

TH-GC12

T
~~TH~~
M 16

~~M 16~~

INRA - SCIENCE DU SOL
Bibliothèque
23 OCT. 1980
84140 MONTFAVET

E.N.I.T.A. - DIJON QUETIGNY

DEFORMATION D'UN SOL ARGILEUX PAR LE
ROULAGE D'UN TRACTEUR : ETUDES EXPERIMENTALES
AU LABORATOIRE ET IN SITU.

Mémoire de fin d'étude

Patrick BERTUZZI

Septembre 1980

AVANT - P R O P O S

Le travail qui a fait l'objet de ce mémoire a été réalisé à la Station de Science du Sol du Centre de Recherches Agronomiques d'Avignon. Je remercie son Directeur, Monsieur G. MONNIER, pour l'accueil qu'il m'a réservé.

Que Messieurs J. GUERIF et P. STENGEL, qui ont dirigé ce travail, Messieurs J. HOROYAN et M. MONJUSIAU, pour leur collaboration technique, et tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

R E S U M E

L'étude de la déformation des couches de sol travaillées, consécutives au roulage d'un engin agricole, a fait l'objet d'une double approche expérimentale.

- Une étude de plein champ a permis de mettre en évidence, dans le cas de trois profils hydriques, pour trois pressions de gonflage des pneus, le rôle de la couche de surface vis-à-vis de la portance.

- Au laboratoire, un test oedométrique a révélé le comportement du matériau à différentes humidités et intensité de la contrainte, pour un temps court d'application de celle-ci. Il a permis d'établir une loi de variation de la limite de plasticité en fonction de la contrainte appliquée au matériau.

Par ailleurs, ces résultats de laboratoire ont contribué à une modélisation du comportement des couches de sol travaillées mettant en évidence l'importance de la composante horizontale du tassement.

S U M M A R Y

In order to study bearing capacity of tilled soils, a double approach is conducted :

- A field experiment shows, in the case of three soil-moisture profiles and for three inflation pressures of the tyres, the influence, on bearing capacity of soil, of the depth of the dry surface layer.

- A laboratory test (oedometer) reveals the behaviour of the soil under a short-time compression at different moisture-content and stresses.

The curve, soil plastic limit (as defined by the compaction test) versus applied vertical stress, is so defined.

Those analytical results compared with field experiments have contributed to work out a model of under wheel tracks soil strain.

The importance of the horizontal component of packing is evaluated.

P L A N

Introduction.

1- Définition d'une approche méthodologique.

- 1-1. Critère de traficabilité.
- 1-2. Notion de critère de portance.
- 1-3. Méthode de travail.
- 1-4. Choix du matériau.

2- Etude au laboratoire.

2-1. Matériel et méthode.

2-1.1. Choix d'une technique de compactage.

2-1.11. Principe de l'oedométrie.

2-1.12. Description des oedomètres utilisés.

2-1.2. Description du système d'enregistrement des mesures.

2-1.3. Choix d'un temps d'application de la contrainte.

2-1.31. Estimation de l'erreur absolue sur le temps d'application.

2-1.32. Cinétique du compactage.

2-1.4. Choix de l'état initial.

2-1.5. Préparation des échantillons remaniés.

2-2. Eléments d'interprétation du comportement du matériau sur une courbe de compactage.

2-3. Résultats et discussion.

2-3.1. Influence de l'état structural sur le comportement du matériau.

2-3.11. Expression des résultats : relation densité-humidité.

2-3.12. Expression des résultats : variation de l'amplitude du tassement.

2-3.2. Influence de l'intensité de la contrainte.

2-3.21. Expression des résultats : relation densité-humidité.

2-3.22. Expression des résultats : variation de l'amplitude du tassement.

3- Etude de plein champ.

3-1. Préparation des différents profils.

3-1.1. Préparation initiale de la parcelle expérimentale.

3-1.2. Obtention des profils différenciés.

3-1.21. Etat structural initial.

3-1.22. Le profil hydrique

3-1.3. Le roulage.

3-2. Techniques de mesure.

3-2.1. Appréciation globale de la déformation de surface :
Technique d'aspérimétrie.

3-2.11. Principe d'utilisation.

3-2.12. Analyse des données.

3-2.13. Méthode de calcul de la profondeur d'ornièrè.

3-2.2. Mesure de la compacité : profil hydrique et profil de
densité.

3-2.21. Principe de la mesure de la densité.

3-2.22. Problèmes posés par l'utilisation de la sonde.

3-2.23. Conditions de réalisation des profils hydriques
et de densité.

3-2.24. Analyse des données.

3-3. Résultats et discussion.

3-3.1. Description de l'état initial.

3-3.11. Le profil hydrique.

3-3.12. Le profil initial de l'indice des vides structuraux.

3-3.13. Le profondeur de travail.

3-3.2. Description des comportements mécaniques.

3-3.21. Influence de la pression de gonflage sur l'ampli-
tude de la déformation.

3-3.22. Mise en évidence du rôle protecteur de la couche
de surface.

3-3.23. Influence de la couche sèche de surface.

3-3.3. Modélisation de la couche travaillée.

3-3.31. Définition d'un coefficient de perte de "masse".

3-3.32. Reconstitution du profil de densité sous les
ornières.

3-3.33. Analyse de la variation du coefficient Λ .

Conclusion.

A n n e x e s

I Caractéristiques granulométriques et physiques du matériau.

Schéma de la parcelle expérimentale.

II Description de l'Aspérimètre.

III Description de la sonde à atténuation γ .

Courbe d'étalonnage.

Références bibliographiques.

Liste des principaux symboles

Indice des vides : $e = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume de solide}}$ (sans dimension)

e_c	indice des vides totaux sous charge
e_c^s	indice des vides structuraux sous charge
e_i	indice des vides totaux initial
e_i^s	indice des vides structuraux initial
e^t	indice des vides texturaux du matériau malaxé
e^T	indice des vides texturaux des agglomérats naturels
Δe^s	amplitude du tassement.

Grandeur physique :

a) Densité : $\bar{\gamma}_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_{\text{eau}}}$ (sans dimension)

ou γ_d (poids volumique) = $\frac{\text{poids sec à } 105^\circ\text{C de l'échantillon}}{\text{volume de l'échantillon à l'humidité de la mesure}}$

$\bar{\gamma}_d$	densité totale sous charge
$\bar{\gamma}_{d_i}$	densité totale initiale
$\bar{\gamma}_d^t$	densité texturale du matériau malaxé
$\bar{\gamma}_d^T$	densité texturale des agglomérats naturels
$\bar{\gamma}_s$	densité de solide = 2.795
$\bar{\gamma}_W$	densité humide $\gamma_W = \frac{P_W}{V} = \frac{\text{Poids humide}}{\text{Volume humide}}$
$\bar{\gamma}_{d1}$	densité totale de la couche "sèche" avant et après roulage
$\bar{\gamma}_{d2}$	densité totale de la couche "humide" après roulage.

$\bar{\gamma}_{d1}$	densité totale moyenne de la couche travaillée avant roulage
$\bar{\gamma}_{d2}$	densité totale moyenne de la couche travaillée après roulage
$\bar{\gamma}_{d2}^*$	densité totale moyenne de la couche travaillée sous hypothèse de tassement latéral nul.

b) Humidité :

W	humidité de l'échantillon compacté (%)
W _o	humidité optimum de compactage (%)
W _l	limite de liquidité (%)
W _p	limite de plasticité (%)
W _{LR}	limite de retrait (%)

c) Autres grandeurs :

\bar{P}	profondeur moyenne des ornières (cm)
Δ_i	déplacement d'une aiguille de l'aspérimètre dans une ornière
P	pression (bar)
t	temps d'application (s)

Données statistiques :

a, b	paramètres de la droite de la régression linéaire $y = a + bx$
n	nombre de couples (x, y)
r	coefficient de corrélation
	★ significatif à p = 0.05
	★★ significatif à p = 0.01
	★★★ significatif à p = 0.001

Coefficient :

Λ	coefficient de perte de masse (définition page 32).
-----------	---

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

=====

La possibilité d'intervenir, un jour donné, dans une parcelle cultivée est soumise à un certain nombre de facteurs limitants. Cette notion agronomique de "jour disponible" relève de connaissances pluridisciplinaires (Phytotechnie, Bioclimatologie, Economie, etc...).

L'objet de ce travail est de contribuer, dans le domaine de la Science du Sol, et sur un point précis : la portance, à l'élaboration d'un modèle de prévision des jours disponibles pour les travaux agricoles.

En effet, certains des facteurs limitants de l'intervention dans une parcelle pour une opération culturale dépendent de l'état physique des couches de surface.

Ils sont de deux types :

- Possibilités de circulation de l'engin dans la parcelle ou traficabilité.
- Conséquences possibles du roulage sur l'état physique de la couche de sol concernée par le roulage.

A cet égard, les recherches de ces dernières années ont porté notamment sur le comportement au compactage et les risques de tassement des couches de surface.⁽¹⁾ Cependant, le tassement n'est qu'un des éléments participant à la déformation des couches de surface consécutive à un roulage.

L'étude des interactions entre l'état physique des couches de surface et les déformations qu'elles subissent lors du roulage entreprise à la Station de Science du Sol d'Avignon devrait permettre de mieux préciser la notion de portance d'un sol agricole. La meilleure connaissance de cette notion permettrait de prévoir et, dans certaines limites, de corriger les conditions d'intervention dans une parcelle relatives à la déformabilité des couches de surface.

Limité à l'étude de la portance des sols, mon travail ne prend pas en compte les facteurs limitants de la traficabilité liés au phénomène d'adhésivité tels que patinage ou bourrage.

(1) BODDAERT (1976), FAURE (1978), FAURE et STENDEL (1978), FAURE et FIES (1972), GUERIF (1979), GUERIF et FAURE (1979).

Nous tenterons, en confrontant des approches expérimentales de terrain et de laboratoire, d'intégrer des observations globales in situ et des modèles analytiques de comportement du matériau dans un modèle permettant une extrapolation des résultats acquis dans la plus large gamme de situations possibles.

1 - DEFINITION D'UNE APPROCHE METHODOLOGIQUE.

1-1. Critère de traficabilité.

Certains auteurs : LVOV (1969), PERDOK (1978) font état de nombreux critères de traficabilité ou d'aptitude à la circulation. Les critères les plus élaborés intègrent des paramètres liés à la puissance des engins, aux caractéristiques des roues, quelquefois aux caractéristiques mécaniques des sols (cohésion, contrainte de cisaillement), mais jamais à des caractéristiques intrinsèques du sol qui permettraient une généralisation des résultats.

Au niveau de la roue, PERDOK définit, par exemple, un coefficient R de résistance au roulage par la formule

$$R = \frac{1}{n + 1} \left(\frac{1}{BK} \right)^{1/2n + 1} \left[\frac{3W}{(3 - n) \sqrt{cD}} \right]^{(2n + 2) (2n + 1)}$$

- D diamètre de la roue
- W charge appliquée sur la roue
- B largeur de la roue
- c facteur de déformation des roues

Les caractéristiques du sol sont modélisées par la variation des deux paramètres n et K. Il a calculé la valeur de ces deux coefficients dans trois situations de surface de quatre types de sol texturalement différents. La comparaison des valeurs obtenues dans les différentes conditions de roulage lui permettent d'explicitier le sens de ces différents paramètres.

La traduction de l'influence de la nature et de l'état structural du sol, lors d'un roulage sous la forme de deux paramètres de situation, ne permet pas une approche analytique de l'influence de son comportement sur les conditions de circulation dans une parcelle.

Ainsi défini, ils constituent des critères synthétiques qui ne caractérisent pas l'aptitude à la circulation d'un sol dans différentes situations :

- différentes textures,
- différents profils hydriques,
- différents états structuraux.

Les critères de traficabilité existant ne permettent en rien de prévoir l'aptitude d'un sol donné au roulage et restent encore l'ultime synthèse de recherches en cours ou à venir.

Dans cet esprit, ce travail, consacré à l'étude de la déformation d'un sol argileux consécutive au roulage d'un engin, contribue à la définition de critère de portance et de niveaux de compacité risqués.

1-2. Notion de critère de portance.

Quel critère de portance choisir pour prévoir qu'un engin agricole peut circuler sur une parcelle ? Nous avons choisi de le définir par la profondeur limite d'enfoncement des roues, acceptable pour un véhicule considéré. Cette limite est propre à chaque type d'engin agricole. L'étude de la portance in-situ consiste à acquérir le moyen de prévoir l'amplitude de la déformation des couches de surface du sol dans toutes les conditions de roulage afin de définir son aptitude à la circulation. Un tel objectif nécessite d'étudier les variations de cette amplitude de déformation en fonction :

- d'une part de la constitution, de l'état structural et de l'humidité du sol en place,
- d'autre part de l'intensité de la contrainte appliquée au sol lors du roulage.

Notre objet n'est pas d'analyser l'aspect théorique des relations, contrainte déformation, lors d'un roulage. Ce travail nécessiterait, dans l'état actuel des connaissances en Mécanique des sols, des hypothèses de continuité, d'homogénéité et d'isotropie du matériau incompatibles avec la réalité d'une couche de sol travaillée.

1-3. Méthode de travail.

Quelles variables faut-il prendre en compte pour prévoir globalement l'amplitude de la déformation affectant un sol argileux, placé dans des cas types de profils culturaux et pour une gamme de pression au sol appliquée par un même tracteur ?

L'amplitude de la déformation résulte de l'action conjuguée de deux phénomènes mécaniques :

- le tassement est lié à l'amplitude de la déformation par deux paramètres qui sont : l'augmentation de compacité et le volume affecté par cette dernière.

- le fluage qui se traduit par un déplacement sans tassement du matériau déformé.

Au laboratoire, l'étude du tassement, phénomène facilement reproductible et relativement connu dans ses mécanismes, permettra de dégager les lois de comportement au compactage du matériau.

Sur le terrain, la technique d'Aspérimétrie (mesure des déformations verticales de la surface du sol) permettra de caractériser l'amplitude de la déformation par la mesure de la profondeur des ornières. La mesure de la variation de compacité des couches de sol déformées permet de séparer la part relative de la composante verticale du tassement dans la déformation globale du matériau.

A partir de l'exploitation des résultats de plein champ et de l'utilisation des lois de compactage, nous tenterons, sur la base d'hypothèses émises après l'observation du profil cultural, de développer une modélisation du comportement des différentes couches de sol affectées par le roulage. Elle permettra de distinguer la part relative de ces deux phénomènes dans la variation de l'amplitude de déformation en fonction des différentes conditions induites de roulage.

1-4. Choix du matériau.

La couche superficielle de la parcelle étudiée présente un avantage majeur. Du fait de sa texture argileuse (40 % de smectites) et dans la gamme des contraintes appliquées, on peut considérer que l'espace poral textural est constant à une humidité donnée. Seul l'espace poral structural est affecté par le tassement. La mise en place de l'essai en sol argileux permet de limiter l'étude à l'évolution des vides structuraux.

Les caractéristiques granulométriques et physiques du sol de la parcelle expérimentale figurent à l'annexe 1.

2 - ETUDE AU LABORATOIRE.

Nous prendrons en compte, dans l'étude du comportement au compactage, l'interaction entre l'intensité de la contrainte appliquée σ et la teneur en eau W du matériau. Ce comportement sera défini par rapport aux états mécaniques solide, plastique et liquide du matériau. L'approche expérimentale consiste, par l'intermédiaire d'un test de compactage, à déterminer :

- l'amplitude de déformation subie par tassement dans chaque état mécanique,

- les limites de ces états :

W_p limite de plasticité

W_l limite de liquidité

et ce pour le sol provenant de la parcelle expérimentale de plein champ.

Pour définir les limites de consistance (W_p et W_l), nous utiliserons une généralisation des limites d'Atterberg proposée par FAURE (1978) :

- W_p : Cette limite de plasticité correspond au seuil hydrique de sensibilité au compactage.

- W_l : Cette limite de liquidité est appelée teneur en eau du maximum de compacité d'un matériau compacté. Au delà de cette limite, le matériau est saturé, son état correspond à la définition de la liquidité mécanique.

Les deux limites W_p et W_l varient avec l'intensité de la contrainte de compactage.

2-1. Matériel et méthode.

2-1.1. Choix d'une technique de compactage.

Le choix d'une technique de compactage doit permettre de prendre en compte les variables qui interviennent au champ : l'intensité σ et le temps d'application t de la contrainte. Il est subordonné à un parfait contrôle de l'intensité de celle-ci et à la maîtrise de temps court d'application. La technique d'oedométrie répond à ces exigences. Par rapport au test Proctor, elle supprime le problème du passage à une équivalence énergétique entre le roulage et le compactage au laboratoire et permet, par l'analyse du système de porosité, de caractériser les variations de l'espace poral de l'échantillon au cours du compactage.

2-1.11. Principe de l'oedométrie (cf. fig. 1)

Dans un oedomètre, on effectue un essai de compactage avec frettage en plaçant l'échantillon dans un cylindre (1). La hauteur de compression est mesurée à l'aide d'un comparateur (2). La contrainte est appliquée sur la surface supérieure de l'échantillon (3) au moyen d'un piston rigide (4). Si le sol est saturé, la présence des deux plaques poreuses (5) permet l'évacuation de l'eau au cours du compactage (consolidation).

2-1.12. Description des oedomètres utilisés (cf. fig. 2)

Nous avons adopté le système de mise en charge pneumatique, mis au point par DEVAUD (1977). C'est le seul système qui permet des temps courts d'application de la contrainte. Par rapport aux oedomètres classiques à poids, la contrainte est transmise au piston (4) par un verin pneumatique (6). Ce type de bâti assure une mise en charge sans à coup dans un délai de 1/5e de seconde. Elle permet la mesure de la variation de volume de l'espace poral sous charge et après recouvrement : (augmentation du volume de l'échantillon après suppression de la contrainte).

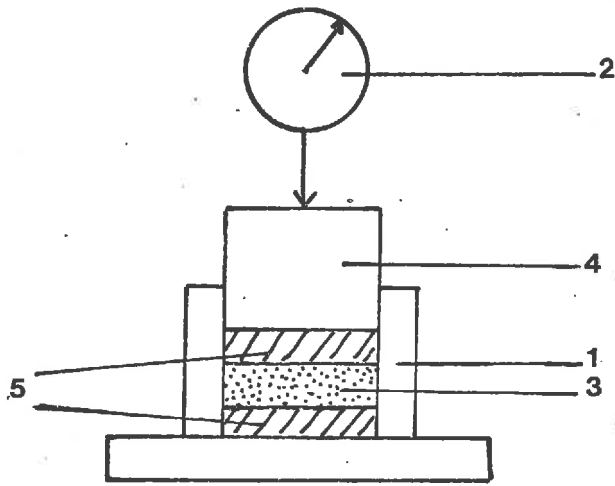


fig1. Schéma type d'un oedomètre

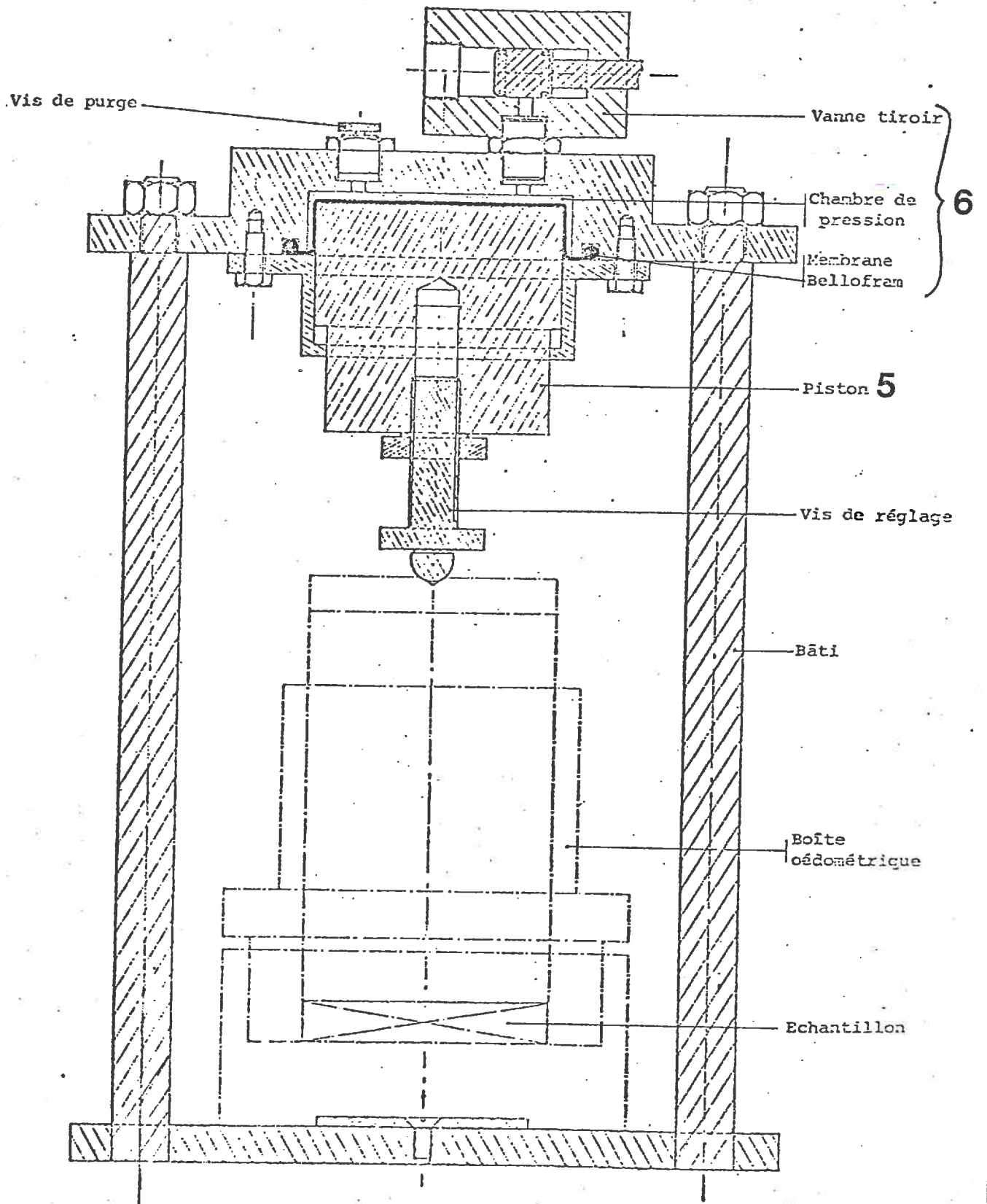


fig 2 Bâti pneumatique

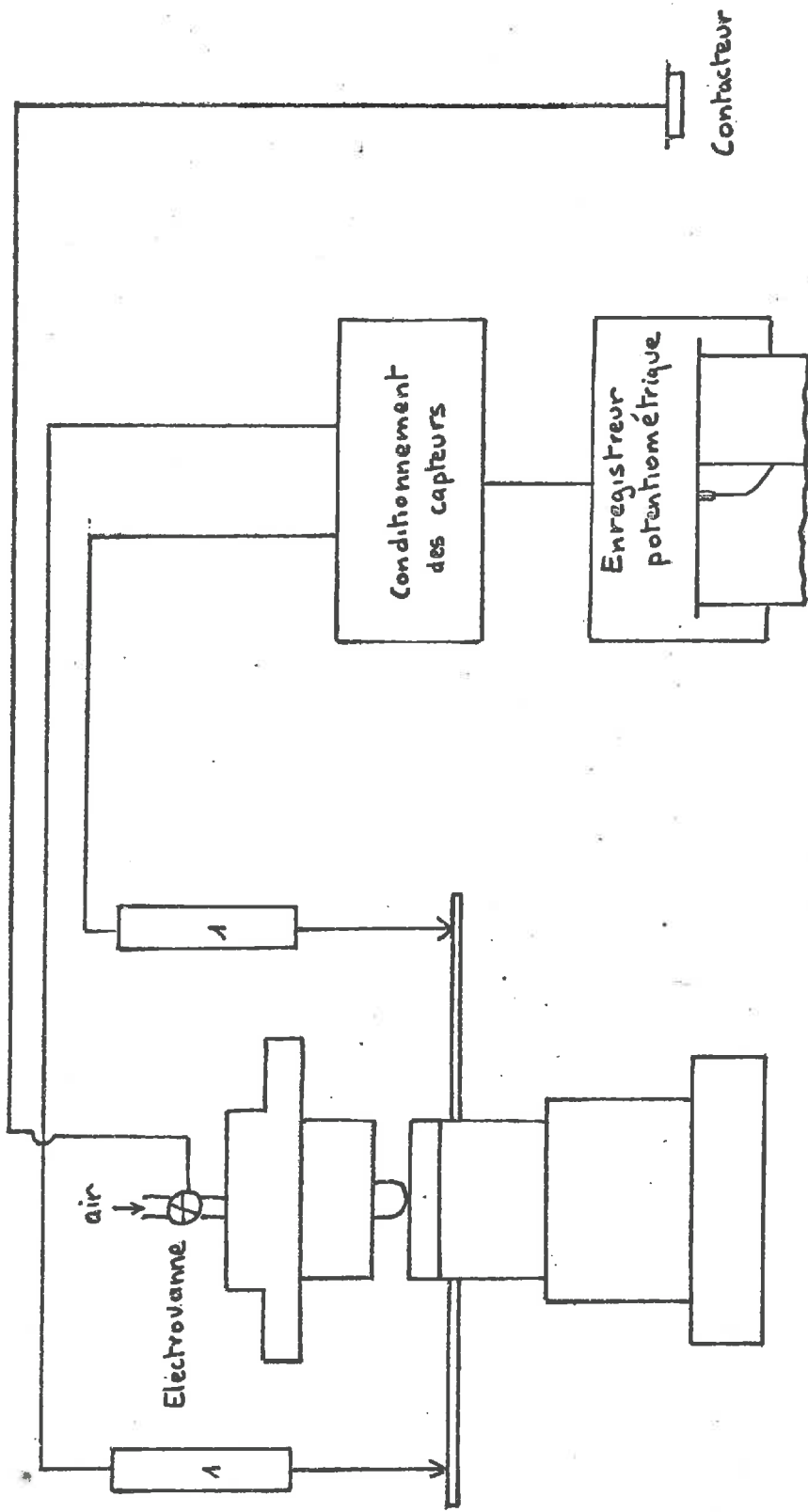


fig 3 Installation du Test oedométrique

2-1.2. Description du système d'enregistrement des mesures. (cf. fig.3)

Deux capteurs de déplacement (1) permettent de suivre graphiquement les variations de la hauteur de l'échantillon sous contrainte et après recouvrement. Ceux-ci traduisent, par une variation d'une différence de potentiel, le déplacement qu'ils subissent. La moyenne des différences de potentiel relatives aux deux capteurs est transmise à un traceur potentiométrique, visualisant la cinétique d'enfoncement du piston. L'étalonnage de ces capteurs abouti au calcul d'une régression linéaire ($r = 0.9999$, $n = 41$) permettant la conversion de la différence de potentiel observée en une hauteur Δh d'enfoncement du piston. L'expression de cette régression linéaire est :

$$\Delta h = -0.1212 + 4.0200 V \quad \text{pour une course maximale du piston de 16 mm.}$$

(domaine de linéarité des capteurs).

2-1.3. Choix d'un temps d'application de la contrainte.

2-1.31. Estimation de l'erreur absolue sur la mesure du temps d'application.

Sur notre dispositif oedométrique, le temps de la mise en charge, après son déclenchement, est d'environ 1/5e de seconde. De plus, le déclenchement et l'arrêt de celle-ci est manuel. Le temps d'application est contrôlé à l'aide d'un chronomètre. Cette absence de programmation rigoureuse du temps d'application de la contrainte se traduit par une erreur absolue sur cette variable d'environ une seconde. De ce fait, nous ne pouvons pas envisager un temps d'application proche de celui réellement appliqué au champ. Compte tenu de la vitesse d'avancement du tracteur (0.8 m/s) et d'une évaluation de la longueur du contact roue-sol (30 cm), nous l'avons estimé à 1/25ème de seconde.

2-1.32. Cinétique de compactage. (cf. fig. 4 et 5).

Le choix d'un temps d'application doit tenir compte de la cinétique de compactage. La contrainte est appliquée, puis maintenue constante. La fig. 4 illustre la cinétique de la déformation.

Elle est en fonction du temps :

- quasi instantanée (zone A). La cinétique est linéaire. A intensité de la contrainte constante, la pente de la cinétique diminue avec

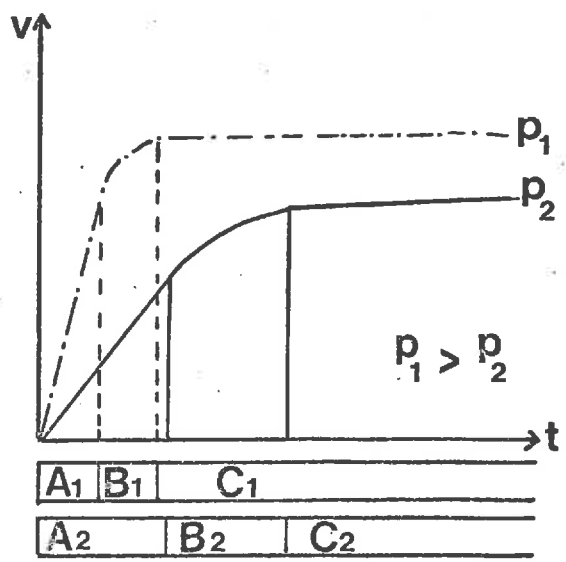
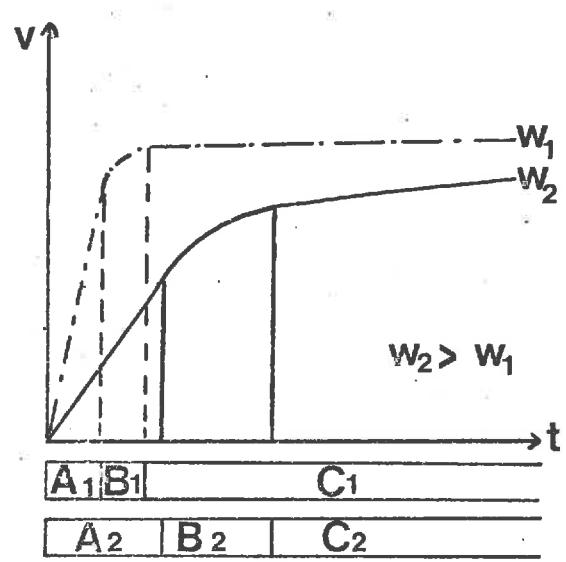
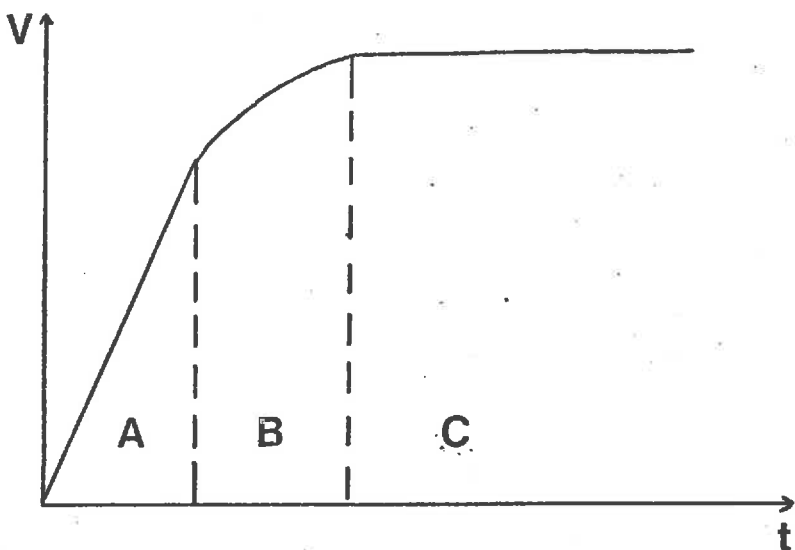


fig 4 Cinétique du compactage

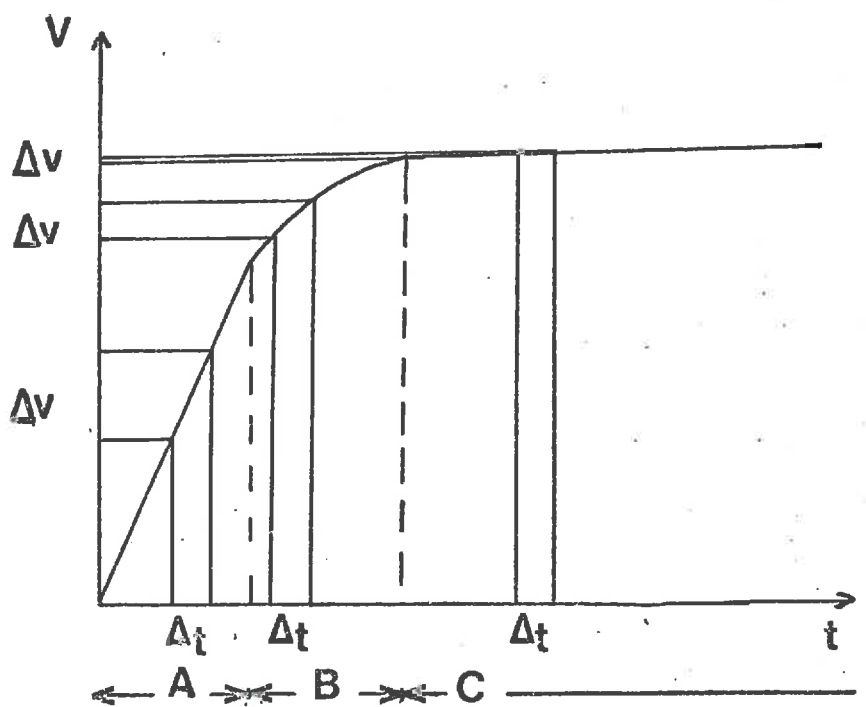


fig 5 Choix d'un temps d'application

l'humidité de l'échantillon. A humidité constante, elle augmente avec l'intensité de la contrainte.

- résiduelle ou retardée (zone B + C). A contrainte constante, la durée de la phase de transition (zone B) entre la déformation instantanée et retardée proprement dite (zone C) augmente avec l'humidité. Elle diminue avec l'intensité de la contrainte à humidité constante. Dans la zone C, la déformation augmente de plus en plus faiblement au cours du temps jusqu'à obtention de l'état d'équilibre : état de compacité maximale du matériau.

La fig. 5 illustre le problème posé par le choix d'un temps d'application. Nous ne pouvons pas mesurer la déformation dans la phase quasi instantanée (zone A). L'erreur absolue sur le temps d'application entraîne une dispersion de la mesure de la déformation. Nous avons choisi de la mesurer dans la seconde phase. En augmentant le temps d'application, l'erreur relative sur la mesure du temps d'application devient négligeable. On obtient une meilleure précision sur la mesure de la déformation. Nous situerons celle-ci dans la zone C, pour un temps d'application arbitrairement choisi d'une minute. Quelles que soient l'intensité de la contrainte et l'humidité de l'échantillon, l'erreur absolue sur la mesure de la déformation est alors négligeable.

2-1.4. Choix de l'état initial. (cf. fig. 6)

Nous avons choisi de définir l'état initial de notre matériau par un indice des vides structuraux constant soit :

$$e_i^s = e_i - e^T = \left(\frac{\bar{\gamma}_s}{\bar{\gamma}_{d_i}} - 1 \right) - \left(\frac{\bar{\gamma}_s}{\bar{\gamma}_d^T} - 1 \right) = \text{constante}$$

$$e_i^s = \bar{\gamma}_s \left[\frac{1}{\bar{\gamma}_{d_i}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_d^T} \right]$$

Il était nécessaire à cette fin de connaître la relation $\frac{1}{\bar{\gamma}_d^T}$, W du matériau soumis au test oedométrique.

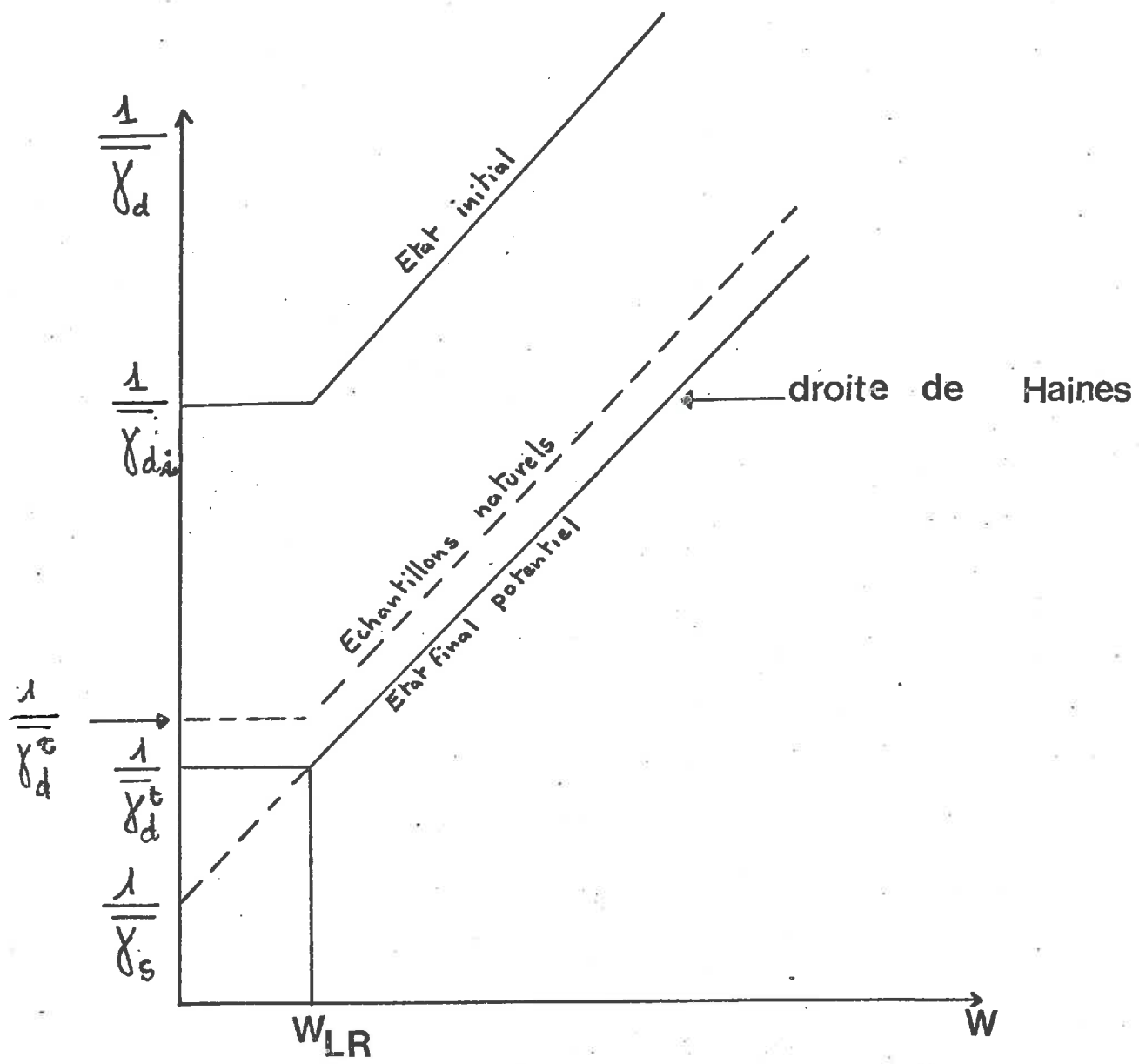


fig.6 Choix de l'état initial

Or, la technique d'humectation par pulvérisation rend inopérante la technique classique de mesure de la densité texturale sur agglomérats tamisés entre 2 et 3 mm (MONNIER et al., 1973). Elle induit en effet dans le matériau argileux une microfissuration qui conduit à une sous estimation sensible de la densité. Compte tenu de l'impossibilité technique de pratiquer la mesure sur agglomérats suffisamment petits (< 1 mm) pour que leur structure soit considérée comme "continue", nous avons utilisé les valeurs obtenus par dessèchement progressif d'une pâte malaxée à l'état saturé.

Dans ces conditions (HAINES, 1923), la courbe et, dans une première phase de dessèchement confondue avec la droite de saturation d'équation :

$$\frac{1}{\bar{\gamma}_d^t} = \frac{1}{\bar{\gamma}_s} + W$$

suivant la technique utilisée par PELTIER, nous avons admis que ce comportement persistait jusqu'à l'humidité de la limite de retrait W_{LR} en deça de laquelle la courbe est assimilable à une horizontale définie par la densité $\bar{\gamma}_{dd}^t$ à l'état sec.

Nous définissons alors e_i^s ainsi :

$$e_i^s = \bar{\gamma}_s \left[\frac{1}{\bar{\gamma}_{di}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_d^t} \right] = \text{constante}$$

Le graphe de variation de $\frac{1}{\bar{\gamma}_{di}}$ en fonction de W est donc parallèle à la courbe de HAINES-PELTIER définie ci-dessus. (cf. fig. 6)

2-1.5. Préparation des échantillons remaniés.

Le matériau utilisé provient de l'horizon B de la parcelle expérimentale. Après séchage et tamisage mécanique, nous avons récupéré les agrégats naturels de 1 à 2 mm.

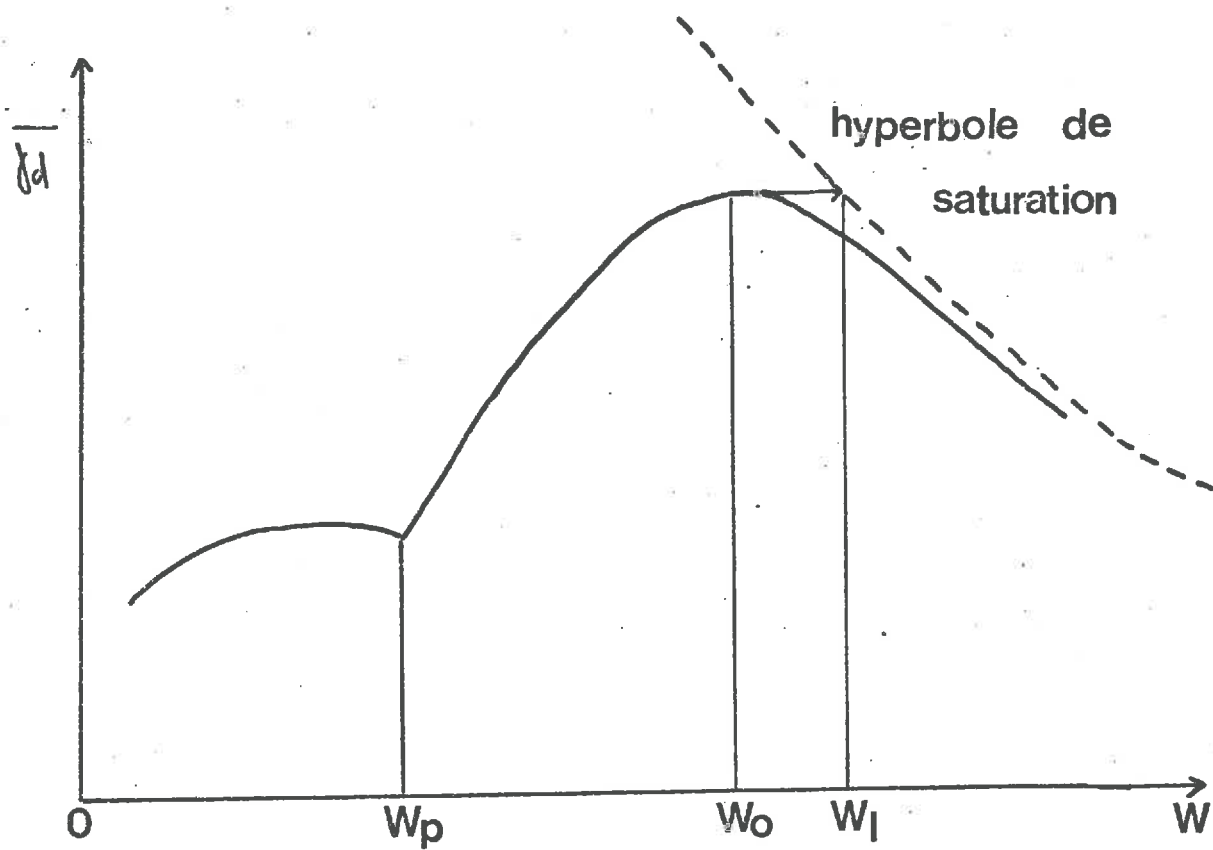


fig 7 Courbe de compactage

Les échantillons sont constitués par cette fraction granulométrique standard des agrégats. Ils sont humectés par pulvérisation jusqu'à obtention du poids d'eau désiré. Ils sont laissés à température constante, pendant 8 jours, afin d'homogénéiser l'humidité.

2-2. Eléments d'interprétation du comportement du matériau sur une courbe de compactage (cf. fig. 7)

Le test Proctor (FAURE, 1978), pour une intensité de la contrainte de compactage, permet de définir sur le graphe $\bar{\gamma}_d = f(W)$ les limites de consistance ou de changement d'état du matériau :

W_p : limite de plasticité ou seuil hydrique de sensibilité au compactage.

W_l : limite de liquidité ou teneur en eau du point de la courbe de saturation ayant pour ordonnée la valeur de la compacité maximale.

Trois régions peuvent être définies :

* $W < W_c$, Etat solide :

L'augmentation de la teneur en eau s'accompagne :
 - de la diminution de la cohésion des agrégats,
 - du gonflement des agrégats.

Si l'effet du gonflement l'emporte, $\bar{\gamma}_d$ diminue, la pente est négative.

* $W_p < W < W_o$, Etat plastique :

L'entrée en plasticité du matériau correspond à l'entrée en plasticité de sa phase argileuse. La densité $\bar{\gamma}_d$ est une fonction croissante de W jusqu'au maximum de compacité (W_o : teneur en eau optimum de compacité).

* $W > W_o$, l'écart expérimental entre la courbe et l'hyperbole de saturation correspond à la présence d'air piégé dans l'échantillon. Si la technique utilisée permet l'élimination de l'air, l'optimum se trouve sur la courbe de saturation.

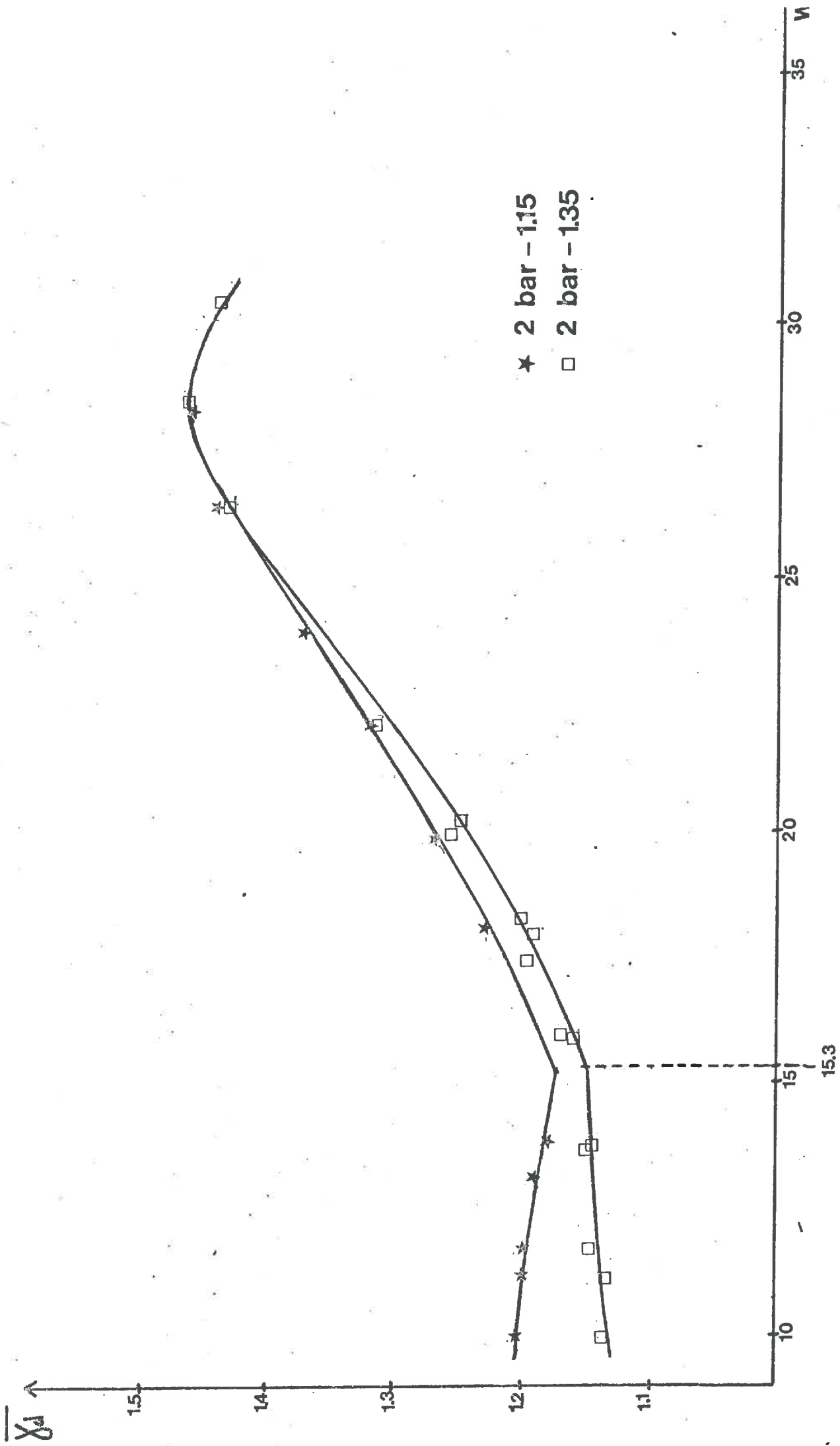


fig 8 Influence de l'état initial

Relation densité - humidité

La limite de liquidité W_1 est déterminée par la teneur en eau du point de la courbe de saturation ayant pour ordonnée la valeur de la compacité maximale (FAURE, 1978).

La différence $W_1 - W_c$ est l'équivalent d'un indice de plasticité pour l'intensité de la contrainte considérée. Les valeurs W_p , W_o et W_1 sont déterminées graphiquement.

Cette définition des limites de consistance a été confirmée par FAURE (1978) sur des courbes de compactage oedométriques pour une contrainte de 10 kg/cm^2 et pour un temps d'application de cette contrainte tel que le matériau atteigne l'équilibre : densité maximale du matériau pour le couple (W, σ) . Nous tenterons de la généraliser pour des intensités variables et un temps court d'application de la contrainte.

2-3. Résultats et Discussion.

2-3.1. Influence de l'état structural sur le comportement du matériau.

2-3.1.1. Expression des résultats : courbe relation densité-humidité de compactage (cf. fig. 8)

L'effet de l'état structural sur le comportement du matériau au compactage a été étudié sur des échantillons placés à deux états structuraux différenciés : $e_1^s = 1.15$ et $e_1^s = 1.35$. Le compactage a été réalisé à la pression de 2 bars et donne les résultats suivants :

- pour un temps court d'application de la contrainte, nous observons les mêmes types de comportement et l'existence de limites de consistance tels qu'ils ont été mis en évidence par le test Proctor et par oedométrie à des temps d'application de la contrainte correspondant à l'équilibre de l'échantillon,

- la création de deux états structuraux différenciés par leur indice des vides structuraux initial, se traduit par deux courbes de compactage individualisées. Les limites de consistance sont indépendantes de l'état structural.

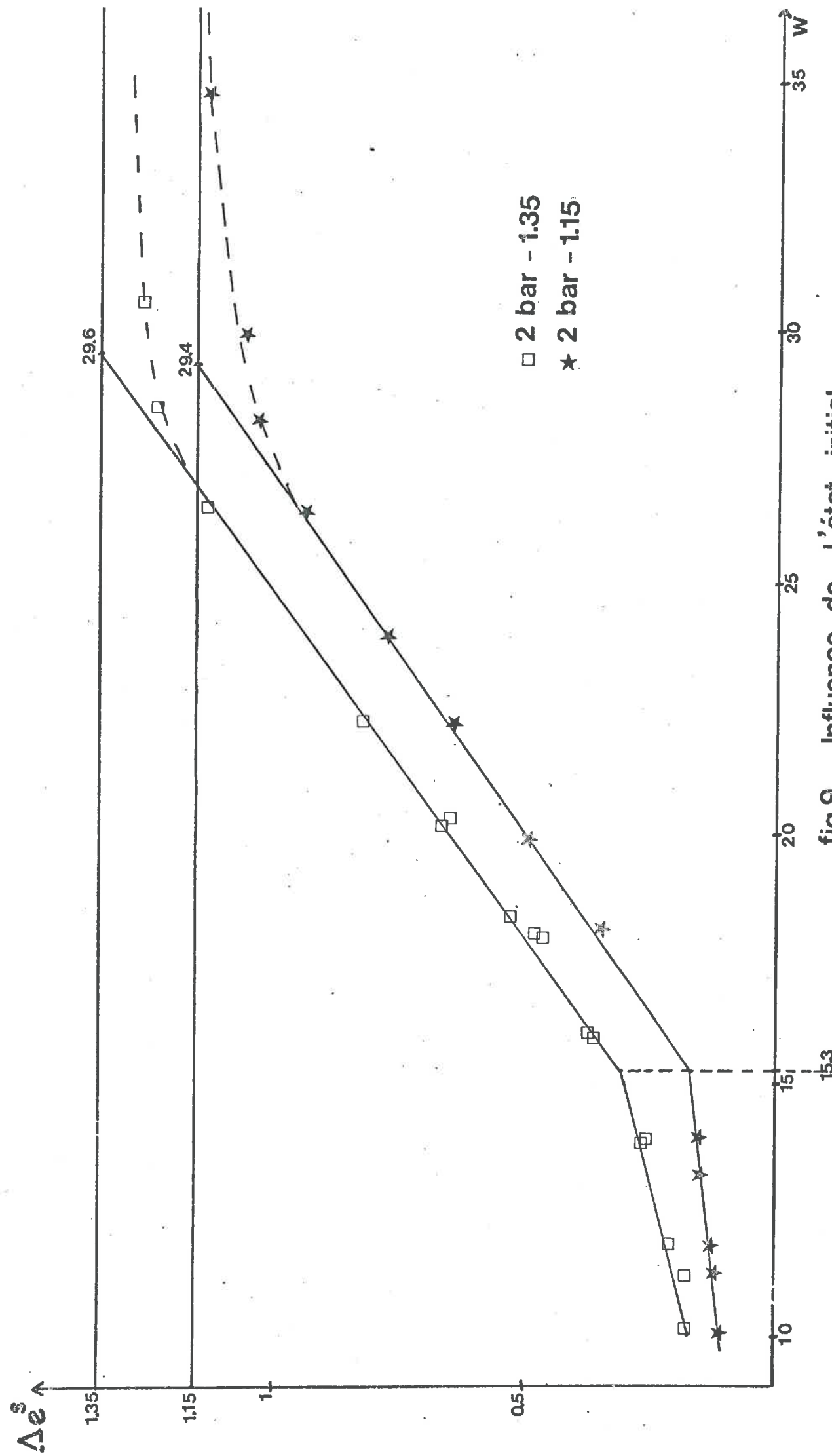


fig 9 Influence de l'état initial

Relation amplitude du tassement - humidité

Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par BODDAERT en technique Proctor, où il a fait varier la granulométrie des agrégats initiaux. Ils confirment la nécessité de la maîtrise de l'état structural initial et le bien fondé de la technique utilisée.

2-3.12. Expression des résultats : variation de l'amplitude tassement.

2-3.121. Analyse de la courbe. (cf. fig. 9)

L'amplitude du tassement s'évalue simplement par la différence des indices des vides totaux initial (e_i) et après compactage (e_c).

$$\Delta e = e_i - e_c$$

L'espace poral textural n'étant pas affecté par le compactage pour les sols argileux, cette variation de l'indice des vides totaux est égale à la variation de l'indice des vides structuraux Δe^s :

$$\Delta e^s = e_i^s - e_c^s = (e_i - e^T) - (e_c - e^T) = e_i - e_c$$

Pour interpréter les courbes de compactage en terme d'amplitude de tassement, on portera Δe^s en fonction de W .

Pour $0 < W < W_p$, on retrouve le comportement solide annoncé plus haut. Le comportement semble linéaire.

Pour $W > W_p$, Δe^s varie brusquement après W_p , on a atteint le comportement plastique. Le graphe semble linéaire croissant jusqu'à ce qu'il s'infléchisse pour tendre asymptotiquement vers une valeur limite correspondant à la structure continue du matériau (indice des vides structuraux nul) et à un état proche de la saturation. La teneur en eau pour laquelle ce phénomène apparaît serait la limite de liquidité W_1 .

Pour $W > W_1$, le matériau est quasiment saturé et de structure assimilable à une structure continue qui serait incompressible sans départ d'eau.

	e_i^S	a	b	r	n
Etat Solide	1.15	0.0012	0.0106	0.9761 ^{**}	5
	1.35	-0.0793	0.0248	0.9739 ^{**}	5
Etat Plastique	1.15	-0.9218	0.0705	0.9995 ^{***}	5
	1.35	-0.8255	0.0736	0.9993 ^{***}	8

tab10 Influence de l'état initial

régressions lineaires $\Delta e^S = a + bW$

2-3.122. Evaluation des valeurs numériques de W_p
(cf. tab. 10)

Les techniques classiques statistiques actuelles ne permettent pas d'évaluer les coordonnées d'un point singulier d'une courbe traduisant une discontinuité de comportement.

Nous avons assimilé les courbes de compactage à une bi-droite :

- la première droite pour l'état solide,
- la seconde droite pour l'état plastique,

pour les teneurs en eau ou les variations de Δe^s semblent linéaires en fonction de W . Sur le tableau (cf. tab. 10) figurent les différents paramètres des régressions linéaires calculées. Les corrélations sont toutes significatives. Les régressions calculées permettent de donner une évaluation graphique de la limite de plasticité W_p . Elle est définie par l'intersection des deux régressions linéaires caractérisant le comportement dans chaque état solide et plastique. Les limites calculées sont

$$W_p = 15.4 \% \quad \text{pour } e_i^s = 1.15$$

$$W_p = 15.3 \% \quad \text{pour } e_i^s = 1.35$$

Aux erreurs expérimentales près et à la méthode d'évaluation près, ces résultats confirment la non influence de l'état structural sur W_p .

2-3.123. Critique de l'évaluation de W_p . (cf. fig. 11)

Dans le système de coordonnées $(\Delta e^s, W)$, nous avons calculé par l'intersection de deux régressions linéaires la limite de consistance W_p . Exprimons Δe^s en fonction des différents paramètres mesurés :

$$\Delta e^s = e_i^s - e^s$$

$$\Delta e^s = \bar{\gamma}_s \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{d_i}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_d} \right) - \bar{\gamma}_s \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_d} - \frac{1}{\bar{\gamma}_d} \right)$$

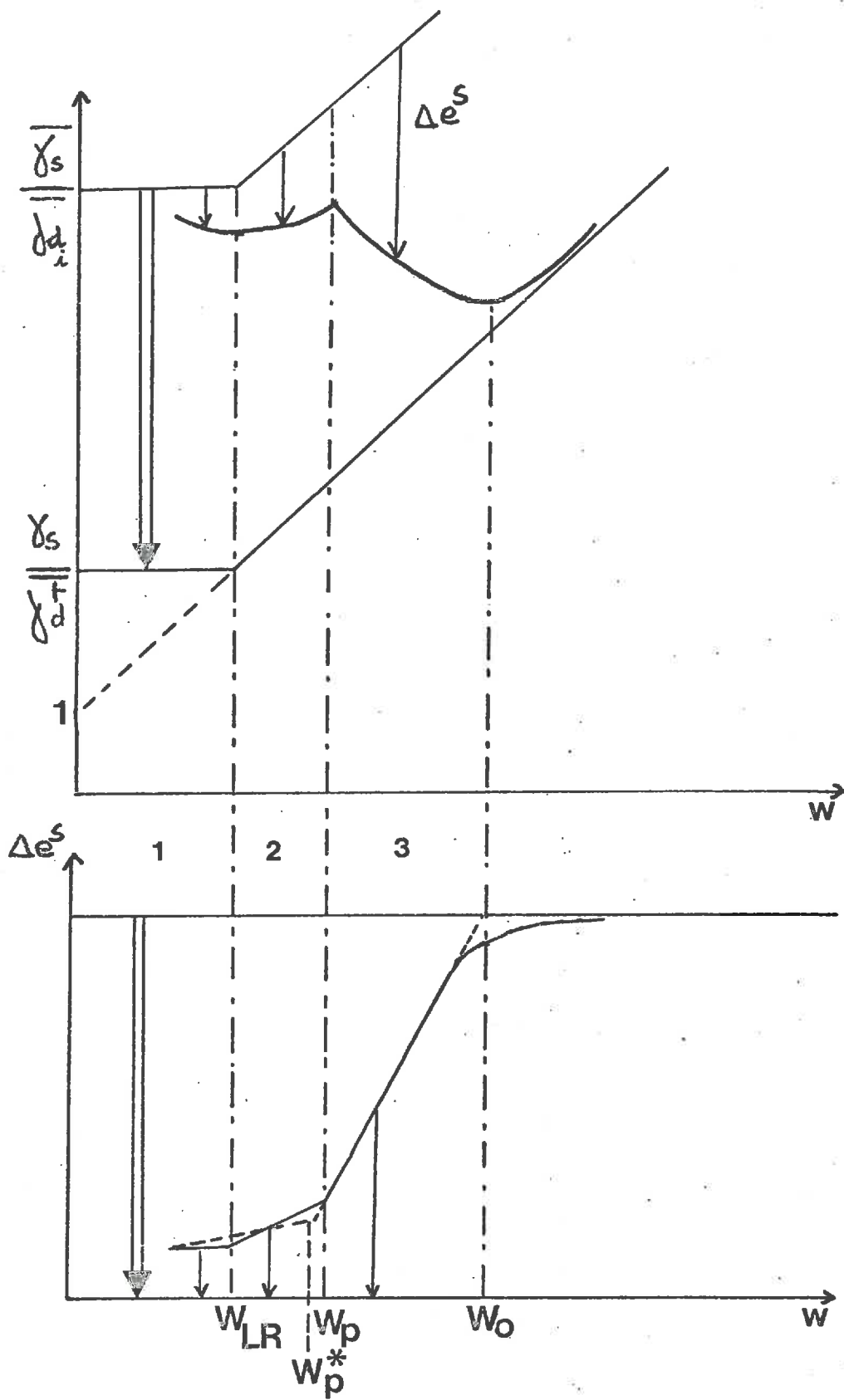


fig11 Critique de l'évaluation graphique de W_p

$\bar{\gamma}_{d_i}$ densité initiale du matériau = $\frac{1}{\bar{\gamma}_{\text{eau}}} \frac{M_s}{V_T}$
 M_s = masse sèche de l'échantillon
 V_T = volume initial de la cellule de l'oedomètre

$\bar{\gamma}_d$ densité mesurée après compactage

$\bar{\gamma}_s$ densité de solide ($\bar{\gamma}_s = 2.795$)

$\bar{\gamma}_d^{-t}$ densité texturale du matériau

Δe^s s'écrit donc $\Delta e^s = \bar{\gamma}_s \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{d_i}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_d^{-t}} \right)$

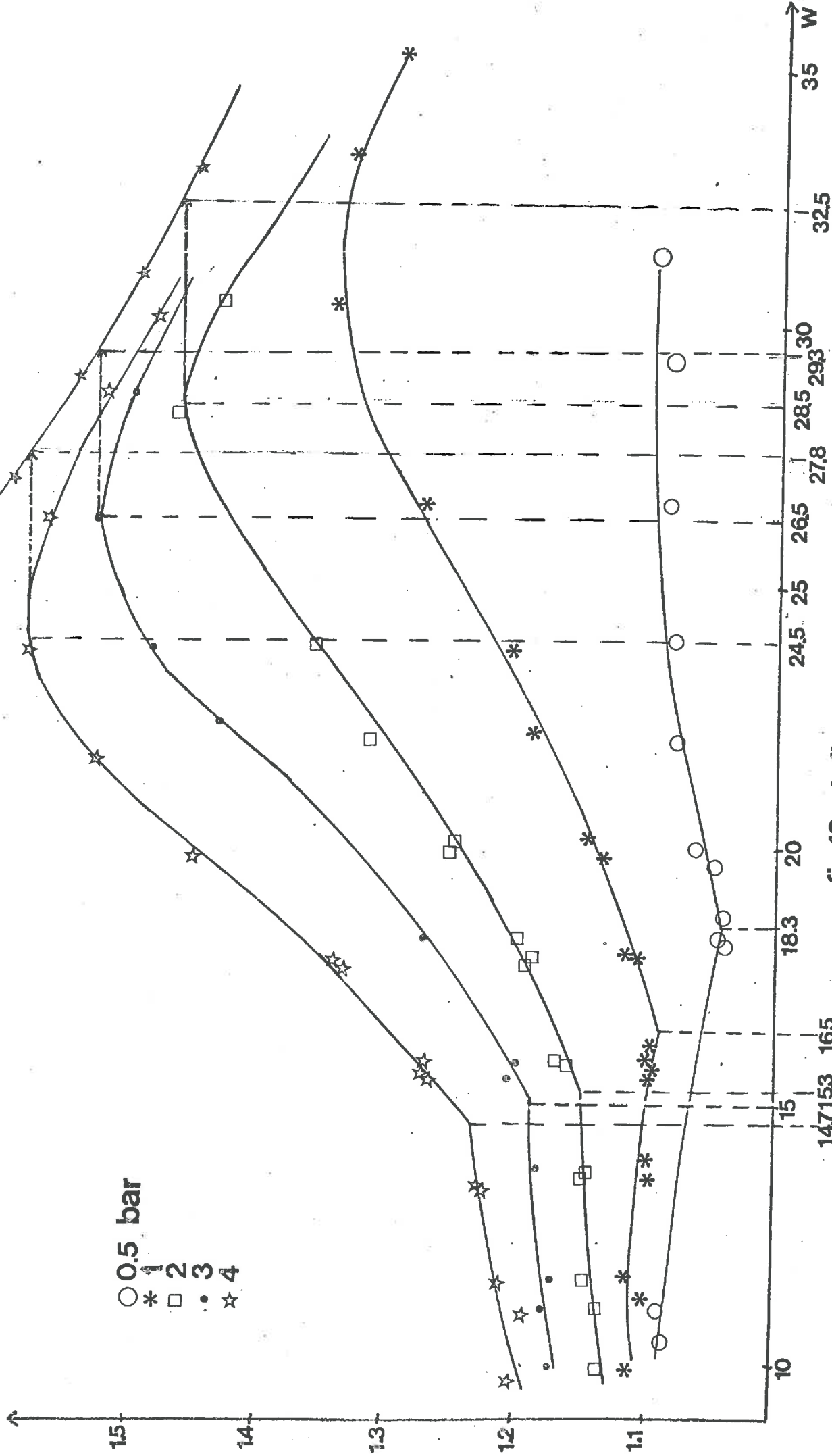
Sur le graphique (cf. fig. 11), l'amplitude du tassement est représenté (au facteur $\bar{\gamma}_s$ près) par l'écart en projection verticale existant entre les courbes

$$\frac{1}{\bar{\gamma}_{d_i}} = f(W) \quad \text{et} \quad \frac{1}{\bar{\gamma}_d^{-t}} = f(W)$$

Nous pouvons distinguer 3 zones de variation de Δe^s :

- zone 1 $W < LR$ le matériau est à l'état solide. Il n'est pas gonflant.
- zone 2 $LR < W < W_p$ le matériau est à l'état solide. Il est gonflant.
- zone 3 $W_p < W < W_l$ le matériau est à l'état plastique. Il est gonflant.

Aux limites de ces trois zones ($W = LR$ et $W = W_p$), il existe deux discontinuités marqués dans la variation de Δe^s . Elle est représentée à l'état solide par deux segments de droites concourants en LR. Nous les avons assimilés dans le calcul de la régression à une seule droite. Nous sous-estimons par ce biais la valeur de W_p . Nous ne disposons pas de moyens statistiques nécessaires pour déterminer l'intervalle de confiance de l'évaluation de W_p par la méthode utilisée. Nous ne pouvons donc pas déterminer l'erreur commise par ce biais introduit.



○ 0.5 bar
 * 1
 □ 2
 • 3
 ☆ 4

fig12 Influence de pression

Relation densité - humidité

Il n'existe pas de moyen statistique qui permet de définir une discontinuité à partir d'une courbe de compactage. La détermination est empirique. L'examen des points expérimentaux en coordonnées (\bar{Y}_d, W) nous permet de réaliser la partition des points expérimentaux nécessaires pour le calcul des régressions linéaires, grâce à une localisation grossière de W_p . La nouvelle méthode de représentation graphique permet l'évaluation de W_p , d'une manière plus objective.

2-3.2. Influence de l'intensité de la contrainte.

Nous avons testé le comportement du matériau pour cinq intensités de la contrainte : pression 0.5, 1, 2, 3 et 4 bars, sur des échantillons dont l'indice initial des vides structuraux est $e_1^s = 1.35$. Cette valeur choisie doit faciliter la comparaison des résultats de laboratoire et de terrain.

2-3.21. Expression des résultats : relation densité-humidité (cf. fig. 12)

Lorsque la pression augmente, la courbe est déplacée vers les compacités les plus fortes et les teneurs en eau les plus faibles. Les limites de consistance dépendent de la pression. Lorsque la pression augmente :

* la teneur en eau nécessaire à l'entrée en plasticité du matériau diminue ;

* pour les pressions de 1, 2, 3 et 4 bars, la teneur en eau nécessaire à l'entrée en liquidité diminue lorsque la pression augmente. Pour la pression de 0,5 bar, dans la gamme d'humidité étudiée, nous ne pouvons pas déterminer W_1 car le maximum de compacité n'est pas atteint.

2-3.22. Expression des résultats : variation de l'amplitude du tassement. (cf. fig. 13)

2-3.221. Analyse de la courbe.

L'expression des résultats du compactage dans les nouvelles coordonnées confirment que les courbes conservent une allure linéaire dans le domaine solide et sur une gamme d'humidité croissante avec la pression dans le domaine plastique. La courbe s'infléchit à une humidité d'autant plus faible que la pression est élevée. Elle devient parallèle à la droite $\Delta e = 1;35$ (sauf pour la pression de 0.5 bars).

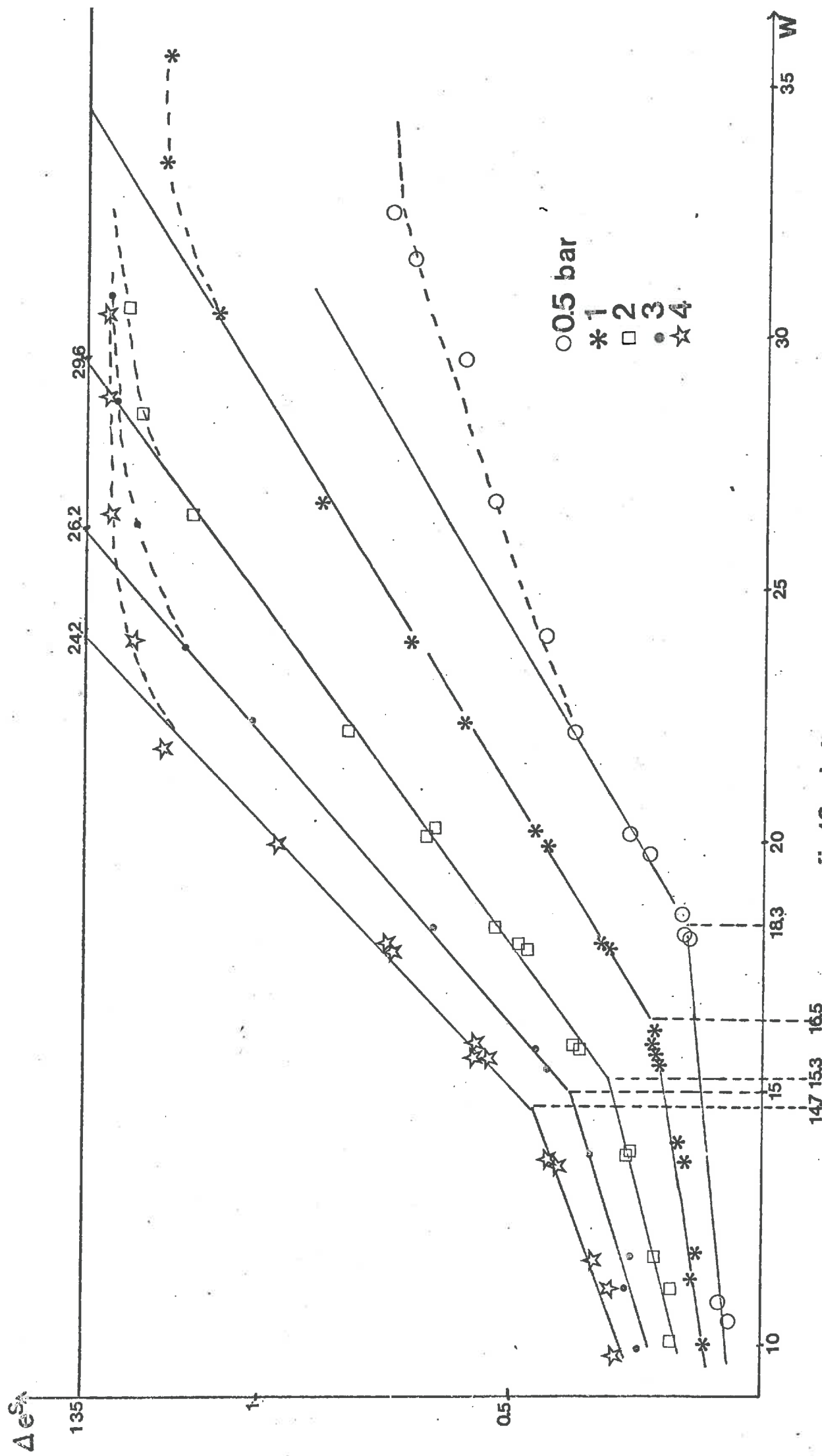


fig13 Influence de la pression

Relation amplitude du tassement-humidité

	Pression	a	b	r	n
Etat Solide	0.5	-0.0481	0.0111	0.9852 [*]	4
	1	-0.0532	0.0166	0.9635 ^{***}	9
	2	-0.0793	0.0248	0.9739 ^{**}	5
	3	-0.0718	0.0300	0.9475 [*]	4
	4	-0.0856	0.0368	0.9584 [*]	5
Etat Plastique	0.5	-0.9462	0.0603	0.9944 ^{**}	4
	1	-0.8500	0.0648	0.9993 ^{***}	8
	2	-0.8255	0.0736	0.9963 ^{***}	9
	3	-0.9238	0.0867	0.9997 ^{***}	5
	4	-0.9319	0.0942	0.9988 ^{***}	7

tab 14 Influence de la pression :
Régressions linéaires $\Delta e^S = a + bW$

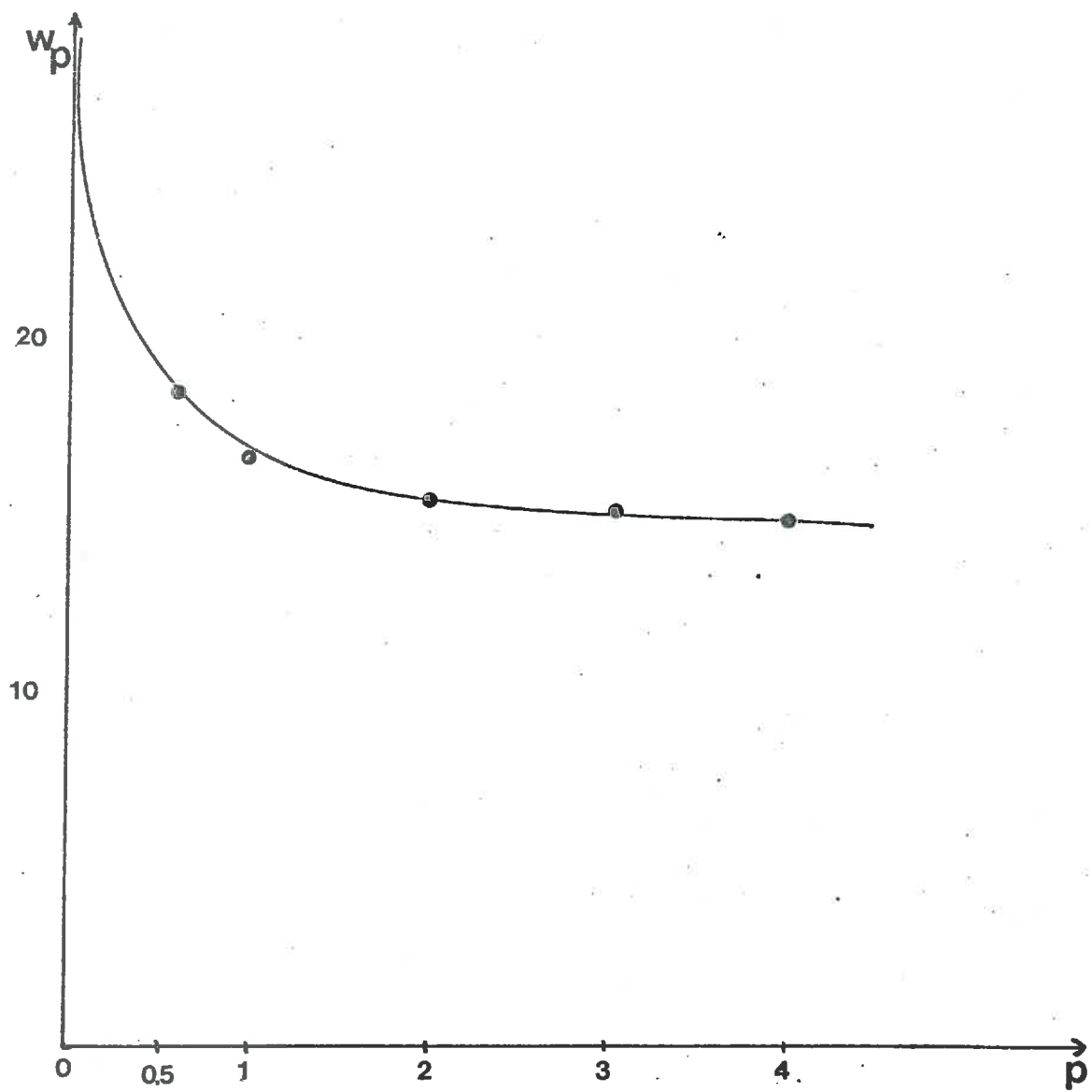


fig 15 Influence de la pression sur W_p

Dans la représentation "classique" du compactage, nous ne pouvons pas mettre en évidence un effet de l'humidité W sur l'état de compacité finale du matériau pour une intensité de la contrainte. La nouvelle expression des résultats montre que le matériau est affecté par la déformation dans cette phase. A la pression de 4 bars, à l'état ~~plastique~~ solide, l'amplitude de la déformation représente le tiers de l'amplitude maximale observée.

Dans le tableau (tab. 14) sont portés les paramètres calculés des régressions linéaires. Nous remarquons que les coefficients de corrélation sont plus faibles pour les régressions caractérisant l'amplitude de la déformation dans l'état solide. Ceci s'explique par deux raisons :

- * nous construisons ces régressions sur un nombre de points expérimentaux généralement plus petit dans l'état solide,

- * la part de la variation de l'amplitude de la déformation par rapport à la gamme d'humidité est plus faible.

Pour l'instant, les variations des paramètres a et b des diverses régressions linéaires sont impossibles à interpréter analytiquement. On peut penser néanmoins les relier à l'angle de frottement interne de l'échantillon.

2-3.222. Influence de la pression appliquée sur W_p (cf. fig. 15)

Nous avons calculé les limites de plasticité W_p selon la méthode définie précédemment. Le graphique des diverses valeurs de W_p en fonction de la pression appliquée s'apparente à une branche d'hyperbole. Dans une telle hypothèse :

- * lorsque la pression tend vers l'infini, W_p tend vers une valeur limite.

- * de même, lorsque la pression tend vers zéro, W_p tend alors vers zéro. Pour une pression supérieure à 1 bar, W_p varie peu. Ce résultat suggère que la diminution de la pression de gonflage, l'utilisation de roues jumelées ou de roues cage fait varier insuffisamment la pression au sol pour induire une variation déterminante de W_p .

2-3.223. Détermination de W_1 . (cf. fig. 12)

La définition de W_1 sur une courbe de compactage suppose que lorsque le matériau atteint le maximum de compacité (W_0), il devient saturé. Incompressible, il subit une déformation à volume constant (définition de la liquidité mécanique).

La présence d'air piégé dans le matériau explique l'écart à l'hyperbole de saturation défini par $\Delta W = W_p - W_0$. Le matériau atteint le maximum de compacité à une humidité W_0 inférieure à W_1 . Pour les pressions supérieures à 2 bars, W_0 est voisin de W_1 . L'écart à l'hyperbole de saturation ΔW est au maximum égal à 3.5 points, à la pression de 2 bars. Il reste dans l'ordre de grandeur admis par FAURE. La détermination de W_1 est possible.

Pour les pressions inférieures à 2 bars, ΔW augmente rapidement lorsque la pression diminue. L'écart à l'hyperbole de saturation n'est plus négligeable. La détermination de W_1 n'a donc plus la même signification que précédemment. Tout se passe alors comme si le matériau, bien que non saturé, acquerrait après W_0 un comportement liquide.

2-3.224. Détermination de W_0 . (cf. fig. 13)

Pour les pressions de 2, 3 et 4 bars, nous pouvons proposer une détermination statistique semblable à celle de W_p . La valeur numérique de W_0 étant déterminée par l'intersection de la droite Δe^s_{\max} (égal à 1.35 dans notre cas) et la droite $\Delta e^s = f(W)$ pour $W > W_p$.

A titre comparatif dans le tableau ci-dessous figurent les valeurs de W_0 déterminées graphiquement :

- sur les courbes "classiques" de compactage (A)
- par l'intersection définie précédemment (B).

P	2	3	4
A	28.5	26.5	24.5
B	29.6	26.2	24.2

Compte tenu de la précision de la détermination graphique, nous pouvons considérer que les valeurs déterminées sont équivalentes.

Par rapport au test Proctor, l'oedométrie présente deux avantages majeurs :

- * elle est d'une part plus rapide dans sa mise en oeuvre ce qui permet d'augmenter le nombre de points de mesure et donc la précision des résultats,

- * d'autre part, elle permet une approche analytique plus approfondie du compactage, grâce à la multiplication du nombre de variables contrôlées qu'elle autorise.

A l'aide de cette technique de compactage, nous avons notamment vérifié, pour un temps court d'application de la contrainte, l'existence des limites de consistance :

- * la limite de plasticité W_p varie peu pour des pressions inférieures à 2 bars. Elle augmente rapidement pour des pressions plus faibles.

- * la limite de liquidité W_L existe si la pression appliquée est suffisante. Il semble par contre que la stricte définition de la limite de liquidité ne rende pas compte des phénomènes observés pour des contraintes inférieures à 2 bars. En effet, tout se passe alors comme si le matériau atteignait, à l'optimum de compactage, un comportement mécanique liquide bien qu'il ne soit pas saturé.

L'ensemble de ces résultats participent à une meilleure connaissance du déterminisme physique des limites hydriques de changement d'état des sols. Nous verrons dans la deuxième partie de ce travail comment ces notions peuvent être utilisées pour modéliser certains mécanismes complexes observés lors de l'analyse en vraie grandeur des déformations subies par des couches de sol travaillées lors du roulage d'un véhicule.

3 - ETUDE DE PLEIN CHAMP.

Nous présenterons dans ce chapitre les moyens mis en oeuvre pour obtenir et caractériser les différentes situations de profil d'un sol travaillé, sur lesquels nous avons mesuré, après roulage, les déformations subies par le sol.

3-1. Préparation des différents profils.

3-1.1. Préparation initiale de la parcelle expérimentale.

Un passage de rouleau compresseur, réalisé sur toute la parcelle avant la mise en place de l'essai, a permis d'annuler l'effet de préparations culturales antérieures et d'obtenir un état structural des couches de surface proche d'un non travail.

3-1.2. Obtention de profils différenciés.

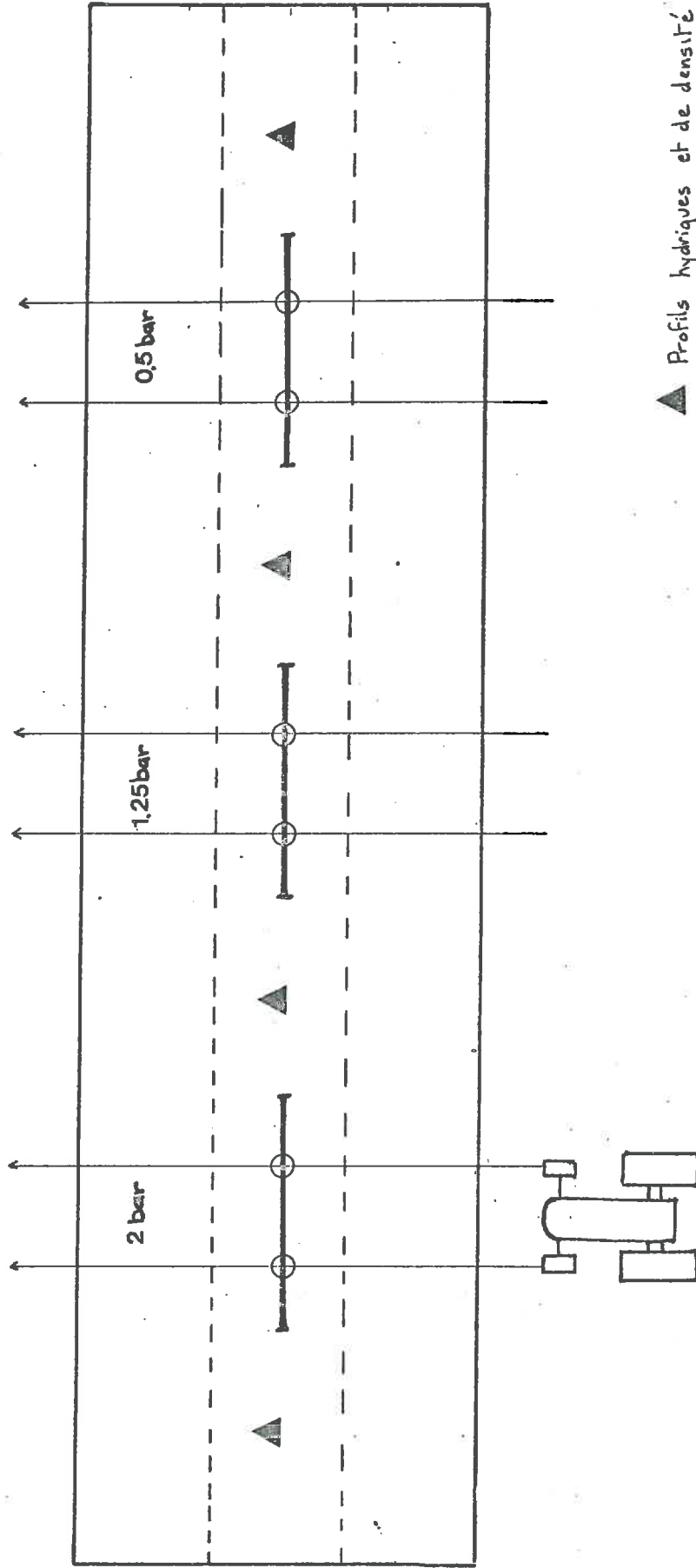
3-1.2.1. Etat structural initial.

Le choix des outils de travail du sol est subordonné à quelques impératifs techniques :

- obtention d'un état structural de la couche travaillée homogène. Il faut éviter un fort gradient de la densité qui rendrait plus difficile l'interprétation des résultats,
- taille des éléments structuraux faible :
 - par rapport à la maille de mesure de la densité par la sonde à atténuation γ . Cette maille est d'environ 12 cm.
 - par rapport à la maille de mesure aspérimétrique. Nous recherchons une variation minimale de l'amplitude de la rugosité de la surface du sol et du fond de travail.

Pour répondre à ces préoccupations, nous avons réalisé un travail à la bêche rotative, qui a travaillé à la profondeur voisine de 20 cm. Trois bandes de roulage ont été réalisées le même jour.

Sens du travail de la bêche



▲ Profils hydrauliques et de densité de l'état initial.

○ " " " des ornières.

— Localisation de l'aspérimètre.

fig16 Dispositif expérimental

3-1.22. Le profil hydrique.

Un dispositif d'arrosage par aspersion a été utilisé pour obtenir dans la zone travaillée un état hydrique proche de la capacité de rétention ($W = 28 \%$). Nous avons obtenu après ressuyage ou évaporation en surface trois profils hydriques différenciés.

3-1.3. Le roulage. (cf. fig. 16: Plan du dispositif expérimental)

Un tracteur a roulé à la vitesse de $0,8 \text{ m/s}$ perpendiculairement au sens du travail du sol. ~~Ses caractéristiques sont portées en annexe 2.~~

Trois pressions de gonflage des pneus :

$$P_1 = 0,5 \text{ bar}$$

$$P_2 = 1,25 \text{ bar} \quad \text{pression habituelle des pneumatiques}$$

$$P_3 = 2 \text{ bar}$$

traduisent, à la rigidité de la carcasse près, la variation de la pression appliquée au sol lors du roulage. Il n'existe pas de techniques qui permettent de la mesurer. La variation de ce facteur est définie nominalement par la pression de gonflage des pneus. Nous ne pouvons donc pas caractériser l'amplitude de la variation de la pression appliquée au sol ; on peut néanmoins affirmer qu'elle varie avec la surface portante des pneumatiques, elle-même étroitement liée à la capacité de déformation de la carcasse des pneumatiques en fonction de la pression de gonflage.

3-2. Techniques de mesure.

3-2.1. Appréciation globale de la déformation de surface :

Technique d'aspérimétrie.

La présence de l'ornièrre traduit la déformation de la surface laissée par le passage des roues. La mesure de cette déformation s'effectue avec un aspérimètre (voir description en annexe 2).

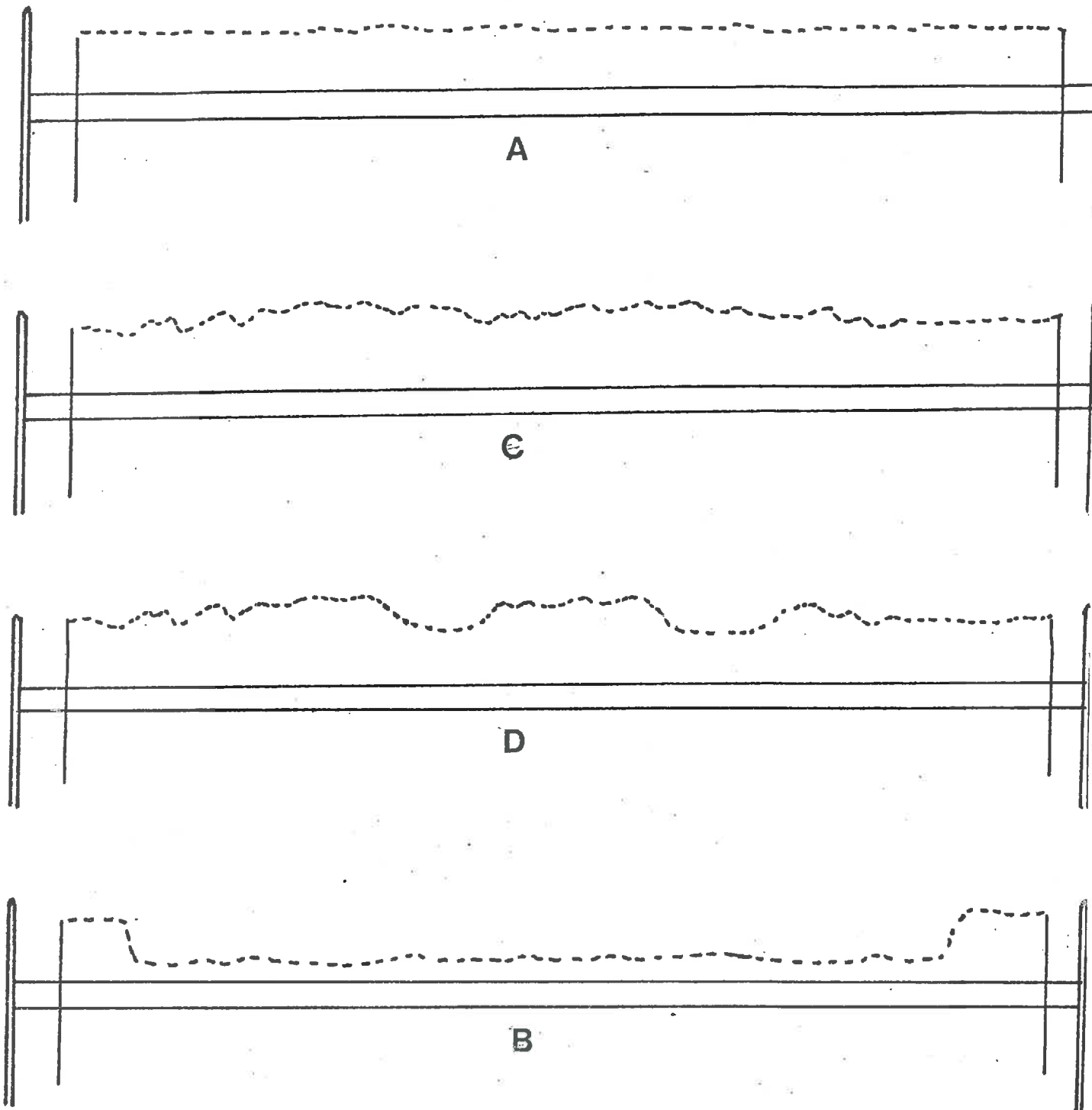


fig17 Succession des aspérimétries

3-2.11. Principe d'utilisation (cf. fig. 17)

Le sommet des tiges matérialise le relief des états initial et final (après roulage) ou du fond de travail. La succession des différentes phases d'utilisation est schématisée par la figure 17. Pour chaque phase, une photographie est réalisée.

3-2.12. Analyse des données.

Dans un rapport d'agrandissement connu, le négatif de la photographie est projeté sur une feuille de papier calque dont la densité a été mesurée. Le repérage du sommet des aiguilles permet par juxtaposition :

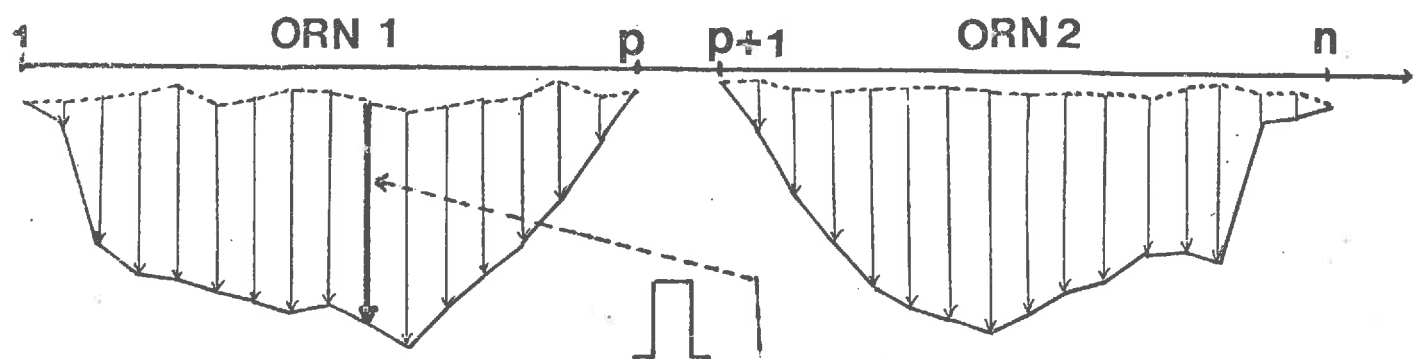
- du profil initial avant travail (A) et du profil de fond de travail (B), de calculer la profondeur du travail par la mesure des déplacements d'un certain nombre d'aiguilles ;
- du profil initial après travail (C) et du profil de fond de travail (B), de calculer la hauteur de la couche travaillée ;
- du profil initial après travail (C) et du profil après roulage (D), *de mesurer la surface de déformation des ornières. L'aire est évaluée par pesée de la surface de calque découpée. Nous utiliserons dans l'interprétation des résultats la somme des surfaces des deux ornières,
- *de calculer une profondeur d'ornière.

3-2.13. Méthode de calcul de la profondeur d'ornière.

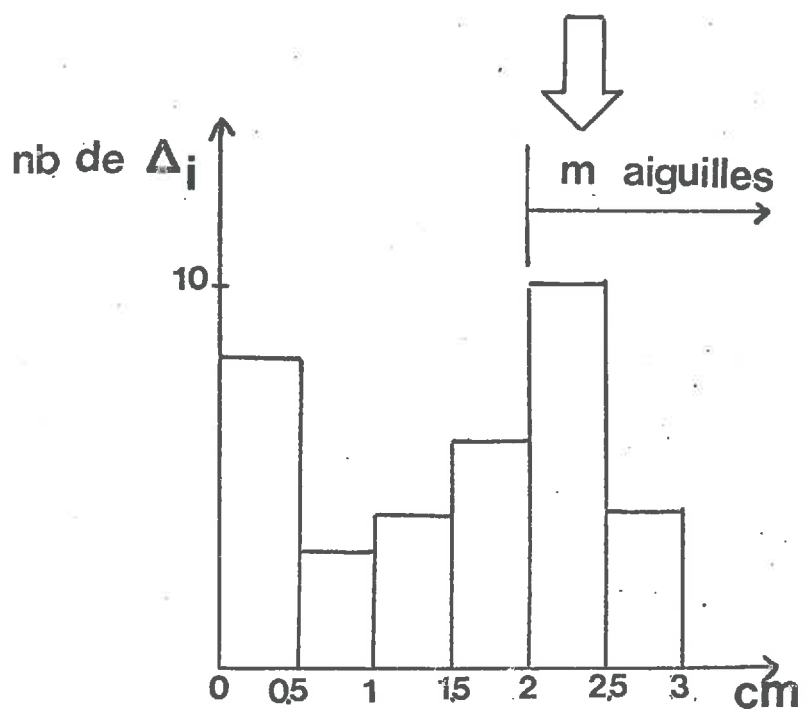
(cf. fig. 18)

L'absence de repères fixes communs à toutes les mesures d'aspérimétrie nous a conduit à définir la profondeur des ornières par rapport aux déplacements Δ_i des aiguilles situées sur les ornières.

La profondeur des ornières doit être représentative de la profondeur de passage des roues. Le calcul de la moyenne arithmétique de tous les déplacements Δ_i sur les deux ornières ne répond pas à cette exigence. Nous devons calculer la profondeur d'ornière :



mesure des Δ_i



$$\bar{p} = k \frac{\sum \Delta_i > x_0}{m}$$

ex: $m = 14$
 $x_0 = 2\text{cm}$

fig18 Calcul de la profondeur des ornières

- en utilisant les déplacements maximaux Δ_i des aiguilles,
- en choisissant un nombre suffisant de Δ_i pour que la moyenne arithmétique calculée soit représentative de la profondeur réelle.

Le protocole de calcul retenu est illustré par la figure 18.

A/ Répartition des mesures de Δ_i par classe de 5 mm d'intervalle.

L'intervalle de 5 mm est déterminé empiriquement. A partir des résultats de plusieurs aspérimétries, nous avons réalisé une série de comparaisons d'histogramme dont l'intervalle des classes variait.

L'intervalle de 5 mm est celui qui permet de conserver un nombre de classes suffisant et d'obtenir un histogramme de fréquence qui conserve quelles que soient les conditions de roulage (couple profil hydrique-Pression de gonflage) la même allure générale.

B/ Définition de la profondeur.

Nous avons défini la profondeur des ornières par la moyenne arithmétique des déplacements Δ_i des aiguilles réparties :

- dans la classe qui possède la plus forte fréquence,
- dans les classes de rangs supérieurs.

$$\frac{p}{m} = K \frac{\sum \Delta_i > x_0}{m}$$

K facteur d'agrandissement = 5

x_0 limite inférieure des déplacements

m nombre d'aiguilles

3-2.2. Mesure de la compacité : profil hydrique et profil de densité.

La caractérisation de l'espace poral en indice des vides nécessite la mesure de la densité sèche du sol en place. Nous avons utilisé une sonde à transmission γ (SOANE, 1971) qui permet d'obtenir le profil évolutif de la densité en fonction de la profondeur (caractéristiques de la sonde en annexe 3).

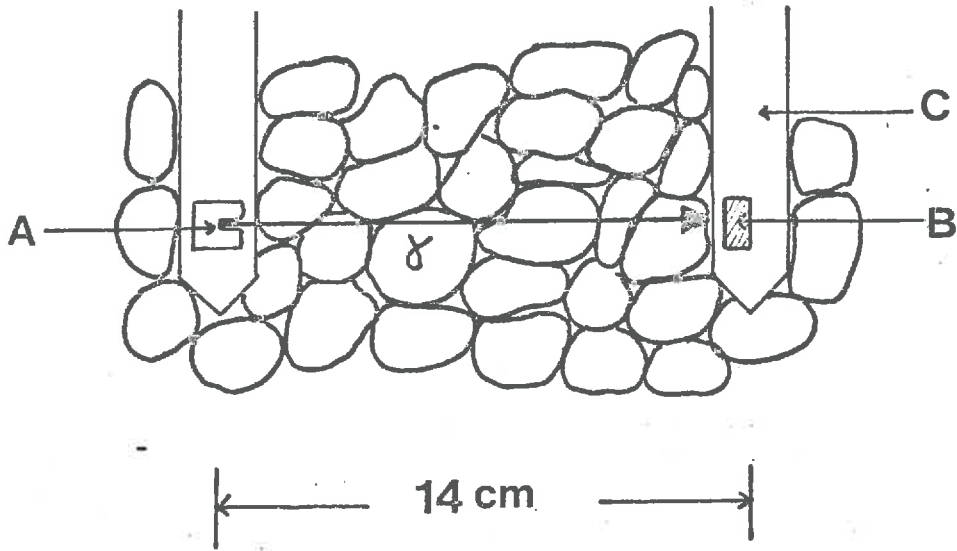


fig19 Principe de la mesure de la densite

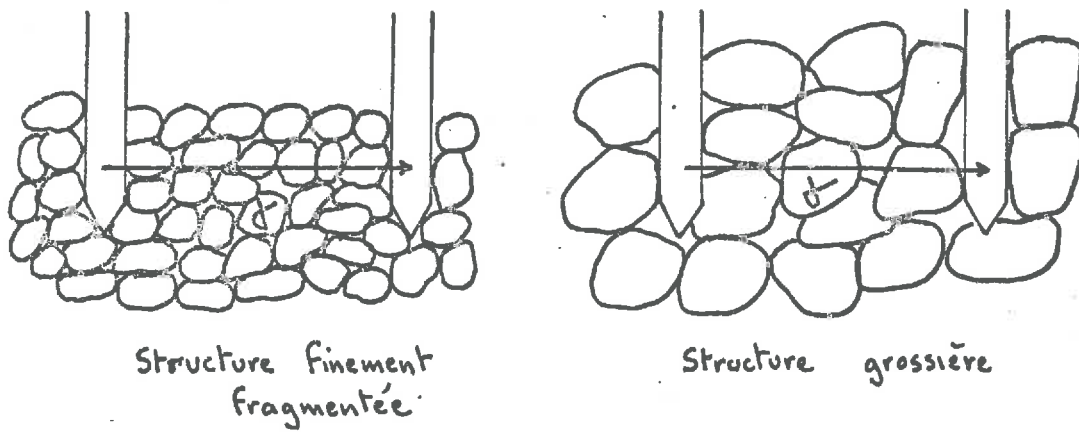


fig20 Problèmes posés par l'utilisation de la sonde

3-2.21. Principe de la mesure de la densité (cf. fig. 19)

Placé entre deux tubes d'acier (C), le sol est traversé par un rayonnement γ (photons) émis par une source radioactive de ^{137}Cs (A). Un compteur Geiger enregistre les photons non absorbés par le matériau.

Les conditions d'absorption sont liées à la densité et à l'humidité du matériau. Plus il est poreux et sec, moins il absorbera les photons émis par la source.

Un dispositif électronique : échelle de comptage, mesure le temps t mis par le compteur Geiger (B) pour dénombrer le nombre fixe d'impulsions (photons). La comparaison à un temps t_0 obtenu dans des conditions standard permet de caractériser l'absorption par le terme $\log \frac{t}{t_0}$. La densité humide $\bar{\gamma}_w$ est calculée par la relation linéaire

$$\bar{\gamma}_w = 2.763 \log \frac{t}{t_0} + 1.747, \text{ obtenue après étalonnage de la sonde.}$$

La détermination de l'humidité du sol W , dans la zone de mesure de la densité, permet de calculer la densité sèche $\bar{\gamma}_d$ par la relation :

$$\bar{\gamma}_d = \frac{100 \bar{\gamma}_w}{100 + W}$$

3-2.22. Problèmes posés par l'utilisation de la sonde.

(cf. fig. 20)

L'écartement des deux tubes de la sonde est de 14 cm. Il constitue une limite importante de son utilisation en sol travaillé et pose le problème de la représentativité et la répétabilité des mesures dans des structures grossières du sol (cf. fig. 20).

Pour cette raison, nous avons cherché par le travail du sol à bien émietter les mottes en effectuant un double passage de l'outil considéré, le plus lentement possible, à la vitesse maximale de rotation de l'outil pour favoriser l'éclatement des mottes et homogénéiser le milieu de mesures.

Les conditions de mesure sont telles, en surface, qu'il existe une perte de photons jusqu'à 5 cm de la surface. Ils ne seront pas comptés. Ceci entraîne une surestimation de la densité. Pour remédier à cet effet, nous avons disposé, en surface, une épaisseur supplémentaire d'une dizaine de centimètres de matériau analogue à celui du milieu de la mesure avant d'effectuer la mesure à 2,5 cm de la surface.

3-2.23. Conditions de réalisation des profils hydriques et de densité.

Les méthodes mises en oeuvre pour la réalisation des différents profils sont complémentaires et différentes suivant leur localisation.

3-2.231. Profils dans les ornières.

Les prélèvements des échantillons de sol pour la mesure de l'humidité et les mesures de densité ont été réalisés dans le plan médian de l'ornière, au niveau de l'emplacement de l'aspérimétrie (cf. fig. 16). Les prélèvements de sol, pour la mesure de l'humidité, sont effectués lors du tarièrage nécessaire pour la mise en place de la sonde γ , par couches successives de 2,5 cm. Les profils dans chaque ornière constituent les deux répétitions qui permettent de définir le profil moyen.

Les conditions techniques de réalisation des profils de densité nécessitent de supprimer la couche sèche de surface. Peu cohérente, elle ne se prête pas à l'utilisation de la tarière :

- instabilité des parois des trous nécessaires à la descente de la sonde,
- risque de mélange des éléments structuraux de la couche sèche aux échantillons représentatifs des couches sous-jacentes provoquant ainsi une sous-estimation de leur humidité.

De plus, une part non négligeable des éléments structuraux de la couche de surface s'enfonce sous l'effet de la pression de roulage dans la couche sous-jacente. L'hétérogénéité de cet horizon de transition nous a amené à l'éliminer avant de pratiquer la mesure.

3-2.232. Profils initiaux de la couche travaillée.

La structure soufflée, obtenue après le travail du sol, ne permet pas la prise des échantillons de l'humidité à la tarière. Les prélèvements ont été réalisés après le creusement d'une fosse, par couches successives de 5 cm d'épaisseur, le long du profil ainsi dégagé. La sonde a été enfoncée dans le sol sans préparation initiale, avec un pas de mesure de 5 cm. Les profils moyens ont été calculés à partir des mesures provenant de quatre sites différents (voir localisation fig. 16).

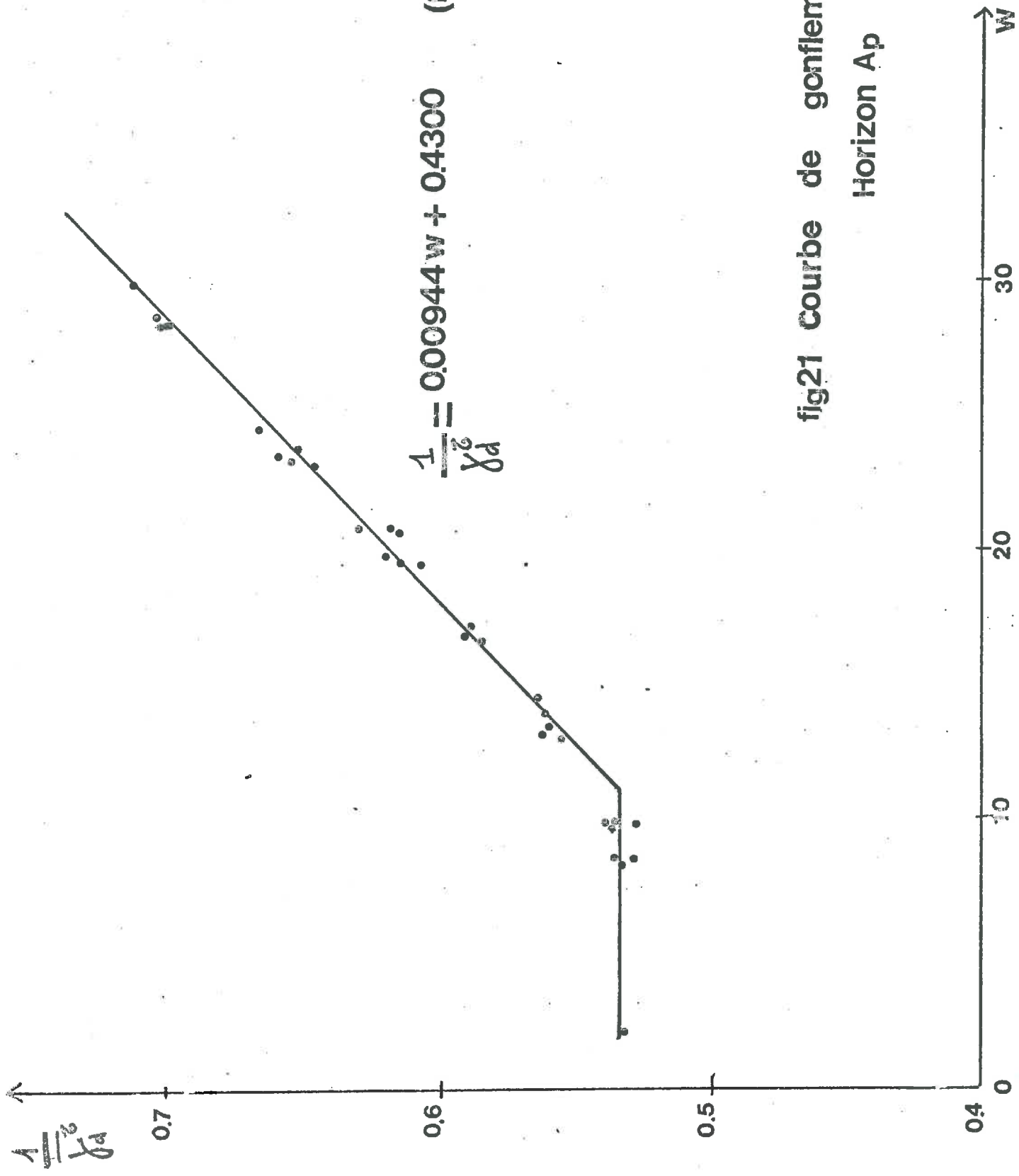


fig21 Courbe de gonflement
Horizon Ap

3-2.24. Analyse des données.

Pour les profils hydriques, nous porterons sur un graphique, en abscisse, l'humidité pondérale de la couche de sol prélevée en fonction de la profondeur de prélèvement.

Nous exprimons les résultats des mesures de densité en indice des vides structuraux. Pour connaître, à toutes les humidités, l'indice des vides texturaux, nous avons utilisé une courbe de gonflement obtenue sur des agrégats naturels de l'horizon A_p (cf. Annexe 1) de la parcelle expérimentale. Le graphe est porté sur la figure 21.

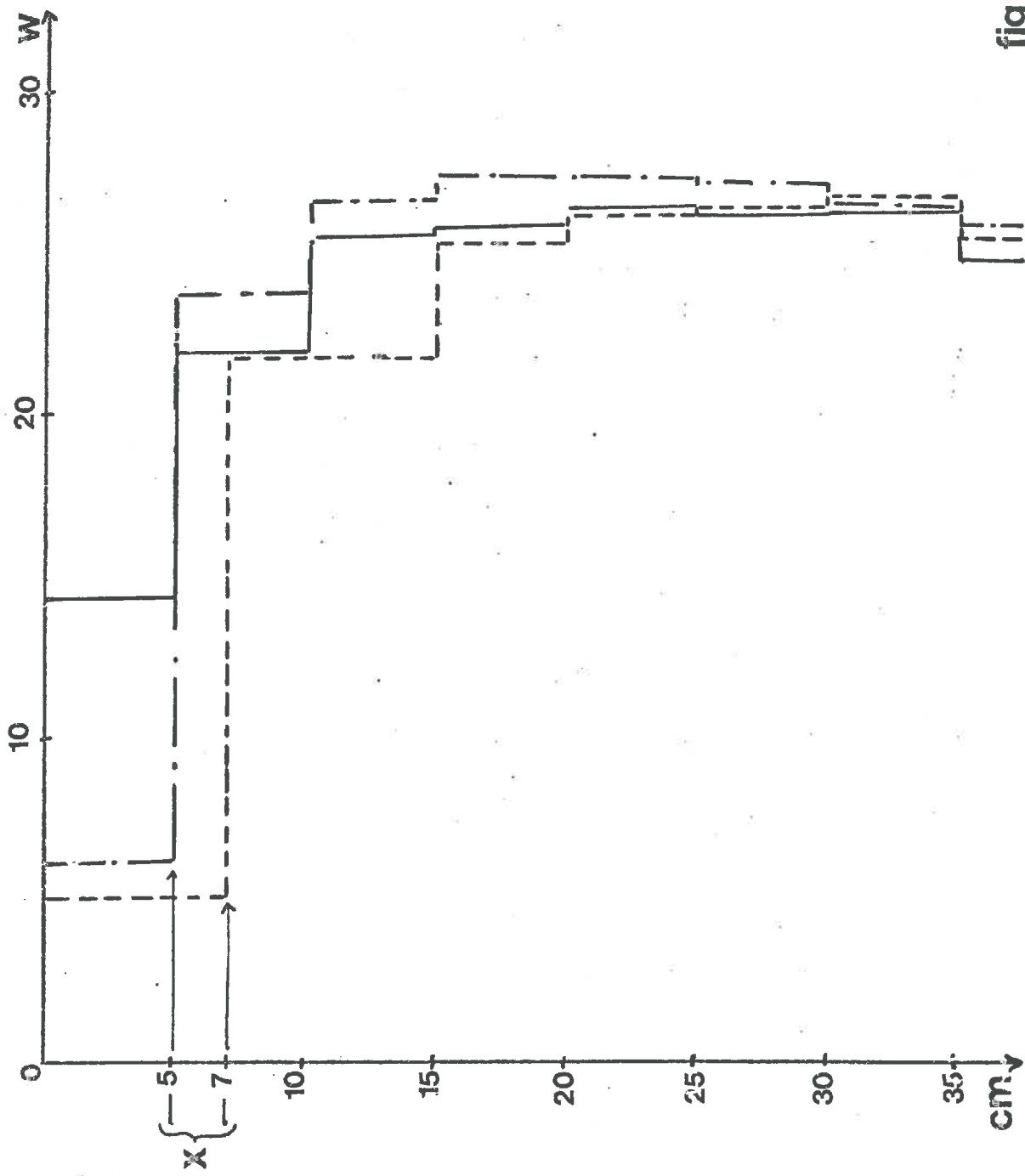


fig22 profils hydriques

3-3. Résultats et Discussion.

3-3.1. Description de l'état initial.

3-3.11. Le profil hydrique. (cf. fig. 22)

Dans les trois situations, la couche travaillée peut être assimilée à une "bicouche" constituée d'une couche "sèche" (0 à x) et d'une couche "humide" (x au fond de travail).

Les trois situations sont différenciées par l'épaisseur et l'humidité de la couche dite "sèche", celles-ci étant déterminées par l'état de dessiccation du profil.

Compte tenu de la variabilité spatiale de l'humidité d'une couche de sol estimée à 2 %, dans les trois situations, la couche "humide" est à la même teneur en eau moyenne (26 %), proche de la capacité de rétention pour les trois situations sous la couche sèche.

3-3.12. Le profil initial de l'indice des vides structuraux. (cf. fig. 24)

Les profils révèlent l'existence d'un gradient positif de la densité en fonction de la profondeur. Réalisés le jour de l'essai de roulage, sur des bandes de travail différentes, ils ne sont pas identiques. Le profil constitue, au même titre que le profil hydrique ou la pression de gonflage, un facteur de variation à prendre en compte lors de la discussion des résultats.

3-3.13. La profondeur de travail.

La bêche rotative a travaillé à la profondeur de 20 à 22 cm. Après foisonnement, la hauteur de la couche travaillée est de :

- 32 cm pour B₂
- 35 cm pour B₁ et B₃.

Cette différence est attribuée à la différence de densité initiale de la couche travaillée. La densité moyenne après travail est, pour B₂, égale à 1.19. Elle est supérieure à celles observées en B₁ et B₂ ($\bar{\gamma}_{d1} = 1.1$).

P	Surface(cm ²) des ornières			Profondeur (cm) moyenne				
	Rota	B ₁	B ₂	B ₃	Rota	B ₁	B ₂	B ₃
0.5	520	785	715	375	9	13.5	11	5
1.25	615	805	700	540	10	14	11.5	9
2	650	780		570	11.5	14		11.5

Humidité moyenne(%)

Rota	B ₁	B ₂	B ₃
16	22	23	24

Tab 23 Résultats de l'aspérimétrie
Humidité moyenne de la couche travaillée

3-3.2. Description des comportements mécaniques.

3-3.21. Influence de la pression de gonflage sur l'amplitude de la déformation. (cf. tab. 23)

Des essais de roulage réalisés au préalable sur une parcelle travaillée au rotavator ont montré l'existence d'un effet de la pression de gonflage des pneumatiques sur l'amplitude de la déformation de surface (cf. tab. 23). Pour une humidité moyenne de la couche travaillée proche de 19 %, l'amplitude de la déformation augmente avec la pression de gonflage.

Pour B_1 (cf. fig. 22), l'humidité moyenne de la couche travaillée est ($W_c = 24\%$) proche de la capacité de rétention. L'amplitude de la déformation est indépendante de la pression de gonflage.

La comparaison de ces deux résultats montre que l'amplitude de la déformation dépend de l'interaction entre l'humidité moyenne de la couche travaillée et la pression de gonflage des pneumatiques. Cette interaction ne permet pas, à elle seule, de caractériser les variations de l'amplitude de déformation dans les différentes situations de roulage. Pour B_3 , l'humidité moyenne de la couche travaillée est proche de 22 %, voisine de B_1 . L'amplitude de la déformation augmente avec la pression de gonflage. Nous allons tenter d'expliquer cette différence de comportement en B_1 et B_3 à partir de la comparaison des profils hydriques.

3-3.22. Mise en évidence du rôle protecteur de la couche de surface. (cf. fig. 24, 25).

Les profils hydriques (cf. fig. 22) B_1 et B_3 diffèrent uniquement par l'épaisseur et l'humidité de la couche "sèche" de surface. En B_3 , son épaisseur augmente de 2 cm, son humidité diminue de 9 %. L'amplitude du tassement (cf. fig. 24) hiérarchisée en B_3 en fonction de la pression de gonflage, est plus petite qu'en B_1 . Dans cette dernière situation, quelle que soit la pression de gonflage, toute la porosité créée par le travail a pratiquement disparu. En B_3 , par contre, la couche sèche de surface, plus épaisse et à une humidité plus faible, a joué un rôle protecteur vis-à-vis du tassement final après roulage. Il se traduit par la conservation dans les couches de sols sous jacentes d'une porosité créée par le travail du sol en B_3 . Le degré de conservation varie en fonction de la pression de gonflage. Il est particulièrement élevé à la pression de 0.5 bars.

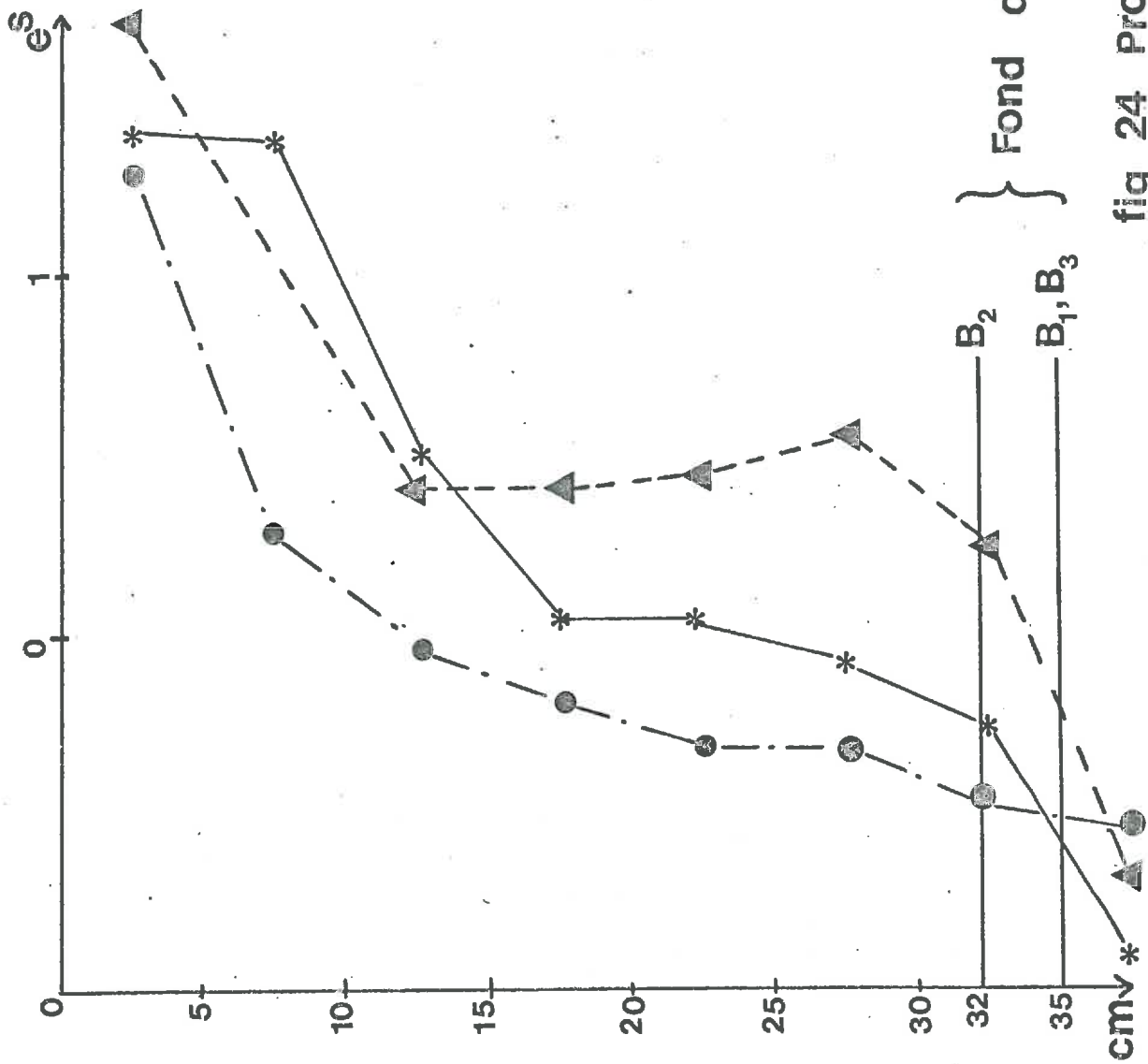


fig 24 Profils d'indice des vides structuraux de l'état initial

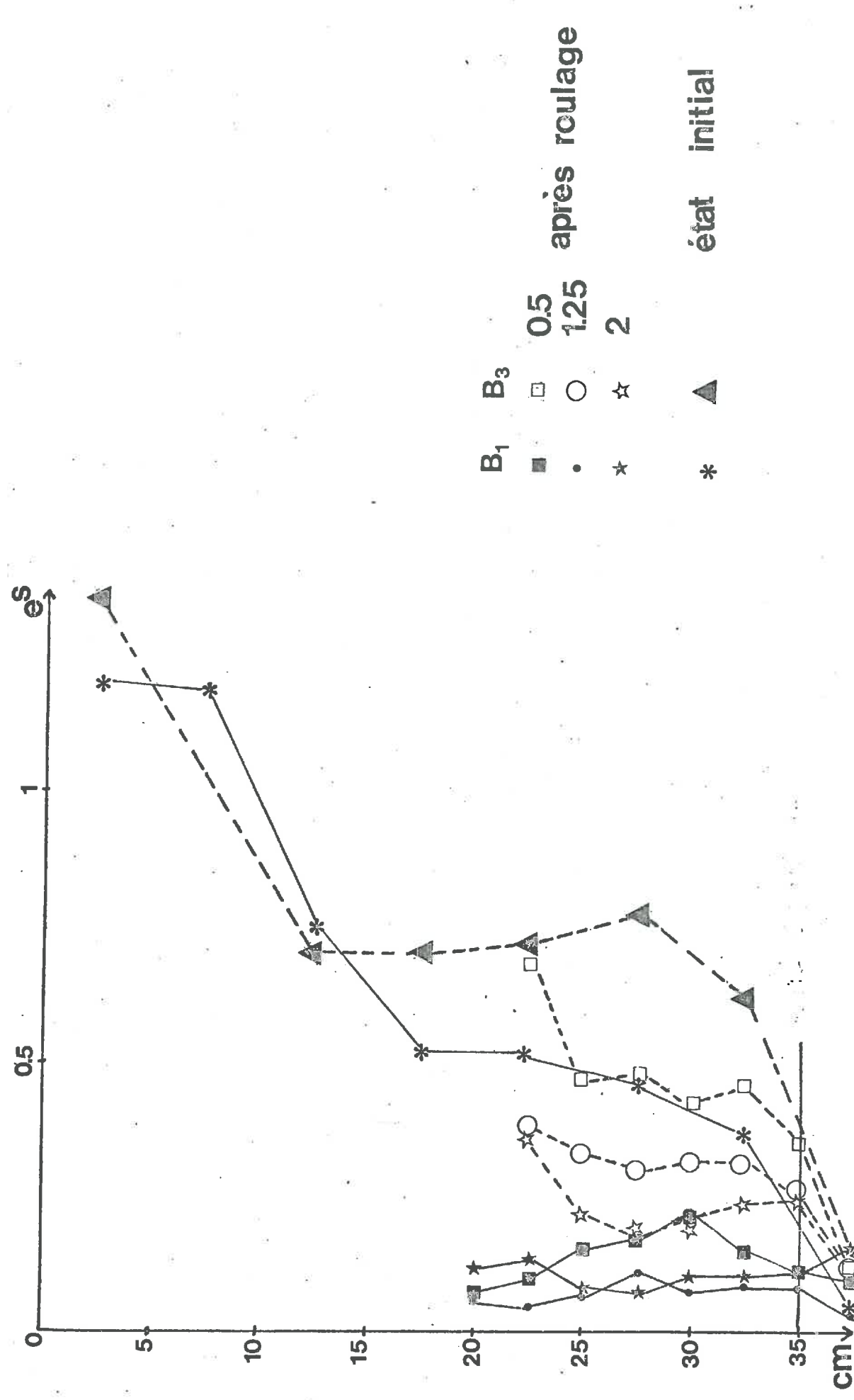


fig25 Rôle protecteur de la couche de surface

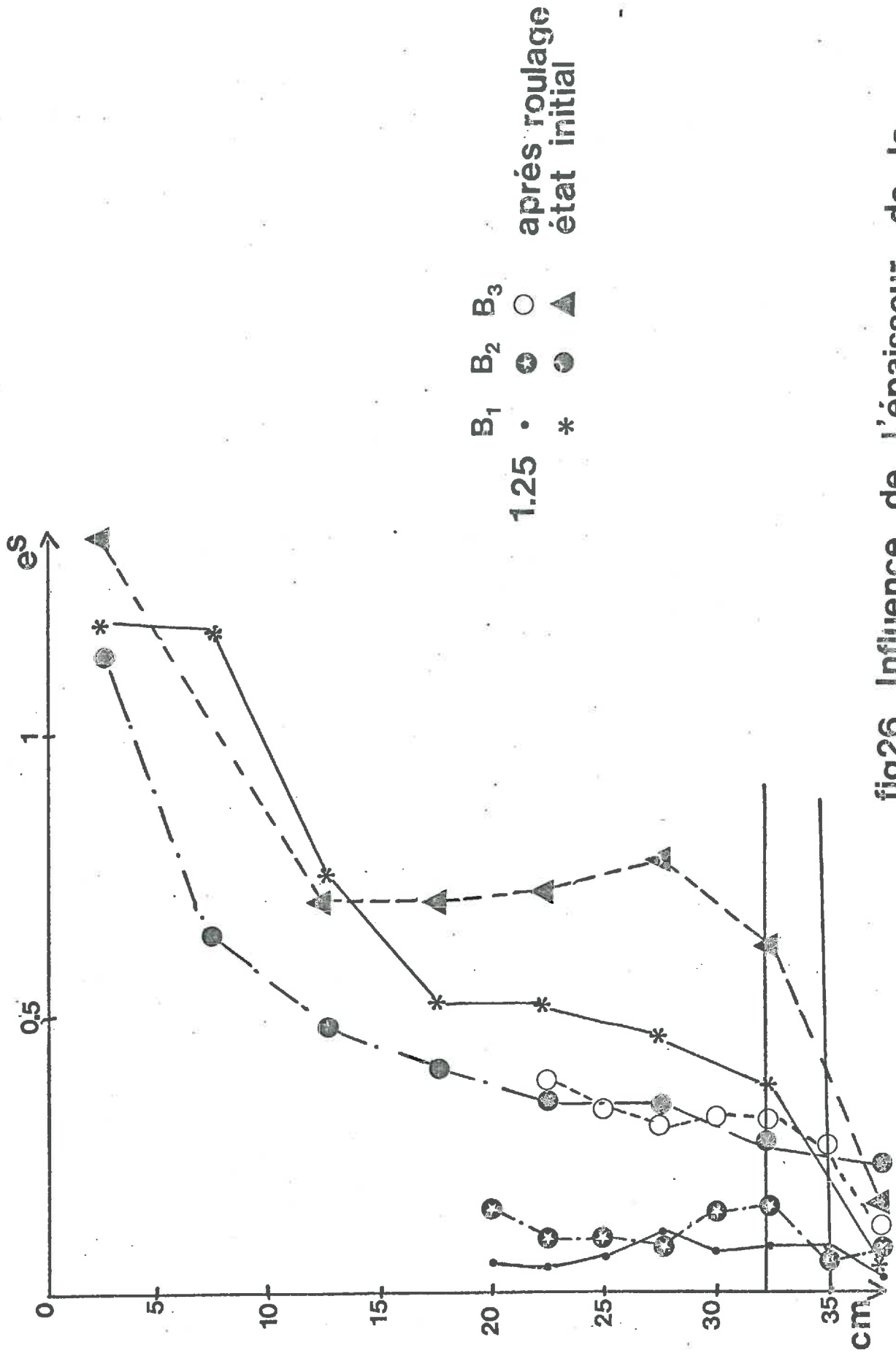


fig26 Influence de l'épaisseur de la couche sèche

L'amplitude de la déformation de surface (cf. tab. 23) est expliquée, en partie, par l'amplitude du tassement :

- en B_1 , l'absence du rôle protecteur de la couche "sèche" de surface vi-à-vis du tassement final, se traduit par une amplitude du tassement plus grande qu'en B_3 et indépendante de la pression de gonflage. L'amplitude de la déformation de surface est alors plus importante qu'en B_3 et identique pour les trois pressions de gonflage.

- en B_3 , l'effet protecteur diminue et hiérarchise l'amplitude du tassement en fonction de la pression de gonflage. L'amplitude de la déformation est plus petite qu'en B_1 et augmente avec la pression de gonflage.

3-3.23. Influence de l'épaisseur de la couche "sèche" de surface. (cf. fig. 26)

Si nous comparons B_1 et B_2 , nous constatons que les profils d'indice des vides structuraux à la pression de 1.25 bars sont identiques (cf. fig. 26). L'effet protecteur de la couche de surface observé en B_3 n'existe pas pour B_2 .

Or, il existe en B_2 une couche de surface à une humidité plus faible qu'en B_1 et identique à B_3 (cf. fig. 22). Elle aurait pu être responsable de l'apparition d'un effet protecteur. L'épaisseur de la couche "sèche" plus importante en B_3 qu'en B_2 est la seule différence existante entre les profils hydriques. Elle est à l'origine des deux comportements mécaniques différents. Il semble donc que pour la pression de gonflage étudiée, il y ait une épaisseur minimale pour qu'apparaisse un effet protecteur.

N.B. : L'amplitude de la déformation est plus petite en B_2 qu'en B_1 (cf. tab. 23). Cet écart s'explique en partie par la différence de compacité initiale de la couche travaillée entre les deux situations : l'indice moyen des vides structuraux initiaux en B_2 ($\bar{e}_1^s = 0.55$) est inférieur à celui de B_1 ($e_1^s = 0.71$). La couche travaillée en B_2 est plus compacte. Pour un même état final, l'amplitude du tassement et donc de la déformation est moins importante en B_2 qu'en B_1 .

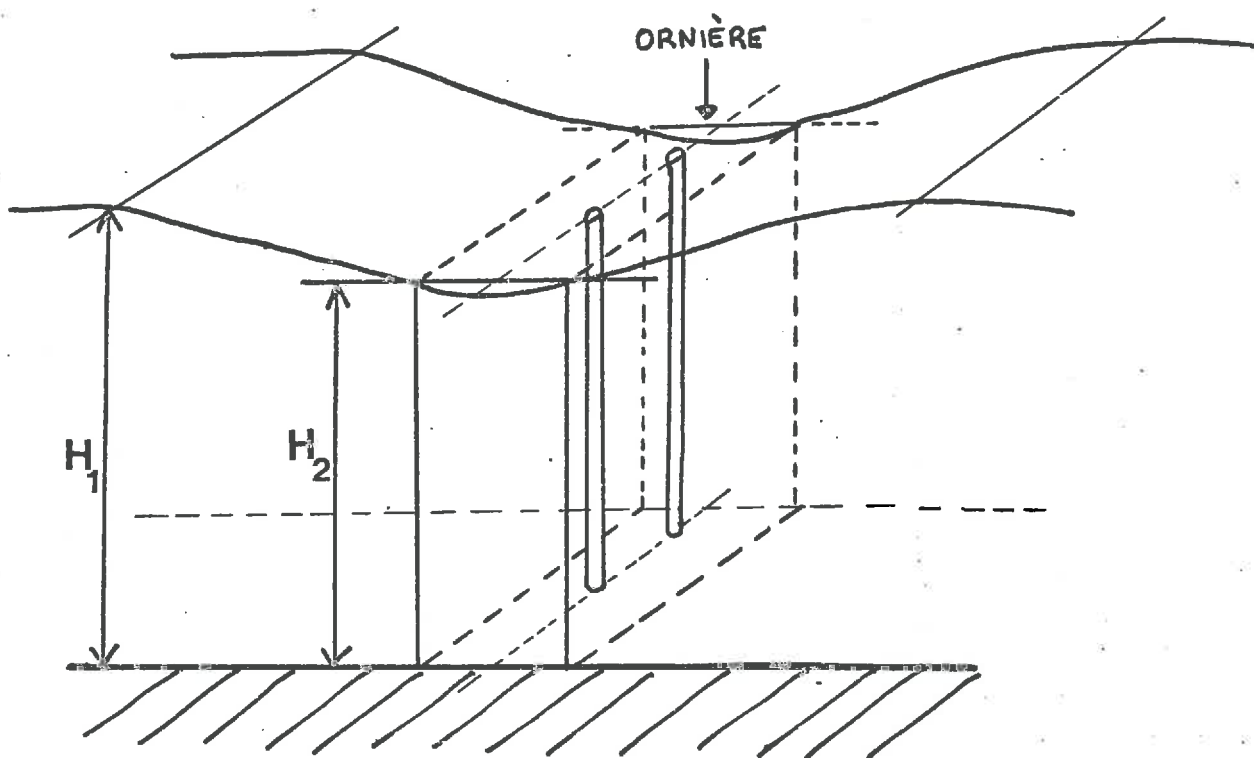


fig 27 Volume exploré par la sonde.

Les résultats de l'aspérimétrie à la pression de 0.5 bars semble confirmer l'absence de l'effet protecteur en B_2 . La surface et la profondeur des ornières sont identiques pour les deux pressions : 0.5 et 1.25 bars (cf. Tab. 23)

Cette étude a montré principalement le rôle de l'humidité et l'épaisseur de la couche de surface vis-à-vis du comportement mécanique du sol au roulage. Une variation de 2 cm de l'épaisseur de la couche "sèche" de surface induit des comportements mécaniques différents. Suffisamment épaisse, la couche "sèche" améliore la portance par la réduction de la profondeur d'enfoncement et réduit les risques de tassement du sol sous les ornières. Par ailleurs, sa présence améliore les conditions de circulation en diminuant les risques de patinage ou d'adhésivité pneu : couche de surface.

3-3.3. Modélisation du comportement de la couche travaillée.

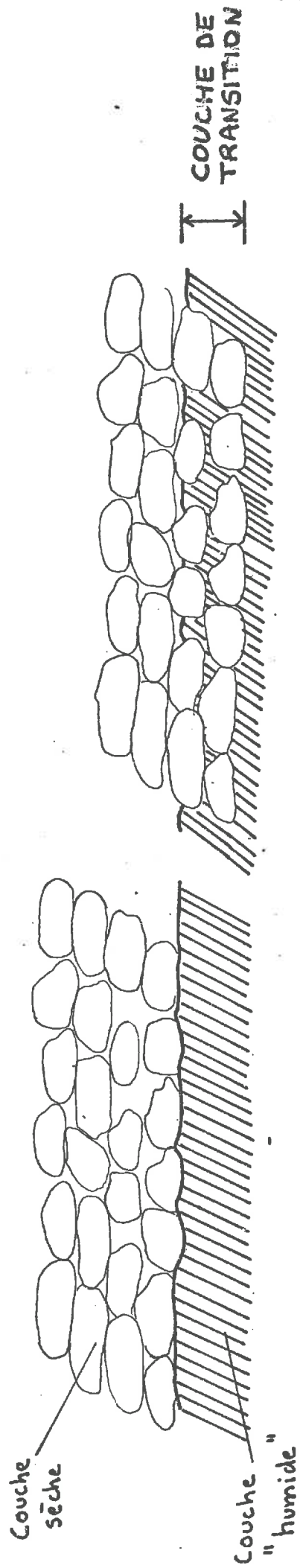
Une des différences essentielles entre les conditions d'application de la contrainte au laboratoire et ce qui se passe sur le terrain réside dans la présence de frottement latéral dans la cellule oedométrique. L'oedométrie ne prend en compte que des déformations monodimensionnelles. Elle exclut tout fluage latéral et l'extension du volume affecté par le tassement. L'absence de frottement latéral au champ se traduit par une extension de la zone tassée au delà du volume défini par l'aplomb du pneumatique.

L'utilisation des résultats de l'oedométrie comme moyen de comprendre le déterminisme de la déformation in situ nous conduit à trouver un moyen d'apprécier la part du "non frottement" dans la déformation globale du matériau.

3-3.31. Définition d'un coefficient de perte de "masse".

(cf. fig. 27).

Les profils d'indices des vides structuraux montrent que le matériau, au fond de travail, n'est pas affecté par le tassement. Dans toutes les situations, les indices des vides structuraux à cette profondeur sont



Avant roulage

Après roulage

fig 28 Mise en évidence de la couche de transition

égaux avant et après roulage. Nous considérons donc que seule la couche de sol travaillée est affectée par le tassement.

Le volume de sol exploré par la sonde, pour la mesure de la densité, peut se réduire à un parallélépipède rectangle, limité en largeur par des plans parallèles au plan médian de l'ornièrre et dont l'écartement constant est inférieur à la largeur de l'empreinte du pneu. Le plan de symétrie longitudinal de ce parallélépipède est situé dans le plan médian de l'ornièrre. La hauteur du parallélépipède correspond à celle de la couche travaillée H_1 avant roulage ou H_2 après roulage. Nous admettons que la densité au sein de ce volume est uniforme. Elle a pour valeur :

● avant roulage, la densité moyenne $\overline{\gamma}_{d1}$ caractéristique de la bande de travail considérée.

● après roulage, la densité moyenne $\overline{\gamma}_{d2}$, qui varie dans chaque situation de roulage en fonction de la pression de gonflage des pneus.

Si nous considérons que la déformation est monodimensionnelle, la loi de conservation de la masse est vérifiée :

$$\overline{\gamma}_{d1} H_1 = \overline{\gamma}_{d2}^* H_2$$

$\overline{\gamma}_{d2}^*$ est la densité moyenne théorique après un compactage oedométrique.

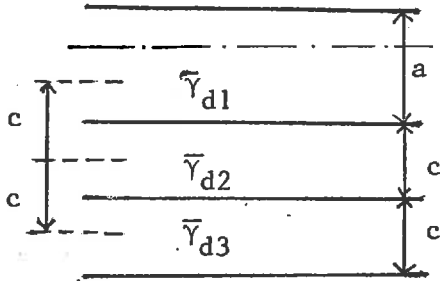
On constate que la densité moyenne après roulage $\overline{\gamma}_{d2}$ est inférieure à la densité moyenne théorique. Il existe donc un tassement latéral dû à l'absence de frettage. Nous pouvons évaluer la part du "non frettage" en évaluant la perte de masse au sein du volume considéré par la différence $\overline{\gamma}_{d2}^* - \overline{\gamma}_{d2}$. Pour pouvoir comparer celle-ci dans les différents cas, nous l'exprimerons sous la forme du coefficient

$$\Lambda = \frac{\overline{\gamma}_{d2}^* - \overline{\gamma}_{d2}}{\overline{\gamma}_{d2}^*}$$

Pour calculer le coefficient Λ , il faut évaluer la densité moyenne de la couche de sol avant et après roulage.

3-3.311. Principe de calcul de la densité moyenne.

Les densités moyennes sont calculées en tenant compte de l'épaisseur relative des couches, définies par le pas de mesure de la densité et auxquelles sont affectées une densité mesurée.



$$\bar{\gamma}_d = \frac{\frac{a}{c} \bar{\gamma}_{d1} + c \bar{\gamma}_{d2} + c \bar{\gamma}_{d3}}{\frac{a}{c} + c + c}$$

c pas de la mesure = épaisseur d'une couche affectée d'une densité.

Nous avons été amenés, pour effectuer le calcul de cette densité moyenne, à reconstituer le profil de densité après roulage, en évaluant les densités manquantes des couches de surface détruites pour les raisons techniques évoquées par ailleurs.

N.B. Les humidités moyennes sont calculées de la même façon (cf. § 3-3.21)

3-3.32. Reconstitution du profil de densité sous les ornières.

3-3.321. Evolution de l'interface couche "sèche" par rapport à la couche "humide" (cf. fig. 28).

Tous les profils hydriques initiaux B_1 , B_2 et B_3 sont assimilables à un bicouche constitué par :

- une couche "sèche" de surface dont l'humidité et l'épaisseur varient
- une couche "humide" sous jacente proche de la capacité de rétention.

L'observation du profil cultural a permis de montrer que les mottes de la couche "sèche" ont pénétré par poinçonnement dans le matériau sous jacent (couche "humide) qui, de ce fait, a comblé les vides existants entre les mottes sèches.

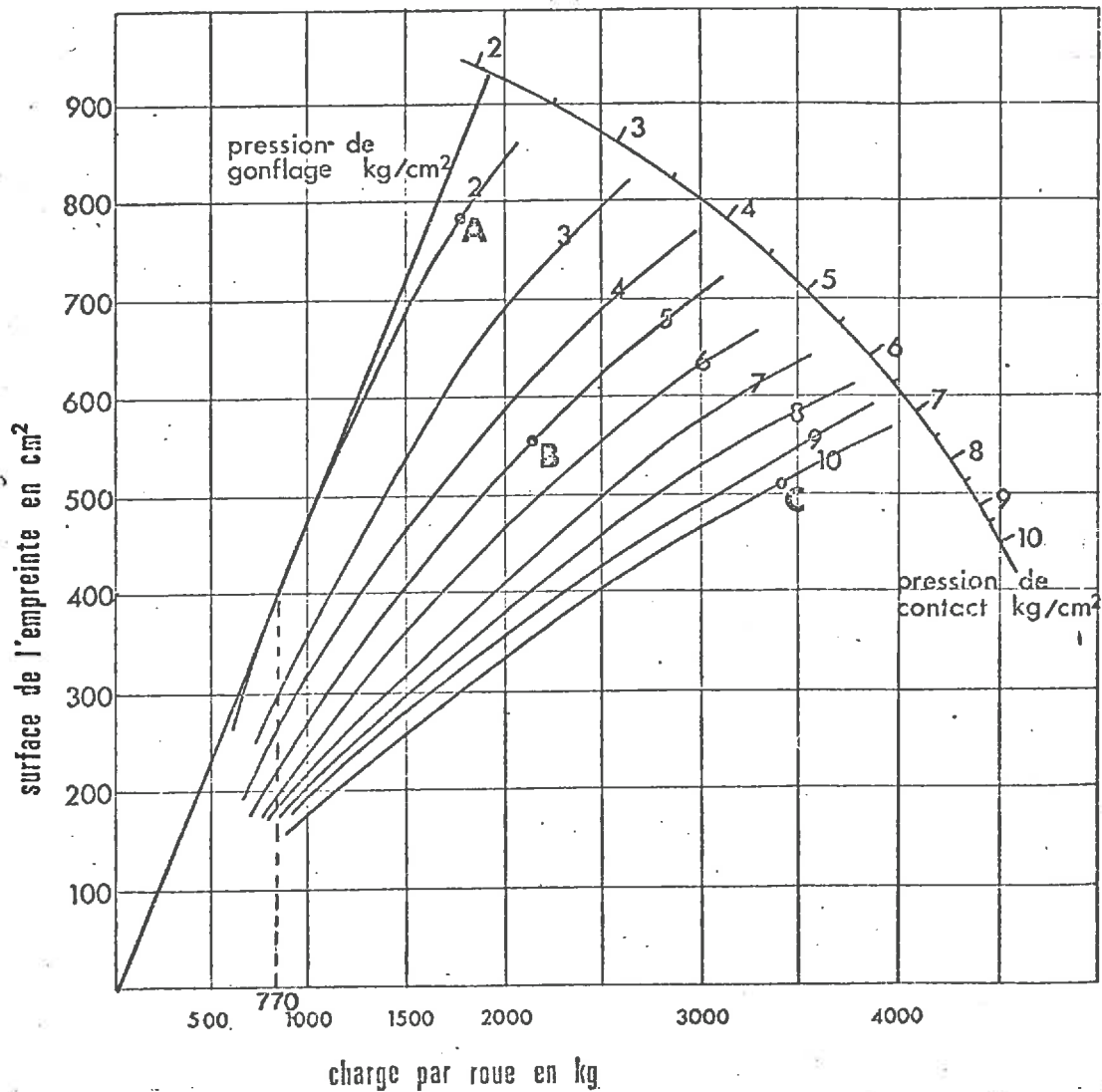


fig29 Relation pression appliquée au sol
pression de gonflage

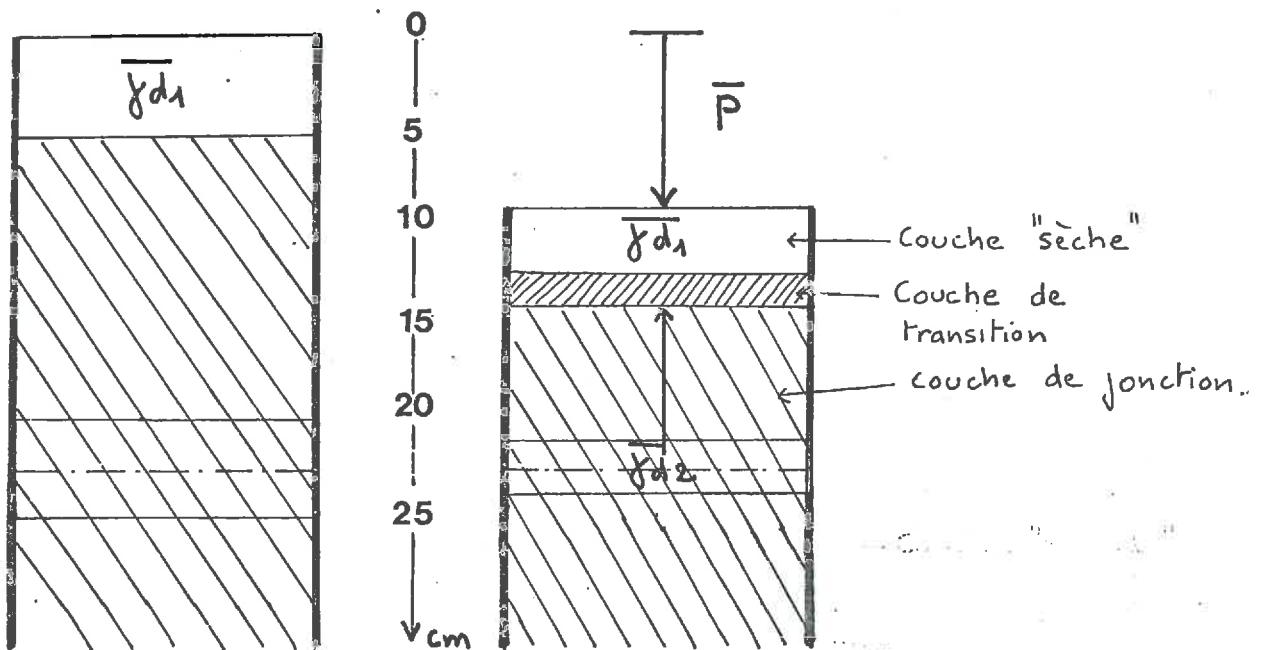


fig30 Evaluation des densités manquantes
Schéma récapitulatif

Il apparaît ainsi une couche de transition dont l'épaisseur a été estimée dans les trois situations au tiers de l'épaisseur initiale de la couche sèche.

3-3.322. Evaluation des densités manquantes.

(cf. fig. 29-30)

Pour estimer la pression réellement appliquée à la surface du sol, nous avons utilisé l'abaque reproduite à la figure 29 (FAURE, 1973). En fonction des caractéristiques du tracteur utilisé, nous estimons la pression maximale appliquée au sol à 2 bars. Par ailleurs, si nous nous reportons aux résultats oedométriques (fig. 9), pour un indice des vides structuraux initial :

* de 1.1 * voisin de celui de la couche "sèche" de surface
en $B_2(1.15)$

* de 1.35 voisin de ceux des couches "sèches" de surface
en $B_1(1.25)$ et $B_3(1.35)$

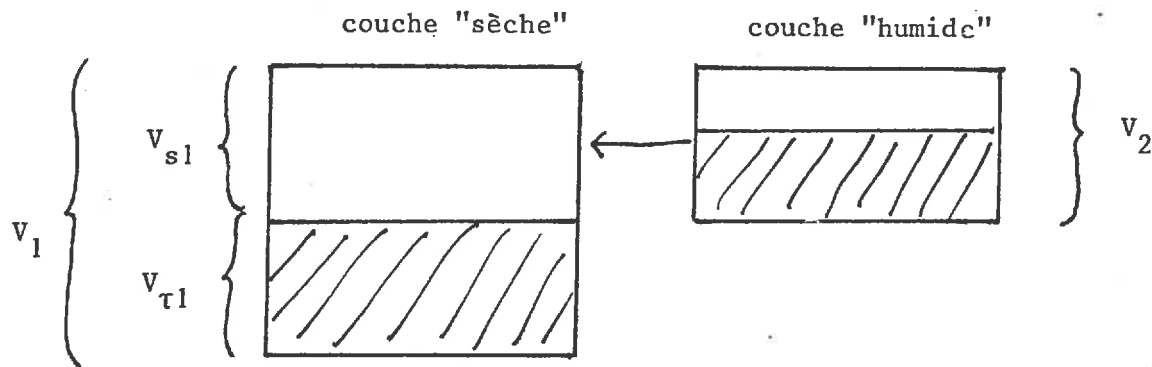
nous voyons que :

* pour la couche "sèche" $W < W_p$, l'amplitude du tassement est faible dans cette zone. Elle est de surcroît limitée par le comportement plastique de la couche "humide" sous-jacente. Nous admettons que le tassement de la couche "sèche" de surface est négligeable après roulage. Elle est simplement translaturée et pénètre en partie dans la couche humide sous-jacente. La couche "sèche" de surface conserve la densité initiale de la couche sèche $\bar{\gamma}_{d1}$, avant roulage.

* pour la couche "humide" sous-jacente $W > W_p$, le comportement du matériau est plastique. Le matériau se déforme et se tasse en pénétrant dans la couche sèche. Nous avons attribué à la couche intéressée par ce phénomène la même densité $\bar{\gamma}_{d2}$ après roulage que la première couche sous-jacente, dont nous avons pu mesurer la densité (cf. fig. 30).

Pour calculer la densité de la couche de transition, il est nécessaire d'émettre une hypothèse sur le mélange des deux couches. Nous avons admis que la couche "humide" plastique remplissait parfaitement les pores existants avant roulage entre les éléments structuraux de la couche sèche.

Principe de calcul de la densité de la couche de la transition.



	couche sèche "non déformable"	couche "humide" tassée
densité totale	$\bar{\gamma}_{d1}$	$\bar{\gamma}_{d2}$
poids	P_1	P_2
volume total	$V_1 = \frac{1}{\gamma_{\text{eau}}} \frac{P_1}{\bar{\gamma}_{d1}}$	$V_2 = \frac{1}{\gamma_{\text{eau}}} \frac{P_2}{\bar{\gamma}_{d2}} \quad (2)$
volume textural	$V_{\tau 1} = \frac{1}{\gamma_{\text{eau}}} \frac{P_2}{\bar{\gamma}_{d1}^{\tau}}$	
volume structural	$V_{s1} = \frac{P_1}{\gamma_{\text{eau}}} \left[\frac{1}{\bar{\gamma}_{d1}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_{d1}^{\tau}} \right] \quad (1)$	

NB. γ_{eau} : poids volumique de l'eau

Hypothèse de non déformabilité.

Remplissage parfait : $V_{s1} = V_2$

$$(1) \text{ et } (2) \Rightarrow P_2 = \gamma_2 P_1 \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{d1}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_{d1}^{\tau}} \right) \quad (3)$$

Densité de la couche de transition : $\bar{\gamma}_d = \frac{P_1 + P_2}{V_1} \quad (4)$

$$(3) \rightarrow (4) \quad \bar{\gamma}_d = \frac{P_1 + \bar{\gamma}_{d2} P_1 \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{d1}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_{d1}^{\tau}} \right)}{\frac{P_1}{\bar{\gamma}_{d1}}}$$

$$\bar{\gamma}_d = \bar{\gamma}_{d1} \left[1 + \bar{\gamma}_{d2} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{d1}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_{d1}^{\tau}} \right) \right]$$

B1	0.5			125			2			
	Cote cm	Epaisseur cm	$\bar{\gamma}_d$	Cote cm	Epaisseur cm	$\bar{\gamma}_d$	Cote cm	Epaisseur cm	$\bar{\gamma}_d$	
Ornières couche sèche couche de transition couche de jonction	0-13.5	13.5		0-14	14		0-14			
	13.5-16.5	3	1.01	14-16	2	1.01	14-16	2	1.01	
	16.5-18.5	2	1.61	16-18	2	1.64	16-18	2	1.62	
	18.5-21.25	2.75	1.39	18-21.5	3.25	1.45	18-21.25	2.25	1.41	
	22.5	2.5	1.37	22.5	2.5	1.43	22.5	2.5	1.38	
	25	2.5	1.39	25	2.5	1.40	25	2.5	1.34	
	27.5	2.5	1.38	27.5	2.5	1.38	27.5	2.5	1.33	
	30	2.5	1.38	30	2.5	1.39	30	2.5	1.30	
	32.5	2.5	1.39	32.5	2.5	1.42	32.5	2.5	1.31	
	35	2.5	1.41	35	2.5	1.42	35	2.5	1.37	
	37.5	2.5	1.39	37.5	2.5	1.48	37.5	2.5	1.28	
B2				Cote cm	Epaisseur cm	$\bar{\gamma}_d$				
	Ornières couche sèche couche de transition couche de jonction			0-11.5	11.5					
				11.5-14.5	3	1.07				
				14.5-16.5	2	1.68				
				16.5-21.25	4.75	1.40				
				22.5	2.5	1.39				
				25	2.5	1.38				
				27.5	2.5	1.38				
				30	2.5	1.34				
				32.5	2.5	1.35				
				35	2.5	1.44				
			37.5	2.5	1.46					
B3	Cote cm	Epaisseur cm	$\bar{\gamma}_d$	Cote cm	Epaisseur cm	$\bar{\gamma}_d$	Cote cm	Epaisseur cm	$\bar{\gamma}_d$	
	Ornières couche sèche couche de transition couche de jonction	0-5	5		0-9	9		0-11.5	11.5	
		5-9	4	0.95	9-13	4	0.95	11.5-15.5	4	0.95
		9-12	3	1.55	13-16	3	1.58	15.5-18.5	3	1.61
		12-23.75	11.75	1.20	16-23.75	7.75	1.27	18.5-23.75	5.25	1.32
		25	2.5	1.22	25	2.5	1.26	25	2.5	1.32
		27.5	2.5	1.18	27.5	2.5	1.27	27.5	2.5	1.33
		30	2.5	1.20	30	2.5	1.26	30	2.5	1.31
		32.5	2.5	1.18	32.5	2.5	1.26	32.5	2.5	1.31
		35	2.5	1.24	35	2.5	1.29	35	2.5	1.30
		37.5	2.5	1.40	37.5	2.5	1.38	37.5	2.5	1.39

tab32 Profils de densité reconstitués

Nous devons émettre quelques réserves quant aux hypothèses permettant le calcul de la densité de la couche de transition :

- l'hypothèse de remplissage parfait par la couche plastique est certainement un facteur de surévaluation de la densité résultante.

- la porosité d'assemblage des éléments structuraux de la couche "sèche" est modifiée par leur intrusion dans la couche "humide".

On observe un tri des mottes en fonction de leur diamètre. Les plus grosses pénètrent dans la couche sous-jacente, les plus petites restent en surface .

Les deux sources d'erreurs, dont la première est la plus grossière, nous conduisent à une surestimation de la densité de la couche de transition.

3-3.323. Effets de la couche de transition. (cf. tab. 32)

Sur les tableaux reproduits (cf. tab. 32) sont portées les différentes densités des profils reconstitués sous les ornières. On note la densité élevée de la couche de transition, sans commune mesure avec celle que l'on peut mesurer dans un matériau argileux homogène après roulage. (BODDAERT, 1976).

La présence de cette couche tassée permettrait d'expliquer le rôle protecteur vis-à-vis du tassement attribué à la couche "sèche" en B₃. Plus compacte, la couche de transition constituerait une fondation qui augmenterait la surface portante du tracteur, protégeant ainsi la couche travaillée vis-à-vis du tassement.

Néanmoins, cette protection vis-à-vis du tassement est toute relative : elle n'intéresse la couche travaillée qu'en moyenne, ou plus précisément elle n'intéresse effectivement que les couches sous-jacentes à la couche de transition.

En effet, une telle explication de l'accroissement de la portance suppose l'existence d'une couche très localisée dont la compacité pourrait avoir des conséquences agronomiques néfastes.

Profil	Pression	f_{d_1}	f_{d_2}	$f_{d_2}^*$	$f_{d_2}^* - f_{d_2}$	Δ %
B1	0.5		1,36	1,78	0,42	23
	1.25	111	1,39	1,78	0,39	22
	2		1,33	1,82	0,49	27
B2	0.5					
	1.25	119	1,36	1,81	0,45	25
	2					
B3	0.5		1,20	1,24	0,04	3
	1.25	106	1,27	1,40	0,13	9
	2		1,28	1,55	0,27	17

Tab 33 Calcul de Δ .

Nous avons montré que cette couche de transition existait dans les trois situations (B_1 , B_2 , B_3). Elle n'assurerait un rôle protecteur qu'en B_3 . Cette différence de comportement mécanique n'est pas explicable pour l'instant. Elle confirme la nécessité d'utiliser de nouvelles techniques d'investigation permettant de mesurer la densité réelle de la couche de transition.

3-3.33. Analyse des variations du coefficient Λ . (cf. tab. 33)

Le coefficient de perte de masse Λ tel qu'il a été défini au paragraphe 3-3.31 permet d'exprimer la part relative du tassement horizontal dans la déformation globale du matériau.

Ainsi :

- Λ est d'autant plus élevé que l'état initial est proche d'une structure continue si, et seulement si, la teneur en eau est telle que le matériau soit déformable (cf. tab. 33, comparaison B_2-B_1 , à 1.25 bar)

A la limite, si le sol a une structure continue et si $W > W_0$ (W_0 étant référencé à la pression de roulage) la déformation de la couche de surface n'est évidemment due qu'au fluage du matériau.

- Λ est d'autant plus faible que le rôle protecteur de la couche sèche est marqué. (cf. tab. 33)

En B_3 Λ diminue avec la pression de gonflage des pneumatiques, jusqu'à ce que pour 0.5 kg l'enfoncement de la roue ne soit pratiquement dû qu'à un tassement monodimensionnel.

L'interprétation des résultats sous la forme de coefficient Λ montre que l'on ne peut simplifier l'étude in-situ des déformations après roulage en les assimilant soit à un tassement monodimensionnel soit à un fluage : déformation du matériau à volume constant. Entre ces deux situations extrêmes, on voit que les cas les plus fréquents s'expliquent par une composante horizontale du tassement.

Si on était à même d'évaluer le gradient de densité dans la couche de surface consécutif à un roulage, l'utilisation d'un coefficient tel que Λ permettrait de prévoir le volume de sol affecté par le tassement.

L'analyse au champ des déformations des couches de sol de surface, sous l'action de roues de tracteur pour des profils hydriques bien différenciés, a permis de mettre en évidence :

- le rôle d'une couche sèche de surface vis-à-vis des phénomènes de portance,

- les interactions entre les couches "sèches" et "humides" dans les phénomènes de compactage. Celles-ci pourraient être à l'origine d'une meilleure portance dans les sols argileux.

Lorsque l'effet de la couche sèche de surface ne se fait pas sentir, et, quelque soit la pression de gonflage des pneumatiques, la couche travaillée retrouve sous l'ornière un état proche du non travail : la porosité créée par le travail du sol disparaît pratiquement.

Ce travail a, en outre, permis de dégager l'importance de la composante horizontale du tassement dans l'amplitude de la déformation.

CONCLUSION

L'étude de la déformation des couches de surface d'un sol travaillé nous a amené à privilégier, dans un premier temps, au laboratoire, l'étude du tassement en terme de variation de l'espace poral. Ce travail a apporté un certain nombre de résultats méthodologiques qui contribuent à l'élaboration d'une nouvelle approche expérimentale du comportement au compactage des sols agricoles.

La technique d'oedométrie pneumatique a permis de vérifier l'existence des limites de consistance pour des temps courts d'application de la contrainte.

La possibilité que donne cette méthode de contrôler parfaitement la contrainte appliquée a permis de mettre en évidence :

* une loi de variation de la limite de plasticité en fonction de la contrainte appliquée,

* la difficulté de définir la limite de liquidité, par un état de saturation, pour les faibles valeurs des contraintes appliquées.

Le choix de nouvelles coordonnées, prenant en compte l'état physique initial du matériau, dans la représentation des courbes de compactage, donne la possibilité d'une évaluation objective de W_p .

L'étude de plein champ des déformations des couches de surface dans le cas de trois profils hydriques modélisés par un bicouche : couche "sèche" (de surface), couche "humide" (en profondeur), a mis en évidence un mécanisme de tassement particulier. Le passage de la roue provoque à l'interface de ces deux couches, la création d'une couche de transition, supposée particulièrement dense. Elle pourrait être à l'origine d'une meilleure portance dans un sol argileux, mais aussi de conséquences agronomiques néfastes.

L'étude comparée de l'amplitude de déformation des couches de surface et de la variation de leur compacité montre la part importante de la composante horizontale du tassement. Celle-ci est faible, voire négligeable lorsque la présence de la couche sèche diminue l'amplitude de la déformation. Elle augmente par contre avec l'amplitude de déformation dans les autres situations.

Une suite à donner à ce travail consisterait à :

- * vérifier les hypothèses émises quant au rôle de la couche dite de transition en vérifiant par une mesure de densité appropriée son existence.

- * vérifier le rôle que peut jouer en plein champ la matière organique dans l'amélioration de la portance des sols argileux.

Un certain nombre de résultats de laboratoire montrent en effet que sa présence dans le matériau :

- * fait varier les limites de consistance,

- * diminue l'amplitude du tassement.

A N N E X E

- ANALYSE GRANULOMETRIQUE

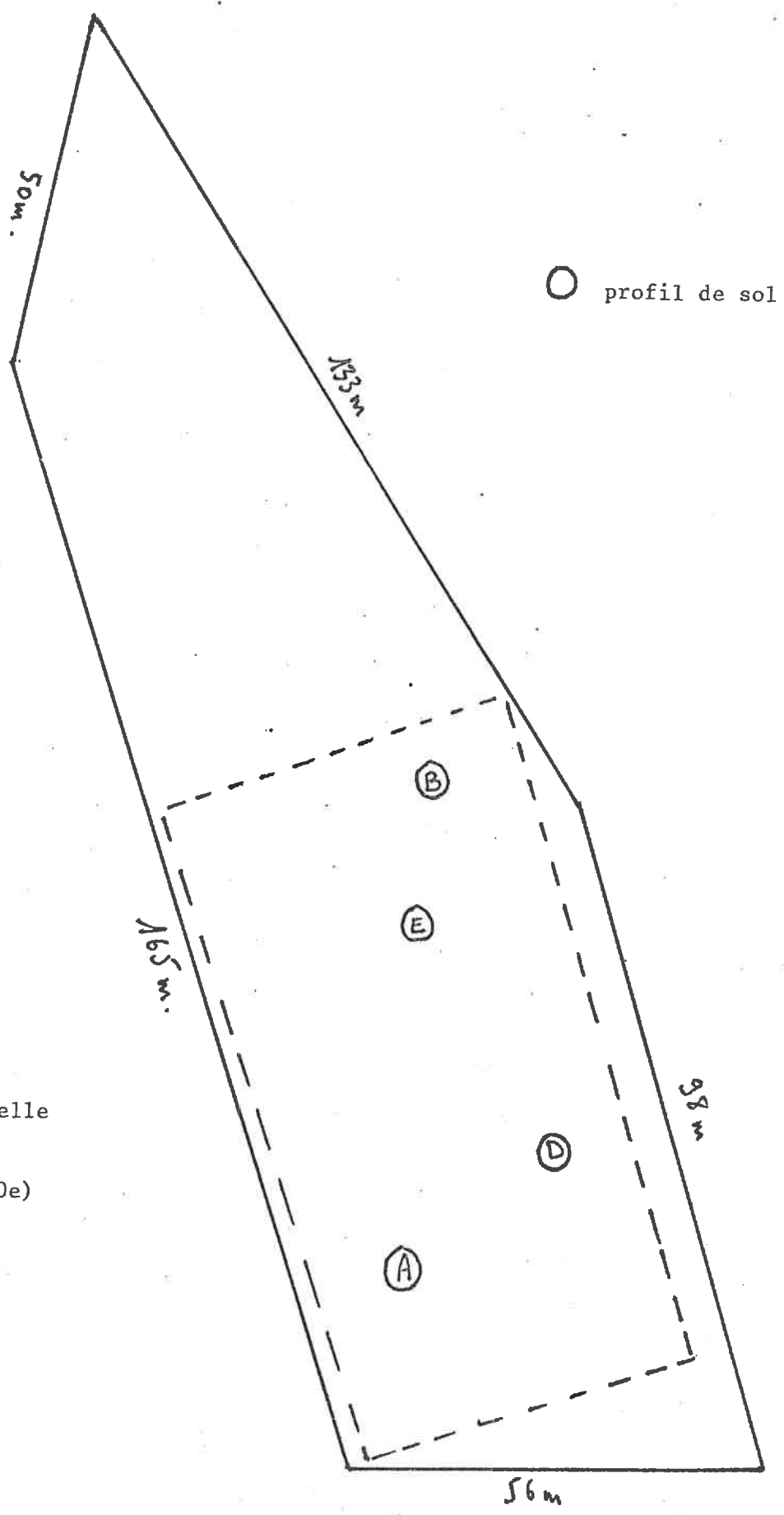
O-	Hori- zon.	Prof. (cm)	Arg. 0-2 r	Limon		Sables					MO %
				2-20 r	20-50 r	50- 100 r	100 200 r	200- 500 r	5000 1000 r	1000 2000 r	
A	Ap	0-30	46,7	31,3	8,0	7,1	4,1	2,0	0,5	0,3	2,06
	B _s	30-55	41,8	25,4	6,5	8,6	11,1	5,9	0,5	0,2	1,28
A (B)	Ap	0-25	41,9	30,3	7,0	8,0	9,2	3,2	0,3	0,1	1,86
	A (B)	25-45	42,3	29,5	7,2	7,2	9,4	4,0	0,3	0,1	1,64
	B _s	45-60	27,3	17,7	4,7	9,8	30,2	9,8	0,2	/	0,88
	Ap	0-34	41,2	27,3	9,7	7,0	10,7	3,7	0,3	0,1	1,72
	B _s	34-80	46,1	30,0	7,7	5,5	7,4	2,9	0,2	0,2	1,06

- CARACTERISTIQUES PHYSIQUES. (MARS 1976)

Profil	Horizon	Prof. (cm)	Densité		Poros. %	CR. p F Heg	W c Hamp
			aH.	reelle			
A.	Ap	0-30	1,26	2,795	54,90	27,7	27,8
	B _s	30-55	1,31	2,795	53,10	25,8	26,4
B	Ap	0-25				26,5	26,1
	A/B	25-45				26,2	25,3
	(B) _s	45-60				20,2	25,1
E.	Ap	0-34	1,32	2,795	52,80	25,3	25,2
	(B _s)	34-80	1,40	2,795	49,90	27,9	26,0

ANNEXE 1 : Caractéristiques physiques et granulométriques du matériau.

d'après BODDAERT (1976)



○ profil de sol

Annexe Ibis :

Schéma de la parcelle
expérimentale
(échelle : 1/1400e)

ANNEXE II : Description de l'aspérimètre.

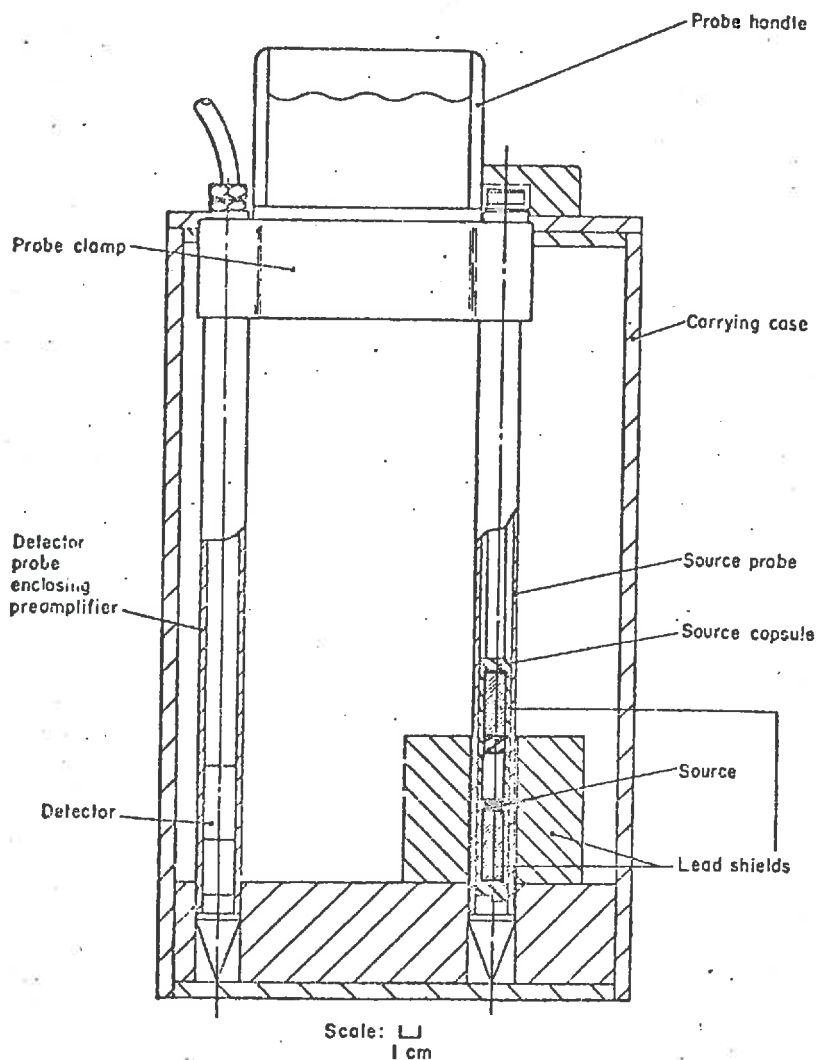
Cet appareil est destiné à relever simultanément et sur une même ligne les cotes du microrelief observé en plein champ.

Notre appareil est constitué d'un support horizontal de 4,50 de long sur lequel coulisent des aiguilles longues de 0,70 mètres et espacées de 2,5 cm.

Le support est maintenu en place grâce à 2 pieds fixés pour toute la durée de la manipulation. Il est placé parallèlement à la surface du sol. L'appareil est placé perpendiculairement à la direction des roulages ou des opérations culturales. Les aiguilles sont alors placées et reposent sur la surface du sol. Leur partie supérieure donne par translation une image du microrelief du sol. Une photographie de l'ensemble permet ensuite de porter cette image sur le papier et d'analyser les données.

Par comparaison de différentes aspérimétries, il est donc possible de calculer les surfaces des ornières ou les variations de volume lors du travail.

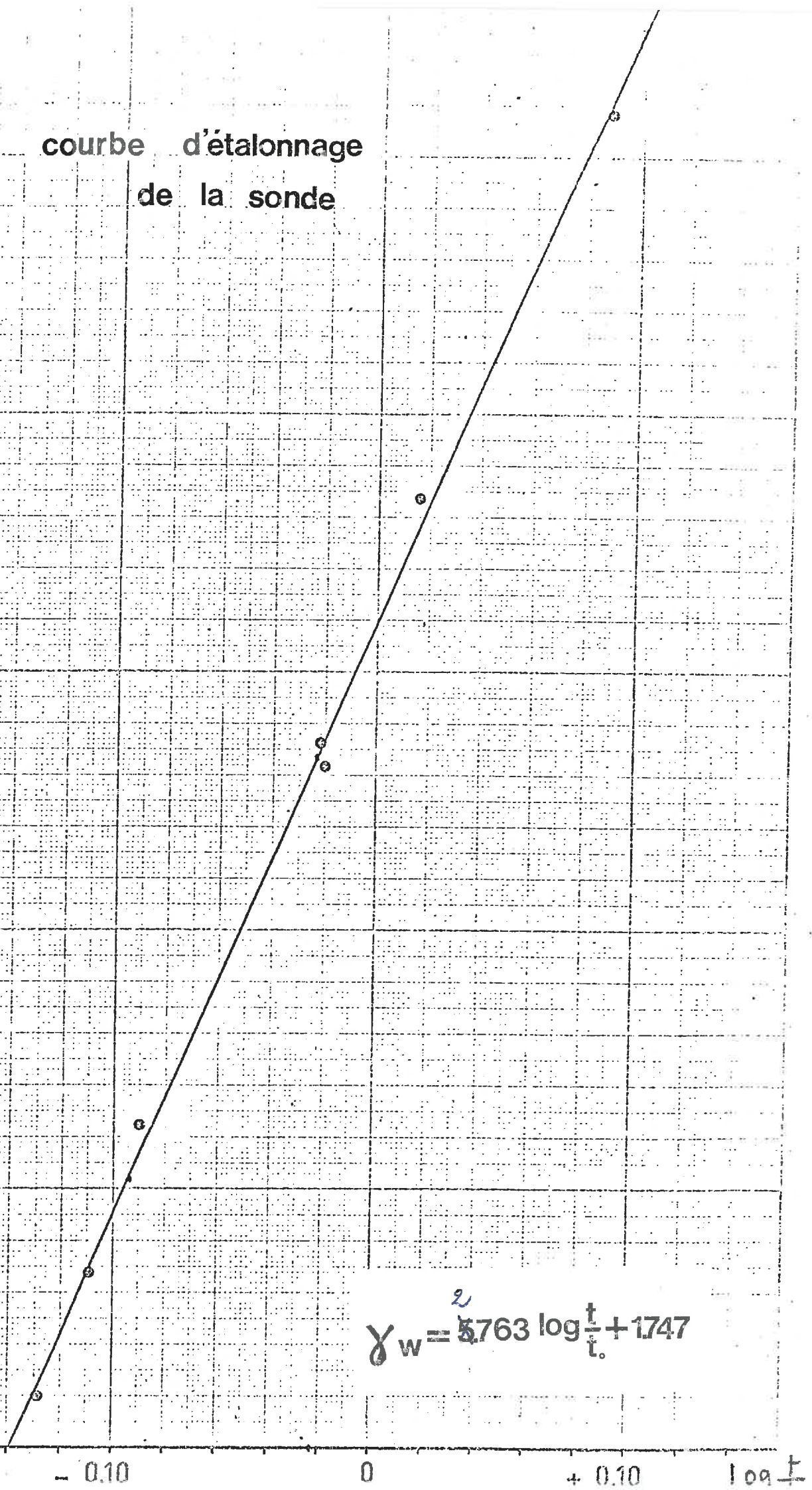
ANNEXE III : Description de la sonde à atténuation . Courbe d'étalonnage.



d'après SOANE
(1971)

Fig. 1. Carrying case containing source and detector probes (25 cm)

courbe d'étalonnage
de la sonde



$$\gamma_w = 5.763 \log \frac{t}{t_0} + 1747$$

B I B L I O G R A P H I E

- BODDAERT D., 1976 - Etude du comportement mécanique d'un sol travaillé soumis au roulage des engins agricoles.
Mémoire de fin d'étude E.N.I.T.A. Dijon - I.N.R.A. Avignon.
- DEVAUX D., 1977 - Contrôle et réalisation de traitements automatiques d'essais de laboratoire en Mécanique des Sols : Essais triaxiaux et oedométriques.
Thèse de Docteur-Ingénieur I.N.S.A. Rennes.
- FAURE A., FIES J.C., 1972 - Etude expérimentale de la sensibilité au compactage des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique.
Ann. Agron. 23(3), 1972, p. 317-332.
- FAURE A., FIES J.C., MONNIER G., 1973 - Comportement des sols soumis au roulage.
Station de Science du Sol, I.N.R.A. Avignon.
- GUERIF J., FAURE A., 1979 - Rôle de la matière organique sur le comportement du sol au compactage. I. Etude statistique.
Ann. Agron. 30(5), 1979, p. 387-399.
- GUERIF J., 1979 - Rôle de la matière organique sur le comportement du sol au compactage. II. Matières organiques libres et liées.
Ann. Agron. 30(6), 1979, p. 469-480.
- HAINES , 1923 - The volume changes associated with variations of water content in soils.
J. Agr. Sc. 13, 296-310.
- LVOV A.A., 1969 - The problem of evaluation of Trafficability of Tractors by dimensionless parameters.
Report of the Central Research Institute of the Mechanization and Electrification of Agriculture of the non black soil zone of the U.S.S.R., Vol. VII, p. 164-169, 1969.

- MONNIER G., FIES J.C., STENGEL P., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente des petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité.
Ann. Agron. 24(5), p. 533-545.
- PERDOK , 1978 - A prediction Model for the Selection of Tyres for Towed Vehicles or Tilled Soil.
J. Agric. Eng. Res. 23, p. 369-383.
- SOANE B.D., CAMPBELL D.J., HERKES S.M., 1971 - Hand held Gamma-ray Transmission Equipment for the Measurement of Bulk density of Field Soils.
J. Agric. Eng. Res. 16, p. 146-156.
- STENGEL P. et FAURE A., 1978 - Comportement mécanique d'un sol argileux soumis au roulage d'engins agricoles.
C.R. Acad. Agric. 64(1), p. 119-124.