

CENTRE DE RECHERCHE AGRONOMIQUE
DU SUD-EST
STATION DE SCIENCE DU SOL

ECOLE NATIONALE D'INGENIERIE
TRAVAUX AGRICOLES
DIJON QUETIGNY

TH
M 1

GC28

SCIENCE DU SOL
BIBLIOTHEQUE
13 JUIN 1980
84140 MONTFAVET

ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE
D'UN SOL TRAVAILLÉ SOUMIS
AU ROULAGE DES ENGIN AGRICOLES

Mémoire de fin d'étude

DIDIER BODDAERT

Septembre 1976

AVANT-PROPOS

Le travail qui a fait l'objet de ce mémoire de fin d'étude a été réalisé à la Station de Science du Sol du Centre de Recherche Agronomique du Sud-Est dont je remercie le directeur Monsieur G. MONNIER pour l'accueil qu'il m'a réservé.

Il a été dirigé par Messieurs A. FAURE et P. STENGEL que je remercie vivement.

Ce séjour au contact d'une équipe de chercheurs et de techniciens m'a permis d'être confronté à un certain nombre de méthodes et d'observations et aux démarches de réflexion qu'elles impliquent.

Que Messieurs A. FAURE, J. HOROYAN, P. STENGEL et tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

S O M M A I R E

INTRODUCTION	p. 1
CHAPITRE I : Rappel de Mécanique des Sols.....	p. 3
Le Compactage au laboratoire	
I Les techniques de compactage au laboratoire	
1. Le compactage dynamique.	
2. Le compactage statique.	
II Les courbes de compactage.	
CHAPITRE II : Le compactage au champ.....	p. 5
I Dispositif expérimental.....	p. 5
1. L'énergie de compactage	
2. Les humidités.	
3. L'état structural.	
31. Création du niveau de référence	
32. La parcelle témoin ou le NON TRAVAIL du sol	
33. Les parcelles travaillées.	
II Description de l'état physique et des comportements mécaniques au champ.....	p. 9
1. Principe. Analyse de la porosité.	
2. Expression des résultats.	
21. Calcul de porosité.	
211. Porosité totale.	
212. Porosité texturale	
213. Porosité structurale.	
22. Calcul des indices des vides.	
221. Indice des vides totaux.	
222. Indice des vides texturaux.	
223. Indice des vides structuraux.	
3. Justification du matériau.	
4. Techniques de mesure.	
41. Mesure du poids volumique du matériau.	
411. Mesure du poids volumique du sol en place γ_d^D	
412. Mesure du poids volumique des agrégats humides γ_d^t	

- 42. Caractérisation de l'état structural après travail.
 - 421. La prise d'échantillon.
 - 422. Le tamisage et ses résultats.
- 43. Mesure des déformations de surface.
 - 431. Sur le terrain.
 - 432. Analyse des données.

III : Résultats et discussions..... p. 14

- 1. Variation de l'indice des vides structuraux e_s
 - 11. Effets du travail du sol.
 - 12. Effets du roulage.
 - 121. en sol non travaillé.
 - 122. en sol travaillé.
 - 13. Influence de l'état structural initial.
- 2. Déformations. Volumes affectés par le tassement.
 - 21. Déformations sous les roues : les ornières.
 - 211. La profondeur.
 - 212. La "surface" des déformations.
 - 22. Relation entre la déformation et le tassement structural.
 - 23. Confrontation des résultats d'aspérimétrie et des variations d'indices des vides structuraux.
 - 231. Intérêt : calcul du volume affecté par le tassement.
 - 232. Principe et calcul.
- 3. Conséquences.

CHAPITRE III : Comparaison du compactage au laboratoire et du compactage au champ..... p. 22

- I. Le compactage au laboratoire du matériau des Vignères.
 - 1. Influence de l'énergie.
 - 2. Influence de l'état structural.
- II Confrontation des résultats du compactage au champ et des résultats de laboratoire.
 - 1. Influence de l'état structural.
 - 2. Influence de l'humidité et de l'énergie.
- III Conclusion.

CONCLUSION..... p. 25

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

Le Travail du sol a pour fonctions principales :

- L'enfouissement des matières organiques et des engrais peu mobiles.
- La lutte contre les mauvaises herbes.
- L'obtention d'un état physique favorable au développement des végétaux cultivés en agissant sur les conditions de température, d'humidité et d'aération nécessaires à la croissance des organes souterrains.

Cependant, certaines de ces fonctions perdent de leur importance avec l'évolution des systèmes de production et l'apparition de nouvelles techniques. En effet :

- L'utilisation des herbicides sélectifs permet un contrôle des adventices sans façons culturales.
- La diminution des quantités de matières organiques à enfouir (disparition du fumier dans certaines exploitations par exemple) et le fractionnement des résidus de récolte par les appareils de broyage rendent le travail du sol moins indispensable.
- La fertilisation pratiquée ces dernières années a contribué à l'enrichissement des sols. L'absence d'apport en profondeur des engrais peu mobiles pendant plusieurs années ne se traduit donc pas nécessairement par une baisse de rendement.

Par ailleurs, l'augmentation des coûts d'utilisation du matériel agricole et la raréfaction de la main d'oeuvre en agriculture sont à l'origine de la diminution de l'intensité du travail du sol (Volume de sol travaillé/hectare/an). Ceci permet en effet de se libérer de certaines contraintes d'équipement et de personnel qui s'avèrent onéreuses et dont les résultats restent parfois aléatoires. Il est donc indispensable d'étudier les conséquences de la diminution du travail du sol ou de sa suppression pour l'état physique.

Enfin, au moment où se développent ces nouvelles techniques l'alourdissement des matériels agricoles et la fréquence de leurs passages se conjugent pour rendre les problèmes de tassement de plus en plus importants. L'effet cumulatif de ces roulages pourrait provoquer une chute des rendements après plusieurs années où conduire à une augmentation irréversible de la compacité des sols. Il serait alors coûteux voire impossible de retrouver l'état physique initial.

L'étude des effets à long terme de la diminution du travail du sol sur l'évolution de l'état physique a donc été entreprise par la Station de Science du Sol d'Avignon en collaboration avec l'I.T.C.F. Les essais implantés depuis six ans fournissent des éléments permettant d'aboutir à la prévision des effets à long terme de la disparition du travail du sol. Cette étude reste cependant insuffisante : la connaissance de l'évolution de l'état structural dans l'année

est en effet fondamentale, dans le cas du travail du sol, pour mesurer l'influence de celui-ci sur l'état physique lors d'un cycle annuel. L'analyse à court terme permet aussi de mieux cerner les conséquences du travail du sol sur le comportement de la plante.

Cependant, sur le terrain, l'évolution structurale annuelle dépend des effets de nombreux facteurs : climatiques, biologiques et mécaniques. Les phénomènes élémentaires sont encore mal définis, c'est pourquoi nous avons choisi l'étude du tassement qui est mieux connu dans ses mécanismes. Il apparaît aussi comme le facteur le plus constant, le mieux caractérisé, le plus facile à reproduire et il intervient pratiquement avant tous les autres.

Après un bref rappel de mécanique des sols, nous présenterons donc le compactage au champ et nous essaierons de le situer par rapport au compactage au laboratoire.

CHAPITRE I : RAPPEL DE MECANISME DES SOLS :

LE COMPACTAGE AU LABORATOIRE.

Dans ce travail, nous nous efforcerons de mettre en évidence quelques mécanismes du comportement du sol au compactage. A cette fin nous utiliserons les résultats acquis par des mesures au laboratoire :

- le compactage dynamique (Test. Proctor)
- le compactage statique (oedomètre).

Nous nous limiterons à ces 2 types de compactage, disposant d'ores et déjà de références avec les travaux d'Alain FAURE sur des matériaux modélisés.

I LES TECHNIQUES DE COMPACTAGE AU LABORATOIRE.

1. Le compactage dynamique.

Le test Proctor consiste à placer un échantillon du matériau dans un moule étanche et à le soumettre à un compactage dynamique standard à différentes humidités.

L'énergie mise en jeu résulte de la chute d'une dame de masse m tombant d'une hauteur h sur un nombre n de couches et N fois par couche.

Son expression est la suivante :

$$E_c = \frac{m \times h \times n \times N}{\text{volume du moule}} \quad \text{en kg. cm}^3$$

On mesure ensuite le poids de matériau sec que l'on a pu ainsi introduire dans le moule de volume connu, de façon à déterminer le poids volumique sec moyen de l'échantillon après compactage.

2. Le compactage statique.

L'échantillon de poids sec connu est placé dans un moule pour y subir une ^{pression} charge statique appliquée rapidement et maintenue pendant un certain temps. L'appareil utilisé est l'oedomètre.

On mesure dans ce cas ^{la hauteur d'humidité après pression} le volume final obtenu qui est fonction de l'humidité du matériau et de l'énergie appliquée.

~~L'oedomètre permet de passer un matériau saturé avec la possibilité d'un drainage éventuel : c'est la consolidation~~

II. LES COURBES DE COMPACTAGE.

Les résultats sont présentés dans un graphe où est portée en abscisses la teneur en eau lors du compactage W (poids d'eau rapporté au poids sec 105°C de l'échantillon) et en ordonnées le poids volumique de l'échantillon γ_d (poids sec à 105°C de l'échantillon rapporté au volume humide après compactage).

Comme le montre la figure n°1 la courbe Proctor présente 2 points particuliers qui délimitent 3 zones de comportements mécaniques différents :

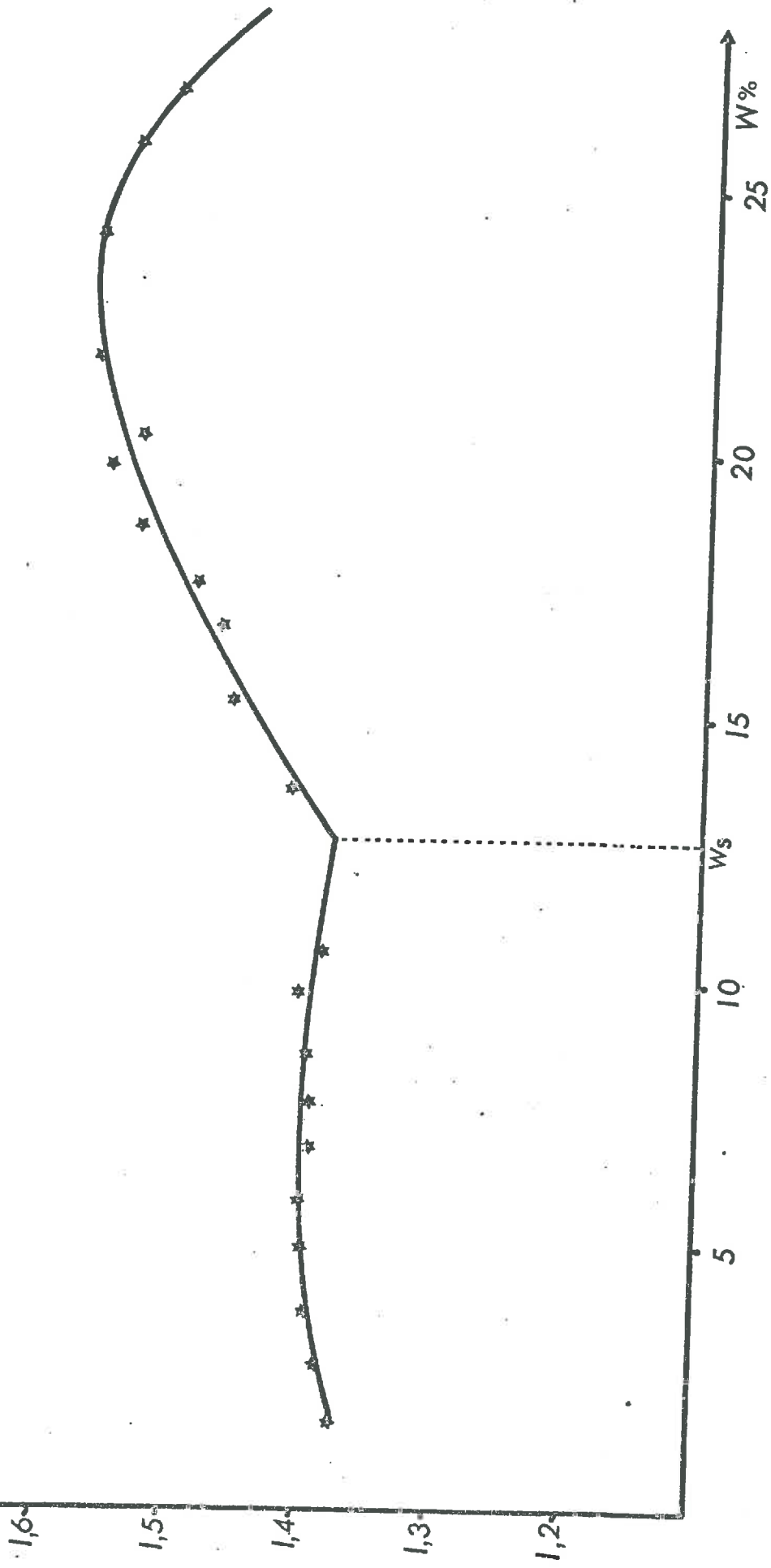


Fig. n° 1 Courbe Proctor complète

1° - Un point singulier à la teneur en eau W_s ou seuil de sensibilité au compactage au delà duquel le poids volumique augmente avec la teneur en eau.

Pour une argile donnée et à une même énergie de compactage on constate que le rapport entre la teneur en eau au point singulier W_s et la teneur en argile est constant et égal à $W_s/A = W_a$

Ainsi quelle que soit sa teneur en argile, le matériau manifeste sa sensibilité au compactage pour ^{une} humidité de la phase argileuse W_a constante. correspond à l'entrée en plasticité de l'argile.

Les résultats montrent également que W_s dépend du niveau de contrainte appliqué lors du compactage.

2° - Un optimum Proctor.

C'est l'humidité pour laquelle le poids volumique sec de l'échantillon compacté est maximum. Il dépend lui aussi de l'énergie et de la constitution du matériau.

Les trois zones de la courbe :

- Pour une teneur en eau de l'échantillon inférieure à W_s l'allure de la courbe résulte essentiellement de l'aptitude au gonflement de l'argile et de la cohésion des agrégats

- Ensuite entre W_s et l'optimum Proctor, par son action lubrifiante lorsqu'elle est entrée en plasticité, l'argile favorise un réarrangement des éléments structuraux et des constituants élémentaires

- Enfin, après l'optimum, le matériau est saturé et le poids volumique sec décroît lorsque la teneur en eau augmente.

En résumé, les facteurs du comportement d'un matériau au compactage au laboratoire sont donc :

- Sa nature
- Sa teneur en eau lors du compactage
- Le niveau de contrainte et son mode d'application.

A ces facteurs de variation des effets du compactage s'ajoute, au champ, l'état structural du matériau qui est en principe éliminé au laboratoire par le tamisage initial de l'échantillon. On ne saurait à priori le négliger lorsqu'on s'intéresse au comportement des sols travaillés. A défaut d'études spécifiques, les résultats d'essais de non travail du sol (Soane et al 1970-1971 - STENGEL 1976.) montrent que le tassement provoqué par le roulage est nettement plus important en sol travaillé qu'en sol non travaillé.

Lors de l'étude du compactage au champ il convient donc de contrôler les facteurs cités dans le chapitre I mais aussi d'évaluer dans quelle mesure des variations de l'état structural initial peuvent modifier leurs effets.

I DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Nous présenterons successivement les moyens de variation des facteurs du compactage au champ.

1 L'Energie de compactage

Le roulage des engins agricoles constituant le principal danger de tassement au champ, les différents niveaux d'énergie de compactage ont été appliqués sous forme de roulage. Nous avons fait varier l'énergie appliquée par le passage répété ou non d'une remorque plus ou moins chargée (caractéristiques en annexe)

Les différents traitements étaient les suivants :

- R₁ : 1 roulage de remorque vide.
- R₂ : 2 roulages de remorque vide.
- R₃ : 1 roulage de remorque vide + 1 roulage de remorque pleine
- R₄ : 1 roulage de remorque vide + Arrêt d'une heure de la remorque pleine

Le traitement R₄ avait pour but la mise en évidence d'une éventuelle consolidation.

La mise en oeuvre de nos techniques de mesure n'étant pas possible dans un sol de structure soufflée, le traitement R₁ a été nécessaire sur toutes les parcelles.

Pour isoler le tassement dû à la remorque, il était nécessaire que ses roues circulent hors de la zone tassée par le tracteur. Compte tenu des largeurs respectives de ces deux engins nous avons dû réaliser cette condition par l'adoption d'un attelage spécial (fig 2). L'asymétrie de ce système nous autorise à penser qu'une interaction éventuelle entre les deux tassements aurait eu des effets différents pour la roue intérieure et la roue extérieure de la remorque. Aucune différence significative n'étant apparue entre les

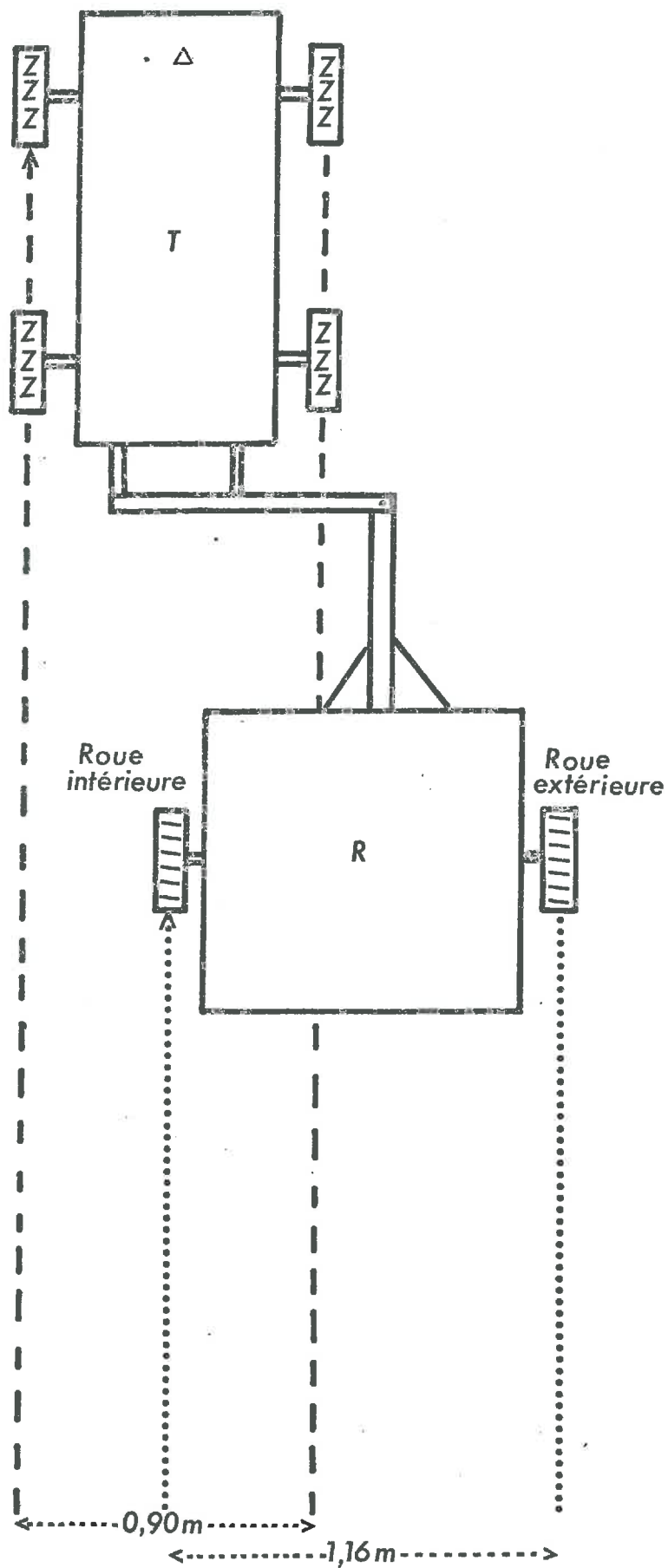


Fig. 2 Schéma du dispositif d'attelage

les porosités mesurées dans les deux traces de roues nous avons admis que le passage du tracteur n'avait pas modifié les effets des traitements.

2 Les humidités.

Quatre niveaux d'humidité ont permis l'étude de l'influence de la teneur en eau sur le compactage.

Le sol ressuyé avant la mise en place de l'essai ne portait aucun végétal. La gamme d'humidité a donc été obtenue par évaporation. Celle-ci a créé un gradient d'humidité que le travail du sol a détruit en homogénéisant la teneur en eau de l'ensemble de l'horizon affecté. Le passage immédiat de la remorque a donc permis l'étude sur un matériau travaillé homogène quant à son humidité. Il convient de noter que dans les parcelles non travaillées le gradient d'humidité était conservé. Ceci rend complexe les comparaisons entre parcelles travaillées et non travaillées, la différence inévitable des profils hydriques s'ajoutant à celle de l'état structural.

Tableau n° 1 : HUMIDITES DU SOL AVANT TRAVAIL (% PONDERAL)

époque. profondeur	1ere série 10-25 Avril	2e série 18-30 Mai	3e série 15-25 Juin	4e série 30 Juin 10 Juillet
0-7 cm.	23,7	14,4	12,9	
7-15 cm	27,4	26,3	24,9	
15-22 cm	27,9	28,2	25,7	

Tableau n° 2 : HUMIDITES DE L'HORIZON TRAVAILLE (% PONDERAL)

	1ere Série	2e Série	3e Série	4e Série
Motobineuse	pas de mesure	22,31	15,49	10,0
Rotavator		24,1	15,86	10,2

Tableau n° 3 - Humidités de roulage (% pondéral)

profondeur	époque	1ere Série	2e Série	3e Série	4e Série
	parcelle				
0-7 cm	Témoin.	23,7	14,4	12,9	
	Rotavator.	22,8	24,1	15,9	10,2
	Motobineuse	23,3	22,3	15,5	10,0
7-15 cm	Témoin.	27,4	26,3	24,6	
	Rotavator	22,8	24,1	15,9	10,2
	Motobineuse	27,6	22,3	15,5	10,0
15-22 cm	Témoin.	27,9	28,2	25,7	
	Rotavator	28,4	27,4	23,0	19,7
	Motobineuse	27,9	25,9	23,4	21,3

3 Etat structural.

Nous avons étudié le comportement de trois états structuraux qui seront décrits par la suite.

3-1. Création du niveau de référence

Le poids volumique du sol en place est généralement plus élevé dans des parcelles non travaillées que dans des parcelles travaillées (Soane 1971-Stengel 1975). Notre parcelle ayant été travaillée en automne 1975 pour l'implantation d'un blé qui fut détruit en janvier 1976, nous voulions annuler l'effet de ces préparations culturales et recréer un état physique voisin de celui d'une parcelle non travaillée. D'autre part pour isoler les effets des techniques de travail du sol mises en oeuvre il était nécessaire de partir d'une compacité moyenne identique sur toute la surface de l'essai.

Nous avons donc cherché à augmenter la compacité du sol par un passage de rouleau compresseur sur toutes les parcelles.

La comparaison des mesures de différents poids volumiques de sol en place permet de juger les résultats de cette opération : le poids volumique dans une couche non travaillée (Horizon B_s inférieur à 35 cm de profondeur) et avant passage du rouleau compresseur est peu différent de celui que nous avons obtenu après passage de cet engin, dans la couche travaillée pour l'implantation du blé (tableau n° 4).

L'homogénéité de constitution du matériau dans la couche considérée autorise cette comparaison. Nous pouvons donc admettre que l'état structural obtenu est voisin de celui auquel aurait conduit le non travail du sol.

Tableau n° 4 COMPARAISON DE POIDS VOLUMIQUES DE SOL EN PLACE

	Horizon B. s.	Horizon Ap. Après passage		
	avant passage du R.C	du rouleau compresseur		
profondeur	35	0-7	7-15	15-22
Humidité (% poids)	26	22	25	27
poids volumique du sol en place	1,35	1,26	1,31	1,33

3-2. La parcelle Témoin ou le non travail du sol

L'état structural est celui qui résulte des opérations décrites dans le paragraphe 31. Dans le cadre de l'essai, cette parcelle n'est jamais travaillée.

3-3. Les parcelles travaillées

Notre objectif était la création de deux états structuraux différenciés par la taille de leurs éléments et suffisamment homogènes pour que les différentes mesures soient représentatives de l'état physique.

Les limitations de nos techniques de mesures du poids volumique apparent nous interdisaient cependant l'étude d'états structuraux trop grossiers tel que celui d'un sol fraîchement labouré par exemple.

Compte tenu de cette limitation, seuls les outils de type rotatif permettaient la création d'un état structural adéquat, dans les conditions d'humidités choisies et avec la nature de notre matériau. (Annexe I.)

Nous avons donc utilisé le matériel suivant :

- Un rotavator pour la création d'un état structural motteux.
- Une motobineuse pour l'obtention d'un état structural plus fin.

Les profondeurs de travail

La profondeur de travail souhaitée était de 15 cm. Le contrôle de cette profondeur effectué par aspérimétrie a donné les résultats suivants.

Tableau n° 5. PROFONDEUR DE TRAVAIL EN CM.

	Motobineuse	Rotavator
2e Série	13 (± 2)	13 (± 2)
3e Série	12 (± 2)	12 (± 2)

II DESCRIPTION DE L'ETAT PHYSIQUE ET DES COMPORTEMENTS MECANIQUES AU CHAMP

1 Principe : Analyse de la porosité.

Nous avons décrit l'état physique du sol par analyse de la porosité selon les techniques mise au point à la Station de Science du Sol d'Avignon. (Fies 1971, Faure et al 1973., Monnier et Al 1973.).

Nous avons donc évalué la porosité totale et sa composante texturale à partir de mesures de poids volumique apparent puis calculé la composante structurale par différence.

2 Expression des résultats

Le volume des vides se calcule à partir de différents poids volumiques du matériau. Nous utiliserons les notations suivantes :

γ_d^D poids volumique du sol en place

γ_d^t poids volumique textural

γ_s poids volumique du solide
pour notre matériau : $\gamma_s = 2,795 \text{ g/cm}^3$

2-1 Calcul de porosité

2-11. Porosité totale :

$$\text{porosité totale en \%} = \left(\frac{\text{volume des vides}}{\text{volume du sol en place}} \right) \times 100$$

$$P_d^T \text{ en \%} = \left(1 - \frac{\gamma_d^D}{\gamma_s} \right) \times 100$$

2-12. Porosité texturale.

$$\text{porosité texturale en \%} = \left(\frac{\text{volume des vides des agrégats}}{\text{volume apparent des agrégats}} \right) \times 100$$

$$P_d^t \text{ en \%} = \left(1 - \frac{\gamma_d^t}{\gamma_s} \right) \times 100$$

2-13. Porosité structurale

$$\frac{\gamma_d^D}{\gamma_d^t} = \text{volume occupé par les agrégats dans } 1 \text{ cm}^3 \text{ de sol en place}$$

$$P_d^s \text{ en \%} = \left(1 - \frac{\gamma_d^D}{\gamma_d^t} \right) \times 100$$

La porosité exprime l'importance relative des vides en pourcentage du volume apparent de l'échantillon. Les valeurs obtenues pour les porosités texturales et structurales n'étant pas exprimées en pourcentage du même volume de référence ne sont pas additives. Ceci pouvant compliquer considérablement l'interprétation des résultats, il est préférable d'utiliser un volume de référence invariant. On choisit généralement le volume de solide et on exprime alors l'importance relative des vides en indice des vides. C'est

2-21. Calcul des indices des vides.

$$e_t = \frac{\text{volume des vides totaux}}{\text{volume de solide}} = \frac{\text{vol. sol en place} - \text{vol. de solide}}{\text{vol. de solide}}$$

$$e_t = \frac{\gamma_s}{\gamma_d^D} - 1$$

2-22. Indice des vides texturaux. e_t

$$e_t = \frac{\text{volume des vides des agrégats}}{\text{volume de solide}} = \frac{\text{vol des agrégats} - \text{vol de solide}}{\text{volume de solide}}$$

$$e_t = \frac{\gamma_s}{\gamma_d^t} - 1$$

2-23. Indice des vides structuraux.

$$e_s = \frac{\text{volume des vides structuraux}}{\text{volume de solide}} = \frac{\text{volume du sol en place} - \text{volume des agrégats}}{\text{volume de solide}}$$

$$e_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_d^D} - \frac{\gamma_s}{\gamma_d^t}$$

Ces différents indices des vides sont additifs et : $e_T = e_t + e_s$

3 JUSTIFICATION DU CHOIX DU MATERIAU.

Le choix du matériau retenu a été guidé par les points suivants :

- Les résultats d'une étude réalisée par la station de sciences du sol (Faure et al. 1973) montrent que les sols argileux ne présentent pas de risque de tassement textural.

- La mise en place de l'essai en sol argileux permettait donc de limiter l'étude à l'évolution des vides structuraux. La mesure des poids volumiques d'agrégats secs prélevés dans les traitements où les énergies de compactage étaient les plus fortes (traitements R_3 et R_4) et aux humidités de compactage les plus élevées ($W = 22$ à 27%) confirment l'absence de tassement textural. (tableau n° 6.)

Tableau n° 6 : Poids volumiques d'Agrégats secs prélevés au champ et d'agregats artificiels

Etat structural traitement roulage	Témoin	Rotavator	Motobineuse	Agrégats artificiels
	R ₁	1,940	1,925	1,950
R ₃	1,940	1,925	1,935	2,010
R ₄	1,922	1,973		

• Pour étudier le comportement d'un sol non travaillé il nous paraissait souhaitable de se placer dans un sol adapté à cette technique c'est pourquoi nous avons choisi ce sol argileux.

• Enfin, la parcelle choisie (Annexe I) présente dans l'horizon A (0-35 cm) une homogénéité suffisante pour ^{ne pas} avoir à tenir compte des effets d'éventuelles variations de constitution sur les propriétés mécaniques.

4. TECHNIQUES DE MESURE

4-1. Mesures du poids volumique du matériau.

4-11. Mesure du poids volumique du sol en place γ_d^D

Les mesures du poids volumique du sol en place nécessaires aux différents calculs d'indices des vides ont été effectués à l'aide d'un densitomètre à membrane (caractéristiques et principes d'utilisation en annexeII)

Nous avons prélevé nos échantillons à trois profondeurs, (0-7 7-15 et 15-22 cm) et chaque résultat correspond à la moyenne de quatres répétitions de la mesure du poids volumique.

L'utilisation du densitomètre à membrane à posé les problèmes suivants:

Le volume sur lequel porte la mesure se situe entre 1000 et 2000 centimètres cubes. La maille des systèmes de porosité pris en compte doit donc être de taille suffisamment petite par rapport à ce volume pour que la mesure soit représentative de l'ensemble du matériau. Les possibilités et les limites d'utilisation de l'appareil sont donc déterminées par l'état structural crée par le travail du sol (cas du labour) et par la maille de fissuration du témoin à l'état sec.

En sol travaillé, notamment après le passage des outils rotatifs la structure soufflée se déforme facilement et la mesure au densitomètre est très délicate. Elle n'a d'ailleurs pas pu être effectuée juste après le travail du sol, ce qui a rendu nécessaire un passage préalable de remorque vide.

Enfin, la teneur en eau du matériau conditionne l'utilisation de l'appareil. Pour les humidités voisines de la capacité de rétention le matériau se déforme sous l'effet de la pression appliquée par la membrane. Pour les humidités trop basses ($WL < 12\%$) la cohésion du matériau argileux non travaillé est telle qu'il est impossible d'y creuser de façon adéquate la cavité nécessaire à la mesure. Nous n'avons donc pas pu effectuer la mesure dans ces conditions.

L'utilisation du densitomètre à membrane a donc constitué une limitation assez contraignante quant au choix de la gamme d'humidité et des états structuraux à étudier.

Bien que les mesures aient été pratiquées à diverses reprises dans des conditions difficiles à cet égard : humidité élevée dans la couche la plus profonde, état structural grossier créé par le rotavator, la dispersion des résultats n'a pas dépassé les valeurs habituellement obtenues dans des situations plus faciles :

4-12. Mesure du poids volumique des agrégats humides γ_d^t

Nous avons utilisé la méthode de mesure du volume apparent par poussée d'Archimède dans le Kerdane (Monnier et al. 1973)

La mesure du poids volumique des agrégats naturels n'a pu être effectuée sur l'ensemble des échantillons compte tenu du temps qui nous était imparti.

Pour connaître l'indice des vides texturaux, à toutes les humidités de prélèvements au champ, nous avons calculé une régression linéaire entre l'humidité et le poids volumique des agrégats humides. Elle a été établie à partir d'une centaine de mesures sur des échantillons correspondant aux différents traitements. Cette corrélation est très hautement significative ($r = 0,953$, $n = 109$) et a pour équation de régression :

$$y = 0,008399 X + 0,4374.$$

Son graphe est porté sur la figure n° 3

L'utilisation de cette régression unique pour tous les traitements est justifiée par la vérification préalable d'absence de tassement textural.

4-2. Caractérisation de l'état structural après travail.

Nous avons caractérisé l'état physique après le passage des outils de travail du sol par la granulométrie des éléments structuraux formés.

4-21. Prise d'échantillon.

A chaque époque, deux échantillons d'un volume de 10 à 15 dm³ ont été prélevés dans la couche travaillée, immédiatement après le passage du rotavator ou de la motobineuse.

La prise d'échantillon est schématisée par la figure n° 4

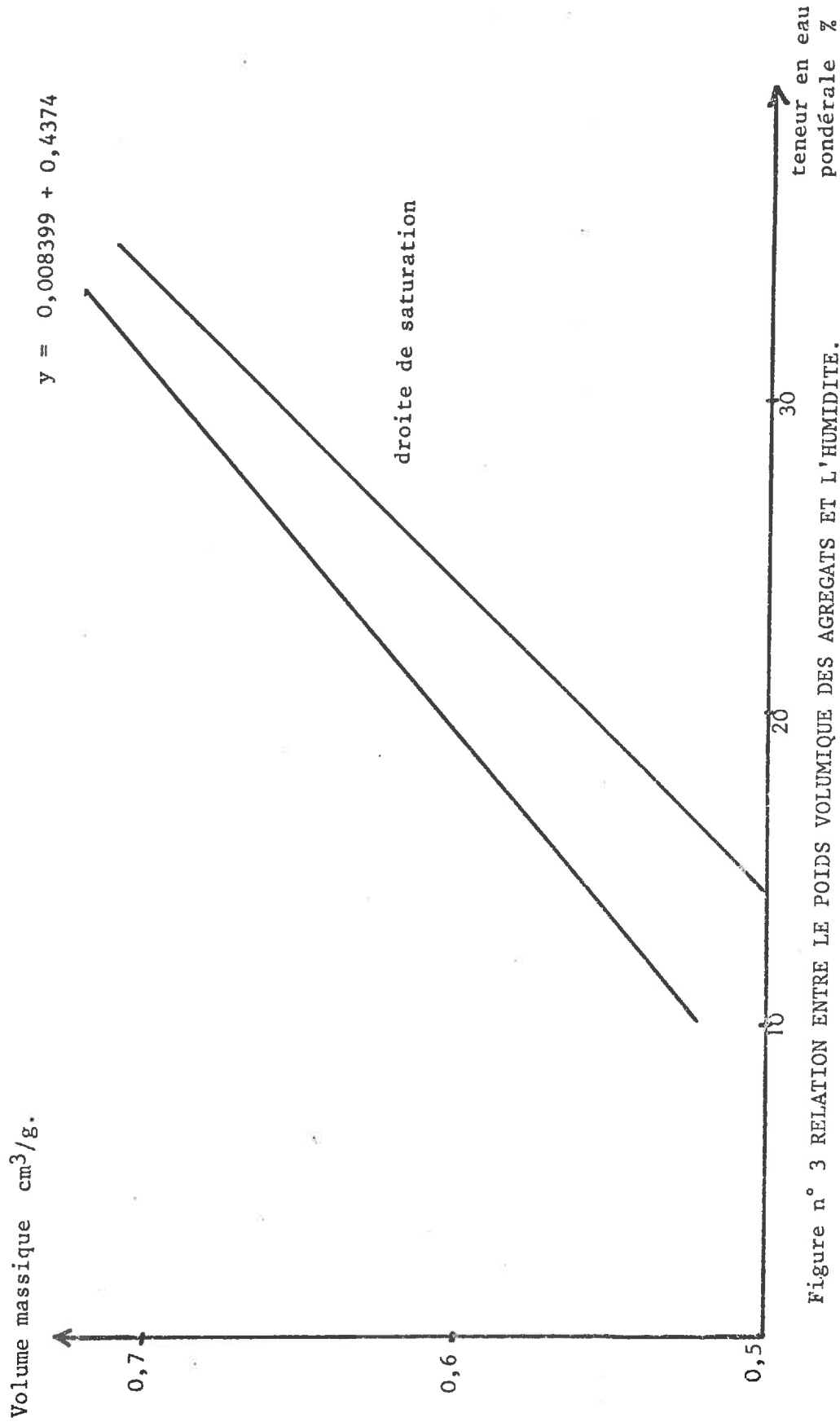
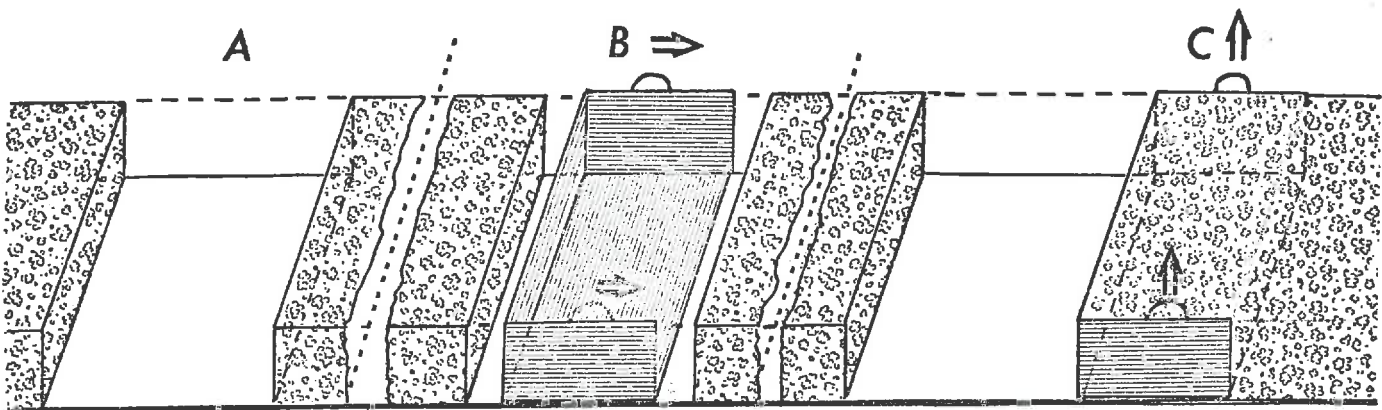


Figure n° 3 RELATION ENTRE LE POIDS VOLUMIQUE DES AGREGATS ET L'HUMIDITE.

Figure n°4 : PRISE DE L'ECHANTILLON A TAMISER



4-22. Le tamisage et ses résultats.

Les échantillons ont ensuite été séchés à l'air et tamisés.

Les résultats (figure n°5) montrent que :

- L'utilisation de ces deux outils a permis la création de deux états structuraux différents et ceci à toutes les humidités de travail. Cette différence porte essentiellement sur le taux de mottes les plus grossières, nettement plus élevé dans le traitement "rotavator"

- Dans le cas du rotavator, les résultats obtenus pour les trois humidités les plus élevées sont très voisins. Dans les conditions les plus sèches, le travail du sol a créé une plus grande quantité de terre fine.

- Dans le cas de la motobineuse, nous n'avons réussi à créer des granulométries de mottes voisines que pour les deux humidités les plus élevées.

4-3. Mesure des déformations de surface

4-31 : Sur le terrain,

L'aspérimètre (caractéristique et principe d'utilisation en Annexe II) a permis de caractériser les déformations créées par les roues.

La position des supports de l'appareil étant maintenue fixe durant toute la durée des opérations, il nous a été possible de suivre l'évolution des différents niveaux du sol.

La succession des mesures est schématisée par la figure n° 6.

4-32. Analyse des données.

On évalue la déformation du sol par la mesure de la surface délimitée par la juxtaposition des courbes d'aspérimétrie initiale et finale.

En pratique, on projette les photos sur une même feuille de papier de densité homogène et avec un rapport d'agrandissement connu.

L'aire est évaluée par pesée de la surface découpée.

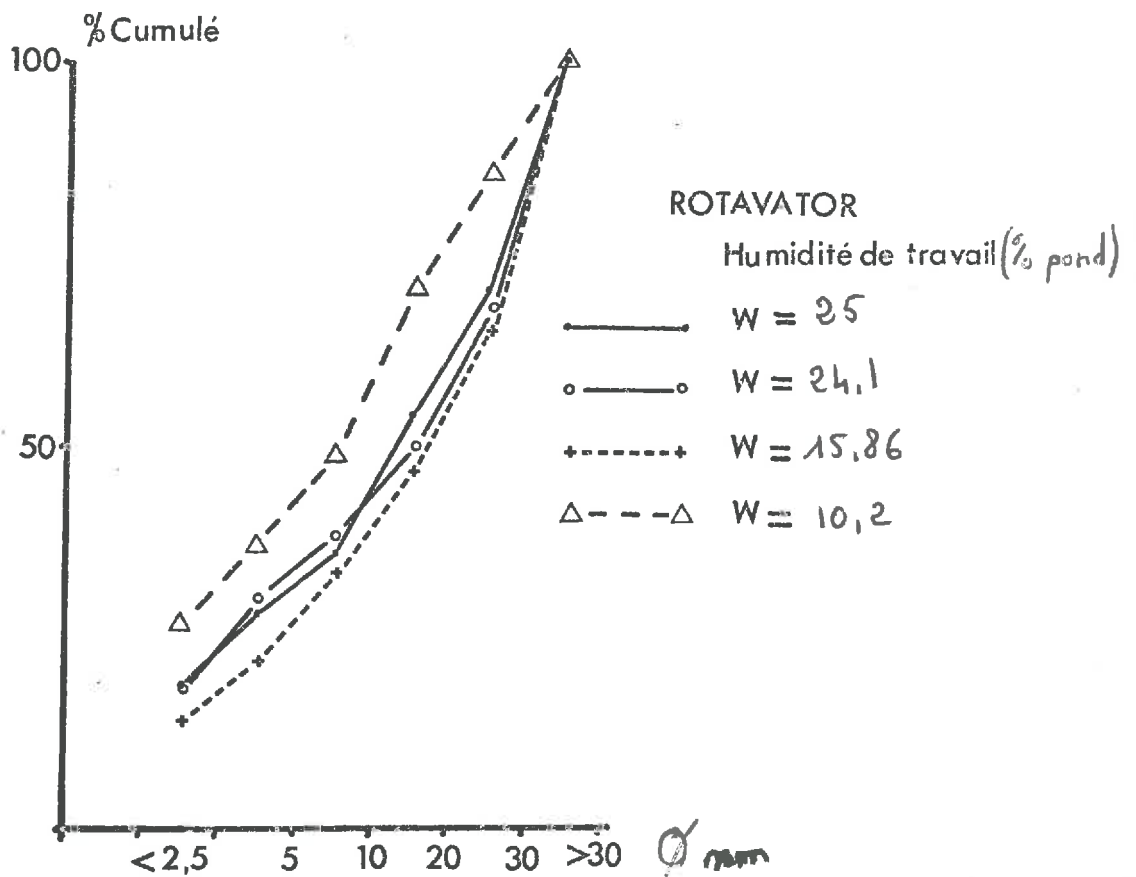
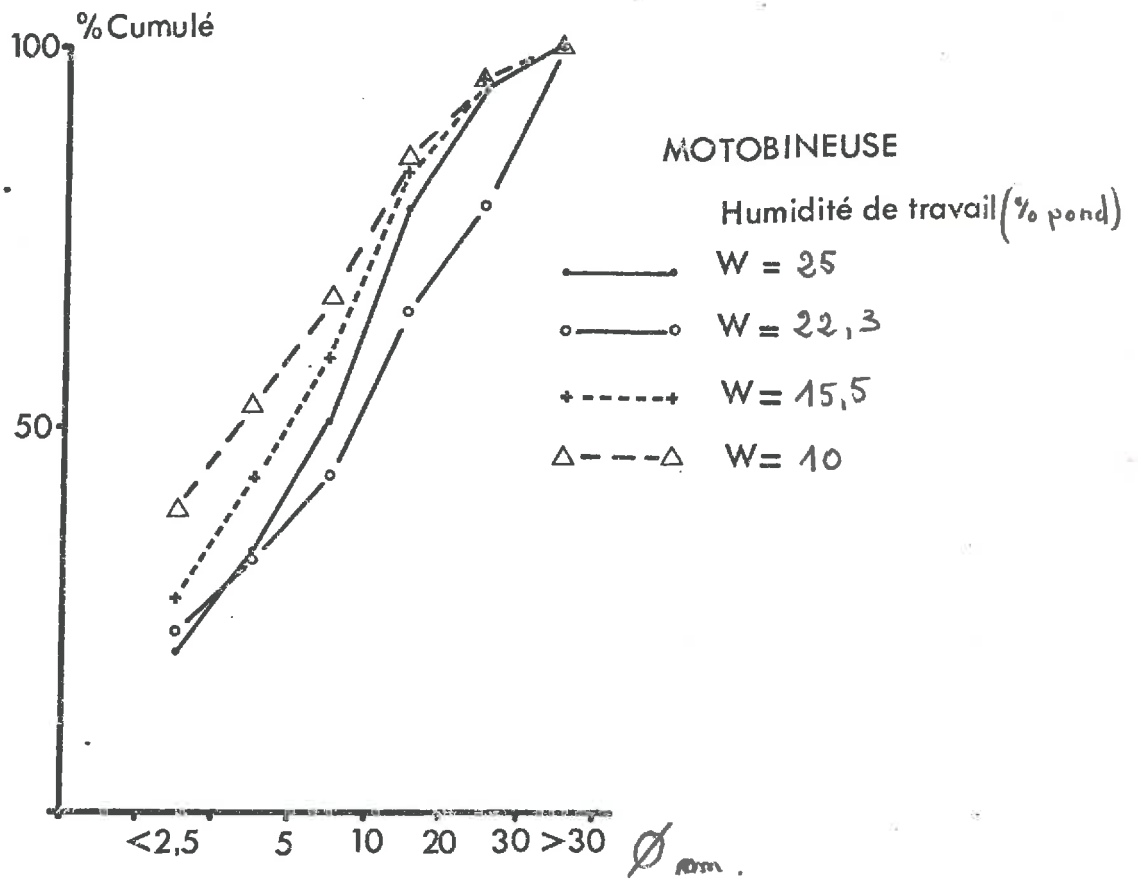
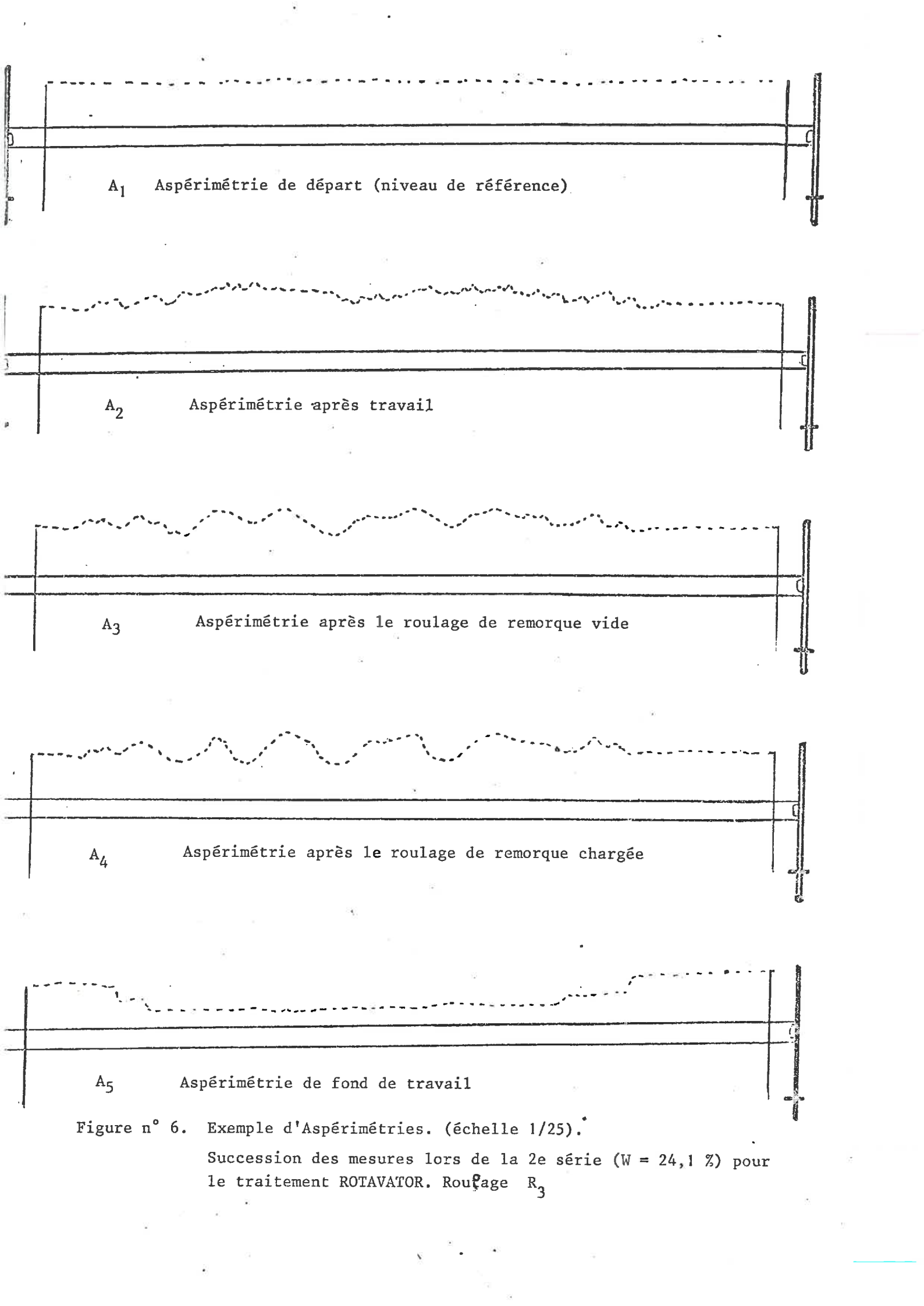


Fig.5 GRANULOMETRIE DES ELEMENTS STRUCTURAUX
APRES TRAVAIL DU SOL



A₁ Aspérimétrie de départ (niveau de référence)

A₂ Aspérimétrie après travail

A₃ Aspérimétrie après le roulage de remorque vide

A₄ Aspérimétrie après le roulage de remorque chargée

A₅ Aspérimétrie de fond de travail

Figure n° 6. Exemple d'Aspérimétries. (échelle 1/25).

Succession des mesures lors de la 2e série (W = 24,1 %) pour
le traitement ROTAVATOR. Roulage R₃

III - RESULTATS ET DISCUSSIONS

1 Variation de l'indice des vides structuraux e_s

1-1. Effet du travail du sol.

La mesure du poids volumique γ_d^D immédiatement après travail du sol ne pouvant être pratiquée avec le densitomètre à membrane, nous avons tenté d'évaluer le gain de porosité dû au travail, à partir de γ_d^D avant travail et des résultats de l'aspérimétrie.

Pour ce faire nous avons mesuré deux surfaces :

S_i : par combinaison de l'aspérimétrie initiale (A_1) et du fond de travail (A_5)

S_f : par combinaison de l'aspérimètre de surface du sol travaillé (A_2), et du fond de travail (A_6)

Si nous appelons

V_i : le volume de la couche avant travail

V_f : le volume de la couche travaillée après travail

Nous avons :

$$\frac{V_f}{V_i} = \frac{S_f}{S_i}$$

et $V_i \times \gamma_{d_i}^D = V_f \times \gamma_{d_f}^D$.

$$\gamma_{d_f}^D = \frac{S_i}{S_f} \gamma_{d_i}^D$$

Pour chaque technique de travail du sol, trois séries d'aspérimétries ont été réalisées en des emplacements différents dont nous avons tiré les valeurs de γ_d^D . Les résultats du tableau n° 7 sont des moyennes de ces valeurs. Les écarts entre les répétitions sont du même ordre de grandeur que ceux que nous avons obtenus, après roulage, avec le densitomètre à membrane. Les valeurs absolues apparaissent également satisfaisantes : les indices des vides structuraux e_s sont en effet légèrement supérieures à ceux du traitement R_1 calculés à partir de mesures au densitomètre.

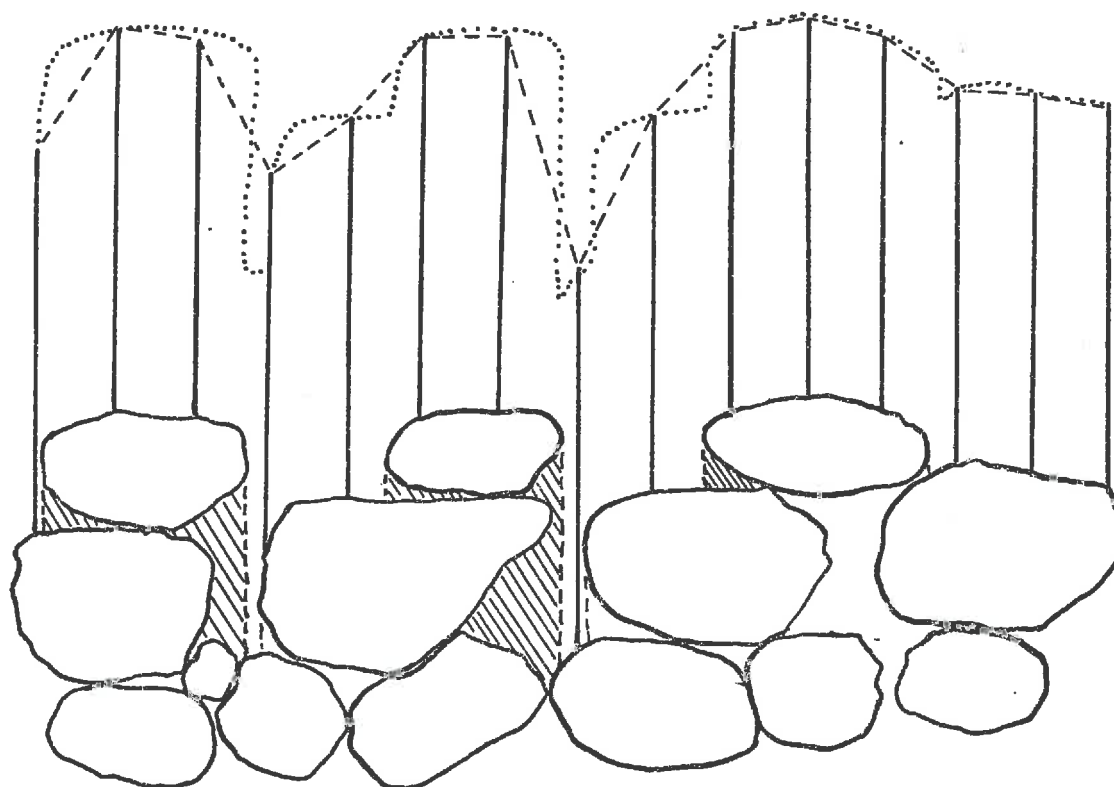
La possibilité d'une erreur systématique ne peut cependant pas être écartée. Notons toutefois que la précision d'une telle mesure est limitée pour des raisons fondamentales. L'indétermination du contour du solide poreux que constitue le sol travaillé est en effet importante par rapport au volume mesuré, et le biais qu'elle peut introduire est difficile à évaluer (fig.7.). Elle diminue cependant avec la taille des éléments structuraux.

Ces réserves étant formulées, cette technique paraît très prometteuse et nécessite d'être étudiée de façon plus approfondie.

TABLEAU n° 7. INDICES DES VIDES STRUCTURAUX DU SOL
APRES TRAVAIL.

		2e Série		3e Série	
		Rotavator	Motobineuse	Rotavator	Motobineuse
D _d avant travail.	0-7	1,29	1,29	1,30	1,30
	7-15	1,35	1,35	1,35	1,35
D _d après travail	0-15	0,92 (± 4)	0,92 ± 3	0,93 (± 2)	1,03 (± 3)
Humidité de travail % pond.		24,1	22,31	15,86	15,49
e _s après travail		1,25	1,29	1,40	1,19
e _s (roulage R ₁ moyenne 0-7 7-15)		1,13	1,22	1,15	1,15

FIG. 7. : Difficultés de la représentation du microrelief de surface



A l'exception de techniques radiométriques coûteuses (mesure d'atténuation de rayonnement γ par transmission) elle est en effet la seule disponible pour évaluer l'effet d'un outil de travail du sol sur la porosité.

Dans le cas des outils rotatifs, l'indice moyen des vides structuraux évalué par aspérimétrie sur l'ensemble de la couche travaillée, est le double de l'indice initial des vides structuraux de la couche 0-7 cm et le quadruple de celui de la couche 7-15 cm. Ce résultat ne rend pas compte d'un éventuel gradient de l'indice des vides induit par un tri mécanique des éléments structuraux

1-2. Effets du roulage. (Fig. 8-9-10)

On distingue nettement deux types de comportement du sol soumis aux roulages. Dans les parcelles travaillées le tassement est beaucoup plus important que dans les parcelles non travaillées. Cette différence est hautement significative pour toutes les humidités de roulage.

1-21. En sol non travaillé la diminution d'indice des vides structuraux est faible ; d'autre part le tassement ne se produit que pour des humidités élevées et avec de fortes énergies de compactage (traitement R_3 et R_4 lors des premiers essais au champ).

1-22. L'effet du tassement en sol travaillé peut être évalué de 2 façons complémentaires :

- on mesure le volume des vides structuraux supprimés par le compactage en se référant à l'indice des vides structuraux du sol après travail.
- on peut aussi évaluer le volume des vides qui subsistent après le compactage en se référant à l'indice des vides de la parcelle témoin.

Dans les parcelles travaillées, nous avons mis en évidence deux niveaux d'énergie dont les effets sur le comportement du sol au compactage sont différents. (cette différence est hautement significative, quelle que soit l'humidité de roulage.) :

- a) Un niveau correspondant aux traitements R_1 et R_2 dont les effets de compactage sont faibles ; Ainsi :

Quelle que soit la teneur en eau du sol lors du compactage, l'indice des vides structuraux reste important. Le premier passage de la remorque vide a diminué d'environ 15% en valeur absolue, l'indice des vides structuraux créé par le travail. L'indice des vides structuraux des parcelles travaillées reste cependant 2 à 3 fois plus élevé que celui du témoin dans les mêmes conditions (différence hautement significative)

La limite en profondeur de la zone tassée est difficile à mettre en évidence, car les variations absolues d'indice des vides sont faibles. En aucun cas le tassement n'affecte la zone située sous la couche travaillée.

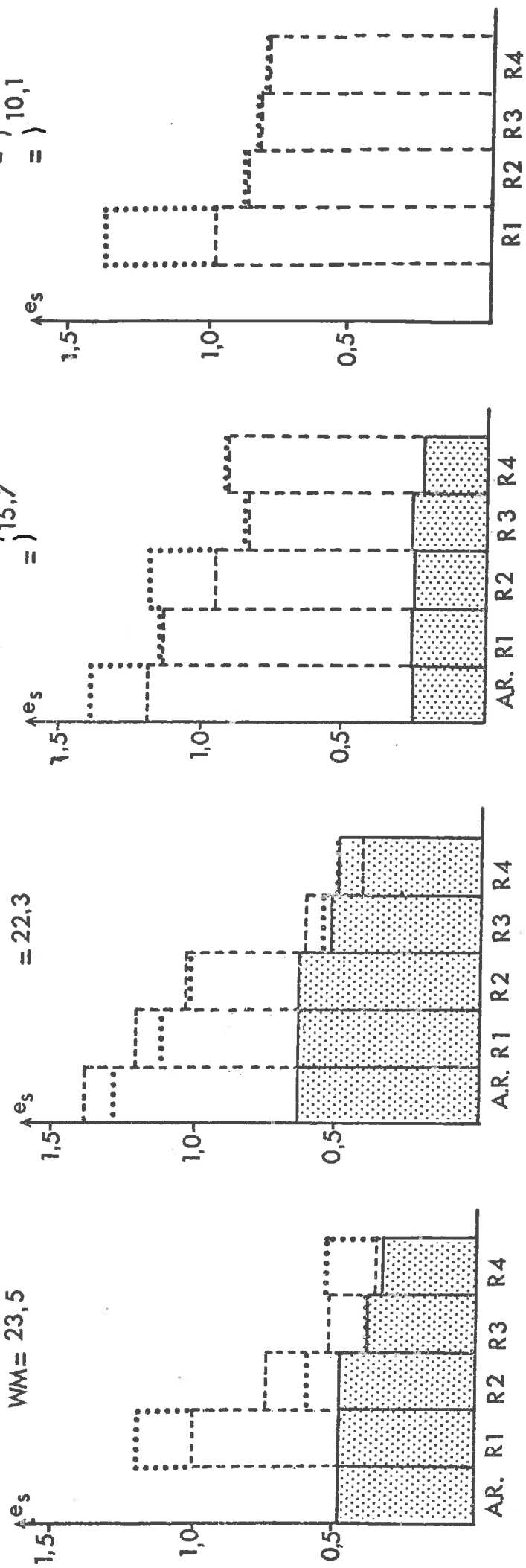
Humidité de roulage

1^{er} Série WT = 23,7
 WR = 22,3
 WM = 23,5

2^e Série = 14,4
 = 24,1
 = 22,3

3^e Série = 12,9
 = 15,7
 =

4^e Série =)
 =) 10,1
 =)

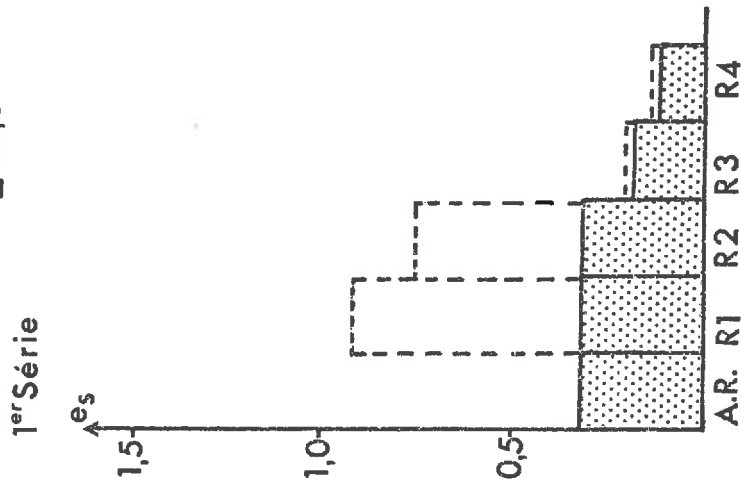


Profondeur : 0 - 7 cm

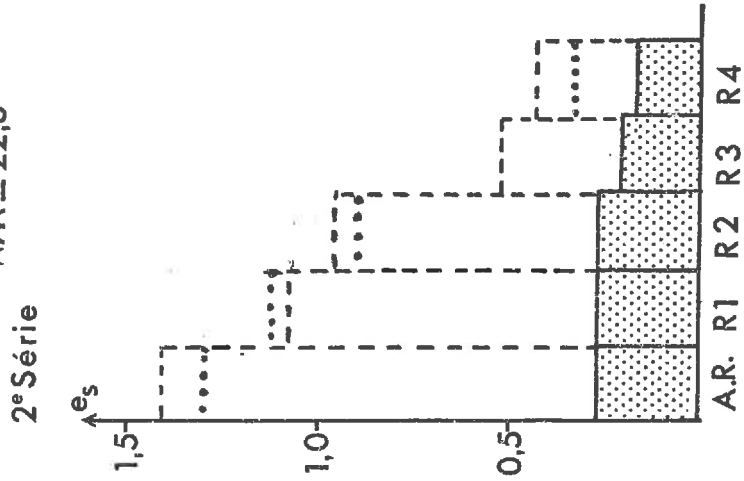
- Témoïn
- Rotavator
- Motobineuse

Fig. 8 VARIATION DE L'INDICE DES VIDES STRUCTURAUX

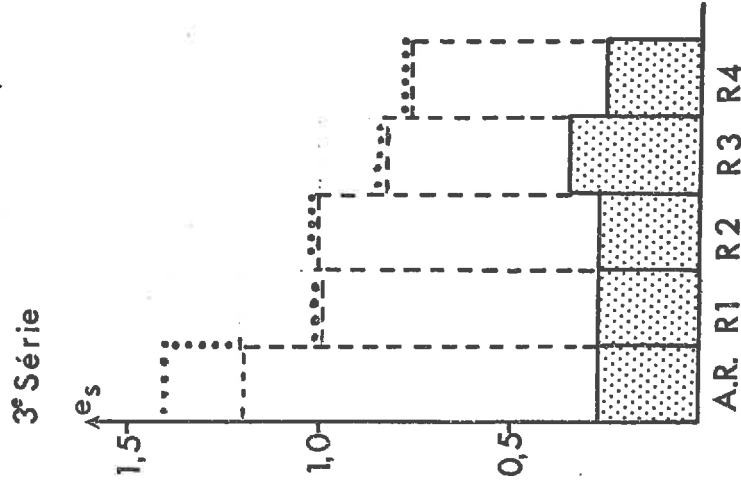
WR = ?
WM = 23,5



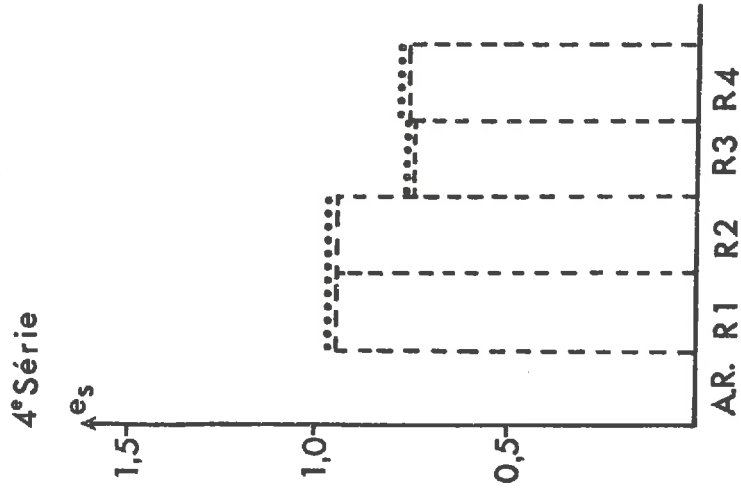
WR = 24,1
WM = 22,3



WR = 15,7
WM = 15,7



WR = 10,1
WM = 10,1



..... Témoïn

..... Rotavator

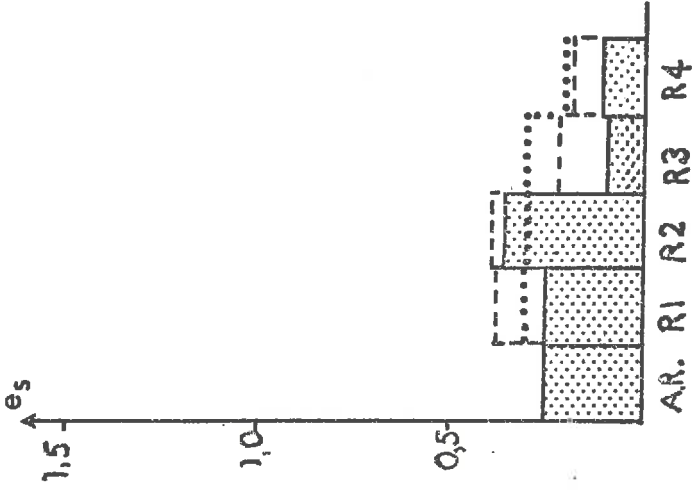
----- Motobinese

Profondeur : 7 - 15

Fig. 9 VARIATION DE L'INDICE DES VIDES STRUCTURAUX

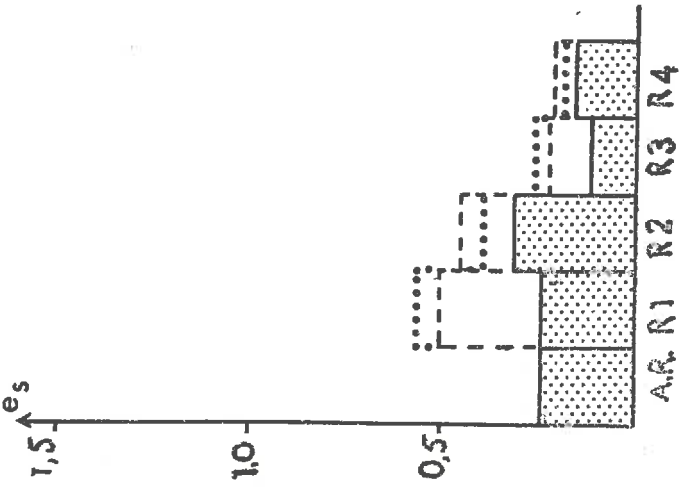
WR = 28.4
WM = 27.9

1^{er} Série



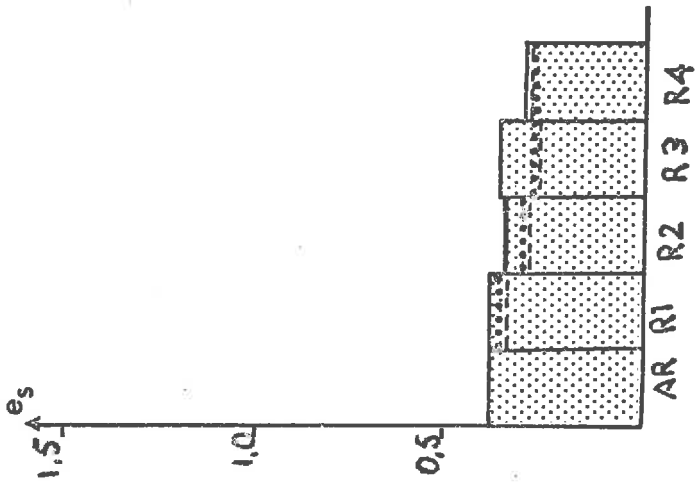
WR = 27.4
WM = 25.9

2^e Série



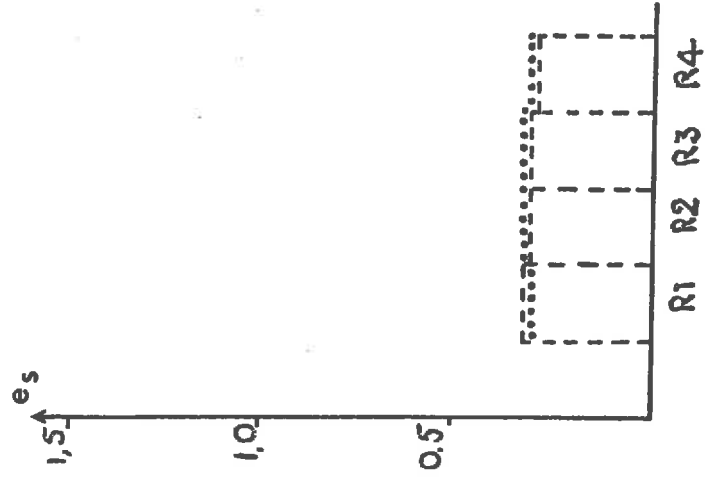
WR } = 23,2
WM }

3^e Série



WR } = 20.5
WM }

4^e Série



Profondeur : 15 - 22

Témoïn
 Rotavator
 Motobineuse

Fig.10 VARIATION DE L'INDICE DES VIDES STRUCTURAUX

Les résultats des traitements R_1 et R_2 ne se différencient de façon significative que pour les humidités supérieures à 20 %. La diminution de e_s consécutive à ce second passage est faible, et pour les teneurs en eau plus basses les parcelles travaillées gardent une bonne partie de l'espace poral créé par le travail.

b) Un niveau d'énergie correspondant aux traitements R_3 et R_4 dont les effets de tassement sont beaucoup plus importants.

Nous avons distingué trois zones d'humidités pour lesquelles l'importance du tassement se différencie.

- Pour une humidité de roulage supérieure à 24%, tout le gain d'espace poral résultant du travail du sol disparaît après le passage de la remorque chargée. La compacité du matériau est même supérieure à l'état initial avant le passage des outils de travail du sol et cette augmentation de compacité affecte également les couches situées sous le travail du sol.

L'indice des vides structuraux des parcelles ayant reçu le même traitement de roulage est identique quel que soit leur état structural initial. (pas de différence significative entre le témoin et les parcelles travaillées.)

- Lorsque la teneur en eau est voisine de 20%, le gain d'espace poral consécutif au travail ne disparaît que dans la couche superficielle (0-7 cm). L'indice des vides structuraux y a donc retrouvé sa valeur initiale et l'effet du travail du sol a disparu

Par contre, en profondeur, (7-15 cm) il persiste une partie des vides structuraux créés par le travail du sol : l'indice des vides structuraux est 2 fois plus important que celui rencontré dans le témoin à la même profondeur.

- Enfin lorsque le niveau d'humidité descend en dessous de 15% , la porosité structurale reste importante sur toute la profondeur. Dans le sol travaillé e_s est très supérieur à celui du témoin, et cette différence est hautement significative pour toute l'épaisseur de la couche travaillée.

Effet de l'arrêt de la remorque pleine:

On n'enregistre pas de différence significative entre les compacités résultant des traitements R_3 et R_4 . Ceci peut s'expliquer par le fait que l'énergie appliquée par la remorque à l'arrêt soit insuffisante pour provoquer une redistribution de l'eau retenue par le potentiel matériel du sol argileux aux humidités considérées. On n'observe donc aucun phénomène de consolidation.

1-3. Influence de l'état structural initial.

Dans les parcelles travaillées, la variation de la taille des éléments structuraux résultant des 2 outils employés n'a pas d'effet significatif sur le comportement du sol au compactage. On ne constate qu'une seule exception pour des énergies faibles et une teneur en eau réduite.

(Seule différence significative : pour $W = 10\%$ e_s Rotavator $>$ e_s Motobineuse)

Par contre les différences de comportement mécanique du sol travaillé ou non travaillé sont toujours significatives.

Le comportement du sol au compactage ne varie donc en fonction de l'état structural que pour des différences importantes de cet état structural.

Ces observations confirment nos hypothèses quant à l'effet de faibles variations de l'état structural sur le comportement du sol au compactage.

Son étude ne nécessite pas la connaissance des résultats de l'utilisation de toute la gamme des outils de travail du sol. Une distinction se limitant aux variations importantes de l'état structural créé par des outils nettement caractérisés (labour - travail superficiel) devrait permettre une bonne approche de l'étude du comportement mécanique des sols.

2 - Déformations. Volumes affectés par le tassement.

2-1. Déformations sous les roues : les Ornières.

Les Ornières ne présentant pas de bourrelets latéraux, la mesure des déformations correspond aux variations réelles de volume sous les roues de la remorque.

Les résultats de l'étude de ces déformations sont présentés sur les figures 11, 12 et 13.

211. La profondeur.

On constate que la profondeur des ornières consécutives au roulage dans le sol travaillé est fonction de l'humidité et de l'énergie de compactage.

- La déformation est d'autant plus profonde que la teneur en eau du matériau est plus élevée.

- Les deux niveaux d'énergie mis en évidence par les variations des indices des vides structuraux se différencient également par des variations de déformations. Les déformations consécutives au roulage R_3 et R_4 sont plus importantes que celles des traitements R_1 et R_2 .

- Enfin il semble y avoir interaction entre l'humidité et l'énergie de compactage sur la déformation : la différenciation des 2 niveaux d'énergie est d'autant plus nette que la teneur en eau est plus élevée.

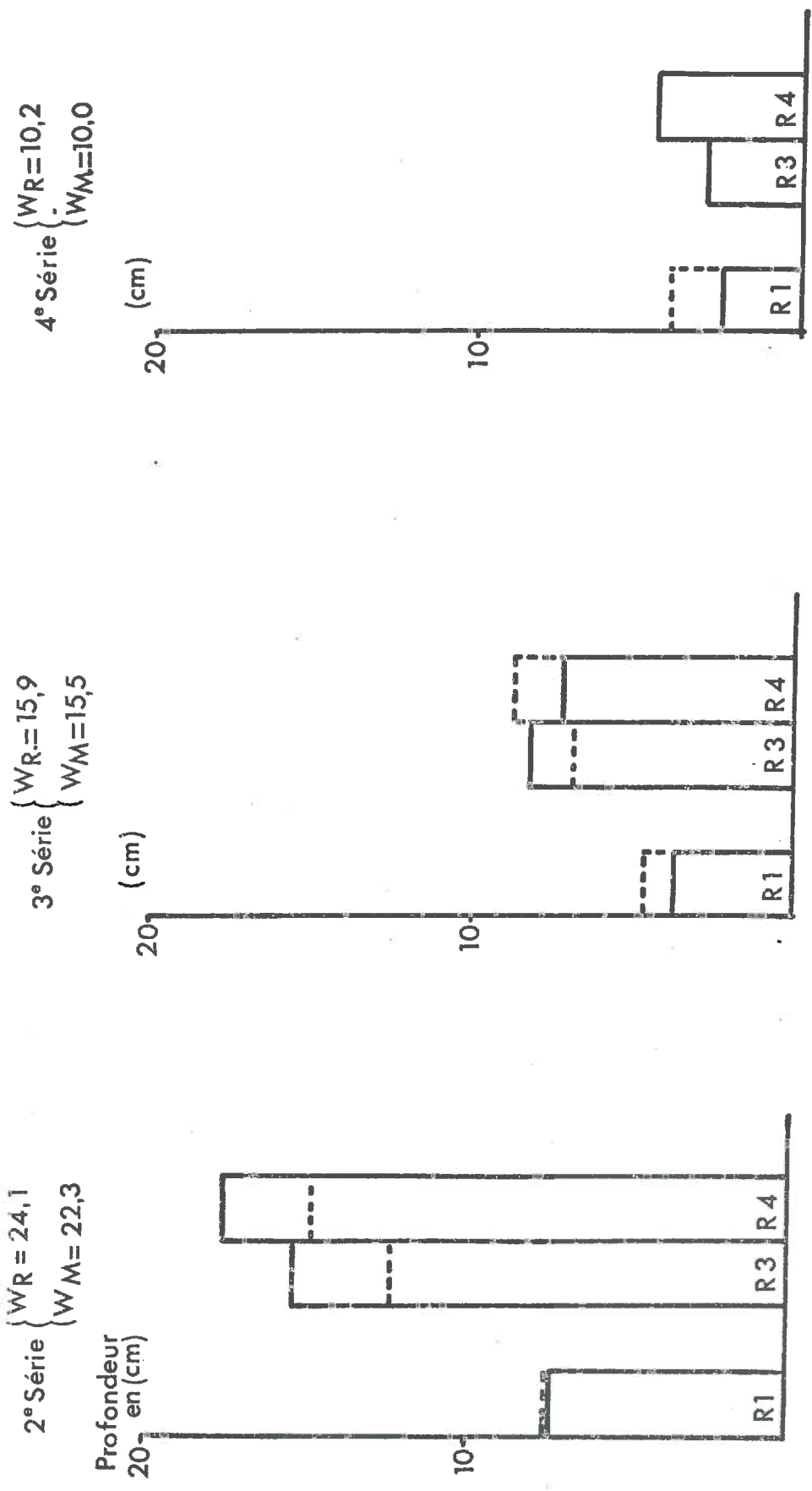


Fig.11 PROFONDEURS DES ORNIERES EN FONCTION DES HUMIDITES DE ROULAGE(%pondéral)

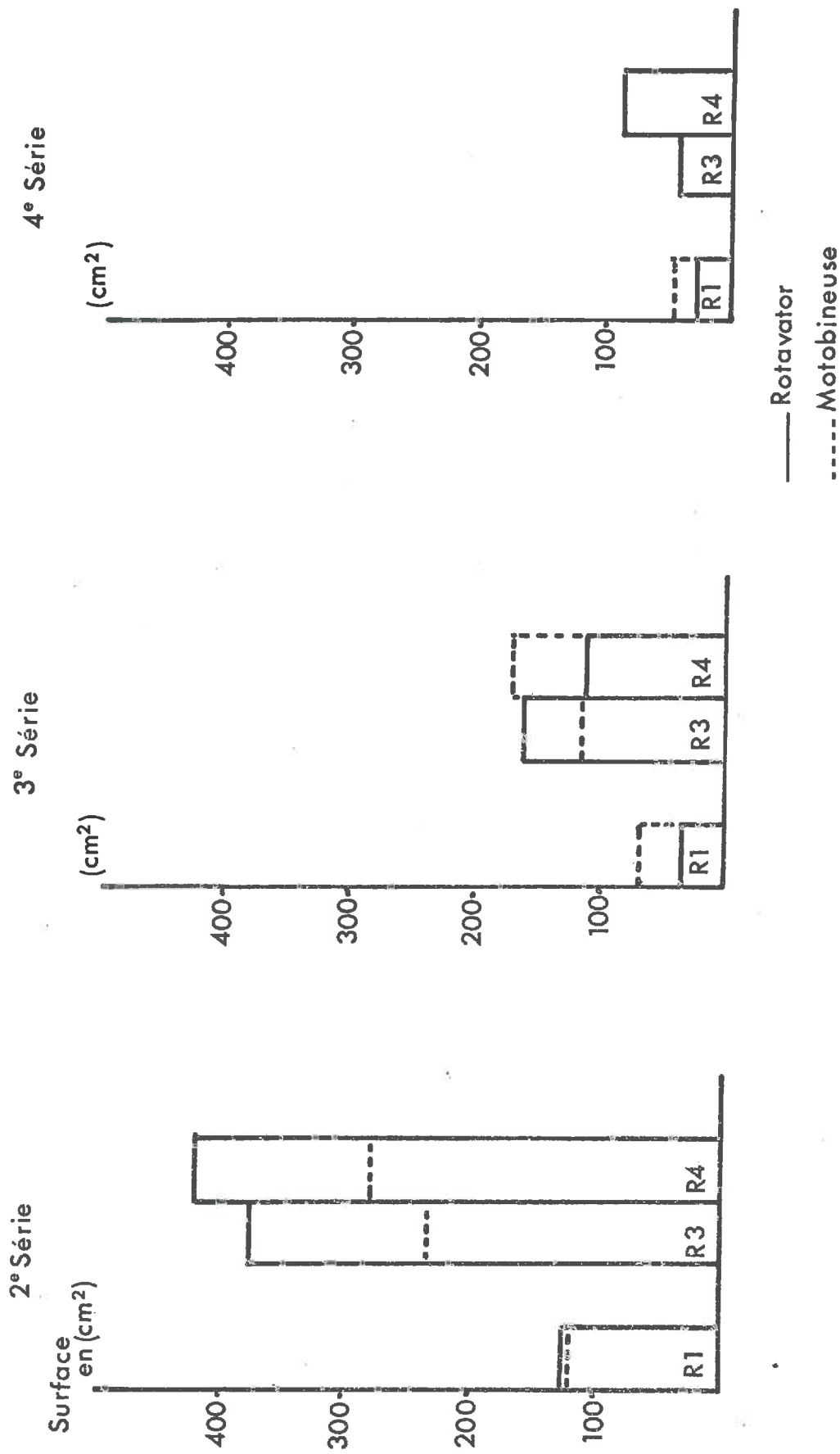


Fig.12 SURFACES DES ORNIERES

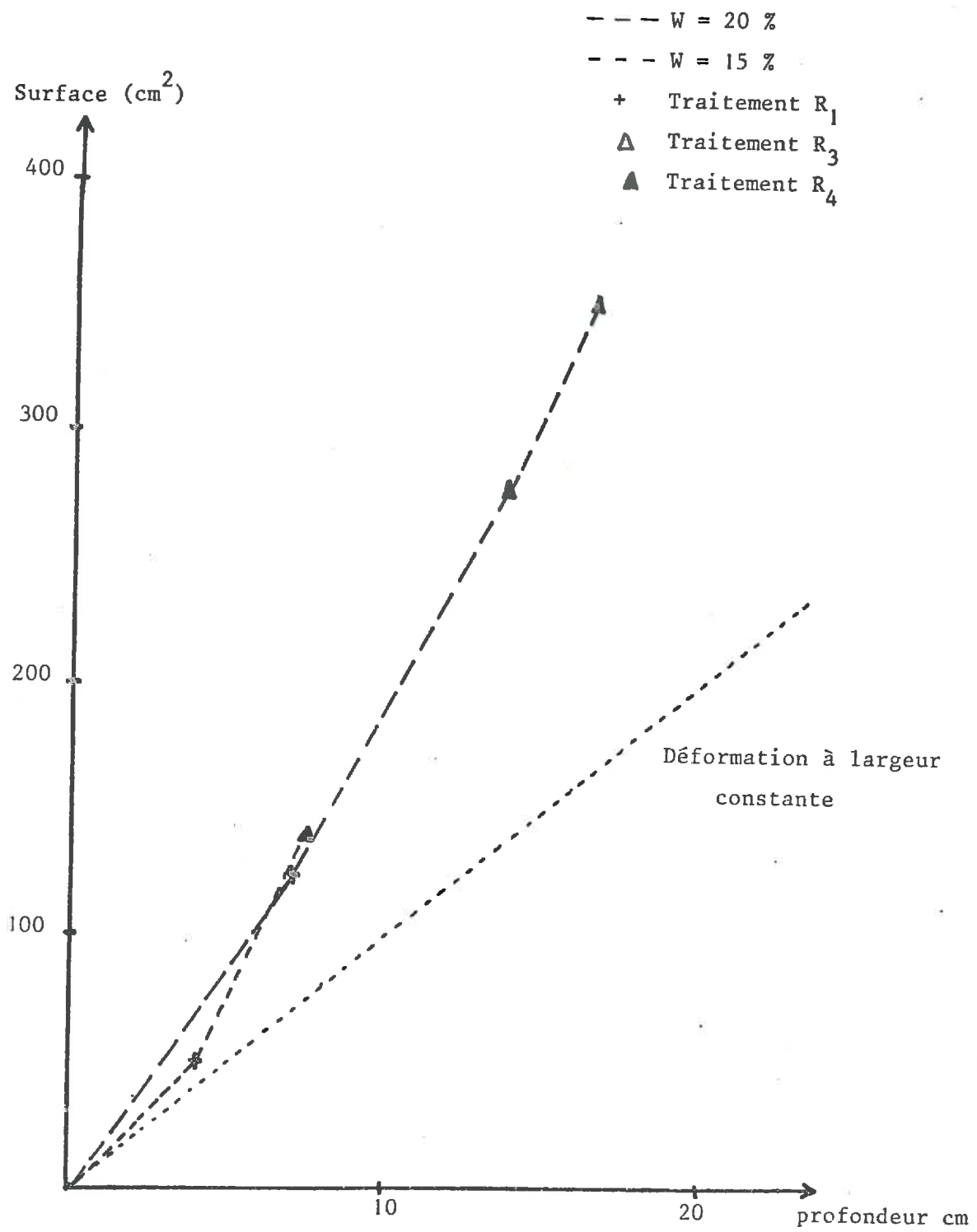


FIG. 13. : Relation entre la profondeur de l'ornièrre et sa surface

212. La "Surface" des déformations.

Cette surface correspond à la projection des Ornières sur un plan vertical perpendiculaire à leur direction.

Cette mesure permet l'évaluation de la déformation totale. La confrontation des figures 11 et 12 montre que lorsque la charge de la remorque augmente, la déformation totale croît plus rapidement que sa profondeur. Le graphe de la figure 13 montre qu'il y a aussi élargissement de la déformation lorsque la charge augmente.

La profondeur seule ne permet pas de caractériser les déformations.

2-2. Relation entre la déformation et le tassement structural.

La comparaison des résultats d'aspérimétrie et des variations d'indice des vides structuraux montre que la déformation et le tassement structural évoluent dans le même sens (fig. 14). Ainsi toute déformation du sol (ornière sans bourrelet) se traduit par un tassement structural au voisinage de la zone déformée. On peut donc penser que les différentes techniques de mesure que nous avons employées permettent une bonne approche de l'étude du comportement du sol : elles ont en outre l'avantage d'être complémentaires comme nous le verrons dans le paragraphe suivant.

2-3. Confrontation des résultats d'aspérimétrie et des variations d' e_s : cas des 2e et 3e manipulations.

231. Intérêt : calcul du volume affecté par le tassement.

L'étude de la variation de la porosité structurale a montré que, pour ces deux humidités de roulage, le compactage n'affecte que la couche travaillée. Les variations de volume ne pouvant être expliquées par les variations de compacité de la couche située sous la déformation (augmentation de compacité plus faible que la diminution de volume), la largeur de la zone tassée est nécessairement supérieure à la largeur de l'ornière.

Or d'un point de vue agronomique, on s'intéresse à la perte de porosité structurale consécutive au passage des différents engins agricoles mais aussi à l'importance du volume affecté par le tassement. On peut schématiser cette importance par le rapport de la largeur tassée sur la largeur correspondant aux bandes de roulement.

232. Principe et calcul.

Avant de procéder au calcul de ce volume, nous formulerons certaines hypothèses :

- La répartition moyenne du poids volumique dans la zone tassée est supposée être régulière.
- La mesure de γ_d^D sous la roue est représentative de γ_d^D dans l'ensemble du bulbe.
- Les variations de γ_d^D selon les traitements sont plus importantes que les risques d'erreur dues à nos techniques de mesure.

--- W de Roulage = 20 %

- - - W de Roulage = 15 %

+ Mesure après traitement R₁

▲ Mesure après traitement R₃

▲ Mesure après traitement R₄

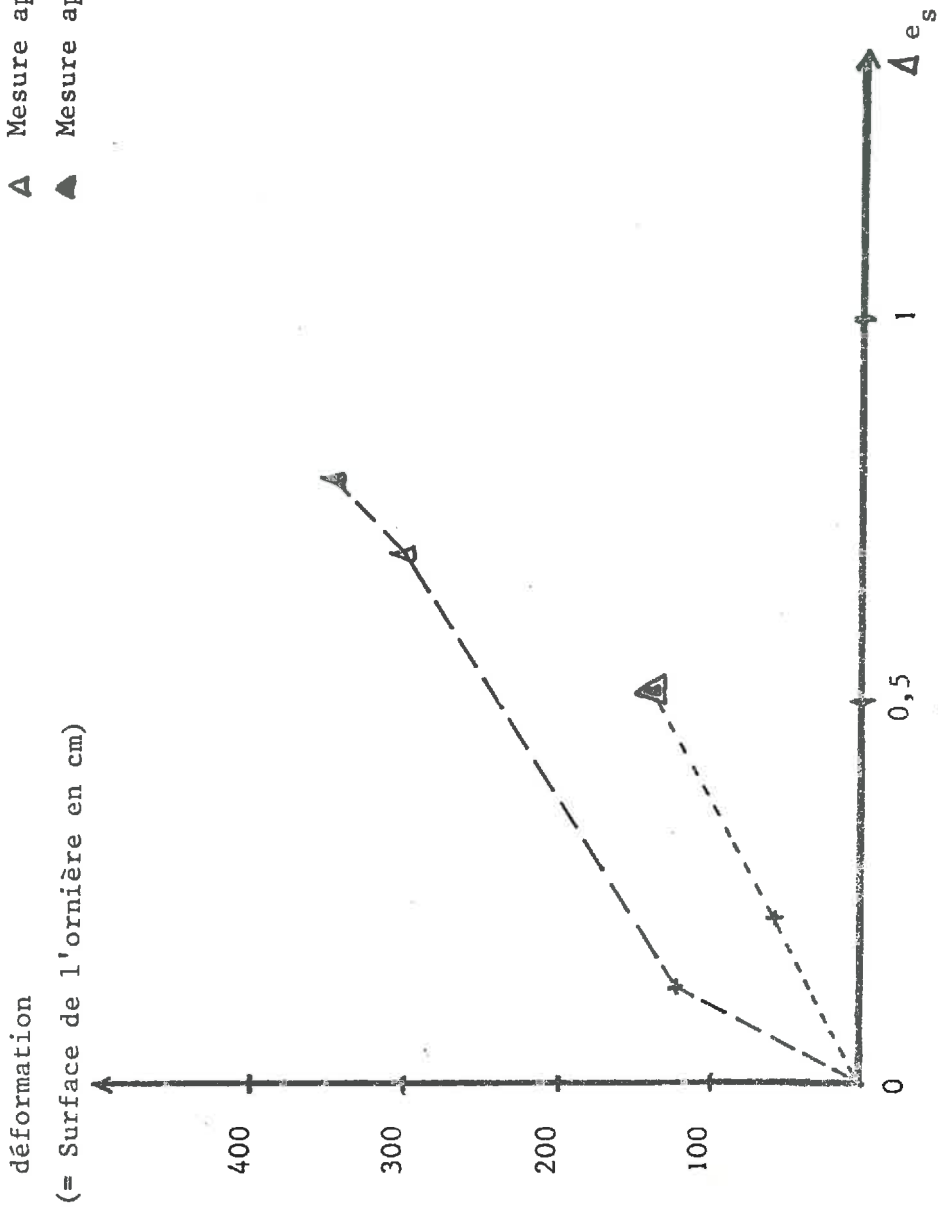


FIG. 14. : Relation entre le Tassement et la Déformation.

- Le volume calculé par cette méthode est donc celui d'un bulbe équivalent dont la masse est ramenée par le calcul au poids volumique moyen mesuré.

$$V_i \times \gamma_i = V_f \times \gamma_f$$

$$\Delta V = V_i - V_f$$

$$V_f \cdot \gamma_f = (\Delta V + V_f) \gamma_i$$

$$V_f (\gamma_f - \gamma_i) = \Delta V \gamma_i$$

$$V_f = \frac{\Delta V}{\frac{\gamma_f}{\gamma_i} - 1}$$

Les différents symboles utilisés dans ce calcul sont définis par la figure n° 15.

Les résultats sont portés dans le tableau suivant :

	2e Série			3e Série		
	R ₁	R ₃	R ₄	R ₁	R ₃	R ₄
ΔS (surf. ornière cm)	121	306	352,22	55,6	138,35	141,15
γ_i	0,92	0,92	0,92	0,98	0,98	0,98
γ_F	0,98	1,27	1,28	1,07	1,19	1,20
Surface de l'anneau compacté	1855	804	900	605,42	645,63	628,76
$S_F / \Delta S$ ornière	15	2,6	2,6	10,89	4,67	4,45

- Cas des traitements R₃ et R₄.

D'après ce calcul, le rapport de la surface du bulbe de tassement à la surface de l'ornière varierait entre 2,5 et 4,5.

Le tassement n'ayant jamais affecté la couche située sous le travail, l'épaisseur du bulbe de tassement est nécessairement comprise entre 10 et 15 cm. Par conséquent, pour les traitements R₃ et R₄ on peut penser que la largeur du bulbe se situe entre 50 et 80 cm. La largeur moyenne des déformations correspondant à ces traitements étant de 15 à 20 cm, nous pouvons écrire :

$$\frac{\text{Largeur tassée}}{\text{Largeur bande de roulement}} = 2,5 \text{ à } 4,5.$$

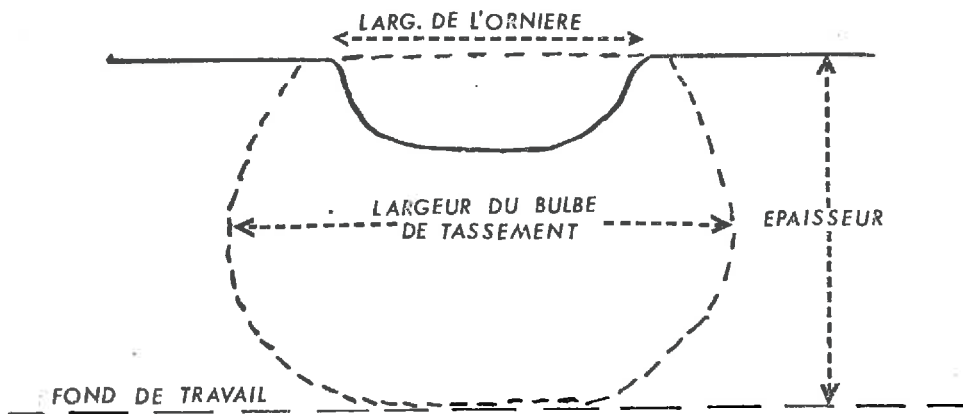
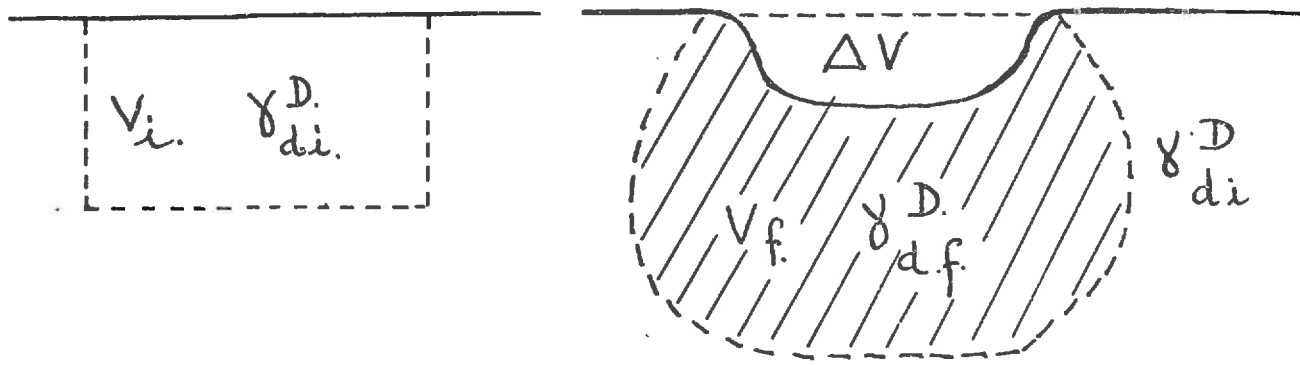


Fig.15 Définition des Symboles employés dans le calcul des déformations

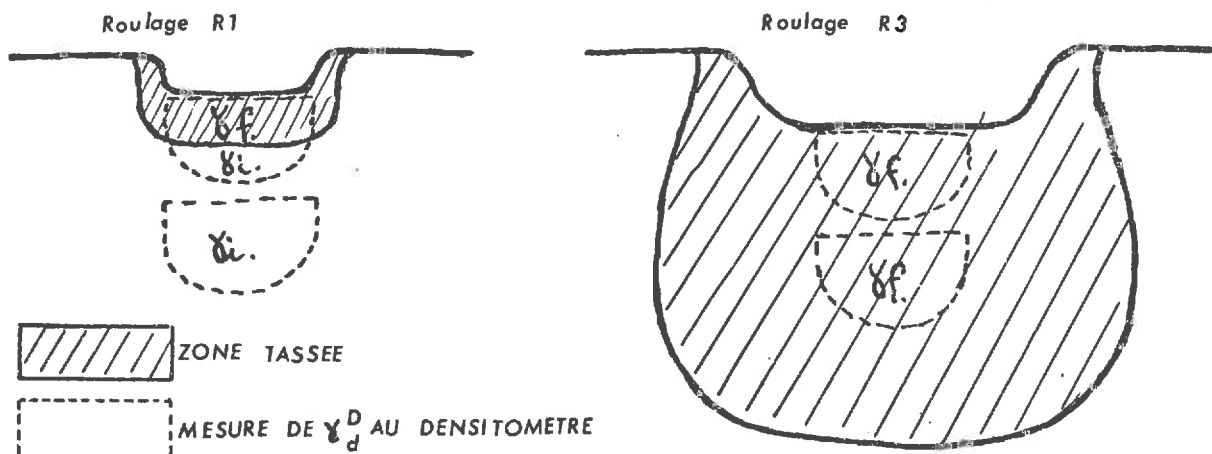


FIG. 16. : Problème de la représentativité des mesures de γ_d^D par le densitomètre à membrane

Compte tenu des hypothèses simplificatrices adoptées en ce qui concerne la répartition des poids volumiques du sol en place, ce calcul ne permet pas d'évaluer avec précision l'importance du volume affecté par le tassement, mais il en donne l'ordre de grandeur qui est toujours supérieur au volume des déformations.

_ Cas des traitements R_1 et R_2 .

Un calcul identique réalisé avec les variations enregistrées pour le traitement R_1 conduit à des résultats aberrants : le volume tassé (quinze fois supérieur à celui de la déformation) serait d'autant plus important que l'énergie de compactage est plus faible, ce qui ne peut être accepté compte tenu de la répartition des pressions dans le bulbe. On peut penser que les techniques de mesure dont nous disposons ne soient pas assez précises pour quantifier les faibles déformations enregistrées ou les augmentations réduites de compacité. Une simple erreur de 10 % sur chaque mesure du poids volumique ne permet pas de définir l'augmentation réelle de compacité et le rapport γ_g / γ_i perd toute sa signification.

D'autre part, on peut penser que la mesure du poids volumique est peut être représentative dans le cas des traitements R_3 et R_4 et qu'elle ne l'est plus dans le cas des traitements R_1 et R_2 (fig. 16).

Quoi qu'il en soit, ces résultats permettent de situer l'ordre de grandeur de l'importance du bulbe de tassement qui est toujours supérieur à celle de la déformation. Des techniques de mesure plus précises devraient permettre d'en apprécier la valeur de façon plus rigoureuse.

3 - Conséquences.

Cette étude du comportement mécanique au champ a montré que le travail du sol avait des effets sur son état physique. Nous avons décrit le résultat de son action par analyse de la porosité, et nous avons alors constaté que le travail du sol avait pour conséquence une augmentation des vides structuraux.

Cependant, l'étude du compactage a montré que l'espace poral créé par le travail du sol était très fragile. Un seul passage d'un engin agricole (ici la remorque) peut suffire pour annuler la porosité créée par les façons culturales antérieures. Or, nos essais se sont déroulés aux humidités habituelles de travail du sol. Ils peuvent être considérés comme une représentation proche des problèmes rencontrés en agriculture. Enfin nous avons essayé de démontrer que la largeur du tassement occasionné par le passage des engins agricoles est supérieure à celle de leur bande de roulement. Les effets du travail du sol sur l'amélioration de l'état physique peuvent donc paraître limités.

Cette étude nous a montré également que les comportements mécaniques d'un sol *in situ* ne dépendaient de l'état physique que pour des variations importantes de son état structural. Il ne nous paraît donc pas nécessaire d'étudier le comportement mécanique de sol dont les états structuraux résultent de l'action

de matériels de même type.

Enfin ces résultats ne peuvent être élargis à toutes les situations et il est nécessaire de les replacer dans la loi de comportement mécanique général des sols agricoles. Les méthodes d'études au laboratoire permettant de se détacher des facteurs extérieurs contraignants, il nous paraît intéressant d'étudier le comportement mécanique des sols par les tests de laboratoire.

C'est pourquoi, dans le chapitre suivant, nous essayerons de voir si, dans des limites d'états structuraux assez proches, le comportement mécanique d'un sol in situ peut être intuité par les résultats des tests de laboratoire.

CHAPITRE III COMPARAISON DU COMPACTAGE AU LABORATOIRE ET DU COMPACTAGE AU CHAMP.

I - Le compactage au laboratoire du matériau des Vignères.

1- Influence de l'énergie (fig. n° 17).

Le compactage est effectué dans les conditions standard, sur le matériau tamisé à 2 mm. Nous avons testé le comportement du matériau à 2 énergies différentes : 6 kg.cm/cm^3 et $1,5 \text{ kg.cm/cm}^3$.

On remarque que lorsque l'énergie augmente, la courbe est déplacée vers des compacités plus fortes et des teneurs en eau plus faibles. Ainsi l'optimum est plus rapidement atteint (W plus faible) et la compacité de l'échantillon est plus élevée. La position du point singulier dépend également de l'énergie : lorsque celle-ci est plus élevée, la teneur en eau nécessaire à l'entrée en plasticité du matériau est plus faible.

, La position de ces 2 courbes devrait nous permettre de situer les énergies de compactage appliquées sur le terrain.

2 - Influence de l'état structural (fig. n° 18).

Les effets de l'état structural sur le comportement du matériau au compactage sont étudiés à l'aide d'échantillons tamisés de façons différentes :

- 1er échantillon : matériau tamisé à 0-2 mm.
- 2ème échantillon : matériau tamisé à 0-5 mm.
- 3ème échantillon : matériau tamisé à 2-5 mm.

Le compactage réalisé dans les conditions standard à l'énergie de 6 kg cm/cm^3 a donné les résultats suivants :

- Le seuil de sensibilité au compactage du matériau est indépendant de l'état structural : nous constatons que le matériau des Vignères suit bien la loi de comportement général. Sa compacité augmente rapidement après le seuil de sensibilité défini par $W_s = 12,5 \%$.

La teneur en argile du matériau étant voisine de 41 %, le rapport W_s/A est proche de 30 %. Il se situe donc bien dans la plage des valeurs obtenues avec les sols agricoles (FAURE - 1974).

- Le comportement du matériau au compactage ne dépend de la granulométrie des agrégats que pour des teneurs en eau inférieures à W_s . On remarque que plus l'échantillon est tamisé finement, plus sa compacité après compactage est élevée. En outre l'étalement de la granulométrie des agrégats affecte le comportement au compactage du matériau. A ces teneurs en eau la valeur de la compacité du matériau peut être considérée comme étant la résultante de deux actions antagonistes :

- le gonflement de la phase argileuse diminue le poids volumique sec de l'échantillon compacté.

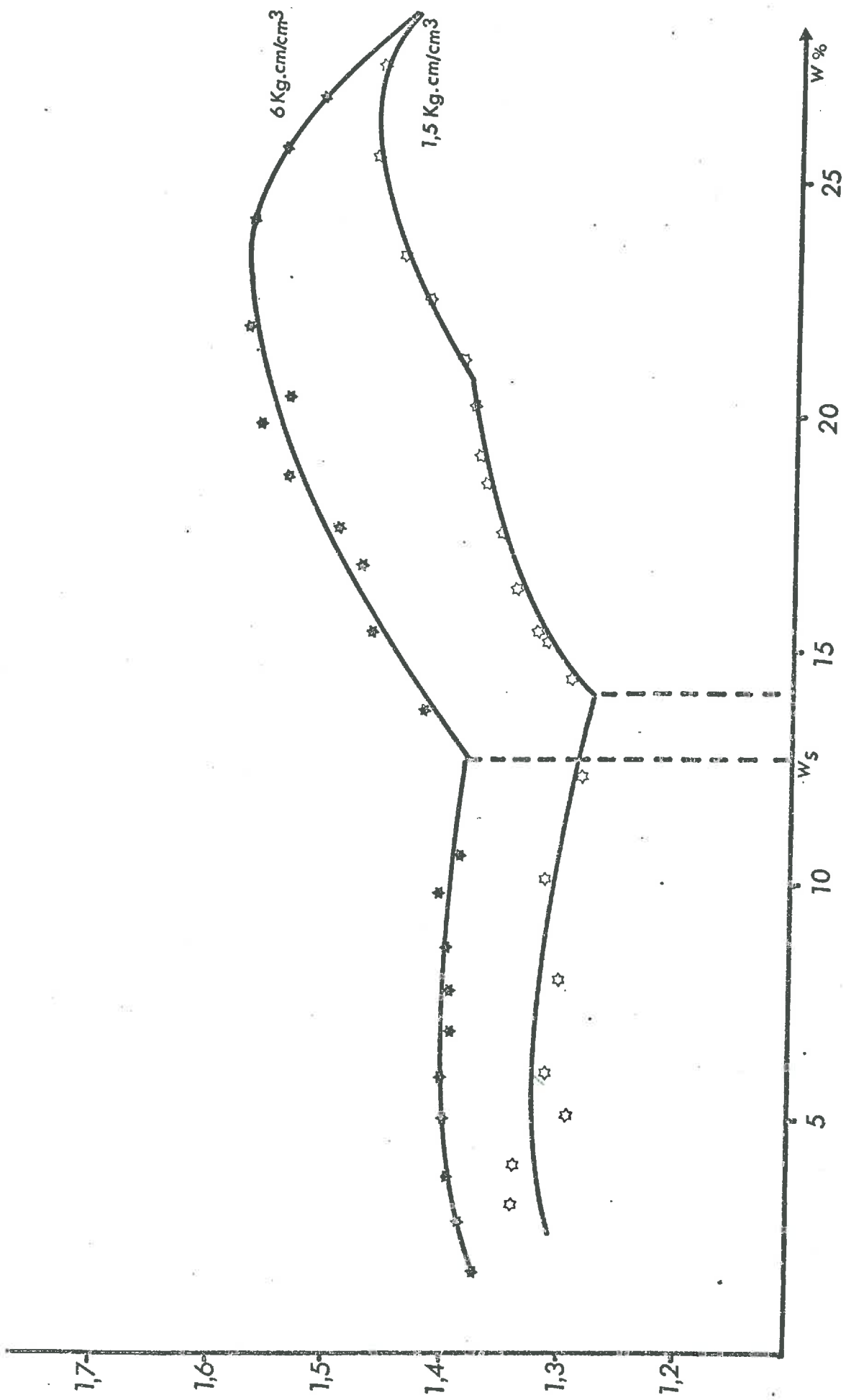


Fig. n° 17 : Le comptage Proctor
Influence de l'énergie de compactage

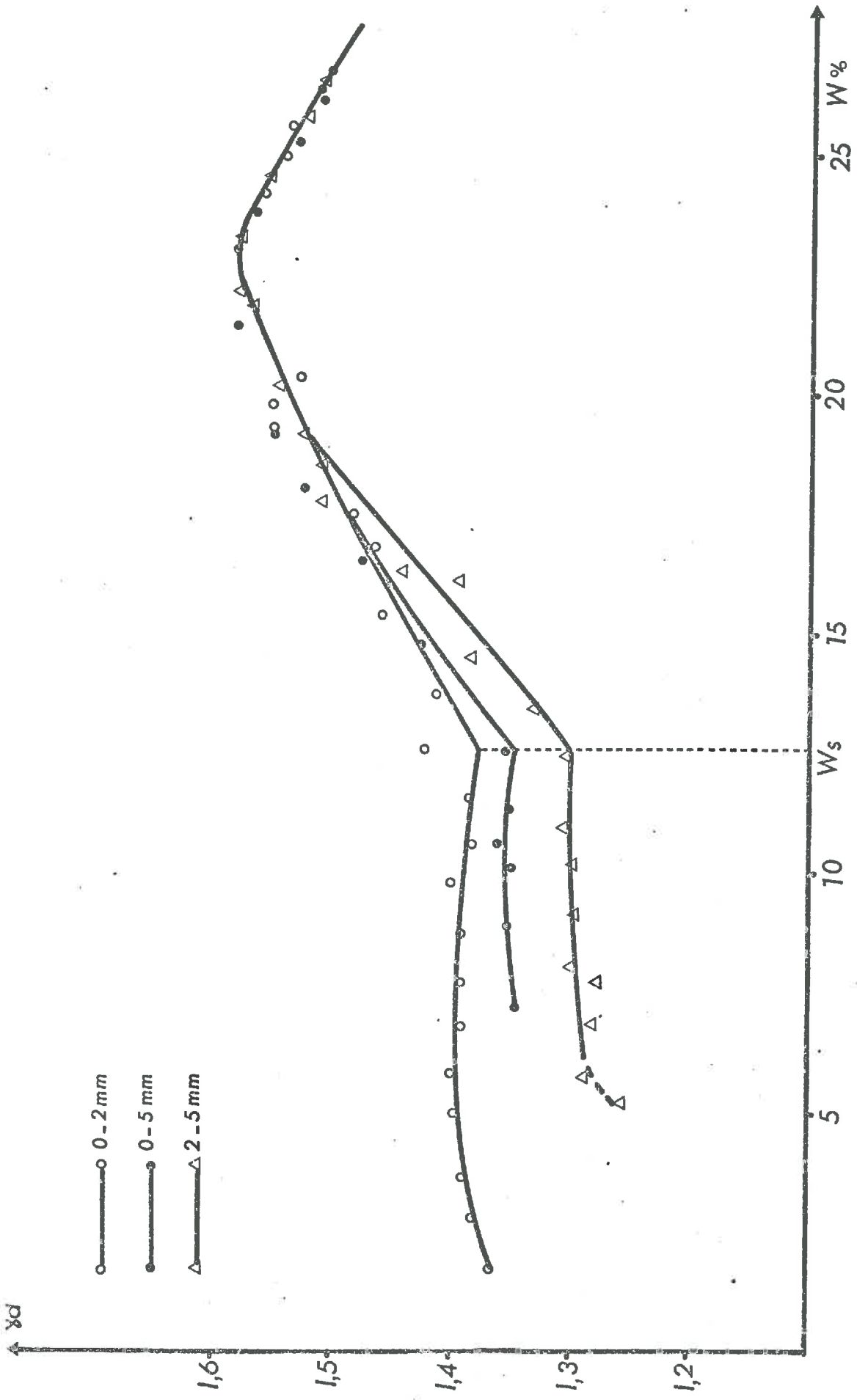


Fig. n° 18 : Le compactage Proctor :
Influence de la granulométrie initiale des agrégats

- Le concassage des agrégats favorise leur arrangement dans le moule.

II - Confrontation des résultats du compactage au champ et des résultats de laboratoire.

1 - Influence de l'état structural.

L'étude du compactage au champ (chapitre II) a montré que la taille des mottes ne modifiait le comportement du sol au compactage que pour les très faibles teneurs en eau (seule différence significative entre Rotavator et Motobineuse pour $W = 10 \%$).

De la même façon, nous venons de voir qu'au laboratoire la compacité du matériau après compactage ne dépendait de la granulométrie des agrégats que pour les teneurs en eau inférieures à $W_s = 12,5 \%$.

Par conséquent, l'étude du comportement mécanique d'un sol ne nécessite pas la prise en considération des effets de son état structural, lorsqu'il résulte de façons culturales voisines. Les méthodes d'étude au laboratoire permettent alors une bonne analyse des phénomènes physiques, rencontrés sur le terrain.

2 - Influence de l'humidité et de l'énergie.

Quelle que soit la méthode d'étude adoptée (test au laboratoire ou essais au champ) on constate que l'humidité et l'énergie sont les facteurs prédominants du compactage.

Nous avons donc porté les résultats des essais au champ sur un graphe où sont représentés les courbes Proctor obtenues au laboratoire avec le même matériau. On remarque que ces résultats ne sont pas qualitativement différents de ceux obtenus lors du test Proctor (figure n° 19).

Nous nous sommes inspirés de l'allure générale classique des courbes Proctor pour relier entre eux les points représentatifs des résultats in situ. Le nombre restreint de points dont nous disposions ne nous a pas permis de tracer ces courbes avec précision. Cependant, il est possible d'en dessiner l'allure générale et de les placer sur le graphique. Il est même possible de situer approximativement la position des différents points singuliers.

La comparaison de ces différentes courbes montre que les énergies de compactage appliquées sur le terrain sont plus faibles que celles pratiquées dans le test Proctor. L'ensemble des courbes des résultats in situ est déplacé vers les humidités plus fortes et les compacités plus faibles. Cependant, il nous est encore impossible de définir une véritable équivalence énergétique entre le compactage au laboratoire et le compactage in situ.

Comme au laboratoire, la position des points singuliers des courbes obtenues avec les différents roulages est conditionnée par l'énergie de compactage. L'humidité W_s nécessaire à l'entrée en plasticité du matériau est effec-

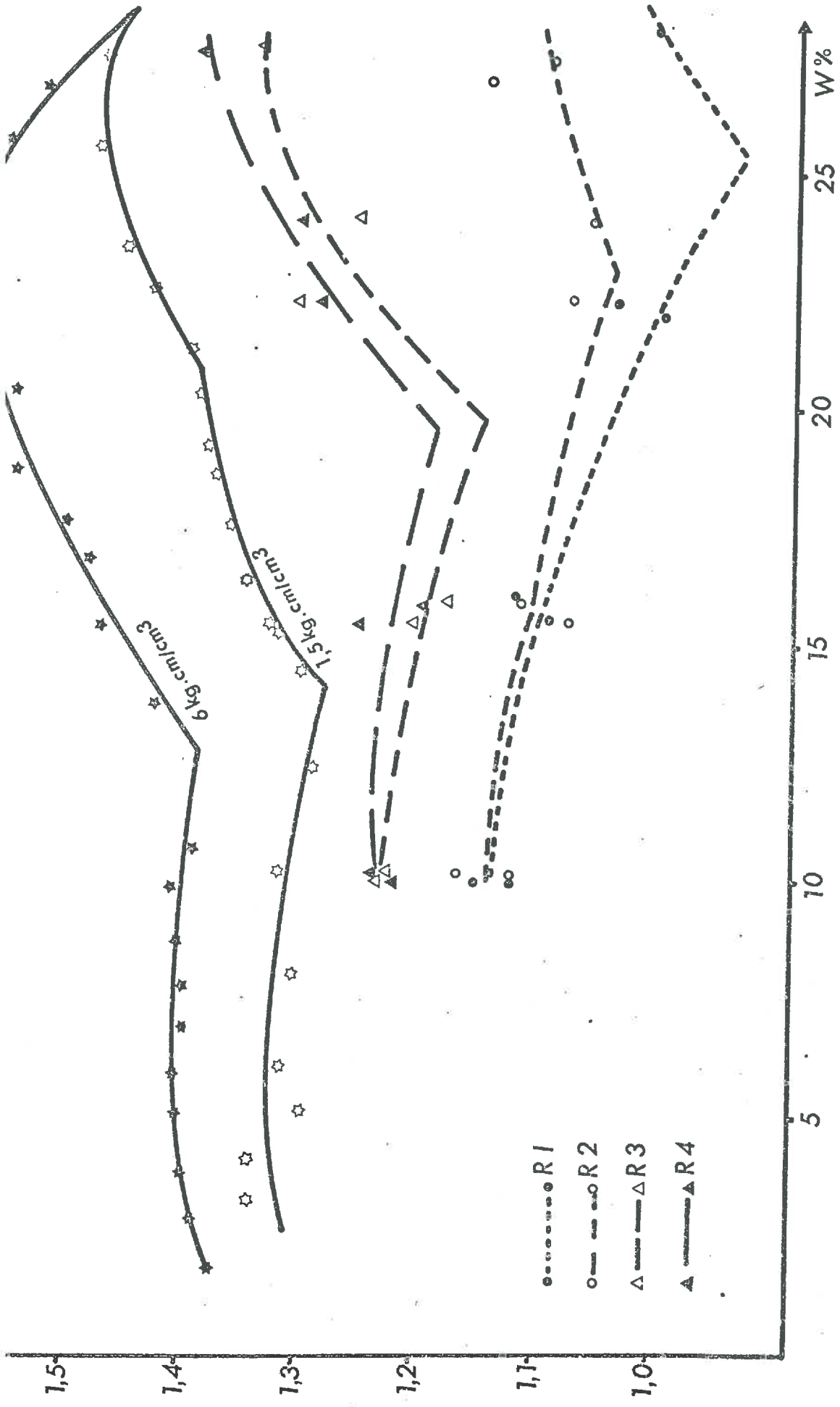


Fig n° 19 Resultats du compactage au laboratoire et du compactage au champ.

tivement plus élevée lorsque l'énergie de roulage est plus faible.

On peut alors essayer d'expliquer certains comportements mécaniques observés sur le terrain. Ainsi, nous avons constaté au champ que la différence de compacité résultant des traitements R_1 , R_2 et R_3, R_4 était plus importante lorsque la teneur en eau lors du compactage augmentait (interaction entre les niveaux d'énergie et l'humidité). La comparaison des différentes courbes de compactage peut donner l'explication suivante :

Lors de la 3e série d'essais au champ ($W = 16 \%$), on peut penser que quel que soit le niveau d'énergie appliqué, on se situe pour l'ensemble des courbes avant le point singulier. Les compacités du sol respectives à chaque niveau de traitement sont peu différentes.

Par contre, lors de la 2e série ($W = 22\%$), pour les énergies correspondantes aux traitements R_1 et R_2 , la compacité a peu évolué (partie de la courbe située avant le point singulier) alors que pour les fortes énergies (R_3 et R_4) le matériau est déjà entré en plasticité et la compacité du matériau augmente rapidement. On distingue alors plus nettement les effets des 2 niveaux d'énergie.

III - Conclusion.

Cette confrontation des résultats a montré que les tests de laboratoire permettent une bonne approche des réalités du terrain. Or l'étude au laboratoire a l'avantage d'être moins contingente des facteurs extérieurs non contrôlables, le climat par exemple.

Nous avons également pu constater que, pour des faibles variations de l'état structural initial, le comportement mécanique des sols pouvait être expliqué par les tests au laboratoire.

Cependant, certains facteurs du comportement mécanique des sols ne sont encore que partiellement connus (rôle des matières organiques, mécanismes de structuration, etc...). L'élargissement de nos conclusions à d'autres matériaux nécessite donc l'étude approfondie des effets de ces facteurs.

C O N C L U S I O N

Cette étude a montré que le travail du sol se traduit par une augmentation de la porosité structurale que nous avons pu évaluer par la combinaison de deux techniques de mesures : l'aspérimétrie et la densitométrie. Cependant, cet espace poral est fragile. Parmi les facteurs de dégradation de l'état physique, le tassement par les engins agricoles constitue bien un risque important compte tenu de leur alourdissement, de la fréquence de leurs passages et de leurs époques d'utilisation. Nous avons pu constater, que le roulage du matériel agricole réduisait fortement l'importance des vides structuraux dans un sol travaillé, mais aussi que l'augmentation de compacité affectait une zone nettement plus large que les traces laissées par les bandes de roulement. Des techniques de mesure plus précises, la radiométrie par exemple, devraient permettre de définir de façon plus rigoureuse ces variations de compacité et l'importance des volumes tassés.

On peut donc penser que dans certains cas une suppression ou une diminution du travail du sol permettrait une économie de moyens sans pour autant nuire à l'état physique du sol.

Le comportement mécanique du sol travaillé s'est avéré être indépendant de l'état structural initial du matériau dans la mesure où celui-ci ne présentait que de faibles variations. On peut donc se limiter à l'étude des effets de quelques états structuraux résultant de l'utilisation de matériels nettement différenciés.

Une confrontation des méthodes d'étude au laboratoire et in situ a permis de constater que les tests de laboratoire constituaient une bonne approche des réalités du terrain. Le comportement des sols soumis au roulage peut s'interpréter à l'aide des lois mises en évidence par les tests de compactage. Les relations entre constitution et comportement mécanique du matériau sont donc utilisables pour prévoir, dans d'autres types de sols, le sens de variation des résultats que nous avons obtenus. Cependant une prévision quantitative d'évolution structurale sous les effets d'un roulage est encore impossible. En effet :

- Le problème de l'équivalence énergétique entre le roulage et le compactage au laboratoire n'est pas encore résolu.

- Au champ, l'existence de gradients hydriques rendent le matériau hétérogène.

- Les variations d'épaisseur de la couche travaillée modifient les mécanismes du comportement des sols.

- Enfin, la présence de matières organiques et de racines perturbent l'étude de ces phénomènes.

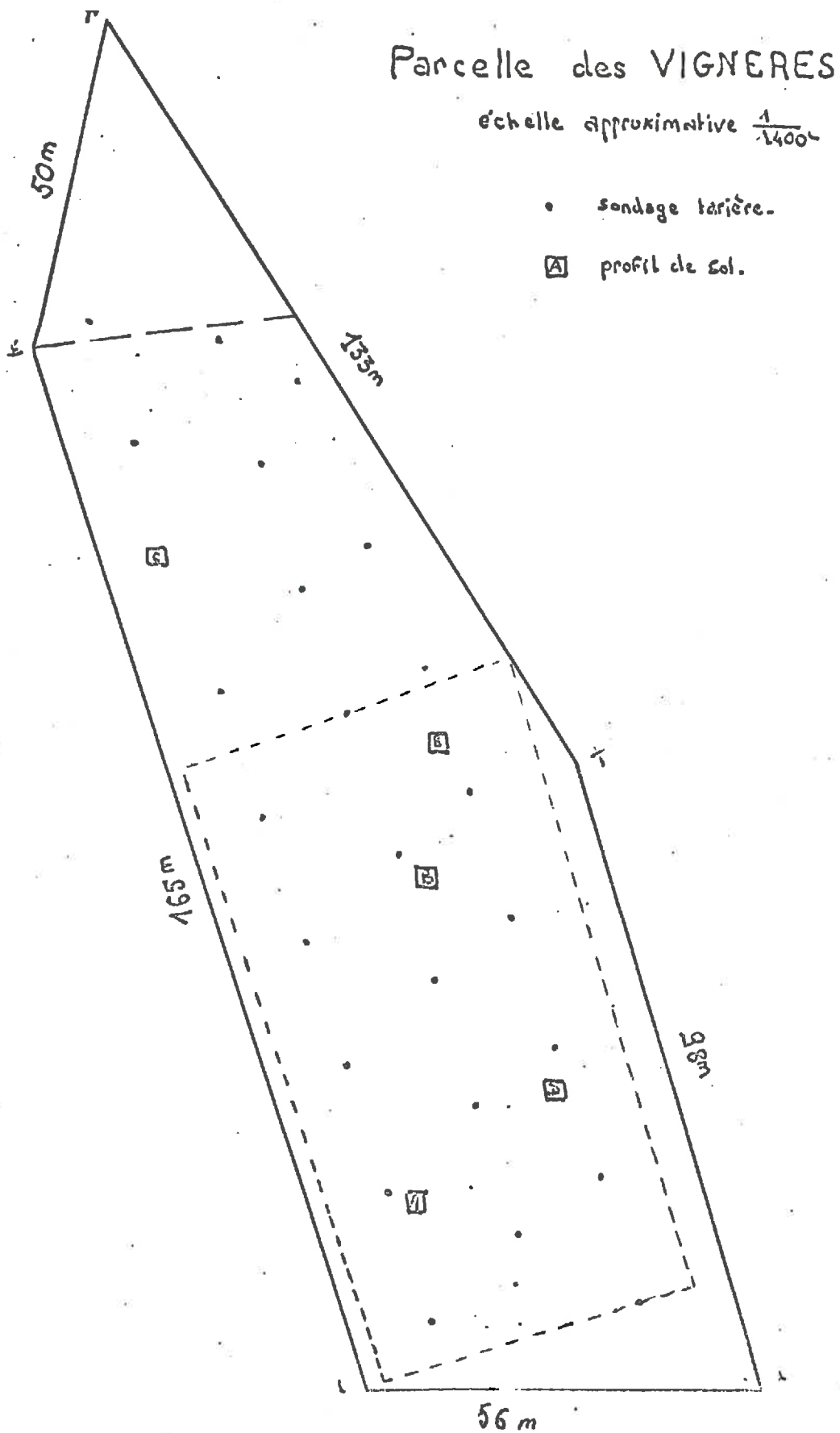
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- FAURE A. - Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols.
Ann. Agron. 1971, 22 (5), 487-513.
- FAURE A., FIES J.C. - Etude expérimentale de la sensibilité au compactage des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique.
Ann. Agron. 1972, 23 (3), 317-332.
- FAURE A., FIES J.C., MONNIER G. - Comportement des sols soumis au roulage.
Station d'Agronomie I.N.R.A., Centre de Recherche d'Avignon, 1973.
- FAURE A. - Des caractéristiques mécaniques de la fraction argileuse dans le mécanisme de tassement des sols. C.R. Acad. Sc. Paris, t 278 (25 février 1974), Série D, 1175-1178.
- MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C. - 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), 533-545.
- SOANE BD, CAMPBELL D.J., HERKES S.M., 1970. Cultivations in relation to continuous barley growing : II Soil physical properties. Proc. Int. Conf. Tillage Res. Methods, 58-76.
- SOANE B.D., CAMPBELL D.J., HERKES S.M., 1971. - The effect of wheel traffic and cultivation of rasp berries on soil physical properties.
N.I.A.E. Scottish Station Departemental Note SSN/68.
- STENGEL P. - Influence du non travail du sol sur sa porosité en rotation céréalière. C.R. Acad. Agr. France, 1975, 881-894.
- STENGEL P. - Evolution de l'état physique en sol non travaillé. 1976, à paraître.

A N N E X E S

Annexe 1 : LE SOL. PARCELLE DES VIGNERES

1. Plan de la parcelle



2 Plan de l'essai

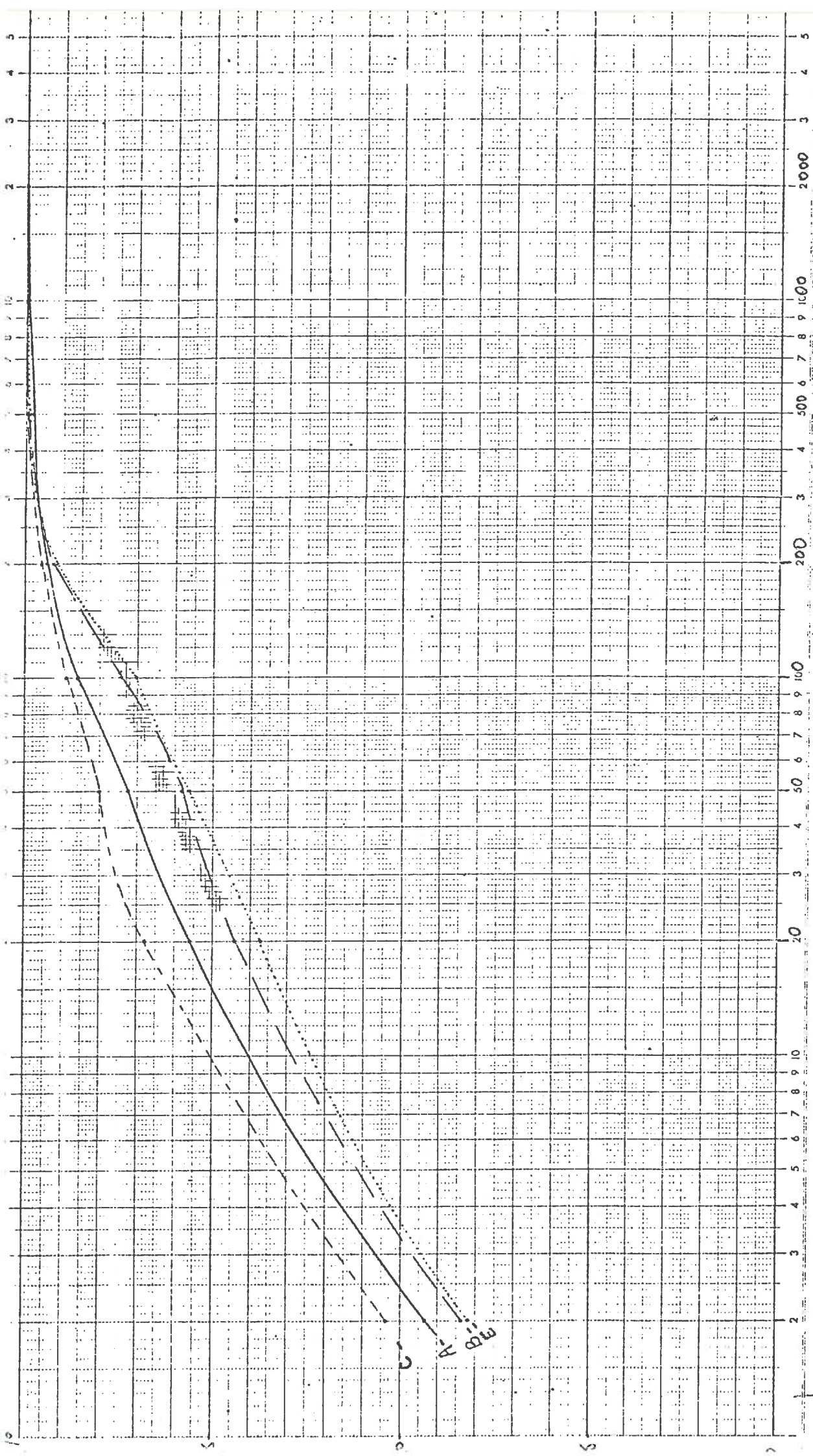
Témoins	Rotat.	MoTob.	
R1 R2 R3 R4	_____ _____ _____ _____	_____ _____ _____ _____	1 ^{er} Série
			2 ^e S.
			3 ^e S.
			4 ^e S.

3 - ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Pro-Fil	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	500-1000 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	
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	
E	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	

4 - 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



ϕ particles

Annexe II : APPAREILS UTILISES POUR LES MESURES DE TASSEMENT
OU DE DEFORMATION :

1°). Le densitomètre à membrane.

(d'après la convention INRA-EDF.)

Cet appareil permet de mesurer sur le terrain un volume apparent de sol en place, de l'ordre de 1000 à 2000 centimètres cubes.

L'appareil essentiellement constitué d'un piston mobile à l'intérieur d'un cylindre rempli d'eau. La base du cylindre est une membrane en latex. On creuse avec soin la couche de sol à étudier, de façon à délimiter une cavité régulière, de forme hémisphérique, sans tasser le matériau sur les bords. Le volume de cette cavité est mesuré au densitomètre, une poussée imprimée au piston assure la placage de la membrane sur les parois de la cavité. A l'équilibre, une échelle graduée sur l'axe du piston permet de lire directement le volume occupé par l'eau à l'intérieur de la membrane. Une mesure avant creusement permet de faire un point zéro qui tient compte notamment des irrégularités de surface de la couche. La différence entre les deux lectures donne le volume apparent occupé par le matériau. La terre extraite est recueillie intégralement dans un récipient hermétique. Son poids sec et son humidité sont déterminés au laboratoire et permettent de calculer à 10% près le poids volumique apparent du matériau à l'humidité du terrain au moment de la mesure.

2°). 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 CARACTERISTIQUES DE LA REMORQUE :

1) Poids.

Poids à vide : 250 kg.

Poids à charge : 1250 kg.

2) Largeurs des bandes de roulement :

sur terrain ferme : remorque vide 9 cm.

remorque pleine. 10,5 cm

sur terrain meuble : 16. 18 cm.

3) Surfaces de contact :

sur terrain ferme : remorque vide $12 \times 9 = 108 \text{ cm}^2$

remorque pleine : $26 \times 10,5 = 273 \text{ cm}^2$

sur terrain meuble : remorque pleine : $26 \times 16 = 416 \text{ cm}^2$

4) Pressions de gonflage :

remorque vide : 1,950 kg/cm²

remorque pleine : 2,050 kg/cm²

5) Calcul à proximatif des Pressions contact.

sur terrain ferme : remorque vide : $\frac{250}{2 \times 108} = 1,15 \text{ kg/cm}^2$

remorque pleine : $\frac{1250}{2 \times 273} = 2,29 \text{ kg/cm}^2$

sur terrain meuble : remorque pleine : $\frac{1250}{2 \times 416} = 1,5 \text{ kg/cm}^2$
(limite inférieure)