

DIPLOME D'ÉTUDE APPROFONDIE EN BIOLOGIE

OPTION : ÉCOLOGIE VÉGÉTALE

INITIATION A LA MESURE DE L'HUMIDITÉ DU SOL PAR RADIOMÉTRIE
APPLICATION A LA DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ AU CHAMP

par

Albert Marcel SICOT

juin 1975

DIPLOME D'ETUDE APPROFONDIE EN BIOLOGIE

OPTION ECOLOGIE VEGETALE

Initiation à la mesure de l'humidité du sol par radiométrie -

Application à la détermination de la capacité au champ -

Albert Marcel SIGOT.

JUIN 1975.

S O M M A I R E

Avant-Propos.

Introduction.

- Première Partie.

Initiation à la détermination de l'humidité du sol par radiométrie.

A. Théorie et description de l'humidimètre à neutrons utilisé au CTGREF.

1. Théorie de la détermination de l'humidité du sol à l'aide d'un humidimètre à neutrons.

2. Etalonnage des appareils.

3. L'humidimètre-densimètre du CTGREF

B. Etude expérimentale du fonctionnement de l'appareil du CTGREF.

1. Influence de la durée des mesures.

2. Variabilité due au profil.

3. Variabilité due à la macrohétérogénéité du sol.

C. Vérification de l'étalonnage de l'appareil du CTGREF.

1. Principe de l'étalonnage de la sonde du CTGREF.

2. Vérification de l'étalonnage de l'appareil utilisé au CTGREF.

D. Discussion.

- Deuxième Partie.

Application de la mesure de l'humidité par radiométrie à la détermination de la capacité au champ.

A. Définition et signification de la capacité au champ.

B. Mesure in-situ de la capacité de rétention hydrique du sol de la station C.T.G.R.E.F. d'Antony.

I. Le milieu.

1.1. Le climat.

1.2. La végétation.

1.3. Le sol.

II. Méthodes.

III. Dispositif expérimental.

3.2. Traitements.

3.3. Conditions expérimentales pendant la durée des manipulations.

IV. Résultats.

4.1. La saturation du profil.

4.2. La capacité au champ.

V. Discussion.

5.1. La saturation du profil.

5.2. Signification de la capacité au champ.

Conclusion.

Bibliographie.

Annexe.

AVANT - PROPOS

Avant d'aborder l'exposé qui suit, je voudrais remercier tous ceux qui ont rendu possible ce travail.

Je voudrais tout d'abord remercier Monsieur Pierre FRANQUIN, mon directeur scientifique qui a bien voulu en assurer la direction.

Monsieur André COMBEAU m'a fourni des documents bibliographiques et prodigué conseils et suggestions, que je n'ai pu totalement concrétiser sur le terrain à cause principalement des conditions météorologiques qui ont prévalu avant et pendant la détermination de la capacité au champ. Qu'il en soit remercié pour le temps qu'il m'a consacré et le profit que je dois en tirer.

Monsieur Michel NORMAND et par son intermédiaire le personnel de la Division Hydraulique souterraine - Drainage du C.T.G.R.E.F. d'Antony, m'ont accueilli et facilité les conditions d'accomplissement de mon stage, et montré tout au long de son déroulement l'intérêt attaché à ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Je ne saurais oublier Madame GUENIN et Messieurs BOTTEX et GUINARD qui ont aidé à la mise en place du dispositif et procédé à certaines déterminations.

Pour terminer, j'adresse mes remerciements à Monsieur le Directeur du Centre de Bondy qui a bien voulu déranger son organigramme des travaux pour cette présentation dactylographique urgente.

INTRODUCTION.

Le travail ici rapporté a été effectué au Centre d'Antony du C.T.G.R.E.F. (centre technique du Génie rural et des eaux et forêts) durant un stage dirigé par M. NORMAND à la division Hydraulique souterraine - Drainage, pour l'obtention du diplôme d'étude approfondie (D.E.A.) d'écologie végétale de la Faculté de Paris-Sud (ORSAY).

Il a consisté en une initiation à la mesure de l'humidité du sol par radiométrie, laquelle a conditionné un essai de détermination in-situ de la capacité de rétention du sol de la station pour l'eau.

Nous exposerons successivement ces deux différentes parties en les faisant précéder par une analyse rapide des principes de base.

PREMIERE PARTIE.

INITIATION A LA DETERMINATION DE L'HUMIDITE DU SOL PAR RADIOMETRIE.

A. Théorie et description de l'humidimètre à neutrons utilisé au CTGREF.

1. Théorie de la détermination de l'humidité du sol à l'aide d'un humidimètre à neutrons.

Il existe de nombreuses méthodes pour la détermination de l'humidité d'un matériau. Des analyses détaillées des procédés de mesures pour le sol effectuées par BOURRIER J. (1963), puis M. NORMAND (1970) ingénieur à la division de drainage et d'hydraulique souterraine au C.T.G.R.E.F., il résulte que l'emploi d'une technique déterminée dépend des objectifs et des moyens disponibles et que l'humidimètre à neutrons est particulièrement adapté aux mesures répétées et non destructives dans le sol en place.

Cette méthode est basée sur le ralentissement dans le sol de neutrons rapides émis par une source radioactive, par les atomes d'hydrogène.

On soumet le sol à un flux constant de neutrons rapides. Particules non chargées, elles s'y propagent sans subir d'effet électromagnétique arrivant jusqu'aux noyaux des atomes élémentaires avec lesquels elles interagissent. A chaque collision, la quantité de mouvement totale est conservée et répartie entre les deux particules suivant les lois de la diffusion élastique. Le neutron cède donc peu à peu de son énergie jusqu'à l'équilibre thermique avec le milieu.

Compte-tenu de la masse du neutron, deux cas sont à considérer : si le noyau cible est de masse très élevée (10 à 200 fois plus lourd que la masse du neutron est peu affectée, sa vitesse peu ralentie et sa trajectoire simplement déviée.

Si les deux masses sont voisines, cas des atomes d'hydrogène, le ralentissement est intense, la quantité de mouvements se répartissant à peu près également entre les deux particules.

Dans le sol l'hydrogène qui provient surtout des atomes de l'eau est le facteur principal de ralentissement des neutrons. Son action est généralement 30 à 40 fois plus élevée que celle de l'oxygène élément qui par sa masse et sa concentration a l'activité immédiatement inférieure.

Les autres éléments du sol ne sont pas pour autant négligeables. Ils interviennent par leur concentration autour du point de mesures. Les chocs élastiques successifs ont pour effet de maintenir les neutrons au voisinage de la source de neutrons et d'augmenter en cette région la probabilité de rencontre avec les noyaux d'hydrogène. Le comptage du nombre de neutrons ralenti se faisant à cet endroit, il en résulte que pour une même teneur en eau le nombre de neutrons ralentis est d'autant plus élevé que le sol est plus dense.

Enfin, certains éléments comme le bore, le lithium, le cadmium, le chlore, le fer ... heureusement en concentrations généralement faibles dans les sols ont une action spécifique par leur pouvoir d'absorber les neutrons lents.

Ces divers phénomènes font que l'expression de l'humidité du sol par radiométrie ne dépend pas uniquement des caractéristiques de la source de neutrons ou de l'appareil. Elle est fonction :

- d'une part, de la densité du sol qui relève de propriétés physiques autant que chimiques du sol,
- d'autre part, des caractéristiques de diffusion et d'absorption des matériaux constitutifs.

Suivant un certain degré de précision et dans une certaine gamme d'humidité qui dépend à la fois des caractéristiques de l'appareil utilisé et des matériaux étudiés. Le taux de comptage de la sonde est lié à la densité et à l'humidité volumique par une relation linéaire du type :

$$n = (\alpha \int_a + \beta) h_v + \gamma \int_a + \delta$$

où n est le nombre de neutrons lents ou sa vitesse de comptage.

\int_a la densité apparente

et α , β , γ et δ des paramètres qui définissent la composition chimique du sol, expriment ses propriétés à l'égard des phénomènes de diffusion et d'absorption neutronique et rendent obligatoire l'étalonnage des appareils COUCHAT (1971).

Cette relation montre l'importance de la densité apparente qui conduit pour un type de sol déterminé à un faisceau de courbes dont les pentes sont cependant peu différentes car α est généralement petit devant β M. NORMAND (1970).

2. Etalonnage des appareils.

Il se fait généralement de façon empirique par référence aux résultats obtenus par la méthode gravimétrique. Ces résultats s'exprimant en humidité pondérale, il est nécessaire de passer par l'intermédiaire de la densité : la densité sèche ou plutôt la densité humide moyennant certaines hypothèses ou après avoir établi les relations liant celle-ci à celle-là.

D'autres méthodes sont basées sur la composition chimique, l'étude de phénomènes de diffusion et d'absorption, COUCHAT (1974). Nous ne les analyserons pas dans le cadre de cette étude et ne décrirons que la méthode suivie pour l'utilisation de l'humidimètre du C.T.G.R.E.F.

3. L'humidimètre-densimètre du C.T.G.R.E.F.

On réalise un humidimètre à neutrons en réunissant :

- un émetteur de neutrons rapides
- un détecteur de neutrons lents

et un dispositif électronique d'alimentation et de comptage des neutrons détectés.

L'appareil utilisé est la sonde de profondeur humidimètre-densimètre BASC associé à un compteur miniscalier type 15 x 101 fabriqués par la Nordisk Elektrisk Apparatfabrik (NEA).

Les caractéristiques de l'humidimètre sont les suivantes :

source de neutrons rapides : 30 m Ci d'americium 241 - de période 460 ans en mélange avec du béryllium,

détecteur de neutrons lents : un grand cristal scintillateur au lithium (enrichi à 96 % en Li-6).

Un photomultiplicateur et un préamplificateur pour l'amplification des impulsions résultant de la détection des neutrons lents. L'appareil fonctionne normalement entre 0 et 50° C dans la gamme de 0 à 100 % d'humidité avec une sensibilité de 700 coups par minute par % d'humidité volumique.

A l'humidimètre est couplé un densimètre qui, en permettant la détermination parallèle de la densité sèche et humide facilite l'étalonnage et rend plus précises les mesures d'humidité.

Son fonctionnement est basé essentiellement sur l'effet Compton, c'est-à-dire sur l'affaiblissement après collision avec les électrons périphériques des atomes des matériaux du sol de l'énergie initiale de rayons γ de flux constant introduits dans le sol.

Certains rayons γ retro-diffusés atteignent le cristal au lithium où ils provoquent des photons lumineux détectables.

Comme pour la diffusion neutronique le phénomène est perturbé par l'absorption des photons par les atomes élémentaires. Plus ces atomes sont nombreux autour du point de mesure autrement dit plus le sol est dense, plus les rayons γ sont absorbés et plus le nombre de photons détecté par le scintillateur est diminué. Il existe une relation linéaire décroissante entre le nombre de coups enregistré par le densimètre et la densité apparente humide du sol.

Le densimètre de l'appareil utilise :

1 m Ci de Cesium 137 comme source de rayons γ

Un discriminateur permet de différencier les impulsions électriques de grande amplitude résultant de la détection des neutrons lents, des impulsions d'amplitude plus faible provenant des photons d'énergie affaiblie. L'appareil est équipé d'un dispositif électronique qui, outre l'alimentation électrique de la sonde permet la lecture et l'enregistrement de la vitesse de comptage des impulsions. Un ensemble de boutons-poussoirs donne la possibilité de régler, de contrôler le fonctionnement de l'appareil et de mesurer les humidités ou les densités pendant 30 secondes ou 120 secondes.

Les mesures sont effectuées à l'intérieur d'un tube métallique ou de matière plastique dur mis en place dans le sol pour guider les mouvements de la sonde et éviter de la détériorer.

*
T A B L E A U n° 1

Influence du temps de comptage sur les mesures
de densité et d'humidité

Type de mesure	Densité		Humidité	
Temps de comptage	30 s	120 s	30 s	120 s
1	190	189	759	769
2	186	191	767	772
3	193	191	769	773
4	194	190	769	773
5	187	190	779	774
6	192	193	763	766
7	196		763	
8	193		768	
9	197		767	
10	192		766	
11	193		778	
12	194		767	
moyenne	192	191	768	772
écart-type	3,25	1,37	5,66	1,92
C.V.	4,8%	2,9%	2,1%	1%

C.V. Coefficient de variation = $\frac{\sigma}{\bar{x}}$

n nombre de mesures

\bar{x} , σ moyenne et écart-type des mesures

Une partie du flux neutronique non réfléchi est perdue dans l'atmosphère biaisant de ce fait les mesures en surface. Un réflecteur en polyéthylène y remédie partiellement et rend possible des déterminations à 15 cm du niveau du sol.

B. Etude expérimentale du fonctionnement de l'appareil du C.T.G.R.E.F.

1. Influence de la durée des mesures.

Les mesures de densité et d'humidité qui concernent des phénomènes aléatoires (chocs aléatoires entre particules) présentent de ce fait une certaine dispersion statistique plus ou moins atténuée par le temps de comptage des impulsions.

Nous avons essayé de mettre en évidence cette influence du temps en utilisant les deux gammes de comptage de l'appareil.

Au tableau n° 1 sont consignés les résultats de séries de 12 et 6 mesures.

On remarque qu'effectivement, en augmentant le temps de comptage on diminue l'imprécision des mesures.

Cependant si l'on compare les résultats relatifs à un même temps de comptage, on note que sur le plan statistique, il y a intérêt de travailler avec l'échelle de comptage de 30 secondes. En effet, durant un même temps de comptage on peut faire trois à quatre fois plus de mesures par rapport à l'échelle de 120 secondes et en considérant non le coefficient de variation, mais celui-ci multiplié par le coefficient de Student, la précision est meilleure dans le premier cas.

$$P_1 = \frac{t_1 \cdot T}{\bar{x} \sqrt{N_1}} = \frac{3,25 t_1}{\bar{x} \sqrt{N_1}} \quad \text{pour l'échelle de 30 secondes}$$

$$P_2 = \frac{t_2 \cdot T}{\bar{x} \sqrt{N_2}} = \frac{1,37 t_2}{\bar{x} \sqrt{N_2}} \quad \text{pour l'échelle de 120 secondes}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{3,25}{1,37} \sqrt{\frac{N_2}{N_1}} \frac{t_1}{t_2} \neq 1,186 \frac{t_1}{t_2}$$

Tableau n° 2 - Mesure de la variance instrumentale pour la densité sèche

Prof. (cm)	Répétitions											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15.	1.445	1.441	1.473	1.468	1.426	1.454	1.485	1.444	1.530	1.442	1.453	1.451
25	1.439	1.479	1.420	1.414	1.425	1.436	1.434	1.438	1.450	1.437	1.447	1.443
35.	1.443	1.495	1.409	1.444	1.457	1.499	1.539	1.502	1.435	1.434	1.440	1.477
45.	1.452	1.463	1.434	1.443	1.461	1.465	1.477	1.466	1.412	1.418	1.459	1.417
55.	1.469	1.462	1.484	1.448	1.480	1.497	1.498	1.476	1.443	1.459	1.502	1.486
65.	1.448	1.459	1.410	1.410	1.430	1.428	1.393	1.404	1.424	1.405	1.431	1.470
75.	1.460	1.431	1.392	1.456	1.490	1.407	1.397	1.443	1.467	1.462	1.379	1.449
85	1.474	1.426	1.483	1.404	1.433	1.399	1.467	1.452	1.472	1.462	1.430	1.468
95	1.473	1.458	1.490	1.509	1.513	1.472	1.464	1.441	1.471	1.504	1.467	1.491
105	1.564	1.546	1.555	1.588	1.575	1.549	1.548	1.570	1.595	1.532	1.541	1.506
115	1.585	1.568	1.621	1.579	1.583	1.611	1.588	1.613	1.579	1.579	1.574	1.575
125.	1.607	1.612	1.633	1.655	1.622	1.603	1.606	1.603	1.614	1.610	1.581	1.674
135	1.663	1.680	1.645	1.662	1.700	1.682	1.698	1.656	1.646	1.647	1.682	1.677
145	1.636	1.623	1.640	1.640	1.693	1.649	1.573	1.623	1.627	1.654	1.610	1.662
155	1.681	1.706	1.655	1.644	1.690	1.663	1.633	1.652	1.623	1.661	1.645	1.645

P_1, P_2 indice de précision sur la moyenne des mesures

t_1 et t_2 coefficient de Student

\bar{x} moyenne des mesures

N_1 et N_2 nombre de mesures.

Lorsque le temps de mesure est court 10 minutes et même plus, on a intérêt à travailler avec des temps de comptage de 30 s, car la distribution du coefficient de Student entraîne que le rapport P_1 / P_2 est inférieur à 1.

On remarque d'autre part l'extrême reproductibilité des mesures. Les coefficients de variation sont très faibles.

Avec 12 mesures établies pendant 30 secondes, l'erreur statistique est de 1 % sur la densité et de 6 % sur le taux d'humidité, ce qui est peu ordinaire.

Avec moins de trois mesures on atteint une précision de 5 % sur les mesures de densités à fortiori d'humidité. Cette remarque justifie à posteriori le mode d'utilisation de la sonde. On prend la moyenne de deux mesures dans les cas généraux. Si les vitesses de comptage observées s'écartent de plus de 10 unités en humidité et de 5 unités en densité, on procède à une troisième mesure.

On peut noter, pour terminer, que ces mesures effectuées dans l'horizon 0-15 cm intègrent non seulement la variabilité due au fonctionnement de l'appareil, mais aussi la micro-hétérogénéité du terrain qui, bien que de faible importance dans les phénomènes utilisés, ne contribue pas moins à diminuer le pouvoir de définition de l'appareil.

2. Variabilité due au profil.

Les résultats de 12 comptages sur 15 horizons de 10 cm transformés en densités sèches et humidités volumiques sont reportés aux tableaux 2 et

3. Voici les tableaux récapitulatifs de l'analyse de variance.

Tableau n° 3

- Mesure de la variance instrumentale de l'humidité volumique

Prof. (cm)	Répétitions											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15.	33,5	33,9	33,8	33,6	34,0	33,1	33,2	34,2	31,3	33,7	34,0	33,5
25	32,8	32,6	32,8	33,4	33,5	32,5	32,6	33,5	32,3	33,6	32,6	33,0
35.	32,4	30,9	33,3	32,9	31,6	31,9	31,0	31,5	32,6	32,6	32,7	31,6
45.	32,8	31,7	32,8	32,4	31,9	32,1	31,6	32,0	33,6	33,0	32,0	32,4
55.	31,7	32,2	32,0	31,9	31,9	31,4	31,3	31,6	32,4	32,0	31,5	31,9
65.	31,9	32,0	33,2	33,2	32,5	32,6	33,6	33,8	33,7	33,7	33,0	32,2
75.	32,0	32,9	33,7	33,0	31,5	33,5	33,8	33,6	32,5	32,4	34,4	32,4
85	34,3	35,3	34,1	36,3	35,9	35,6	35,0	35,2	35,1	34,9	35,6	35,0
95	36,3	37,1	37,1	35,8	36,1	36,4	36,6	37,0	36,5	35,8	36,3	35,8
105	36,1	36,6	35,7	36,1	35,5	36,9	36,3	36,0	35,4	36,8	36,4	36,8
115	36,5	36,9	35,4	36,5	36,7	35,8	36,2	35,5	37,4	37,0	36,3	37,5
125.	36,8	36,3	36,7	35,8	37,2	37,1	36,2	37,2	36,7	37,1	38,1	35,7
135	33,7	34,7	34,9	33,8	33,8	33,0	34,0	34,4	34,8	35,3	33,7	34,2
145	34,5	35,8	34,8	34,8	34,5	35,1	36,4	35,2	35,4	35,2	35,2	34,4
155	33,8	33,9	34,5	35,0	34,8	34,3	34,8	34,8	35,2	34,5	35,5	34,8

T A B L E A U n° 4

Variance de la densité sèche mesuré au densimètre
en sept sites de mesures différents

1.5550	1.5500	1.6050	1.7150	1.5800	1.6400	1.6200
1.6000	1.5100	1.5000	1.6650	1.5500	1.5600	1.5950
1.4700	1.5050	1.4450	1.5800	1.4750	1.5350	1.5250
1.4450	1.5000	1.4750	1.4950	1.4850	1.4750	1.4600
1.4900	1.4800	1.4800	1.5000	1.4850	1.5250	1.4700
1.5100	1.5100	1.5000	1.5450	1.5200	1.5000	1.4300
1.5500	1.5550	1.5200	1.5200	1.5350	1.5250	1.5250
1.5400	1.5450	1.5550	1.5350	1.5800	1.5450	1.5600
1.5600	1.5600	1.5550	1.5500	1.5650	1.5400	1.5450
1.5500	1.5600	1.5850	1.5750	1.5700	1.5750	1.5550
1.5600	1.5550	1.6150	1.5850	1.6000	1.5150	1.5500
1.5900	1.5500	1.6000	1.5400	1.6050	1.4700	1.5450

T A B L E A U n° 5

Variance du taux d'humidité volumique (% du volume)
déterminé à la sonde en sept sites de mesure
différents

35.1000	34.5000	35.2000	32.5000	35.7000	32.0000	33.8000
32.9000	34.3000	35.5000	33.9000	35.3000	33.3000	33.8000
33.4000	32.8000	33.9000	34.8000	35.1000	32.5000	34.1000
33.2000	33.4000	33.1000	34.5000	34.1000	32.7000	33.7000
32.6000	33.0000	32.6000	32.9000	33.7000	31.4000	32.5000
32.5000	33.4000	33.2000	32.3000	33.9000	33.0000	33.9000
33.8000	33.5000	34.4000	34.0000	33.6000	33.5000	32.8000
33.6000	35.0000	33.9000	34.4000	33.4000	33.7000	33.8000
34.9000	35.5000	35.0000	35.3000	34.1000	35.2000	35.1000
35.9000	37.9000	35.2000	35.4000	35.2000	35.4000	36.5000
36.7000	38.6000	35.3000	36.8000	35.7000	35.4000	38.9000
37.4000	39.4000	36.6000	37.7000	36.4000	38.3000	38.5000

Pour les mesures de densité :

Origine	S.C.E.	d.d.l.	C.M.	F.
ligne	1,3325	14	0,0952	78,24 **
colonne	0,0116	11	0,0010	0,87
résidu	0,1873	154	0,0012	

écart-type du résidu 0,035

Pour les mesures d'humidité :

Origine	S.C.E.	d.d.l.	C.M.	F.
ligne	495,2644	14	35,3760	91,929 **
colonne	5,0011	11	0,4564	1,181
résidu	59,2622	154	0,3848	

écart-type du résidu 0,620

Confirmant les résultats précédents, la variabilité des résultats due au fonctionnement de l'appareil est négligeable dans chaque horizon.

Les écarts-types des densités et humidités moyennes en chaque horizon sont respectivement 0,01 pour des valeurs de 1,426 à 1,67 de la densité et 0,179 pour des taux d'humidité moyens variant de 31,82 à 36,74.

S.C.E. somme des carrés des écarts

d.d.l. degré de liberté

C.M. carré moyen

F. coefficient de Fischer = rapport des variances calculées.

L'incidence de l'hétérogénéité due à la stratification verticale du sol est par contre hautement significative. Il est nécessaire d'y pallier en effectuant les déterminations sur les différents horizons du sol.

Nous avons effectué des mesures tous les 10 cm, mais nous aurions pu tout aussi bien y procéder tous les 20 cm, car, étant donné l'homogénéité du sol, l'erreur commise sur la réserve hydrique du sol estimée sur 155 cm est inférieure à 1 %.

3. Variabilité due à la macrohétérogénéité du sol.

Les résultats relatifs à sept points de mesure distants de 1 à 10m sont groupés dans les tableaux n° 4 et 5. Ils ont été analysés comme précédemment. Le rapport F des variances calculées est en ce qui concerne les densités de 9,428 pour les divers horizons et de 1,713 pour les différents sites de mesures. Il s'en suit que la macrohétérogénéité du sol appréciée sur les distances considérées est négligeable bien que, l'incidence de la stratification du sol reste toujours importante.

D'autre part ce sol n'est pas très hétérogène car les écarts-types des séries de mesures sont faibles et les coefficients de variation égaux à 2,2 et 2,5 % pour les mesures de densité et d'humidité.

Etant donné la faiblesse des écarts-types, deux points de mesure ne conduisant qu'à des erreurs de 5 à 6 % seraient suffisants pour ces types de détermination.

En définitive, nous avons un appareil d'une sensibilité et d'une fidélité exceptionnelles et opérons sur un substrat relativement homogène, reste à savoir si les déterminations effectuées correspondent effectivement aux valeurs de densité et aux taux d'humidité réels du sol. Tel a été l'objet de l'étalonnage de l'appareil que nous exposons ci-après.

Remarque.

Les résultats que nous venons d'analyser ont été calculés par le programme U.S.E.T.A. utilisé lors de l'étalonnage de la sonde. Travaillant sur des relations faisant intervenir la densité humide comme variable, il intègre en calculant les valeurs d'humidité volumique, les variations relatives à la fois à cette grandeur et à la densité humide.

Les calculs effectués par le programme de dépouillement de routine qui utilise des relations avec la densité sèche déjà fixée comme variable conduiraient à une précision encore meilleure: (programme U.S.O.L.)

C. Vérification de l'étalonnage de l'appareil du C.T.G.R.E.F.

L'étalonnage se fait en comparant les valeurs de densité ou d'humidité données par l'appareil aux valeurs trouvées à partir de prélèvements de sol effectués à la tarière, lors de la mise en place du tube de guidage de la sonde.

Pour passer des valeurs d'humidité pondérales provenant de la méthode gravimétrique aux valeurs volumiques données par la sonde, il est nécessaire de se référer aux densités correspondantes. Elles sont généralement déterminées sur échantillons cylindriques de sol prélevés sur les parois d'une fosse pédologique voisine.

Les courbes d'étalonnage sont les courbes mettant en corrélation les comptages de l'appareil avec les mesures de densité ou d'humidité.

1. Principes de l'étalonnage de la sonde du C.T.G.R.E.F.

Le constructeur fournit ; (cf. documents en annexe) :

une droite unique donnant la relation entre vitesse de comptage de l'appareil et densité apparente humide valable en principe pour n'importe quel sol.

- deux faisceaux de droites - l'un paramètre en densité sèche, l'autre en densité humide, valables pour un sol normal du Danemark (sol limoneux, légèrement sableux),
- ainsi que des indications sur les variations et l'importance de ces variations en fonction de la composition granulométrique des autres sols :
vitesse de comptage plus élevée en milieux plus sableux ou organiques,
vitesse de comptage plus faible en milieux plus argileux ou contenant plus d'éléments absorbant les neutrons lents (bore, chlore, fer...).

M. NORMAND (1973) a montré que le faisceau constructeur paramétré par la densité humide, pouvait être représenté par les équations suivantes :

$$C P H V = \gamma \cdot H_v + S \quad (1)$$

$$S = D \cdot d_n + E \quad (2)$$

$$\gamma = F \cdot S + G \quad (3)$$

T A B L E A U n° 6

Etalonnage de la densité sur le tube 7

Profondeur (cm)	Valeurs du paramètre E			Valeurs obtenues sur cylindres
	- 1300	- 1250	- 1200	
15	1,503	1,499	1,495	1,48
20				
25	1,476	1,472	1,468	
35	1,486	1,482	1,478	
45	1,465	1,462	1,458	1,525
50				
55	1,451	1,447	1,444	
65	1,485	1,481	1,478	
75	1,521	1,518	1,514	1,536
80				
85	1,513	1,509	1,505	
95	1,535	1,531	1,527	
100				1,54
105	1,531	1,526	1,522	
115	1,531	1,526	1,522	
120				
125	1,546	1,542	1,537	1,645

avec $C P H V$ = vitesse de comptage pour la mesure des taux d'humidité en coups par minute H_v = humidité volumique.

D, E, F et G étant des paramètres dépendant des caractéristiques du sol et, du tube de guidage.

Il a calculé 24 faisceaux supplémentaires au faisceau de droites fourni par le constructeur en faisant varier l'ordonnée à l'origine et la pente des droites étalons de façon à couvrir un intervalle de variation relative de $\pm 15\%$ d'humidité volumique pas de 1,25 %.

De plus, un programme fortran USETA permet le dépouillement des données et le test semi-automatique des faisceaux d'étalonnage par groupe de neuf.

L'ordinateur fournit les valeurs et le tracé graphique d'un profil de densité humide, de neuf profils d'humidité volumique, d'humidité pondérale et de densité sèche. C'est par ces derniers profils d'humidité pondérale et de densité sèche que s'effectue au vu des résultats obtenus sur échantillons, le choix des paramètres d'étalonnage D, E, F et G et les droites étalons pour les tubes étudiés.

Remarques :

Les caractéristiques pédologiques des sols étudiés font que généralement un seul faisceau d'étalonnage est suffisant pour traiter l'ensemble des horizons d'un profil. Il est cependant probable que dans des sols très hétérogènes et selon le degré de précision exigé, il soit nécessaire de faire appel à plus d'un faisceau. Les paramètres retenus sont ensuite introduits dans un programme de dépouillement USOL pour les mesures de routine effectuées ultérieurement en ce site.

2. Vérification de l'étalonnage de l'appareil utilisé au C.T.G.R.E.F.

Les tubes de mesures étant déjà implantés lors de notre stage, nous n'avons fait que vérifier l'étalonnage déjà pratiqué en comparant l'évolution dans le temps des valeurs données par l'appareil à celles mesurées sur les parois de la fosse adjacente.

Le tableau n° 6 est donné pour illustrer le principe de l'étalonnage que nous venons d'exposer.

Tableau n°7 - Profil de densité sèche de la station d'Antony.

Profondeur en cm	Traitements			
	1	2	3	4
15	1,515	1,555	1,524	1,54
	1,51	1,55	1,479	1,495
	1,525	1,605	1,551	1,567
	1,675	1,715	1,644	1,655
	1,58	1,58	1,58	1,596
	1,64	1,64	1,657	1,671
	1,62	1,62	1,587	1,599
25	1,560	1,60	1,481	1,496
	1,47	1,51	1,452	1,468
	1,42	1,50	1,462	1,478
	1,625	1,665	1,623	1,634
	1,55	1,55	1,53	1,546
	1,56	1,56	1,537	1,552
	1,595	1,595	1,562	1,573
35	1,430	1,47	1,47	1,485
	1,465	1,505	1,464	1,478
	1,365	1,445	1,409	1,424
	1,54	1,58	1,53	1,542
	1,475	1,475	1,45	1,466
	1,535	1,535	1,515	1,529
	1,525	1,525	1,52	1,531
45	1,405	1,445	1,432	1,447
	1,46	1,50	1,442	1,458
	1,395	1,475	1,435	1,45
	1,455	1,495	1,453	1,464
	1,485	1,485	1,452	1,467
	1,475	1,475	1,448	1,463
	1,46	1,46	1,447	1,458
55	1,450	1,49	1,484	1,498
	1,44	1,48	1,428	1,444
	1,40	1,48	1,433	1,448
	1,46	1,50	1,464	1,475
	1,455	1,485	1,479	1,494
	1,525	1,525	1,522	1,535
	1,47	1,47	1,428	1,439
65	1,47	1,51	1,504	1,518
	1,47	1,51	1,462	1,478
	1,42	1,50	1,451	1,467
	1,505	1,545	1,499	1,51
	1,52	1,52	1,508	1,523
	1,50	1,50	1,485	1,50
	1,43	1,43	1,404	1,416

(:	:	:	:)
(	:	1,51	: 1,55	: 1,541	: 1,556)
(	:	1,515	: 1,555	: 1,498	: 1,514)
(	:	1,44	: 1,52	: 1,472	: 1,488)
(	75	: 1,48	: 1,52	: 1,484	: 1,495)
(	:	1,535	: 1,535	: 1,531	: 1,546)
(	:	1,525	: 1,525	: 1,504	: 1,519)
(	:	1,525	: 1,525	: 1,52	: 1,531)
(:	:	:	:)
(	:	1,50	: 1,54	: 1,507	: 1,523)
(	:	1,505	: 1,545	: 1,489	: 1,505)
(	:	1,475	: 1,555	: 1,508	: 1,523)
(	85	: 1,495	: 1,535	: 1,506	: 1,518)
(	:	1,58	: 1,58	: 1,585	: 1,600)
(	:	1,545	: 1,545	: 1,528	: 1,543)
(	:	1,56	: 1,56	: 1,546	: 1,558)
(:	:	:	:)
(	:	1,52	: 1,56	: 1,549	: 1,564)
(	:	1,52	: 1,56	: 1,511	: 1,527)
(	:	1,475	: 1,555	: 1,494	: 1,511)
(	95	: 1,51	: 1,55	: 1,492	: 1,505)
(	:	1,565	: 1,565	: 1,556	: 1,572)
(	:	1,54	: 1,54	: 1,504	: 1,52)
(	:	1,545	: 1,545	: 1,518	: 1,53)
(:	:	:	:)
(	:	1,51	: 1,55	: 1,531	: 1,547)
(	:	1,52	: 1,56	: 1,504	: 1,522)
(	:	1,505	: 1,585	: 1,554	: 1,57)
(	105	: 1,535	: 1,575	: 1,531	: 1,544)
(	:	1,57	: 1,57	: 1,534	: 1,551)
(	:	1,575	: 1,575	: 1,562	: 1,578)
(	:	1,555	: 1,555	: 1,546	: 1,558)
(:	:	:	:)
(	:	1,52	: 1,56	: 1,534	: 1,551)
(	:	1,515	: 1,555	: 1,504	: 1,522)
(	:	1,535	: 1,615	: 1,555	: 1,571)
(	115	: 1,545	: 1,585	: 1,536	: 1,548)
(	:	1,60	: 1,60	: 1,599	: 1,615)
(	:	1,515	: 1,515	: 1,478	: 1,495)
(	:	1,55	: 1,55	: 1,501	: 1,515)
(:	:	:	:)
(	:	1,55	: 1,59	: 1,572	: 1,589)
(	:	1,51	: 1,55	: 1,519	: 1,537)
(	:	1,520	: 1,60	: 1,511	: 1,529)
(	125	: 1,50	: 1,54	: 1,518	: 1,531)
(	:	1,605	: 1,605	: 1,612	: 1,628)
(	:	1,470	: 1,47	: 1,445	: 1,464)
(	:	1,545	: 1,545	: 1,538	: 1,551)
(:	:	:	:)

Tableau n°7-Profil de densité sèche de la station d'Antony
(Suite)

Tableau n°8- Profil d'humidité volumique de la station d'Antony

Profondeur en cm	Traitements			
	1	2	3	4
15	33,8	35,1	35,7	34,1
	31,9	34,5	35,7	34,1
	34,5	35,2	36,1	34,5
	31,3	32,5	33,7	32,2
	35,7	35,7	35,7	34,1
	32,0	32,0	31,8	30,4
	33,8	33,8	34,4	32,8
25	31,7	32,9	34,9	33,3
	31,7	34,3	35,3	33,7
	34,8	35,5	36,1	34,5
	32,6	33,9	34,6	33,0
	35,3	35,3	35,6	34,0
	33,3	33,3	33,7	32,2
	33,8	33,8	34,4	32,8
35	32,2	33,4	33,4	31,9
	30,3	32,8	33,5	32,0
	33,4	33,9	34,6	33,0
	35,5	34,8	35,6	34,0
	35,1	35,1	35,5	33,9
	32,5	32,5	32,8	31,4
	34,1	34,1	34,2	32,7
45	32,1	33,2	33,5	32,0
	30,8	33,4	34,3	32,8
	32,6	33,1	33,8	32,3
	33,2	34,5	35,2	33,6
	34,1	34,1	34,7	33,1
	32,7	32,7	33,1	31,7
	33,7	33,7	33,9	32,4
55	31,4	32,6	32,7	31,3
	30,5	33,0	33,8	32,3
	32,1	32,6	33,4	31,9
	31,7	32,9	33,5	32,0
	33,7	33,7	33,8	32,3
	31,4	31,4	31,5	30,1
	32,5	32,5	33,2	31,8
65	31,3	32,5	32,6	31,2
	30,9	33,4	34,2	32,7
	32,7	33,2	34,1	32,5
	31,1	32,3	33,1	31,6
	33,9	33,9	34,1	32,6
	33,0	33,0	33,2	31,8
	33,9	33,9	34,4	32,9

	:	:	:	:	:	:
	:	32,5	:	33,8	:	33,9
	:	30,9	:	33,5	:	34,4
	:	33,7	:	34,4	:	35,2
75	:	32,7	:	34,0	:	34,6
	:	33,6	:	33,6	:	33,7
	:	33,5	:	33,5	:	33,8
	:	32,8	:	32,8	:	32,9
	:	:	:	:	:	:
	:	32,3	:	33,6	:	34,1
	:	32,3	:	35,0	:	36,0
	:	33,7	:	33,9	:	34,7
85	:	33,1	:	34,4	:	34,9
	:	33,4	:	33,4	:	33,3
	:	33,7	:	33,7	:	34,0
	:	33,8	:	33,8	:	34,0
	:	:	:	:	:	:
	:	33,6	:	34,9	:	35,1
	:	32,7	:	35,5	:	36,3
	:	34,3	:	35,0	:	36,1
95	:	33,9	:	35,3	:	36,3
	:	34,1	:	34,1	:	34,3
	:	35,2	:	35,2	:	35,8
	:	35,1	:	35,1	:	35,6
	:	:	:	:	:	:
	:	34,5	:	35,9	:	36,2
	:	34,9	:	37,9	:	38,9
	:	34,5	:	35,2	:	35,7
105	:	34,0	:	35,4	:	36,1
	:	35,2	:	35,2	:	35,9
	:	35,4	:	35,4	:	35,6
	:	36,5	:	36,5	:	36,6
	:	:	:	:	:	:
	:	35,3	:	36,7	:	37,2
	:	35,6	:	38,6	:	39,6
	:	34,6	:	35,3	:	36,3
115	:	35,3	:	36,8	:	37,6
	:	35,7	:	35,7	:	35,7
	:	35,4	:	35,4	:	39,0
	:	38,9	:	38,9	:	39,8
	:	:	:	:	:	:
	:	36,0	:	37,4	:	37,8
	:	36,2	:	39,4	:	39,9
	:	35,9	:	36,6	:	38,2
125	:	36,2	:	37,7	:	38,1
	:	36,4	:	36,4	:	36,2
	:	38,3	:	38,3	:	41,1
	:	38,5	:	38,5	:	38,7
	:	:	:	:	:	:

Tableau n° 8 - Profil d'humidité volumique de la station d'Antony

(Suite)

Les valeurs de la densité apparente sèche ont été calculées à partir du faisceau comprenant les droites de paramètres $E = -1300$, $D = 5750$, $F = 3,0089$ et $G = 31150$ à $E = -900$, $D = 5750$, $F = 2,7472$ et $G = 26184$.

La comparaison des valeurs calculées aux valeurs mesurées sur cylindre de terre, montre que la droite adéquate devrait avoir une valeur de E se situant entre -1300 et -1400 .

Nous avons fait de même pour les différents du tube de guidage.

Une autre méthode d'étalonnage que nous avons effectivement pratiquée consiste à essayer de retrouver l'étalonnage initial au moment de la mise en place du tube. A supposer que celle-ci ait été exécutée dans les meilleures conditions, le résultat est identique. Par ailleurs, cette méthode permet de contrôler le bon fonctionnement de l'appareil ou d'apprécier les changements survenus.

Les figures 1 à 4, montrent pour quelques tubes l'évolution des mesures de densité de la date de mise en place au 24/ 2/75.

On note une faible diminution, de l'ordre de 0,02 à 0,04 sur 1,55 de moyenne. Cette diminution n'est pas systématique ; la densité autour du tube 7 n'a pratiquement pas bougé. De plus, il n'y a pas de relation entre le temps écoulé depuis l'étalonnage et l'amplitude des variations. Il s'en suit qu'une décroissance significative de la source radioactive ne peut être évoquée. Restent les changements dans l'environnement immédiat des tubes ; tassement, poches d'air, écoulement préférentiel qui agissent sur les déterminations de densité.

Les écarts de mesures constatés sont loin d'être significatifs compte-tenu de la variabilité de la densité mesurée sur cylindre, que nous verrons ci-après.

Cependant, étant donné la fidélité et la précision de l'appareil, nous avons procédé à l'ajustement de densité qui s'imposait.

Les tableaux 7 et 8 rassemblent pour sept tubes (n° 6, 7, 8, 9, 11, 12 et 13) les valeurs de densité ou d'humidité découlant :

- de l'utilisation du programme US⁶L suivant les conditions de l'étalonnage initial (1),
- ou après ajustement de la densité (2),
- de l'utilisation du programme USETA avec le faisceau de paramètre $E = 1000$ (3)
- et $E = -1200$ (2).

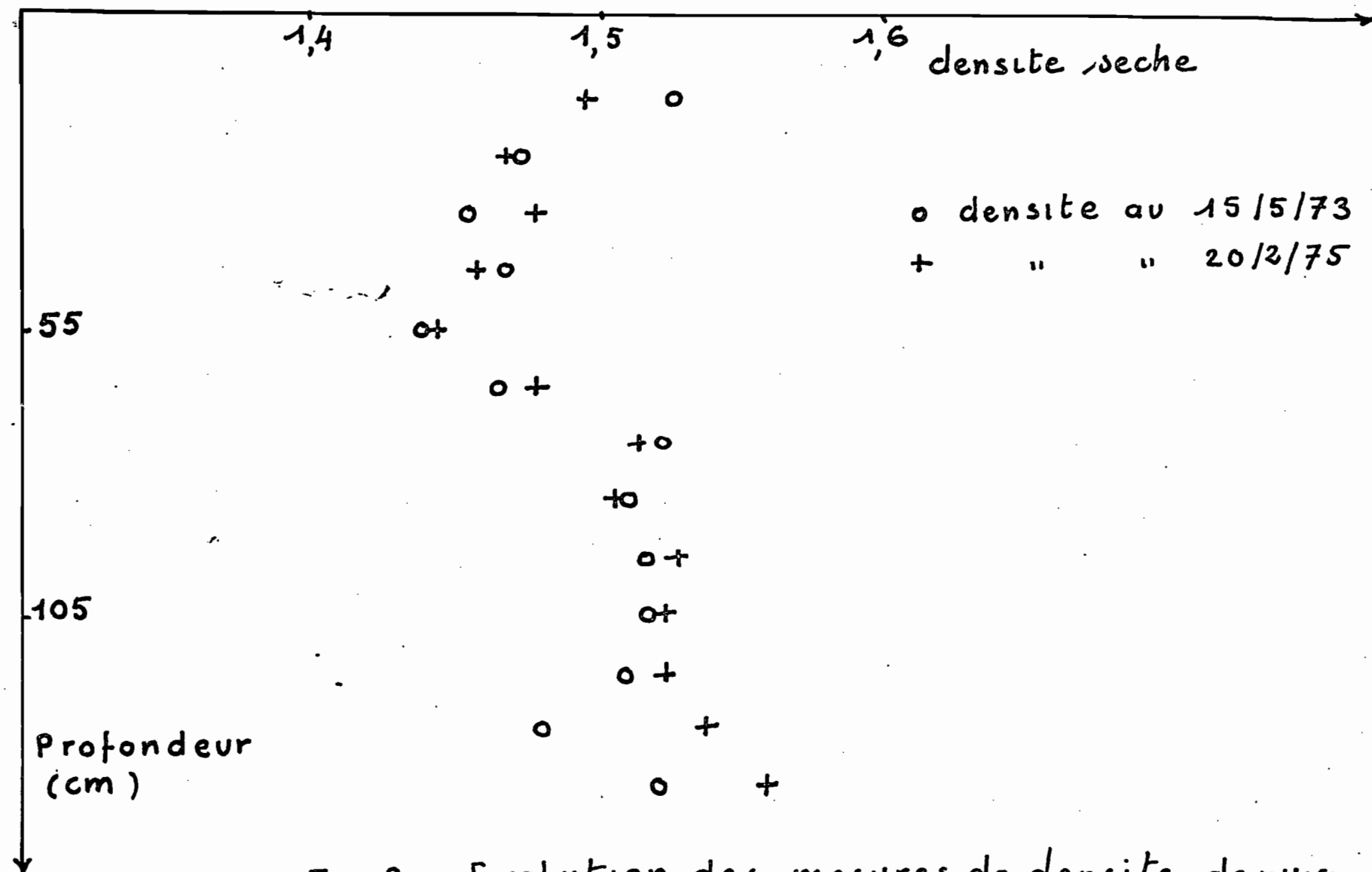


Fig 2 Evolution des mesures de densite depuis
L'etalonnage du tube n°7

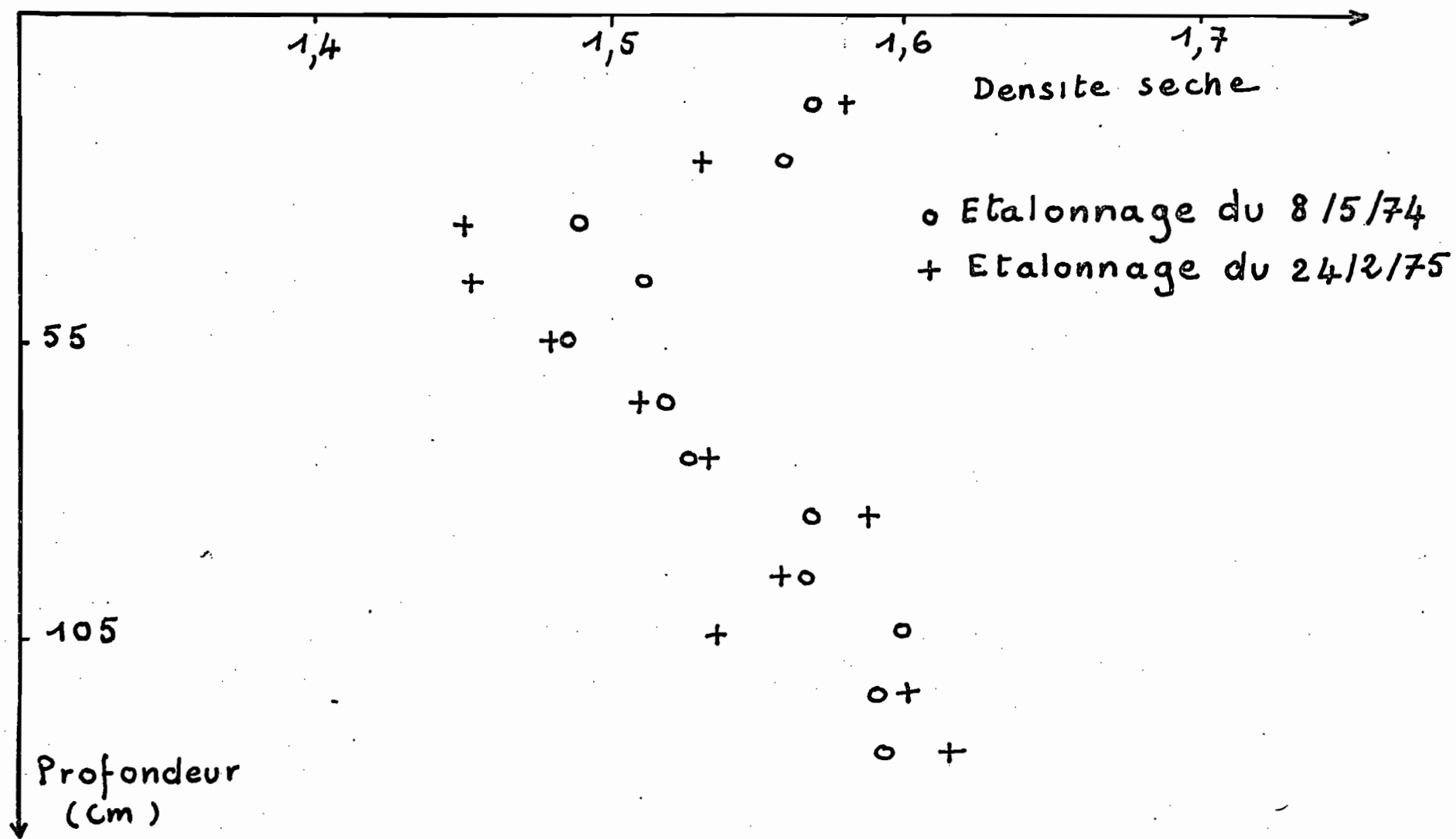
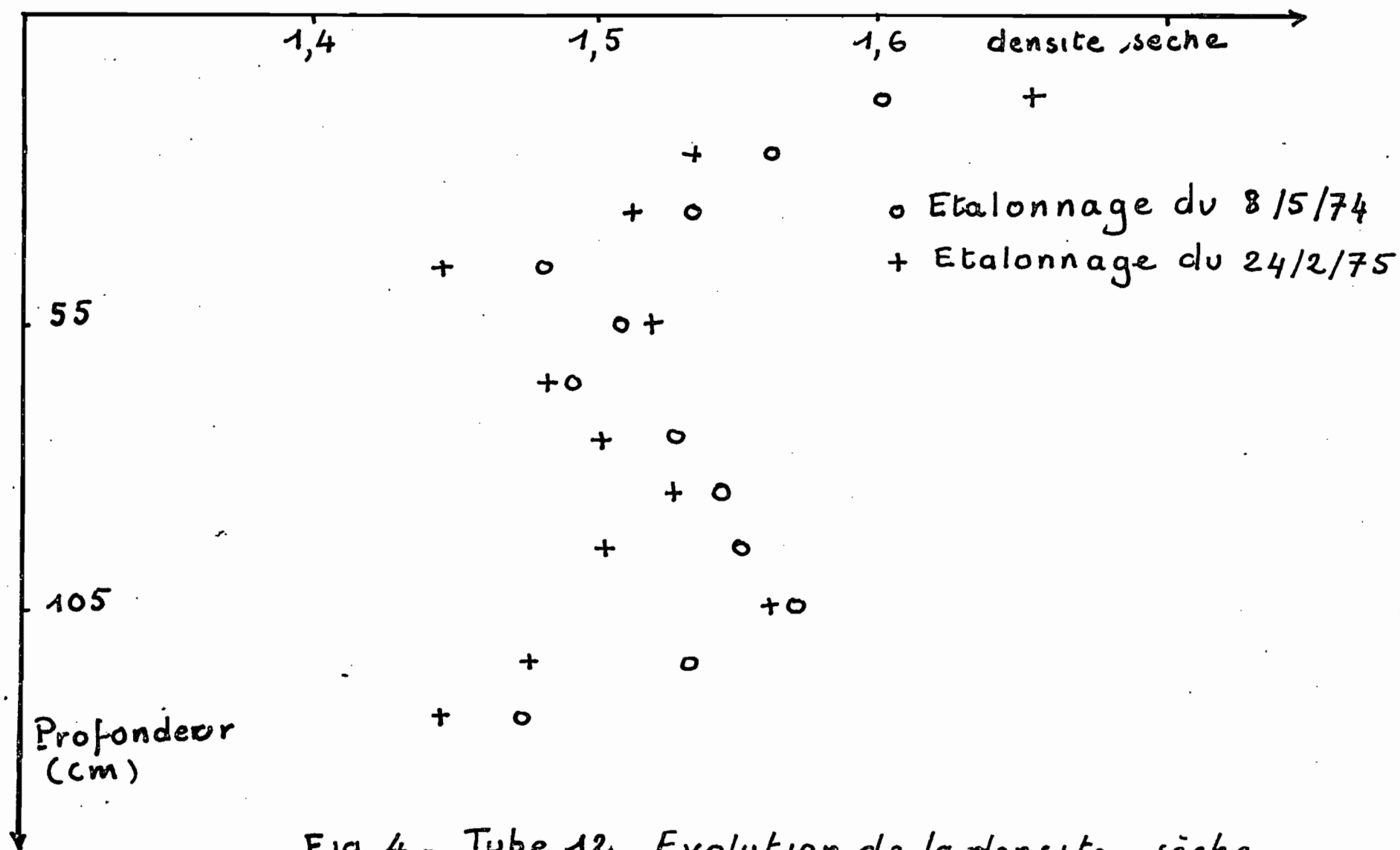


Fig 3 Tube 11 - Evolution de la densite seche depuis la mise en place



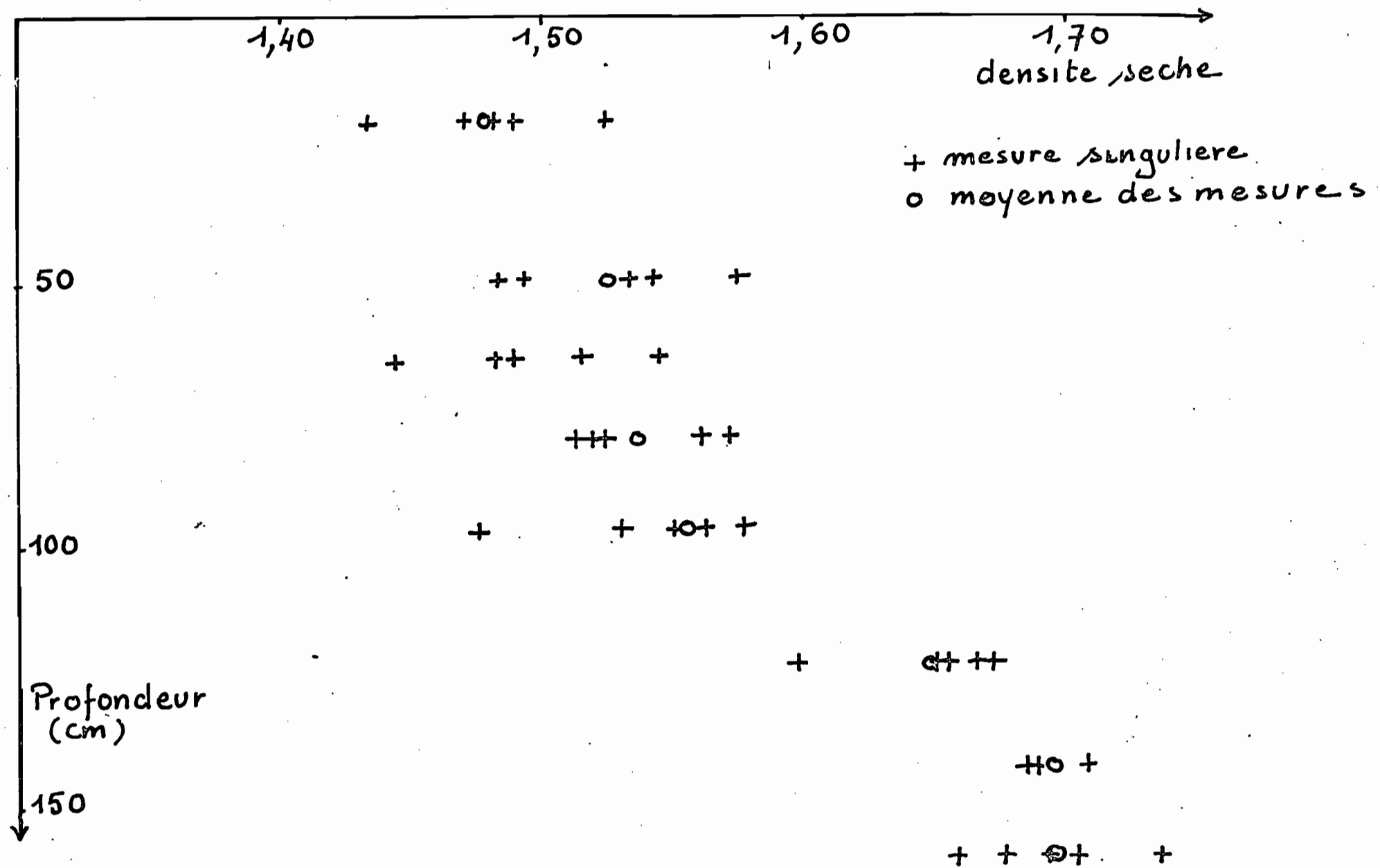


Fig 5. Variabilite des valeurs de la densite apparante seche
mesurees sur echantillons cylindriques de sol

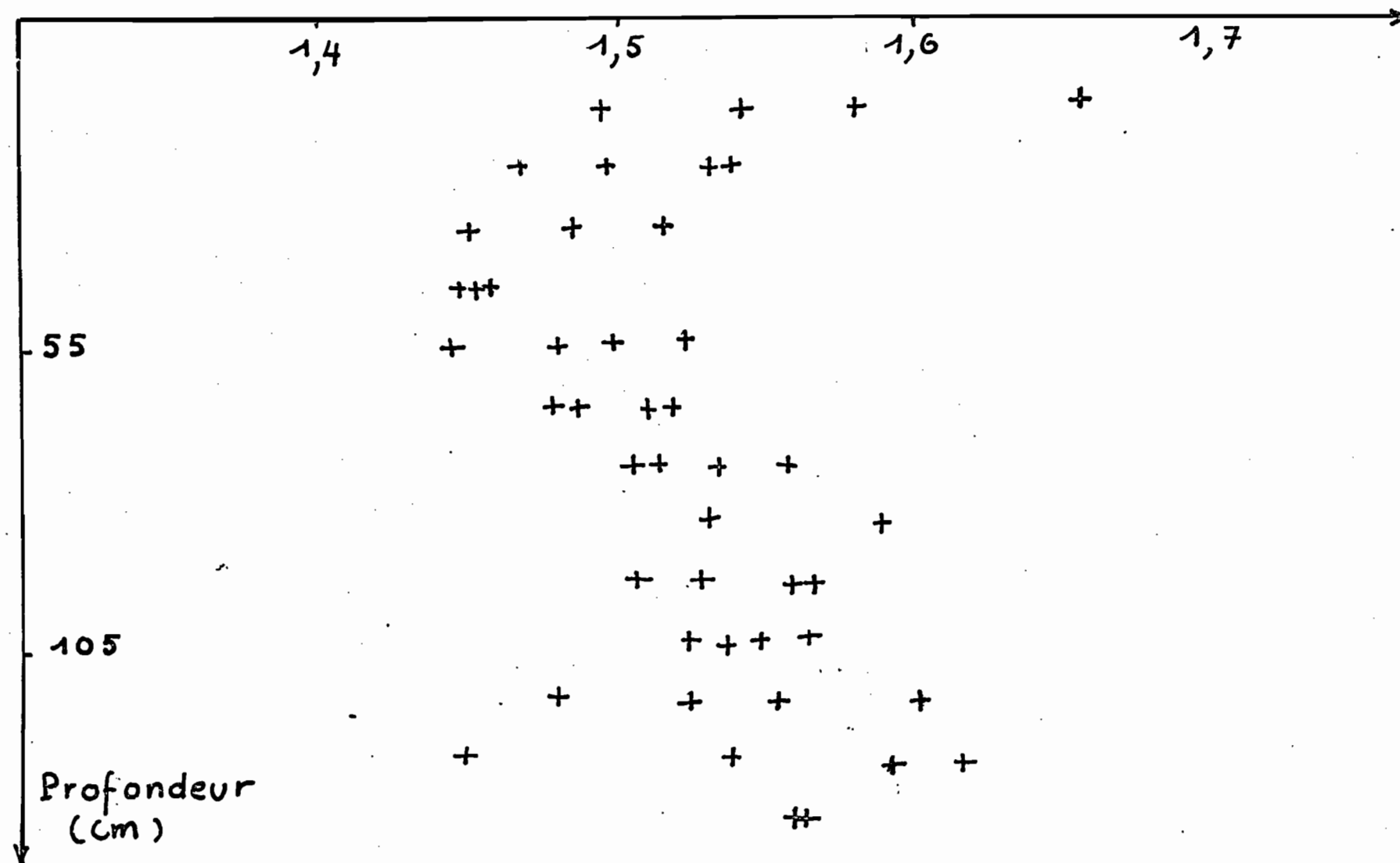


Fig 6 Dispersion des valeurs de la densité apparente sèche
mesurées au densité au 24-2-75

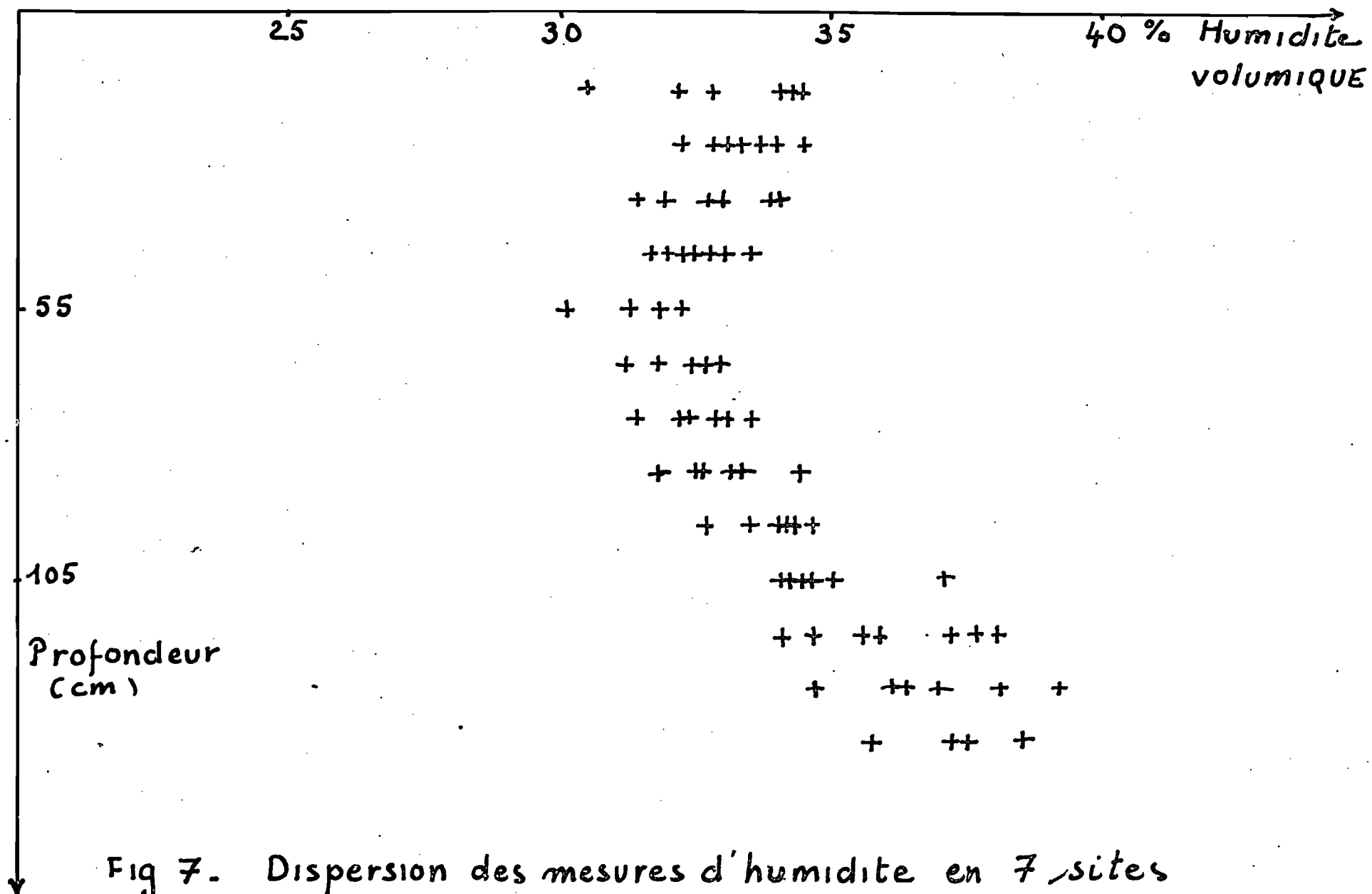


Fig 7. Dispersion des mesures d'humidite en 7 sites
au 24-2-75 apres reajustement de la
densite

L'analyse de la variance de ces résultats montre que les différents étalonnages conduisent à des valeurs significativement différentes pour la densité et l'humidité.

Si on ne tient compte que du fonctionnement de l'appareil, l'ajustement effectué se justifie.

D. Discussion.

La figure n° 5 montre la variabilité des valeurs de la densité mesurée sur cylindres de terre. Les densités des différents horizons sont comprises entre 1,40 et 1,60. Les fluctuations sont surtout prononcées dans les horizons supérieurs et dans une moindre mesure, dans les horizons inférieurs. Vers 75-90 cm la variabilité est plus faible. Il se pourrait que ce soit l'effet d'un tassement qui homogénéise les valeurs. On peut faire les mêmes remarques pour les mesures de densité et d'humidité volumique données par la sonde en notant toutefois, la faiblesse relative des écarts particulièrement visible pour les mesures d'humidité volumique.

Cette homogénéité relative des données de la sonde résulte du fait que la mesure est intégrée sur la zone d'influence de l'appareil, zone grossièrement sphérique qui contient 95 % des neutrons lents et dont le diamètre approximatif D est donné par la formule :

$$D \text{ (cm)} = 30^3 \sqrt{\frac{100}{H_v}} *$$

avec H_v = humidité volumique en %

soit environ 40 cm pour les 33 % d'humidité volumique au moment des mesures, ce qui est nettement plus important que les 5 à 6 cm de diamètre des cylindres de prélèvement.

Réciproquement, l'étalonnage doit tenir compte de ce fait et les comparaisons se pratiquent sur les moyennes de plusieurs mesures gravimétriques.

* On doit cependant noter que la densité des neutrons lents décroît quand on s'éloigne de la source radioactive. Le voisinage immédiat du point de mesure contribue largement à l'établissement de la valeur observée et impose l'exécution de mesures rapprochées.

Quoi qu'il en soit, l'étalonnage d'un site de mesure, est le choix d'une valeur inconnue parmi une sous-population de variables aléatoires extraites par une méthode différente dans le voisinage le plus immédiat possible. Faute de connaître la valeur exacte, la moyenne est retenue. Mais on doit connaître l'intervalle de sa variation.

De sorte que l'ajustement de densité que nous avons opéré est tout à fait superflu étant donné la variabilité constatée des mesures résultant des prélèvements au "cylindre".

En définitive, l'étude de la dispersion du comptage a montré l'extrême fiabilité de fonctionnement et la précision de la sonde de profondeur humidimètre-densimètre du CTGREF.

L'exécution de l'étalonnage et l'analyse de l'évolution des mesures dans le temps met d'autre part l'accent sur les conditions de mise en place du tube de guidage de la sonde.

L'erreur commise sur les déterminations résultant à la fois du bon fonctionnement de l'appareil et de l'étalonnage du site de mesure, on voit toute l'importance que revêt l'opération de mise en place du tube d'accès pour la justesse des mesures.

DEUXIEME PARTIE.

Application de la mesure de l'humidité par radiométrie à la détermination de la capacité au champ.

A. Définition et signification de la capacité au champ.

Tout point de la surface du globe est soumis au rayonnement solaire. L'énergie interceptée présente des fluctuations saisonnières en rapport avec le mouvement apparent du soleil, fluctuations qui se reproduisent assez fidèlement suivant un cycle climatique annuel.

Elle sert en sa majeure partie à vaporiser dans l'atmosphère soit directement par évaporation, soit indirectement par la transpiration des plantes, l'eau des précipitations atmosphériques.

Mais celles-ci dont la distribution est aussi saisonnière, se révèlent des plus irrégulières dans le temps comme dans l'espace et les variations^{ne} produisent généralement^{pas} dans le sens d'un ajustement aux variations du bilan radiatif.

D'où l'importance de la quantité d'eau emmagasinée par le sol en période d'excédent hydrique, réserve qui peut atténuer sinon compenser les déficits instantanés par rapport à la demande d'eau à évaporer.

Cet effet tampon est sans doute proportionnel à l'épaisseur de la couche en laquelle se fait le stockage, mais dépend en premier lieu de caractéristiques hydrodynamiques spécifiques au sol considéré.

Le concept de la capacité de rétention résume ses propriétés. Elle a été introduite par MAYER qui la définit en ces termes en 1880 : "La capacité pour l'eau d'un sol est son aptitude à retenir de l'eau, à une hauteur qui n'est pas atteinte par l'eau capillaire liée à la "grundwasser" (nappe phréatique ou non), sa valeur ne dépend pas de la disposition de la couche de sol sur la verticale, au contraire, elle est identique à différents niveaux ...".

Avec le recul du temps, on note que "l'eau suspendue" qui constitue la réserve hydrique du sol est parfaitement définie. Cependant MAYER n'accorde pas d'importance à l'agencement des divers horizons et semble accorder une importance particulière aux propriétés des matériaux constituant le sol. De plus, sa définition ne préjuge pas des forces mises en jeu.

VEITHMEYER et HENDRICKSON ont précisé les modalités de détermination de la capacité de rétention du sol au champ. Pour ces auteurs, la "field capacity", terme dû à ISRAELEN et WEST en 1922, est la quantité d'eau retenue dans le sol lorsque l'eau gravitationnelle en excès a percolé et que le régime de mouvement descendant de l'eau a pratiquement cessé.

Mais auparavant, les considérations thermodynamiques de BUCKINGHAM (1907) et les travaux menés au laboratoire par BRIGG et MAC LANE (1907), GARDER (1920) et SCHOFIELD (1935), utilisant des techniques de mesures basées sur la centrifugation, avaient abouti à la théorie selon laquelle les forces de rétention développées par le sol pour retenir l'eau étaient équivalentes à 1000 g soit un potentiel de 1000 cm d'eau ou $p^F = 3$ selon les calculs et la terminologie introduits par SCHOFIELD. De sorte que, même en notant le comportement apparemment anormal des sols sableux, VEITHMEYER et HENDRICKSON s'attachèrent à prouver par des corrélations que l'humidité équivalente mesurée au laboratoire, correspondait à la capacité au champ.

Ce n'est qu'à partir des résultats de RICHARDS et WEAVER (1944), lesquels remplaçant la centrifugation par la pression, aboutirent à des valeurs de l'humidité de un tiers d'atmosphère, que l'on prend réellement conscience des à priori introduits dans les considérations et calculs théoriques qu'HENIN et DOLGOV (1948) avaient d'ailleurs contesté.

Il est maintenant établi que la capacité au champ ne correspond pas à une force de succion déterminée : MARSHALL (1949), WETHERLEIN (1959), BONNEAU (1961), GRAS (1962), COMBEAU (1963), FEODOROFF et BETREMIEUX (1964), SALTER et WILLIAMS (1965), OBREJAN et coll. (1966)...

Tous ces auteurs ont montré :

- que le p^F à la capacité au champ n'est pas unique pour tous les sols,
- qu'il existe bien des corrélations liant l'humidité à la capacité au champ, l'humidité à différents p^F à la granulométrie...

Mais ces relations ne sont pas généralisables, car la capacité au champ dépend aussi de la structure et de la stabilité de celle-ci (COMBEAU, HENIN).

Par la suite les études se sont orientées sur la dynamique de l'eau dans le sol. RODE (1960), puis FEODOROFF (1962) analysant le ressuyage notent deux phases distinctes : une phase de drainage rapide suivie d'une phase de drainage lent au cours de laquelle la teneur en eau du sol évoluant très lentement peut être considérée comme constante ("palier" d'humidité de RODE).

T A B L E A U n° 9

Distribution de l'eau 2 à 4 heures après la
fin de l'irrigation

n° tube	Réserve initiale (l/m ²)	Eau apportée (l/m ²)	Réserve après 2-4h (l/m ²)	Eau retenue (l/m ²)	Perte en eau (l/m ²)
6	398,38	75	432,42	34,04	- 40,96
7	394,47	75	437,00	42,53	- 32,47
11	396,24	75	428,59	32,35	- 42,65
12	398,21	75	430,13	31,92	- 43,08
8	395,70	150	430,22	34,52	-115,48
13	393,87	150	431,44	37,57	-112,43
9	387,48	250	421,96	34,48	-215,52
14	396,11	250	433,25	37,14	-212,86
Moy.	395,06		430,63	35,57	
21	408,83	0	414,62	5,79	
22	400,77	0	404,6	3,23	
23	410,60	0	413,01	2,41	
24	412,80	0	412,84	0,04	
Moy.	408,25	0	411,27	3,02	

T A B L E A U n° 10

Perméabilité de quelques horizons du profil

Profondeur (cm)	Perméabilité (cm/s)	Débit (l/h/m ²)
57 - 77	10^{-2}	360
	$2 \cdot 10^{-3}$	72
78 - 98	$3 \cdot 10^{-2}$	1080
	$3 \cdot 10^{-3}$	108
100 - 120	$2,5 \cdot 10^{-2}$	900
	$3,10^{-3}$	108

La capacité au champ selon MAYER apparaît comme une valeur asymptotique à la courbe de ressuyage. Cette valeur limite vers laquelle tendrait l'humidité du sol par la redistribution, il est difficile de la préciser graphiquement et impossible à déterminer au champ à cause de la lenteur du phénomène : OGATA et RICHARD (1960).

Par contre les deux phases de drainage rapide et lent se reproduisent invariablement durant des expériences conduites au laboratoire ou au champ.

Le point de transition entre ces deux modes d'écoulement ne correspond ni à un pF , ni à un temps de drainage, mais à un taux d'humidité déterminé, spécifique pour chaque sol.

C'est ce point singulier d'humidité qui est généralement pris comme "capacité au champ". Point de départ d'un état métastable pour le mouvement de l'eau dans le sol, il correspond à la quantité d'eau définie par VEIHMEYER et HENDRICKSON et compte tenu des vitesses relatives des phénomènes d'absorption végétale, évaporation, c'est la quantité d'eau maximale emmagasinable par le sol.

A la suite des travaux de HALLAIRE (1957-1965), on explique le comportement de l'eau dans le sol suivant le modèle capillaire malgré ses limites et les schématisations simplificatrices qu'il suppose. Le sol est en effet assimilé à un résidu de capillaires plus ou moins fins empruntés par l'eau. La circulation se fait dans les gros capillaires : diamètre supérieur ou égal à une vingtaine de microns. Les capillaires les plus fins servent au stockage : PEERLKAMP P K et BOEKEL I (1960), HENIN (1969).

La texture, la structure, l'agencement des différents horizons conditionnent l'existence, la continuité et la stabilité des pores et fissures empruntés par l'eau en circulation et justifient l'importance actuellement accordée à ces caractéristiques dans les études se rapportant à la capacité au champ.

C'est des particularités de ces caractéristiques que dérivent la spécificité des propriétés hydrodynamiques des sols et de leur taux d'humidité à la capacité au champ.

La présence notamment de discontinuités dans les horizons sous-jacents peut modifier radicalement la rétention pour l'eau des horizons supérieurs, modifications qui peuvent remettre même en question le concept de capacité au champ PERRIGAUD (1963). Aussi les mesures exécutées au

champ servent-elles de référence aux méthodes de détermination de la capacité de rétention au laboratoire.

Par ailleurs, celles-ci tendent à se rapprocher des méthodes de mesure in situ en simulant la circulation de l'eau sur monolithes de sol non perturbés FEODOROFF (1964), car ce n'est que par abus de langage que l'on continue à assimiler "l'humidité équivalente" déterminée au laboratoire par centrifugation ou par pression à la capacité au champ mesurée in situ.

B. Mesure in-situ de la capacité de rétention hydrique du sol de la station C.T.G.R.E.F. d'Antony.

L'expérimentation décrite ci-après devait servir d'exemple pour la détermination de la capacité au champ, suivant la méthode de la saturation progressive du sol par irrigation fractionnée et analyse de la vitesse de ressuyage. Des circonstances défavorables : pluies continues, utilisation intensive de l'humidimètre à neutrons, temps trop court imparti à l'étude, compte tenu de l'horaire des cours du D.E.A. et d'un certificat de statistique appliquée, ne nous a pas permis d'obtenir des résultats démonstratifs avant notre départ pour la Haute-Volta.

Nous avons dû modifier notre protocole initial, modifier la méthode. Cependant les observations et l'interprétation des résultats ne sont pas dénuées d'intérêt à la fois pour l'expérience réalisée et pour la méthodologie de la détermination.

I. LE MILIEU.

1.1. Le Climat.

Nous ne disposons pas de renseignements suivis d'ordre météorologique pour la station d'Antony. Les relevés très sporadiques effectués l'ont été durant des expériences très courtes et ne concernent que la température. On pourrait se reporter aux données climatiques de la région parisienne, lesquelles sont relatives à un climat de type océanique, particulièrement arrosé cette année.

1.2. La végétation.

Le dispositif expérimental est situé en bordure d'un champ de culture, transformé momentanément en prairie de fauche à ray-grass (*Lolium perenne*) pour l'étude du matériel agricole. La végétation comporte de nombreuses plantes rudérales, plantes cultivées et adventices des cultures que nous n'avons pas étudiées. Une liste de plantes est sans intérêt sans interprétation, cependant que l'analyse de ce type de végétation, compte tenu de l'influence de l'homme, est assez laborieuse et justifie à elle seule, un sujet de rapport.

1.3. Le sol.

Le sol est un sol brun calcaire développé sur loess. Nous reproduisons in extenso la description donnée par J.L. DEVILLERS, ingénieur au C.T.G.R.E.F., ainsi que les résultats de l'analyse granulométrique. La texture est limono-argilo-sableuse en surface et en profondeur. La texture argilo-limono-sableuse des horizons intermédiaires est, nous le verrons ultérieurement, d'une grande importance pour les propriétés hydrodynamiques du sol. (cf. documents en annexe).

La structure est pour la majeure partie du profil, continue, fragmentaire et polyédrique. Les nombreuses fentes de retrait, fissures, conduits de radicules et forams de lombrics, sont à noter pour la circulation de l'eau gravitationnelle.

II. METHODES.

Le principe de la détermination a été d'amener le sol à saturation par irrigation unique à cause des conditions climatiques et du temps imparti à l'étude, et de suivre l'évolution de l'humidité du sol protégé de l'évaporation pour repérer le point de passage du drainage rapide au drainage lent.

Par ailleurs, des déterminations effectuées au laboratoire sur les caractéristiques physiques et hydriques du sol devaient permettre de préciser la signification de la capacité au champ ainsi mesurée.

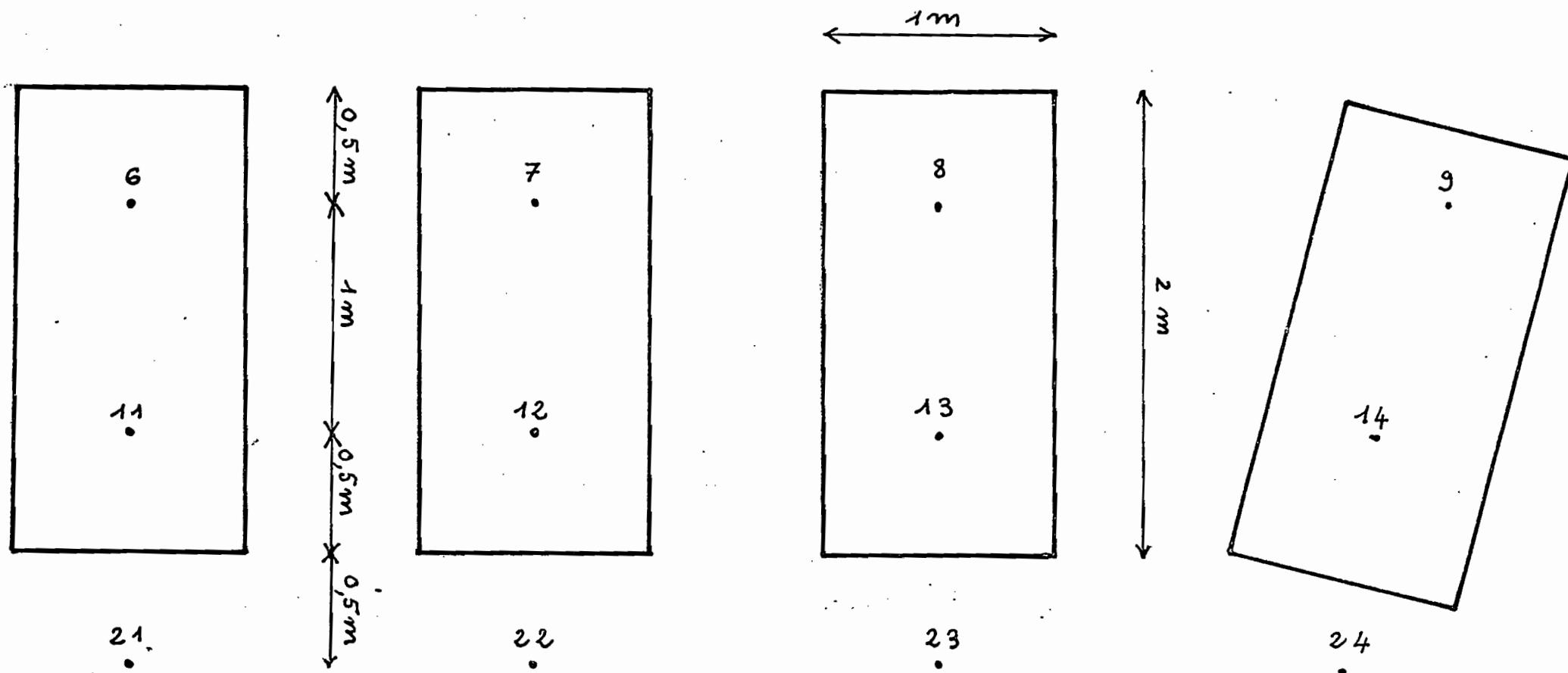


Fig n° 7 bis Schema du dispositif experimental

III. DISPOSITIF ET CONDITIONS EXPERIMENTALES.

3.1. Dispositif expérimental.

Le champ d'expérience a été disposé suivant le schéma ci-contre. Les photos montrent comment ont été délimités les aires d'irrigation qui englobent deux tubes de mesures du ressuyage et laisse de côté un tube témoin. (cf. documents en annexe).

Après irrigation les bassins ainsi que le voisinage des tubes témoins adjacents ont été protégés de l'évaporation par une bâche en matière plastique grise.

3.2. Traitements.

Nous avons apporté :

- 150 l d'eau mesurés à l'aide d'un compteur donnant le litre sur les deux premiers bassins d'irrigation ; tubes 6, 11, et 7, 12 soit 75 mm.
- 300 l d'eau dans le troisième bassin ; tubes 8 et 13, soit 150 mm.
- et 500 l d'eau dans le dernier bassin ; tubes 9 et 14 soit 250 mm.

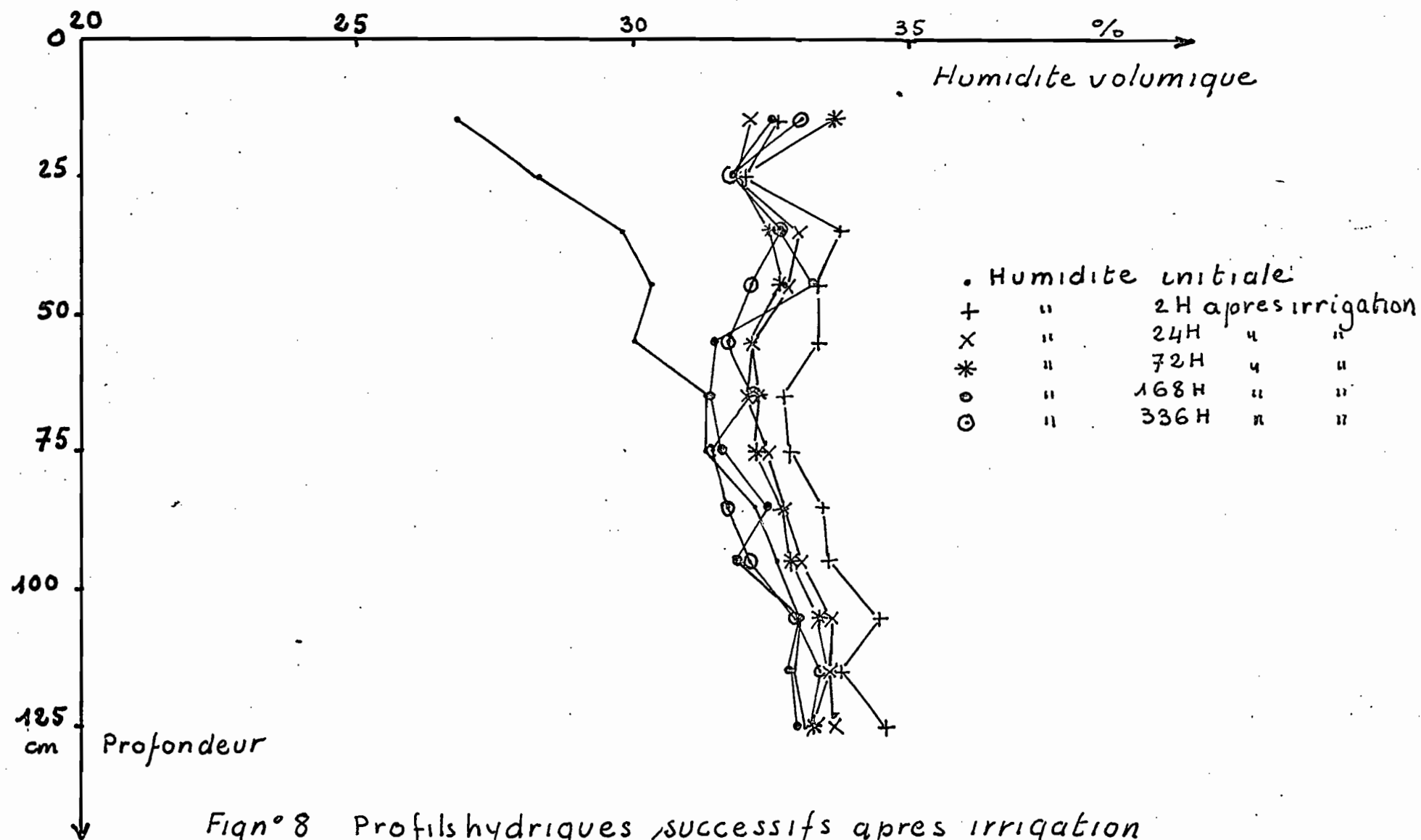
Ces quantités d'eau, la dernière surtout, devaient en principe être suffisantes pour la saturation du profil au moins en ses horizons superficiels.

Les mesures d'humidité ont été faites 2-3, 24, 48, 72 heures, 7 et 14 jours après la fin des irrigations.

3.3. Conditions expérimentales pendant la durée des manipulations.

Depuis le début de l'année, les pluies sont tombées de façon quasi continue sur la région parisienne. Elles ont beaucoup gêné l'installation du dispositif qui n'a pu être mis en place qu'enfin mai et le déroulement de l'expérience, qui a été exécutée en des conditions qui sont loin de l'idéal.

Les taux d'humidité initiaux ont été quand même voisins de la capacité au champ après un mois de report et d'attente.



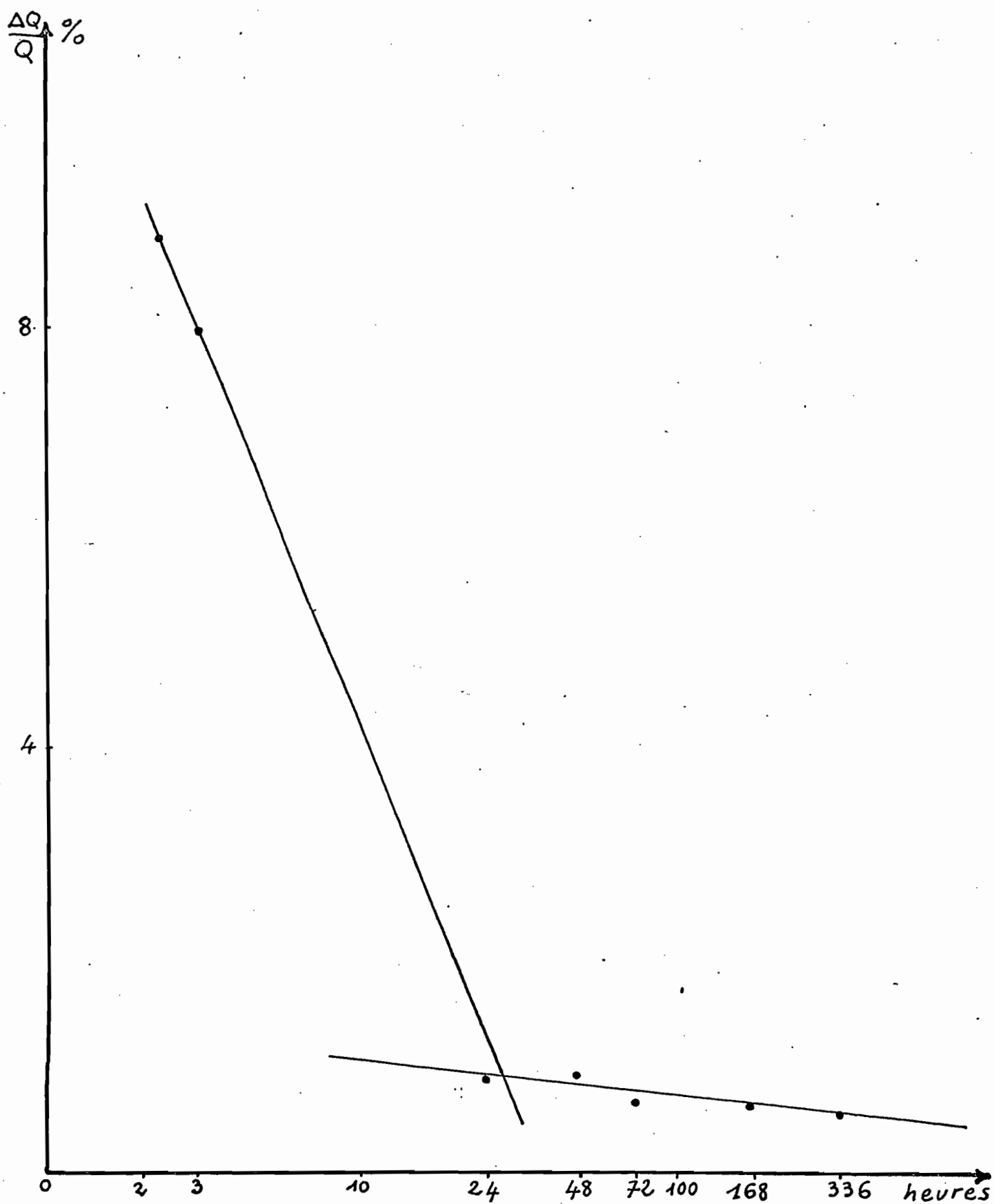


Fig. 9 Evolution de la reserve hydrique du sol.

IV. RESULTATS.

4.1. La saturation du profil.

Quelle que soit la quantité d'eau apportée, le sol ne retient que 35 mm en moyenne sur 125 cm d'épaisseur. (C.F. Tableau n° 9). L'augmentation de la rétention est faible en profondeur, de même que l'infiltration latérale. Il en résulte que la majeure partie de l'eau d'irrigation s'est infiltrée et a percolé en profondeur hors de la zone de mesure.

Les valeurs de porosité situant celle-ci vers 45 % du volume, deux à quatre heures après l'irrigation, le profil n'est plus saturé.

Nous avons recommencé la manipulation de saturation en irriguant sous charge d'eau de 5 cm pendant 24 heures. Les mesures ont été faites une heure avant l'arrêt de l'apport d'eau. Sur près de 4.600 l d'eau apportés par mètre carré, 48 l ont été retenus en moyenne (47,50 - 49,00 l).

Nous avons donc confirmation que le sol est très filtrant et qu'il n'existe pas de discontinuité dans le profil qui permettrait du moins pour l'épaisseur du sol considérée de mieux approcher la saturation.

4.2. La capacité au champ.

Les profils hydriques évoluent peu (figure 8). L'analyse de la réserve hydrique du sol sur 125 cm (figure n° 9) met en évidence les deux modes d'écoulement de l'eau. Le drainage lent très bien observé se met sous l'équation suivante :

$$\frac{\Delta Q}{Q} \% = - 0,2698 \log t + 1,2177$$

ΔQ variation de la réserve Q

t = temps en heure

Le drainage rapide, peut être formulé par une équation du même type que nous n'explicitons pas étant donné le caractère fugace du phénomène et l'imprécision de la mesure du temps et le petit nombre de points.

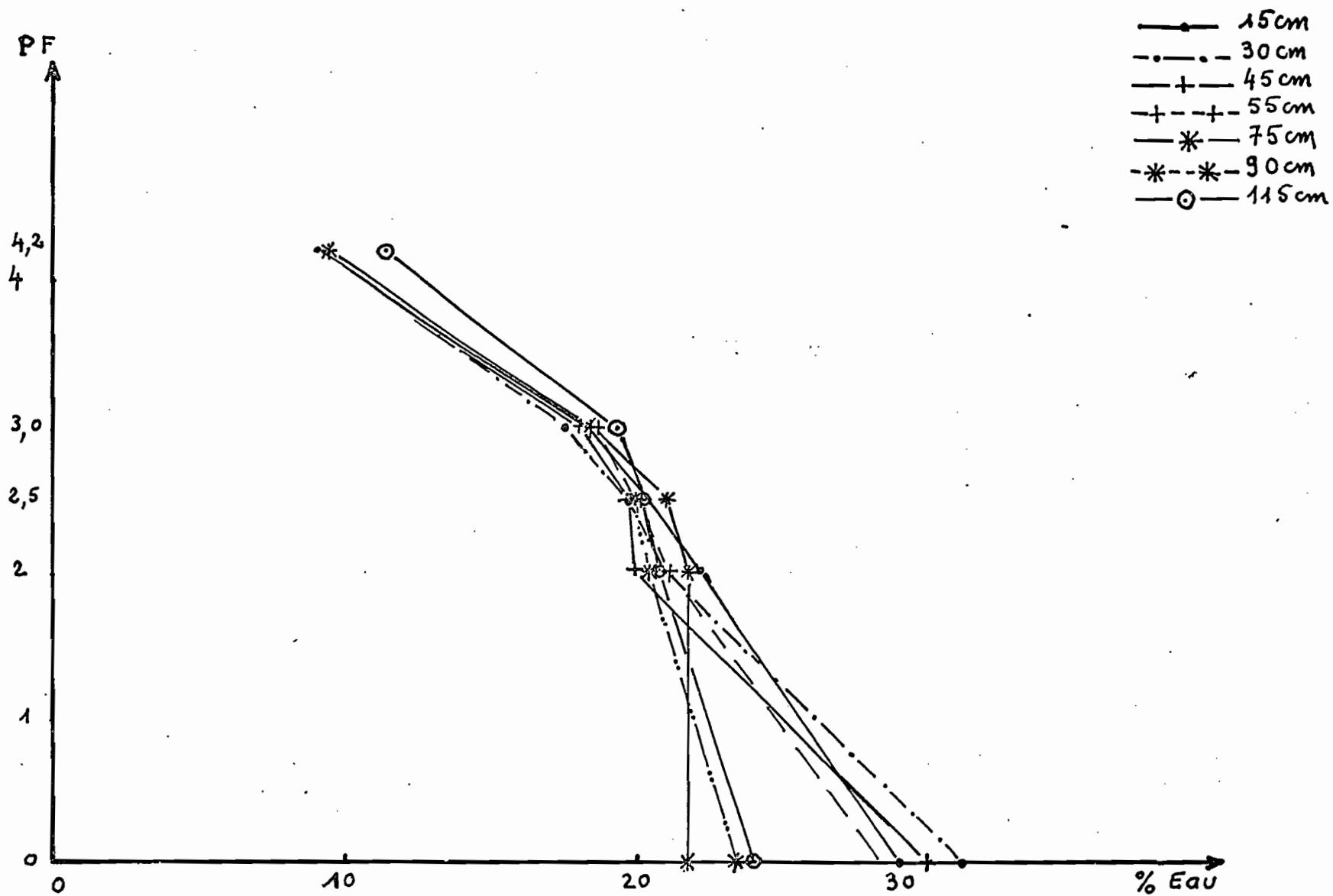


Fig 10. Courbe de l'humidite en fonction du pF

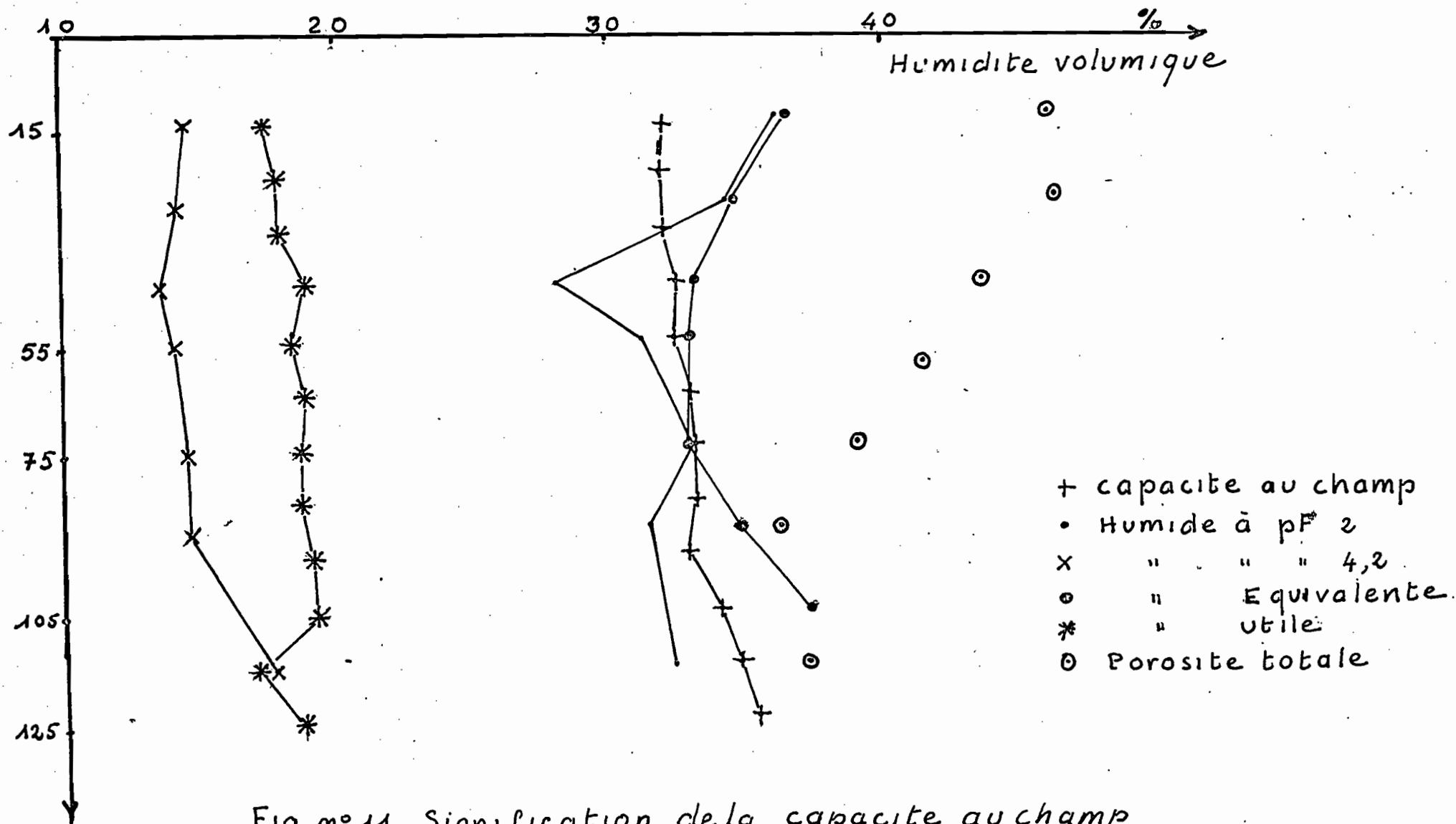


Fig n°11 Signification de la capacite au champ

L'intersection des deux courbes montre que 24 heures après l'arrêt des irrigations, l'eau ne se redistribue que par drainage lent. Y correspond une valeur moyenne de la capacité au champ de 33 % d'humidité volumique pour l'ensemble du profil, et des valeurs singulières augmentant de 32 à 35 % de la surface à 125 cm de profondeur. Ces valeurs sont similaires à celles trouvées par HALLAIRE (1956) pour différents limons (20 - 25° en poids).

V. DISCUSSION.

5.1. La saturation du profil.

En ce qui concerne la saturation du sol, il a semblé surprenant que de telles quantités d'eau aient si peu d'effet sur la réserve hydrique du sol. Nous avons cherché l'explication en analysant la perméabilité.

Au tableau n° 10 sont consignés les résultats des mesures effectuées par le C.T.G.R.E.F. sur "cubes Vergière" préalablement saturés d'eau. Les valeurs inférieures résultent de la décroissance de cette grandeur après 4 jours de percolation. Ces vitesses de percolation très élevées, sont assez surprenantes pour un sol limono-argileux développé sur loess, car elles le situent au niveau des sols développés sur sables grossiers très perméables (MUNTZ in HENIN).

Il se pourrait qu'elles soient dues à la macro-structure polyédrique notée lors de la description du profil.

Quoi qu'il en soit, ces valeurs sont en parfait accord avec nos observations et indiquent d'autre part l'absence de discontinuité en profondeur dans le profil.

Il en résulte que la méthode de saturation progressive du sol pour éviter l'emprisonnement d'air dans l'espace libre n'est pas applicable dans ce type de sol. Elle ne ferait en effet que prolonger le temps mis pour remplir la microporosité du profil.

5.2. Signification de la capacité au champ.

La courbe des p_F en fonction de l'humidité (fig. n° 1⁰), situe la capacité au champ à $p_F = 2$. L'humidité équivalente a été mesurée sur échantillons saturés et centrifugés à 1000 g.

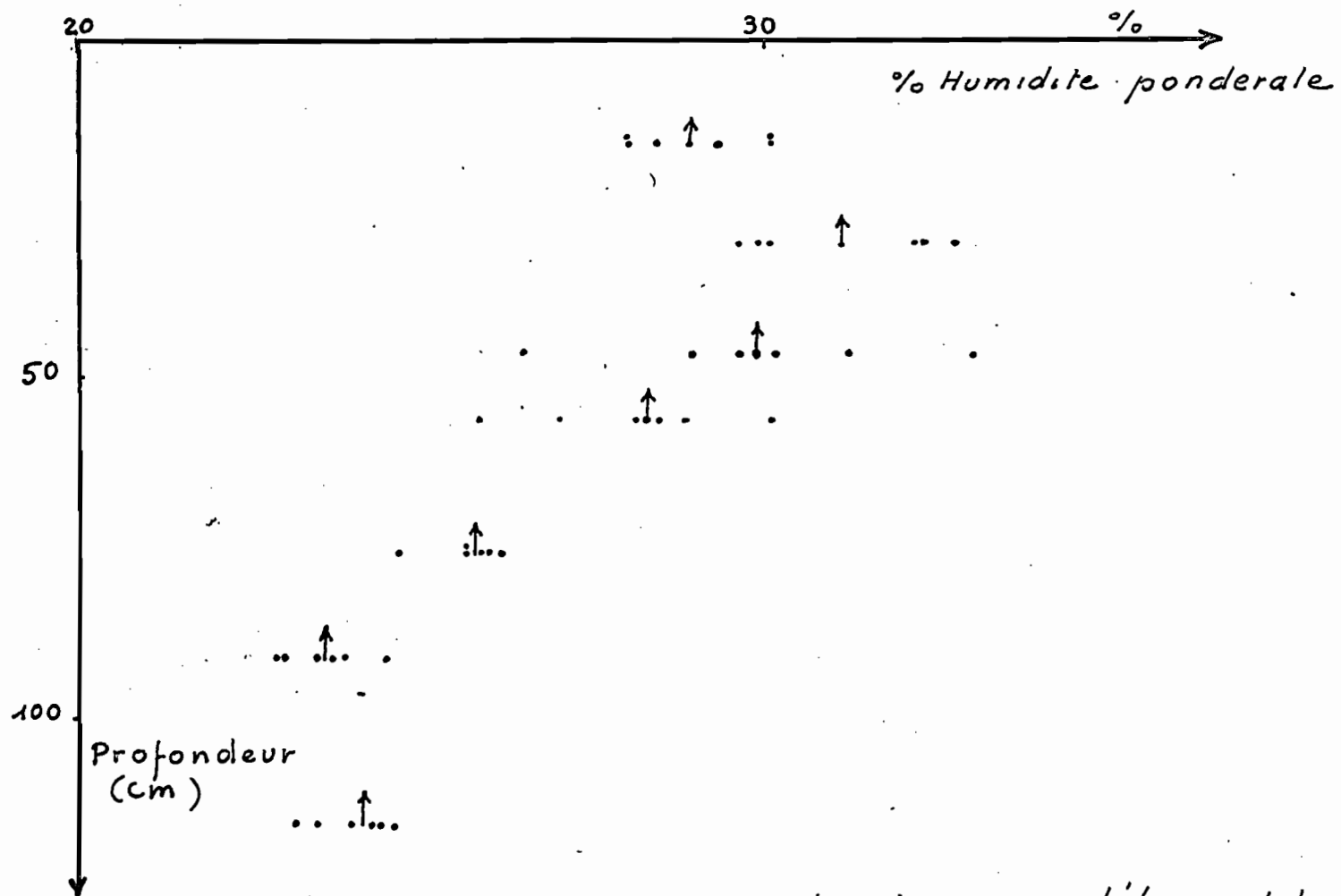


Fig n° 12 Dispersion des teneurs d'humidite à $pF=0$

Les deux séries de mesures se confondent avec les valeurs observées in situ entre 55 et 85 cm. Dans les autres horizons, l'humidité équivalente est plus élevée que la capacité au champ, tandis que c'est généralement l'inverse pour l'humidité à $pF = 2$. Les écarts sont assez importants pour interdire de réunir ces trois types de déterminations sous la même appellation de "capacité au champ".

L'eau retenue à $pF = 4,2$ est élevée à cause de la texture limono-argileuse.

Les courbes de la capacité au champ et de l'humidité à $pF = 4,2$ sont parallèles malgré la diminution régulière de la porosité jusqu'à 90 cm (cf. figure n° 12 sur la dispersion du taux d'humidité à $pF = 0$).

Le tassement du sol à cette profondeur n'affecte pas la microporosité, ni même la macroporosité étant donné les importants débits d'écoulement observés.

5.3. L'eau utile.

Plus de la moitié de la réserve en eau du sol est utilisable par la végétation. La quantité totale d'eau utile est de $237,3 \text{ l/m}^2$ sur 125 cm. Elle est très régulièrement distribuée dans le profil.

CONCLUSION.

Ce stage effectué au centre C.T.G.R.E.F. d'Antony nous a permis de nous initier à la détermination de l'humidité du sol à l'aide d'un humidimètre à neutrons. L'appareil utilisé comportait en outre un densimètre à rayons gamma. D'une grande simplicité et commodité de manoeuvre, il s'est révélé d'une fidélité exceptionnelle.

La justesse des mesures ne dépend que de l'étalonnage et de la stabilité des conditions physico-chimiques environnant le point de mesure.

La mise en place du tube d'accès de la sonde ne doit y apporter que le minimum de perturbation et surtout ne doit pas induire des modifications ultérieures. Compte tenu des qualités de l'appareil, c'est l'opération la plus délicate et la plus difficile à réaliser.

Déterminer la capacité au champ a été très facile dans ce sol, la redistribution de l'eau gravitationnelle se faisant très rapidement. La très grande perméabilité et l'absence de discontinuité dans le profil en rend l'engorgement impossible et ne permet guère de dépasser la capacité au champ. Il en résulte qu'il est assez difficile de mettre en évidence le drainage rapide à l'aide de la sonde à neutrons. Un tensiomètre ou un spychromètre permettant le calcul du flux serait plus adéquat.

Les principales propriétés hydrodynamiques du sol, passées en revue à cette occasion, montrent l'importance de la texture et de la macro-structure polyédrique.

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

- 1 - Amilianov V.A. et al. - 1962
Methodological instruction for the measurement of soil moisture under field conditions with gama rays and neutrons.
Sov. soil Sc., n° 3, 340.. 1962.
- 2 - Antunes da silva A 1965
Emploi de radiation γ et 1_0n pour la détermination de la densité et l'humidité des sols
Agron. Lusitana 27, n° 2, 135-153, 1965-1967
- 3 - Barrado Y., Decroux I - 1965
Observation sur l'utilisation de la sonde à neutrons pour l'étude de l'alimentation en eau des plantes
Awani, Maroc 1965, 14, 115-147.
- 4 - Bell J.P., Eeles C.WD 1967
Neutron random counting error in terms of soil moisture for non linear calibration curves
Soil Sci. 103, 1, 1-3, 1967.
- 5 - Boirat R. 1967
Principe des mesures d'humidité et de densité au moyen des radio-éléments.
Ann I.T.B.T.P., 233 587-589, 1967
- 6 - Borowczyk M et al. 1961
Détermination "in situ" de l'humidité et de la densité des sols peu compacts par radiométrie.
Rev. Archiv. G. R., T VIII, fas 2, 193-217, 1961
- 7 - Bourdon D, Henin S. 1950
La capacité des sols pour l'eau. Sa mesure au laboratoire et dans le sol en place
C.R. Acad. Agric. France p. 50-54
- 8 - Bourrier I. 1963
Considérations sur la mesure de l'humidité du sol pour la conduite des irrigations
Bull. Tech. Génie rural n° 63 24p.

9 - Bouyoucos G. J. 1929

A new, simple, and rapid method for determining the moisture equivalent of soils and the role of soil colloids on this moisture equivalent. Soil Sc. vol. 27.

10 - Burn K.N. 1965

Calibration of neutron soil as determined by a neutron scattering moisture meter.

Humidity and moisture vol 4, 205-211, 1965

11 - Burrow W.C. 1958

Measurement of field capacity with a neutron meter. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 22, 2, 103-105, 1958

12 - Camus H. 1973

Règle d'emploi de l'humidimètre à neutrons à l'échelle du bassin versant.

Cah. ORSTOM, sér. Hydr. Note tech n° 34, 22p., 1973

13 - Camus H. 1974

Homogénéisation des mesures de l'humidité du sol faite avec diverses sondes à neutrons et à partir d'étalonnages différents

Cah. ORSTOM. sér. hydrol. 9, 1, 3-34, 1974.

14 - Couchat P. 1970

Une méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols indépendante de la densité sèche

C.R. Acad. Sc. Paris. t 271 sér. D, 1264-1267, 1970

15 - Couchat P. 1973

Les récents développements de la méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols et ses perspectives

IAEA Vienne 1973, 41-47, 1973.

16 - Couchat P.

Mesure neutronique de l'humidité du sol

Thèse Univ. Toulouse 1974.

17 - Cornet A. 1971

Méthodes de détermination de la capacité de rétention en eau du sol
Rapport DEA 1971 34p.

- 18 - Feodoroff A. 1962
Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau.
Ann. Agron. 1962 13 (6) 523-547
- 19 - Feodoroff A. Betremieux R. 1964
Une méthode de laboratoire pour la détermination de la capacité
au champ.
8th Int. Cong. Soil Sc. Bucharest Ro 387-396.
- 20 - Feodoroff A 1965
Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante
Thèse Ing. doct. Univ. Paris 90 p.
- 21 - Feodoroff A. 1968
Expériences de redistribution gravitaire
Coll SEPE Bordeaux 1968.
- 22 - Feodoroff A. 1969
Infiltration et problèmes agronomiques. Quelques approches.
CR Réunion. Fontainebleau SPEPE Paris.
- 23 - Feodoroff A, Baillif J.L. 1969
Etude de l'infiltration de la pluie in situ à l'aide de tensiomètres.
Ann. Agron. n° 5 1969
- 24 - Feodoroff A. Arnoux J., Leconte M. 1969
Une définition du "palier de teneur en eau"
Rapport int. INRA 16p. mult.
- 25 - Féodoroff A. Galula E. 1973
Conductivité hydraulique d'un sol non saturé
Coll. SEPE Reading 1973, 13p.
- 26 - Gras R. 1962
Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône entre Vienne et Valence.
Ann. Agron. 13, n° 2, 359-370
- 27 - Hallaire M. 1953
Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés.
Thèse Univ. Paris 106 p.

- 28 - Hallaire M. 1956
L'état de l'eau dans le sol et l'alimentation en eau des végétaux
Bull. Soc. Rrc. Phys. vég. 2, 1, 1 - 17.
- 29 - Hans C.F. 1965
Available ~~moisture~~ in soils of the Netherlands
Verl. Meded. Comm. Hudrol. Onderz T.N.O. n° 5 21p.
- 30 - Hénin S. Gras R. Monnier G. 1969
Le profil cultural.
Masson 2è édit. 332p.
- 31 - Herband J. 1967
Renseignements concernant les humidimètres à neutrons et les densimètres à rayons X adaptés aux mesures dans le sol
Cah. O.R.S.T.O.M. sér. hydrol. NT n° 10 27p.
- 32 - Hewlett J.B. et al. 1964.
Instrumental and soil moisture variance using the neutron scattering method
Soil Sc. U.S.A. vol 97, 1, 19-24
- 33- Marcesse J. 1967
Détermination in-situ de la capacité de rétention d'un sol au moyen de l'humidimètre à neutrons.
Coll A.I.P.A , radio-isotopes Istamboul 1967
- 34 - Mortier P. et al. 1960
Pouvoir de résolution de la méthode de mesure de l'humidité du sol par diffusion de neutrons.
Trans 7th Intern. Cong. Soil Sc. Madison W, 1960, I 321-329.
- 35 - Moussighitghy M. 1967
Etude expérimentale de la redistribution et effet des conditions d'arrosage par aspersion.
Thèse. Paris 1967.
- 36 - Normand M. 1969
La mesure de l'humidité du sol. Application au problèmes d'hydraulique agricole.
Bull. Tech. G.R. n° 103, 232 p.

37 - Normand M. 1973

Une méthode d'étalonnage d'un humidimètre à neutrons utilisant les
mesures de densité du gamma - densimètre associé

Coll. I.A.E.A., SM - 176/24 Vienne 1973 26p.

38 - Peerklamp P.K., Bockel 1960

Moisture retention by soils

Versl. Meded. Comm. Hydrol. Onderz. T.N.O. n° 5 18 p.

39 - Rode A.A. 1960

Méthodes d'étude du régime hydrique des sols (russe).

1 vol Ed. Acad. Sc. URSS Moscou.

40 - Rode A.A. 1965

Fondements de la connaissance sur l'eau du sol

Trad. V.V. Yagello Leningrad.

41 - Salters P.J., Willams J.B. 1965

The influence of texture on the moisture characteristics of soils.

J. Soil. Sc 19, 1, 1-15

42 - Stakman 1966

Determination of pore size by the air pressure method

Wageningen Symp. Juin 1966 "Water in the insaturated zone"

43 - Trost A. 1966

Mesure de l'humidité au moyen de neutrons

Cah. Eurisotop n° 12 ser. 3 51 p.

Addendum

COMBEAU A 1960

Observations sur certains facteurs de la rétention d'eau par le sol pour diverses valeurs remarquables du pF. Application à quelques types de sols tropicaux.

O.R.S.T.O.M. rapport multig. 25 p.

COMBEAU A. QUANTIN P. 1963.

Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques. Rapprochement avec les courbes pF - humidité

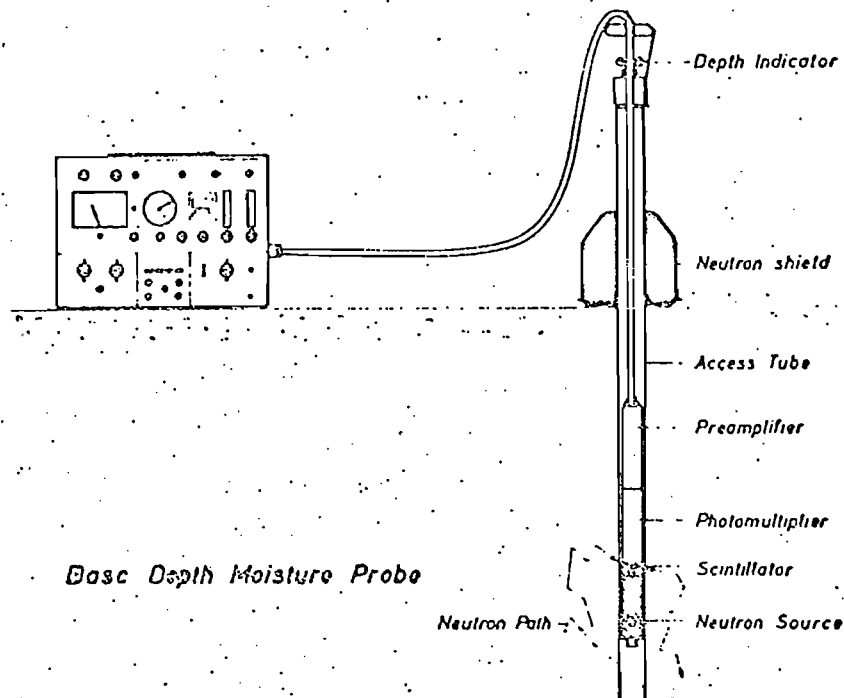
Sc. Sol Mai 1963 N° 1, 1 - 7.

A N N E X E N° 1

Documents fournis par le constructeur concernant la description, l'étalonnage de l'appareil en densité et humidité volumique et l'incidence sur les courbes d'étalonnage de l'absorption des neutrons lents par le chlore, le bore et le fer.

Fig. 1

Soil Moisture Measurements



Soil Moisture/Density Measurements

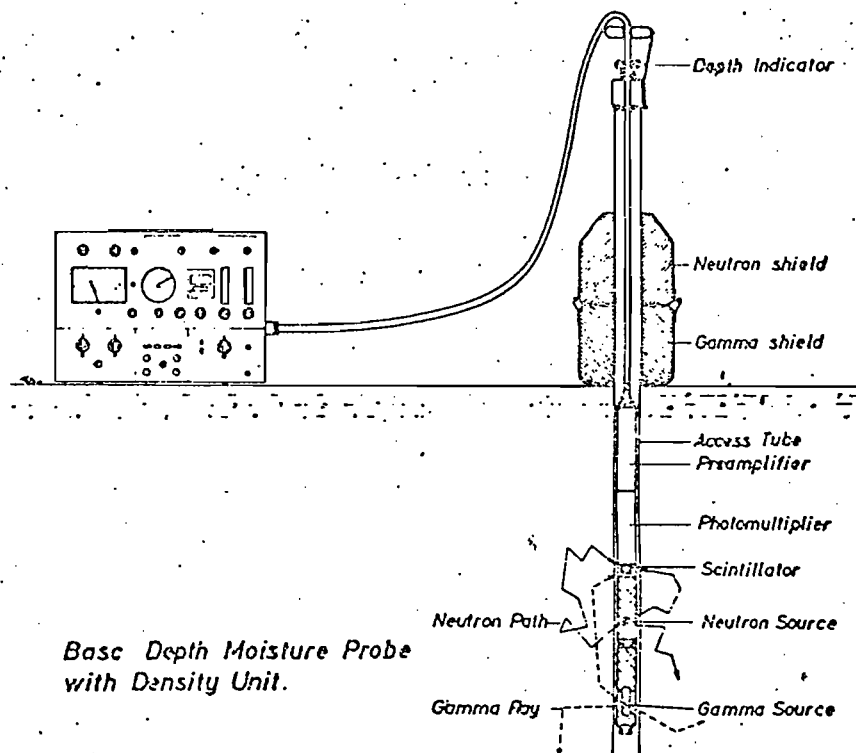


Illustration of Soil Moisture and Soil Moisture/Density Measurements.

Gross Count Rate

NEA Denmark

17.71

25000

Calibration Curve

Base Depth Moisture/Density

Probe no. A4-04/B4-07

Container no. 04-012

Net soil density in g/cc

D. - L.L. 22527

D. - U.L. 37507

20000

15000

10000

5000

1.0

1.2

1.4

1.6

1.8

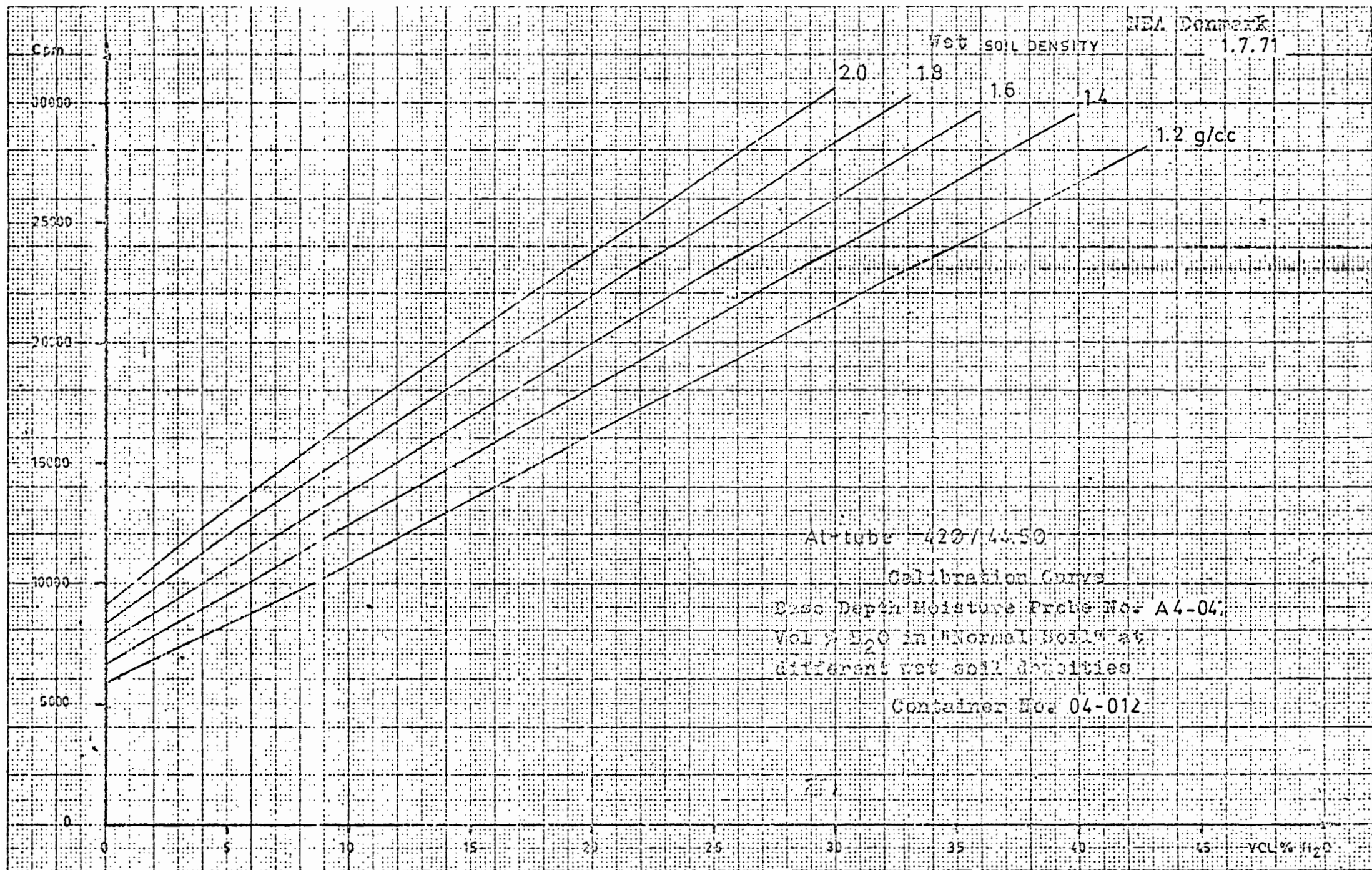
2.0

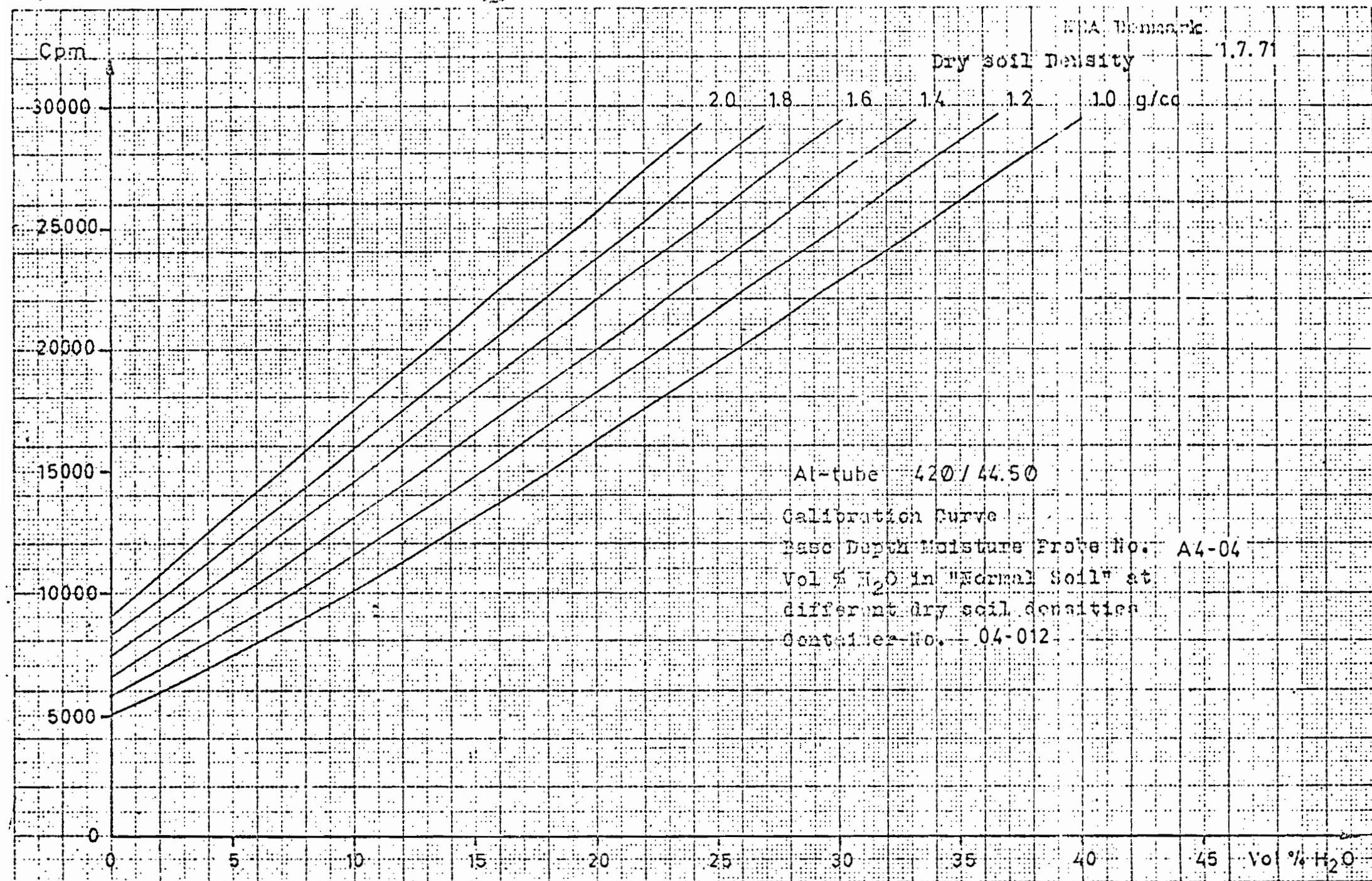
2.2

2.4

g/cc

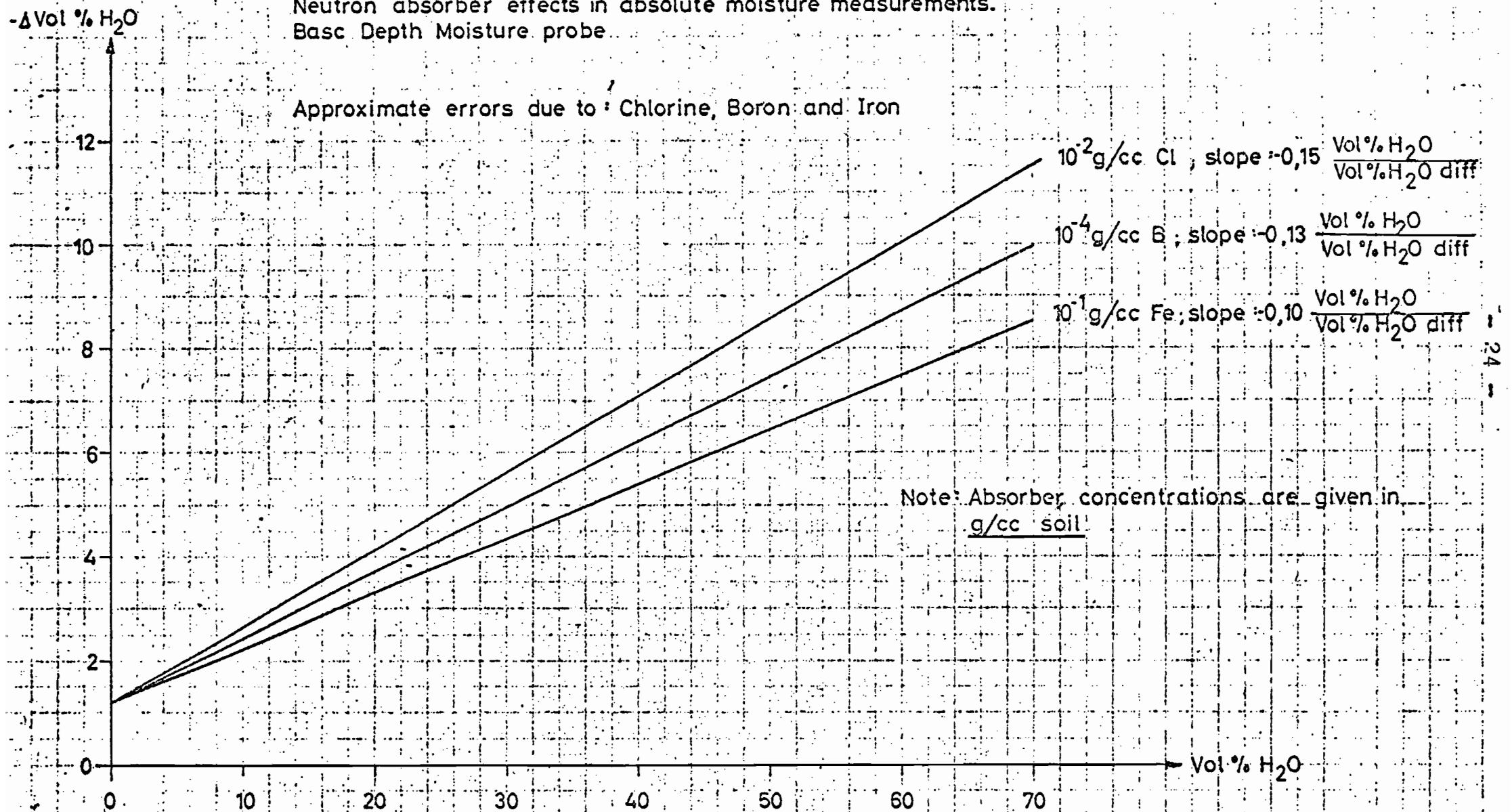
Al-tube 420/44.50





Neutron absorber effects in absolute moisture measurements.
Basic Depth Moisture probe

Approximate errors due to Chlorine, Boron and Iron



A N N E X E N° 2

Documents relatifs à la description du milieu et du
dispositif expérimental mis en place pour la déter-
mination de la capacité au champ.

DÉPARTEMENT: 92... COMMUNE: ANTONY... PROPRIÉTÉ: CRAPER, PARCELLE:

profil n°: 1... date: 15/12/71... Conditions météo: humide après longue période sèche

Topographie: Horizontal... Altitude: ...

Substrat géologique: limon argilo-calcaire... Etat du sol: sec à frais

Végétation: adventices... Passer Cultural: cultivé autrefois.

x	Ap ₁	L.A.S. (limono-argilo-sableux) brun noirâtre humifié. Quelques cailloux calcaires et non calcaires (exogènes). frais. nombreuses radicelles d'adventices et forameurs de lombrics (vermicules). Très bonne activité biologique sans structure granuleuse jusque 8 cm, continue de 8 à 26. - à 26: limite régulière (sol de surface)
x	Ap ₂	limono-argilo-sableux. brun noirâtre. humifié. mélange de terre brune polvée. radicelles et petits racines. Structure fragmentaire polyédrique (1 cm) assez marquée. rhizomes traçants à la base de l'horizon. Limite nette (fin du labour).
x	A ₃	Argile limono-sableuse à Argile sableuse. couleur brun foncé. racines. radicelles. Structure continue à tendance fragmentaire polyédrique peu marquée. frais. peu cohérent.
x	B ₁	Argile à Argile limono-sableuse horizon de transition. macrostructure peu marquée. sous-structure fragmentaire polyédrique.
x	B _{2/3}	Argile à Argile limono-sableuse. argile brune. macrostructure à éléments verticaux se séparant très nettement au niveau de faces verticales à clay-skein (argile orientée). Ces éléments se divisent en polyèdres aux arêtes vives. H _{ts} bien structurée. Au moment de l'observation, les faces rhéomales sont bien marquées. niveau sain. Nombreux trous de lombrics tapissés d'éléments illuviaux humifiés. Radicelles rares localisées dans les faces verticales principales et surtout dans les trous de lombrics. Assez sec. cohérent. ferme. <u>Limite nette</u> .
x	C	Limon argilo-sableux calcaire. - marnes à cailloux calcaires. beige à taches ocre et grises. friable. Structure continue - sec. peu cohérent. frais. Limite peu nette: variation de texture du substrat.
x	C	110-115 Limon sableux à Sable argilo-limoneux calcaire. niveau beige à cailloux blancs friables. structure continue. Quelques taches ferromanganiques (rares concrétions) sans localisation préférentielle. frais.
	Cg.	150-160 même matériau. fond beige à taches ocre et languettes grises, fines et fines.

Prélèvements:

8 prélèvements marqués d'une croix (x) pour granulométrie.

Sol brun calcaire développé sur Caess.
voie de séquestration de l'irrigation

Résultat des analyses granulométriques.

profil: ANTONY. CERAFER.

cf.	argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Texture. (S.S.P.A.)	
0-25	34,3	21,5	26,0	11,0	4,6	limono-argilo-sableuse	
25-33	29,2	21,7	28,1	15,0	5,0	limono-argilo-sableuse	argile = 0-2µ.
33-48	33,5	19,7	26,7	15,5	3,5	Argile limono-sableuse	limon fin = 2-20µ.
48-59	25,3	19,6	24,4	15,6	5,1	Argile limono-sableuse	limon grossier = 20-50µ.
59-90	40,2	18,7	24,8	13,4	8,9	Argile limono-sableuse	sable fin = 50-200µ.
90-110	54,5	14,1	20,1	21,9	12,4	limono-argilo-sableuse	sable grossier = 200-2000µ.
110-150	25,4	5,8	20,6	26,8	20,4	limono-argilo-sableuse	
150-160	25,5	15,4	32,1	19,9	6,1	limono-argilo-sableuse	

résultats exprimés en % de terre fine.

terre séchée à l'air.

Analyse granulométrique après dispersion à l'Hexametafosphate de Na (méthode internationale).



Photo n° 1 - Vue d'ensemble du dispositif expérimental.



Photo n° 2 - L'humidimètre-densimètre utilisé au C.T.G.R.E.F.



Photo n° 3 - une parcelle sous irrigation.



Photo n° 4 -

Etat du sol une
heure après la
fin de l'irrigation.