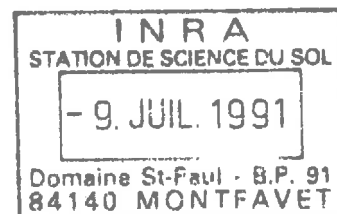


SS AVS  
TH-L7.

GF8



UNIVERSITE PARIS VII

D.E.A. de Pédologie

"ETUDE EXPERIMENTALE DES MODIFICATIONS  
DE CERTAINES CARACTERISTIQUES DE  
L'ESPACE PORAL D'UN MATERIAU SABLO-  
ARGILEUX SOUS L'EFFET DE CONTRAINTES"

D. ZIMMER

Septembre 1981

## PLAN

### I INTRODUCTION

- I - 1 OBSERVATION DE MATERIAUX NATURELS
- I - 2 ETUDE EXPERIMENTALE

### II CARACTERISATION DU MELANGE EXPERIMENTAL

- II - 2 NATURE DES CONSTITUANTS
  - II - 1-1 Le squelette
  - II - 1-2 Le plasma
- II - 2 LE MELANGE
  - II - 2-1 Fabrication
  - II - 2-2 Courbe de retrait du mélange
  - II - 2-3 Choix et préparation des états initiaux
  - II - 2-4 Caractérisation de l'espace poral du matériau :  
porosimétrie à mercure
    - II - 2-4<sub>1</sub> Généralités sur la méthode
    - II - 2-4<sub>2</sub> Résultats
      - II - 2-4<sub>21</sub> Courbe caractéristique du sable
      - II - 2-4<sub>22</sub> Courbe caractéristique de l'argile
      - II - 2-4<sub>23</sub> Courbe caractéristique du mélange

### III ANALYSE DU COMPORTEMENT AU TASSEMENT

- III - 1 MESURE DE PARAMETRES PHYSIQUES
  - III - 1-1 Tassements avec consolidation
  - III - 1-2 Tassements en non saturé
- III - 2 MODIFICATIONS DE CARACTERISTIQUES DE L'ESPACE PORAL :  
POROSIMETRIE A MERCURE
  - III - 2-1 Présentation des résultats, choix d'un intervalle  
d'étude
  - III - 2-2 Résultats
    - III - 2-2<sub>1</sub> Comparaison des volumes intrudés totaux
    - III - 2-2<sub>2</sub> Variations qualitatives
      - III - 2-2<sub>21</sub> Tassement avec consolidation
      - III - 2-2<sub>22</sub> Tassement en non saturé
    - III - 2-2<sub>3</sub> Bilan détaillé

### IV DISCUSSION

IV - 1 ORGANISATION DU MATERIAU NON TASSE

IV - 1-1 Observations des sections polies

IV - 1-2 Modélisation

IV - 2 MODIFICATIONS APORTEES PAR LE TASSEMENT

IV - 2-1 Observations des sections polies

IV - 2-2 Essai d'interprétation des modifications observées

CONCLUSION

ANNEXES

## I. INTRODUCTION.

Les tassements des sols consécutifs à des roulages peuvent affecter les propriétés physiques des sols et en particulier leur espace poral de manière plus ou moins réversible dans le temps.

Avant d'essayer de déterminer les conditions rendant possibles ces modifications, il semble important de pouvoir situer les niveaux d'organisation du sol qui ont été perturbés.

L'hypothèse qui a guidé ce travail est que les modifications les plus préjudiciables pour un sol sont celles qui changent l'arrangement des particules élémentaires (squelette-plasma) ainsi que leur distribution relative (FAURE ; FIES ; MONNIER, 1973).

Notre démarche a été double : d'une part, observer des matériaux naturels afin de montrer l'existence de telles modifications, afin également de trouver des traits propres aux sols tassés ; d'autre part, étudier un matériau expérimental où l'on peut facilement provoquer de telles modifications. Nous nous sommes limités ici à l'examen de caractéristiques de l'espace poral du matériau.

## 11. Observation de matériaux naturels.

Les deux objectifs visés étaient de repérer les niveaux d'organisation d'un sol pouvant être affectés par un roulage et de déceler des traits caractéristiques de tassement (orientations du plasma, de l'espace poral, distributions relatives squelette-plasma particulières). Trois types de sols ont été choisis qui différaient par leurs textures : sablolimoneuse à limonoargileuse, sablo-argileuse et sableuse (tableau 1).

Pour chacun d'eux, nous avons prélevé des couples d'échantillons correspondant à des situations roulées et non roulées repérables sur le terrain. Après séchage à l'étuve, des lames minces ont été faites sur ces prélèvements.

Nous nous limiterons ici à deux exemples (fig. 1 à 4) tirés de couples d'échantillons de textures limonoargileuse et sableuse.

A l'échelle de la lame mince, le premier type de matériau, de texture limonoargileuse, présente en zone non roulée une organisation à deux niveaux : arrangements des constituants du plasma et du squelette d'une part, peds d'autre part.

Cette organisation diffère en zone roulée où l'on constate un litage des éléments du squelette, alors que dans le premier cas la distribution relative du squelette et du plasma était isotrope.

On constate de plus une perte de pédalité dans le sol roulé qui se manifeste par une très forte réduction du nombre de vides fissuraux.

Il n'est pas possible d'affirmer que ces différences ont été causées par le roulage, au vu de cette seule lame mince. Néanmoins, nous avons observé des modifications qualitatives de la distribution squelette-plasma. Nous avons également été rendus attentifs au fait que le roulage n'induisait pas uniquement un tassement, pris au sens d'une diminution de porosité.

Dans ce matériau, deux niveaux d'organisation au moins ont été affectés. La perte de pédalité est ici d'autant plus significative que dans un matériau de cette texture, quelques cycles humectation-dessiccation suffisent à induire une fissuration (MONNIER et al., 1973).

Le deuxième type de sol (fig. 3 et 4), de texture sableuse, ne présente à l'échelle d'observation qu'un seul niveau d'organisation : l'assemblage de grains du squelette reliés par des ponts d'argile. Aucune différence qualitative n'est décelable entre les deux situations roulée et non roulée dans ce matériau.

SOLOGNE  
appréciation tactile

COULON		MILLE	
	%		%
A	22,8	A	21,6
LF	25,8	LF	15,1
LG	11,1	LG	9,3
SF	14,6	SF	28,3
SG	25,7	SG	25,7
Ca.tot.	1,6	Ca.tot.	26,6

D'après triangle des textures :

COULON : sablo-limoneux à limonoargileux

MILLE : sablo-argileux

SOLOGNE : sableux

Tableau 1 : Granulométrie des sols observés.

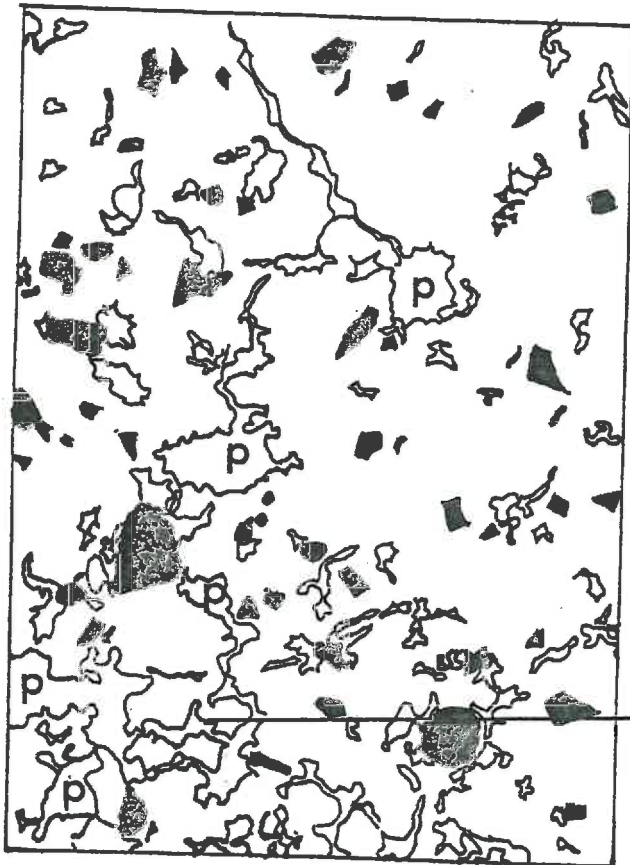


fig.1 ORGANISATION D'UN SOL DE TEXTURE LIMONOARGILEUSE NON ROULE

 pores  
 squelette

zone à pédalité marquée

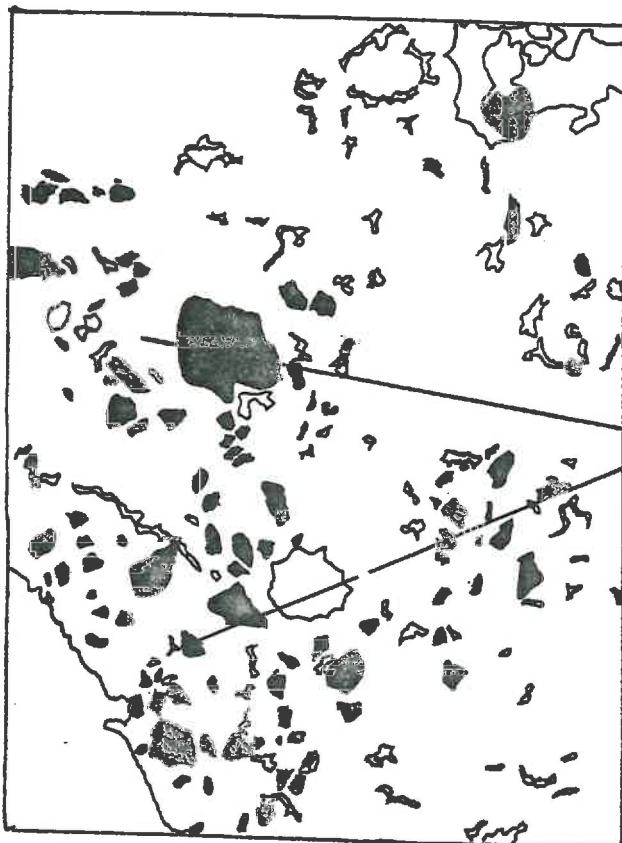


fig.2 ORGANISATION DU MEME SOL , ROULE

litage des grains de squelette



 pores  
 squelette

fig.3 situation non roulée

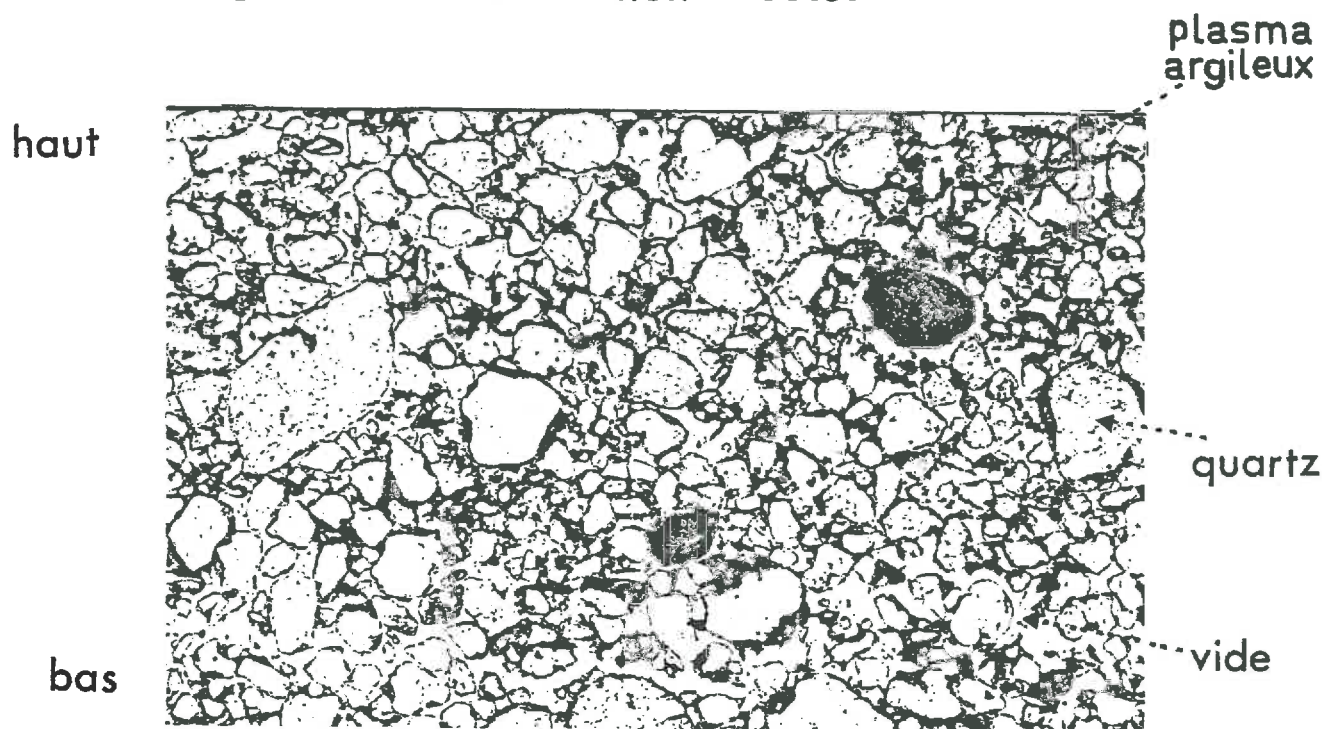
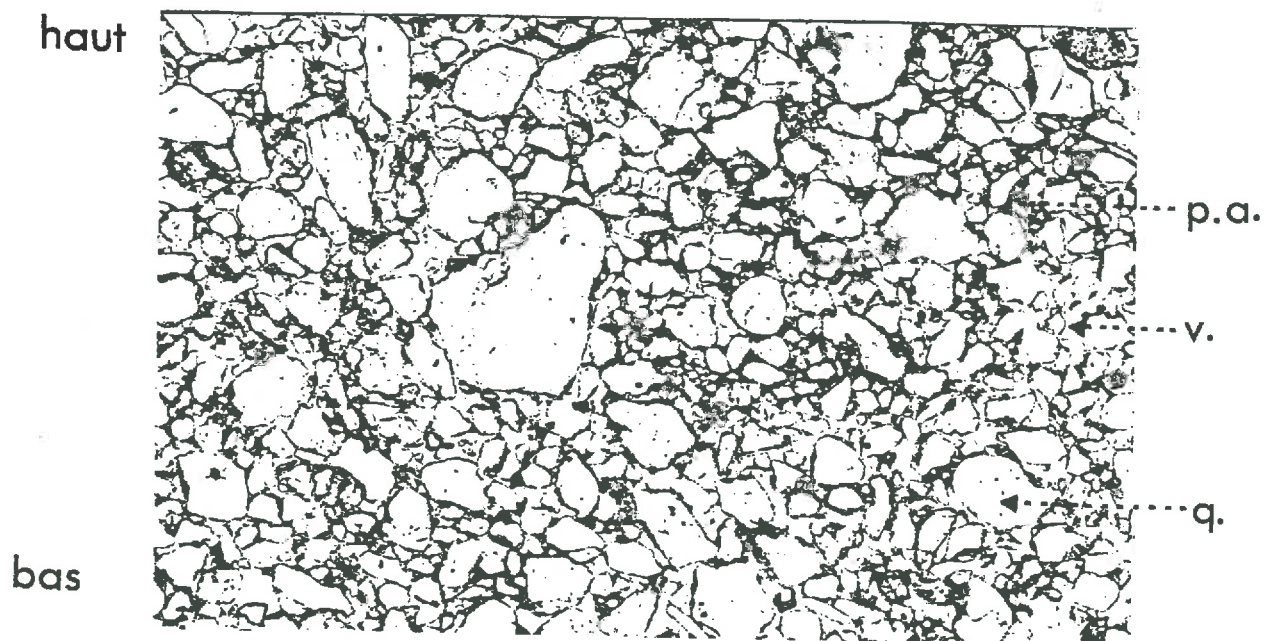


fig.4 situation roulée

2 mm





On peut avancer plusieurs hypothèses pour expliquer cela : soit l'échelle d'observation est inadaptée, car le niveau d'organisation affecté par le roulage n'est pas représenté sur la lame mince ; ou alors les roulages induisent des modifications qui ne seraient appréciables qu'au niveau quantitatif. Enfin, il est possible que le matériau non roulé ait conservé des traces d'anciennes contraintes.

Deux catégories de sols ont donc été observées :

- D'une part, des matériaux de texture relativement fine, sur lesquels des différences qualitatives ont été répertoriées. Pour ces types de sols, il sera difficile de déterminer dans quelles conditions et avec quelle gravité un niveau d'organisation sera affecté.

- D'autre part, des matériaux de texture grossière qui n'ont pas paru être modifiés qualitativement par le roulage.

Tirer des conclusions sur le tassement à partir de l'examen de ces lames minces se heurte à des difficultés dues tout d'abord à l'absence de contrôle du tassement et de l'histoire subie ensuite par les matériaux, dues également à la technique utilisée (perturbations induites par la dessiccation, représentativité de la lame mince vis-à-vis de tous les niveaux d'organisation).

## 12. Etude expérimentale

C'est en tenant compte de ces difficultés que nous avons procédé à une étude expérimentale des modifications apportées par un compactage à l'oedomètre, à l'assemblage squelette-plasma d'un matériau artificiel sablo-argileux.

Pour cela nous avons travaillé à plusieurs niveaux:

- au niveau global, nous avons mesuré des variations de volume et de teneur en eau massiques lors de tassements d'échantillons saturés (consolidation) et de tassements conduits dans le domaine non saturé.

- au niveau de l'espace poral que nous avons caractérisé par des courbes d'intrusion de mercure et que nous avons essayé de décrire grâce à des observations de sections polies.

Nous avons choisi pour cela un mélange de deux constituants bien typés, un squelette de sable quasiisodimensionnel de dimension suffisante pour être vu au microscope et un plasma constitué d'une argile granulométrique, contenant surtout des phyllites et présentant un retrait marqué à la dessiccation. Compte-tenu des données obtenus sur la sensibilité au tassement des sols selon leur granulométrie (FAURE, FIES, 1972), c'est un mélange à 15 % d'argile qui a été choisi.

## II - CARACTERISATION DU MELANGE EXPERIMENTAL.

Les méthodes utilisées font l'objet d'une présentation en annexe, notamment en ce qui concerne la porosimétrie à mercure et les mesures de volume massique d'échantillons sableux.

### II-1. NATURE DES CONSTITUANTS.

#### II-1.1. Le squelette.

C'est du sable de Flassan, composé quasi exclusivement de particules anguleuses et irrégulières de quartz, que nous avons tamisé dans la gamme de taille 200-250  $\mu\text{m}$ . La masse volumique de solide en a été mesurée au pycnomètre à air (tableau 2).

#### II-1.2. Le plasma.

C'est la fraction 0-2  $\mu\text{m}$  d'un sol argileux (Vignières), séparée par sédimentation, saturée en calcium puis recueillie par centrifugation. Elle contient principalement de la montmorillonite et de la chlorite, peu de kaolinite et d'illite. Sa CEC est de 47,6 meq/100 g.

Son volume massique à sec est de 0,484 et sa teneur en eau au point d'entrée d'air est comprise entre 15 et 20 % (PINOCHET, 1981).

Sa masse volumique de solide a été mesurée au pycnomètre à eau (tableau 2).

### II-2. LE MELANGE.

#### II-2.1. Fabrication.

Après détermination de l'humidité de l'argile (170 à 200 %), nous avons procédé à un malaxage à la main des constituants dans les proportions choisies.

Sa masse volumique de solide a été calculée à partir des masses volumiques du sable et de l'argile. Elle est de 2,673 (tableau 2).

	Masse volumique $\rho$	Répétitions	Volume massique
Sable de Flassan	$\rho_s$ 2,651	5	$1/\rho_s$ 0,3772
Argile des Vignières	$\rho_a$ 2,800	5	$1/\rho_a$ 0,3571
Mélange $\rho_m = \frac{\rho_s \cdot \rho_a}{0,15 \cdot \rho + 0,85 \rho_a}$	$\rho_m$ 2,673	--	$1/\rho_m$ 0,3741

Tableau 2 : Masses volumiques du mélange et de ses constituants.

## II-2.2. Courbe de retrait du mélange.

C'est une caractérisation du processus de dessiccation du mélange, décrivant ses variations de volume massique lors du départ d'eau. Dans le cadre de ce travail, son utilité était de déterminer la teneur en eau  $W_{AE}$  au point d'entrée d'air.

Par rapport à la typologie des courbes de retrait étudiées par P. STENGEL (1981), la courbe de retrait du mélange devait être une bidroite, le volume massique de l'échantillon restant constant pour des valeurs de teneur en eau inférieures à  $W_{AE}$ .

Le détail des modes opératoires propres à la mesure du volume massique et à la dessiccation des échantillons figure en annexe. Précisons néanmoins que deux voies de dessiccation ont été suivies, l'une par équilibres à différents potentiels, l'autre par mise en présence avec du sel de silice (fig. 5).

Le problème de définition du point d'entrée d'air est simple a priori : la courbe de saturation étant définie par l'équation  $\frac{1}{\rho_d} = \frac{1}{\rho_s} + 0,01 W\%$  ( $\frac{1}{\rho_s}$  et  $\frac{1}{\rho_d}$  respectivement volumes massiques de solide et apparent), il suffit de montrer la constance du volume massique en dessous d'une certaine teneur en eau pour définir  $W_{AE}$ .

Sur les échantillons desséchés en présence de gel de silice, nous avons constaté un comportement de type bidroite avec cependant une tendance des valeurs du volume massique à diminuer aux très faibles teneurs en eau.

Nous avons réalisé une première estimation de  $W_{AE}$  en prenant en compte tous les points expérimentaux (tableau 3) ne se situant pas en domaine saturé ( $W \leq 23\%$ ). La valeur obtenue se situe dans l'intervalle 25, 26,7 %. Par ailleurs, compte tenu du fait qu'une diminution se manifeste aux teneurs en eau voisines du point d'entrée d'air de l'argile (P. STENGEL, 1981), qui correspondent dans le mélange à des teneurs comprises entre 2,25 et 4,5 %, nous avons réalisé une seconde estimation de  $W_{AE}$  en ne tenant compte cette fois-ci que des valeurs de volume massique aux teneurs en eau supérieures à 4,5 %. Pour ces valeurs, le volume massique est indépendant de la teneur en eau ( $r^2 = 0,003$  contre 0,25 dans le premier cas).

Ceci nous a conduit à faire une deuxième estimation de  $W_{AE}$  qui se situe dans l'intervalle 25,5 - 27 % (tableau 3).

Les valeurs obtenues pour des échantillons amenés à différents équilibres de potentiel ont donné les mêmes résultats, notamment en ce qui concerne le retrait aux teneurs en eau très faibles. Pour déterminer le point d'entrée d'air sur ce type de matériau, il vaut donc mieux se placer à des teneurs en eau supérieures à celle du point d'entrée d'air



Tableau 3

ESTIMATION DU POINT D'ENTREE D'AIR DU MELANGE

1/  $0 < W < 23 \%$

$n = 75$

$r^2 = 0,2485$

ordonnée à l'origine : 0,627

pente de la droite  $6.10^{-4}$

volume massique moyen :  $\rho = 0,633$

écart type : 0,0088

$0,624 < \rho < 0,641$

$24,96 < W_{AE} < 26,72$

2/  $5 < W < 23 \%$

$n = 50$

$r^2 = 0,003$

ordonnée en 0 : 0,638

pente de la droite :  $- 1.10^{-4}$

volume massique moyen :  $\rho = 0,636$

écart type : 0,0074

$0,629 < \rho < 0,644$

$25,49 < W_{AE} < 26,97$

$0 < W < 5\%$

$n = 25$

$r^2 = 0,2195$

ordonnée à l'origine : 0,627

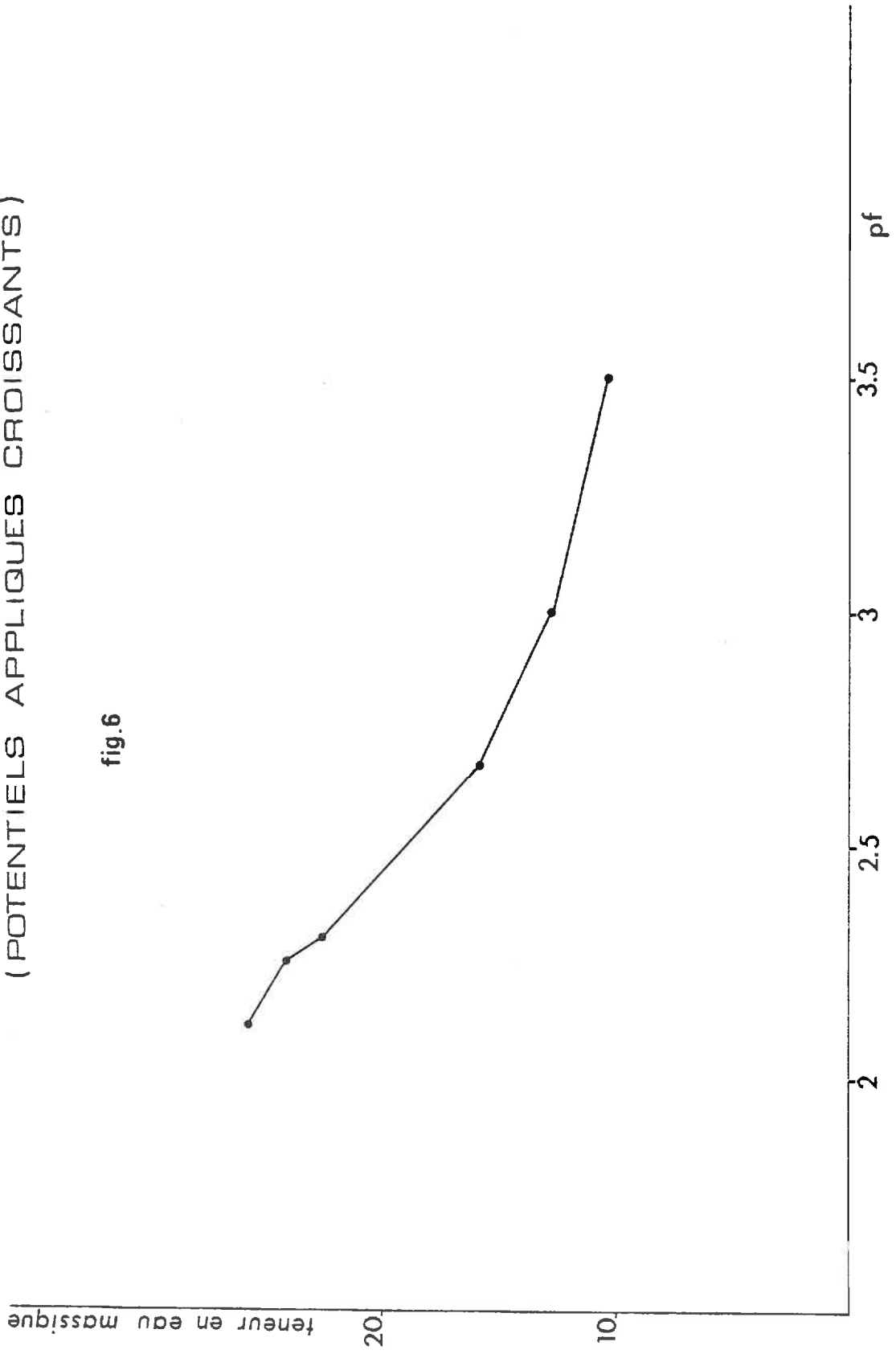
pente de la droite :  $- 2.10^{-3}$

volume massique moyen : 0,625

écart type : 0,0059

COURBE CARACTERISTIQUE pf vs TENEUR EN EAU MASSIQUE DU MELANGE  
(POTENTIELS APPLIQUES CROISSANTS)

fig.6



### II-2.3. Choix et préparation des états initiaux.

Nous avons réalisé deux types de tassements. L'un à partir du point d'entrée d'air : il s'agit alors d'un tassement par consolidation, dû à un départ d'eau de la phase argileuse. L'autre sur des échantillons présentant des lacunes liées au retrait de la phase argileuse, alors que le volume massique ne diminue plus.

Une courbe humidité pF (fig. 6) nous a permis de choisir deux valeurs de potentiels auxquelles ont été portés les échantillons avant, soit :

- pF 2,11, la teneur en eau massique moyenne des échantillons est alors de 25,80 % (écart type de 0,70),
- pF 3 , la teneur en eau massique moyenne est de 15,32 % (écart type 0,61).

Les détails des manipulations figurent en annexe, mais il faut néanmoins signaler que des précautions ont été prises lors de la réalisation des échantillons pour que leur porosité ne résulte que de l'assemblage des grains (absence de bulles et de fissures dues au retrait).

### II-2.4. Caractérisation de l'espace poral du matériau : porosimétrie à mercure.

#### II-2.4.1. Généralités sur la méthode.

Par cette méthode, exposée plus en détail en annexe, on mesure des volumes de mercure contenus dans un échantillon à une pression donnée. Cette pression est transformée en diamètre équivalent par la loi de JURIN-LAPLACE.

Plusieurs points méritent d'être soulignés, qui expliquent les difficultés d'interprétation des résultats :

\* les échantillons traités doivent être au préalable séchés à l'étuve à 105°C. Différentes techniques ont été proposées pour dessécher des échantillons sans modifier leur organisation (congélation, dessèchement par passage au point critique). Aucune conclusion certaine n'en a encore été tirée ; aussi avons-nous choisi de dessécher nos échantillons en suivant une histoire hydrique standard, à savoir 12h de séchage à l'air, puis 24h à l'étuve à 105°C.

\* les mesures de volume de mercure contenu dans l'échantillon peuvent avoir lieu lors de l'intrusion ou de l'extrusion du mercure suivant que l'on applique des pressions respectivement croissantes et décroissantes. Deux types de résultats peuvent être obtenus, qui concernent des caractéristiques différentes de l'espace poral. Ce sont les constrictions de cet espace poral qui règlent l'intrusion ; ainsi une



quantité de mercure intrudée pour un diamètre équivalent donné, peut l'être dans des lacunes de diamètre équivalent supérieur. Par contre, pour l'extrusion du mercure, on peut penser que le diamètre maximal des pores est plus déterminant.

Nous avons choisi dans un premier temps de nous limiter au seul protocole d'intrusion.

\* les mesures ne fournissent que des diamètres équivalents d'intrusion. En effet, peu de données existent sur les valeurs précises prises par la tension superficielle ou par l'angle de raccordement du mercure dans les matériaux. Ayant travaillé avec les mêmes constituants, nos différentes mesures sont comparatives.

#### II-2.4.2. Résultats (tableau 4, fig. 7).

Les valeurs d'intrusion mesurées concernent des diamètres équivalents variant entre 400  $\mu\text{m}$  et 0,006  $\mu\text{m}$ , ces valeurs étant imposées par le porosimètre. La réalisation des courbes d'intrusion a posé quelques problèmes : d'une part les équilibres étaient très longs à s'établir dans les zones de forte intrusion, d'autre part une montée trop rapide de la pression dans les zones de faible intrusion provoquait un échauffement du mercure et faussait les mesures.

##### II-2.4.2.1. Courbe caractéristique du sable.

Les mesures faites montrent que la quasi-totalité du mercure est intrudée pour des valeurs de pression correspondant à des diamètres équivalents situés de part et d'autre d'une valeur modale comprise entre 50 et 60  $\mu\text{m}$ . Le calcul de la pente, dont nous présentons le principe au Chapitre III, précise l'existence d'une zone d'intrusion très peu marquée, pour des diamètres compris entre 10 et 8  $\mu\text{m}$ . La valeur totale intrudée est de 31,22  $\text{cm}^3/100 \text{ g}$ , ce qui correspond à une porosité de 45,5 %. L'absence d'intrusion au delà d'un diamètre de 6  $\mu\text{m}$  laisse penser que l'ensemble des pores du matériau sableux a été rempli de mercure. Le principal apport de cette courbe est de montrer que dans un squelette de type isodimensionnel la répartition des diamètres d'intrusion du mercure est quasiunimodale.

##### II-2.4.2.2. Courbe caractéristique de l'argile.

Le matériau argileux a été desséché dans les mêmes conditions que celles indiquées pour les mélanges et des fragments de taille de l'ordre du  $\text{cm}^3$  traités au porosimètre. Les diamètres d'intrusion du mercure sont ici essentiellement situés dans la gamme 0,03  $\mu\text{m}$ -0,006  $\mu\text{m}$  (86 % du mercure intrudé total).

CARACTERISATION PAR POROSIMETRIE A MERCURE  
DU MATERIAU AVANT TASSEMENT

fig.7

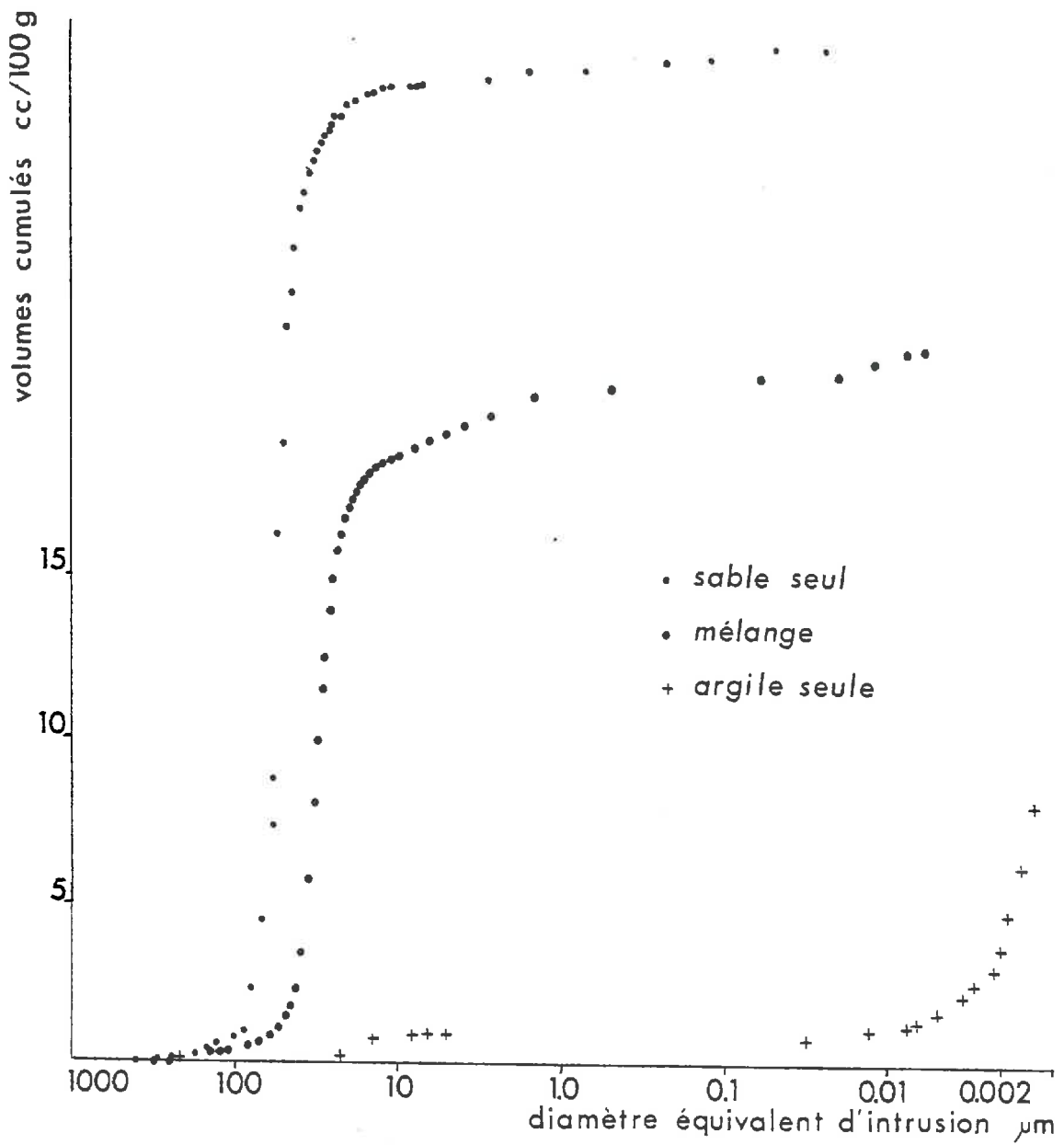


Tableau 4 :

VOLUMES DE MERCURE INTRUDES DANS LE MELANGE, DANS LE SABLE ET DANS L'ARGILE SEULS.

		VOLUMES INTRUDES				cc/100 g.	
	Totaux	gamme de diamètres d'intrusion % du		%	gamme		
		400 - 10 µm	total		10 - 0,02 µm	0,02 - 0,006 µm %	
Mélange	22	19,06	86,5	9,5	2,09	0,84	3,8
Sable seul	31,22	29,94	95,9	4,1	1,28	0	0
Argile seule	6,97	0,78	11,2	8,0	0,55	5,63	80,8
Argile à 15 %	1,05	0,12	-	-	0,08	0,84	-

Tableau 5 :

VARIABILITE DES VALEURS D'INTRUSION DE MERCURE SUR ECHANTILLONS  
NON COMPACTES.

Echantillons	INTRUSION $\text{cm}^3/100 \text{ g.}$						
	Totale	200 - 60 $\mu\text{m}$	60 - 25 $\mu\text{m}$	25 - 15	10 - 3	3 - 0,02	0,02-0,06
1 *	21,93	0,76	13,71	2,98	1,64	1,14	0,82
1'	-	0,94	13,63	3,33	-	-	-
2	22,04	0,78	13,65	3,71	0,96	1,28	0,75
2'	-	0,95	14,53	3,36	-	-	-

\* 1 et 1' (resp. 2 et 2') sont deux échantillons provenant d'un même cylindre (cf annexe préparation des échantillons).

Pour obtenir une courbe d'intrusion complète, il est nécessaire d'effectuer deux mesures (cf annexe porosimétrie).

D'autre part, la porosité de la phase argileuse sèche étant de 26,21 % le taux d'occupation de l'espace poral par le mercure en fin d'intrusion a été de 53 %.

#### II-2.4.2.3. Courbe caractéristique du mélange.

A quelques modifications près, c'est la composée des deux courbes précédentes ; elle comprend trois zones d'intrusion :

- entre 400  $\mu\text{m}$  et 10  $\mu\text{m}$ , 86,5 % du mercure est intrudé et ce de part et d'autre d'une valeur modale de 30  $\mu\text{m}$  (cf. tableau 4).
- entre 6 et 1  $\mu\text{m}$ , on intrude 6,5 % du mercure total.
- entre 0,02  $\mu\text{m}$  et 0,006  $\mu\text{m}$ , on intrude 0,845  $\text{cm}^3/100 \text{ g}$  soit 3,8 % de mercure total. Cette dernière valeur, est rigoureusement identique à celle obtenue pour l'argile pure dans la même gamme de diamètres. Ceci nous montre que dans cette zone, absente dans la courbe du squelette, seul l'espace poral de la phase argileuse est intrudé.

Pour tester la variabilité des valeurs obtenues, nous avons effectué 4 mesures sur des échantillons provenant de deux cylindres témoins. Les valeurs obtenues (tableau 5) témoignent d'une faible variabilité qui existe surtout dans la zone de forte intrusion ou l'équilibre était long à s'établir.

D'autre part, on peut essayer de comparer les valeurs d'intrusion mesurées et les valeurs théoriques données par la formule  $x = 100 \left( \frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right)$  (x en  $\text{cm}^3/100 \text{ g}$ ). La valeur mesurée est à additionner à la valeur du volume poral intrudé de la phase argileuse estimable grâce à son volume massique à sec (0,484). On trouve une intrusion totale d'environ 23  $\text{cm}^3/100 \text{ g}$ . La valeur théorique est de 24,49  $\text{cm}^3/100 \text{ g}$ . Ces deux valeurs sont du même ordre de grandeur ; leur différence n'est pas significative puisqu'elle correspond à une précision de 0,015 sur le volume massique, précision qui n'est pas atteinte dans nos mesures. L'observation des échantillons séchés nous incite de plus à penser qu'ils ne présentent pas de pores d'intrusion du mercure de plus de 400  $\mu\text{m}$ .

Compte tenu de la bonne répétitivité des mesures, compte tenu du bon accord entre valeurs d'intrusion calculées et observées, nous pouvons conclure que la courbe de distribution des pores <sup>d'intrusion</sup> du mélange est de type bimodale, le premier mode caractérisant l'espace poral lié à l'assemblage sable-argile, le second, l'espace poral propre à la phase argileuse.

La technique porosimétrique va donc nous permettre de bien étudier les modifications induites au niveau de l'assemblage sable-argile par les tassements auxquels nous avons soumis les échantillons.

### III - ANALYSE DU COMPORTEMENT DU MELANGE AU TASSEMENT.

La série des opérations et mesures effectuées est consignée dans le tableau 6.

En ce qui concerne le passage à l'oedomètre, nous avons opté après quelques essais pour un protocole consistant à appliquer la même pression quatre fois de suite pendant deux heures. Cette façon de procéder est apparue plus fiable vis-à-vis de la réalisation d'équilibres que celle qui consistait à laisser l'échantillon sous charge pendant douze heures.

Compte tenu des pertes d'argile par fluage observées aux fortes pressions, nous avons également testé un protocole d'application de contraintes croissant par paliers de 2 kg/cm<sup>2</sup>. Mais comme nous n'étions pas sûrs qu'appliquer des pressions croissantes était énergétiquement comparable en domaine saturé et en domaine non saturé, nous n'avons pas retenu ce dernier protocole. Les pressions appliquées ont été : 0,5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 6 ; 8 ; 10 kg/cm<sup>2</sup>, cette valeur étant maximale pour l'oedomètre.

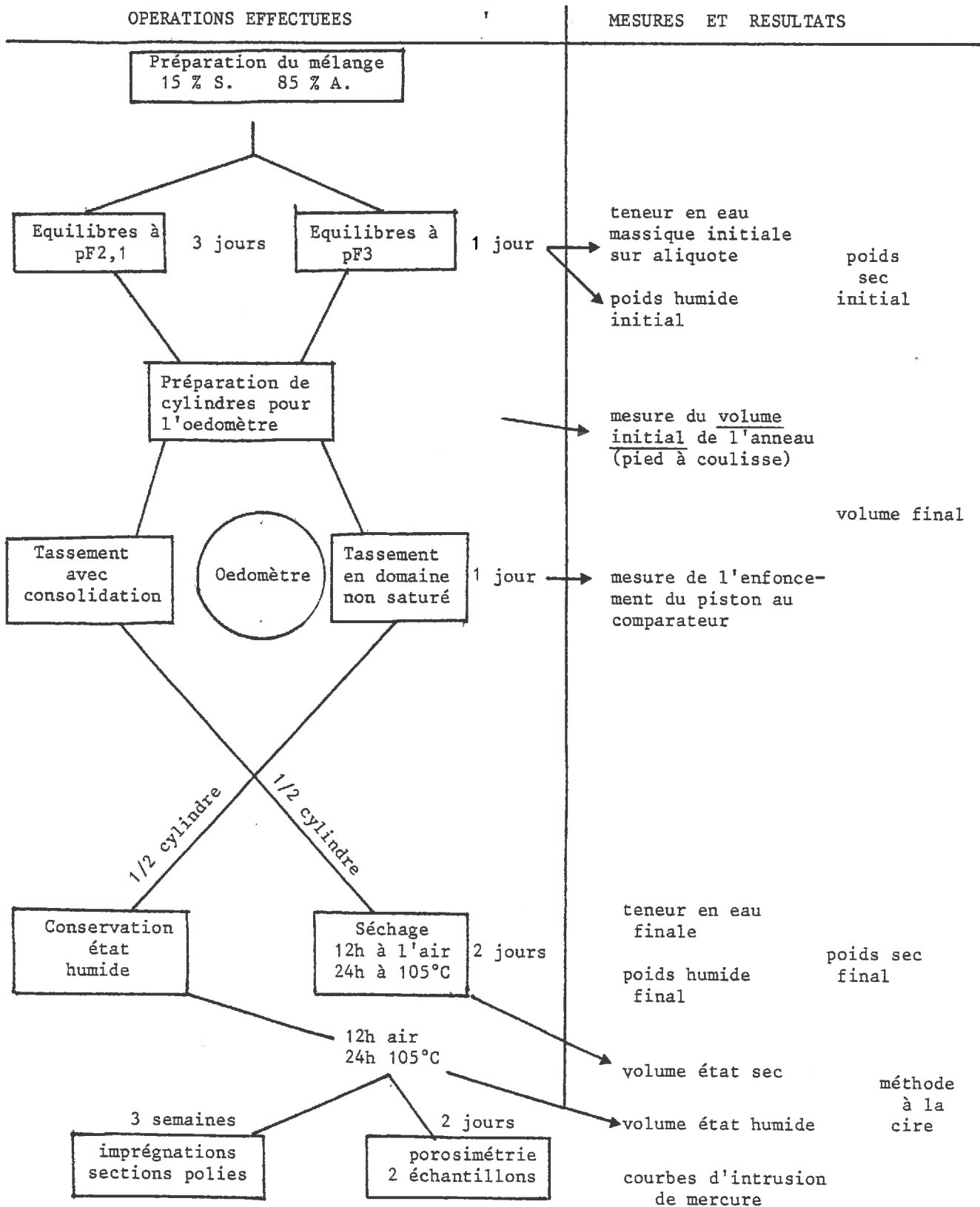
#### III-1. MESURE DE PARAMETRES PHYSIQUES (volume massique, teneur en eau) (Fig. 8 et 9).

##### III-1.1. Tassements avec consolidation (Tabl. 7).

- L'ensemble des points initiaux et des points obtenus après tassement (valeurs mesurées sous charge, cf. annexe) se situe sur une droite dont l'équation obtenue par ajustement linéaire est  $\frac{1}{\rho^d} = 0,3726 + 0,0103 W \%$  ( $r^2 = 0,951$ ). Cette droite est proche et quasiment, parallèle à la droite de saturation du mélange, d'équation :  $\frac{1}{\rho^d} = 0,3741 + 0,01 W \%$ .

Nos points de départ se situant à des humidités comparables à celle du point d'entrée d'air, on peut expliquer cette différence par la présence d'air piégé dans les échantillons. Ceci semble confirmé par le fait que d'après l'équation obtenue, on tend à se rapprocher de la droite de saturation quand on tasse, ce qui pourrait s'expliquer par une compression de l'air piégé. De plus, les mesures de volume effectuées grâce à un enrobage de cire indiquent une augmentation du volume massique hors charge, qui semble plus marquée aux fortes pressions (cf. tabl. 7).

Tableau 6 -

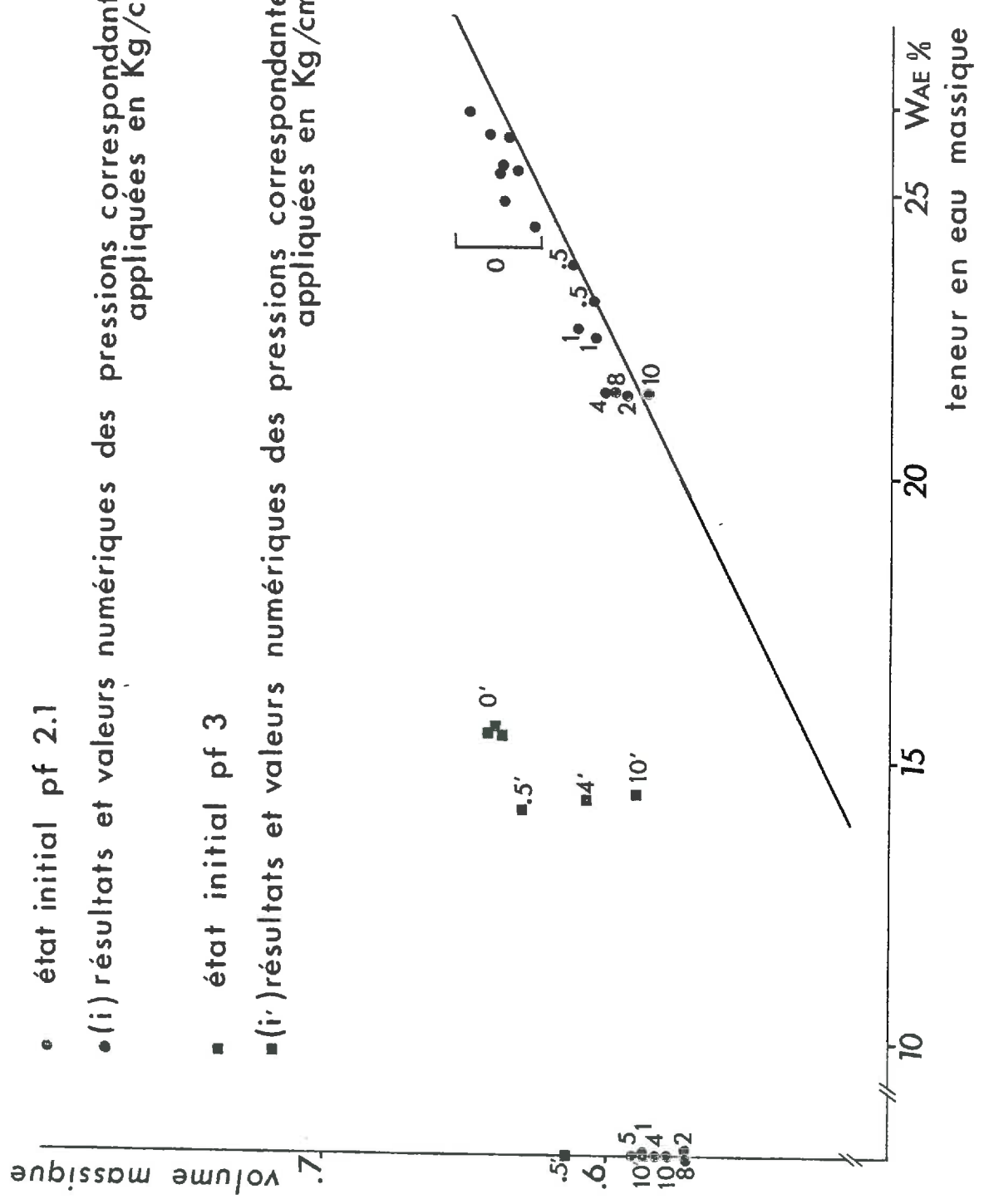


RESULTATS DU COMPACTAGE A L OEDOMETRE ( 4 APPLICATIONS SUCCESSIVES DE LA PRESSION)

VALEURS SOUS CHARGE ET APRES DESSICATION

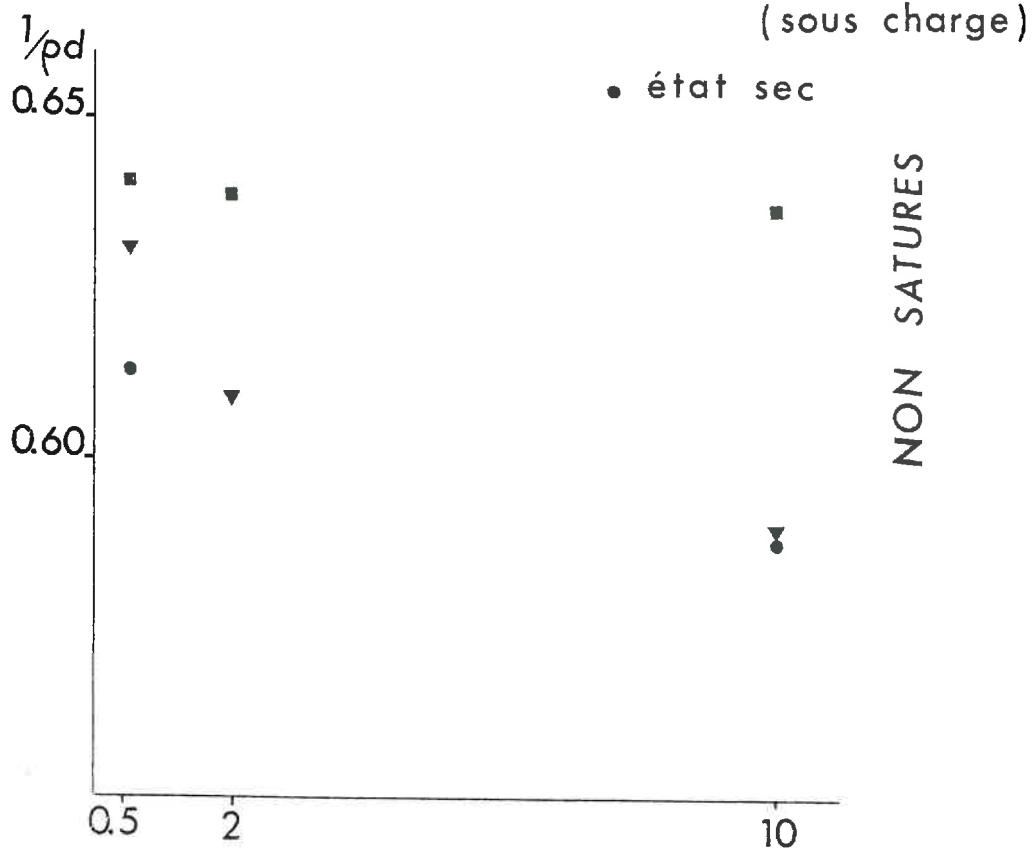
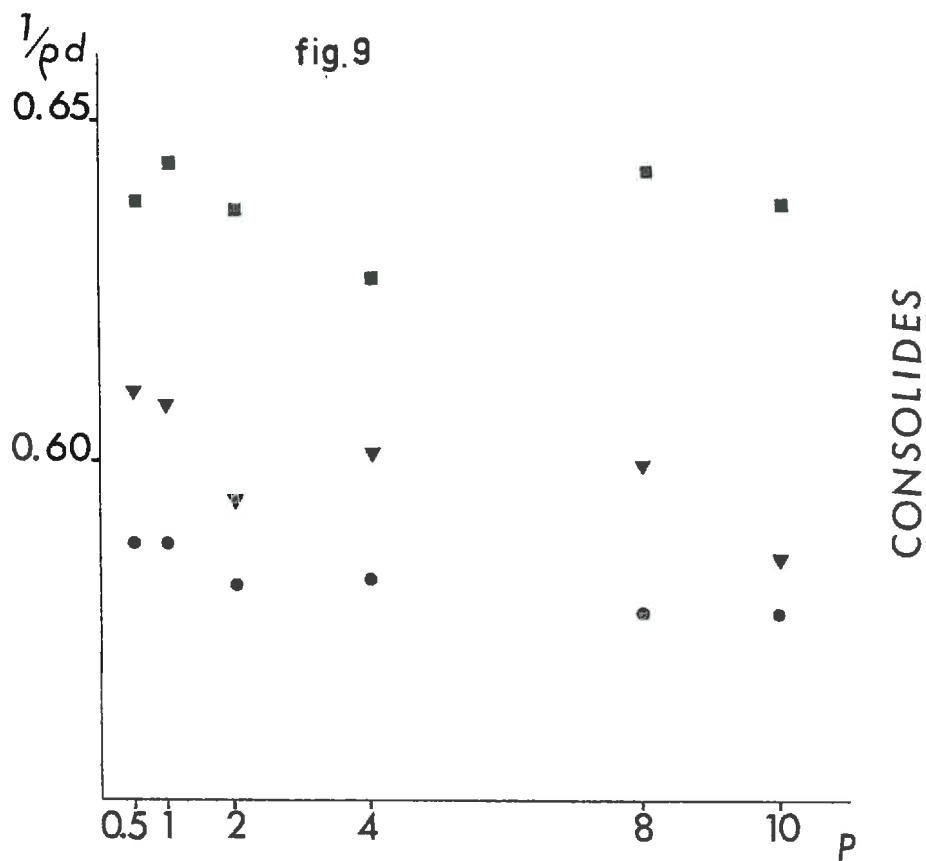
- état initial pf 2.1
- (i) résultats et valeurs numériques des pressions correspondantes appliquées en Kg/cm<sup>2</sup>
- état initial pf 3
- (i') résultats et valeurs numériques des pressions correspondantes appliquées en Kg/cm<sup>2</sup>

fig.8





# VARIATIONS DU VOLUME MASSIQUE EN FONCTION DE LA CONTRAINTE APPLIQUEE



Pression appliquée kg/cm <sup>2</sup>	Teneur en eau		Volume massique			
	initiale	finale	initial	final (sous charge)	final (hors charge)	après séchage
0.5 (3)	26.00	23.69	0.642	0.614	0.615	0.591
0.5 (3)	25.36	23.10	0.636	0.606	0.618	0.584
1 (3)	26.40	22.60	0.650	0.611	0.606	0.588
1 (3)	24.88	22.40	0.638	0.605	0.613	0.587
2 (1)	25.88	22.36	0.632	0.607	-	0.583
2 (1)	26.18	22.76	0.641	0.604	-	-
2 (3)	25.94	21.45	0.637	0.594	0.600	0.572
4 (1)	25.70	21.43	0.637	0.596	-	-
4 (2)	26.61	22.07	0.642	0.599	-	0.583
4 (3)	24.40	21.49	0.627	0.601	0.600	0.583
6 (2)	25.09	21.91	0.637	0.594	-	0.582
8 (3)	27.00	22.27	0.648	0.600	0.604	0.584
8 (3)	25.39	21.50	0.639	0.599	0.600	0.572
10 (1)	26.92	22.04	0.637	0.600	-	-
10 (2)	25.44	21.57	0.635	0.582	-	0.583
10 (3)	25.51	21.49	0.638	0.586	0.599	0.578

Tableau 7 : Variations des paramètres physiques (teneurs en eau, volume massique) lors de la consolidation.

(1) (2) (3) correspondent aux protocoles respectifs d'application de la contrainte, une fois pendant 12 h, augmentant de 2 kg/cm<sup>2</sup> toutes les 2 h, 4 fois de suite pendant 2 heures.

- On peut constater d'autre part qu'on parvient rapidement à une efficacité maximale des pressions appliquées, -dès 2 kg/cm<sup>2</sup>-, puis-qu'au-delà, on ne diminue plus significativement le volume massique. Ceci apparaît nettement pour les échantillons ayant subi 4 périodes succes-sives d'application de la charge. Pour cette série d'échantillons, l'humidi-té après tassement aux pressions supérieures à 2 kg/cm<sup>2</sup> est constante et vaut 21,50 %.

- Un autre point important à souligner est le déplacement du point d'entrée d'air lors du tassement avec consolidation. Ce déplace-ment ne paraît pas avoir modifié le comportement des échantillons au retrait. En effet, on observe lors de la dessiccation, une diminution du volume massique du même ordre que celle intervenant sur des maté-riauX non tassés (tabl. 7). Cette persistance du comportement au retrait nécessite néanmoins l'établissement d'une courbe de retrait complète pour être confirmée.

### III-1.2. Tassements en non saturé (tabl. 8).

A 15,32 % de teneur en eau massique, l'échantillon contient 10,6 cm<sup>3</sup>/100 g de pores potentiellement réductibles. Or, les résultats des mesures montrent que, non seulement on ne revient pas sur la courbe de saturation, mais qu'à pression égale, on tasse moins à ces valeurs d'humidité que lorsque l'échantillon est saturé.

Enfin, pour ces échantillons, un même type de comportement apparaît à la dessiccation, à savoir qu'un léger retrait affecte le matériau.

### III-2. MODIFICATIONS DE CARACTERISTIQUES DE L'ESPACE PORAL : POROSIMETRIE A MERCURE.

#### III-2.1. Présentation des résultats, choix d'un intervalle d'étude.

Les données obtenues ont été représentées de 3 façons :

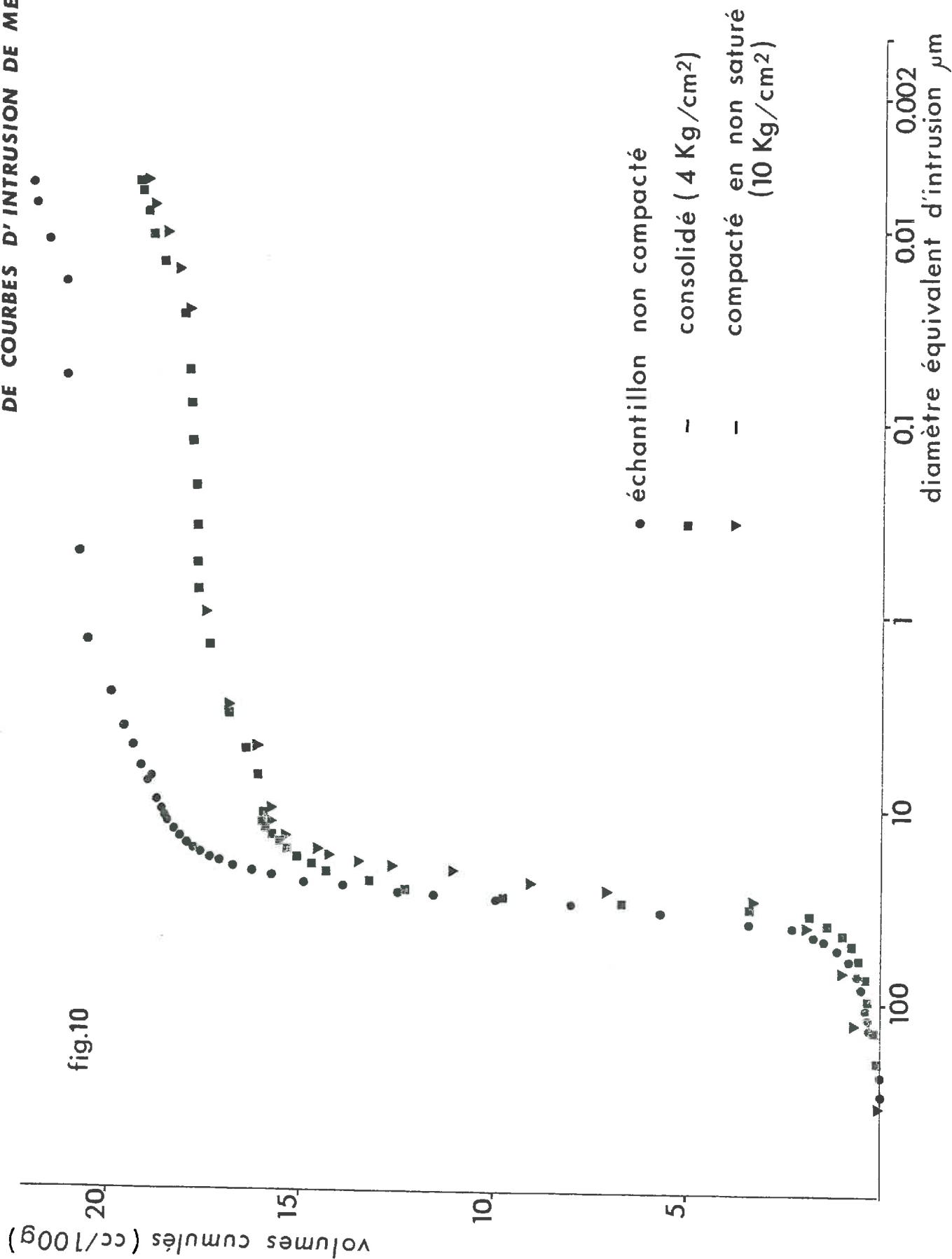
- courbes cumulatives d'intrusion de mercure-obtenues directe-ment au porosimètre-(fig. 10),
- fonction de répartition de ces intrusions, grâce à un calcul de pente entre les différents points obtenus, qui tenait compte de la re-présentation logarithmique

$$y' = \frac{\Delta y}{\text{Log } x_2 - \text{Log } x_1} , \quad x' = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (\text{Fig. 11})$$

pression appliquée kg/cm <sup>2</sup>	Teneur en eau		Volume massique			après séchage
	initiale	finale	initial	final (sous charge)	final (hors charge)	
0,5	15,46	14,11	0,641	0,631	0,630	0,613
2	19,08	17,48	0,639	0,609	0,614	-
4	15,48	14,26	0,634	0,607	-	-
10	15,42	14,41	0,637	0,590	0,613	0,588

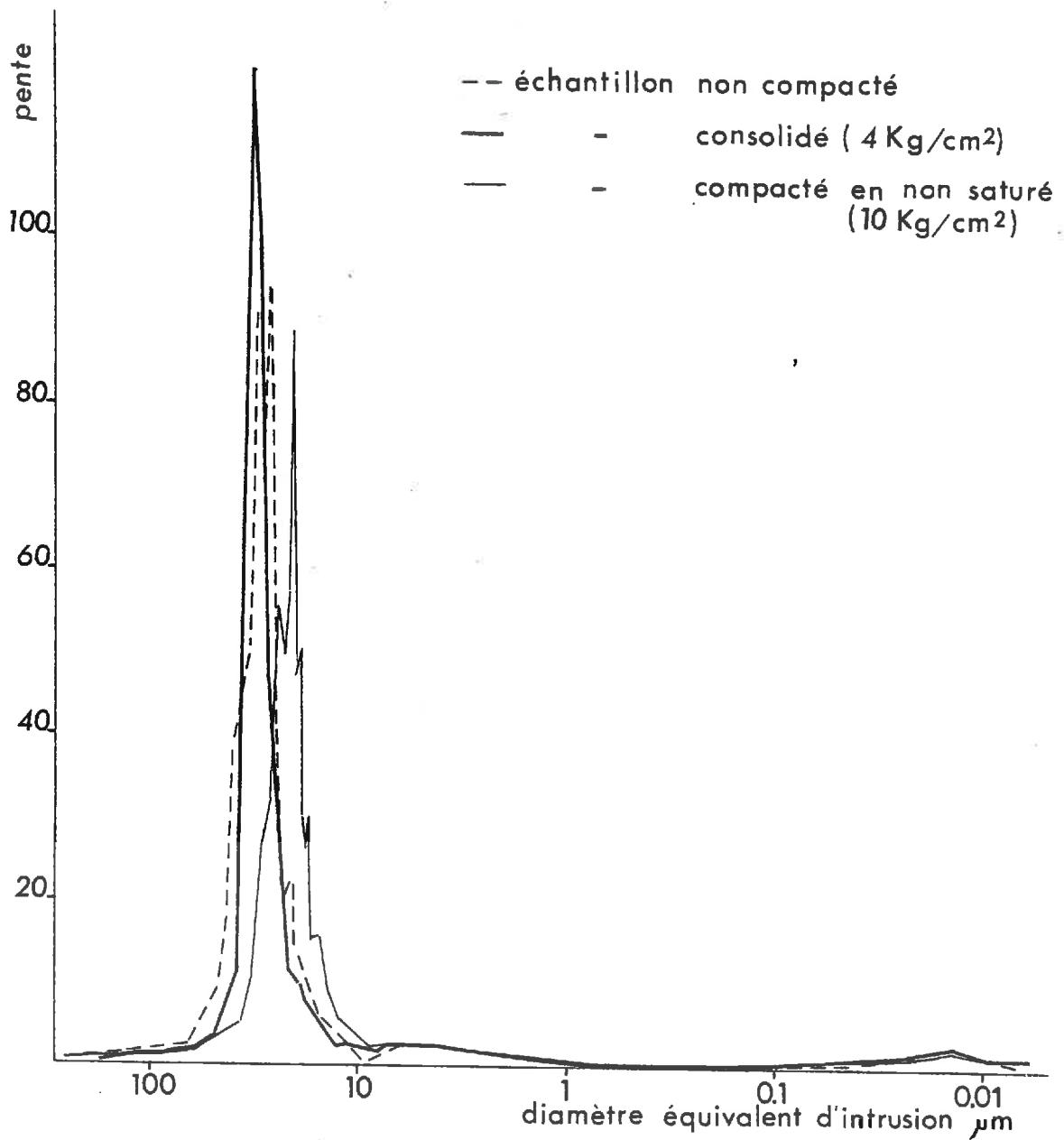
Tableau 8 : Variations des paramètres physiques (teneur en eau, volume massique) lors du compactage en non saturé - protocole identique pour tous les échantillons : 4 applications successives de 2 h chacune.

COMPARAISON DE L'EFFET DU COMPACTAGE EN NON SATURÉ ET DE LA CONSOLIDATION AU MOYEN DE COURBES D'INTRUSION DE MERCURE



FONCTIONS DE REPARTITION DES PENTES DE COURBES  
D'INTRUSION

fig.11



- fonction de répartition des intrusions grâce à une partition du domaine d'étude en intervalles identiques pour chacune des courbes, et grâce au calcul du volume intrudé dans chacun de ces intervalles. Aux bornes des intervalles, les valeurs d'intrusion ont été calculées par interpolation linéaire (Fig. 12). Ce type de représentation pose un problème de choix des intervalles. Pour nos données, l'existence d'une valeur modale bien marquée d'une part, la persistance de l'allure générale d'autre part (cf. Fig. 10) ont simplifié ce choix. Des intervalles de  $5 \mu\text{m}$  ont été choisis dans la partie où on intrude le plus de mercure. Les bornes ont été:  $200 \mu\text{m}$  ;  $100$  ;  $60$  ;  $45$  ;  $35$  ;  $30$  ;  $25$  ;  $20$  ;  $15$  ;  $10$  ;  $7$  ;  $5$  ;  $3$  ;  $1$  ;  $0,7$  ;  $0,2$  ;  $0,007 \mu\text{m}$ . Une variabilité des premières et des dernières valeurs de diamètre équivalents due à la technique du porosimètre nous a conduit à choisir deux bornes extrêmes ( $200$  ;  $0,007 \mu\text{m}$ ) présentes sur toutes les courbes.

### III-2.2. Résultats.

#### III-2.2.1. Comparaison des volumes intrudés totaux.

Pour la comparaison des résultats obtenus, nous avons fait l'hypothèse que l'état initial non tassé était identique après dessiccation pour les échantillons équilibrés à pF2 ou pF3.

Nous avons vérifié tout d'abord la cohérence des valeurs des volumes totaux intrudés obtenus avec les résultats obtenus par mesure de volume massique (Fig. 13 et 14). Les tendances observées sont identiques : en consolidation, l'efficacité du tassement est plus grande qu'en non saturé et atteint un maximum pour une pression de  $2 \text{ kg/cm}^2$ .

La différence entre valeurs calculées grâce au volume massique et valeurs mesurées est quasiment constante dans les deux figures. Cette différence peut s'expliquer en partie par le fait que tout le mercure n'est pas intrudé pour des diamètres équivalents compris entre  $200 \mu\text{m}$  et  $0,007 \mu\text{m}$ . A la pression correspondant au diamètre d'intrusion de  $0,007 \mu\text{m}$ , l'argile comporte encore  $1 \text{ cm}^3/100\text{g}$  de matériau de pores intrudables et à la pression correspondant à  $200 \mu\text{m}$  on a déjà intrudé en moyenne  $0,4 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ . Le reste de la différence pourrait s'expliquer par une erreur systématique due à la mesure au porosimètre ou à la mesure de volume massique ou par l'existence de pores non intrudables par le mercure dans les échantillons.

Néanmoins, il apparaît que les courbes d'intrusion de mercure sur échantillons séchés, rendent bien compte des diminutions de porosité observées lors des différents tassements.

# FONCTIONS DE REPARTITION DES INTRUSIONS PAR CLASSES DE DIAMETRE

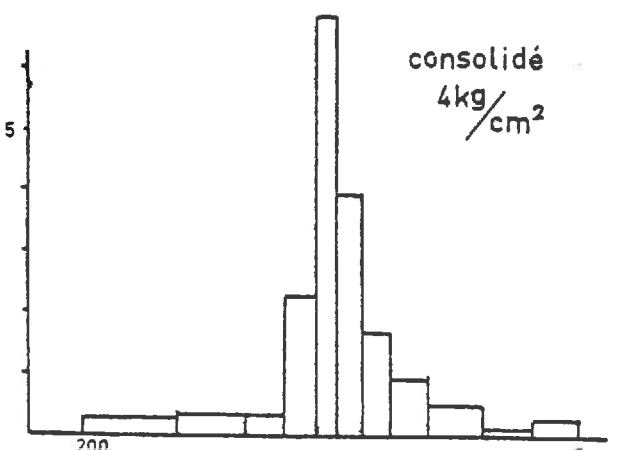
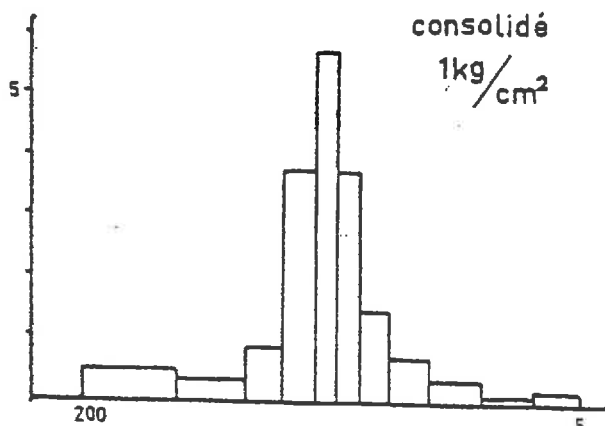
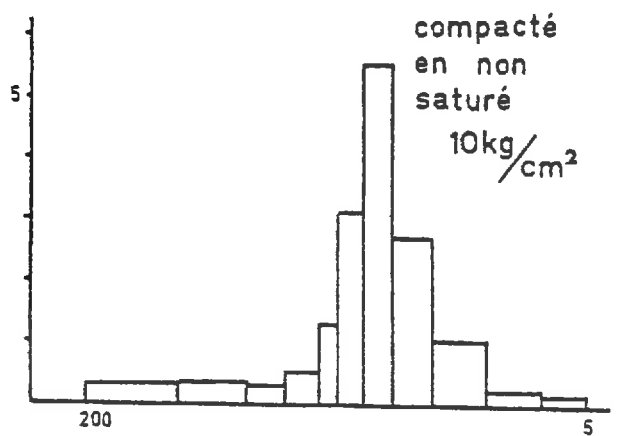
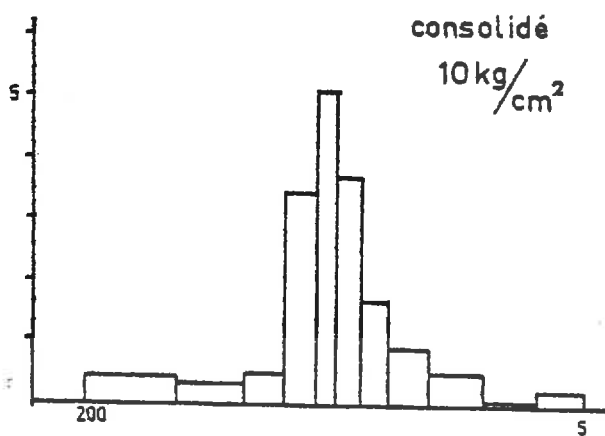
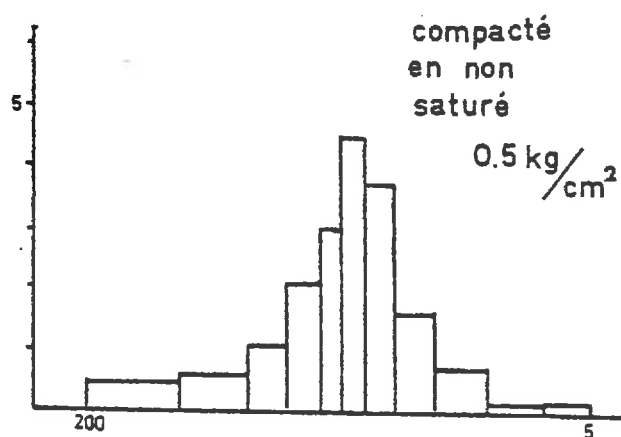
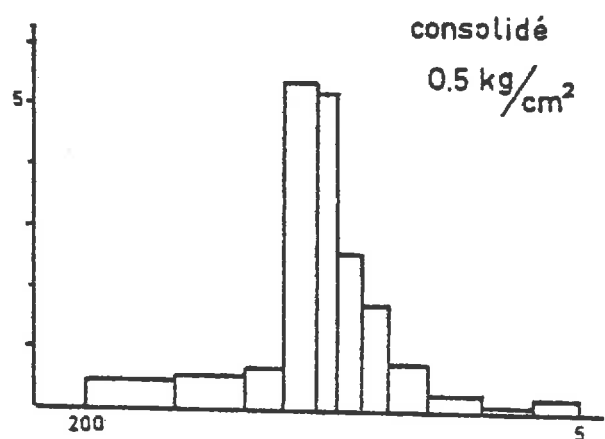
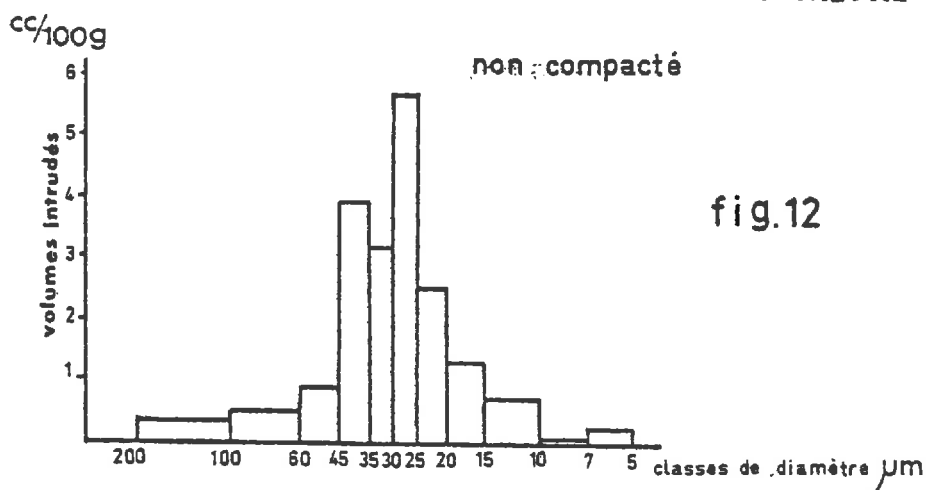




fig.13

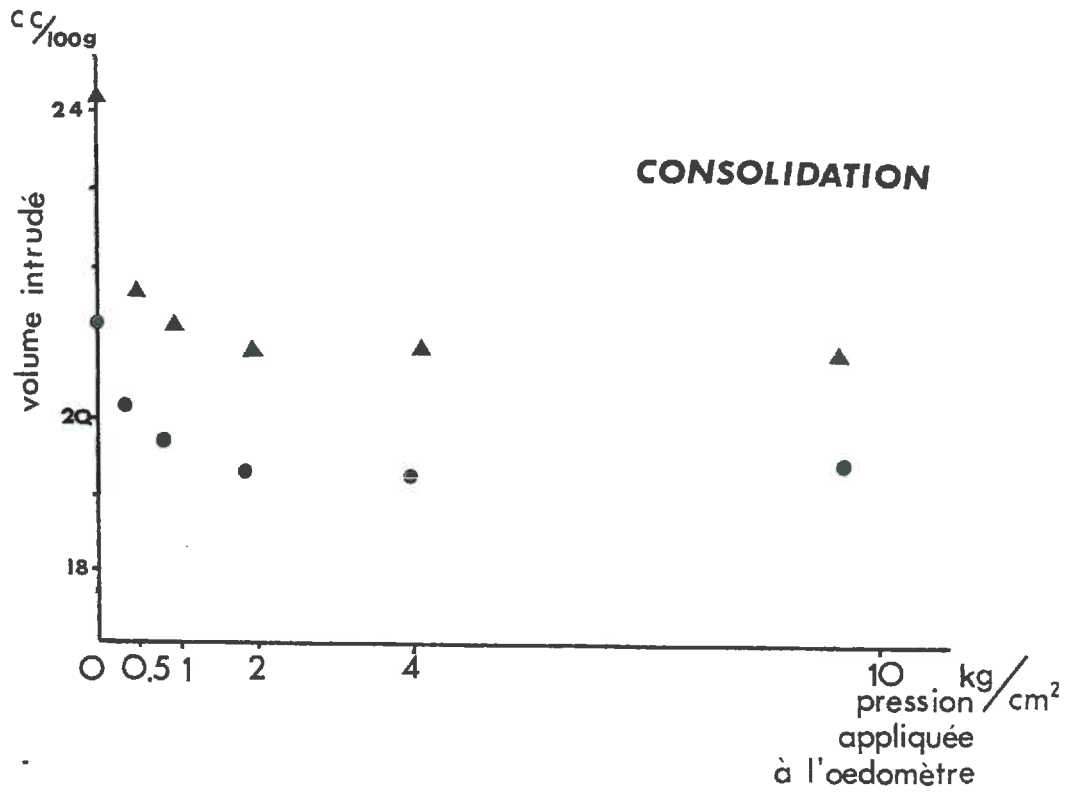
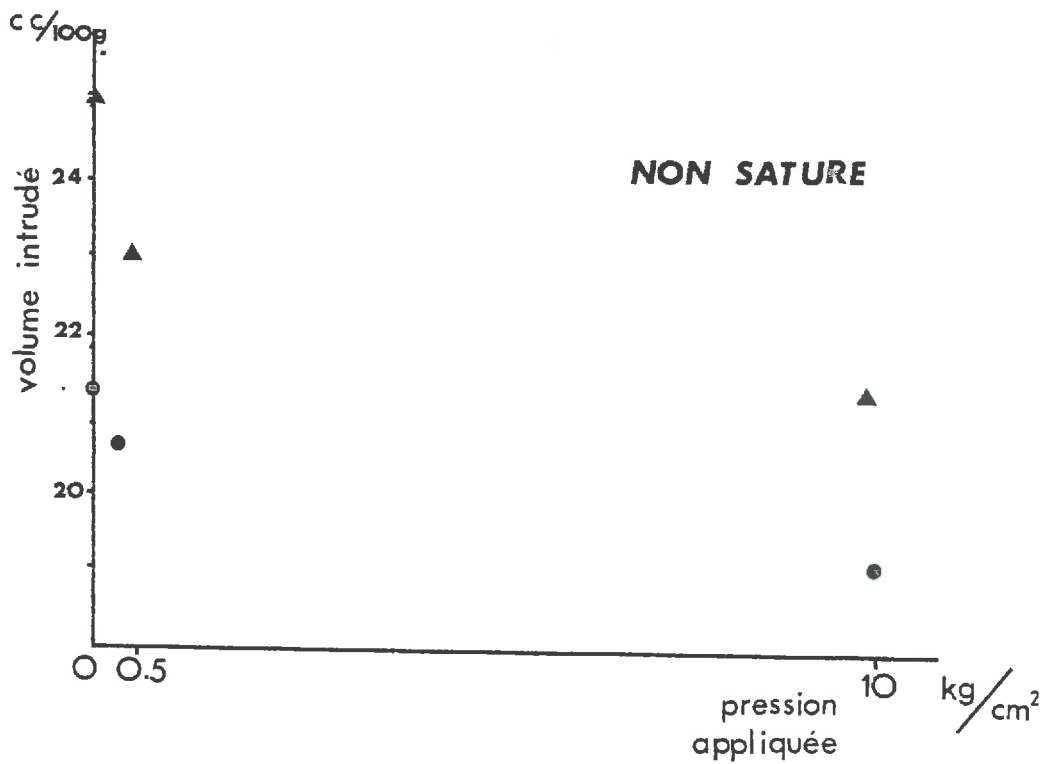


fig.14



▲ volume intrudable  
● volume intrudé

**COMPARAISON VOLUMES TOTAUX INTRUDABLES CALCULES  
VOLUMES INTRUDES DANS LA GAMME  
DE DIAMETRE (200 - 0.007  $\mu$ m)**

### III-2.2.2. Variations qualitatives.

#### III-2.2.2.1. Tassement avec consolidation.

Le principal résultat observé est le non-déplacement de la valeur modale qui dans tous les cas est restée rigoureusement constante à 30  $\mu\text{m}$ . A cette valeur, il semble qu'on intrude de plus en plus de mercure, la pente obtenue étant de plus en plus grande et le pic obtenu pour la fonction de répartition semblant se rétrécir à sa base.

#### III-2.2.2.2. Tassement en non saturé.

Les courbes caractéristiques de l'espace poral de ces échantillons témoignent d'un déplacement de la valeur modale. Ce déplacement est d'autant plus marqué que la pression appliquée est forte puisqu'à 0,5 kg/cm<sup>2</sup> la valeur modale est de l'ordre de 27  $\mu\text{m}$  alors qu'elle est de 20  $\mu\text{m}$  pour une pression appliquée de 10 kg/cm<sup>2</sup>.

Notons ici que l'échantillon tassé à 2 kg/cm<sup>2</sup> n'est pas comparable aux autres (0,5 kg, 10 kg) car son humidité de départ était de 19 %. Le volume massique de cet échantillon a diminué plus que celui de l'échantillon tassé à 10 kg et sa valeur modale a été également déplacée à 20  $\mu\text{m}$ .

### III-2.2.3. Bilan détaillé.

Sur l'ensemble des courbes obtenues, on constate que les quantités intrudées n'ont varié significativement que pour une gamme limitée de diamètres d'intrusion (cf. Tabl. 9).

Les fonctions de répartition obtenues grâce au calcul de pente montrent une persistance des pics obtenus à 4  $\mu\text{m}$  et à 0,015  $\mu\text{m}$  lors du tassement : les quantités intrudées pour des diamètres d'intrusion supérieurs à 7  $\mu\text{m}$  ne varient pas significativement.

Par ailleurs, les quantités intrudées entre 200 et 60  $\mu\text{m}$  sont également constantes. Ceci peut être dû à un effet de bord des échantillons : les lacunes présentes en bordure sont intrudables à des pressions plus basses et ceci indépendamment du fait que l'échantillon soit tassé ou non. Un ordre de grandeur de cet effet de bord a été estimé par le calcul à 1,4 cm<sup>3</sup>/100 g, valeur non négligeable et du même ordre que celle observée en moyenne pour des diamètres supérieurs à 60  $\mu\text{m}$ , 1,1 cm<sup>3</sup>/100 g.

Ainsi, les variations des caractéristiques de l'espace poral observées lors du tassement se produisent essentiellement dans la gamme de diamètres (60  $\mu\text{m}$ , 7  $\mu\text{m}$ ).

Pressions kg/cm <sup>2</sup>	C L A S S E S D E D I A M E T R E    μm																			
	200	200-100	100-60	60-45	45-35	35-30	30-25	25-20	20-15	15-10	10-7	7-5	5-3	3-1	1-0.7	0.7-0.2	200-0.2	200-0.007	60-7	
Non cassé	0.284	0.338	0.515	1.039	4.269	3.828	5.005	2.297	1.135	0.633	0.058	0.316	0.562	0.646	0.082	0.178	20.220	21.257	1.04	18.244
	0.649	0.370	0.470	0.676	4.694	4.892	3.194	1.786	0.797	0.497	0.059	0.299	0.511	0.637	0.070	0.144	18.842	20.265	1.42	16.595
	0.486	0.479	0.340	0.700	3.138	5.771	3.637	1.593	0.899	0.358	0.119	0.214	0.496	0.718	0.080	0.133	18.264	19.873	1.61	16.215
Consolidation	0.314	0.318	0.294	0.492	2.537	4.787	4.556	2.209	0.882	0.562	0.082	0.315	0.532	0.625	-	-	-	-	-	16.107
	0.012	0.238	0.299	0.359	1.910	6.562	4.083	1.708	0.924	0.544	0.123	0.297	0.506	0.610	0.079	0.141	17.769	19.305	1.54	16.213
	0.907	0.416	0.380	0.547	3.608	4.214	3.904	1.846	0.959	0.552	0.063	0.305	0.480	0.616	0.074	0.157	17.824	19.316	1.49	15.693
	0.445	0.466	0.565	1.111	2.294	3.094	4.489	3.711	1.682	0.701	0.081	0.190	0.566	0.684	0.084	0.137	19.404	20.937	1.53	17.163
Non saturé	0.217	0.254	0.305	0.312	0.557	0.636	2.596	6.396	3.133	1.139	0.291	0.208	0.512	0.620	0.077	0.200	15.551	17.078	1.53	15.060
	0.314	0.365	0.428	0.339	0.796	1.592	3.399	5.116	4.789	1.050	0.209	0.139	0.602	0.693	0.152	0.254	17.661	19.047	1.38	17.290
Moyenne	0.406	0.360	0.400	0.619								0.254	0.593	0.650	0.087	0.168				1.443
Ecart-type	0.259	0.084	0.100	0.294								0.066	0.039	0.039	0.026	0.042				0.178

Tableau 9 - Bilan détaillé des volumes de mercure intrudés (cm<sup>3</sup>/100g) dans les différentes classes de diamètres équivalents choisies (les moyennes et écarts-types n'ont été calculés que dans les classes où les variations étaient faibles).

Dans le tableau 9 ont été portées les quantités de mercure intrudées dans les intervalles choisis (cf. III-2.1.). Dans les figures 15 et 16, seule la gamme de diamètres (60  $\mu\text{m}$ , 7  $\mu\text{m}$ ) a été retenue, et on a ramené les valeurs obtenues pour les différents intervalles à la quantité totale intrudée dans cette gamme.

\* En consolidation (Fig. 15), avec les intervalles choisis, trois tendances se dégagent :

- après tassement à 0,5 kg/cm<sup>2</sup>, les quantités relatives intrudées varient peu par rapport à l'état initial. Les volumes intrudés augmentent légèrement dans l'intervalle (45  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ ) et diminuent peu ailleurs.

- pour des pressions allant de 1 à 4 kg/cm<sup>2</sup>, une forte diminution affecte la quantité intrudée entre 45 et 35  $\mu\text{m}$  alors que celle de la classe 35-30  $\mu\text{m}$  augmente nettement. Les quantités intrudées par des petits diamètres diminuent d'autant moins que l'on tasse plus.

- après tassement à 10 kg/cm<sup>2</sup>, les valeurs d'intrusion de la classe 45-35  $\mu\text{m}$  ont tendance à augmenter. Ce comportement bien établi paraît difficilement explicable avec les données que nous possédons.

\* En non saturé, des changements plus nets apparaissent, à savoir que pour les échantillons traités, on constate que les quantités intrudées à l'état non tassé aux diamètres compris entre 60 et 25  $\mu\text{m}$  sont réduits de moitié lors d'un tassement à 10 kg/cm<sup>2</sup> au profit des classes 25-20 et 20-15  $\mu\text{m}$ . A 0,5 kg/cm<sup>2</sup>, c'est surtout la quantité intrudée dans l'intervalle (30-25  $\mu\text{m}$ ) qui augmente. (Fig. 16)

L'ensemble de ces résultats montre que l'espace poral d'un matériau sablo-argileux peut être affecté qualitativement de façon très différente pour une même diminution de volume massique. Ce résultat est d'autant plus important que les variations qualitatives observées portent sur des diamètres d'intrusion, dont on peut penser qu'ils jouent un rôle important dans la dynamique de l'eau de ce type de matériau.

#### IV - DISCUSSION.

Pour tenter d'interpréter les résultats obtenus, nous avons, dans le cas des matériaux non tassés et tassés avec consolidation, complété les mesures effectuées, par l'observation de sections polies taillées perpendiculairement et parallèlement à l'axe du tassement.

fig. 15

**CONSOLIDATION**

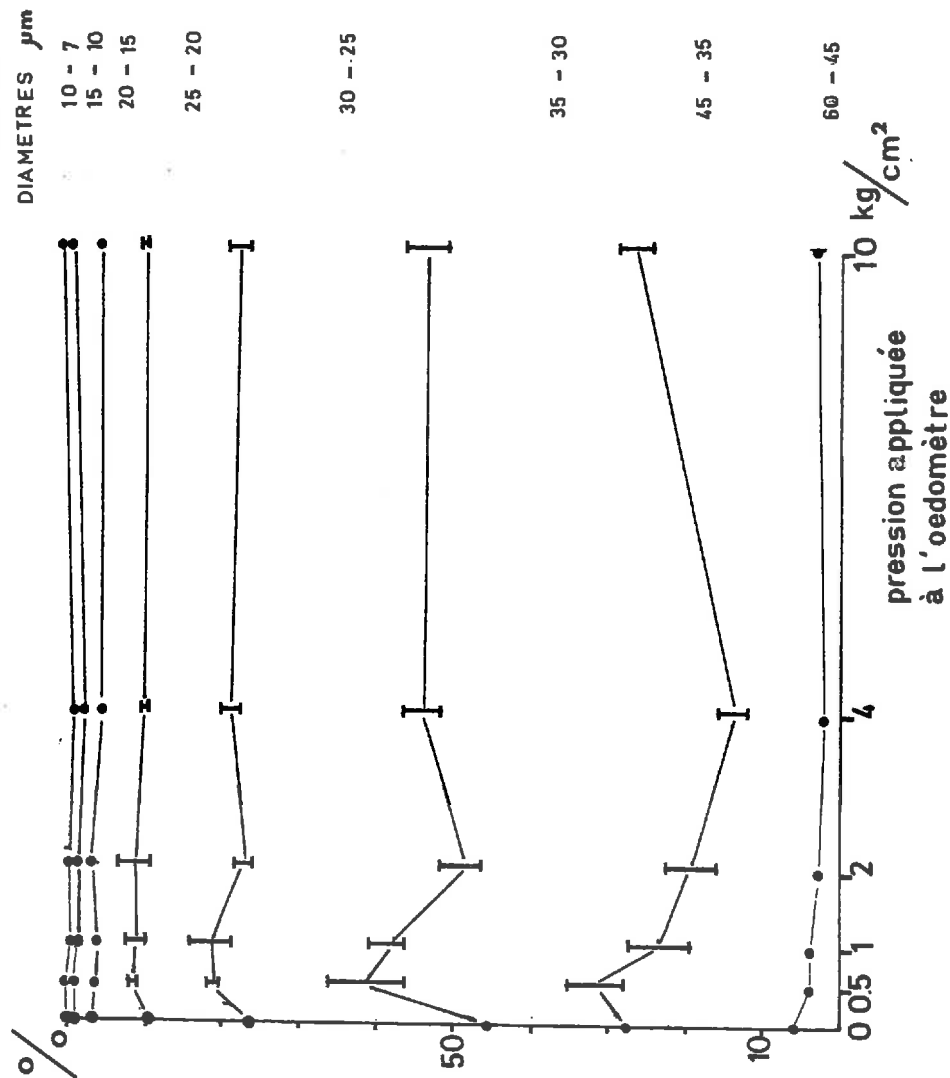
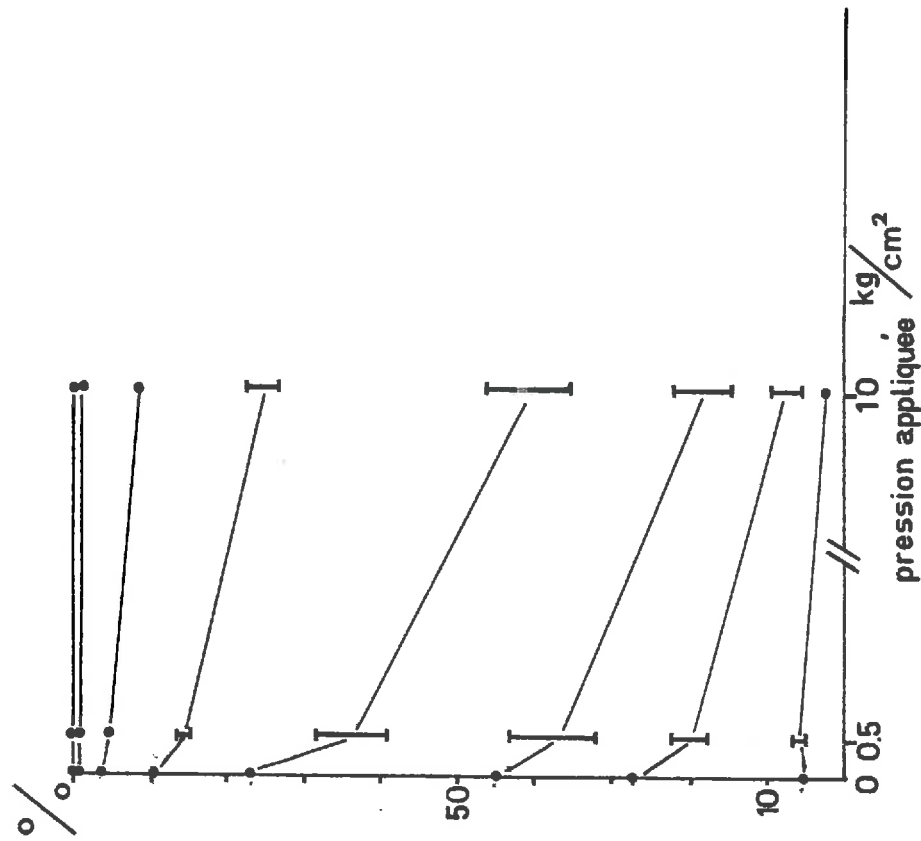


fig. 16

**NON SATURE**



**BILAN DES VARIATIONS RELATIVES DE VOLUMES DE MERCURE INTRUDES DANS LES CLASSES DE DIAMETRES EQUIVALENTS DE LA GAMME (60 - 7  $\mu\text{m}$ )**

Dans ce qui suit, le terme "lacune" ne s'applique qu'à l'espace poral dû à l'assemblage des grains du squelette et apparaissant lors du retrait de la phase argileuse.

#### IV-1. ORGANISATION DU MATERIAU NON TASSE.

##### IV-1.1. Observations des sections polies (Fig. 17)

Plusieurs points ont pu être précisés :

- L'épaisseur de la couche d'argile enrobant les grains de squelette est régulière et de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ .
- Aucune anisotropie (éventuellement liée aux conditions du retrait) ne peut être décelée dans l'échantillon.
- La taille moyenne des lacunes est comparable à celle des grains de quartz, soit de l'ordre de 200  $\mu\text{m}$  de diamètre apparent.

##### IV-1.2. Modélisation.

Ces observations nous ont suggéré de comparer ce type de matériau à un assemblage de sphères (FIES, 1978) constituées d'un grain de quartz de diamètre de 225  $\mu\text{m}$  enrobé par de l'argile. L'épaisseur de la couche d'argile a pu être estimée de 2 façons :

- par calcul de la surface enrobée, connaissant le nombre de grains de sable contenus dans un gramme de matériau et la masse volumique de la phase argileuse sèche, nous avons trouvé une épaisseur de 8,5  $\mu\text{m}$ .
- en comparant différents assemblages possibles de sphères, on trouve que seul l'assemblage orthorhombique est compatible avec l'état et la constitution de notre matériau : la porosité théorique de cet assemblage est de 39,54 % contre 40,33 % pour notre matériau ; l'épaisseur d'argile serait alors de 6,57  $\mu\text{m}$ . Dans ce type d'assemblage, les diamètres les plus contraignants pour l'intrusion du mercure sont situés dans les plans où 3 sphères sont en contact. Le diamètre d'intrusion correspondant serait alors de 36  $\mu\text{m}$ .

Par ailleurs, avec l'hypothèse qu'à un grain correspond, en moyenne, une lacune, on peut calculer un diamètre équivalent de ces lacunes, supposées sphériques. Nous avons obtenu une valeur de 203  $\mu\text{m}$ . Ces ordres de grandeur qui concordent avec les observations, suggèrent que l'interprétation des courbes d'intrusion en terme de description de l'espace poral lacunaire devra et pourra s'appuyer sur des modèles d'organisation confortés par des observations.



200  $\mu\text{m}$

q quartz  
l lacune



enrobage  
d'argile

fig.17 ORGANISATION DU MATERIAU  
NON COMPACTE

On peut donc considérer l'espace poral de ce matériau comme constitué :

- d'un ensemble de lacunes de diamètre de l'ordre de 200  $\mu\text{m}$  reliées entre elles par des "pores d'intrusion" dont les plus contraignants ont un diamètre de l'ordre de 30  $\mu\text{m}$ .

- de l'espace poral propre à la fraction argileuse.

Ainsi un schéma très simple constitué par une série de réservoirs reliés entre eux par des conduits de plus en plus fins peut modéliser l'intrusion du mercure dans notre échantillon (Fig. 18).

#### IV -2. MODIFICATIONS APPORTEES PAR LE TASSEMENT.

##### IV-2.1. Observations des sections polies (Fig. 19)

Des contraintes de temps ont limité ces observations aux matériaux tassés avec consolidation.

L'organisation de ces échantillons présente une anisotropie. Sur les sections perpendiculaires à l'axe du tassement, les lacunes ont une forme plus arrondie et des diamètres plus grands en moyenne que sur les sections parallèles à cet axe où leur forme est plutôt allongée et les diamètres plus faibles, de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$  contre 200  $\mu\text{m}$  dans le premier cas (cf. Fig.19)

Une appréciation quantitative des changements produits par le tassement est par contre difficile à estimer. Une comparaison de photos de sections perpendiculaires à l'axe du tassement témoigne d'une légère augmentation du nombre de grains de quartz et de lacunes par unité de surface, augmentation qu'il faudrait vérifier sur un champ de plus grande dimension.

Par ailleurs, sur un échantillon présentant une telle anisotropie, il serait nécessaire d'obtenir des données sur deux plans perpendiculaires pour pouvoir évaluer quantitativement les modifications notamment de volume et de nombre de lacunes. Par contre, les variations affectant les "pores d'intrusion" des lacunes sont difficilement estimables par une analyse des images, car ils apparaissent statistiquement peu dans un plan. Cette remarque souligne l'efficacité qu'aurait la confrontation des méthodes de morphologie descriptive et de caractérisation quantitative (bilans de volume, porosimétrie) de l'espace poral.



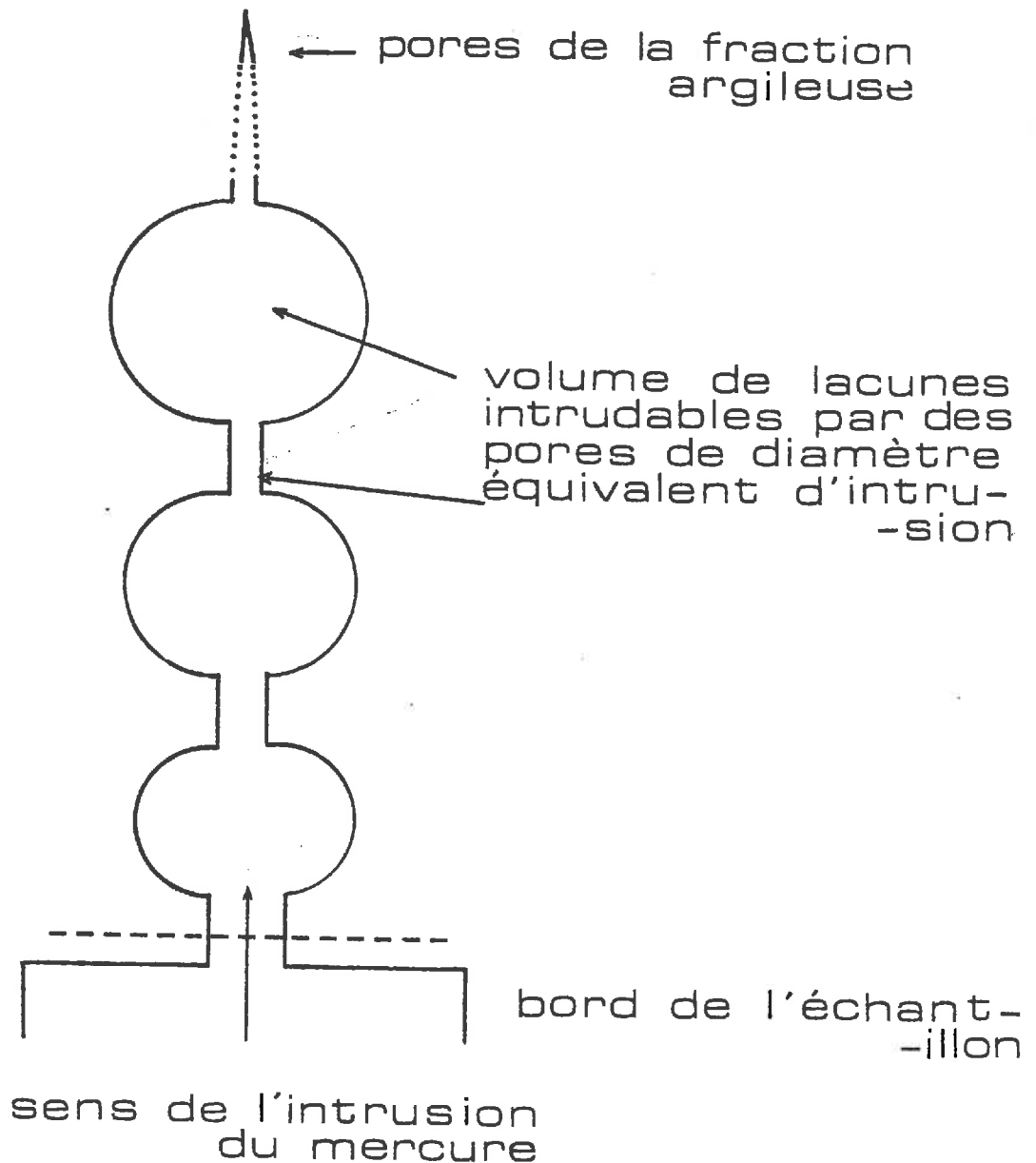
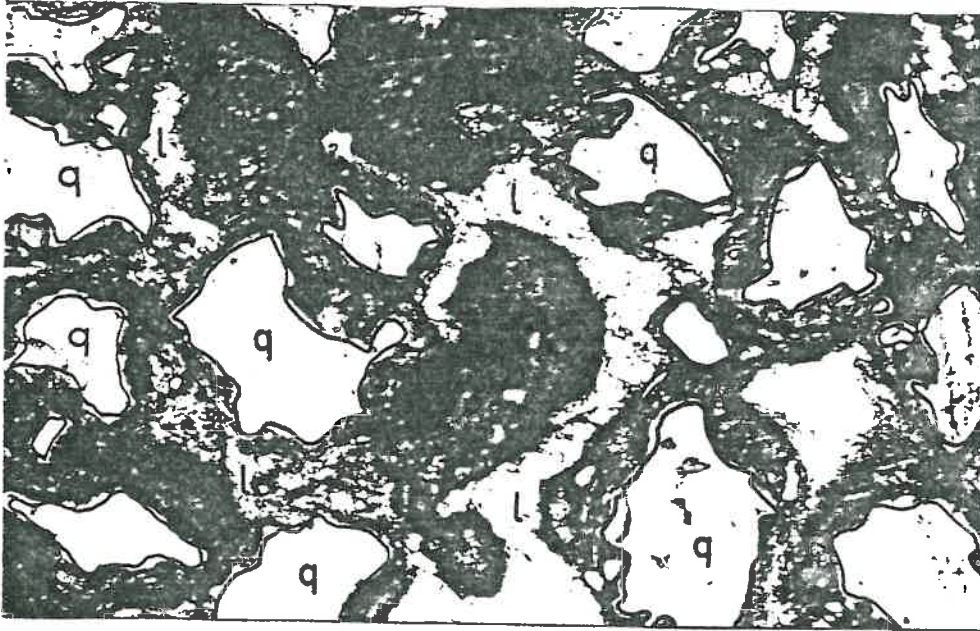


fig 18 MODELE D'ORGANISATION DU MATERIAU SCHEMATISANT LE PROCESSUS D'INTRUSION DU MERCURE DANS LES LACUNES

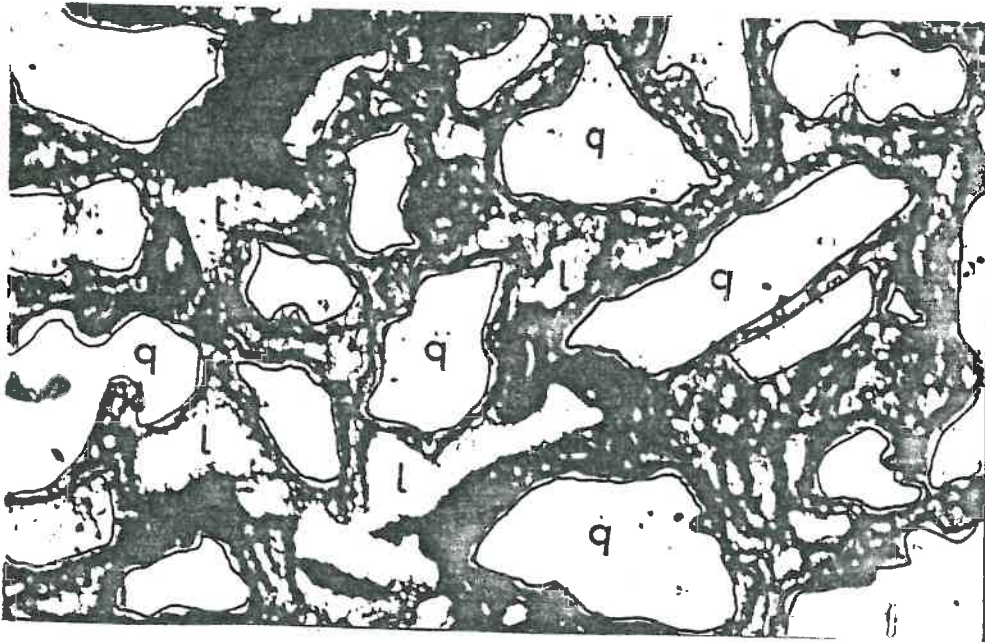
face perpendiculaire à l'axe du compactage



q quartz  
l lacune

200  $\mu\text{m}$

face parallèle



sens de la contrainte

fig. 19

COMPARAISON DES FACES PERPENDICULAIRE  
ET PARALLELE A L'AXE DU COMPACTAGE  
D'UN ECHANTILLON CONSOLIDE A  $10\text{KG}/\text{cm}^2$

#### IV-2.2. Essai d'interprétation des modifications observées.

D'après le modèle proposé en IV-1, il apparaît que les modifications des courbes d'intrusion de mercure consécutives au tassement peuvent être dues à des variations de volume des lacunes et(ou) de diamètres équivalents de pores d'intrusion (nommés dans la suite du texte "diamètres d'intrusion").

Nous ne pouvons, dans l'état actuel de nos connaissances, que formuler des hypothèses pour faire la part de ces deux mécanismes.

Un des raisonnements que l'on pourrait tenir serait le suivant :

On admettra qu'il y a indépendance entre le diamètre équivalent d'une lacune et le diamètre équivalent du pore y donnant accès lors de l'intrusion -et ce tout particulièrement dans les classes de diamètres d'intrusion dont le volume intrudé correspondant est susceptible d'être modifié par le tassement (60-7  $\mu\text{m}$ )-. On ne peut en effet préjuger des relations pouvant exister entre ces deux grandeurs. On pourra donc admettre que, dans chaque classe de diamètre d'intrusion, la variation de volume intrudé consécutive au tassement sera proportionnelle au volume intrudé initialement. Une fonction de répartition théorique des volumes intrudés a été calculée sur ces bases pour un échantillon consolidé et pour un échantillon tassé en non saturé dans les classes de diamètre d'intrusion comprises entre 60 et 7  $\mu\text{m}$ . Cette fonction de répartition a été comparée à la fonction de répartition réelle (Fig. 20 ).

Pour l'échantillon consolidé, les différences observées ne sont significatives que dans les 3 premières classes considérées (60, 45  $\mu\text{m}$ ), (45,35  $\mu\text{m}$ ), (35,30  $\mu\text{m}$ ). Les quantités de mercure intrudé réelles sont plus faibles que les quantités calculées dans les 2 premiers intervalles et plus élevées dans le 3e intervalle. On pourrait interpréter cela, soit par une réduction en nombre ou en taille des grands diamètres d'intrusion (60-35  $\mu\text{m}$ ), soit par une réorganisation des connexions entre lacunes rendant moins probable l'intrusion par ces grands diamètres.

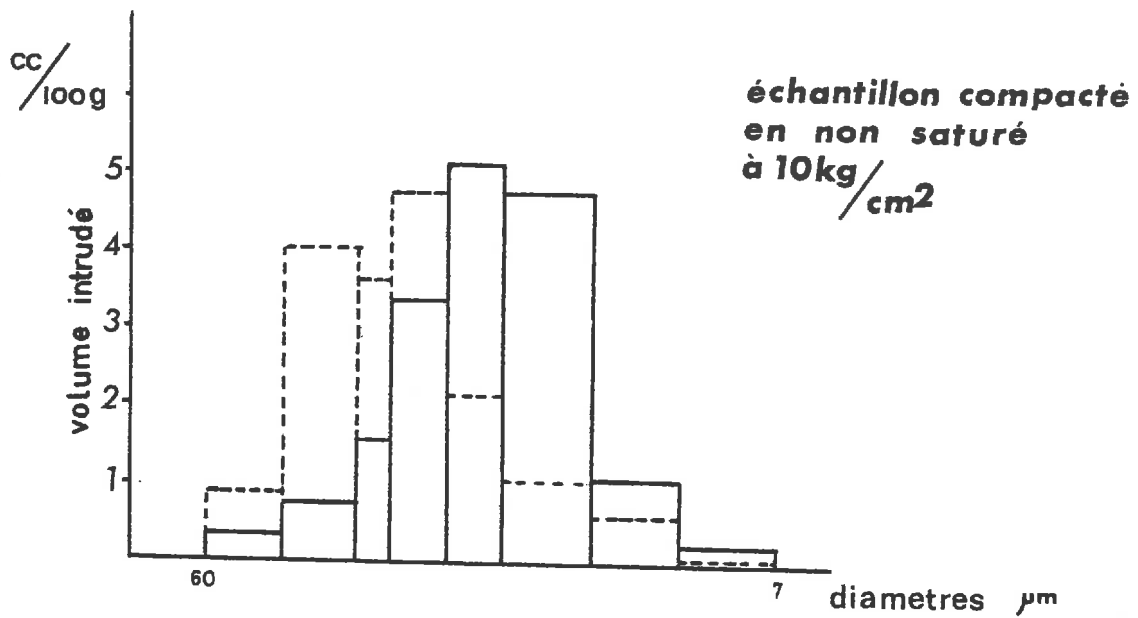
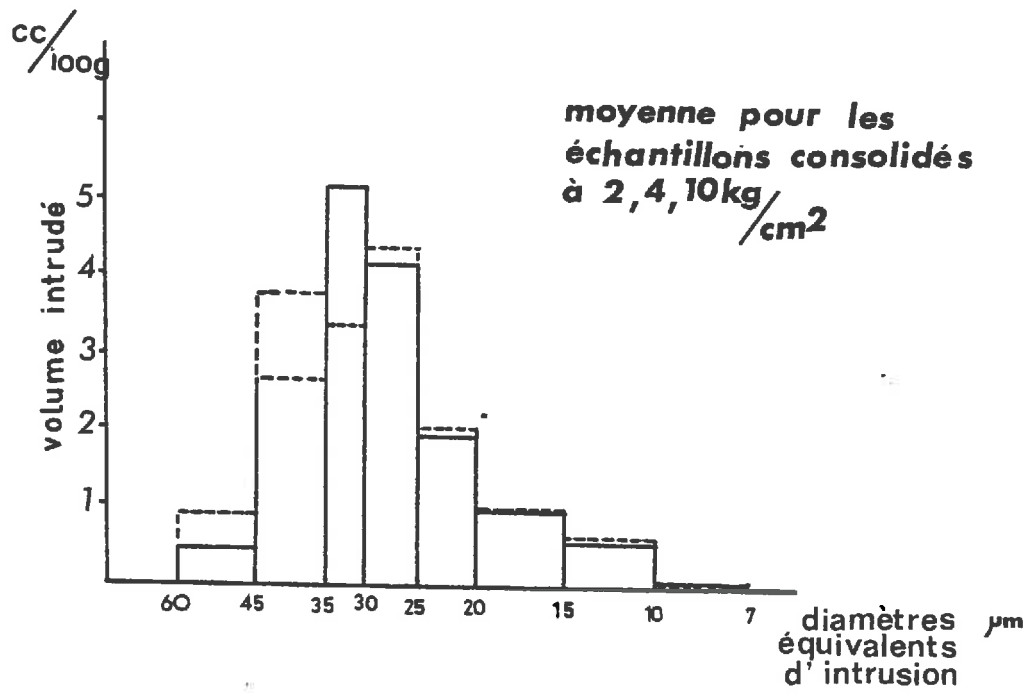
Pour l'échantillon tassé en non saturé, les différences entre fonction de répartition sont significatives dans toute la gamme de diamètres d'intrusion (60-7  $\mu\text{m}$ ). Les quantités de mercure intrudées dans les quatre premières classes de diamètre (couvrant la gamme 60  $\mu\text{m}$ -25  $\mu\text{m}$ ) sont plus faibles que celles calculées, alors que dans les quatre suivantes c'est le contraire. Il existe ici une forte probabilité pour que les diamètres d'intrusion aient été modifiés par le tassement. Ceci n'excluant en aucun cas une réorganisation des connexions entre lacunes.

# COMPARAISON DES FONCTIONS DE REPARTITION OBTENUES ET CALCULEES

— obtenues

----- calculées

fig 20



Cette démarche, fondée sur la confrontation d'observation morphologique et de mesures physiques, aurait nécessité l'acquisition de données supplémentaires infirmant ou confirmant certaines des hypothèses émises. Néanmoins, ce type de raisonnement montre que même pour un modèle très simple, il est nécessaire d'obtenir des données par différentes méthodes pour pouvoir simplement décrire des états différents et a fortiori interpréter des comportements.

## CONCLUSION.

L'étude expérimentale du comportement au compactage de l'assemblage des constituants élémentaires d'un matériau artificiel sablo-argileux a précisé les points suivants :

1) Le niveau de compacité résultant de l'organisation des constituants à des teneurs en eau inférieures à celle du point d'entrée d'air du matériau non tassé, a pu être sensiblement augmenté par un compactage à l'oedomètre. On a ainsi pu diminuer la teneur en eau au point d'entrée d'air. Cette augmentation de compacité, lors d'une stricte consolidation a été maximale pour des pressions de l'ordre de  $2 \text{ kg/cm}^2$ . En non saturé (pF3), une même amplitude de variation de compacité n'a pu être atteinte que pour des pressions de l'ordre de  $10 \text{ kg/cm}^2$ .

Cette augmentation de compacité se maintient après dessiccation. Les différences des caractéristiques de l'espace poral à l'état sec peuvent donc être imputées au compactage.

2) Un léger retrait a été observé lors de la dessiccation du matériau, aux très faibles teneurs en eau. Ce comportement, mis ici pour la première fois en évidence, est d'autant plus important qu'il a été également observé sur le matériau après compactage.

3) L'étude des modifications de l'espace poral a montré l'insuffisance des mesures de variations de volume massique pour l'analyse des conséquences d'un compactage, les caractéristiques de l'espace poral étant modifiées, différemment quand on augmente la compacité d'une même valeur dans des conditions différentes d'état hydrique. Nous ne pouvons actuellement fournir, ni une explication, ni même une description correcte de ces modifications, mais il est probable que la confrontation de résultats de porosimétrie au mercure (comprenant courbes d'intrusion et d'extrusion du mercure) et de l'examen de la morphologie du matériau permette de construire un modèle explicatif des variations notées.

4) Les quelques observations de sections polies du matériau rendent compte de l'apparition après consolidation puis retrait de la pâte argileuse, d'une anisotropie de la forme des lacunes. L'obtention expérimentale de tels traits morphologiques indicateurs du compactage pourrait fournir un outil d'investigation utile à l'observation de lames minces de sols naturels.

## BIBLIOGRAPHIE

- FAURE A., FIES J.C., 1972 - Etude expérimentale de la sensibilité à la compaction de matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. Ann. Agron., 23(3), 317-332.
- FAURE A., FIES J.C. ; MONNIER G. 1973 - Comportement des sols soumis au roulage. Rapport de la convention de recherche INRA EBF.
- FIES J.C., 1978 - Porosité du sol : Etude de son origine texturale. Thèse U.L.P. Strasbourg, 139 p.
- FIES J.C., STENGEL P., 1981 - Densité texturale des sols naturels : I. Méthode de mesure - II. Eléments d'interprétation. Agronomie 1(8) (sous presse).
- G. MONNIER et P. STENGEL 1976 - Rôle des propriétés d'origine texturale dans dans les processus d'organisation structurale des sols. Science du sol. Bulletin de l'AFES n°2.
- PINOCHET X. 1981 - Mémoire ENITA (sous presse).
- STENGEL P. 1981 - Etude expérimentale du retrait de mélanges argile - limon Agronomie 1(8) (sous presse).

A N N E X E S





## ANNEXES

### I PREPARATION D'ECHANTILLONS CONTINUS DESTINES AU COMPACTAGE.

#### I-1. Equilibres pF.

\* pF2,1 Le mélange a été introduit dans des entonnoirs cylindroconiques à plaques filtrantes pouvant supporter une succion de 0.2 bar. La succion était exercée par une colonne d'eau de 1.20 m en dessous des plaques filtrantes.

\* pF3 Le mélange a été déposé, sur une plaque filtrante, pouvant supporter une succion de 1 bar, dans des anneaux en plexiglass.

Le matériau a été déposé sur les plaques filtrantes moyennant plusieurs précautions :

- les parois de verre des entonnoirs et de plexiglass des anneaux ont été légèrement graissées afin d'empêcher l'apparition de fentes lors du retrait.

- le mélange a été tout d'abord étalé à la spatule en une couche de quelques millimètres d'épaisseur sur une plaque de verre. Cette manière de procéder supprimait les bulles d'air. Le mélange était repris à la spatule et déposé sur la plaque filtrante en évitant toute nouvelle création de bulles.

Les équilibres étaient atteints après plusieurs jours.

#### I-2. Préparation de cylindres pour passage à l'oedomètre.

Dans les préparations à l'équilibre, nous avons enfoncé des anneaux métalliques définissant des volumes cylindriques, puis le mélange a été décollé de la plaque filtrante et les faces du cylindre arasées à l'aide d'une règle métallique. Dans le mélange en excès, deux prélèvements étaient effectués pour mesure de la teneur en eau massique.

### II MESURES DE VOLUME.

Nous avons eu recours à deux types de méthodes :

- des mesures directes au pied à coulisse et au comparateur,
- des mesures utilisant la poussée d'Archimède.

## II-1. Méthode directe.

Elle ne s'applique qu'à des volumes bien définis tels que les cylindres préparés pour l'oedomètre. Cette méthode nous a permis de mesurer les volumes des échantillons avant et après compactage.

### II-1.1. Etat initial.

Pour connaître le volume des cylindres, nous avons effectué des séries de mesures au pied à coulisse sur les anneaux utilisés (diamètre 7 cm et hauteur 2,4 cm, soit un volume approximatif de 92.4 cm<sup>3</sup>). L'imprécision théorique sur le volume massique obtenu était de  $5 \cdot 10^{-3}$  mais en pratique il était difficile d'araser les faces du cylindre de façon parfaite. Néanmoins, la bonne concordance des valeurs d'humidité et de volume massique avec la courbe de saturation laisse penser que ces mesures étaient correctes.

### II-1.2. Etat final après compactage.

Pendant le compactage, l'enfoncement du piston était suivi grâce à un comparateur mesurant des déplacements au 1/100e de millimètre. Connaissant le diamètre de l'anneau, il était possible de calculer la diminution de volume qu'avait subi l'échantillon.

Il est important de noter que la valeur obtenue était une valeur sous charge.

## II-2. Méthode utilisant la poussée d'Archimède.

Pour d'une part vérifier les mesures directes et d'autre part mesurer les variations de volume lors du retrait, il s'est avéré nécessaire d'utiliser des méthodes qui consistent à mesurer la poussée hydrostatique induite lors de l'immersion d'un échantillon dans un liquide de densité connue.

Le problème posé par ces méthodes est la définition des limites du volume que l'on cherche à mesurer. Il existe des méthodes consistant soit à saturer au préalable les échantillons par le liquide d'immersion (méthode au pétrole, FIES-STENGEL, 1981), soit à imperméabiliser l'échantillon par un enrobage de vernis, paraffine, ...

Les deux méthodes au pétrole et à la paraffine s'étant révélées inopérantes, nous avons mis au point une méthode d'enrobage à la cire d'abeille. Celle-ci a été dissoute dans du benzène ; ce solvant possède les avantages d'être inerte vis-à-vis des argiles, de ne pas modifier la cohésion de l'échantillon, et d'être très volatil, ce qui permet un enrobage rapide, d'échantillons humides ou secs.

La mesure de poussée d'Archimède se fait dans l'eau.

### III-2-1 Détail des manipulations

-préparation du liquide imperméabilisant

La cire est dissoute, dans du benzène après avoir été fondue.

Une concentration de 100 g/l s'est révélée adéquate.

La solution obtenue reste liquide au dessus de 40°C ;

-mesure de la poussée hydrostatique dans l'eau.

Nous avons négligé le volume de la cire et celui du fil.

-mesure de la teneur en eau massique.

Elle est mesurée sur aliquote.

### III-2-2 Précision des résultats

La fiabilité de la méthode à tout d'abord été testée sur des échantillons secs d'un matériau sablo-argileux à 20 % d'argile. Pour 14 mesures, le volume massique moyen calculé à été de 0,6603 avec un écart type de 0,0027.

Nous avons par ailleurs testé l'imprécision apportée par l'enrobage de cire :

- sur de gros échantillons de notre mélange (70 cm<sup>3</sup>) un volume massique moyen de 0,624 a été mesuré (6 mesures) et comparé au volume massique sur petits échantillons (10 cm<sup>3</sup>). Leur volume massique moyen était de 0,6296 avec un écart type de 0,0113. Les 2 valeurs obtenues ne sont pas significativement différentes.

- sur un petit échantillon un enrobage supplémentaire de cire ne provoquait pas d'augmentation du volume massique.

Enfin, des mesures au pied à coulisse sur le même matériau donnait comme résultat un volume massique de 0,6396 avec un écart type de 0,0154 (6 mesures). Cet ensemble de résultats nous a conduit à retenir la méthode à la cire pour la mesure de volume massique de nos échantillons.

### III POROSIMETRIE A MERCURE

La porosimétrie à mercure permet de caractériser l'espace poral d'un matériau par des mesures de volumes de mercure intrudé dans ce matériau à différentes pressions.

Les mesures de volume intrudé peuvent se faire lors de l'intrusion ou de l'extrusion du mercure.

On peut calculer à chaque pression un diamètre d'intrusion équivalent suivant la loi de Jurin.

$$p = \frac{-4 \gamma \cos \theta}{d}$$

P pression appliquée,  $\gamma$  et  $\theta$  respectivement tension superficielle et angle de raccordement du mercure dans l'échantillon, d diamètre équivalent.

Nous avons choisi  $\gamma = 484 \text{ dynes.cm}^{-1}$  et  $\theta = 130^\circ$ , P étant exprimé en mégapascals (MPa).

La porosimétrie utilisé était de marque Micromeritics.

Il comprenait 2 chambres de mesures, l'une pour les hautes pressions, l'autre pour les basses pressions. L'obtention d'une courbe complète nécessitait donc le traitement de 2 échantillons.

Le volume des cellules de mesure utilisées était de  $5 \text{ cm}^3$  pour un volume de mercure intrudable de  $1,8 \text{ cm}^3$ .

La gamme des pressions utilisées à été :

- en basse pression  $6,6 \cdot 10^{-6}$  à  $0,16 \text{ MPa}$
- en haute pression  $0,1$  à  $206 \text{ MPa}$

En haute pression l'appareil possède une résolution de  $7 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$  et une précision correspondant à 2 % de la valeur lue.

En basse pression la résolution est de  $7 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}$  et la précision de  $0,2 \text{ MPa}$ .

La précision sur le volume de mercure intrudé était de  $0,05 \text{ cm}^3$ .