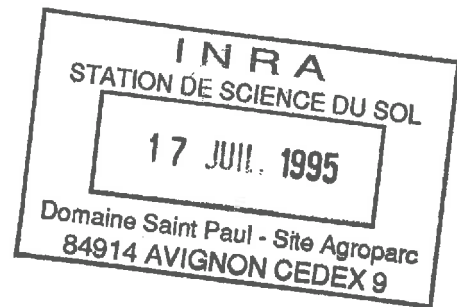


TH - GE 7⁸⁵¹

Institut National Agronomique
de PARIS - GRIGNON

Septembre 1972



INFLUENCE DU TRAVAIL DU SOL
SUR LA POROSITE

D. de La Mettrie

(Chaire d'Agriculture
3ème année)

Cette étude a été menée sous la Direction de Monsieur A. RECAMIER qui a bien voulu nous diriger au cours de sa réalisation.

Les diverses manipulations ont été exécutées à l'INRA, au Laboratoire de Monsieur MONNIER.

Monsieur TRI nous a guidé de ses conseils et le personnel du Laboratoire nous a initié aux manipulations.

L'appui de Messieurs HUET et FOURBET nous a été également précieux.

Qu'ils veuillent bien trouver ici l'expression de notre gratitude.

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

Les recherches sur le travail du sol connaissent à l'heure actuelle un regain d'intérêt en France.

Un ensemble de faits nouveaux justifie les études entreprises.

Citons :

- l'implantation de cultures nouvelles dans certaines régions : maïs, blé dur, tournesol, colza, prairie temporaire. Elles entraînent la mise au point de rotations nouvelles, et réduisent le nombre de jours disponibles pour les labours.
- l'apparition de machines nouvelles, venues souvent des U. S. A. où leur utilisation, là-bas, paraît être une réponse possible aux problèmes de l'érosion, telles que : les fraises-rotatives, les chisels, les herses-alternatives, les semoirs pour semis direct.
- ces différents matériels exigent une augmentation de la puissance du tracteur et soumettent le sol à un travail plus brutal que les méthodes conventionnelles. Ils permettent de "pénétrer" dans des terres lourdes, humides et battantes.
- la pratique généralisée des désherbages chimiques dont l'efficacité est souvent en relation avec l'état de compaction du sol.
- l'évolution de techniques de fertilisation: application localisée de l'azote liquide et épandage du lisier, par exemple.
- la nécessité de diminuer la pénibilité des travaux agricoles et de faire face au manque de personnel et à l'augmentation de son coût.

Peu à peu, le labour conventionnel se voit dépouillé de ses traditionnelles fonctions :

- de lutte contre les mauvaises herbes;
- de préparation de lit de semence;
- de préparation d'une structure d'accueil pour les racines;
- d'enfouissement de la nature organique et des éléments fertilisants;
- d'action sur la pénétration de l'eau et le ressuyage du sol;
- de lutte contre les érosions.

Le travail minimum n'est pas une panacée universelle; il constitue une technique élaborée qu'il faut maîtriser, pour pouvoir l'appliquer à chaque cas particulier : la diversité des situations interdit une réponse unique.

Faut-il contenir l'intérêt grandissant des agriculteurs, poussés par la dynamique économique, trop prompts parfois à généraliser et à systématiser des techniques aux conséquences lointaines, mal connues ?

A l'heure actuelle, il semble que la recherche doive canaliser l'engouement des exploitants vis-à-vis des fraises rotatives, à axe horizontal, au réglage de plus en plus précis, mais qu'elle soit par contre en avance quant à l'étude des conséquences du semis direct, sans aucun travail du sol, encore peu répandu.

Les effets de ces nouvelles pratiques sur l'état physique du sol n'apparaissent souvent qu'à long terme. Ils ont une implication sur la préservation du patrimoine foncier; aussi sont-ils souvent de longue durée.

Pour un même type de sol, trois questions fondamentales peuvent se poser à l'expérimentateur :

- une rotation est d'ores et déjà généralisée; que faut-il faire pour la maîtriser parfaitement ?
- quelle est la meilleure rotation à pratiquer en fonction d'une technique de préparation des terres déterminée ?
- quelle est l'évolution physique et chimique d'un sol soumis à plusieurs types de travail du sol sur une longue période ?

C'est à cette dernière question qu'ont choisi de répondre les responsables du S. E. I. de GRIGNON en mettant en place, dès 1966, une monoculture d'orge RIKA. Etait éliminé ainsi " l'effet rotation " sur la structure du sol. Toutes les pailles sont exportées.

La parcelle, A VI, est soumise à trois types de travail du sol :

- L0 : Semis direct avec semoir triple disque NODET;
- L1 : ROTAVATOR, à 8-10 cm de profondeur, et semis comme en L0;
- L2 : Labour conventionnel, à 20 cm.
semis identique.

Cette étude a pour but de décrire les conséquences sur la structure du sol de ces trois types de préparation.

S O M M A I R E

	Page
I - DESCRIPTION DE LA METHODE	1
1.1 - Présentation générale	2
1.2 - Détermination de la densité réelle	3
1.3 - Détermination de la densité apparente totale	4
1.4 - Détermination des densités apparentes mottières	5
1.5 - Détermination de la distribution dimensionnelle des agrégats	7
1.6 - Détermination de la densité texturale sèche	9
1.7 - Détermination de la densité texturale humide	10
1.8 - Etablissement de la courbe PELTIER	11
1.9 - Détermination d'une compaction de référence	13
1.10 - Analyse statistique	16
II - CONDITIONS EXPERIMENTALES	18
2.1 - Dispositif d'essai	19
2.2 - Prélèvements (Mars - Mai - Août)	19
2.3 - Déroulement chronologique des travaux agricoles	21
2.4 - Conditions climatiques de l'année	22
24.1 - Pluviométrie	
24.2 - Bilan hydrique	
24.3 - Températures	
2.5 - Caractéristiques du sol	26
25.1 - Caractéristiques texturales du sol	
25.2 - Caractéristiques structurales moyennes	
25.3 - Autres facteurs influençant le comportement structural	

	II
	Page
III - LES DENSITES	29
3.1 - Les résultats	30
31.1 - Les densités réelles	
3.2 - Relations entre les densités	30
32.1 - Liaison entre la densité réelle et la densité apparente mottière	
32.2 - Liaison entre la densité apparente mottière et la densité apparente totale	
3.3 - Différences entre les densités du mois de Mai et celles du mois d'Août	32
IV - LES POROSITES	36
4.1 - Porosité apparente totale	37
41.1 - Comparaisons entre traitements	37
411.1 - Pour l'ensemble du profil	
411.2 - En surface	
411.3 - En profondeur	
4.2 - Porosité apparente mottière	38
42.1 - Porosité apparente mottière totale	
42.2 - Porosité de fissures intra mottières	
4.3 - Porosité de fissures	38
4.4 - Porosité structurale	39
4.5 - Relations entre les porosités	39

	Page
45.1 - Influence de la porosité apparente mottière sur la porosité apparente totale	
45.2 - Influence de la porosité de fissures sur la porosité apparente totale	
45.3 - Influence de la porosité de fissures intra-mottière sur la porosité apparente totale	
 V - LE TAUX D'AGREGATION DU SOL	 43
5.1 - Résultats	44
5.2 - Le pourcentage d'agrégats < 10 mm	44
52.1 - Comparaison entre les traitements	
52.2 - Comparaison entre les résultats de Mars et de Mai	
52.3 - Comparaison entre niveaux	
52.4 - Relations entre le % d'agrégats < 10 mm et la porosité	
5.3 - L'épaisseur des fissures	46
53.1 - Résultats	
53.2 - Relation entre l'épaisseur des fissures et la porosité	
 VI - LES HUMIDITES	 47
6.1 - Les teneurs en eau	48
61.1 - Au niveau du sol en place	
61.2 - Au niveau des mottes	
61.3 - Comparaison des humidités entre sol en place et mottes	
6.2 - Mouvements de l'eau	52
62.1 - L ₀	
62.2 - L ₁	
62.3 - L ₂	
62.4 - Comparaisons des humidités	

	Page
6.3 - Relations entre les teneurs en eau et les porosité	54
63.1 - Au niveau de la porosité apparente totale	
63.2 - Au niveau de la porosité apparente mottière	
6.4 - Relations entre le gonflement et la porosité	54
64.1 - Liaison entre la teneur en eau et le gonflement au niveau des mottes	
64.2 - Liaison entre le gonflement et la porosité des fissures	
64.3 - Liaison entre le gonflement des mottes et le taux d'agrégation du sol	
6.5 - Relations entre les écarts d'humidité des mottes et du sol en place et l'épaisseur des fissures	55
VII - LE RENDEMENT ET SES COMPOSANTES	57
7.1 - Le rendement	58
7.2 - Les composantes	58
7.3 - Liaison éventuelle des composantes du rendement avec la porosité	58
VIII - CONCLUSIONS	60
ANNEXES BIBLIOGRAPHIQUES	

G R A P H I Q U E S

N°	<u>Pages</u>
1 - Courbe PELTIER	12 bis
2 - Relation entre l'humidité et le gonflement au niveau des mottes	12 ter
3 - Courbe de compaction PROCTOR	15 bis
4 - Influence de l'humidité sur la porosité structurale après compaction PROCTOR	15 ter
5 - Porosité perdue sous l'effet de la compaction	15 qu.
6 - Conditions climatiques de l'année : pluviométrie	22
7 - Bilan hydrique	23
8 - Températures : moyennes des maxima et des minima (Mars - Août 1972)	24 bis
9 - Courbe des températures cumulées en 1972 (du 15.3 au 15.8) : comparaison avec la courbe optimum	24 ter
10 - Relation entre la densité apparente totale et la densité apparente mottière	31 bis
11 - Comparaison graphique de porosité : prélèvements Mai 1972	37 bis
12 - Répartition des trois familles de porosité dans 100 cm ³ de sol	38 bis
13 - Relation entre la porosité de fissures et la porosité apparente totale	39 bis
14 - Relation entre la porosité apparente mottière et la porosité apparente totale	39 ter
15 - Test à l'alcool (Mars et Mai 1972)	45 bis

N°	<u>Pages</u>
16 - Relation entre l'épaisseur des fissures et la porosité apparente totale	46 bis
17 - Comparaison test à l'alcool, porosité totale, porosité de fissures (Mai 1972)	46 ter
18 - Occupation par l'eau et par l'air de 100 cm ³ de sol (Mai 1972) - porosité apparente totale - porosité apparente mottière	52 bis
19 - Humidités 1971 (en % de terre sèche)	53 bis
20 - Relation entre l'humidité et la porosité apparente totale	54 bis
21 - Relation entre la porosité apparente mottière et la teneur en eau Relation entre la porosité apparente totale et la teneur en eau	54 ter
22 - Relation entre le gonflement et la porosité apparente totale	55 bis
23 - Relation entre le gonflement et la porosité de fissures Relation entre le gonflement et le taux d'agrégation du sol	55 ter
24 - Relation entre l'épaisseur des fissures et les écarts d'humidité des mottes et du sol en place Relation entre la porosité des fissures et les écarts d'humidité des mottes et du sol en place	55 qu.

SIGNIFICATION DES ABREVIATIONS

dr	densité réelle
dat	densité apparente totale
dam	densité apparente mottière
PT	Porosité Texturale
PS	Porosité Structurale
Pat	Porosité apparente totale
Pam	Porosité apparente mottière
Pof	Porosité de fissures
Pofim	Porosité de fissures intra-mottières
Pop	Porosité optimum PROCTOR
Pp	Porosité proctor (d'une humidité donnée)
S	Significatif
HS	Hautement significatif
NS	Non significatif
NS*	Proche de la signification
% H ₂ O	Teneur en eau ou humidité
% ϕ \leq 10 mm	- % d'agrégats plus petits que 10 mm
Gfit	Gonflement
a = 0 - 10 cm	= en surface
b = 10-20 cm	= en profondeur

I - DESCRIPTION de la METHODE

I - DESCRIPTION DE LA METHODE

1.1 - Présentation générale de la méthode

L'état de compaction d'un sol s'exprime au travers de différents paramètres tels que : sa densité in situ, sa porosité apparente totale, ses variations de teneur en eau et sa résistance à la pénétration.

Ces informations cependant renseignent peu sur l'organisation interne de la porosité, au sein de la masse de sol, bien qu'elle ait incidence directe sur :

- la circulation d'eau;
- l'implantation du système racinaire;
- l'intensité de la minéralisation;
- la pullulation de la faune souterraine.

De plus, ces informations ne permettent pas de distinguer une porosité "naturelle", d'origine texturale, d'une porosité "complémentaire", dite structurale, dont les causes sont étrangères au sol lui-même : les précédents culturaux, les alternances d'humectation et de dessiccation, le gel et le dégel, les pratiques culturales, les cultures en place.

La porosité texturale procède de l'arrangement naturel à une humidité donnée des particules élémentaires du sol et dépend de la répartition granulométrique de celui-ci.

La description d'un système de porosité doit s'attacher, en premier lieu, à faire la part de cette porosité texturale, dans la porosité apparente totale.

Cette étude a utilisé la méthode de description d'un système de porosité mis au point par le LABORATOIRE des SOLS de l'I.N.R.A. (HENIN, MONNIER, TRI, FIES, FAURE).

Pour une terre donnée, la porosité texturale à une humidité donnée est constante. Ce sont les variations de la porosité structurale qui déterminent celles de la porosité apparente totale.

Enoncé des formules générales : définition des termes

- | | | |
|-------------------------------|---|--|
| 1 - porosité apparente totale | = | porosité texturale + porosité structurale |
| Pat | = | PT + PS |
| 2 - porosité apparente totale | = | porosité mottière + porosité de fissures |
| Pat | = | Pam + Pof |
| 3 - porosité mottière | = | porosité texturale + porosité de fissures mottière |
| Pam | = | PT + Pofim |

4 - porosité de fissures	= porosité apparente totale - porosité de mottes
Pat	= Pat - Pam
5 - porosité structurale	= porosité de fissures intra mottière + porosité de fissures
PS	= Pofim + Pof
6 - porosité apparente totale	= porosité texturale + porosité de fissures intra mottière + porosité de fissures
Pat	= PT + Pofim + Pof

A quelle humidité se vérifie l'équation (6) : l'équation devient :

Pat	= PT	+ Pofim	+ Pof
à l'humidité du prélèvement	à l'humidité des mottes	à l'humidité des mottes	Pat - Pam à leur humidité respective

Le tableau p. 41 illustre cette dernière équation

Les pages suivantes complètent l'énoncé ci-dessus des formules générales de la méthode par la description des manipulations et des interprétations des mesures qui en résultent.

Une bibliographie présente brièvement en annexe les méthodes habituelles d'étude de la structure du sol.

1.2 - Détermination de la densité réelle.

12.1 - Détermination du volume de l'échantillon :

Utilisation du pycnomètre à air différentiel BECKMANN.

Principe : Loi de MARIOTTE : PV = constante

Conception : Soit deux pistons dont l'avancement est assuré, pour chacun, par une manivelle, dans 2 cylindres parallèles, de volume identique. L'un est dit "de référence", l'autre accueille l'échantillon dont on veut connaître le volume.

Les deux pistons avancent de front, une aiguille permet de s'assurer que la pression est bien la même au cours de l'avancement des deux pistons dans les deux cylindres indépendants l'un de l'autre.

Quand la course des deux pistons est terminée, nous avons :

<u>1er piston</u> (de référence)		<u>2ème piston</u>
V ₁	=	P (V ₂ + V échantillon)
	ou	
V ₁	=	V ₂ + V _é
	ou	
V ₁ = V ₂	=	V _é

.... /

Un compteur permet de lire le volume de l'échantillon au 1/1000 de cm³ près.

Pour chaque échantillon 3 lectures successives au minimum sont faites, parfois 10, jusqu'à ce que le manipulateur trouve un résultat constant.

Source d'erreur : la porosité piégée au sein des agrégats.

12.2. - Détermination du poids

L'échantillon est pesé à sec puis une correction est faite après son passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.

Mode de calcul :
$$\frac{\text{Poids séché à l'air} - \text{poids d'eau}}{\text{Volume pycnomètre} - \text{volume d'eau}} = \text{densité réelle}$$

1.3. - Détermination de la densité apparente totale au densitomètre à membrane

Principe : Appréciation du volume exact d'un trou dans le sol par déplacement, sous l'action d'un piston, d'un volume d'eau à l'intérieur d'une membrane extensible dont l'élasticité lui permet d'épouser précisément les parois du trou, conçu plus particulièrement pour les sols caillouteux.

Description sommaire de l'appareil :

- Un piston dans un cylindre, actionné par une tige, surmontée d'une poignée munie d'un dynamomètre permettant de contrôler l'effort de poussée du manipulateur;
- sur la tige du piston, un vernier coulissant permettant de lire le volume d'eau déplacé;
- à la base du cylindre : une membrane extensible en caoutchouc et une plaque de couche, annulaire, sur laquelle repose perpendiculairement le cylindre;
- trois piquets à 120° pour maintenir la plaque de couche au sol;
- le cylindre se sépare aisément de la plaque de couche par 2 boulons à oreille.

Manipulation

I - mise en place de l'appareil

- . dégager le sol sur 1 cm de profondeur;
- . positionner la plaque de couche de façon stable, horizontale, sans perturber la zone de sol à prélever;
- . fixer la plaque de couche au sol en enfonçant en terre les trois piquets;
- . rendre solidaires plaque de couche et cylindre + piston
- . régler le dynamomètre compte tenu de l'humidité du sol : toutes les mesures, au moins pour un même bloc, doivent être réalisées avec le même réglage du dynamomètre.

2 - Mesures

- . Effectuer, avant tout prélèvement, le volume de départ, soit V_0 ;
- . prélever la terre en faisant un trou aussi circulaire et régulier que possible, de la profondeur du niveau à étudier soit V_1 , la terre est mise aussitôt, intégralement, dans un sac plastique, hermétiquement fermé, pour mesure d'humidité.
- . réaliser la deuxième mesure de volume : soit V_2 , on a donc :

$$V_1 - V_0 = \text{volume du premier niveau}$$

$$V_2 - V_1 = \text{volume du deuxième niveau et ainsi de suite ...}$$

A partir de la surface du sol, on ne peut descendre au delà de 20 cm sans creuser pour abaisser le niveau de la plaque de couche.

Calculs : Après détermination de l'humidité, nous avons :

$$\frac{\text{Poids sec}}{\text{volume humide}} = \text{densité apparente totale}$$

$$\frac{\text{Densité réelle} - \text{densité apparente totale}}{\text{densité réelle}} \times 100 = \text{porosité apparente totale}$$

Sources d'erreur : On ne peut travailler qu'après ressuyage du terrain, car, malgré le dynamomètre, il peut se produire que la pression latérale de la membrane élargisse le trou du prélèvement.

Le manipulateur doit s'efforcer de réaliser toujours le même geste vertical de poussée :

- . Les structures creuses :
La matière organique, localisée au-dessus de la semelle de labour, se comprime sous l'effet de la pression de la membrane.
- . Les parois trop irrégulières des trous ne permettent pas à la membrane d'apprécier très exactement le volume.
- . La précision est d'autant plus grande que l'on travaille dans des gammes de densités élevées.

1.4. - Détermination des densités apparentes mottières, sèches et humides Méthode au vernis.

Principe : apprécier le volume exact d'une motte, après enrobage par un vernis imperméable, par déplacement d'un liquide de densité connue.

Déroulement des opérations :

Chaque motte d'environ 40 g est :

- nettoyée au pinceau des petits agrégats qui y adhèrent;
- entourée par un fil à coudre (résistant à la chaleur de l'étuve);
- pesée sur une balance au centième de gramme;
- plongée dans du vernis;

- suspendue par le fil à une potence; jusqu'à ce qu'aucune bulle d'air ne s'en échappe;
- remontée hors du vernis; maintenue suspendue par le fil jusqu'au séchage du vernis qui l'enrobe;
- pesée à nouveau avec le vernis;
- trempée dans un BECHER plein d'eau; posée sur une balance au centième, réglée au zéro, pour en apprécier son volume humide : il y a nécessité d'effectuer la lecture rapidement, dans le cas où quelques bulles d'air s'échapperaient de la motte;
- mise à l'étuve à 105°C pendant une nuit;
- pesée, ainsi séchée, après refroidissement au dessiccateur;
- son volume sec est à nouveau apprécié, comme précédemment.

Calculs :

Nous obtenons ainsi :

$\frac{\text{Poids sec } 105^{\circ}\text{C}}{\text{volume humide}} = \text{densité apparente mottière humide}$

$\frac{\text{Poids sec } 105^{\circ}\text{C}}{\text{volume sec}} = \text{densité apparente mottière sèche}$

$\frac{\text{densité apparente} - \text{densité apparente humide}}{\text{densité apparente sèche}} \times 100 = \text{gonflement}$

Remarques :

- La précision s'accroît quand le volume de la motte augmente.
- Les calculs sont faits sans tenir compte du poids et du volume du fil et du vernis, que l'on considère comme négligeables.
- Parfois, on ne peut opérer avec des mottes trop humides " qui ne tiennent pas " dans le vernis; dans ce cas, on effectue un premier trempage très rapide dans le vernis, puis on fait sécher le vernis à l'air pour tenir la motte. On continue par un second trempage de la motte pour en assurer l'enrobage complet.
- Le vernis est un mélange à 20 %, de densité 0,89, de résine SARAN et de BUTANOL.

Au cours des manipulations successives, le vernis a tendance à s'épaissir par évaporation du BUTANOL : il faut en vérifier régulièrement la densité et rajouter du butanol pour maintenir le mélange à la densité 0,89.

1.5 - Détermination de la distribution dimensionnelle des agrégats.

Test à l'alcool : TRI (1969)

But : Détermination de l'état d'agrégation du sol à un moment donné.

Principe : Imbibition d'un échantillon de terre séché à l'air par un liquide non polaire qui s'introduit dans les fissures préexistantes, sans modifier en rien l'état de division initial du sol.

Prélèvement : Un coup de bêche est donné à 10 cm du trou qui procède de la détermination de la densité apparente totale au densitomètre. L'intégralité de ce qui est soulevé par la bêche est recueillie avec soin, séchée à l'air et soumise au minimum de perturbation possible.

Toute la validité du test repose sur la représentativité du prélèvement et de la prise d'échantillon.

Manipulation : A partir d'échantillons ainsi prélevés, on prend une partie aliquote de 100 g.

Chaque échantillon est :

- immergé dans de l'alcool éthylique à 95°, au minimum pendant 1 heure;
- placé au dessus d'une série de tamis de 10 mm, 5mm, 3, 5mm, 2, 1 mm, 0,5 mm.
Ce tamis est alors fixé à un appareil de FEODOROFF et plongé jusqu'au niveau des mailles du tamis supérieur dans de l'alcool éthylique - puis,
- soumis à une agitation standard, grâce à l'appareil de FEODOROFF, de 30 tours/30 secondes.

Les différentes classes d'agrégats sont recueillies dans des coupelles, séchées à l'étuve à 105°C, puis pesées.

Représentation des résultats

- 1° - sur papier GAUSSO-arithmétique :
- . en ordonnée d'échelle gaussienne, on porte des pourcentages cumulés d'éléments structuraux, plus petits qu'une taille donnée
 - . en abscisse d'échelle arithmétique, les tailles correspondantes.

La distribution obtenue peut être normale, si les points sont alignés : on obtient alors la taille moyenne des éléments structuraux et l'écart-type de la distribution.

- 2° - sur papier GAUSSO-logarithmique :

On peut procéder à un ajustement si on n'obtient pas une ligne droite, en utilisant une échelle logarithmique en abscisse.

Interprétation des résultats

TRI (1970), à partir de 80 échantillons, a montré que les distributions dimensionnelles des éléments structuraux sont normales pour les échantillons à structure continue et à tendance granulaire et LOG-normales pour les terres à structure granulaire.

On considère généralement que nous sommes en présence de structure :

- continue pour des % d'agrégats < 10mm : 10 % *ou moins*
- à tendance granulaire d° : entre 10 % et 30 %
- granulaire d° : 50 %

A partir de 19 terres différentes le même auteur a mis en évidence qu'il y avait une relation positive étroite entre la porosité totale et le pourcentage d'éléments structuraux inférieurs à 10 mm, ou entre la porosité totale et l'inverse de leur taille moyenne.

A partir de la répartition des classes d'agrégats, on détermine l'épaisseur des fissures par échantillon :

Mode de calcul de l'épaisseur des fissures

I/- Calcul de la surface des agrégats.

Pour un diamètre donné, d'une classe d'agrégats, leur surface sera:

$$s_1 = \frac{1}{\rho D} x_1$$

Le numérateur variant de 1 à 6 suivant que l'examen de la forme des agrégats révèle qu'ils sont respectivement plus près de la forme sphérique, ou plus près de la forme cubique.

ρ = la densité apparente mottière humide

D = le diamètre de la classe d'agrégats considérée

x = l'importance en % pondéral de cette même classe d'agrégats, dans l'ensemble de l'échantillon.

Pour l'ensemble des 6 classes d'agrégats constituant l'échantillon, nous avons : $\sum s = s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_6$

$\sum s \times \rho$ On obtient le résultat en cm² pour 100 g de terre, et en multipliant densitomètre, on obtient S pour 100 cc.

Exemple :

maille du tamis	taille moyenne	% pondéral	surface
10 mm	7,5	x_1	$s_1 = \frac{1}{\rho_{7,5}} x_1$
5	4,25	x_2	$s_2 = \frac{1}{\rho_{4,25}} x_2$
3,5	2,75	x_3	d°
2	1,50	x_4	d°
1	0,75	x_5	d°
0,5	0,25	x_6	d°
0			<hr/> $\sum s$ ou S <hr/>

On admet que l'importance de la surface qui procède des éléments structuraux plus grands que 10 mm est négligeable.

2/- Calcul de l'épaisseur

On évalue la somme des épaisseurs de l'ensemble des fissures de l'échantillon composé des 6 classes d'agrégats.

Les agrégats sont assimilés à des sphères, empilées en quinconce. La formation d'une fissure correspond à l'écartement de ces "billes". La section du canal ainsi formé est assimilée à un parallélogramme.

Des dimensions de cette " fissure parallépipédique ", nous connaissons :

- le volume qui est égal à la porosité des fissures

- la surface de la plus grande base : $\frac{S}{2}$

- la hauteur, ou l'épaisseur des fissures, est obtenue par la formule :

$$e = \frac{\text{Porosité de fissures}}{\frac{S}{2}}$$

ou

$$e = \frac{V}{\frac{S}{2}}$$

Remarque : Ce mode de calcul semble cependant moins s'adapter aux structures feuilletées et lamellaires, cas de L_0 entre 0 et 10 cm, dont les éléments structuraux ont davantage la forme de parallépipède rectangle aplati que d'une sphère. Si les mailles du tamis déterminent leur hauteur et largeur maximum, leur longueur n'est pas constante et dépasse souvent le diamètre de la taille du tamis supérieur. Par contre, leur mode d'arrangement correspond davantage au calcul final de l'épaisseur : $e = \frac{V}{\frac{S}{2}}$

Cette épaisseur de fissure peut être reliée aux taux d'humidité, aux écarts d'humidité entre mottes et sol en place, au gonflement, à la porosité.

1.6 - Détermination de la densité texturale sèche (KHEYROBI et MONNIER)

Principe : Détruire toutes traces du passé cultural de la terre et des influences de l'ensemble des facteurs de la porosité pour déterminer une densité liée exclusivement aux caractéristiques "génétiques" du sol.

Prélèvements et échantillonnages : 6 prélèvements en tout, soit 3 dans le bloc II et 3 dans le bloc V; 1 prélèvement dans chaque traitement. La terre utilisée provenait des restes de la terre prélevée pour le test à l'alcool. A partir de chaque prélèvement, étaient préparés deux échantillons de 100 g de terre, tamisée à 2 mm.

Manipulation :

Chaque échantillon ainsi préparé est :

- mélangé à une quantité d'eau correspondant à 1,9 fois l'humidité équivalente, bien malaxé avec une spatule pour homogénéiser l'humectation

- conservé pendant une nuit pour en assurer le gonflement maximum, maintenu à l'abri du dessèchement sous poche plastique;
- remélangé énergiquement, jusqu'à parfaite homogénéisation;
- placé sur un entonnoir de BUCHÈNER, garni d'un disque de papier filtre;
- soumis à l'action de vide pour ressuyage, pendant 5 heures : on limite au maximum les fissures dans le gâteau de terre en introduisant le vide progressivement et en colmatant les fuites par une légère pression du doigt sur le gâteau;
- retiré du Büchner;
- découpé en 4 morceaux égaux et mis à l'étuve.

Des quatre morceaux, refroidis au dessiccateur, on en retire deux dont on détermine la densité texturale sèche à l'aide de la méthode au vernis décrite plus haut.

1.7 - Détermination de la densité texturale humide Test de réhumectation

But

- 1 - Différencier la porosité d'origine texturale de la porosité structurale due aux agents extérieurs : façon culturale, résidus de récolte, etc...
- 2 - Apprécier l'humidité texturale à la saturation.
- 3 - Calculer le gonflement potentiel par comparaison avec la densité texturale sèche.
- 4 - Etablir la courbe PELTIER.

Principe : Réhumectation sous vide d'un gâteau de terre avec de l'eau préalablement dégazée.

Manipulation : Les deux autres morceaux du gâteau préparé pour la détermination de la densité structurale sèche, restés dans le dessiccateur, sont :

- limés pour obtenir une face bien plane, afin d'assurer un contact parfait avec la plaque poreuse;
- placés sur une plaque poreuse, à l'intérieur d'un exsiccateur dont le niveau d'eau, préalablement dégazée, atteint le milieu de l'épaisseur de la plaque poreuse;
- laissés une nuit, sans introduction du vide, afin qu'une réhumectation lente, naturelle mais incomplète s'établisse;
- réhumectés alors en introduisant lentement le vide afin d'éviter au maximum la fissuration du gâteau par établissement soudain d'une dépression.

La réhumectation dure deux à trois jours. Elle est complète quand l'eau "mouille" la base des morceaux de gâteau. On détermine alors la densité texturale humide, à la saturation, par la méthode au vernis précédemment décrite.

L'humidité à saturation de chaque morceau est également déterminée après passage à l'étuve à 105°C.

1.8 - Etablissement de la courbe PELTIER

Principe : L'étude expérimentale des phénomènes de gonflement et de retrait a été effectuée par HAINES en 1923. Cet auteur a établi que lorsqu'on laisse un pâton de terre argileuse se dessécher lentement on peut distinguer 3 phases :

- 1) - La diminution du volume de l'échantillon correspond au volume d'eau perdue
- 2) - la diminution de volume est inférieure à la quantité d'eau perdue : introduction d'air dans l'échantillon
- 3) - de l'eau continue à s'évaporer sans que le volume de l'échantillon varie.

Le taux d'humidité qui se situe entre la fin de la phase 2 et le début de la phase 3 correspond à LA LIMITE DE RETRAIT.

Cette vérification expérimentale du phénomène de dessiccation est utilisée pour bâtir la courbe PELTIER à partir de trois informations précédemment obtenues, à savoir :

- la densité texturale sèche;
- l'humidité à saturation;
- la densité texturale humide.

Etablissement de la courbe - En ordonnée est porté l'inverse de la densité texturale sèche, soit le volume de terre pour 100 g de sol.

A partir de cette valeur est tracée, parallèlement à l'axe des abscisses, une droite A, correspondant à la phase 3 du phénomène précédemment décrit.

En ordonnée encore, est porté l'inverse de la densité texturale humide; en abscisse l'humidité correspondant à cette densité : nous obtenons le point de la courbe correspondant à l'HUMIDITE A LA SATURATION.

A partir de ce point, parallèlement à la première diagonale, est tracée une diagonale B qui correspond à la phase I.

L'intersection de l'horizontale A et de la diagonale B définit la limite de retrait.

Toutes les porosités, appréciées graphiquement, entre la limite de retrait et l'humidité à la saturation, seront de nature exclusivement texturales.

Remarquons que, si nous prolongeons vers le bas la courbe PELTIER, son intersection avec l'ordonnée donne l'inverse de la densité réelle : la comparaison de la densité réelle, déterminée ainsi, graphiquement, et de la densité réelle déterminée expérimentalement au pycnomètre à air, donne l'idée de l'erreur introduite lors de l'établissement de la courbe.

densité réelle graphique = 2.640

densité réelle pycnomètre = 2.724

La courbe PELTIER de la terre de l'essai de A VI, construite de cette façon, figure en page suivante.

Cependant, une erreur a été introduite " en escamotant la phase N°2".

Comparaison avec le comportement des mottes au gonflement

- En essayant de tracer la même droite à partir des chiffres obtenus avec les 144 mottes (1/dam et % H₂O), nous avons obtenu un nuage de points groupés puisque les étendues respectives des humidités et des densités étaient très faibles.

- La courbe PELTIER a également été comparée à la droite $X = 14,17 + 0,86 Y$, établissant la liaison positive, hautement significative, entre l'humidité (X) et le gonflement des mottes (Y)

$$R = 0,639 - 36 \text{ points.}$$

Utilisation de la courbe PELTIER

- 1 - La courbe définit un comportement textural à l'égard du phénomène de gonflement et de retrait et permet de savoir si le sol étudié s'en écarte, ou non. Nous avons vu, à l'aide de la droite de gonflement tracée à côté de la courbe PELTIER, que le sol de A VI a un comportement qui n'est plus d'origine texturale mais est tributaire de facteurs étrangers au sol. Remarquons que la zone hachurée du graphique N° 1 représente l'accroissement de la porosité structurale des mottes (Pofim) en fonction de leur teneur en eau.
- 2 - Cette courbe s'apparente également à un état de compaction de référence : lorsque les porosités totales, ou mottières, sont inférieures aux porosités texturales correspondant à leur teneur en eau respectives, il y a compaction; c'est-à-dire qu'il y a écrasement des agrégats. Le développement sur la compaction de référence PROCTOR, page 13, précise ces notions. (Voir graphique N° 5).
- 3 - Dans la formule générale, nous avons :

$$Pat = Pam + Pof.$$

Pat et Pam étant déterminées expérimentalement, leur différence donnera la porosité de fissures, réelle, directement.

Par contre, lorsque nous décomposons la Pam en porosité structurale et en porosité texturale, nous obtenons :

$$Pat = PT + Pofim + Pof$$

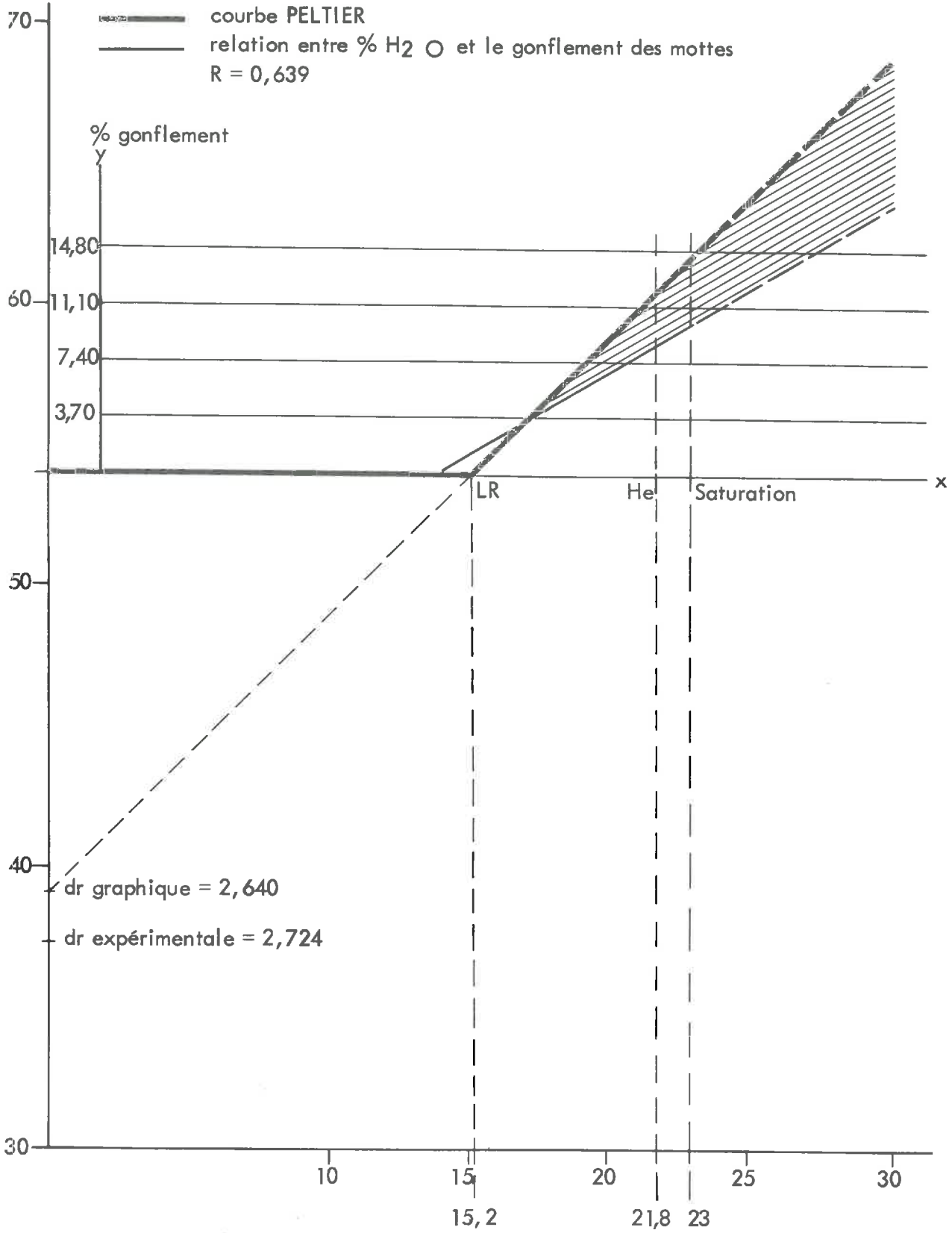
dans ce cas là, Pofim est obtenue par l'équation :

$$Pam - PT (\text{à } \% H_2O \text{ des mottes}) = Pofim.$$

Si Pofim est nulle ou négative, il y a eu compaction de la motte; c'est le cas d'un seul échantillon sur 36 : Bloc V - L₁.

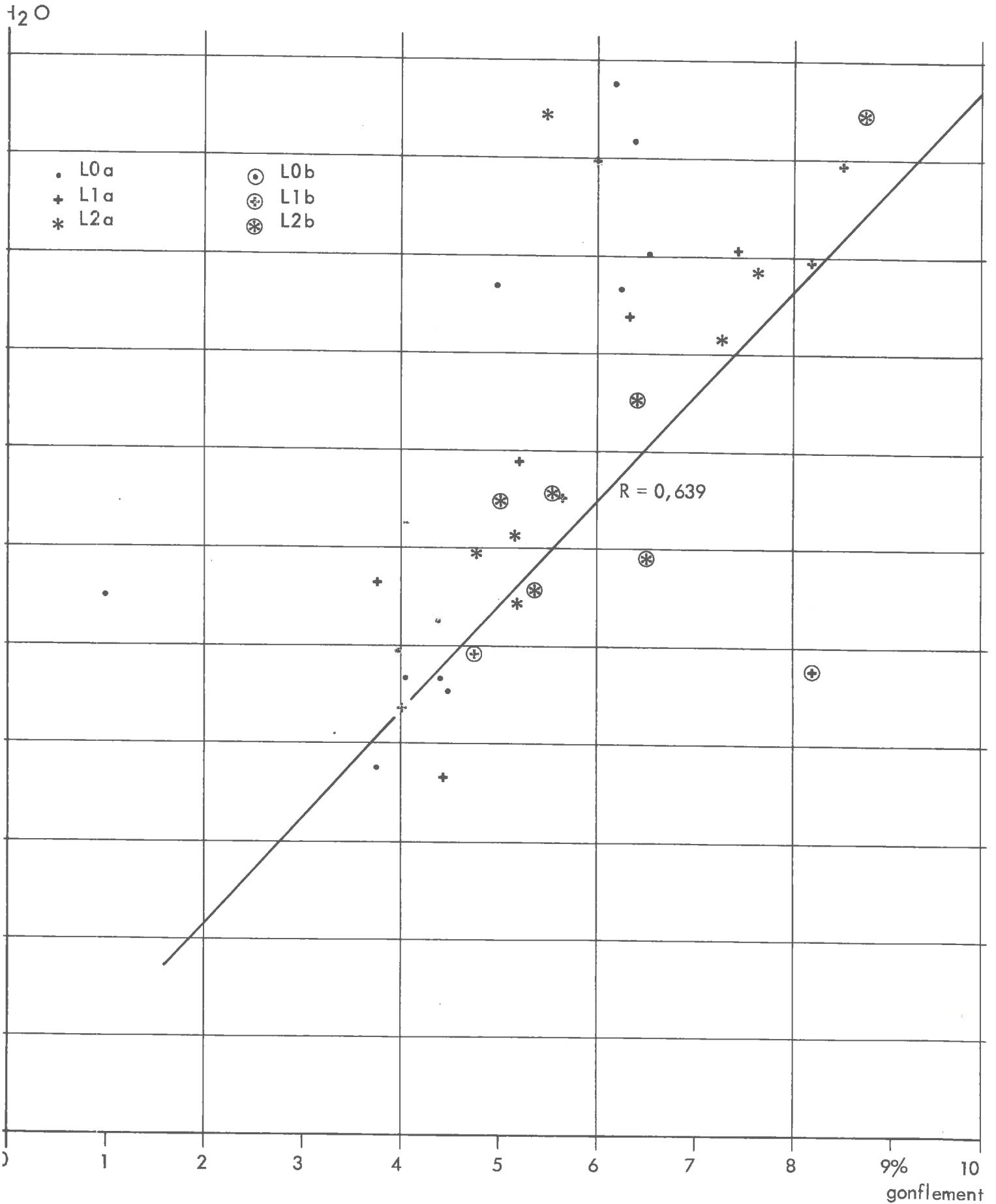
C O U R B E P E L T I E R

gr. de terre pour
100 cm² de sol



Graphique n° 1

RELATION ENTRE L'HUMIDITÉ ET LE GONFLEMENT
 AU NIVEAU DES MOTTES



1.9 - Détermination d'une COMPACTION de REFERENCE
Méthode PROCTOR : PELTIER 1959

Principe : On déterminera la densité apparente maximum d'une terre en soumettant des échantillons de volume constant à une énergie standard (6 tonnes/mètre par m³). Le taux d'humidité, par contre, croît à chaque échantillon.

Manipulation : Pour une terre donnée, 15 à 20 échantillons sont nécessaires. Chaque échantillon correspond à un point de la courbe.

Il représente 600 g de terre :

- tamisé à 2 mm, mélangé intimement à un pourcentage d'eau connu;
- conservé dans un BECHER, une nuit, à l'abri du dessèchement sous poche plastique;

un moule PROCTOR de 300 cm³ est ensuite rempli de cette terre humide, en trois fois. Puis, chaque apport est soumis à 30 coups de dame de 1 kg, tombant de 20 cm; soit, pour l'ensemble du moule, 3 tonnes-Mètre par m³. Chaque apport représente le tiers de la hauteur du moule.

La partie supérieure du moule servant au remplissage est alors enlevée; la terre est arasée à 300 cm³, puis la partie supérieure remise.

L'ensemble est fixé à un extracteur, sorte de piston qui chasse la carotte de terre compactée vers le bas, après avoir enlevé le fond du moule.

Toute la terre extraite du moule est recueillie, pesée, son humidité évaluée.

Mode de calcul : $\frac{\text{Poids sec}}{300\text{cc}} = \text{densité PROCTOR à l'humidité de la carotte}$
soit dp 1 - par exemple.

$$\frac{dr - dp 1}{dr} \times 100 = \text{porosité PROCTOR à l'humidité de la carotte.}$$

Prélèvement : Dans le cas de l'essai A VI, les dix kilos de terre nécessaires à l'établissement d'une courbe caractéristique, partant du poids d'humidité zéro, ont été obtenus par un mélange homogène des 36 échantillons prélevés lors de la détermination de la densité apparente totale.

La densité réelle utilisée pour le calcul de la porosité est égale à 2,720, moyenne de l'essai A VI. (CV = 2 %).

Exploitation des résultats : L'état de compaction d'un sol se définit par trois stades :

- Pat > PT : tassement, si Pat diminue, les agrégats se rapprochent les uns des autres.
- Pat = PT : soudure des agrégats.
- Pat < PT : compaction; les agrégats sont écrasés.

FAURE (1971) a montré, à partir de mélanges binaires, à squelette identique, mais à taux d'argile croissant, l'influence de la teneur en argile sur le comportement au compactage :

		dop	% H ₂ O
Pour un squelette sans argile (LG = 0,15 % ; SF = 65,6 % ; SG = 34,9 %)		1,585	16
Même squelette + argile	12,1 %	1,760	14
- d° - + d°	47,2 %	1,515	25
- d° - + d°	71 %	1,330	33
Essai A VI - Grignon : argile (LF = 23 % ; LG = 46 % ; SF = 4 % ; SG = 4 %)	23 %	1,697	17,3

En outre, la nature des argiles, par le biais de leur gonflement potentiel, la répartition granulométrique du squelette et la forme géométrique de ses grains modifient le comportement au compactage.

Des études sont en cours à l'I. N. R. A. pour déterminer l'importance relative des différents paramètres rentrant en jeu.

La densité optimum proctor, ou la porosité correspondante, est une constante de nature texturale. Elle permet de caractériser les résistances relatives des sols à la compaction : ce test est couramment utilisé par les Services du Génie Civil, comparé à la pression exercée par les roues des matériels agricoles (0,519 kg/cm² pour le test; cultipacker = 0,3 kg/cm²).

Il permet d'apprécier les gammes d'humidité dans lesquelles la dégradation de la structure d'un sol, sous l'effet d'une contrainte, est la plus importante.

Le bouleversement apparent d'une terre n'est pas révélateur de l'importance réelle des dégâts, au-delà de l'optimum proctor, plus la terre est humide, en effet, davantage les ornières seront profondes et bordées de bourrelets de terre latéraux; ce qui signifie qu'il y a eu déplacement de terre " en suspension dans l'eau " sans qu'il y ait eu compaction, donc dégradation.

Comparaison avec les porosités texturales sèches et humides

La comparaison de deux constantes texturales, la porosité texturale sèche et la porosité optimum proctor, permet de mieux saisir l'aptitude du sol à soutenir une pression.

Porosité optimum PROCTOR - porosité texturale sèche =

$$\text{Porosité structurale à l'optimum PROCTOR} = 1 - \frac{\gamma_d^{opt}}{\gamma_d^e}$$

$$Pop - PTs = Pst op$$

soit, pour GRIGNON : $37,64 - 32,09 = 5,55$

.../

Cependant, bien qu'utile pour caractériser un sol, ce chiffre (5,55) qui doit représenter la porosité structurale, résiduelle, après compaction PROCTOR, n'est pas le reflet de la réalité car les humidités sont différentes: $PTs = 0 \%$; $Pop = 17,3 \%$.

Il est plus exact de mettre en comparaison la porosité texturale humide, à saturation (22,50 %) et la porosité PROCTOR, évaluée à la même humidité; ou, d'une façon plus dynamique, de représenter graphiquement l'évolution des porosités résiduelles, après compaction PROCTOR, en fonction du taux d'humidité (graphique n° 4).

Les porosités résiduelles ainsi obtenues sont de nature structurales puisqu'à tout moment : Porosité Proctor \gg Porosité Texturale.

A la valeur 5,55 se substitue celle de 3,27, plus proche de la réalité.

Comparaison avec la porosité apparente totale

Si on admet, que dans un terrain homogène tel que celui de A VI à GRIGNON, la résistance à la compaction est sous la seule dépendance de l'humidité, la porosité perdue, sous l'effet d'une contrainte standard, peut être évaluée par :

$$Pat - Pp \text{ (à l'humidité de Pat)} = \text{porosité structurale perdue par compaction PROCTOR.}$$

Ce calcul ne donne pas des moyennes par traitement statistiquement différentes. Cela est normal puisque les différences de teneurs en eau entre traitement ne l'étaient pas non plus.

Par contre, puisque les teneurs en eau sont significativement différentes entre mottes 19,12 % et sol en place 16,23 %, la réaction des mottes au tassement devrait être différente de celle des mottes en place : ce raisonnement n'est que théorique car, sous l'effet de la pression, une redistribution de l'eau doit se faire dans le profil.

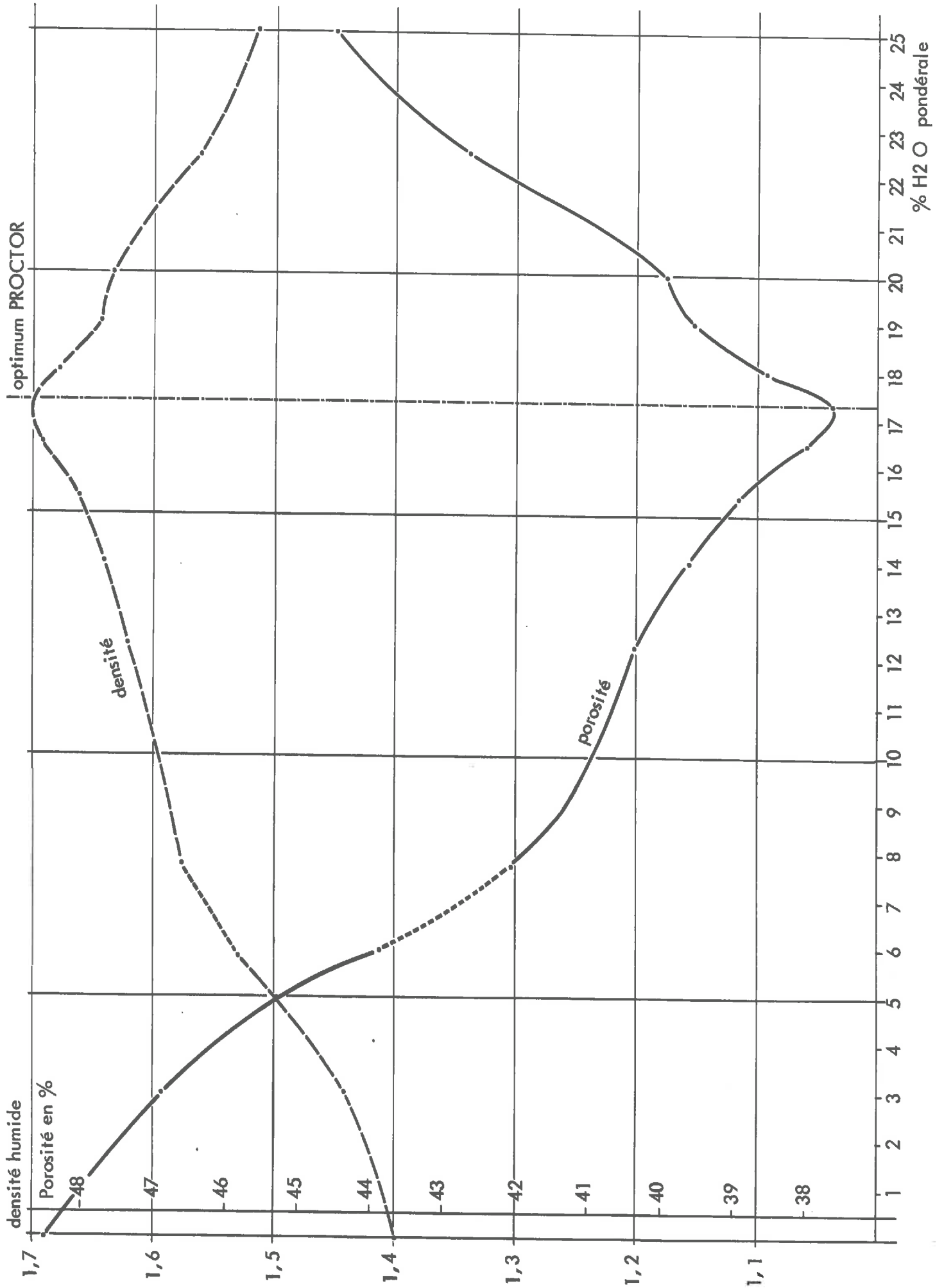
Les porosités PROCTOR correspondant aux teneurs en eau de Pat ont été déterminées graphiquement à partir de la courbe page graphique 3.

Représentation graphique des porosités perdues

Pour illustrer les trois phases de la compaction : rapprochement des agrégats, soudure et écrasement, et les comparaisons entre Pat et PT et Pat et Pp, nous avons reproduit graphiquement, page suivante, par soustraction avec la porosité apparente totale, les fractions de porosité perdue respectivement :

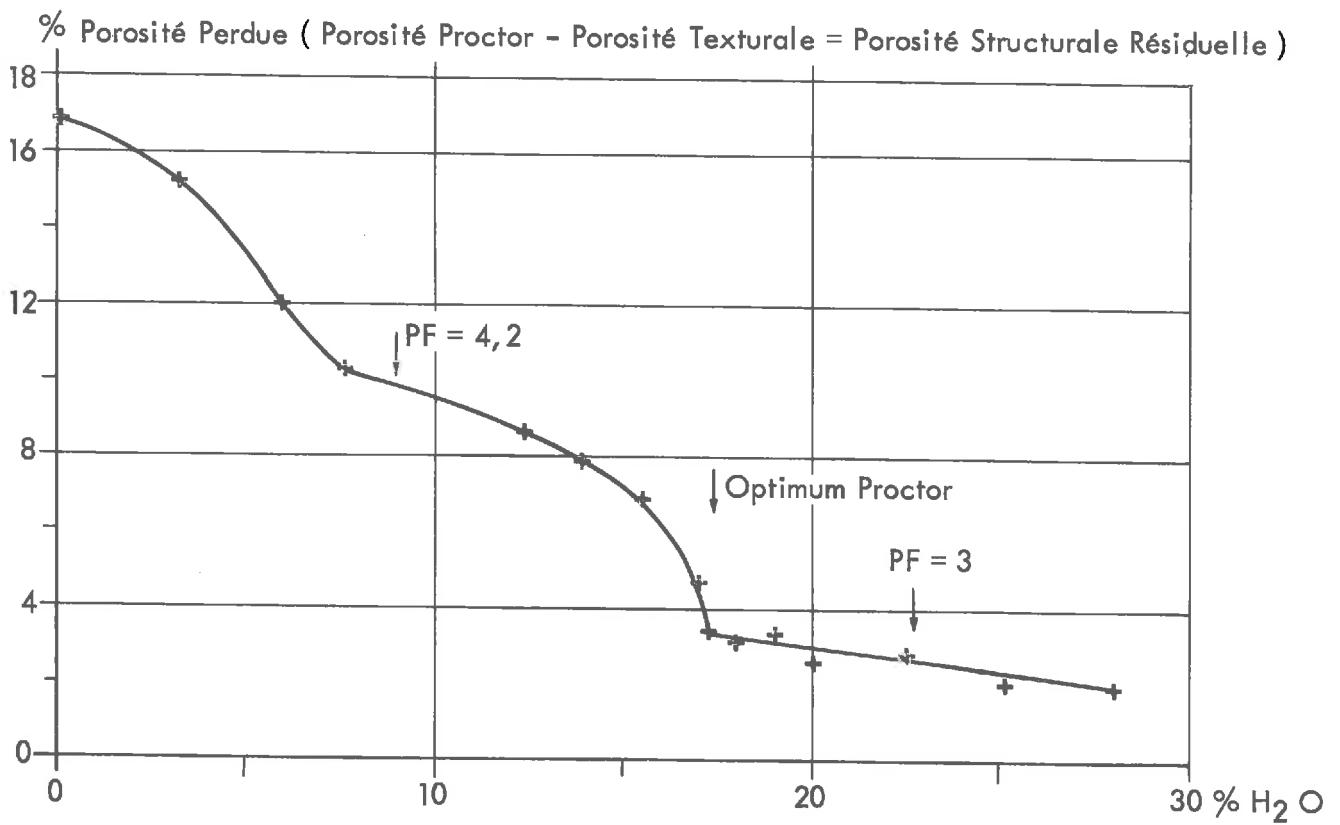
- Courbe 1 : rapprochement des mottes ($Pof \rightarrow$ zéro)
- Courbe 2 : suppression des fissures mottières (+ Pof)
- Courbe 3 : compaction PROCTOR
- Courbe 4 : compaction correspondant à la densité texturale.

COURBE DE COMPACTION PROCTOR



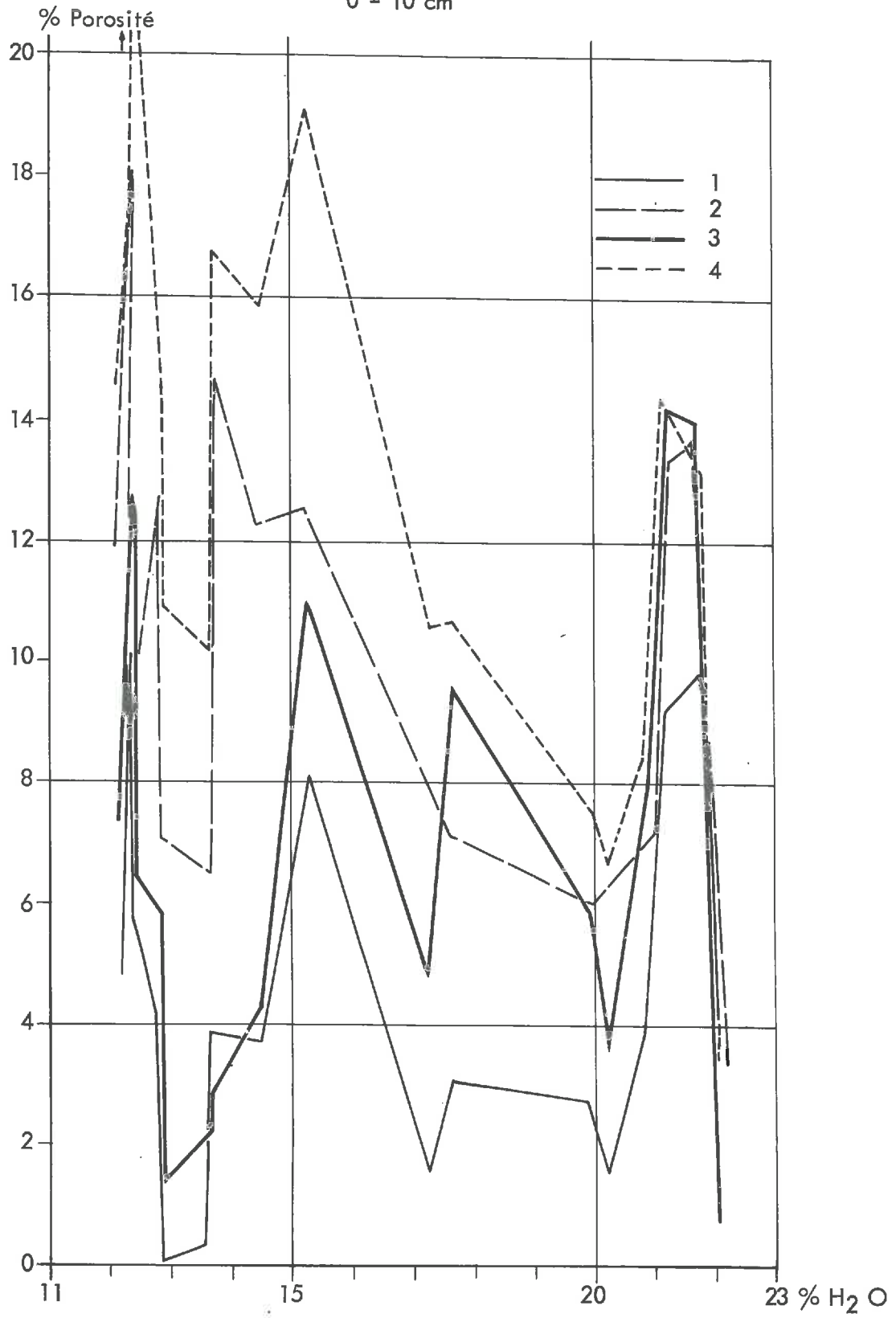
Graphique n° 3

INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ SUR LA POROSITÉ STRUCTURALE
APRÈS COMPACTION PROCTOR



POROSITÉ PERDUE SOUS L'EFFET DE LA COMPACTION

0 - 10 cm



Résistance à la compaction en fonction des traitements L_0 , L_1 , L_2

Il est probable, en effet, que le comportement à l'égard de la compaction se soit modifié du fait des différents traitements L_0 , L_1 , L_2 , notamment sous l'effet de la matière organique qui a du s'accumuler en surface; puisque les effets consécutifs au tassement sont plus éphémères dans un sol riche en matières organiques, du fait du retrait plus important.

La liaison significative ($R = 0,872$) entre l'humidité et la porosité des mottes, sur L_0 0,10 cm, d'une part, celle existant entre le gonflement des mottes et leur humidité ($R = 0,639$, HS, 36 points) suggèrent cette hypothèse.

Pour s'assurer de cette modification, il aurait fallu soumettre un prélèvement de terre au test PROCTOR, comme à BOIGNEVILLE (1), ou faire des prélèvements systématiquement dans les traces de roues.

A ce sujet, les résultats d'un tel essai peuvent être complètement faussés si le soin n'est pas pris d'assurer un trafic homogène du matériel agricole sur l'ensemble de l'essai.

L'obtention d'une densité forte (1,8 - 1,9) au test PROCTOR contre-indique le passage de matériel agricole à l'intérieur de la fourchette d'humidité encadrant immédiatement cette densité.

1.10 - Analyse statistique

Nous avons utilisé des programmes préalablement établis par le S. E. I. et adaptés à l'E. M. D. 8-48.

- le programme "bloc" a été utilisé pour comparer les résultats entre traitements pour un niveau déterminé et pour la comparaison des composantes du rendement (test de FISCHER et test de la P. P. D. S.)
- la méthode des couples a été employée, manuellement, pour appréhender les différences entre les niveaux a et b.

.../

(1) - A BOIGNEVILLE les deux traitements comparés étaient les effets du blé et du maïs sur L_0 :

	densité apparente	% H_2O
- Maïs	1,666	17,97
- Blé	1,652	17,99

La similitude des résultats laisse supposer que le test n'est pas apte à révéler les différences de nature structurale; les mesures au densitomètre et les prélèvements de mottes sur les traces de roues sont plus révélatrices.

- le programme "regression linéaire" pour les calculs de corrélation simple. Ce programme était successivement passé avec 36 points (a + b), 18 points (a), ou (b), et 6 points $L_0 a$, $L_1 a$ et $L_0 b$, $L_1 b$, $L_2 b$.

La comparaison des liaisons entre traitements n'a donc pu se faire qu'avec 6 points, ce qui est trop peu.

Cependant, c'est surtout le parallélisme des diverses relations étudiées, la convergence de leur signification que nous avons retenus pour émettre des hypothèses.

II - CONDITIONS EXPERIMENTALES

2.1 - Dispositif d'essai

L'essai A VI, du S. E. I de GRIGNON, est un dispositif de 6 blocs parallèles, se succédant dans le sens de la pente, avec les trois traitements L₀, L₁, L₂, répartis au hasard, sur deux blocs consécutifs, afin de faciliter l'exécution des façons culturales.

Chaque parcelle élémentaire est "SPLIT PLOTE" pour introduire un traitement de dose et de date d'épandage d'azote.

L'étude de l'influence de cette deuxième variable n'intervient pas dans l'exploitation des résultats.

2.2 - Prélèvements

22.1 - Série du 18 Mars 1972

Elle ne concerne que le test à l'alcool. Le nombre de prélèvements est le même que pour la série du mois de Mai, explicitée ci-après.

22.2 - Série du mois de Mai 1972

Pour le mois de Mai, nous entendons par prélèvement l'ensemble des prises d'échantillons qui concernent simultanément :

- la densité apparente totale;
- la densité apparente mottière;
- le test à l'alcool;
- l'humidité

Ils ont eu lieu le 5 et le 6, pour les blocs I à IV, le 18 pour les blocs V et VI.

Cette interruption était due aux pluies et à la nécessité de laisser le terrain se ressuyer.

Un même bloc était toujours fait dans la même demi-journée.

Les premiers blocs ont des humidités basses (12, 14%), les deux derniers blocs ont des humidités voisines de l'humidité équivalente.

L'intérêt de cette grande variation sera de permettre des calculs de corrélation simple.

222.1- Nombre de prélèvements

- 1 prélèvement par bloc et par traitement, à deux niveaux,
a = 0 - 10 cm et b = 10 - 20 cm, a été effectué, soit :
3 traitements x 2 niveaux x 6 blocs = 36 prélèvements

222-2- Cas de la densité apparente mottière.

4 mottes étaient prélevées par niveau, chacune mise aussitôt dans une boîte d'aluminium hermétiquement fermée, soit :
36 prélèvements x 4 mottes = 144 mottes de 40 g environ.

22.3 - Série du mois d'Août 1972

Seule la densité apparente totale a été mesurée au densitomètre à membrane.

Répartis comme au mois de Mai, les prélèvements ont été doublés :

- 36 prélèvements sur parcelles n'ayant reçu que 70 unités d'azote en Mai;
- 36 prélèvements sur parcelles ayant reçu, en plus, 30 unités d'azote le 1^{er} Juin 1972.

Tous les prélèvements ont été faits en dehors des traces de roues en Août, là où était discernable le passage du culti-packer

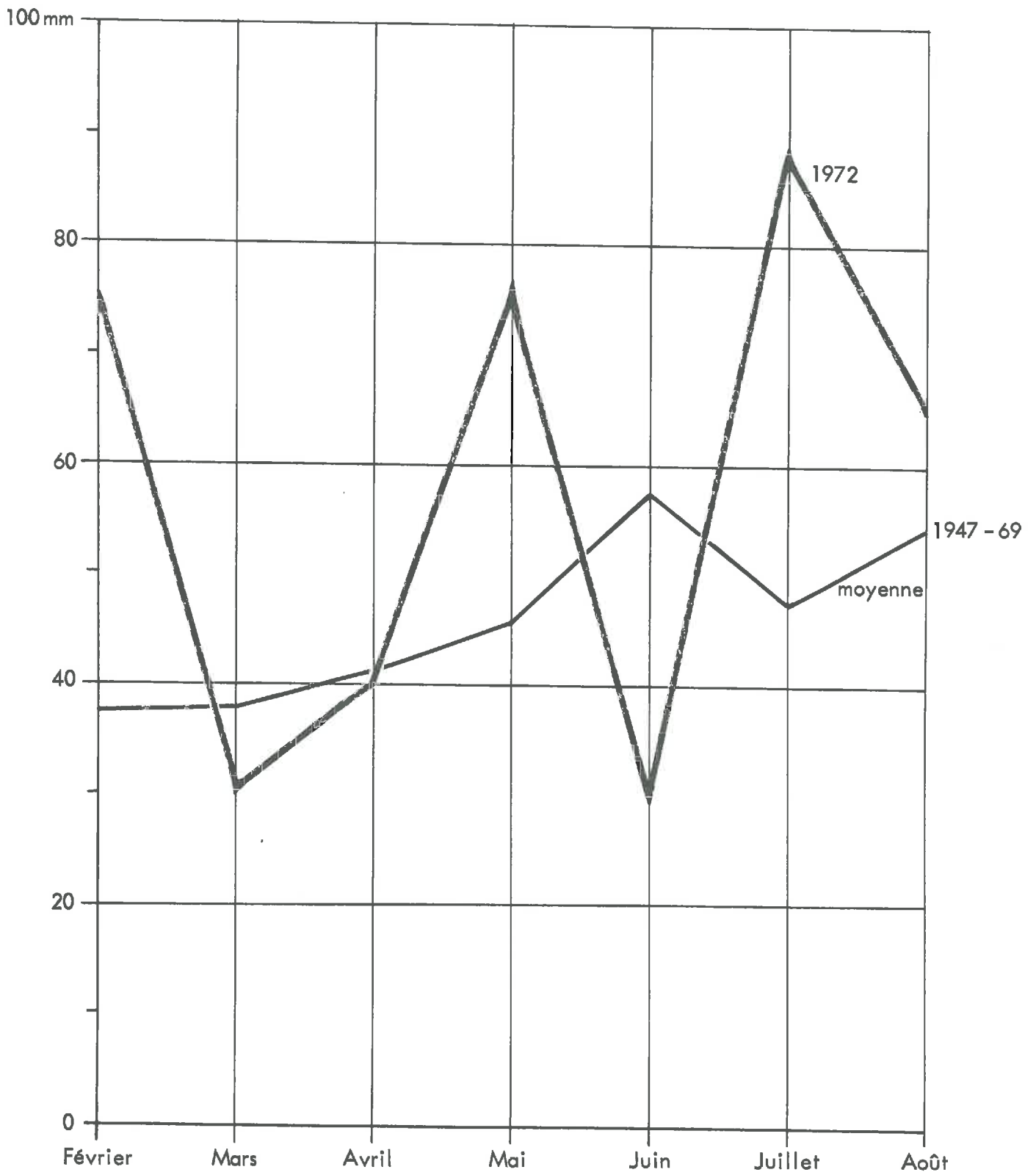
2.3 DEROULEMENT CHRONOLOGIQUE DES TRAVAUX AGRICOLES

	Nov	Dec.	Janv.	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
Cycle Végétatif :	L 0 L 1 L 2				.15 .15 .15 S	.20 .18 .16 T	.25 .20 .19 M	.20 .18 .17 E	.9 .7 .5 F	5.12 4.12 3.12 M R
PRELEVEMENTS					X1 18	X2 8 X2 18				X 20
<u>LABOUR</u>	L 2 19				L1 14					
<u>Façons superficielles</u>					15.L1.2 15.L0.1.2 15.L0.1.2					
<u>Cross kill</u>										
<u>Séries triple disque</u>										
<u>Culti-packer</u>										
<u>TRAITEMENTS</u>										
<u>Aminotriazole(1) :</u>	18.08.71	Partout								
<u>(2) :</u>										
<u>Paraquat</u>				17.10.1	9. L0.1					
<u>D N O C</u>										
<u>M C P A</u>						28.10.1.2	19.L0.1.2			
<u>FUMURE</u>										
<u>P K-100-100</u>	5.10.71	partout								
<u>Ammonitrate 33,5(1)</u>										
a) <u>Toutes parcelles sauf</u>										
<u>et L1 : 70 U 2 de LO</u>										
b) <u>Sur parcelle 2 de LO et</u>							4.L			
<u>L1</u>										
<u>AMMONITRATE 33,5(2)</u>										
<u>sur 1 de LO, L1, L2, 30U</u>										

X : Prélèvements
S : Semis
T : tallage
M : Montaison
E : Epiaison
F : Floraison
M : Maturité
R : Récoite
L0.1.2=L0, L1, L2
La barre verticale du L indique la date

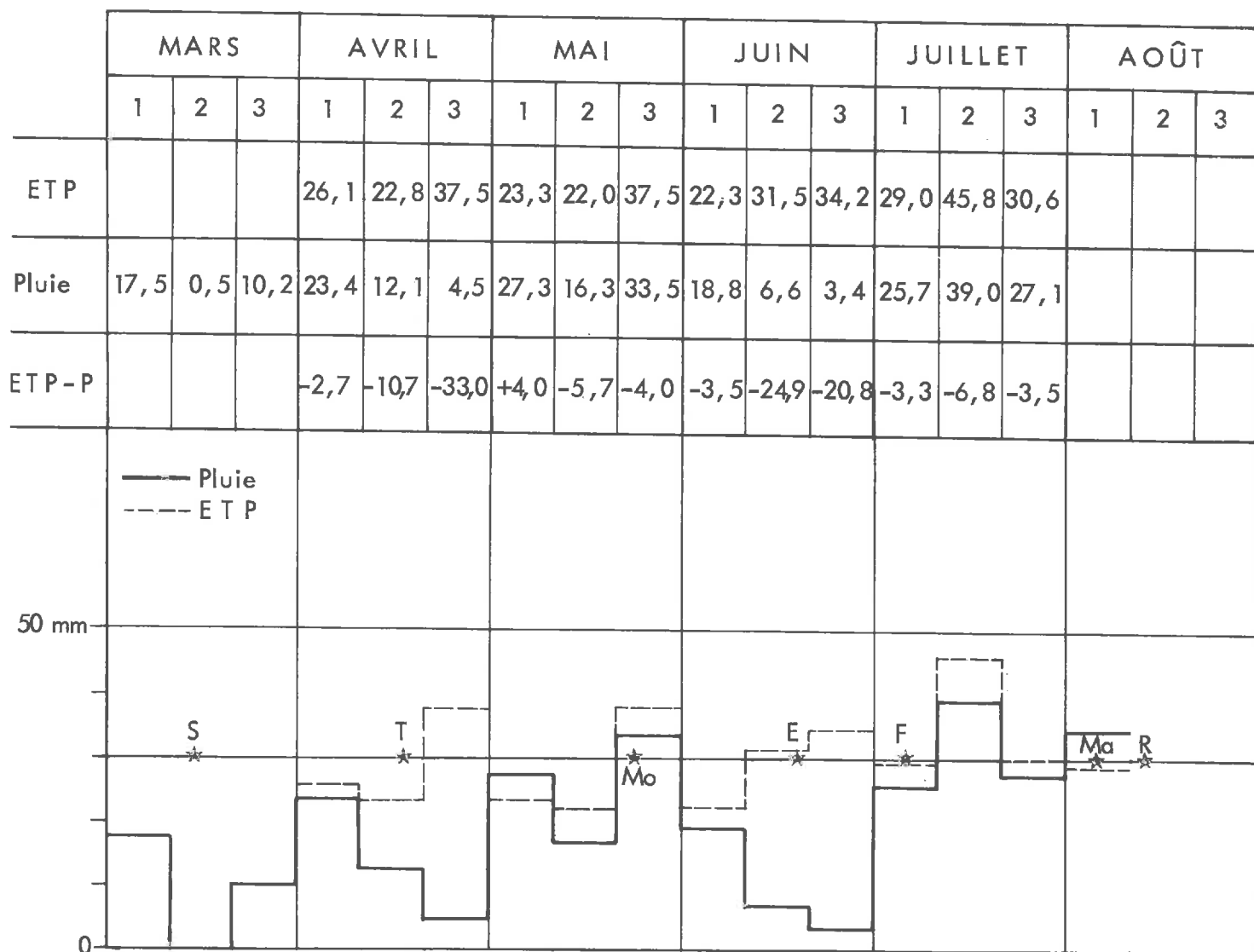
24 CONDITIONS CLIMATIQUES DE L'ANNÉE

24. 1 PLUVIOMÉTRIE



Graphique n° 6

24 . 2 BILAN HYDRIQUE



Bilan hydrique : en mm de pluie par jour : moyenne par décade

DEFICIT : en Avril au tallage
en Juin à l'épiaison

Mais : bonne alimentation à l'époque
de la formation du grain

S Semis
T Tallage
Mo Montaison
E Epiaison
F Fenaison
Ma Maturation
R Récolte

24.3 - Températures (cf. graphique)

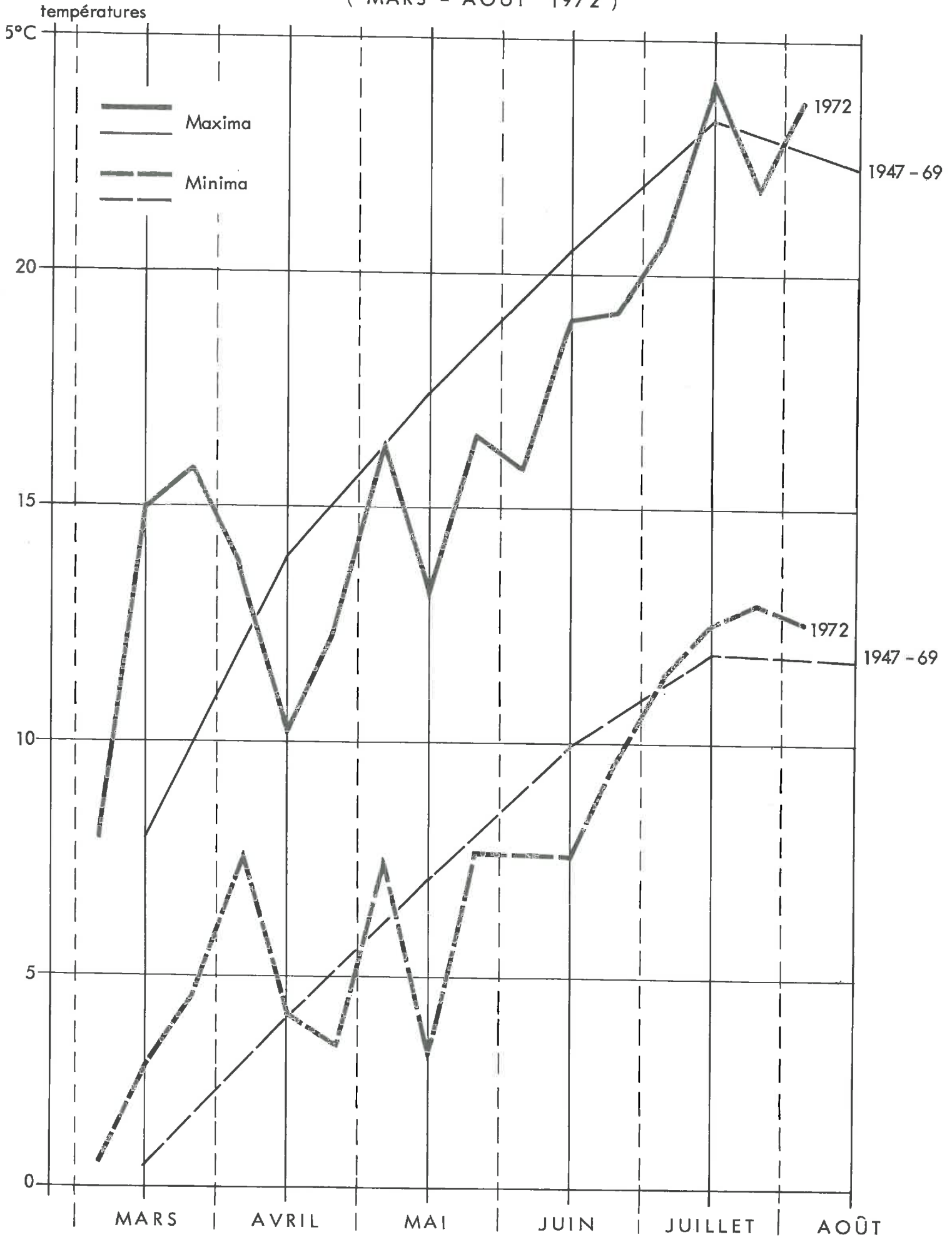
La campagne au cours du cycle végétatif, a été particulièrement fraîche : le départ excessivement lent des maïs, voisins de l'essai A VI, aucune couverture du sol n'étant encore assurée, en témoignait.

Pour l'orge, alors que l'on atteint généralement entre la levée et l'épiaison 900°C , au 60ème jour, ce total ne fut réalisé qu'au 85ème jour.

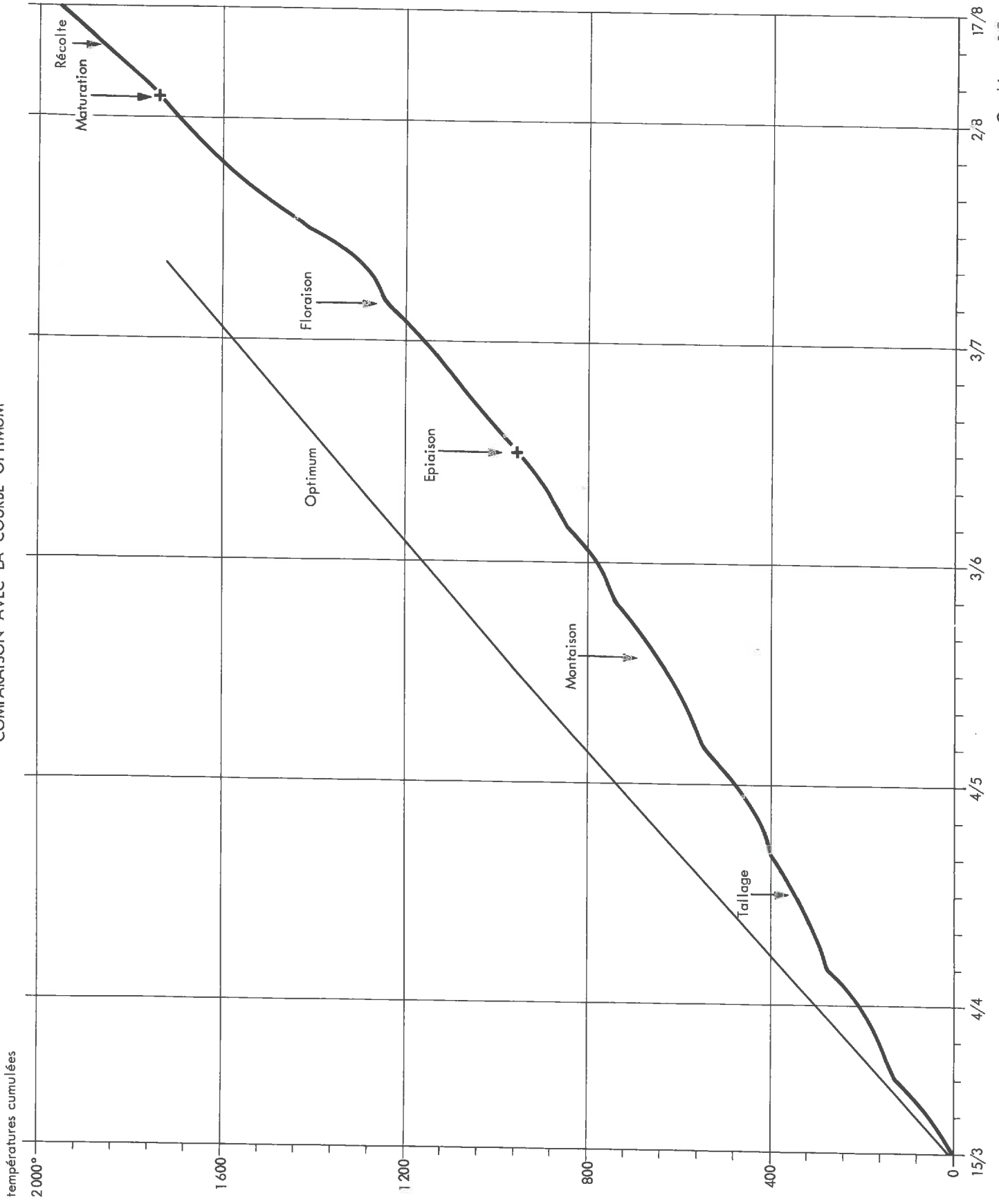
La maturité, généralement obtenue au 110-120ème jour, à $1.600 - 1700^{\circ}\text{C}$, n'intervint qu'au 140ème jour.

Les rendements très satisfaisants n'ont cependant pas souffert de cet allongement du cycle.

24 . 3 MOYENNES DES MAXIMA ET DES MINIMA
(MARS - AOÛT 1972)



(DU 13 MAKS AU 13 MOUI)
COMPARAISON AVEC LA COURBE OPTIMUM



2.5 - Caractéristiques du sol

25-1 - Caractéristiques texturales du sol

1- ANALYSE GRANULOMETRIQUE : (*laboratoire* S.A.S. d'ARRAS)- en pourcentage

	argile	L.F	L.G	S.F	S.G
Bloc II - 3 prélèvements	22,03	23,1	46,7	4,2	3,8 %
Bloc V - 3 prélèvements	23,4	23,7	44,3	3,9	3,6 %

2- DENSITE

		Effectif	% CV	Ecart-type
Densité réelle	2,724	36	2	0,054
Densité texturale sèche.....	1,858	24	1,03	0,019
Densité texturale humide.....	1,617	18	2,43	0,039
Porosité texturale sèche.....	32,09	24	1,67	0,52
Porosité texturale humide (à la saturation).....	41,08	18	4,42	1,81

3- HUMIDITE

Point de fletrissement permanent pF = 4,2.....	9,19	30	7,22	0,66
Humidité texturale à la saturation....	22,50	18	7,82	1,36
Limite de retrait	15,2 %	à partir de la courbe PELTIER		
Humidité équivalente : pF = 3.....	21,83	48	3,38	0,73
Gonfiement potentiel	14,47 %			
Gonfiement à l'humidité équivalente..	11,08 %			

4- RESISTANCE A LA COMPACTION

Porosité à l'optimum PROCTOR.....	37,64 %
Humidité à l'optimum PROCTOR....	17,33 %
Vol. d'eau dans la porosité optimum PROCTOR	78,08 %
% d'air dans volume terre à oP.....	8,25 %
Porosité structurale à optimum PROCTOR.....	5,55 %
(Pop - PTs)	

...../

25.2 - Caractéristiques structurales Moyennes
de AVI

	Moyenne	Ecart type	Effectif
Densité apparente totale :			
0 - 10 cm	1,439	0,195	18
10 - 20 cm	1,440	0,090	18
Densité apparente Mottière :			
0 - 10 cm	1,572	0,0425	72
10 - 20 cm	1,580	0,0280	72
Porosité apparente totale :			
0 - 10 cm	46,54	3,65	18
10 - 20 cm	47,16	7,30	18
0,20 cm	47,14	1,71	18
Porosité apparents Mottière :			
0 - 10 cm	42,16	1,88	72
10 - 20 cm	42,06	1,38	72
Porosité de fissures			
0 - 10 cm	4,49	2,59	18
10 - 20 cm	6,23	5,56	18
Porosité de fissures Mottières :			
0 - 10 cm	5,87	1,33	72
10 - 20 cm	5,65	1,62	72
Porosité structurale			
0 - 10 cm	10,36	2,87	18
10 - 20 cm	11,08	6,45	18

25.3 - Autres facteurs influençant le comportement structural
C/N = 9,4

Matière organique totale : 2,4 %

CO₃Ca : 3 %

COMMENTAIRES -

- l'essai A VI est implanté sur un type de sol "brun légèrement lessivé", édifié sur une roche mère "limon de plateau".
- il est caractérisé par la présence de complexes argile - humus - oxyde de fer à l'état flocculé qui constitue le ciment des agrégats.
- le taux de matière organique, satisfaisant, compte-tenu du pourcentage d'argile, en dépit d'une monoculture d'orge, avec paille exportée, implantée depuis 6 ans, atteste du bon passé cultural de la parcelle.
- La stabilité structurale de tels sols est bonne, à moyenne ; soit, en utilisant la formule de Morel (1958) :
Ag.B = 13,3 + 2,81 MO ou AgB = 8,074

- La détermination du coefficient K en cm d'eau percolée en 1 heure à partir de la formule de S. MERIAUX (1958) :

$$\log_{10} K = 2,44 - 0,32 \frac{L}{A} \quad (P < 0,05)$$

indique un drainage satisfaisant de 13,2 cm/h (pour $\log_{10} K = 2,12$)

Si à partir de la valeur de K, nous calculons S à l'aide de la formule :
 $3 \log K + 2,5 \log_{10} s - 7,5 = 0$ (Monnier), nous obtenons une valeur de
 $\log_{10} S = 0,456$; révélatrice d'un comportement de terre franche.

- le gonflement est notable, 14,4 %; il indique que la structure du sol est sous la dépendance directe des alternances de dessiccation et d'humectation il confirme le bon niveau de stabilité structurale.

L'analyse granulométrique fait apparaître une légère différence entre le bloc II et le bloc V, situés, respectivement, vers le bas et vers le haut de l'essai.

L'appréciation des densités réelles à l'aide du pycnomètre à air différentiel permet de retrouver cette différence significative, de 0,090 à l'avantage du bloc VI : PPDS = 0,064 ($P < 0,05$)

Il en est de même pour les humidités, après réhumectation sous vide et les porosités texturales humides correspondantes.

Cette légère hétérogénéité confirme le bien fondé de la disposition en blocs se succédant dans le sens de la pente. Aucune différence significative entre les traitements n'apparaît.

Les chiffres suivants, obtenus par différence entre les caractéristiques texturales et les caractéristiques structurales, indiquent la faiblesse des écarts à l'intérieur desquels se situe cette étude.

	0-10 cm	10-20 cm
Porosité apparente totale -		
- Porosité texturale sèche	14,15 %	15,07 %
- Porosité texturale humide	5,46	6,08
Porosité structurale :		
- Porosité structurale à l'optimum Proctor	4,81	9,58

De plus , il apparait que le sol dans son ensemble est en état de tassement, sans être ni soudé, ni compacté. Aucun prélèvement, en effet, ne révèle une Pat < PT ou une Pam < PT, d'une part, ou inférieur à une porosité PROCTOR à l'humidité correspondante, d'autre part.

.../

III - LES DENSITES

3.1 - Les résultats

Ils figurent dans les pages suivantes.

31.1 - Les densités réelles

Elles sont pratiquement constantes, cependant des différences faibles, mais systématiques, lors de leur détermination au pycnomètre à air nous ont incité à faire faire une analyse granulométrique des blocs II et V.

Cette légère hétérogénéité nous a amené, après observation de la dispersion des points, à effectuer un calcul de corrélation simple entre la densité réelle et les autres densités d'une part, et les porosités correspondantes, d'autre part.

3.2 - Relations entre les densités

32.1 - Liaison entre la densité réelle et la densité apparente mottière

La densité réelle ne détermine pas la densité apparente mottière.

Cette absence de liaison sera confirmée par la différence significative entre la porosité texturale et la porosité mottière.

32.2 - Relations entre la densité apparente mottière et la densité apparente totale

- de 0 à 20 cm (a+b), la liaison est inexistante
- en profondeur, également
- en surface, la liaison, faible, apparaît : R = 0,536 ; S; 18 points

.../

RESULTATS RECAPITULATIFS

Densité apparente totale

0 - 10 cm

	1968 (Août) (Méthode aux anneaux)	Mai 1972 densitomètre	Août 1972 densitomètre
L 0 <i>Cemen direct</i>	1,396	1,496	1,471
L 1 <i>Rotavalor</i>	1,312	1,387	1,404
L 2 <i>Labour</i>	1,375	1,507	1,447
Signification	HS	NS	NS

10 - 20 cm

L 0	1,307	1,407	1,520
L 1	1,384	1,569	1,530
L 2	1,342	1,340	1,498
Signification	HS	NS	NS

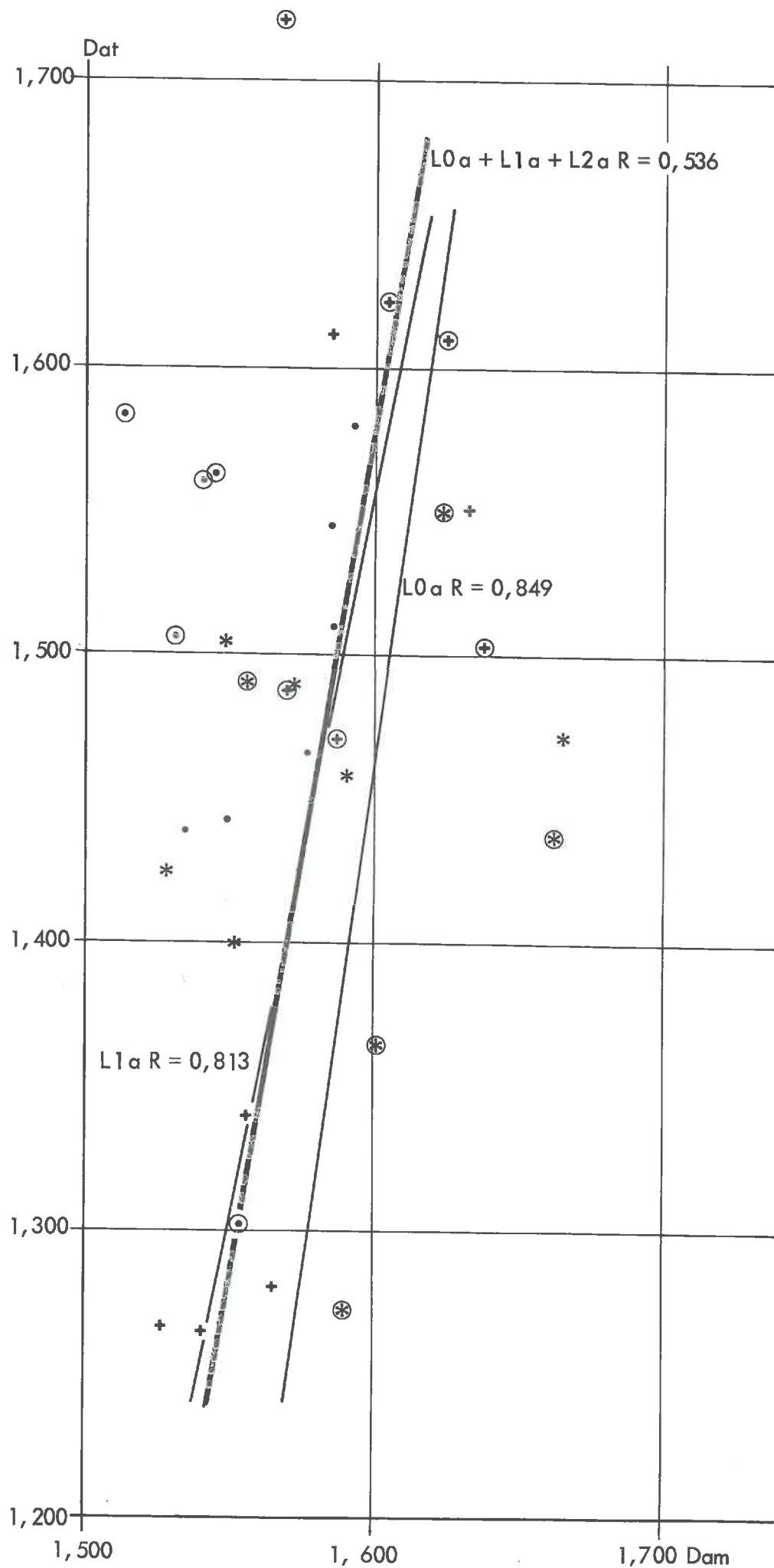
En Août, les différences de densité entre niveau par traitement donnent :

L0 a - L0 b → NS

L1 a - L1 b → S

L2 a - L2 b → NS

RELATION ENTRE LA DENSITÉ APPARENTE TOTALE ET LA DENSITÉ APPARENTE MOTTIÈRE



Par traitement, nous obtenons :

				dam	dat
L ₀ a	R = 0,849	S	6 points	1,495	1,595
L ₁ a	R = 0,813	S	6 points	1,367	1,568
L ₂ a	Pas de liaison				

L'existence de cette liaison à ces deux niveaux, de densités différentes met en évidence l'évolution parallèle des deux densités, totale et mottière.

Le premier niveau, de structure fragmentaire feuilletée, a une densité mottière voisine de la densité apparente totale.

Le deuxième niveau, de structure fragmentaire, grumeleuse, à mottes bien différenciées, résultat du passage de la fraise-rotative, accuse une différence nette entre les densités, totale et mottière.

LE FAIT IMPORTANT EST SURTOUT L'INDEPENDANCE DE LA DENSITE APPARENTE TOTALE PAR RAPPORT AUX AUTRES DENSITES.

3.3 - Différences entre les densités du mois de Mai et celles du mois d'Août

33.1 - Par traitements

- En surface : Les différences, non significatives, sont très faibles et ne peuvent être prises en considération.
- En profondeur:
 - en L₀ : Une densité plus faible au mois de Mai, mais une mesure anormalement faible au bloc V : 0,928, vient fausser la comparaison.
 - en L₁ : aucune différence
 - en L₂ : une densité plus forte au mois d'Août, du fait sans doute de la réduction des structures creuses, rencontrées à ce niveau en Mai, lors des prélèvements.

L'étude des liaisons entre la porosité et l'humidité nous dira quelle est l'importance de cette dernière dans les variations.

.../

Signification des Résultats

		Moyenne	Ecart type	P. P. D. S
dr	a + b	2,724	0,054	0,064
dam	a	1,572	0,042	0,050
	b	1,580	0,028	0,030
dat (mai)	a	1,439	0,195	0,250
	b	1,440	0,090	0,120
(Août)	a	1,438	0,093	0,190
	b	1,516	0,134	0,280

Résultats élémentaires - Mai 1972

Densités apparentes - totale et Mottière

	a : 0 - 10 cm				b 10 - 20 cm <i>Pointe'</i>				0-20 cm	
	Densité réelle	Densité au champ	Densité apparente Mottière		Densité réelle	Densité au champ	Densité apparente Mottière			Densité apparente totale
			humide	sèche			humide	sèche		
L0	2,686	1,543	1,585	1,657	2,691	1,304	1,557	1,621	46,13	
	2,724	1,579	1,591	1,607	2,712	1,563	1,545	1,625	42,12	
	2,503	1,439	1,537	1,608	2,643	1,583	1,514	1,573	41,85	
	2,692	1,466	1,578	1,652	2,682	1,560	1,541	1,606	43,50	
	2,784	1,510	1,586	1,617	2,791	0,928	1,561	1,665	56,51	
	2,809	1,442	1,549	1,653	2,793	1,506	1,531	1,632	43,17	
	2,699	1,496	1,595	1,645	2,718	1,407	1,541	1,620	45,54	
L1	2,750	1,613	1,585	1,646	2,661	1,505	1,638	1,720	42,07	
	2,677	1,341	1,558	1,617	2,724	1,470	1,586	1,728	51,14	
	2,770	1,556	1,632	1,708	2,760	1,623	1,604	1,672	42,71	
	2,694	1,265	1,541	1,633	2,680	1,610	1,625	1,714	46,11	
	2,856	1,281	1,565	1,689	2,776	1,720	1,569	1,675	47,23	
	2,817	1,268	1,527	1,669	2,800	1,487	1,570	1,669	50,97	
	2,760	1,387	1,568	1,673	2,733	1,569	1,598	1,696	46,70	
L2	2,674	1,489	1,572	1,639	2,674	1,004	1,586	1,681	48,13	
	2,665	1,400	1,553	1,643	2,738	1,549	1,610	1,694	54,23	
	2,740	1,459	1,591	1,678	2,708	1,414	1,557	1,665	47,17	
	2,723	1,426	1,528	1,611	2,733	1,365	1,602	1,696	48,57	
	2,680	1,513	1,554	1,683	2,713	1,439	1,663	1,775	44,80	
	2,719	1,473	1,665	1,795	2,841	1,273	1,590	1,742	52,12	
	2,700	1,507	1,577	1,674	2,734	1,340	1,601	1,708	49,17	

Les résultats sont toujours présentés dans l'ordre du Bloc I au Bloc VI

Résultats élémentaires des prélèvements du 17 au 23 Août 1972
(Densitomètre à membrane)

0 - 10 cm				10 - 20 cm			
L 0	L 1	L 2		L 0	L 1	L 2	
densité % H2O	densité % H2O	densité % H2O		densité % H2O	densité % H2O	densité % H2O	
1,433	1,474	1,530	22,1	1,613	1,472	1,480	18,5
1,434	1,394	1,574	20,8	1,469	1,533	1,561	15,7
1,651	1,429	1,495	20,2	1,335	1,588	1,670	20,6
1,538	1,372	1,530	18,8	1,466	1,568	1,529	20,7
1,307	1,332	1,166	18,1	1,504	1,486	1,519	20,3
1,415	1,233	1,271	16,0	1,505	1,186	1,219	19,8
1,577	1,456	1,478	21,0	1,491	1,589	1,253	20,5
1,397	1,558	1,399	16,8	1,583	1,609	1,629	21,2
1,469	1,358	1,528	20,4	1,551	1,586	1,516	20,3
1,480	1,269	1,650	17,4	1,507	1,456	1,511	20,1
1,484	1,392	1,440	19,1	1,480	1,559	1,496	19,8
1,468	1,546	1,312	17,6	1,746	1,730	1,601	19,7
1,471	1,404	1,447	18,9	1,520	1,530	1,458	19,8
					20,1	21,9	

IV - LES POROSITES

4.1. - Porosité apparente totale41.1. - Comparaisons entre traitements - Mois de MAI411.1 - Pour l'ensemble du profil étudié

Les porosités par traitement sont très voisines, sans différences significatives; leur hiérarchie est celle-ci, prévisible; $L_0 < L_1 < L_2$.

411.2 - En surface : On remarque une grande similitude des résultats entre L_0 et L_2 et une porosité supérieure en L_1 , du fait du travail intense des fraises rotatives.

411.3 - En profondeur : On note la même ressemblance entre L_0 et L_2 .

L_1 est caractérisé par une porosité nettement plus faible.

41.2. - Comparaisons entre les niveaux 0 - 10 cm (a) et 10 - 20 cm (b).412.1 - Par traitement :

- au mois de MAI le calcul statistique, par la méthode des couples, ne fait apparaître aucune différence significative entre niveaux pour un traitement donné, bien que cette différence soit perceptible par un simple examen au couteau en L_1 : le faible nombre de répétitions, et leur grande dispersion sont responsables de cette absence de signification.

- au mois d'AOUT avec 12 répétitions, au lieu de 6, la plus grande porosité en surface de L_1 est significative.

Pour L_2 et L_0 , pas de différence significative entre les niveaux a et b.

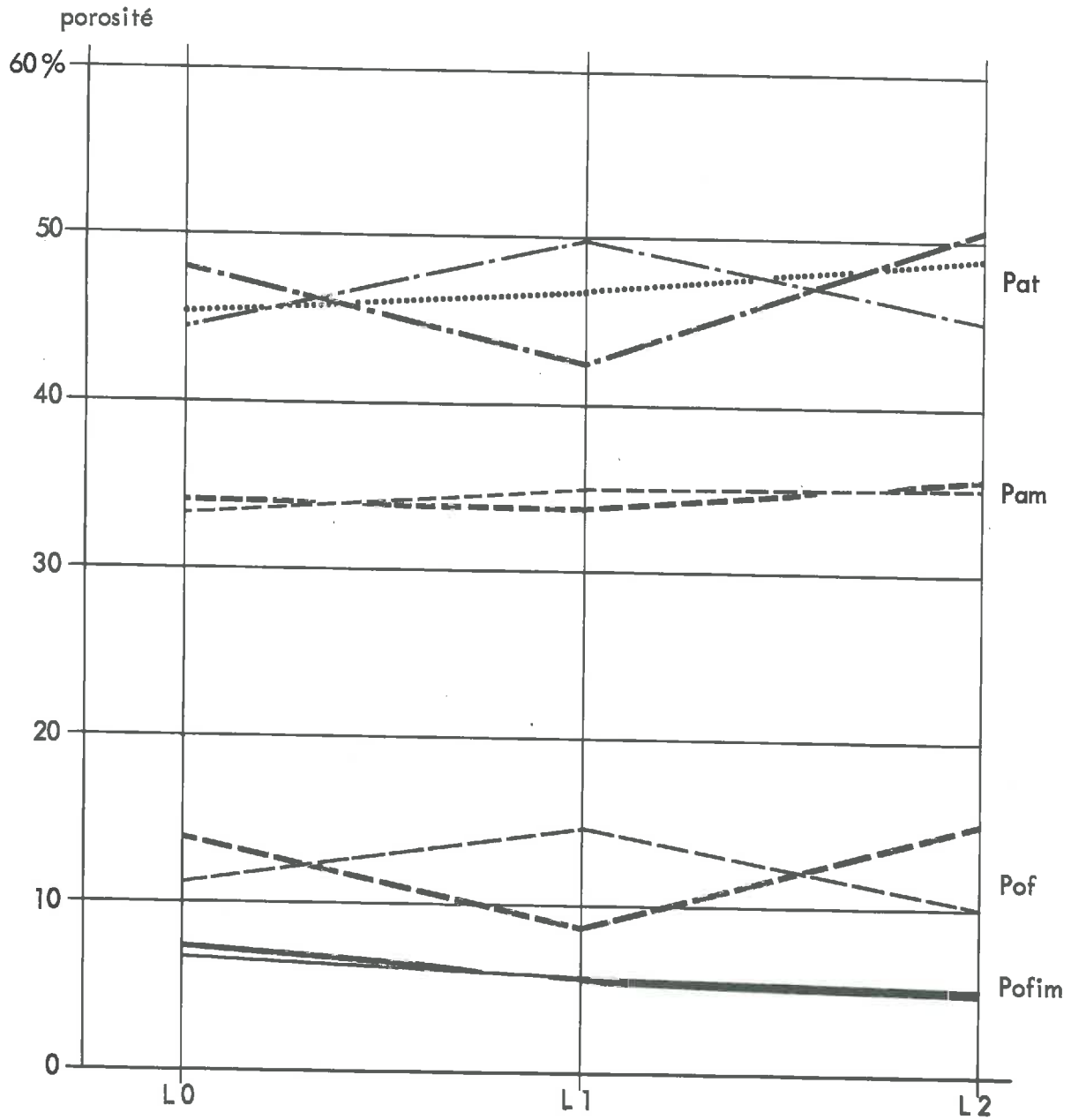
Le calcul confirme la discontinuité marquée dans le traitement L_1 entre les niveaux a et b. Elle est confirmée par le même calcul effectué avec les teneurs en eau.

Signification des Résultats

	Moyenne	Ecart type	P. P. D. S. (0,05)
. Porosité apparente totale :	a	46.54	3,65
	b	47.16	7,30
	a + b	47.14	1,71
. Porosité apparente mottière :	a	42.16	1,88
	b	42.06	1,38
	a + b	36.20	1,81
. Porosité texturale :			
. Porosité de fissures :	a	4,49	2,59
	b	6,23	5,56
. Porosité de fissures intra-mottières :	a	5,87	1,33
	b	5,65	1,62
	a + b	10,36	2,87
. Porosité structurale :	a	10,36	2,87
	b	11,08	6,45
			3,69
			8,29

COMPARAISON GRAPHIQUE DE POROSITÉ

PRÉLÈVEMENTS MAI 1972



porosité apparente totale	0 - 10 cm	10 - 20 cm
porosité apparente mottière	-----	-----
porosité de fissures	-----	-----
porosité de fissures intramottières	-----	-----
porosité apparente totale	0 - 20 cm	
	

4.2. - Porosité apparente mottière

42.1 - Porosité apparente mottière totale

LES DIFFERENCES SONT TRES MINIMES. TOUTES LES MOTTES, AUX DEUX NIVEAUX, DANS LES 3 TRAITEMENTS, ONT DES POROSITES SEMBLABLES : C'EST LE POINT IMPORTANT DES RESULTATS.

- En surface : Les mottes de L_1 semblent les plus poreuses.
- En profondeur : Ce sont les mottes de L_0 .

Aucune différence significative n'existe.

42.2 - Porosité de fissures intra-mottière

En déterminant la droite de gonflement des mottes, puis en la comparant à la courbe PELTIER (page 12 ter) nous avons mis en évidence l'existence d'une porosité de fissures intra-mottière.

- en surface : Elle est d'autant plus grande que le sol est moins travaillé :

$$L_0 < L_1 \neq L_2$$

Cela n'est-il pas dû à la structure lamellaire, feuilletée, caractéristique, aisément observable en L_0a .

- en profondeur : On observe $L_0 > L_2 > L_1$. Cette porosité de fissures intra-mottière plus importante en L_0 suggère une puillulation plus grande des vers de terre, déjà signalés par les auteurs et, d'autre part, une décomposition en place des systèmes racinaires des années antérieures.

Aucune différence significative.

4.3. - Porosité de fissures

43.1 - Comparaisons entre traitements

En surface : ELLE SUIT L'INTENSITE DU TRAVAIL DU SOL : $L_1a > L_2a > L_0a$, dans le même sens que la porosité apparente totale : un calcul de corrélation mettra en évidence, plus loin, cette relation.

En profondeur : On peut faire la même remarque si l'on considère le travail du sol effectué à ce niveau là $L_2b > L_0b > L_1b$.

43.2 - Comparaisons entre les niveaux a et b

Malgré la différence très nette des moyennes, le calcul statistique ne révèle aucune différence significative.

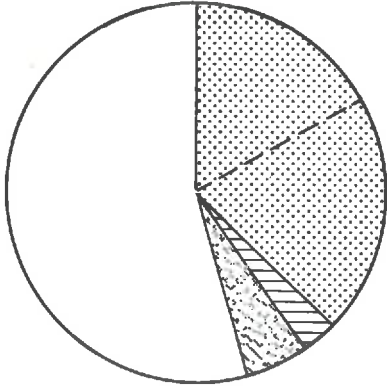
On note des fissures plus importantes en profondeur en L_0 et L_2 , des fissures plus réduites en profondeur en L_1 .

.../

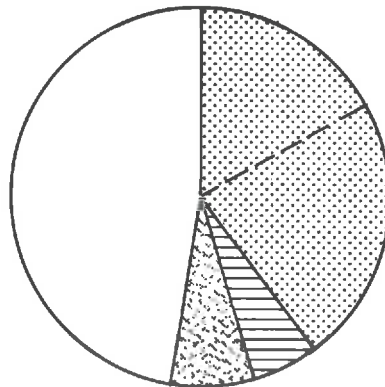
RÉPARTITION DES 3 FAMILLES DE POROSITÉ DANS 100 CM³ DE SOL

- 10 cm

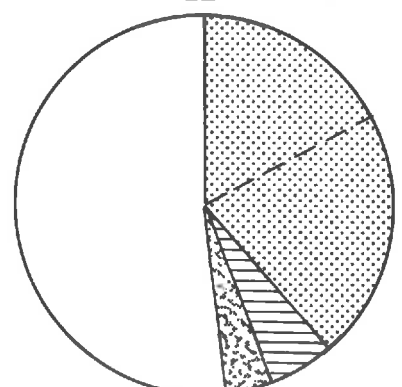
L0



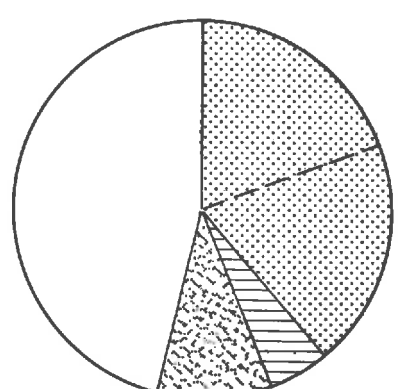
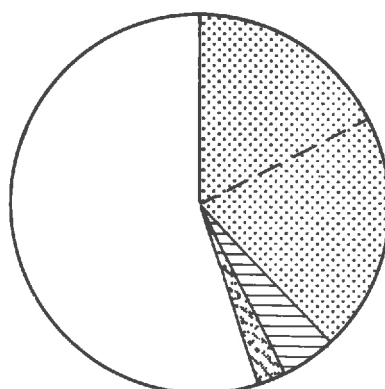
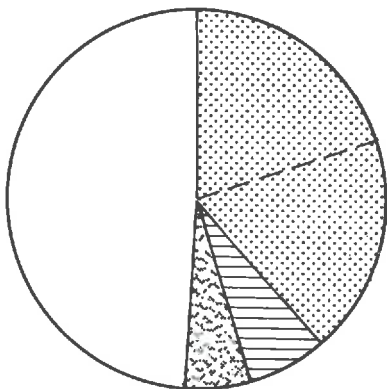
L1



L2



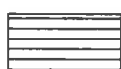
0 - 20 cm



Terre



Pofim



Pof



PT

teneur en eau

En profondeur comme en surface, nous avons essayé d'évaluer l'individualisation des mottes dans le profil en comparant la porosité totale et la porosité des mottes. Elle est significative pour les niveaux L₁a et L₂b.

4. 4. - Porosité structurale

Elle résulte de la somme des porosités de fissures intra-mottières et des porosités de fissures.

44. 1. - Par traitement et par niveau

Puisqu'elle dépend de la porosité de fissures :

en surface elle sera : $L_1 > L_2 > L_0$

en profondeur : $L_2 > L_0 > L_1$

les différences ne sont pas significatives.

4. 5. - Relations entre les porosités

45. 1. - Influence de la porosité apparente mottière sur la porosité apparente totale.

Malgré leur faible coefficient de variation, les porosités apparentes mottières influencent légèrement la porosité apparente totale, sur l'ensemble du profil :

a + b R = 0,355 36 points

Cette liaison se vérifie en surface mais non en profondeur :

niveau a R = 0,717 18 points

L₀a accuse une liaison nette : R = 0,818, 6 points, ce qui est en accord avec sa faible porosité de fissures.

45. 2. - Influence de la porosité de fissures sur la porosité apparente totale.

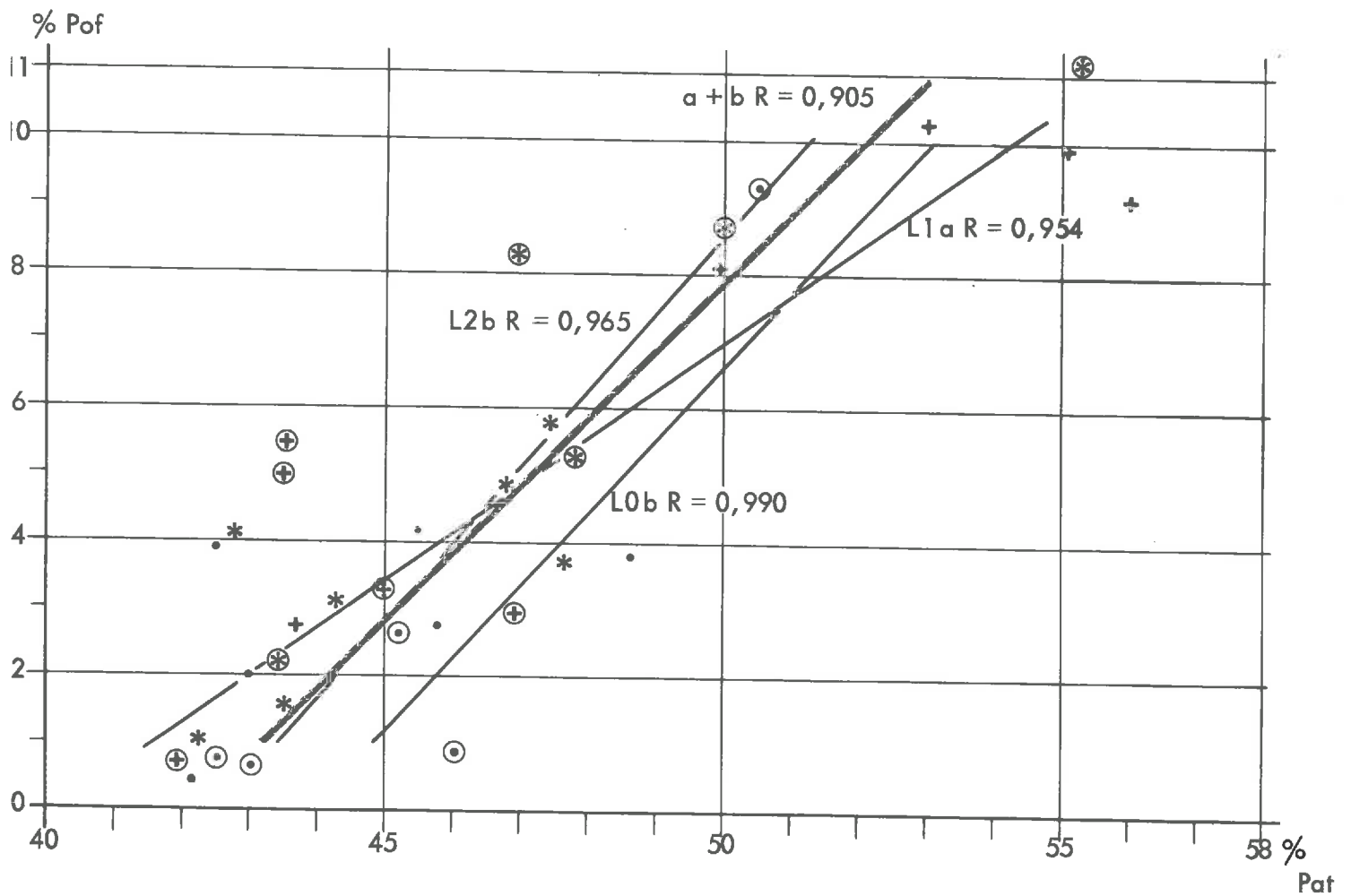
ELLE EST PREPONDERANTE AUX DEUX NIVEAUX a et b COMME EN a + b.

a R = 0,913 18 points

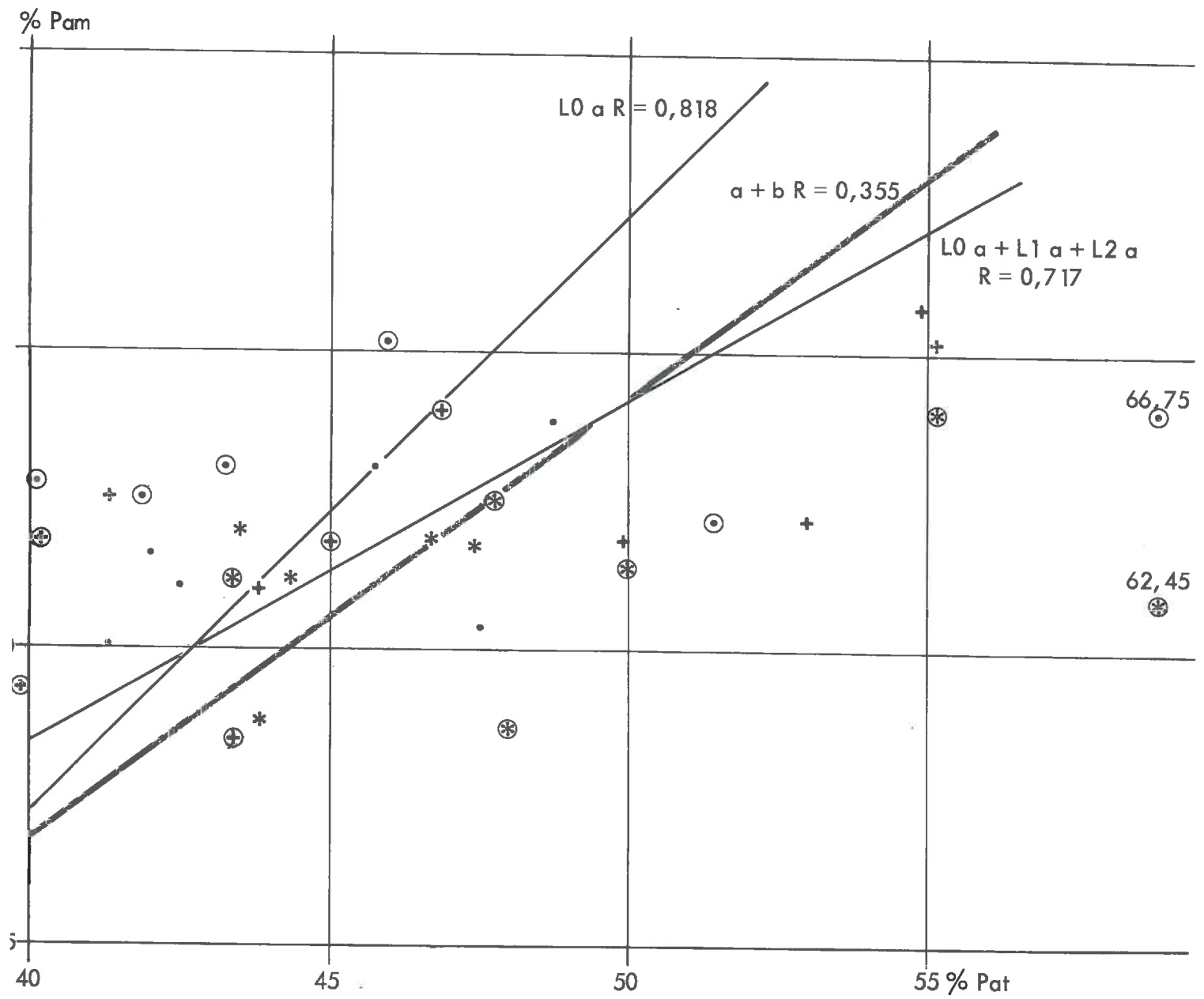
b R = 0,913 18 points

a + b R = 0,905 36 points

RELATION ENTRE LA POROSITÉ DE FISSURES
ET LA POROSITÉ APPARENTE TOTALE



RELATION ENTRE LA POROSITÉ APPARENTE MOTTIÈRE
 ET LA POROSITÉ APPARENTE TOTALE



452.1 - par traitements

Cette liaison se retrouve en :

L_1 a	$R = 0,954$	6 points
L_0 b	$R = 0,990$	6 points
L_2 b	$R = 0,965$	6 points

Ces relations caractéristiques et très nettes, même avec 6 points, confirment les résultats des porosités de fissures; en dessous d'une porosité de fissures de 4 %, la relation n'apparaît pas.

45.3 - Influence de la porosité de fissures intra-mottière sur la porosité apparente totale.

L'observation du nuage de points ne suggère aucune liaison.

Résultats élémentaires MAI 1972 : Porosités apparentes, totale et mottière

Vérification expérimentale de l'équation : Pat = PT + Pof + Pofim

niveau a : 0 - 10 cm

1	2	3	4	humidité densitomètre	Pam	humidité motte	5
Pat - Pam	Pofim Pam - PT % H ₂ O Pam	Porosité Texturale à %H ₂ O des mottes	Pat 1 + 2 + 3				Porosité structurale 1 + 2
L ₀	6,52 7,12 10,83 8,55 3,27 3,38 6,61	34,47 34,47 27,76 32,83 39,76 41,47 35,12	42,55 42,00 42,50 45,54 45,76 48,66 44,50	16,27 13,64 13,64 12,86 19,97 20,95 16,22	40,99 41,59 38,59 41,38 43,03 44,85	17,26 17,47 16,66 16,59 21,08 22,17 18,53	8,08 7,56 14,74 12,71 6,00 7,19 9,38
L ₁	6,04 4,45 7,44 7,79 3,85 4,15 5,62	35,30 37,35 33,64 35,00 41,35 41,64 37,38	41,34* 49,90 43,82 53,03 55,14 54,98 49,70	12,86 15,20 12,86 12,35 21,68 21,19 16,02	42,36 41,80 41,08 42,79 45,20 45,79	17,64 20,90 15,63 18,53 21,12 22,19 19,33	7,06 12,55 10,18 18,03 13,79 13,34 12,49
L ₂	7,29 3,23 7,08 8,52 4,81 1,40 5,38	33,92 38,49 34,85 35,36 37,20 37,36 36,19	44,31 47,46 46,75 47,63 43,54 42,84 45,42	17,64 12,36 12,10 14,41 20,21 22,04 16,46	41,21 41,72 41,93 43,88 42,01 38,76	17,97 22,38 17,43 18,19 20,81 20,15 19,48	10,39 8,97 11,90 12,27 6,34 5,48 9,22
3,83	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
S							

(*) - chiffre obtenu au densitomètre, remplacé par la porosité mottière plus forte pour la vérification de l'équation ci-dessus.

Résultats élémentaires MAI 1972 : Porosités apparentes, totale et mottière

Vérification expérimentale de l'équation : Pat = PT + Pof + Pofim

niveau b : 10 - 20 cm

	1	2	3	4	% H ₂ O Pat	Pam	% H ₂ O Pam	5
	Pof Pat-Pam	Pofim Pam - PT (%H ₂ O Pam)	Porosité Texturale %H ₂ O des mottes	Pat 1 + 2 + 3				Porosité structurale 1 + 2
L ₀	9,31 0,67 2,61 0,71 22,68 0,89 6,14	8,77 4,64 10,12 9,36 4,62 3,47 6,83	33,37 37,72 32,52 32,47 39,45 41,71 36,20	51,45 42,36* 45,25** 42,54 66,75 46,07 48,09	16,27 13,89 13,64 14,94 23,55 20,29 17,11	42,14 43,03 42,71 42,54 44,07 45,18 43,27	16,99 20,61 15,74 16,62 20,62 22,73 18,88	18,08 5,31 12,37 10,07 27,30 4,36 12,97
L ₁	5,00 3,31 0,69 0,56 5,43 2,97 2,99	6,13 8,04 7,06 4,25 0,72 3,82 4,76	32,31 33,73 34,13 35,11 38,76 40,10 35,69	43,44 45,08 41,19* 39,92 43,47 46,89 42,42	12,86 15,74 15,75 13,89 10,32 20,58 16,35	38,44 41,77 41,88 39,36 43,47 43,92 41,47	16,89 16,72 16,30 18,83 20,35 21,93 18,50	11,13 11,35 7,75 4,81 4,71 6,79 7,75
L ₂	21,77 2,23 5,28 8,67 8,25 11,16 9,56	7,55 5,04 7,98 6,37 2,14 1,73 5,13	33,13 36,15 34,52 35,01 36,56 42,30 36,27	62,45 43,42 47,78 50,05 46,95 55,19 50,97	17,64 14,15 15,74 18,48 21,90 23,12 NS 16,23	40,68 41,19 42,50 41,38 38,70 44,03 41,41	18,56 18,44 17,84 17,66 19,54 22,47 19,12	29,32 7,27 13,26 15,04 10,59 12,89 14,69
	S	NS	NS	NS	← S	NS	→ S	NS

(*) - Chiffre obtenu au densitomètre, remplacé par la porosité mottière, plus forte, pour la vérification de l'équation ci-dessus
 (***) - Seul prélèvement ou l'équation ne se vérifie pas.

V - LE TAUX D'AGREGATION DU SOL

5 - LE TAUX D'AGREGATION DU SOL5.1. - Résultats

0 - 10 cm

	% $\phi < 10$ mm		Epaisseur des fissures en cm Mai
	Mars	Mai	
L ₀	38,9	33,9	0,164
L ₁	30,9	24,4	0,412
L ₂	23,0	21,9	0,289
	NS	NS	NS

10 - 20 cm

L ₀	43,4	23,8	0,454
L ₁	42,3	29,9	0,190
L ₂	40,4	22,7	0,759
	NS	NS	NS

5.2. - Le pourcentage d'agrégats < 10 mm.52.1. - Comparaison entre les traitements

- l'ensemble de la parcelle A VI présente une structure à tendance granulaire,
- nous obtenons des distributions Log-normales, parallèles entre elles pour les 3 traitements et les 6 niveaux,
- les résultats expérimentaux de taux d'agrégation exprimés en pourcentage d'agrégat < 10 mm, n'accusent aucune différence significative par traitement, au niveau a comme au niveau b.

52.2. - Comparaison entre les résultats de MARS et de MAI522.1 - En surface : La similitude des résultats est évidente.522.2 - En profondeur : Un tassement généralisé s'est installé depuis MARS, plus nettement marqué en L₂.

.../

52.3. - Comparaison entre niveaux

523.1 - en MARS :

- en L_0 la différence est nulle, témoignant d'une structure homogène,
- en L_1 la différence est nettement accusée : le taux d'agrégation est le plus fort en profondeur (42,3 contre 30,9),
- en L_2 différence très nette en L_2 au bénéfice de L_2b (40,4 contre 23,0).

Aucune différence n'est significative.

523.2 - en MAI :

Les différences entre niveaux sont inexistantes.

52.4. - Relations entre le pourcentage d'agrégats ≤ 10 mm et la porosité

La seule liaison que nous ayons pu mettre en évidence est une liaison négative en surface : $L_0a + L_1a + L_2a$; $R = 0,750 - 18$ points.

Nous remarquons en effet qu'en surface L_0 a le taux d'agrégation le plus fort, en MARS comme en MAI, alors qu'il a la porosité la plus faible.

Nous pensons que nous devons faire intervenir les conditions d'expérimentation pour expliquer cette "anomalie". Elle révèle une organisation différente de la porosité entre L_0 et les autres traitements et un comportement différent au cours du processus de retrait.

En L_0 , les échantillons à structure lamellaire, feuilletée, séchant à l'air, individualisent leurs strates par un retrait orienté verticalement : ce clivage favorise l'émiettement lors des manipulations.

En L_1 et L_2 , le retrait se fait dans tous les sens sans diviser les échantillons.

Remarque : La détermination des humidités équivalentes, à partir de ces agrégats, n'a pas fait ressortir de différences entre traitements.

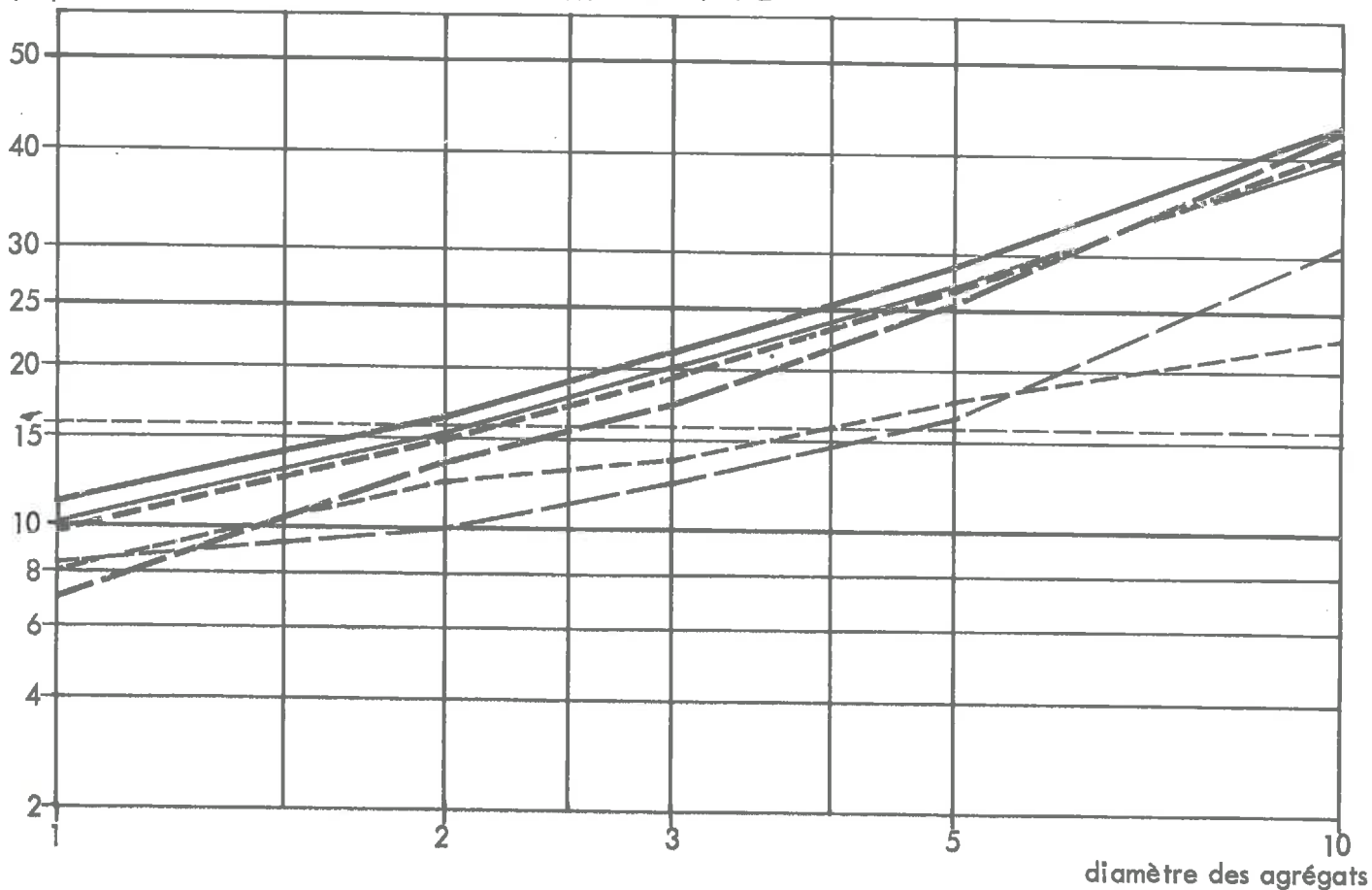
Les agrégats ont été conservés et examinés au binoculaire à l'issue du test à l'alcool. Ceux provenant de L_0 présentaient une forme caractéristique, plus aplatie, lancéolée, à faces lisses et aux arêtes plus vives. Les agrégats des traitements L_1 et L_2 étaient sphériques et d'aspect plus poreux.

.../

TEST A L'ALCOOL

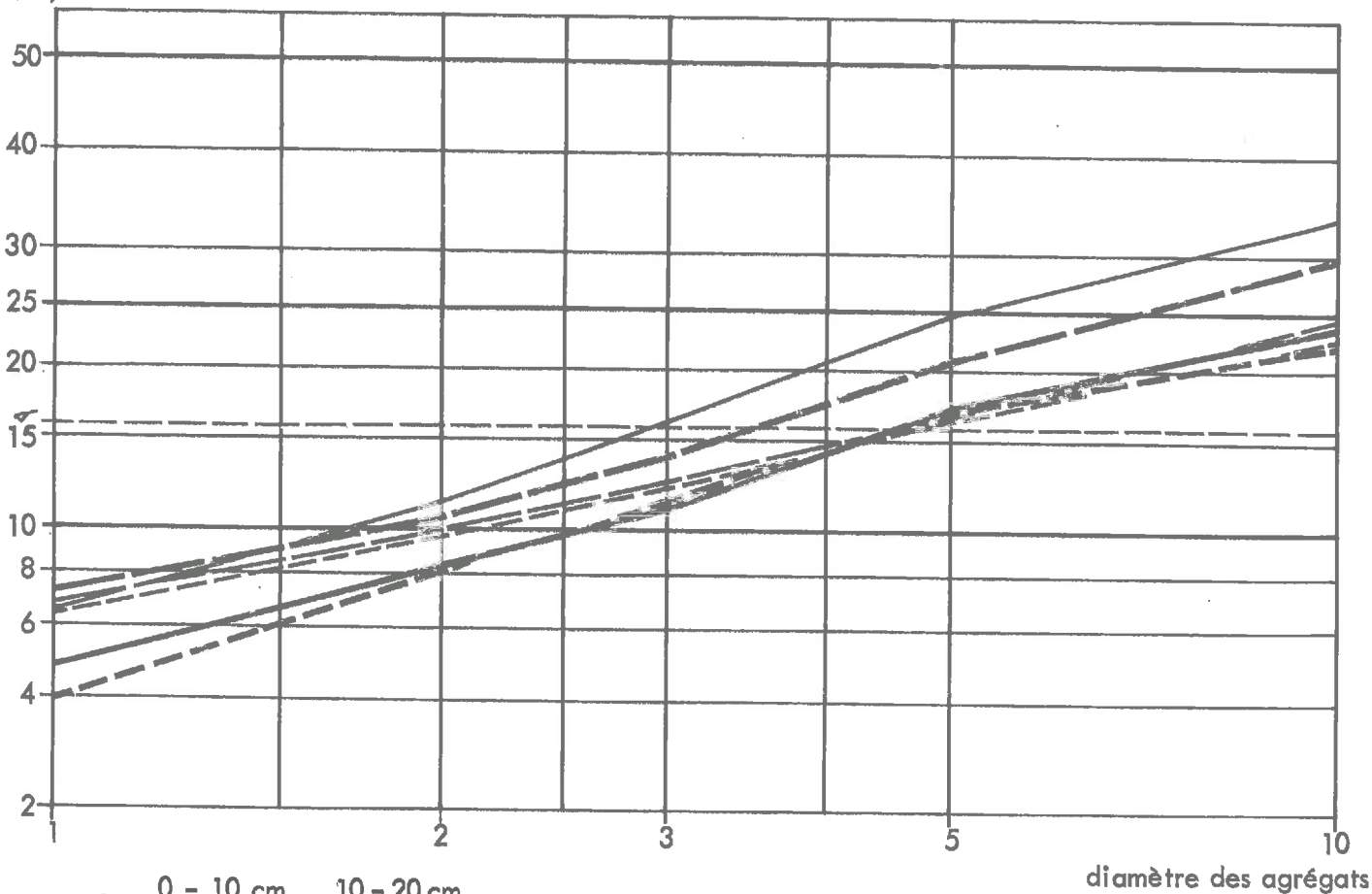
MARS 1972

% $\phi <$ la classe considérée



MAI 1972

% $\phi <$ la classe considérée



L0	<u>0 - 10 cm</u>	<u>10 - 20 cm</u>
L1	-----	-----
L2	- . - . - .	- . - . - .

5.3. - L'épaisseur des fissures

53.1. - Résultats : Présentés en 5.1., ils ne révèlent aucune différence significative, en dépit de la correspondance des moyennes avec celles de la porosité.

53.2. - Relation entre l'épaisseur des fissures et la porosité

Cette relation va permettre de confirmer les tendances exprimées par les mesures au densitomètre.

532.1 - Par niveau : Elle se confirme, dans le sens positif, sur l'ensemble du profil puis, séparément, par niveau :

a + b : R = 0,759 HS 36 points

a : R = 0,626 S 18 points

b : R = 0,806 HS 18 points

532.2 - Par traitement : Elle se confirme aux niveaux les plus poreux :

L₁ a : R = 0,628 S 6 points

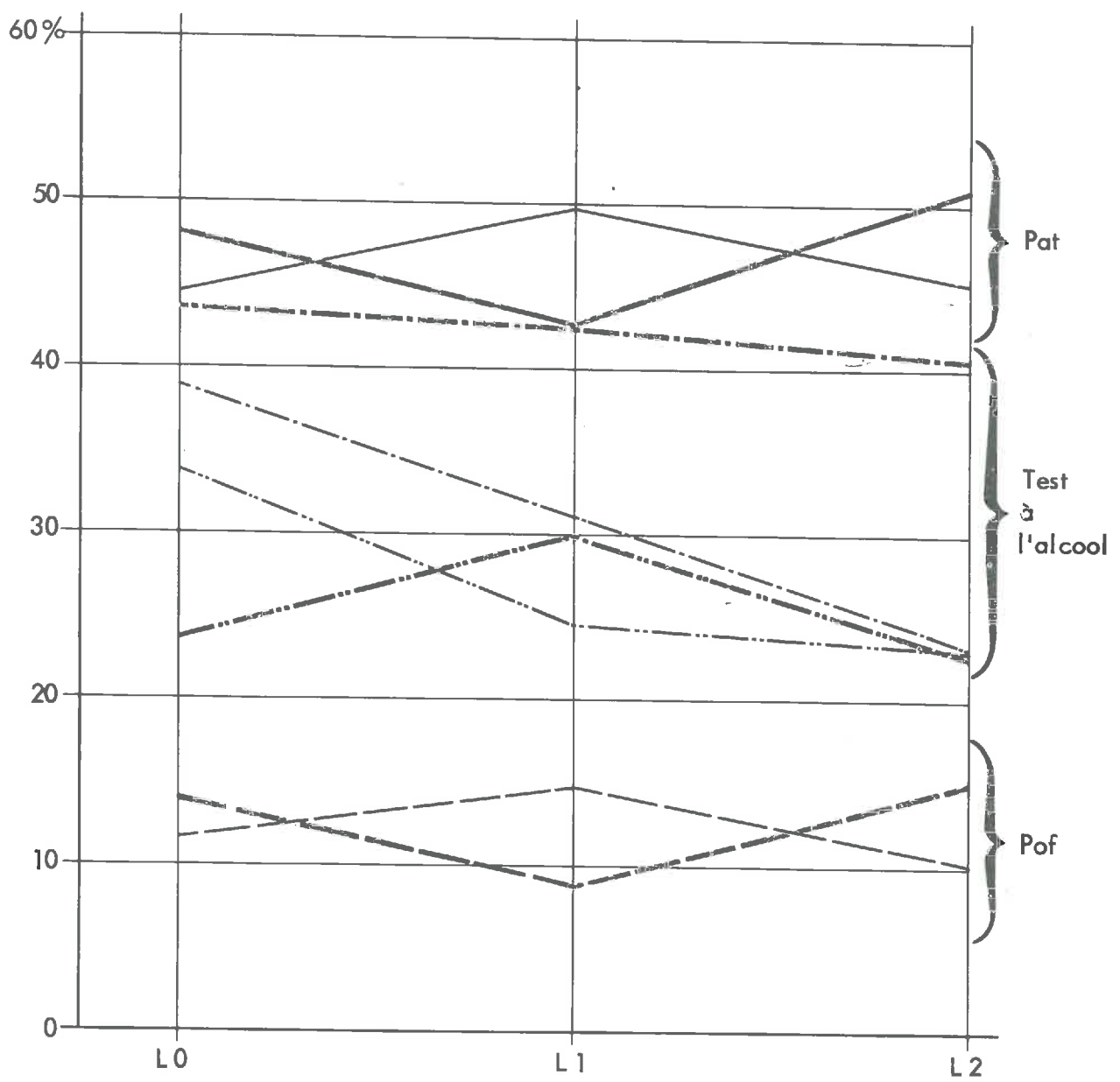
L₀ b : R = 0,912 HS 6 points

L₂ b : R = 0,899 HS 6 points

Les relations étudiées dans le chapitre " humidités ", entre l'épaisseur des fissures et les écarts d'humidité, entre le sol en place et les mottes, appuieront l'interprétation, agronomique, de ces résultats.

COMPARAISON TEST A L'ALCOOL , POROSITÉ TOTALE , POROSITÉ DE FISSURES

(MAI 1972)



porosité apparente totale Mai 1972	0 - 10 cm	10 - 20 cm
test à l'alcool Mars 1972	— — — —	— — — —
test à l'alcool Mai 1972	— · — · —	— · — · —
porosité de fissures Mai 1972	— — — —	— — — —

VI - LES HUMIDITES

6 - LES HUMIDITES

Plusieurs questions concernant les relations entre le sol et l'eau sont posées à l'occasion d'un tel essai :

- les réserves en eau sont-elles les mêmes ?
- l'eau est-elle répartie de la même façon dans le profil ?
- le débit de l'évapo-transpiration est-il le même ?
- le drainage s'effectue-t-il à la même vitesse ?
- Y a-t-il des conséquences du travail du sol sur la "cessibilité" de l'eau aux plantes ?
- Quelles sont les relations entre la porosité et l'humidité ?

Pour tenter d'apporter des éléments de réponse à ces questions, nous disposons :

- des 7 séries de mesures d'humidité effectuées en 1971; des mesures d'humidité du sol en place et des mottes des prélèvements de Mai et d'Août 1972;
- des résultats du test à l'alcool du mois de Mars et du mois de Mai 1972;
- des calculs de corrélation simple entre les données concernant la structure et celles concernant l'humidité.

6.1 - Les teneurs en eau

À l'examen des résultats des mesures de teneurs en eau de 1971 et de 1972, on s'aperçoit que :

a) les réserves en eau au début de printemps étaient les mêmes dans les trois traitements : 15,4 %, 15,4 % et 15,7 %, respectivement pour L₀, L₁, L₂.

C'est un fait d'importance, puisque "le climat de GRIGNON est caractérisé par une pluviométrie mal répartie, faible quand les plantes ont des besoins maximum, les mois les plus secs étant MARS, AVRIL et MAI";

b) Il y a des légères différences dans la répartition de l'eau dans le sol et que cette répartition évolue différemment dans le temps.

61.1 - Au niveau du sol en place (densitomètre)

Les tendances sont les suivantes :

En L₀ teneur en eau plus grande en surface, à cause, sans nul doute, de l'accumulation de matières organiques augmentant la capacité au champ;

En L₁ augmentation de la teneur en eau en profondeur du fait du drainage plus aisé en milieu plus poreux : la seule différence significative des teneurs en eau entre les niveaux a et b apparaît en L₁;

.../

en L_2 même raisonnement qu'en L_1 mais la tendance est moins nette puisque le profil n'accuse pas de discontinuité importante entre les niveaux a et b comme c'est le cas en L_1 .

61.2 - Au niveau des mottes

On ne peut déceler de différences que cela soit entre traitements ou entre niveaux pour un même traitement.

Notons cependant la similitude entre les teneurs en eau des niveaux non travaillés :

L_0 a	L_0 b	L_1 b	
18,5	18,8	18,5	Moyenne = 18,6

et celle existant entre les teneurs en eau des niveaux travaillés :

L_1 a	L_2 a	L_2 b	
19,3	19,4	19,0	Moyenne = 19,2

Ces 2 moyennes ne sont pas significativement différentes.

... /

	% H ₂ O Août sol nu	% H ₂ O Mai (densito)	% H ₂ O Mottes	% H ₂ O en % de Pat	% H ₂ O en % de Pam	Gonflement au niveau des mottes en motte et sol en place	Ecart % H ₂ O en motte et sol en place	pF = 3
0- 10 cm								
L0	20,4	16,2	18,5	54,0	68,7	4,5	2,3	21,4
L1	18,9	16,0	19,3	44,1	69,6	6,3	3,5	22,1
L2	19,7	16,4	19,4	50,3	73,9	5,8	3,6	21,5
Signification	S	NS	NS	NS*	NS	NS	NS	
10 - 20 cm								
L0	19,8	17,1	18,8	50,4	67,0	4,8	2,7	21,7
L1	20,1	16,3	18,5	61,0	71,9	5,7	2,1	22,3
L2	21,1	18,5	19,0	49,8	85,6	6,2	1,8	21,7
Signification	S	NS	NS	NS	NS*	NS	NS	NS
0 -20 cm								
L0	20,1	16,6	18,7					
L1	19,5	16,1	18,9					
L2	20,4	17,4	19,2					
Signification	S	NS	NS					

Résultats des Prélèvements d'humidité : Campagne 1971
en % de terre sèche

1° - 6 Prélèvements du 15.4 au 28.7.71

	5 cm	10 cm	20 cm	0-20 cm
L0	13,61	15,50	15,41	15,00
L1	13,40	15,80	15,78	14,96
L2	12,76	14,38	15,23	14,16
Signification	NS	S	NS	NS
PPDS	1,61	0,85	0,69	1,14

2° - Choix de prélèvements successifs aux différences entre traitements plus marqués (cf courbe page : 53bis)

	du 1.5 au 15.6 5 cm	su 15.3 au 30.7 10 cm	du 15.5 au 30.7 20 cm
L0	15,70	15,50	15,50
L1	14,80	15,80	15,85
L2	14,13	14,38	14,85
Signification	NS	S	NS*
PPDS	1,51	0,85	0,77

3° - Ecart d'humidité entre chaque prélèvement successif (7 prélèvements)
Comparaison entre traitement en % de terre sèche.

	5 cm	10 cm	20 cm	0-20 cm
L0	7,20	2,90	1,68	3,95
L1	5,50	1,58	1,61	2,96
L2	5,35	2,50	1,16	2,75
Signification	NS*	NS	NS	NS*
PPDS	1,61	1,33	0,63	1,16

61.3 - Comparaison des humidités entre sol en place et mottes

Il existe, sur l'ensemble de l'essai, des différences significatives entre les teneurs en eau du sol en place et celles des mottes : mottes : 16,2 - sol en place : 19,1

Cette signification disparaît quand ces écarts sont comparés par traitement.

La rétention des mottes est en effet meilleure puisqu'il n'y a pas, ou peu, de drainage au travers. Nous verrons plus loin la mise en évidence d'une relation positive entre ces écarts de teneur en eau et l'épaisseur des fissures.

La comparaison des écarts d'humidité entre sol en place et motte nous a paru également un moyen pour apprécier l'individualisation des mottes.

6.2 - Mouvements de l'eau

Il semble que :

62.1 - L0 drafne et cède son eau plus lentement du fait de la plus grande tortuosité de ses pores, de la structure feuilletée, lamellaire, caractéristique en 0 et 10 cm, et de l'épaisseur réduite de ses fissures en surface.

En effet, 8 jours après la récolte, L0 a est le niveau le plus humide.

Cependant, si les mouvements de l'eau sont les plus lents, il apparaît, sans doute à cause de sa structure à réseau de capillaires peu perturbé, que l'amplitude des teneurs en eau est la plus grande dans ce traitement : les écarts d'humidité entre deux prélèvements successifs sont toujours plus importants en L0; ils suggèrent cette hypothèse.

62.2 - L1 Le mouvement de l'eau a lieu d'abord au niveau 0 - 10 cm : les écarts entre les prélèvements sont faibles au-dessous de 10 cm. De tous les niveaux, c'est L1 a qui s'est asséché le plus vite au cours de la période de chaleur du 16 au 25 Août.

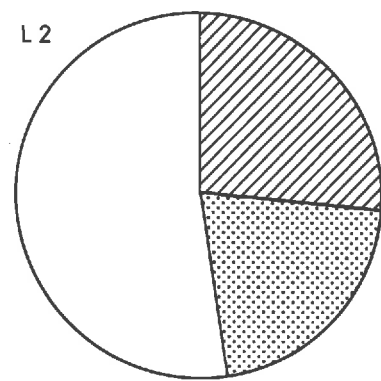
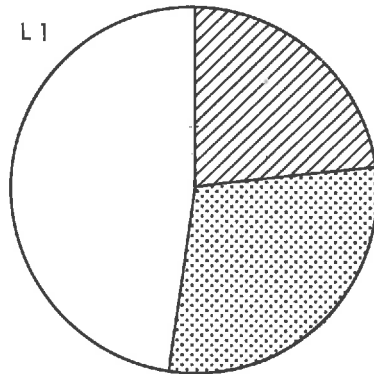
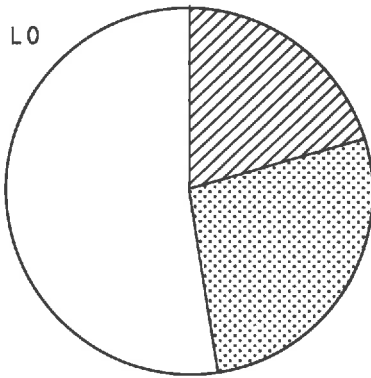
En sol nu, on peut supposer qu'au cours d'une dessiccation, contrairement à L0 qui prélève l'eau d'une façon homogène dans l'ensemble du profil 0-20 cm (structure massive), L1 répond à la demande de l'évaporation en vidant d'abord son niveau supérieur.

Notons que les conditions d'assèchement en sol nu et en sol couvert diffèrent puisque les plantes ne sont plus là pour prélever l'eau en profondeur. Cependant, l'assèchement rapide de L1a confirme sa plus grande porosité.

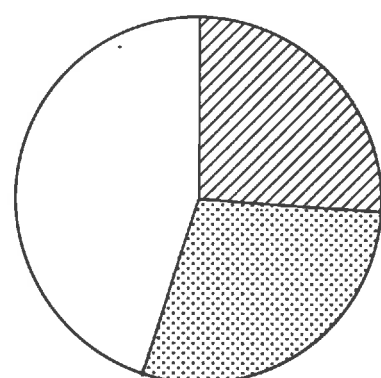
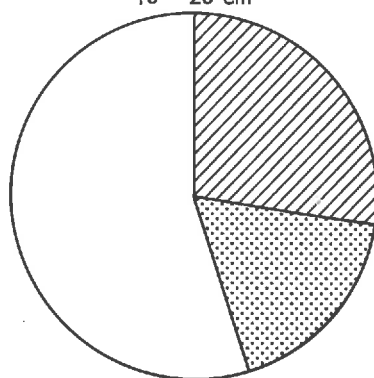
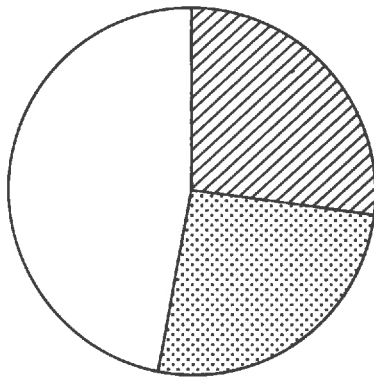
.../

OCCUPATION PAR L'EAU ET PAR L'AIR DE 100 CM³ DE SOL
MAI 1972

POROSITÉ APPARENTE TOTALE
0 - 10 cm

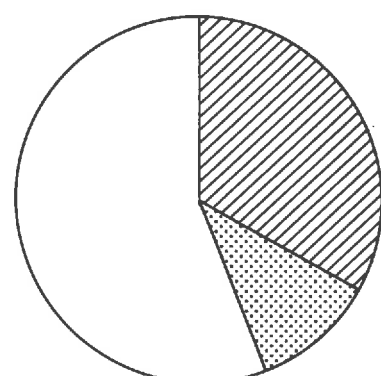
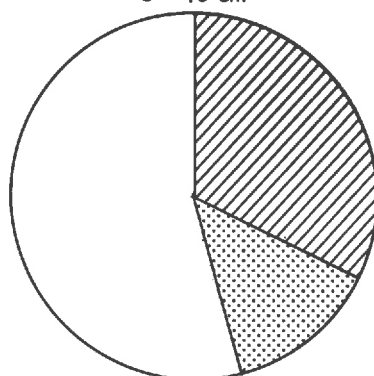
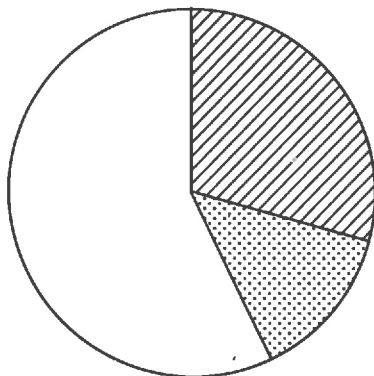


10 - 20 cm

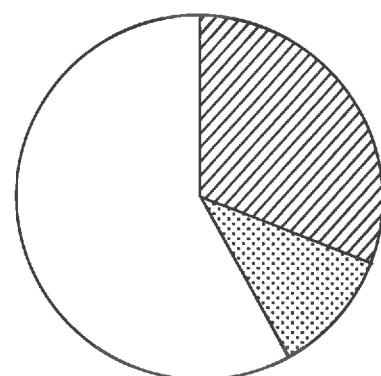
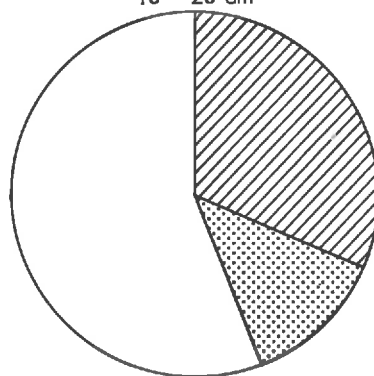
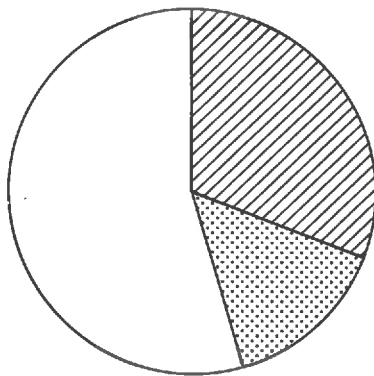


POROSITÉ APPARENTE MOTTIÈRE

0 - 10 cm



10 - 20 cm



terre



eau



air

62.3 = L₂ en période de végétation. L₂ peut être considéré comme un réservoir qui se remplit vite mais qui se vide également plus vite que les autres.

En 1971, à partir du tallage, les teneurs en eau, en profondeur, sont toujours les plus faibles des trois traitements, témoignant d'une consommation en eau plus grande et d'une meilleure "cessibilité" de l'eau, du fait des fissures plus larges et, sans doute, d'une meilleure colonisation par les racines.

Les courbes de teneur en eau, par niveau (page suivante) pour l'année 1971, illustrent bien cette consommation d'eau en L₂.

En année où le rapport $\frac{P}{E, T, P} \times 100$ est faible, une structure à faible énergie de rétention d'eau rapproche ETR de ETP ; cela ne peut-il pas contribuer à expliquer les meilleurs rendements en L₂, d'autant plus que nous avons vu que les 15 derniers jours de la campagne ont été favorables à un bon remplissage du grain.

62.4 - Comparaisons des humidités : sol nu, 23.8.72

624.1 - en surface : les pertes d'eau, sous l'effet de l'évaporation suivent la porosité : L₁ > L₂ > L₀

624.2 - en profondeur : le sens des porosités n'est pas respecté

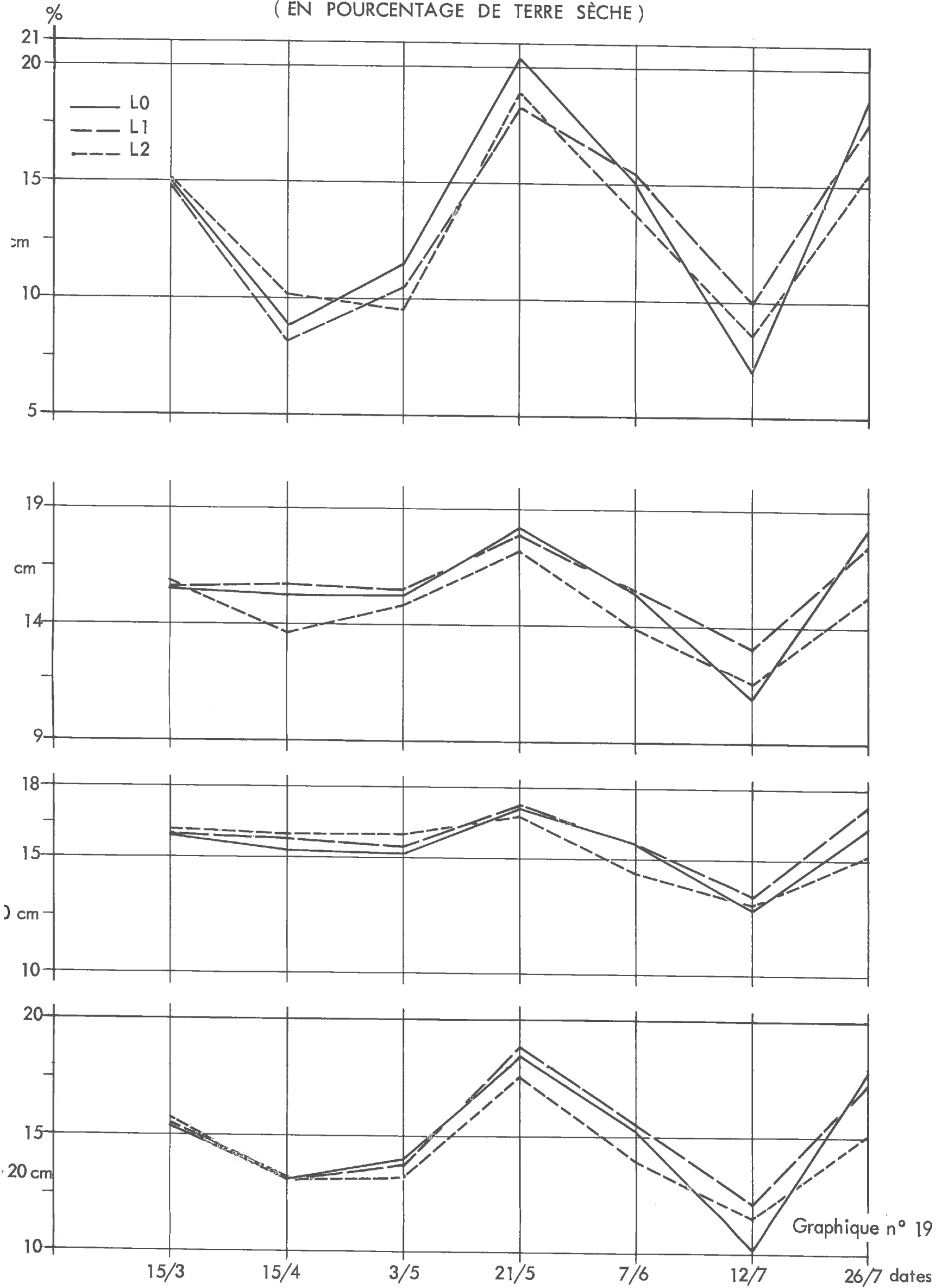
En L₀ : l'humidité supérieure en surface signifie que l'eau, sans l'évaporation, aurait tendance à descendre pour rétablir l'équilibre avec le niveau 10 - 20 cm, d'autant plus que L₀ accuse une structure fragmentaire homogène. Cependant l'intervention de l'évaporation vide le niveau inférieur.

En L₂ : le même raisonnement peut être fait, la structure est plus poreuse. L'assèchement est homogène sur l'ensemble du profil étudié.

En L₁ : sans évaporation, l'équilibre se rétablirait par un mouvement ascendant de l'eau ; mais l'évaporation (voir plus haut, paragraphe 62.2) vide d'abord L_{1a}, avant L_{1b} à cause du changement de structure entre ces deux niveaux. Leur différence de teneur en eau est proche de la signification.

Le calcul statistique a donné :	0 - 10 cm	10 - 20 cm
L ₀	20,4	19,8 NS
L ₁	18,9	20,1 NS*
L ₂	19,9	21,9 NS
	S	S

HUMIDITES 1971
(EN POURCENTAGE DE TERRE SÈCHE)



Graphique n° 19

6.3- Relations entre les teneurs en eau et les porosités

Nous avons expérimentalement déterminé le gonflement potentiel (14,4 %) à l'aide du test de réhumectation.

Cette première information indiquait l'influence prépondérante de l'humidité sur la porosité à l'intérieur d'une gamme de porosités de nature texturale comprise entre 32 et 41 %.

Nous avons vérifié cette liaison :

63.1 - Au niveau de la porosité apparente totale.

Pour l'ensemble du profil étudié, la liaison est positive $R = 0,438$; 36 points. Le sens positif de cette liaison est confirmé par traitement aux niveaux a et b, excepté en L_2a où la liaison : $R = 0,944$, devient négative.

Ce renversement net et souvent significatif du sens de la liaison en L_2a est caractéristique : nous le retrouverons quasi systématiquement dans les autres relations étudiées.

63.2 - Au niveau de la porosité apparente mottière

La liaison positive est d'autant mieux vérifiée que les porosités mottières se rapprochent de la porosité texturale. ($R = 0,530$) 36 points. Elle est plus nette pour L_0a et b. Respectivement $R = 0,872$ et $R = 0,869$, 36 points.

Cela suggère l'hypothèse que, du fait de la grande "fertilité physique" de ce sol de limon de plateau, les alternances naturelles d'humectation et de dessiccation suffisent seules à maintenir le sol dans une fourchette de porosité voisine de celle du labour et satisfaisante pour la culture. On retrouve toujours la liaison négative en L_2a .

6.4 - Relations entre le gonflement et la porosité

64.1 - Liaison entre la teneur en eau et le gonflement au niveau des mottes

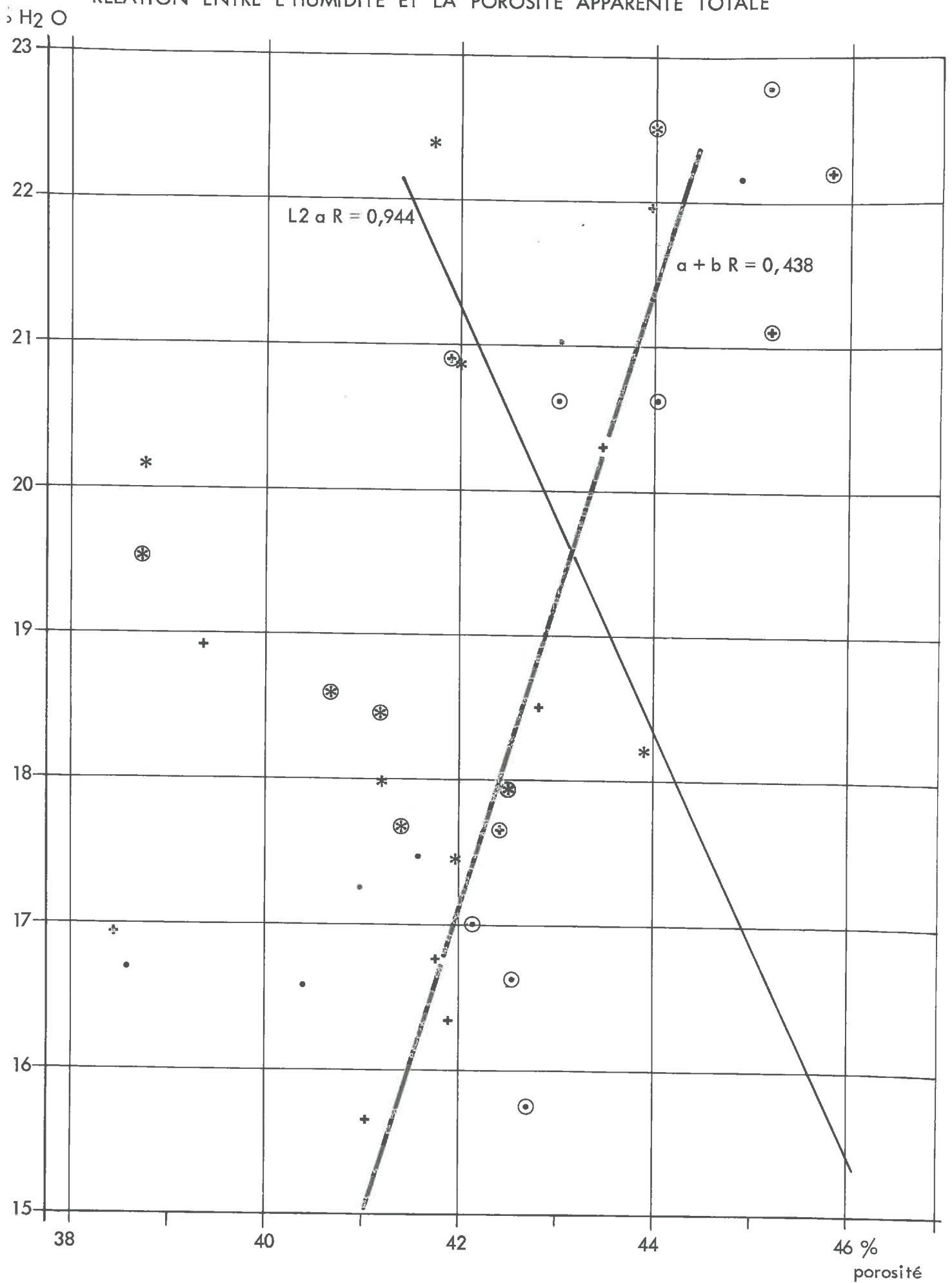
Lors de l'établissement de la courbe PELTIER, nous l'avons comparée à la droite illustrant la liaison entre la teneur en eau et le gonflement des mottes ($R=0,639$; 36 points), cette liaison positive, sur l'ensemble du profil, se trouve confirmée en L_1a , L_0b et L_2b .

$L_1 a$ $R = 0,916$

$L_0 b$ $R = 0,923$

$L_2 b$ $R = 0,871$

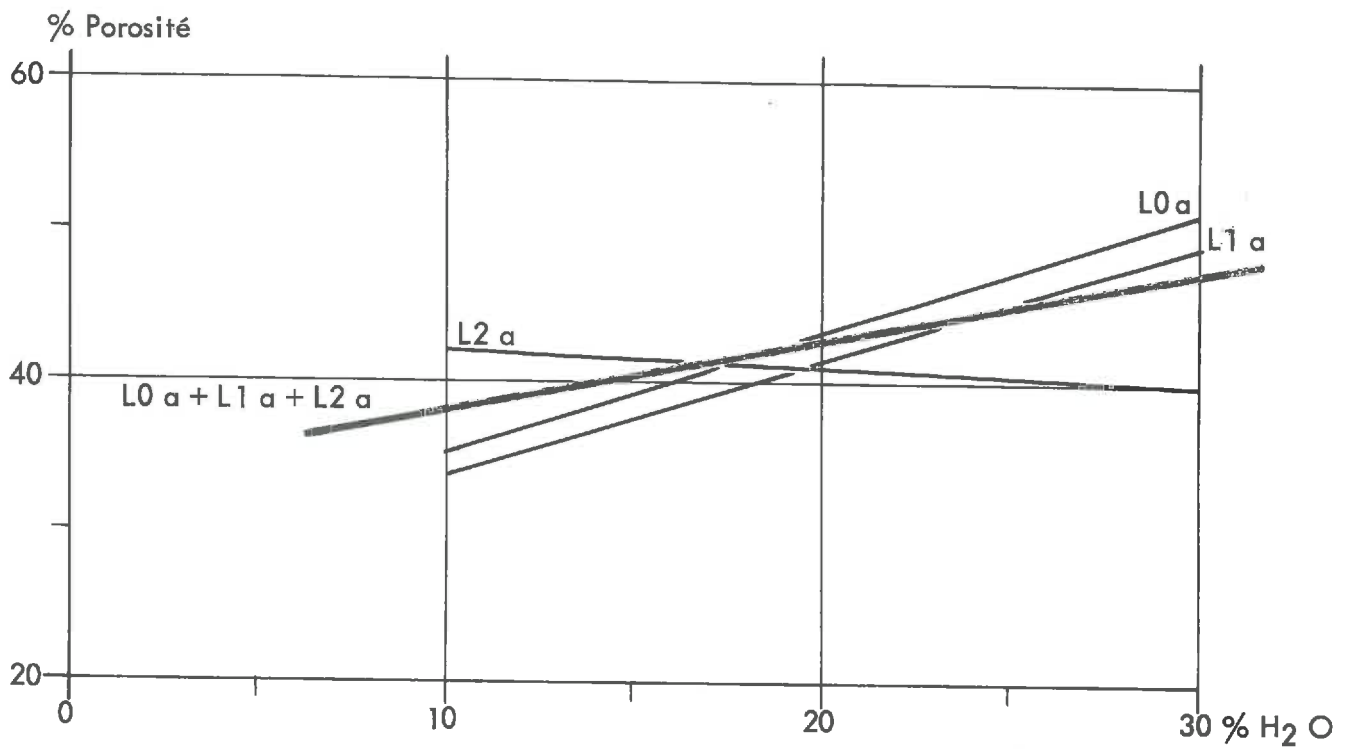
RELATION ENTRE L'HUMIDITÉ ET LA POROSITÉ APPARENTE TOTALE



Graphique n° 20

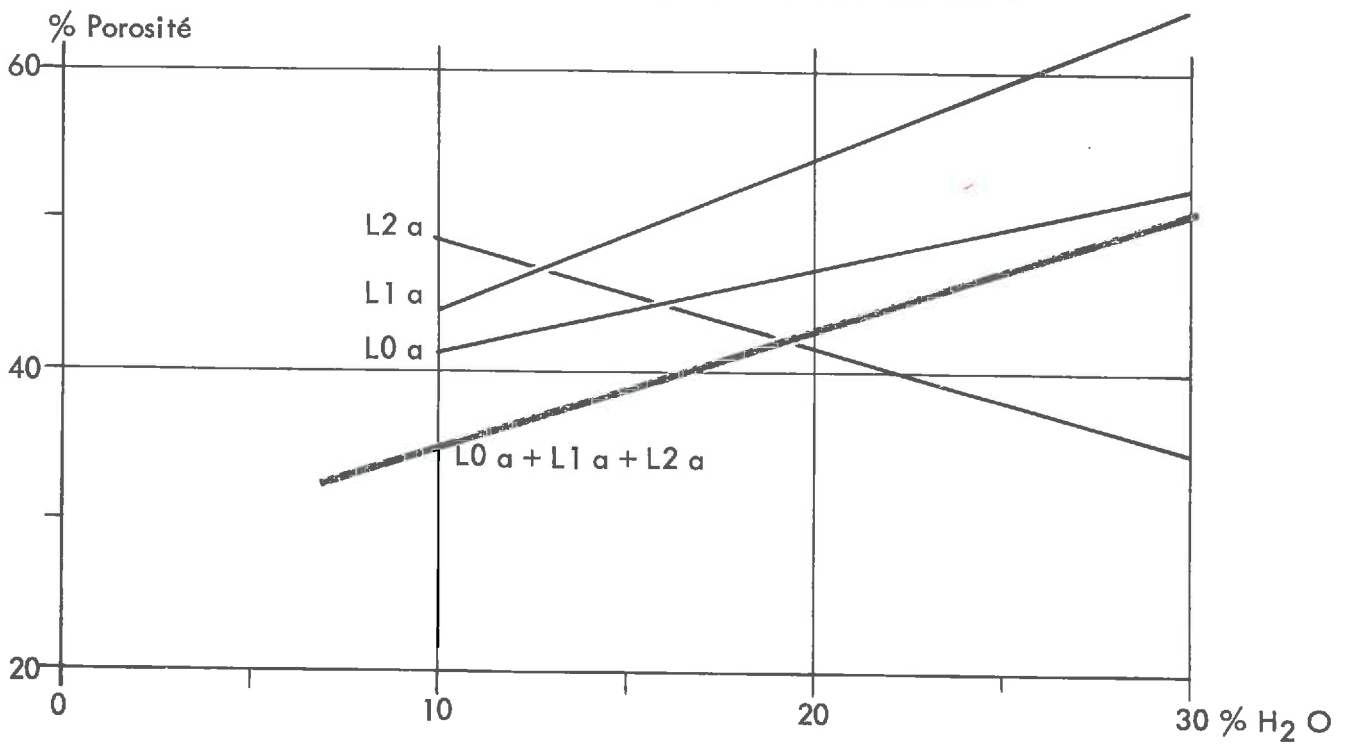
RELATION ENTRE LA POROSITÉ APPARENTE MOTTIÈRE ET LA TENEUR EN EAU

Renversement du sens de la liaison en L2 a



RELATION ENTRE LA POROSITÉ APPARENTE TOTALE ET LA TENEUR EN EAU

Renversement du sens de la liaison en L2 a



64.2 - Liaison entre le gonflement et la porosité de fissures

Le gonflement influence légèrement la porosité de fissures (R = 0,349 ; 36 points), la liaison semble plus forte en surface : (R = 0,602 ; 18 points).

Aucune différence entre traitements n'est décelable si ce n'est la liaison qui, là encore, change de sens en L_{2a}.

Cette liaison positive, hormis L_{2a}, atteste du faible état de division du sol établi par le test à l'alcool. Nous sommes en présence d'une structure compacte où les mottes se différencient peu du reste. La motte est davantage une zone à densité plus forte qu'un ensemble d'agrégats séparé d'un autre ensemble par des fissures qui l'entourent. Auquel cas, la porosité de fissures apparaîtrait comme reliée négativement au gonflement des mottes. Cela est le cas de L_{2a} (au taux d'agrégation cependant très voisin des autres traitements).

Ce renversement de la liaison en L_{2a}, déjà signalé plus haut, n'indiquerait-il pas une différence dans l'organisation interne de la porosité, non perceptible à travers les renseignements fournis par le densitomètre et la méthode au vernis.

64.3 - Liaison entre le gonflement des mottes et le taux d'agrégation du sol (exprimé en % d'agrégats < 10 mm)

La liaison pour les 36 points, du profil étudié, 0-20 cm existe (R = 0,350); elle est négative. Ce résultat est très nettement accentué en L_{2a} (R = 0,963 - 6 points) pour lequel il faut noter le parallélisme de cette liaison avec celle évoquée ci-dessus (voir graphique page précédente)

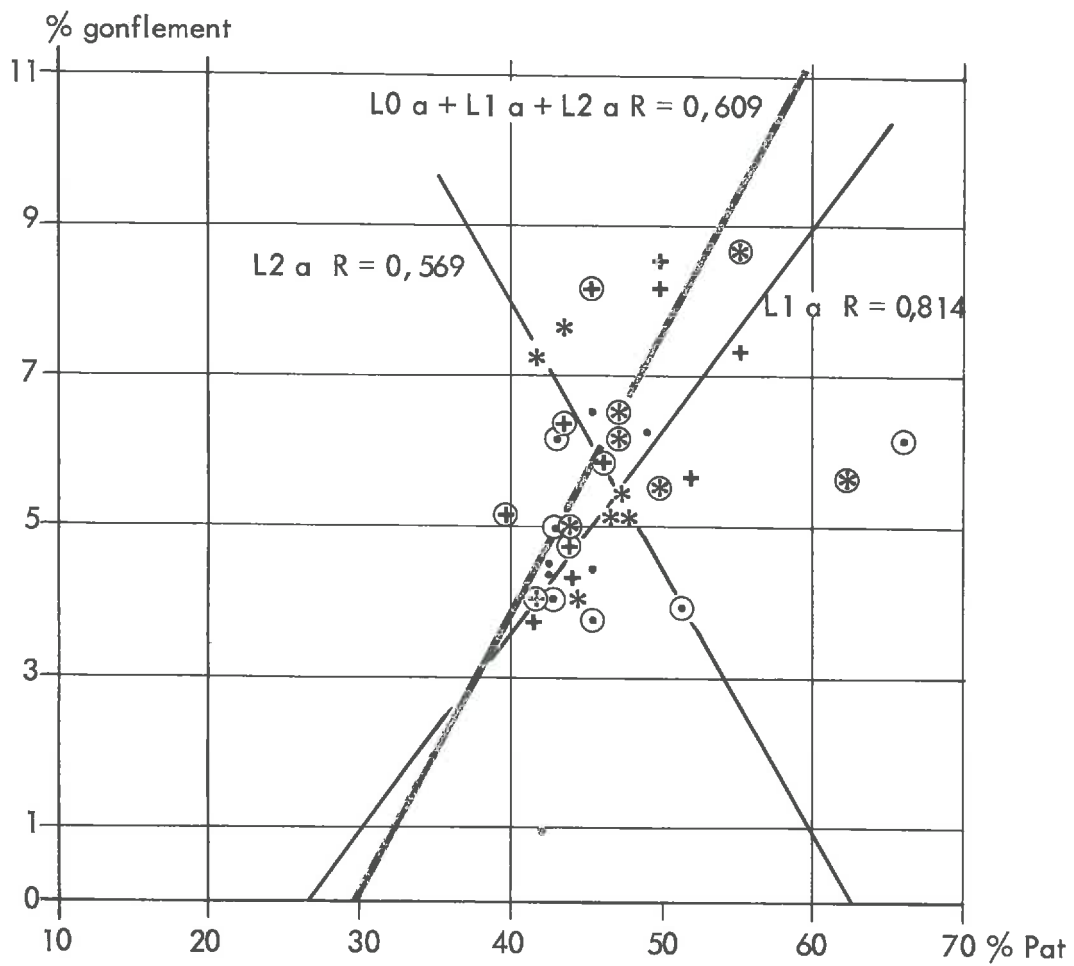
Le gonflement réduirait donc l'état de division du sol. Les mottes vraiment individualisées, atténueraient par leur gonflement l'importance de la porosité de fissures : notons que L₂, en Mars comme en Mai, en surface, est le traitement le moins divisé (test à l'alcool), bien que plus poreux que L₀.

6.5 - Relations entre les écarts d'humidité des mottes et du sol en place et l'épaisseur des fissures.

Nous avons considéré que cette liaison révélerait l'existence d'un processus du drainage ou d'évaporation par des capillaires préférentiels qui ne seraient rien d'autres que la porosité de fissures.

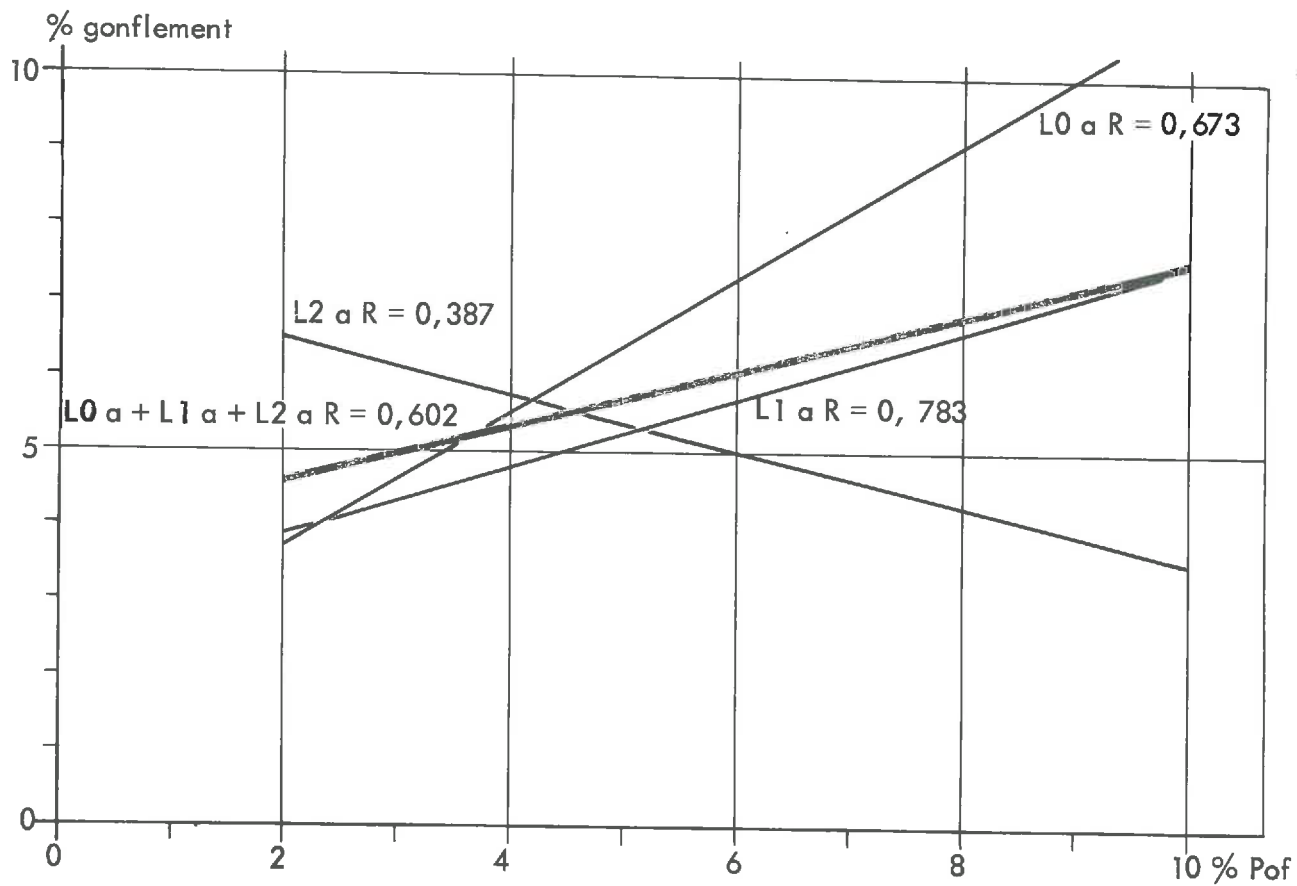
Cette hypothèse se vérifie pour l'ensemble du niveau 0 - 10 cm : (R = 0,496 - 18 points) sans que des différences nettes entre traitements puissent être mises en évidence, bien qu'en L_{2a} cette relation soit plus accusée : (R = 0,849 - 6 points). En profondeur aucune liaison n'apparaît. Le même calcul entre la porosité de fissures et ces mêmes écarts d'humidité n'a pas révélé de liaison, sauf pour L_{2a} (R = 0,860 - 6 points)

RELATION ENTRE LE GONFLEMENT ET LA POROSITÉ APPARENTE TOTALE



RELATION ENTRE LE GONFLEMENT ET LA POROSITÉ DE FISSURES

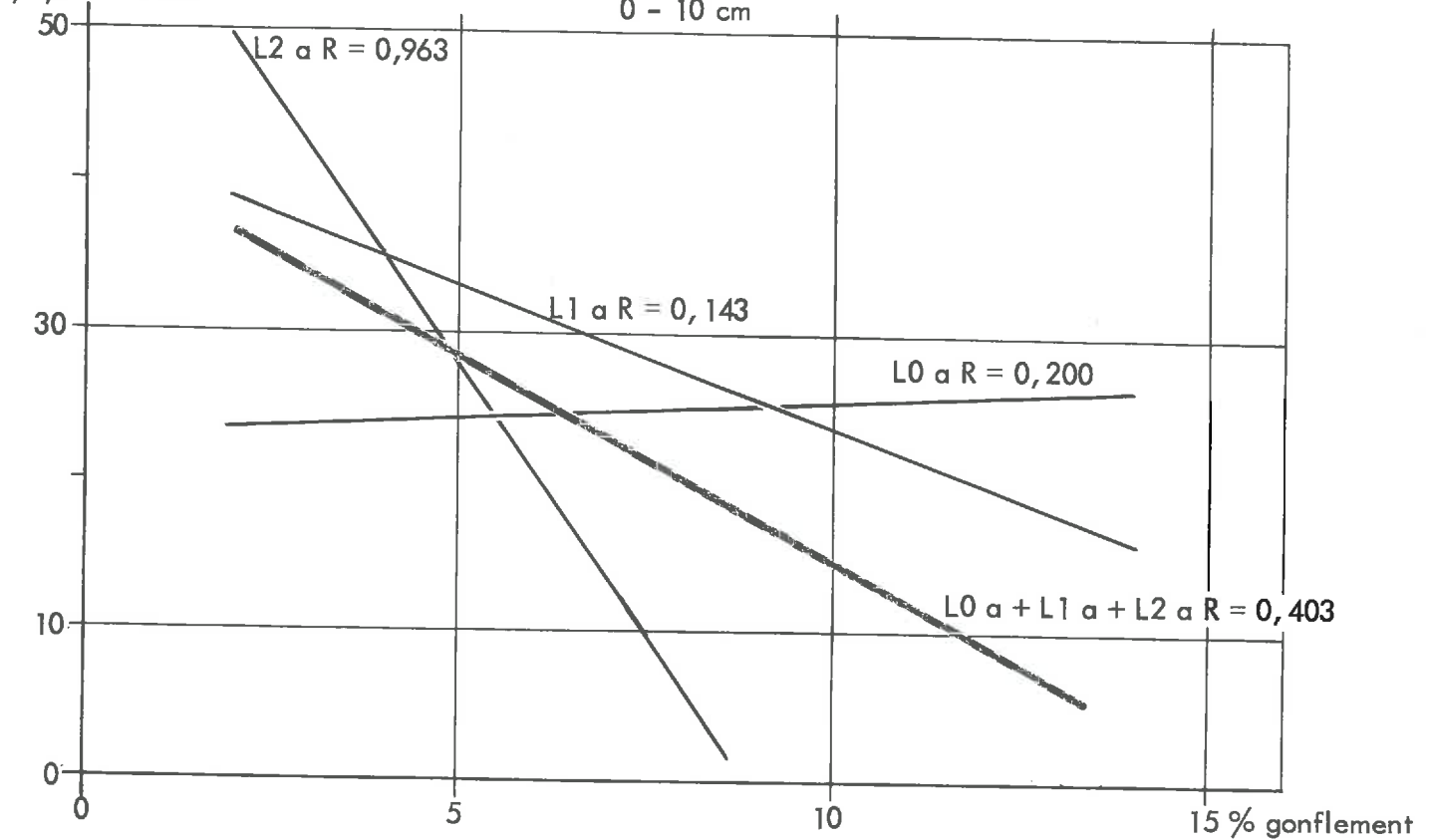
0 - 10 cm



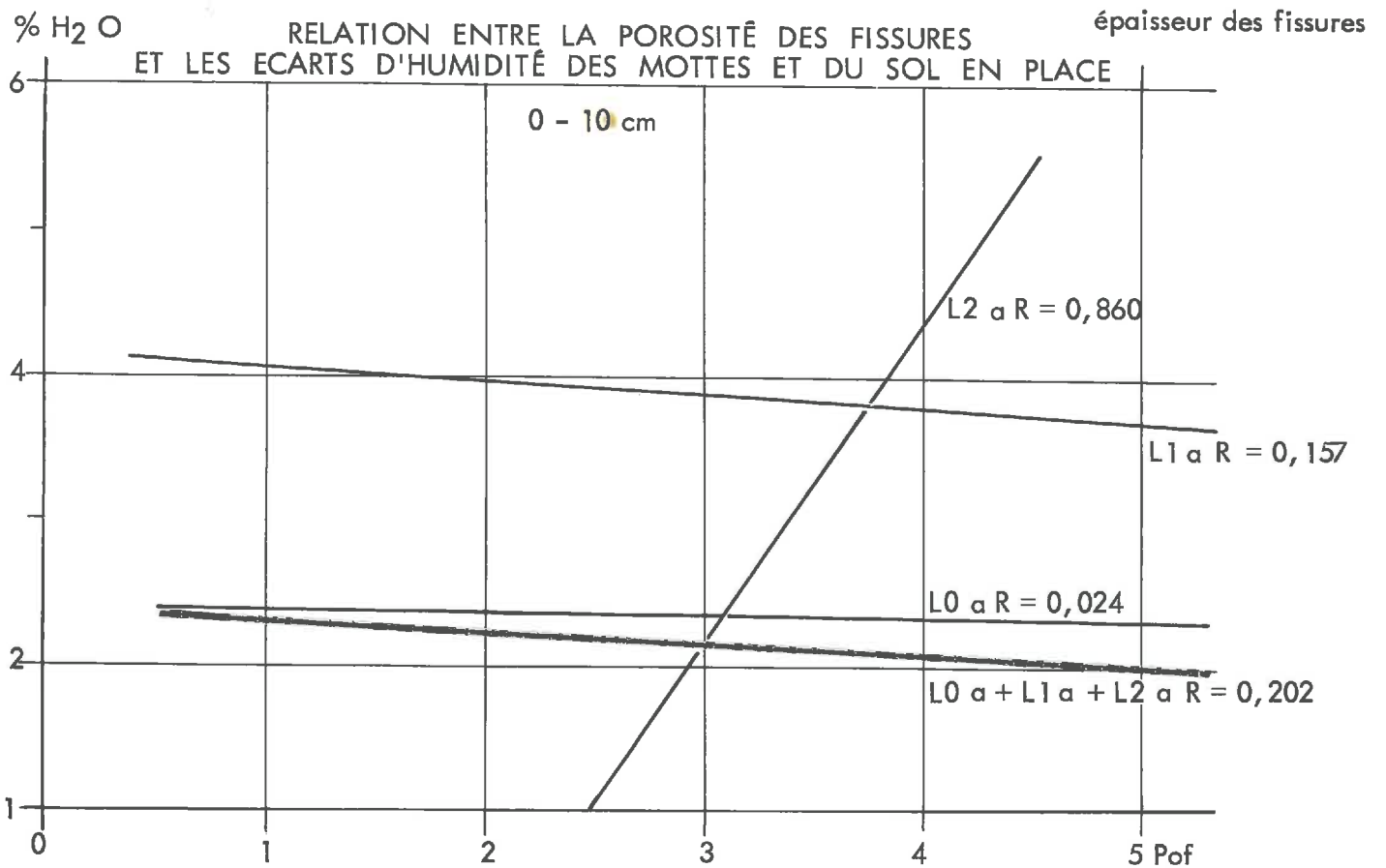
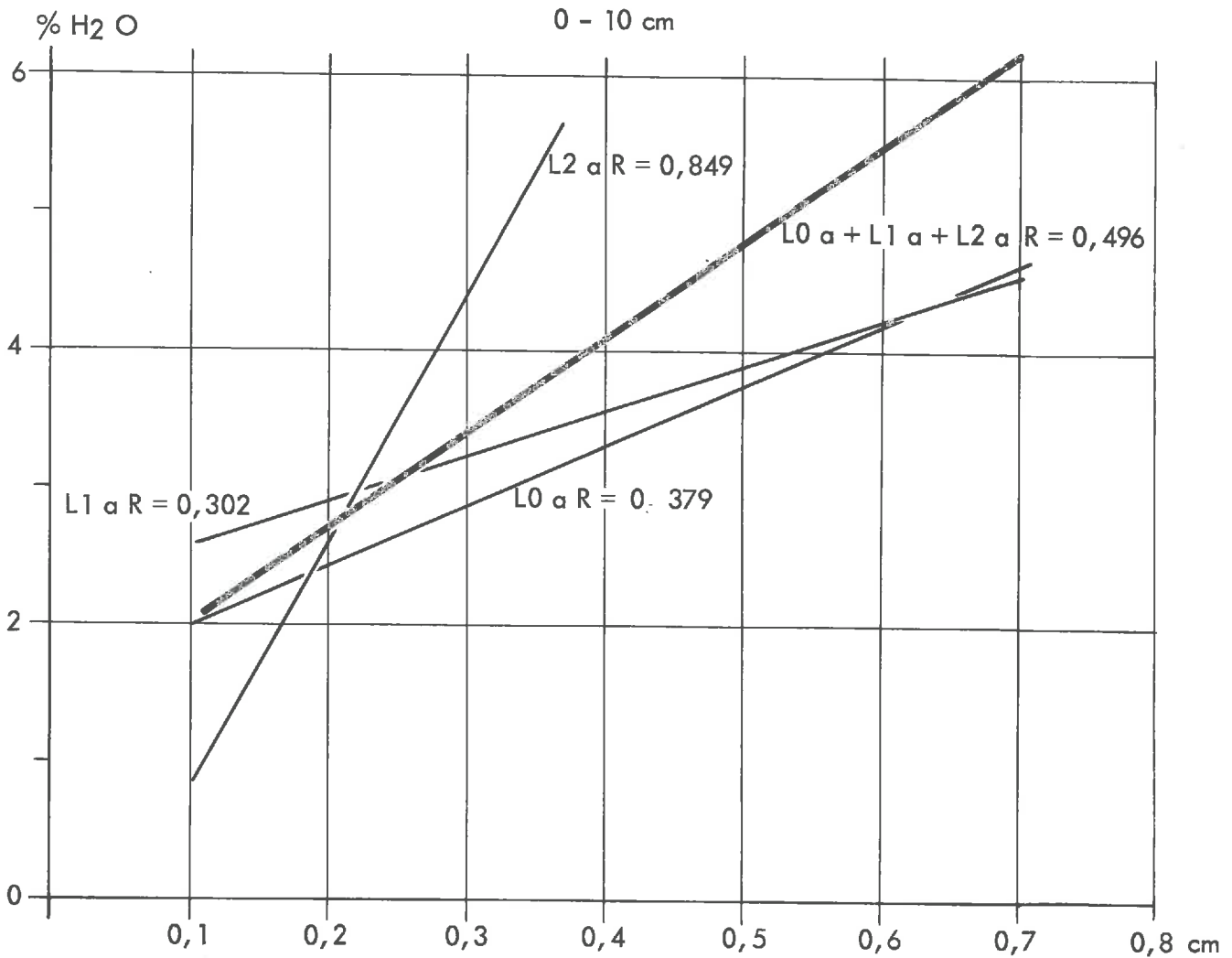
RELATION ENTRE LE GONFLEMENT ET LE TAUX D'AGREGATION DU SOL

% $\phi < 10$ mm

0 - 10 cm



RELATION ENTRE L'ÉPAISSEUR DES FISSURES
ET LES ÉCARTS D'HUMIDITÉ DES MOTTES ET DU SOL EN PLACE



Résultats élémentaires liés à la teneur en eau - Mai 1972

	Ecart de humidité entre mottes et sol en place.		Volume occupé par l'eau en % de la porosité				Gonflement au niveau des mottes	
	a	b	densitomètre		mottes		a	b
			a	b	a	b		
L ₀	0,99	0,72	59,03	41,26	63,47	62,71	4,34	3,94
	3,83	6,72	51,24	51,25	65,03	73,65	0,99	4,92
	3,02	2,10	46,18	53,86	66,39	55,84	4,41	3,75
	3,73	1,68	41,45	56,22	63,43	60,24	4,47	4,04
	1,11	2,93	64,31	33,48	77,62	73,08	6,54	6,24
	1,22	2,44	62,10	66,83	76,63	77,04	6,29	6,18
	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	2,31	2,76	54,05	50,48	68,76	67,09	4,50	4,84
L ₁	4,78	4,03	50,12	44,59	66,05	68,75	3,70	4,76
	5,70	0,98	40,86	51,39	77,00	66,29	8,19	8,21
	2,77	0,55	45,54	61,62	62,56	62,46	4,44	4,06
	6,18	4,94	29,47	56,03	66,02	77,64	5,63	5,19
	0,56	1,03	50,29	87,32	72,80	73,29	7,34	6,32
	1,00	1,35	48,90	65,23	73,74	78,41	8,50	5,93
	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	3,49	2,14	44,19	61,03	69,69	71,14	6,30	5,74
L ₂	0,33	0,92	42,70	28,37	68,57	72,34	4,08	5,65
	10,02	4,29	36,47	50,66	81,80	71,61	5,47	4,95
	5,33	2,10	37,79	46,58	66,18	65,69	5,18	6,48
	3,78	0,82	43,18	50,42	63,42	68,10	5,15	5,54
	0,60	2,36	70,23	67,3	76,95	83,87	7,66	6,30
	<u>1,89</u>	<u>0,65</u>	<u>71,87</u>	<u>55,78</u>	<u>86,55</u>	<u>81,12</u>	<u>7,24</u>	<u>8,72</u>
	3,65	1,85	58,46	49,80	73,91	85,64	5,79	6,26
	S	S	S		S		NS	NS

VII - LE RENDEMENT ET SES COMPOSANTES

VII - LE RENDEMENT ET SES COMPOSANTES

7.1 - Le rendement en q/ha à 16 % d'humidité

L0	46,0
L1	47,8
L2	50,2

La hiérarchie des rendements confirme celle des 6 dernières années.

7.2 - Les composantes

- à la levée, on note une différence significative dans le sens $L0 < L1 < L2$ de la densité de pieds au m².
- à la récolte, l'analyse statistique des résultats figurant dans le tableau ci-dessous ne fait apparaître qu'une seule différence significative due à la diminution du poids de grains par épis; en L1 : de - 8,3 % par rapport à L0 et de -7,5 % par rapport à L2.

Cette baisse est largement compensée par un poids du grain supérieur proche de la signification, d'une part, et une quantité supérieure d'épis au m², d'autre part.

L'humidité du grain à la récolte n'accusait aucune différence significative entre traitements.

Cependant, le poids du grain supérieur (+ 8,1 % en L2 par rapport à L0) soutient l'hypothèse d'une meilleure alimentation en eau du grain qui se remplit pendant les derniers jours précédant immédiatement la maturité.

7.3 - Liaison éventuelle des composantes du rendement avec la porosité

Nous avons tenté un calcul de corrélation simple, successivement avec les résultats des deux niveaux a et b, entre :

- la porosité totale du mois de MAI et la tallage;
- la densité apparente totale du mois d'AOUT et le rendement;
- le poids du grain et la teneur en eau du sol.

Aucune liaison n'est apparue, qu'elle soit lointaine, ou proche, de la signification.

Outre le grand nombre d'échantillons que nécessite un tel calcul, il aurait fallu faire des mesures au densitomètre exactement là où les prélèvements de plantes avaient eu lieu.

.../

Composantes du Rendement

	L0	L1	L2	Signification	
					PPDS
Rendement q/ha	46,08	47,86	50,25	HS	1,83
Pieds à la levée (en m ²)	306,8	321,0	332,0	HS	12,53
Pieds à la récolte (2 m)	41,81	44,79	45,47	NS	
Tiges totales (2 m)	121,7	131,7	132,1	NS	
Tiges/pied	2,92	2,96	2,92	NS	
Epis totaux	113,8	121,5	121,0	NS	
Epis restants	112,0	116,6	113,0	NS	
Poids de grain par épi	0,838	0,768	0,831	S	
Poids du grain;					8,10
(Nombre de grains/ 5 gr.)	135,84	145,75	142,87	NS	

VIII - CONCLUSION

VIII - CONCLUSION

Depuis 6 ans, les rendements sont systématiquement plus forts en L₂. Une tentative d'explication peut faire intervenir le système de porosité propre à chaque traitement et ses conséquences sur l'alimentation en eau, du fait d'énergies de rétention différentes.

- L0 - Ce traitement se caractérise par son homogénéité, sa structure fragmentaire feuilletée en surface (0-10 cm) et évoluant progressivement en profondeur.
- . Les fissures sont fines, mais nombreuses, plus tortueuses, les mottes vraiment différenciées, inexistantes.
 - . Le système racinaire se développe rapidement en début de cycle, les radicelles s'allongent horizontalement entre les feuillets.
 - . L0 est le traitement le plus compact mais la faiblesse des différences en MAI et la similitude des résultats en AOUT éliminent l'hypothèse d'effets cumulés au cours des années.
 - . L'humidité se maintient en surface, du fait de l'accumulation de la matière organique à ce niveau.
 - . Les mouvements de l'eau sont lents mais complets : la dessiccation appréhende toute la masse du sol.
 - . Le phénomène de retrait et de gonflement s'exerce verticalement.
 - . La plante exploite moins bien qu'en L₂ les réserves en eau, plus difficilement accessibles.
- L1 - Ce traitement se caractérise par la nette discontinuité entre les niveaux a et b.
- Le travail intense des fraises crée une porosité importante qui se maintient pendant tout le cycle.
- . Les fissures sont importantes en surface.
 - . En période de bonne alimentation, l'approvisionnement en eau provient surtout de l'horizon travaillé.
 - . Le tassement, net dans l'horizon 10-20 cm, en limite l'exploitation par la plante. Les conséquences sont cependant faibles puisque l'orge est une céréale à enracinement superficiel.
- L2 - Ce traitement présente une structure homogène, mais poreuse de 0 à 20 cm.
- . Des vraies mottes existeraient bien différenciées du reste et gonfleraient " tous azimuts " sans pour autant obstruer les fissures.
 - . L'eau est mise aisément à la disposition des plantes dans l'ensemble du profil.

.../

- . Bien que moins poreux que le niveau L1 a, le niveau L2a présente des fissures qui favorisent davantage les mouvements de l'eau. L'organisation interne des fissures est donc différente.
- . Un léger tassement s'effectue en profondeur au cours de la campagne.

Du point de vue des effets du travail de l'outil sur la structure du sol, il apparaît que la fraise rotative n'a pas créé une porosité différente au niveau de la motte de celle provoquée par le labour.

Cette étude n'apporte que des informations partielles.

Nous n'avons pas, en particulier, établi les taux de matière organique; les mouvements de l'eau ont été plus suggérés par les diverses mesures que prouvés : des mesures d'humidité à la sonde à neutrons et au tensiomètre permettraient de mieux les mettre en évidence.

Nous n'avons pas intégré dans cette étude une comparaison entre les réserves utiles de chaque traitement. Le fait de nous être limités aux 20 premiers centimètres ne le permettait pas.

Le nombre de prélèvements du mois de MAI est insuffisant et limite le caractère de certitude des relations présentées.

Il est clair, cependant, que la grande fertilité physique de ce sol de limon de plateau lui permet par le seul jeu des alternances des facteurs naturels de se maintenir dans une gamme de porosités satisfaisante pour la culture. Ces porosités sont sous l'influence prépondérante et quasi exclusive de la porosité de fissures.

Dans des terres, moins franches, plus sensibles à la compaction, il est probable que le réchauffement des terres au printemps et les mouvements de l'eau en cours de végétation soient fortement modifiés : la mise en place, sur de telles terres, d'essais dans lesquels seraient pratiqués simultanément l'irrigation et le zéro travail, aurait l'avantage d'indiquer les limites du possible.

ANNEXES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES BIBLIOGRAPHIQUES

	<u>Pages</u>
<u>I. METHODES HABITUELLES DE DETERMINATION DE LA DENSITE</u>	3
1.1. Densité réelle	3
11.1. Pycnomètre à eau	3
11.2. Pycnomètre à air différentiel	3
1.2. Densité apparente	3
12.1. Densité apparente totale	3
121.1. Méthode aux anneaux	3
121.2. Densitomètre à membrane	3
121.3. Densitomètre à sable	3
121.4. Utilisation de la radio-activité	3
1.3. Densité apparente mottière	4
13.1. Utilisation du pycnomètre	4
13.2. Mesures par déplacement de mercure	5
13.3. Méthode au pétrole	5
13.4. Méthodes au vernis	5
<u>2. DISTRIBUTION DE LA TAILLE DES PORES</u>	6
2.1. Principe	6
2.2. Détermination expérimentale	6
2.3. Porosimètre à mercure	7

3. <u>LA DISTRIBUTION DIMENSIONNELLE DES AGREGATS</u>	8
3.1. Tamisage en sec	8
31.1. Le tamisage à plat	8
31.2. Le tamisage rotatif	8
3.2. La sédimentation	8
3.3. Tamisage en humide	9
3.4. Elutriation	10
3.5. Le test à l'alcool	10
3.6. Utilisation des ultrasons	10
4. <u>OBSERVATION DU PROFIL CULTURAL</u>	10
5. <u>LA RESISTANCE A LA PENETRATION COMME CRITERE DE LA COMPACTION DES SOLS</u>	11
5.1. Les facteurs pédologiques permanents influençant cette résistance	12
5.2. Les facteurs pédologiques variables	14
5.3. La résistance à la pénétrométrie et le développement du système radiculaire	18
53.1. Pénétration des racines : notion de seuils	19
5.4. Les différents modèles de pénétromètres	22

1. METHODES HABITUELLES DE DETERMINATION DE LA DENSITE

1.1. Densité réelle

11.1. Pycnomètre à eau (pour mémoire)

11.2. Pycnomètre à air différentiel (décrit plus haut)

1.2. Densité apparente

12.1. Densité apparente totale

121.1. Méthode aux anneaux

De pratique courante, elle ne peut être utilisée dans les sols caillouteux. Sur une terre noire, de loess, un auteur allemand (1972) a déterminé qu'il fallait pour un total de 6 répétitions, 2 prélèvements pour obtenir une PPDS (0,05 %) = 4 %.

121.2. Densitomètre à membrane (décrit plus haut)

121.3. Densitomètre à sable

La membrane caoutchoutée, pleine d'eau sous pression, est remplacée par un sable de densité connue.

121.4. Utilisation de la radio-activité

Deux méthodes sont utilisées :

a/ Par mesure de la transmission de la radiation gamma, entre une source d'émission et un compteur Geiger placé à distance constante, dans deux tubes parallèles, enfoncés dans le sol.

b/ Par mesure de l'éparpillement de la radiation gamma. La source et le détecteur sont placés dans le même tube, à la différence de la première méthode.

La première méthode est plus précise ; elle permet de saisir les différences de densités par niveau, à quelques centimètres près, tandis que la deuxième méthode appréhende, suivant le type de sol, une zone variant de 12 à 35 cm de rayon. De plus, elle exige une source radio-active plus puissante.

L'une et l'autre technique mesurent la densité des trois phases, la densité des composants gazeux du sol est négligée.

Parallèlement à la mesure de la densité, on détermine le taux d'humidité.

MINTZEL, en 1971, a comparé les densités (et les humidités) obtenues avec la méthode (a) et la méthode du densitomètre à sable : il constate que la méthode radio-active donne des résultats généralement plus élevés.

Quatre types de sols étaient concernés par cette étude, de sable grossier à limon argileux. Les différences moyennes n'excédaient pas 2,03 %, les différences extrêmes, en pourcentage par rapport à la moyenne, variaient de -4,53 à 9,27 %.

1.3. Densité apparente mottière

13.1. Utilisation du pycnomètre

La loi de MARIOTTE $P_1 V_1 = P_2 V_2$ peut être utilisée pour déterminer la part de porosité occupée par l'air, à un taux d'humidité donné. L'appareil peut-être employé aux champs comme aux laboratoires. Il consiste en deux chambres dont la première contient de l'air sous pression ; la seconde reçoit l'échantillon.

L'appareil est étalonné avec des plaques de métal de volume croissant. Une courbe est établie permettant d'obtenir le pourcentage du volume de la chambre occupé par l'échantillon, à partir d'une pression lue sur un manomètre.

Le pycnomètre exige une lecture rapide et ne mesure pas la porosité piégée.

A partir d'un échantillon, on obtient son volume à une teneur en eau donnée ; après dessiccation, nous avons :

volume pycnomètre - volume d'eau = volume terre sèche
 volume pycnomètre - (volume sec + volume d'eau) = volume d'air

13.2. Mesure par déplacement de mercure

Après insertion d'un échantillon de 20 à 30 g séché à l'étuve, le volume de la motte est calculé à partir de la densité du mercure et du poids du mercure déplacé.

13.3. Méthode au pétrole

Les mottes sont imbibées pendant 24 heures à l'air libre ; puis dans une chambre à vide, sous une légère dépression, pendant 10 mn. Les mottes, ainsi saturées, sont drainées dans un appareil de RICHARD, sous une succion de 10 cm.

Le volume est ensuite apprécié par déplacement du pétrole.

Une méthode plus rapide consiste à vaporiser de l'eau sur la motte séchée à l'étuve de façon à l'imbiber sur une épaisseur de 2 mm. La mesure est immédiatement faite par déplacement de pétrole.

et on se frotte !

13.4. La méthode au vernis

Le principe en a été décrit plus haut.

Les méthodes rencontrées dans la bibliographie ne diffèrent que par le choix du vernis dont l'imperméabilité doit être satisfaisante. Il semble que le vernis employé à l'I.N.R.A. un mélange de 20 % de résine SARAN et de BUTANOL, soit le plus satisfaisant. Les autres vernis utilisés nécessitent de trois à huit trempages successifs : on signale l'emploi d'un mélange de caoutchouc-crêpe et de benzène (1/30), de collodion, de cire à 65 °C et 100 °C.

Avec les meilleurs vernis, cette méthode permet d'atteindre le coefficient de variation de 1,27 % avec un écart-type de 0,022 pour une densité moyenne de 1,736.

2. DISTRIBUTION DE LA TAILLE DES PORES

2.1. Principe

Son appréciation est appréciée par le biais de la capillarité; dont la loi est : $h = \frac{2 \gamma \cos \theta}{\rho g r}$

ou : h est la hauteur de remontée du liquide dans un capillaire de rayon r

γ la tension superficielle du liquide

ρ la densité du liquide

g l'accélération due à la gravité

θ l'angle du ménisque avec la paroi du capillaire, caractéristique du liquide.

Pour qu'il y est mouvement de l'eau, il faut que la pression ascendante, au niveau du ménisque, soit plus faible que la pression descendante, ou vice-versa.

Si θ est constant, pour une température donnée, et si l'angle θ du ménisque avec la paroi du capillaire est nul, h représentera la force de succion nécessaire pour draîner un tube de rayon donné r.

Bien que les pores, par leur tortuosité ne s'apparentent pas exactement à un faisceau de capillaires de diamètre constant, le rayon calculé à partir de la formule ci-dessus représentera le diamètre minimum des pores, au travers duquel l'eau circule au cours du drainage.

2.2. Détermination expérimentale

Expérimentalement, la répartition des pores par taille sera appréciée en plaçant l'échantillon de terre non perturbée, saturée d'eau, au-dessus d'une plaque poreuse dont le diamètre des pores est connu. Au-dessus de cette plaque, sont exercées, successivement des dépressions ou succions croissantes, exprimées en cm d'eau : 20, 40, 60, 150, 200 et 300 est une séquence souvent utilisée.

La méthode décrite ne permet pas d'aller au-delà, c'est-à-dire d'extraire l'eau de pores à diamètre inférieur à $5/\sqrt{U}$. On note la quantité d'eau drainée à chaque succion et on exprime son volume en pourcentage de la "porosité drainée" totale de l'échantillon.

Puisque pour chaque volume d'eau ainsi drainé, on a la force de succion correspondante en cm d'eau, on calcule le rayon des pores correspondant, à partir de la formule ci-dessus. On en déduit une courbe cumulée d'eau drainée en fonction des différentes succions.

La difficulté, d'ordre pratique, est la mise au point de plaques poreuses, résistantes à la dépression, à diamètre de pores constant. Les différentes matières utilisées sont : l'amiante, le papier comprimé, le verre concassé, la céramique, la cellophane, les membranes de celluloses destinées à la confection des saucisses etc... Les appareils les plus intéressants sont ceux qui permettent les mesures à partir d'échantillons non perturbés.

2.3. Porosimètre à mercure

Le volume du mercure qui pénètre dans la motte est fonction de la pression exercée.

La relation entre la pression et le rayon du pore, $r = 75\ 000/P$, permet de calculer le rayon des pores et leur volume à partir d'un graphique circulaire sur lequel s'inscrit :

- radialement, la pression en kilogramme/cm²
- angulairement, le déplacement linéaire du mercure, ayant pénétré dans les pores, soit H' , en mm de Hg

On connaît la section A , en cm², du dilatomètre dans lequel l'échantillon est placé et le poids Q de l'échantillon, en gramme. Le volume total des pores est alors égal à $V = A \times H'/Q$.

A chaque pression correspond un rayon de pores donné. En augmentant la pression de 1 à 1 000 kg/cm², il est possible de déterminer des pores de 75 à 75 000 Å. L'échantillon ne peut dépasser 5 g de terre.

3. LA DISTRIBUTION DIMENSIONNELLE DES AGREGATS

Un agrégat est un groupe de deux ou plusieurs particules élémentaires : le facteur déterminant de la distribution dimensionnelle des agrégats sera par conséquent la manière dont la masse de sol est divisée.

Les agents de rupture à utiliser doivent se rapprocher, autant que possible, de ceux prévisibles au champ : c'est le but actuel de l'amélioration des méthodes de détermination de distribution dimensionnelle des agrégats.

3.1. Tamisage en sec

Cette méthode est couramment utilisée par le CNEEMA pour évaluer le pouvoir de division d'un outil : 5 à 10 kg de terre sont prélevés, après le passage de l'outil, séchés à l'air et tamisés. On distingue :

31.1. Le tamisage à plat

31.2. Le tamisage rotatif à tamis concentriques (EDWARD - 1956)

Plus le rayon des tamis est important, plus la quantité de terre tamisée en une seule fois est grande.

Cette méthode a comme avantage sur la première d'être moins brutale.

L'une et l'autre nécessitent une standardisation du mouvement : les appareils de YODER - 1931 et de FEODOROF dont habituellement utilisés pour la première méthode.

3.2. Sédimentation

En 1905, STROKES a établi la loi suivante :

$$V = \frac{2 (\sigma - \rho) gr^2}{9 r}$$

- ou r = rayon de la sphère
 n = viscosité du liquide, en gramme, par cm, par seconde
 g = la constante de gravitation : 981 cm/seconde
 σ = la masse spécifique de la sphère en gramme, par cm^3
 ρ = la masse spécifique du liquide en gramme par cm^3
 v = la vitesse de la sphère

Il en résulte que la vitesse de chute d'une particule est proportionnelle au carré de son rayon.

L'application de cette relation nécessite que les agrégats soient de la même densité.

Le fluide employé peut être soit de l'eau, soit un liquide non polaire, peu perturbant.

L'inconvénient de cette méthode est que les agrégats \gt que 1 mm se déposent trop vite pour être différenciés avec précision.

DAVIDSON & EVANS (1960), pour une séparation en six classes d'agrégats, ont utilisé, puisque la vitesse de dépôt est inversement proportionnelle à la viscosité du liquide, un mélange de 9 volumes de glycérol pour 1 volume d'eau dont la viscosité est 140 fois plus élevée que celle de l'eau : la corrélation entre la stabilité des agrégats à l'eau et au mélange glycérol + eau est de $R = 0,9$.

3.3. Tamisage en humide

Les agrégats sont placés dans une batterie de tamis immergée dans l'eau.

Cette technique suppose qu'ils aient été préalablement séparés : 2 méthodes sont possibles :

- par humectation des échantillons à la pression atmosphérique
- par humectation sous vide.

VAN BAVEL (1953) a établi que la deuxième méthode d'emploi, plus rapide, est plus reproductible à condition que les dimensions des chambres à vide soient constantes et que le vide soit introduit suivant une procédure standard pour tous les échantillons.

3. 4. Elutriation ou tamisage par flux d'eau

KOPECKY (1914) et RHOADES (1932) obtiennent une distribution satisfaisante des agrégats inférieurs à 2 mm avec ce système. Ce système consiste à soumettre un échantillon de terre à un flux d'eau s'élevant verticalement. L'échantillon est placé en dessous d'une série verticale de faisceaux de tubes en verre, à diamètre décroissant. La vitesse de l'eau au travers de ces "capillaires" sera d'autant plus grande que le diamètre des tubes sera petit : de cette façon, les agrégats les plus petits resteront dans les tubes les plus larges.

3. 5. Le test à l'alcool TRI (1969)

Cette méthode, exposée plus haut, satisfait aux exigences de respect de l'état de division initiale du sol et de différenciation des strates d'agrégats. Cependant, sa fiabilité est d'autant meilleure que l'on opère à partir d'échantillons à caractéristique granulaire prononcée.

3. 6. Utilisation des ultrasons

La séparation de particules élémentaires est habituellement réalisée par immersion et agitation de l'échantillon dans une solution à fort pouvoir de rupture (hexamétaphosphate de soude, par exemple).

L'emploi des ultrasons a l'avantage d'être très exactement reproductible et de mesurer avec une grande précision l'intensité de la force de rupture en relation avec un état de division donné.

4. OBSERVATION DU PROFIL CULTURAL

Déjà largement utilisée, cette méthode exige une grande expérience. Signalons la tentative actuelle de l'Institut Technique de Céréales et des Fourrages (I. T. C. F.) de réduire au maximum l'équation personnelle de l'observateur par l'établissement de fiches d'observations normalisées.

Ces fiches sont destinées à caractériser les états structuraux du sol dans leur relation avec la plante et l'outil sur les essais de longue durée de l'Institut.

La codification a été établie en prévision d'un traitement ultérieur sur ordinateur.

5. LA RESISTANCE A LA PENETRATION COMME CRITERE DE LA COMPACTION DES SOLS

Les autres critères tels que densités en place, densités mottières, les taux d'agrégation aussi révélateurs qu'ils puissent être sur l'état structural du sol, exigent de longues et nombreuses manipulations si l'on veut accéder à une précision satisfaisante.

A ces méthodes, peut-on substituer un autre critère, synthétique, plus aisément appréhendable ?

La résistance à la pénétration apparaît, à travers les études actuelles, comme la résultante de la plupart des facteurs de la structure.

Utilisée sur le terrain, elle s'implifierait énormément les procédures actuelles utilisées dans les expérimentations sur le travail du sol.

Exprimé en kg/cm² ou en Bar, elle représente la force qu'il faut exercer sur une pointe en acier pour l'enfoncer d'une profondeur donnée dans un sol.

Le test peut être fait en laboratoire à partir d'échantillons remaniés ou de blocs de terre non perturbés, en adoptant une humidité standard afin de séparer l'influence de l'humidité de l'action des autres propriétés physiques du sol.

Au champ, les différences de tassement sont souvent marquées par l'humidité : il faut alors utiliser le pénétromètre près du point de flétrissement ou très près de la capacité au champ rapidement après une pluie.

Des études fondamentales ont été effectuées sur les corrélations liant les résistances à la pénétration aux principaux facteurs de la structure d'un sol.

En empruntant cette classification à NICHOLS (1929) et CANARACHE (1963), nous distinguerons les facteurs pédologiques permanents : texture, composition chimique, teneur en humus, etc...

des facteurs pédologiques variables : structure, porosité, humidité, etc...

5.1. Les facteurs pédologiques permanents influençant cette résistance à la pénétration

Les plus étudiés sont :

- la teneur en argile physique
- le pourcentage d'humidité (de la capacité au champ au point de flétrissement)
- la vitesse d'infiltration
- la force de succion
- la densité

La résistance à la pénétration apparaît donc comme un indice particulièrement révélateur des relations sol-eau, liées d'une part à la cohésion des particules élémentaires, d'autre part au volume des espaces libres.

Les relations suivantes sont citées par l'ensemble des auteurs :

CANARACHE (1965) décrit la résistance à la pénétration par rapport à la teneur en argile physique par l'équation d'une fonction exponentielle :

$$\log RP = -0,03 + 0,017 AP + 7,53 \log PV$$

$$\text{avec } R = 0,911$$

RP : résistance à la pénétration
 AP : argile physique
 PV : poids volumétrique

La résistance à la pénétration est inversement proportionnelle à l'humidité. La courbe parabolique est caractérisée par une rupture de pente, plus accentuée, marquant le point d'humidité où la terre passe de l'état plastique à l'état cassant. A partir de mesures au pénétromètre à main, il est possible d'apprécier rapidement la teneur en eau d'un sol, à condition qu'une courbe de correspondance ait été préalablement établie.

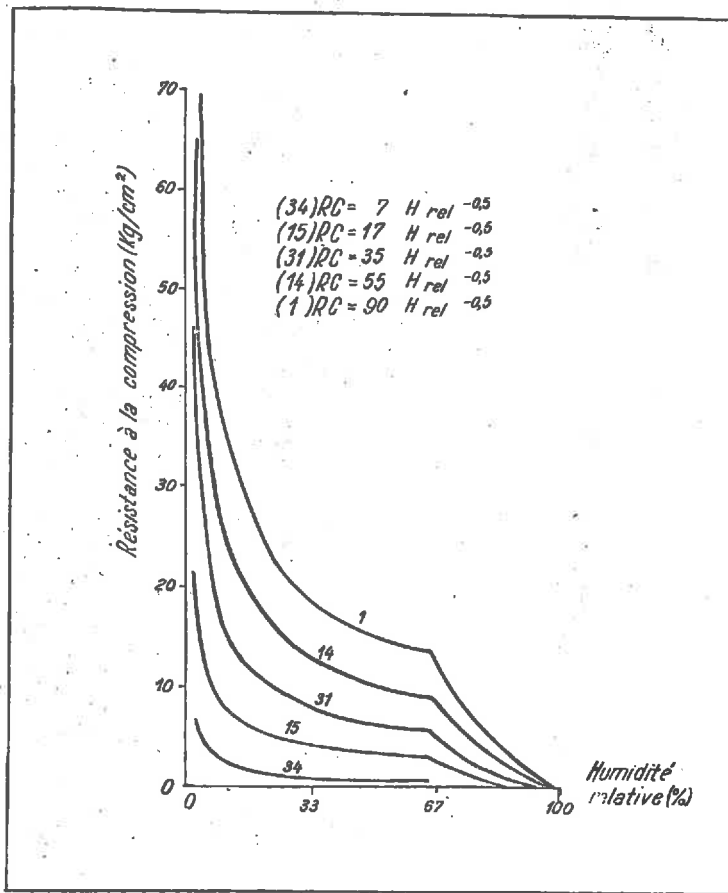


FIGURE 3

Corrélation entre le taux d'humidité (H, %) et la résistance à la compression (RC, kg/cm²) pour quelques sols qui diffèrent par la texture (CANARACHE, 1960)

34. Sable limoneux. — 15. Limon sableux. — 31. Limon. — 14. Limon argileux. — 1. Argile lourde.

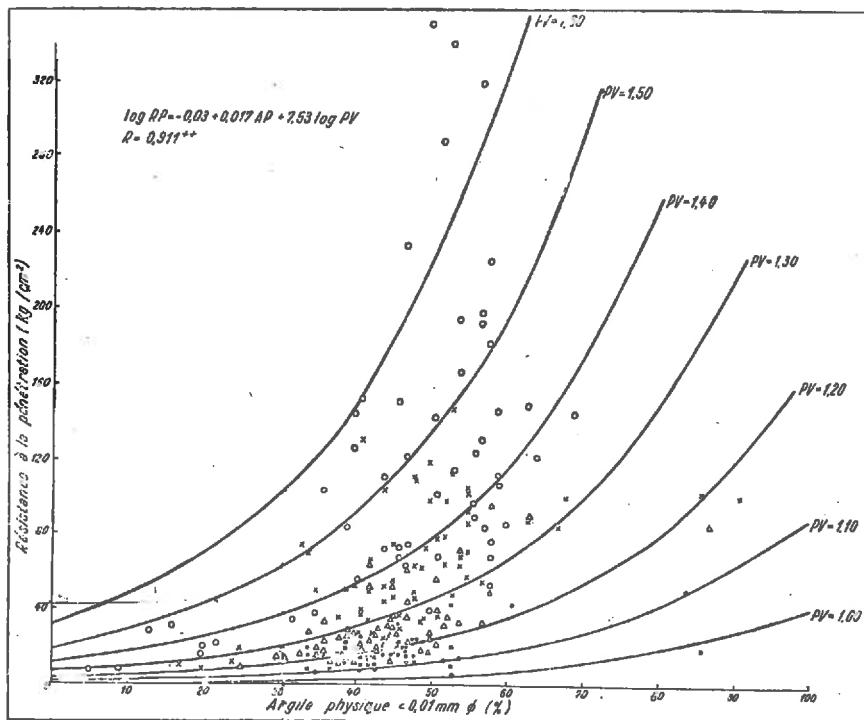


FIGURE 12

Corrélation entre la teneur en argile physique (AP, %), le poids volumétrique (PV, g/cm³) et la résistance à la pénétration (RP, kg/cm²) déterminée au laboratoire (CANARACHE, 1964)

Les signes conventionnels dont sont marqués les points sur le graphique indiquent les classes de poids volumétrique, à savoir : . moins de 1,20 ; Δ 1,20-1,30 ; x 1,30-1,40 ; o plus de 1,40. Les courbes tracées sur le graphique représentent la variation de la résistance à la pénétration pour des valeurs fixes du poids volumétrique ; ces courbes ont été calculées conformément à l'équation de régression multiple indiquée sur la figure.

- la force de succion croît avec la compacité qui croît avec la résistance à la pénétration
- plus la capacité du champ ou la vitesse d'infiltration augmente, plus la résistance à la pénétration diminue

Dans l'ensemble des résultats présents dans la bibliographie, les corrélations entre expériences aux champs et expériences en laboratoires sont étroites : $R = 0,742$, dans le cas d'une corrélation entre la densité et la résistance à la pénétration.

Certaines sources d'erreur sont signalées :

- . L'angle de la pointe d'acier, ou le diamètre de l'embout
- . Le frottement longitudinal lors de l'enfoncement de la tige que l'on réduit en prévoyant pour le cône un diamètre supérieur à celui de la tige
- . Le frottement différentiel de la pointe d'acier quand on opère dans deux sols de texture différente, même quand ils sont à la même humidité
- . La vitesse d'avancement : THOMAS (1967) trouve que la résistance au cône du pénétromètre augmente quand la vitesse de pénétration s'accroît
- . Poids de la masse percutante.

MAYMARD (1970) constate que la reproductibilité de la mesure est d'autant meilleure que la difficulté de pénétration est plus grande : CV variant de 31 à 18 % par cm, pour des enfoncements respectivement de 0,58 cm par kg/m à 0,129 cm par kgm.

Le problème essentiel est le niveau de sensibilité de l'appareil ; est-il suffisant pour déceler une semelle de labour, une légère discontinuité dans la compacité d'un profil ?

Le croquis ci-joint, numéro , extériorise une différence sur limon argileux, après test au laboratoire, sur échantillon non perturbé (CANARACHE 1963).

5.2. Les facteurs pédologiques variables

Appliquée comme nous l'avons vu plus haut à la caractérisation de certains types de sol, la résistance à la pénétration peut aussi être utilisée en tant qu'indice de l'état physique du sol dans les expériences concernant les façons culturales.

Dans ce cas, la résistance à la pénétration est reliée, comme précédemment :

- aux différentes propriétés physiques du sol

mais également :

- au développement du système racinaire
- au stock d' NO_3 - N dans le sol
- au rendement des cultures, etc...

Nous avons sélectionné dans la bibliographie quelques rapports d'expériences dont les objectifs s'apparentent à celui de AVI et dans lesquels la résistance à la pénétration était utilisée.

MM. SWANSON et JACOBSON : 1951 - 1953

Pendant trois ans, sur une culture de maïs, en se servant exclusivement d'un pénétromètre "à percussion" utilisé au champ, ont étudié les relations qui liaient la résistance à la pénétration, à la production et au taux de NO_3 N dans le sol.

Trois types d'entretien de la culture étaient pratiqués :

- les compactions observées se classaient dans l'ordre :

3 binages du cultivateur \lt 2.4 D + 1 binage \lt 2.4D seul

- la production est inversement proportionnelle au nombre de coups de pénétromètre
- les parcelles ayant reçu de l'azote accusaient moins de compaction que les parcelles sans azote.

Cependant, il y avait accumulation de nitrate dans les traces de roues du fait de la meilleure humidité de ces zones tassées, - donc favorables à la nitrification - et de leur faible colonisation par les racines limitant ainsi l'exportation des nitrates.

Les caractéristiques granulométriques du sol de l'expérience étaient :

sable 61 % - limon 25 % - argile 14 % - MO 2,6 %

Il s'agissait surtout de limiter la formation d'une croûte en surface au cours de végétation, croûte préjudiciable à la production des nitrates.

L'intérêt d'une telle expérimentation est la simplicité et la rapidité des mesures sur le terrain, réduites à l'emploi du pénétromètre.

VEZ SUISSE : 1970

Sur céréales de printemps avec trois traitements : sans travail du sol - disques + rouleau - labour + herse, avec un pénétromètre à percussion d'un cm² de section, constate qu'avec des écarts de quelques pour cents en ce qui concerne la porosité du sol, il obtient des relations de 1 à 2, 5, voire 3, en ce qui concerne la résistance mécanique à la pénétration.

	porosité	capacité rétention	macro- porosité	résistance au pénétromètre	
				0 - 12	12 - 24
Labour au disque + rouleau	52,4	37,5	14,9	6,3	10,0
Labour conventionnel	59,6	32,0	27,6	3,3	6,1

Sur betteraves :

Les parcelles non labourées se caractérisent par les résistances les plus élevées et celles préparées au rotavator par les plus faibles.

De plus, il constate que la plus faible proportion de racines fourchues s'observe après rotavator.

PETAR DREZGIC et Al. de 1966 à 1970

A partir d'une rotation Maïs-blé sur un chernozem riche en carbonates ; après un labour conventionnel commun à toutes les parcelles, de 15-20 cm et de 30-35 cm, comparent trois traitements appliqués au maïs :

- disques et herse
- disques et herse et 1 passage de rouleau (810 kg)
- disques et herse et 2 passages de rouleau

Outre les mesures habituelles de densité, de porosité, de capacité au champ et de teneur en air du sol, des mesures au pénétromètre à percussion, dont les dates ne sont pas précisées, ont été faites chaque année :

POUR 10 COUPS : PROFONDEUR de PENETRATION en cm

TRAITEMENTS	%		DISQUES		1 ROULAGE		2 ROULAGES	
	H ₂ O		15 - 20	30	15 - 20	30	15 - 20	30
Profondeur du labour (cm)								
née 1966 / 1967	16,5		14,3	14,5	12,0	12,4	11,8	11,8
1967 / 1968	18,7		19,1	25,7	14,1	16,3	9,6	13,8
1968 / 1969	24,0		21,0	24,1	20,7	25,1	19,1	19,9
1969 / 1970	21,0		19,6	20,5	14,8	15,0	13,5	14,9

Ces mesures montrent, encore une fois, que la résistance à la pénétration augmente quand l'humidité diminue.

L'intensité de compactage au rouleau augmente cette résistance tandis que la profondeur du labour la réduit.

Bien que l'Etude ait été effectuée dans une gamme de porosité identique (de 55 à 47 %), elle ne vérifie pas l'observation de VEZ comme quoi les résultats du pénétromètre amplifient les différences observées entre les porosités ; cependant, les densités à tous les niveaux varient dans le même sens que la résistance à la pénétration.

CHARREAU et POULAIN au Sénégal (IRAT)

Avec des coefficients de variation de 25 % à 35 % ont établi qu'une trentaine de répétitions étaient nécessaires pour qu'une différence de 50 kg entre traitement puisse être significative, entre un terrain sans labour, d'une part, un traitement avec labour depuis deux ans et labouré depuis un an d'autre part.

Les mesures étaient faites à la fin de la saison sèche, au dessous du point de flétrissement et permettaient d'apprécier l'effet résiduel du labour sur sol de texture sableuse (sol dior).

Ils relient : La résistance à la pénétration au déficit de rétention à la courbe d'E. T. P. cumulée aux efforts de traction nécessaires aux différents matériels aratoires.

VAN OUWERKERKE and F.R. BROWN : 1971 (Hollande)

A l'aide d'un pénétromètre enregistreur à pression continue, mettent en évidence des différences de résistance à la pénétration dans un sol limoneux, d'origine marine, portant une orge de printemps :

	<u>JUIN</u>		<u>SEPTEMBRE</u>	
en kg/cm ²	0 - 10 cm	10 - 20 cm	0 - 10	10 - 20
labour 20 cm	4,4	5,4	13,6	31,9
cultivateur 10 cm	5,7	10,2	22,1	15,8

A partir de 25 échantillons, ils obtiennent, dans un sol sablonneux, cultivé en betterave :

<u>sol labouré</u> :	<u>sol non labouré</u> :
23,73 kg/cm ²	48,39 kg/cm ²
avec CV 21,27 %	6,14 %

Ce qui vérifie la remarque de MAYMARD sur la précision qui augmente avec la difficulté de pénétration.

CANARACHE (1965)

Utilise systématiquement le pénétromètre au champ pour apprécier les différences de compaction de deux types de récolteuses de maïs (cf. photocopie).

5.3. La résistance à la pénétrométrie et le développement du système racinaire

L'idée de base est que l'enfoncement d'une pointe d'acier dans le sol simule celui de la racine.

Comme l'avancement du pénétromètre, la pénétration des racines est considérée comme une fonction du taux d'humidité du sol, de la force de succion du sol, de la porosité à l'air, de la densité à l'air, de la plasticité du sol, etc...

La similitude n'est que lointaine, surtout pour un système racinaire fasciculé. En effet, le pénétromètre n'est pas flexible, il donne une idée des difficultés rencontrées par la racine, sauf dans les structures creuses, mais ne révèle pas les possibilités que la racine a de les éviter en suivant le cheminement des pores.

La friction des racines peut-être complètement différente de celle du métal sur la terre, surtout si la racine lubrifie son passage avec du mucilage. On réduit la friction du pénétromètre en imprimant à son aiguille un mouvement de rotation et en limitant au maximum la vitesse d'avancement de celle-ci : 0,30 mm par minute. (WALDON et CONSTANTIN U.S.A. - 1967).

Malgré ces réserves, il a été démontré (MAERTENS - 1964) que la résistance à la pénétration influence grandement le développement des racines. Sur des échantillons en vase de végétation, tamisés à 2 mm de 35 % et 50 % de porosité, il a été mis en évidence, comme TAYLOR & GARDENER (1963), une régression liant la longueur moyenne des racines = Y, d'orge RIKA, au LOG de la résistance mécanique à la pénétration = X

$$Y = 8,32 - 0,5625 \times (Z_1) + 0,1631 \times (Z_2) \text{ pour } F < 0,01$$

./.

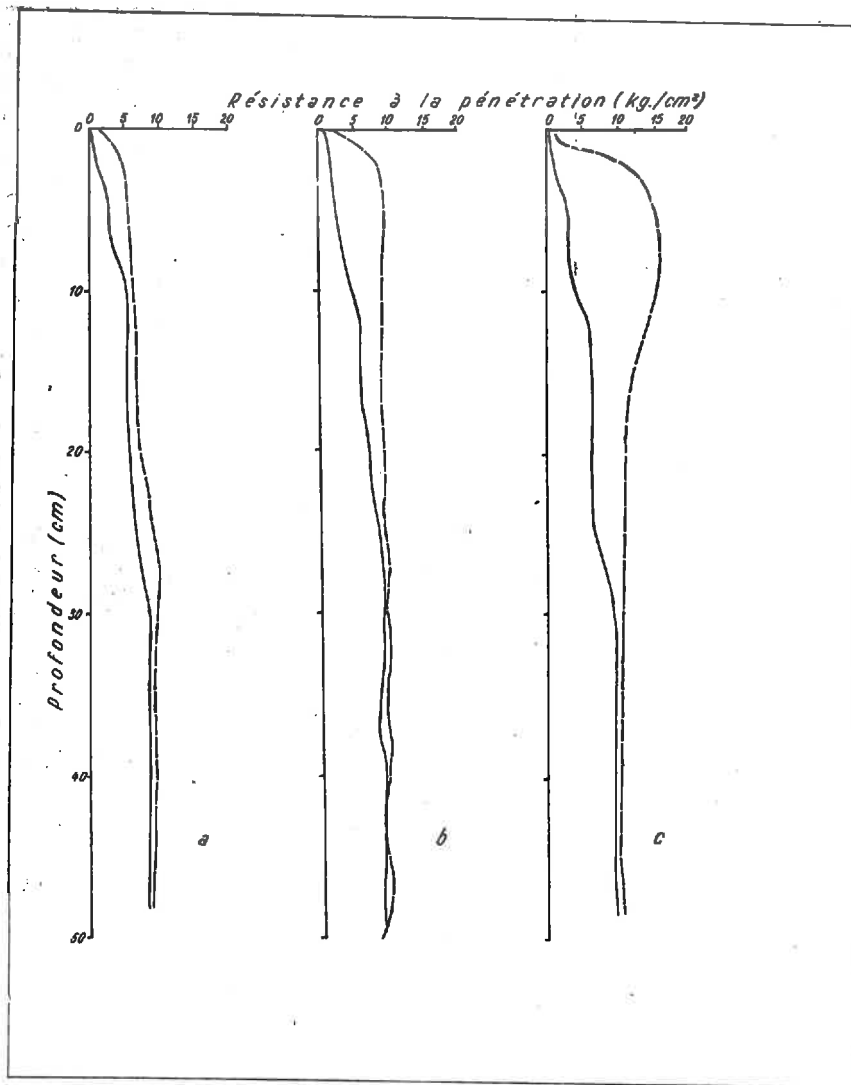


FIGURE 14

La résistance à la pénétration (déterminée au champ) en tant qu'indice de la compaction du sol par l'action d'une machine autopropulsée (a) et d'une machine remorquée (b) à récolter le maïs, ainsi que par l'action des véhicules utilisés pour transporter la récolte (c) (FLORESCU et CANARACHE, 1965)

-- Avant le passage des machines -- — Après le passage des machines.

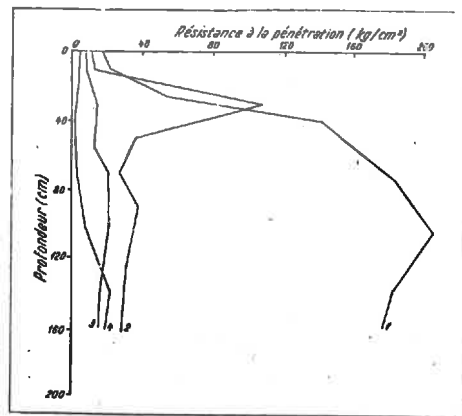


FIGURE 13

Variation de la résistance à la pénétration (déterminée au laboratoire dans des conditions d'humidité standard) sur le profil de quelques sols (CANARACHE, 1964)

1. Sol sylvestre podzolisé brun à pseudogley, Ghelmeioala (limon-limon argileux dans l'horizon A, argile-argile limoneuse dans l'horizon B). — 2. Chernozem chocolat, Semlac (limon argileux). — 3; Chernozem châtain, Mărculești (limon). — 4. Sol sableux de dune fixée, Hanul lui Conachi.

Dans une autre expérience à humidité constante, il a été obtenu :

Porosité	Résistance à la pénétration	Longueur moyenne des racines
-----	-----	-----
42 %	700 gr	6,16 cm
37 %	2 700 gr	3,16 cm

Remarquons cependant que les comparaisons sont faites sur sol très homogène ce qui n'est pas le cas d'une couche arable.

TAYLOR & BURNETT (1961)

Réjoignent les conclusions des recherches fondamentales de CANARACHE et PERIGAUD lorsqu'ils démontrent, sur un limon sableux hydromorphe que la résistance à la pénétration limite la croissance des racines, plus que tout autre facteur, notamment la porosité, l'humidité ou le taux d'oxygène.

PERIGAUD (1964)

Relie la notion d'activité racinaire exprimée en $\frac{\text{gramme de racine}}{\text{quantité d'éléments minéraux exportés}}$ à la résistance à la pénétration : ratio très synthétique ; il a l'avantage de rappeler que la racine, non seulement pénètre, mais fonctionne : cette activité diminue quand la résistance à la pénétration augmente.

Cette auteur conclue que le compactage du sol peut influencer la composition minérale des parties aériennes et les racines de la plante, sans que l'on constate nécessairement une action dépressive de la croissance.

53.1. Pénétration des racines : notion de seuils

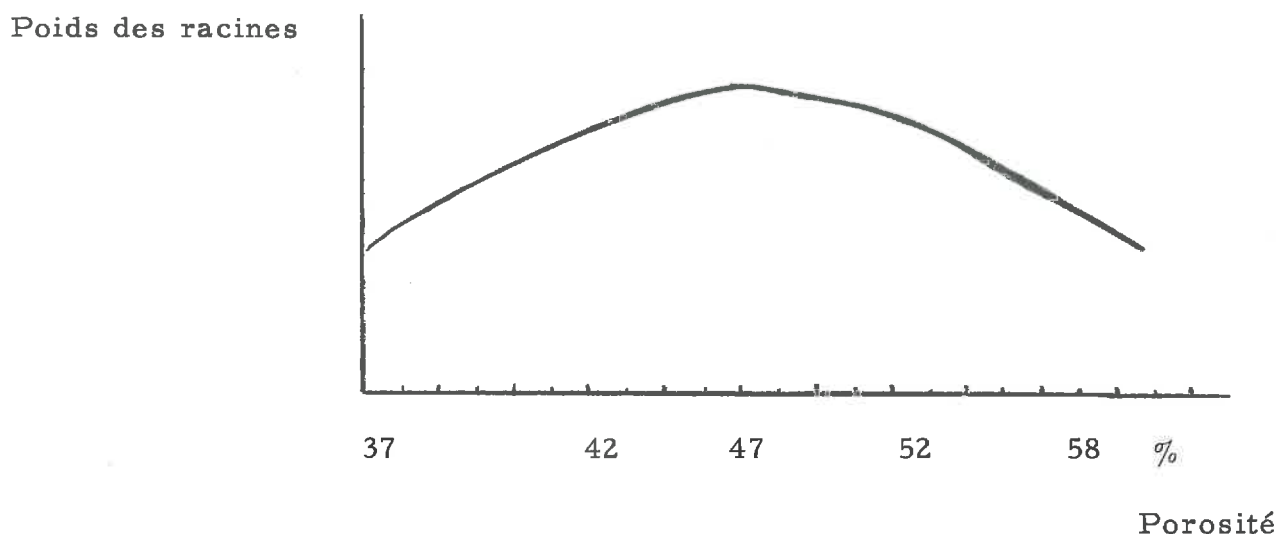
Certains auteurs se sont attachés à délimiter des seuils et des optimum de compaction ; bien que cette notion ne décrive en rien le système interne de porosité dans la masse du sol.

Le problème est de savoir quelle fourchette de compaction il est raisonnable de tolérer sans augmenter inconsidérément les risques encourus par les récoltes et les sols sous différentes conditions climatiques : plus le cycle végétatif d'une plante est bref, par exemple dans les régions à saison humide courte, plus la vitesse d'élongation des racines, par conséquent la résistance à la pénétration prend de l'importance.

La contradiction entre les résultats de J. WILKINSON et D. THOMAS avec ceux de MAERTENS (1964) n'est qu'apparente : les premiers trouvent que, sur des plantes à enracinement superficiel comme *POA ANNUA*, *POA PRATENSIS* et *AGROSTIS PALUSTRIS*, le poids de racines augmente avec la densité, tandis que le second trouve le contraire avec du maïs.

Mais l'expérience de WILKINSON & THOMAS se situe dans une gamme de grande porosité : 58 - 52 et 47 % - tandis que celle de MAERTENS dans une gamme de plus faible porosité : 42 et 37 %.

Si nous traçons la courbe, la comparaison de ces deux expériences illustre bien la notion d'optimum de porosité liée à une croissance maximum des racines.



Peter DREZGIC (Pologne)

Etablit pour le blé d'hiver l'optimum entre une densité de 1,46 soit 44,9 % de porosité, et une densité de 1,54 soit une densité de 41,8 % sur un chernozem riche en carbonates.

Un auteur Russe , pour l'orge, fixe l'optimum de porosité entre 52 et 55,8 %, soit une densité de 1,19 et 1,25, sur un sol DERNO légèrement podzolé, moyennement argileux.

CZERATIKI et RUHM (1970)

Constatent que dans les conditions climatiques de l'Allemagne, dans les bonnes terres de betteraves, les meilleurs rendements sont obtenus dans une zone de porosité totale, comprise entre 44 et 48 %.

Mais il s'agit d'optimum "régionalisé", absolument pas généralisable, lié à un type de sol donné et aux exigences d'une plante déterminée, dans des conditions locales d'alimentation hydrique.

Ces différents seuils sont le plus souvent exprimés par les auteurs en quantité de BARS, optimum ou limites. Ils sont déterminés expérimentalement pour chaque type de sol à partir d'observations et de pesées du système racinaire et de mesures au pénétromètre.

RUNKLES et GERARD (1970)

Montrent que le point critique au-delà duquel il n'y a plus croissance des racines est de 70 BARS, dans un limon finement sableux et de 40 BARS dans un sol argileux. (Sans indication du taux d'humidité).

HOWARD M. TAYLOR et EARL BURNETT (1963 et 1969)

Etablissent que pour un limon finement sableux à la capacité au champ le point limite se situe à 25 BARS (densité 1,75 à 1,88) et les optimum varient entre 9,4 BARS et 16 BARS (densité 1,20 à 1,60) suivant les plantes étudiées : coton = 9,4 BARS ; pois = 13 BARS ; arachide = 11,5 BARS

Pour le SESAME, le haricot, le niébé, le sorgho, l'AMARENTHUS RETRO-FLEXUS (brède), etc... la pénétration des racines était possible à partir d'une résistance à la pénétration, lue sur le pénétromètre, inférieure à 19 BARS.

5.4. Les différents modèles de pénétromètres

La plupart des pénétromètres présentés ci-dessous ont été conçus pour l'étude de la dynamique du sol relative aux problèmes du Génie Civil.

1/ En laboratoire

Le plupart des pénétromètres ont une aiguille de 0,5 cm à 0,1 cm dont la pression est produite par un bras monté sur charnière à une extrémité et qui se prolonge de l'autre, au-delà de la position de l'aiguille.

A l'extrémité de ce bras de levier sont ajoutés progressivement des poids, souvent sous forme de plomb ou de mercure : ce système permet de contrôler la vitesse d'avancement de l'aiguille. Un dynamomètre permet de lire et d'enregistrer parfois la pression exercée.

Citons le pénétromètre de plasticité, destiné à la détermination rapide de la limite de liquidité d'un sol : on mesure la profondeur de l'enfoncement du cône, pénétrant dans l'échantillon sous l'effet de son propre poids. Le pénétromètre à aiguille servant aux essais de pénétration sur les produits bitumineux.

2/ Au champ

A. Pénétromètre à percussion

- . masse percutante, coulissant sur une tige à bout cônica, munie d'un butoir (HENIN - DEMOLON)
- . dame PROCTOR percutant une tige guidée jusqu'au sol par un tube. L'ensemble est maintenu vertical par un trépied. Le diamètre de l'embout est de 2 pouces (5,08 cm) (SWANSON and H. G. - JACOBSON 1953).

Pénétromètre à "cueillère" (Standard split spoon penetrometer).
Surtout employé pour l'étude du sous-sol.

Le cône est remplacé par un tube dont l'extrémité, à bord coupant, traité, se dévisse pour le recueil de l'échantillon.

Pénétrromètre à pression continue

- a. Pénétrromètre à main : type BARENTZEN, à cône d'un angle de 60° surface de 10 cm^2 .

Il a l'avantage de comporter une tige-guide, creuse, qui s'enfonce en terre et qui élimine ainsi le frottement latéral ; lecture sur manomètre.

. Type aiguille proctor

Sert à mesurer le compactage des sols fins. L'appareil est constitué par un dynamomètre à ressort prolongé par une tige de pénétration recevant un embout calibré.

. Pénétrromètre de poche

Destiné à la classification rapide des sols fins, cohérents et des argiles, par mesure de la résistance à la pénétration d'une tige cylindrique, de $6,35 \text{ mm}$ de diamètre, soit $0,317 \text{ cm}^2$. Le cadran est gradué en bars ($1 \text{ bar} = 1,02 \text{ kg/cm}^2$. Force maximale : 30 bars).

. Pénétrromètre à cône

Cône de 30° , surface $1/2$ pouce carré, soit $1,27 \text{ cm}^2$ - hauteur du cône : $1,5$ pouce ou $3,81 \text{ cm}$; se vissant à une tige surmontée d'un anneau dynamométrique. Un modèle récent est muni d'un dispositif enregistreur électronique.

. Le pénétrographe

Est l'ancêtre du précédent - monté sur un statif solidaire d'une plaque de couche, la pression est produite par une manivelle.

Nous passons sous silence les gros pénétromètres des Travaux Publics, à percussion ou à pression croissante, développant des forces de 500 kg/cm^2 et plus.

La pénétrométrie peut-elle remplacer d'autres méthodes d'étude de la compaction et de la porosité ?

Dans le cas contraire, doit-elle intervenir avant ou après d'autres méthodes plus fines, comme celle utilisée dans cette étude ?

La réponse à ces deux questions tiendra lieu de conclusion :

1. Dans la mesure où, dans un sol donné, des relations ont été préalablement mises en évidence entre la résistance à la pénétrométrie et la densité, la teneur en eau, la porosité, le pourcentage de tares à la récolte de betteraves etc... l'emploi du pénétromètre au champ permettra de suivre aisément, avec une précision suffisante, l'état physique d'un sol au cours d'une campagne.
2. Dans le cas où aucune comparaison préalable existe, l'emploi d'un pénétromètre, suffisamment élaboré, correspondra à une auscultation exploratoire du terrain permettant de dégrossir les problèmes.

En aucun cas, la pénétrométrie ne décrira un système de porosité et ne remplacera un examen détaillé du profil cultural.

BIBLIOGRAPHIE

- Le profil cultural (S. HENIN - R. GRAS - G. MONNIER) - 1969
- Guide pour l'Etude Expérimentale du sol (A. DEMOLON et D. LEROUX) 1952
- L'expérimentation et les engrais, les bases de l'expérimentation, le mode de calcul statistique (Michel LECOMPT).
- Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes (Daniel SCHWARTZ).
- L'évaporation réelle de différents couverts végétaux bien alimentés en eau et l'évapotranspiration potentielle - Détermination potentielle (M. ROBELIN) Annales agronomiques 1962 - 13 (6) pages 493 -522
- L'eau et la production végétale - INRA
- Dynamique du sol (DEMOLON)
- Précis de pédologie (DUCHAUFOR)
- Les céréales (MOULE) (1972)
- Dynamique de la Granulation du sol sous prairie (BUI HUUTRI) (1970)
- Influence of particles size distribution on soil compactibility - (M.V.H. VANDER WATT) - Faculty of agriculture - University of Pretoria Agrochemophisica 1969 - 1, 79.86
- Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols - FIES 1971
- Papers on the zero tillage (VAN OUWERKERKE - FR BOONE and al.) Netherland journal science - 1970
- The undergrounds organs (THROUGHTON)
- La croissance des céréales
Annales INRA - Série B - mars 1952
- La réserve en eau facilement utilisable : tentative de mesure par la courbe de dessèchement (CATZEFLIS J,) Recherche agronomique suisse t.9 n°2 - p. 194.204 - 1970
- Effets de la résistance mécanique et du déficit en oxygène sur la croissance du maïs et le développement racinaire (PERIGAUD) C.R. Académie d'Agriculture Française - t. 51 et t. 52
- Travail du sol enrelation avec les rendements de betteraves et de céréales. VEZ - Station Fédérale de recherche agronomique de Lauzanne 40.906 - 1971 - n°838 - 1969 - 893 - 1970
- A comparaisom of several methods for evaluating bulk density of field soils (J.P. PALTA - and Al.) - Punja Agricultural University - Indian society of soil science 1969.
- Methods of soil analysis - American society of agronomy n° 9.

.../

- Influence of soil strenght on roots growth.
(TAYLOR H.M. and BURNETT) (1964)
Soil science 98 p. 174 - 80
- Soil Science (TAYLOR and GARDNER) 96 p. 153 -156
- Influence of soil strenght on growth of roots (BARKLEY K.P.) (1963)
Soil science 96 p. 175-180
- Amélioration du profil cultural (Casamance)
(CHARREAU et POULAIN (IRAT)) (1970)
- Relations entre la compaction du sol et les rendements du maïs
(SWANSON and JACOBSON) - Soil science
- Compte rendu du Colloque : herbicides et techniques de culture
FNGPC - COLUMA 1969 -
- Les facteurs de la résistance mécanique des sols et les méthodes
utilisés pour les étudier. (CANARACHE) 1960-1965 (Roumanie)
Science du sol 1965 n° 2 p. 89. 107
- Response of Tillage Systems as Influenced by soiltype
B. TRIPLETT and al. (Ohio - USA)
The transactions of the ASAE - 1970
- A Study of the relationships between root growth and physical properties
of soils (RUNKLES and GERARD - TEXAS USA)
Dissertation Abstracts International 1970 - 31-10
- Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols
A FAURE (INRA)
Annales Agronomiques 1971 - 22 (5) -487-513/