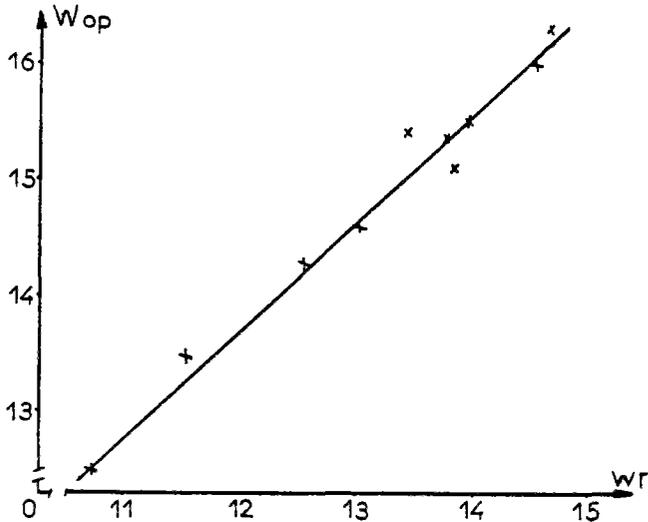


Fig. 73 : Répartition de Wop en fonction de la limite de retrait  
 n = 10 nombres de points  
 R = 0,98 coefficient de corrélation  
 $Wop_n = 0,85 Wr + 3,59$

Nous constatons :

- d'une part, que le coefficient de corrélation est égal à 0,98. Ceci confirme la relation linéaire entre la teneur en eau de densité sèche optimum et la limite de retrait correspondante dans la fourchette de teneurs en eau étudiées.
- La limite de retrait est plus faible que la Wop correspondante. Ceci s'explique de la façon suivante. Pour qu'un matériau soit le plus dense possible, il faut que le volume d'eau soit réduit au maximum afin de laisser le plus de volume possible au solide. Cependant, les grains ont besoin de se déplacer les uns par rapport aux autres pour prendre la place qui leur convient le mieux. Il faut un minimum de lubrifiant pour diminuer les frottements et faciliter les déplacements. Par conséquent, l'eau qui a servi de lubrifiant s'évapore en provoquant un très léger retrait.

Cette relation a été établie sur la fraction (0-10mm). Il faudrait vérifier qu'elle l'est toujours pour des fractions plus étendues comme (0-20mm) par exemple. Ce résultat serait très intéressant car il donnerait la possibilité de déduire une valeur approchée par excès de la limite de retrait d'un graveleux à partir de WopN qui est obtenue par l'essai proctor. Ainsi, nous pourrions relier un des paramètres de retrait à une valeur de teneur en eau obtenue par un essai classique de comportement.

Cependant, aucun paramètre n'a pu être mis

en relation avec la valeur de la pente de la droite intrinsèque.

### 3 - CRITERES D'ESSAIS DE RETRAIT

#### 3.1. Les fractions (0-1mm)

Nous avons vu au chapitre III qu'aucun critère d'identification pris séparément ne pouvait être lié directement à un des paramètres de retrait car ils interviennent simultanément. Par corrélation multiple, peut être serait-il possible d'obtenir des informations plus précises sur les paramètres de retrait?

Cependant, l'essai de retrait sur cette fraction étant rapide, il est plus judicieux de l'exécuter que de vouloir absolument trouver un critère qui ne rendra pas compte du potentiel de retrait d'un sol fin.

#### 3.2. Les fractions (0-10mm)

Il serait effectivement intéressant, sans avoir à effectuer d'essais de retrait, d'établir une estimation de la droite intrinsèque d'un graveleux, afin de savoir s'il y a lieu de réaliser des essais de retrait.

Au cours de ce rapport, nous avons mis en évidence tous les paramètres qui influencent le retrait. Jusqu'à présent, nous avons constaté que seule l'expression (2) reliant la limite de retrait à la teneur en eau optimum est satisfaisante.

Néanmoins, nous constatons d'après nos résultats que les pentes des droites intrinsèques varient moins en fonction de la granularité qu'en fonction de la quantité d'argile, donc en fonction du passant à 1 mm. C'est pourquoi on pourrait essayer de classer les pentes en fonction des passants de la façon suivante :

Passants à 1 mm en %	pente
100 - 55	0,42 - 0,37
55 - 40	0,37 - 0,21
40 - 30	0,21 - 0,1

Il est évident que les classes auraient besoin d'être affinées, surtout celle des 55 - 40, ainsi ce type de tableau donnerait une approximation satisfaisante de la pente de la droite intrinsèque d'un graveleux.

Pour la fraction (0-10mm), la limite de retrait serait égale en pourcent à :

$$Wr = \frac{Wop - 3,59}{0,85}$$

Si, par des essais réalisés sur un grand nombre de graveleux on parvient, d'une part, à établir un tableau permettant de mieux évaluer les pentes des droites intrinsèques et, d'autre part, à établir pour différentes fractions de graveleux des relations entre WR et

Wop , on pourra donner une évaluation relativement précise des droites intrinsèques.

Nous constatons également, à la figure 74, que le passant à 1 mm peut être un premier critère de sélection de graveleux. Quatre graveleux ont été reconstitués à partir de deux matrices distinctes par leur potentiel de retrait.

Ils sont tous bien gradués sur (1-10 mm) et la taille des plus gros grains est de 10 mm.

A4.40.b10 contient 40% de A4 et A4-25-b10 en contient 25%, G10-40-b10 contient 40% de G10 et G10.30-b10 en contient 30%.

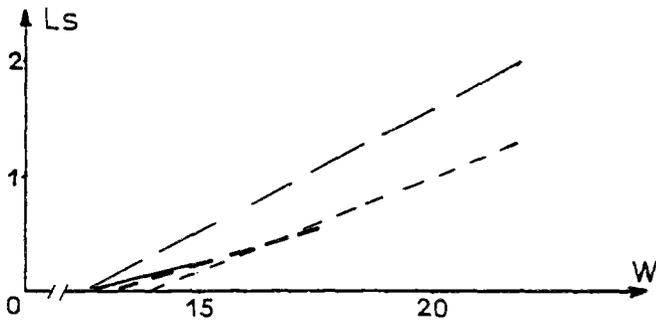


Fig. 74 : droites intrinsèques des sols :

sols	WR	Pente
A4-40-b10	12,5	0,21
A4-25-b10	12,8	0,11
G10-40-b10	13,9	0,16
G10-30-b10	13,4	0,12

Il apparaît clairement que quelle que soit la nature de la matrice, les amplitudes de retrait sont presque nulles à partir de 25% de passant à 1mm.

Toutefois, il serait intéressant de déterminer in situ la valeur du pourcentage de retrait à partir de laquelle on serait certain que le retrait engendré ne provoquerait pas de désordres importants.

#### 4 - CONCLUSIONS

L'essai de retrait mis au point est reproductible et adapté à des graveleux de fractions inférieures ou égales à (0-10mm). Cependant, il serait souhaitable d'augmenter les dimensions du moule pour effectuer des essais jusqu'à des fractions de (0-20mm). Ainsi, nous avons mis en évidence les résultats suivants :

- La linéarité de la droite intrinsèque est vérifiée pour toutes les fractions granulométriques et elle est conservée jusqu'à l'axe des abscisses. Ceci confirme la convention prise au chapitre II, à savoir que l'abscisse à l'origine est la limite de retrait la plus faible.

- La granularité influence sensiblement le potentiel de retrait. C'est pourquoi il faut envisager deux essais; l'un pour les matériaux fins et l'autre pour les sols graveleux.

Il devient possible d'optimiser la quantité et les tailles de granulats qu'il faut apporter à un graveleux pour faire chuter sensiblement son potentiel de retrait.

- Pour les graveleux (0-10mm), la fonction qui lie les teneurs en eau optimum de densité sèche aux limites de retrait est linéaire. Les limites de retrait sont inférieures aux Wop correspondantes.
- Pour juger s'il y a lieu de réaliser ou non des essais de retrait sur un graveleux, il est possible auparavant d'estimer la position de la droite intrinsèque à l'aide de la relation qui lie  $W_r$  à  $W_{op}$  et du passant à 1mm.

## CONCLUSIONS GENERALES

Nous avons mis au point un nouvel essai de retrait reproductible qui se pratique sur des fractions allant jusqu'à 0-10mm, voire 0-20mm. Lors de leur fabrication, les éprouvettes sont compactées, chaque matériau subit en moyenne un essai de retrait à six teneurs en eau initiales différentes. De ces essais ont obtenu les résultats suivants :

- La courbe représentant la densité sèche initiale de l'échantillon considéré en fonction des teneurs en eau initiales.
- Les courbes de retrait rendent compte du comportement au retrait des matériaux. Elles représentent les variations de longueur des éprouvettes durant le séchage.
- Enfin, à partir des courbes de retrait, on déduit la droite intrinsèque de retrait. Elle représente la variation du pourcentage de retrait en fonction de la teneur en eau initiale. Suivant les positions relatives de ces droites situées sur un repère, on compare les potentiels de retrait des matériaux considérés.

La droite intrinsèque permet également de préciser la notion de limite de retrait. Nous la définissons comme étant l'abscisse à l'origine de la droite intrinsèque.

Ensuite, nous avons mis en évidence les influences des paramètres suivants sur le retrait :

- La nature minéralogique des argiles conditionne la capacité d'adsorption et de migration de l'eau au sein des matériaux ainsi que l'arrangement final de l'édifice morphologie.
- La quantité d'argile, pour un même matériau, plus la teneur en argile est élevée plus la pente de la droite intrinsèque est forte.
- La granularité intervient de deux manières; tout d'abord par l'étendue (O-D) dont les effets se ressentent essentiellement sur les graveleux, puis par la graduation qui modifie la porosité du squelette et la forme des pores. Le retrait est d'autant plus faible que la porosité augmente. D'un point de vue pratique, nous pensons que la meilleure solution pour diminuer le potentiel de retrait d'un sol est de modifier sa granularité. L'essai de retrait permet d'optimiser cet apport granulaire.

Pour les graveleux seulement, nous pouvons estimer la position de leur droite intrinsèque si nous connaissons  $W_{op}$  et le passant à 1mm du matériau considéré.

## Recherche

À présent que l'on peut mesurer le potentiel de retrait des sols, il serait intéressant de déterminer la ou les limites de pourcen-

tages de retrait in situ, pour lesquelles le retrait n'engendrerait pas de désordre. Il y a peut-être plusieurs valeurs suivant la fraction (O-D) considérée.

La difficulté est de déterminer les critères qui évalueraient les états de dégradation. Dans un premier temps, les critères simples et quantifiables sont :

- La densité de fissuration qui serait égale au nombre de fissures pour une surface unitaire.
- La moyenne des amplitudes des fissures, tant en profondeur qu'en largeur.

Il est bien évident que ces deux critères ne constituent pour l'instant qu'une approche de l'ensemble des symptômes liés au retrait des sols in situ. Une recherche sérieuse a besoin d'être entreprise pour quantifier les effets du retrait en fonction des nombreux paramètres que nous avons mis en évidence tout au long de ce rapport.

Il serait également souhaitable de réaliser un moule, afin de pouvoir effectuer des essais sur des fractions (0-20mm)

A N N E X E S

Annexe I : matériels utilisés

Annexe II : échantillons

minéralogie

identifications et résultats des essais de retrait

Bibliographie

ANNEXE IMatériels utilisés

Les matériels de base utilisés sont les suivants :

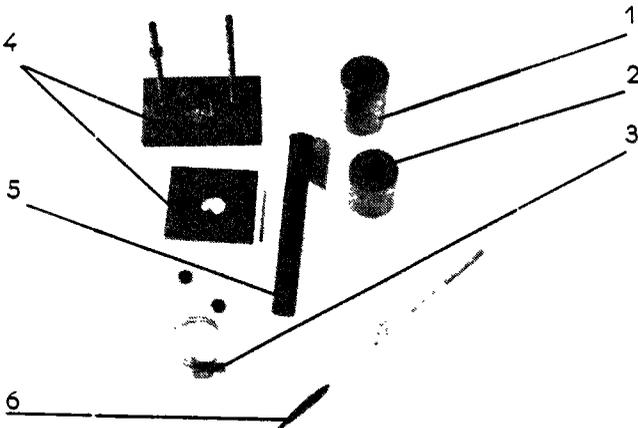
- une balance pouvant supporter 2.000g précise à  $\pm 0,05g$
- une presse CBR
- des comparateurs précis à  $\pm 0,02$  mm
- une étuve
- des tamis de 1mm - 10 mm, voire 20mm
- des supports d'éprouvettes

. Pour les éprouvettes de fraction (0-1mm), la forme importe guère. L'essentiel est de pouvoir placer une éprouvette de 60mm horizontalement sur une plaque de verre à laquelle on applique à chaque extrémité une plaquette métallique et une tige de comparateur. L'ensemble de ces pièces doit être solidaire.

. Pour les éprouvettes de fraction (0-10mm), le support est très simple. Il nécessite un plan horizontal avec une tige verticale sur laquelle on peut placer un comparateur.

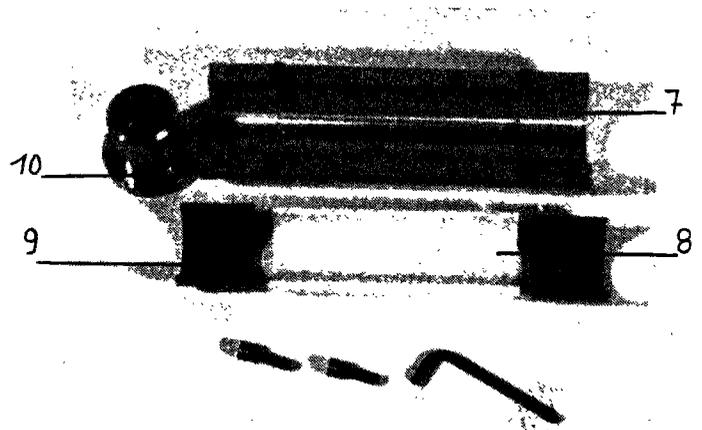
- des moules

. Pour la fraction (0-1mm)



- (1) moule :  $\varnothing$  18mm intérieur; longueur 60mm
- (2) réhausse :  $\varnothing$  18mm intérieur; longueur 40mm
- (3) serre-joint : Il est nécessaire et suffisant pour assurer le centrage de la réhausse sur le moule.
- (4) mécanisme de serrage
- (5) un piston :  $\varnothing$  18mm
- (6) une spatule pour l'arasage

. pour la fraction (0-10mm)



- (7) deux demi-coquilles en acier :  
 $\varnothing$  int. : 60mm;  $\varnothing$  ext. : 80mm et longueur 270 mm
- (8) deux demi-coquilles en téflon  
 $\varnothing$  int. : 50 mm ;  $\varnothing$  ext. 60mm et longueur 170 mm
- (9) quatre demi-coquilles en laiton  
 $\varnothing$  int. : 50 ;  $\varnothing$  ext. : 60 et longueur 50 mm
- (10) deux pistons  
 $\varnothing$  50 mm et longueur 50 mm

ANNEXE IIE C H A N T I L L O N S

<b>Sols siliceux</b>	<u>Lieux de prélèvement</u>
Si 1	Boué, transgabonais
Si 2	Offoué, déblai du PK 312, transgabonais
Si 3	Ayem, Majohé PK 268,7 R 220, transgabonais
Si 4	Ayem, R 232 matériau mis en noyau, transgabonais
Si 5	PK 306, transgabonais
Si 6	D 27, transgabonais
Si 7	PK 236, transgabonais
Si 8	déblai offaré, transgabonais
<b>Sols limoneux</b>	
L 1	butte de la Mignoué au droit du PK 248,2, transgabonais
L2	D46 entrée de Bouée, transgabonais
L3	Offoué PK 312, transgabonais
L4	Gare de la Loyé, transgabonais
L5	Offoué PK 311, transgabonais
L6	Cocobeach PK4, LBTP
<b>Sols argileux</b>	
A1	PK 324; R 26 - 27, transgabonais
A2	Déblai P 390 N'TOUM-Cocobeach, LBTP
A3	D 27, transgabonais
A4	Route LBV - Kango, PK 80
A5	Carrefour du 12 mars - 2ème déblai, LBV
<b>Graveleux</b>	
g 1	Ayem butte Boléko, transgabonais
g 2	Boué, hors transgabonais
g 3	R 220 PK 200,85, mis en carapasse, transgabonais
g 4	ile M'BAMA, transgabonais
g 5	Ayem, D 39-R 29; PK 254 + 50, transgabonais
g 6	lotissement de Guégué PM 10, LBV
g 7	déblai rive droite, Mieme PK 202, GERI
g 8	Emprunt n° 4; PK 55,8; PM 5; 1,90, Moanda
g 9	Emprunt n° 4; PK 55,8 : ST 15, Moanda
g 10	Carrefour du 12 mars, 1er déblai, LBV
G 1	PK 60,2 de NTOUM, LBTP
G 2	relais de télévision, transgabonais
G 3	N'TOUM-Cocobeach, PK 9 de Cocobeach, LBTP
G 4	Bas de Guégué; PM 24 : 0-1,1 m, LBV
G 5	Dépôt pétrolier; PM1 - 2, - 2,4 m, GERI
G 6	dépôt pétrolier; PM2 - 2 - 2,5 m, GERI
G 7	rive gauche Moulili PM 21; PK 55,8; ER 8. 0,8 - 1,4 m, GERI
G 8	Mieme, PK 202; 2 - 3 m, GERI
G 9	Remblai, PK 220, GERI
G 10	Carrefour du 12 mars, 2ème déblai, LBV

## MINÉRALOGIE

Ech	minéraux de la fraction inférieure à 2 microns					cristallinité des argiles	
	Kaolinite	Micas	Goethite	Gibbsite	Autres Minéraux	Kaolinité	Micas
Si 1	++	++++	-	-	Montmorillonite	b	muscovite
Si 2	++	+++	tr	-		b	"
Si 4	++++	+++	+	-		b	"
Si 5	+++	+++	-	-		bien cristallisée	"
Si 6	+	+++	-	-		b	"
Si 7	+	+++	-	-		b	"
Si 8	++	+++	tr	-	Vermiculite	b	"
L 1	+++	++	+	-		b	Illite
L 2	+++	++	+	-	Interstratifié I/M	b	"
L 3	+++	++	+	-		b	"
L 4	+++	++	+	-	Interstratifié I/M	b	"
L 5	+++	+	+	+	Interstratifié I/M	b	"
L 6	+++	++	+	?	Montmorillonite	b	" mal cristallisé
g 1	+++	+	+	+		b	raie trop faible
g 2	+++	+	+	-	Interstratifié I/M	b	Illite
g 3	+++	++	+	-		b	Muscovite
g 4	+++	++	+	-		mal cristallisée	Illite
g 5	++	+	+	-	Hydromica-Montmorillonite	bien cristallisée	Muscovite
g 6	+++	+	+	-	7,7 ?	mal cristallisée	Illite mal cristallisé
g 7	+++	+	+	-	Montmorillonite	b	Illite
g 8	+++	+	+	-	Chlorite + Interst I/M	b	Illite
g 9	++	++	+	-	" "	b	"
G 1	+++	+	+	+		b	raie trop faible
G 2	+++	+	+	-		b	Illite
G 3	++	-	+	+	argile mal définie	b	raie non décelable
G 4	++	+	+	-	"	b	Illite
G 5	+++	++	+	-	chlorite + Interst I/M	b	"
G 6	+++	++	+	-	"	b	"
G 8	+++	+	+	-	Interstratifié I/M	b	muscovite
G 9	+++	+++	-	-		bien cristallisée	"
A <sub>1</sub>	++++	+++	+	-		bien cristallisée	Illite
A <sub>2</sub>	++	+++	-	-		mal cristallisée	Illite mal cristallisé
A <sub>3</sub>	+++	++	+	-		b	Illite

## DIFFRACTION AUX RAYONS X

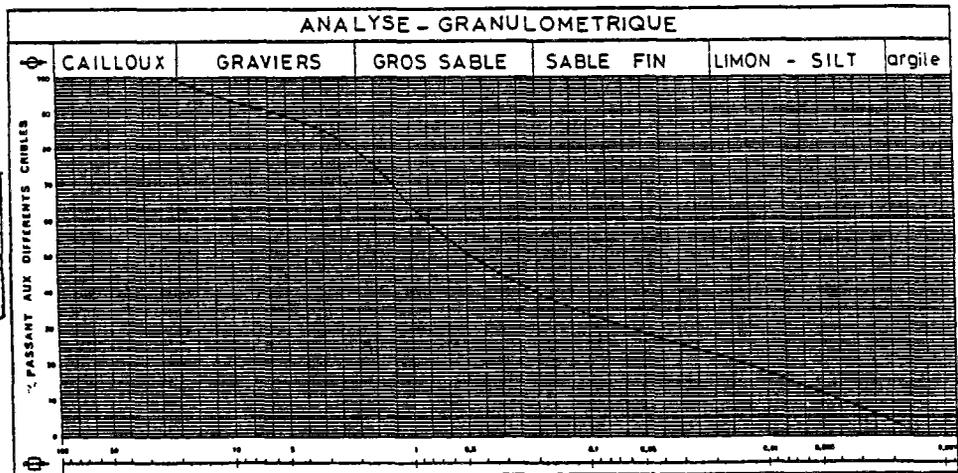
- présence non décelée
- ? présence incertaine ou raie non identifiée
- tr. traces
- + faible quantité
- ++ quantité moyenne
- +++ forte quantité
- ++++ très forte quantité

Interst. I/M Interstratifié Illite/Montmorillonite

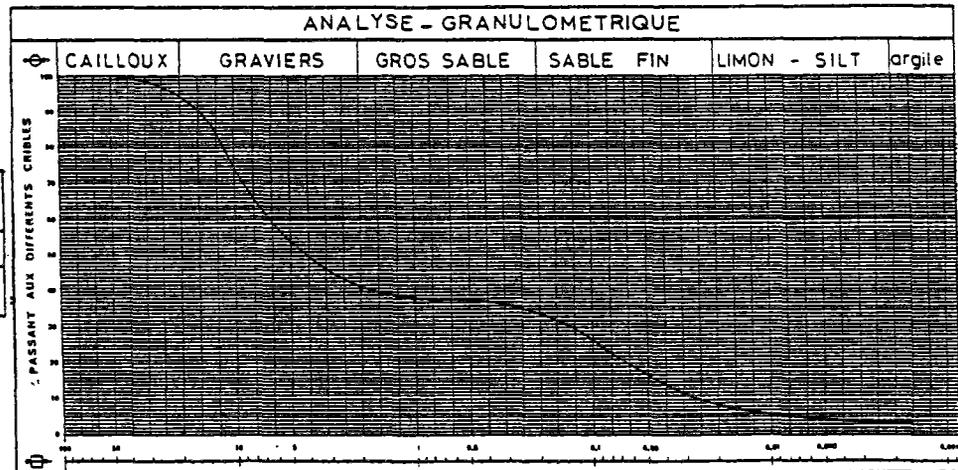
b Kaolinite désorganisée suivant l'axe b

## SOLS DONT LE RETRAIT N'EST PAS MESURABLE

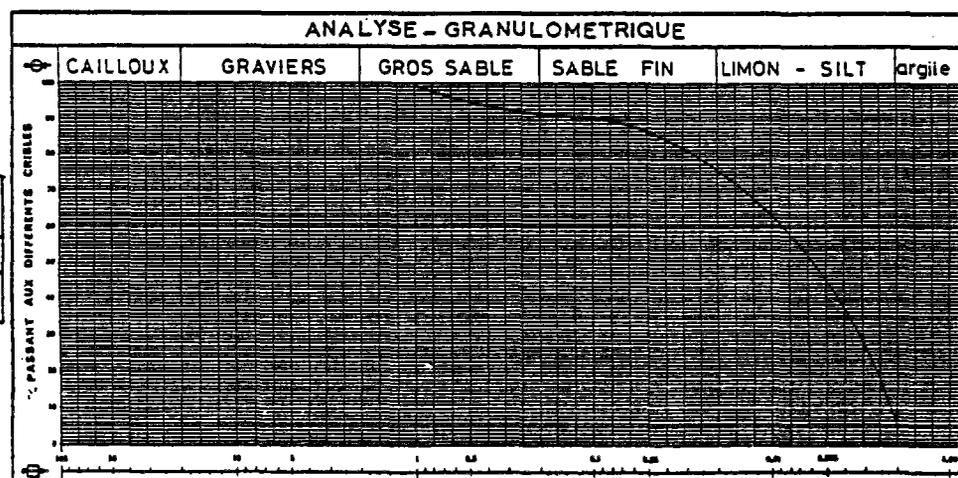
ECH	LIMITES D'ATTERBERG			
	WP	WL	IP	
96	15,3	30,2	14,9	
PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\phi$ m	2 $\phi$ m / 4mm	1mm	Vb <sub>2<math>\phi</math>m</sub>	Vb <sub>1mm</sub>
4	5	65	23,75	1,21
DROITE INTRINSEQUE				
WR	pente'			
"	"			



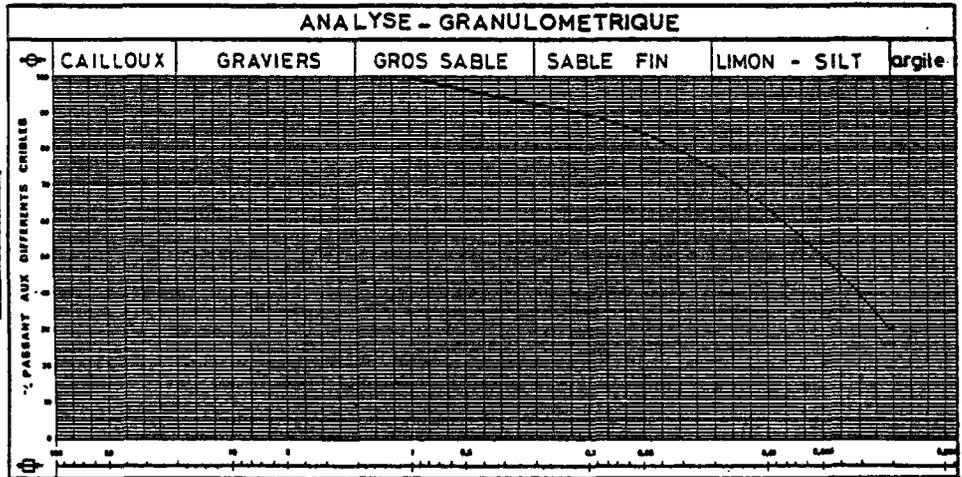
ECH	LIMITES D'ATTERBERG			
	WP	WL	IP	
G4	16,2	30,8	14,6	
PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\phi$ m	2 $\phi$ m / 4mm	1mm	Vb <sub>2<math>\phi</math>m</sub>	Vb <sub>1mm</sub>
3	8	37	13,7	1,1
DROITE INTRINSEQUE				
WR	pente'			



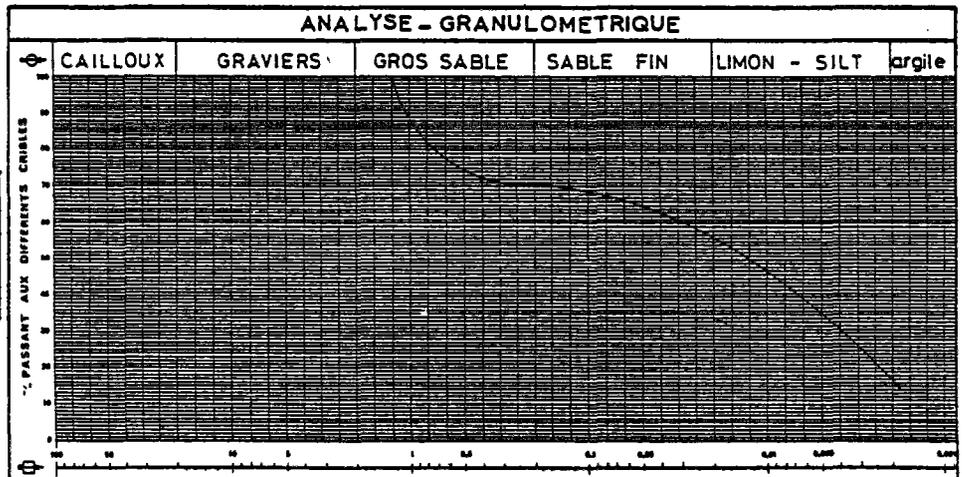
ECH	LIMITES D'ATTERBERG			
	WP	WL	IP	
Si1	25	36	11	
PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\phi$ m	2 $\phi$ m / 4mm	1mm	Vb <sub>2<math>\phi</math>m</sub>	Vb <sub>1mm</sub>
8	8	100	2,9	1,45
DROITE INTRINSEQUE				
WR	pente'			
"	"			



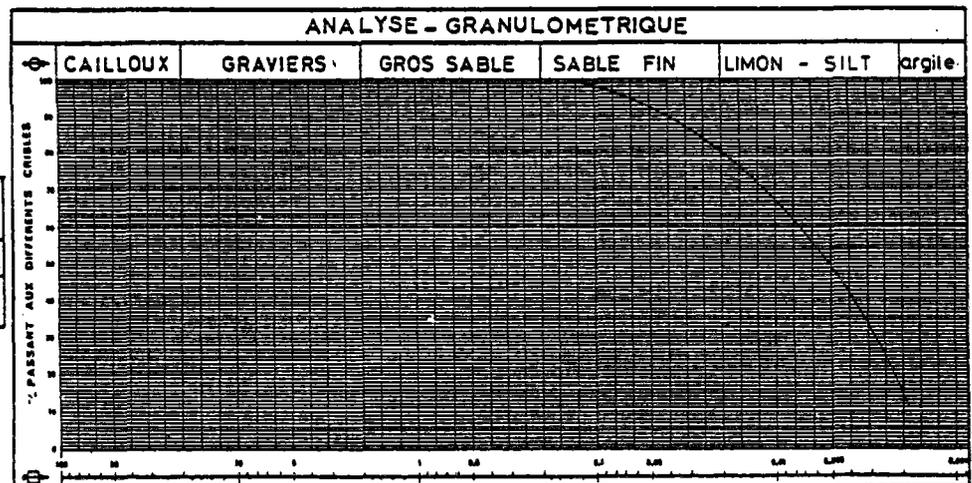
ECH	LIMITES D'ATTERBERG			
	WP	WL	IP	
Si2	26	38	12	
PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\phi_m$	2 $\phi_m$ / <sub>2mm</sub>	1mm	Vb <sub>2<math>\phi_m</math></sub>	Vb <sub>1mm</sub>
31	31	100	2,6	0,8
DROITE INTRINSEQUE				
WR	pente			
"	"			



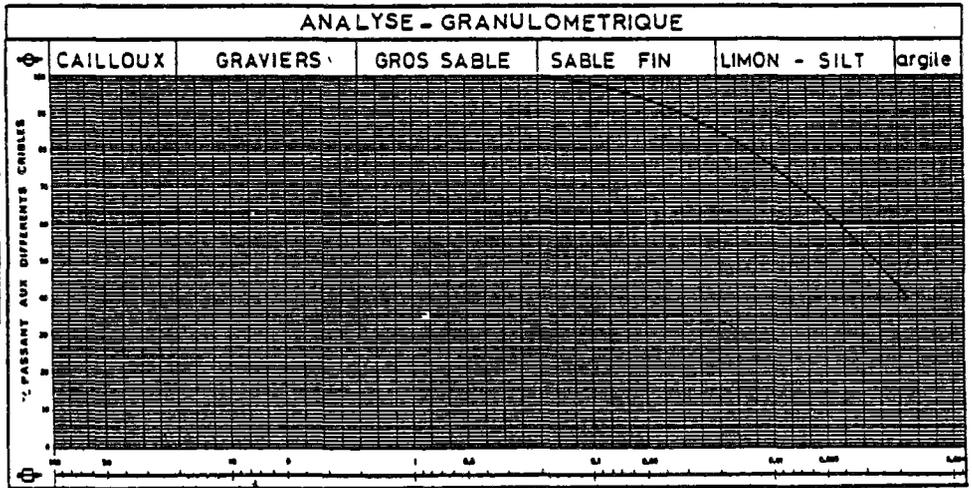
ECH	LIMITES D'ATTERBERG			
	WP	WL	IP	
Si4	25	34	9	
PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\phi_m$	2 $\phi_m$ / <sub>2mm</sub>	1mm	Vb <sub>2<math>\phi_m</math></sub>	Vb <sub>1mm</sub>
17	17	100	3,3	0,6
DROITE INTRINSEQUE				
WR	pente			
"	"			



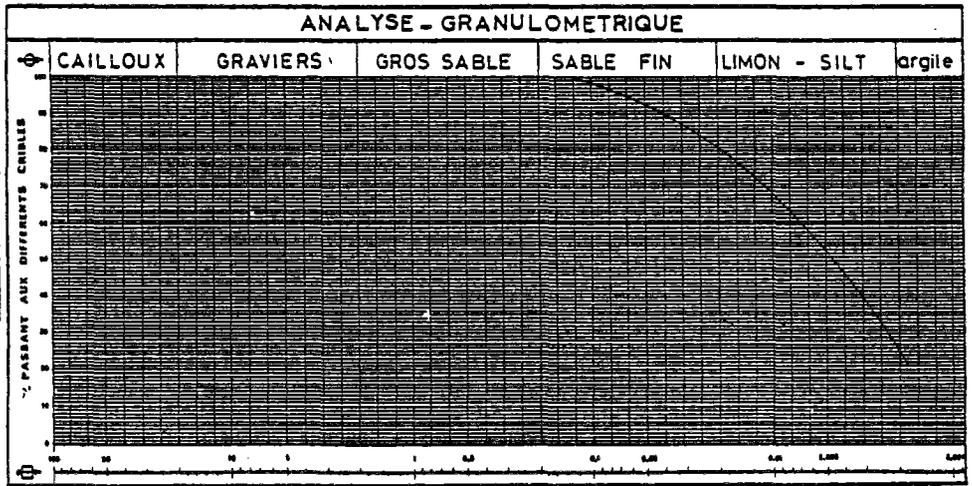
ECH	LIMITES D'ATTERBERG			
	WP	WL	IP	
Si5	50	38	12	
PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\phi_m$	2 $\phi_m$ / <sub>2mm</sub>	1mm	Vb <sub>2<math>\phi_m</math></sub>	Vb <sub>1mm</sub>
17	17	100	3,8	0,6
DROITE INTRINSEQUE				
WR	pente			
"	"			



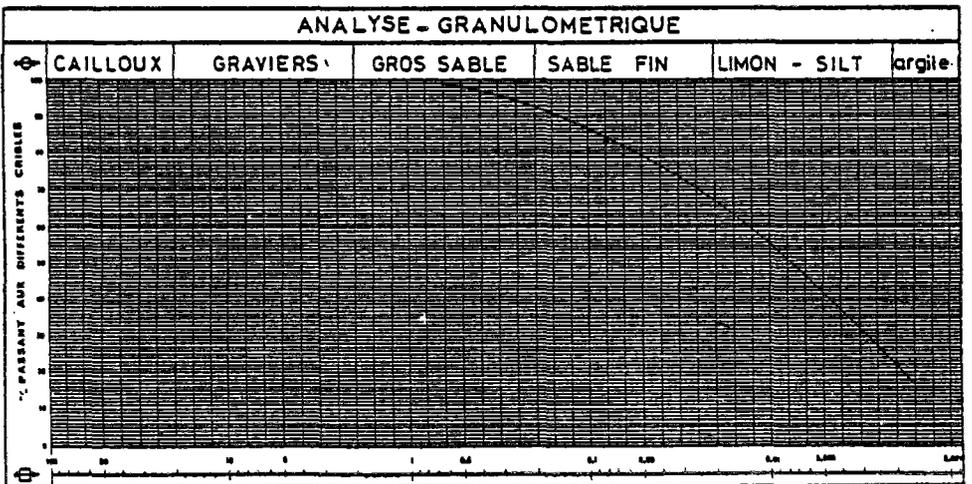
ECH	LIMITES D'ATTERBERG			
	WP	WL	IP	
Si6	32	46	14	
PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m/2mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub>	Vb <sub>1mm</sub>
48	48	100	1,3	0,62
DROITE INTRINSEQUE				
WR	pente'			
"	"			



ECH	LIMITES D'ATTERBERG			
	WP	WL	IP	
Si7	25	35	10	
PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m/2mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub>	Vb <sub>1mm</sub>
26	26	100	2,02	0,52
DROITE INTRINSEQUE				
WR	pente'			
"	"			

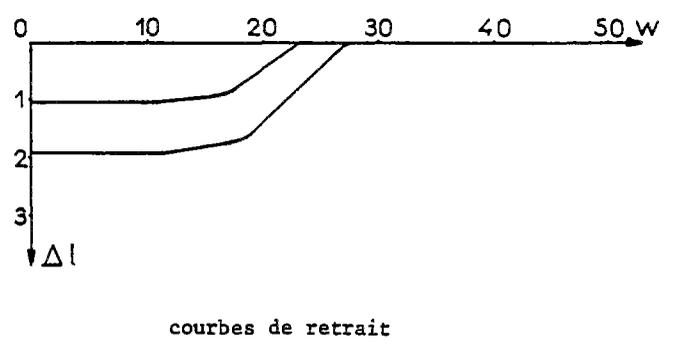
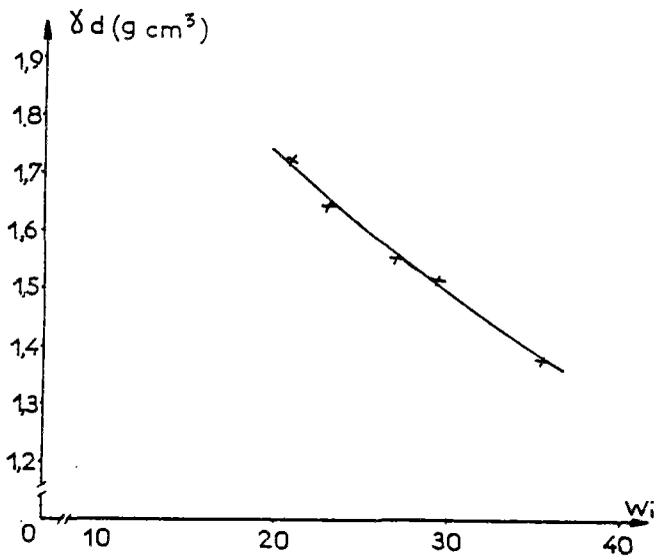
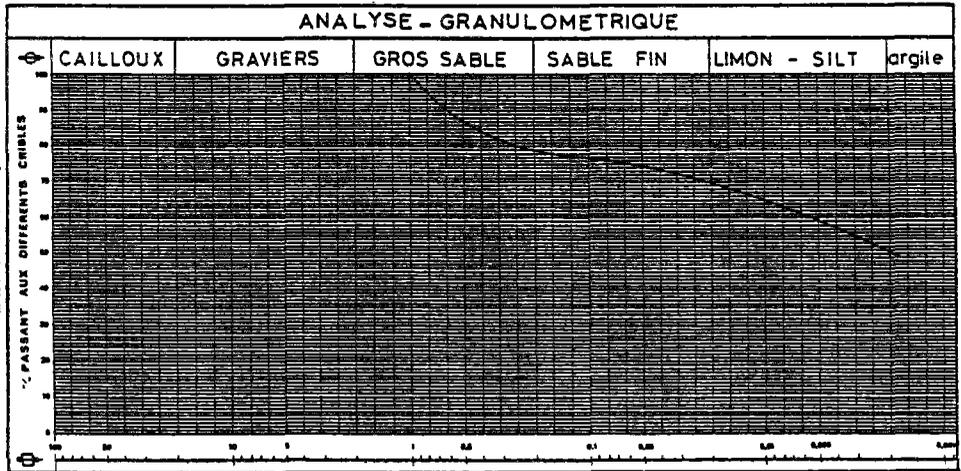


ECH	LIMITES D'ATTERBERG			
	WP	WL	IP	
Si8	25	32	7	
PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m/2mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub>	Vb <sub>1mm</sub>
23	23	100	3,6	0,83
DROITE INTRINSEQUE				
WR	pente'			
"	"			

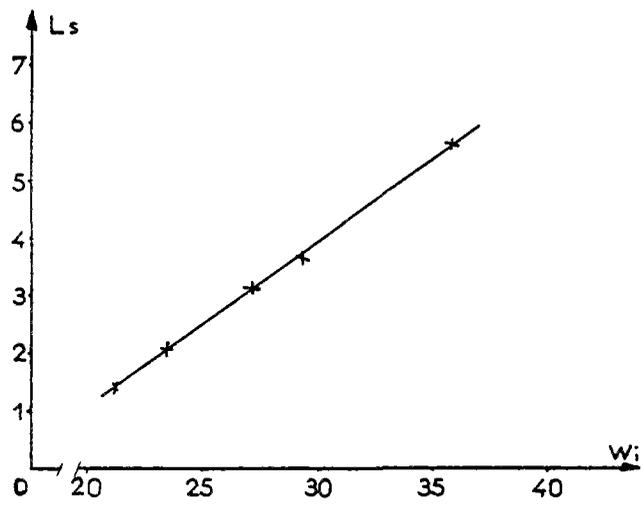


SOLS ARGILEUX

ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
A1	24	48	24
PASSANTS à			VALEUR BLEU
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 1mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
51	51	100	2,67 1,36
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
16	0,29		

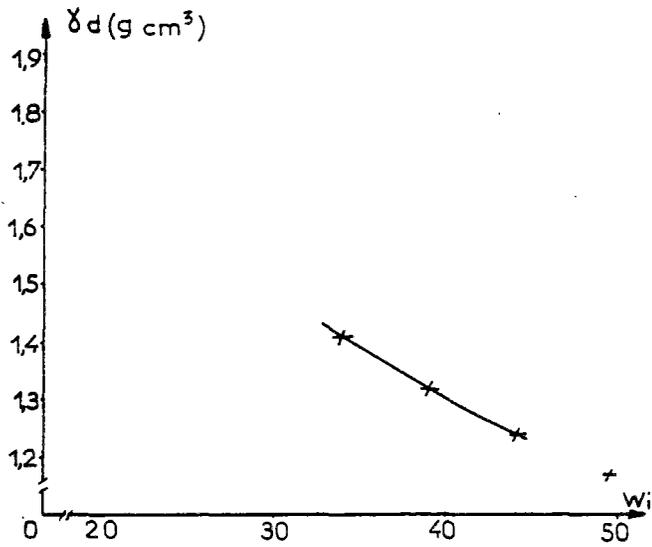
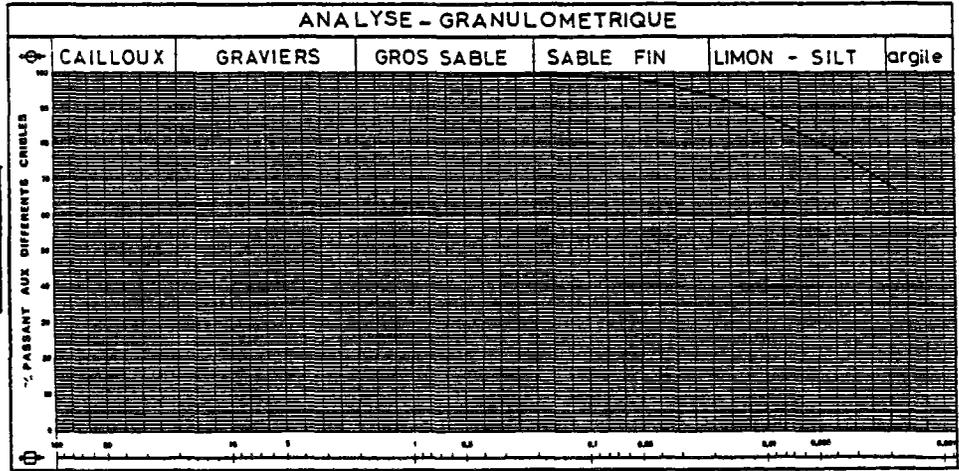


courbe de densité sèche

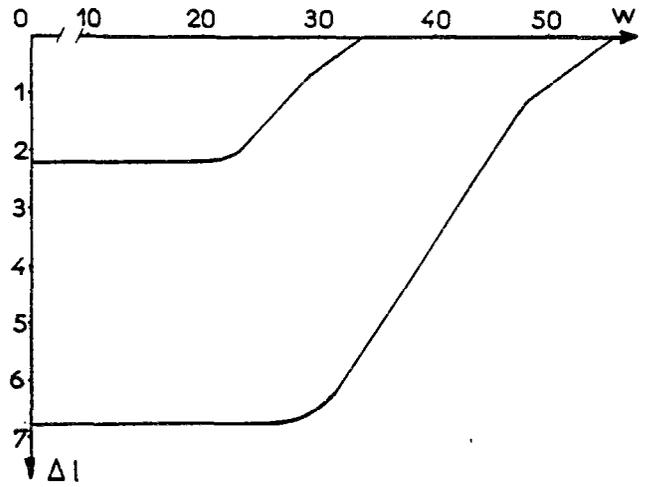


droite intrinsèque

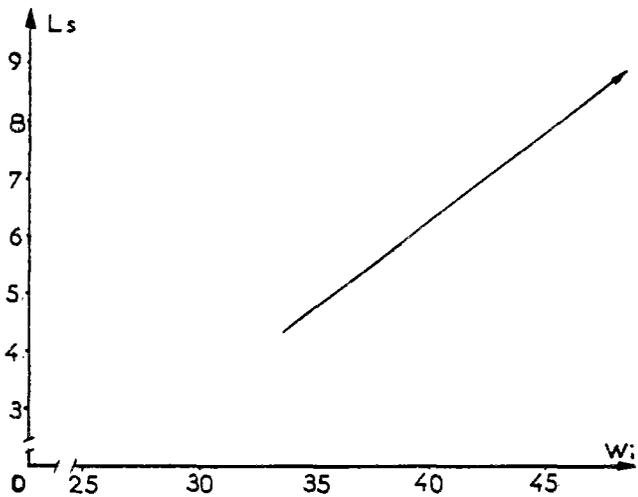
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
A2	38	68	30
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 1mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> / Vb <sub>1mm</sub>
69	69	100	6,67 / 4,6
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
26	0,31		



courbe de densité sèche



courbes de retrait



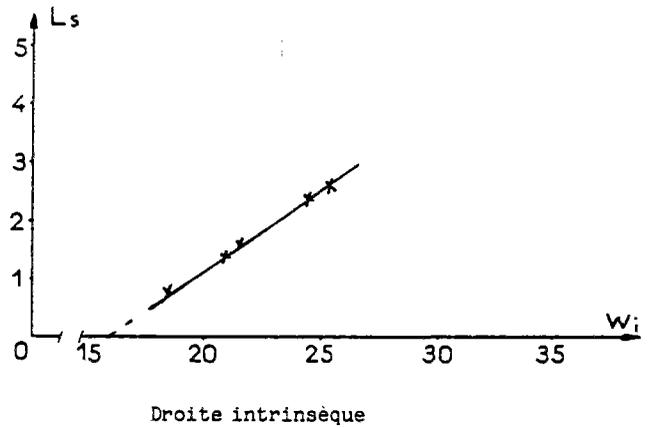
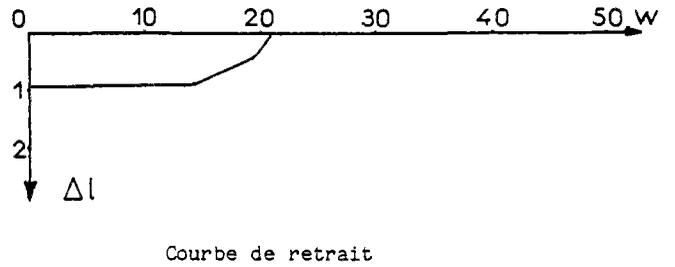
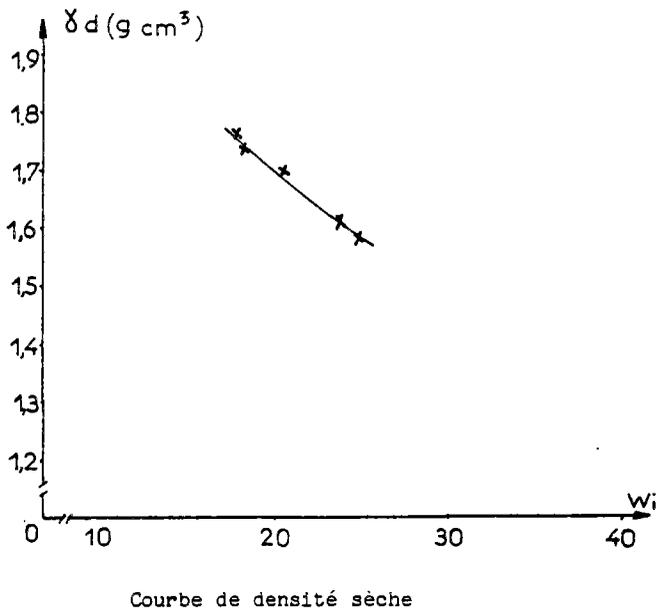
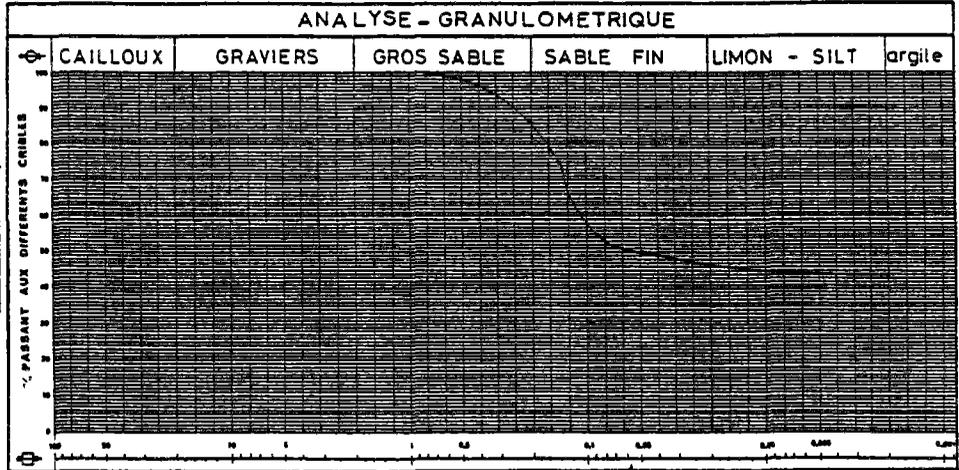
droite intrinsèque



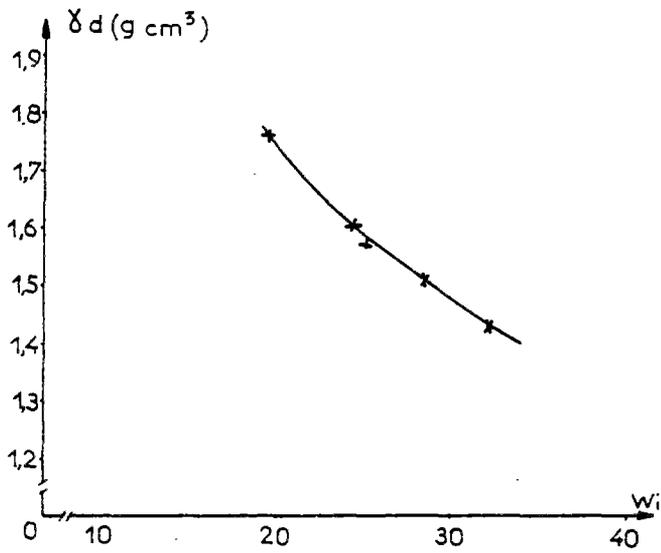
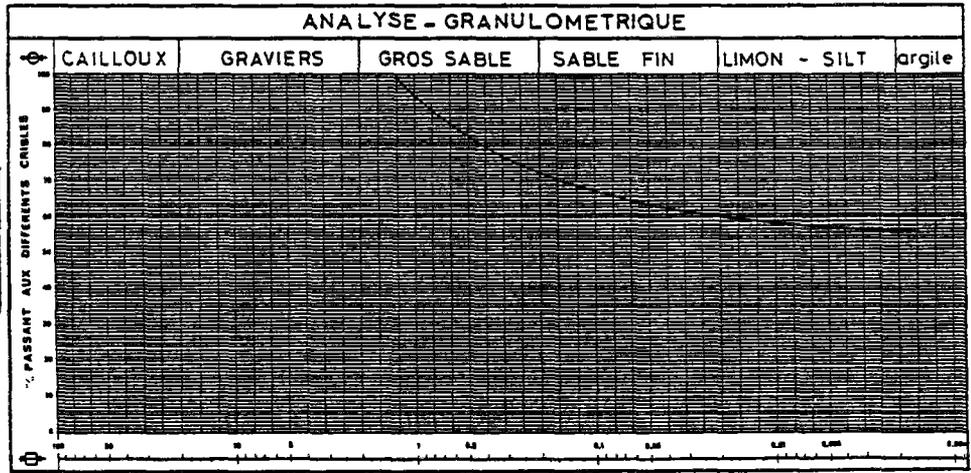


SOLS LIMONEUX

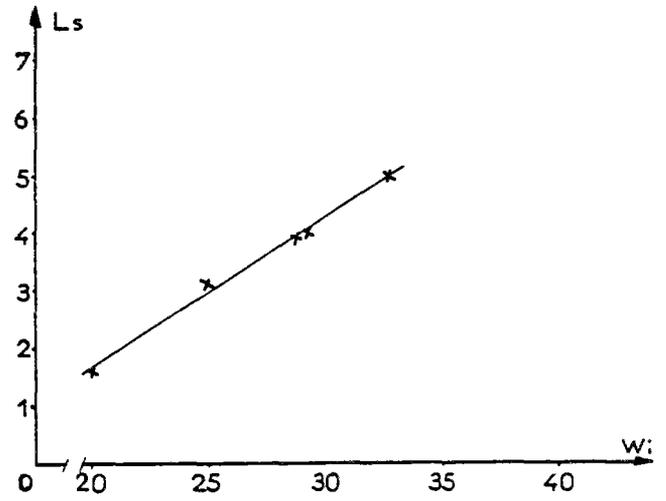
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
L1	23	36	13
PASSANTS à			VALEUR BLEU
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
44	44	100	1,98 0,87
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
15,5	0,25		



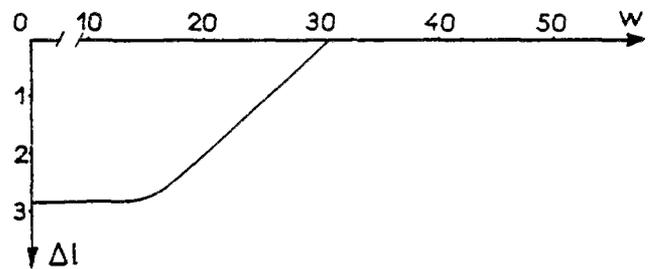
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
L2	28	55	27
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 1mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> / Vb <sub>1mm</sub>
57	57	100	2,6 / 1,55
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
12,8	0,26		



Courbe de densité sèche

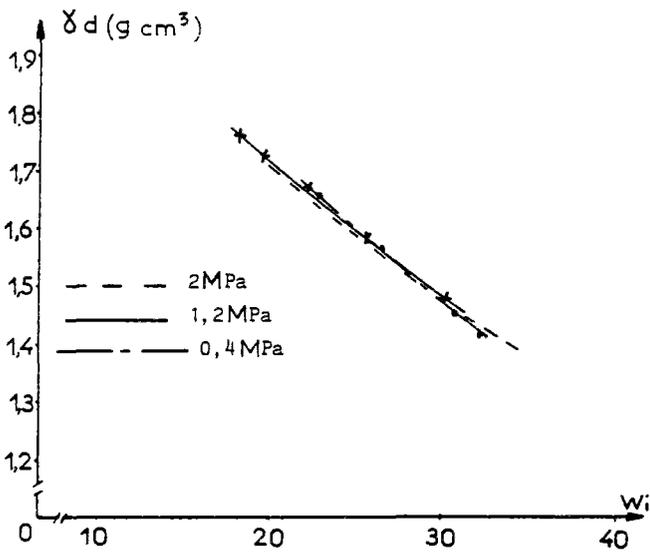
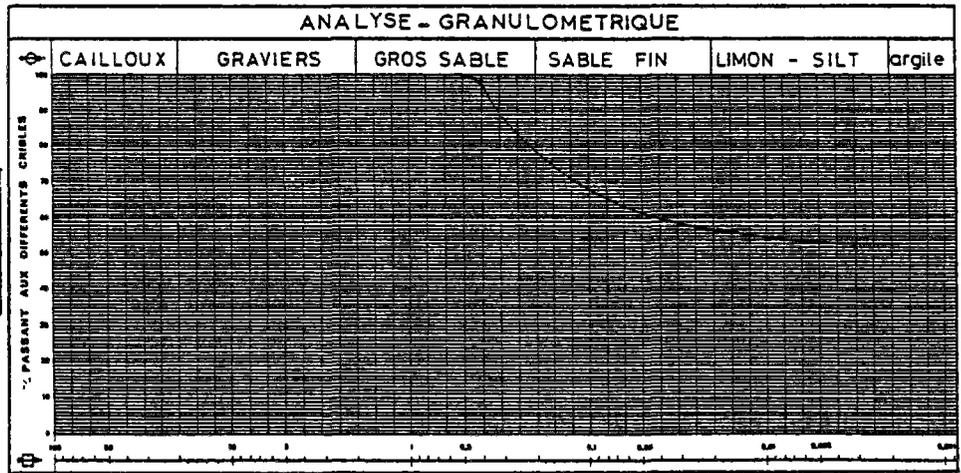


Droite intrinsèque

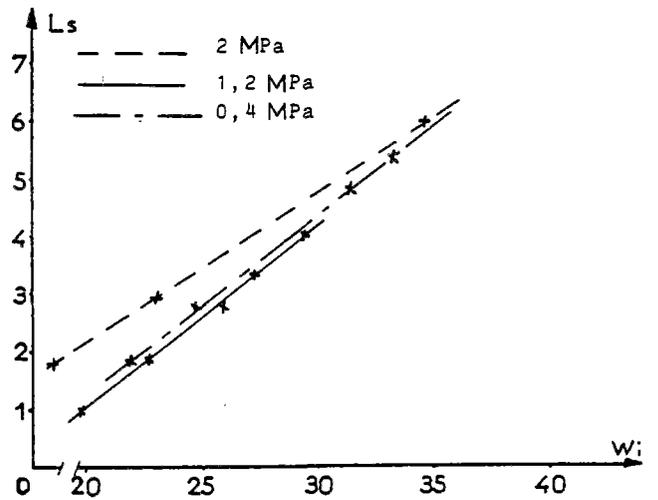


Courbe de retrait

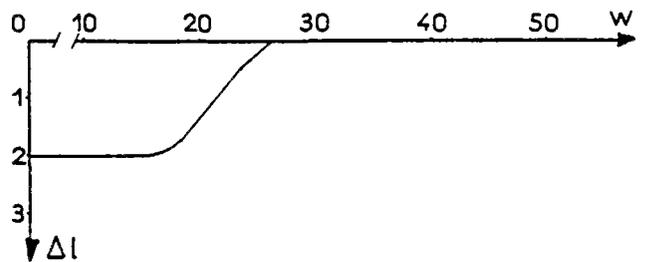
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
L 3	21	46	25
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 2mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> / Vb <sub>1mm</sub>
53	53	100	2,48 / 1,13
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
16,4	0,31		



Courbe de densité sèche

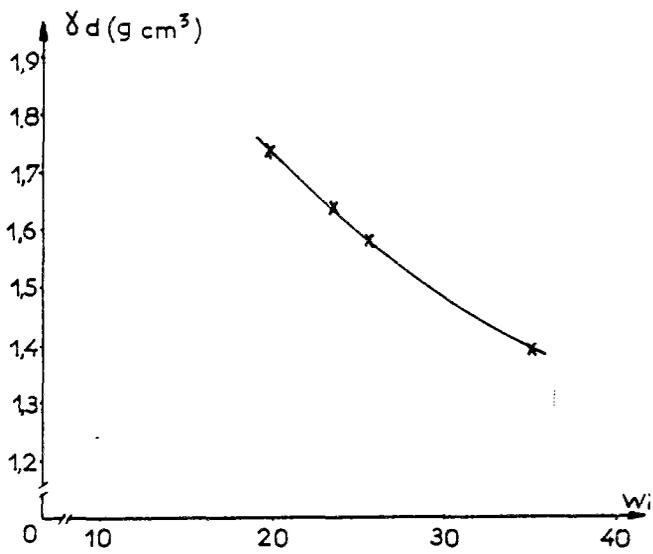
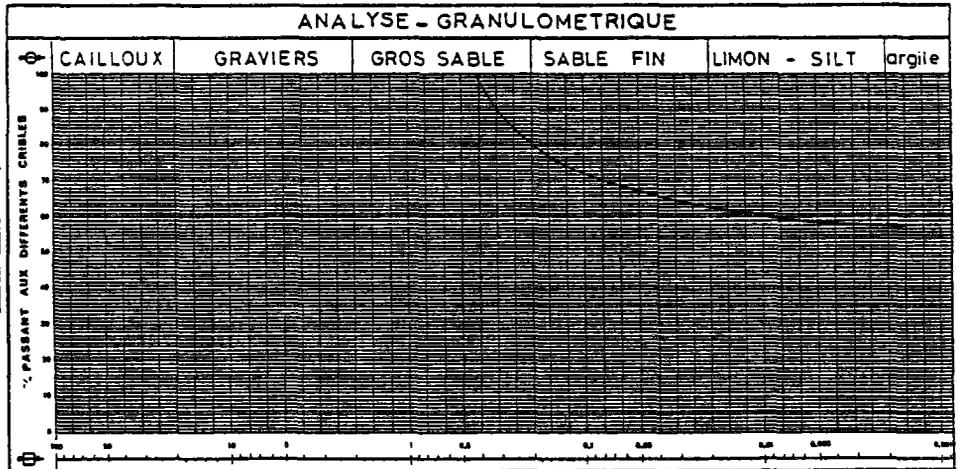


Droites intrinsèques

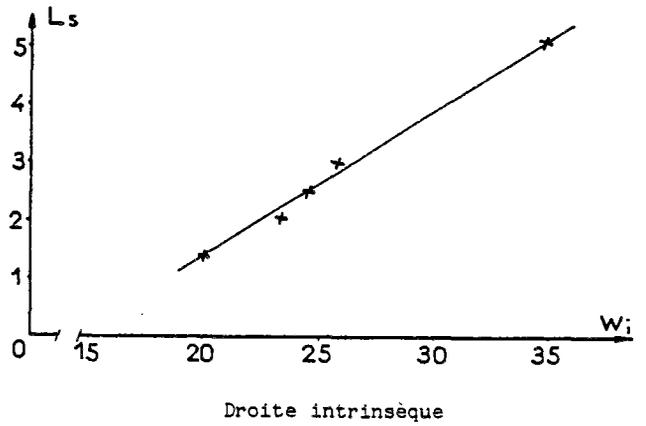


Courbe de retrait

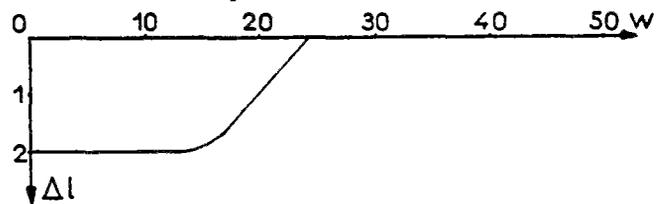
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
L4	22	46	24
PASSANTS à			VALEUR BLEU
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 2 $\mu$ m	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> / Vb <sub>1mm</sub>
58	58	100	4,9 / 1,1
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e		
14,1	0,25		



Courbe de densité sèche

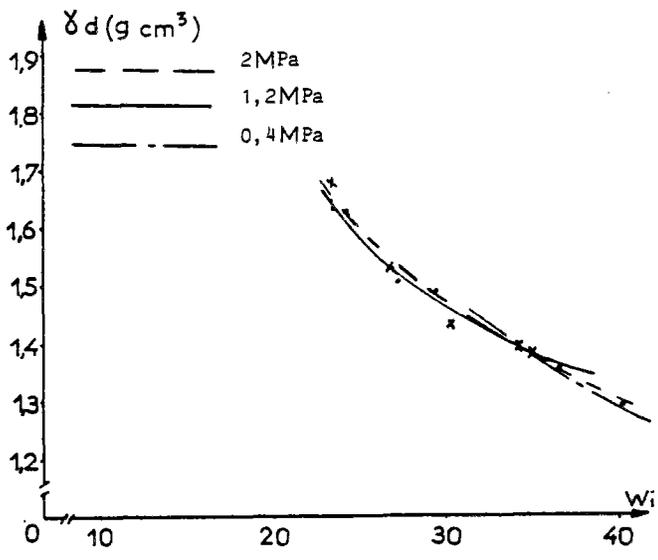
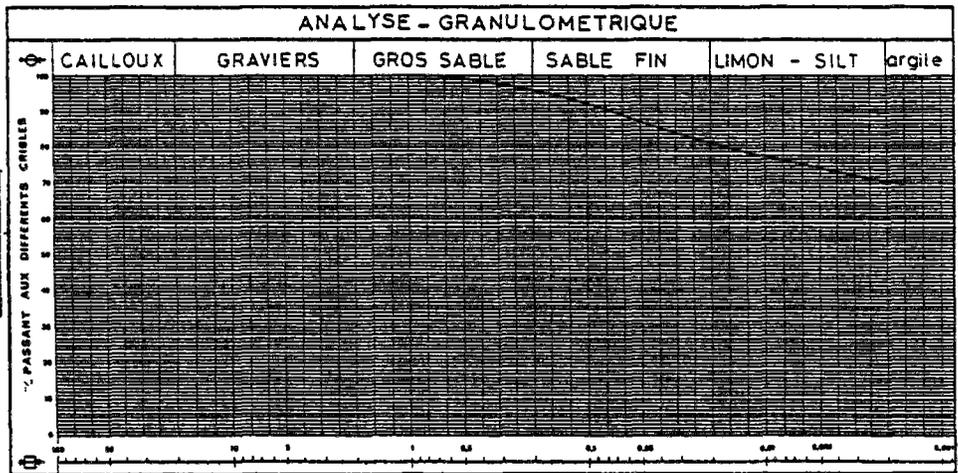


Droite intrinsèque

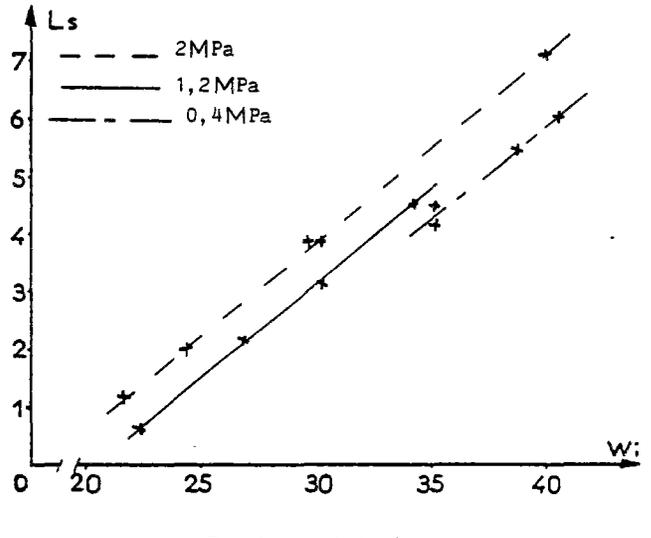


Courbe de retrait

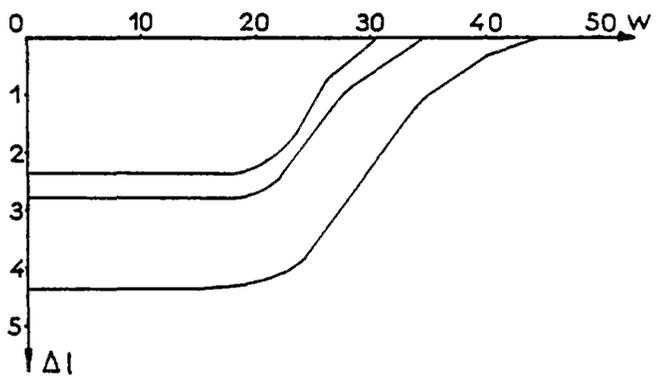
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
L5	26	52	26
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\phi_m$	2 $\phi_m/2mm$	1mm	Vb <sub>2<math>\phi_m</math></sub> Vb <sub>1mm</sub>
70	70	100	2,45 1,92
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente		
20,3	0,33		



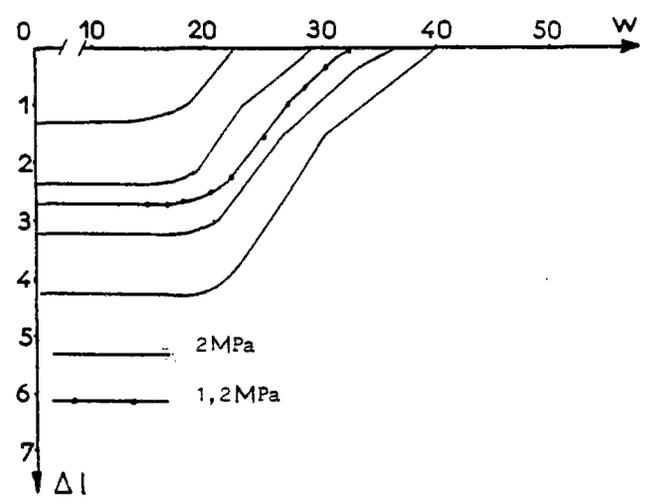
Courbes de densité sèche



Droites intrinsèques

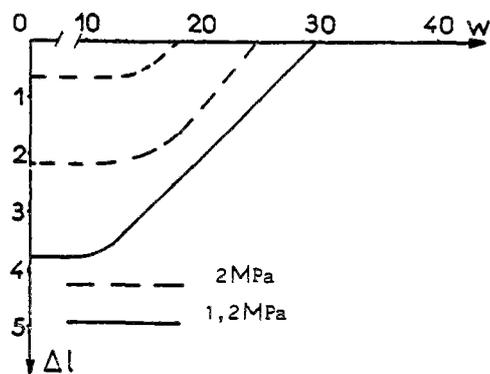
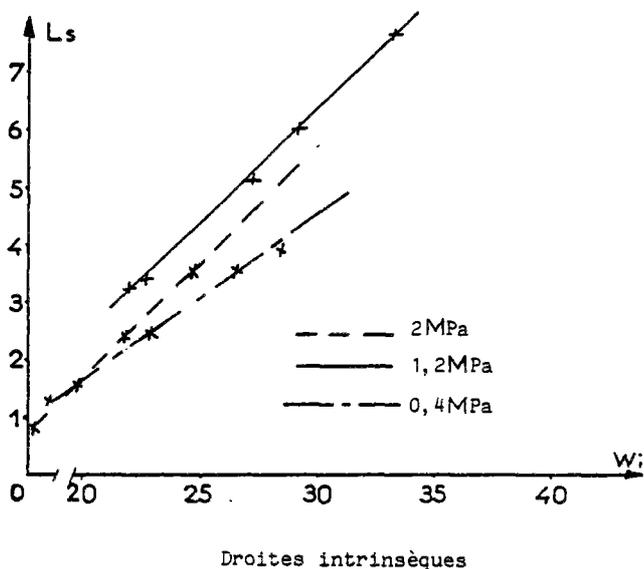
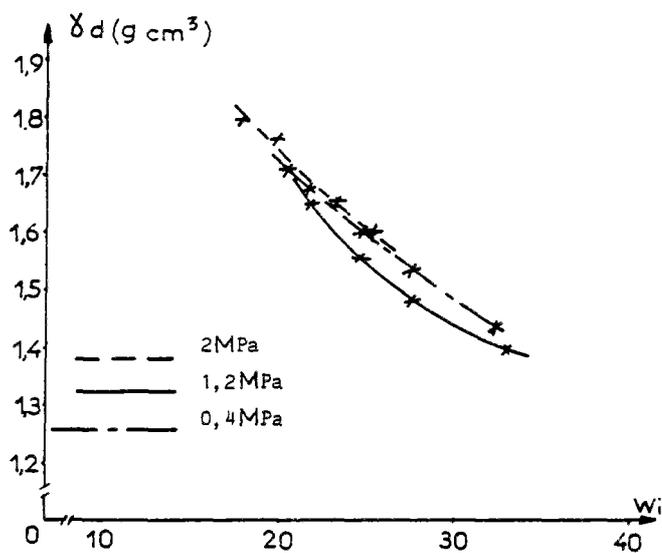
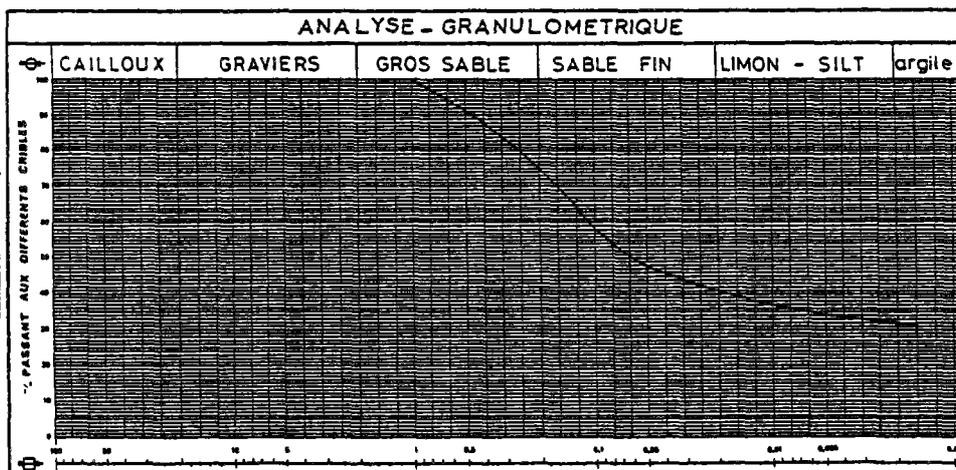


Courbes de retrait à 0,4 MPa



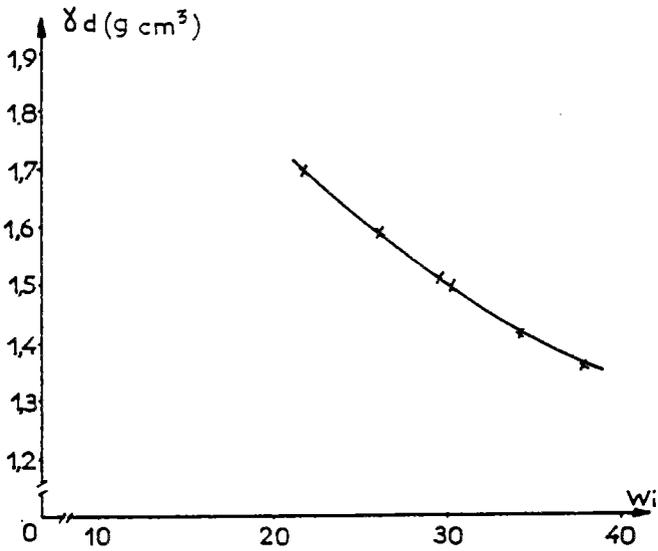
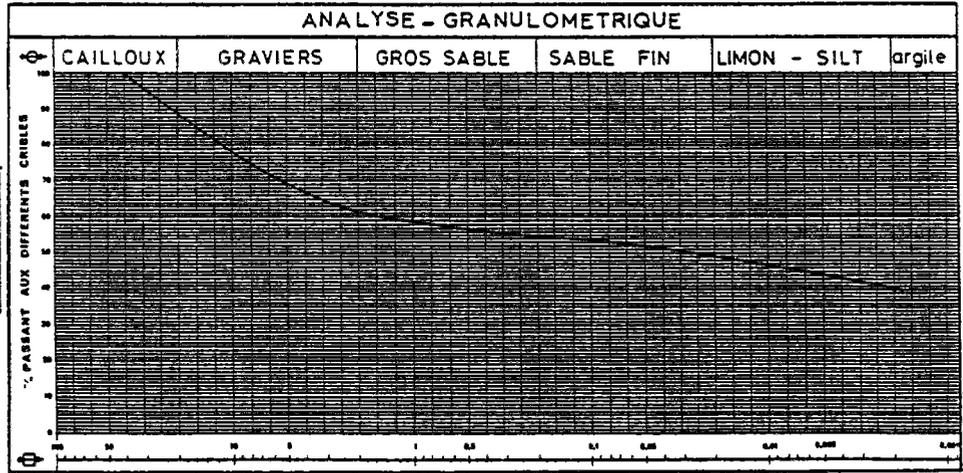
Courbes de retrait

ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	TP
L6	22	40	18
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 4mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
32	32	100	6,6 0,32
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente		
13,9	0,37		

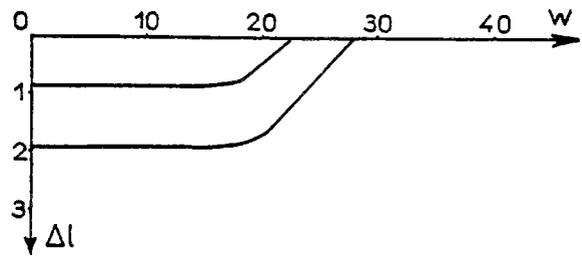


GRAVELEUX

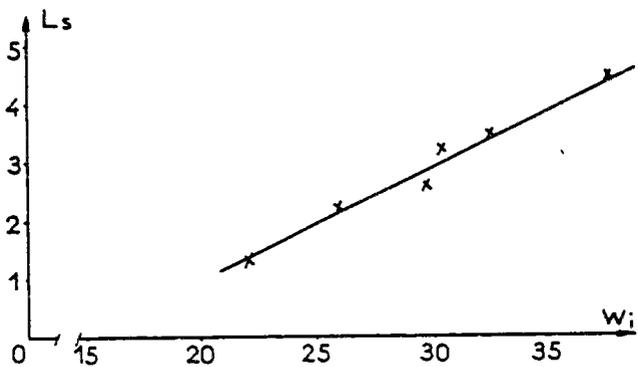
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
G1	28	53	25
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 1mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
40	69	58	2,13 1,47
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente		
14,8	0,19		



courbe de densité sèche



courbes de retrait

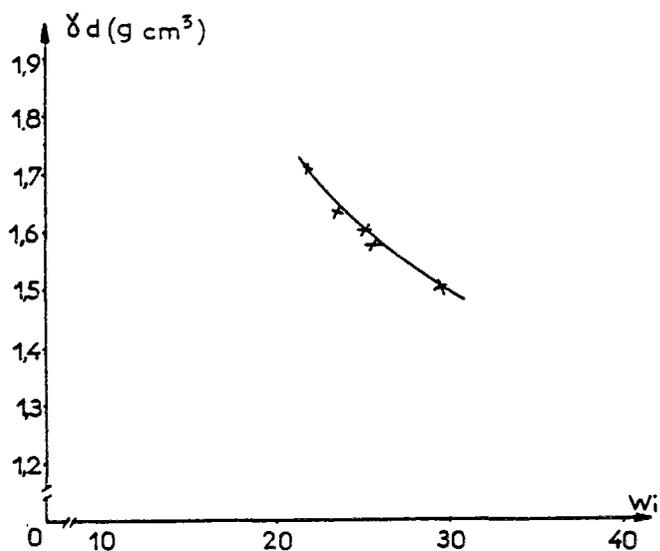
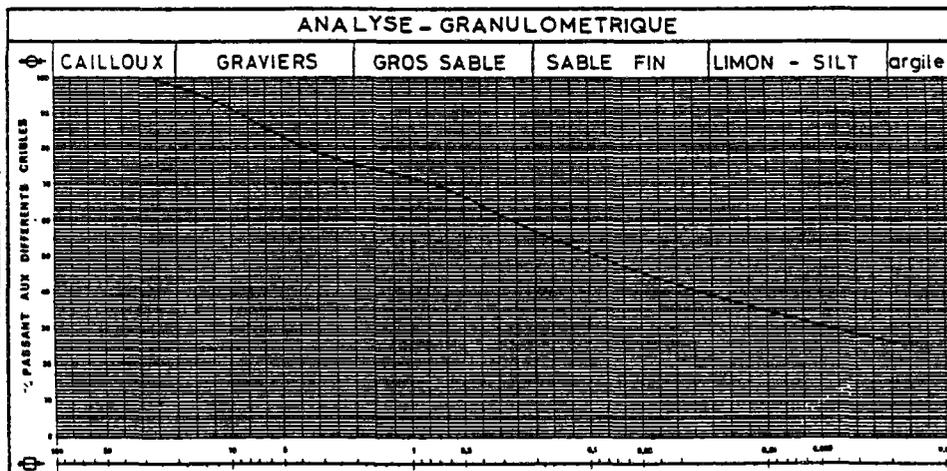


droite intrinsèque

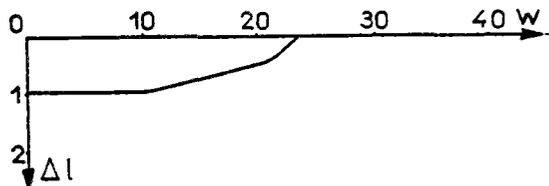
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
92	28	40	12

PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m/2mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m}</sub>	Vb <sub>1mm}</sub>
27	37	73	3,55	1,31

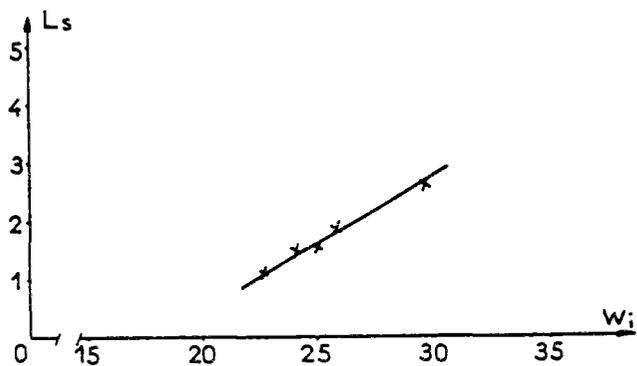
DROITE INTRINSEQUE	
WR	pen $\epsilon$
18,2	0,23



courbe de densité sèche

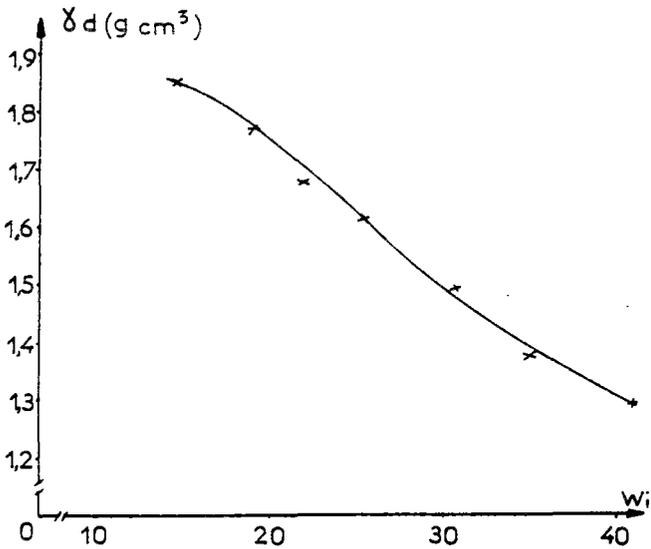
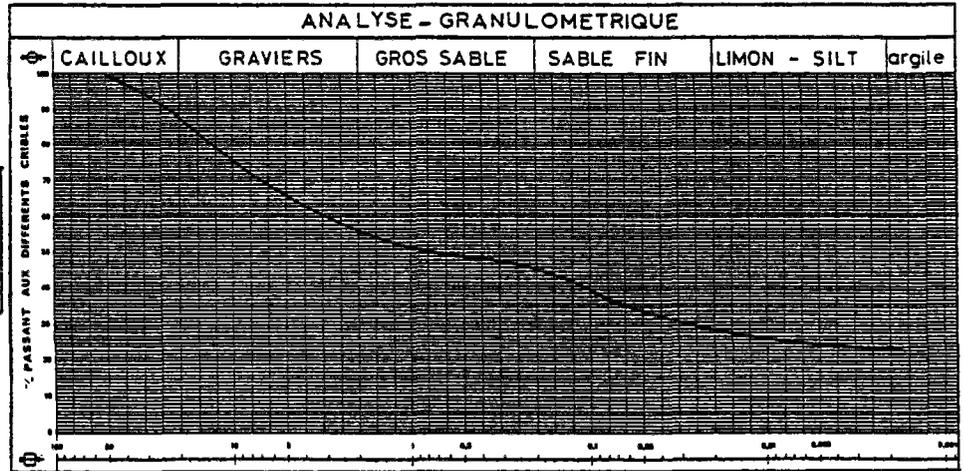


courbe de retrait

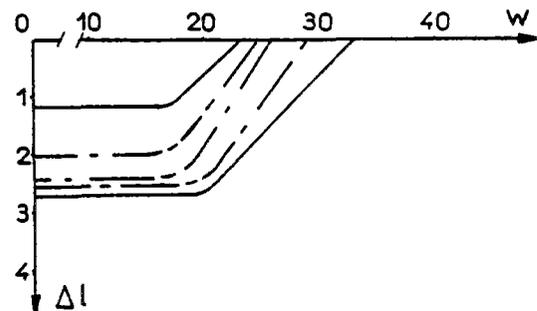
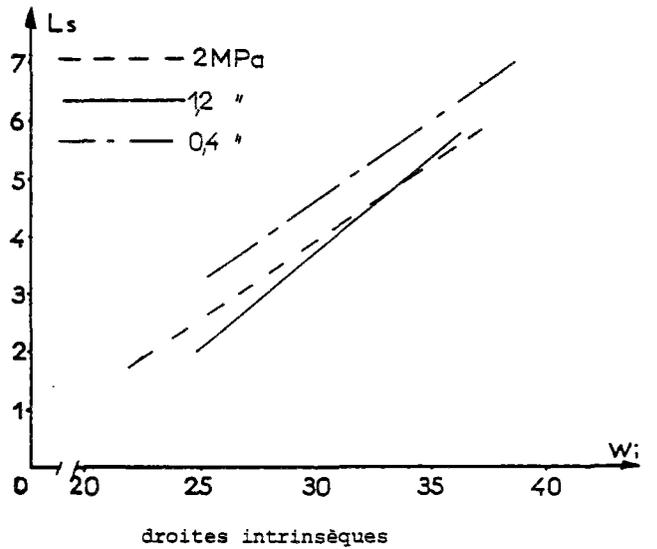


droite intrinsèque

ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
93	30	49	19
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\varphi_m$	2 $\varphi_{1mm}$	1mm	Vb <sub>2<math>\varphi_m</math></sub> Vb <sub>1mm</sub>
24	46	52	3,4 1,56
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente'		
1,54	0,29		

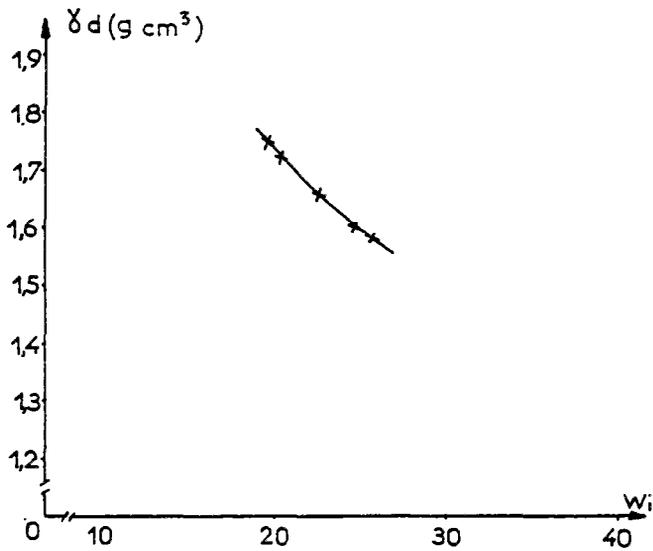
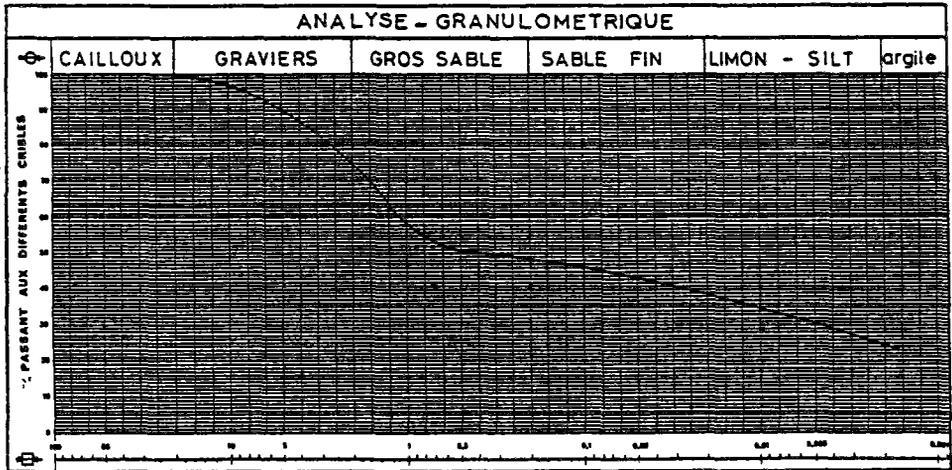


courbe de densité sèche nous avons tracé qu'une courbe car les densités sont très sensiblement identiques pour chaque intensité de compactage

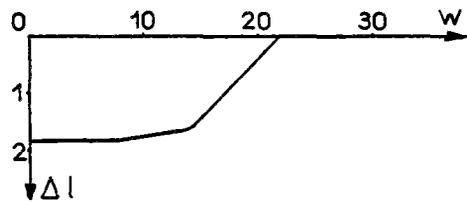


courbes de retrait

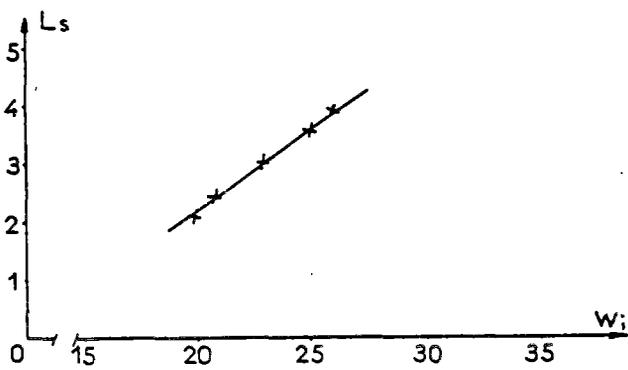
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
G4	22	37	15
PASSANTS à			VALEUR BLEU
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 2mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
24	41	58	3,57 1,48
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
13	0,3		



courbe de densité sèche

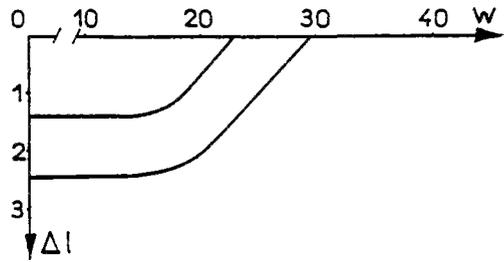
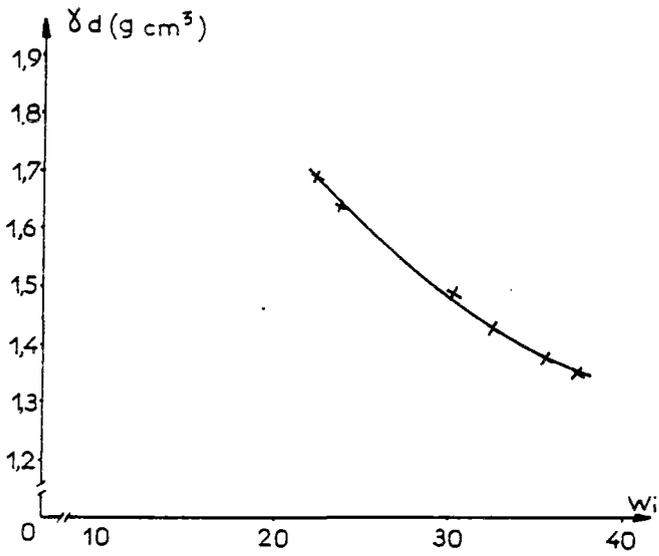
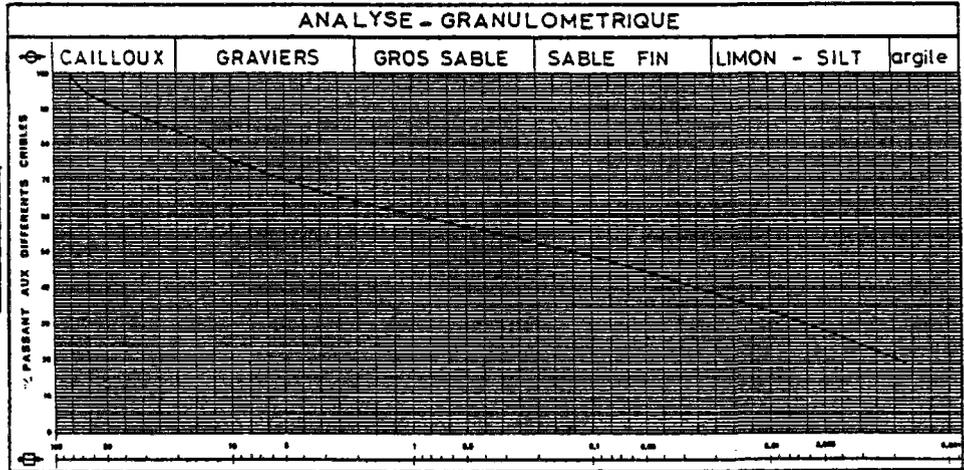


courbe de retrait

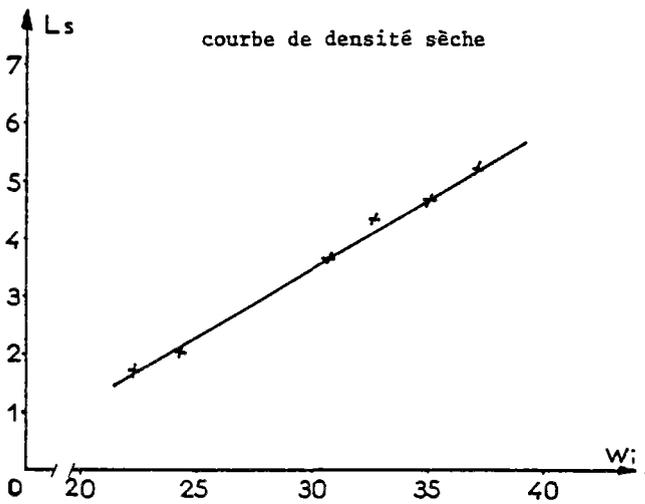


droite intrinsèque

ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
g5	32	41	9
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m/4mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
21	35	60	3,51 1,33
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
15,3	0,25		

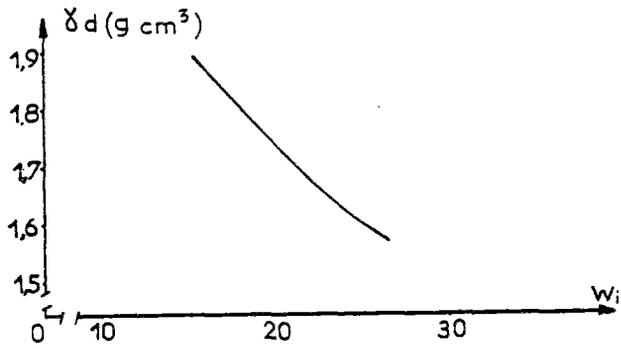
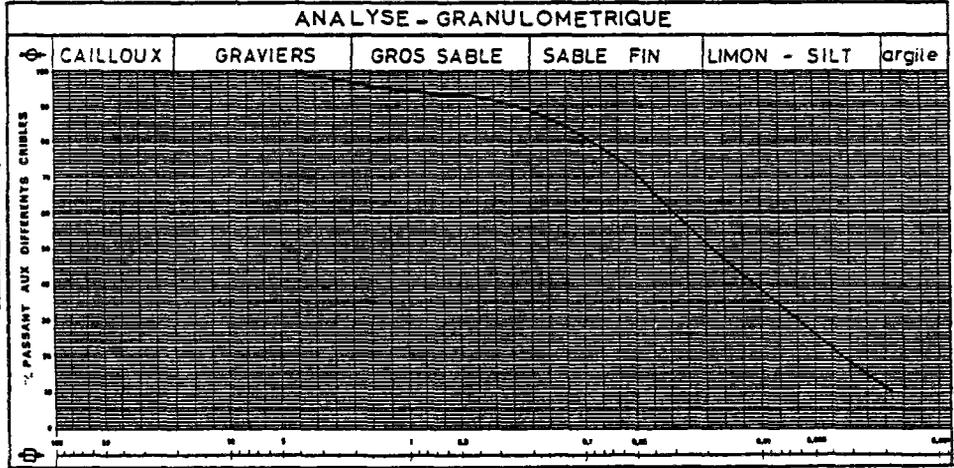


courbes de retrait

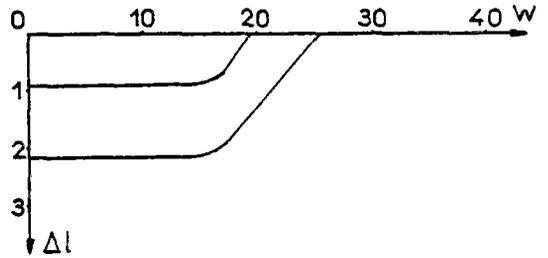


droite intrinsèque

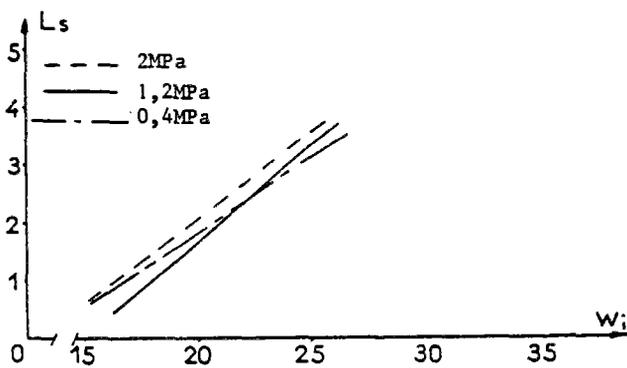
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
g7	30,9	44,1	13,2
PASSANTS à			VALEUR BLEU
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 1mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
12	13	94	6,9 0,88
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
15	0,33		



courbe de densité sèche

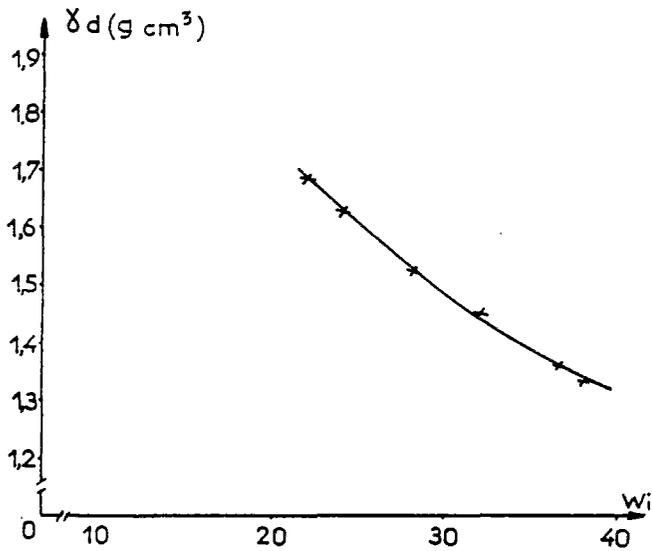
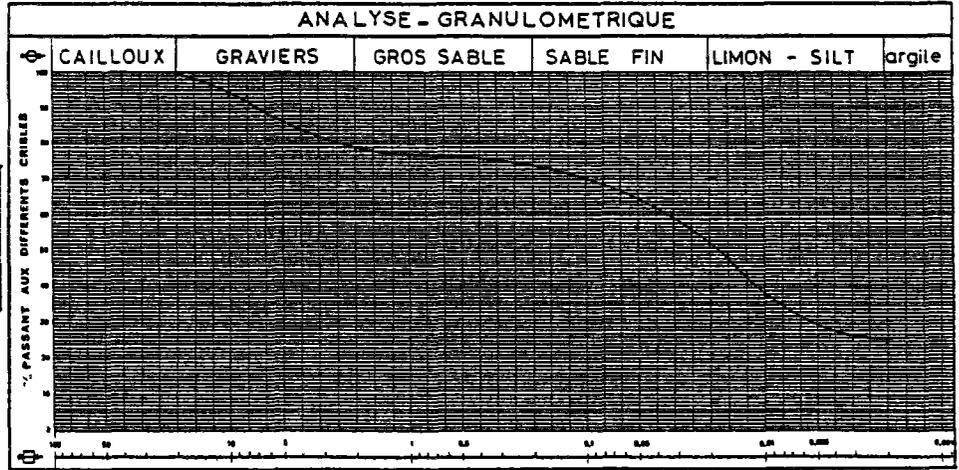


courbes de retrait

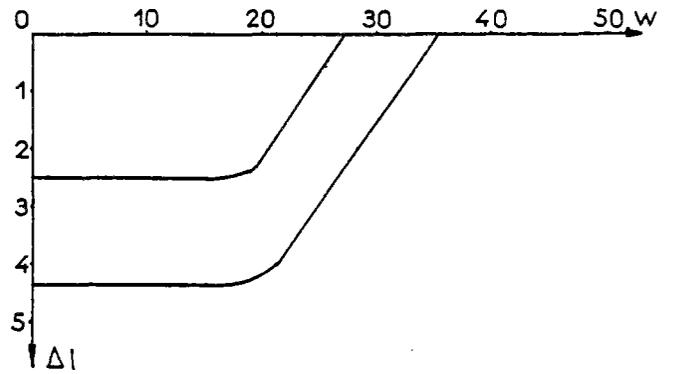


droites intrinsèques

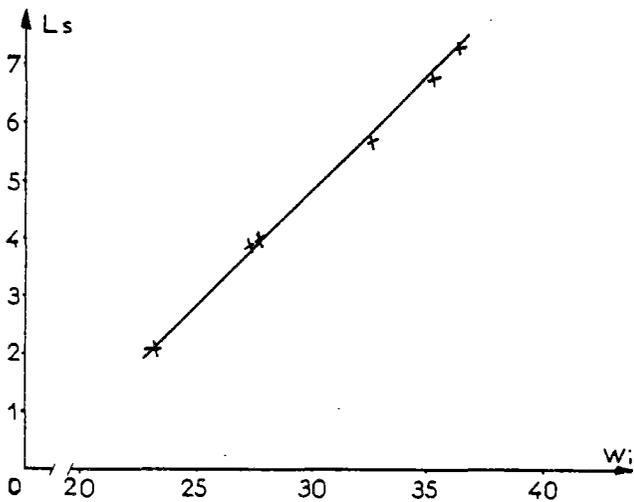
ECH	LIMITES D'ATTERBERG			
	WP	WL	IP	
g8	27,2	68,4	41,2	
PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m/1mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub>	Vb <sub>1mm</sub>
24	31	77	3,6	1,68
DROITE INTRINSEQUE				
WR	pente			
17	0,38			



courbe de densité sèche



courbes de retrait

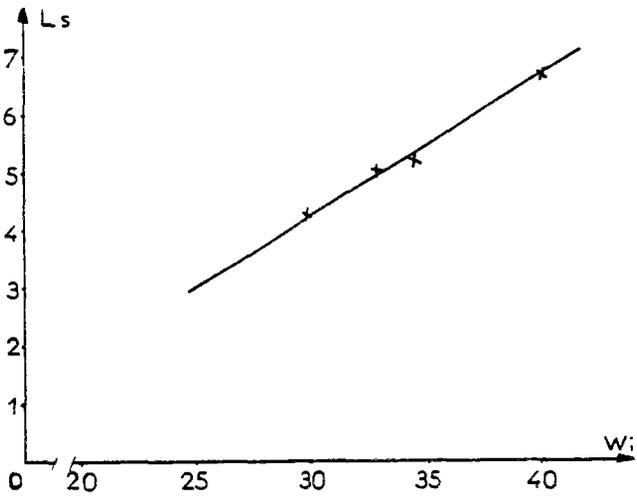
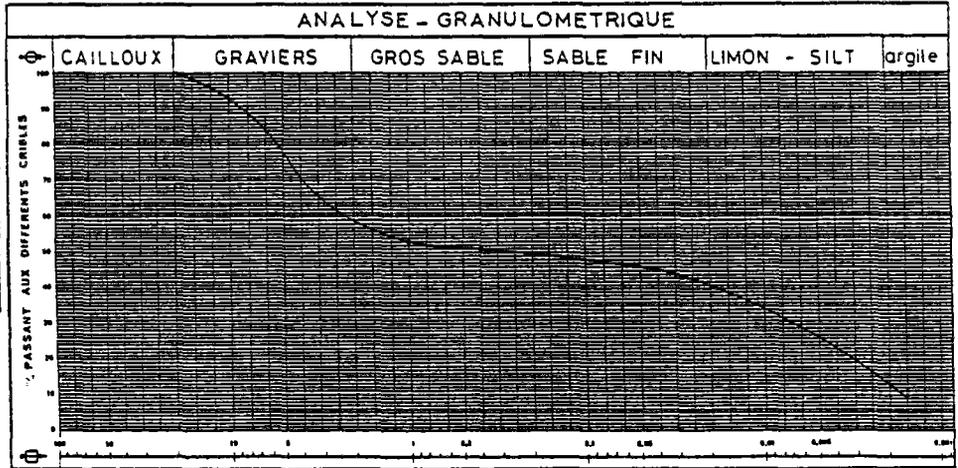


droite intrinsèque

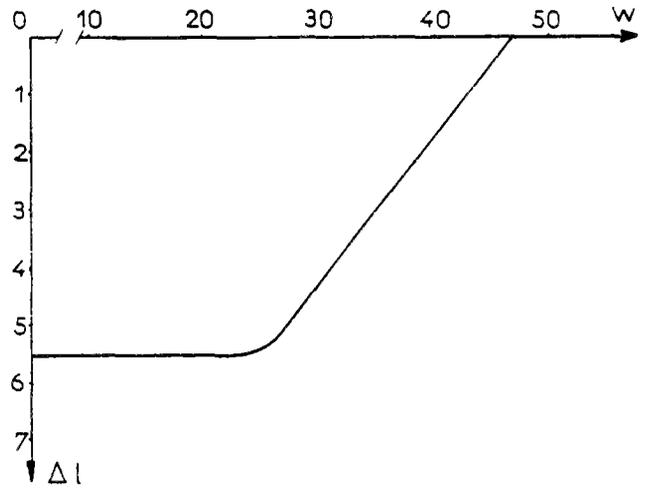
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
99	29,3	78	48

PASSANTS à			VALEUR BLEU	
2 $\varphi_m$	2 $\varphi_{mm}$	imm	Vb <sub>2<math>\varphi_m</math></sub>	Vb <sub>1<math>\varphi_m</math></sub>
13	51	53	5,3	2,7

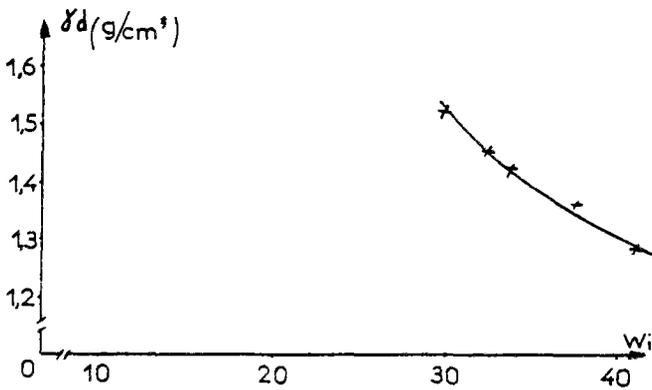
DROITE INTRINSEQUE	
WR	pende e'
13	0,25



droite intrinsèque

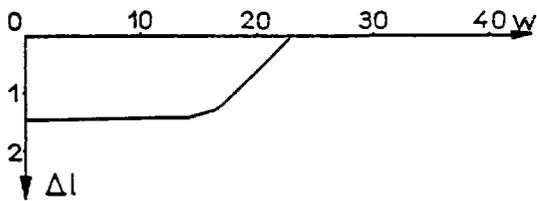
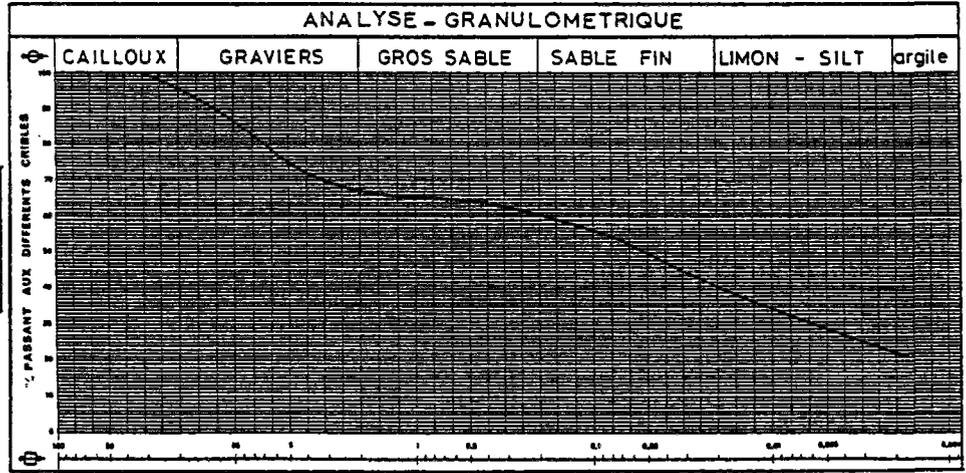


courbe de retrait

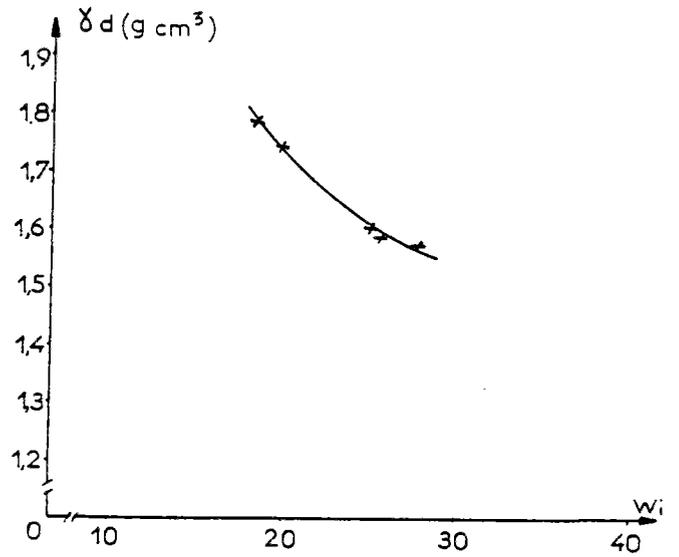


courbe de densité sèche

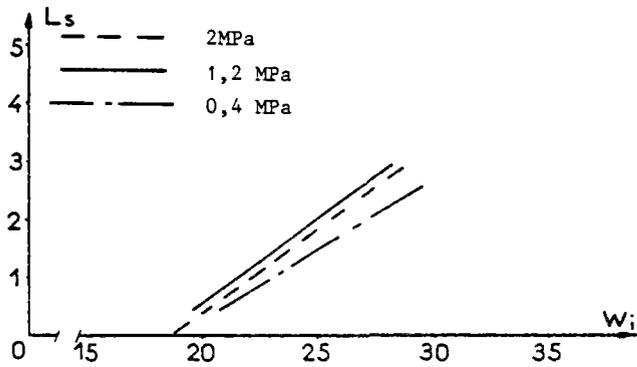
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
910	23	35	12
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\phi_m$	2 $\phi_{mm}$	1mm	Vb <sub>2<math>\phi_m</math></sub> Vb <sub>1mm</sub>
21	33	64	1,5 1,5
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente		
183	0,26		



courbe de retrait

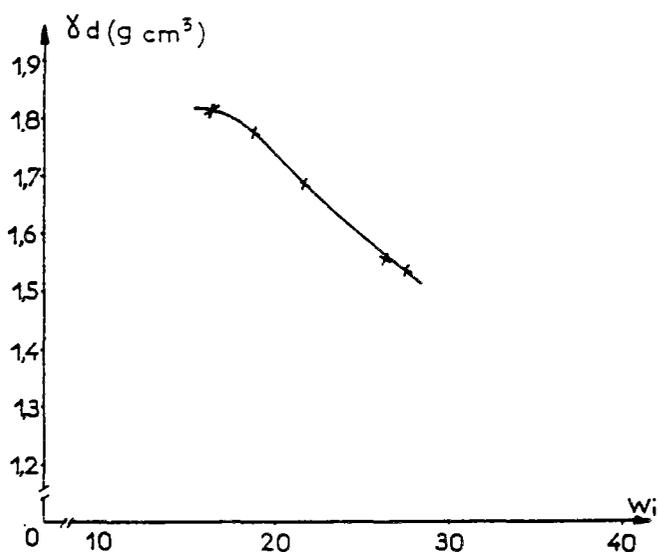
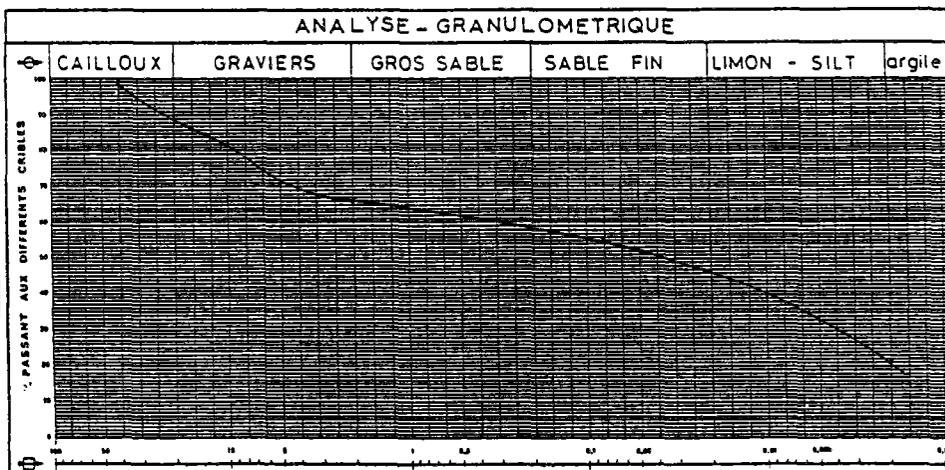


courbe de densité sèche

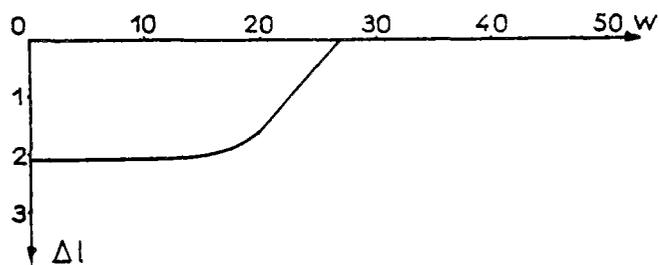


droites intrinsèques

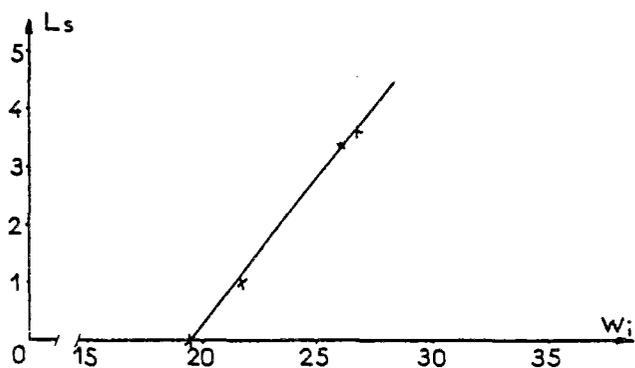
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
g11	23	35	12
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\gamma_m$	2 $\gamma_{m/1mm}$	1mm	Vb <sub>2<math>\gamma_m</math></sub> Vb <sub>1mm</sub>
22	33	65	5,5 1,8
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente		
19	0,49		



courbe de densité sèche

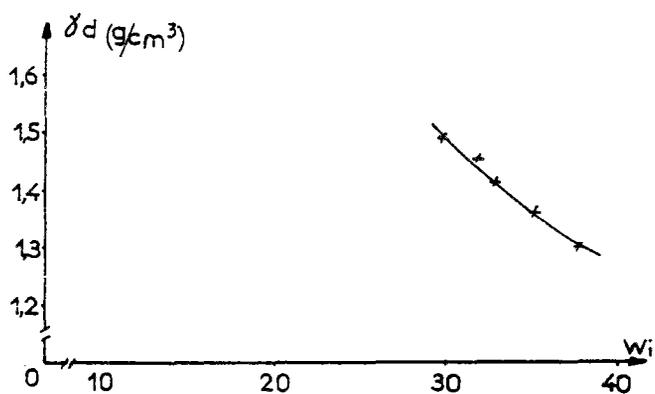
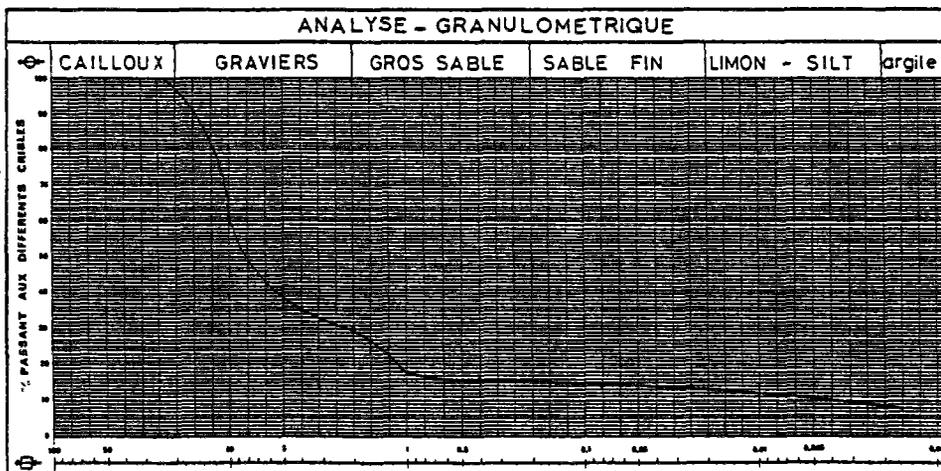


courbe de retrait

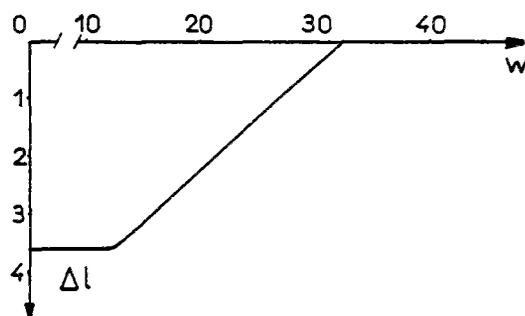


droite intrinsèque

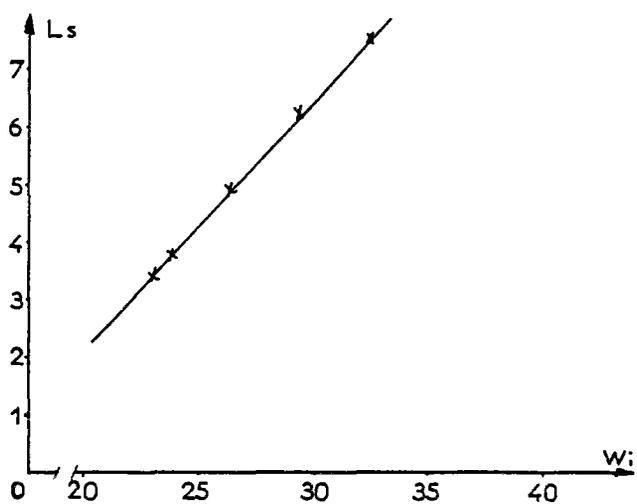
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
G1	34	50	16
PASSANTS à			VALEUR BLEU
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 2 $\mu$ m	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
8	50	16	2,85 1,43
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente		
15	0,42		



courbe de retrait

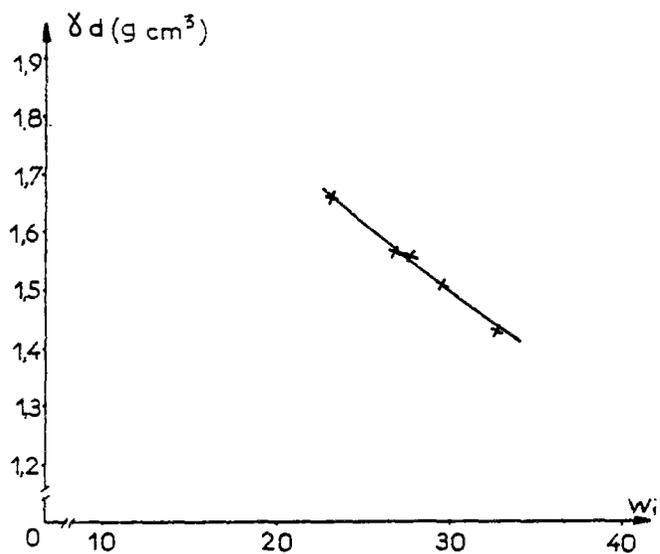
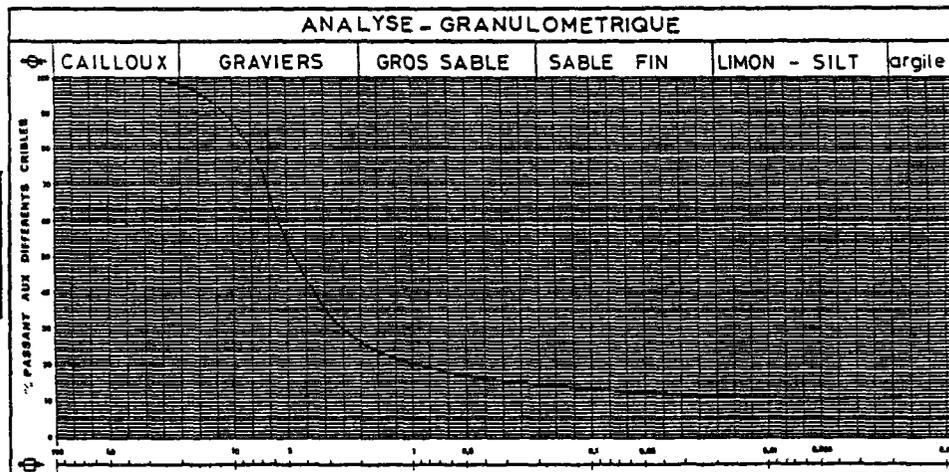


courbe de retrait

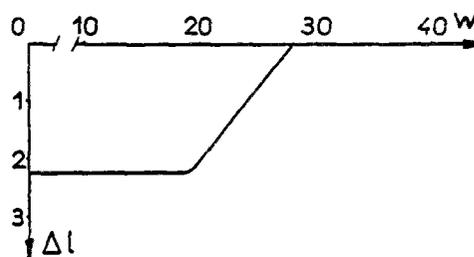


droite intrinsèque

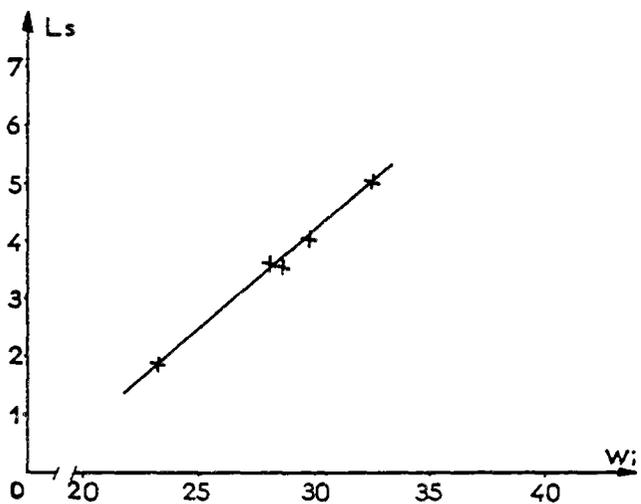
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
G2	22	56	15
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\gamma_m$	2 $\gamma_m$ / 1mm	1mm	Vb <sub>2<math>\gamma_m</math></sub> Vb <sub>1mm</sub>
11	58	19	2,2 1,27
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente		
17,7	0,34		



courbe de densité sèche

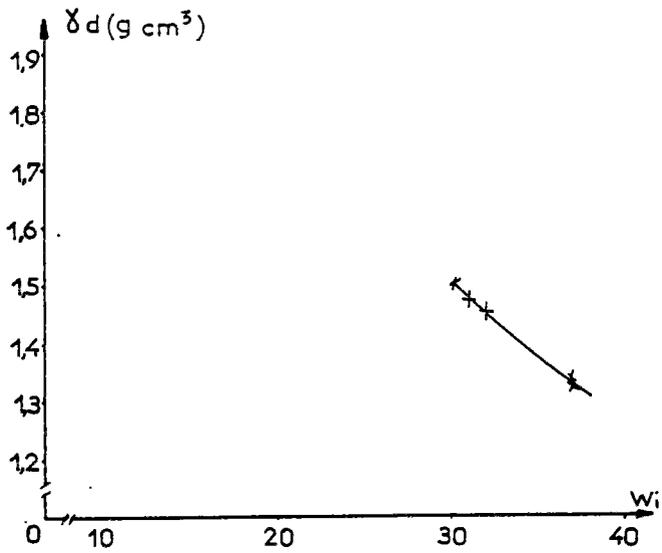
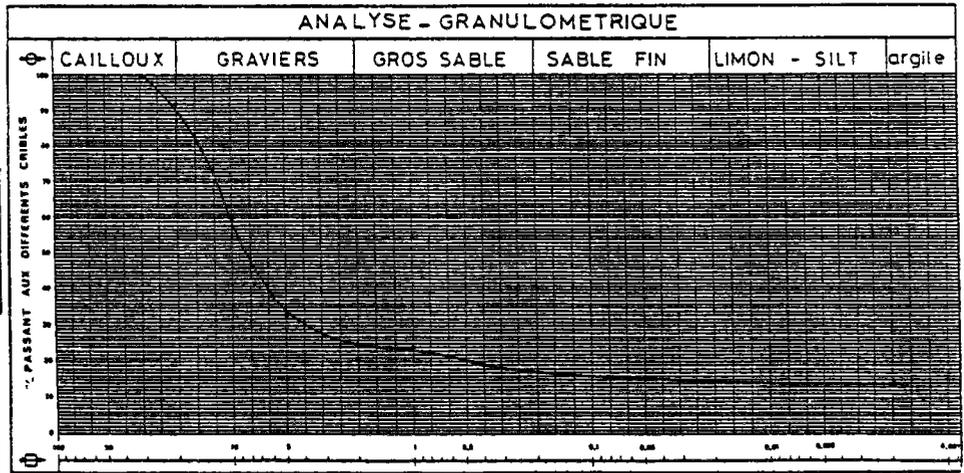


courbe de retrait

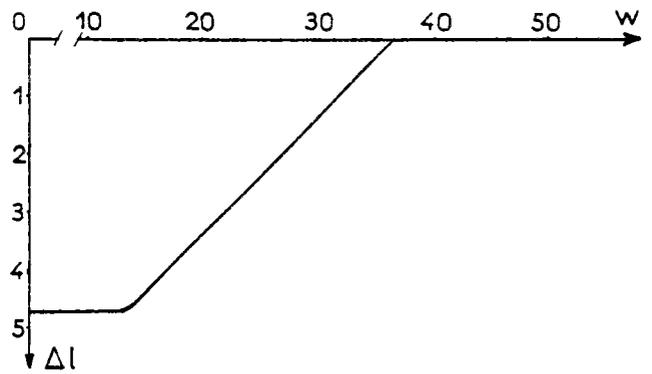


droite intrinsèque

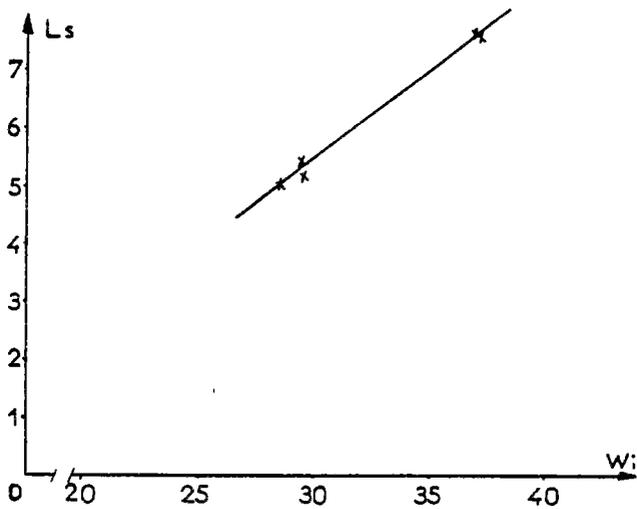
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
G3	25	52	27
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\gamma_m$	2 $\gamma_m$ / 1mm	1mm	Vb <sub>2<math>\gamma_m</math></sub> Vb <sub>1mm</sub>
14	58	24	3,36 1,96
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pen $\alpha$		
13,4	0,4		



courbe de densité sèche

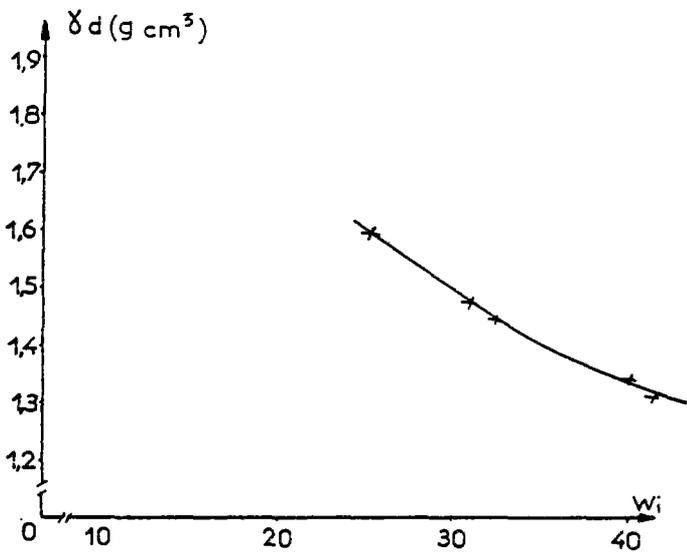
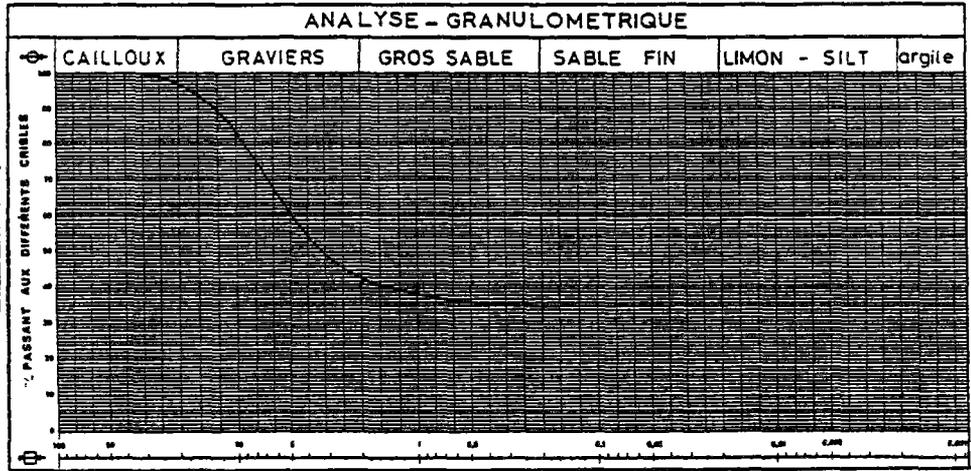


courbe de retrait

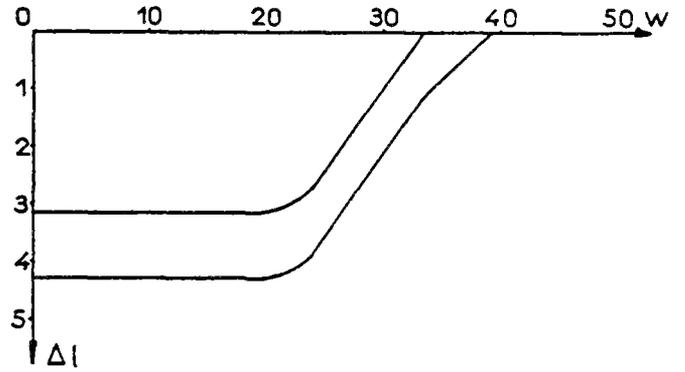


droite intrinsèque

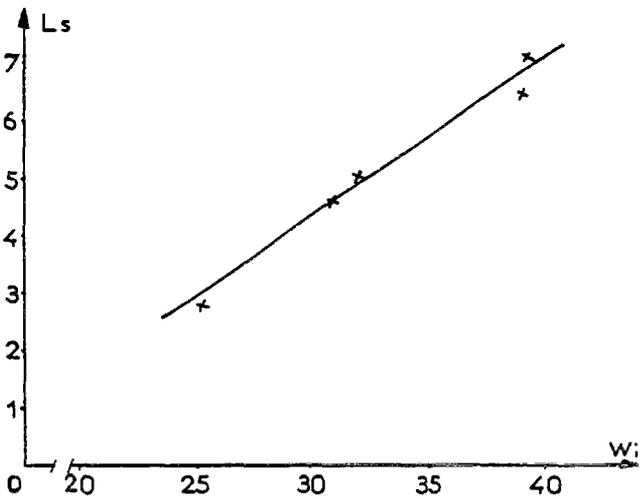
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
G5	33	73	40
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m/2mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
10	26	39	8,1 2,1
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
14	0,27		



courbe de densité sèche

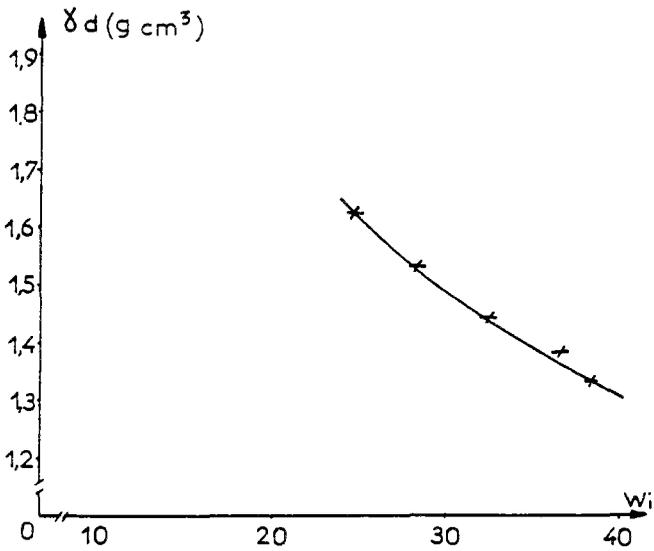
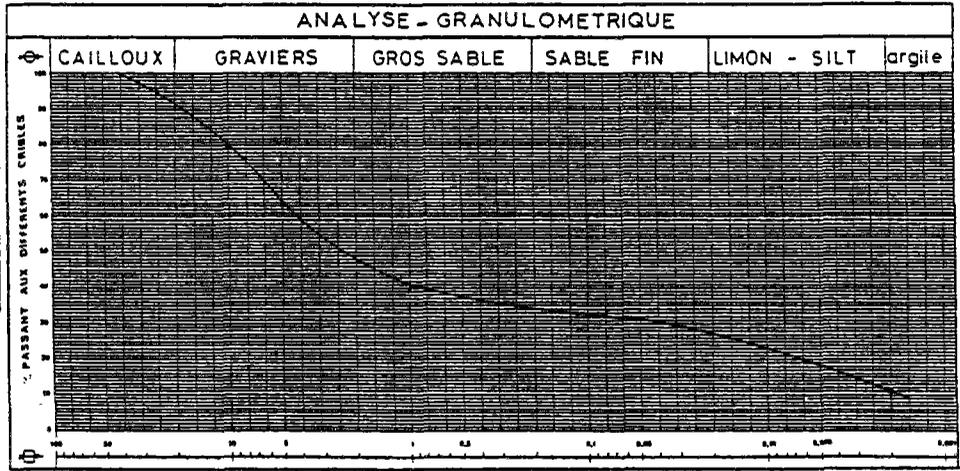


courbes de retrait

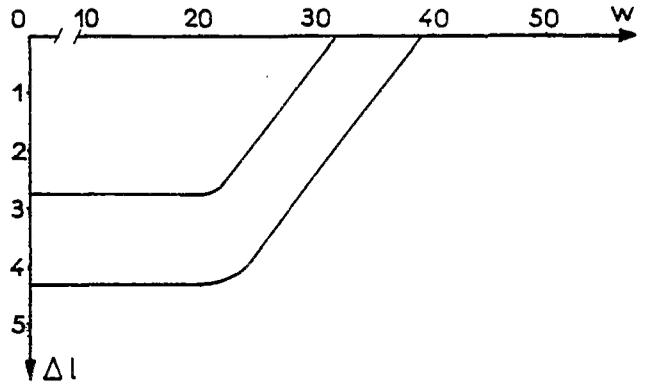


droite intrinsèque

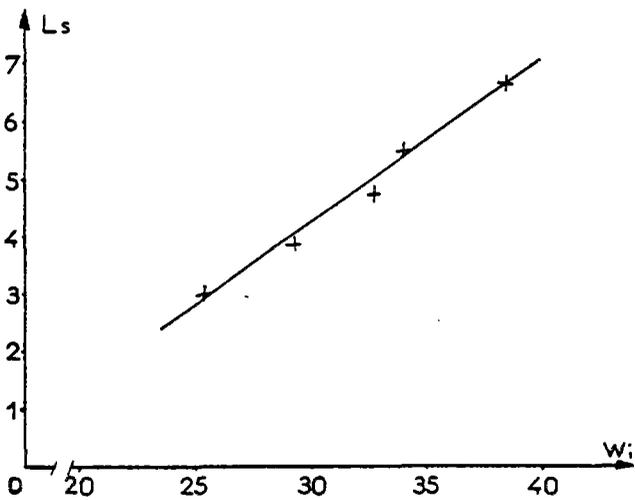
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
G6	31,2	68	36,8
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 1mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
12	30	40	5,8 1,73
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente		
18,9	0,36		



courbe de densité sèche

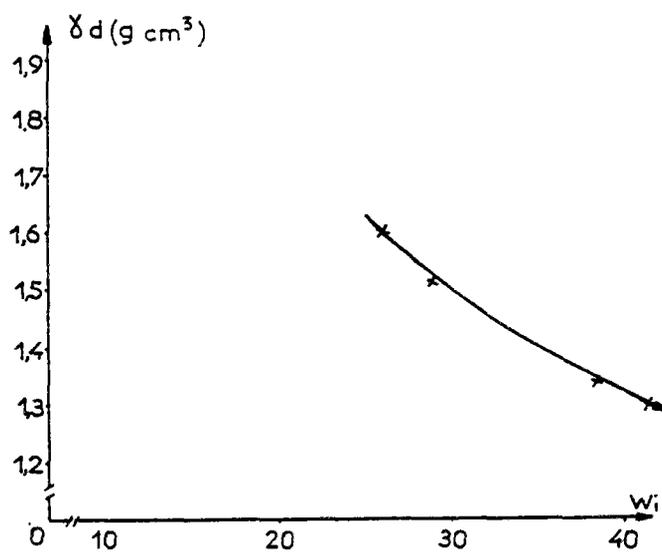
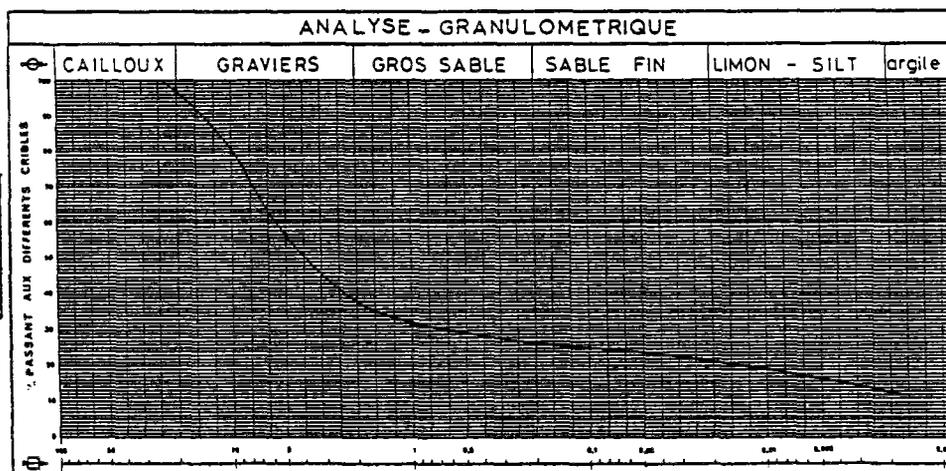


courbes de retrait

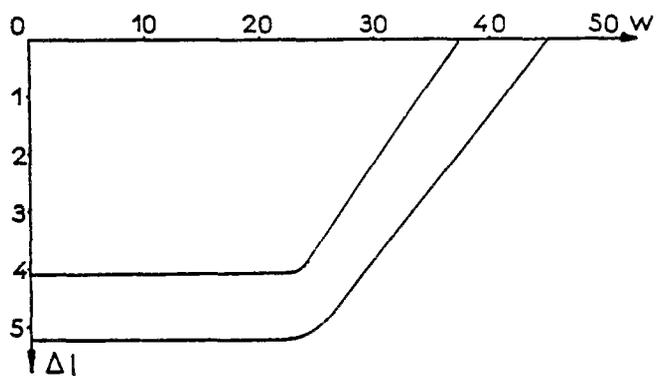


droite intrinsèque

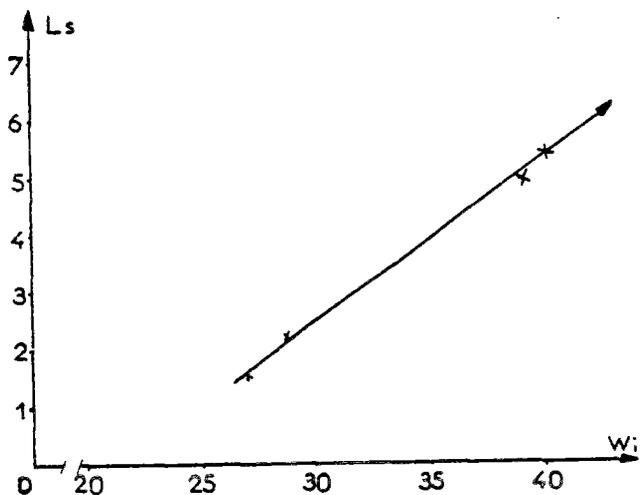
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
G7	32,7	98,4	65,7
PASSANTS à			VALEUR BLEU
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m/2mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
13	41	32	- -
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
21,4	0,36		



courbe de densité sèche

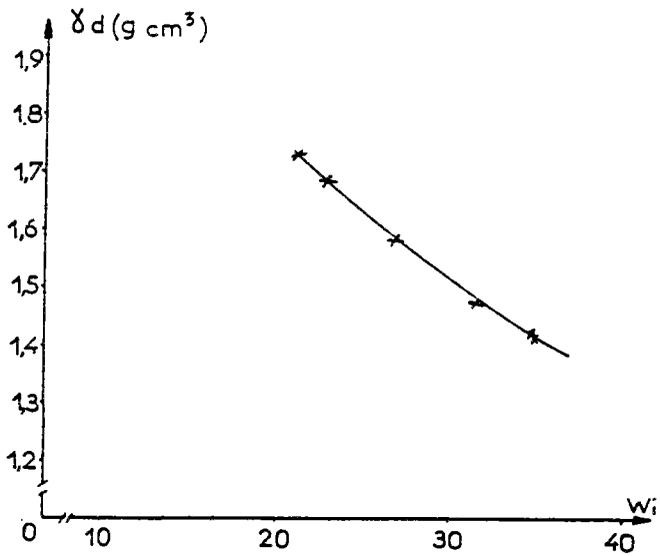
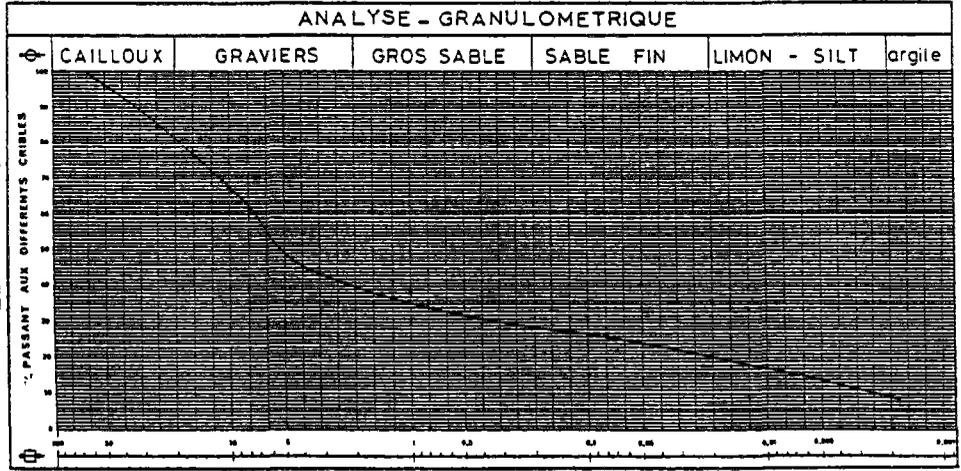


courbes de retrait

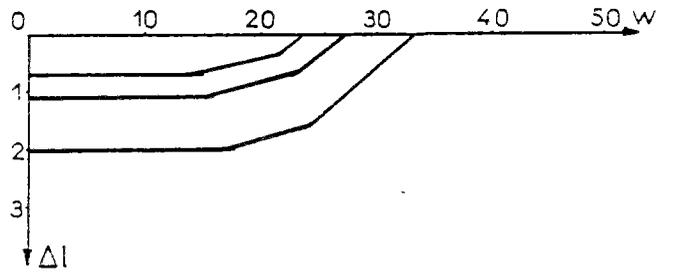


droite intrinsèque

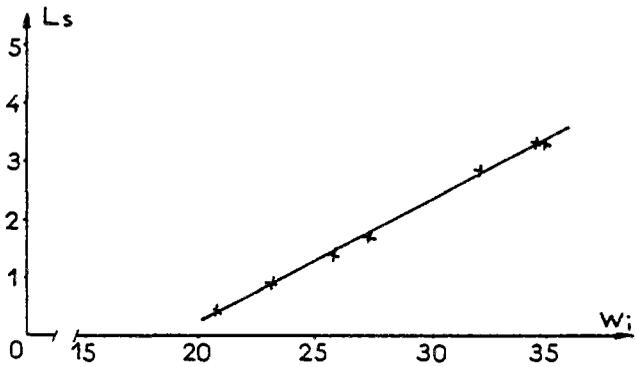
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
G8	22,8	40,1	17,3
PASSANTS à			VALEUR BLEU
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 2 $\mu$ m	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
10	26	38	2,9 0,76
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
18,8	0,2		



courbe de densité sèche

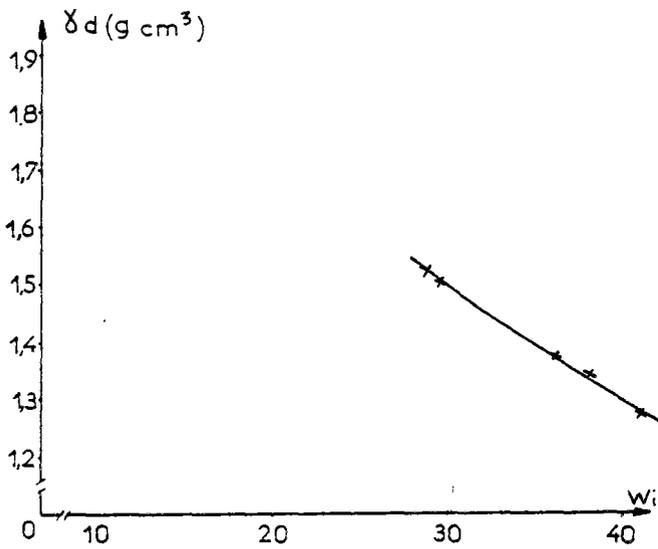
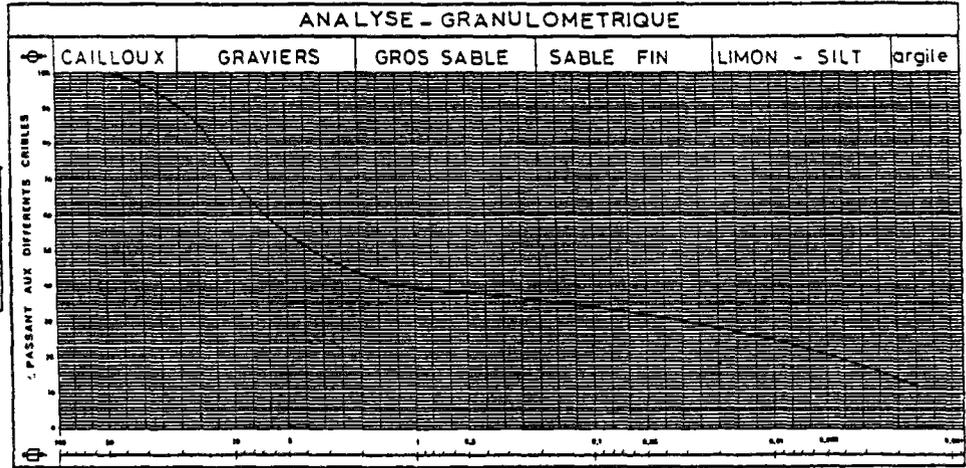


courbes de retrait

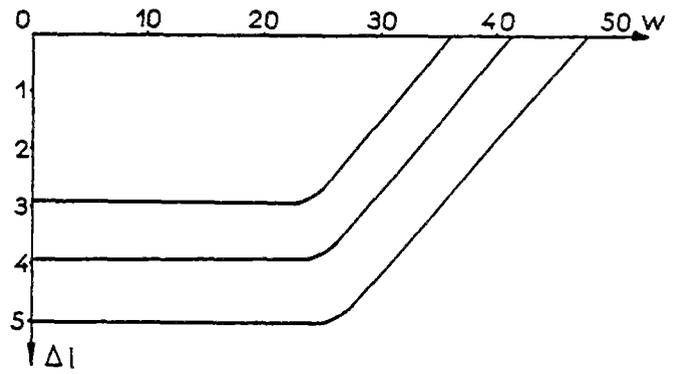


droite intrinsèque

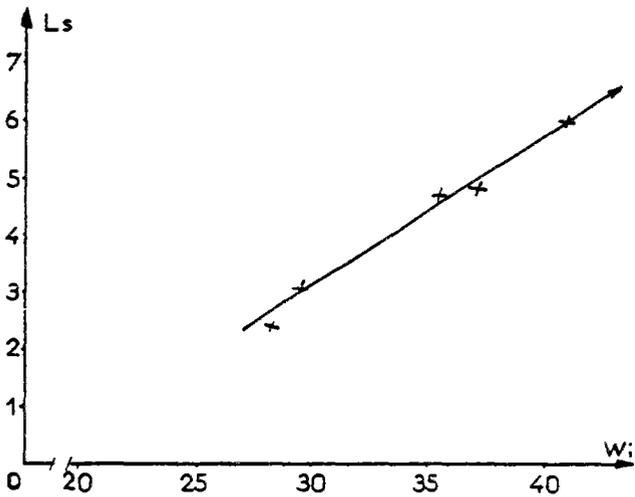
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
G9	32	68	36
PASSANTS à		VALEUR BLEU	
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m / 4mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
15	41	37	3,7 1,49
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
18	0,26		



courbe de densité sèche

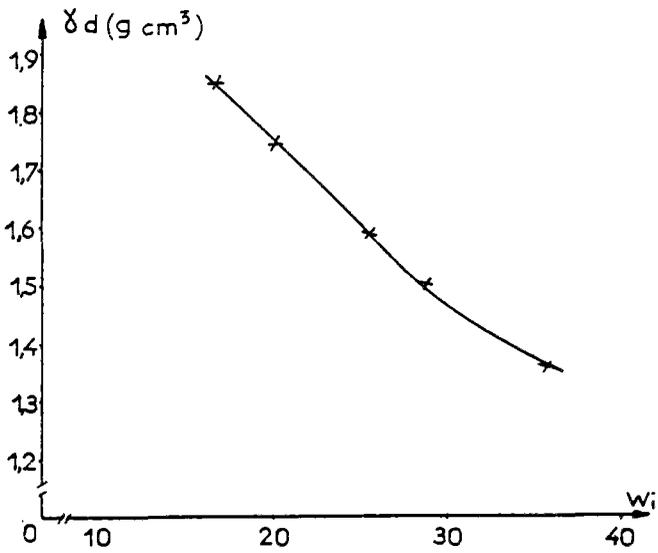
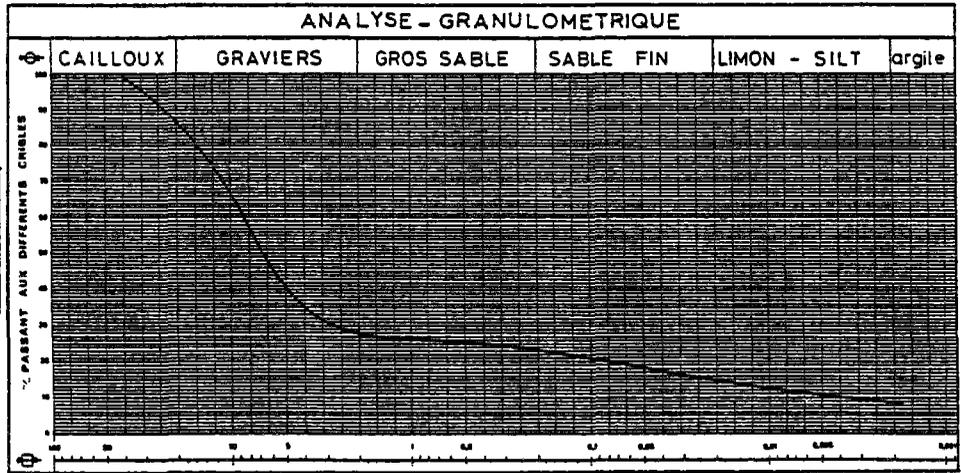


courbes de retrait

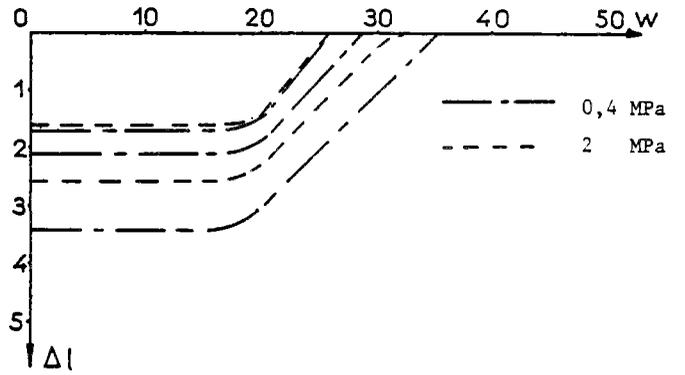


droite intrinsèque

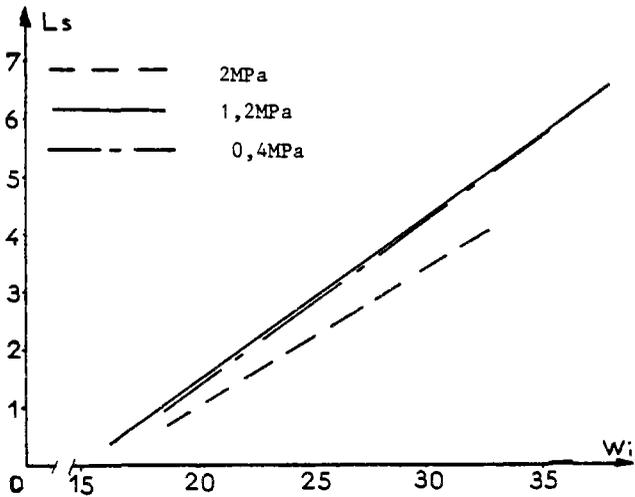
ECH	LIMITES D'ATTERBERG		
	WP	WL	IP
G10	28	47	19
PASSANTS à			VALEUR BLEU
2 $\mu$ m	2 $\mu$ m/1mm	1mm	Vb <sub>2<math>\mu</math>m</sub> Vb <sub>1mm</sub>
9	38	23	6,8 2,6
DROITE INTRINSEQUE			
WR	pente e'		
15	0,28		



courbe de densité sèche

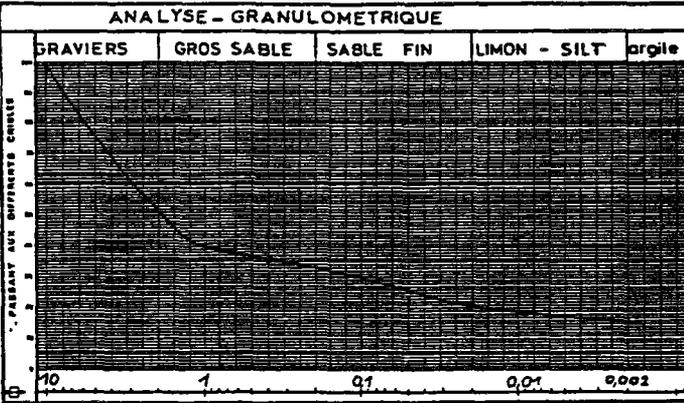


courbes de retrait

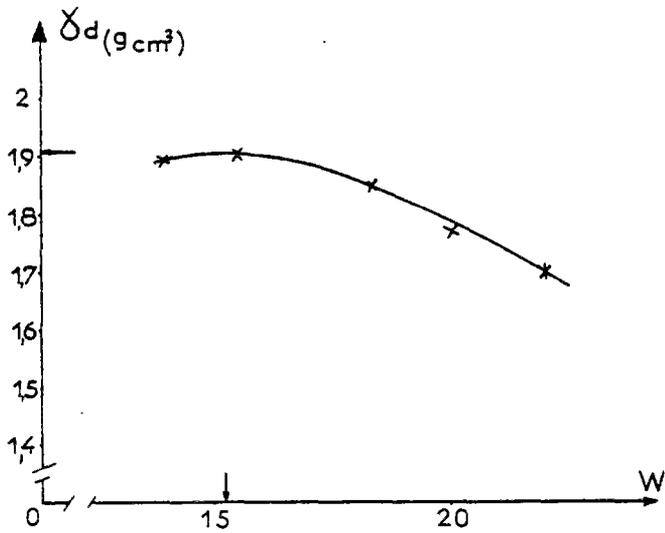
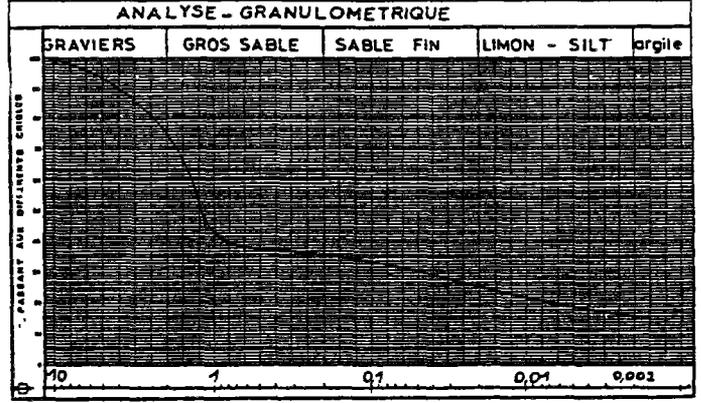


droites intrinsèques

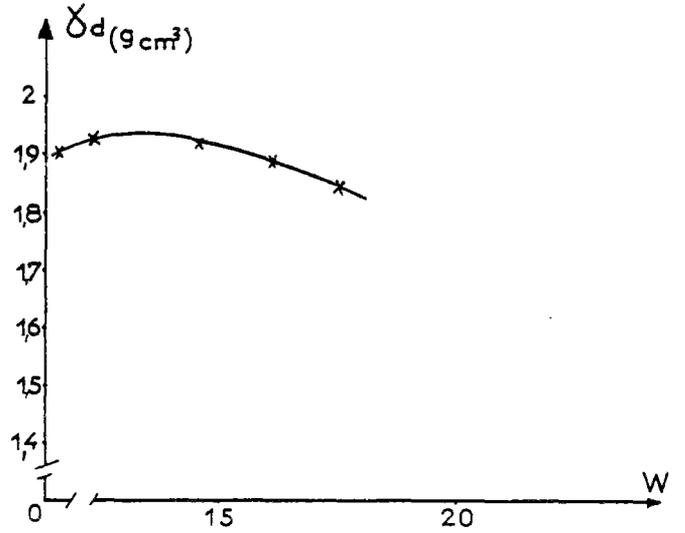
ECH	P <sub>a</sub> 1mm	w <sub>op</sub> %	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	WR%	PENTE
G10,40 b10	40%	15,1	1,9	13,9	0,16



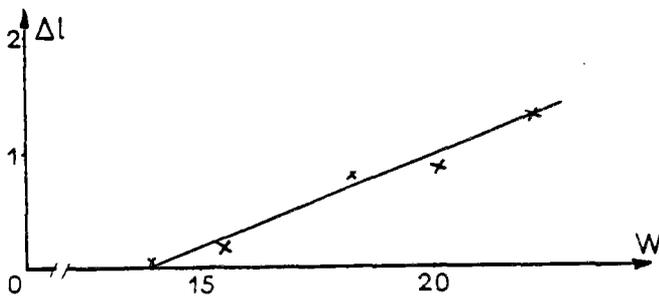
ECH	P <sub>a</sub> 1mm	w <sub>op</sub> %	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	WR%	PENTE
G10,40 m10 f	40	13,5	1,94	11,5	0,185



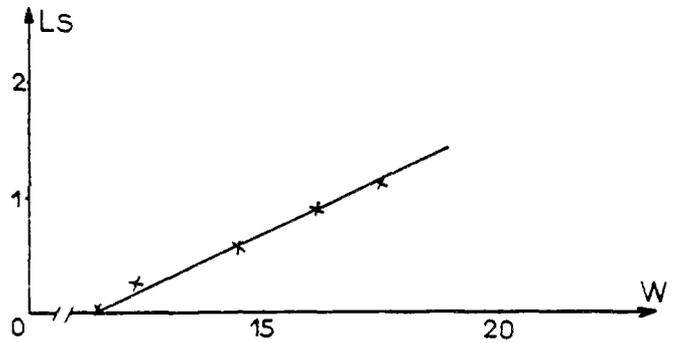
courbe de densité sèche



courbe de densité sèche



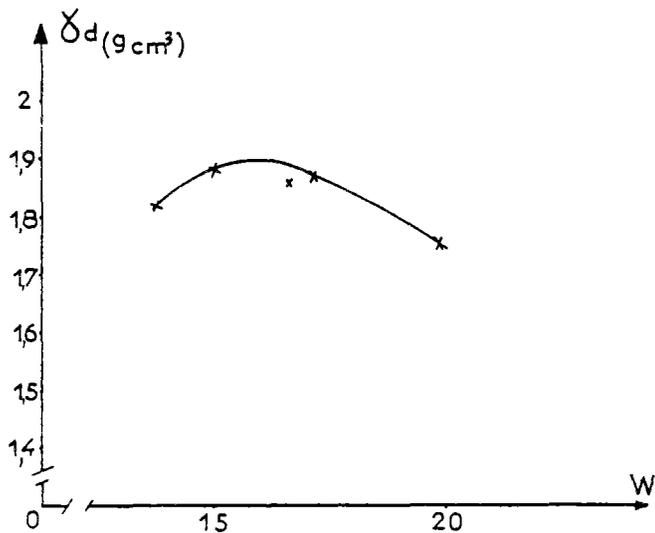
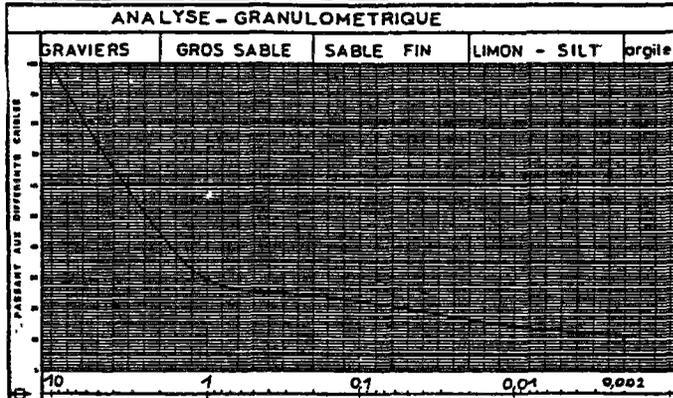
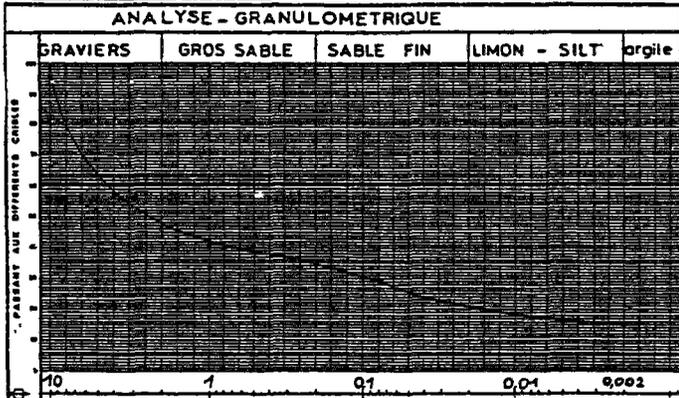
droite intrinsèque



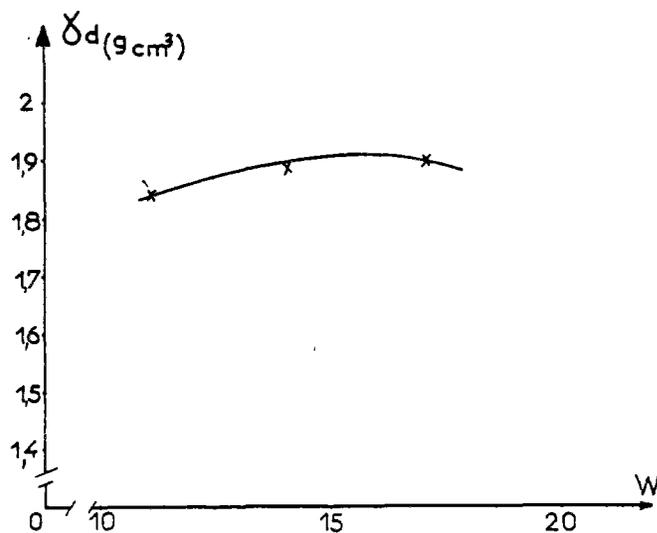
droite intrinsèque

ECH	P <sub>a</sub> 1mm	w <sub>op</sub> %	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	WR %	PENTE
G10.40 m10g	40	16	1,9	14,5	0,19

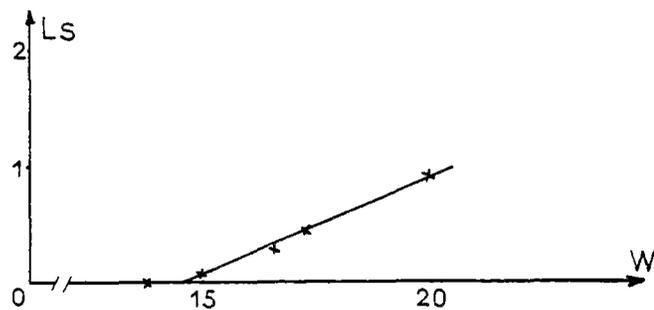
ECH	P <sub>a</sub> 1mm	w <sub>op</sub> %	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	WR %	PENTE
G10.30. b10	30	15,4	1,91	13,4	0,12



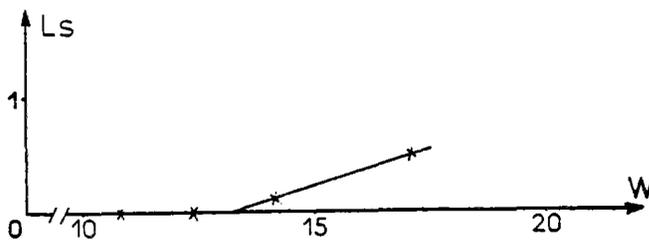
courbe de densité sèche



courbe de densité sèche

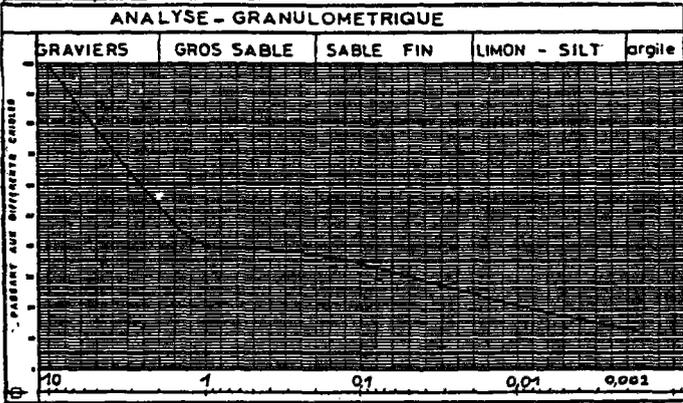


droite intrinsèque

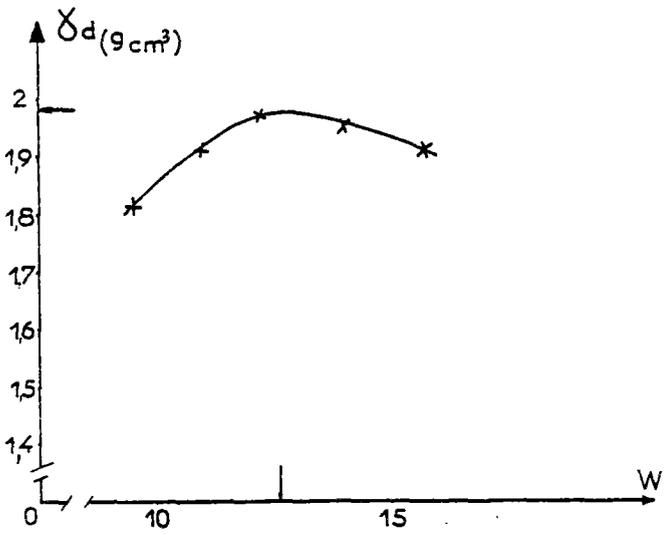
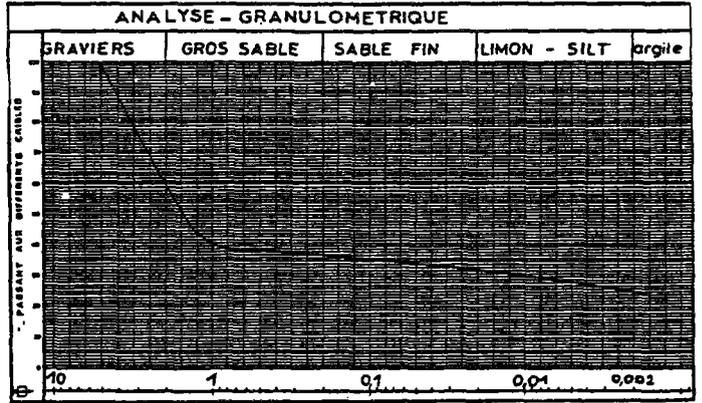


droite intrinsèque

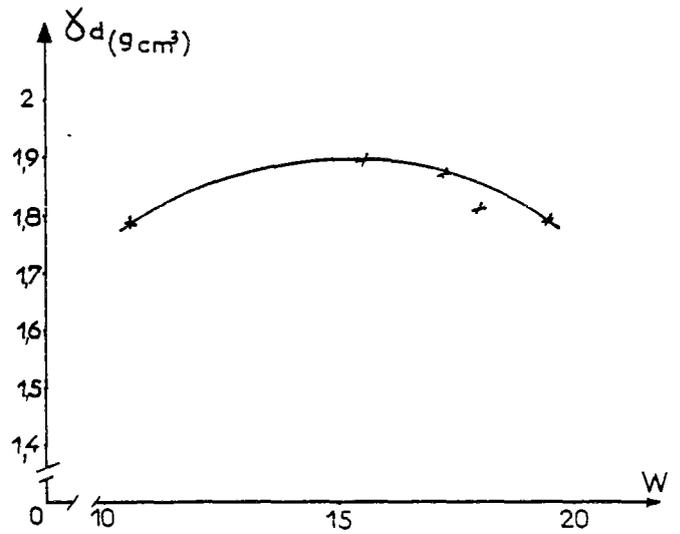
ECH	P à 1mm	w <sub>op</sub> %	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	WR %	PENTE
910-40- b10	40	12,5	1,98	10,7	0,15



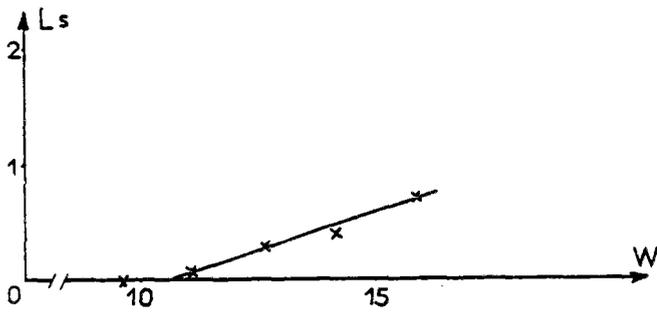
ECH	P à 1mm	w <sub>op</sub> %	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	WR %	PENTE
A4 40 b5	40	15,5	1,9	14	0,28



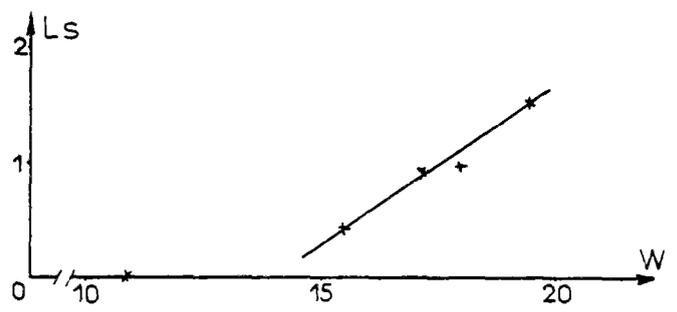
courbe de densité sèche



courbe de densité sèche

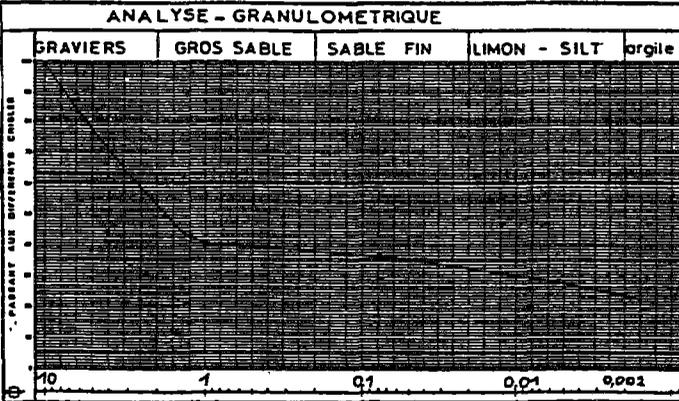


droite intrinsèque

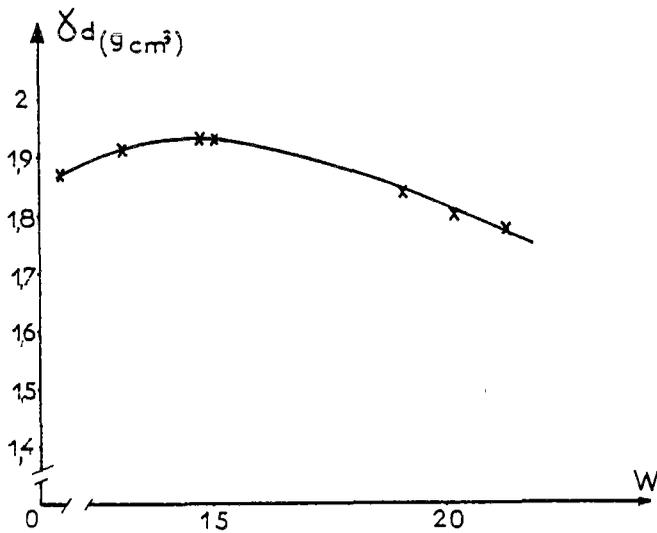
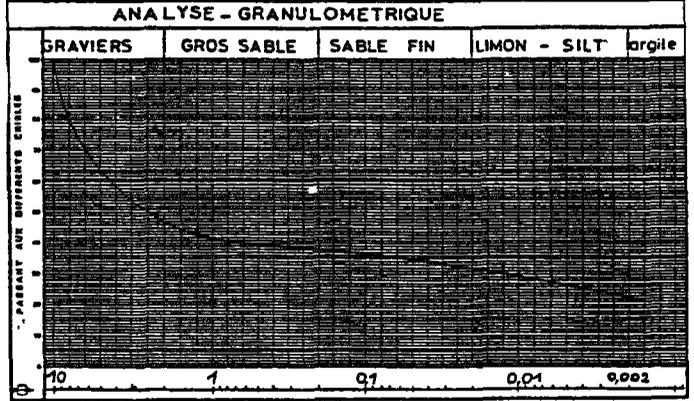


droite intrinsèque

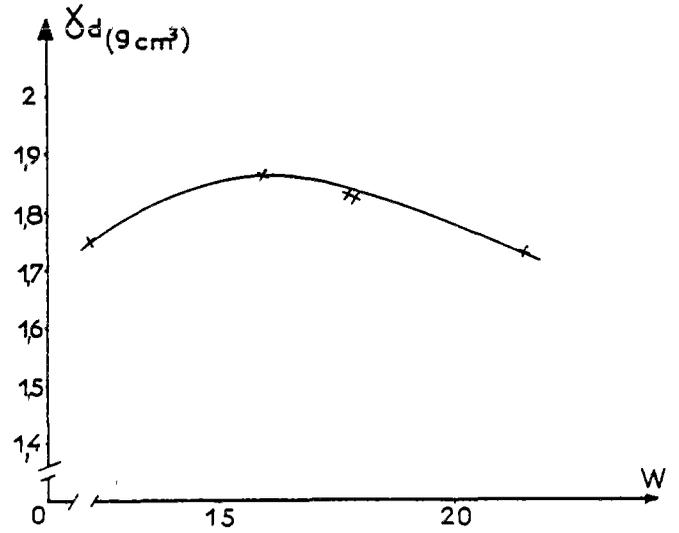
ECH	P <sub>a</sub> 1mm	w <sub>op</sub> %	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	WR%	PENTE
A4 40 b10	40	14,3	1,93	12,5	0,21



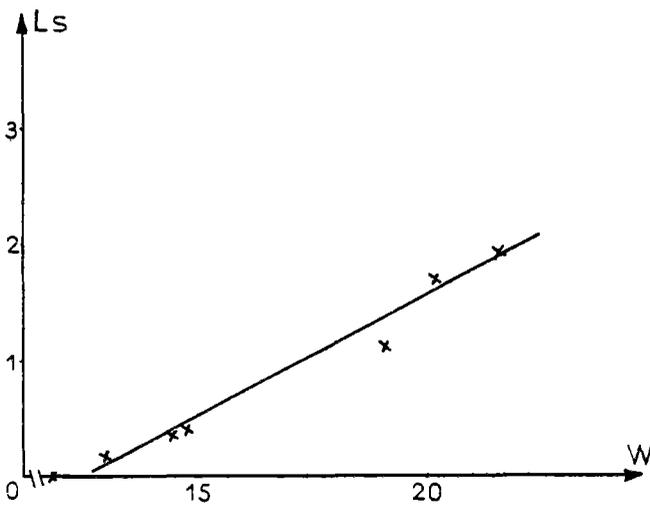
ECH	P <sub>a</sub> 1mm	w <sub>op</sub> %	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	WR%	PENTE
A4 40 m109	40	16,3	1,86	14,7	0,2



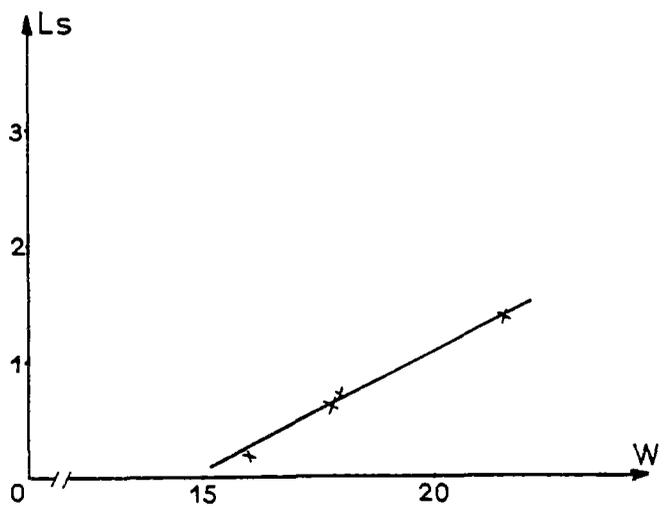
courbe de densité sèche



courbe de densité sèche

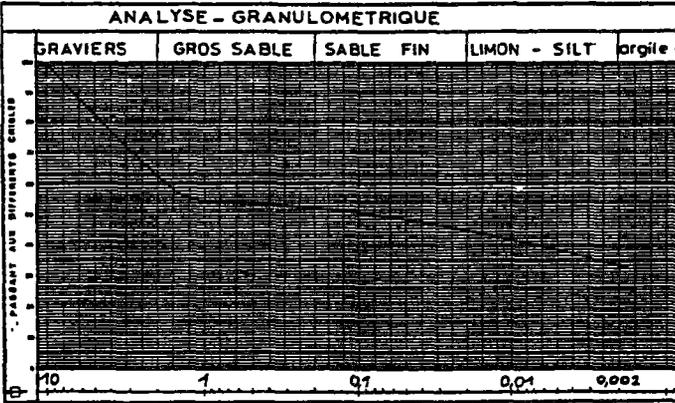


droite intrinsèque

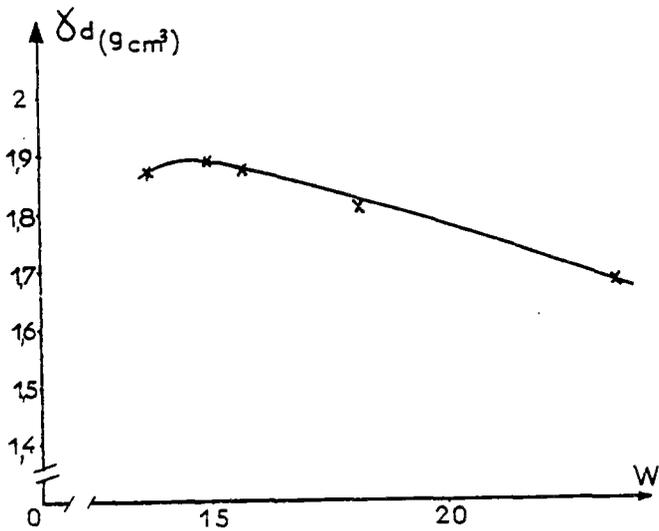


droite intrinsèque

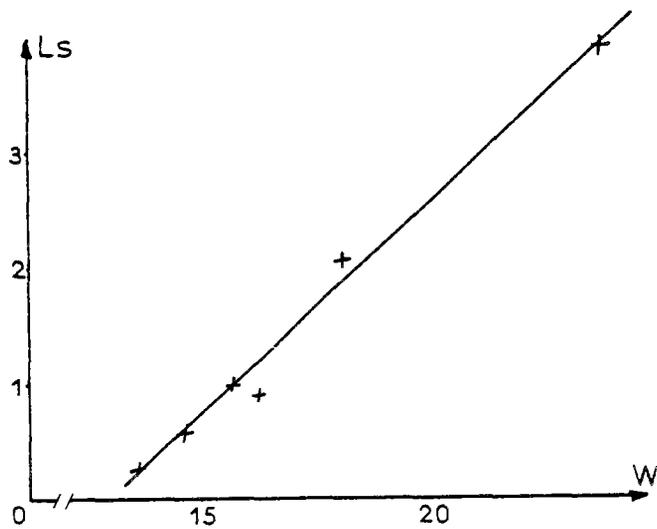
ECH	P <sub>a</sub> 1mm	w <sub>op</sub> %	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	WR %	PENTE
A4 55 b10	55	14,6	1,89	13	0,39



ECH	P <sub>a</sub> 1mm	w <sub>op</sub> %	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	WR %	PENTE
G10 40 b10	40	15,1	1,9	13,9	0,16
G10.40 m10 g	40	16	1,9	13,9	0,19
G10.40 m10 f	40	13,5	1,94	11,5	0,18
G10.30 b10	30	15,4	1,91	13,4	0,12
G10.40 b10	40	12,5	1,98	10,7	0,15
A4.40 b5	40	15,5	1,9	14	0,28
A4.40 b10	40	14,3	1,93	12,5	0,21
A4.40 m10 g	40	16,3	1,86	14,7	0,2
A4.55 b10	55	14,6	1,86	13	0,39



courbe de densité sèche



droite intrinsèque

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- P. AUTRET, 23 octobre 1980 - Contribution à l'étude des graveleux latéritiques traités au ciment - thèse E.N.P.C. Paris
- CAMBIER et PROST, 1981 - Etude des associations argile-oxyde : organisation des constituants d'un matériau ferrallitique, Agronomie 1981, 1(9) 713-722
- I.S.A. - Barelattographe - ADEMEL et LHOMARGY, 15, avenue Jean Jaurès, 94203 Ivry-sur-Seine cédex
- KIBKALO, 25 juin 1980 - Minute d'avant-projet de mode opératoire sur l'essai de succion - L.R. de Rouen
- L.C.P.C., mars 1981 - Les latérites du gabon dans le domaine routier
- M. MESSOU, 19 décembre 1980 - Comportement mécanique d'une couche de base en graveleux latéritiques améliorés au ciment - Thèse de l'E.N.P.C.
- J.A. NELSON et A.I. ANDREWS, 1959 - Rhéological properties of the clay water system under pressure - Vol. 38, n°9 1959
- R. PELTIER, 1969 - Manuel du Laboratoire routier - DUNOD 1969
- A.R. RODRIGUEZ, mai 1982 - Fissuration longitudinale des chaussées - revue française de géotechnique n° 19, P 51-60
- D. TESSIER, 1978 - Etude de l'organisation des argiles calciques évolution au cours de la dessiccation - AN AGRAM, 1978, 29 (4), 319 - 355 INRA Versailles
- D. TESSIER et J. BERRIER, avril 1979 - Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols - INRA Versailles
- D. TESSIER, G. PEDRO et L. CAMARA, 5 mai 1980 - Cycle de dessiccation et de réhumectation sur smectite et kaolinite. CR. Acad. Sc Paris t 290
- D. TESSIER, 29 septembre 1980 - Signification de la limite de retrait dans les argiles CR. Acad. Sc Paris t 291
- TOKLU - Etude des mortiers de graves traitées aux liants hydrauliques et aux liants mixtes en vue de la réduction de leur fissuration de retrait - Thèse de Docteur Ingénieur
- TRAN, 1981 - Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassement routier, Bulletin de Liaison n° 111