

Université des Sciences et Techniques du Languedoc

Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

Diplôme d'Etudes Approfondies d'Agronomie

Option : Pédologie

**Caractérisation
des propriétés physiques
d'un sol argileux à nappe salée
du littoral languedocien**

**"Les Palus Nord"
Marsillargues (Hérault)**

par Fathel AL ADDAN

Mémoire présenté en Juillet 1984 devant le Jury :

JURY : MM. E. SERVAT
JC. FAVROT
G. MANIERE

A V A N T - P R O P O S

Avant de commencer ce mémoire, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à le réaliser, notamment Monsieur le Professeur E. SERVAT, directeur de la Chaire de Science du Sol de l'E.N.S.A.M., et Mr J.C. FAVROT, directeur adjoint de recherches INRA qui a encadré et dirigé mon stage de D.E.A.

Ont aussi participé à ce travail :

- Mr G. MANIERE, Maître de Conférence de la chaire de Génie Rural à l'E.N.S.A.M.
- Mr R. BOUZIGUES, Ingénieur au Laboratoire de Science du Sol de l'I.N.R.A.
- Mr S. CONVENTI, Technicien au Laboratoire de Science du Sol de l'I.N.R.A.
- Melle H. FONTA, Technicienne à la chaire de Génie Rural de l'E.N.S.A.M.
- Mr A. DUCREUX, Ingénieur au G.E.E.M.A.T.
- Mme A. VIEILLLOT qui a assuré la frappe et la présentation de ce mémoire.

Je tiens à remercier toutes ces personnes pour leur aimable collaboration, notamment S. CONVENTI qui m'a bien aidé pour la collecte des données de terrain puis leur mise en forme.

Je remercie aussi tout le personnel technique du Laboratoire de Science du Sol de l'I.N.R.A.-E.N.S.A.M., qui, sous des formes très variées, m'a aidé dans ce travail.

Merci enfin à Mr TRIOL, propriétaire des parcelles étudiées, pour son accueil compréhensif.

S O M M A I R E

AVANT PROPOS

INTRODUCTION	1
I - PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE	3
1.1. - Localisation géographique	3
1.2. - Climat	4
1.2.1. - Températures	
1.2.2. - Précipitations	
1.2.3. - Vents	
1.2.4. - Ensoleillement et évapotranspiration potentielle	
1.3. - Géologie	5
1.4. - Le sol	5
1.5. - Description des deux parcelles étudiées	6
II - PROPRIETES MECANIQUES DES SOLS - METHODES D'ETUDES ET RESULTATS	6
2.1. - Origine des échantillons	6
2.1.1. - Objectif des prélèvements	
2.1.2. - Localisation des échantillons	
2.2. - Etude de la compaction par le test PROCTOR.....	8
2.2.1. - Le principe de la méthode	
2.2.2. - Justification de la méthode	
2.2.3. - Protocole et matériel utilisés	
2.2.4. - Préparation du matériau soumis à l'essai	
2.2.5. - Réalisation des opérations	
2.2.6. - Rappel sur les courbes PROCTOR	
2.2.7. - Résultats et commentaires des courbes PROCTOR	
2.2.7.1. - Tracé des courbes	
2.2.7.2. - Allure générale des courbes Proctor	
2.2.7.3. - Valeur du rapport $\frac{w_c}{A}$	
2.2.7.4. - Sensibilité à la compaction	

2.3.	-	Etude de la consistance du sol - Limites d'Atterberg	18
2.3.1.	-	Principe de la méthode	
2.3.2.	-	La méthode	
2.3.2.1.	-	Préparation des échantillons soumis à l'essai	
2.3.2.2.	-	Exécution des essais	
2.3.2.3.	-	Indice de plasticité	
2.3.2.4.	-	Classification des sols au moyen de l'abaque de plasticité	
2.3.2.5.	-	Limite de retrait	
2.3.3.	-	Calculs et résultats	
2.3.4.	-	Commentaires	
2.3.4.1.	-	Variabilité spatiale	
2.3.4.2.	-	Evolution verticale dans le profil	
2.3.4.3.	-	Limites d'Atterberg et abaque de Casagrande	
2.3.4.4.	-	Limites d'Atterberg et courbes PROCTOR	
2.3.4.5.	-	Limites d'Atterberg, capacité de rétention Hr, et point de flétrissement Hf.	
III	-	STABILITE STRUCTURALE DU SOL DE MARSILLARGUES	29
3.1.	-	Test d'Emerson	29
3.1.1.	-	Principe général	
3.1.2.	-	Résultats	
3.2.	-	Comparaison avec le test Hénin	31
IV	-	DENSITE APPARENTE, POROSITES ET CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DU SOL DE MARSILLARGUES	32
4.1.	-	Porosités : rappels et considérations générales	32
4.2.	-	Structure du sol, porosités et échantillonnage	33
4.3.	-	Méthodes utilisées	33
4.4.	-	Résultats et commentaires	34
4.4.1.	-	Expression des résultats	
4.4.2.	-	Variabilité des résultats	
4.4.3.	-	Comparaison entre les 2 profils, variabilité spatiale.	
4.4.4.	-	Evolution verticale de la porosité	

4.5. - Capacité de rétention et point de flétrissement ..	37
4.6. - Réserve utile en eau et R.F.U.	37
V - INCIDENCE DU REGIME HYDRIQUE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DU SOL DE MARSILLARGUES	38
5.1. - Evolution de l'état hydrique en 1983	38
5.1.1. - Piézométrie	
5.1.2. - Humidimétrie	
5.1.3. - Evolutions du profil hydrique et du niveau de la nappe.	
5.2. - Incidence du régime hydrique sur les propriétés mécani- ques et physiques du sol argileux de Marsillargues .	40
5.2.1. - Teneur en eau et sensibilité au compactage	
5.2.1.1. - Couches de surface	
5.2.1.2. - Horizons (B)	
5.2.2. - Teneurs en eau et états de consistance	
5.2.2.1. - Domaine plastique (> LP)	
5.2.2.2. - Domaine friable (LP - LR)	
5.2.2.3. - Domaine rigide (< LR)	
5.2.3. - Teneurs en eau et réserve en eau du sol ...	43
CONCLUSION GENERALE	44
BIBLIOGRAPHIE	46
ANNEXES : 2 - Description d'un test de comportement à l'eau pour déterminer la classe de stabilité structurale des sols argileux des marais de l'Ouest d'après EMERSON (1967), GREENLAND et al., 1975.	
3 - Tableaux des résultats expérimentaux de mesure de densité apparente et états de l'eau.	

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

La mise en valeur d'un sol par des aménagements hydroagricoles (irrigation, drainage), puis son mode de culture (itinéraires techniques), dépendent évidemment de ses propriétés chimiques et physiques.

Afin d'apprécier ces dernières, il existe diverses méthodes complémentaires de laboratoire, appliquées, selon les cas, à des échantillons peu ou très remaniés.

Ces méthodes permettent de déterminer soit des teneurs en eau caractéristiques de changements de consistance (plasticité, friabilité) ou de comportements particuliers (sensibilité au tassement), soit d'apprécier la stabilité structurale des différents horizons du sol, soit encore de relier la dynamique de la porosité à celle de la structure du sol.

Afin de mieux raisonner les modalités de drainage puis de conduite des terres drainées, ces différents tests et méthodes ont été appliqués aux sols d'un site expérimental représentatif des terres argileuses à nappe salée du littoral languedocien, terres assez difficiles à mettre en valeur. Outre la caractérisation elle-même du comportement physique des sols, ces déterminations ont été réalisées dans le but d'étudier la variabilité spatiale de ce comportement, ses modalités de changement du sommet vers la base des profils (en fonction de la salinité) et ses variations en fonction du drainage agricole. L'évolution des propriétés physiques dans le temps, en liaison avec les variations de teneur en eau du sol (suivis humidimétrique et piézométrique), a fait aussi l'objet de mes préoccupations.

Ce travail fait suite aux études de M. BRIDIER (1981), P.F. VAQUIE (1982), Ph. LAGACHERIE (1982) sur les mêmes sols, analysant entre autres le rôle des phénomènes physiques de gonflement-retrait sur le colmatage argileux des tuyaux de drainage. Il complète également mes

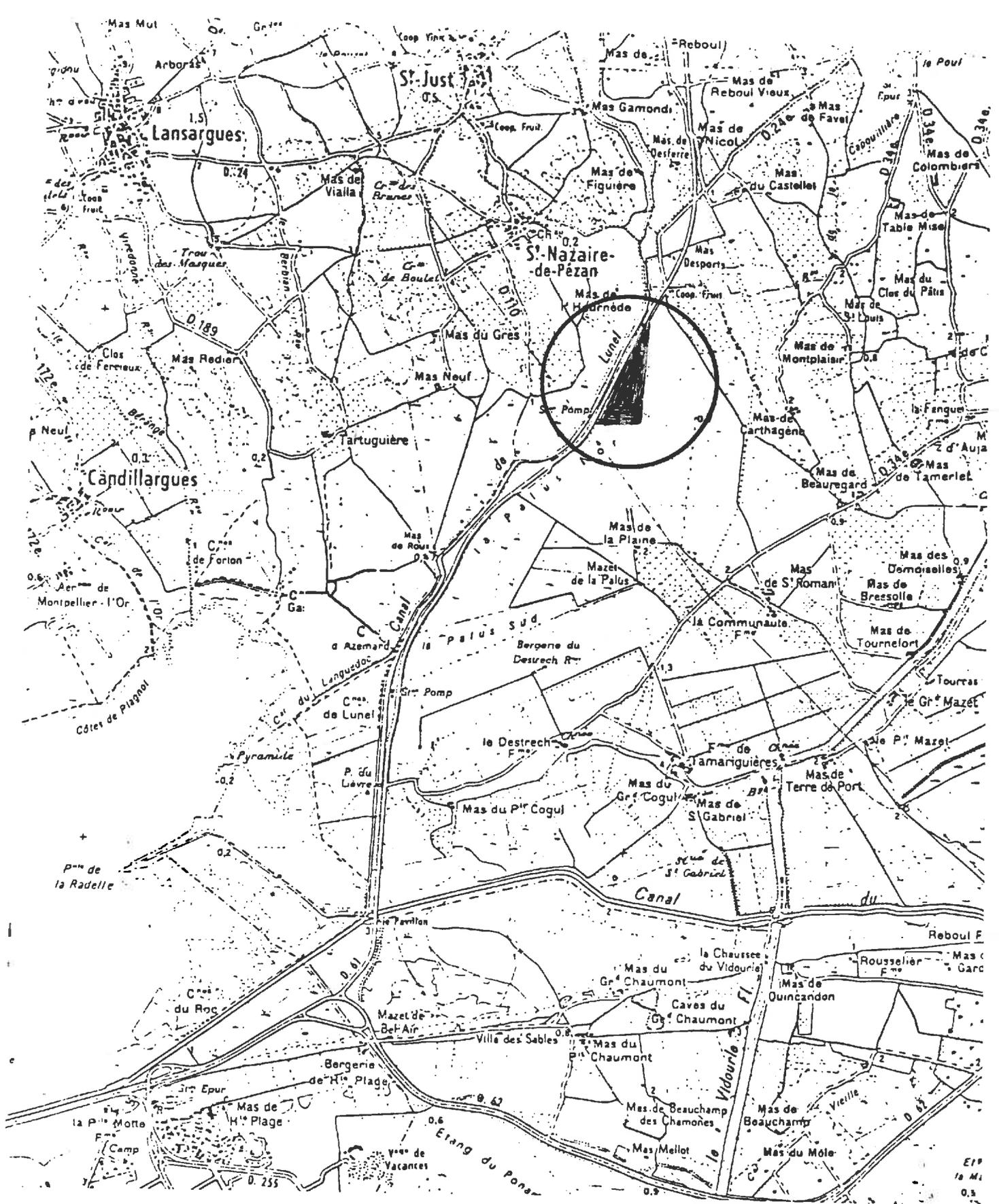


FIG. 1 : LOCALISATION DU SITE ETUDIE, CHAMPS CULTIVES EN BLE EN 1983
 "LES PALUS NORD" 34 - MARSILLARGUES
 ECHELLE 1/50 000

propres investigations menées en 1983 sur les propriétés mécaniques de ces sols et ayant donné lieu à un mémoire de D.E.S.

Le présent document reprend une partie des résultats de 1983, en insistant sur les propriétés physiques, et en résumant en revanche la partie consacrée au suivi du comportement hydrique in situ de ces sols.

L'ordre de présentation retenu tend à évoquer d'abord les résultats de tests de mécanique et physique du sol, puis d'analyser la porosité accessible à l'eau avant de discuter l'évolution constatée de la teneur en eau.

Dans ces conditions le plan du mémoire comprendra les points suivants :

- présentation du milieu et des caractéristiques du dispositif expérimental,
- le test de compactage (Proctor),
- consistance et limites d'Atterberg,
- stabilité structurale (tests Emerson et Hénin),
- porosité structurale et porosité texturale,
- incidences du régime hydrique sur les propriétés physiques du sol.

Chacun de ces chapitres, comprendra un rappel rapide de la méthode puis la discussion des chiffres obtenus.

Nos résultats devraient faciliter l'interprétation des données recueillies au cours du suivi (piézométrie, humidimétrie, porosimétrie, agronomie) du couple de parcelles drainées et non drainées entrepris depuis 1983 par le laboratoire INRA de Science du Sol de Montpellier.

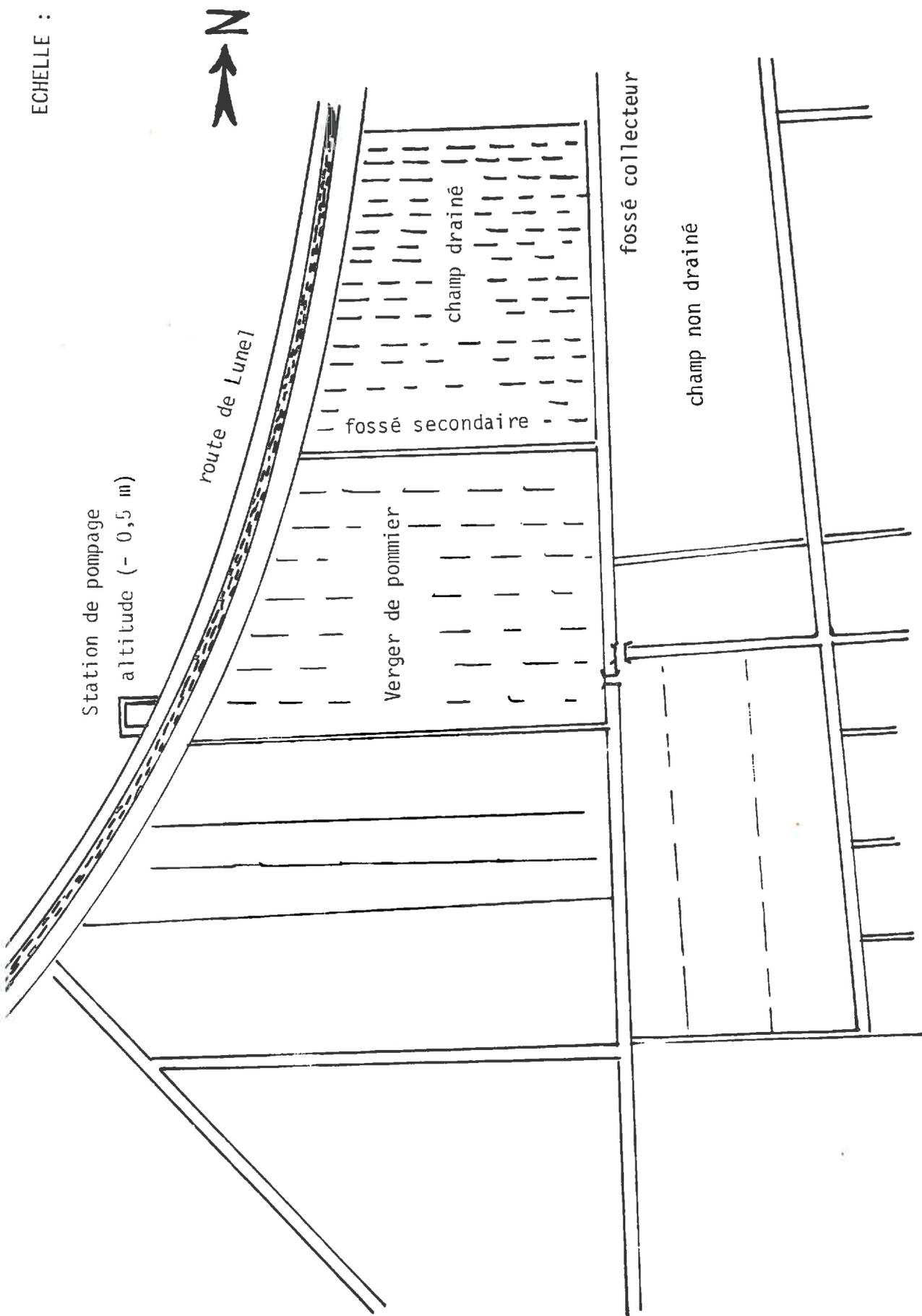


FIG. 2 : PLAN DE SITUATION DES PARCELLES ETUDIÉES
(d'après agrandissement de photographie
aérienne 1/30 000 (1981) de la plaine de

I - PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE

1.1 - Localisation géographique (Fig. 1)

Les parcelles faisant l'objet de notre suivi, se situent à 20 km environ à l'Est de Montpellier, à 10 km au Sud de Lunel, sur le territoire de la commune de Marsillargues, au lieu dit "Les Palus-Nord".

Ces parcelles, bordant le canal de Lunel et la voie rapide Lunel-La Grande Motte (face à une station de pompage), font partie d'un site suivi par le Laboratoire de Science du Sol du Centre INRA de Montpellier pour étudier les phénomènes de colmatages argileux et ferriques des drains.

Il s'agit de champs semés en blé dur en 1982 et 1983, et moissonnés début juillet 83-84. Ils bordent le verger de pommiers où Ph. LAGACHERIE a analysé en détail le colmatage d'un réseau de drains (mémoire de DAA 1982).

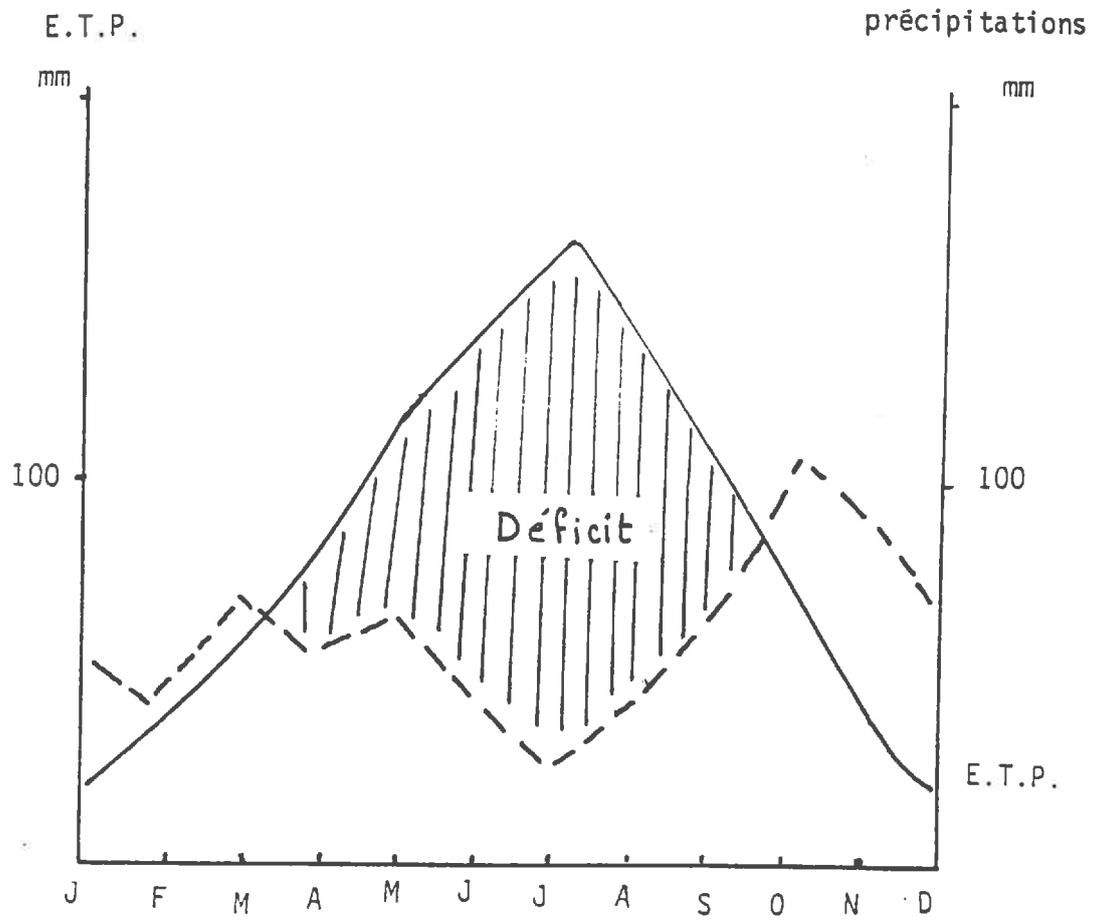
La topographie des terrains est très plane, l'altitude est négative, voisine de - 0,60 à - 0,70 m NGF.

Les parcelles sont entourées par des fossés collecteurs plus ou moins importants (fig. 2). Celle située à l'Ouest est aménagée avec un réseau de drains directs, écartés de 14 m à pente (3 à 9 ‰) et diamètre (50 ou 65 mm) variables.

La position des profils étudiés (prélèvement) et des tubes neutroniques est notée dans la fig. 6.

Ces deux parcelles sont représentatives du milieu régional composé de casiers aménagés par assainissement- drainage et irrigation.

Ils ont été gagnés depuis quelques années sur d'anciens marécages bordant les étangs littoraux (ici étang de l'Or ou de Mauguio). Autrefois, ces terrains étaient en effet occupés par des marais incultes et par de maigres pelouses halophiles où paissaient chevaux et taureaux camarguais.



Bilan hydrique - Diagramme E.T.P. - Précipitations
(Années 1951 à 1970)

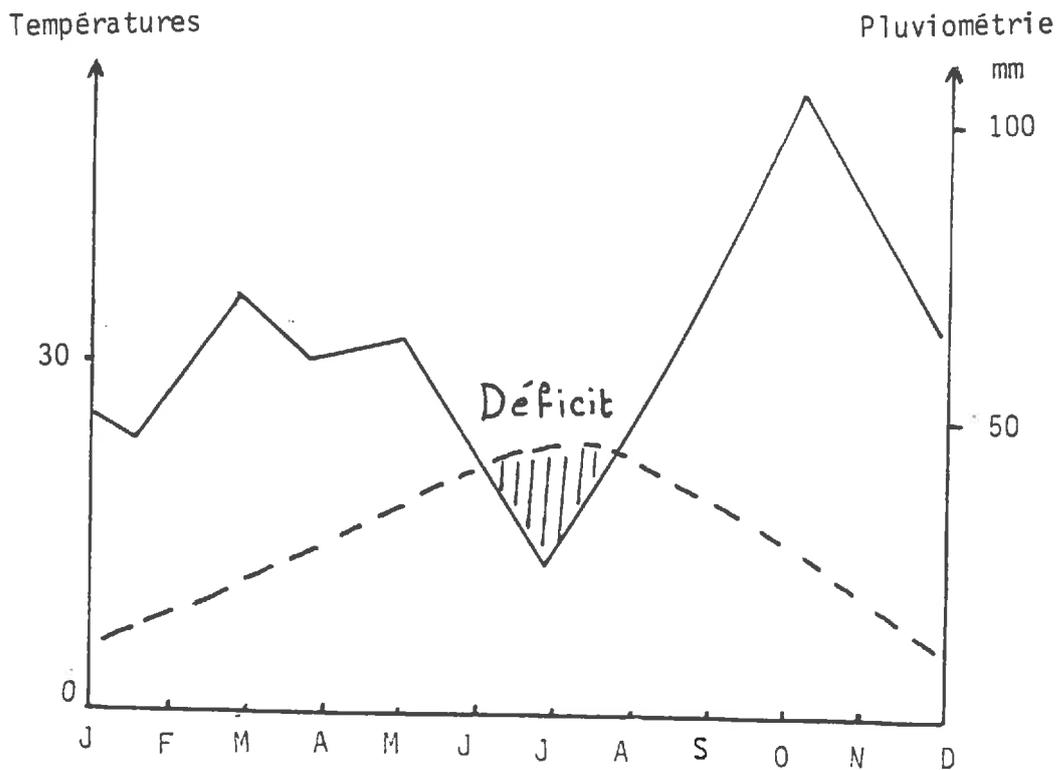


Diagramme ombrothermique

FIG. 3 : DONNEES CLIMATIQUES
Station de Montpellier - Fréjorgues
(années 1946 à 1960)

1.2. - Climat

(d'après P.F. VAQUIE et PH. LAGACHERIE, 1982).

Le climat régional est de type méditerranéen tempéré ; il est fortement influencé par la proximité de la mer Méditerranée (fig. 3).

1.2.1. - Températures

A Montpellier Fréjorgues, la moyenne annuelle des températures est de 13°8. Les hivers sont doux (la température moyenne des minima du mois le plus froid est supérieure à 0°C) et les étés sont très chauds. Les variations de la température au sein des zones littorales de la région de Montpellier sont très peu marquées et inférieures à 1°C.

1.2.2. - Précipitations

La hauteur moyenne annuelle des précipitations est voisine de 700 mm. Toutefois, les variations dans le temps et dans l'espace sont importantes.

Ainsi les pluies tombent surtout en automne et à l'entrée de l'hiver, un peu au printemps. Elles revêtent souvent un caractère orageux (ex : 35,2 mm en un jour à la dernière décade de novembre 1980 ; 56,4 mm en un jour durant la même période en 1981). L'augmentation des précipitations est très sensible de la mer vers le Nord Ouest.

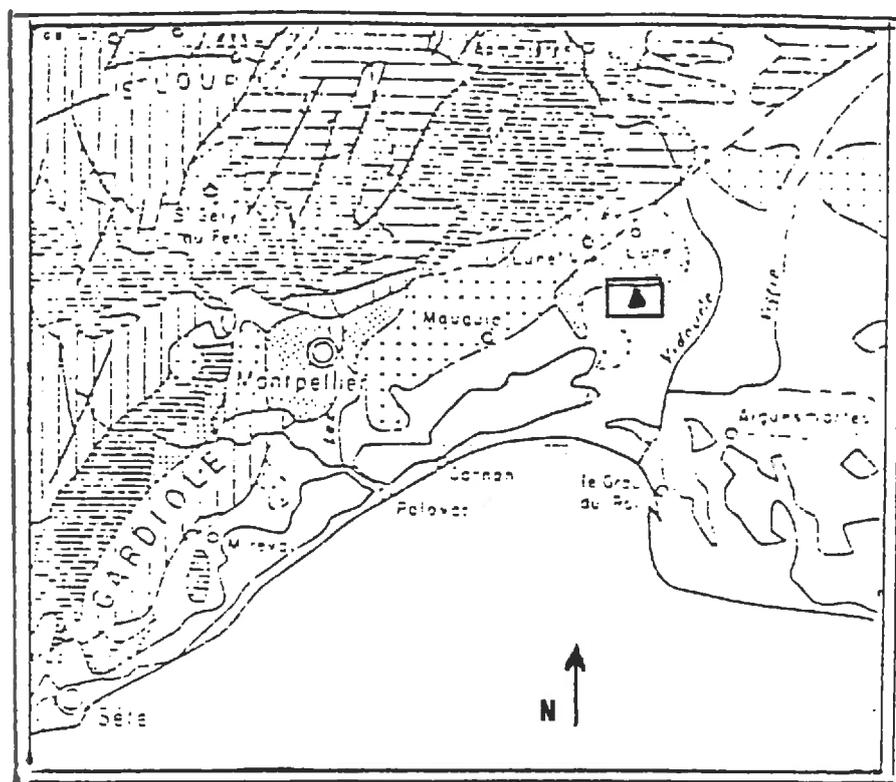
1.2.3. - Vents

La région de Montpellier est soumise aux vents secs et froids du Nord et Nord Ouest en hiver (Mistral), aux vents doux et humides d'Est et du Sud Est (Marin), fréquents en été.

1.2.4. - Ensoleillement et évapotranspiration potentielle

L'ensoleillement est élevé. Au vu du diagramme ombrothermique (fig. 3), il apparaît une période de sécheresse estivale de 3 mois.

FIG. 4 : CARTE GEOLOGIQUE REGIONALE (EXTRAIT)



Légende :

-  Quaternaire Villafranchien
-  Tertiaire Astien-Plaisancien
-  Crétacé
-  Jurassique
-  Les Palus Nord

Echelle: 0 5 10 15 20 km



D'autre part, la comparaison des courbes d'évapotranspiration potentielle et de pluviométrie met en évidence des périodes de déficit hydrique de l'ordre de 5 mois, avec un maximum en juillet (140 mm). Les valeurs d'excès d'eau sont relativement faibles (70 mm à Montpellier au début de l'hiver).

Ces conditions climatiques justifient l'irrigation pour l'alimentation en eau des plantes pendant la période estivale et l'assainissement-drainage pour l'évacuation des eaux de ruissellement provoquées par les pluies violentes et pour le lessivage des sels.

1.3. - Géologie (fig. 4)

Les terrains concernés par notre étude correspondent à des dépôts palustres du Quaternaire récent. Ceux-ci sont caractérisés par une texture fine et par des horizons très humifères ou tourbeux (roseaux, phragmites) en dessous. Les couches profondes sont parfois sableuses avec des niveaux coquilliers (anciens cordons littoraux). Ces dépôts palustres sont plaqués sur des matériaux issus de la molasse d'âge Astien, plus ou moins remaniée au Quaternaire ancien.

Au Nord et à l'Ouest, ces matériaux argileux et salés sont à leur tour recouverts par les alluvions fluviales du Vidourle.

1.4. - Le sol

Les parcelles étudiées ont fait l'objet en 1982 d'une cartographie détaillée (S. CONVENTI) qui a révélé une relative homogénéité au plan pédologique. Seule la profondeur d'apparition de l'horizon tourbescent enfoui varie du Sud (70 cm) vers le Nord (100 cm) de la parcelle.

Le sol est représentatif des sols lourds à nappe salée régionaux. Ces derniers sont caractérisés par une texture très argileuse (50 à 75 % d'argile), une structure prismatique grossière (fentes de retrait), une teneur en calcaire totale variant de 5 à 40 %. La salinité est importante

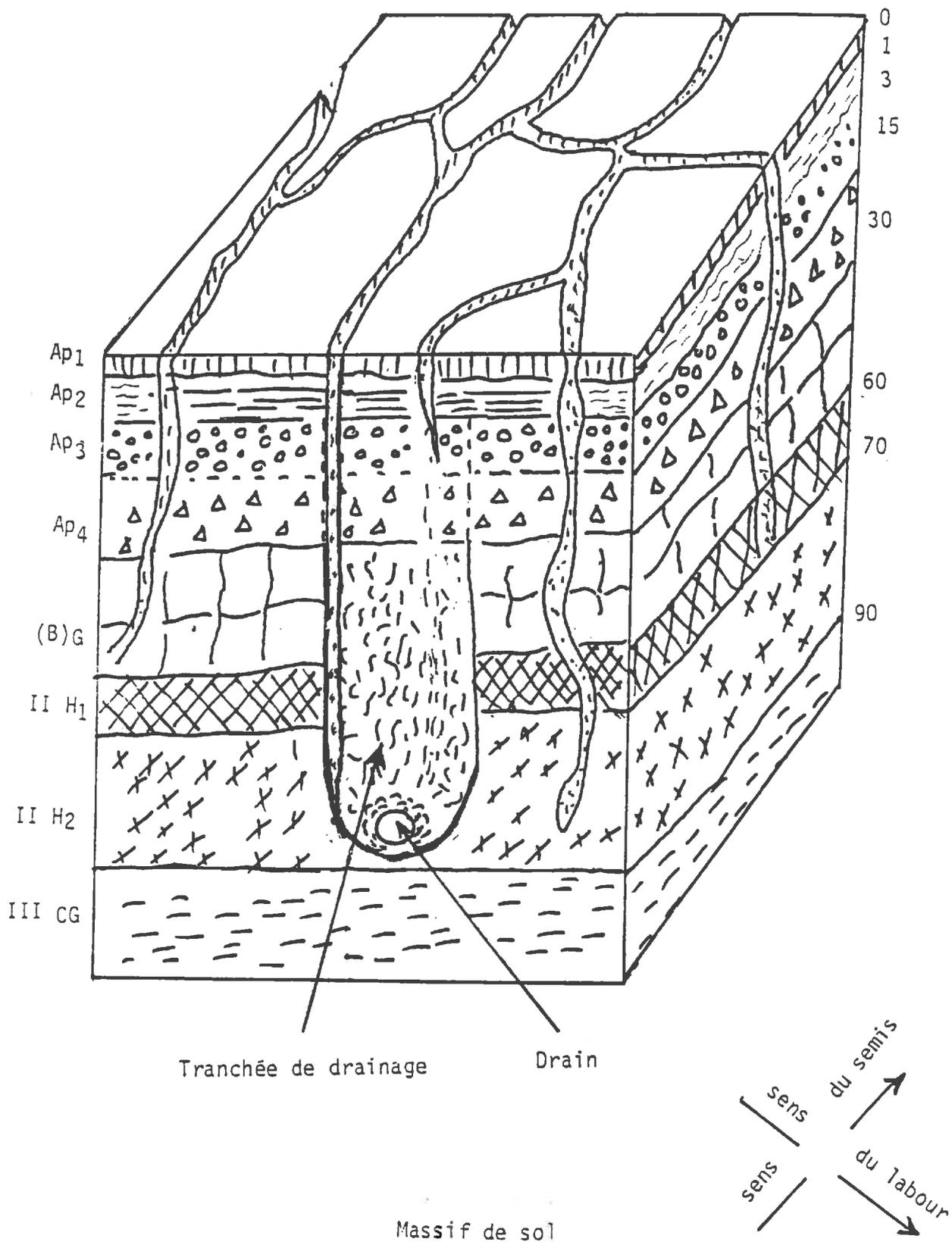


FIG. 5 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROFIL DU SOL
ET D'UNE TRANCHEE DU DRAINAGE

ANNEXE 1 : DESCRIPTION DETAILLEE DU PROFIL (S. CONVENTI - 1982)

SITUATION : Marsillargues - 34 - Les Palus Nord
ROCHE MERE : dépôts lagunaires
TOPOGRAPHIE : plane
VEGETATION : blé dur
DRAINAGE : posé en 1982, drain annelé 50 mm enrobage coco. Profondeur
du drain : 85 cm en moyenne.

- Ap1 0-1 cm : Couleur gris sombre en sec (2,5 Y 7/2) ; texture argileuse ; structure polyédrique avec sur-structure prismatique grossière (fentes de retrait) ; compact en sec en surface, foisonnement en petits agrégats anguleux à la suite de petites pluies ; (reprise en masse lors de pluies dépassant 20 mm environ).
- Ap2 1-3 cm : Idem précédent mais avec une structure très fine de type polyédrique toujours apparente, même après de fortes pluies.
- Ap3 10-15 cm : Couleur très foncée (2,5 Y 7,2) ; texture argileuse ; sur-structure prismatique grossière, structure polyédrique sub-anguleuse grossière (mottes provenant du Labour) ; très compact ; forte porosité structurale ; activité biologique importante ; racines très nombreuses ; limite nette, horizontale (semelle de labour).
- (B)g 30-60 cm : Couleur gris bleuté (10 YR 6/2), avec trainées ocre rouille très contrastées, plus diffuses dans la masse, de formes irrégulières ; texture argileuse ; horizon très compact, peu poreux dans la masse ; structure prismatique grossière avec fissures verticales ouvertes de 1 à 3 cm, tapissées d'un chevelu racinaire dense. A la base, au contact avec l'horizon sous-jacent, revêtement ferrugineux avec taches brunes (10 YR 5/1) et taches rouille (5 YR 5/8).
- II H1 60-70 cm : Tourbe altérée noire (10 YR 4/1), structure nuciforme peu nette avec une sur-structure prismatique ; présence de noyaux très durs (état sec) ; larges fentes de retrait avec revêtements ferrugineux.
- II H2 70-90 cm : Tourbe brune non altérée ; structure lamellaire, formée par enchevêtrement de tiges de phragmites.
- III CGr 90 cm et plus : Couleur gris clair (10 YR 7/1) avec des trainées gris bleuté associées à des débris végétaux ; texture limono-sableuse ; odeur putride (H₂S).

Prof. cm	GRANULOMETRIE					M.O.	pH	CALCAIRE		CATIONS ECIANG. me/100g					T	Conduc. électr. ms/cm ²
	SG	SF	LG	LF	A			Tot.	Act.	Ca	Mg	K	Na	S		
0-30	1,2	2,6	13,6	34,2	46,6	2,1	8,0	19,5	8,0	40,6	6,70	0,956	0,77	49,026	23,9	2,52
30-60	1,1	1,9	9,2	29,0	58,8		8,4	8,9	1,0	39,1	10,30	1,101	0,72	51,221	28,3	2,38
60-70 argile noire	0,7	0,8	13,3	19,1	65,4	0,6	7,2	1,1	0	35,2	8,00	0,872	7,07	51,142	23,3	17,69
70-90 niveau organique						42,5										Zone d'influence de la nappe
90-120	5,3	16,2	22,8	34,6	19,9	1,2	8,3	26,4	10,5	27,1	2,55	0,409	3,48	33,539	6,1	21,86

TABLEAU 1 : Résultats analytiques

avant aménagement.

Au plan morphologique (fig. 5), le profil est marqué par la présence d'un horizon très humifère ou tourbeux à moyenne profondeur (60-90 cm). La description détaillée du profil type figure en annexe 1.

1.5. - Description des deux parcelles étudiées

Nous avons réalisé nos études sur deux parcelles planes, l'une est drainée, l'autre ne l'est pas encore. La première comprend un réseau de tuyaux enterrés posés en juin 1982 à une profondeur moyenne de 85 cm avec un écartement moyen de 14 m, à l'aide d'une draineuse-trancheuse.

Les deux parcelles sont séparées par un fossé collecteur de 3 mètres de largeur au sommet et de 2 m de profondeur. Elles sont entourées par des fossés secondaires (1,5 m de largeur en haut et 1,0 m de profondeur) se jetant dans les grands fossés collecteurs.

II - PROPRIETES MECANIQUES DES SOLS - METHODES D'ETUDES ET RESULTATS

Deux méthodes principales ont été utilisées pour caractériser les sols des parcelles étudiées au plan physique : l'essai Proctor d'une part, les limites d'Atterberg d'autre part.

Avant de les décrire succinctement, nous allons présenter les conditions de prélèvement des échantillons.

2.1. - Origine des échantillons

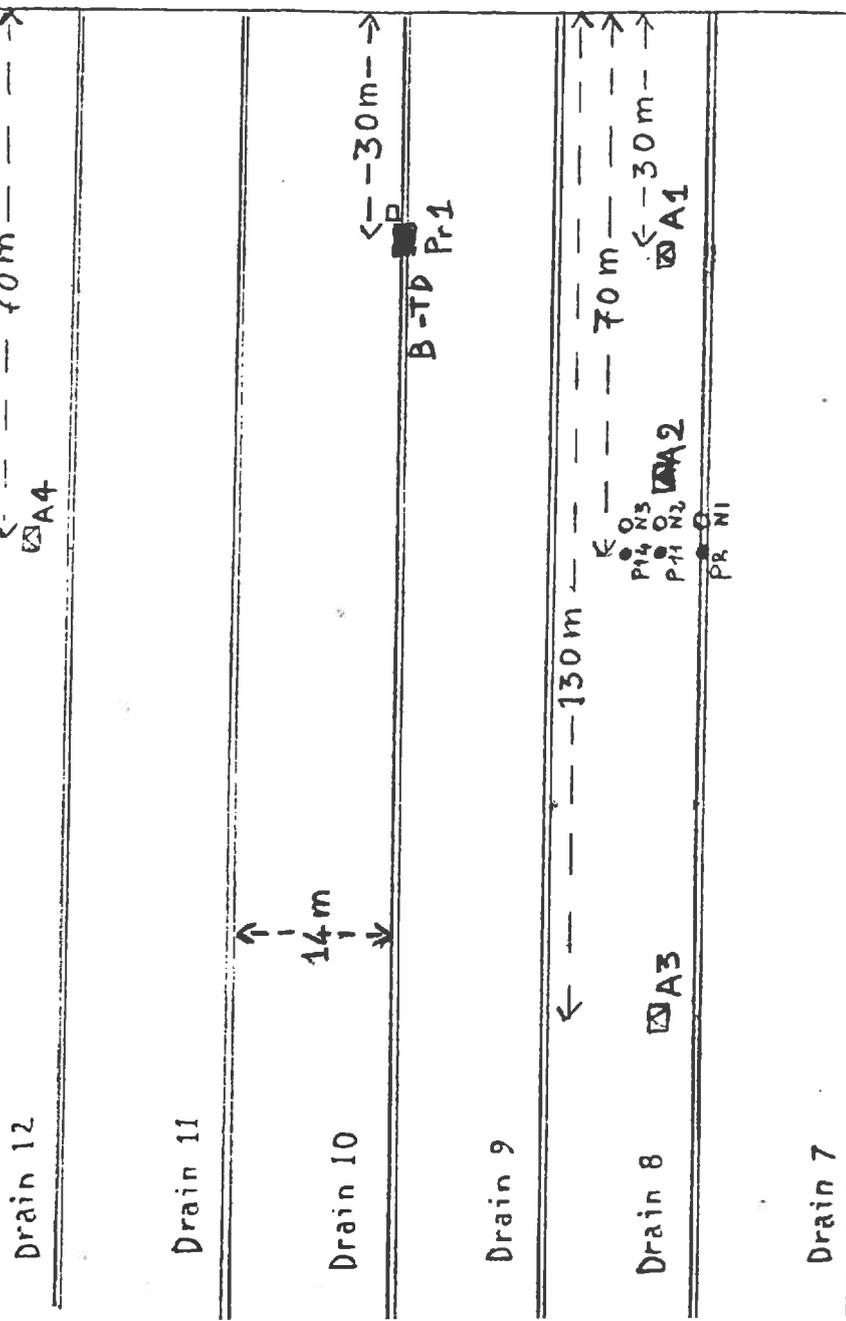
2.1.1. - Objectif des prélèvements

Les divers échantillons prélevés en vue des mesures l'ont été dans les buts suivants :

- déterminer l'évolution verticale des caractéristiques mécaniques au sein d'un même profil ;

PARCELLE NON DRAINEE

PARCELLE DRAINEE (DRAIN NU $\phi 65$ mm, PENTE 3‰)



VERGER DE POMMIERS

- N3 O : Tube neutron
- B-TD : Prélèvement pour test Proctor
- A6 Δ : Prélèvement pour limites d'Atterberg (surface)
- A1 □ : Prélèvement pour test Proctor et limites d'Atterberg de surface
- A2 ▣ : Prélèvement pour test Proctor et limites d'Atterberg de surface et de profondeur
- Pr. ■ : Profil nédonométrique
- P8 ○ : piézomètre
- A : horizon superficiel 0-30 cm
- B : horizon (B) 30-60 cm
- D : champ drainé
- T : tranchée de drainage
- ND : champ non drainé
- A2-A5 : profils prélevés en 1984

Pr. ■ : Profil nédonométrique

- voir leur évolution éventuelle après drainage ;
- étudier la variabilité spatiale éventuelle de ces caractéristiques à l'échelle des parcelles ;
- comparer les valeurs obtenues dans une tranchée de drainage et dans le sol non perturbé.

2.1.2. - Localisation des échantillons

Compte tenu des objectifs ci-dessus, huit échantillons ont été prélevés au total pour effectuer le test Proctor. Ainsi (fig. 6) :

- Dans la parcelle drainée :
 - . drain n° 8, à 3,5 m de la tranchée de drainage, prélèvement entre 0 et 30 cm, en trois endroits : à 30 m (A_1D), à 70 m (A_2D) et à 130 m (A_3D) du fossé collecteur.
 - . drain n° 10 : dans un profil ouvert sur le drain à 30 m du fossé collecteur ; prélèvement entre 30 cm et 60 cm. (horizon (B)) et de la terre de la tranchée (TD).
 - . drain n° 12 : à 3,5 m de la tranchée du drainage, prélèvement entre 0 et 30 cm, à 70 mètre du fossé collecteur (A_4D).

- Dans la parcelle non drainée :

deux prélèvements ont été faits ; dans l'horizon A_p entre 0 et 30 cm (A_5ND) et dans l'horizon (B) entre 30 et 60 cm (B_5ND). Un nouveau prélèvement A ND a été réalisé en mars 1984.

Nous avons aussi prélevé 34 échantillons pour effectuer l'essai des limites d'Atterberg ; soit :

- 3 échantillons (profondeurs 0-1 cm, 1-3 cm et 10-15 cm) dans chacun des 5 sites situés dans le champ drainé et le champ non drainé (fig. 6).
- 8 échantillons par sondage (profondeurs 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 et 80 cm) dans la parcelle drainée et dans la parcelle non drainée.

- et 3 échantillons dans le verger de pommiers se trouvant en bordure de la parcelle drainée (profondeurs de 0-1 cm ; 1-3 cm et 10-15 cm).

2.2. - Etude de la compaction par le test Proctor

2.2.1. - Le principe de la méthode

L'essai Proctor a pour but de permettre d'isoler et d'étudier en laboratoire l'influence de deux facteurs sur la densité apparente :

- 1 - l'énergie de compactage ;
- 2 - la teneur en eau.

Il s'effectue dans un moule cylindrique métallique, de dimensions normalisées. Le sol à étudier y est placé avec une teneur en eau déterminée, puis compacté avec une énergie fixée. Cette énergie est fournie par une dame de masse invariable, tombant toujours de la même hauteur. Chaque coup de dame correspond donc à une énergie élémentaire connue. On détermine ensuite la densité sèche apparente et l'humidité de l'échantillon par séchage et pesée.

Cette manipulation est faite sur différentes prises du même échantillon, en faisant varier l'humidité ; la courbe $D = f(W)$ peut ainsi être tracée.

2.2.2. - Justification de la méthode

D'après MANIERE (1973), STENGEL et FAURE (1978) et DUCREUX (1981),

le test Proctor peut être considéré comme un moyen efficace de caractériser un matériau en vue de prévoir son comportement in situ.

En effet, les courbes $D = f(W)$ obtenues par mesure sur un sol en place après roulage, ont une allure semblable à celle d'une courbe Proctor obtenue avec une énergie inférieure à celle apportée dans le test lui-même. Ceci explique le choix de la méthode Proctor

pour caractériser la sensibilité d'un échantillon du sol à la compaction.

2.2.3. - Protocole et matériel utilisés

Nous avons suivi le mode opératoire du laboratoire central des Ponts et Chaussées (essai Proctor-Dunod, 1970).

Nous avons effectué le test avec le moule et la dame G.E.R.D.A.T. pour limiter l'importance des prélèvements car tous nos échantillons, de texture argilo-limoneuse, ne contiennent pas de cailloux. Ce moule Proctor Gerdat (300 cm^3) est donc préféré au moule Proctor standard beaucoup plus gros (949 cm^3).

En effet, les quantités de sol utilisées pour faire une série de mesures avec 10 prises sont les suivantes, selon le type de moule :

(10 prises) x volume du moule Proctor x densité apparente moyenne du sol

$10 \times 300 \text{ cm}^3 \times 1,5 = 4,5 \text{ kg}$ avec le moule Proctor GERDAT et
 $10 \times 949 \text{ cm}^3 \times 1,5 = 14 \text{ kg}$ avec le moule Proctor standard.

Nous réduisons donc les poids de terre à utiliser de 14 kg à 4,5 kg.

2.2.4. - Préparation du matériau soumis à l'essai

Les matériaux à étudier ont été desséchés à l'air. Nous avons broyé, malaxé et tamisé ensuite les matériaux. Le broyage et le tamisage des échantillons ont été effectués à l'aide d'un broyeur électrique à tamis cylindrique de maille de 5 mm, contenant des rouleaux métalliques pour écraser les mottes. Cet appareil a réduit la durée et simplifié la préparation des échantillons.

Tous les matériaux ont été tamisés à 5 mm.

Chaque essai nécessite la préparation de 10 échantillons amenés ensuite à une teneur en eau définie. Ainsi, le premier a amené à une teneur en eau égale, à celle obtenue après le séchage à l'air. Pour les compactages suivants, les matériaux ont été humidifiés par addition progressive d'une quantité d'eau, (calculée) de 15, 30, 45, 60, 90, 105, 120, 135, 150 ml (ils sont malaxés avec 15 ml d'eau pour le deuxième échantillon, avec 30 ml d'eau pour le troisième, etc...). Pour l'échantillon A₅ND prélevé en 1984, le test a porté sur 23 prises au lieu de 10.

Pour les sols argileux cette humidification a été faite quelques heures avant le compactage, le matériau étant ensuite conservé en atmosphère humide.

2.2.5. - Réalisation des opérations

Les caractéristiques de l'essai Proctor sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

CARACTERISTIQUES DE L'ESSAI		PROCTOR GERDAT
MOULE	hauteur	7,8 cm
	diamètre	7,0 cm
	volume	300 cm ³
DAME	diamètre du mouton	3,9 cm
	masse du mouton	1064 g
	hauteur de chute	19,9 cm
	énergie d'un coup de dame	2,08 J
	$\frac{\text{Diamètre du mouton}}{\text{Diamètre du moule}}$	0,56

Tableau n°1 : DIMENSIONS DU MOULE ET DE LA DAME UTILISES DANS L'ESSAI PROCTOR G.E.R.D.A.T.

Le compactage a été effectué de la manière suivante :

Le moule est rempli en 3 couches successives avec à chaque fois 28 coups de dame.



Moule Proctor "Gerdat"



Dame Proctor Gerdat

Nous avons effectué ce compactage à la même énergie par unité de volume. Celle-ci se calcule comme suit :

$$\text{Energie totale} = \frac{E \times N \times n}{V}$$

E = énergie apportée par 1 coup de dame,

N = nombre de coups de dame par couche de l'éprouvette,

n = nombre de couches de l'éprouvette,

V = volume de l'éprouvette.

Par référence au tableau ci-dessus, on trouve que cette énergie est égale à :

$$\frac{2,08 \times 28 \times 3}{300} = 0,582 \text{ J/cm}^3$$

3 couches
28 coups par couche
Coup de dame = 2,08 J

Nous avons donc choisi de donner 28 coups par couche et d'appliquer une seule énergie sur tous nos échantillons, afin d'obtenir des résultats comparables.

2.2.6. - Rappel sur les courbes Proctor

Il est admis que lorsqu'un matériau est compacté avec une énergie constante et qu'il est porté à des humidités croissantes depuis l'état sec jusqu'à l'état saturé, son comportement passe généralement par quatre

phases différentes.

En exagérant les phase 1 et 2, pour mieux voir le phénomène, on trouve classiquement le tracé de courbe suivant (DEMDAMI, 1982).

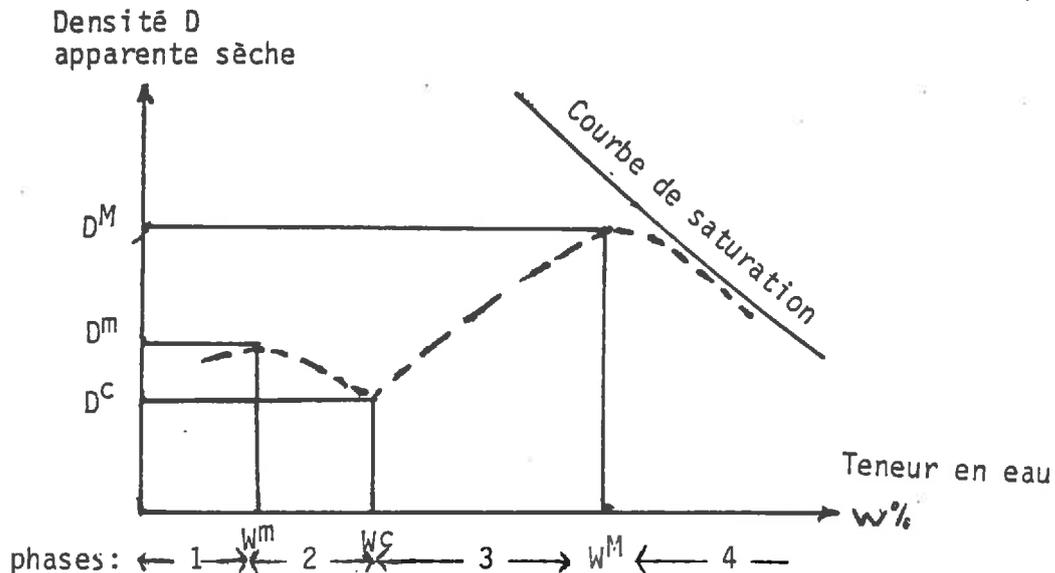


Fig. 7 : COURBE PROCTOR THEORIQUE

où :

D^M = est la densité Maximale,

W^M = est la teneur en eau de D^M ,

D^m = est la densité maximale de la première partie de la courbe Proctor

W^m = est la teneur en eau de D^m ,

D^c et W^c (eau critique) = correspondent respectivement à la densité et à la teneur en eau du seuil de sensibilité au compactage.

W_s = hyperbole de saturation, $W_s = \frac{1}{D} - \frac{1}{D_r}$

D_r = densité réelle des grains, $D_r = 2,56$,

D = densité apparente sèche.

Phase 1 : aux faibles teneurs en eau (jusqu'à W^m) l'accroissement de la compacité engendré par le compactage est dû en fait à un écrasement des éléments structuraux dont la fragilité augmente avec la teneur en eau.

Phase 2 : Au delà de la limite de retrait des agrégats, le gonflement des particules argileuses libérées de la structure des agrégats, commence à se manifester ; il en résulte une diminution de la

compacité par l'augmentation de la pression de gonflement des phyllites. Celle-ci dépend non seulement du type de matériau présent, mais aussi de la nature des cations et des contraintes subies par le matériau.

Ce phénomène est d'autant plus sensible que la teneur en argile gonflante est importante.

Phase 3 : A des teneurs en eau supérieures à W^C , l'angle de frottement interne de l'argile est inférieur à sa valeur critique, l'argile entre alors en plasticité et permet un déplacement mutuel des constituants incompressibles du sol avec de moins en moins de résistance.

L'argile joue alors un rôle de lubrifiant pour les autres éléments du sol, en permettant des glissements entre les particules et grains solides. Cette lubrification dont l'action est opposée à celle du gonflement, l'emporte très nettement sur cette dernière d'où l'augmentation rapide de la densité.

Phase 4 : Quand l'argile atteint sa limite de liquidité, le matériau est généralement saturé, excepté quand le pourcentage de l'argile est faible. Au delà de cette limite, le matériau est incompressible ; la courbe Proctor tend asymptotiquement vers l'hyperbole de saturation d'équation :

$$W_s = \frac{1}{D} - \frac{1}{D_r}$$

On voit donc le rôle important joué par la fraction argileuse dans les phénomènes de compaction.

2.2.7. - Résultats et commentaires des courbes Proctor

2.2.7.1. - Tracé des courbes

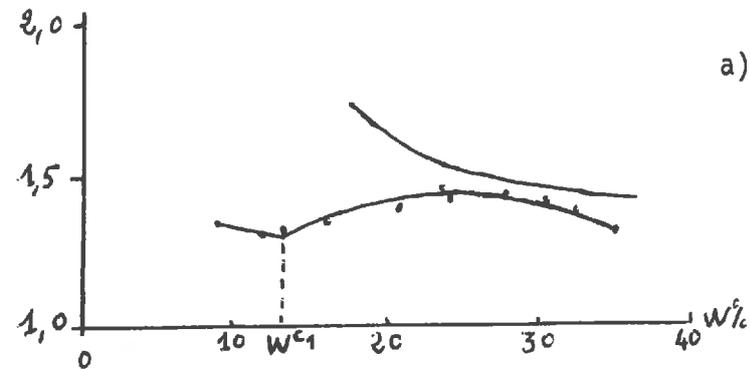
A partir des résultats expérimentaux de densité apparente et de teneur en eau le tracé de la courbe Proctor n'est pas toujours facile.

TABLEAU N°2 : RESULTATS DU TEST PROCTOR, DU RAPPORT $\frac{w^c}{A}$ ET DE LA SENSIBILITE AU COMPACTAGE OBTENUS POUR LES ECHANTILLONS ETUDIES

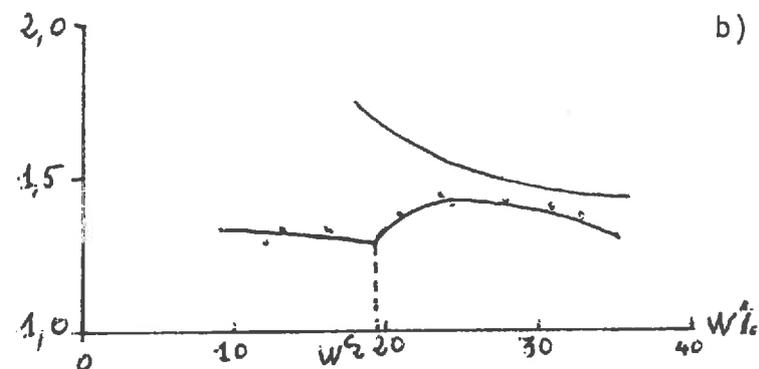
NATURE ECHAN-TILLON	PROFONDEUR EN CM	DENSITE CRITIQ. ET HUMIDITE CRITIQUE		DENSITE MAXIMUM ET HUMIDITE OPTIMUM PROCTOR		VARIATION entre DM et DC EN FONCTION W %		TENEUR en EN ARGILE %	TENEUR en MATIERES ORGANIQUES %	TENEUR en CaCO ₃ %	RAPPORT $\frac{w^c}{A}$	SENSIBIL. AU COM-PACTAGE
		DC	w ^c	DM	w ^M	D ^M - DC	w ^M -w ^c					
A ₁ D	0 - 30	1,38	17,5	1,50	26,3	0,12	8,8	48,1	3,81	37,8	0,36	0,014
A ₂ D	0 - 30	1,36	19,8	1,46	26,7	0,10	6,9	52,9	3,52	35,3	0,37	0,014
A ₃ D	0 - 30	1,38	20,8	1,45	27,5	0,07	6,7	51,5	3,62	37,4	0,41	0,010
A ₄ D	0 - 30	1,42	22,4	1,48	27,2	0,06	4,8	50,5	3,16	39,0	0,44	0,013
A ₅ ND	0 - 30	1,37	20,4	1,46	28,2	0,09	7,8	50,5	3,81	37,9	0,40	0,012
BPD	30 - 60	1,31	22,6	1,40	29,7	0,09	7,1	58,6	2,47	26,9	0,39	0,013
B ₅ ND	30 - 60	1,36	22,4	1,44	29,6	0,08	7,2	65,5	2,21	25,2	0,34	0,011
TDD	30 - 60	1,27	23,0	1,34	31,7	0,07	8,7	55,4	5,12	29,0	0,42	0,008

DC et w^c : correspondent respectivement à la densité et à la teneur en eau du point de sensibilité au compactage.
 DM : est la densité maximale.
 w^M : est la teneur en eau de DM.

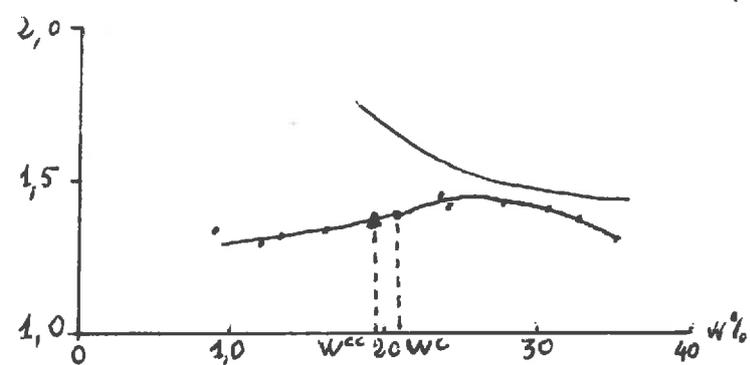
En effet, compte tenu d'une certaine dispersion des points de mesure, plusieurs interprétations peuvent être faites. L'exemple ci-dessous concernant le site A₃D en est l'illustration. Au moins trois tracés sont possibles en fonction de la situation retenue pour le point de passage entre les phases 2 et 3.



a) Le premier consiste à choisir comme point W^{c1} , un point très proche de la teneur en eau minimale obtenue expérimentalement.



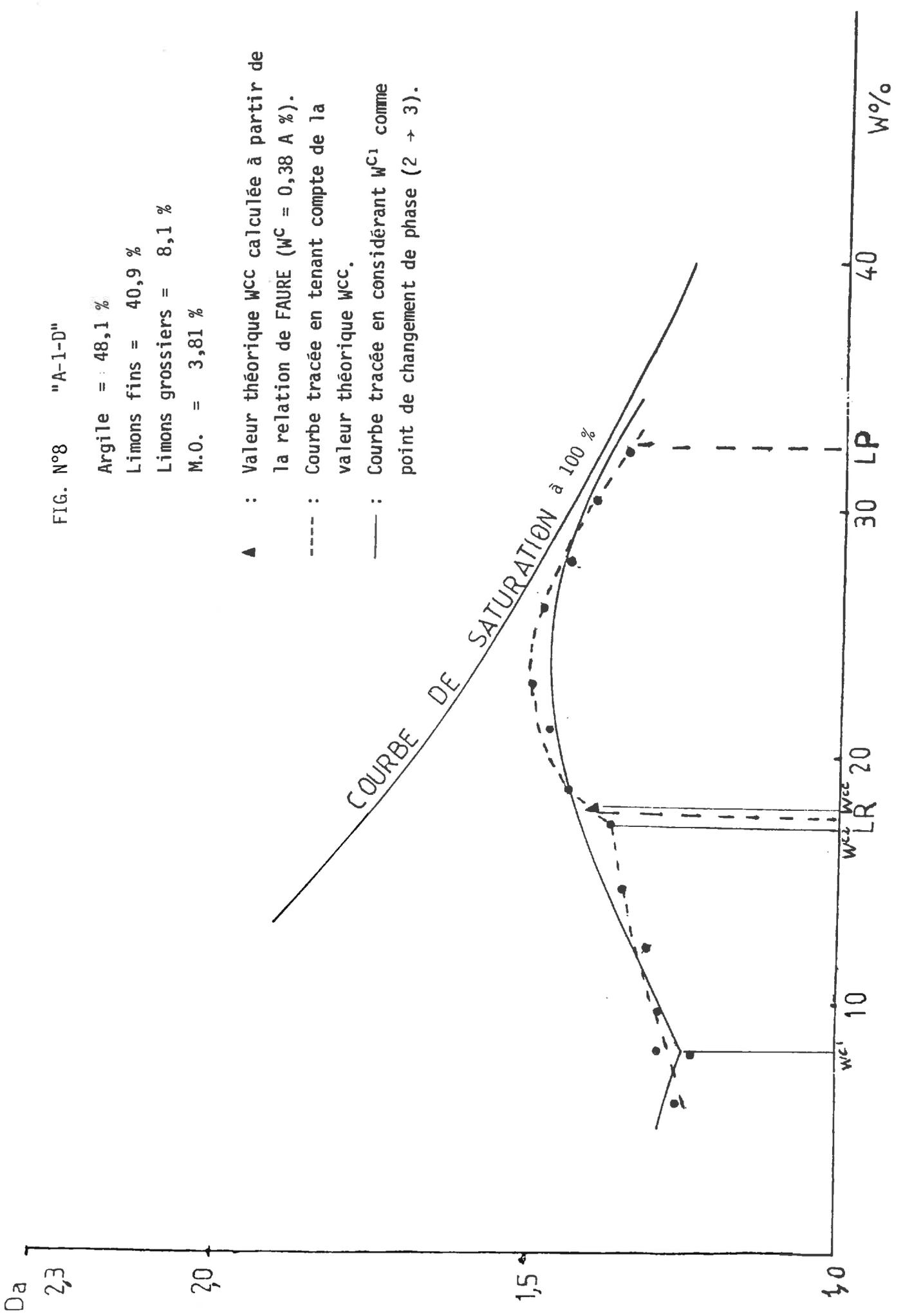
b) Le second tracé consiste à prendre comme valeur de sensibilité au compactage la teneur en eau W^{c2} correspondant à un changement net de la densité apparente ("lissage" plus important du tracé).



c) Le troisième tracé tient compte d'un point W^{cc} théorique calculé d'après la relation de Faure $\frac{Wc}{W^c} = 0,38$ (cf paragraphe 2273). Le point $^a W^c$ est alors généralement assez proche de W^{cc} (et de W^{c2}). C'est cette valeur qui a été retenue, avec les valeurs correspondantes de D^c , W^M , D^M .

Sur les courbes 8 à 15 les tracés correspondant aux interprétations a et c ont été reportés (trait plein pour tracé a et tireté pour tracé c) ; la valeur de W^{cc} a été également indiquée.

Sur un nouveau prélèvement effectué en A₅ND en mars 1984,



23 prises ont été compactées pour définir avec précision le point W_c et tester ainsi les modes de tracés exposés ci-dessus. La nouvelle courbe est reportée à la figure n°12.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau 2' ci-dessous :

Teneur pondérale en eau H	3,75	5,34	6,57	8,00	9,28	10,57	11,64	13,10	14,58	16,13	17,48
Densité apparente sèche	1,257	1,300	1,310	1,393	1,347	1,362	1,379	1,369	1,360	1,352	1,341

19,08	20,18	21,80	22,47	24,00		25,82	26,97	28,88	30,76	31,81	33,80	36,56
1,378	1,396	1,408	1,438	1,450		1,472	1,462	1,446	1,411	1,392	1,355	1,302

Tableau 2' : RESULTATS EXPERIMENTAUX DU TEST PROCTOR
SUR L'ECHANTILLON A₅ND

Les valeurs de D^C et W^C sont de 1,34 (contre 1,37) et 17,5 (contre 20,4), de D^M et W^M de 1,47 (contre 1,46) et de 25,8 (contre 28,2).

Ne sagissant pas exactement du même prélèvement, il est difficile de conclure catégoriquement. Néanmoins il apparait que la nouvelle valeur de W_c (17,5) est plus proche de W_{c1} retenue (20,4) que de celle correspondant à la teneur en eau minimale du premier test (10 % tracé a) ; elle est en tout cas assez proche également de la valeur théorique W^{CC} (19,2 %) calculée à partir de la relation de FAURE. Cette dernière appliquée aux chiffres réels du tableau 2' (avec $A' \% = 50,5$) aboutit à la valeur 0,35 (voir paragraphe 2.2.7.3.).

Le tableau 2 rassemble les valeurs caractéristiques de la courbe

FIG. N°9 "A-2-D"

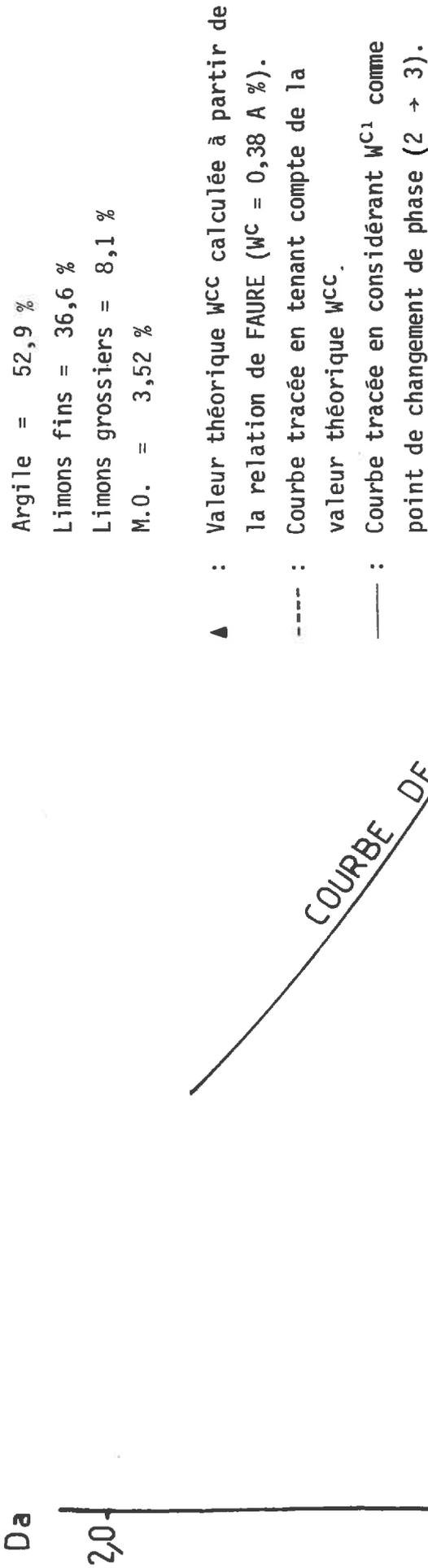


FIG. N°10 "A-3-D"

Argile = 51,5 %
 Limons fins = 36,8 %
 Limons grossiers = 9,2 %
 M.O. = 3,62 %

- ▲ : Valeur théorique W^{CC} calculée à partir de la relation de FAURE ($W^C = 0,38 A \%$).
- : Courbe tracée en tenant compte de la valeur théorique W^{CC} .
- : Courbe tracée en considérant W^{C1} comme point de changement de phase (2 → 3).

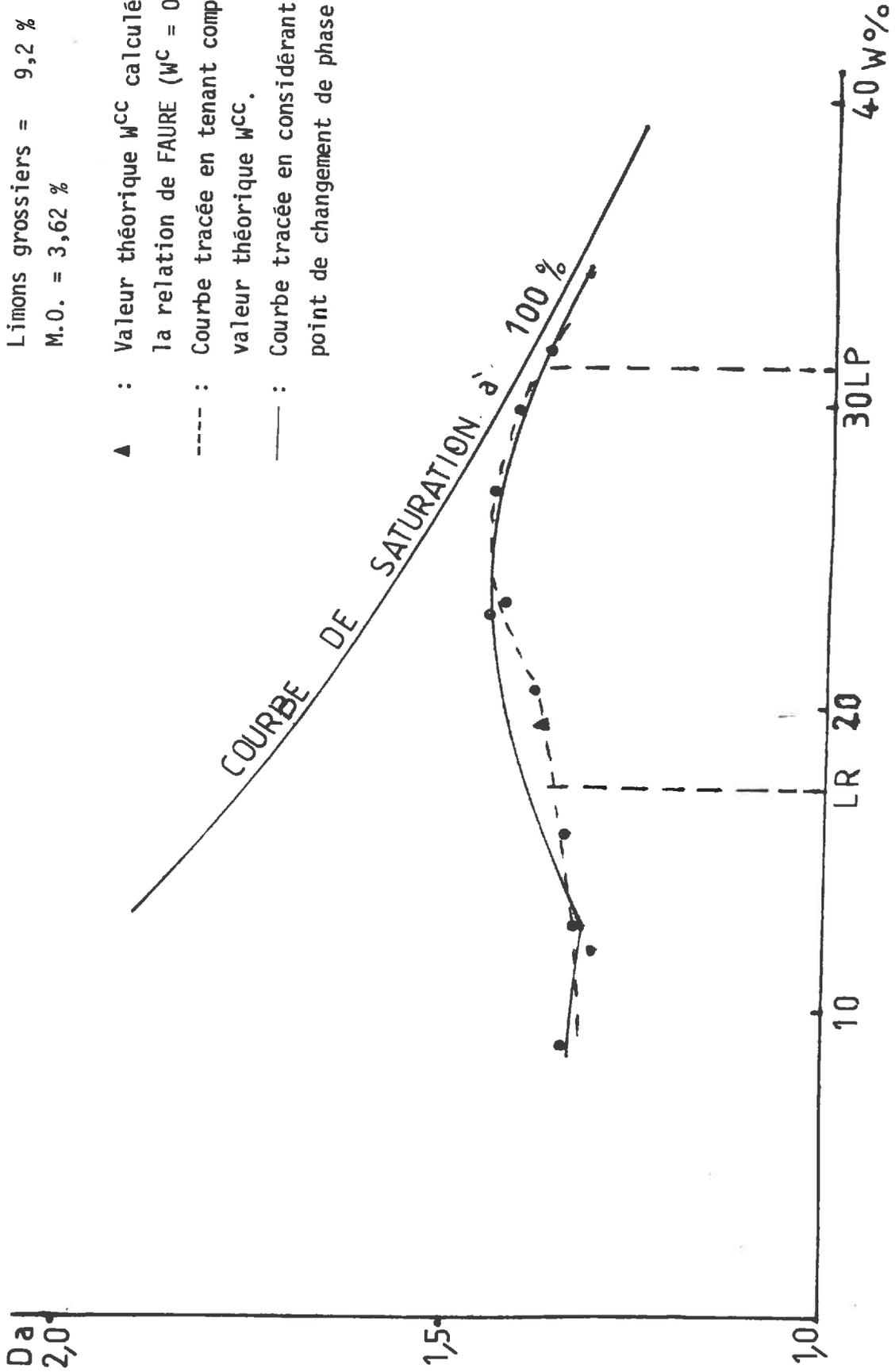


FIG. 11 "A-4-D"

Argile = 50,5 %

Limons fins = 36,6 %

Limons grossiers = 9,7 %

M.O. = 3,16 %

- ▲ : Valeur théorique W^{CC} calculée à partir de la relation de FAURE ($W^C = 0,38 A \%$).
- : Courbe tracée en tenant compte de la valeur théorique W^{CC} .
- : Courbe tracée en considérant W^{C1} comme point de changement de phase (2 → 3).

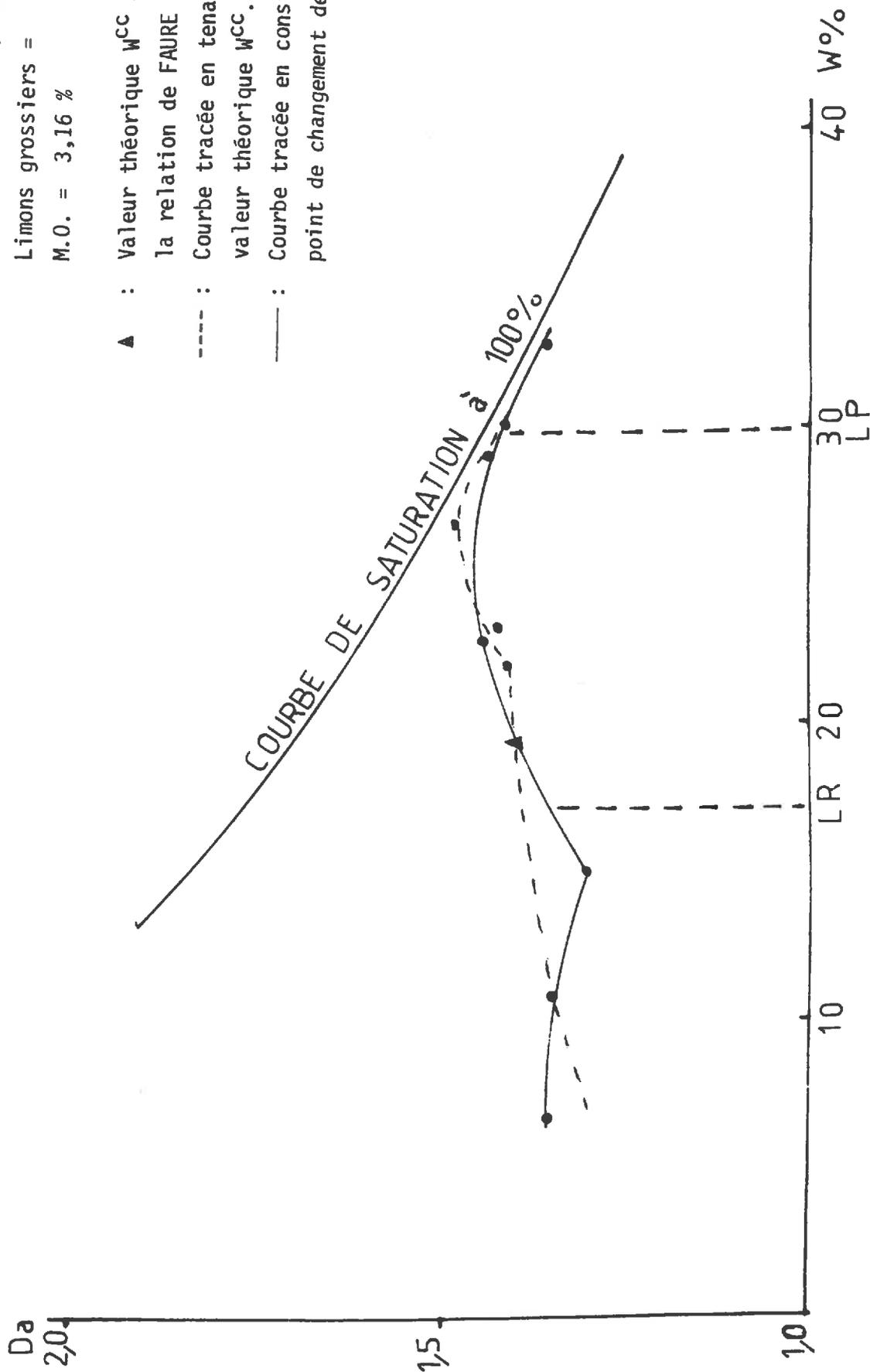


FIG. N°12 "A-5-ND"

Argile = 50,5 %
 Limons fins = 38,4 %
 Limons grossiers = 7,7 %
 M.O. = 3,8 %

- ▲ : Valeur théorique w^{CC} calculée à partir de la relation de FAURE ($w^C = 0,38 A \%$).
- : Courbe tracée en tenant compte de la valeur théorique w^{CC} .
- : Courbe tracée en considérant w^{C1} comme point de changement de phase (2 → 3).
- : mesures réalisées sur l'échantillon en 1984.

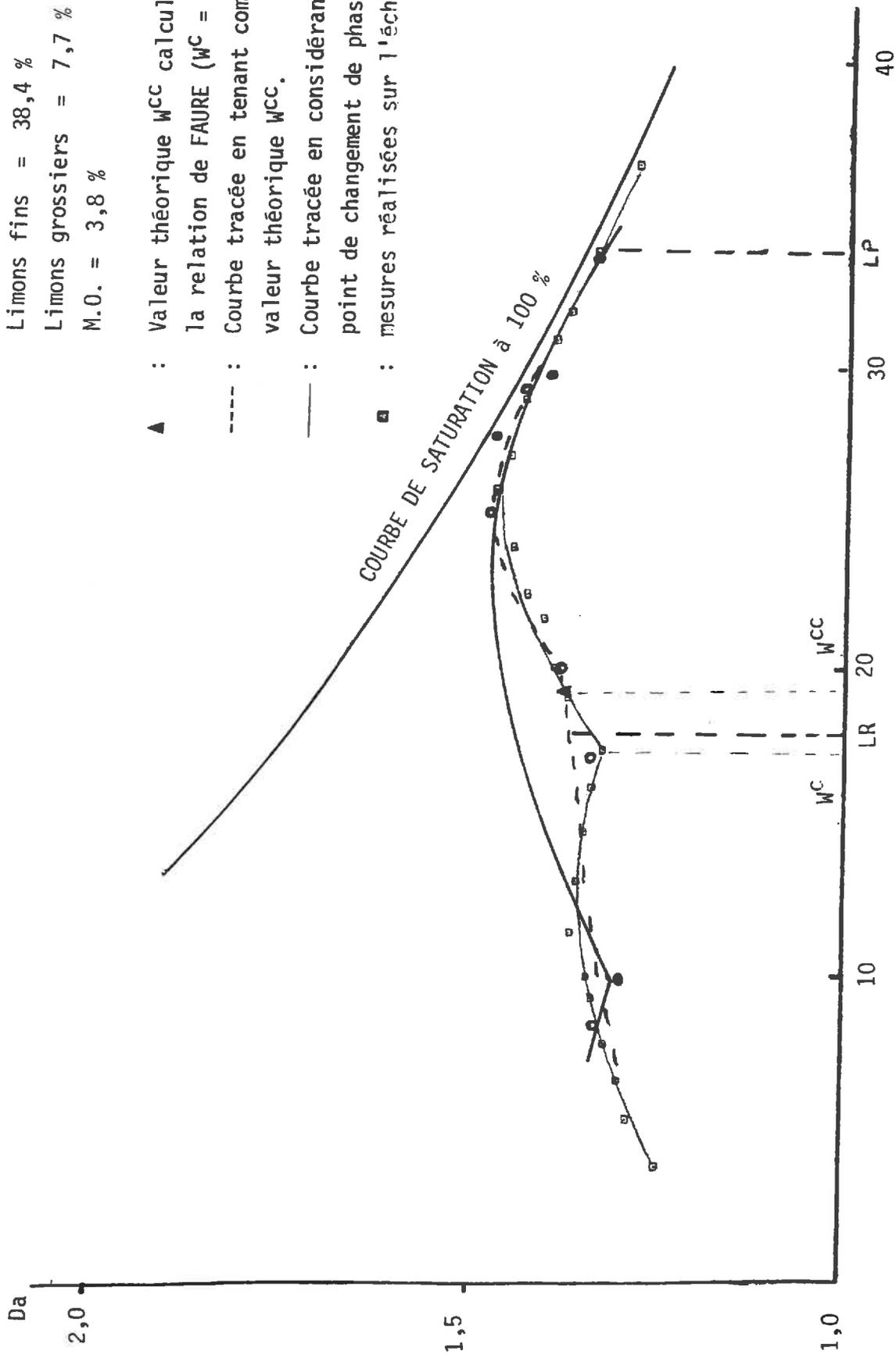


FIG. N°13 "B-P-D"

Argile = 58,6 %
 Limons fins = 33,9 %
 Limons grossiers = 5,4 %
 M.O. = 2,47 %

- ▲ : Valeur théorique W^{CC} calculée à partir de la relation de FAURE ($WC = 0,38 A \%$).
- : Courbe tracée en tenant compte de la valeur théorique W^{CC} .
- : Courbe tracée en considérant W^{C1} comme point de changement de phase (2 → 3).

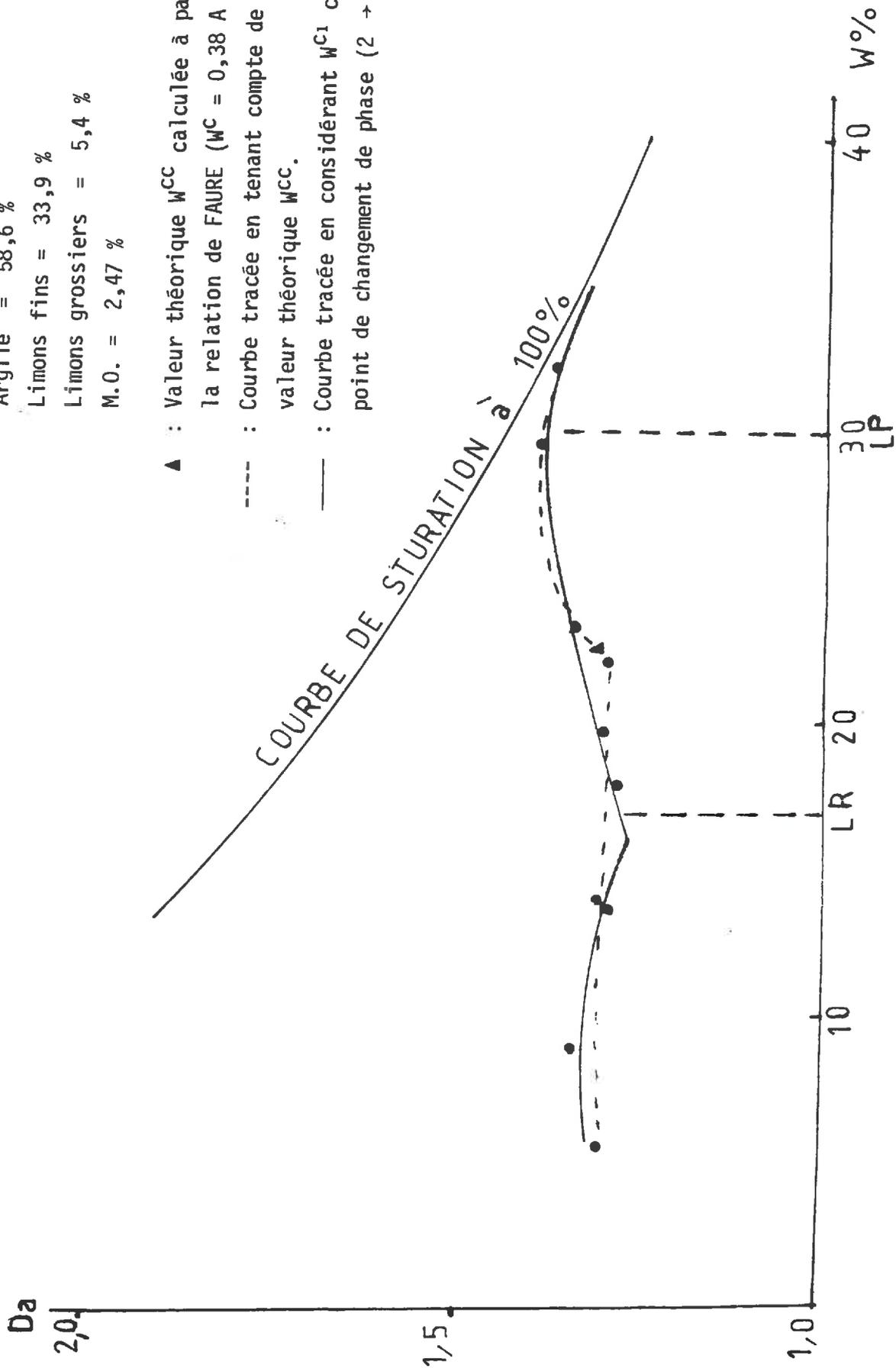


FIG. N°14 "B-5-ND"

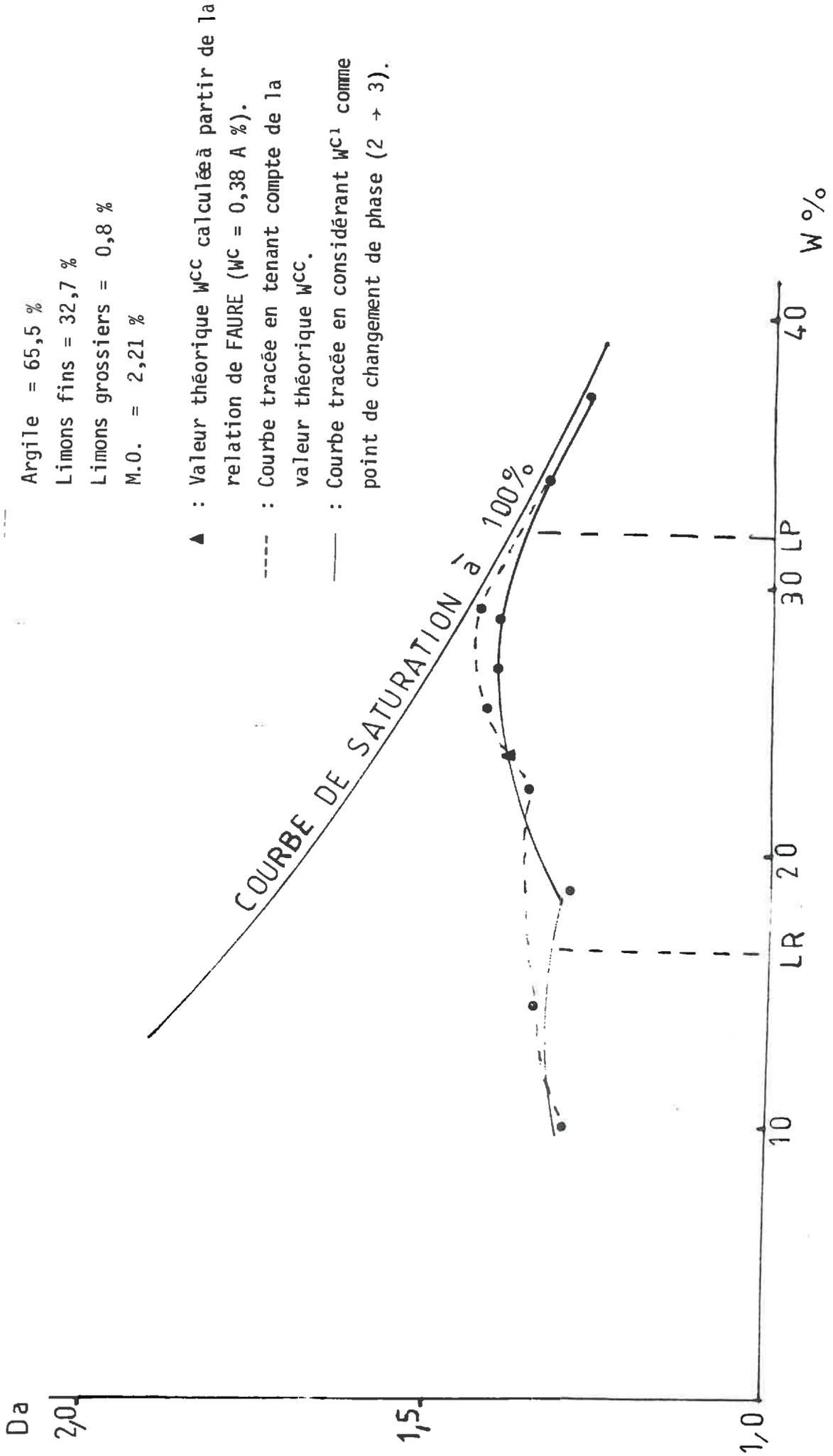


FIG. N°15 "T-D-D"

Argile = 55,4 %
 Limons fins = 34,6 %
 Limons grossiers = 7,9 %
 M.O. = 5,12 %

- ▲ : Valeur théorique W^{CC} calculée à partir de la relation de FAURE ($W^C = 0,38 A \%$).
- : Courbe tracée en tenant compte de la valeur théorique W^{CC} .
- : Courbe tracée en considérant W^{C1} comme point de changement de phase (2 → 3).

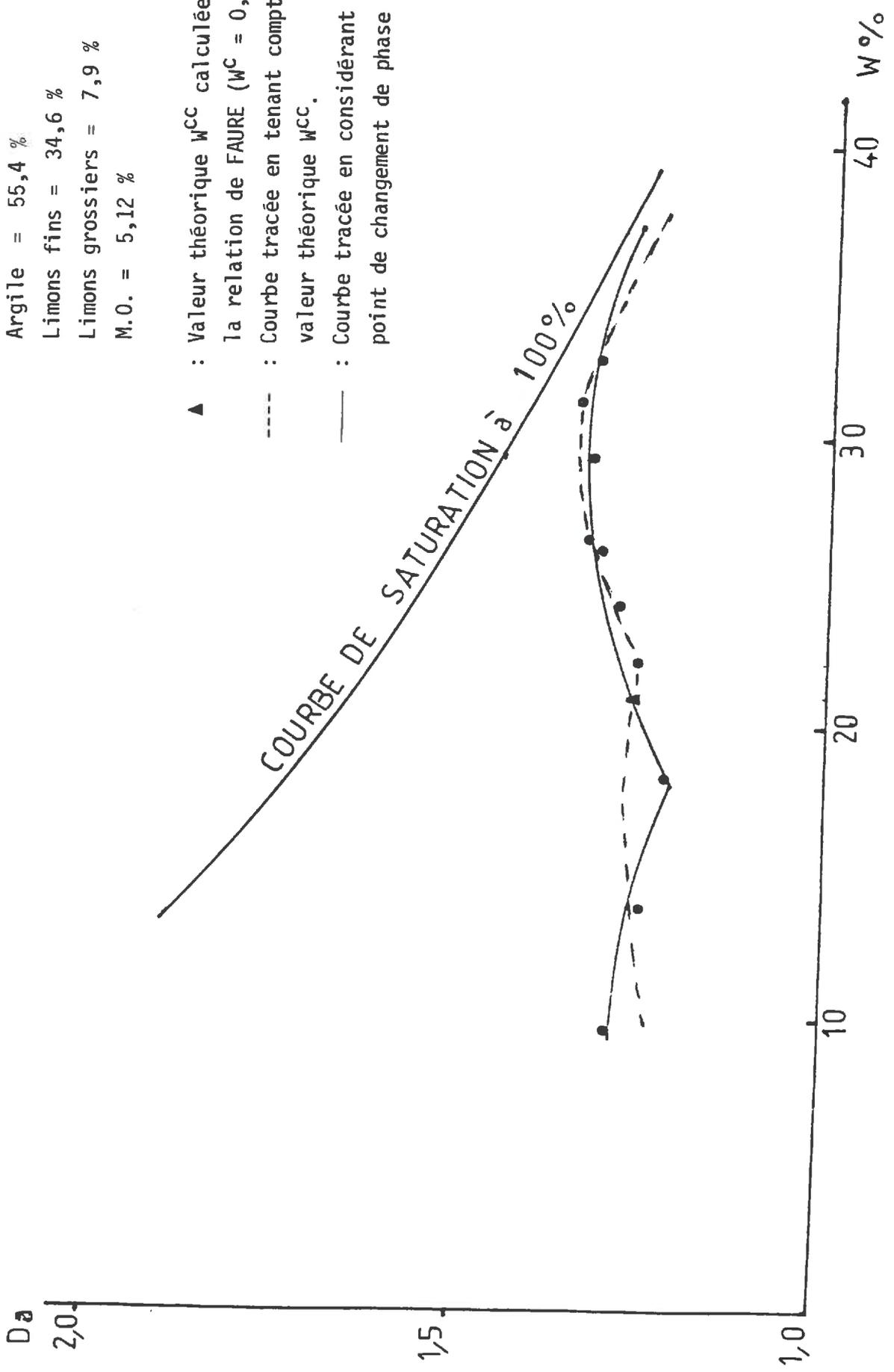
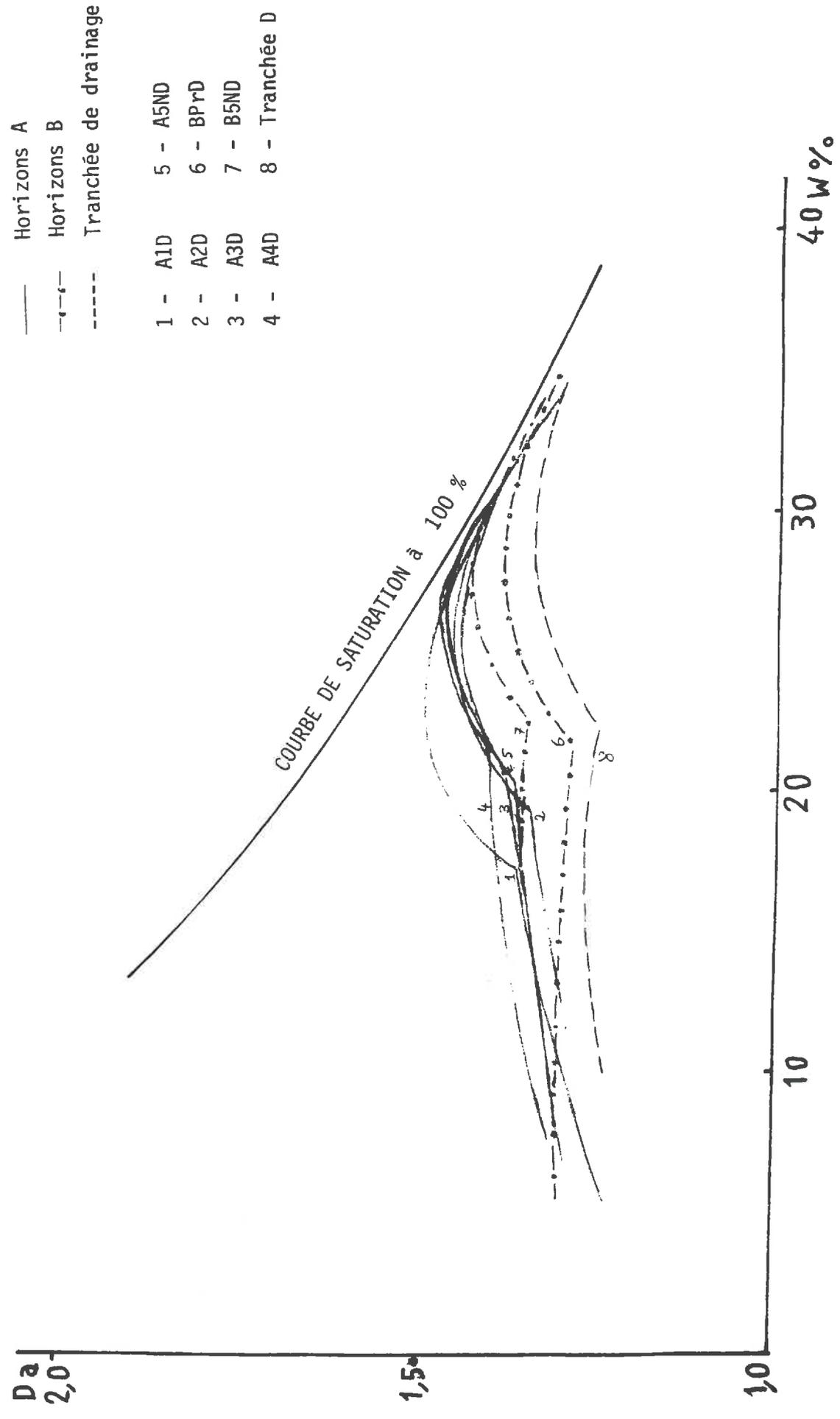


Fig. 15 : RECAPITULATION DES COURBES PROCTOR CORRESPONDANT
AUX ECHANTILLONS ETUDIES



tracée selon la démarche c. Le tableau 2', en annexe, regroupe les valeurs liées au tracé a. Dans les deux cas ont été mentionnées également les valeurs de deux indices utilisés pour caractériser le comportement au compactage des sols : le rapport $\frac{W^C}{A}$ (FAURE, 1978) et l'indice de sensibilité au compactage (DEMDANI, 1982) : évidemment de grands écarts apparaissent entre les chiffres.

2.2.7.2. - Allure générale des courbes Proctor et valeurs caractéristiques
(W^C , D^C , W^M , D^M)

Globalement, l'allure des courbes obtenues est la même, que ce soit par le tracé a ou le tracé c. Toutefois, si dans les deux cas, la phase 1 est inapparente, le changement entre les phases 2 et 3 est plus net avec les courbes du type a.

Avec le tracé de type c, finalement retenu, les valeurs caractéristiques obtenues révèlent un comportement de sol globalement assez peu sensible au compactage puisque les valeurs de D^C oscillent entre 1,31 et 1,42 et celles de D^M entre 1,40 et 1,50 pour les différents horizons .

Dans le détail et pour les teneurs en eau caractéristiques, notons également des variations de W^C et W^M très modestes pour des horizons comparables.

Ainsi les horizons de surface présentent sauf exception (A_1D), des valeurs de W^C comprises entre 19,8 % et 22,4 %. La valeur plus faible (17,5 %) de l'échantillon A_1D peut être reliée à un taux d'argile légèrement plus faible également (48,1 %) que celui des quatre autres échantillons (50,5 à 52,9 %). En revanche, pour les 5 sites, les valeurs de W^M sont très proches (26,3 % à 28,2 %).

Les deux échantillons prélevés dans les horizons (B), présentent des valeurs quasi égales pour W^C (22,4 et 22,60 %) et pour W^M (29,6 et 29,7 %).

La tranchée de drainage (TDD), mélange des horizons A et (B) et d'horizons tourbescents contraste avec les résultats des horizons non remaniés : les densités apparentes y sont plus faibles ($D^C = 1,27$;

TABLEAU 3 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES ECHANTILLONS SOUMIS AUX TESTS PROCTOR

ECHANTIL. PROFOND.	GRANULOMETRIE %							MATIERE ORGANIQUE %				PH eau	CO ₃ Ca %		LOG IOIS	CATIONS ECHANGEABLES me/100 g				
	en cm	SG	SF	LG	LF	A	M.O.	C	N	C/N	Total		Actif	Ca		Mg	K	Na	T	
A ₁ D	0 - 30	0,5	2,4	8,1	40,9	48,1	3,81	2,22	0,248	8,95	8,1	37,8	15,5	41,7	4,62	1,491	0,324	20,5		
A ₂ D	0 - 30	0,5	1,9	8,1	36,6	52,9	3,52	2,05	0,235	8,72	8,1	35,3	14,0	41,8	5,00	1,380	0,279	20,1		
A ₃ D	0 - 30	0,5	2,0	9,2	36,8	51,5	3,62	2,11	0,236	8,94	8,3	37,4	15,0	40,3	6,40	1,318	1,026	20,6		
A ₄ D	0 - 30	0,7	2,5	9,7	36,6	50,5	3,16	1,84	0,299	8,40	8,5	39,0	14,5	38,1	7,20	1,306	2,385	19,5		
A ₅ ND	0 - 30	0,8	2,6	7,7	38,4	50,5	3,81	2,22	0,253	8,77	8,3	37,9	15,0	39,6	6,60	1,165	1,296	20,6		
BPD	30 - 60	0,7	1,4	5,4	33,9	58,6	2,47	1,44	0,168	8,57	8,4	26,9	12,0	40,9	8,20	0,965	0,834	22,7		
B ₅ ND	30 - 60	0,3	0,7	0,8	32,7	65,5	2,21	1,29	0,149	8,65	8,5	25,2	11,5	40,0	9,80	1,035	1,831	22,7		
Tranchée D	30 - 60	0,5	1,6	7,9	34,6	55,4	5,12	2,98	0,272	10,95	8,0	29,0	12,0	45,2	7,40	1,151	3,022	25,0		

$D^M = 1,34$) mais les teneurs en eau légèrement plus fortes ($w^C = 23,0 \%$; $w^M = 31,7 \%$).

Il ressort de cette comparaison que la variabilité spatiale est négligeable (horizon A_1) et qu'un drainage récent n'a pas entraîné de modification de la courbe Proctor.

Les variations verticales se traduisent par une sensibilité au compactage légèrement plus faible des horizons (B) (B.P.D., B_5ND) par rapport aux horizons A. Il y a sans doute une compensation du rôle des constituants du sol puisque si le taux d'argile augmente sensiblement (de 48 - 53 % à 59 - 65 %), il y a diminution de la teneur en matière organique (3,2 - 3,8 % à 2,2 à 2,5 %) et du taux de calcaire total (35 - 38 % à 25 - 27 %).

2.2.7.3. - Valeur du rapport $\frac{w^C}{A}$

Afin de caractériser le comportement des sols au compactage et étudier le rôle de l'argile, FAURE (1978) a mis l'accent sur la valeur du rapport teneur en eau au seuil de sensibilité au compactage (w^C) sur taux d'argile de l'échantillon correspondant (A).

Dans un premier travail expérimental portant sur des mélanges binaires de sable et d'argile, sans matière organique ni calcaire, avec des taux d'argile (type kaolinite) variant de 3 à 100 % (21 échantillons), cet auteur constate que ce rapport est égal à 0,32.

Passant à des sols agricoles variés (27 échantillons), il obtient une valeur moyenne de 0,38, attribuant les variations constatées au type d'argile, ainsi qu'aux teneurs en calcaire et en matière organique.

Malgré un protocole de mesure sensiblement différent du notre (énergie de compactage de 0,147 j/cm³ contre 0,582 j/cm³, nous avons donc utilisé ce dernier résultat pour choisir le tracé définitif de la courbe Proctor de nos échantillons en calculant un point théorique supplémentaire

W^C . Il n'est donc pas surprenant de trouver pour le rapport $\frac{W^C}{A}$ de nos huit prélèvements des valeurs assez peu dispersées (0,34 à 0,44), "encadrant" la valeur de 0,38. On n'observe toutefois pas de sens de variation net de ce rapport en fonction des variations des taux d'argile, de calcaire total et de matière organique constatée d'un échantillon à l'autre.

2.2.7.4. - Sensibilité à la compaction

DEMDAMI (1982) caractérise le comportement des sols à la compaction par un indice de sensibilité à la compaction Sc obtenu de la manière suivante :

$$Sc \% = \frac{D^M - D^C}{W^M - W^C}$$

Sc est donc la pente de la droite qui joint les deux points

$$\begin{aligned} D^M &= f(W^M) \text{ et} \\ D^C &= f(W^C), \end{aligned}$$

Sc représente donc l'augmentation moyenne de la densité apparente quand l'humidité croit entre W^C et W^M . Il dépend donc étroitement de l'option prise pour le tracé de la courbe Proctor.

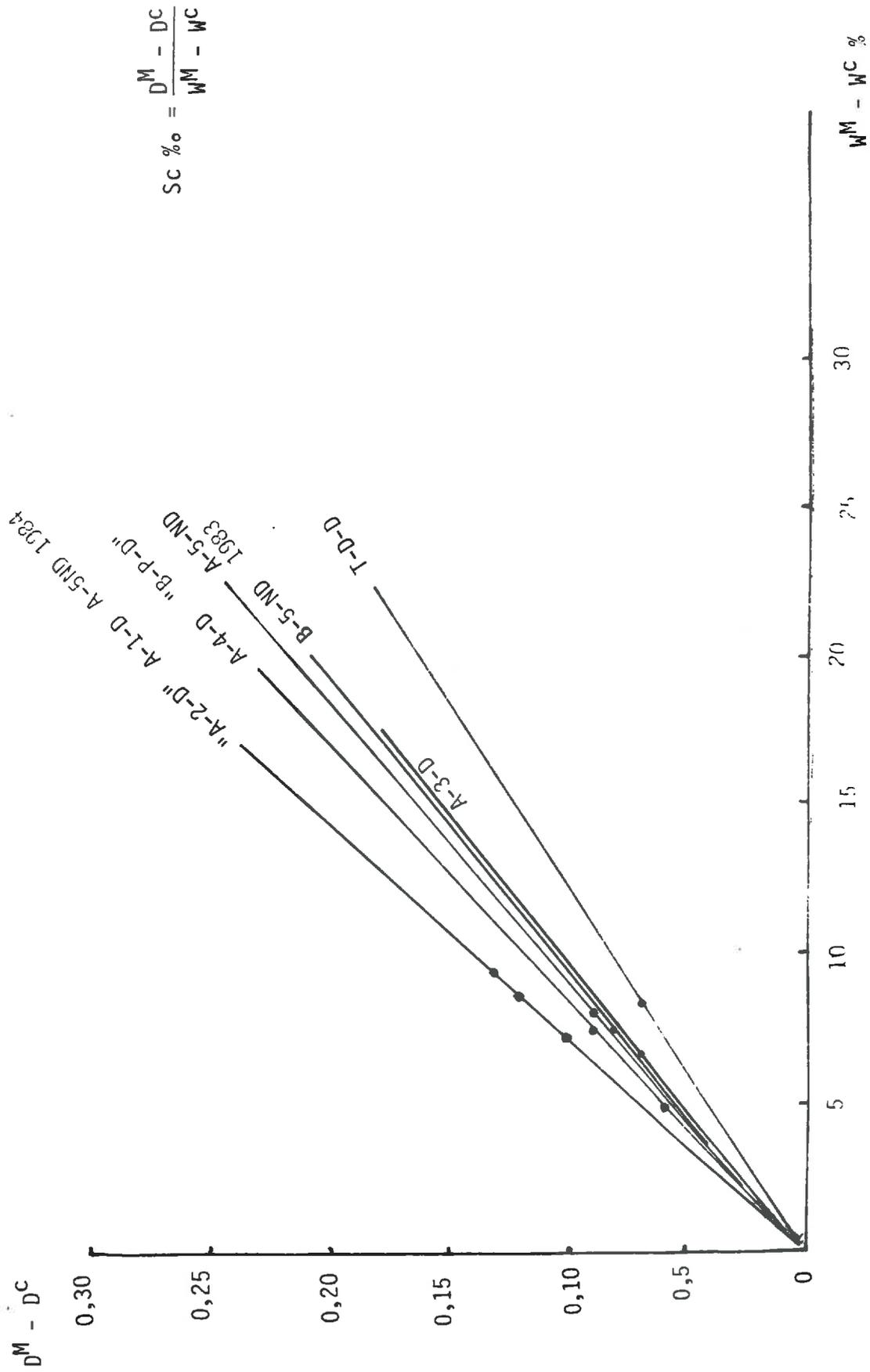
Les valeurs calculées de Sc % pour les 8 échantillons figurent dans le tableau 2.

Les valeurs s'étalent ainsi entre 0,010 et 0,014* pour les échantillons des horizons non remaniés alors que la tranchée de drainage présente une valeur de 0,008.

La représentation graphique des valeurs de D^M et D^C en fonction de W^M et W^C (figure 16) visualise également les différences constatées entre les échantillons.

* $Sc = 0,016$ pour le prélèvement A₅ND de 1984.

FIG. 16 : SENSIBILITE AU COMPACTAGE (Sc %) DES ECHANTILLONS ETUDIES
 (Sc % étant la pente de la droite entre $D^M(W^M)$ et $D^C(W^C)$)



Enfin, les échantillons A₁D et A₂D apparaissent comme les plus sensibles à la compaction et l'échantillon TDD comme le moins sensible.

2.3. - Etude de la consistance du sol-Limites d'Atterberg

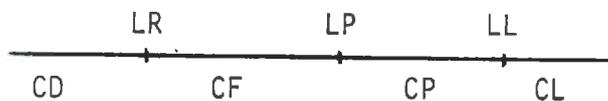
2.3.1. - Principe de la méthode

L'essai a pour but de définir les différents états de consistance d'un sol en fonction de la teneur en eau. Cette consistance peut varier dans de larges limites avec :

- la quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores ;
- l'épaisseur des couches d'eau absorbées qui enrobent ses grains.

La méthode d'Atterberg définit les teneurs en eau qui limitent les différents états de consistance ou "limites d'Atterberg". Ce sont des constantes physiques, déterminées par Atterberg et précisées par Casagrande.

Ces limites marquent successivement les seuils entre le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité ; LL), de l'état plastique à l'état friable (Limite de plasticité ; LP), et de l'état friable à l'état solide ou dur (limite de Retrait ; LR).



C.D. : consistance dure

C.F. : consistance friable

C.P. : consistance plastique

C.L. : consistance liquide

LR : Limite de retrait

LP : Limite de plasticité

LL : Limite de liquidité

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage du poids du matériau sec.

NOMOGRAMME W.E.S.

$$w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

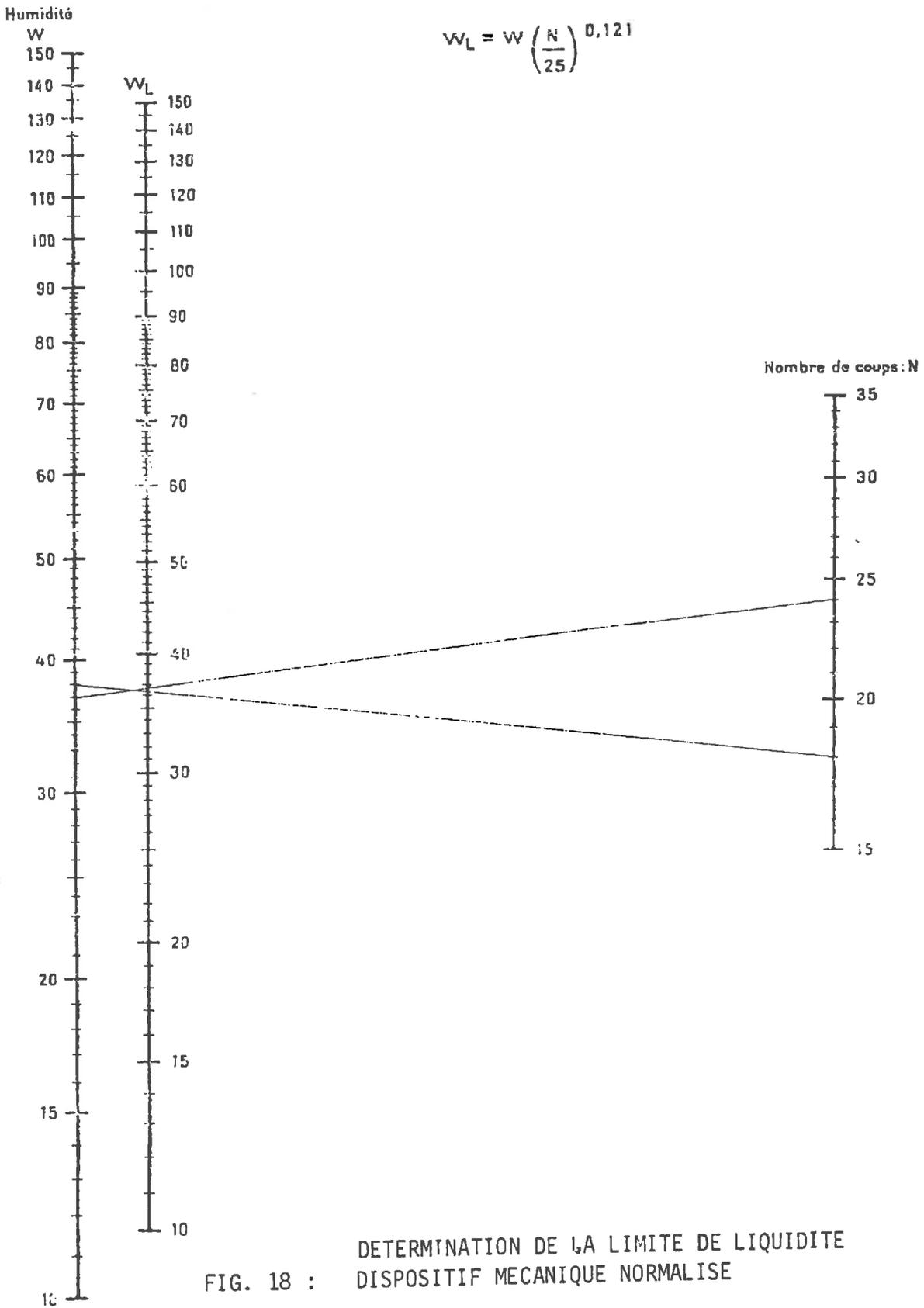


FIG. 18 : DETERMINATION DE LA LIMITE DE LIQUIDITE
DISPOSITIF MECANIQUE NORMALISE

2.3.2. - La méthode

2.3.2.1. - Préparation des échantillons soumis à l'essai

Nous avons effectué ce test sur 34 échantillons.

Chaque échantillon est obtenu par tamisage sous l'eau au tamis de $0,4\text{ mm}$. Celui-ci est placé au dessus d'un bac recueillant l'eau de lavage, et le tamisage est terminé lorsque l'eau s'écoulant du tamis est claire.

Nous avons utilisé cette méthode parce que nos échantillons étaient trop argileux et trop plastiques pour le seul tamisage à sec (refus important).

Après décantation, l'eau de lavage claire est siphonnée avec précautions, pour ne pas entraîner les éléments inférieurs à $0,40\text{ mm}$.

Ensuite, l'eau excédentaire est éliminée par évaporation à l'étuve à une température ne dépassant pas 60°C , afin d'accélérer le séchage des matériaux et arriver à une teneur en eau disponible pour effectuer l'essai.

2.3.2.2. - Exécution des essais

L'essai s'effectue en deux phases principales ; la première phase, c'est à dire la détermination de la limite de liquidité (LL) se fait à l'aide de l'appareil de Casagrande (figure 17).

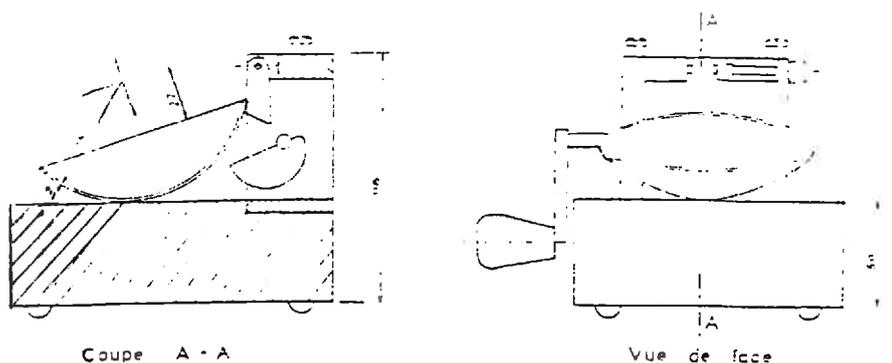


Figure 17 : Appareil de Casagrande

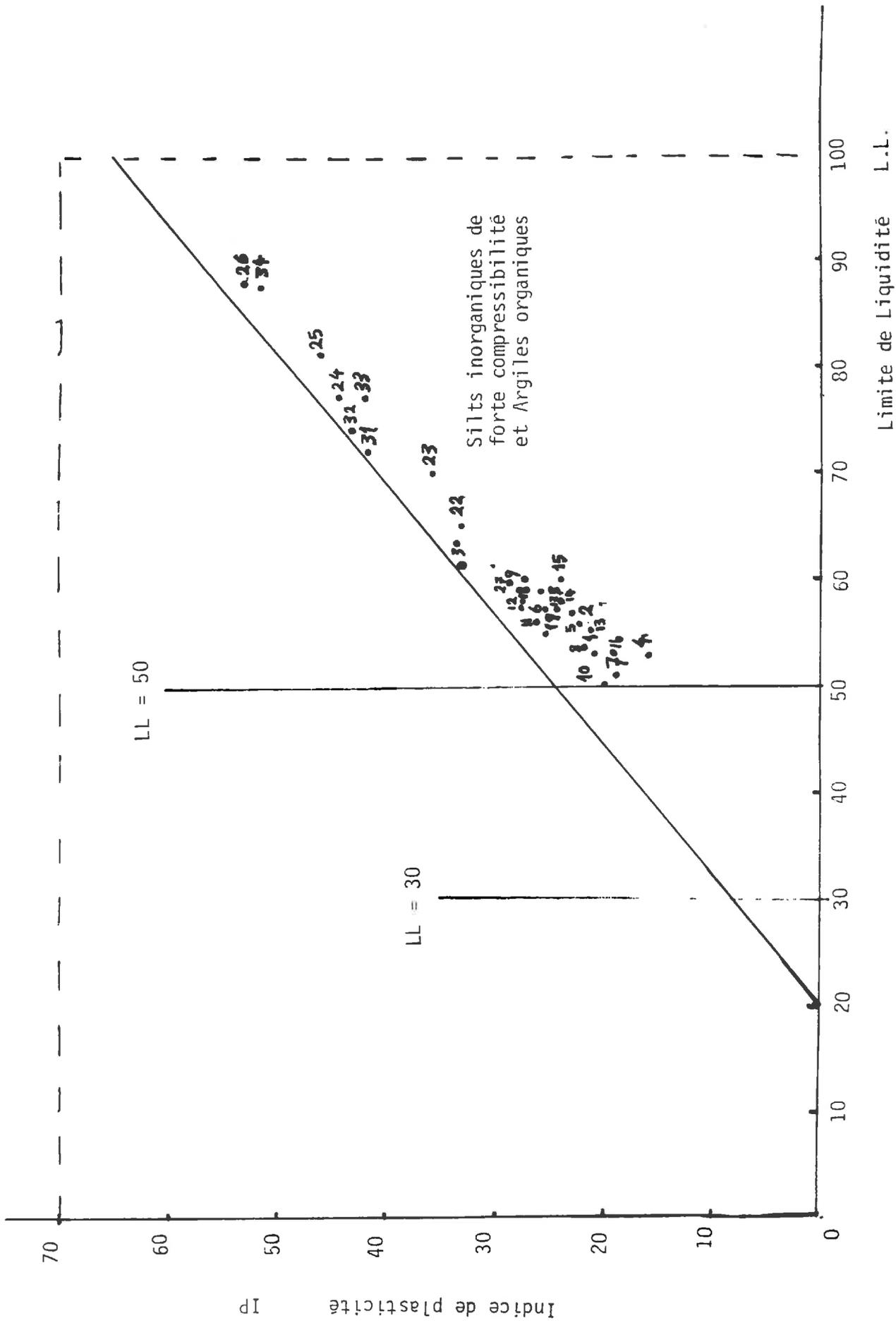


FIG. 20 : POINTS REPRESENTATIFS DE NOS ECHANTILLONS SUR L'ABAQUE DE PLASTICITE (d'après CASAGRANDE)

On remplit la coupelle d'une pâte de sol que l'on divise en deux parties. La limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle les deux lèvres de la saignée viennent tout juste en contact l'une de l'autre, sans se confondre, quand on donne des coups secs (15 à 35) à la partie inférieure de la coupelle.

L'équation personnelle influe beaucoup sur les résultats de l'essai. Pour éliminer ce facteur, on utilise un dispositif mécanique normalisé.

La deuxième phase, est la mesure de la limite de plasticité (LP), ou limite inférieure de l'état plastique. C'est la teneur en eau à laquelle le sol commence à s'émietter, quand on fait des rouleaux en fils de 3 mm de diamètre et de 15 cm de longueur.

La limite de plasticité est atteinte lorsqu'en soulevant de 1 à 2 cm le rouleau de 3 mm en son milieu, il se fissure.

2.3.2.3. - Indice de plasticité

On donne au domaine de teneur en eau à l'intérieur duquel un sol est doué de plasticité, le nom de domaine plastique.

L'indice de plasticité (IP) est la différence numérique entre la limite de liquidité et la limite de plasticité : $IP = LL - LP$.

Cet indice permet d'estimer la fourchette d'humidité dans laquelle le sol étudié garde des propriétés plastiques.

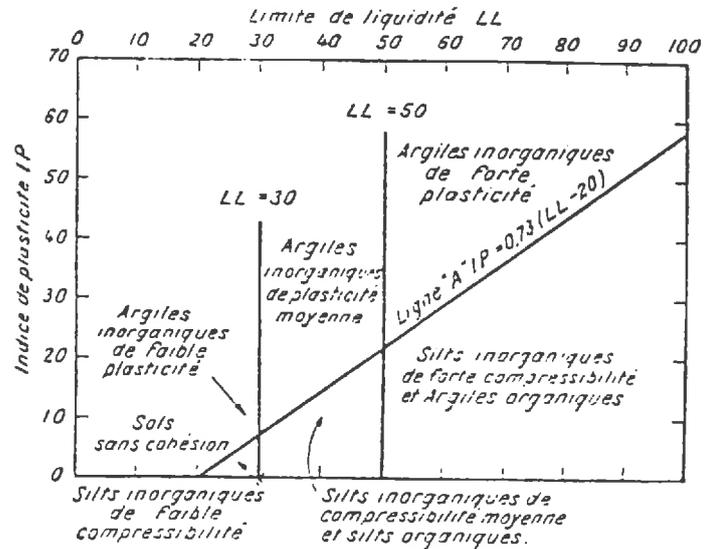
Les valeurs de IP ainsi obtenues sont notées dans le tableau n°4.

2.3.2.4. - Classification des sols au moyen de l'abaque de plasticité

D'après TERZAGI et PECK, on peut classer les sols cohérents d'après leurs caractères généraux et leurs propriétés physiques en 8 groupes (figure 19) : les argiles inorganiques de forte, moyenne ou faible

plasticité, les silts inorganiques de forte, moyenne ou faible compressibilité, les argiles organiques et les sols sans cohésion.

Figure 19 : Abaque de plasticité
(d'après A. CASAGRANDE)



Il est donc possible de classer un sol donné à partir de l'abaque de CASAGRANDE (figure 19).

D'après cet abaque, la figure 20 montre que les points représentatifs de nos échantillons correspondent aux argiles organiques et silts inorganiques de forte compressibilité.

2.3.2.5. - Limite de retrait

C'est la limite inférieure de variation de volume ou teneur en eau au-dessous de laquelle une perte supplémentaire d'eau par évaporation n'entraîne plus de réduction du volume. C'est la teneur en eau remplissant les vides du sol au moment où ce dernier atteint (par séchage) son volume minimal.

Pour calculer cette limite, on met un échantillon à l'état liquide dans une coupelle que l'on passe dans une étuve à 150°C, pendant 12 heures.

Si on trace $V = f(W)$, c'est à dire la courbe du volume d'un échantillon du sol en fonction de son humidité, on obtient les valeurs LR puis LR' d'où :

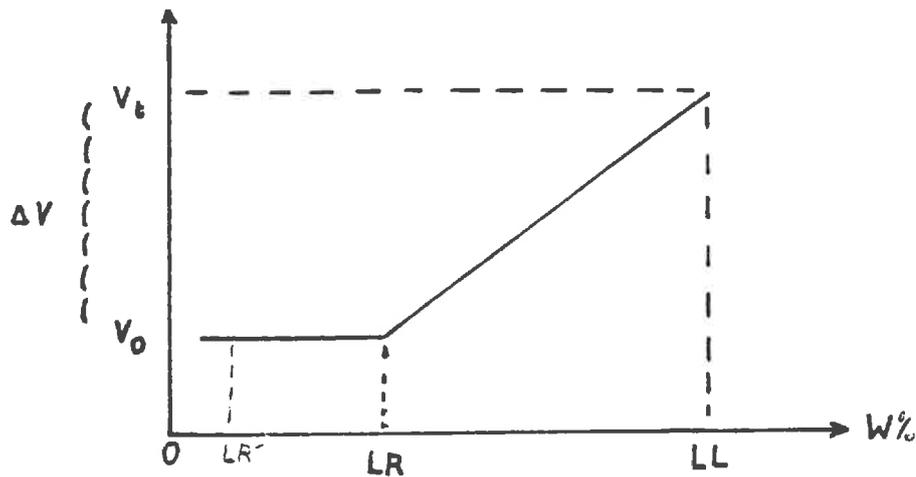


Figure 21 : Relation entre la variation du volume (ΔV) et la teneur en eau (W %)

$LR - LR'$ = la quantité d'eau qui remplit les vides du sol.

Dans cette phase de l'essai, nous n'avons pas mesuré LR' , qui est inférieure à LR limite de retrait, puisque ce qui nous intéresse est la limite de retrait et la variation de volume de l'échantillon entre l'état liquide et l'état à la limite de retrait.

Nous avons donc recherché pour nos échantillons la variation de volume $\frac{\Delta V}{V}$ qui traduit les effets de tassement résultant des alternances de gonflement-retrait.

La teneur en eau correspondant à la consistance friable permet de prévoir l'époque où le travail du sol n'entraîne pas de risques de tassement.

Il faut rappeler que si la méthode conduit à des résultats variables mais légèrement différents pour un même échantillon traité plusieurs fois par un même expérimentateur, les résultats de mesures faites sur un même échantillon par plusieurs expérimentateurs peuvent être assez différents.

2.3.3. - Calculs et résultats

Nous envisagerons les définitions suivantes :

LL = teneur en eau en % à la limite de liquidité = WL %
LP = " " " en % à la limite de plasticité = WP %
LR = " " " en % à la limite de retrait = WR %

Poids du sol sec = Ps
Poids de l'eau à la (LL) = P_l
Poids de l'eau à la (LP) = P_p
Poids de l'eau à la (LR) = P_r

$$WL \% = \frac{P_l}{P_s} \times 100$$

$$WP \% = \frac{P_p}{P_s} \times 100$$

$$WR \% = \frac{P_r}{P_s} \times 100$$

$$P_r = P_e - (V_i - V_g) \times Y_e$$

P_e = Poids de l'eau initial ou poids de l'eau à la (LL)

Y_e x (V_i - V_g) = Poids de l'eau entre LL et LR

V_i = Volume du sol à la limite de liquidité

V_g = Volume du sol à la limite de retrait

Y_e = Poids spécifique de l'eau

ΔV % = augmentation de volume

$$\Delta V \% = \frac{V_i - V_g}{V_i} \times 100$$

Das = Densité apparente sèche, $Das = \frac{P_s}{V_g}$

2.3.4. - Commentaires

L'interprétation des valeurs présentées dans les tableaux 4.1, 4.2, 5 et sur la figure 20 peut se faire sous différentes formes :

LIMITE D'ATTERBERG, INDICE DE PLASTICITE,
DENSITE APPARENTE SECHE ET AUGMENTATION DU
VOLUME, OBTENUS POUR LES ECHANTILLONS ETUDIES

PARCELLE	SITE	SERIE SUR ABAQUE	PROFONDEUR EN CM	LR en %	LP en %	LL en %	IP	DENSITE APPARENTE SECHE Y _s	ΔV %
CHAMP DRAINE	A1	1	0 - 1	15,5	32,2	53,5	21,3	1,80	
		2	1 - 3	18,5	33,7	57,1	23,4	1,78	42,4
		3	10 - 15	19,1	32,3	59,0	26,6	1,76	41,2
	A2	4	0 - 1	17,4	36,8	53,5	16,6	1,78	39,0
		5	1 - 3	18,1	34,5	56,9	22,4	1,77	41,8
		6	10 - 15	18,0	32,7	57,5	24,7	1,78	43,1
	A3	7	0 - 1	18,5	31,8	51,5	19,6	1,77	39,2
		8	1 - 3	17,4	32,8	54,3	21,5	1,81	43,1
		9	10 - 15	17,7	31,1	59,2	28,1	1,80	45,0
	A4	10	0 - 1	18,1	30,5	50,8	20,3	1,79	37,4
		11	1 - 3	16,8	30,2	56,6	26,3	1,80	42,5
		12	10 - 15	17,4	30,0	57,3	27,3	1,81	43,1
CHAMP NON DRAINE	A5	13	0 - 1	20,7	34,0	55,0	21,0	1,70	34,5
14		1 - 3	17,3	33,9	58,1	24,2	1,80	42,8	
15		10 - 15	16,3	35,2	60,0	24,7	1,81	44,0	
VERGER DE POMMIER	A6	16	0 - 1	18,9	33,1	52,7	19,5	1,77	39,3
17		1 - 3	17,3	32,4	57,0	24,5	1,79	42,1	
18		10 - 15	17,6	32,4	57,6	25,1	1,81	42,9	

- variabilités spatiale et verticale des limites d'Atterberg ;
- position sur l'abaque de Casagrande ;
- limites d'Atterberg et courbe Proctor ;
- limites d'Atterberg, capacité de rétention et point de flétrissement.

Ensuite, l'incidence de ces données sur le travail du sol et les conditions de pose des drains pourra être discutée.

2.3.4.1. - Variabilité spatiale

Si l'on considère les résultats moyens (tableau 5) des valeurs de LR, LP, LL, IP et Das pour les prélèvements (0 - 15 cm) A₁ à A₄, éloignés les uns des autres, on constate de faibles variations dans l'horizon Ap :

LR	varie de 17,6 % à 18,1 %,
LP	de 30,2 % à 34,6 %,
LL	de 55,0 % à 57,7 %,
IP	de 21,3 % à 24,4 %,
Das	de 1,77 % à 1,80 %.

Concernant les deux échantillons prélevés dans l'horizon (B) ^(BPD - B 5) cette constatation reste vraie, l'écart maximum (3,3 points) étant confirmé pour LP, alors que les valeurs de densité apparente, très élevées, sont identiques (Das). On peut donc considérer le comportement mécanique du sol comme homogène au sein des deux parcelles (drainée - non drainée) appartenant au dispositif expérimental.

2.3.4.2. - Evolution verticale dans le profil

L'évolution verticale des résultats peut être envisagée d'abord dans l'horizon Ap où trois prélèvements ont été effectués (0-1 cm, 1-3 cm, 10-15 cm - tableau 4.1.) puis au sein des profils 1 et 2 (tableau 4.2.).

TABLEAU N° 4.2. : RESULTATS DES DEUX SONDAGES EXECUTES
DANS LES CHAMPS DRAINE ET NON DRAINE

PARCELLE	SERIE	PROFON- DEUR EN CM	LR	LP	LL	IP	DENSITE APPARENTE SECHE	ΔV %
CHAMP NON DRAINE SONDAGE PRES A5	19	0 - 10	19,2	32,0	55,0	23,0	1,78	42,0
	20	10 - 20	18,1	32,5	57,0	24,5	1,78	43,4
	21	20 - 30	16,8	32,12	57,5	25,38	1,81	42,8
	22	30 - 40	16,8	31,22	65,0	33,78	1,84	47,8
	23	40 - 50	17,2	34,0	70,0	36,0	1,84	48,7
	24	50 - 60	13,2	32,7	76,5	44,0	1,84	51,8
	25	60 - 70	15,2	35,1	80,9	45,8	1,87	54,7
CHAMP DRAINE SONDAGE PRES A2	26	70 - 80	15,2	35,0	88,0	53,0	1,86	58,0
	27	0 - 10	18,6	31,3	57,0	26,0	1,76	41,6
	28	10 - 20	18,0	31,5	59,5	28,0	1,78	43,1
	29	20 - 30	16,5	31,2	59,5	28,0	1,78	44,1
	30	30 - 40	16,3	27,0	61,0	34,0	1,85	45,2
	31	40 - 50	16,7	30,1	72,5	42,3	1,84	52,0
	32	50 - 60	17,8	31,0	74,0	43,0	1,82	50,4
	33	60 - 70	17,5	35,0	77,0	42,0	1,83	52,4
34	70 - 80	16,1	36,0	88,0	52,0	1,85	57,6	

LR : Limite de retrait
LP : Limite de plasticité
LL : Limite de liquidité

IP : Indice de plasticité
 ΔV % : augmentation du volume

2.3.4.2.1. - Horizon Ap

De l'examen du tableau n° 4.1. se dégagent les remarques suivantes :

- pour LR ; pas de sens de variation unique du sommet vers la base de l'horizon : parfois il y a croissance des valeurs (A_1 , A_2) parfois il y a décroissance (A_5) ; enfin le prélèvement intermédiaire (1-3 cm) a la valeur minimale (A_3 , A_4 , A_6).

Les écarts dans le même horizon sont, en valeur absolue, inférieurs ou égaux à 1,6 % pour A_2 , A_3 , A_4 , ils atteignent 3,6 % en A_1 et même 4,4 % en A_5 .

- pour LP ; pas de sens de variation net, comme pour LR. Les valeurs sont assez groupées en 1,5 points de teneur en eau, 4 fois sur 6 (écarts de 4,1 % pour A_2 et 1,2 % pour A_5).
- pour LL, paradoxalement il y a un sens unique de variation pour les 6 profils avec augmentation du sommet vers la base de l'horizon. La valeur de LL augmente ainsi de 4,0 à 7,7 points de teneur en eau.
- IP ; compte-tenu du sens de variation de (LL) l'indice de plasticité croît également de manière régulière et systématique entre 0-1 cm et 10-15 cm. En valeur absolue, cet accroissement est important puisque compris entre 3,7 et 8,5 points d'humidité (soit de 1/4 à plus de 1/3 en valeur relative).
- Das, compte-tenu de la sensibilité de la mesure, il n'apparaît pas, sauf exception (A_5), d'écarts significatifs de densité apparente au sein de l'horizon (écarts de 0,04 et moins).

2.3.4.2.2. - Profil

Le tableau 5 fait apparaître des différences nettes entre horizons Ap et (B). Ainsi, les valeurs de LR et LP sont plus faibles alors que celles de LL, IP et Das sont bien plus élevées en profondeur qu'en surface.

TABLEAU N° 5 : VALEURS MOYENNES DES LIMITES D'ATTERBERG, DE L'ETAT FRIABLE, DE LA TENEUR EN EAU CRITIQUE (W^c) PROCTOR, DU POINT DE FLETRISSEMENT (Hf) ET DE LA CAPACITE DE RETENTION (Hr)

	LR	LP	LL	IP	DENSITE APPARANTE	AUGMENTAT. DU VOLUME	ETAT FRIABLE LR → LP en %	W ^c → W ^m en %	Hf → Hr en %
A - 1 - D	17,7	32,7	56,5	23,8	1,78	41,5	17,7 → 32,7	17,5 → 26,3	21,2 → 31,8*
A - 2 - D	17,8	34,6	55,9	21,3	1,77	41,3	17,8 → 34,6	19,8 → 26,7	20,8 → "
A - 3 - D	17,6	31,6	55,0	23,4	1,79	42,4	17,6 → 31,6	20,8 → 27,5	23,8 → "
A - 4 - D	17,4	30,2	54,6	24,4	1,80	41,0	17,4 → 30,2	22,4 → 27,2	23,8 → "
A - 5 - ND	18,1	34,2	57,7	23,5	1,77	40,4	18,1 → 34,2	20,4 → 28,2	21,4 → 31,5
B - P - D	16,9	29,3	69,2	39,9	1,84	48,5	16,9 → 29,3	22,6 → 29,7	23,6 → 36,4*
B - 5 - ND	16,1	32,6	70,5	37,9	1,84	49,5	16,1 → 32,6	22,0 → 29,6	24,2 → 35,3

* Valeurs moyennes tirées de mesures réalisées sur des profils comparables (P.F. VAQUIE, 1982).

Les mesures plus détaillées faites sur chacun des huit horizons du sondage A5(parcelle non drainée) et du sondage A2(parcelle drainée) montrent que ;

- pour LR, LP, il y a des sens de variation uniques de la surface vers la base du profil, sauf une augmentation à l'horizon 40-50 cm (champ non drainé) et à l'horizon 50-70 cm (champ drainé).

Les écarts maxima entre la surface et la base du profil 1, sont de 4 points d'humidité pour LR et de 3 points pour LP. Pour le profil 2, ils sont de 2,1 points pour LR et de 4,5 points pour LP.

- LL et IP croissent également de manière régulière et systématique entre 0-10 cm et 70-80 cm dans les deux parcelles, cet accroissement étant compris entre 0,5 et 7,5 points d'humidité pour LL et entre 1,3 et 8,4 pour LP au sondage A5; entre 1,5 et 11,5 pour LL, entre 2 et 10 pour IP au sondage A2.

- La densité apparente sèche D_{as} croit systématiquement avec la profondeur, passant de 1,78 à 1,86 dans le champ non drainé et de 1,76 à 1,85 dans le champ drainé. L'augmentation du volume ΔV % passe de 42 % au sommet du profil à 58 % à la base.

Globalement, il apparaît donc que les écarts sont faibles, entre les deux profils; soit, en valeurs absolues :

LR : écart compris entre 0,6 point d'humidité (en surface) et 1,1 (en profondeur) ;

LP : entre 0,7 et 1,0 ;

LL : entre 0 et 2 ;

IP : entre 1 et 3 ;

D_{as} : entre 0,01 et 0,05 ;

ΔV % : entre 0,6 et 1,1.

2.3.4.3. - Limites d'Atterberg et abaque de Casagrande

En valeur absolue (fig. 20) et malgré un étalement apparent des résultats (quoique alignés sous la droite de régression), les sols argileux de Marsillargues se situent tous dans la classe "silts inorganiques de forte compressibilité et argiles organiques" de l'abaque de Casagrande.

Il s'agit donc de sols à valeurs très élevées de la limite de liquidité ($> 50\%$) et à valeurs moyennes à forte de l'indice de plasticité (20 à 50 %).

2.3.4.4. - Limites d'Atterberg et courbes Proctor

Le report des valeurs de LR et LP sur les courbes Proctor (fig. 8 à 14) montre immédiatement deux comportements différents :

- pour les horizons Ap (A_{1D} à A_{5ND}), les valeurs de LR sont égales ou inférieures à W^c mais les valeurs de LP toujours plus élevées (et de manière plus importante) que W^M .

- pour les horizons (B) (B_{PD} et B_{5ND}) les teneurs en eau à LR sont nettement inférieures à W^c alors que pour LP il y a soit coïncidence avec W^M (B_{PD}), soit comme précédemment LP plus élevée que W^M .

2.3.4.5. - Limites d'Atterberg, capacité de rétention, Hr et point de flétrissement, Hf.

Par rapport aux valeurs de Hr (pf 3,0)* et Hf (pf 4,2), les limites d'Atterberg se situent ainsi :

- pour l'horizon Ap la limite de plasticité a des valeurs voisines de la capacité de rétention (31 %) alors que la limite de retrait est bien inférieure au point de flétrissement (21 %).
- pour l'horizon (B) la limite de plasticité se situe au-dessus du point de flétrissement (25 %), la valeur de la capacité de rétention (38 %) se situant entre LP et LL, l'état plastique a donc des chances de se maintenir longtemps dans l'année.

* - Voir chapitre "porosité".

III - STABILITE STRUCTURALE DU SOL DE MARSILLARGUES

Sur le terrain, l'évolution de la consistance du sol et de sa sensibilité au tassement, sous l'effet de variations de teneur en eau, ne suivent pas strictement les seuils déterminés dans les tests précédents, Proctor et Atterberg.

En effet, appliquées à des échantillons fortement remaniés (broyage, tamisage sous l'eau), les méthodes précédentes ne rendent pas compte des conditions structurales du sol en place.

Pour apprécier ces dernières, et notamment la stabilité de la structure, deux tests ont été utilisés : le test d'Emerson d'une part, le test Hénin d'autre part.

Rappelons d'abord que l'eau tend à détruire les assemblages structuraux par deux processus simultanés (HENIN, 1938) ;

a) Un gonflement, qui tend à disperser les ciments colloïdaux (SCHLOESING, 1885), ce qui diminue la cohésion (C) de la terre mouillée. Cette cohésion, premier facteur de résistance de la structure, dépend notamment de la texture du sol et des cations échangeables ;

b) Et surtout un éclatement (YODEN, 1936) ; l'eau pénètre dans les pores capillaires en commençant par les plus gros ; une pression (P) est ainsi exercée sur l'air qui s'y trouvait ;

$$p = \frac{2A \cos \alpha}{r} \quad \text{avec } A = \text{tension superficielle de l'eau}$$

$\alpha = \text{angle de raccordement sol-eau}$
 $r = \text{rayon des gros capillaires du sol.}$

Donc p est d'autant plus élevé que le sol est plus mouillable. Le second facteur de résistance de la structure est donc la faible mouillabilité du sol, facteur qui dépend principalement de la matière organique ; un agrégat reste stable tant que $C > p$; stabilité = cohésion à l'état humide - pression interne de l'air.

3.1. - Test d'Emerson

3.1.1. - Principe général

Ce test, adapté par PONS et MARTINEAU (1983) (d'après EMERSON, 1967 et GREENLAND et al., 1975) a été retenu car appliqué par les auteurs aux sols argileux (40 à 60 % d'argile, 40 à 60 % de limon), à nappe salée,

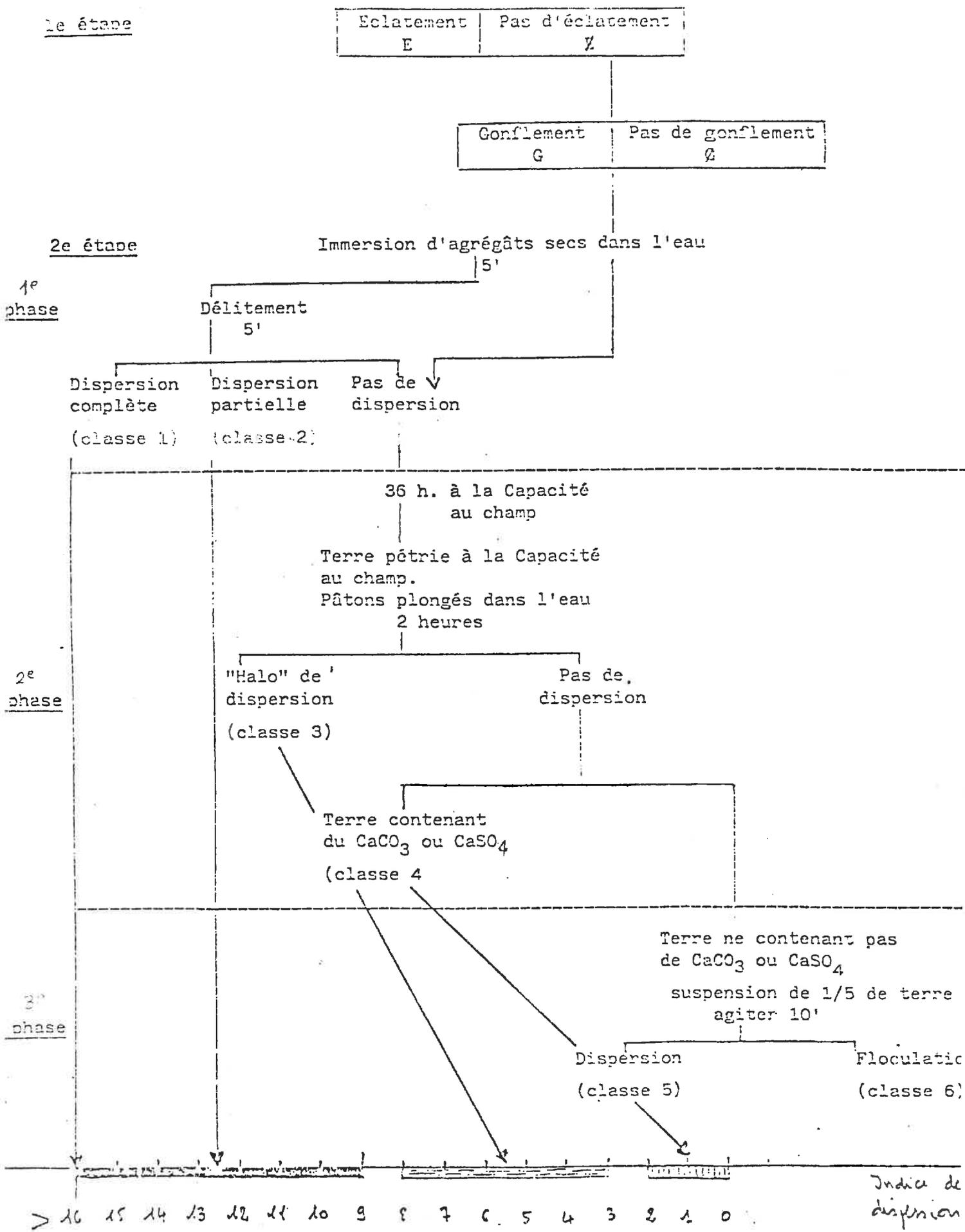


FIG. 22 : PRINCIPE DU TEST D'EMERSON (PONS et al 1983)

des Marais de l'Ouest.

Outre une caractérisation des sols de Marsillargues, une comparaison était donc possible avec les sols des plaines littorales atlantiques où ce test contribue à estimer le comportement des sols vis à vis du drainage enterré.

Ce test, dichotomique et ordonné (cf. protocole en annexe), se déroule en deux ou trois phases et s'applique à un échantillon prélevé en période hivernale, puis sèche à l'air libre pendant un mois environ. Il consiste à immerger dans de l'eau distillée, d'abord des agrégats de 3 à 5 mm de diamètre, puis de petits pâtons de terre. En fonction de l'évolution de ces matériaux (délitement, gonflement, dispersion), de leur teneur en CaCO_3 et gypse, le comportement est noté à l'aide de 8 classes et d'un indice de dispersion (I.D.), variable de 0 à plus de 16 (figure 22).

D'après PONS (1984 - communication orale), dans les marais de l'Ouest, le comportement physique des sols peut se classer de la manière suivante :

- bon, I.D. < 4 classe Emerson 3^+
- moyen, I.D. # 8 (9-10) classe Emerson 3 et 3^-
- mauvais, I.D. > 11 classe Emerson < 3 (2^+ , 2, ...)

Dans les marais de Rochefort, les indices de dispersion obtenus varient de 0 à 14.

3.1.2. - Résultats

Appliquée aux 6 horizons de deux profils caractéristiques des parcelles drainée et non drainée, cette méthode a donné les résultats regroupés dans les tableaux 6-1 et 6-2. Ces derniers montrent globalement une grande homogénéité quant aux classes d'Emerson (3 ou 3^+) et une certaine variabilité vis à vis de l'indice de dispersion (4 à 8).

Concernant d'abord la variabilité d'un profil à l'autre, il apparaît qu'elle est très négligeable, le site drainé ayant pratiquement le même comportement que le terrain non drainé.

Il est intéressant de noter, en revanche, une évolution verticale assez nette au sein des profils. Ainsi les horizons supérieurs

TABLEAU 6-1 : RESULTATS DU TEST D'EMERSON - PROFIL 1 , PARCELLE DRAINEE

PRELEVEMENT		PREMIERE PARTIE					DEUXIEME PARTIE				CLASSEMENT DEFINITIF	
PROFON- DEUR cm.	N° de LABORAT.	EGLAT de 0 à 3	DISP. de 0 à 3	GONFLE. de 0 à 3	Hc1 de 0 à 5	CLASSE	N° de LABORAT.	DISP. de 0 à 3	CLASSE	EMERSON	I.D.	
0 - 1	1	3	0	-	5	AS	1	3		3	8	
	2	3	0	-			2	3				
1 - 3	3	3	0	-	5	AS	3	3		3	8	
	4	3	0	-			4	3				
3 - 15	5	2	0	-	5	AS	5	3		3	7	
	6	2	0	-			6	3				
15 - 30	7	2	0	-	4	AS	7	2		3	7	
	8	2	0	-			8	2				
30 - 50	9	2	0	-	5	AS	9	2		3	6	
	10	2	0	-			10	2				
50 - 75	11	1	0	-	4	AS	11	1	3 ⁺	3 ⁺	4	
	12	1	0	-			12	1				

DATE DU PRELEVEMENT : 03 - 04 - 84

DATE DU TEST : 04 - 05 - 84

(0-30 cm) ont un comportement "moyen" alors que les horizons plus profonds (30-75 cm) sont à classer en "moyen-bon".

3.2. - Comparaison avec le test "Hénin"

Le test de stabilité structurale I.S a été appliqué aux échantillons soumis à l'essai Proctor. Les résultats figurent dans le tableau 7 ci-dessous :

Echantillon	A ₁ D	A ₂ D	A ₃ D	A ₄ D	A ₅ ND	BPD	B ₅ ND	tranchée
Log 10 I.S	1,55	1,52	1,66	1,64	1,55	1,35	1,48	1,43

Tableau n°7 : Valeurs de Log.10 I.S d'échantillons de surface et de profondeur (Laboratoire INRA d'ARRAS)

Bien qu'il ne s'agisse pas exactement des mêmes profils que précédemment, il apparaît ici encore néanmoins une évolution favorable de la stabilité structurale, de la surface vers la profondeur. Ainsi, alors que les horizons Ap ont une valeur de log.10 I.S comprise entre 1,52 et 1,62, les horizons (B) ont des valeurs inférieures à 1,50 (1,48 et 1,35).

Si l'on essaie de rapprocher ce comportement des caractéristiques physico-chimiques du sol étudié, on constate alors :

- que le facteur favorable "teneur en argile", qui croît avec la profondeur, l'emporte sur le caractère défavorable "salinité" qui augmente nettement de l'horizon Ap vers les horizons (B) et (C) ;
- que la décroissance du taux de matière organique de Ap vers (B) ne se retrouve pas dans l'évolution de log.10 I.S. ;
- que cette amélioration de la stabilité du sommet vers la base du profil correspond également à une augmentation du pouvoir de gonflement (accroissement de volume de 41,6 % en surface et de 58 % en profondeur - tableau 4-2), fait en accord avec les résultats de Hénin (1938) et Hutter (1964) ;
- qu'il y a croissance parallèle du taux d'agrégats stables sans prétraitement et de la teneur en fer (2,41 % de fer total en Ap, 3,26 % en profondeur - Lagacherie (1982), comme l'ont constaté Combeau (1960) et Martin (1961).

TABLEAU 6.2 : RESULTATS DU TEST EMERSON - PROFIL 2, PARCELLE NON DRAINEE

PRELEVEMENT		PREMIERE PARTIE					DEUXIEME PARTIE			CLASSEMENT DEFINITIF	
DATE DU PRELEVEMENT :	03 - 04 - 84	DATE DU TEST :	04 - 05 - 84								
PROFON. en cm	N° de LABORAT.	ECLAT de 0 à 3	DISP. de 0 à 3	GONFL. de 0 à 5	Hc ¹ de 0 à 5	CLASSE	N° de LABORAT.	DISP. de 0 à 3	CLASSE	EMERSON	I.D.
0 - 1	13	3	0	-	5	AS	13	3	3	3	8
	14	3	0	-			14	3			
1 - 3	15	3	0	-	5	AS	15	3	3	3	8
	16	3	0	-			16	3			
3 - 15	17	3	0	-	5	AS	17	3	3	3	8
	18	3	0	-			18	3			
15 - 30	19	2	0	-	5	AS	19	3	3	3	7
	20	2	0	-			20	3			
30 - 60	21	2	0	-	4	AS	21	1	3 ⁺	3 ⁺	5
	22	2	0	-			22	1			
60 - 80	23	1	0	-	5	AS	23	E	3 ⁺	3 ⁺	4
	24	1	0	-			24	E			

IV - DENSITES APPARENTES, POROSITES ET CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DU SOL DE MARSILLARGUES

Les tests Proctor et Atterberg ayant défini des seuils de teneur en eau caractéristiques du comportement physique du matériau "sol" (remanié), il est nécessaire de voir maintenant dans quelles conditions de telles valeurs peuvent être effectivement atteintes sur le terrain. Il faut pour cela estimer la porosité réellement accessible à l'eau en fonction des variations climatiques saisonnières.

Dans les sols très argileux, tels que ceux de Marsillargues, où les phénomènes de fissuration-retrait sont importants, l'appréciation de la porosité est délicate et nécessite, plus qu'ailleurs, des mesures sur des volumes différents du sol afin d'apprécier les principaux types de pores (porosité fissurale, structurale, d'agrégats).

4.1. - Porosité, rappel et considération générales

Rappelons d'abord que la porosité P d'un échantillon est obtenue à partir de mesures de sa densité apparente D_a et de sa densité réelle D_r , d'après la relation : $P = \frac{D_r - D_a}{D_r} \times 100$.

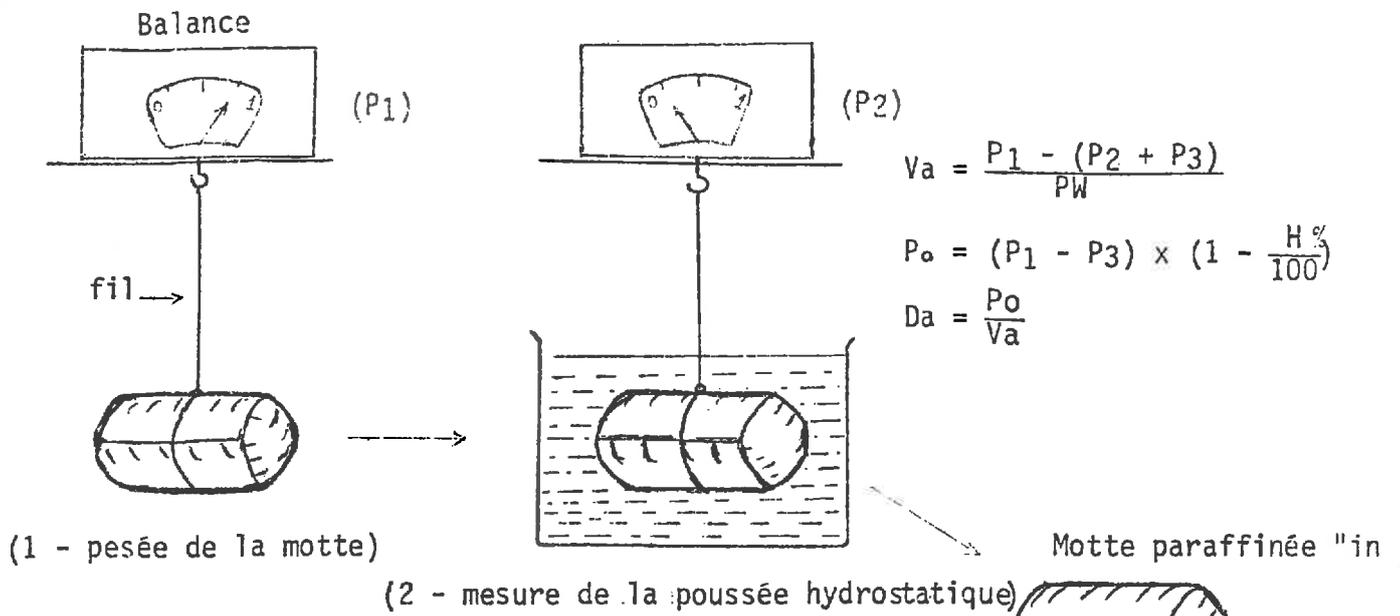
La densité apparente D_a du même échantillon s'obtient par la mesure de son poids de terre sèche P_s et de son volume apparent V_a , puisque $D_a = \frac{P_s}{V_a}$.

Suivant la taille de l'échantillon, la porosité ainsi mesurée concerne une ou plusieurs catégories de pores.

L'étude des propriétés mécaniques et du comportement hydrique d'un matériau "sol" consiste généralement en une appréciation de la répartition de l'eau et de l'air dans l'espace poral du sol, de l'énergie de rétention de cette eau au sein de ce matériau, tous éléments dépendant de la géométrie de l'espace poral. Il est souhaitable pour cela d'utiliser des méthodes prenant en compte des matériaux non remaniés, pas trop desséchés, afin de limiter au maximum les modifications d'organisation de la phase solide.

Pour une méthode donnée, la qualité des résultats dépend non seulement de la taille et de la nature des échantillons, mais aussi du nombre de répétitions des mesures effectuées.

1ère PHASE



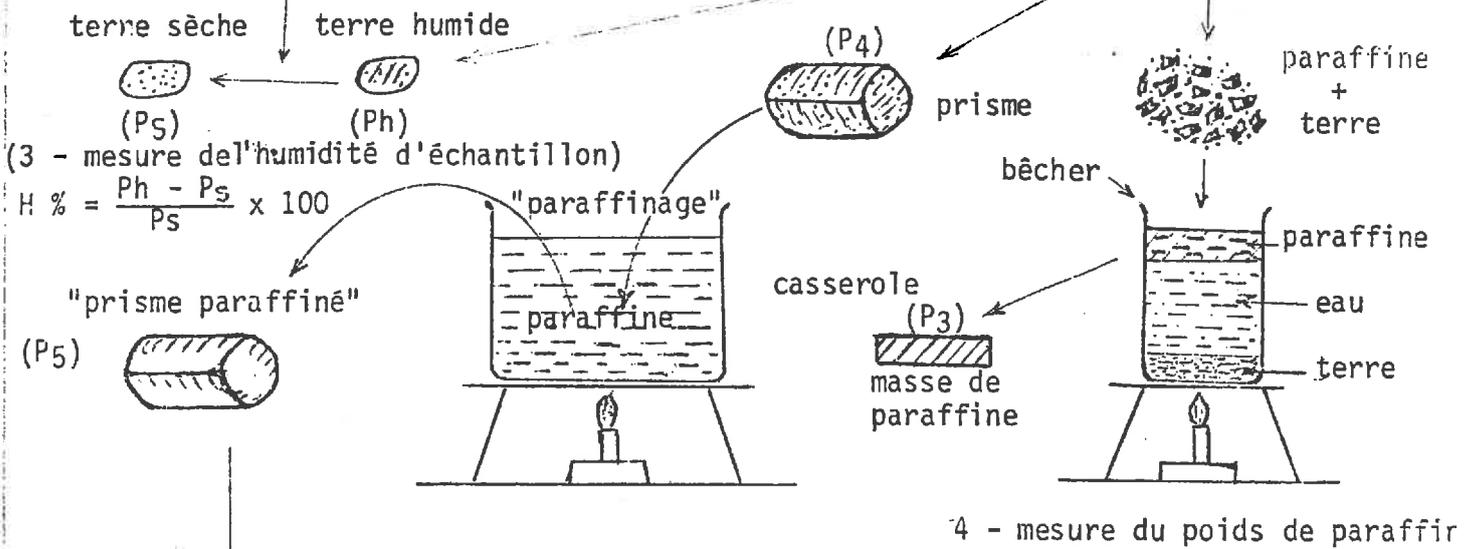
$$V_a = \frac{P_1 - (P_2 + P_3)}{P_W}$$

$$P_o = (P_1 - P_3) \times \left(1 - \frac{H\%}{100}\right)$$

$$D_a = \frac{P_o}{V_a}$$

2ème PHASE

passage à l'étuve à 105°C



3ème PHASE

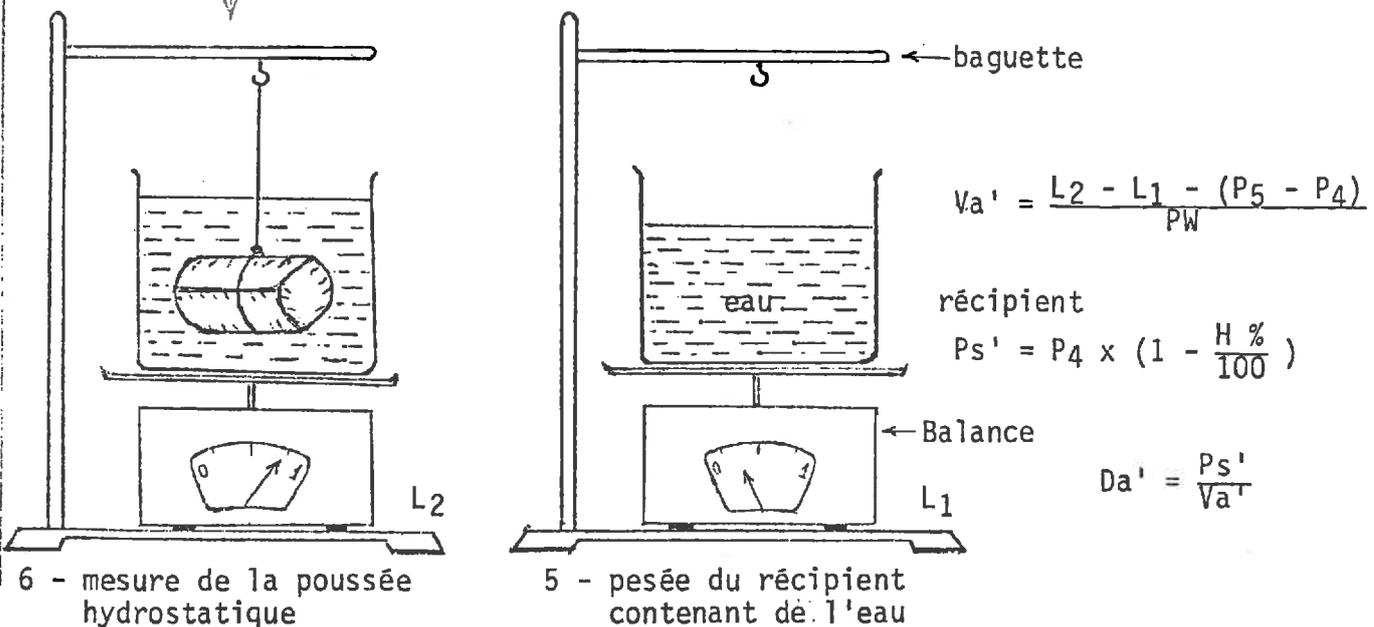


FIG. 23 : PRINCIPE DE LA MESURE DE DENSITE APPARENTE DES GROSSES MOTTES ET DES ELEMENTS STRUCTURAUX PRISMATIQUES

4.2. - Structure du sol, porosité et échantillonnage

Dans les sols argileux fissurables étudiés, l'organisation structurale du sol doit être prise en compte pour le prélèvement des échantillons. De cette manière les mesures concerneront des éléments structuraux naturels, depuis les agrégats polyédriques subanguleux de quelques millimètres de diamètre (surface du sol), jusqu'aux prismes entiers de plusieurs centimètres de diamètre des horizons (B) (volumes de 300 à 1500 cm³).

Concrètement, sur le terrain, dans les deux profils étudiés (champs drainé et non drainé), des mottes de 15 cm de diamètre environ ont été prélevées, puis enduites immédiatement d'une couche assez épaisse de paraffine.

Sur ces échantillons ont été effectuées des mesures de la densité dite totale D_a (bien que l'on ne puisse appréhender ainsi les plus grosses fentes de retrait).

Le paraffinage direct sur le terrain permet de maintenir l'échantillon à sa teneur en eau initiale.

Ensuite, au sein de ces échantillons (après les mesures précédentes comportant le décollement de la paraffine) des éléments sous-structuraux (prismes élémentaires) centimétriques, sont détachés et enduits de nouveau de paraffine. Au laboratoire y sera effectuée la mesure de la densité dite "structurale" ou "de prisme (D_a')". Enfin, sont détachés des agrégats élémentaires de quelques millimètres de diamètre qui permettront de réaliser la mesure de la densité "d'agrégat D_a " (dite aussi densité texturale).

4.3. - Méthodes utilisées

Pour les éléments structuraux "décimétriques" et "centimétriques" (mottes ou prismes grossiers et prismes élémentaires), la mesure du volume apparent se fait par poussée hydrostatique, selon le schéma de la figure 23. La mesure de la teneur en eau de ces mêmes éléments est obtenue par pesée avant et après séchage à l'étuve à 105°C d'un échantillon prélevé au sein des prismes mesurés.

La détermination de la porosité d'agrégat utilise la méthode

Soit :

Pn_1 : poids de la nacelle vide

Pn_2 : poids de la nacelle dans le pétrole

L_1 : lecture de poussée hydrostatique par la nacelle (eng)

L_2 : lecture de poussée par l'échantillon + nacelle (eng)

pa : poids de pétrole poussé par l'échantillon (eng)

ρ_p : densité de pétrole $\left(\frac{g}{cm^3} \right)$

Va : volume de l'échantillon

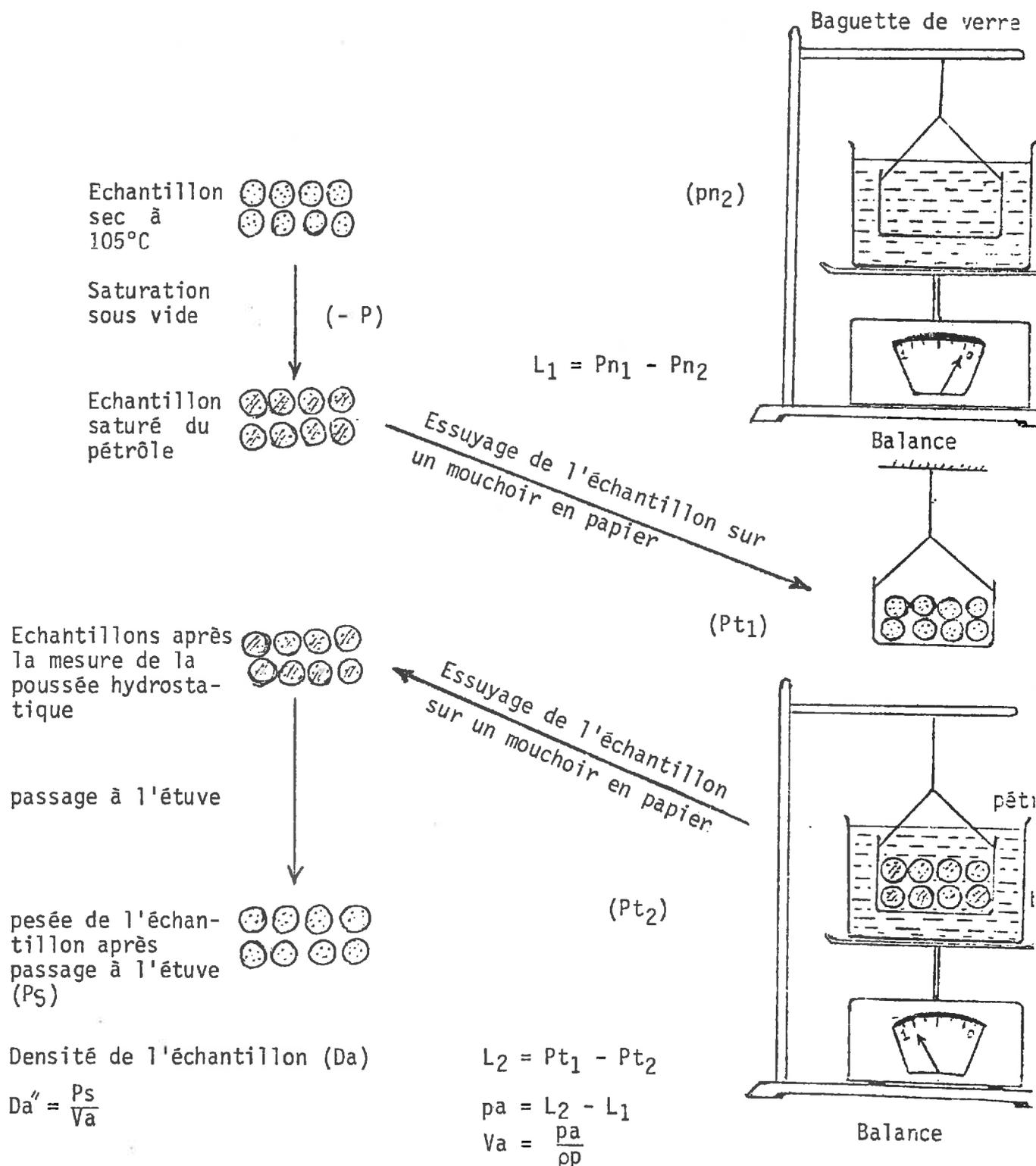


FIG. 24 : PRINCIPE DE LA MESURE DE LA DENSITE APPARENTE D'AGREGAT (Méthode au pétrole - MONNIER, 1973)

du pétrole (MONNIER, 1973) basée sur la poussée d'Archimède (volume apparent), qui est appliquée à des éléments structuraux de 2 à 5 millimètres de diamètre. Le principe des opérations nécessaires est schématisé figure 24.

Pour ces 3 types d'échantillons, quatre prélèvements ont été effectués par horizon. La densité réelle, enfin, a été déterminée par la méthode au pycnomètre de Blank et al. (1955) citée par Ataman, Banin, Chen (1980), appliquée à des échantillons de 5 g, séchés pendant 24 heures à l'étuve à 105°C.

4.4. - Résultats et commentaires

4.4.1. - Expression des résultats

Les tableaux 8.1, 8.2 rassemblent les différents résultats expérimentaux obtenus pour chacun des cinq horizons de chaque profil type (y compris l'horizon tourbeux profond). Sont ainsi regroupées :

- la densité apparente sèche D_a des plus gros échantillons (mottes de surface et prismes) (300 à 1500 cm^3), intégrant un certain nombre de fissures ;
- la densité apparente sèche D_a' d'éléments prismatiques élémentaires (70 à 160 cm^3 environ), prenant en compte la porosité inter-agrégats et intra-agrégats (sous-structure polyédrique) ;
- la densité apparente sèche D_a'' des agrégats élémentaires (2 à 5 mm)
- la densité réelle D_r . de diamètre ;

En prenant comme référence la densité réelle D_r mesurée, les valeurs de D_a , D_a' , D_a'' permettant d'estimer l'importance des différentes formes de l'espace poral.

Ainsi :

- D_a permet d'apprécier la porosité totale (P_t) ou porosité des grosses mottes :

$$P_t = \frac{D_r - D_a}{D_r}$$

(bien qu'en fait toutes les fissures ne soient pas prise en compte).

- D_a' rend compte de l'importance de la porosité des prismes élémentaires (P_a') :

$$Pa' = \frac{Dr - Da'}{Dr}$$

et la différence $Pt - Pa' = Pf$ représente, dans une certaine mesure, la part des fissures vraies dans la porosité totale ;

- Da'' conduit à l'évaluation de la porosité d'agrégat (Pa''), en fait, intra-agrégats :

$$Pa'' = \frac{Dr - Da''}{Dr}$$

La différence " $Pr - Pa''$ " rend compte de la porosité structurale totale, alors que $Pa' - Pa''$ indique la valeur de la seule porosité inter-agrégat (Pi) à l'intérieur des prismes élémentaires. Sur le tableau 8, est donnée aussi, à titre indicatif, la teneur en eau volumique au moment du prélèvement (prismes grossiers et élémentaires).

Avant de discuter ces résultats il faut signaler que la porosité biologique, celle due aux lombrics notamment, est apparemment très modeste sur le site étudié. Des essais de coloration au bleu de méthylène, effectués à l'été 1983 (DURET, 1983) ont en effet surtout mis en évidence une porosité fissurale.

4.4.2. - Variabilité des résultats

Si l'on examine les valeurs de l'écart-type associé aux valeurs moyennes des densités apparentes de chaque horizon, calculées sur 4 échantillons (tableaux 1 et 2 en annexe 3), il apparaît les faits suivants :

- pour les grosses mottes, pour des valeurs de Da variant de 0,34 à 1,38, l'écart type est le plus faible ($\neq 0,025$) en général, sauf pour quelques horizons, différents d'un profil à l'autre ;
- cet écart-type est assez comparable pour Da et Da' (dont les résultats oscillent entre 0,76 et 1,80) avec souvent des valeurs comprises entre 0,03 et 0,05 (parfois en dessous).

Au total la variabilité est relativement faible et les méthodes utilisées sont donc assez fiables.

Concernant l'humidité pondérale, l'écart-type reste assez faible pour les 3 premiers horizons (0,5 à 1,8 au profil "non drainé" et 1,3 à 2,6 au profil "drainé"), où les valeurs absolues varient de 27 à 31 %. Entre 50 et 80 cm, puis dans la tourbe, les écarts-types augmentent plus vite que les valeurs absolues.

TABLEAU 8.1: RESULTATS EXPERIMENTAUX DE DENSITE APPARENTE ET CALCULS DE POROSITE

SITE	PROFONDEUR EN CM	DENSITE DES GROSSES MOTTES Da	DENSITE DES PRISMES Da'	DENSITE DES AGREGATS Da''	DENSITE REELLE Dr	POROSITE FISSURALE Pf	POROSITE INTERAGREGATS P1	POROSITE DES AGREGATS Pa''	POROSITE TOTALE Pt	HUMIDITE VOLUMIQUE
CHAMP DRAINE	3-15 cm	1,234	1,260	1,654	2,589	1,0	15,2	36,1	52,3	38,1
	15-30 cm	1,213	1,268	1,697	2,655	2,1	16,1	36,1	54,3	37,8
	30-50 cm	1,354	1,384	1,754	2,756	1,1	13,4	36,4	50,9	40,4
	50-75 cm	1,075	1,092	1,706	2,656	0,6	23,1	35,8	59,5	53,9
	75 cm et + Tourbe	0,371	0,382	—	1,743	0,6	—	—	78,7	73,5
CHAMP NON DRAINE	3-15 cm	1,184	1,266	1,710	2,566	3,2	17,3	33,4	53,9	36,4
	15-30 cm	1,378	1,411	1,701	2,618	1,3	11,1	35,0	47,4	37,2
	30-60 cm	1,344	1,368	1,689	2,734	0,9	11,7	38,2	50,8	39,2
	60-80 cm	1,197	1,299	1,762	2,627	3,9	17,6	32,9	54,4	45,7
	80 cm et + Tourbe	0,442	0,457	—	1,908	0,8	—	—	76,8	74,6

4.4.3. - Comparaison entre les 2 profils, variabilité spatiale

Globalement, pour la plupart des résultats les chiffres moyens obtenus dans la parcelle drainée et dans le champ non drainé sont relativement voisins.

Pour les mottes et les prismes grossiers, les écarts de densité apparente, à profondeur égale, sont généralement inférieur à 0,15 points.

Pour les prismes élémentaires cet écart varie entre 0,006 et 0,16 (sauf exception pour le 4^e horizon). Pour la densité d'agrégat, moins de 0,06 points séparent les couples de mesures.

Enfin, pour la densité réelle des horizons argileux, les résultats sont quasi-identiques (écart < 0,03 point).

Ces (légères) différences se retrouvent évidemment pour les valeurs de porosité, où, en général, les écarts en valeur absolue sont de quelques %.

4.4.4. - Evolution verticale de la porosité

Pour le profil de la parcelle drainée, toutes les valeurs de densité (D_a , D_a' , D_a'' , D_r) ont un maximum entre 30 et 50 cm pour décroître nettement dans l'horizon sous-jacent et très nettement dans l'horizon tourbeux (75 cm et +). Dans l'autre profil, les densités apparentes sont maximales entre 15 et 30 cm. La densité réelle est encore la plus forte (2,734) entre 30 et 80 cm. Il y a là aussi des horizons moins denses de 60 à 80 cm, puis très peu denses au-dessous.

Exprimées en terme de porosité, ces variations sont moins nettes. Pour le profil "drainé", la porosité totale croit globalement du premier (52,3 %) au 4^eme (59,5 %) puis au 5^eme (78,7 %) horizon.

La porosité d'agrégats reste assez stable dans les horizons argileux (36 %). La porosité inter-agrégats passe de 15-16,1 % en A_p à 13,4 % en dessous pour s'élever à 23 % de 50 à 75 cm. La part des fissures dans la porosité totale décroît à partir du 2^eme horizon (de 2,1 à 0,6 %).

Dans l'autre profil (parcelle non drainée), la porosité totale est assez faible de 15 à 30 cm (47,4 %) puis s'élève à 54,4 % et 76,8 % dans les 4^eme et 5^eme horizons. La porosité d'agrégats varie de plus ou

TABLEAU 8.2: RESULTATS EXPERIMENTAUX DE LA CAPACITE DE RETENTION (Hr %) ET DU POINT DE FLETRISSEMENT (Hf).
RESULTATS CALCULES DE LA MICROPOROSITE ET DE LA MACRO POROSITE.

SITE	PROFONDEUR EN CM	Hf % PONDERALE	Hr % PONDERALE	Da	MICROPOROSITE EN % Hr x Da	MACROPOROSITE en %	POROSITE TOTALE EN %	HUMIDITE VOLUMIQUE EN %	R.U. (Hr-Hf) x Da	R.U. en mm (Hr - Hf) Da x e*
CHAMP DRAINE	3-15 cm	20,4	31,8	1,234	39,2	13,1	52,3	38,1	14,1	21,2
	15-30 cm	23,9	36,4	1,213	44,1	10,2	54,3	37,8	15,2	23,4
	30-50 cm	24,9	36,4	1,354	49,3	1,6	50,9	40,4	15,6	31,2
	50-75 cm	26,1	44,3	1,075	47,6	11,9	59,5	53,9	19,6	49,0
	75 cm et + Tourbe	67,2	77,3	0,371	28,7	50,0	78,7	73,5	3,7	—
CHAMP NON DRAINE	3-15 cm	19,8	31,5	1,184	37,3	16,6	53,9	36,4	13,4	20,1
	15-30 cm	20,7	31,1	1,378	42,8	4,6	47,4	37,2	14,3	21,4
	30-60 cm	25,2	35,3	1,344	47,4	3,4	50,8	39,2	13,6	40,8
	60-80 cm	25,4	39,3	1,197	47,0	7,4	54,4	45,7	16,6	33,2
	80 cm et + Tourbe	61,3	71,1	0,442	31,4	45,4	76,8	74,6	4,3	—

e* = épaisseur d'horizon

moins 3 % par rapport à une valeur moyenne de 35 % observée entre 15 et 30 cm. C'est entre 30 et 60 cm, puis dans la tourbe, que les fissures sont les moins importantes (0,9 %).

4.5. - Capacité de rétention et point de flétrissement

Sur les mêmes profils que précédemment, la capacité de rétention H_r et le point de flétrissement H_f ont été mesurés sur des échantillons séchés et tamisés à 2 mm, avec trois répétitions par horizon.

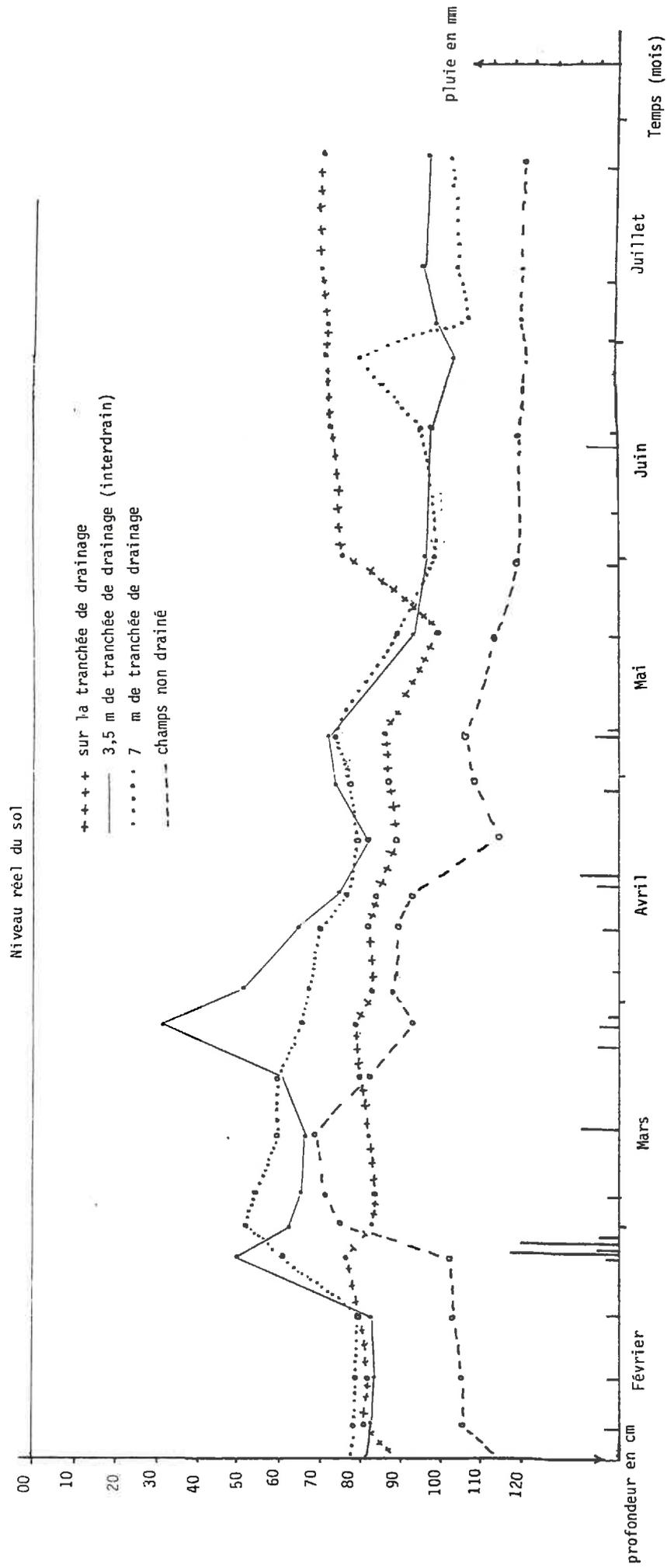
Les méthodes traditionnelles ont été utilisées : presse à plaque de céramique et pF 3,0 (pression 1 bar) pour la capacité de rétention, presse à plaque et pF 4,2 (15 bars) pour le point de flétrissement. Dans le tableau 9, outre les valeurs moyennes de H_r et H_f , ont été reportées les valeurs moyennes de la densité apparente (D_a - mottes et prismes grossiers) et de la porosité totale. De cette manière ont pu être calculées les valeurs de la microporosité ($\mu P = H_r \times D_a$) et déduite celles de la macroporosité ($M_p = P_t - \mu P$). Enfin figurent aussi la réserve utile en eau, exprimée en volume ($R_U = H_r - H_f \times D_a$) ou en mm par horizon $R_U = H_r - M_f \times D_a \times e$ (e dm = épaisseur de l'horizon). Les résultats montrent une augmentation des valeurs de H_f entre le 1er (20 %) et le 4ème horizons (25 - 26 %), l'horizon tourbeux présentant une valeur très élevée (61 à 67 %). La capacité de rétention suit la même évolution, passant de 31 % en surface, à 39 - 44 % de 50 à 80 cm, puis à 71 - 77 % en dessous.

La valeur de la microporosité calculée est de l'ordre de 37 - 39 % en surface (soit à peu près la valeur de l'humidité du sol lors du prélèvement) et de 47% dans le dernier horizon argileux (soit un peu au dessus ou assez en dessous de la teneur en eau mesurée au champ lors du prélèvement). La tourbe présente une valeur peu élevée (29 - 31 %). Dans les horizons argileux la macroporosité calculée varie peu du sommet vers la base du profil dans le sol drainé (13 à 12 %), elle diminue beaucoup dès le deuxième horizon dans la parcelle non drainée (17 à 3 %).

4.6. - Réserve utile en eau et R.F.U.

Exprimée en volume, la réserve en eau R.U. croit globalement du premier 13 - 14 % au 4ème horizon argileux (17 - 20 %), puis chute dans la tourbe (4 %). Calculée par horizon et cumulée pour l'épaisseur 0 - 75/80 cm, la R.U. est de l'ordre de 120 mm.

Fig. N°25 : EVOLUTION DU SOMMET DE LA NAPPE ENTRE LE 1er FÉVRIER ET LE 22 JUILLET 1983 DANS LES CHAMPS DRAINE ET NON DRAINE



La réserve facilement utilisable R.F.U. = $(H_r - H_f) D a \times e \times a$ sera égale à 80 mm pour un coefficient "a" de 0,66 et 60 mm si l'on estime que la structure prismatique grossière ne permet pas une exploitation racinaire importante ($a = 0,50$).

V - INCIDENCE DU REGIME HYDRIQUE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DU SOL ARGILEUX DE MARSILLARGUES

5.1. - Evolution de l'état hydrique en 1983

L'évolution du comportement hydrique du sol du site expérimental a été suivi en 1983 et 1984 (années relativement sèches), de deux manières différentes, par piézométrie et par humidimétrie.

5.1.1. - Piézométrie

En 1983, 22 piézomètres avaient été installés sur le site expérimental, en parcelles drainée et non drainée. En 1984, le nombre de piézomètres a été réduit à 4. Le suivi est de fréquence hebdomadaire.

Les courbes de la figure 25 rendent compte de l'évolution de la nappe au cours du premier semestre 1983 dans 4 situations. Les tendances suivantes s'en dégagent :

- malgré un décalage de plusieurs dm entre les sites extrêmes, l'allure générale des courbes est comparable : remontée de la nappe entre début et fin février 1983 puis descente assez régulière jusqu'en juin. Les pluies postérieures à mars ne modifient pas l'allure générale des courbes.

- Paradoxalement, c'est la parcelle non drainée qui, sauf au début mars (après de fortes pluies), présente la profondeur de nappe la plus élevée (- 70 à - 120 cm). Les sites à l'interdrain, et à 3,50 m du drain, aux courbes très voisines, ont en revanche, une nappe plus près de la surface durant tout le semestre (- 50 à - 110 cm). L'écart de profondeur entre ces deux situations est de l'ordre de 20 cm.

Toutefois, si l'on considère que la parcelle non drainée (- 73 cm NGF au P 19)* a une altitude réelle supérieure de 13 cm environ à celle

* Mesures effectuées par référence à la station de pompage.

de la parcelle drainée (- 60 cm NGF à l'interdrain P14), l'altitude absolue de la nappe resterait assez voisine dans les deux sites**. De toute manière le réseau de drainage n'aura pas eu d'effet marqué au cours de ce premier semestre 1983 (relativement sec au plan climatique).

- La tranchée de drainage révèle une profondeur de nappe intermédiaire entre les sites précédents, voisine de 80-90 cm jusqu'en mai. Début juin le piézomètre installé dans la tranchée (P8) semble montrer une remontée de nappe jusqu'à 70 cm environ. Il semble en fait que l'alimentation de ce tube soit indépendant de la nappe et qu'elle résulte probablement d'arrivées d'eau provenant des drains eux-mêmes (cf teneurs en eau).

- Les "pics" spécifiques observés ponctuellement dans les piézomètres situés à 350m (P11) (1/04/83) ou à l'interdrain (P14) (27/06/83) ressemblent plus à des artefacts qu'à des réponses fiables à des phénomènes climatiques précis***

5.1.2. - Humidimétrie

L'évolution de la teneur en eau en 1983 et 1984 a été suivie à deux niveaux : celui des couches de surface, celui de l'ensemble du sol (profils hydriques). La périodicité des mesures a été hebdomadaire.

Les méthodes utilisées sont la gravimétrie (couches de surface : 0-1 cm, 1-3 cm, 10-15 cm) et la neutronométrie (couches profondes), celle-ci étant "calée" par des mesures gravimétriques périodiques.

Les résultats du premier semestre 1983 sont représentés sur les figures 26 à 29.

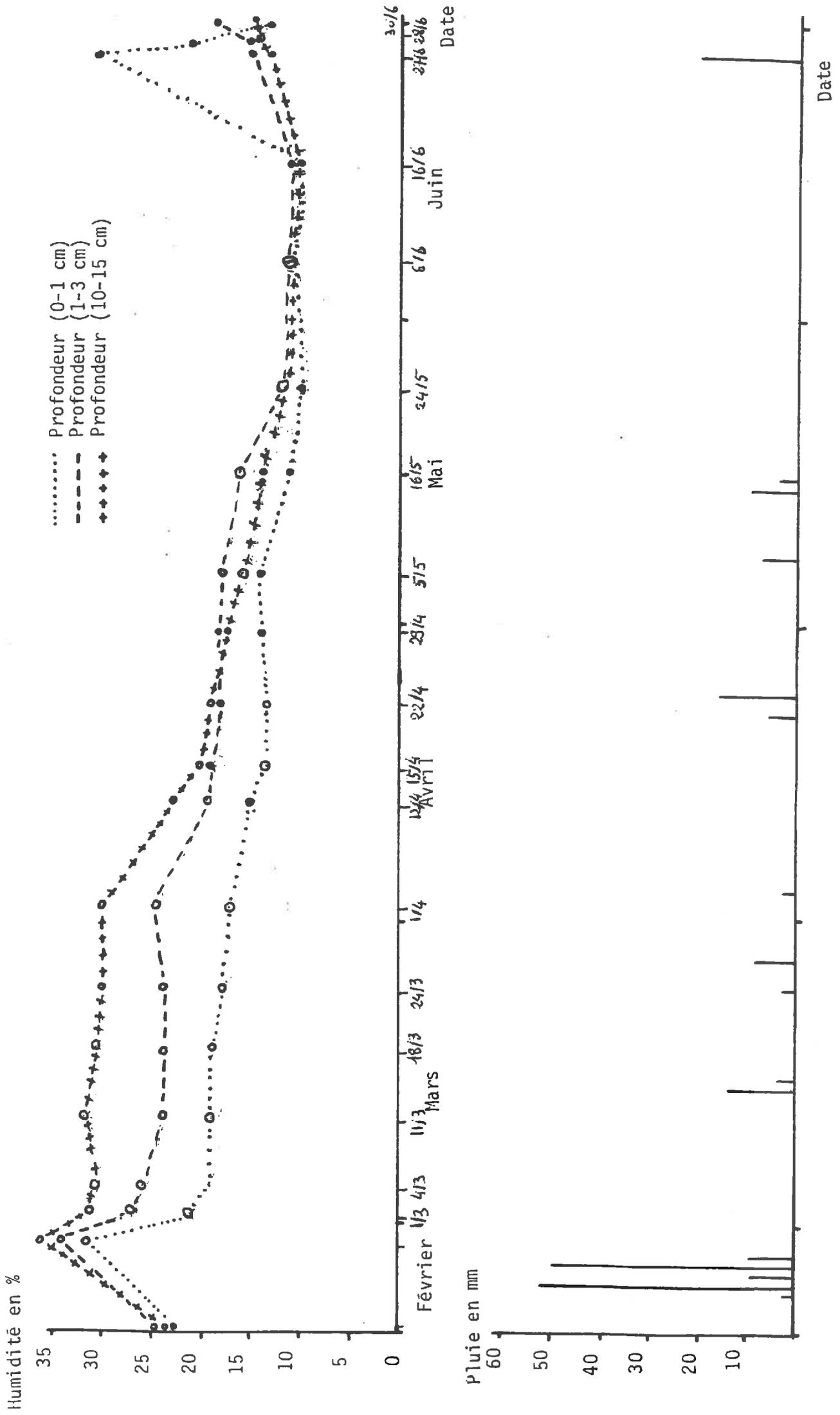
5.1.3. - Evolution du profil hydrique et du niveau de la nappe

Afin de tenter d'expliquer l'évolution de la teneur en eau en profondeur, il était intéressant de rapprocher les profils hydriques des variations du niveau de la nappe relevées dans les piézomètres. Cette comparaison révèle des faits parfois étonnants :

*** En outre le piézomètre de la parcelle non drainée est plus près du grand fossé collecteur (30 m) que les trois autres (70 m) d'où un possible effet de rabattement.

*** Il pourrait s'agir de remontées de nappe liées soit à une forte pression sur l'étang de l'Or (veut), soit à un arrêt prolongé de la station de pompage.

DU 1er SEMESTRE 1983, SITE N°3, INTERDRAINS, CHAMP DRAINE,
EVOLUTION DU 18/2 AU 30/6/83



DU 1er SEMESTRE 1983 - SITE N° 4, CHAMP NON DRAINE, 30 M DU FOSSE ; EVOLUTION DU 18/2 AU 30/6/83.

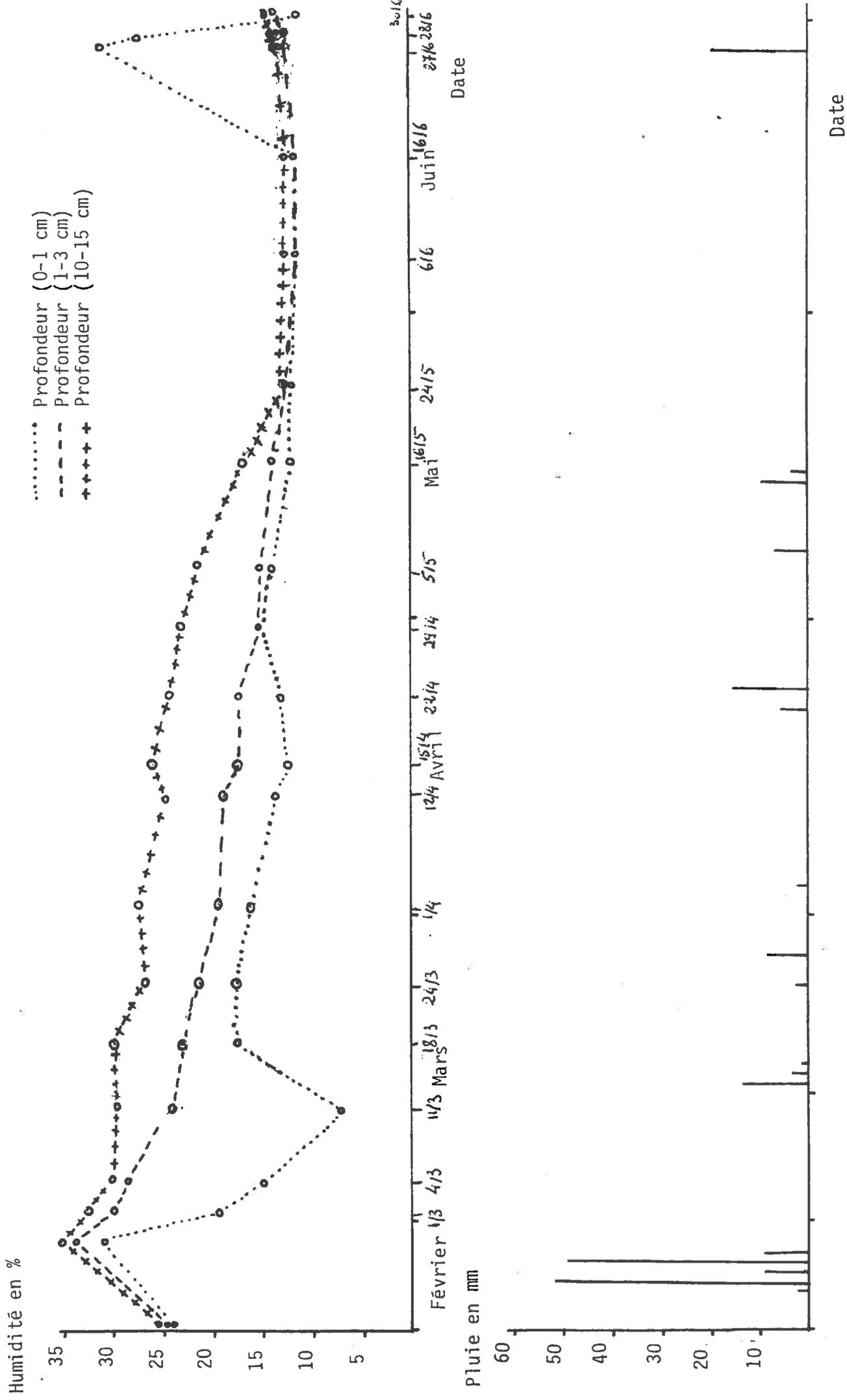
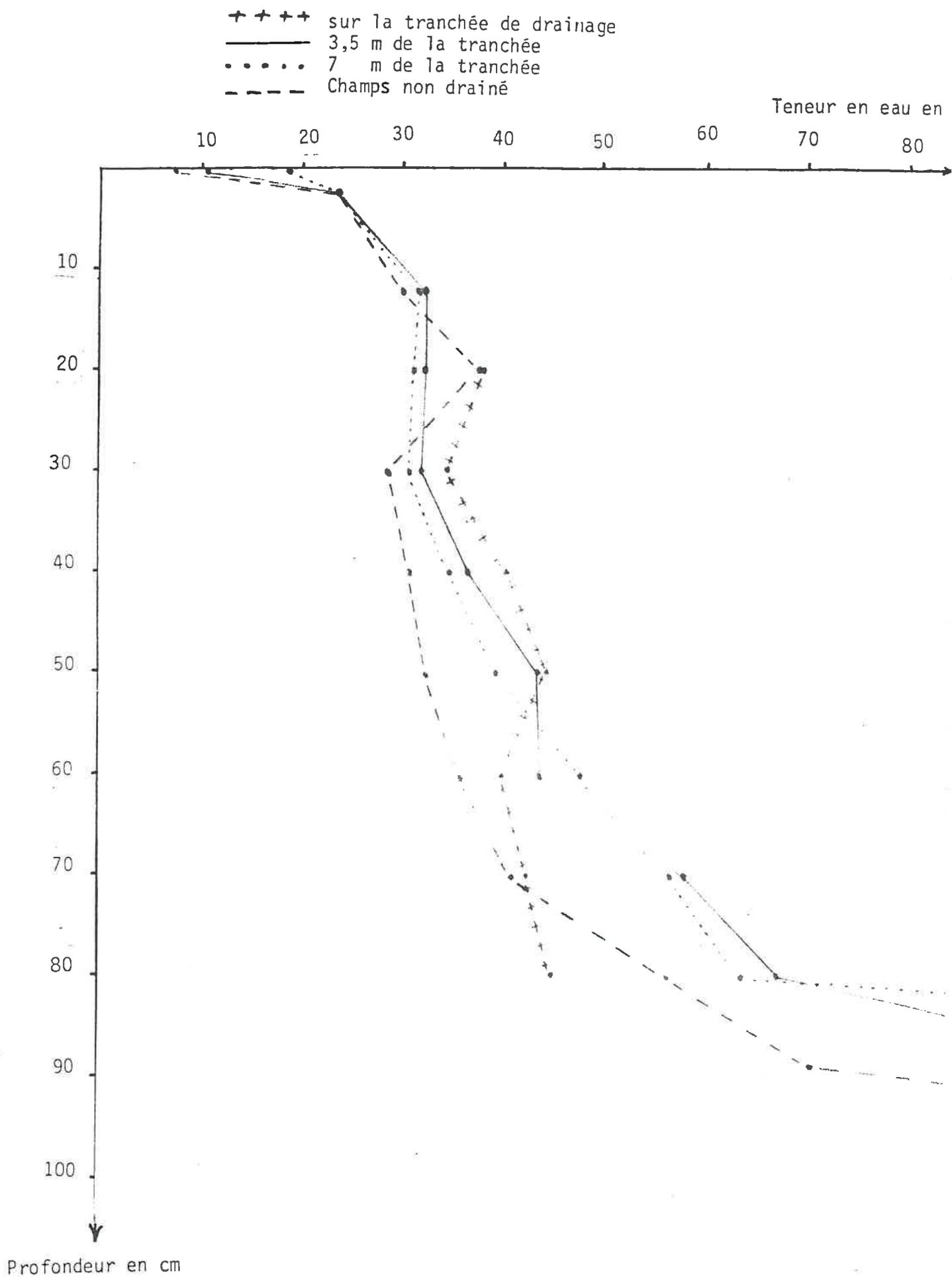


FIG. 28 : PROFILS HYDRIQUES AU 11/3/83



- Ainsi, dans la tranchée de drainage, le piézomètre semble révéler une remontée de la nappe de 83 cm à 72 cm entre le 11/3 et le 30/6 alors qu'à 80 cm la teneur en eau diminue de 45,1 % à 41,2 %. En fait, compte tenu de la profondeur de la nappe à 3,50 m et 7,00 m du drain le 30 juin (respectivement 99 cm et 107 cm), il est probable que le piézomètre placé dans la tranchée de drainage ait été alimenté par l'eau issue des drains et non par la nappe.

- Pour les mesures à 60 et 70 cm dans la parcelle drainée (3,50 m et interdrain), lorsque la nappe affecte ces profondeurs (11/3 et 1/4) la teneur en eau (saturation) est compatible avec la porosité totale correspondante (55 à 60 %). En revanche à 80 cm les valeurs d'humidité mesurées (65 à 70 %) sont bien supérieures à la porosité totale calculée. Ceci peut s'expliquer notamment par les conditions de prélèvement de l'échantillon destiné à la mesure ; étant situé dans la nappe, une part d'eau extérieure à l'échantillon est probablement entraînée lorsque la tarière est remontée en surface.

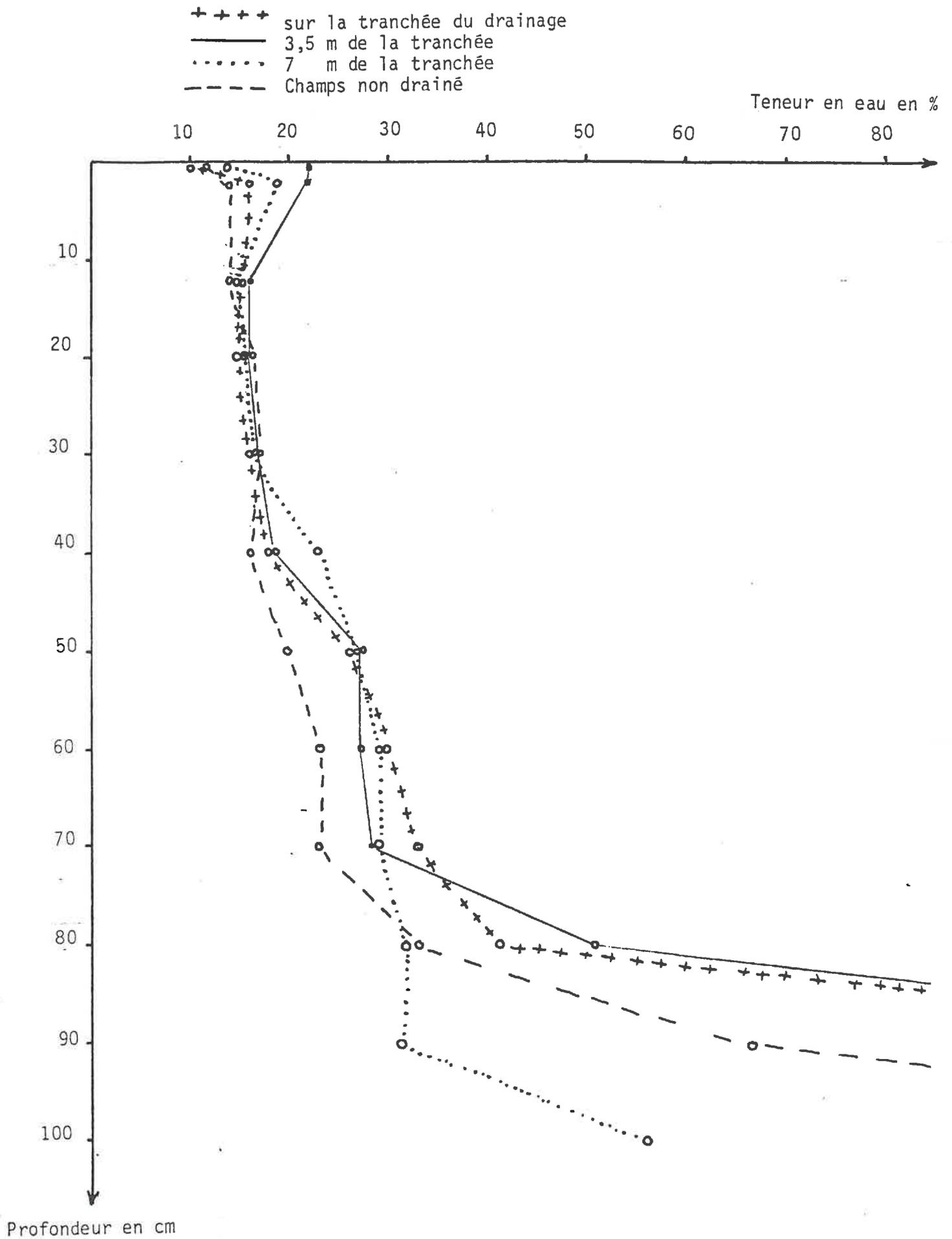
A partir de 90 cm les très fortes teneurs en eau observées aux mêmes dates s'expliquent par les mêmes conditions de prélèvement et aussi par le fait qu'il s'agit d'horizons tourbeux.

Dans le champ non drainé, l'horizon tourbeux étant plus profond (100 cm), les constatations précédentes restent vraies mais décalées de 10 cm en profondeur.

5.2. - Incidence du régime hydrique sur les propriétés mécaniques et physiques du sol argileux de Marsillargues

Connaissant d'une part les valeurs de teneurs en eau caractéristiques des changements de comportements physiques et mécaniques du sol, d'autre part, l'évolution dans le temps de l'humidité de ce même sol, il est possible maintenant de relier ces deux types d'informations et d'en tirer un bilan (tableau II. - fig. 30). On soulignera immédiatement que ce bilan ne pourra être qu'approché dans la mesure où certaines propriétés physiques du sol ont été réalisées sur des échantillons remaniés donc plus ou moins éloignés de leur structure originelle et compte tenu aussi de la périodicité assez lâche des mesures d'humidité.

FIG. 29 : PROFILS HYDRIQUES AU 30/6/83



5.2.1. - Teneur en eau et sensibilité au compactage. Test Proctor

5.2.2.1. - Couches de surface

En considérant comme domaine critique* les teneurs en eau comprises entre w^C et w^M (voire au delà de w^M), il apparaît immédiatement que la couche 0-1 cm n'a atteint ce domaine qu'au mois de février en parcelles drainées et non drainées (108 et 110 jours < w^C respectivement). Pour les couches sous-jacentes le domaine critique dure plus longtemps mais avec des différences sensibles entre ces deux types de parcelles.

Parcelle drainée :

Il y a comportement identique entre les couches 1-3 et 3-15 cm en ce qui concerne la durée de la période à teneur en eau non préjudiciable au tassement : 70 jours < w^C , soit à compter de la mi-avril. Pour les valeurs supérieures, la couche 10-15 cm est plus souvent à une teneur en eau dépassant w^M (40 jours), phénomène inverse dans la tranche 1-3 cm (42 jours entre w^C et w^M).

Parcelle non drainée :

Les couches 1-3 et 10-15 cm présentent des comportements bien différents : alors que la première reste 83 jours au dessous de la valeur critique w^C , cette durée est réduite de moitié dans la seconde (41 jours).

A noter que w^M correspond à une teneur en eau de 27 % environ contre 35 % environ pour Hr. w^C est égale à 20 % soit voisine de Hf. Cela signifie schématiquement et très théoriquement qu'après un épisode pluvieux, le drainage en éliminant l'eau libre amène le sol à une teneur en eau supérieure de 5 % au seuil de sensibilité maximale au compactage et que la teneur en eau optimale vis à vis du (non)compactage, w^C , implique en surface une humidité voisine de celle du point de flétrissement.

5.2.1.2. - Horizons (B)

L'horizon 30-60 cm présente un comportement sensiblement différent entre parcelle drainée et témoin non drainé.

* Rappelons néanmoins la faible susceptibilité au compactage du sol argileux de Marsillargues.

TABLEAU n° 9 : VALEURS DES Hr, Hf, LP, LR, W^M, W^C DU SOL DE MARSILLARGUES

		CHAMP	DRAINE	CHAMP NON DRAINE	
		Couche superficielle	B.P.D. (30-60 cm)	Couche superficielle	B.5.N.D. (30-60 cm)
	Hr	31,8	36,4	31,5	35,3
	Hf	20,4	24,9	19,8	25,2
	LP	32,2	29,3	34,2	32,6
	LR	17,6	16,9	18,1	16,1
	W ^M	26,9	29,7	28,2	29,6
	W ^C	20,1	22,6	20,4	22,4

Hr : capacité de rétention Hf : point de flétrissement
 LP : limite de plasticité LR : limite de retrait
 W^M : humidité maximale Proctor W^C : humidité critique Proctor

TABLEAU n° 10 : VALEURS DE LA TENEUR PONDERALE EN EAU DES HORIZONS (B.P.D. ET B.5.N.D.) EXPRIME EN POURCENTAGE DE LA TERRE SECHE

CHAMPS	HORIZON (30-60)	DATES					
		1/3	1/3	1/4	5/5	6/6	30/6
Drainé	B.P.D.	35,3	37,0	35,4	31,6	29,4	19,6
Non drainé	B.5.N.D.	35,6	34,3	37,3	35,5	32,7	21,5

Dans les premiers cas, dès la mi-mai, la teneur en eau passe au-dessous de W^M (39 jours $< W^M$ et 8 jours $< W^C$). Dans le second, en revanche il faut attendre la mi-juin pour que la teneur en eau passe au-dessous de W^M (9 jours $< W^M$), mais elle reste jusqu'au 30/6 supérieure à W^C .

Comme en surface, les valeurs W^M et W^C correspondent à des teneurs en eau inférieures respectivement à la capacité de rétention et au point de flétrissement.

5.2.2. - Teneur en eau et états de consistance - Limites d'Atterberg

5.2.2.1. - Domaine plastique $> (LP)$

Au cours du premier semestre 1983, les couches de surface n'ont jamais atteint le domaine de plasticité.

En revanche la couche 30-60 cm, plus humide, reste à l'état plastique plus de trois mois (95 jours champ drainé, 102 jours champ non drainé sur 122 jours d'observations). Ce n'est que début juin que la teneur en eau de l'horizon (B) descend au dessous de la limite de plasticité.

Cette observation, bien que théorique, confirme les observations de terrain et tend à montrer en particulier que le recours à une draineuse sous-soleuse reste limité dans ce type de sol.

5.2.2.2. - Domaine friable $(LP - LR)$

Sur 122 jours d'observations la couche 0-1 cm reste 38 jours dans le domaine friable en parcelle drainée contre 11 jours seulement pour la parcelle non drainée. Le même décalage est constaté pour la couche 1-3 cm sous-jacente qui reste 70 jours à l'état friable à l'inter-drain contre 33 jours seulement dans le champ non drainé. En revanche, cet écart disparaît au dessous de 10 cm ainsi que dans l'horizon (B) où les durées respectives sont du même ordre de grandeur (57-76 jours pour la couche 10-15 cm et 27-20 jours pour l'horizon 30-60 cm).

5.2.2.3. - Domaine rigide $(< LR)$

Compte-tenu de conditions climatiques assez sèches c'est donc à l'état "rigide" que les deux premières couches de surface se sont trouvées

FIG. 30 : RELATION ENTRE L'EVOLUTION DE L'HUMIDITE AU COURS DU 1er SEMESTRE 1983 ET LES TENEURS EN EAU CARACTERISTIQUES DES PROPRIETES MECANQUES DU SOL

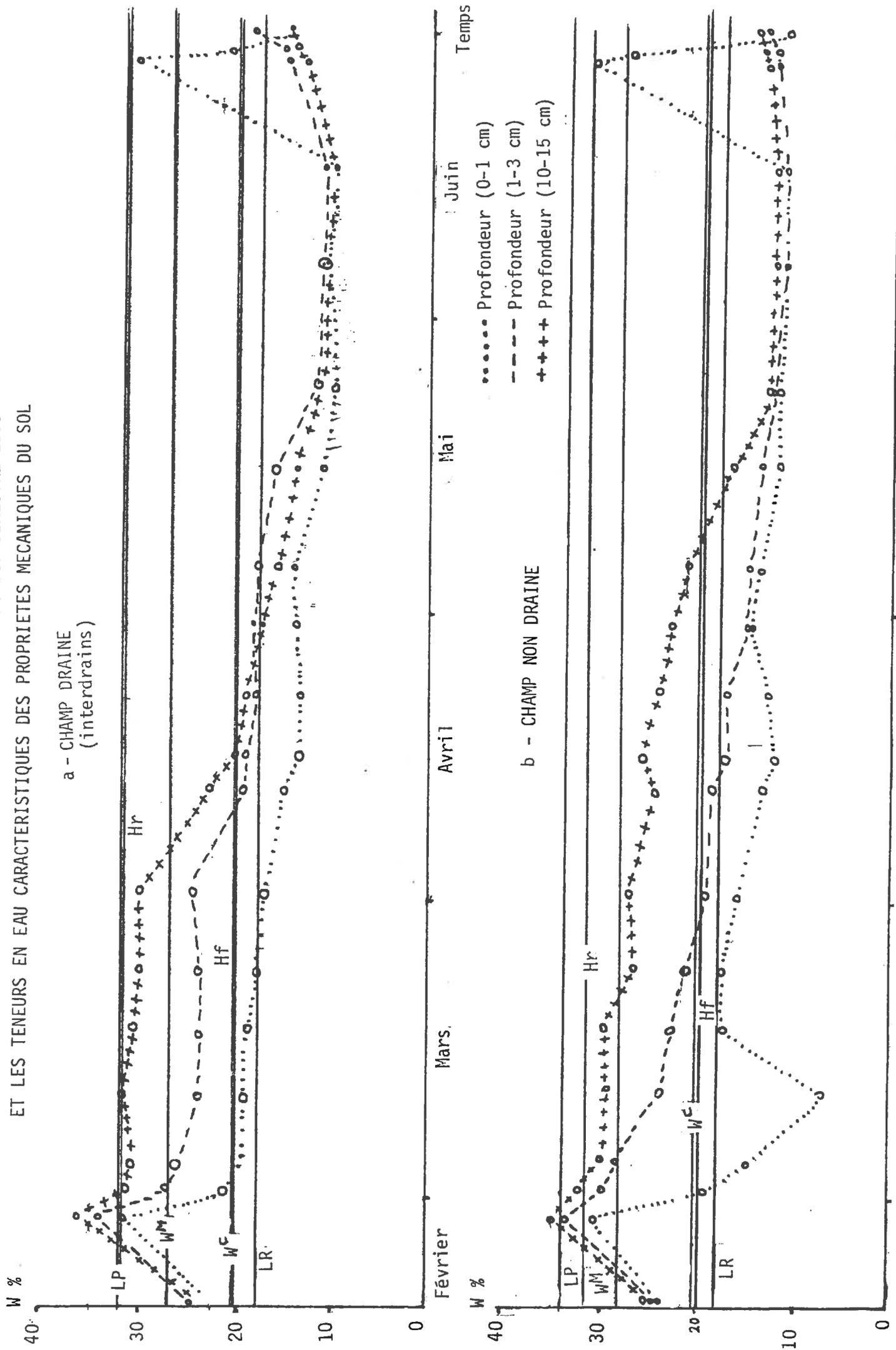


FIG. 31 RELATION ENTRE L'EVOLUTION DE L'HUMIDITE AU COURS DU 1er SEMESTRE 1983 ET LES TENEURS EN EAU CARACTERISTIQUES DES PROPRIETES MECANQUES DU SOL

(B.P.D.)
 Horizon (B) 30-60 cm

CHAMP DRAINE

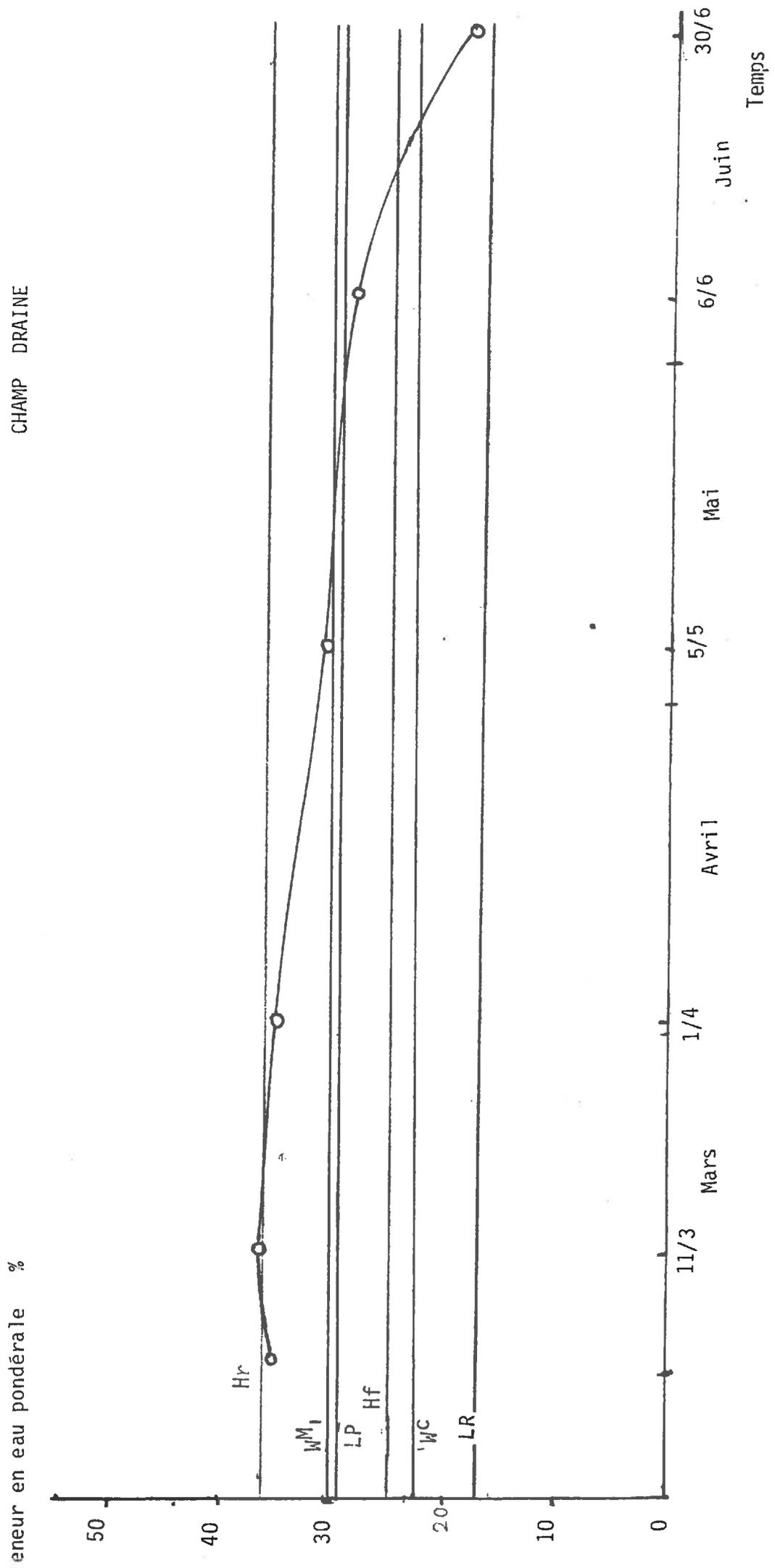


FIG. 32 :
 RELATION ENTRE L'EVOLUTION DE L'HUMIDITE AU COURS DU 1er SEMESTRE 1983
 ET LES TENEURS EN EAU CARACTERISTIQUES DES PROPRIETES MECANIQUES DU SOL

(B-5-ND)

Horizon (B) 30-60 cm

CHAMP NON DRAINE

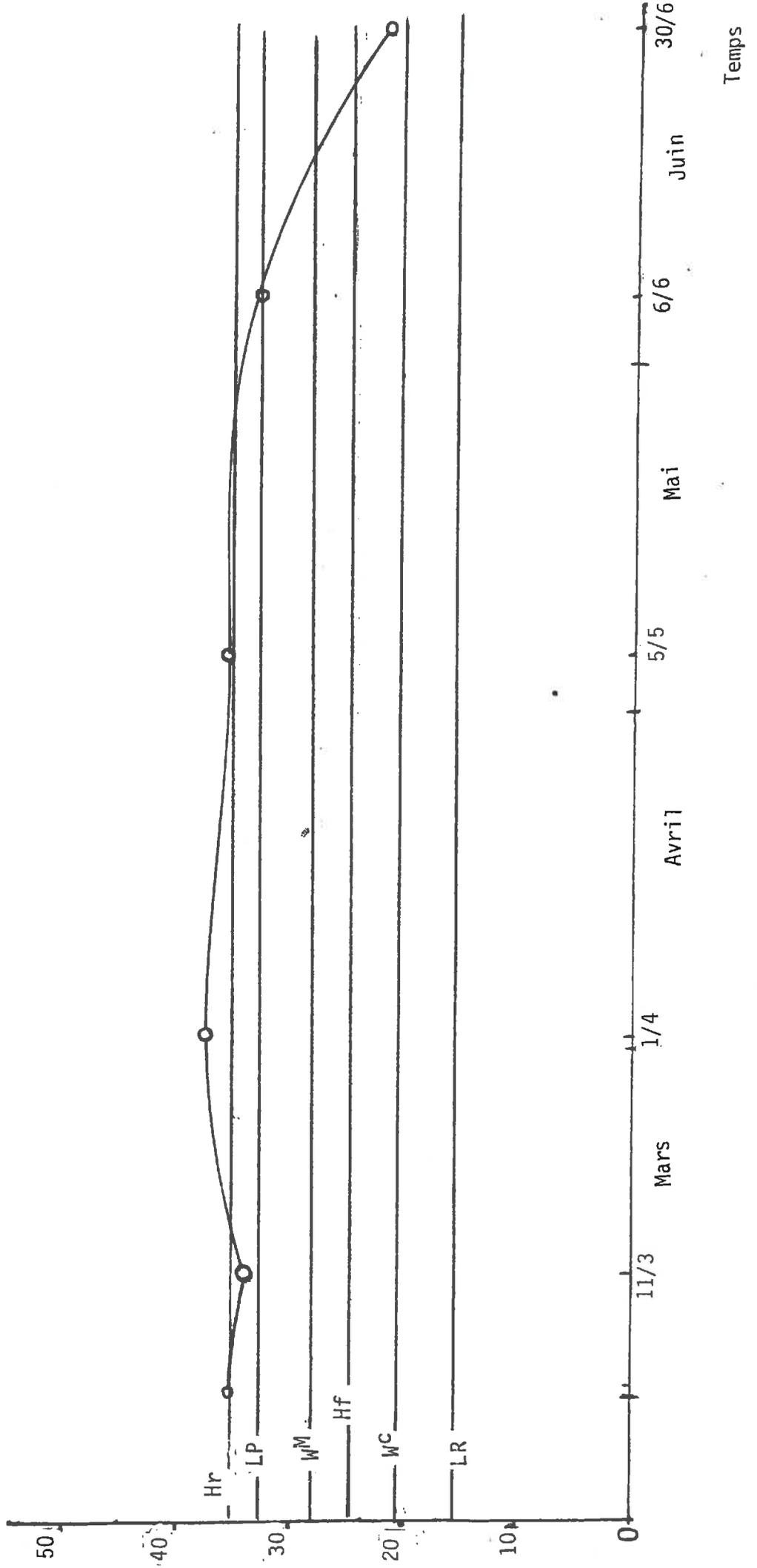


TABLEAU N 11 : DUREE EN JOURS MONTRANT L'EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU, DANS LE TEMPS,
 PAR RAPPORT AUX DIFFERENTES VALEURS-SEUILS : COURBES PROCTOR, LIMITES
 D'ATTERBERG - CAPACITE DE RETENTION ET POINT DE FLETRISSEMENT
 1er SEMESTRE 1983 (1/3 au 30/6) : 122 jours

PARCELLE	COUCHE	> Hr	Hr à Hf	< Hf	> W ^M	W ^M à W ^C	< W ^C	> LP	LP à LR	< LR
CHAMP DRAINE (interdrain)	0 - 1 cm	-	15	107	6	8	108	-	38	84
	1 - 3 cm	2	51	69	10	42	70	2	70	50
	10 - 15 cm	5	46	69	40	12	70	5	57	60
	B.P.D.	12	101	9	75	39	8	95	27	-
CHAMP NON DRAINE	0 - 1 cm	-	19	95	4	8	110	-	11	111
	1 - 3 cm	4	31	87	11	28	83	-	33	89
	10 - 15 cm	8	71	43	30	51	41	1	76	45
	B. 5. ND	70	49	3	113	9	-	102	20	-

au cours du premier semestre 1983. Paradoxalement, c'est dans la parcelle non drainée que les durées correspondantes sont les plus grandes (111 jours contre 84 pour la couche 0-1 cm et 89 contre 50 pour la couche 1-3 cm). Toutefois, à la base de l'horizon Ap (10-15 cm) l'état "rigide" a duré un peu plus longtemps à l'interdrain (60 jours contre 45).

5.2.3. - Teneurs en eau et réserve en eau du sol

La figure 30 et le tableau n°11 montrent que la teneur en eau de l'horizon Ap se situe très longtemps en dessous du point de flétrissement : 107 jours (drainé) et 95 jours (non drainé) sur 122 pour la couche 0-1 cm, 69 et 87 jours pour la couche 1-3 cm, 69 et 43 jours dans la couche 10-15 cm. Heureusement (pour le blé), le dessèchement de l'horizon (B) a été moins sévère : les conditions (théoriques) d'un flétrissement permanent n'ont été atteintes que 9 jours (drainé) et 3 jours (non drainé) à la fin du mois de juin.

A titre indicatif, les rendements en blé dur (variété Printal) mesurés sur deux placettes de 120 m², l'une dans le champ drainé, l'autre dans le champ non drainé ont été respectivement de 40,8 et 36,9 quintaux/ha (moisson le 6 juillet).

C O N C L U S I O N G E N E R A L E

A l'issue des travaux entrepris en 1983 (DES) et en 1984, l'objectif recherché, c'est à dire, la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques d'un sol argileux représentatif des plaines littorales à nappe salée du Languedoc, a été atteint. Il a montré en particulier une relative uniformité de ces caractéristiques (test Proctor - limites d'Atterberg) à l'échelle des deux parcelles étudiées, l'une drainée, l'autre seulement assainie par fossés. Le test Proctor a révélé une susceptibilité assez modeste de ce sol au compactage.

Les tests de stabilité structurale (Emerson, Hénin) montrent un comportement moyennement favorable, même en profondeur (malgré la salinité), facteur sans doute attribuable à la richesse en argile et en calcaire du sol étudié.

L'estimation de la porosité, à partir d'échantillons non remaniés de taille décroissante, a conduit à des valeurs élevées de la porosité totale (50 à 60 %) et à des valeurs également importantes de la porosité d'agrégat (appelée aussi porosité texturale : 35 % environ). La réserve utile en eau, pour les horizons argileux (80 cm) est voisine de 120 mm.

Un suivi de l'état hydrique du sol au cours du premier semestre 1983 (piézométrie, humidimétrie), autre objectif, a été également atteint, même si la périodicité des mesures n'a pas permis d'étudier dans le détail l'évolution de la teneur en eau après un épisode pluvieux.

La confrontation de ces deux grands types de données, seuils d'humidité caractéristiques du comportement physique, et évolution du profil hydrique, a permis de dégager quelques grandes orientations que l'on doit relier à des conditions climatiques assez sèches globalement :

- Les couches de surface restent la plupart du temps dans le domaine critique vis à vis de la susceptibilité au tassement (heureusement modeste dans ce type de sol) ;

- L'horizon (B) reste plastique durant plusieurs mois, critère à priori peu favorable à un drainage par draineuse sous-soleuse.

- Les couches de surface sont souvent au dessous du point de flétrissement mais l'horizon (B) garde une teneur en eau comprise dans le domaine de disponibilité de l'eau (entre H_r et H_f) ;

- Il n'y a pas eu de différence significative de comportement entre parcelle drainée et parcelle non drainée.

Bien que critiquable dans sa démarche (comportement physique apprécié à partir d'échantillons souvent remaniés, donc éloignés de leurs propriétés in situ), notre travail nous semble pouvoir apporter des éléments de réponse intéressants pour raisonner le drainage et l'après-drainage.

Divers compléments sont souhaitables pour affiner les références acquises :

- Etude de l'évolution de la teneur en eau à différents pF (dont capacité de rétention et point de flétrissement) pour le sol du site étudié, en utilisant des mesures sur échantillons non remaniés, (prélèvements des cylindres de sols).

- mise en oeuvre de tests complémentaires : machine à tasser, appréciation de l'adhésivité.

- suivi plus détaillé de la teneur en eau (sonde à neutrons), de la densité apparente (sonde γ), de la hauteur de nappe (piézographe).

La connaissance de ces données devrait alors permettre de tester et adapter un modèle de prévision des jours disponibles pour les diverses façons culturales, moyen permettant ainsi de mieux raisonner les itinéraires techniques sur ce type de sol particulier.

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

- BOIFFIN J., MONNIER G. (1982) - Etats, propriétés et comportements des sols ; recherche et utilisations des critères de fertilité physique - BTI n° 370/332. 401, 407.
- BONNEAU M. et SOUCHIER B. (1979) - Pedologie Tome 2 - Constituants et propriétés du sol. pp. 234 - 250. Edit. Masson.
- BRIDIER M. (1981) - Etude d'un réseau de drainage en sol argileux hydromorphes et salés (LASAGUES - 34). Mémoire D.A.A. E.N.S.A. Montpellier 57 pages.
- BRIDIER M. (1982) - Sols et drainage dans la plaine de Marsillargues (Hérault), Juin 1982. SES n° 534. I.N.R.A. Montpellier. 26 p.
- DALLEINE E. (1978) - Les façons de travail du sol. Etude du C.N.E.E.M.A. n° 463. pp. 6, 11.
- DAMOUR L., DUPRAT J., JANIN J.L. & ROLLAND L. (1978) - Le drainage des sols lourds dans les marais de Charente Maritime - 10è Congrès C.I.I.D. Irrigation et Drainage - Athènes. pp. 63-89.
- DEMOLON A. (1952) - Dynamique du sol - Tome 1, 5ème Edition. pp. 185-214.
- DURAND J.H. (1958) - Les sols irrigables. Etude pédologique, pp. 40, 410. 181 pages.
- FAURE A. (1971) - Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols. Ann. Agron. 22 (5), pp. 487, 513.
- FAURE A. (1974) - Des caractéristiques mécaniques de la fraction argileuse dans le mécanisme de tassement des sols. C.R. Acad. Scien. Paris C. 278, pp. 1175, 1178.
- FAURE A. (1976) - Influence de la phase argileuse sur la susceptibilité au tassement des sols. Science du Sol n° 2. pp. 121, 130.
- FAURE A. (1976) - Tassement par le gros matériel. Fermes modernes. pp. 27, 30.
- FAURE A. (1978) - Comportement des sols au compactage. Rôle de l'argile et conséquence sur l'arrangement des grains. Thèse Doc. es Science. Université Scientifique et Médicale de Grenoble. 136 p.

- FAVROT J.C., BOUZIGUES R., VAQUIE P.F. - Efficacité et pérennité des réseaux de drainage en sols argileux halomorphes (solontchaks "sodiques") du Languedoc. Bilan de vingt années d'irrigation-drainage. 12 congrès CIID. Port-Collins. USA (à paraître en 1984).
- HENIN S. (1976) - Cours de physique du sol. Tome 1 - ORSTOM - Editeur
Initiations et documentations techniques. N°29. 159 p.
- HENIN S., MONNIER G. et COMBEAU A. (1958) - Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. ann. Agron. 1, 88 71-90.
- HERRMANN P. (1976) - Travaux pratiques, D.A.A. Science du Sol - Aménagements et D.E.A. Agronomie (option Pédologie). E.N.S.A. Montpellier
63 p.
- HILLEL D. (1971) - Soil and Water. Physical principles and processus
Academic press. New York. 288 p.
- LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (1970) - Modes opératoires du
Laboratoire central des Ponts et Chaussées. Limites d'Atterberg
(Limite de plasticité).
- LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (1970) - Modes opératoires du
Laboratoire central des Ponts et Chaussées. Essai Proctor. DUNOD.
1970.
- LAGACHERIE P. (1982) - Colmatage argileux et ferrique, réseaux de drainage.
D.A.A. - E.N.S.A. Montpellier. 48 pages.
- LESAFFRE B. et HERVE J.J. (1982) - Le Drainage Agricole. Principes de
fonctionnement. C.E.M.A.G.R.E.F., B.I. n° 293.
- LUC J. (1978) - Caractérisation hydrique des sols, utilisation des mesures
d'humidité et charge in situ. Comparaison avec les mesures de
Laboratoire. Thèse de Docteur de Spécialité en Agronomie. Option
Pédologie. USTL-ENSA. Montpellier. pp. 21, 26.
- MANCHON B. (1982) - Etude de la sensibilité au compactage. Application aux
sols agricoles de la Haute Vallée du Rhône. D.A.A. E.N.S.A.
Montpellier. 31 pages.
- MANIERE G. (1973) - Propriétés mécaniques du système sol - air - eau.
B.T.I. 278, pp. 195 - 200.

- MANIERE G. (1973) - Contribution à l'étude des zones compactées des horizons superficiels d'un sol complanté de vignes et désherbé chimiquement. Utilisation de la méthode Proctor. Thèse de Doctorat 3ème Cycle. U.S.T.L. Montpellier. 116 pages.
- MATTAUER H. (1983) - Comportement physique et mécanique du sol. CULTIVAR n° 162. pp. 26, 27.
- MONNIER G. et STENGEL P. (1982) - Le comportement granulométrique des sols. Un moyen de prévoir leur fertilité physique. BTI n° 370 - 372. pp. 503, 511
- MONNIER G., STENGEL P. et FIES J.C. (1973) - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. Agron. 24, 5. pp. 533 - 545.
- OLLIER C. et POIREE M. (1981) - Irrigation. Les réseaux d'irrigation. Théorie, technique et économie des arrosages. Edit. pp. 217, 227.
- PAPY F. (1982) - Praticabilité du milieu et itinéraires techniques. BTI n° 370, 372. pp. 375, 381.
- PONS Y. et MARTINEAU G. (1983) - Description d'un test de comportement à l'eau pour la détermination de la classe de stabilité structurale des sols argileux des marais de l'Ouest, Note du laboratoire. I.N.R.A. S.A.D. St Laurent de la Prée. 16 p.
- SOCIETE D'APPLICATIONS MECANIQUES ET OPTIQUES - Appareillage d'essai de retrait (19) n° 88. Notice UT 88 (M & O).
- STENGEL P. et FAURE A. (1978) - Comportement mécanique d'un sol argileux soumis au roulage d'engins agricoles. C.R. Acad. Agr. pp; 119, 124.
- TERZAGHI K. et PECK R.B. (1961) - Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et aux bâtiments. DUNOD Ed. pp. 35, 37.
- VAQUIE P.F. (1982) - Le drainage en Bas Languedoc. Efficacité et pérennité de réseaux implantés depuis 1962. Mémoire. E.N.I.T.R.S Strasbourg 182 pages.

I.N.R.A. - D.R.S.A.D.
Centre expérimental
de Saint-Laurent-de-la-Prée
74500 FOUGES

Confronté à des comportements très différents des sols de marais vis-à-vis du drainage enerré, de la dispersion de surface et de la reprise en masse, nous avons voulu trouver un test permettant de pronostiquer la stabilité structurale de ces sols.

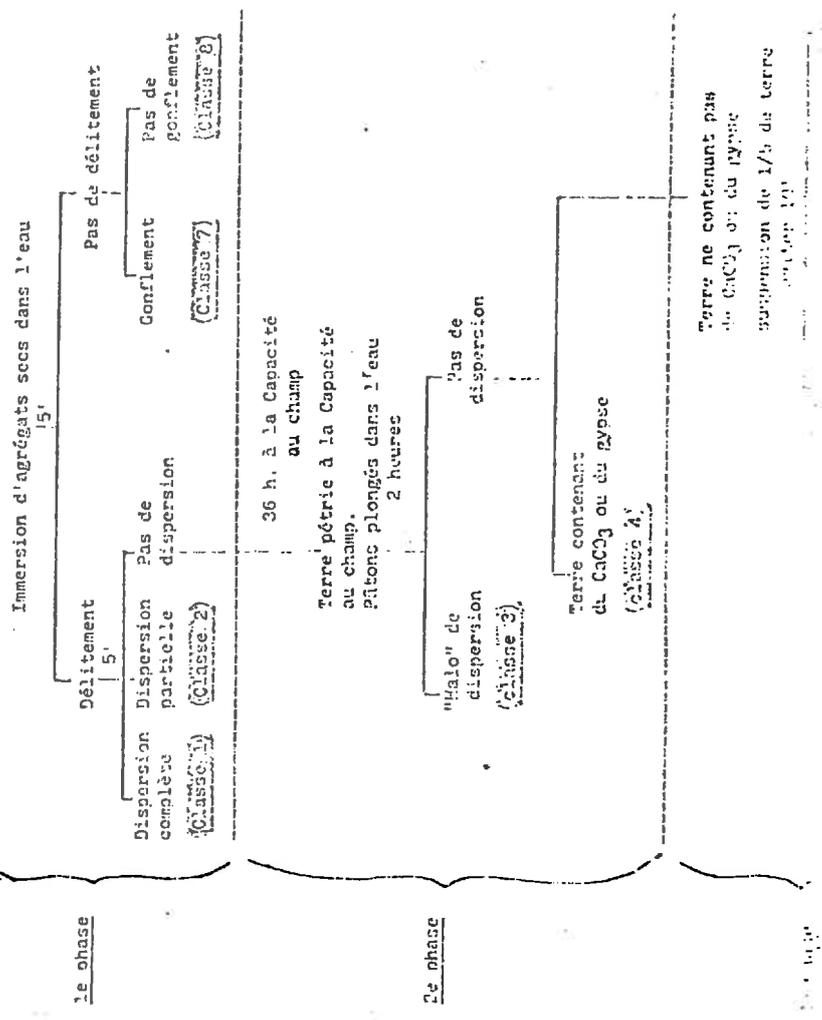
Le test que nous décrivons a été mis au point par EMERSON (1967) et utilisé par GREENLAND et al (1975) pour classer les sols anglais et gallois. Nous nous sommes inspirés de ces deux articles pour la réalisation du test qui s'est faite au domaine expérimental I.N.R.A.-S.A.D. de Saint-Laurent-de-la-Prée sur plus d'un millier d'échantillons de sols de marais uniquement. (Argile : 40 à 60 % ; Limon : 40 à 60 %)

NOTE de LABORATOIRE

DESCRIPTION D'UN TEST DE COMPORTEMENT A L'EAU
POUR DETERMINER LA CLASSE DE STABILITE STRUCTURALE
DES SOLS ARGILEUX DES MARAIS DE L'OUEST

I - PRINCIPE ET DESCRIPTION GENERALE DU TEST

Le test se déroule en trois phases selon le schéma suivant :



d'après W. EMERSON (1967)
DJ. GREENLAND et al (1975)

YVES PONS
GUY MARTINIAN
1975

" Six agrégats de 3 à 5 mm de diamètre, pris au hasard sur un échantillon de sol séché à l'air, sont séparés en deux lots de trois et chaque lot est plongé dans 20 ml d'eau distillée dans un petit bocal de verre ou de plastique à fond plat.

Les sols dont les agrégats se délitent, sont mis dans les classes 1 à 6 ; ceux dont les agrégats restent entiers sont dans les classes 7 et 8. Si après cinq minutes, les agrégats sont intacts et manifestent un gonflement visible, le sol est en classe 7 ; s'il n'y a ni gonflement ni délitement apparent, il est en classe 8. Si la dispersion de l'argile est manifestement complète (5 minutes après le délitement), le sol est dans la classe 1. Si la dispersion est incomplète, le sol est dans la classe 2.

Les échantillons dont les agrégats éclatent mais ne dispersent pas immédiatement sont soumis pendant 36 heures à une humidité correspondant à la capacité au champ. L'échantillon humide est ensuite pétri avec une spatule, puis on forme des cubes grossiers d'environ 4 cm de côté que l'on plonge dans l'eau distillée comme auparavant.

Si après deux heures on peut détecter un "halo" d'argile dispersée autour du matériau du sol, on classe ce sol en 3. Si on ne voit pas de dispersion, on prépare une suspension de 1 pour 5 de sol pétri dans de l'eau distillée que l'on agite circulairement pendant 10 minutes et que l'on laisse reposer pendant 5 minutes. Si la dispersion apparaît après ce traitement plus vigoureux, le sol est classé en 5. S'il reste flocculé et ne possède ni CaCO_3 ni gypse, il est en classe 6. S'il y a présence de carbonate de calcium ou de gypse, ces sols sont en classe 4.

- II - MATÉRIEL UTILISÉ

Pour la première phase :

- 1 spatule servant à l'immersion des agrégats

- acide HCl Normal
- boîte de pétri ou assiette
- papier blanc

Pour la deuxième et troisième phase :

- 30 bûchers de 60 ml environ ; diamètre 30 à 35 mm
- 1 doseur d'apporteur (20 ml)

Pour la deuxième et troisième phase :

- 2 bacs échantillon d'environ 40 x 30 x 5 cm
- 2 bûchers de moules 40 x 30 x 5 cm

- papier essuie-mains
- spatule de malaxage
- quelques verres de montre

Pour la troisième phase :

- 1 balance

- quelques Erlenmeyers (petits)

Communs pour les trois phases :

- sous-mains noir mat
- eau distillée
- 1 agitateur circulaire
- 1 minuterie

- III - METHODES

III.1. PRELEVEMENTS ET CONDITIONNEMENT DES ECHANTILLONS ET AGRÉGATS

III.1.1. Prélèvement et conditionnement des échantillons

Les prélèvements de sol se font en période hivernale (décembre à avril), lorsque l'état du sol se trouve dans des conditions identiques (sol en état de non-fleur), sans lissage, ni compression, ni malaxage.

Le séchage du sol se fait à l'air libre à la température du laboratoire pendant un mois environ et le test n'est jamais réalisé dans un délai de plus de trois mois après le séchage.

III.1.2. Prélèvement des agrégats

Les agrégats de 3 à 5 mm sont prélevés au hasard mais ne doivent pas s'écraser sous les doigts ni comporter d'arêtes trop vives qui se délitent plus facilement pouvant fausser le test d'éclatement. Simultanément, on prélève une motte de 30 à 40 mm au hasard pour effectuer le test à l' HCl (présence de CaCO_3) et pour observer la présence de gypse cristallisé.

III.2. LE TEST

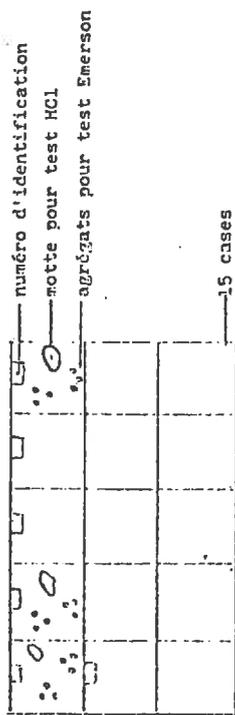
III.2.1. Première phase

Un seul opérateur peut travailler par séries de 15 échantillons, soit 30 bûchers.

Les 6 agrégats prélevés sur chaque échantillon seront divisés en deux groupes de trois.

EXEMPLE DE CARTON SERVANT A PREPARER LES SERIES

de QUINZE ECHANTILLONS

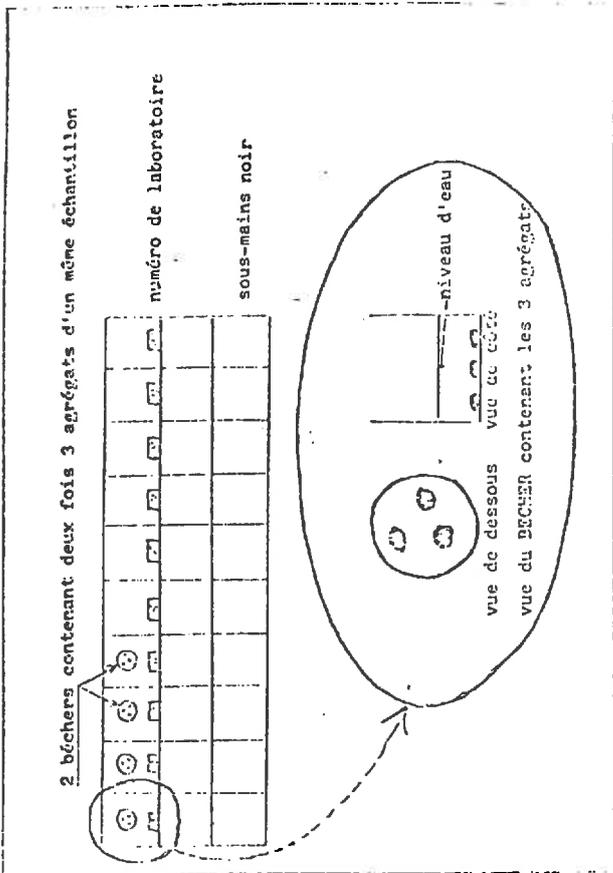


III.2.11 : Mise en place :

Numérotter les béciers de 1 à 30 suivant le schéma ci-dessous. Y verser 20 ml d'eau distillée. Placer les 30 béciers sur les sous-mains. Plonger délicatement les 3 agrégats à l'aide de la petite spatule (le choc de l'agrégat au contact de l'eau pourrait influencer l'éclatement).

Les agrégats ne doivent pas toucher les bords du flacon ni se toucher entre eux. (voir schémas page suivante)

EXEMPLE DE MISE EN PLACE DES BECIERS POUR LA PREPARATION PHASE :



Toute la série est immergée pendant un temps minuté car le facteur temps est très important. L'éclatement et la dispersion évoluent quelquefois très vite.

III.21.2 : Lecture :

III.21.2.1 : Eclatement

Observation après 5 mn d'immersion. Note de 0 à 3.

- Note : 0 = aucun des agrégats n'est fragmenté
 1 = 1 agrégat est fragmenté
 2 = 2 agrégats sont fragmentés
 3 = 3 agrégats sont fragmentés

La chute de grains de sables ou d'autres particules de surface de l'agrégat n'est pas considérée comme un éclatement.

III.21.2 : Dispersion

Observation après 10 mn d'immersion. Note de 0 à 3+ suivant tableau ci-dessous :

Note : 0 = si pas de dispersion

1 = si voile laiteux autour des petites miettes issues de l'éclatement

2 = si 1/3 du fond est recouvert d'un halo

3 = si 2/3 du fond sont recouverts d'un halo

3+ = si le halo recouvre la totalité du fond

3+ = si le halo recouvre la totalité du fond et si l'agrégat n'a plus de relief

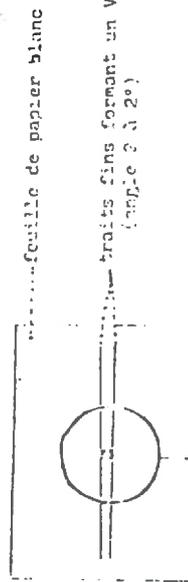
III.21.3 : Test du gonflement

Méthode du V (voir schéma ci-dessous)

Le V permet de trouver une position où les bords de l'agrégat sont tangents aux deux traits du V et ainsi, de voir si après 10 mn d'immersion, l'agrégat déborde les traits, signe que le sol a gonflé.

Mettre 20 ml d'eau distillée dans un bûcher de 60 ml et y immerger un agrégat de 3 à 5 mm. Positionner le bûcher sur le V (tangenter).

POSITION DU BÛCHER : pendant le test du V



Lecture du gonflement après 10 mn d'immersion. Note de 0 à 3.

Note : 0 = pas de gonflement

1 = si légèrement gonflé (0,5 mm)

2 = si moyennement gonflé (1 mm)

3 = si très gonflé (le débordement de l'agrégat est alors très net, > 1 mm)

III.21.2.4 : Présence de calcaire et de sulfate de calcium

Elles sont effectuées sur une grosse motte pour une meilleure observation.

Présence de calcaire : test HCl N

Placer la motte dans une boîte de Pétri et l'arroser avec un jet de pipette (HCl N). Notation de 0 à 5.

Note : 0 = si pas d'effervescence du tout

1 = si quelques bulles autres que d'air (en chapelet)

2 = si quelques taches font effervescence

3 = si toute la motte est en effervescence, mais faible

4 = si effervescence importante accompagnée du petit bruit très caractéristique du bouillonnement

5 = si effervescence très importante et instantanée

Présence de sulfate de calcium

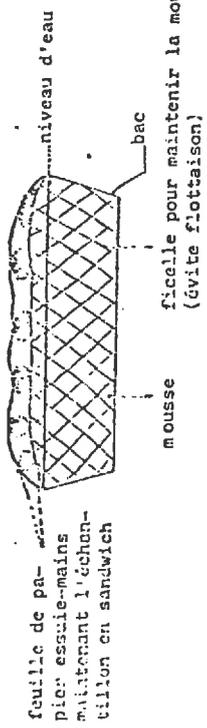
On observe sur la motte la présence en son de sulfate de calcium cristallisé (gypse) qui se présente sous forme de veinules blanches réticulées entre les éléments structuraux.

III.23. Deuxième phase

III.23.1 : Préparation de l'échantillon :

Mouliner l'échantillon en le passant 36 h. sur un morceau de mousseline d'eau distillée d'après le schéma ci-dessous. On considère que, selon ce moyen simple, l'échantillon a atteint la capacité au champ après un jour et demi.

POSITION DES ÉCHANTILLONS (20 environ) pendant l'humectation à la capacité de charge



III.23.2 : Préparation du test :

Sécher pendant 2 minutes les échantillons (préparés comme ci-dessus) dans un verre de montre, à l'aide d'une spatule.

Faire des pâtons et prélever rapidement 6 agrégats de 3 à 5 mm (éviter le dessèchement).

Les plonger dans 20 ml d'eau distillée.

Les disposer dans le bûcher de façon à ce qu'ils ne soient pas en contact, soit entre eux, soit avec les bords du bûcher.

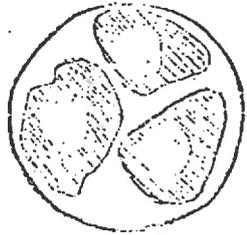
Le nombre d'échantillons traités dans une série peut être plus grand que pour le test d'écatement et de dispersion. En effet, le temps d'immersion est beaucoup plus important (2 heures).

La lecture se fait 2 heures après la plongée.

Seule, la dispersion sera observée. Notation de 0 à 3, comme pour le test de dispersion de la première phase.

On distingue très nettement le halo qui entoure les agrégats.

Echelle : 1/1



EXPOSÉ D'AGREGATS DISPERSÉS : ici, note 2.

III.23. Troisième phase

Humidification et pétrissage de l'échantillon comme pour la deuxième phase.

- faire des pâtons et prélever 4 ou 5 agrégats
- les placer dans un petit Erlenmeyer
- les peser et verser cinq fois leur poids d'eau distillée
- agiter le tout (à vitesse moyenne) sur l'agitateur circulaire, pendant 10 mn
- placer les récipients sur un fond noir et laisser reposer 5 mn

Lecture de la dispersion. Note de 0 à 3, comme pour la dispersion de la première phase.

IV.1. EXPERIMENTATION DES RESULTATS

Les résultats seront mentionnés sur un tableau du modèle ci-après :

Date du prélevement : 18/06/81 - Date du test : 18/08/81		Première partie			Deuxième partie			Troisième partie		
N° d'ordre Labo.	N° de cliché de013	disp. de013	CONF. de013	HCL de015	classe	N° de Labor. de013	disp. de013	N° de Labor. de013	Classement définitif	
1 286	1	3	0	3	AS*	17	1	3+	3+	
	2	3	0			18	1		4	
1 287	3	3	0	5	AS*	19	3	3	3	
	4	3	0			20	3		9	
1 288	5	1	0	4	AS*	21	0	AS*	4	
	6	1	0			22	0		0	
1 289	7	2	5	3	AS*	23	3	3	3	
	8	2	5			24	3		10	
1 290	9	3	1	1	2+	25	3		2+	
	10	3	1			26	3		12	
1 291	11	2	0	2	AS*	26	3	3	3	
	12	2	0			27	3		8	

* AS = à suivre (c'est-à-dire, continuer les phases suivantes du test)

Lorsque les diverses étapes du test sont réalisées, on les note sur le tableau ci-dessus et on conclut sur le classement des échantillons selon les critères retenus dans le premier chapitre (principe et description), à savoir :

Les sols dont les agrégats éclatent (5' après immersion) sont dans les classes : à 6, ceux qui n'éclatent pas, dans les classes 7 et 8. S'il y a gonflement sans éclatement, on est en classe 7 ; s'il n'y a ni gonflement ni éclatement, on est en classe 8.

Si 5' après l'éclatement, la dispersion des agrégats est manifestement complète, le sol est en classe 1, si elle est incomplète, le sol est en classe 2.

Les échantillons dont les agrégats éclatent mais ne disparaissent pas immédiatement sont soumis à la deuxième phase après humidification de l'échantillon à la capacité au champ et naturelle. Si les cubes dispersent

deux heures après immersion, le sol est classé en 3. S'il n'y a pas dispersion, on réalise la troisième phase et si les cubes restent floqués, l'échantillon est en classe 6. Dans le cas contraire et si le sol ne gonfle ni calcifie ni gypse, il est en classe 5 ; s'il possède calcifère ou gypse, il est en classe 4.

Remarque :

On peut distinguer, à l'intérieur des classes 2 et 3, les sous-classes 2⁻, 2⁺, 3⁻, 3⁺ et 4⁺ d'après l'intensité de dispersion des sols lors des phases 1 et 2 du test

Phases	Eclatement		Dispersion		Classe
	1	2	3	4	
1ère	- id -	-	2	2	2
	- id -	-	1	1	2+
	- id -	-	E	E	3-
2me	-	-	2	3	3
	-	-	1	E	3+
	-	-	0	4	4

Le comportement des différents agrégats d'un même échantillon est remarquablement constant, bien qu'inévitablement, il y ait des exceptions. Lorsque le comportement des 6 agrégats est trop contradictoire, on peut recommencer le test et noter les différences ; cependant, seules les différences et non classera l'échantillon dans la classe la plus basse.

IV.2. INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.2.1. Quelques réserves importantes sur le test

Le test proposé par Emerson est dichotomique, ce qui veut dire que les comportements répondent de façon claire et sans aucun doute aux observations d'éclatement, de dispersion et de gonflement. Les réponses sont du type oui/non. Or, lorsqu'on réalise les notations des différences observations, on est conduit à pondérer les observations par des notes qui permettent de rendre compte de l'intensité des phénomènes classiques (éclatement et surtout dispersion).

Ce test est donc dichotomique mais aussi ordonné, ce qui veut dire que si le test devient positif, l'échantillon manifeste un comporte-

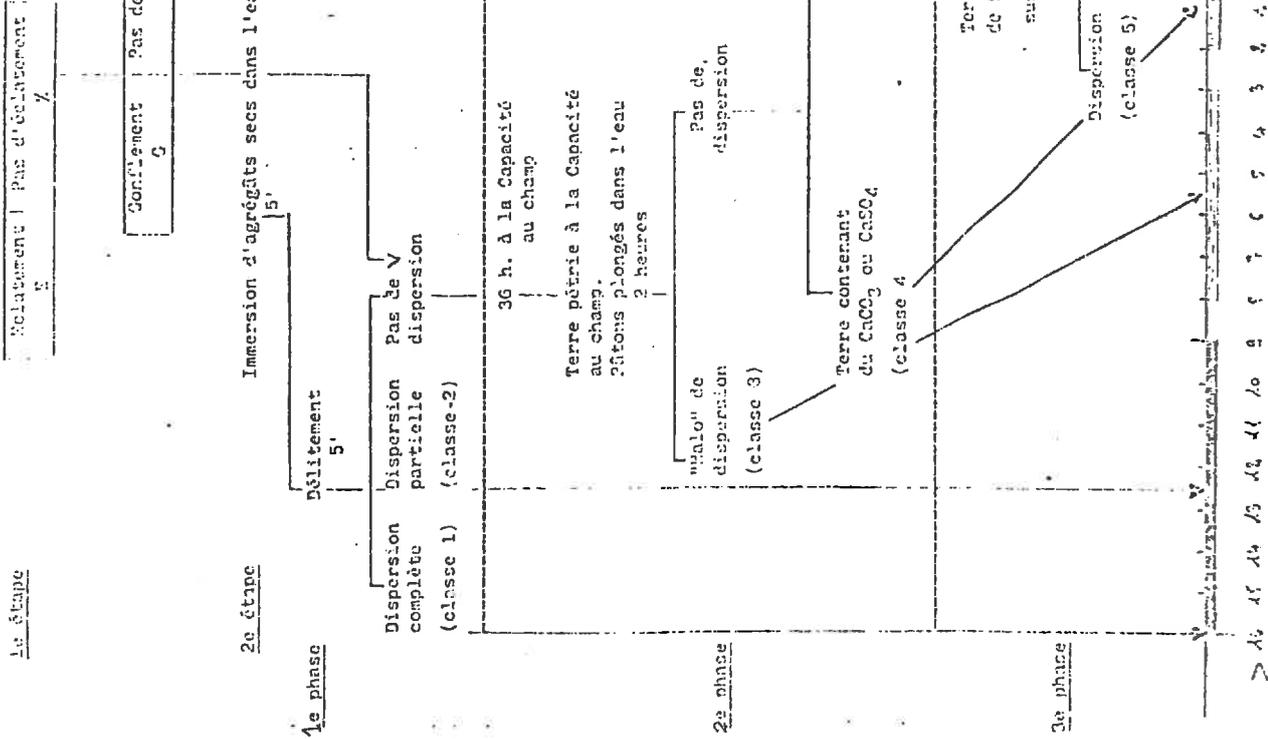
ment permettant de classer l'échantillon, il n'est pas nécessaire de continuer les phases suivantes. Ainsi, les agrégats qui dispersent très légèrement en première phase (note Σ , 1), ne devraient pas normalement subir la deuxième phase, car ils sont supposés disperser. On a vérifié que ceci était vrai dans 96 % des cas, quand la note de dispersion de la première phase était de 1 et, dans 80 % des cas, lorsque la note était de Σ . Donc, si on veut mieux assurer le classement, il est nécessaire de continuer le test, quand le résultat de dispersion de la première phase est 1 et surtout Σ .

Autre cas plus grave : lorsque les agrégats n'éclatent pas (classe 7 ou 8), ils peuvent manifester malgré cela une très légère dispersion en première phase et/ou en deuxième phase. En effet, sur 24 épreuves où le test d'éclatement était négatif, on hésite entre la classe (7 - 8) et la classe (3) dans 33 % des cas, la classe (3+) dans 50 % des cas, la classe (4/5) dans 17 % des cas.

Ces comportements entraînent une indétermination du classement de l'échantillon qui peut être classé en classe 7/8 ou 3/4/5. Greenland et al signale ce cas et propose de classer l'échantillon dans la classe la plus basse.

Autant on peut accepter d'hésiter entre deux classes adjacentes, autant il est grave d'hésiter entre des classes aussi éloignées que 3 et 8. Ceci veut dire que le test ne mesure pas qu'un seul phénomène isolé.

Aussi, nous proposerons de séparer les phénomènes d'éclatement/gonflement et les phénomènes de dispersion. Ainsi, pour nous, le test comporte une première étape où on juge de l'éclatement/gonflement et une deuxième étape où on juge la dispersion d'un sol soumis à des contraintes de plus en plus fortes.



"Champs Non drainés"

Tableau 1 - Resultat de mesures de densité apparente (D_a, Co), D_a) de densité réelle (D_r) et humidité pondérale en % Moyennes

No	Densité apparente D _a		Densité apparente D _a		Densité réelle D _r	Humidité pondérale en %
	Moyenne	écart-type	Moyenne	écart-type		
1	1,242		1,352		1,677	30,73
2	1,175	1,184	1,269	1,266	1,709	31,76
3	1,168		1,171		1,732	30,42
4	1,210	0,058	1,271	0,074	1,703	30,25
5	1,376		1,409		1,738	26,67
6	1,332	1,372	1,354	1,441	1,652	27,72
7	1,416		1,464		1,676	26,89
8	1,337	0,030	1,415	0,045	1,737	26,67
9	1,336		1,368		1,696	31,05
10	1,337	1,344	1,373	1,368	1,753	29,96
11	1,335		1,344		1,627	28,27
12	1,369	0,016	1,389	0,018	1,680	26,84
13	1,122		1,169		1,802	40,99
14	1,252	1,197	1,374	1,299	1,779	33,43
15	1,242		1,354		1,754	40,26
16*	0,708	0,063	0,989	0,113	1,714	59,71
17	0,583		0,611		—	105,26
18	0,377	0,442	0,385	0,457	—	201,34
19	0,377		0,386		—	203,22
20	0,434	0,097	0,447	0,107	—	165,72
21						45,79

* Echantillon éliminé car "à cheval" sur deux horizons, l'un argileux, l'autre tourbeux.

CONCLUSION

Ce test rapide demandant peu de matériel permet, dix minutes après la plongée des agrégats dans l'eau, de différencier les grandes catégories de comportement de sols de marais (éclatement, gonflement, dispersion), vis-à-vis de la stabilité structurale : classes 7 et 8, classes 1 et 2, classes 3 à 6.

Sa simplicité peut le faire adopter par un nombre important d'agents de développement et d'agriculteurs pour une aide précieuse dans le diagnostic du comportement des sols argileux par rapport à la stabilité structurale.

La stricte application de ce test dichotomique et ordonné peut entraîner quelques erreurs qui peuvent être levées par la distinction des phénomènes d'éclatement/gonflement et ceux de dispersion (I.D.). La hiérarchie des catégories ainsi définie ne sera véritablement bien établie que lorsque les correspondances entre comportement au champ et résultats seront plus fiables. Pour l'instant, nous utiliserons provisoirement le classement proposé par Emerson.

BIBLIOGRAPHIE

EMERSON W.W. (1967)
A classification of soil aggregates based on their coherence in water.
Aust. J. Soil Res, 5, 47-57.

GREENLAND D.J., RIMMER D., PAYNE D. (1975)
Determination of the structural stability class of English and Welsh soils, using a water coherence test. J. Soil, vol. 26, n° 3.

LOVEDAY J. PYLE J. (1973)
The Emerson dispersion test and its relationship to hydraulic conductivity. CSIRO, Division of soils Technical Paper n° 15.

Tableau 4 - champ drainé
capacité de rétention (pf = 3) - Detail de
mesures de laboratoire

N°	Poids humide	Poids Sec	NB	Poids de l'eau	Poids de terre sèche	HR en % pondérale	Mélange
1	13,9533	12,615	46	7,8666	4,7499	28,1437	28,1437
2	16,6875	15,7555	49	10,2551	5,0004	28,6377	28,6377
3	16,7377	15,3333	50	10,4124	4,9209	28,5395	28,5395
4	16,6677	15,7645	101	10,0565	5,0889	29,8286	29,8286
5	16,7933	15,1960	102	10,0667	5,1293	31,1407	31,1407
6	16,9650	15,3347	104	10,0602	5,2746	30,9066	30,9066
7	16,7426	15,1835	105	10,1791	5,0049	31,2747	31,2747
8	17,0835	15,3580	106	9,9535	5,4065	31,92709	31,92709
9	17,3243	15,5402	107	10,0297	5,5164	32,23297	32,23297
10	17,5602	15,5820	108	10,0280	5,5554	33,61757	33,61757
11	17,7906	15,7013	109	10,0649	5,6364	37,06798	37,06798
12	17,8065	15,3405	110	9,9450	5,3155	36,43777	36,43777
13	16,7530	15,0315	111	10,3027	4,7228	36,4046	36,4046
14	17,3154	15,4195	112	10,2779	5,1416	36,8737	36,8737
15	16,9002	15,1517	113	10,2711	4,8206	35,8255	35,8255
16	17,7924	15,4003	114	9,9880	5,4123	44,19745	44,19745
18	16,8791	14,7330	115	9,9015	4,8315	44,4891	44,4891
20	17,6844	15,3590	116	9,9144	5,2040	43,3893	43,3893
21	15,409	13,0660	117	10,1173	2,9487	79,45874	79,45874
23	15,3529	13,0620	118	10,0255	3,0367	75,6314	75,6314
24	14,7952	12,7113	119	9,9978	2,7135	76,99749	76,99749

Tableau 5 - champ drainé
point de flétrissement (PF: 42) - Detail de
mesures

N°	Poids humide	Poids Sec	NB	Poids de l'eau	Poids de terre sèche	HR en % pondérale	Mélange
46	13,8190	17,8723	46	7,8666	5,0057	18,91	18,91
47	16,2701	15,3023	49	10,2551	5,047	19,1797	19,1797
48	16,2168	15,2668	50	10,4124	4,9534	19,61	19,61
49	16,3979	15,2693	101	10,0565	5,2828	21,6505	21,6505
50	16,2334	15,1835	102	10,0667	5,1168	20,54208	20,54208
51	16,1188	15,19325	104	10,0602	5,0725	19,6448	19,6448
52	16,4343	15,4040	105	10,1791	5,2300	19,617	19,617
53	16,3555	15,2706	106	9,9535	5,3171	20,1403	20,1403
54	16,7609	15,5807	107	10,0288	5,5509	21,261	21,261
55	15,9464	14,8065	108	10,0280	4,7785	23,2547	23,2547
56	16,7678	15,5490	109	10,0649	5,4801	22,2242	22,2242
57	16,1794	14,9101	110	9,9450	4,9651	25,5644	25,5644
58	16,7030	15,4590	111	10,3027	5,1563	24,1258	24,1258
59	16,8123	15,5055	112	10,2779	5,2276	24,9981	24,9981
60	17,0785	15,6929	113	10,2711	5,4218	25,5561	25,5561
61	15,9611	14,7707	116	9,9880	4,7827	24,8807	24,8807
62	16,1756	14,8422	115	9,9015	4,9407	26,9881	26,9881
63	16,539	15,1941	116	10,1144	5,0797	26,4759	26,4759
64	14,9122	12,19200	117	10,1173	2,9027	71,0816	71,0816
65	14,8431	12,0670	118	10,0255	2,8315	67,1907	67,1907
66	14,2671	12,0165	119	9,9978	2,9187	63,4049	63,4049

Tableau 8 - mesure de la densité réelle - Détail etc

type	W1	W2	W3	W4	Volume	poids sec	densité réelle
drainé	3-15cm	22,3002	61,4086	25,3667	63,5553	4,1845	2,589
	15-30cm	21,7712	63,7690	25,8221	64,6361	4,2255	2,656
	30-50cm	46,7695	123,4165	50,2872	123,3438	1,2263	2,756
	50-75	41,0977	118,3895	46,1772	122,3890	1,9124	2,656
	Tourbe	23,3002	61,4086	23,8966	62,8485	1,4886	1,743
Non drainé	3-15cm	22,3002	61,4080	27,5695	65,0839	2,0534	2,566
	15-30cm	21,7712	61,7610	27,4745	65,7818	2,1795	2,618
	30-60cm	46,7695	124,8165	51,5227	123,0234	1,7607	2,734
	60-80cm	41,0977	118,7885	46,5835	122,6392	2,0805	2,627
Tourbe	21,7712	61,7690	24,3144	63,2778	1,3329	1,908	

$$\frac{W_2 - W_1}{P_1} - \frac{W_3 - W_4}{P_2} = \text{Volume d'extrapolation}$$

$$\text{Densité réelle} = \frac{PS}{\text{Volume}}$$

$$\text{Densité de pétrole} = \frac{9,776 \text{ mesurée à la température du laboratoire}}{\text{Volume}}$$

Tableau 9 - "Champ Non drainé" - Densité des grosses mottes - Détail des mottes

N°	Volume paraffine	Volume de terre	Poids de terre humide	Poids de terre sèche	Pénalité P.S.urale	Moyennes	
						100%	100%
1	52,1	504,6	819,3	626,7	1,242	100%	1,81
2	42,5	317,7	492,4	373,6	1,175	100%	1,81
3	42,6	268,1	387,1	293,1	1,108	100%	1,81
4	45,6	374,2	594,1	453,02	1,210	100%	1,81
5	36,8	366,9	661,8	504,58	1,376	100%	1,81
6	57,3	675,9	1155,7	904,83	1,338	100%	1,81
7	62,3	907,1	1623,0	1279,0	1,410	100%	1,81
8	45,0	534,5	939,5	749,68	1,381	100%	1,81
9	54,6	581,9	777,4	593,20	1,336	100%	1,81
10	40,2	408,2	709,2	545,68	1,337	100%	1,81
11	45,9	585,6	1007,2	781,76	1,335	100%	1,81
12	50,3	632,7	1097,6	865,30	1,369	100%	1,81
13	70,1	958,3	1524,3	1081,07	1,128	100%	1,81
14	53,3	533,7	895,2	670,40	1,252	100%	1,81
15	56,5	499,3	848,5	605,20	1,212	100%	1,81
16	72,5	965,1	1091,3	883,29	0,708	100%	1,81
17	132,7	1439,0	2713,0	834,54	0,583	100%	1,81
18	112,7	954,8	1084,7	359,95	0,377	100%	1,81
19	114,2	1009,7	1148,2	378,06	0,375	100%	1,81
20	104,6	683,0	786,8	296,09	0,434	100%	1,81

Tableau 12 - champ Non drainé
 Capacité de rétention (PF33) - détail
 mètre

Prof.	poids humide	poids sec	boîte		poids de l'eau	poids de terre sèche	HK en % pondérale	détail mètre
			No	poids				
25	16,0522	14,6095	120	9,7655	1,4427	4,844	29,78323	
26	16,8328	15,3112	121	10,2030	1,5216	5,1082	29,7814	
27	17,2094	15,6402	122	10,2337	1,5692	5,4065	29,02422	
28	16,7101	15,1997	124	9,8577	1,5894	5,2720	30,17795	
29	17,3720	15,6129	125	9,9627	1,7653	5,6502	31,24314	
30	17,3058	15,5870	126	10,0513	1,7186	5,5359	31,04463	
31	17,0528	15,3715	127	10,0942	1,6713	5,2267	31,61329	
32	17,0582	15,4035	128	10,1539	1,6293	5,2756	30,82369	
33	17,0001	15,3435	129	10,1476	1,6586	5,1959	31,2130	
34	17,1019	15,4609	130	10,2748	1,641	5,366	30,58143	
35	16,8815	15,2051	131	9,8243	1,6763	5,3809	31,15272	
36	17,1282	15,3292	132	9,6824	1,7995	5,7068	31,53255	
37	17,4445	15,5684	133	10,1730	1,8761	5,2954	32,42226	
38	17,9421	15,8656	134	10,0254	2,0765	5,8397	35,55833	
39	17,5680	15,6093	135	9,9956	1,9527	5,6137	34,77142	
40	17,7225	15,5454	136	9,9896	2,1831	5,5464	39,36066	
41	17,8133	15,6674	137	10,1924	2,1459	5,475	38,19452	
42	17,4755	15,3687	138	9,9934	2,1676	5,3747	39,21262	
43	15,5075	13,1952	139	9,9644	2,3123	3,2308	71,5705	
44	15,5220	13,2648	140	10,0949	2,2573	3,1699	71,21044	
45	15,7140	13,5453	141	9,7830	2,1628	3,3603	70,45177	

Tableau 13 - champ Non drainé
 point de flétrissement (PF 4,2) - détail
 de sécheresse

Prof.	poids humide	poids sec	boîte		poids de l'eau	poids de terre sèche	HF en % pondérale	détail mètre
			No	poids				
67	15,5314	14,5928	120	9,7655	0,9386	4,8273	1,94435	
68	16,6073	15,5035	121	10,2030	1,1038	5,3005	20,8244	
69	16,1503	15,1945	122	10,2337	0,9558	4,9602	19,2670	
70	16,0930	14,9889	124	9,8577	1,1041	5,1312	21,51773	
71	16,1442	15,0265	125	9,9627	1,1177	5,0638	22,0723	
72	16,9045	15,6978	126	10,0513	1,2067	5,6465	21,3707	
73	16,1799	15,1490	127	10,0942	1,10309	5,0542	20,3968	
74	16,4819	15,3932	128	10,1539	1,0877	5,2393	20,7795	
75	16,5294	15,4457	129	10,1476	1,0837	5,981	18,1199	
76	16,4191	15,2751	130	10,0990	1,144	5,1802	22,089	
77	15,7908	14,7216	131	9,8243	1,0062	4,9573	20,3578	
78	15,8516	14,8350	132	9,6824	1,0166	5,1526	19,7292	
79	16,5855	15,474	133	10,2730	1,1712	5,7473	22,7822	
80	16,6789	15,4336	134	10,0259	1,2403	5,4077	22,9358	
81	16,8497	15,5259	135	9,9956	1,2282	5,5303	23,9281	
82	17,1965	15,7260	136	9,970	1,4699	5,7276	25,6684	
83	16,8413	15,4812	137	10,1924	1,3631	5,2828	25,7733	
84	16,7360	15,3991	138	9,9934	1,3369	5,6057	24,7313	
85	15,5874	13,459	139	9,9644	2,1515	3,4715	61,9769	
86	15,7940	13,6443	140	10,0949	2,447	3,549	60,5719	
87	15,7422	13,6736	141	9,9830	2,06286	3,6906	56,0505	