

~~JH-R01~~

GE4

ENITA Dijon-Quetigny

COMPORTEMENT AU COMPACTAGE
D'UNE COUCHE DE SOL CULTIVEE :
Influence de la profondeur de travail.

Hervé DURAND

Mémoire de fin d'études.

Septembre 1982

AVANT - PROPOS

Ce travail a été réalisé à la Station de Science du Sol d'Avignon, dans le cadre de l'option d'Agronomie de l'ENITA Dijon.

Je remercie vivement Monsieur MONNIER, Directeur de la Station et Monsieur THOMAS, Professeur d'Agronomie à l'ENITA.

Que Monsieur J. GUERIF qui a dirigé ce travail et Monsieur STENGEL trouvent ici la marque de ma reconnaissance pour les conseils et l'aide qu'ils m'ont apportés tout au long de cette étude.

Que tous ceux qui à un moment ou à un autre m'ont apporté aide et encouragements; notamment Monsieur ROYERE et Madame BARTHELEMY qui a assuré la frappe de ce mémoire, soient également remerciés.

Je remercie enfin Monsieur BOISGONTIER, responsable de l'essai travail du sol de l'I.T.C.F. à Boigneville.

I- INTRODUCTION.

II- MATERIEL ET METHODE.

2-1. Test in situ.

2-1.1. Principe.

- a. Description appareil à compacter
- b. Contrôle de la pression appliquée
- c. Choix des pressions appliquées
- d. Temps d'application
- e. Choix des humidités

2-1.2. Compactage.

2-1.3. Mesures et observations effectuées

- a. Profil hydrique
- b. Mesure de l'enfoncement
- c. Mesure de la densité
- d. Observations visuelles des zones compactées.

2-2. Etude au laboratoire.

2-2.1. Oedomètre

- a. principe
 - oedomètre
 - enregistrement des mesures
- b. Préparation des échantillons.
 - échantillons remaniés
 - échantillons non remaniés

2-2.2. Courbes de retrait-gonflement.

- principe

2-3. Présentation des situations.

2-3.1. Site d'étude

2-3.2. Caractéristiques des différentes situations

- a. labour : L_0
- b. travail superficiel : L_1
- c. semis direct : L_2

III- RESULTATS.

3-1. Etats initiaux.

3-1.1. Profils hydriques

3-1.2. Profils de masse volumique

3-2. Déformations de surface

3-2.1. Effet traitement

3-2.2. Recouvrance

3-3. Comportement au compactage des différentes situations étudiées.

3-3.1. Exemple : $L_{1/1}$

3-3.2. Comportement au compactage d'un tricouche : règles

3-3.3. Application aux différentes situations

3-4. Evaluation du fluage.

- Hypothèses

- Ecriture de l'équation de conservation de masse

- Calcul

- Résultats sur quelques exemples

3-5. Comparaison des courbes de compressibilité au champ et au laboratoire

IV- CONCLUSION.

Annexe 1 - Gammadensimètre à transmission

Annexe 2 - Courbes de retrait

Références bibliographiques

R E S U M E

L'étude du comportement au compactage au champ, de profils différenciés, par les techniques de travail du sol, a été simplifiée en les assimilant à des tricouches.

Cette démarche a permis de mettre en évidence les effets propres à chacune des techniques de travail du sol :

- sur les déformations de surface,
- sur l'interaction des compressibilités des couches dans les phénomènes de tassement.

Des tests faisant appel à la technique d'oedométrie ont été réalisés parallèlement au laboratoire sur des échantillons non remaniés et remaniés. Les résultats de ces tests n'ont pas permis de déterminer les pressions de précompression des couches et ne permettent pas en l'état actuel de caractériser le comportement au compactage d'un tricouche.

S U M M A R Y

In situ compaction behaviour of different soil profiles due to various soil tillage techniques is studied. In order to simplify their analysis, they are assumed to be a three layers system.

This approach allowed us to show the respective effects of each soil tillage technique on :

- soil surface deformation,
- interaction between layers' compressibilities, as a major factor in soil compaction process.

Laboratory compaction tests are compared on remoulded and unremoulded samples. Precompression stress determination seems not to be allowed by those techniques. Moreover they do not allow the characterization of a three layers system compressibility.

I INTRODUCTION.

La prévision et la maîtrise des variations de compacité d'une couche de surface d'un sol cultivé en fonction de sa constitution minérale et organique en particulier, passe par la connaissance de son état physique initial et de la pression appliquée au sol par un engin.

Compte tenu de l'extrême difficulté qu'il y a, comme on le verra par la suite, à utiliser les lois de la mécanique des sols dans les sols agricoles et de la variabilité aussi bien spatiale que temporelle des états physiques des couches de surface des sols cultivés, l'analyse directe et systématique, à des fins prévisionnelles, des comportements au champ est impossible.

Une approche à deux niveaux d'observation et d'analyse paraît nécessaire :

- utilisation de tests de laboratoire pour dégager des lois physiques et/ou statistiques permettant d'extrapoler ou d'intrapoler les effets des principales variables explicatives des comportements mécaniques : constitution, teneur en eau, pressions appliquées, etc On cherche ainsi à mettre en évidence des caractéristiques permanentes intrinsèques des matériaux.

- expérimentation en vraie grandeur, au champ pour évaluer la valeur prévisionnelle des modèles établis grâce aux tests de laboratoire et pour tenter d'expliquer les spécificités du comportement mécanique des couches de surface des sols cultivés. Ce travail aboutissant à la mise en place d'une typologie des cas de figures pouvant être rencontrés.

Cette deuxième approche est essentielle dans la mesure où les couches de surface des sols cultivés ne satisfont que très rarement aux hypothèses de base que sont la continuité et l'isotropie.

La position d'interface sol-atmosphère confère aux couches de surface des sols cultivés une anisotropie très marquée caractérisée par :

- des gradients de structure dus au travail du sol, aux roulages et aux actions du climat par l'intermédiaire des phénomènes de retrait gonflement,
- des gradients de constitution, qui dans la couche travaillée sont dus essentiellement aux modes d'incorporation des résidus de récolte (travail du sol, brassage par la faune, etc),
- des gradients de teneur en eau.

Nous tenterons de dégager dans ce qui suit des éléments d'interprétation du comportement au compactage des situations retenues, en s'appuyant chaque fois que possible, sur des résultats obtenus au laboratoire.

II MATERIEL ET METHODE.

2-1. TEST IN SITU.

Les travaux précédents de BODDAERT (1976) et BERTUZZI (1980) rendent compte des difficultés d'analyse de l'action d'un pneumatique lors d'un roulage sur une couche de sol travaillé compte tenu du grand nombre de variables à contrôler.

Ainsi, pour les véhicules agricoles, SOANE (1982) distingue les caractéristiques propres :

- à l'engin : principalement son poids,
- au type de pneu : sa largeur, la rigidité plus ou moins grande de la carcasse, la pression de gonflage,
- à la cohésion et à l'humidité de la couche de surface : l'aire de contact et d'application des pressions diminue avec l'augmentation du degré de compacité de la couche superficielle. La cohésion et l'humidité du matériau déterminent de plus, pour un engin donné, les effets du patinage, généralement négligés lors de l'étude du tassement.

Face à des approches de ce type, plus descriptives qu'analytiques, parce qu'intervient un nombre élevé de paramètres, nous avons bâti un test de compactage au champ nous permettant :

- de maîtriser par l'application statique de l'effort, le niveau de la contrainte appliquée et le temps d'application de cette même contrainte,
- de nous adapter à la maille structurale des couches de surface par le choix d'une aire d'application des pressions adéquates,

Ce test est simple à mettre en œuvre et se rapproche du test oedométrique. Il en diffère par une des conditions d'application de la contrainte. En effet, l'oedométrie ne prend en compte que des déformations monodimensionnelles, du fait de l'existence d'un freinage latéral dans la cellule oedométrique. Au champ, l'absence de freinage latéral peut entraîner une extension de la zone déformée au-delà du volume défini à l'aplomb de la plaque : il y a alors fluage.

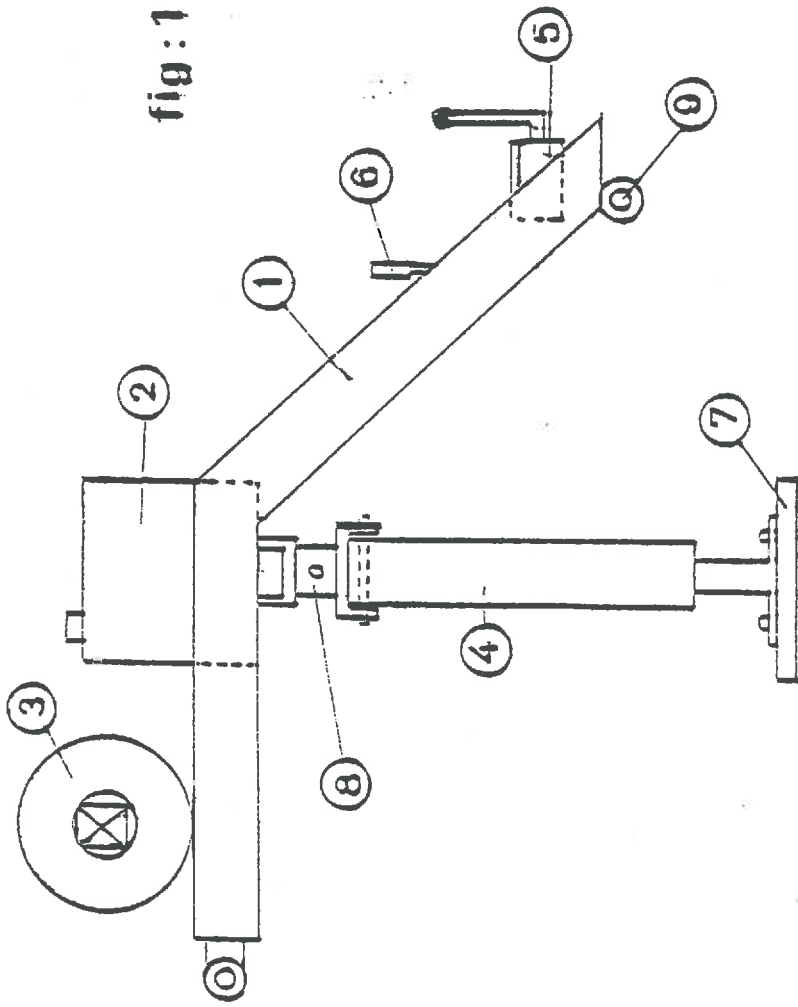
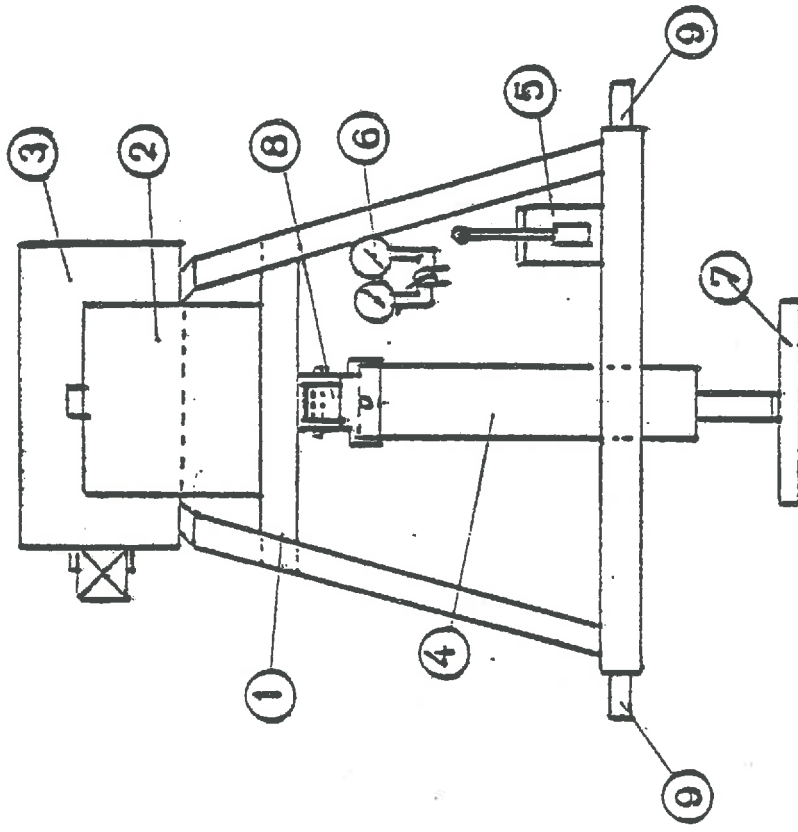
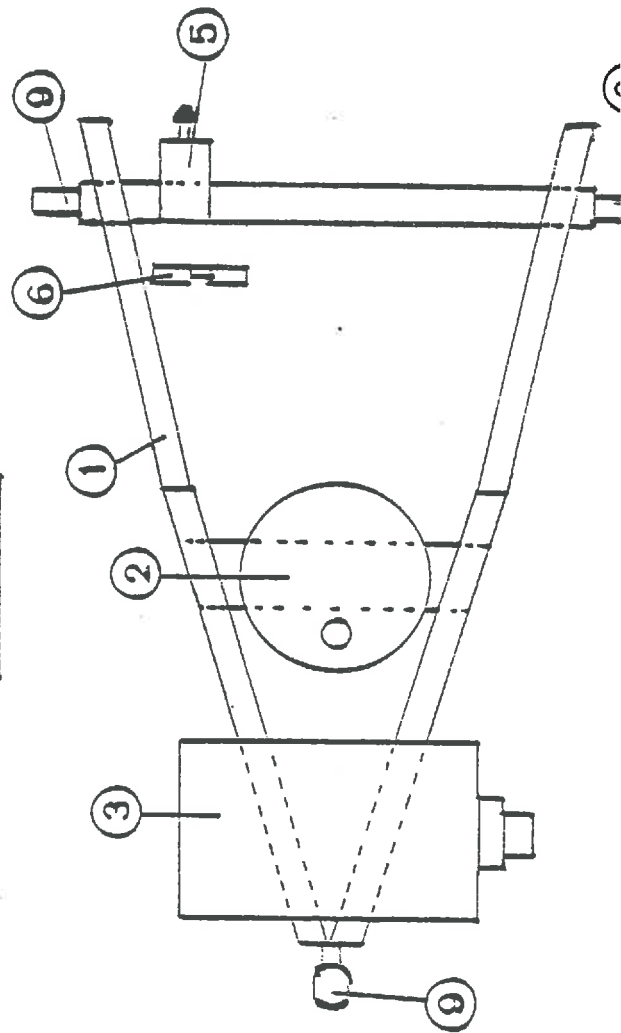


fig: 1



APPAREIL à COMPACTER IN SITU

- 1 Bati Métallique
- 2 Réservoir de Liquide Hydraulique
- 3 Pompe Hydraulique
- 4 Verin Hydraulique à double effet
- 5 Distributeur-Régulateur Hydraulique
- 6 Manomètres de CONTRÔLE
- 7 Plaque de Pression Interchangeable
- 8 Suspension à Cardan

2-1.1. Principe.

Les pressions sont appliquées au sol par une plaque actionnée par un vérin. L'évolution de la compacité des couches déformées est décrite en utilisant un gammadensimètre à transmission.

a. Description de l'appareil à compacter. (cf. figure 1).

L'ensemble de cet appareil à compacter comporte :

- un bâti rigide s'adaptant sur le système de fixation trois points des tracteurs agricoles (9),
- un réservoir d'huile (2),
- une pompe d'alimentation hydraulique mue par un moteur électrique alimenté par un jeu de batteries (2 batteries, 12V en série) non supportées par le bâti,
- un distributeur hydraulique (5) à fuite réglable par vis pointeau,
- un vérin (4) double effet relié au bâti par une suspension à cardan (8) assurant la verticalité du vérin,
- une plaque de pression (7) interchangeable.

b. Contrôle de la pression appliquée.

La pression est maintenue constante au point d'application de la plaque, quelle que soit la nature et l'importance des déformations engendrées. Ceci est obtenu en maintenant constante, la pression d'huile dans le corps du vérin, quelle que soit la course du piston, par une fuite préalablement tarée au niveau du distributeur.

c. Choix des pressions appliquées.

Nous avons retenu une gamme de pression compatible avec les niveaux de pressions exercés lors du roulage des engins agricoles au champ.

Plaque A (15 cm Ø) : 2, 3, 4, 6, 8 bars.

d. Temps d'application.

Le temps d'application retenu est $t_1 = 30$ s comme dans le cas des oedomètres (cf. § 2-2.1.a.)

e. Choix des humidités.

Les risques de tassement extrêmes coïncident le plus souvent avec des périodes d'intervention critiques au champ en sortie d'hiver (reprises superficielles, semis, épandage d'engrais, traitements, ...). Les jours disponibles pour lesquels l'intervention dans la parcelle fournit des résultats satisfaisants tant pour le court terme (réussite de la levée par exemple) que pour la suite (limitation de la dégradation du profil en profondeur), sont en nombre réduits. On est le plus souvent contraint de rouler en condition humide, le sol étant pratiquement à la capacité au champ.

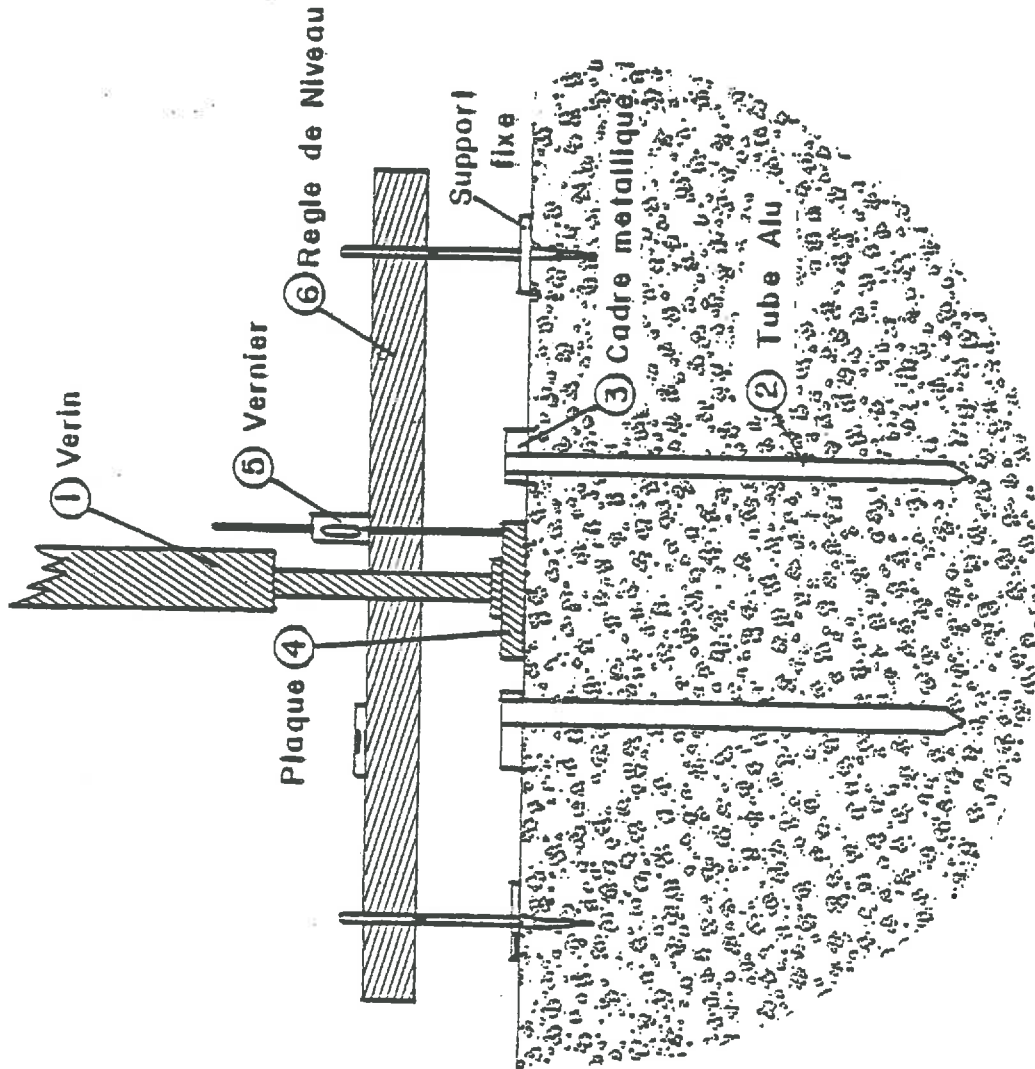


Fig. 2 - Compactage

γ densimètre

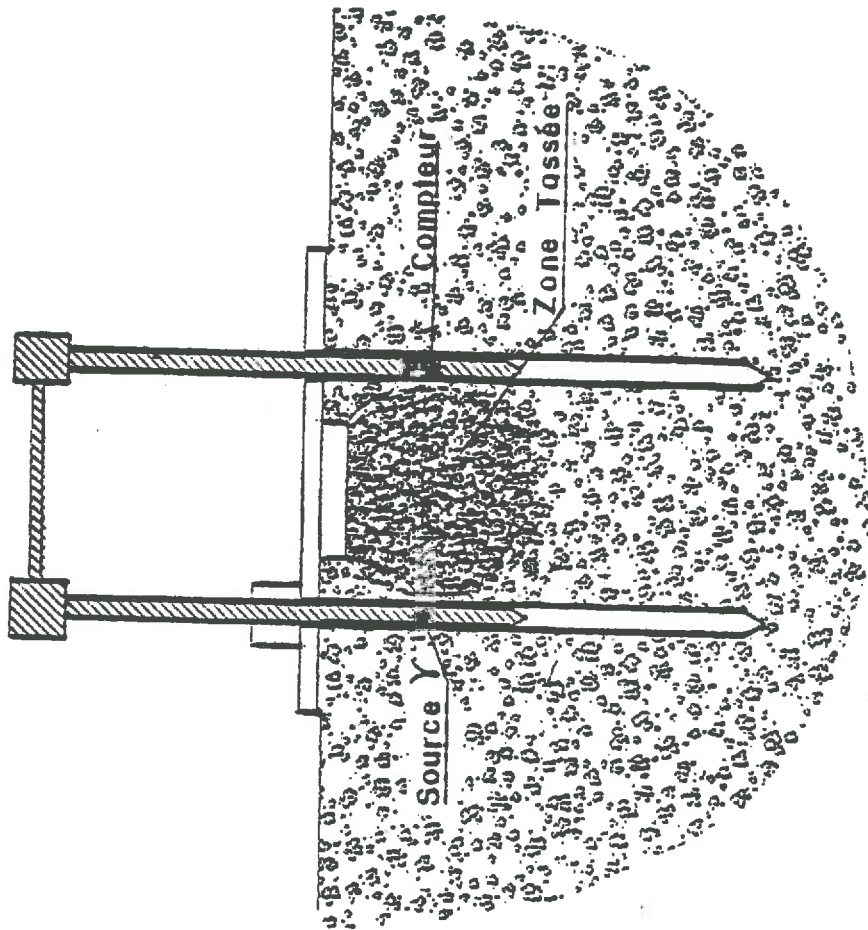


Fig. 3 - Mesure de la Masse Volumique

Nous nous sommes donc placés dans des gammes de teneur en eau équivalentes. Pour cela, nous avons installé un dispositif d'arrosage par aspersion pour porter le sol à une valeur d'humidité proche de la capacité au champ.

Nous n'avons débuté les tests qu'après ressuyage.

2-1.2. Compactage.

Nous avons pour chaque situation délimité trois ou quatre emplacements. A chaque emplacement, nous avons imprimé pas à pas une série de pressions croissantes.

2-1.3. Mesures et observations effectuées.

a. Profil hydrique.

Les mesures d'humidité sont effectuées par gravimétrie après séchage à 105°C pendant 24 heures. Les prélèvements d'échantillons réalisée de 5 en 5 cm sur une profondeur de 40 cm sont recueillis lors du perçage des deux trous nécessaires à l'introduction des deux pals du gammadensimètre. Chaque couche est considérée comme homogène et se voit affectée d'une valeur moyenne.

b. Mesure de l'enfoncement (cf. figure 2).

La cote de la plaque (4) est relevée avant et après chaque application d'une pression, par la lecture d'un vernier (5) solidaire d'une règle à niveau (6), supportée par deux repères fixes pendant toute la durée du test.

Une appréciation de la recouvrance (amplitude de la part réversible de la déformation) est obtenue en effectuant la différence entre les cotes de la plaque avant l'application de la pression P_{n+1} et après l'application de la pression P_n .

c. Mesure de la densité (cf. figure 3).

Deux trous sont forés à la tarière. On place ensuite dans chacun d'eux un tube en aluminium (2). Ces trous sont destinés à recevoir les deux pals du gammadensimètre à transmission (INRA-LPC, 1980, Annexe 1).

Un cadre métallique (3) maintient les extrémités affleurantes des deux tubes pour en conserver éventuellement le parallélisme en cas de fluage lors du compactage.

Les pressions sont imprimées au centre de ce cadre métallique (entre les deux trous). Après chaque application d'un niveau de pression donné, on détermine

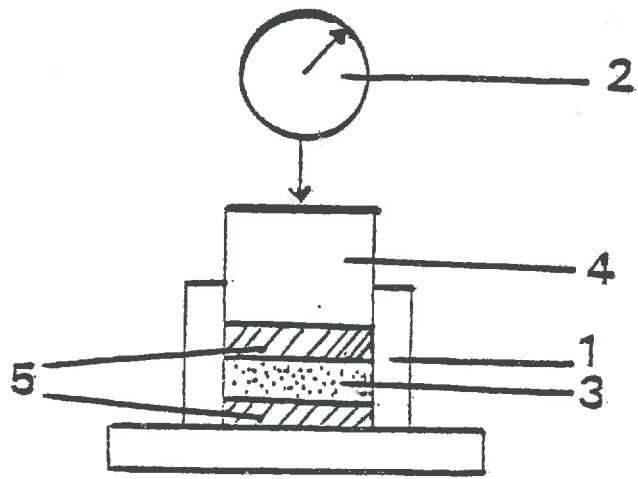
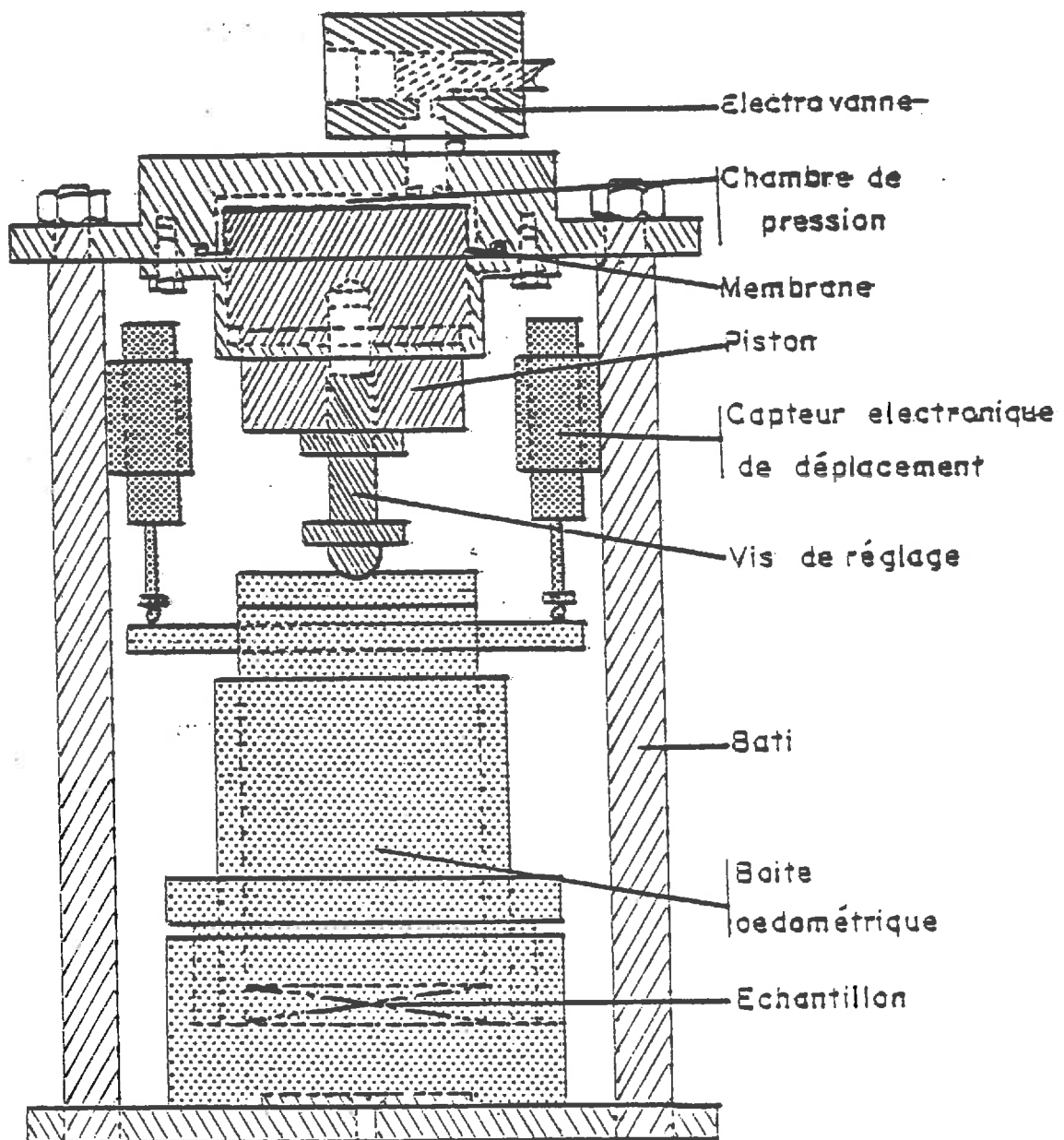


fig:4 Schéma type d'un œdomètre



OEDOMETRE PNEUMATIQUE

fig:5

le profil de densité grâce au gammadensimètre. La zone scrutée s'inscrit donc dans le plan diamétral du bulbe. La profondeur de sol scrutée est de 39 cm, le pas de mesure choisi est de 3 cm.

d. Observations visuelles des zones compactées.

A la fin de chaque test, c'est-à-dire après que l'on ait appliqué pas à pas la gamme de pressions retenues, on a observé le profil cultural dans le plan de scrutation γ . Nous avons alors tenté de dégager des zones de compacités différentes, affectées par le tassement lors du test.

2-2. ETUDE AU LABORATOIRE.

2-2.1. Oedométrie.

La technique d'oedométrie retenue a été étudiée et mise au point par GUERIF (1982).

a. Principe (cf. figure 4).

L'échantillon est placé dans la cellule de compression de l'oedomètre, constituée d'un cylindre (1) et d'un piston (4) de 7 cm de diamètre, la hauteur de l'échantillon avant compactage étant de 2,4 cm.

Cette stricte définition du volume initial de l'échantillon permet d'en maîtriser l'état initial.

De plus, deux plaques poreuses (5) assurent l'élimination de l'eau en cours de compactage (consolidation).

- oedomètre.

Le système est à mise en charge pneumatique (cf. figure 5).

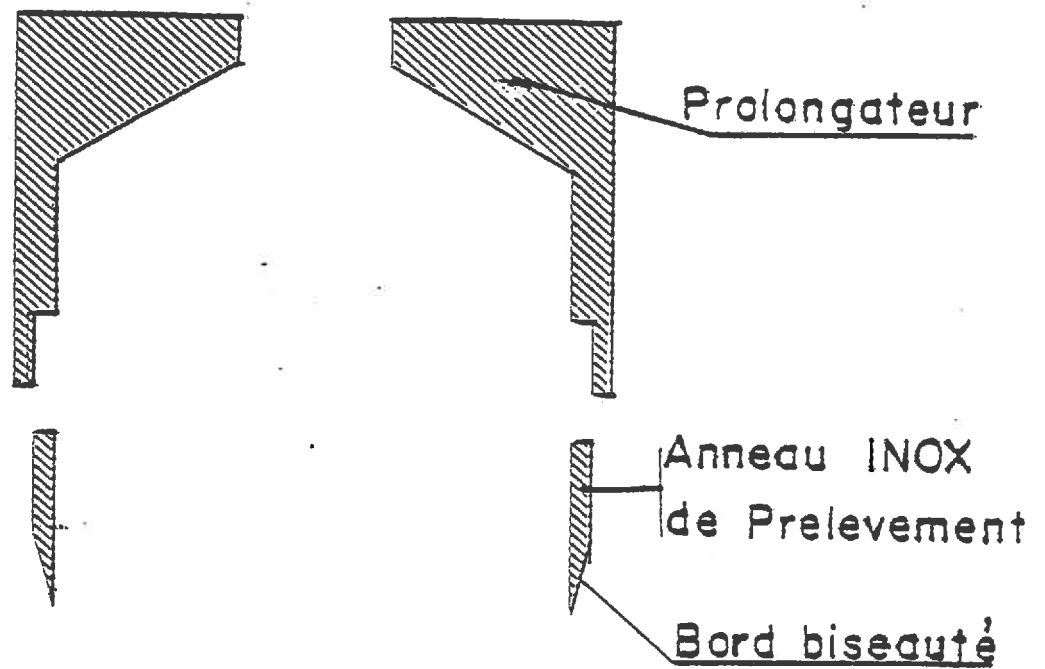
L'application statique de l'effort donne la possibilité de contrôler au mieux l'intensité et le temps d'application de la charge : 7 intensités de pression ont été retenues (0,5 ; 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 6 ; 8 bar) et le temps d'application $t_1 = 30$ s.

Ce temps $t_1 = 30$ s étant suffisamment long pour être sûr que l'on ait dépassé la phase quasi-instantanée de la déformation (BERTUZZI, 1980).

Un échantillon, pour une humidité donnée reçoit successivement toute la gamme de pression.

- enregistrement des mesures.

Les variations de volume de l'échantillon ne sont dues qu'à la variation de sa hauteur. Celle-ci est suivie par un capteur de déplacement qui permet d'enregistrer, sur un traceur de courbe, la course du piston.



Vue en Coupe

Figure 6 : Appareil de Prelevement in situ.

b. Préparation des échantillons.

- échantillons remaniés.

Après séchage à 105°C, le matériau est broyé et tamisé entre 1 et 2 mm.

Les échantillons sont ensuite humectés par vaporisation jusqu'à obtention de la masse d'eau désirée. Suit une période d'homogénéisation (à température constante) d'une semaine environ.

Un prélèvement d'humidité de contrôle est alors effectué.

- échantillons non remaniés .

Le matériau est prélevé avec un anneau métallique (cf. figure 6) d'une hauteur de 2,4 cm et d'un diamètre intérieur de 7,01 cm. L'anneau est biseauté dans sa partie inférieure. L'anneau est enfoncé dans le sol à l'aide d'un prolongateur adéquat, puis dégagé et arasé grossièrement au couteau.

Au laboratoire, l'échantillon est arasé à la règle, puis passé à l'œdomètre.

2-2.2. Courbes retrait gonflement.

Sa connaissance permet pour toute teneur en eau de pratiquer l'analyse de la porosité d'un matériau.

- principe.

La courbe de retrait-gonflement, établie sur des agglomérats naturels, traduit la relation entre le volume massique textural de l'échantillon et son humidité (STENGEL, 1978).

Les échantillons sont séchés à l'air, concassés, puis tamisés entre 2 et 3 mm. Les agrégats ainsi obtenus subissent une réhumectation standard (PINOCHET, 1981). Au cours de cette réhumectation, chaque échantillon est porté à un potentiel voisin de zéro (-3 mbar) ; à l'équilibre son gonflement est alors maximum.

Il est à noter que les amplitudes de gonflement-retrait observées sur des agrégats libres de toute contrainte de confinement au laboratoire, sont peut être maximisées par rapport à ce qu'elles seraient en place.

Suit une phase de dessiccation en atmosphère contrôlée. Les mesures de volume massique sont effectuées suivant la méthode de la poussée hydrostatique dans le pétrole, d'agrégats précédemment saturés dans le même liquide (MONNIER et al., 1973).

	< 2 μ	< 20 μ	20 à 50 μ	50 à 200 μ	200 à 2000 μ	C %	CEC meq/100 g
All L ₂ maïs	25,5	29,9	35,6	6,9	2,1	9,1	11,5
All L ₁ maïs	24,3	28,1	37,9	7,7	2,0	9,9	12,7
All L ₀ maïs	24,8	31,8	35,7	6,3	1,4	8,3	14,0
All L ₂ blé	23,7	30,3	37,3	6,7	2,0	8,9	12,2
All L ₁ blé	20,5	31,5	39,2	7,0	1,8	10,6	12,7
All L ₀ blé	24,2	29,6	37,9	6,4	1,9	10,1	11,7

TABLEAU N° 1 : Analyses granulométriques.

2-3. PRESENTATION DES SITUATIONS.

2-3.1. Site d'étude.

Le site d'étude retenu est l'essai travail du sol de BOIGNEVILLE (Essonne) où l'on met en comparaison trois techniques de travail du sol :

- un travail du sol classique : labour à 25 cm (L_0),
- un travail superficiel jusqu'à 10-12 cm (L_1),
- non travail du sol : technique du semis direct (L_2).

L'essai est implanté depuis 1970 sur un sol limoneux. Les trois situations en présence sont très différenciées. Elles se distinguent par des anisotropies de structure (différenciation en horizons) et de constitution (plus ou moins grande dilution de la matière organique, vitesses d'évolution différentes) extrémisées, liées aux techniques de travail du sol.

Les trois parcelles sur lesquelles ont été effectuées les mesures appartiennent au même bloc (A.II, blé et maïs) et présentent une faible variabilité de la constitution granulométrique (tableau n° 1).

Les teneurs en carbone total et en carbone libre de chacune des situations (L_0 , L_1 , L_2) sont présentées dans le tableau n° 2.

2-3.2. Caractéristiques des différentes situations.

a. Labour : L_0 .

Les parcelles L_0 sont labourées à 25 cm de profondeur. Au cours de cette opération, les résidus de récolte sont enfouis dans l'ensemble de la couche travaillée.

b. Travail superficiel : L_1 .

Les effets du travail du sol sont analogues au cas précédent. Seule variante, l'épaisseur de la couche travaillée qui n'est plus que de 10 cm d'épaisseur.

c. Semis direct : L_2 .

Dans le cas du semis direct, les effets du travail du sol sur la structure sont réduits à la seule ligne de semis. Ce travail minimum vise à placer les graines dans des conditions favorables à leur levée (localisation des graines à une profondeur régulière, recouvrement de celles-ci par de la terre fine).

Le travail du sol n'affecte donc qu'une fraction de la surface sur une épaisseur de l'ordre de 5 cm. De ce fait, l'incorporation des résidus de récolte est en partie mécanique, bien que la faune du sol y participe grandement.

		Teneur en Carbone total (% _a)		Teneur en Carbone libre (% _a)	
		maïs	blé	maïs	blé
L ₀	Couche 0-10 cm	10,00	9,40	0,98	0,73
	Couche 10-20 cm	10,00	9,40	0,98	0,73
L ₁	Couche 0-12 cm	14,00	12,90	1,98	1,65
	Couche 12-25 cm	8,75	9,75	0,62	0,56
L ₂	Couche 0-3 cm	20,20	18,85	4,26	2,61
	Couche 3-5 cm	13,60	11,85	1,55	0,83
	Couche 5-25 cm	9,20	9,50	0,72	0,66

TABLEAU N° 2 : Teneur en carbone total et libre des parcelles maïs et blé
(CHIADOEUF, 1981).

	Couche A	Couche B	Couche C
L ₀ cote nature	0-25 cm couche travaillée	25-30 cm	30-40 cm
L ₁ cote nature	0-12 cm couche travaillée	12-25 cm	25-40 cm
L ₂ cote nature	0-10 cm riche en matières organiques	10-25 cm	25-40 cm

TABLEAU N° 3 : Caractéristiques des multicouches.

III - RESULTATS.

3-1. ETATS INITIAUX.

3-1.1. Profils hydriques.

Parcelles maïs.

Les profils hydriques présentés par situation (figure 7) révèlent la dispersion des teneurs en eau des couches de surface (0-5 et 0-10 cm) par opposition à la relative homogénéité des couches sous-jacentes.

Ces écarts de teneurs en eau ont deux origines :

- d'une part, nous sommes intervenus dans les parcelles après une phase de réhumectation. Les couches de surface, très poreuses, se sont donc réhumectées rapidement. La circulation de l'eau a été entravée au niveau du fond de travail (particulièrement net en L_2 et L_1).

- d'autre part, à l'intérieur de chaque situation, les écarts de teneurs en eau des différents profils proviennent du fait que nous avons été contraints d'étaler nos tests sur plusieurs jours. Les couches situées à proximité de la surface se sont desséchées (figure 7). En L_0 et L_2 , seuls les cinq premiers centimètres sont affectés par ce phénomène. En L_1 , ce sont les dix premiers centimètres qui sont à l'origine de la variabilité de la teneur en eau des différents profils.

Parcelle blé.

Les niveaux différents de réhumectation des profils appartenant à chacune des situations (figure 7) semblent provenir en partie du fait qu'en L_0 et L_1 , les deux emplacements retenus n'ont pas été préparés de la même façon. En $L_{0/1}$ et $L_{1/1}$, la végétation a été coupée avant arrosage, alors qu'en $L_{0/2}$ et $L_{1/2}$, la végétation n'a été coupée qu'après arrosage.

3-1.2. Profils de masse volumique ρ_d .

L'analyse des profils (figure 8) appartenant à chacune des situations (L_0 , L_1 , L_2) permet de distinguer graduellement trois couches :

- une couche A meuble,
- une couche B plus dense, voire nettement plus dense que A,
- une couche C moins dense que B.

L'épaisseur de chacune des couches ainsi définies varient suivant les situations (tableau n° 3).

fig:7 Profils d'Humidité

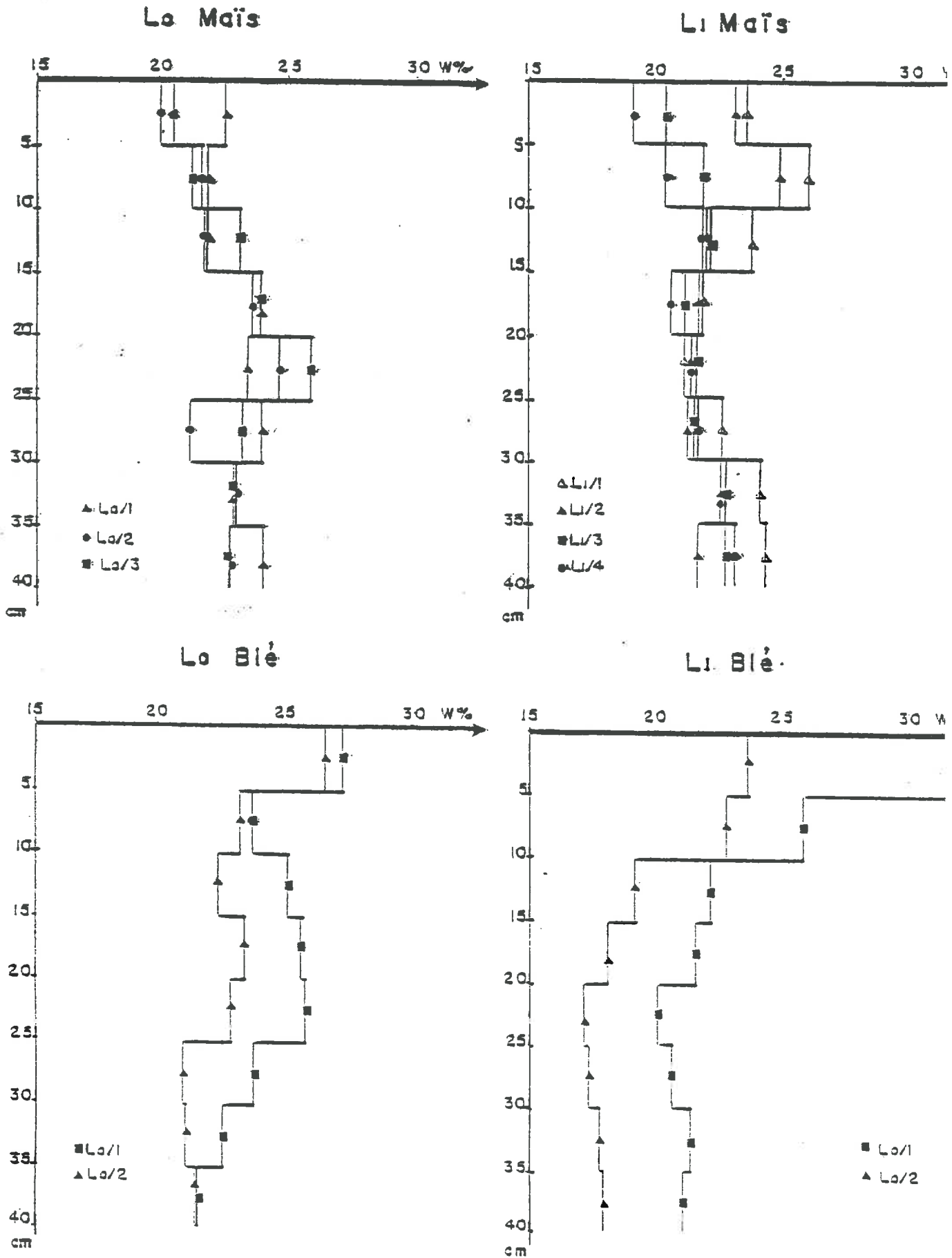


fig:7 Profils d'Humidité

L2 Maïs

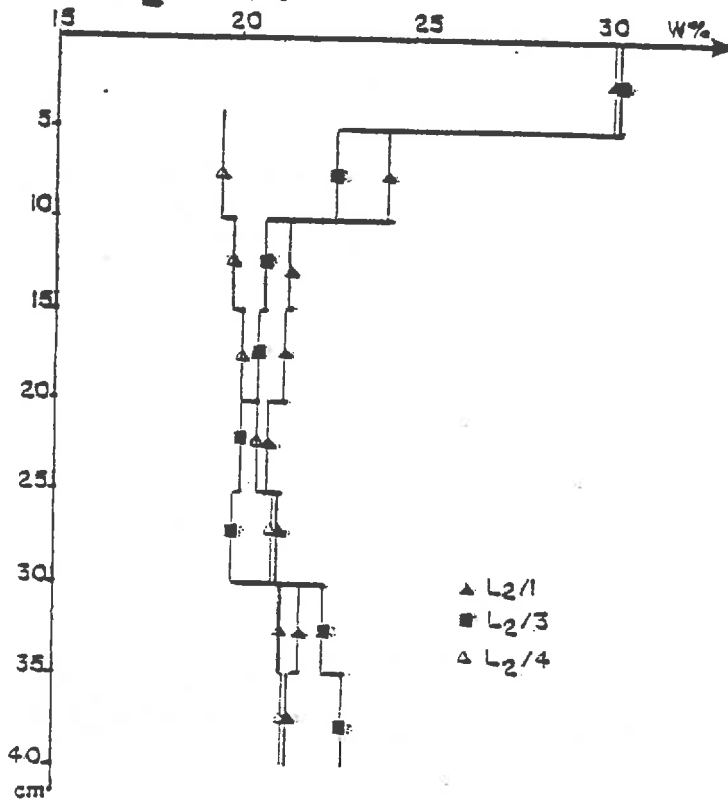
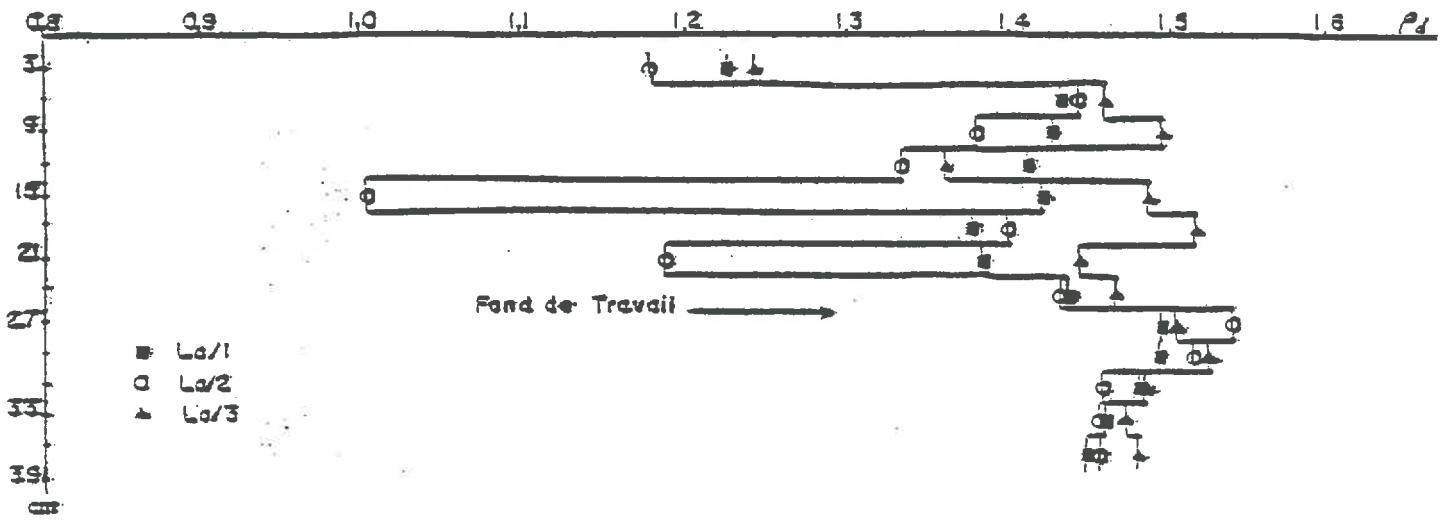
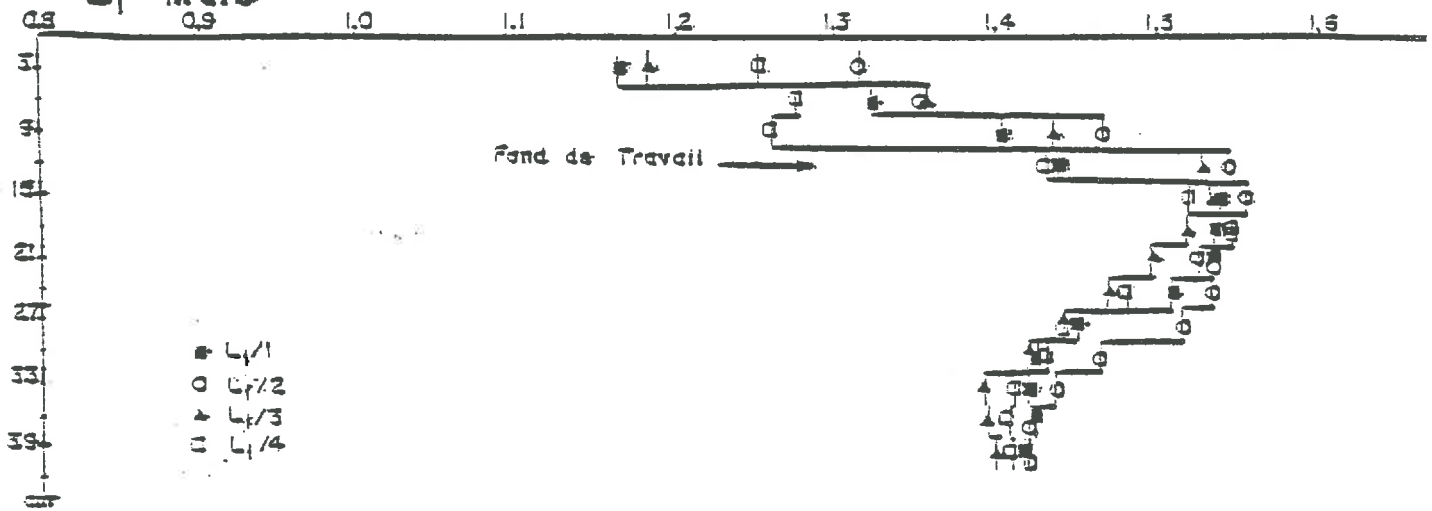


fig:8 Profils initiaux des Masses Volumiques ρ_d

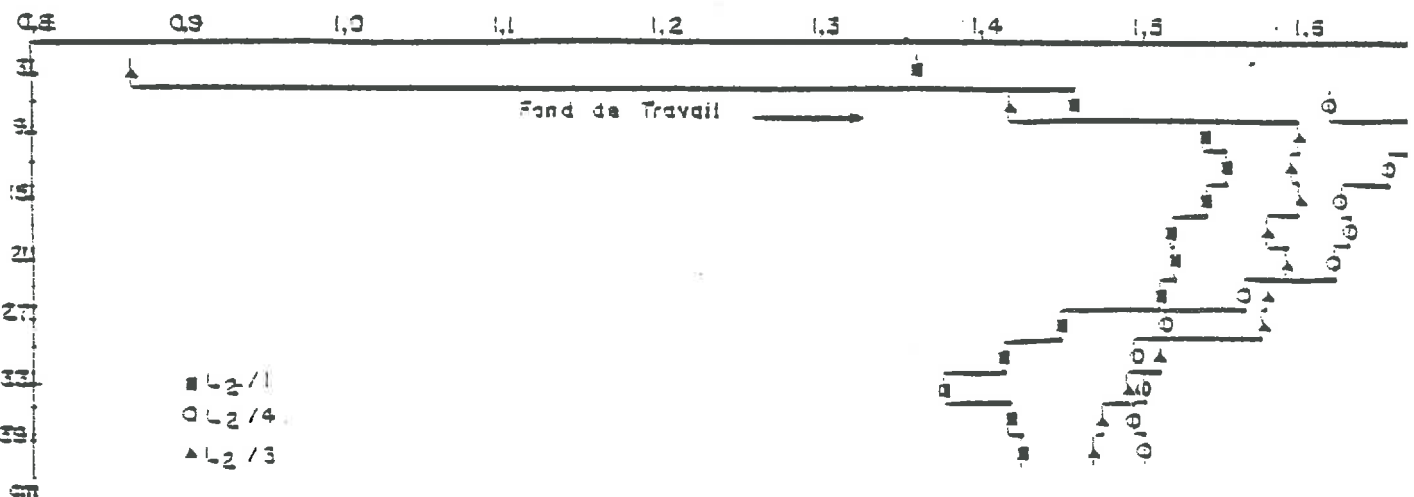
L₀ Maïs



L₁ Maïs



L₂ Maïs



Ainsi, quelle que soit la technique de travail du sol, les profils ont-ils une forme commune caractérisée par l'existence d'une couche plus dense placée entre deux couches plus poreuses. Il paraît alors possible d'assimiler ces profils complexes à des tricouches dont la couche centrale est plus dense. C'est l'attitude que nous avons adoptée, en considérant chacune des couches comme homogène en ρ_d et en humidité sur toute son épaisseur.

La limite entre les couches A et B se distingue très nettement dans toutes les situations. Par contre, la limite fixée entre la couche B et C prend parfois un caractère arbitraire. En effet, on a plus souvent affaire à un gradient de masse volumique ρ_d qu'à une discontinuité marquée. Mais compte-tenu des moyens de mesure mis en oeuvre, cette modélisation en tricouches permettra de mieux appréhender les comportements au compactage des profils pris dans leur totalité.

Les hétérogénéités rencontrées au niveau des profils qu'elles soient :

- de constitution : plus ou moins bonne répartition des matières organiques

(voir profil $L_{0/2}$, figure 8),

- de structure : taille des éléments structuraux, émiettement plus ou moins poussé de la couche travaillée,

peuvent modifier grandement les valeurs de masse volumique de chaque couche.

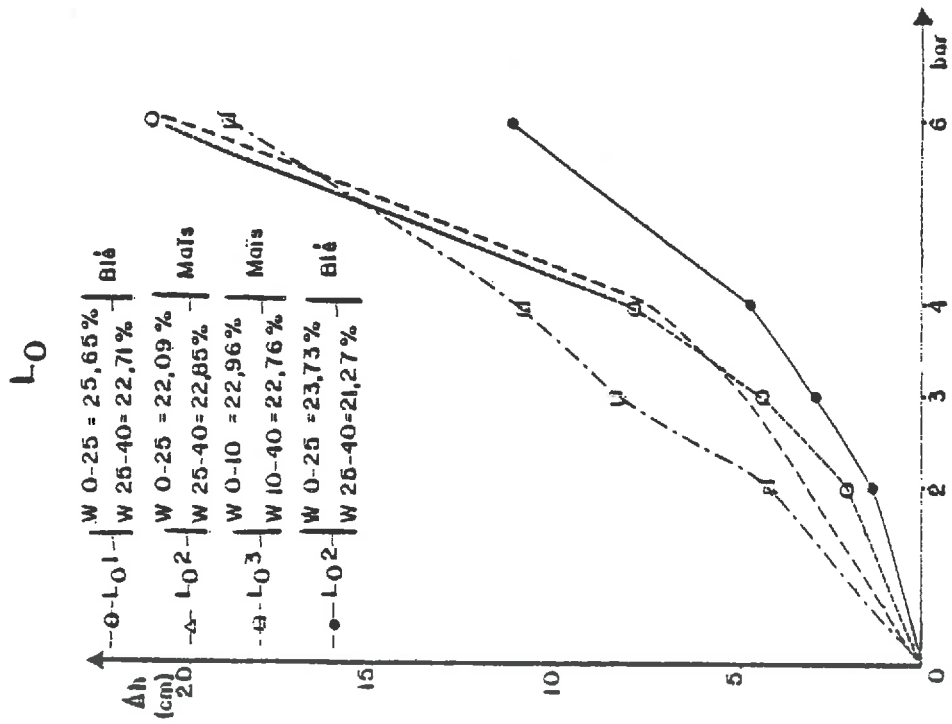
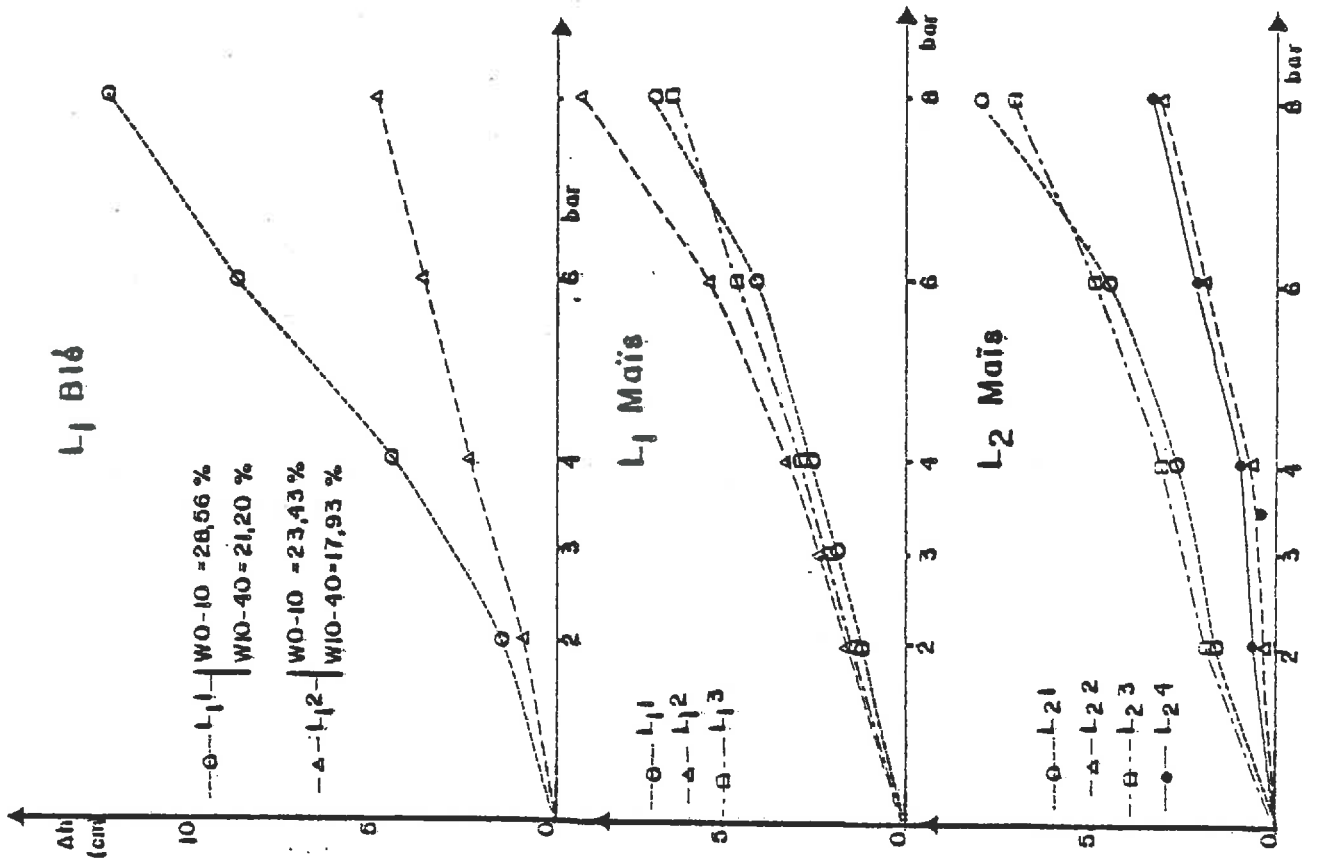
Compte-tenu de l'influence de la masse volumique ρ_d initiale sur la relation pression appliquée-masse volumique ρ_d après compactage, cette variabilité spatiale risquait de rendre très difficile la comparaison des résultats du test si chacune des pressions avait été appliquée en un site différent. C'est pourquoi nous avons choisi d'appliquer les différentes pressions successivement au même emplacement. Ceci nous a interdit la réalisation de mesures destructives à chaque pas de pression (mesure teneur en eau par exemple ou de masse volumique ρ_d) à l'intérieur de la zone compactée.

3-2. DEFORMATIONS DE SURFACE.

La cote de la plaque est relevée avant et après chaque application d'une pression.

On connaît ainsi, pour une pression donnée, la variation de hauteur du tricouche pris dans son ensemble (ΔH_T), mais non la variation de hauteur de chacune des couches A, B, C prises une à une.

$$\Delta H_T = \Delta H_A + \Delta H_B + \Delta H_C$$



Seules les mesures de masse volumique ρ_d nous permettent d'affirmer qu'une couche s'est tassée.

Ex : Pour une pression P_{n+1}

$$\Delta \rho_{dA} = \rho_{dA} P_{n+1} - \rho_{dA} P_n > 0$$

la couche A se tasse

$$\Delta \rho_{dB} = \rho_{dB} P_{n+1} - \rho_{dB} P_n = 0$$

la couche B ne s'est pas tassée

d'où $\Delta H_T = \Delta H_A$

3-2.1. Effet traitement.

Les plus grandes amplitudes de déformations sont obtenues en L_0 (figure 9). En L_1 et L_2 (figure 9), les variations de cote de la plaque sont nettement moindres.

Les variations de cote de la plaque relevées en L_1 ($L_1 \text{ blé}_1$ et $L_1 \text{ blé}_2$, figure 9) et L_0 ($L_0 \text{ blé}_1$ et $L_0 \text{ blé}_2$, figure 9) montrent à quel point les variations de teneurs en eau confèrent aux couches concernées des propriétés mécaniques différentes.

3-2.2. Recouvrance.

Afin de mettre en évidence la compressibilité de la couche A de L_2 , nous avons procédé à la comparaison d'une série de profils appartenant à cette situation :

- deux profils en l'état : $L_{2/1}$ et $L_{2/3}$,
- un profil où nous avons décapé la couche A. Ce profil est noté $L_{2/4}$.

La figure 10 montre les amplitudes des déformations de surface de chacun des profils appartenant à L_2 . La couche A des profils $L_{2/1}$ et $L_{2/3}$ présente une compressibilité importante liée à son état initial et à sa richesse en matières organiques.

La technique d'appréciation de la recouvrance n'a pas permis de mettre en évidence des différences significatives en présence ou l'absence de la couche A (figure 10). On n'a donc pas pu mettre en évidence le rôle protecteur des matières organiques dû à l'élasticité des pailles. (GUERIF, 1979).

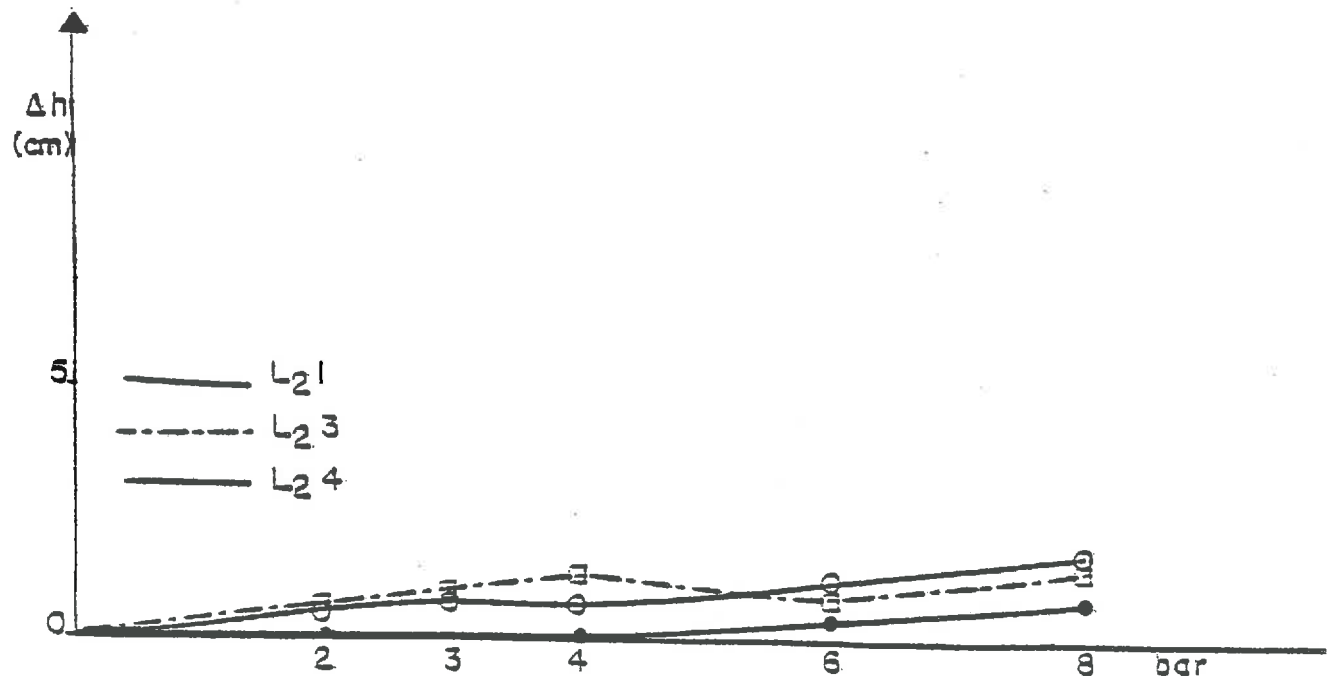


Figure:10 Courbes de Recouvrance L₂ Maïs

Il est à noter que l'importance des déformations pour les plus fortes pressions a pu engendrer ou être la cause d'interpénétration des couches. Ce phénomène rend difficile l'utilisation des profils différenciés de teneur en eau initiaux. Ceci ~~avait~~ ^{avait} justifié la réalisation d'un nouveau profil hydrique après application de la dernière pression (FIN du test).

3-3. COMPORTEMENT AU COMPACTAGE DES DIFFERENTES SITUATIONS ETUDIEES.

L'analyse de comportement au compactage de chacune des situations est conduite couche par couche. Nous avons vu précédemment (paragraphe 3-1.2.) que nous pouvions assimiler les profils initiaux de masse volumique $\bar{\rho}_d$ complexes à des tricouches A, B, C, chaque couche étant définie par une valeur de masse volumique ρ_d et une valeur d'humidité W moyennes. Nous allons considérer que chacune de ces couches a un comportement mécanique qui lui est propre.

Cette démarche simplificatrice va nous permettre de raisonner la compressibilité de chacune de ces couches lors de l'application d'un niveau de pression donné (les pressions étant imprimées à la surface du sol).

Avant de raisonner sur l'ensemble des sites retenues dans chaque situation, nous allons illustrer cette démarche à partir de l'étude d'un site : $L_{1/1}$.

3-3.1. Exemple : $L_{1/1}$.

L'étude du profil initial de masse volumique $\bar{\rho}_d$ (figure 11) permet de définir l'épaisseur de chacune des couches, malgré les incertitudes liées aux mesures de masse volumique. En effet, la dispersion des mesures de masse volumique aux interfaces des différentes couches rend parfois difficile la localisation de leurs limites.

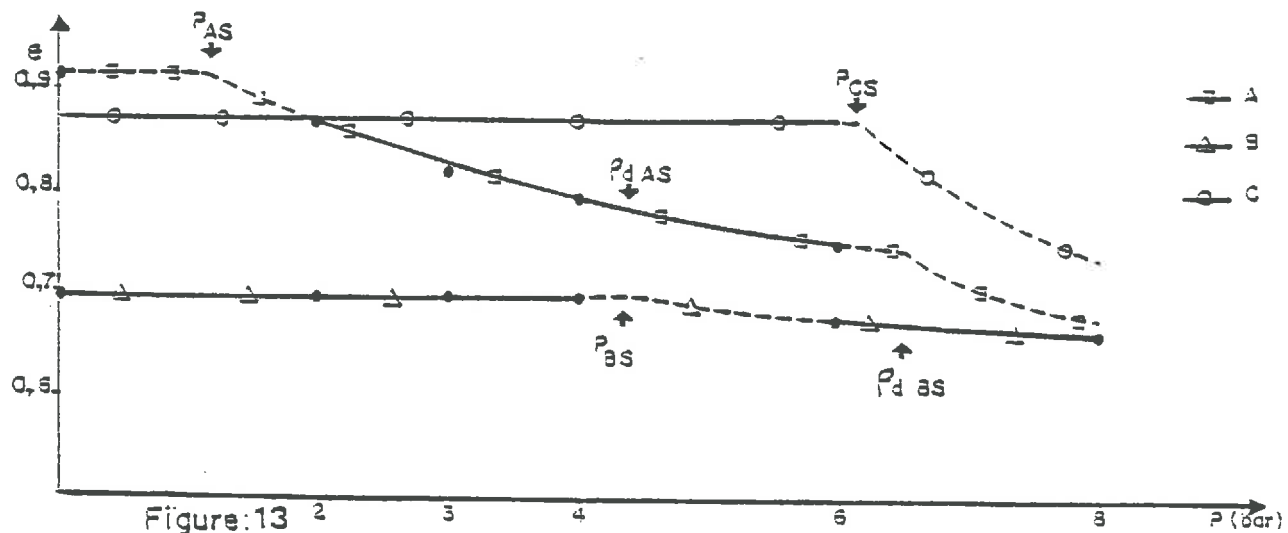
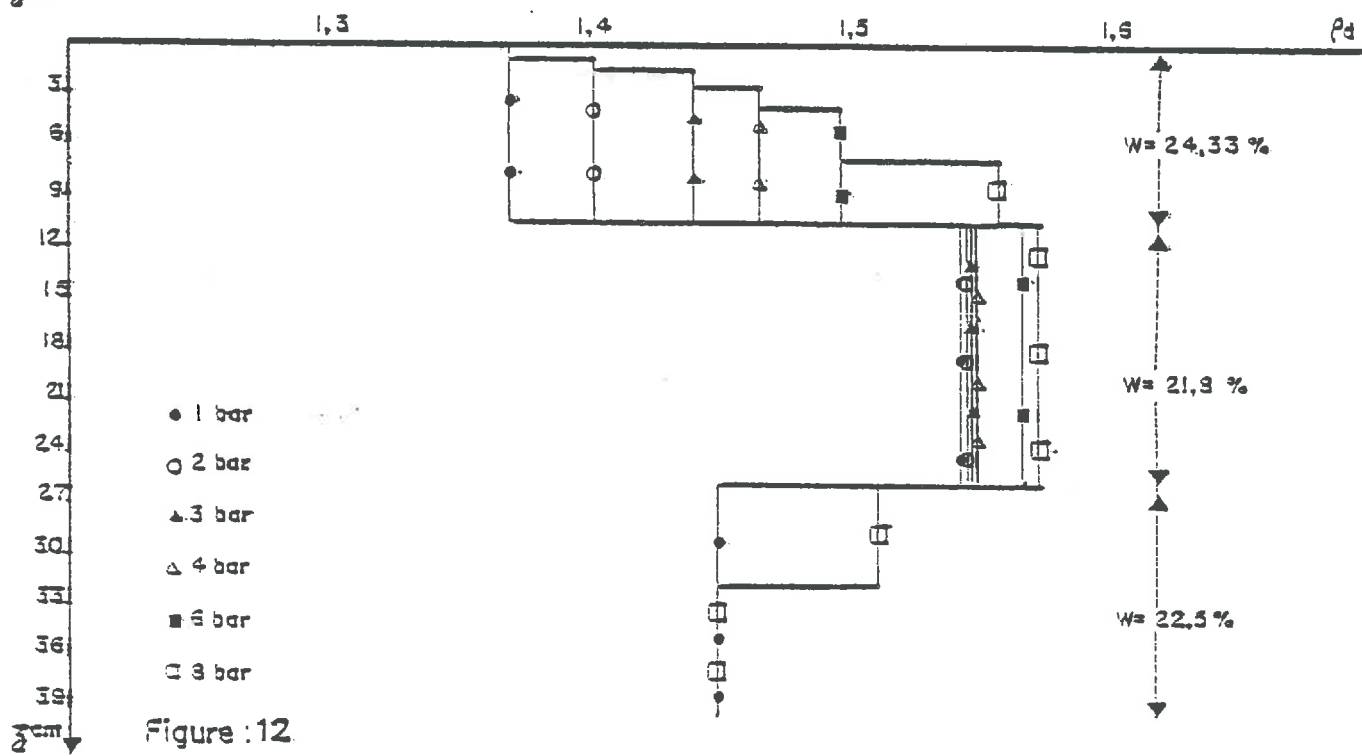
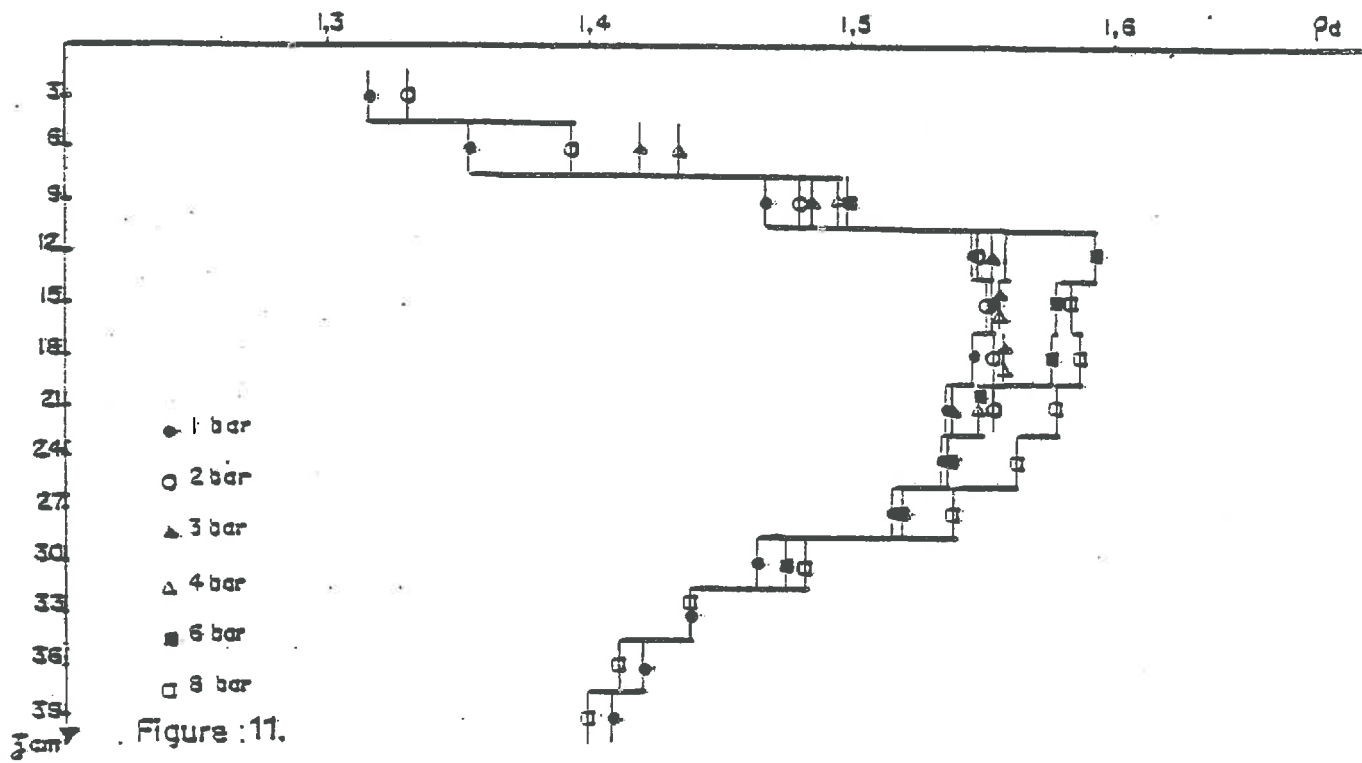
Cette dispersion est due en partie :

- aux hétérogénéités de structure,
- à la disposition relative de la zone scrutée et de l'interface,
- à la résolution du gammadensimètre : $\pm 2,5$ cm.

Toutefois l'examen systématique des profils culturaux a permis de lever une grande partie de ces ambiguïtés.

La couche A est définie entre les scrutations $z = 3$ cm et $z = 12$ cm. Le gradient de masse volumique élevé, existant entre les deux couches A et B justifie la limite inférieure fixée à $9 \text{ cm} < z < 12 \text{ cm}$.

La couche B apparaît comme relativement homogène entre les scrutations $z = 12$ cm et $z = 24$ cm. Sa définition ne pose pas de problèmes majeurs. Seule



INTERPRETATION du CAS LI/1

la distinction opérée entre la couche B et C peut apparaître plus arbitraire. On n'a pas affaire dans ce cas à une discontinuité marquée, comme entre la couche A et B, mais à un gradient de masse volumique faible. Nous avons défini l'interface couche B-couche C comme étant l'ancien fond de travil (situé à $z = 25$ cm de profondeur).

Pour chacune de ces couches A, B, C ainsi établie, nous prendrons en compte la moyenne des masses volumiques ρ_d des couches élémentaires, dont l'épaisseur est définie par le pas de scrutation.

Les pressions prises en compte dans la suite du texte seront les seules pressions connues, c'est-à-dire les pressions appliquées à surface du tricouche.

-Profil moyen (figure 12).

La couche A se tasse dès que l'on applique la première pression (2 bar). Nous ne pouvons donc définir une pression seuil, provoquant le début du tassement.

On admettra cependant, par équivalence avec les comportements des couches B et C, que si cette pression seuil P_A existe, elle serait comprise entre 0 et 2 bar. L'application pas à pas des pressions croissantes provoque graduellement un tassement de la couche A.

La couche B ne se tasse que lorsqu'on applique à la surface du sol une pression comprise entre 4 et 6 bar. A 8 bar, le tassement de la couche B s'accroît alors que la couche C commence à se tasser.

Il existe donc des pressions seuils, relatives à chacune des couches, pour lesquelles celles-ci commencent à se tasser. Pour formaliser le comportement au compactage de chacune des couches, on peut tracer leurs courbes de compressibilité, c'est-à-dire le graphe de la relation indice des vides-pressions appliquées (figure 13). (l'indice des vides étant le volume des vides ramené au volume de solide soit $e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$ avec ρ_s = masse volumique de solide, ρ_d masse volumique sèche de la couche de sol compactée). Ce type de représentation est couramment utilisé en génie civil pour repérer les pressions seuils dans les phénomènes de préconsolidation. Son utilisation dans le domaine du comportement mécanique des sols agricoles a été tentée depuis par différents auteurs comme par exemple J. GUERIF, 1982 ; A.J. KOOLEN, 1982.

Compte-tenu du nombre de points, ce tracé ne permet pas de définir ^{aisément} la pression seuil de chacune des couches.

La compressibilité de l'ensemble du profil dépend des compressibilités propres à chaque couche et à leur interaction. Ainsi, tant que les compressibilités de B et de C restent faibles devant celle de A, seule la couche A se tasse. Lorsque

sa compressibilité diminue, la transmission de la pression au travers de la couche A ainsi que la compressibilité de B deviennent telles que B se tasse alors. Il en est de même pour le processus de tassement de la couche C.

La confrontation des différents cas de figures enregistrés permet d'établir un schéma explicatif du comportement au compactage du tricouche précédemment défini.

3-3.2. Comportement au compactage d'un tricouche : règles.

$$(1) \begin{aligned} \Delta \rho_{dA} &> 0 \\ \Delta \rho_{dB} &= 0 \\ \Delta \rho_{dC} &= 0 \end{aligned}$$

La couche A repose sur un plancher incompressible. Le tassement de cette couche ne débute que pour une pression $P > P_A$ Seuil.

La masse volumique de la couche ρ_{dA} passe par une valeur seuil ρ_{dAS} pour laquelle la couche B commence à se tasser.

$$(2) \begin{aligned} \Delta \rho_{dA} &> 0 \\ \Delta \rho_{dB} &> 0 \\ \Delta \rho_{dC} &= 0 \end{aligned}$$

Les couches A et B reposent sur un plancher incompressible. Le tassement de B ne débute que pour une pression seuil P_{BS} .

La masse volumique de la couche B augmente et tend vers une valeur limite ρ_{dB}^l de telle sorte que :

- les compressibilités comparées de A et de B conduisent à une reprise du tassement de A. ρ_{dA} tend alors vers une valeur limite ρ_{dA}^l

$$(3) \begin{aligned} \Delta \rho_{dA} &> 0 \\ \Delta \rho_{dB} &> 0 \\ \Delta \rho_{dC} &> 0 \end{aligned}$$

Le tassement de la couche C ne débute que pour une pression seuil P_C dont l'action ne se fait sentir que pour une valeur seuil de masse volumique de B (ρ_{dB}^S)

SITUATIONS	A						B						C		
	\bar{w}_A	ρ_{DAI}	ρ_{DAS}	ρ_{DAI}	ρ_{DI}^T	P_{AS} (bar)	\bar{w}_B	ρ_{DBI}	ρ_{DBS}	ρ_{DBL}	ρ_{DI}^T	P_{DS} (bar)	\bar{w}_C	ρ_{DCI}	P_{CS} (bar)
Profils															
L_0 blé ₁	25,0	1,42	1,585	1,515	1,519	< 0,7	23,0	1,47	1,531	1,53	1,54	4	23,0	1,4	6
$L_0/3$	22,8	1,42	1,545	1,54	1,567	< 0,7	23,17	1,515	1,515	1,59	1,564	6	22,8	1,482	6
L_1 blé ₁	28,5	1,34	1,405	1,51	1,515	<< 2	21,0	1,56	1,585	1,60	1,592	2	21,0	1,43	3
L_1 blé ₂	22,0	1,405	1,49	1,572	1,587	< 2	18,0	1,53	-	1,572	1,66	4	18,0	1,463	> 8
$L_1/1$	24,3	1,37	1,466	1,56	1,555	< 2	21,8	1,54	1,571	1,57	1,57	4	22,5	1,45	8
$L_1/2$	24,7	1,27	1,42	1,57	1,548	< 2	22,5	1,501	1,57	1,57	1,58	4	22,5	1,42	8
$L_1/3$	21,0	1,31	1,46	1,582	1,587	< 2	22,0	1,53	1,58	1,58	1,59	4	22,0	1,46	8
$L_2/1$	27,0	1,4	1,475	1,57	1,47	<< 2	23,0	1,53	1,566	1,57	1,587	4	23,0	1,415	8
$L_2/3$	26,2	1,08	1,46	1,62	1,46	< 2	21,0	1,59	-	1,62	1,62	4	23,0	1,47	> 8
$L_2/4$ (5-30)	-	-	-	-	-	-	20,0	1,63	1,63	1,659	1,64	6	22,0	1,51	6

TABLEAU N° 4 : Valeurs caractéristiques.

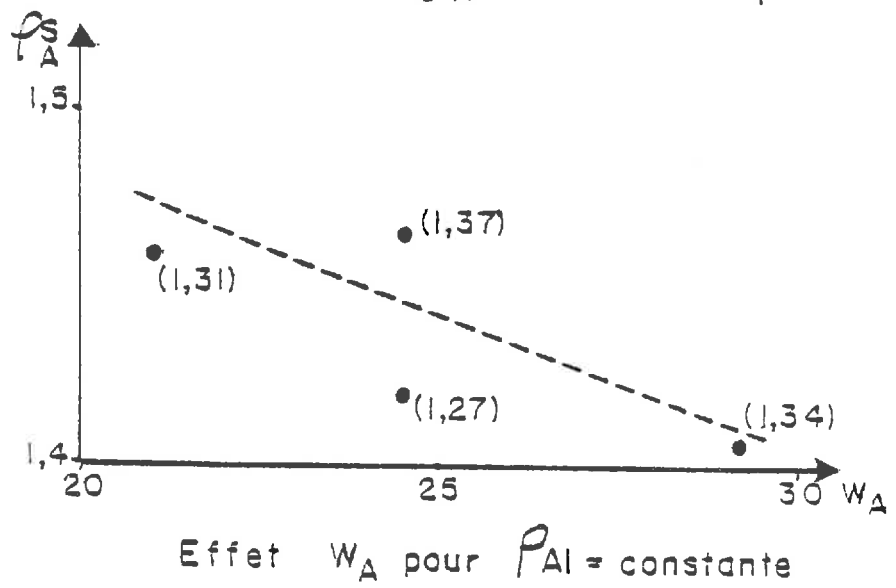
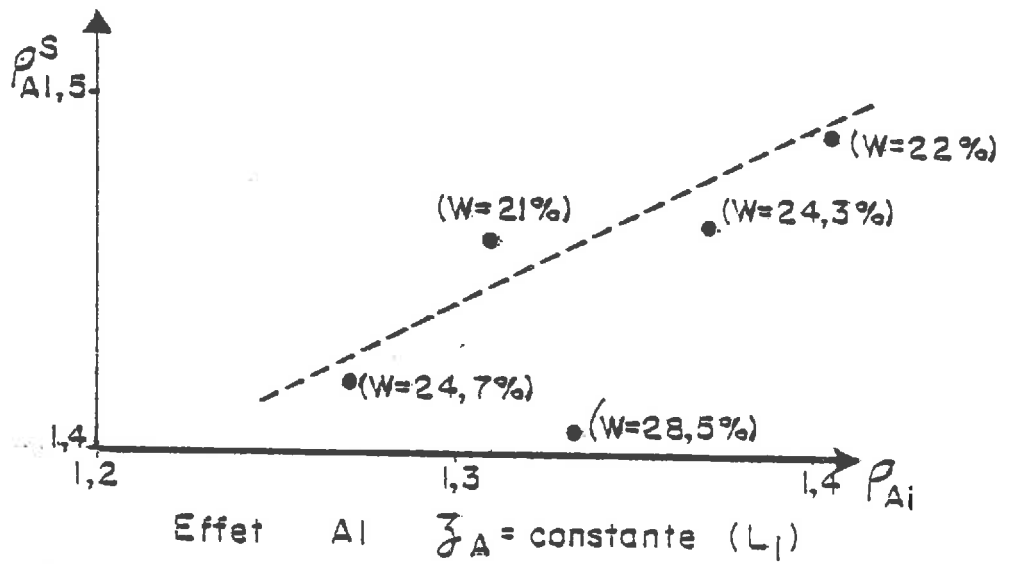
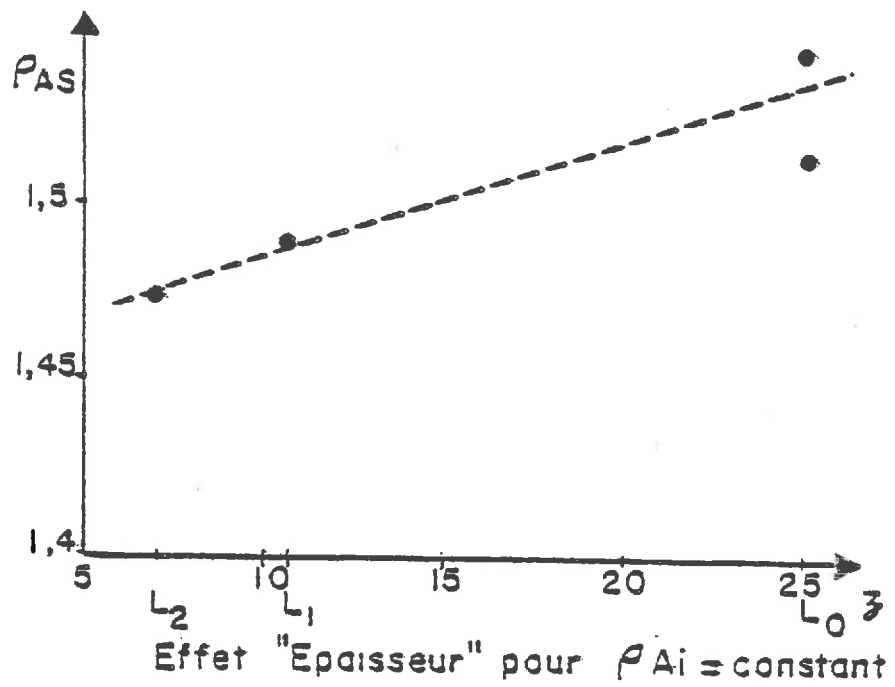


Figure.14: Facteurs de Variation de la Masse Volumique de A

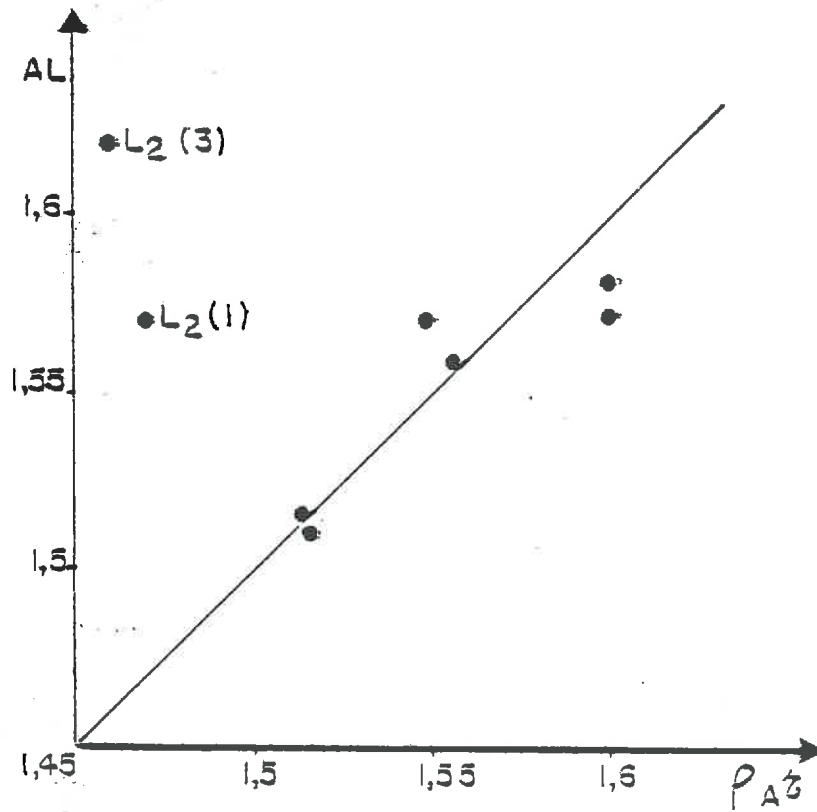


Figure.15 : Masse Volumique . Limite de A

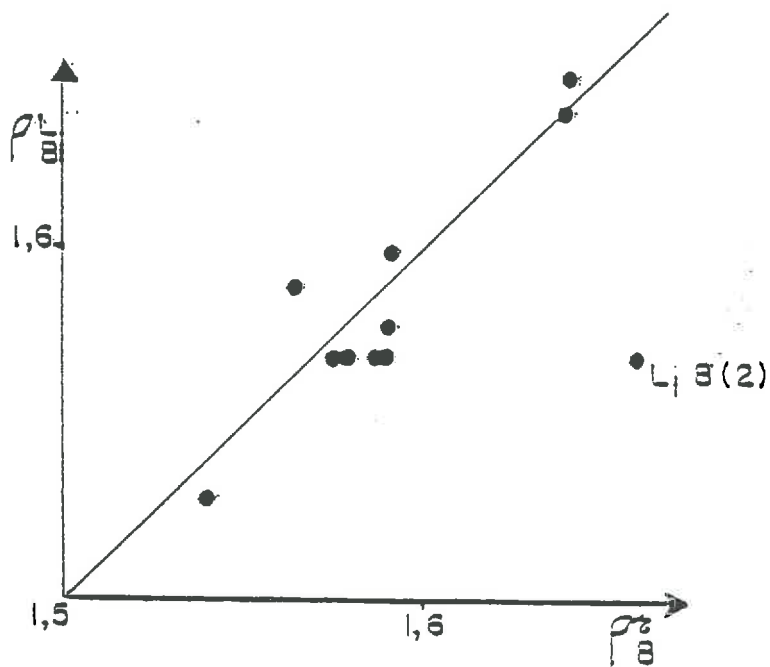
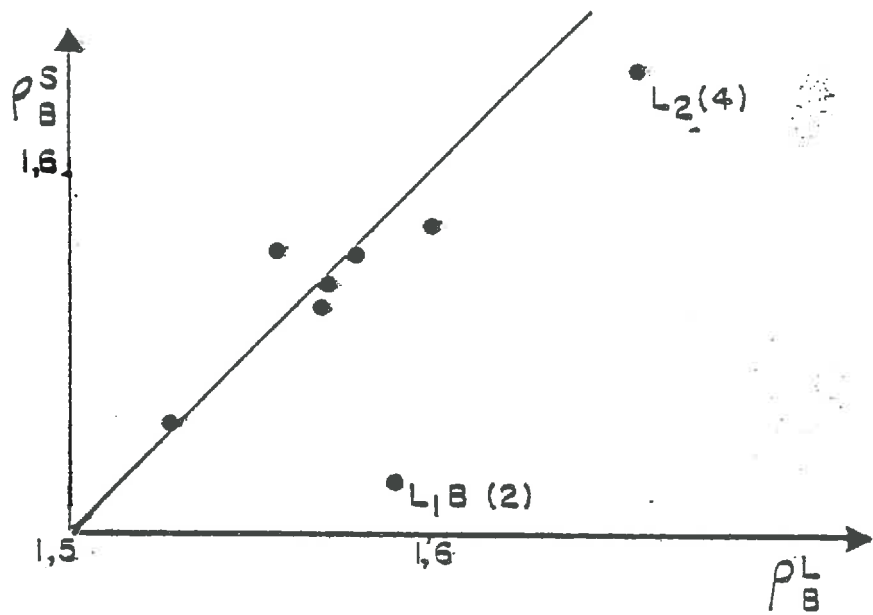


Figure.16 : Masse Volumique Seuil et Limite de B

3-3.3. Application aux différentes situations (tableau n° 4).

Couche A.

La masse volumique seuil de A (ρ_{dAS}) varie essentiellement en fonction des paramètres suivants :

- l'épaisseur : z_A
- la masse volumique initiale ρ_{dAi}
- la teneur en eau initiale W_{Ai}

Pour étudier l'influence de chacun de ces paramètres, nous nous sommes placés à chaque fois dans des cas où deux de ces paramètres étaient sensiblement constants.

Il semble que la valeur de masse volumique seuil est d'autant plus élevée que la couche A est initialement plus épaisse et plus dense (figure 14). De plus, des teneurs en eau élevée déterminent une valeur de masse volumique seuil plus faible (figure 14).

Les valeurs limites de masse volumique (ρ_{dAL}) (figure 15) obtenues en A après compactage (8 bar) semblent correspondre à la masse volumique texturale évaluée à partir des courbes de retrait (Annexe II).

Couche B.

Sauf dans le cas de L_1 blé₂ pour lequel la teneur en eau de la couche B est relativement faible ($\bar{W}_B = 18\%$), les gammes de variations de \bar{W}_B et ρ_{dBi} sont trop réduites pour tenter de mettre en évidence leur influence sur ρ_{dBS} , ρ_{dBL} et P_{BS} . On arrive au cas particulier où les masses volumiques seuils et limites sont confondues. Elles correspondent de plus dans les conditions de l'essai à la masse volumique texturale (figure 16).

Ainsi, dans les couches A et B, on semble tendre au cours du compactage vers l'obtention d'une structure continue (à 8 bar).

- la pression seuil P_{BS} à partir de laquelle la couche B commence à se tasser semble fonction des paramètres suivants :

- épaisseur de la couche A,
- différence entre la masse volumique seuil et la masse volumique initiale $\Delta \rho_d = \rho_{dAS} - \rho_{dAi}$
- de l'humidité initiale de la couche A,
- et enfin de la compressibilité de B.

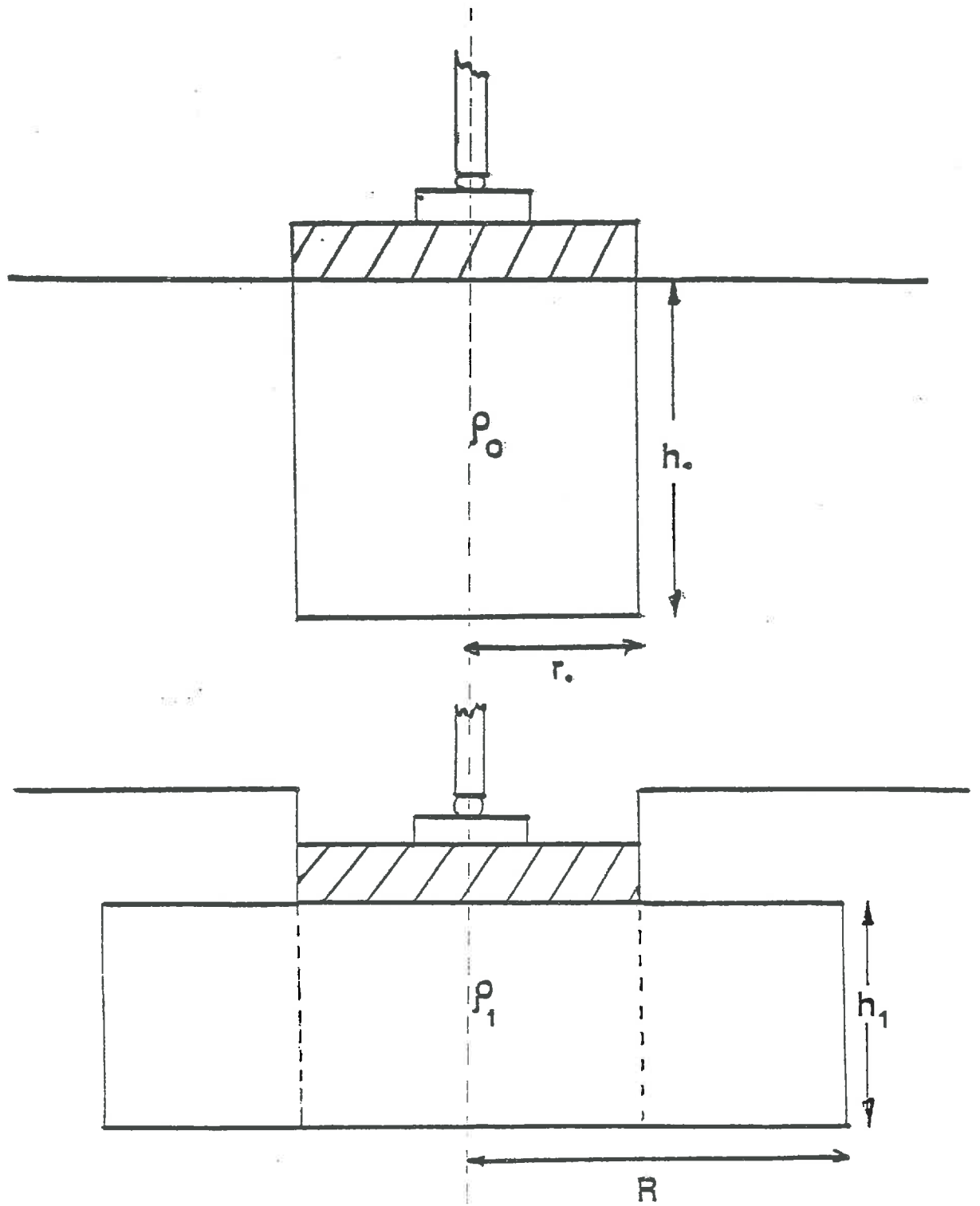


fig: 17

Nous n'avons pas pu mettre en évidence de relations précises entre P_B et ces différents paramètres, dans la mesure où l'on ne dispose pas d'une assez grande variabilité de chacun de ces paramètres à l'intérieur de chacune des situations.

Couche C.

L'état initial ($\rho_{d_{ci}}, W_{ci}$) de la couche C présente une faible variabilité d'une situation à l'autre.

La similitude des pressions seuils (P_{C_s}) enregistrées ne permet pas, encore une fois, de dégager leurs facteurs de variations.

Le fait que les L_0 ($P_{C_s} = 6$ b) se distinguent des L_1 ($P_{C_s} = 8$ b) suggèrent l'effet de l'épaisseur de la couche A et/ou de l'épaisseur de la couche B.

3-4. EVALUATION DU FLUAGE.

L'observation détaillée et systématique des profils culturaux nous a conduit à essayer de définir la zone tassée d'une façon plus précise. En effet, dans certains cas, nous avons pu observer des extensions des zones tassées au-delà de la zone définie à l'aplomb de la plaque, dans d'autres cas nous étions dans l'impossibilité de conclure quant à l'ampleur du phénomène. Les variations de masse volumique à l'aplomb de la plaque ne suffisent pas à expliquer l'amplitude de déformation de surface obtenue après compactage.

On a donc cherché à déterminer l'extension horizontale de la zone tassée.

Hypothèses.

- (1) le bulbe est assimilé à un cylindre centré sur l'axe de la plaque.
- (2) la masse volumique du matériau est considérée comme homogène à l'intérieur du cylindre.
- (3) la partie située sous la plaque est comprimée de h_0 à h_1 .
- (4) la partie extérieure à la plaque subit une compression radiale.

Écriture de l'équation de conservation de la masse.

On écrit que la masse de sol qui flue à l'extérieur du cylindre, situé au droit de la plaque et de rayon r , se retrouve après tassement dans un cylindre de rayon $R > r$, dont la densité est passée de ρ_0 , avant tassement, à ρ_1 (figure 17).

Calcul.

1. Perte de masse au droit de la plaque :

avant tassement la masse de sol est :

$$m_0 = \pi r^2 h_0 \rho_0$$

après tassement :

$$m_1 = \pi r^2 h_1 \rho_1$$

$$\text{d'où : } \Delta m = \pi r^2 (h_0 \rho_0 - h_1 \rho_1)$$

2. Gain de masse à la périphérie de la plaque :

avant tassement :

$$M_0 = \pi R^2 h_1 \rho_0 - r^2 h_1 \rho_0$$

après tassement :

$$M_1 = \pi R^2 h_1 \rho_1 - r^2 h_1 \rho_1$$

$$\text{d'où : } \Delta M = \pi R^2 (h_1 \rho_1 - h_1 \rho_0) + r^2 (h_1 \rho_0 - h_1 \rho_1)$$

3. Equation de conservation de la masse.

$$\Delta m = \Delta M$$

d'où :

$$R^2 = r^2 \frac{\rho_0 (h_0 - h_1)}{h_1 (\rho_1 - \rho_0)}$$

Le calcul est aisément généralisable aux applications successives des pressions croissantes en utilisant les valeurs correspondantes de h et de ρ_d .

Calcul de la masse volumique de la zone tassée : la distance de scrutation du gammadensimètre étant fixe ($x = 30$ cm), la masse volumique mesurée est différente de la masse volumique atteinte au droit de la plaque dont le diamètre est $2r = 15$ cm.

Nous avons évalué une borne supérieure de la valeur de masse volumique sous plaque en affectant toute l'augmentation de masse volumique ρ_d mesurée entre deux applications de la pression, à la zone définie à l'aplomb de la plaque

fig:18

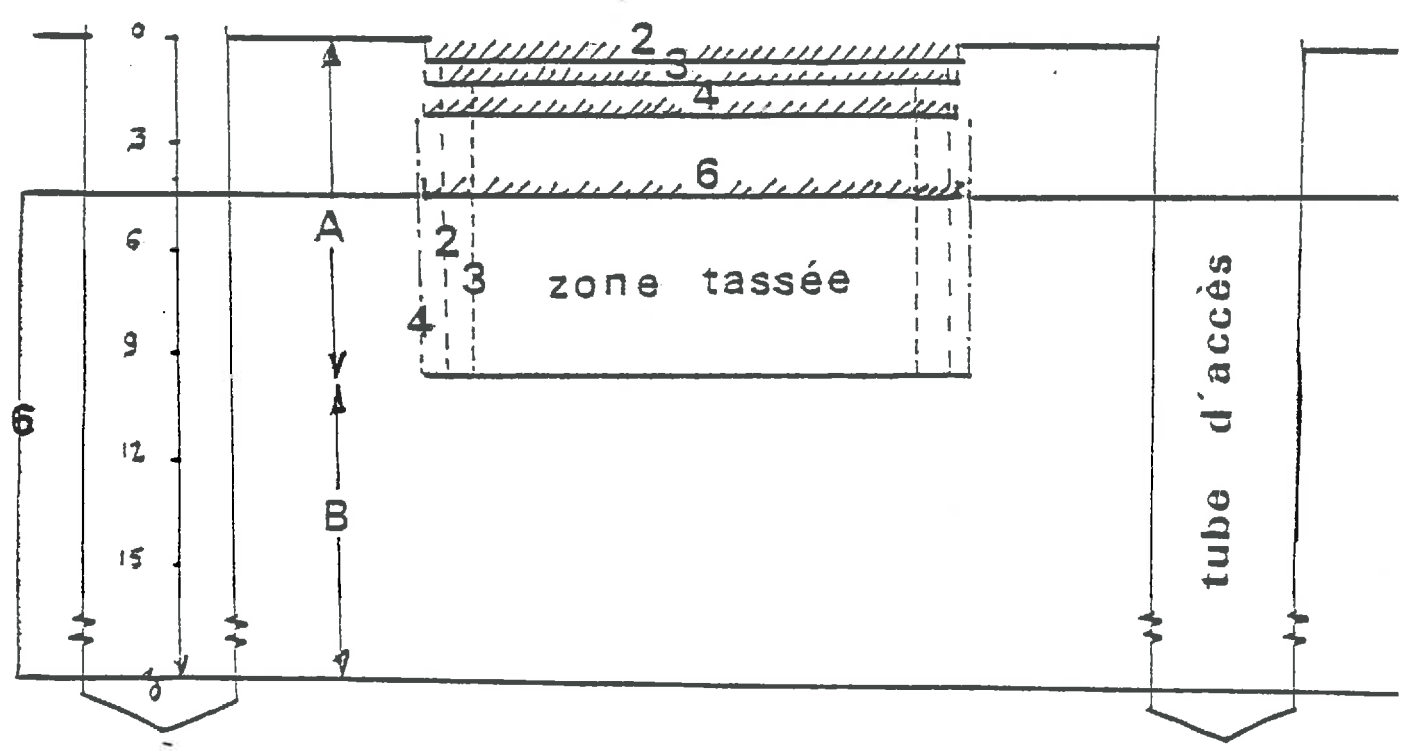
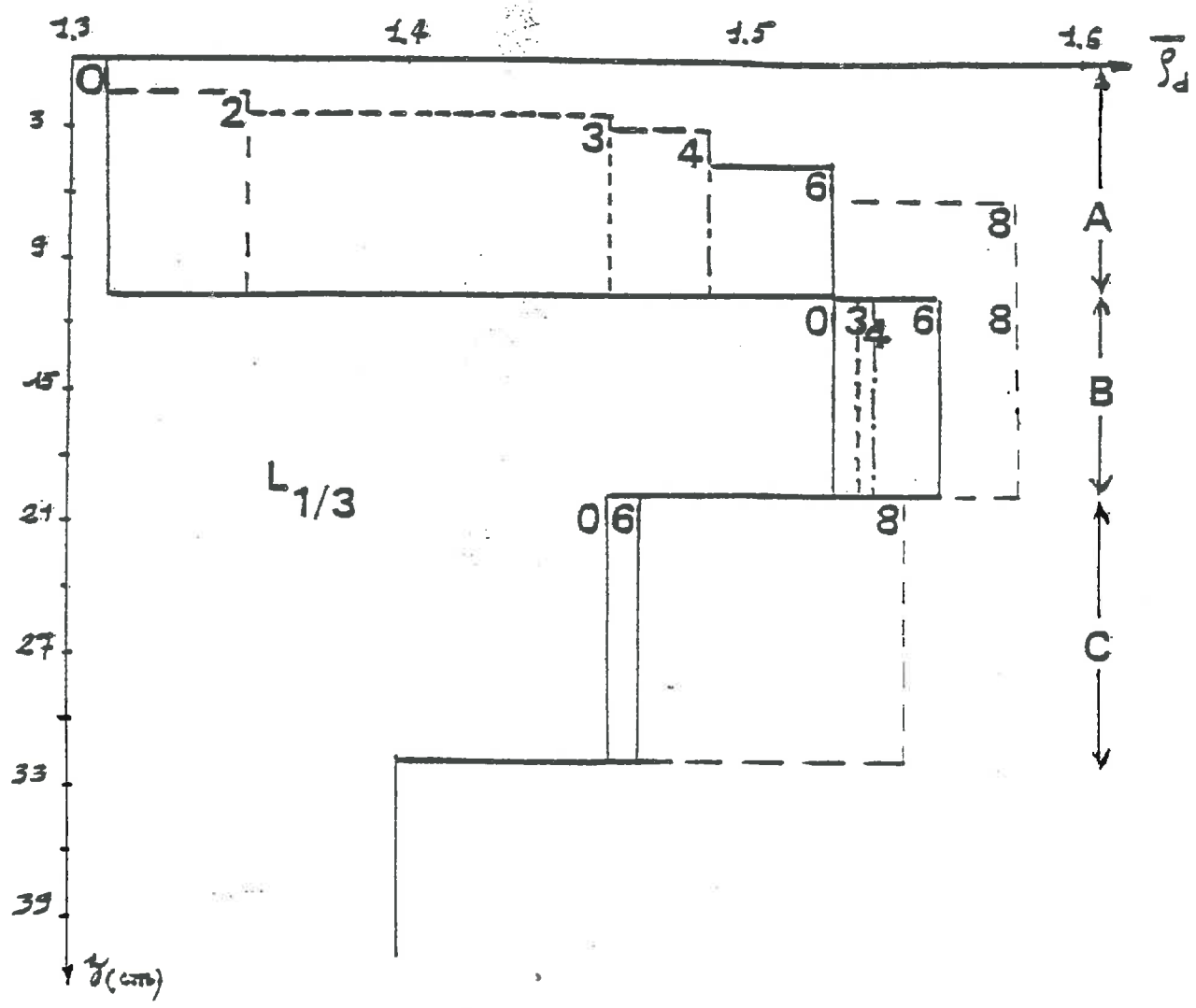
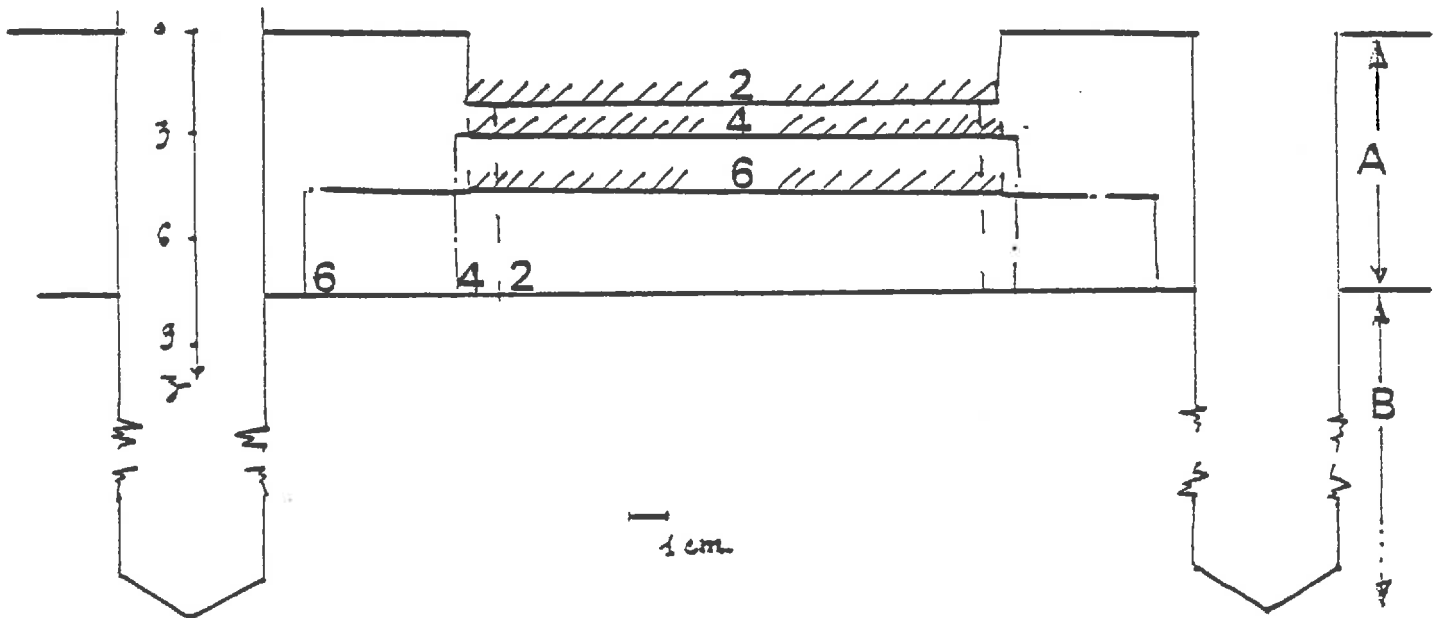
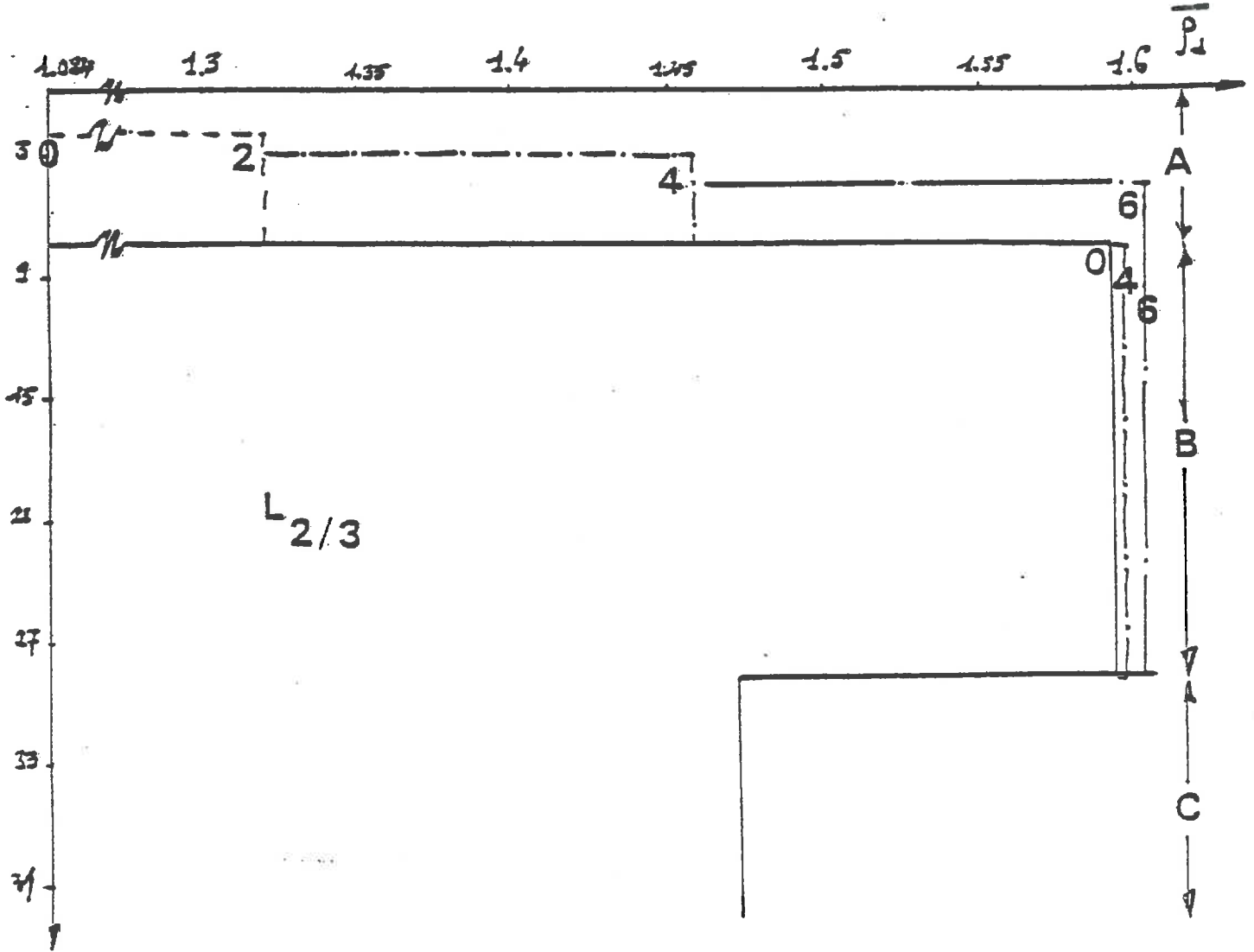
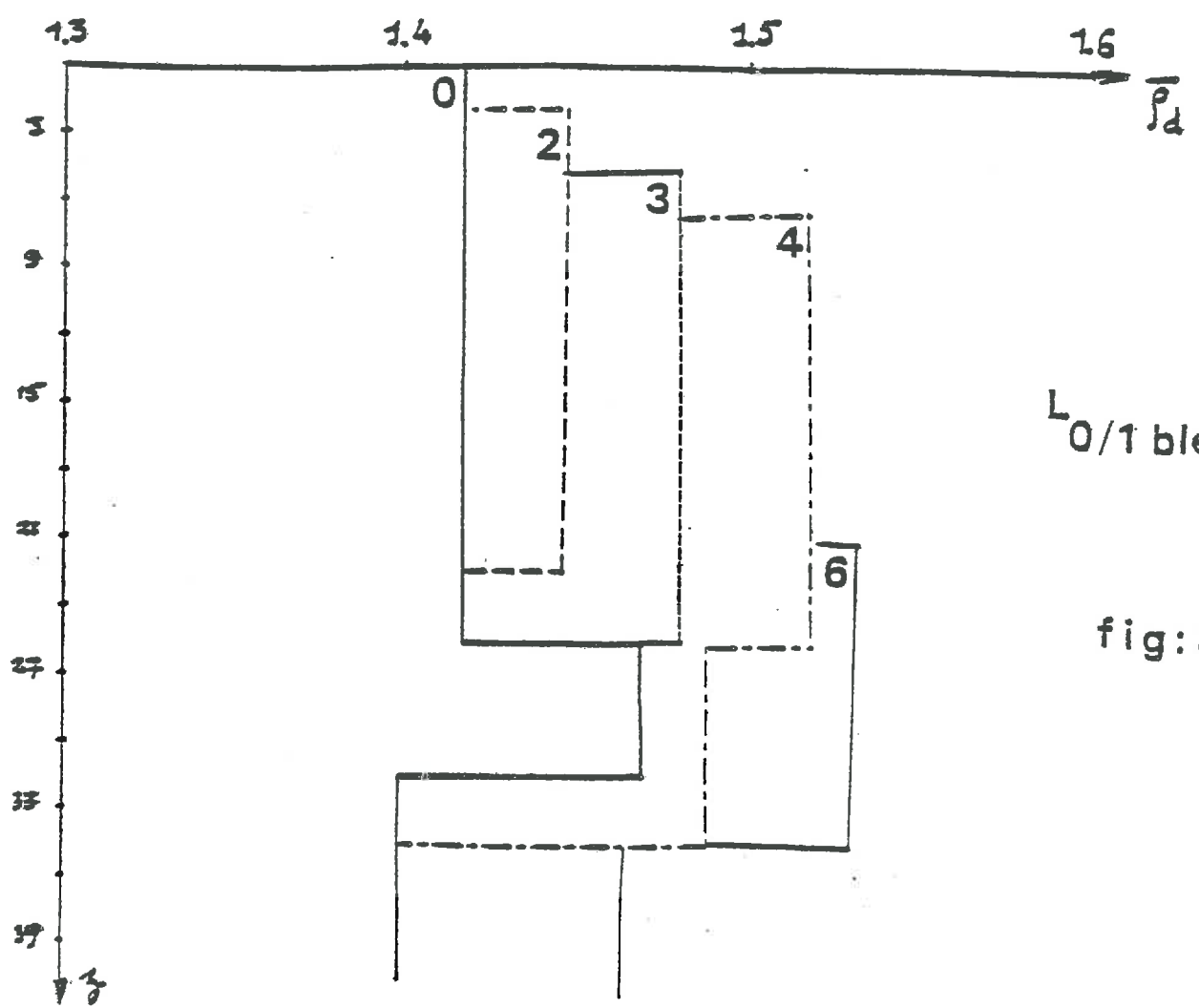


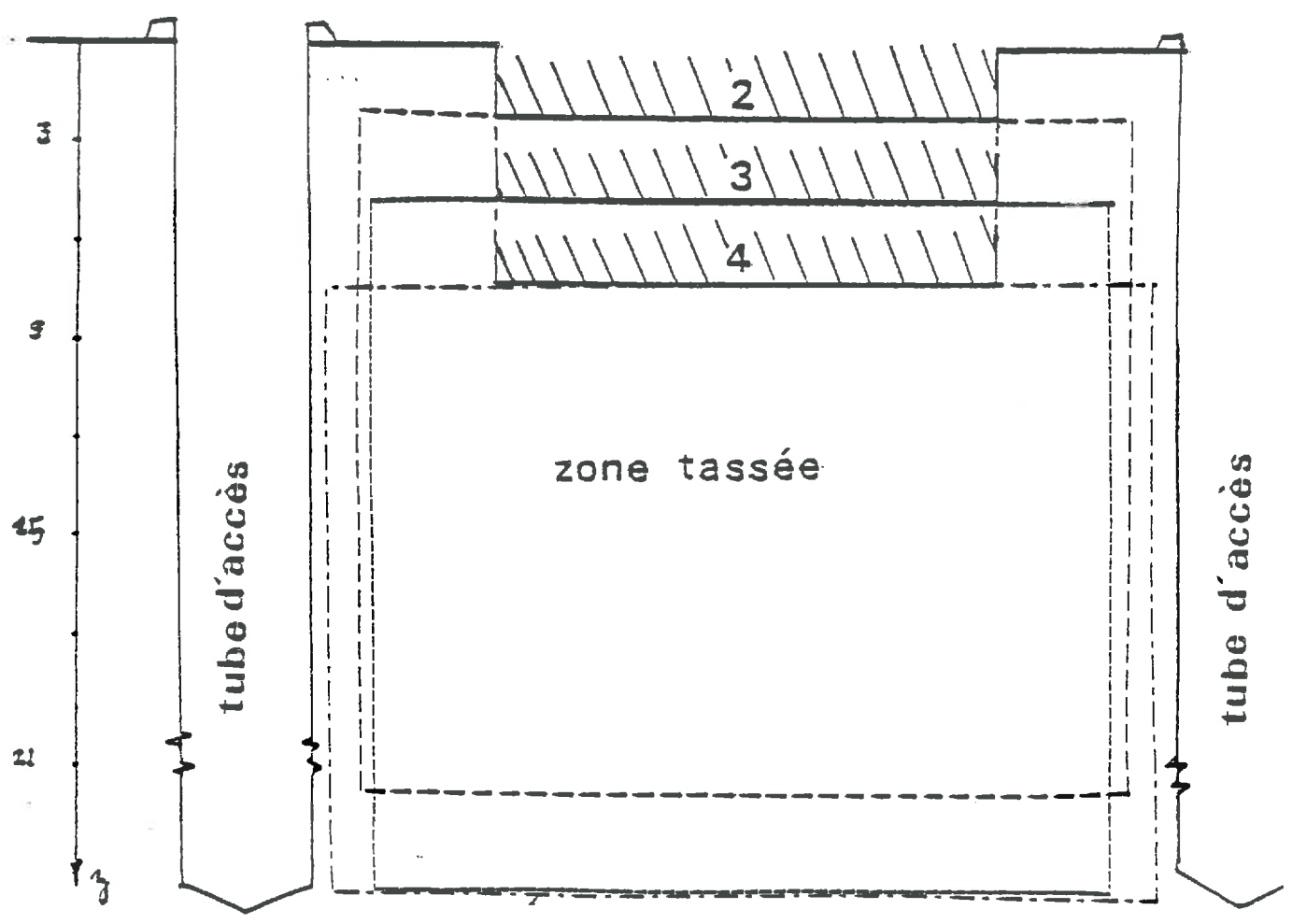
fig:19





$L_{0/1}$ blé

fig: 20



$$\rho_1 x = 2r \rho'_1 + (x - 2r) \rho_0$$

ρ_0 : masse volumique mesurée dans l'entrepal après application de la pression P_n

ρ'_1 : masse volumique mesurée dans l'entrepal après l'application de la pression P_{n+1}

x : entrepal (30 cm)

r : rayon de la plaque

ρ'_1 : masse volumique sous plaque.

$$\rho_1 x = 2r \rho'_1 + (x - 2r) \rho_0$$

$$\rho'_1 = \frac{\rho_1 x - (x - 2r) \rho_0}{2r}$$

$$\rho'_1 = \frac{x}{2r} (\rho_1 - \rho_0) + \rho_0$$

Il est clair que cette hypothèse de calcul ρ'_1 est contradictoire avec le calcul du rayon de la zone tassée ($R > r$). De ce fait, et à cause du caractère très schématique des hypothèses précédentes concernant la géométrie du bulbe et son homogénéité, les résultats ainsi obtenus ne peuvent au mieux être considérés que comme une indication d'une tendance.

Résultats sur quelques exemples.

$L_{1/3}$ (figure 18).

Jusqu'à 4 bar, il y a tassement avec peu ou pas de fluage de la couche A, la couche B constituant un plancher incompressible. A partir de 4 bar, le tassement des couches A et B ne compense pas la déformation : le fluage devient très important.

$L_{2/3}$ (figure 19).

Le comportement au compactage de ce profil semble comparable au cas précédent ($L_{1/3}$) malgré les épaisseurs relatives différentes de chacune des couches A, B, C.

La couche A se tasse avec peu ou pas de fluage jusqu'à 6 bar. A 6 bar, la couche B se tasse légèrement, la couche A flue.

L_0 blé₁ (figure 20).

Dans ce cas, le fluage intervient dès l'application des premières pressions (2,3 bar).

L-1/3

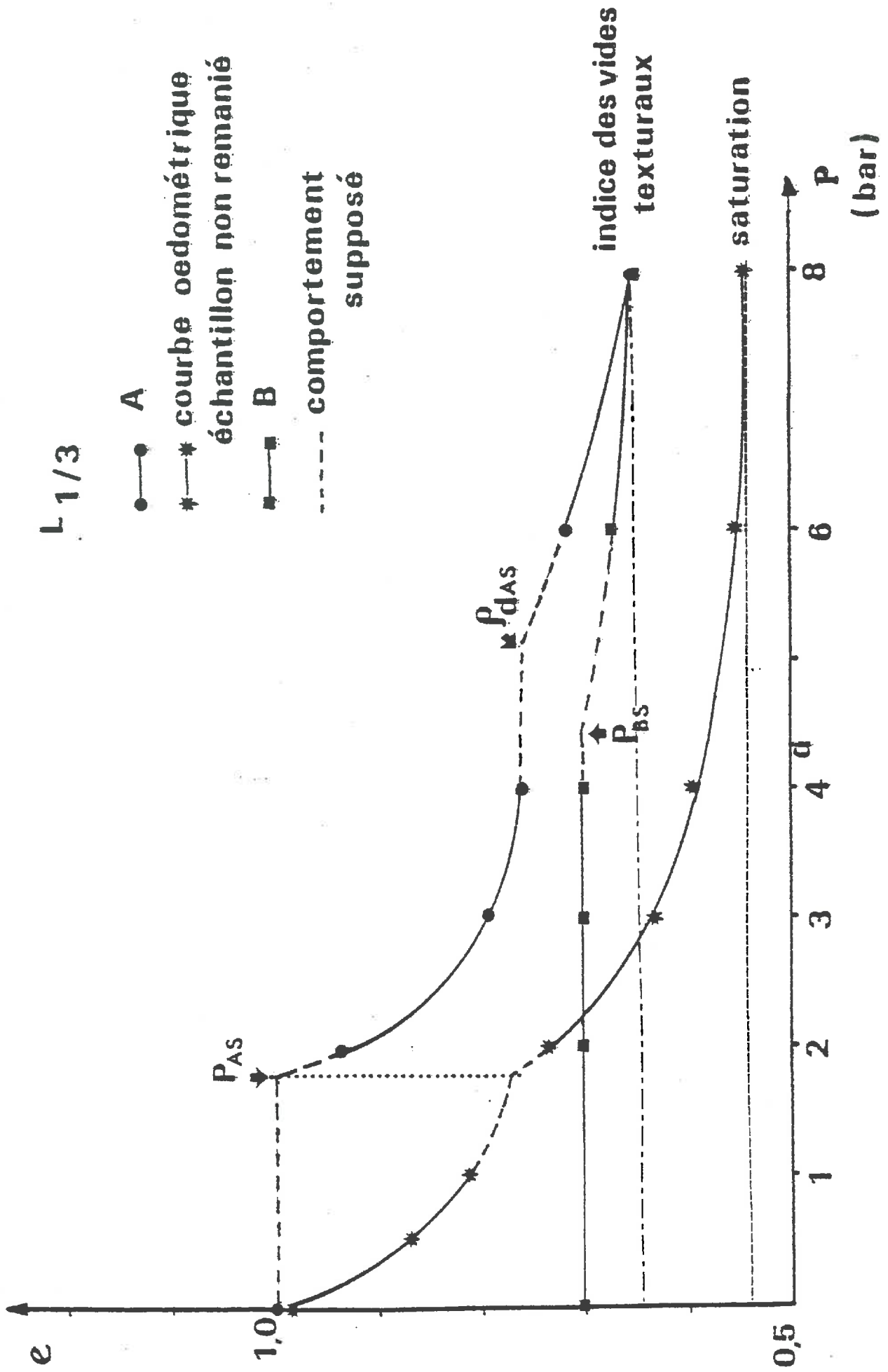


fig:21

3-5. COMPARAISON DES COURBES DE COMPRESSIBILITE AU CHAMP ET EN LABORATOIRE.

Nous avons tenté de retrouver les pressions seuils (ou pressions de précompression) des couches A, B, C en étudiant le comportement au compactage d'échantillons non remaniés prélevés in situ.

Les travaux récents de J. GUERIF (1982) et de A.J. KOOLEN (1982) notamment, ont montré sur des échantillons remaniés dans des conditions standard, qu'une telle approche semblait possible. Un échantillon ayant subi une pression P (2 bar dans le cas de A.J. KOOLEN), sa déformation sous charge ne reprend que lors de l'application d'une pression P supérieure : $P' = P + \Delta P$.

La relative facilité avec laquelle on décrit ce phénomène sur des échantillons remaniés contraste avec les résultats que nous avons obtenus. Dans les cas où nous avons tenté cette approche, la discontinuité lue sur la courbe de compression, supposée indiquer la pression seuil est généralement faiblement marquée. Et cela même lorsque l'on a recours à l'échelle semi-logarithmique, la détermination des ruptures de pente reste arbitraire. En $L_{1/3}$ (figure 21), on semble pouvoir mettre en évidence la pression de précompression de la couche A ; en L_0 blé₁ (figure 22) cela semble difficile, sinon impossible, en tout cas spéculatif.

On peut formuler plusieurs hypothèses relatives à cette difficulté de définir précisément les pressions seuils au laboratoire : cette méthode ne peut être menée que lors de l'étude d'un monocouche. Dès que l'on passe à un multicouche, les pressions seuils sont définies par les compressibilités relatives de chacune des couches : on assiste à un phénomène interactif. Or, en l'état actuel des connaissances et des techniques de mesures opérationnelles au laboratoire, on n'est pas capable de définir le comportement d'un multicouche.

La définition des pressions seuils en A est difficile, même lorsque la compressibilité de B reste quasiment nulle et que le comportement au compactage de A ne dépend que de ses caractéristiques propres (état initial : ρ_{dAi} , W_{Ai} : - les états initiaux des échantillons non remaniés prélevés in situ sont comparables sinon identiques aux états initiaux des couches A. On observe toutefois des différences dues :

- à la qualité du prélèvement,
- à l'échantillonnage, la taille des échantillons ainsi prélevés peut être dans certains cas peu compatible avec la maille structurale de la couche concernée.
- les contraintes appliquées dans les oedomètres et au champ ne sont pas de même nature : les échantillons sont frettés dans le cas des oedomètres. De plus, il y a un problème d'équivalence entre les niveaux de pression exercés

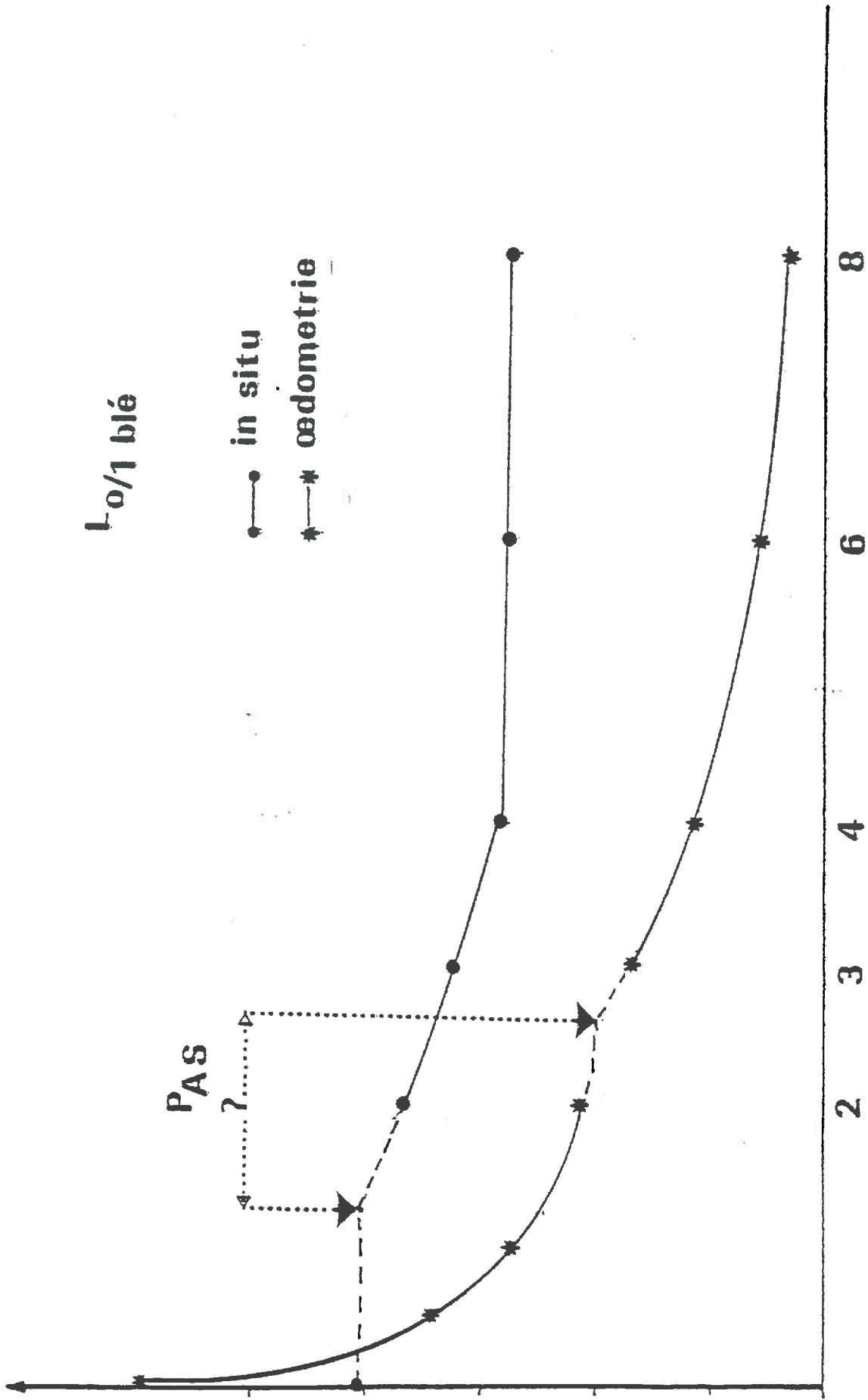


fig:22

au laboratoire et au champ : les élancements (rapport hauteur de la couche soumise au compactage sur le diamètre de la plaque d'application des pressions) sont différents :

$$\text{dans les oedomètres } \frac{h}{\phi} = \frac{2,4}{7,1} = 0,34$$

au champ couche A : h = 10 cm

$$\frac{h}{\phi} = \frac{10}{15} = 0,667$$

couche A : h = 25 cm (L_0)

$$\frac{h}{\phi} = \frac{25}{15} = 1,667$$

Pour conserver au champ le même élancement qu'au laboratoire, il faudrait utiliser des plaques d'un diamètre égal à :

$$A : h = 10 \text{ cm} \quad \frac{10}{\phi} = 0,34 \quad \phi = \frac{10}{0,34} = \underline{29,4 \text{ cm}}$$

$$A : h = 25 \text{ cm} \quad \frac{25}{\phi} = 0,34 \quad \phi = \frac{25}{0,34} = \underline{73,5 \text{ cm}}$$

De tels diamètres semblent peu compatibles avec les contraintes pratiques des expériences de ce type. Il faudrait en effet disposer d'un solide point d'appui compte-tenu de l'aire d'application des pressions et on pourrait de toute façon s'interroger sur l'extension possible des résultats obtenus de cette manière, aux problèmes posés par le passage des engins agricoles.

- la gamme de pressions retenue au champ n'est pas suffisamment étendue pour cerner le comportement au compactage de cette couche dans les faibles pressions.

En ce qui concerne l'éventuelle caractérisation du fonctionnement d'un tricouche au laboratoire, elle pourra être conduite :

- d'une part en affinant les techniques de mesure au laboratoire et au champ,

- d'autre part, en ayant pour souci d'explicitier les conséquences du choix d'un temps d'application des pressions au champ. En effet, il est probable que les cinétiques de compression des différentes couches soient comme leur compressibilité, interactives et rendent, par là même, complexe l'effet du temps d'application de la pression.

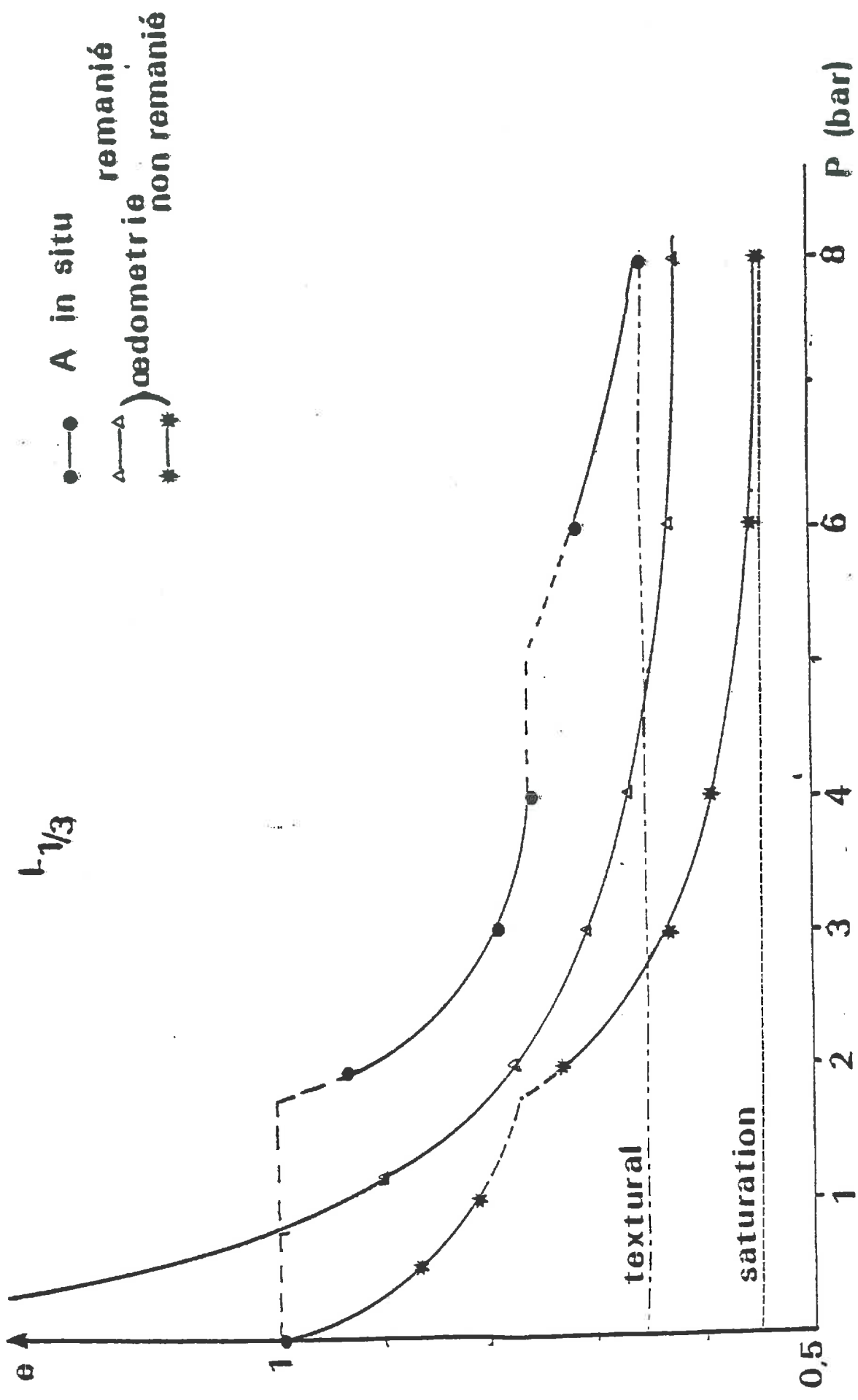


fig: 23

Pour une même intensité de pression nominale, les tassements atteints sont nettement plus marqués dans les tests de laboratoire qu'in situ. Les problèmes d'élançement et de frettage évoqués au paragraphe précédent expliquent en grande partie ces différences.

La comparaison peut être effectuée par exemple dans le cas de la couche A de $L_{1/3}$ présentée figure 23. On observe lors du compactage dans l'oedomètre un tassement textural, et plus particulièrement dans le cas du matériau non remanié, on atteint la droite de saturation. Lors du test in situ par contre, l'indice des vides tend vers l'indice des vides textural. Cette limite, in situ, se retrouve dans toutes les situations comme on l'a vu au tableau IV.

D'une certaine façon, ces observations montrent bien qu'il ne faut pas accorder à la porosité texturale une valeur de concept inamovible, mais que les phénomènes de fluage ainsi que les gammes de pressions couramment rencontrées in situ, concourent probablement à la stabilité dans le temps de la porosité de petits agglomérats et confirment la valeur opérationnelle d'un tel moyen d'analyse du système de porosité.

Le compactage des échantillons remaniés et non remaniés montre qu'il n'existe pas de courbe de compression unique au-delà de la contrainte de précompression, apparentée à la courbe vierge de consolidation.

L'histoire d'un échantillon non saturé ne peut donc se résumer à une contrainte de précompression accompagnée de son état initial (e, w).

On peut, par ailleurs, imaginer que la circulation de l'eau dans des circuits préférentiels au cours de la phase de réhumectation n'a pas amené le matériau à un état d'hydratation homogène et que pour une même teneur en eau moyenne, les échantillons remaniés et non remaniés n'étaient pas au même potentiel expliquant ainsi les différences de comportement.

IV Conclusion.

L'étude du comportement au compactage de profils complexes, différenciés par les techniques de travail du sol, a été simplifiée en les assimilant à des tricouches.

Cette démarche a permis de mettre en évidence les effets propres à chacune des techniques de travail du sol sur :

- les déformations de surface,
- l'interaction des compressibilités des couches dans les phénomènes de tassement.

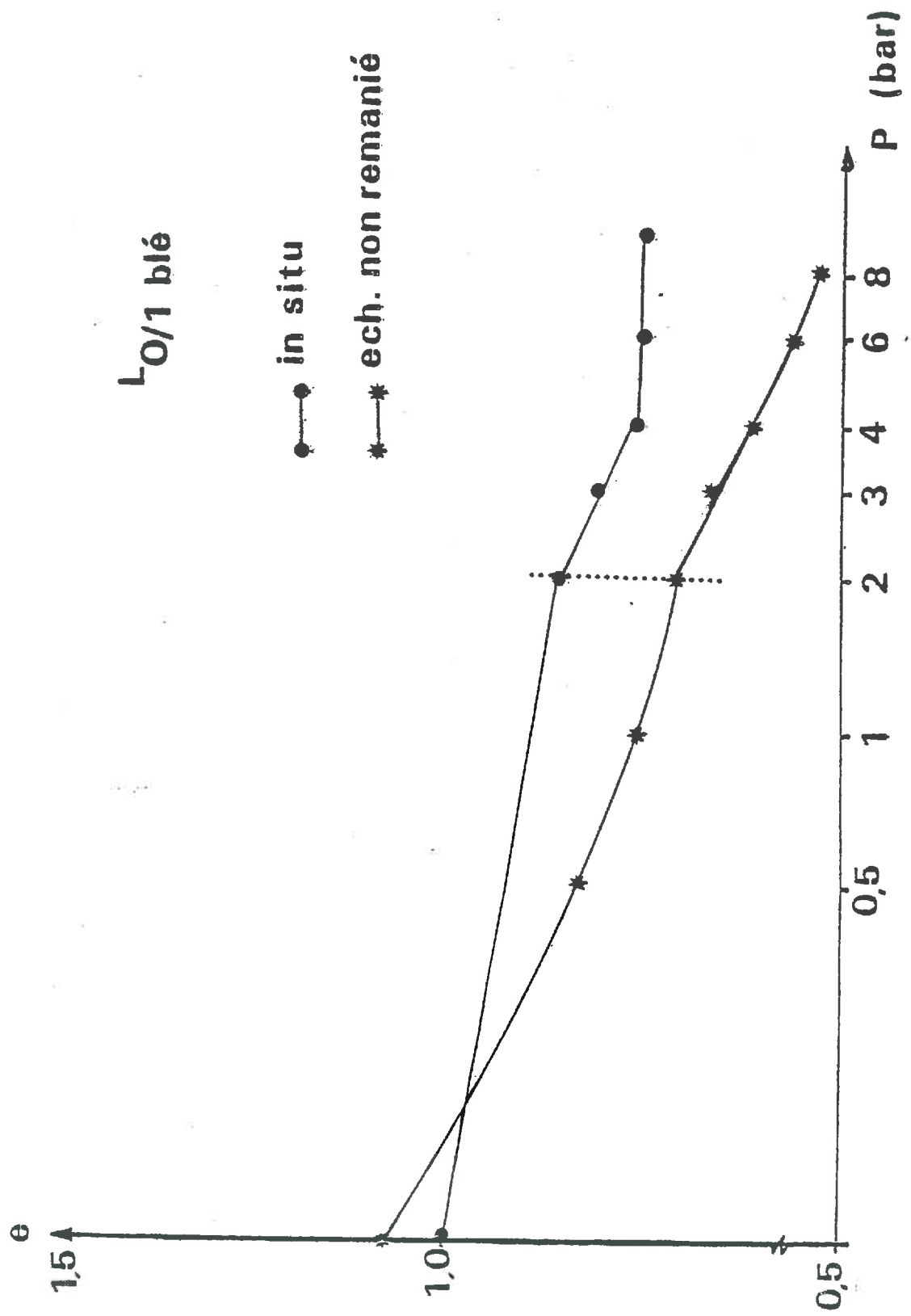


fig. 23 bis

Une telle méthode devrait permettre d'établir une typologie des comportements des profils couramment rencontrés.

L'analyse des phénomènes de fluage est restée assez limitée. L'utilisation de moyens de mesures complémentaires telle que la pénétrométrie (BILLOT, 1982) devrait permettre de mieux apprécier l'extension des zones tassées. Par ailleurs, un tel outil permettrait d'effectuer une prospection efficace pour une implantation raisonnée des sites de mesure.

La comparaison ébauchée entre les tests de laboratoire et in situ s'avère plus complexe que prévue. L'obtention de moyens, mêmes grossiers, de prévisions des comportements in situ nécessite une analyse plus fine des comportements en tricouche :

- au laboratoire en élaborant un moyen d'analyse des compressibilités relatives déterminant les pressions seuils.

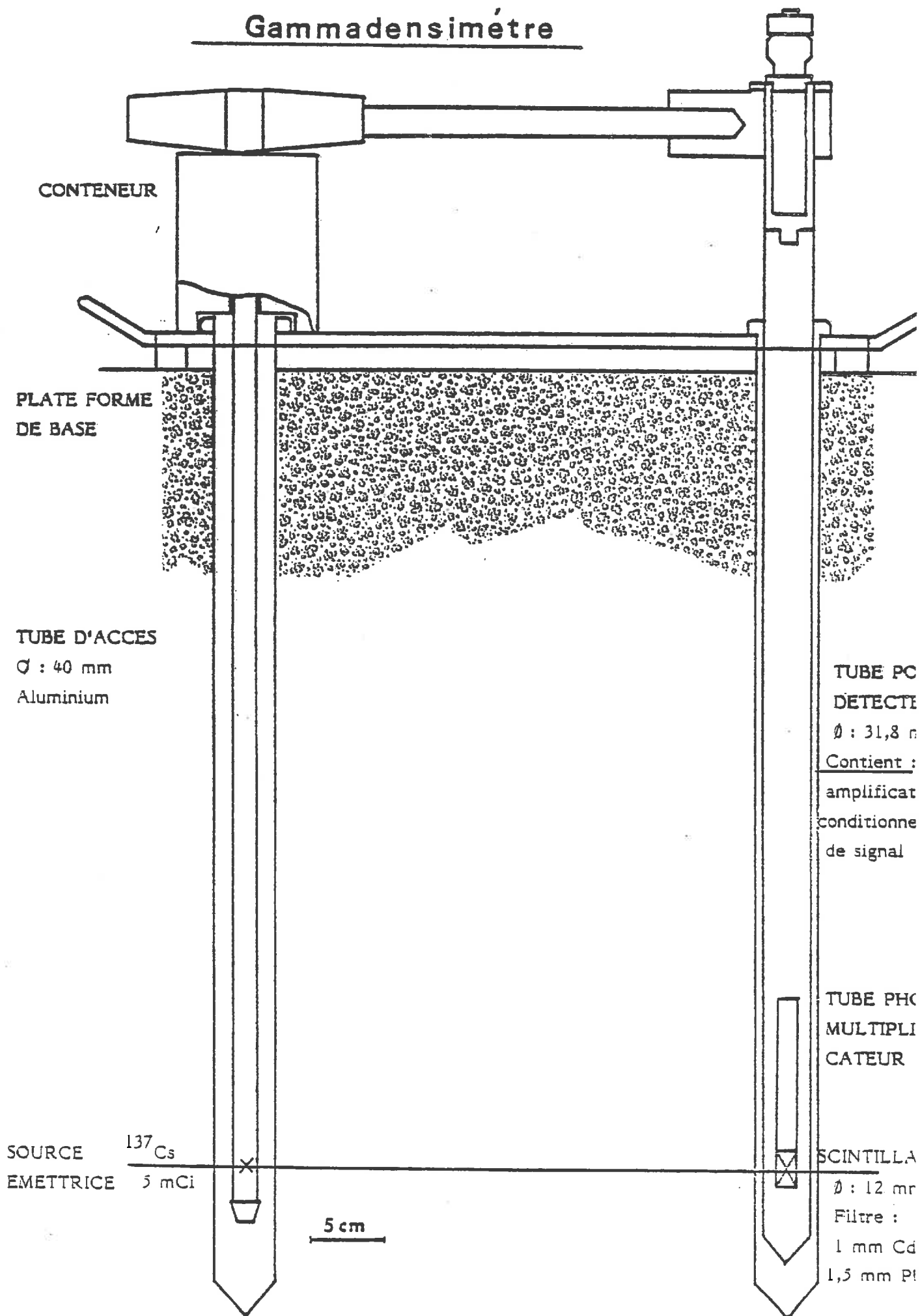
- en vraie grandeur, en modélisant des tricouches en bacs, de manière à mieux contrôler les différents paramètres, et s'affranchir des contraintes de terrain (hétérogénéité spatiale des variables mesurées : constitution, structure, teneur en eau, etc...)

- sur l'essai de Boigneville, ce travail pourrait être poursuivi en généralisant la méthode employée en L_2 , c'est-à-dire décaper une à une, les couches pour tenter d'individualiser leur comportement propre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERTUZZI P., 1980 - Déformation d'un sol argileux par le roulage d'un tracteur : études expérimentales et in situ. Mémoire de fin d'étude ENITA Dijon-INRA Avignon.
- BILLOT J.F., 1982 - Use of penetrometers for showing soil structure heterogeneity application to study of tillage implement impact and compaction effects. Proceedings of the 9th conference of the international soil tillage research organisation, ISTRO, 1982, p. 177-182.
- BODDAERT D., 1976 - Etude du comportement mécanique d'un sol travaillé soumis au roulage des engins agricoles. Mémoire de fin d'étude ENITA Dijon - INRA Avignon.
- ERIKSSON J., HÅKANSSON I., DANFORS B., 1974 - The effect of soil compaction on soil structure and crop yields. Swedish institute of agricultural Engineering, Bulletin n° 354.
- 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), p. 469-480.
- GUERIF J., 1982 - Compactage d'un massif d'agrégats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. Agronomie, 2(3), p. 287-294.
- KOOLEN A.J., 1982 - Precompaction stress : determination on precompacted soil. Proceedings of the 9th conference of the international soil tillage research organisation, ISTRO, p. 225-230.
- MONNIER G., FIES J.C., STENGEL P., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux : application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. Agron., 24(5), p. 533-545.
- PINOCHET X., 1981 - Prévisions du retrait gonflement d'agrégats de sol. Relation avec le potentiel de l'eau. Mémoire de fin d'étude ENITA Dijon - INRA Avignon.
- SOANE B.D., 1982 - Compaction by agricultural vehicles. A review. Soil and tillage research :
 1- 1980-1981, p. 207-237.
 1- 1980-1981, p. 373-400.
 2- 1982, p. 3-36.
- 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), p. 27-51.

Gammadensimètre



ANNEXE 1

GAMMADENSIMETRE À TRANSMISSION

(Sonde INRA - LPC, 1980, figure)

Le gammadensimètre à transmission est destiné à mesurer la masse volumique humide de matériaux en place. L'axe de scrutation s'inscrit dans un plan horizontal défini entre la profondeur $z = 0$ et $z = -50$ cm, l'épaisseur de matériau scruté est de 30 cm.

Le principe de mesure est fondé sur le phénomène d'absorption du rayonnement gamma par la matière. La méthode consiste à dénombrer le nombre N de photons émis par la source radioactive ayant traversé le matériau sans interactions suivant la loi :

$$(1) \quad N = N_0 e^{-\mu' \rho_w x}$$

où N_0 représente le nombre initial de photons émis par la source,

μ' : le coefficient d'absorption massique pour l'énergie du rayonnement considéré (cm^2/g),

ρ_w : masse volumique humide du matériau (g/cm^3),

x : épaisseur de matière intéressée par la mesure.

La loi d'absorption (1) suppose que les photons détectés n'aient subi aucune interaction, c'est-à-dire qu'ils aient conservé leur énergie initiale. Pratiquement, cette condition est difficilement réalisable et le nombre N de photons détectés comporte un certain pourcentage de photons diffusés dans le matériau. Si le pourcentage de photons diffusés demeure faible, la loi expérimentale est conservée et s'écrit alors

$$N = N_0 e^{-K \rho_w x}$$

où K représente un coefficient expérimental caractérisant l'appareil.

Un étalonnage sur des matériaux connus permet, connaissant x (cm) de déterminer la masse volumique humide ρ_w pour un N donné.

La droite d'étalonnage du gammadensimètre a alors pour équation :

$$\frac{\mu}{\mu_0} \rho_w = a \log c + b \quad c : \text{nombre de coups/s}$$

où :

a et b sont deux coefficients spécifiques de l'appareil déterminés lors de l'étalonnage. Dans notre cas :

$$a = -0,605$$

$$b = 5,947$$

μ : coefficient d'absorption massique du sol humide (cm^2/g)

μ_0 : coefficient d'absorption massique du sol sec (cm^2/g)

x : épaisseur du matériau

ρ_w : masse volumique humide

μ_0 est considéré comme constant ($\mu_0 = 0,076 \text{ cm}^2/\text{g}$), μ est connu.

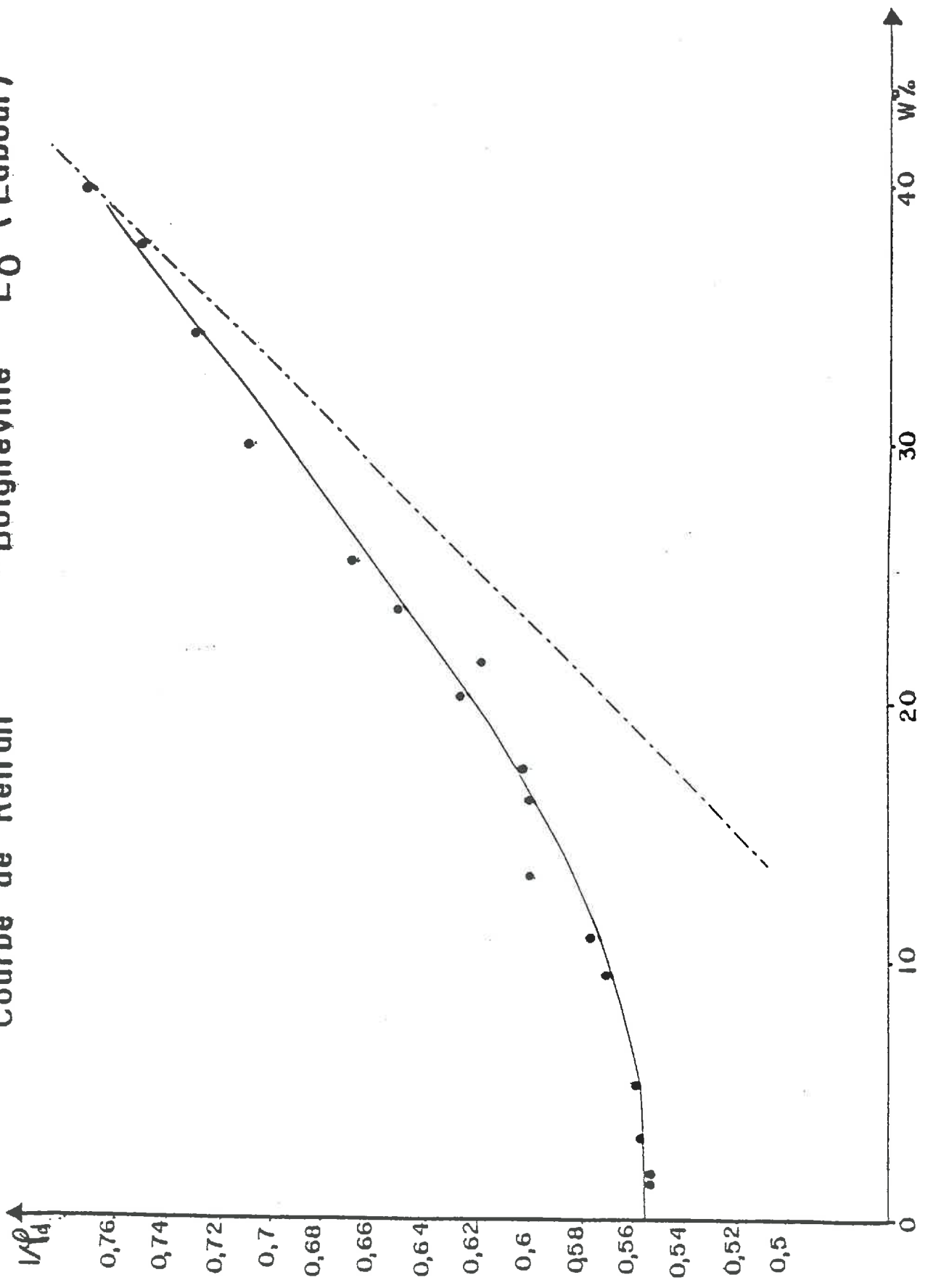
Les conditions d'absorption sont liées à la masse volumique et à l'humidité du matériau. Plus celui-ci sera poreux et sec, moins il absorbera les photons et plus c (nombre de coups/s) sera élevé.

La détermination de l'humidité w dans la zone de mesure nous permet de calculer la masse volumique sèche :

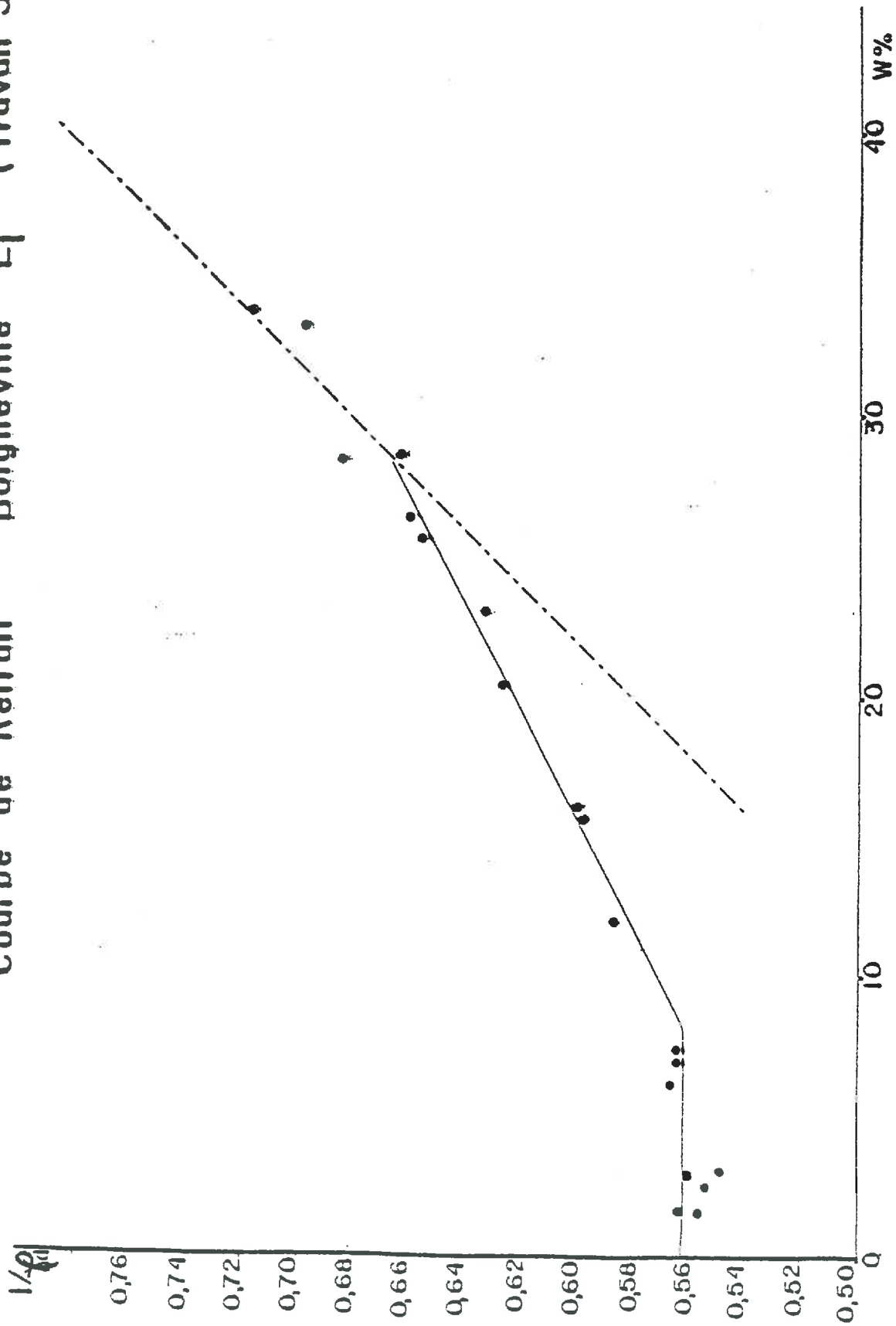
$$\rho_d = \rho_w \frac{1}{1+w}$$

Courbe de Retrait L-O (Labour)

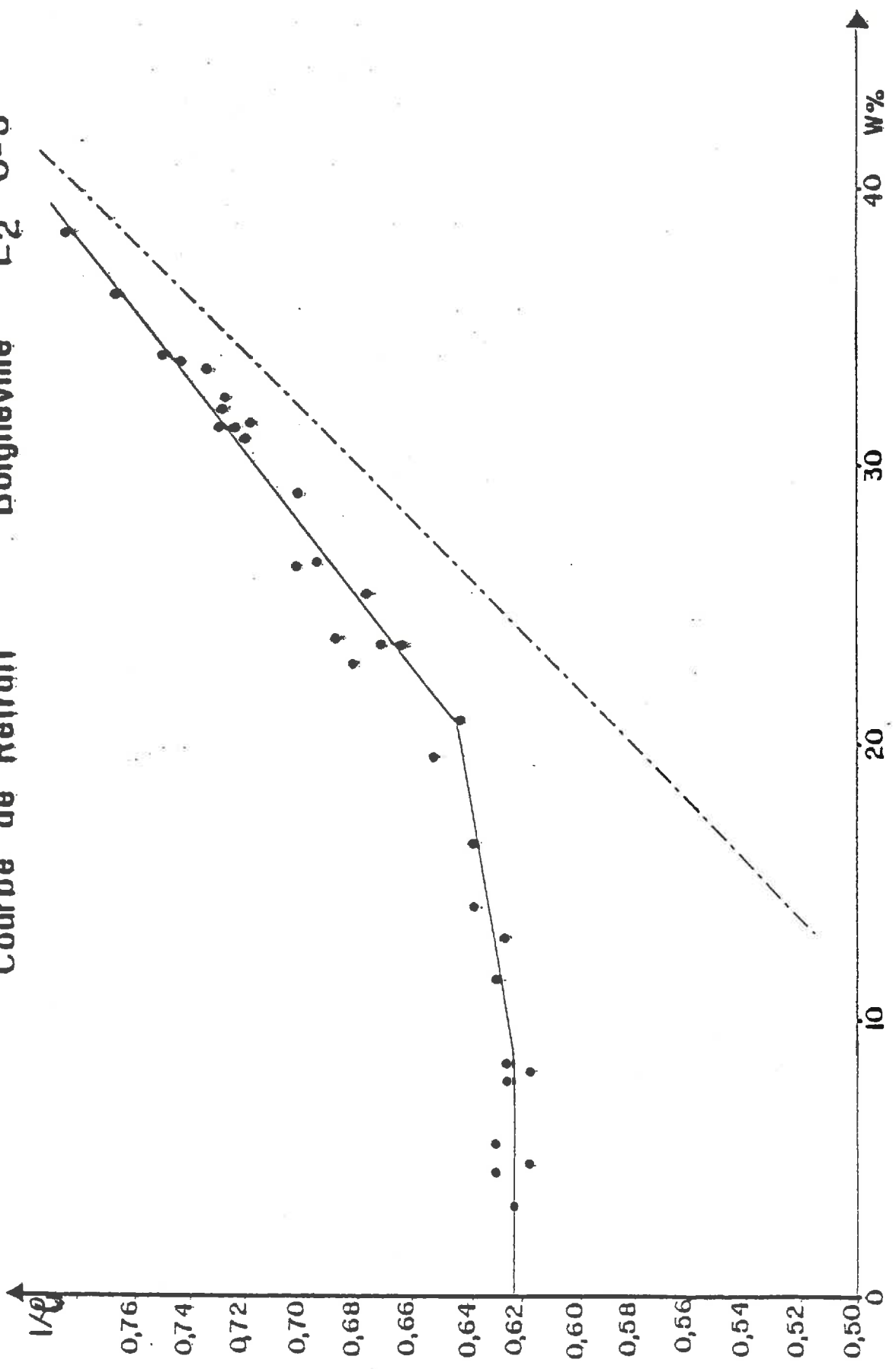
Boigneville



Courbe de Retrait Boigneville L₁ (Travail Superficiel)



Courbe de Retrait Boigneville L2 0-5



Courbe de Retrait Boigneville L2 5-30

