

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE

AGRONOMIQUE DE RENNES

Université de RENNES

U.E.R. des Sciences Biologiques

INSTITUT NATIONAL DE LA

RECHERCHE AGRONOMIQUE

Station de Science du Sol

d'AVIGNON

6
M29
TH6F5

TASSEMENT TEXTURAL :
ETUDE EXPERIMENTALE SUR UN MATERIAU LIMONEUX
DES MODIFICATIONS DE L'ESPACE PORAL CONSECUTIVES
A L'APPLICATION D'UNE PRESSION ET A LA REALISATION
DE CYCLES D'HUMECTATION-DESSICCATION

S D S 310

Octobre 1983

Olivier TOURET



0-2
1-1

1-1

AVANT-PROPOS

Ce mémoire a été réalisé à la Station de Science du Sol de l'I.N.R.A. d'AVIGNON, dans le cadre de l'option de pédologie de l'E.N.S.A. de RENNES dirigée par C. CHEVERRY.

Je remercie Monsieur MONNIER pour l'accueil qu'il m'a réservé, ainsi que J.C. FIES qui a dirigé ce travail et Cl. JEANDET dont la collaboration technique fut précieuse.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes de la Station pour l'aide qu'elles m'ont apportée dans mon travail.

INTRODUCTION.

I. MATERIEL ET METHODES.

I.1. CHOIX ET DESCRIPTION DES MATERIAUX UTILISES.

I.2. PREPARATION DES MATERIAUX.

- a) Préparation du mélange binaire
- b) Préparation de la terre de Boigneville
- c) Dessiccation.

I.3. CARACTERISATION DES ECHANTILLONS.

- a) Mesure de densité sur petits agrégats
- b) Porosimétrie au Mercure.

I.4. TRAITEMENT DES MATERIAUX.

- a) Etat de référence
- b) Compactage des échantillons

I.5. DESCRIPTION DU MODE D'HUMECTATION-DESSICCATION.

- a) Choix des points de mesure
- b) Réhumectation des agrégats
- c) Déshydratation.

II. RESULTATS CONCERNANT LE MATERIAU NATUREL REMANIE (Boigneville).

II.1. PRESENTATION DES COURBES CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS DE REFERENCE.

- a) La courbe de retrait
- b) La courbe de porosimétrie au mercure.

II.2. COMPORTEMENT DU MATERIAU NATUREL AU COMPACTAGE.

II.2.1. Modification de la courbe de retrait.

- a) Compactage en saturé
- b) Compactage en non saturé

II.2.2. Modification de la courbe d'intrusion de mercure.

II.3. ETUDE DE LA REVERSIBILITE DU COMPACTAGE.

II.3.1. Présentation des résultats

- a) Mesures de densité et de teneur en eau
- b) Courbes porosimétriques.

II.3.2. Discussion.

III. RESULTATS CONCERNANT LE MELANGE BINAIRE.

III.1. MESURES DE DENSITE.

III.2. POROSIMETRIE AU MERCURE.

III.3. DISCUSSION.

III.3.1. Rôle de l'argile.

- a) Caractéristiques propres à la phase argileuse
- b) Comparaison avec un matériau argilo-sableux
- c) Confrontation avec d'autres matériaux.

III.3.2. Rôle du squelette.

- a) Forme et minéralogie
- b) Etalement de la granulométrie

III.3.3. Le retrait résiduel indice de la sensibilité au tassement ?

III.4. PROPOSITIONS D'EXPERIENCES COMPLEMENTAIRES.

CONCLUSION.

ANNEXE.

INTRODUCTION.

La porosité totale d'un sol peut se subdiviser en deux parties (STENGEL, 1979) :

- la porosité structurale, due à l'action de facteurs externes (climatiques, biologiques, mécaniques) sur le sol,
- la porosité texturale, liée à l'assemblage des particules élémentaires du sol.

Les études faites précédemment par la Station de Science du Sol d'AVIGNON montrent que l'application d'une pression sur un sol peut avoir différents effets : (convention I.N.R.A.-E.D.F. 73, recherche et environnement 82)

- Un tassement structural qui n'affecte que la porosité structurale. On constate que, sous l'effet du travail du sol, le phénomène est réversible.

- Un tassement textural consécutif à une modification de l'assemblage élémentaire qui devient plus dense. Ce phénomène paraît difficilement réversible puisque, même après plusieurs années de travail du sol, la densité texturale, aux endroits compactés, reste supérieure à celle mesurée pour le sol intact. Ce type de tassement, à travers les limitations qu'il peut entraîner sur le drainage interne, la profondeur et la densité d'enracinement, risque d'avoir des conséquences agronomiques non négligeables.

Ce mémoire constitue une première approche des conditions d'existence et de réversibilité du tassement textural sur des matériaux à squelette limoneux et à teneur en argile inférieure à 30 %. Ce problème est apparu lors d'une étude I.N.R.A.-E.D.F. (1973, 1982) où il s'est avéré que l'on pouvait déterminer des plages de texture à fort risque de tassement textural.

Mais ce moyen de prévision reste insuffisant car il s'agit simplement d'une enquête qui sépare grossièrement les sols sensibles et non sensibles au tassement en conditions naturelles. Ce type de classement ne permet de prendre en compte que 80 à 100 % des cas étudiés et surtout, ne définit ni les conditions de réalisation d'un tassement textural, ni l'intensité de ce dernier lorsqu'il se produit. D'autre part, ce rapport ne décrit pas les modifications que subit l'espace poral et n'aborde pas les mécanismes éventuels de la réversibilité d'un tassement textural.

Pour comprendre les phénomènes et essayer d'établir des lois générales, il faut maîtriser :

- les modalités d'application de la contrainte ainsi que son intensité,
- l'état du matériau auquel on applique cette contrainte (état hydrique, structuration),
- les facteurs permettant une récupération du tassement textural.

Ces questions ne peuvent être abordées, dans un premier temps, que par voie expérimentale car l'hétérogénéité de la distribution de facteurs tels que l'état structural, la composition granulométrique, l'état hydrique ainsi que les problèmes que pose le contrôle de l'application de la contrainte, sont beaucoup trop grands in-situ pour pouvoir être contrôlés.

Nous avons choisi d'étudier l'influence qu'a l'état hydrique d'un matériau de composition et structure connues, auquel on applique une pression connue sur la réalisation d'un tassement textural. Puis nous étudions les possibilités de récupération du tassement obtenu.

Ceci correspond à deux grandes séries d'expériences :

- Soumettre des échantillons de matériaux choisis et remaniés par malaxage humide à des compactages.

Nous utilisons des matériaux remaniés de façon à obtenir des échantillons homogènes et dont l'état structural initial soit identique.

Le choix des matériaux, guidé par les conclusions du rapport I.N.R.A.-E.D.F., est exposé dans la suite (I.1.).

Pour réaliser les compactages, nous travaillons sur des cylindres prélevés à des humidités choisies auxquels on applique une pression connue dans un oedomètre.

On contrôle ensuite la réalisation du tassement par des mesures de densité en comparant les échantillons traités aux échantillons de référence.

- Juger des possibilités de récupération du tassement textural.

On étudie l'action de cycles d'humectation-dessiccation réalisés sur des agrégats provenant des cylindres traités ou non traités. On suit l'évolution des agrégats par des mesures de densité.

Nous avons choisi de travailler sur des agrégats (tamisés de 2 à 3,15 mm) pour éviter les problèmes de gradient hydrique que l'on observe lorsque l'on réhumecte de gros échantillons.

Enfin, pour évaluer en particulier les modifications que subissent le diamètre des seuils et le volume des pores sous l'effet des différents traitements, on utilise des mesures de porosimétrie au mercure.

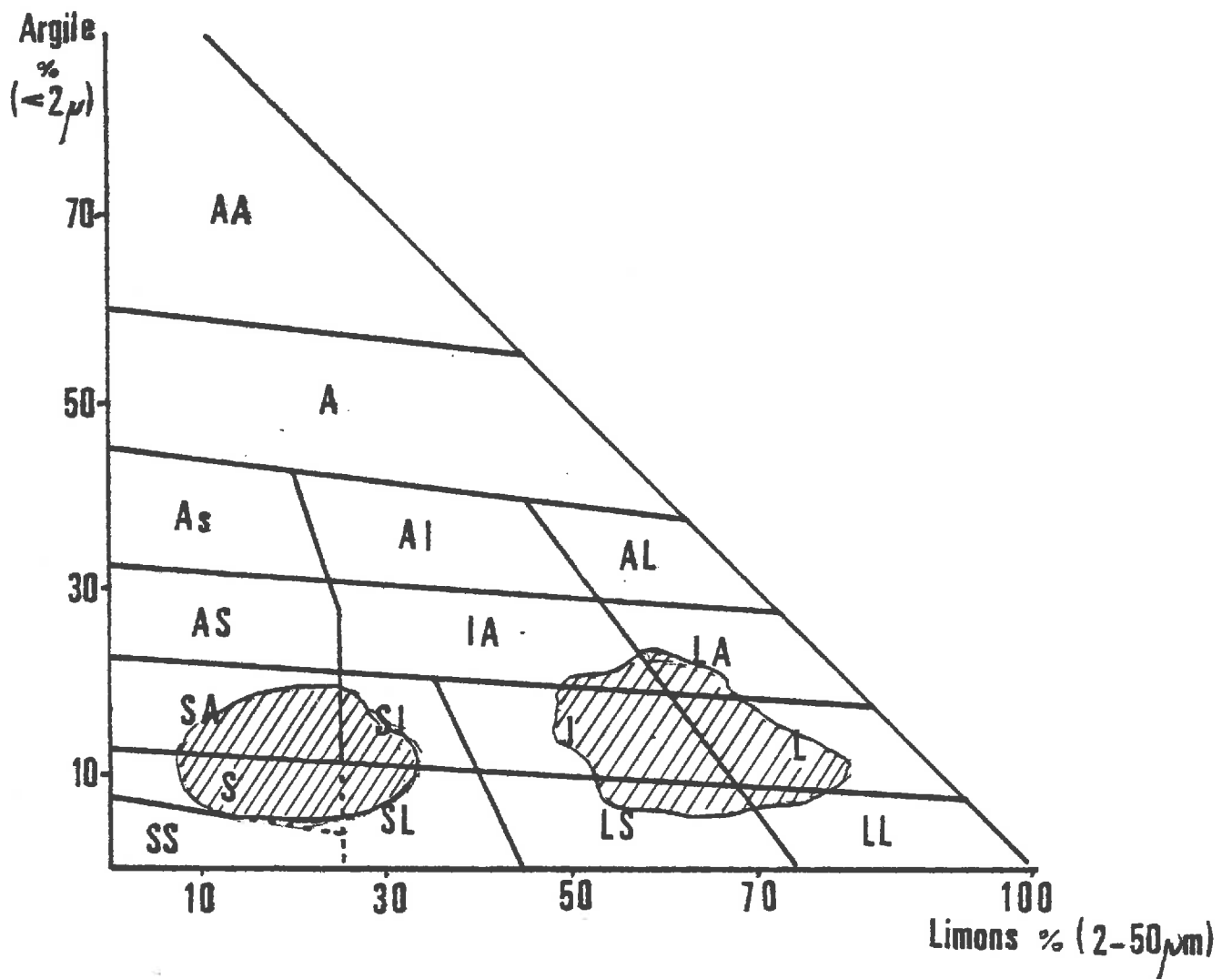


Figure 1 : Textures sensibles au tassement textural d'après la convention I.N.R.A.-E.D.F., 1973.

Le triangle de texture est extrait du profil cultural, 1969.

	Argile	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200-2000 μ	M.O
Boigneville	25,5 %	29,9 %	35,6 %	6,9 %	2,1 %	13,6 %.
Mélange Binaire	18,6 %	-	81,4 %	-	-	-

Tableau 1 : Granulométrie de la terre de Boigneville L₂ 5-30 et du mélange

binaire A/L.

I. MATERIEL ET METHODE.

I.1. CHOIX ET DESCRIPTION DES MATERIAUX UTILISES.

En reportant les résultats de l'étude entreprise pour l'E.D.F. dans un triangle de texture, on délimite deux zones de constitution granulométrique susceptibles de subir un tassement textural (fig. 1). Il faut noter qu'il s'agit seulement d'une indication car les limites de ces plages sont très floues. Nous avons néanmoins utilisé ce triangle pour choisir deux matériaux limoneux, contenant tous deux des argiles gonflantes. Le choix de matériaux limoneux, au lieu de matériaux sableux, s'explique par le fait que nous possédons déjà des résultats sur ces derniers grâce aux travaux de ZIMMER (1981).

Nous pourrions ainsi compléter des travaux déjà existants. Les deux matériaux choisis diffèrent par l'étalement de leur granulométrie et leur mode de préparation, une des argiles étant simplement remaniée alors que l'autre a été dispersée, puis flocculée. Par contre, les deux squelettes ont des caractéristiques minéralogiques et morphologiques voisines.

Ce sont :

- un matériau naturel extrait d'un horizon non travaillé d'un sol limoneux (BOIGNEVILLE). Il a été prélevé de 5 à 30 cm de profondeur. Son taux de matières organiques et sa granulométrie sont donnés au tableau 1. La phase argileuse contient 40 % de smectites.

- un mélange binaire composé :

- d'une argile extraite d'un sol argileux (LES VIGNERES) par centrifugation et rendue calcique. Cette argile contient principalement de la montmorillonite et de la chlorite ainsi qu'un peu de kaolinite et d'illite (ZIMMER, 1981),
- d'un limon extrait par sédimentation entre 20 et 50 μm (limon de la SARTHE).

On choisit a priori un mélange binaire pour obtenir des courbes d'intrusion de mercure où les phases d'intrusion s'individualisent bien de façon à ce qu'elles soient facilement interprétables (FIES-ZIMMER, 1981).

I.2. PREPARATION DES MATERIAUX.

a) Préparation du mélange binaire.

On mélange l'argile à 155 % d'humidité pondérale au limon sec par malaxage à la main. Le mélange final est à 40 % d'humidité pondérale.

b) Préparation de la terre de Boigneville.

Après l'avoir tamisée à 2 mm, on remanie la terre dans un excès d'eau par malaxage à la main durant une dizaine de minutes, ce malaxage est répété après un repos de 24h (KHEYRABI, 1968).

Pour connaître la quantité d'eau à apporter, on calcule l'humidité équivalente (H_e) grâce à la formule de GRAS et on multiplie le résultat trouvé par le coefficient 1,9 (KHEYRABI-MONNIER, 1968).

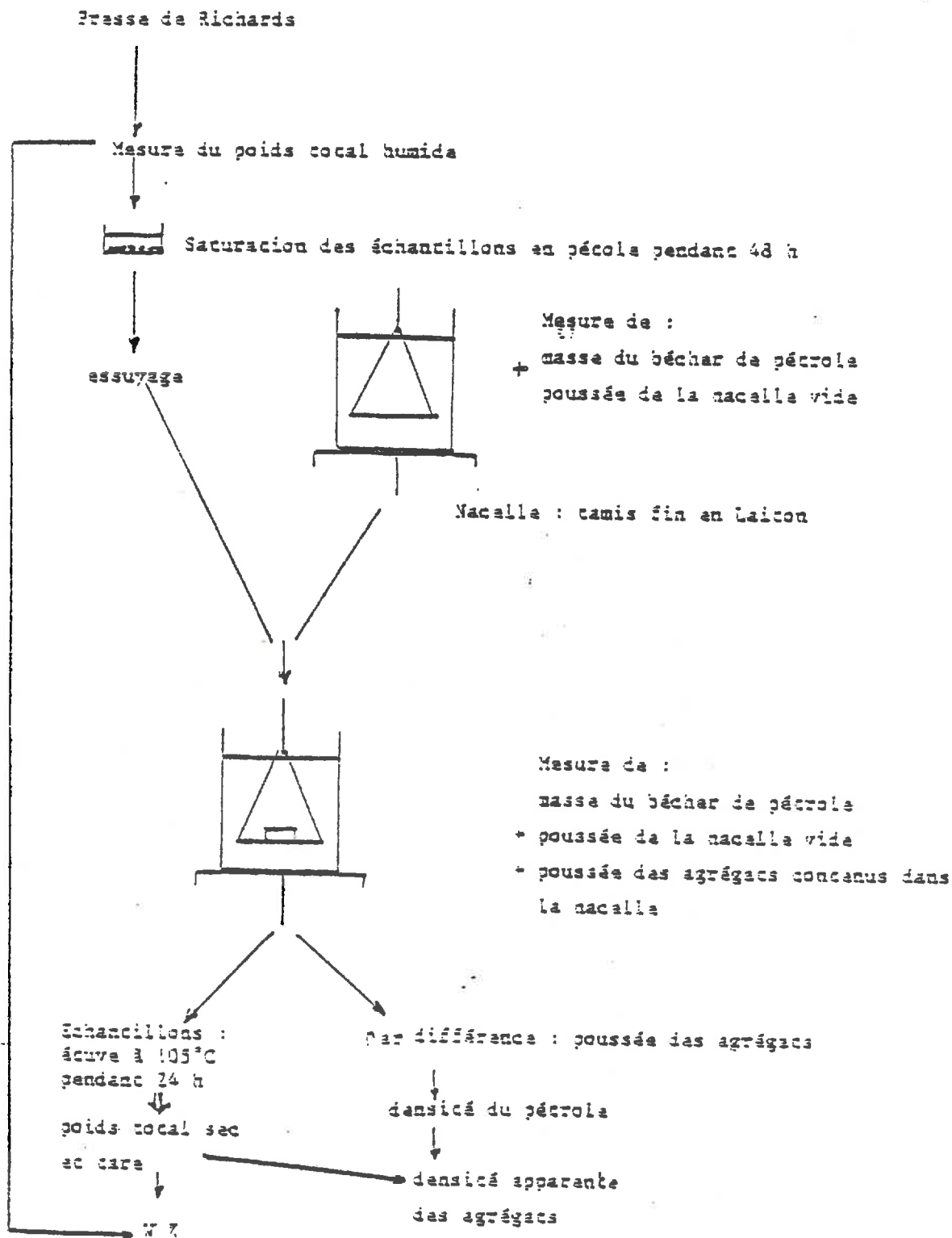


Fig. 2 : Schéma des étapes de la mesure de densité apparente des agrégats par la méthode de poussée hydroscatique dans le pétrole. (d'après PINOCHET, 1981)

c) Dessiccation.

Dans les deux cas, le matériau est placé dans un moule cylindrique

- soit sur un Buchner où on lui applique une succion de 0,14 bar,
- soit dans une presse Richard, si on veut obtenir une succion plus importante.

La mise à l'équilibre dure deux jours.

I.3. CARACTERISATION DES ECHANTILLONS.

On effectue essentiellement des mesures de densité et des courbes porosimétriques. Les mesures de densité sur échantillons humides permettent en particulier de définir les courbes de retrait.

a) Mesure de la densité sur petits agrégats.

Nous utilisons la méthode de la poussée hydrostatique, dans le pétrole, d'agrégats précédemment saturés dans le même liquide (FIES-STENGEL, 1981).

Le principe de la méthode est donné par la figure 2.

b) Porosimétrie au mercure.

On introduit du mercure sous pression dans un échantillon. La méthode permet, à une pression donnée, de mesurer le volume de mercure contenu dans l'échantillon. Cette pression est transformée en diamètre équivalent par la loi de JURIN-LAPLACE.

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

P : pression appliquée en MPa

γ : tension superficielle du mercure dans l'échantillon

Ici $\gamma = 0,484 \text{ N.m}^{-1}$

θ : angle de raccordement du mercure dans l'échantillon $\theta = 130^\circ$

Les agrégats que l'on étudie par porosimétrie au mercure sont d'abord desséchés à l'air puis à l'étuve à 105°C. En effet, aucune conclusion certaine n'a encore été tirée sur l'efficacité des techniques de déshydratation, sans modification de l'organisation, d'échantillons humides (Lyophilisation, passage au point critique).

I.4. TRAITEMENT DES MATERIAUX.

a) Etat de référence.

Dans le cylindre de matériau amené à 0,14 bar de succion, on prélève un cylindre plus petit à l'aide d'un anneau cedométrique. On laisse ensuite sécher ce cylindre pendant 2 jours à l'air et 3 sous gel de Silice.

On le fractionne ensuite précautionneusement (pour éviter de fabriquer trop de terre fine), en agrégats à l'aide d'un pilon. Les agrégats sont tamisés de 2 à 3,15 mm puis placés pendant deux jours sous gel de Silice. Ils sont ensuite conservés dans une boîte hermétique.

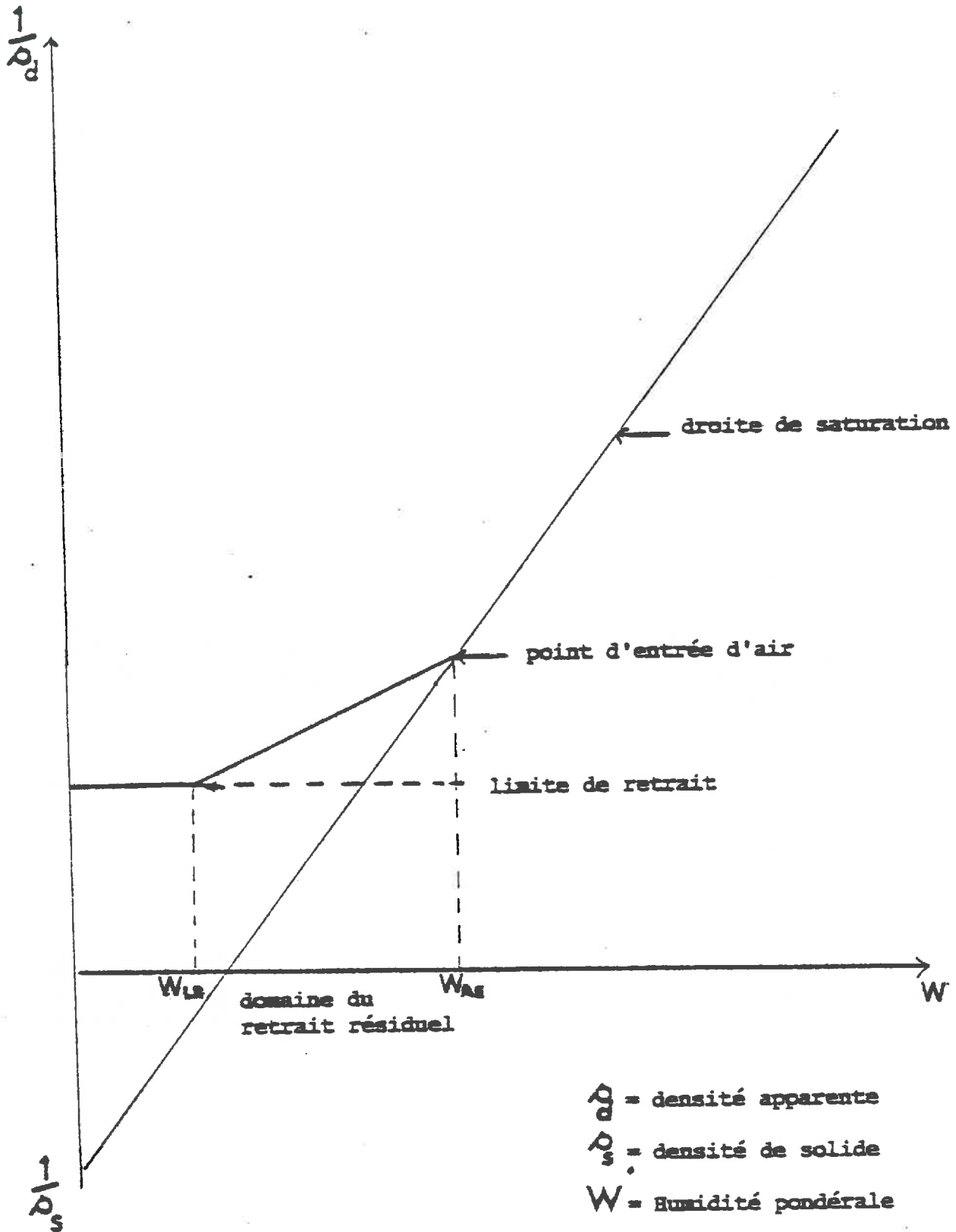


Figure 6 : Éléments caractéristiques d'une courbe de retrait obtenue par dessiccation d'un matériau remanié.

b) Compactage des échantillons.

Notre but étant de préparer deux séries d'échantillons correspondant à des compactages en saturé et non saturé, il était nécessaire de déterminer à l'avance les teneurs en eau des échantillons lors de l'application de la charge.

Pour ce faire, nous avons établi pour chaque matériau les relations volume massique-teneur en eau et potentiel hydrique-teneur en eau en amenant à l'aide d'anneaux cylindriques, d'un diamètre de 4 cm et d'une hauteur de 1 cm, des échantillons que nous appellerons par la suite pastilles, à différents potentiels. Nous avons vérifié par la suite que les valeurs trouvées sur pastilles n'étaient pas significativement différentes de celles trouvées sur agrégats et que les valeurs obtenues par équilibre de potentiel étaient comparables à celles obtenues par dessiccation (STENGEL, 1981) Figures 3, 4, 5. On peut d'ailleurs remarquer que le type de courbe que nous obtenons correspond bien à celui prévu par cet auteur.

Pour comprendre l'utilisation que nous faisons des courbes de retrait, il est nécessaire de décrire l'allure générale d'une courbe. Ce type de courbe relie le volume massique textural des agrégats ($1/\rho_d$) à leur humidité pondérale (W).

La figure 6 donne l'allure générale d'une courbe de retrait, ainsi que la position des points caractéristiques : point d'entrée d'air et limite de retrait. Il faut noter que nous établissons ce type de courbe lors de la première dessiccation du matériau.

La droite de saturation théorique est tracée grâce à son équation

$$1/\rho_d = \frac{1}{\rho_s} + \frac{W}{100} \quad (\text{HAINES, 1923})$$

ρ_d : densité apparente

ρ_s : densité de solide

W : humidité pondérale en %

On peut aussi préciser les états physiques par lesquels passe un échantillon lors de son retrait.

La première partie de la courbe (la droite de saturation) est décrite lorsque le volume total est égal à la somme des volumes de solide et d'eau. Sur cette droite, la diminution de volume de l'échantillon correspond au volume de l'eau perdue.

Ensuite, dès qu'il y a entrée d'air dans le matériau (au point d'entrée d'air) la perte d'eau ne se traduit plus par une perte de volume équivalent. On est alors dans le domaine du retrait résiduel. Ce retrait se poursuit jusqu'à un point (la limite de retrait) où le volume de l'échantillon devient constant. Ce point marquerait l'entrée de l'air dans la phase argileuse (STENGEL, 1981).

Nous avons ainsi déterminé à quel potentiel il était nécessaire d'amener chaque matériau pour obtenir :

- un compactage en saturé débutant au niveau du point d'entrée d'air,
- un compactage en non-saturé sachant que la teneur en eau de l'échantillon lors de l'application de la charge doit correspondre à une succion inférieure à 15 bar de façon à ne pas atteindre la limite de retrait et à rester dans des conditions favorables au tassement.

Le matériau est amené au potentiel choisi par un des deux dispositifs cités en L.2. On prélève un échantillon grâce à un anneau œdométrique que l'on place dans la cellule œdométrique (fig. 7).

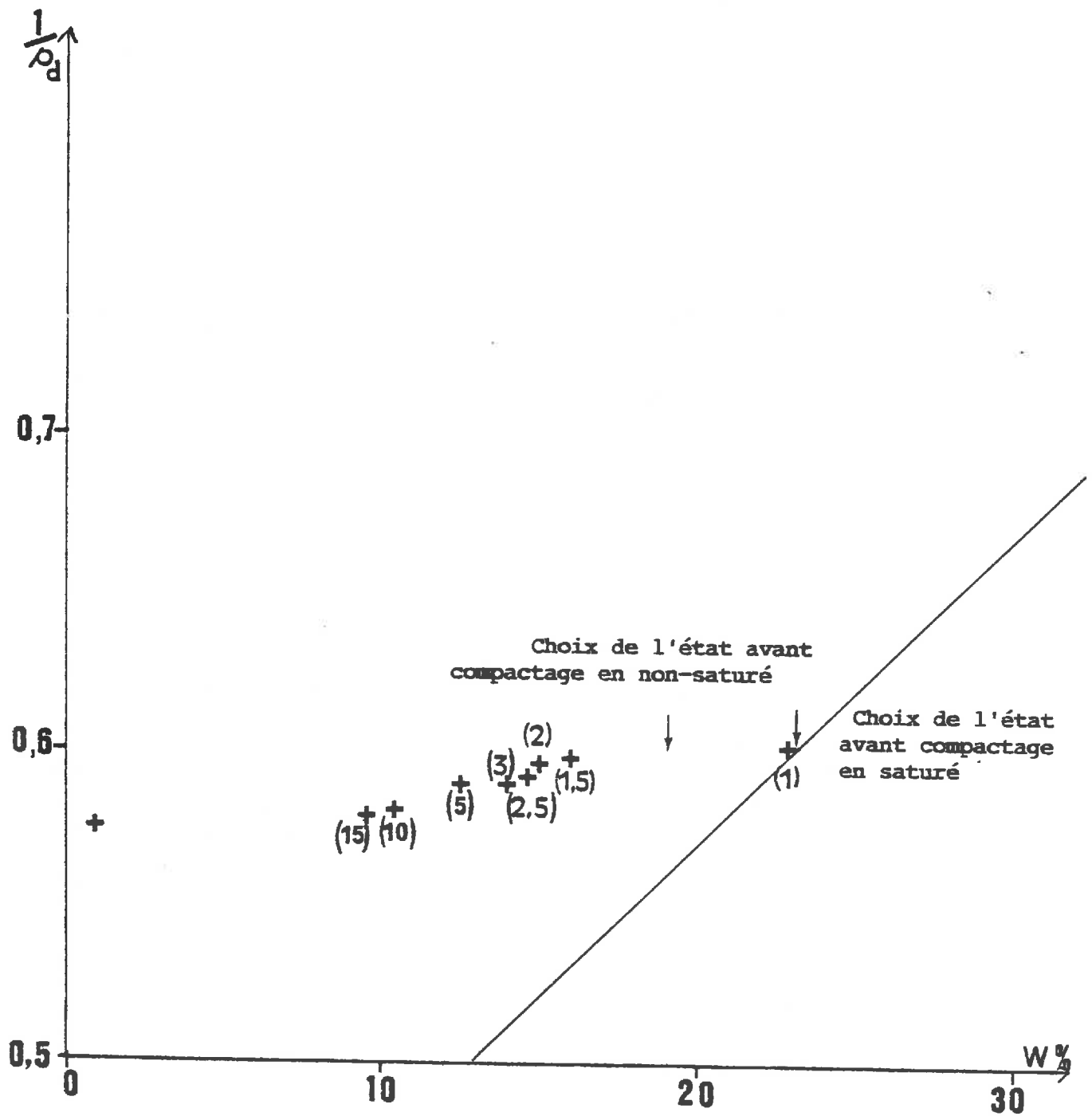


Figure 3 : Courbe de retrait par équilibre de potentiel sur pastilles de Boigneville L₂ 5-30.

En paramètre : valeur absolue du potentiel en bar
(chaque point est la moyenne de 5 mesures).

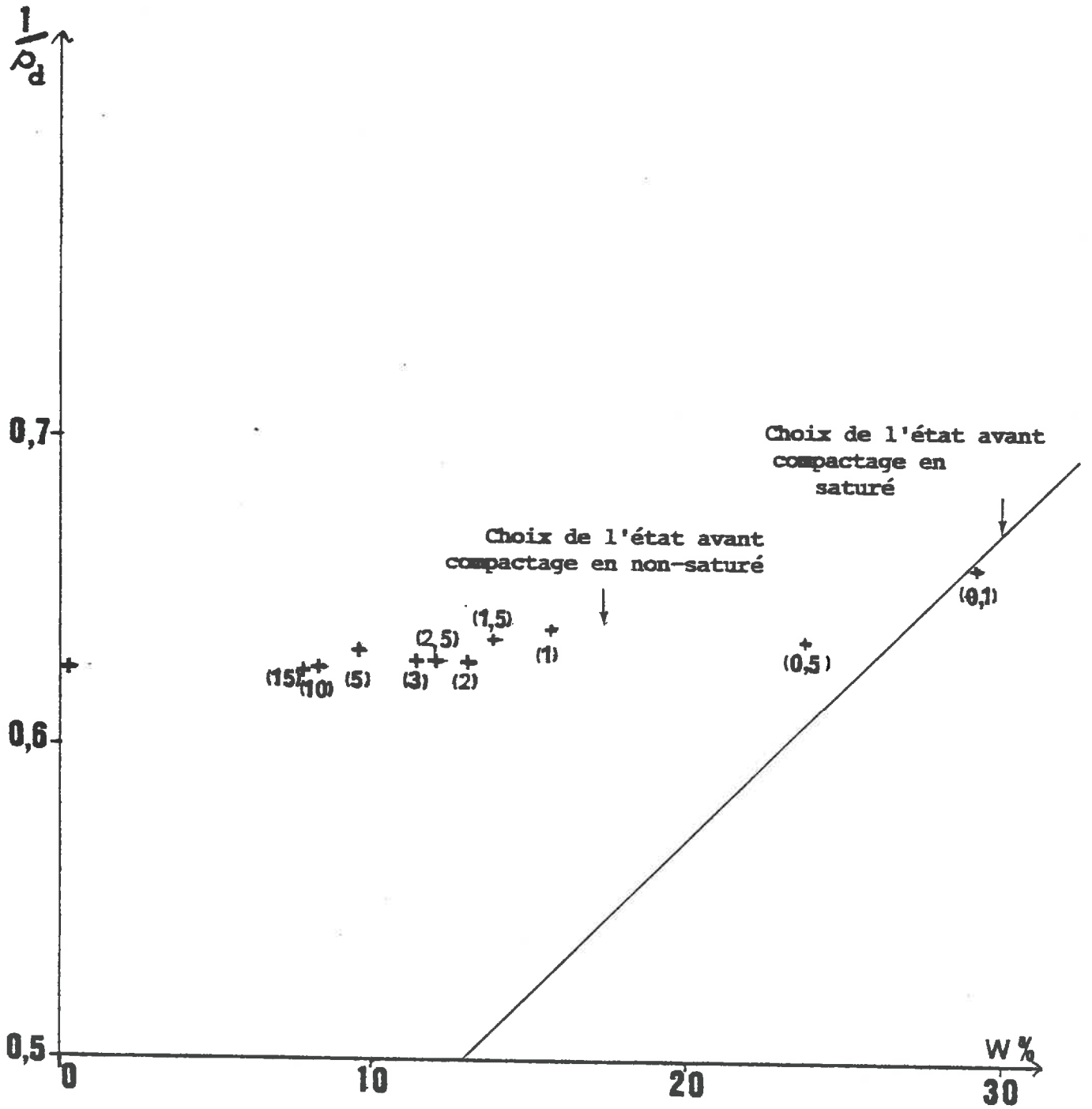


Figure 4 : Courbe de retrait par équilibre de potentiel sur pastilles du mélange binaire.

En paramètre : valeur absolue du potentiel en bar
(chaque point est la moyenne de 5 mesures).

• materiau naturel
x " " artificiel

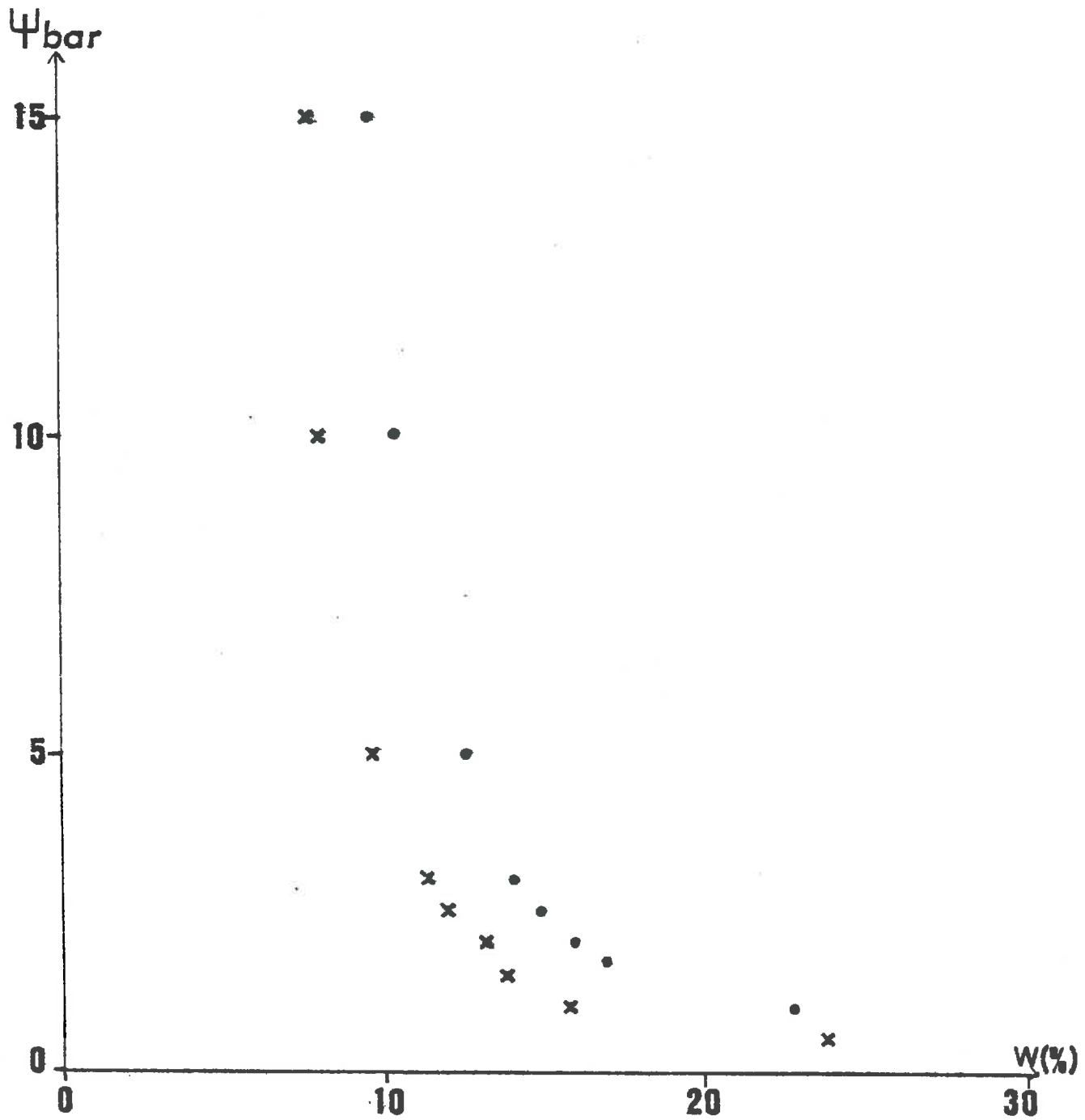


Figure 5 : Courbe valeur absolue du potentiel (ψ)-teneur en eau pondérale (W).

(Chaque point correspond à la moyenne de 5 mesures).

On applique ensuite une pression de 15 bar que l'on relâche et réapplique environ toutes les deux heures pendant deux jours. Ce mode d'application de la charge permet d'obtenir un tassement accru par rapport à la même charge appliquée en une seule fois (ZIMMER, 1981).

On fait ensuite subir à l'échantillon l'histoire de séchage et de fractionnement que nous avons définie précédemment.

I.4. DESCRIPTION DU MODE D'HUMECTATION-DESSICCATION.

a) Choix des points de mesure.

Nous avons choisi de nous placer dans la gamme des teneurs en eau extrêmes. C'est-à-dire, d'effectuer une mesure lorsque les agrégats sont hydratés sous une très faible succion et une autre lorsqu'ils ont été séchés sous gel de Silice.

Pour chaque série de cycles d'humectation-dessiccation, on juge de l'existence d'une évolution en comparant les valeurs obtenues sur les échantillons soumis au compactage par rapport à celles obtenues sur des échantillons de référence qui subissent la même histoire hydrique.

La longueur des manipulations excluait la possibilité de suivre l'évolution de la teneur en eau pour différents potentiels hydriques dans les agrégats compactés et non-compactés. Cette expérience doit constituer une suite logique de ce mémoire.

b) Réhumectation des agrégats.

L'objectif de la phase de réhumectation est d'amener les agrégats à un état d'hydratation maximum et donc à un potentiel de l'eau le plus faible possible.

Pour cela, nous avons utilisé le dispositif schématisé à la figure 8.

Il est composé d'une enceinte en verre contenant dans sa partie inférieure de l'eau permutée dégazée. Au-dessus se trouve une plaque poreuse recouverte d'un tissu en coton qui sert de mèche. On dispose sur cette plaque des morceaux de papier filtre sur lesquels on étale une monocouche d'environ 2 g d'agrégats. Puis on établit rapidement un vide d'environ 500 mm de Hg de façon à éviter un éclatement dû à une surpression d'air à l'intérieur des agrégats.

On ne peut placer les agrégats à un potentiel nul car la formation de ménisques entre les agrégats et le support fausse les mesures. L'application d'une faible succion de 3 mb (PINOCHET, 1981) permet de résoudre ce problème et d'éliminer les risques de perte de cohésion des agrégats.

Toutefois, il faut noter que si les agrégats sont suffisamment manipulables pour qu'on puisse évaluer leur humidité, il s'est avéré impossible d'effectuer des mesures de densité apparente.

Nous avons résolu ce problème en prenant, pour chaque mesure correspondant à un état d'hydratation maximum, un échantillon sur lequel on fait une mesure d'humidité pondérale. Cette mesure permet d'évaluer en quel point de la droite de saturation nous nous trouvons. Pour vérifier que nous parcourons toujours la droite de saturation, on prélève au même moment un échantillon que l'on place dans un Buchner soumis à 10 cm de succion. Après 24 h d'équilibre, les agrégats sont suffisamment cohérents pour que l'on puisse effectuer la mesure de densité.

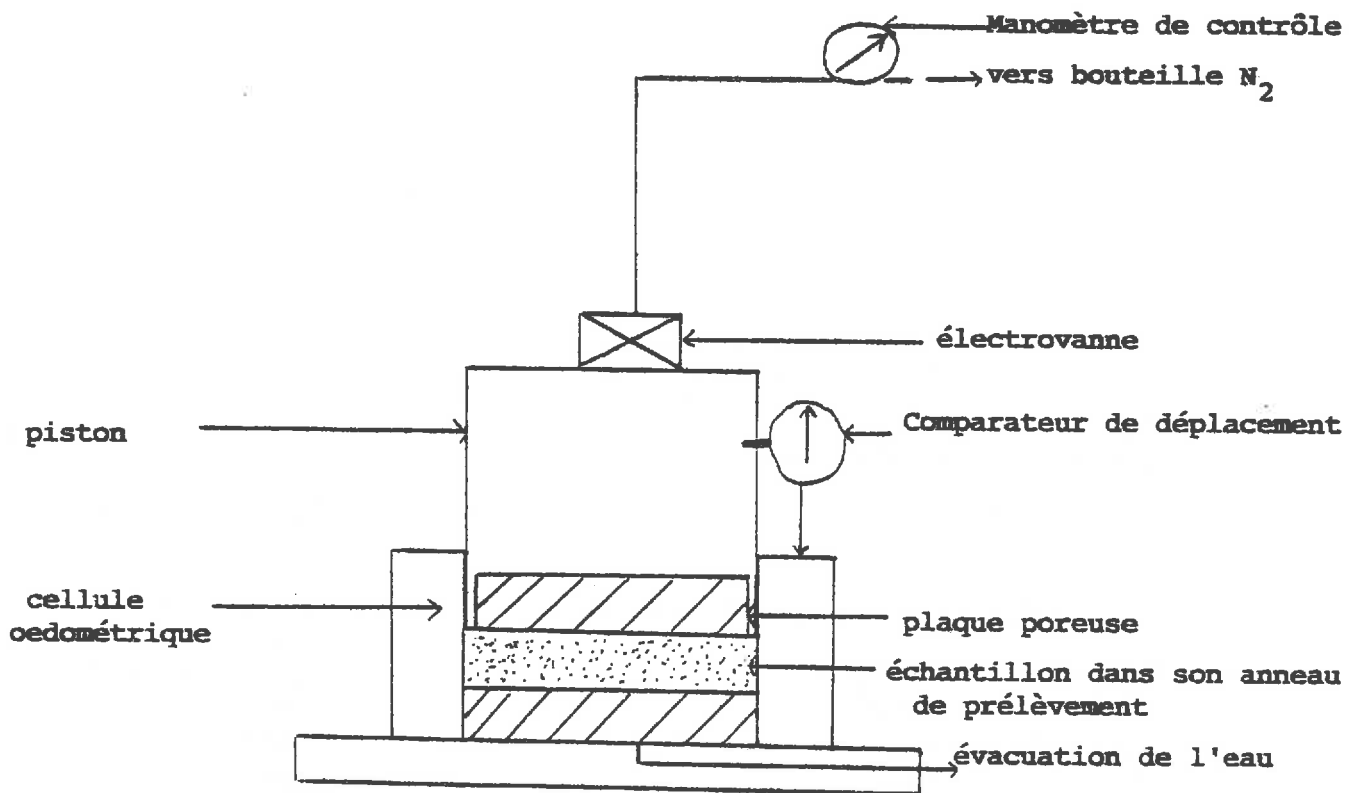


Figure 7 : Schéma de l'oedomètre utilisé pour le compactage.

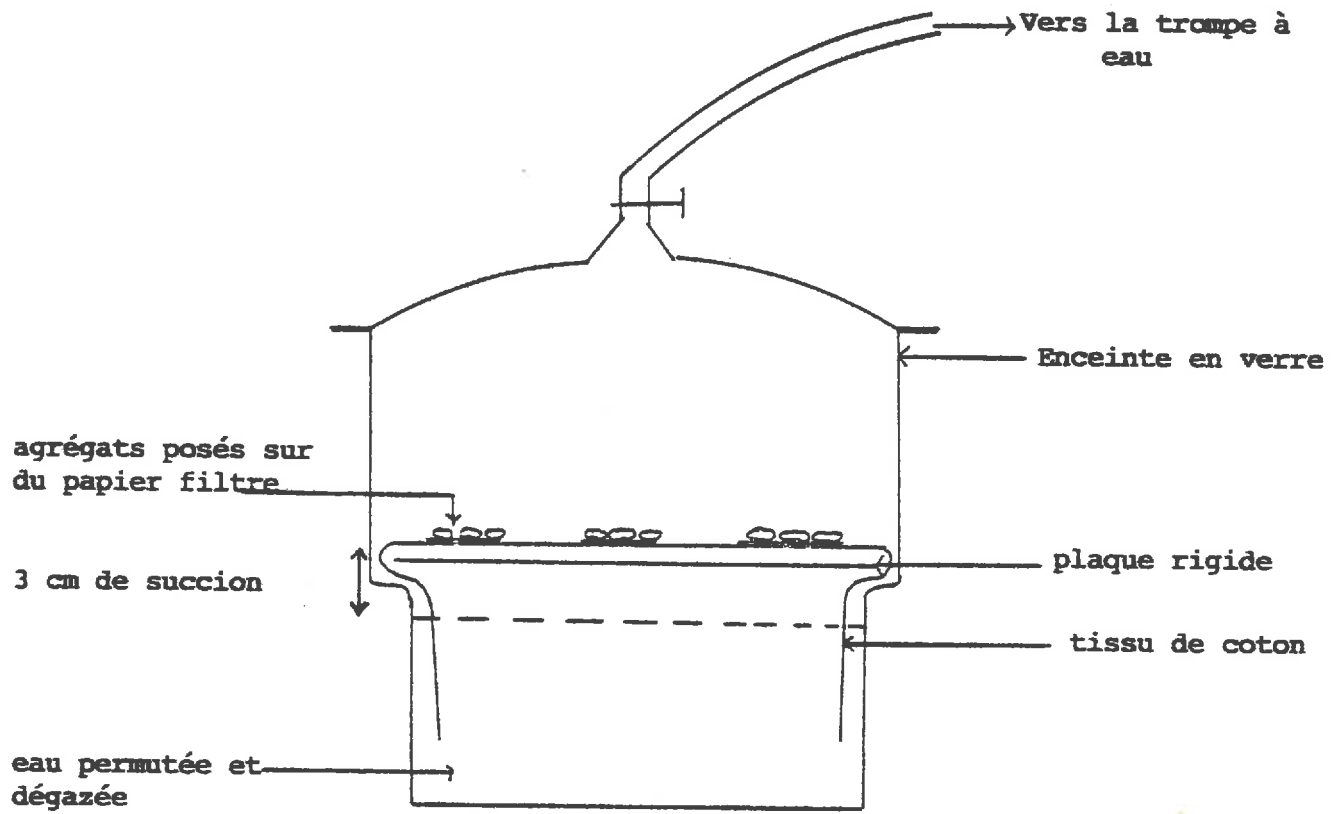


Figure 8 : Schéma du montage utilisé pour l'humectation des agrégats.

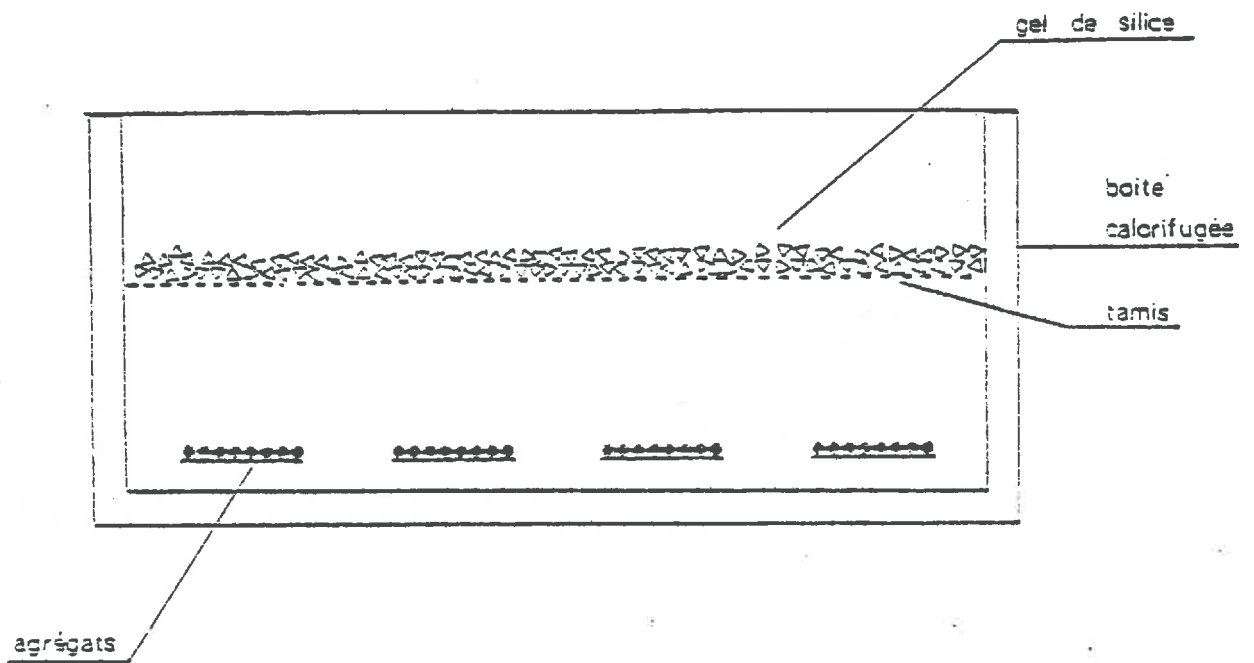


fig. 9 : Schéma du dispositif de séchage par gel de Silice.
(d'après PINOCHET, 1981).

Nous avons choisi un temps de réhumectation de 48 h, qui est suffisant pour que l'équilibre soit atteint pour tous nos types d'échantillons. Ce temps fut déterminé par quelques manipulations préalables dont un exemple est donné en annexe.

c) Déshydratation des agrégats.

Les agrégats réhumectés à 3 mbar sont ensuite placés pendant 48 h dans une boîte hermétique sous un grillage supportant du gel de Silice (Fig. 9).

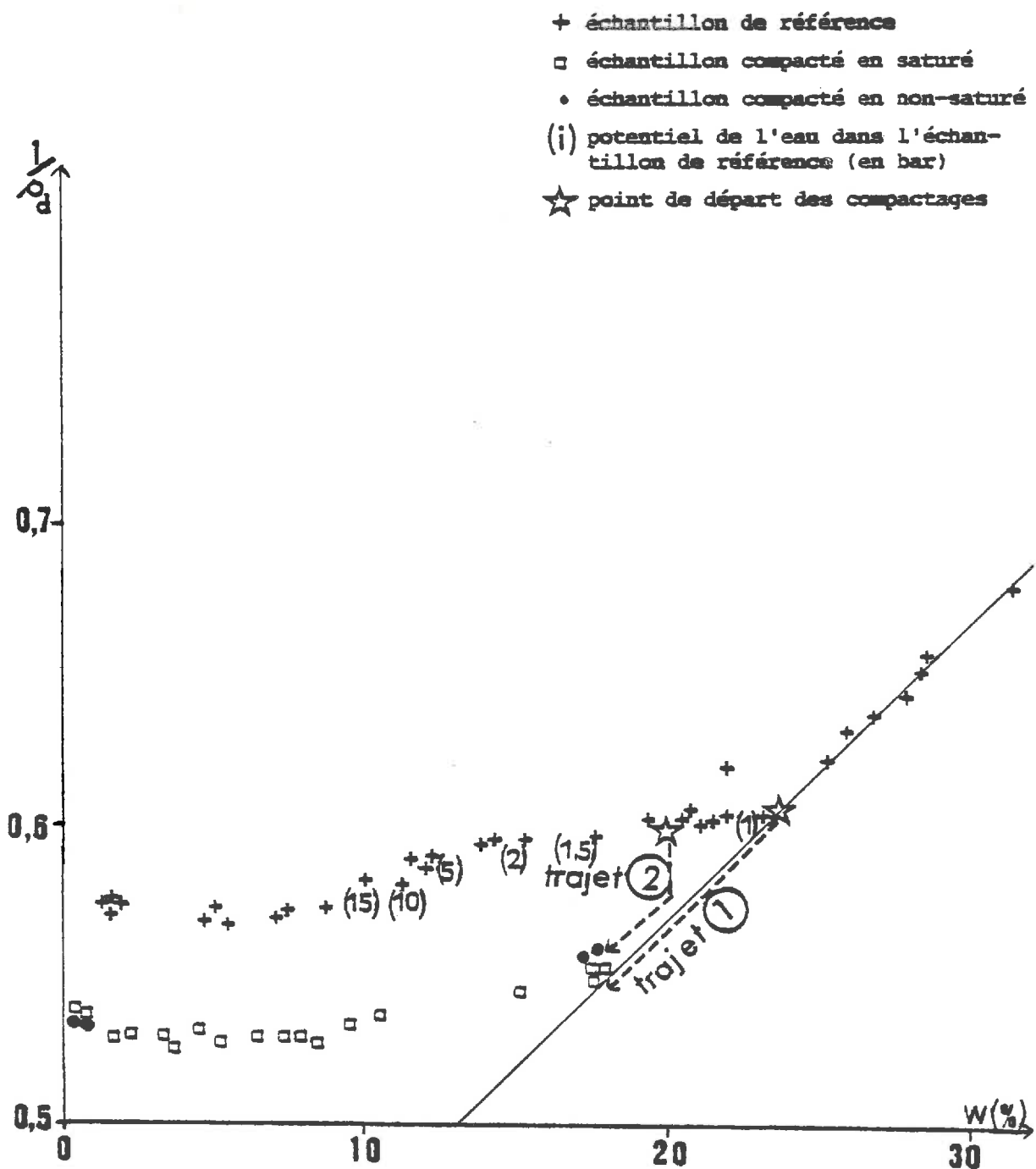


Figure 10 : Effet du compactage sur le matériau naturel remanié (Boigneville).

II. RESULTATS CONCERNANT LE MATERIAU NATUREL REMANIE (Boigneville).

II.1. PRESENTATION DES COURBES CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS DE REFERENCE.

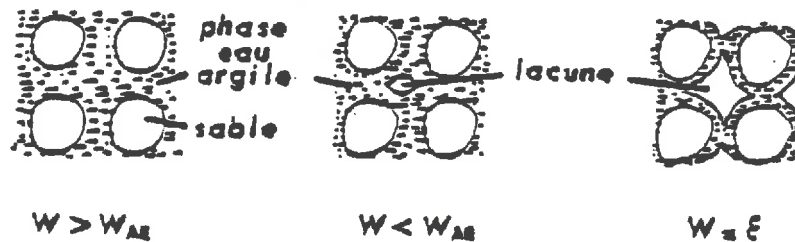
a) La courbe de retrait.

La figure 10 permet de montrer l'existence d'un retrait résiduel entre le point d'entrée d'air (situé à 23 % d'humidité pondérale) et la limite de retrait (située à 9 % d'humidité pondérale).

b) La courbe de porosimétrie au mercure.

Pour interpréter ces courbes, il est nécessaire de se référer aux études de FIES (1971) et FIES-ZIMMER (1981). Ces auteurs, pour un type de courbes comparables aux nôtres, proposent une description de la disposition relative de la phase argile et du squelette.

Ce modèle peut être schématisé de la façon suivante :



Lorsqu'on introduit les échantillons dans le porosimètre, ils ont été séchés à l'étuve à 105°C. On se trouve dans le cas où $W = \epsilon$. La phase argileuse s'est placée en enrobage autour des grains, ménageant un espace poral de grande dimension appelé espace poral lacunaire.

Les courbes porosimétriques que nous obtenons permettent de penser que nous sommes en présence de cette disposition.

En effet, l'intrusion du mercure se fait en deux phases :

- une forte intrusion de mercure dans la gamme des diamètres de 200 à 1 μm . La majorité de l'intrusion s'effectue entre 4 et 2 μm autour d'une valeur modale située à 3 μm .

Cette intrusion correspond dans le modèle que nous utilisons, au remplissage des pores lacunaires.

Il faut noter que l'intrusion du mercure dans les agrégats ne débute qu'après une phase de remplissage de l'espace poral inter-agrégats.

Ceci est bien montré sur la figure 12 qui représente la courbe d'intrusion du mercure dans des morceaux de marbre concassés de 2 à 3,15 mm. Sur cette courbe, après le remplissage d'espaces tels que ceux qui sont compris entre les morceaux de marbre et la paroi de la cellule, l'intrusion est quasiment nulle.

On montre ainsi qu'il faut soustraire au volume total intrudé, le volume correspondant à cette phase de remplissage de l'espace poral inter-agrégats. Ce dernier est déterminé graphiquement en se plaçant au point d'intersection de la tangente au premier palier et de la tangente à la courbe d'intrusion dans les lacunes.

Figure 11 : Courbes d'intrusion du mercure dans le matériau naturel.

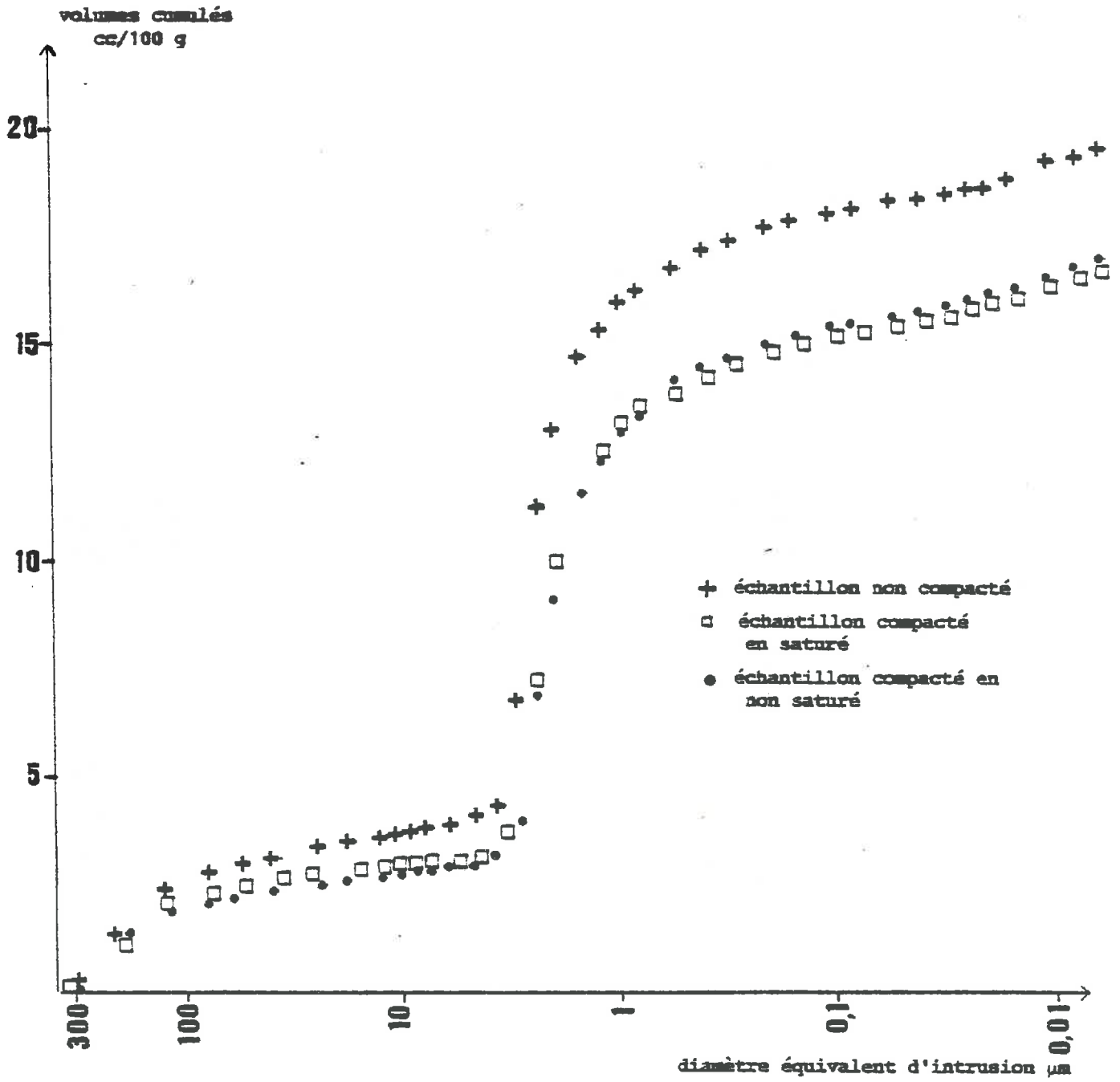
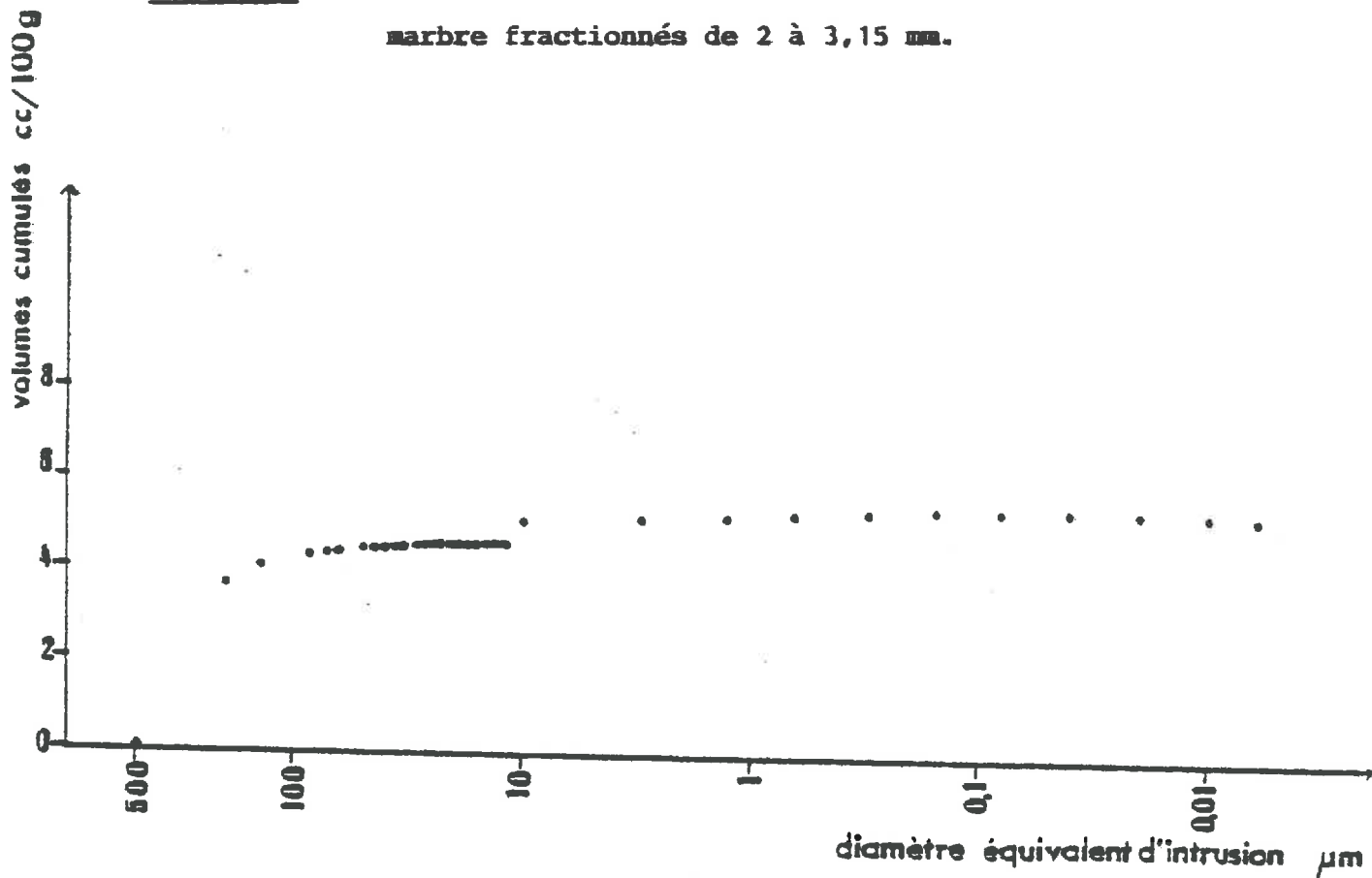


Figure 12 : Courbe d'intrusion de mercure établie sur des échantillons de marbre fractionnés de 2 à 3,15 mm.



	Humidité avant traitement	ρ_d
Echantillon de référence	26 %	1,758
Echantillon compacté en saturé	23 %	1,848
Echantillon compacté en non-saturé	20 %	1,844

Tableau 2 : Réponse au compactage du matériau naturel remanié (Boigneville)

(Les valeurs données sont les moyennes de plusieurs mesures, ces dernières étant effectuées après séchage).

- après un palier, on observe une deuxième phase d'intrusion, plus faible, à partir d'un diamètre d'entrée inférieur à $0,06 \mu\text{m}$.

Cette intrusion correspondant alors au remplissage d'une partie des pores propres à la phase argileuse, les pores les plus fins de cette phase ne pourront être pris en compte car on atteint les limites de l'appareil. L'intrusion du mercure n'était pas possible dans des pores de diamètre d'entrée inférieur à $0,006 \mu\text{m}$ avec notre porosimètre.

Ceci permet d'étendre aux matériaux limoneux les résultats donnés par ZIMMER pour les matériaux sableux.

Dans le cas du matériau naturel, il ne nous est pas possible de tester la cohérence des résultats en comparant les valeurs d'intrusion mesurées à celles calculées (cf. III.2.) car nous ne possédons ni la densité de solide, ni la densité apparente de la phase argileuse.

Nous pouvons seulement constater que nous avons une très bonne répétitivité des mesures (figure 13).

II.2. COMPORTEMENT DU MATERIAU NATUREL AU COMPACTAGE.

II.2.1. Modification de la courbe de retrait.

a) Compactage en saturé.

La figure 10 et le tableau 2 montrent que le matériau naturel est sensible au compactage.

Les mesures de volume massique faites à l'état sec après compactage d'un échantillon prélevé à 23,5 % d'humidité pondérale, soit légèrement avant le point d'entrée d'air, montrent que l'on a une réduction de 3 % de la porosité en valeur absolue, celle-ci passant de 20 % à 17 %.

Sur la figure 10, il est important de noter le déplacement du point d'entrée d'air le long de la droite de saturation (trajet (1)). Ceci permet d'affirmer qu'il s'agit d'une consolidation, l'entrée de l'air dans le matériau consolidé se faisant alors pour une humidité de 18 %.

La courbe de retrait complète de l'échantillon compacté permet de constater que le retrait résiduel persiste. En effet, les courbes de retrait de l'échantillon de référence et de l'échantillon consolidé sont parallèles.

b) Compactage en non saturé.

Le prélèvement de l'échantillon avant compactage s'effectue alors à 20 % d'humidité pondérale.

Les mesures de volume massique à l'état sec ne permettent pas de mettre en évidence une différence entre les échantillons compactés en saturé et non saturé.

Sur la figure 10, on constate qu'après compactage on ne rejoint pas la droite de saturation alors que l'humidité des échantillons compactés en saturé et non saturé est la même. Ceci pourrait s'expliquer par la présence d'air piégé à l'intérieur de l'échantillon compacté en non saturé. Ce dernier rejoindrait alors une parallèle à la droite de saturation avant de subir une consolidation (trajet (2)).

Figure 13 : Exemple de reproductibilité des mesures de porosimétrie.

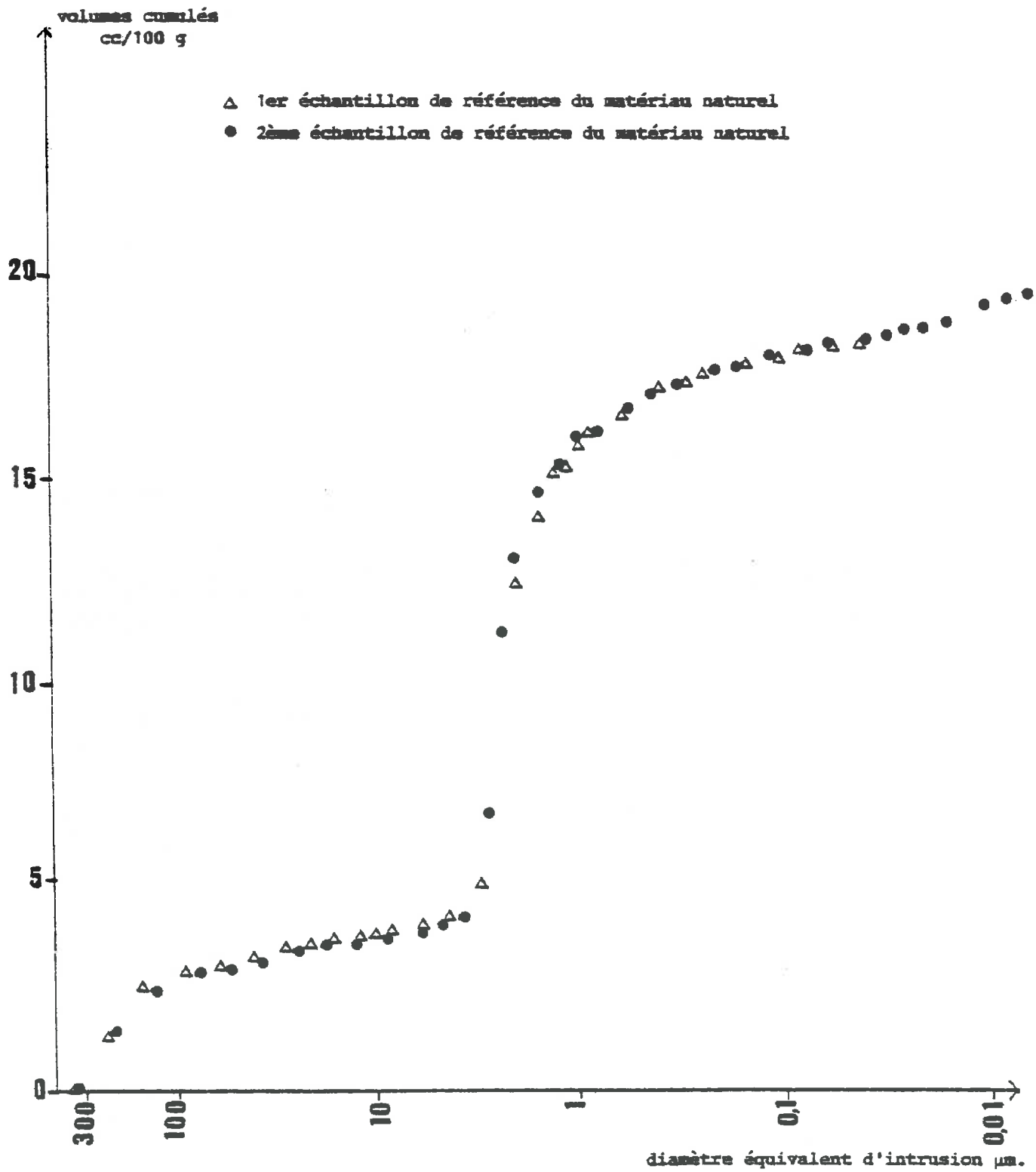
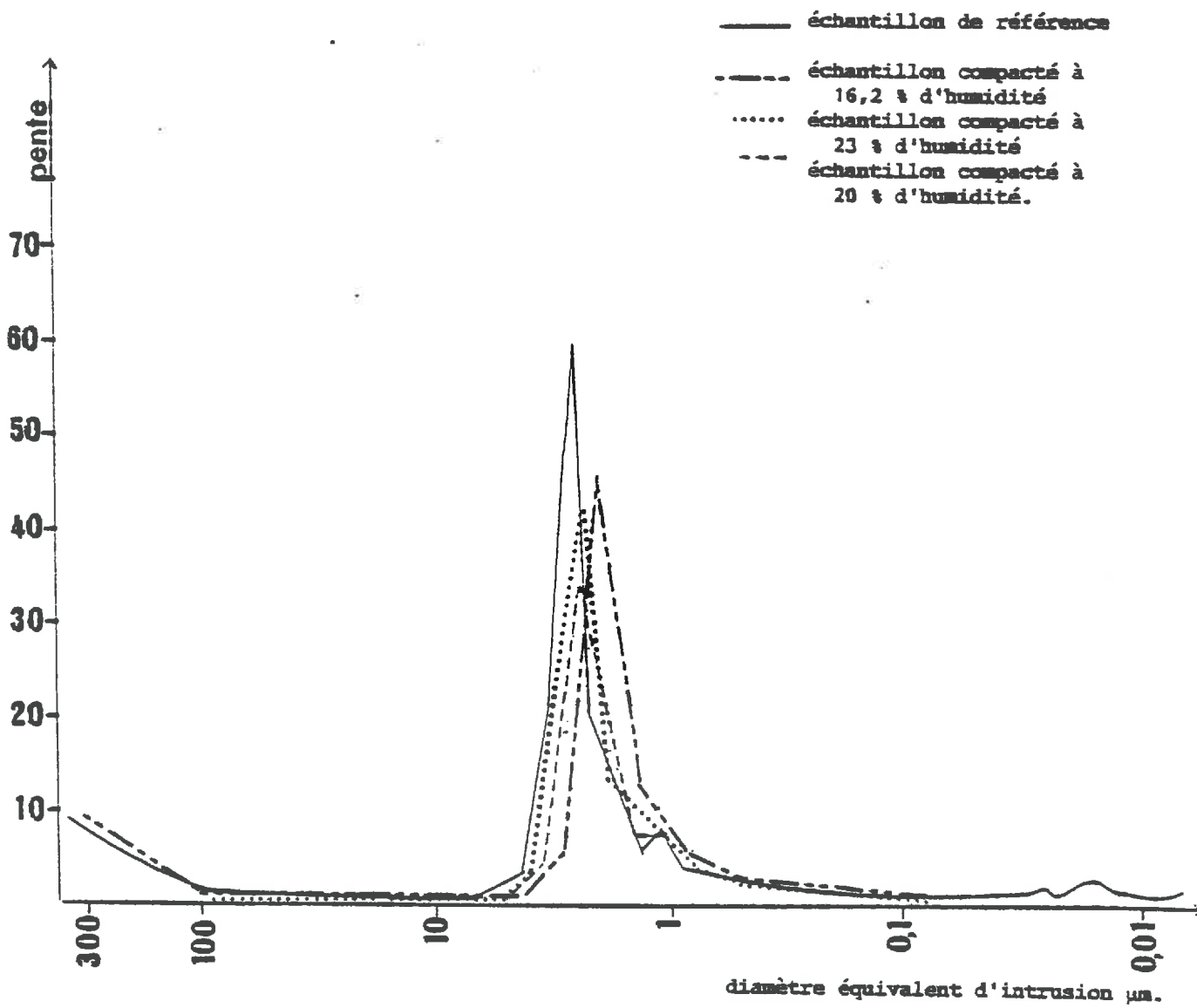


Figure 14 : Fonction de répartition des pentes des courbes d'intrusion dans le matériau naturel (Boigneville).



	Moyenne des mesures de densité effectuées à l'état sec sur petits agrégats
Echantillon de référence	1,739
Echantillon compacté	1,809

Tableau 3 : Mesure de densité sur les agrégats après 9 cycles d'humectation-dessiccation.

II.2.2. Modification de la courbe d'intrusion de mercure.

Le calcul (cf. III.2.) de la différence entre les volumes massiques des échantillons compactés et non-compactés laisse prévoir une différence de volume de mercure intrudé d'environ 2 cc/100 g. Ce que l'on retrouve bien sur les courbes de la figure 11.

Il faut noter que les parties des courbes correspondant à l'intrusion du mercure dans la phase argileuse se superposent parfaitement. On peut donc supposer que la phase argileuse n'a pas été affectée par le tassement.

Le compactage semble s'être traduit par une diminution du volume des lacunes. Les diamètres d'entrée dans ces dernières n'ayant pas varié de manière significative.

Ceci est confirmé par le calcul de la distribution des pentes des courbes d'intrusion calculées pour les classes de diamètre d'entrée choisies dans l'intervalle 300-0,1 μm . La pente est définie par la valeur y dans la relation suivante :

$$y = V_2 - V_1 / \log_{10} \frac{D_2}{D_1} \quad \text{et} \quad x \text{ (abscisse)} = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

où, V_1 et V_2 représentent les volumes de mercure introduits pour des diamètres d'entrée égaux ou supérieurs respectivement à D_1 ou D_2 , diamètres limites de la classe considérée (Fig. 14).

Dans notre cas, on ne peut mettre en évidence une différence entre les échantillons compactés en saturé et non-saturé. Par contre, ZIMMER, dans le cas d'un squelette sableux constatait, bien que le volume massique soit le même pour les deux modes de compactage, des différences dans la répartition des seuils de pores.

Nous avons alors compacté un échantillon non-saturé dont l'humidité avant compactage était plus faible (16,2 %). Après compactage, on obtient un volume massique moyen mesuré à l'état sec de 1,86, ce qui est comparable au volume massique atteint par les échantillons compactés en saturé. Mais la fonction de répartition des pentes de la courbe d'intrusion dans cet échantillon qui est portée sur la figure 14, permet de mettre en évidence un déplacement de la valeur modale d'intrusion vers un diamètre plus faible.

Cette expérience permet donc de confirmer pour un matériau limoneux ce que ZIMMER avait mis en évidence pour un matériau sableux.

Elle montre aussi que les échantillons que nous avons compacté à partir de 20 et 23 % avaient des états initiaux trop proches pour que l'on puisse les distinguer par la suite.

II.3. ETUDE DE LA REVERSIBILITE DU COMPACTAGE.

II.3.1. Présentation des résultats.

a) Mesures de volume massique et de teneur en eau.

Le tableau 3 montre qu'après 9 cycles d'humectation-dessiccation les volumes massiques des échantillons compactés et non-compactés sont encore très différents.

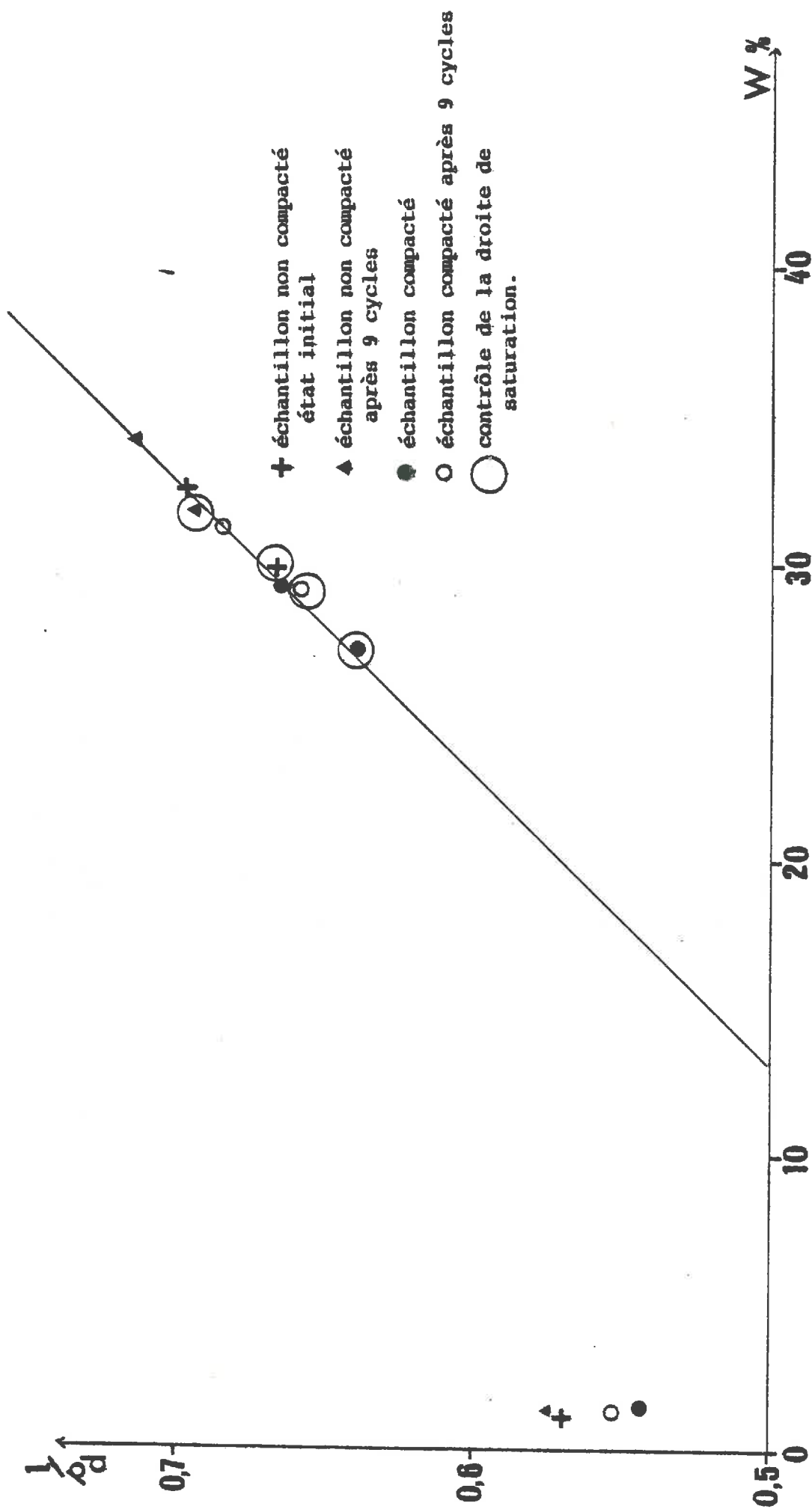
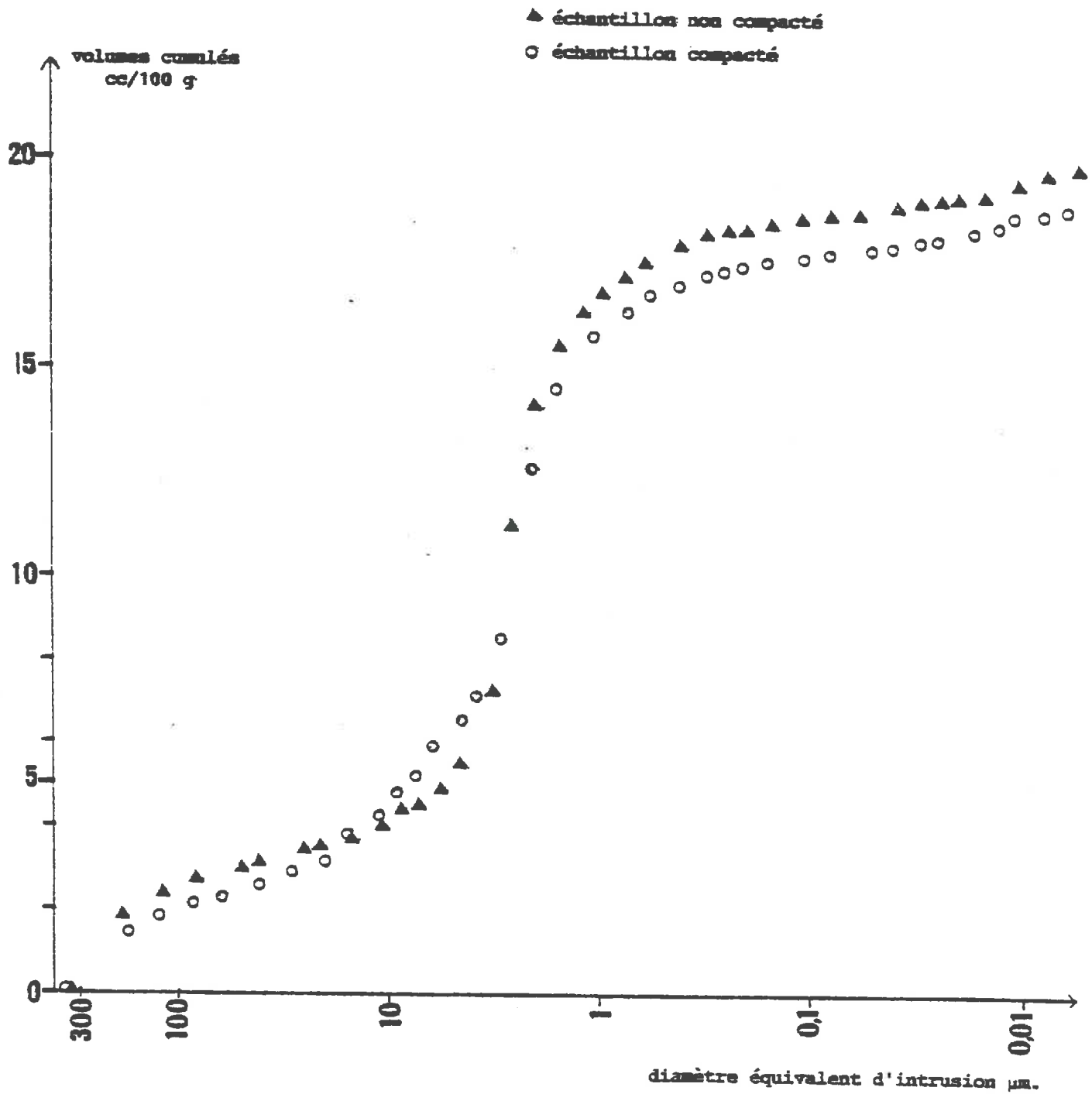


Figure 15 : Evolution des points extrêmes des courbes de retrait-gonflement avant et après les expériences d'humectation-dessiccation.

Figure 16 : Courbe porocimétrique du matériau naturel (Boigneville) après 9 cycles d'humectation-dessiccation.



Si on compare le tableau 2 et le tableau 3, on constate cependant une légère variation de masse volumique des échantillons compactés qui passe de 1,84 avant humectation à 1,81 après 9 cycles d'humectation-dessiccation.

La figure 15 montre que la différence de teneur en eau à l'état humide qui existait entre les échantillons compactés et non-compactés subsiste après 9 cycles d'humectation-dessiccation.

Il faut noter qu'à la fin des cycles d'humectation-dessiccation, nous avons procédé à un tamisage léger des agrégats secs de façon à éliminer les agrégats qui s'étaient désagrégés.

b) Courbes porosimétriques.

La figure 16 présente les courbes d'intrusion du mercure dans les échantillons compactés et non-compactés ayant subi 9 cycles d'humectation-dessiccation.

En comparant les courbes d'intrusion du mercure dans les échantillons de référence avant et après les cycles d'humectation-dessiccation, on remarque que les courbes sont presque semblables. On note cependant une légère intrusion dans des pores de seuil de 6 à 15 μm , cette intrusion n'existait pas avant les 9 cycles d'humectation-dessiccation. Si on admet que le volume intrudé correspondant au réarrangement des agrégats reste le même, on obtient alors une valeur corrigée d'intrusion de 14,65 cc/100 g pour l'échantillon de référence avant les 9 cycles et de 15,85 cc/100 g après les cycles.

Par contre, la courbe d'intrusion que nous obtenons pour les échantillons compactés ayant subi 9 cycles d'humectation-dessiccation ne permet plus de définir une valeur modale unique d'intrusion dans les lacunes. En effet, on ne peut plus mettre en évidence de palier correspondant au remplissage de l'espace inter-agrégats des agrégats, car l'intrusion du mercure semble débiter dans les agrégats dès le seuil de 20 μm .

Le type de courbe que nous obtenons se rapproche en fait de celui qu'on obtient sur un matériau naturel de granulométrie comparable non remanié (FIES, comm. pers.).

D'autre part, le volume intrudé que nous obtenons ne semble pas confirmer les mesures de densité au pétrole. En effet, après 9 cycles, ce volume intrudé de 15,92 cc/100 g, si on considère que la phase de réarrangement des agrégats correspond à la même valeur qu'avant les 9 cycles, est presque le même que pour les échantillons non compactés alors que l'écart entre les volumes massiques subsiste presque entièrement.

II.3.2. Discussion.

Pour mieux comprendre comment ont évolué les différents agrégats, nous avons fait une série d'observations microscopiques.

Les deux planches de photos présentées résument ces observations. On remarque :

- de grosse fissures (de l'ordre de 500 μm) qui affectent seulement un petit nombre d'individus dans chacune des deux familles d'agrégats,
- de petites fissures de 6 à 20 μm . Ces fissures se trouvent surtout sur les échantillons compactés où elles peuvent former un véritable réseau.

On en trouve aussi quelques unes sur les agrégats non-compactés mais elles sont généralement isolées et en nombre beaucoup moins important.

Ces observations permettent d'expliquer la contradiction que nous avons noté entre les mesures de densité et de porosimétrie.

On peut considérer que les grosses fissures n'ont pas d'influence sur l'écart entre les deux mesures. En effet, elles sont remplies par le mercure avant que la mesure de l'intrusion ne débute et lors de la mesure de densité au pétrole ces fissures ne restent pas saturés lors du ressuyage du pétrole. Elles ne sont donc comptabilisées ni dans un cas ni dans l'autre.

Par contre, le réseau des petites fissures doit avoir une influence prépondérante. En effet, la taille de ces fissures laisser penser que, lors des mesures de densité au pétrole une partie d'entre elles se vidangent aussi lors de la phase de ressuyage des agrégats, pour se remplir à nouveau pendant la mesure de la poussée hydrostatique dans le pétrole. Le volume occupé par ces fissures n'est donc pas pris en compte dans la mesure de densité.

Lors des mesures de porosimétrie, l'intrusion du mercure dans ces fissures est comptabilisée dans le volume total intrudé, sans que l'on puisse déterminer précisément la part qu'elles représentent.

Or, de même que l'on soustrait de la valeur finale le volume de mercure correspondant à la phase de remplissage de l'espace inter-agrégats, il faudrait soustraire ce volume correspondant au remplissage des fissures. En faisant une approximation graphique, on s'aperçoit que l'écart entre les volumes de mercure intrudés dans les échantillons compactés et non-compactés devient compatible avec la différence de densité que l'on mesure.

D'autre part, le fait que les mesures de densité et de porosimétrie au mercure concernant les échantillons de référence avant et après les 9 cycles d'humectation-dessiccation restent compatibles entre elles va aussi dans le sens de cette explication. En effet, après 9 cycles, ces agrégats ne présentent que peu de fissures.

On montre ainsi que, l'arrangement des particules des échantillons compactés n'a pas été modifié par les cycles d'humectation-dessiccation. On ne peut donc parler de récupération du tassement textural proprement dite.

Par contre, les agrégats ont subi une évolution qui se manifeste par l'apparition de fissures en nombre beaucoup plus important dans les agrégats tassés.

Les modifications de l'arrangement textural d'un matériau consécutives à un tassement ne sont donc pas réversibles sous l'effet de cycles d'humectation-dessiccation.

D'autres facteurs tels que le gel et les phénomènes de battance peuvent peut-être, avoir une action sur la réversibilité du tassement textural qu'il serait intéressant d'étudier.

Planche 1 : Photo d'agrégats non compactés après 9 cycles
d'humectation-dessiccation.

Photo 1

L'agrégat présente le même aspect qu'avant les cycles,
il n'y a pas de fissures visibles.

Photo 2

Sur certains agrégats on peut mettre en évidence un
phénomène de fissuration. Mais il ne s'agit pas du
cas général.

Planche 2 : Agrégats compactés après 9 cycles d'humectation-dessiccation.

Photo 3

Ce type de fissures de grande dimension s'observe sur quelques agrégats de chaque famille.

Photo 4

On trouve ce type de fissuration sur un grand nombre d'agrégats de cette famille. Noter, en plus de la fissure transversale bien visible, tout un réseau de petites fissures.

	Humidité avant traitement	ρ_d
Echantillon de référence	29,85 %	1,654
Echantillon compacté en saturé	29,85 %	1,678
Echantillon compacté en non-saturé	17,50 %	1,662

Tableau 4 : Réponse au compactage du mélange binaire.

(Les valeurs données sont des moyennes de 4 mesures, ces dernières étant effectuées après séchage).

III. RESULTATS CONCERNANT LE MELANGE BINAIRE.

III.1. MESURE DE DENSITE.

Le tableau 4 montre que le mélange binaire choisi est très peu sensible au compactage. En effet, les différences de densité observées restent dans le domaine de l'erreur liée à la méthode de mesure (voir en annexe l'écart-type de la méthode utilisée).

La courbe de retrait présentée dans la première partie (fig. 4) ne permet pas de mettre en évidence de retrait résiduel.

III.2. POROSIMETRIE AU MERCURE.

Les courbes porosimétriques (fig. 17) présentent la même forme générale que celles décrites pour le matériau naturel.

Ce sont des courbes bimodales bien caractéristiques. Elles présentent une forte intrusion de 18 cc pour 100 g pour des pores compris entre 300 et 5 µm. Comme nous l'avons fait pour le matériau naturel, on interprète ceci comme étant le remplissage des pores lacunaires.

Comme nous l'avons vu précédemment, une nouvelle phase d'entrée se produit pour des diamètres d'entrée inférieur à 0,06 µm, lors du remplissage de l'espace poral propre à la phase argileuse.

Dans le cas de ce matériau, nous possédons les éléments nécessaires pour tester la cohérence entre les mesures porosimétriques et de densité.

En effet, la valeur de densité que nous obtenons par la méthode du pétrole permet de calculer un volume théorique intrudable (x cc/100 g) par la formule

$$x = 100 \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right)$$

Dans le cas de l'échantillon de référence, on obtient

$$x = 23,3 \text{ cc/100 g}$$

La valeur lue sur le porosimètre est de 24,96 cc/100 g, mais compte-tenu des remarques faites en II.1.b., il faut lui apporter deux corrections :

- celle qui correspond au réarrangement des agrégats graphiquement, on trouve qu'il faut soustraire 3,6 cc/100 g.
- celle qui prend en compte l'impossibilité de remplir la phase argileuse dans sa totalité. ZIMMER a déterminé que l'on pouvait introduire 1,96 cc dans la phase argileuse de 100 g de matériau.

La courbe permet de déterminer qu'avant que commence l'intrusion dans la phase argileuse proprement dite, on a déjà intrudé 24,1 cc/100 g.

La valeur corrigée déterminée expérimentalement est donc de 22,46 cc/100 g avec un taux de remplissage de la phase argileuse de 44 %.

Les deux valeurs sont bien du même ordre de grandeur et leur différence ne dépasse pas l'écart dû à la précision des mesures.

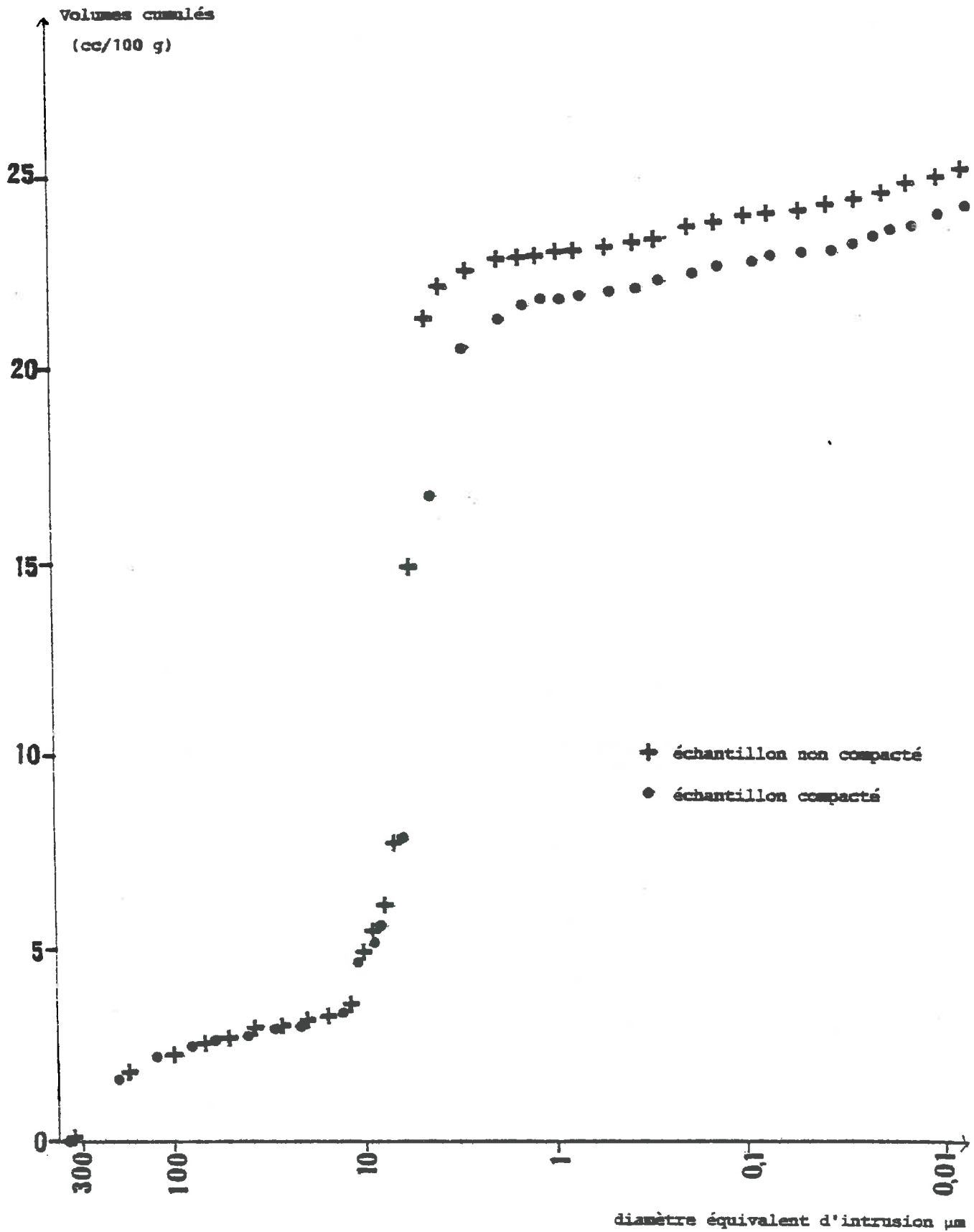


Figure 17 : Courbes d'intrusion de mercure dans le mélange binaire.

La comparaison de la courbe de l'échantillon de référence et de celle de l'échantillon soumis au compactage amène plusieurs remarques :

- La porosimétrie au mercure semble être une méthode d'investigation plus fine que les mesures de volume massique lorsque l'on veut déceler un tassement textural. En effet, nous avons vu que les mesures de volumes massiques ne mettaient pas en évidence une différence significative entre les échantillons, alors que leurs courbes d'intrusion ne se superposent pas : le volume de mercure intrudé dans les pores lacunaires étant légèrement inférieur pour le matériau compacté.
- Les deux courbes d'intrusion dans la phase argileuse se superposent exactement. Comme pour le matériau naturel ceci semble indiquer que cette phase n'a pas été modifiée par le compactage.
- Si on excepte la légère différence provenant du compactage, on constate une très bonne répétabilité de l'allure générale de la courbe.

III.3. DISCUSSION.

Le fait que ce mélange binaire soit très peu sensible au tassement alors que nous l'avions choisi dans une plage de composition granulométrique supposée sensible montre qu'actuellement nous ne sommes pas en mesure d'établir la liste de tous les facteurs qui conditionnent la sensibilité au tassement textural d'un matériau.

Pour essayer de préciser ces paramètres, nous avons essayé d'établir des comparaisons, entre le comportement de nos matériaux naturel et artificiel, et nous nous sommes référés aux travaux de ZIMMER (1981) ainsi qu'à la convention I.N.R.A.-E.D.F. 73 (tableau 5, figure 18).

Le tableau 5 sert de base aux comparaisons qui vont suivre.

III.3.1. Rôle de l'argile.

a) Influence des caractéristiques propres à la phase argileuse.

Si l'on se réfère à la préparation des matériaux décrite dans la première partie, on peut penser que la différence de comportement des matériaux naturel et artificiel dépend en partie de l'histoire qu'a subie la phase argileuse. En effet, l'argile du matériau artificiel a été dispersée alors que celle du matériau naturel n'a été que remaniée.

Il faut aussi noter que les deux argiles utilisées n'ont pas exactement la même composition minéralogique, et qu'on n'a pas de renseignements sur la teneur en matières organiques de chacune des argiles.

Les expériences faites dans le cadre de ce mémoire ne nous permettent pas de conclure sur l'importance de ces influences. On peut seulement noter que les courbes d'intrusion de mercure dans les phases argileuses des deux matériaux sont semblables.

	Colonne 1	Colonne 2	Colonne 3	Colonne 4	Colonne 5
	Tassement mesuré par rapport à la courbe de retrait	Retrait Résiduel	Étalement de la granulométrie (1)	Surface spécifique du squelette (2)	Épaisseur équivalente de la couche d'argile (3)
15 % Λ_V + S 200-250 μm	OUI	NON*	1,25	84 cm^2/g	9,3 μm
19 % Λ_V + L 20- 50 μm	NON	NON*	2,5	550 cm^2/g	1,7 μm
25 % Λ_B + 2 - 200 μm	OUI	OUI**	100	1106 cm^2/g	1,2 μm
Correspondant à la courbe (1) du rapport EDF	NON	non étudié	100	1007 cm^2/g	1,3 μm
Correspondant à la courbe (2) du rapport EDF	OUI	non étudié	100	970 cm^2/g	1,1 μm

Abréviations : Λ_V = Argile des vignères - Λ_B = Argile de Boigneville - S = Sable - L = Limon

(1) L'étalement de la granulométrie est donné par $\frac{D}{d}$ où D = diamètre maximum du squelette
 d = diamètre minimum du squelette

(2) On utilise la formule HENIN-OSTY (non publiée)

$$S = 10^4 \frac{6 P}{\rho (D_2 - D_1)} \log \frac{D_2}{D_1}$$

avec

S : surface spécifique

P : poids de squelette pour 1 gramme de mélange

ρ : densité de solide du squelette

D_1, D_2 : valeurs extrêmes de diamètre de la classe granulométrique considérée

(3) $V_A = E_A \cdot S$ et $V_A = \frac{(1 - P)}{\rho_a}$ avec

ρ_a : densité de solide de l'argile

V_A : volume encombré par l'argile

E_A : épaisseur équivalente de la couche d'argile

* mélange binaire

** matériau naturel remanié

Tableau 5 :

- b) Comparaison entre notre matériau artificiel argilo-limoneux et le matériau argilo-sableux étudié par ZIMMER (Ligne 1 et 2 du tableau 5).

Lorsqu'on compare ces deux matériaux qui diffèrent uniquement par leur squelette, on peut penser que la différence de comportement provient d'une différence dans l'épaisseur équivalente de la couche d'argile enrobant les grains du squelette.

En effet, l'argile qui est saturée en eau et donc déformable au moment du compactage assure le glissement des grains du squelette les uns contre les autres et permet ainsi un réarrangement de l'assemblage textural. S'il y a contact direct entre deux grains, ils ne peuvent bouger l'un par rapport à l'autre.

On comprend alors qu'une diminution de l'épaisseur équivalente de la couche d'argile, qui se traduit par une augmentation de la probabilité du contact direct entre les grains, engendre un blocage rapide des réarrangements. On constate alors une non-sensibilité au tassement.

- c) Confrontation de cette hypothèse avec les résultats obtenus sur les autres matériaux.

Les trois dernières lignes du tableau 5 montrent que cette hypothèse n'est pas suffisante pour tout expliquer. En effet, alors que les épaisseurs des couches d'argile enrobant les grains sont équivalentes, les réponses au compactage sont différentes.

On est alors conduit à rechercher une explication aux différences de comportement dans les caractéristiques propres au squelette.

III.3.2. Rôle du squelette.

- a) Forme et minéralogie.

Pour vérifier que la différence de sensibilité de nos deux matériaux ne provenait pas d'un effet de la forme ou de la minéralogie des squelettes, nous avons fait des observations microscopiques. Pour cela, nous avons séparé par dispersion, puis lavage, l'argile et le squelette du matériau naturel.

Ces observations montrent que dans les deux cas le squelette est formé de beaucoup de quartz et d'un peu de micas, feldspaths, Les grains sont subsphériques ou légèrement anguleux à arêtes émoussées.

- b) Étalement de la granulométrie.

Pour les matériaux que nous avons étudiés (lignes 2 et 3, colonne 3 du tableau 5), l'étalement de la granulométrie du squelette semble avoir une influence sur la sensibilité au tassement.

Mais, si l'on considère les trois dernières lignes de cette même colonne, on s'aperçoit que l'étalement de la granulométrie peut être le même alors que la réponse au compactage est différente.

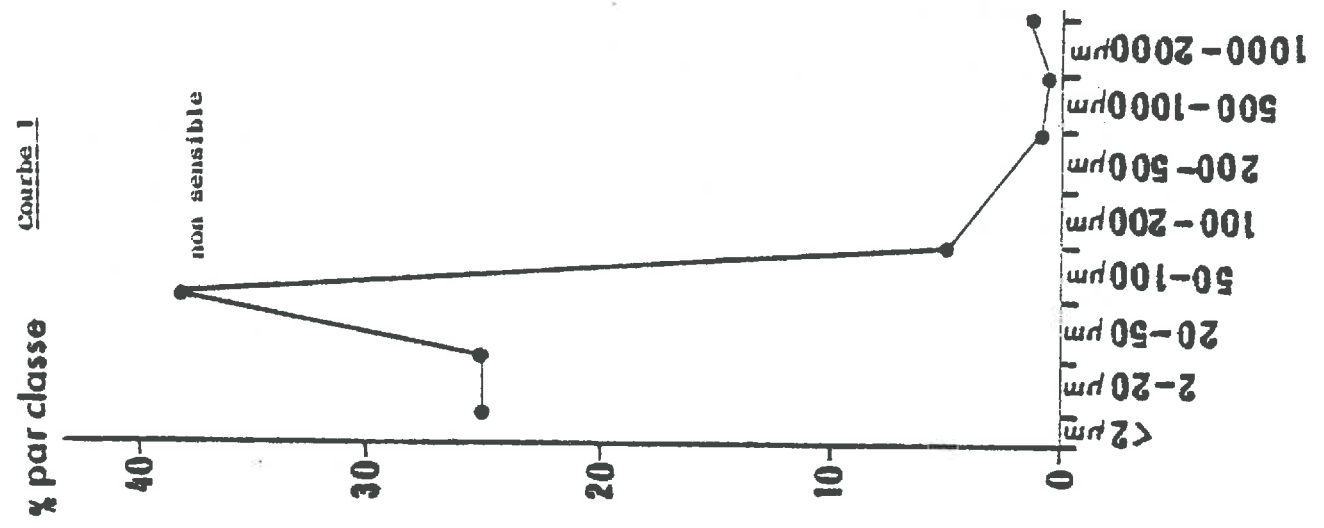
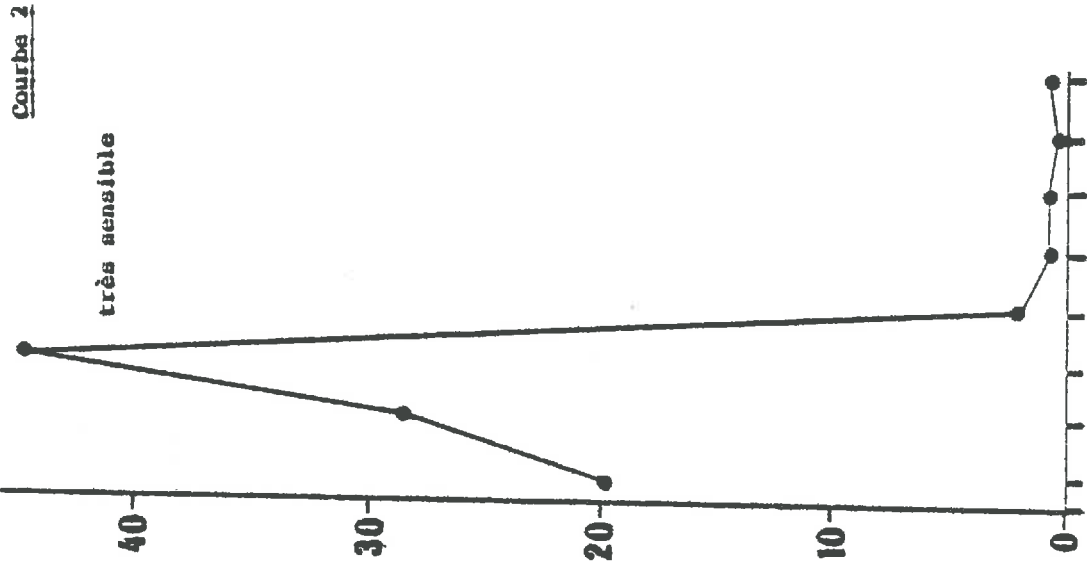


Figure 18 : Courbes granulométriques extraites de la Convention INRA-EDF

III.3.3. Le retrait résiduel indice de la sensibilité au tassement.

La deuxième colonne du tableau 5 donne des résultats qui vont dans le sens de l'hypothèse selon laquelle l'existence d'un retrait résiduel serait l'indice d'une sensibilité au tassement textural (GUERIF, comm. pers.). En effet, le matériau naturel qui est sensible au compactage présente un retrait résiduel alors que le matériau artificiel n'en présente pas.

Pour plus de clarté, les courbes de retrait des deux matériaux sont schématisées à la figure 19.

III.4. PROPOSITIONS D'EXPERIENCES COMPLEMENTAIRES.

Les paragraphes précédents montrent que, même en se référant à d'autres travaux, les résultats que nous avons obtenus permettent seulement d'émettre quelques hypothèses sans qu'il soit possible de les confirmer ou de les infirmer.

On peut d'ailleurs raisonnablement penser que la sensibilité au tassement textural est régie par plusieurs facteurs qui interviennent à des degrés divers.

Pour juger de l'importance des hypothèses émises, on peut proposer :

- des études du même type que celles entreprises avec le matériau artificiel, mais avec des squelettes de taille variant entre 50 et 200 μm , de façon à préciser l'influence de l'épaisseur équivalente de la couche d'argile enrobant le squelette.
- des études de type expérimental pour déterminer :
 - l'influence de l'étalement de la granulométrie du squelette sur la sensibilité au tassement textural,
 - s'il y a effectivement une corrélation entre l'existence d'un retrait résiduel et la sensibilité au tassement.
- des observations au microscope électronique à balayage (MEB) pour étudier plus précisément l'état de la phase argileuse en fonction du mode de préparation.

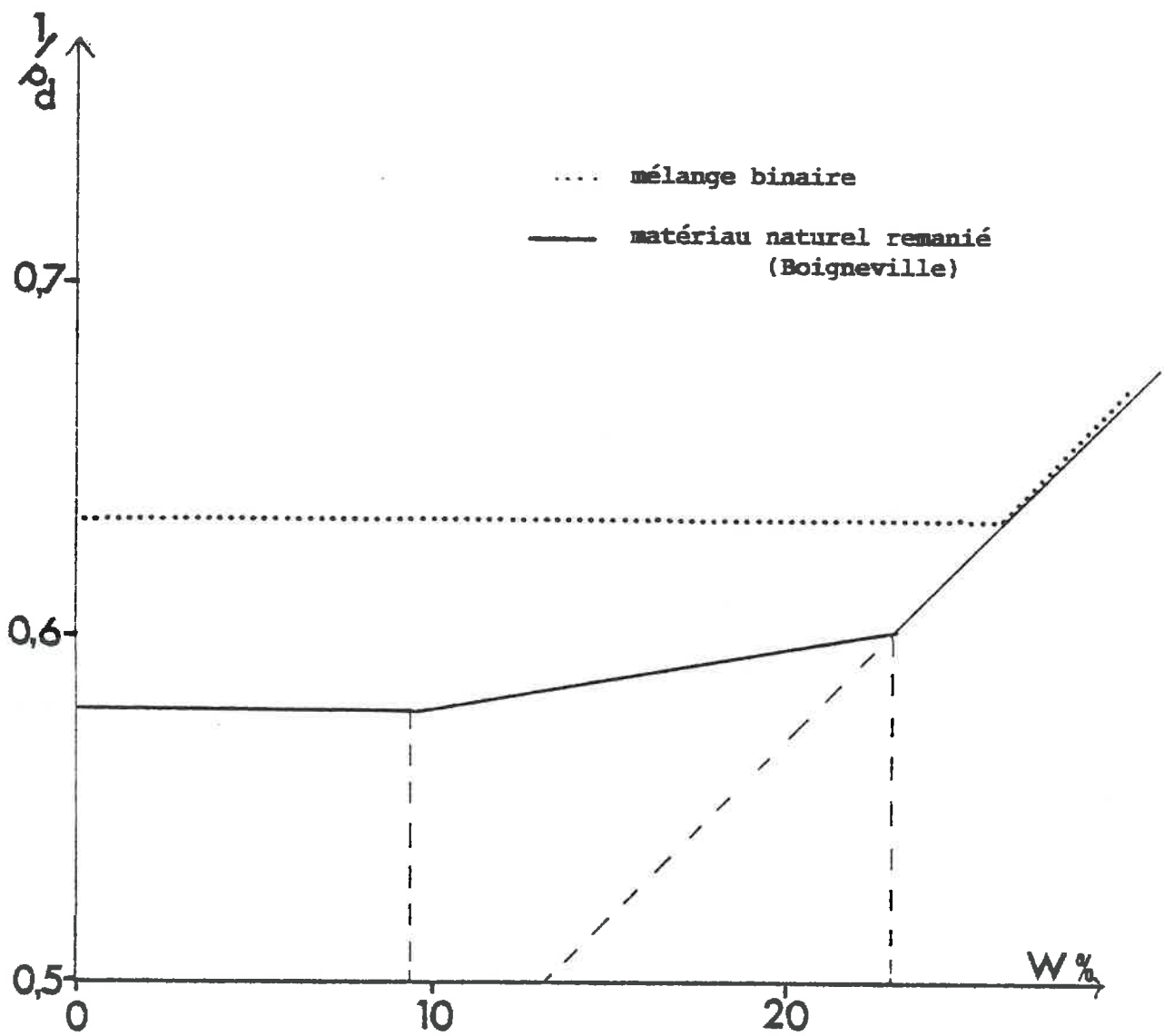


Figure 19 : Représentation schématique des courbes de retrait.

CONCLUSION.

Les expériences effectuées ont permis de montrer que le modèle de subdivision de la porosité texturale d'un matériau en une porosité lacunaire et une porosité propre à la phase argileuse s'appliquait aussi pour les matériaux argilo-limoneux dont le squelette présente une granulométrie étalée.

Elles ont aussi permis de confirmer pour des matériaux argilo-limoneux les résultats obtenus par ZIMMER concernant le tassement de matériaux argilo-sableux :

- l'application d'une pression conduit à un tassement dont l'amplitude n'est pas modifiée au cours du dessèchement et ceci quel que soit l'état hydrique (saturé ou non saturé) de l'échantillon au moment de l'application de la charge.
- la forme de la courbe de retrait n'est pas modifiée par le tassement.
- en revanche, l'effet sur la morphologie de l'espace poral lacunaire, qui dans tous les cas est le seul modifié, est différent, le diamètre équivalent d'intrusion dans les lacunes étant plus faible lors d'un compactage en non-saturé.

Par ailleurs, nous avons montré que les cycles de réhumectation-dessiccation ne provoquent pas une réorganisation d'ensemble de l'assemblage des particules. En ce sens, le tassement textural a des conséquences qui apparaissent irréversibles.

Par contre, ces cycles induisent une micro-fissuration des agrégats qui est beaucoup plus importante pour les échantillons compactés que pour les non-compactés, ceci se traduisant aussi par une cohésion moindre des agrégats compactés à la fin des cycles.

L'apparition de ce type de pores, qui sont différents des lacunes, peut être considérée comme un mécanisme de "récupération" si on considère essentiellement le bilan en volume.

On peut imaginer que dans des conditions différentes de notre mode opératoire, en réhumectation brutale à l'air libre par exemple, ce phénomène ait une amplitude accrue, ce qui conduirait à une désagrégation de l'échantillon.

On serait alors en présence d'un phénomène de récupération à long terme car seuls les premiers centimètres de la surface du sol peuvent gonfler suffisamment pour se désagréger, le travail du sol permettant d'amener chaque année de nombreux agrégats à la surface.

BIBLIOGRAPHIE

- FAURE A., FIES J.C., 1972 - Etude expérimentale de la sensibilité au compactage 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 I.N.R.A.-E.D.F.
- FIES J.C., 1971 - Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols.
Ann. agron., 22(6), 655-685.
- FIES J.C., 1983 - Répartition du volume des pores dans des assemblages argile-squelette à différents états hydriques : étude expérimentale et modélisation.
Colloque Franco-Polonais, LUBLIN (à paraître).
- FIES J.C., ZIMMER D., 1982 - Etude expérimentale de modifications de l'assemblage textural d'un matériau sablo-argileux sous l'effet de pression.
Bull. G.F.H.N., 12, 39-54.
- FIES J.C., STENGEL P., 1981 - Densité texturale des sols naturels. I- Méthode de mesure. II- Eléments d'interprétation.
Agronomie, 1(8), 651-659.
- KHEYRABI, MONNIER G., 1968 - Granulométrie et stabilité structurale.
Ann. agron., 19(2), 129-152.
- MONNIER G., FIES J.C., 1982 - Dégâts occasionnés aux terrains agricoles lors de l'implantation de pylônes porteurs de lignes électriques de transport.
Recherche et Environnement, N° Spécial : La transformation des terres, 249-266.
- PELLERIN F.M., 1980 - La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches.
Bull. liaison Laboratoire Ponts et Chaussées, 106, mars-avril 1980, réf. 2456.
- PINOCHET X., 1981 - Prévision du retrait-gonflement d'agrégats de sol. Relation avec le potentiel de l'eau.
Mémoire de fin d'étude de l'E.N.I.T.A. DIJON-QUETIGNY.
- STENGEL P., 1979 - Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in-situ.
Ann. agron., 30(1), 27-51.
- STENGEL P., 1983 - Etude expérimentale du retrait de mélanges Argile-Limon.
Agronomie (à paraître).
- ZIMMER D., 1981 - Etude expérimentale des modifications de certaines caractéristiques de l'espace poral d'un matériau sablo-argileux sous l'effet de contraintes.
D.E.A. de Pédologie de l'Université de PARIS VII.

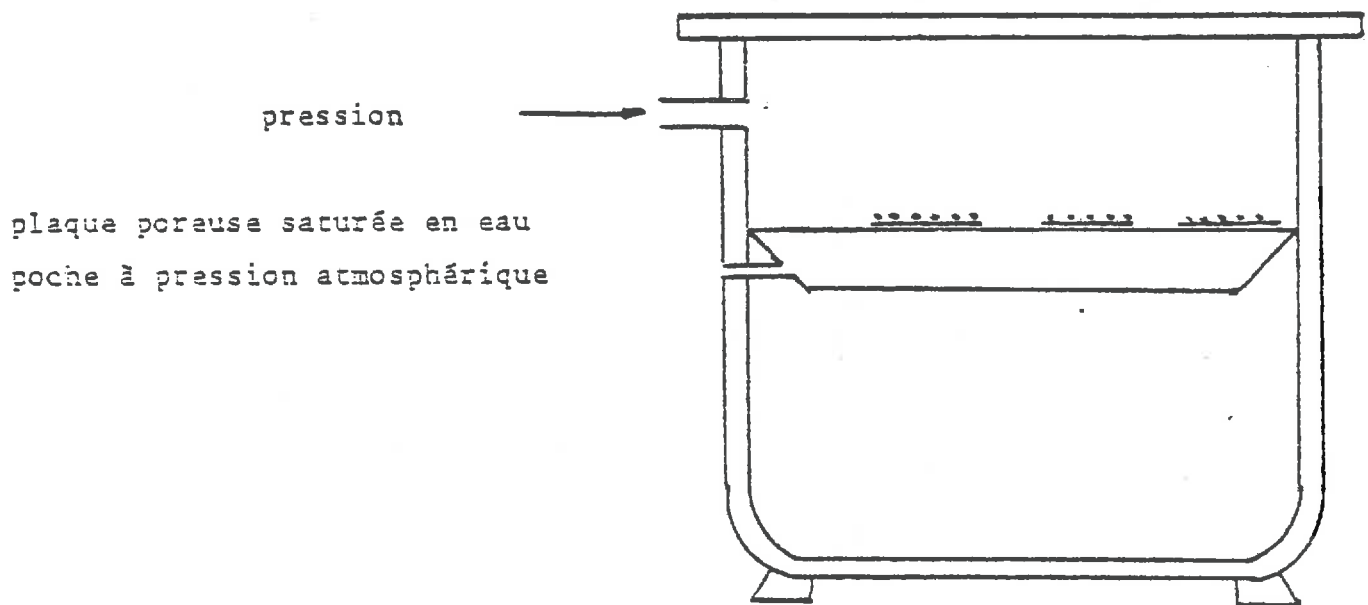


fig 20 Schéma de la presse de Richards
(d'après PINOCHET, 1981)

ANNEXE

PROTOCOLE DE PREPARATION DES AGREGATS

Nous allons décrire les différentes étapes du protocole en précisant l'utilité des manipulations effectuées. Toutes les étapes se font dans une pièce climatisée à 20°C.

I) Préparation des échantillons en vue d'un prélèvement dans un anneau œdométrique.

Les deux matériaux ont été préparés en quantité suffisante au début de l'expérience. La conservation se fait dans une chambre froide à 4°C de façon à garder une teneur en eau constante dans chacun des matériaux.

Lorsque l'on veut préparer un échantillon, il faut tout d'abord procéder à une phase d'homogénéisation du matériau par un malaxage d'une dizaine de minutes.

Le matériau utilisé est ensuite lissé sur une plaque en plexiglass à l'aide d'une spatule de façon à former une couche mince et homogène. Cette opération permet :

- d'écraser les "grumeaux" qui ont pu se constituer,
- d'avoir le moins de bulles possible avant de disposer l'échantillon dans un cylindre.

On place ensuite le matériau dans un cylindre de PVC, d'un diamètre de 10 cm et d'une hauteur de 5 cm, en ayant soin d'éviter la formation de bulles. En fonction de l'humidité pondérale que l'on veut atteindre, le cylindre de PVC est placé :

- soit dans un buchner soumis à une succion de 0,14 bar.

Ceci a pour but :

- de parcourir une partie de la courbe de saturation de façon à se rapprocher du point d'entrée d'air tout en restant dans le domaine saturé. On minimise ainsi les problèmes de cinétique d'écoulement de l'eau à travers l'échantillon.
- d'éviter le fluage de l'échantillon hors du moule œdométrique lorsqu'on applique la charge.
- soit sur une plaque poreuse à l'intérieur d'une presse Richards (fig. 20), si on veut atteindre des humidités plus faibles.

Dans les deux cas, le cylindre de PVC est entouré par une couche d'un matériau de composition peu différente de façon à éviter que le système ne se dessature et à assurer une bonne étanchéité entre le cylindre et la plaque.

Le temps de mise à l'équilibre est fixé à deux jours.

II) Prélèvement et compactage.

Dans le cylindre formé à l'aide de l'anneau en PVC, on prélève un cylindre plus petit à l'aide d'un anneau œdométrique. Cet anneau mesure 2,4 cm de hauteur pour un diamètre de 7 cm.

On connaît ainsi le volume de l'échantillon avant compactage, ainsi que son poids grâce à une pesée.

Une aliquote prélevée dans le reste du cylindre initial permet de connaître l'humidité de l'échantillon avant compactage.

La phase de compactage proprement dite s'effectue dans une cellule œdométrique à une pression de 15 bar.

Le compactage dure 48 h. On interrompt et réapplique aussitôt la pression toutes les deux heures de façon à obtenir une efficacité maximale du compactage à la pression de 15 bar. Lorsqu'on sort l'échantillon compacté de la cellule œdométrique, on effectue une mesure de densité et d'humidité sur une aliquote. Ceci permet de savoir de façon précise l'état du matériau après compactage.

Remarque :

Les échantillons de référence sont préparés de la même manière. Pendant la durée du compactage des autres échantillons, ils sont conservés dans des boîtes hermétiques à 20°C.

III) Séchage.

Le séchage des différents échantillons se fait pendant deux jours à l'air, puis trois jours sous gel de Silice.

On commence par une dessiccation à l'air, car aux humidités concernées, le gel de Silice se sature trop vite et comme les échantillons sont placés dans une boîte hermétique, le temps final de séchage est plus long.

IV) Fractionnement en agrégats.

On concasse les échantillons avec soin (pour fabriquer le moins de terre fine possible) d'abord au pilon, puis avec le pouce de façon à fabriquer des agrégats de 2 à 3,15 mm.

Le choix de cette taille d'agrégats s'explique par :

- la nécessité d'avoir des mesures de densité précises,
- les problèmes de gradient de réhumectation qui existent sur des échantillons plus gros.

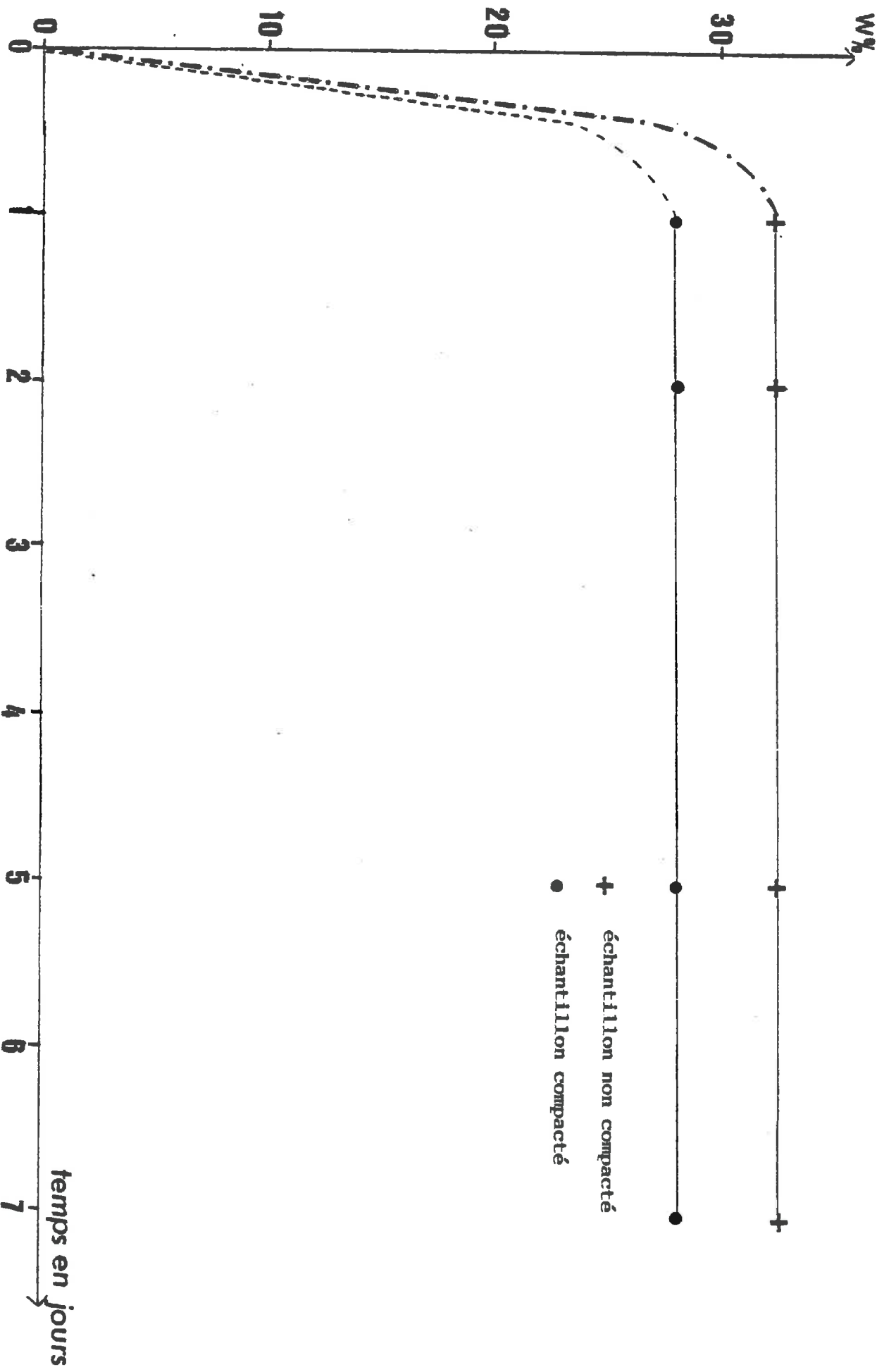
Lorsque tous les agrégats sont prêts, on homogénéise les différentes familles, puis on place tous les agrégats pendant deux jours sous gel de Silice. On fait ensuite des mesures de densité, d'humidité et de porosimétrie pour chaque famille.

On peut alors commencer l'expérience d'humectation-dessiccation.

Numéro de la mesure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ρ_d	1,776	1,785	1,762	1,767	1,768	1,767	1,781	1,778	1,785	1,770	1,768
$1/\rho_d$	1,563	0,560	0,567	0,566	0,566	0,566	0,561	0,562	0,560	0,565	0,565
Numéro de la mesure	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Ecart-type	
ρ_d	1,783	1,784	1,793	1,796	1,762	1,770	1,767	1,756	1,784	0,011	
$1/\rho_d$	0,561	0,561	0,558	0,557	0,567	0,565	0,566	0,570	0,560	0,003	

Annexe : Ecart-type des mesures de densité et de volume massique par la méthode du pétrole sur le matériau naturel remanié (Boigneville)

ψ 1 bar		ψ 1,7 bar		ψ 2 bar		ψ 2,5 bar	
ρ_d	W (%)	ρ_d	W	ρ_d	W	ρ_d	W
1,648	22,75	1,671	16,84	1,679	16,02	1,695	14,79
1,650	22,67	1,672	16,79	1,682	15,94	1,693	14,76
1,645	22,74	1,672	16,89	1,681	15,99	1,691	14,77
1,646	22,99	1,670	16,93	1,679	15,97	1,685	14,95
1,645	22,74	1,674	16,98	1,677	16,01	1,687	14,96
1,64	22,78	1,672	16,89	1,679	15,99	1,690	14,85
Moyennes							
ψ 3 bar		ψ 5 bar		ψ 10 bar		ψ 15 bar	
ρ_d	W	ρ_d	W	ρ_d	W	ρ_d	W
1,706	14,03	1,701	12,52	1,709	10,30	1,726	9,51
1,692	14,06	1,698	12,54	1,722	10,23	1,730	9,55
1,695	13,98	1,697	12,64	1,716	10,22	1,728	9,51
1,690	14,03	1,703	12,54	1,711	10,25	1,723	9,60
1,695	13,98	1,703	12,60	1,721	10,26	1,730	9,48
1,696	14,02	1,700	12,57	1,716	10,25	1,727	9,53
Moyennes							



Annexe : Cinétique de réhumectation du matériau naturel remanié (Boignyville)

