

L'AGRONOMIE TROPICALE

Extrait
du Bulletin Agronomique N° 19
NOVEMBRE 1963

DYNAMIQUE DE L'EAU DANS DEUX SOLS DU SÉNÉGAL

par

C. CHARREAU

Pédologue, Maître de Recherches de l'ORSTOM
CRA Bambey

Institut des Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières

DYNAMIQUE DE L'EAU DANS DEUX SOLS DU SÉNÉGAL

par

C. CHARREAU

Pédologue, Maître de Recherches de l'ORSTOM
CRA Bambey

Institut des Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières

1) INTRODUCTION

Cette étude a été réalisée sur les terrains d'expérimentation du C R A de Bambey entre le mois d'avril 1959 et le mois de mai 1960.

Des relevés de profils hydriques ont été effectués à intervalles réguliers, toutes les semaines pendant la période des pluies (6 juin - 1^{er} octobre 1959) et tous les mois pendant la saison sèche (1^{er} octobre 1959 - 15 mai 1960). Ces profils ont tous été relevés sous végétation naturelle et jusqu'à une profondeur minimum de 2 m (certains jusqu'à 4 m). Il avait été envisagé, au début, d'effectuer cette étude en remplaçant la mesure des humidités par celle des pF réalisée grâce aux éléments Boyoucos et Gély. Malheureusement, dans les sols étudiés, cette deuxième méthode s'est révélée beaucoup trop imprécise pour être applicable. La première méthode, bien que présentant d'autres inconvénients, a donc prévalu.

Son principal défaut tient au fait que les mesures n'ont jamais pu être réalisées rigoureusement au même emplacement, les trous de sondage étant répartis sur une surface d'environ 200 m² ; cette superficie est suffisante pour que l'hétérogénéité du terrain ait introduit une certaine imprécision dans les mesures. Cette imprécision a toutefois pu être réduite par des corrections appropriées, car, sur chaque prise de terre, ont été effectuées, en même temps que la mesure d'humidité, des mesures de pF. De sorte que toutes les mesures ont pu être ramenées à un profil moyen, à caractéristiques constantes.

2) APERÇU SUR LE CLIMAT

Les caractéristiques climatiques de la région de Bambey ont été étudiées à plusieurs reprises [1, 2]. Nous nous contenterons donc d'un bref rappel de ces données. Parmi celles-ci les plus importantes pour notre étude sont la pluviométrie et l'évaporation.

Le climat est du type sahélo-soudanien, tel qu'il est défini par AUBREVILLE. Les pluies débutent en général dans la première quinzaine de juin et s'arrêtent en octobre ; elles présentent un maximum en août.

En 1959 la pluviométrie a été très déficitaire par rapport à la normale : 450 mm seulement contre 650 (moyenne sur dix ans) ; par ailleurs le maximum se situe en septembre et non en août.

Le pouvoir évaporant de l'air (tab. 2), mesuré à l'évaporomètre PICHE, oscille entre 2 et 12 mm par jour, les valeurs les plus élevées étant observées entre janvier et mai, les plus faibles pendant les mois pluvieux août et septembre.

3) LES SOLS

Les sols sont :

un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sur sable ; dénomination vernaculaire : Dior ;

un sol à hydromorphie temporaire de surface sur sable et marno-calcaire ; dénomination vernaculaire : Dek.

Ces deux sols occupent des superficies importantes au Sénégal, notamment dans le Baol et le Cayor.

TABLEAU 2

POUVOIR ÉVAPORANT DE L'AIR EN MM AU COURS DE L'ANNÉE 1959-1960

E : évaporomètre Piche sous abri à 2 m du sol

E' : — — — à 20 cm du sol

	1959							1960					
	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Av.	Mai	Juin
E	123	86	73	50	198	138	191	200	181	219	200	208	158
E'	218	167	126	100	171	196	269	258	283	330	330	307	247
E'/E	1,77	1,94	1,73	2,00	1,75	1,42	1,41	1,29	1,56	1,51	1,65	1,47	1,56

A) Granulométrie

Ces deux sols sont très sableux. Dans le tableau 3 figurent les résultats de l'analyse granulométrique concernant deux profils de ces sols prélevés dans les deux zones, où furent effectuées les mesures d'humidité.

TABLEAU 3

GRANULOMÉTRIE DE DEUX PROFILS DE SOLS DIOR ET DEK

Profondeur	Echantillons	DEK					Profondeur	Echantillons	DIOR				
		S. G.	S. F.	L	A	A + L			S. G.	S. F.	L	A	A + L
0-5 cm	B 1	38,1	53,9	2,5	5,5	8,0	0-5 cm	A 1	22,3	73,7	2,0	2,0	4,0
5-10	B 2	41,0	52,0	2,0	5,0	7,0	5-10	A 2	21,1	74,9	1,5	2,5	4,0
10-20	B 3	42,7	46,3	4,0	7,0	11,0	10-20	A 3	22,6	72,4	1,0	4,0	5,0
20-40	B 4	23,2	65,3	1,0	10,5	11,5	20-40	A 4	21,9	71,1	2,5	4,5	7,0
40-60	B 5	41,2	42,8	4,5	11,5	17,0	40-60	A 5	25,0	66,0	1,0	8,0	9,0
60-80	B 6	41,2	39,3	12,0	7,5	19,5	60-80	A 6	22,4	70,1	2,0	5,5	7,5
80-100	B 7	21,6	67,9	0,5	10,0	10,5	80-100	A 7	24,9	68,1	3,0	4,0	7,0
100-120	B 8	20,9	69,1	1,5	8,5	10,0	100-120	A 8	24,3	68,7	1,5	5,5	7,0
120-140	B 9	19,8	70,2	1,5	8,5	10,0	120-140	A 9	22,5	71,5	1,5	4,5	6,0
140-160	B 10	19,0	72,0	0,5	8,5	9,0	140-160	A 10	22,9	71,6	1,0	4,5	5,5
160-180	B 11	19,0	72,0	4,0	5,0	9,0	160-180	A 11	25,2	67,8	2,5	4,5	7,0
180-200	B 12	19,4	68,1	1,0	11,5	12,5	180-200	A 12	25,6	67,9	1,0	5,5	6,5
245-255	B 13	20,4	72,6	0,0	7,0	7,0	245-255	A 13	24,1	68,9	0,0	7,0	7,0
295-305	B 14	16,0	71,0	0,5	12,5	13,0	295-305	A 14	20,5	73,5	2,0	4,0	6,0
325-335	B 15	18,7	67,8	1,5	12,0	13,5	345-355	A 15	24,5	73,0	1,0	1,5	2,5
335-340	B 16	22,7	63,8	2,0	11,5	13,5	395-405	A 16	20,0	67,5	3,0	9,5	12,5

Les teneurs en argile oscillent autour de 4 % dans les différents horizons du sol Dior avec comme limites extrêmes : 2 % et 9,5 % ; pour le Dek la moyenne est de 8 % et les limites 5 % et 12,5 %. Les teneurs en limon sont faibles : entre 0 et 3 % pour le Dior, 0 et 5 % pour le Dek. La fraction sableuse est très importante dans les deux cas mais le classement des sables est différent : pour le Dior, il y a une nette dominance des sables fins dans tous les horizons (66 à 75 % de sables fins contre 20 à 26 % de sables de diamètre supérieur à 0,2 mm) ; pour le Dek la proportion de sables grossiers est équivalente ou légèrement inférieure à celle des sables fins dans les 80 premiers centimètres. Plus en profondeur, les proportions relatives entre sables fins et grossiers redeviennent équivalentes à celles du sol Dior.

Ces variations dans la granulométrie du profil reflètent, à notre avis, davantage les caractéristiques du dépôt sédimentaire que l'action du lessivage.

Celui-ci est réel pour le sol Dior puisque, en cases lysimétriques, on observe très généralement un départ d'argile dans les eaux de drainage à 2 m de profondeur ; pour le sol Dek par contre ce phénomène s'observe très

rarement, à l'occasion d'une pluviométrie exceptionnellement élevée, et toujours d'une façon très peu marquée. Le lessivage dans ce cas est donc presque inexistant.

Les niveaux plus argileux s'observent à des profondeurs variables dans le profil et il est difficile de définir un horizon d'accumulation, même pour le sol Dior. Celui-ci peut se situer à une profondeur supérieure à 4 m, profondeur rarement atteinte par les sondages. Par contre les horizons superficiels, jusqu'à 20 cm, sont dans les deux sols passablement lessivés et appauvris en argile. Cet appauvrissement semble résulter à la fois de l'action du lessivage (vertical et oblique) de l'érosion en nappe et du remaniement du profil cultural.

B) Propriétés chimiques

La différence essentielle entre les deux sols réside dans l'inégalité de richesse en calcium. Le sol Dek repose sur des marno-calcaires à faible profondeur (1,50 à 4 m) ; bien que le sol se soit constitué à partir d'un matériau originel différent (alluvions et colluvions sablo-argileuses), la présence de ce banc calcaire a influencé son évolution. Les termites ont probablement joué un rôle important dans les remontées du calcaire vers la surface.

L'apparition du calcaire se fait à une profondeur variable mais généralement supérieure à 1 m. Les teneurs, faibles d'abord (0,1 %), atteignent 1 % vers 2 m.

Même quand les horizons ne présentent pas de traces de calcaire ils sont toujours très bien pourvus en calcium. Il y a toujours plus de 4 m é de calcium échangeable pour 100 g de sol Dek, alors que les teneurs n'atteignent pas 1 m é en sol Dior. Les teneurs en calcium échangeable sont entre cinq et vingt fois plus élevées en sol Dek. Le complexe absorbant de ce dernier se trouvera donc bien saturé (70 à 100 %) alors que celui du Dior le sera médiocrement (10 à 50 %).

Ceci se reflétera également sur les pH qui avoisineront la neutralité en sol Dek et ne dépasseront pas 6,6 en sol Dior dans l'horizon superficiel, pour descendre à 5,4 en profondeur. Dans les deux cas les valeurs de la capacité d'échange seront naturellement assez faibles, étant donné la texture sableuse de ces sols : 2,0 à 2,6 m é pour 100 g pour le Dior, 6 à 11 pour le Dek.

L'inégalité de richesse en calcium et de saturation du complexe expliquent certaines différences dans le comportement de ces sols vis-à-vis de l'eau et dans leurs propriétés physiques.

Les teneurs en fer total exprimées en Fe_2O_3 % augmentent avec la profondeur de 0,45 à 0,70 en sol Dior, de 0,61 à 0,82 en sol Dek. Les teneurs en fer libre augmentent également avec la profondeur en sol Dior de 0,19 à 0,52 % ; en sol Dek elles oscillent entre 0,20 et 0,30 % sans que l'accroissement avec la profondeur soit très net.

Le lessivage du fer est donc plus évident que celui de l'argile tout au moins pour le sol Dior.

C) Dureté et structure

La résistance à la pénétration, à la traction et à la compression est sensiblement plus élevée en sol Dek qu'en sol Dior. Les valeurs du test de perméabilité pour les différents horizons sont assez comparables dans les deux sols ; elles sont de l'ordre de 1 cm/h avec comme limites 0,5 et 2. La structure observée en sec est beaucoup plus développée en sol Dek, qu'en sol Dior.

Le pourcentage d'agrégats stables à l'eau, d'un diamètre supérieur à 0,02 mm est de 10,5 % pour le sol Dek, contre 2,7 % seulement pour le sol Dior (J. FAURE). Cette meilleure stabilité de la structure est à mettre en relation avec la richesse en calcium du sol Dek.

D) Propriétés hydriques ; courbes des pF

De nombreuses mesures de pF ont été effectuées sur les différents horizons des sols Dior et Dek ; deux profils choisis comme profils de référence ont été étudiés en détail.

Les résultats figurent dans le tableau 4. Les courbes complètes ont été établies pour trois horizons de chaque sol, choisis comme étant les plus représentatifs (une courbe de valeurs moyennes, deux courbes de valeurs limites : graphiques 1 et 2).

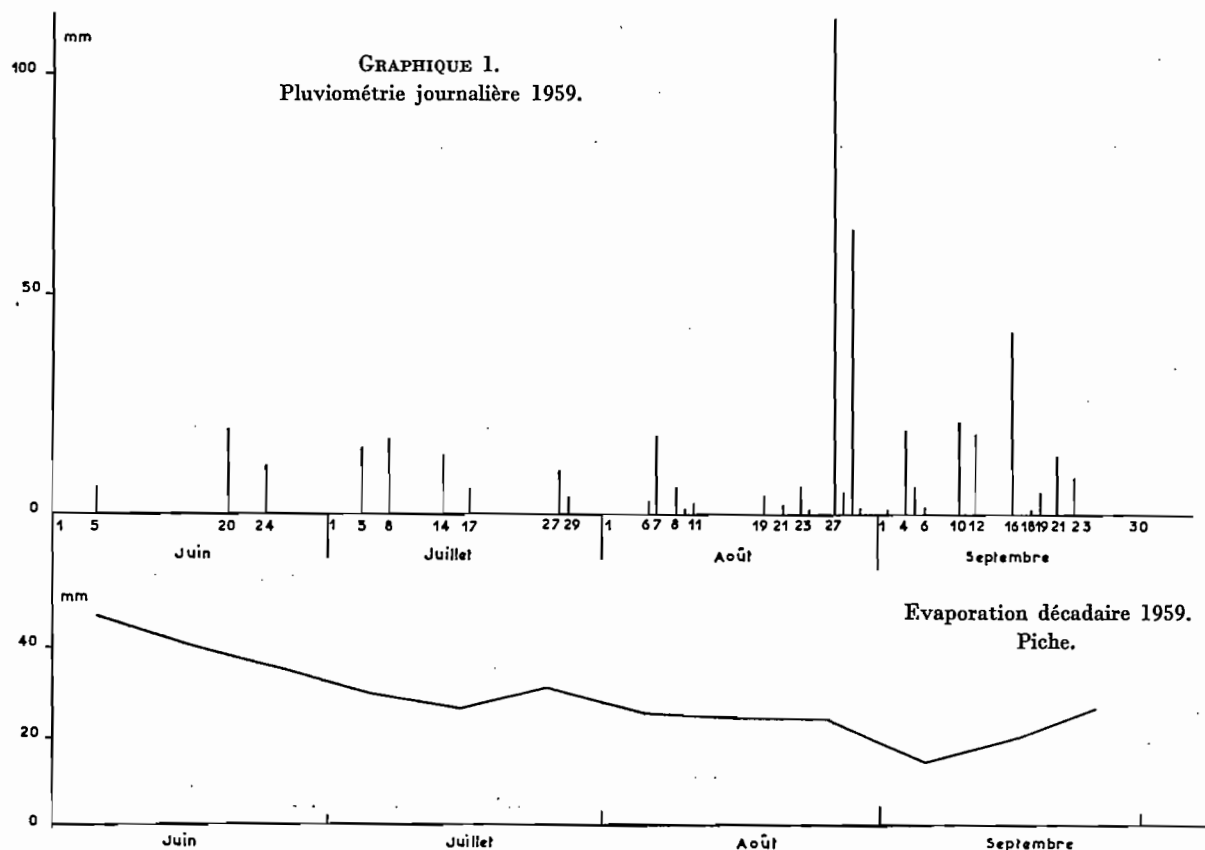
Les mesures de pF ont été effectuées :

- par hygroscopicité pour les pF supérieurs à 4,2,
- par pression (presse à membrane) pour les valeurs comprises entre 4,2 et 3,3,
- par centrifugation pour les pF compris entre 3,3 et 2,0,
- par succion pour les pF inférieurs à 2,0.

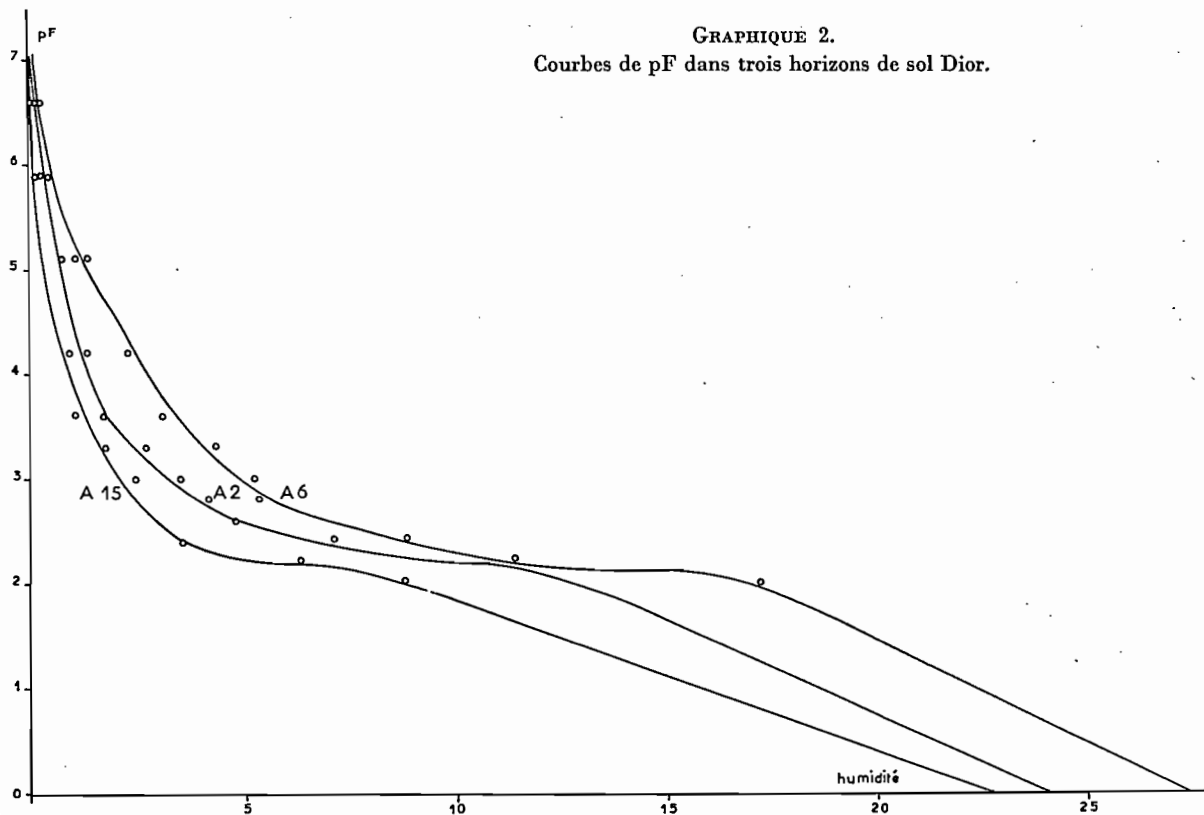
TABLEAU 4
HUMIDITÉS AUX DIFFÉRENTS pF DES HORIZONS D'UN SOL DIOR

Profondeur	Echant.	pF													
		6,5	5,9	5,1	4,2	3,6	3,3	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	0	
0-5 cm	A 1	0,10	0,17	0,77	1,30	1,58	2,23	3,05	3,03	4,27	6,69	8,95	—	23,15	
5-10	A 2	0,10	0,21	1,12	1,22	1,66	2,64	2,47	4,12	4,74	7,09	10,00	16,05	23,70	
10-20	A 3	0,14	0,25	1,22	1,57	2,12	3,26	3,77	4,12	5,53	7,43	10,46	16,12	20,75	
20-40	A 4	0,16	0,25	1,71	2,19	2,90	3,71	4,93	4,69	6,15	8,19	10,42	16,82	25,85	
40-60	A 5	0,22	0,41	1,58	2,57	3,46	4,75	5,91	5,83	7,71	9,50	12,11	17,67	28,75	
60-80	A 6	0,20	0,36	1,30	2,28	3,05	4,28	5,18	5,33	6,97	8,77	11,36	17,20	27,35	
80-100	A 7	0,17	0,30	1,52	2,00	2,62	3,56	4,32	4,47	6,00	7,86	10,44	16,43	26,25	
100-120	A 8	0,19	0,33	1,46	2,08	2,89	4,25	4,72	5,04	6,75	8,32	11,00	15,69	25,50	
120-140	A 9	0,22	0,31	1,40	1,92	2,53	3,53	4,34	4,29	5,45	8,23	8,76	—	27,12	
140-160	A 10	0,17	0,30	1,38	2,04	2,65	3,48	4,52	4,29	5,58	8,18	8,54	11,31	26,06	
160-180	A 11	0,15	0,32	1,71	1,95	2,33	3,33	4,39	4,15	5,66	8,26	8,57	11,25	26,65	
180-200	A 12	0,18	0,32	1,22	2,03	2,66	3,60	4,36	4,65	5,38	6,02	9,03	11,70	27,00	
245-255	A 13	0,11	0,22	0,53	1,65	2,10	2,92	3,65	4,33	4,34	4,90	7,71	10,95	25,23	
295-305	A 14	0,04	0,09	—	1,30	1,60	2,20	3,15	3,58	3,74	4,30	7,02	10,38	24,31	
345-355	A 15	0,26	0,48	0,66	0,83	0,98	1,59	2,40	2,30	2,87	3,53	6,33	8,74	22,66	
395-405	A 16	0,12	0,23	0,74	3,48	4,70	6,45	7,99	9,12	8,86	9,31	12,77	15,47	33,31	
Moyenne . . .		0,17	0,29	1,36	1,93	2,54	3,55	4,41	5,50	5,85	7,87	9,97	15,02	25,58	

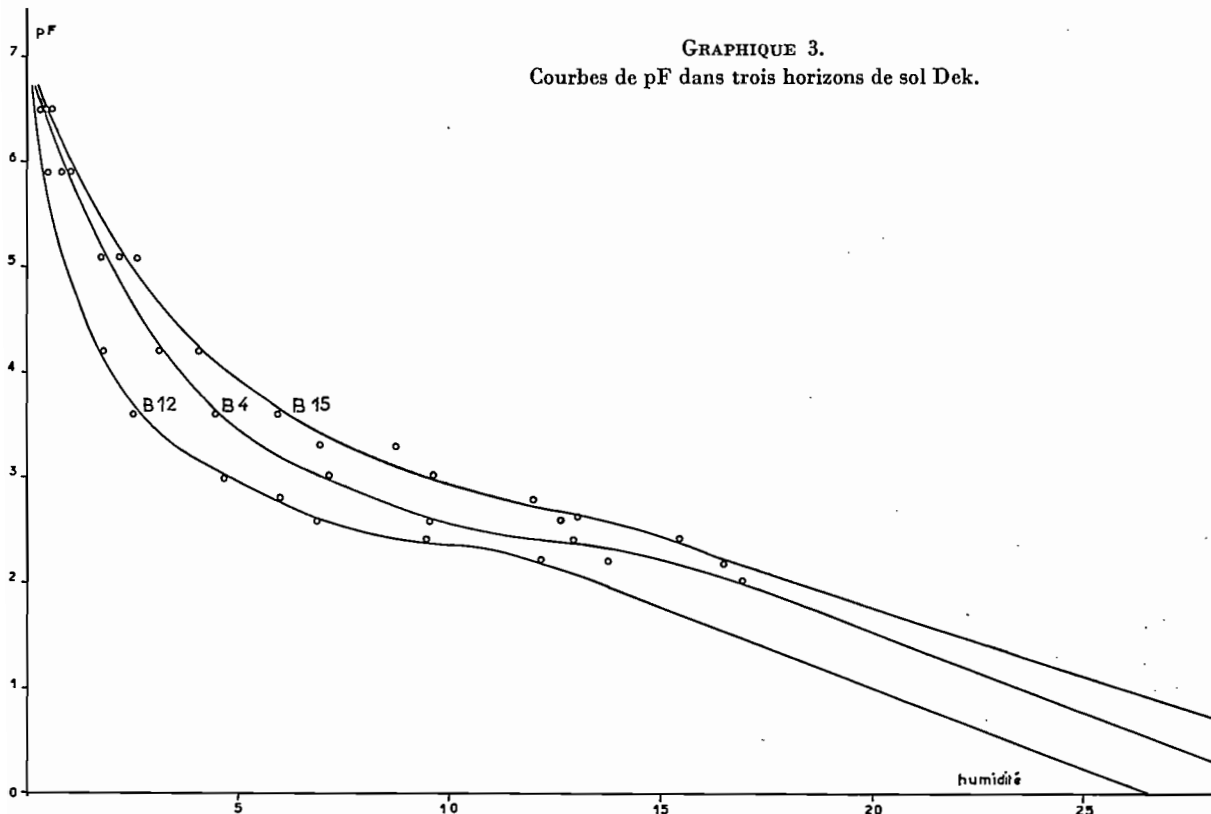
Les différentes méthodes de mesure ont été comparées à cette occasion ; pour les sols étudiés les recoupe-
ments sont bons dans l'ensemble, mais la presse à plaque a dû être abandonnée au profit de la centrifugeuse en
raison de la médiocre reproductibilité des résultats.



GRAPHIQUE 2.
Courbes de pF dans trois horizons de sol Dior.



GRAPHIQUE 3.
Courbes de pF dans trois horizons de sol Dek.



Dior, entre 1,50 et 1,68 pour différents horizons de sol Dek. Nous avons retenu comme valeur moyenne les chiffres de :

1,5 pour le sol Dior,
1,6 pour le sol Dek.

Les porosités correspondantes sont 43,5 % et 40,5 %, soit :

en sol Dior : microporosité = 0,9 % macro-porosité = 34,5 %
en sol Dek : — = 16,0 % — = 24,5 %

Ces chiffres ont été obtenus par mesure de densités apparentes du sol en place (méthode du cylindre). Des mesures de densités et de porosités ont également été effectuées sur les échantillons de terre tamisée (méthode KEEN RAKOWSKI) ; les résultats sont très voisins pour la densité apparente et la porosité, sensiblement inférieurs pour la densité réelle.

F) Mesures de la perméabilité

Plusieurs méthodes de mesure de la perméabilité ont été comparées sur les deux sols étudiés :

au laboratoire, méthode de DARCY (coefficient de filtration ou conductivité hydraulique) appliquée sur des échantillons de terre tamisée et sur des échantillons intacts ;

au champ méthode de MÜNTZ et méthode de PORCHET ;
en cases lysimétriques.

a) MÉTHODE DE DARCY AU LABORATOIRE.

La mesure du coefficient de filtration a été effectuée sur seize horizons de chaque profil de référence, de 0 à 4 m. Les résultats figurent dans le tableau 5. Les valeurs obtenues varient peu d'un horizon à l'autre et d'un

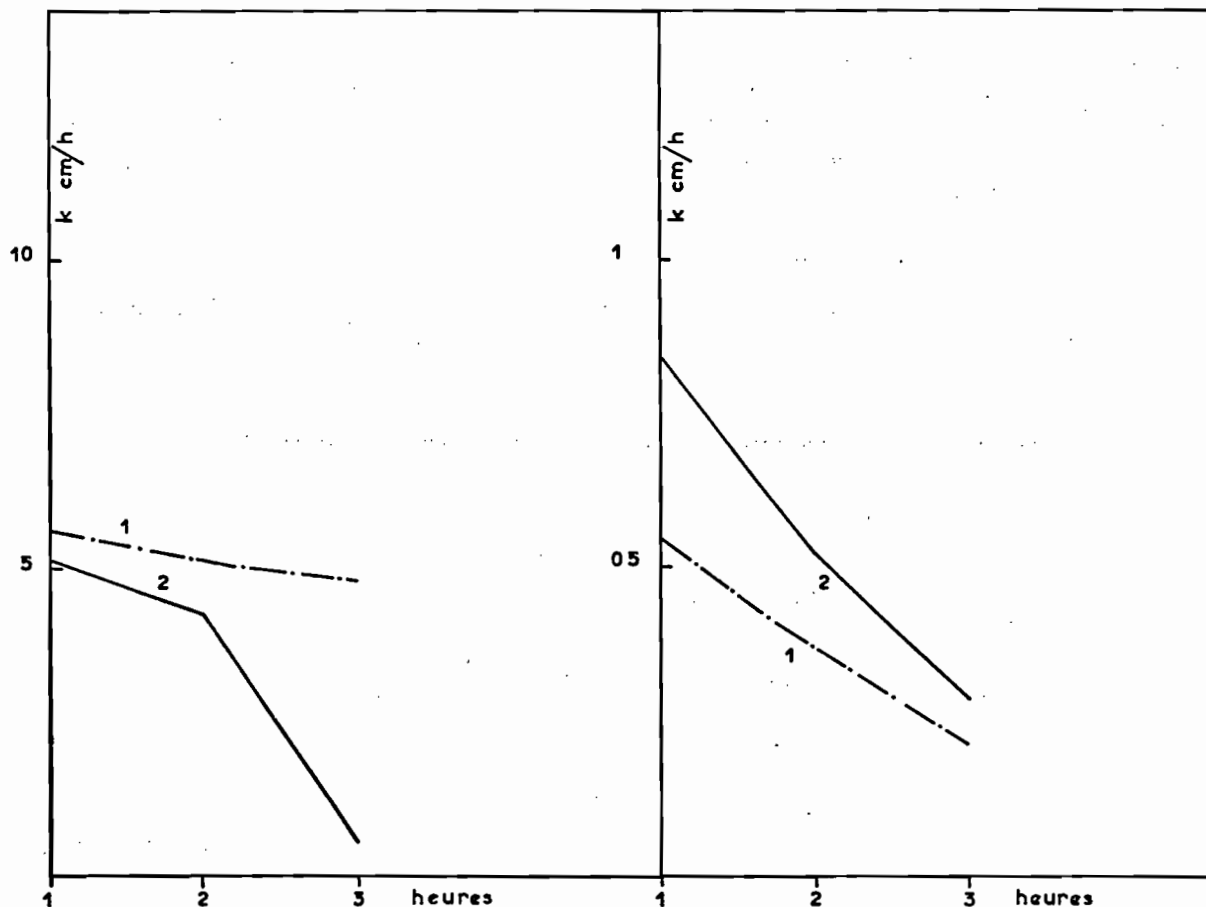
TABLEAU 5
HUMIDITÉS AUX DIFFÉRENTS pF DES HORIZONS D'UN SOL DEK

Profondeur cm	Ech.	pF												
		6,5	5,9	5,1	4,2	3,6	3,3	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	0
0-5	B 1	0,39	0,66	1,81	3,59	4,19	6,38	7,23	—	—	12,80	—	—	—
5-10	B 2	0,36	0,64	2,29	2,71	3,69	5,81	6,31	6,55	7,92	11,95	—	—	—
10-20	B 3	0,21	0,77	2,32	2,92	4,10	6,34	6,75	—	—	12,23	—	—	—
20-40	B 4	0,51	0,79	2,53	3,12	4,38	6,90	7,08	7,82	9,48	12,88	13,72	16,85	30,35
40-60	B 5	0,20	0,34	2,63	3,30	4,82	7,04	7,49	7,94	9,87	13,15	14,12	16,73	31,62
60-80	B 6	0,50	0,76	2,11	3,54	4,95	7,61	7,50	8,68	10,10	13,57	13,69	—	31,44
80-100	B 7	0,52	0,67	1,39	3,25	4,49	7,03	7,20	7,91	9,69	13,37	13,40	17,67	28,52
100-120	B 8	0,50	0,58	2,90	2,97	4,11	6,57	6,76	7,35	9,09	12,77	—	—	28,92
120-140	B 9	0,58	0,73	1,24	3,06	4,03	6,13	6,98	7,24	8,91	12,31	13,27	16,86	30,32
140-160	B 10	0,35	0,54	—	2,63	4,41	5,69	6,35	6,64	8,18	11,11	11,86	16,45	29,40
160-180	B 11	0,45	0,41	0,58	2,38	2,79	—	5,23	5,35	6,96	10,17	10,81	14,64	28,94
180-200	B 12	0,46	0,80	3,12	4,40	6,13	—	9,75	10,08	12,66	15,34	15,63	—	33,
245-255	B 13	0,45	0,38	1,68	1,70	2,47	—	4,63	5,94	6,81	9,44	12,10	14,48	26,66
295-305	B 14	0,39	0,83	2,15	4,31	6,10	8,81	9,81	11,81	12,96	15,15	16,80	—	35,30
325-335	B 15	0,37	0,87	2,24	4,08	5,88	8,66	9,51	11,87	12,59	15,38	16,52	—	34,60
335-340	B 16	0,24	0,98	2,47	4,37	6,31	—	10,10	—	—	15,34	—	—	—
Moyenne		0,42	0,61	1,95	2,93	4,03	6,55	6,62	7,14	8,70	12,14	13,81	16,53	29,57

sol à l'autre. Le sol Dior semble cependant un peu plus filtrant que le Dek ; la valeur moyenne obtenue est de 0,98 cm/h (limites : 0,38 et 2,63), contre 0,88 pour le Dek (limites 0,46 et 1,73). Ces chiffres sont très faibles surtout pour des sols aussi sableux. Ce test doit être interprété davantage comme une mesure de structure que comme une mesure de la perméabilité. Il met en évidence la structure instable à l'eau de ces sols ; l'argile, facilement dispersée, vient colmater les pores entre les sables et limiter la filtration.

La même mesure effectuée par P. BONFILS sur des échantillons de sols intacts prélevés au champ dans des cylindres métalliques de 250 cm³ de volume donne des valeurs sensiblement supérieures : 4,80 cm/h pour le sol Dior en moyenne contre 4,00 pour le sol Dek. La mesure a été effectuée sur cinq horizons de deux profils (0 à 1 m). Les chiffres sont assez voisins pour les différents horizons sauf pour l'horizon 150-160 du sol Dek, constitué par du marnocalcaire altéré, dont la perméabilité est nettement plus faible (1,70 cm/h).

Dans les deux cas, échantillons tamisés et échantillons intacts, la perméabilité diminue au cours du temps (graphique 5). La valeur retenue pour la mesure sur échantillons tamisés concerne le volume écoulé pendant la première heure de filtration ; pour les échantillons intacts, les deux premières heures de filtration.



GRAPHIQUE 5.

Variation de H avec le temps (échantillons intacts).

- 1) Dior = 50-60 cm.
- 2) Dek = 50-60 cm.

Variation de K avec le temps (échantillon tamisé).

- 1) Dior 40-60 cm.
- 2) Dek 40-60 cm.

b) MÉTHODE DE PORCHET.

Deux profondeurs ont été choisies pour effectuer cette mesure : 50 et 100 cm. Les valeurs obtenues pour la profondeur de 100 cm sont en général trois fois plus élevées que pour 50 cm.

Pour un sondage de 50 cm, les valeurs moyennes obtenues en régime permanent sont de 25 cm/h pour le Dior, 27 cm/h pour le Dek. Pour un sondage de 100 cm, ces chiffres deviennent 70 et 76 cm/h.

c) MÉTHODE DE MÜNTZ.

Pour cette mesure deux anneaux concentriques alimentés en eau par des réservoirs distincts ont été utilisés [4]. Une charge égale à 4 cm a été maintenue dans l'anneau central et dans l'anneau de garde. Il est

admis que, dans ces conditions, l'infiltration dans l'anneau central se fait exclusivement dans le sens vertical, alors que dans l'anneau de garde la diffusion est à la fois verticale et latérale. Les diamètres des anneaux utilisés étaient respectivement de 15 et de 58 cm ; l'infiltration a été mesurée séparément dans les deux anneaux.

En régime permanent l'infiltration verticale moyenne est de 20 cm/h pour le sol Dior et 21 cm/h pour le Dek. Ces deux sols ont donc une infiltration verticale à peu près identique. Par contre les chiffres d'infiltration globale diffèrent sensiblement : 35 pour le Dior contre 30,0 pour le Dek. La diffusion latérale serait donc supérieure en sol Dior : 15 cm/h contre 9,0 cm/h pour le Dek ; soit, exprimé en pourcentages de l'infiltration globale, respectivement 43 et 30 %.

d) CASES LYSIMÉTRIQUES.

Le drainage le plus élevé observé à 2 m au cours de l'année 1960 a été de 35 mm en vingt-quatre heures, ce qui correspond à une vitesse moyenne de 0,15 cm/h. La vitesse maximum observée au cours de cette journée a été estimée à 0,55 cm/h, chiffre trouvé également par P. BONFILS et J. FAURE en 1954 [2]. La vitesse du drainage ne diffère pas significativement entre le sol Dior et le sol Dek, elle dépend essentiellement du type de culture ou de végétation.

e) COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTES MÉTHODES.

Le tableau 6 donne les valeurs comparées du coefficient K, en régime permanent. Plusieurs conclusions paraissent se dégager de l'examen de ce tableau.

TABLEAU 6
COMPARAISON ENTRE LES HUMIDITÉS MESURÉES ET CALCULÉES AUX DIFFÉRENTS pF

Echan- tillons pF	Sol Dek				Sol Dior				LIMITE D'EXTRAPO- LATION
	B 4		B 15		A 2		A 6		
	Mesuré	Calculé	Mesuré	Calculé	Mesuré	Calculé	Mesuré	Calculé	
5,9	0,79	0,60	0,87	0,78	0,21	0,15	0,36	0,45	
5,1	2,53	1,42	2,24	1,80	1,12	0,45	1,30	1,05	
4,2	3,12	3,12	4,08	4,08	1,22	1,22	2,28	2,28	
3,6	4,38	4,80	5,88	6,40	1,66	2,15	3,05	3,50	
3,3	6,90	6,00	8,66	7,90	2,64	2,75	4,28	4,25	
3,0	7,08	7,08	9,51	9,51	3,47	3,47	5,18	5,18	
2,8	7,82	8,00	11,87	10,80	4,12	3,90	5,33	5,60	
2,6	9,48	8,80	12,59	12,00	4,74	4,50	6,97	6,30	
2,4	12,88	9,80	15,38	13,00	7,09	5,10	8,77	7,00	
2,2	13,72	10,70	16,52	14,20	10,00	5,60	11,36	7,50	
2,0	16,85	11,60	—	15,50	16,05	6,30	17,20	8,20	
0	30,35	17,00	34,60	23,00	23,70	10,20	27,35	12,00	

La valeur de K varie dans de très larges limites suivant la méthode de mesure utilisée. Même si l'on écarte les mesures de PORCHET faites sur sondages de 1 m comme trop éloignées de la réalité, l'amplitude des variations va de 1 à 50. Ceci n'a rien de très étonnant puisque toutes ces mesures ont un caractère plus ou moins conventionnel, que d'autre part la perméabilité d'un sol saturé d'eau est très différente de celle du même sol dans un état de sécheresse accentuée.

Quelle que soit la méthode utilisée, les résultats obtenus pour les deux sols sont très voisins. Etant donné la médiocre reproductibilité des résultats le nombre des essais doit être élevé pour différencier avec certitude un sol de l'autre. C'est ainsi que J. FAURE [2], avec vingt-cinq mesures PORCHET pour chaque sol, avait trouvé une plus grande perméabilité en sol Dior qu'en sol Dek. Le petit nombre d'essais effectués ici pour chaque méthode ne permet pas de confirmer ce résultat. Par contre l'ensemble des résultats traduit bien l'identité de comportement entre le sol Dior et le sol Dek, sauf toutefois en ce qui concerne la diffusion latérale. Ce dernier point sera d'ailleurs précisé par l'étude expérimentale de la saturation du profil.

Les mesures faites sur le terrain en sec, donnent des résultats comparables, qu'il s'agisse de la méthode PORCHET (sondage de 50 cm) ou de celle de MÜNTZ (infiltration verticale dans l'anneau central). D'après les normes citées par P. ROLLEY [5] les sols Dior et Dek se classent dans la catégorie des terrains très perméables.

Les mesures effectuées au laboratoire par la méthode de DARCY-PORCHET donnent au contraire des résultats très faibles. Ceci s'explique car, dans cette mesure, la structure du sol et sa stabilité à l'eau deviennent des facteurs prépondérants. La structure étant peu développée, et la stabilité médiocre, le coefficient de filtration est faible et, de surcroît, diminue avec le temps.

Il est curieux de constater que la vitesse maximum du drainage est du même ordre de grandeur que le coefficient de filtration mesuré par la méthode de DARCY appliquée à la terre tamisée. Mais ceci, à notre avis, ne devrait être interprété que comme une coïncidence car le débit du drainage dépend d'autres facteurs que le sol lui-même, en particulier la végétation.

Le débit des fortes pluies atteignant parfois 1 mm par minute (soit 6,0 cm/h), la perméabilité du sol saturé d'eau serait alors insuffisante pour que les pluies puissent s'infiltrer en totalité. Ceci explique le ruissellement qui peut s'observer au cours de la saison des pluies.

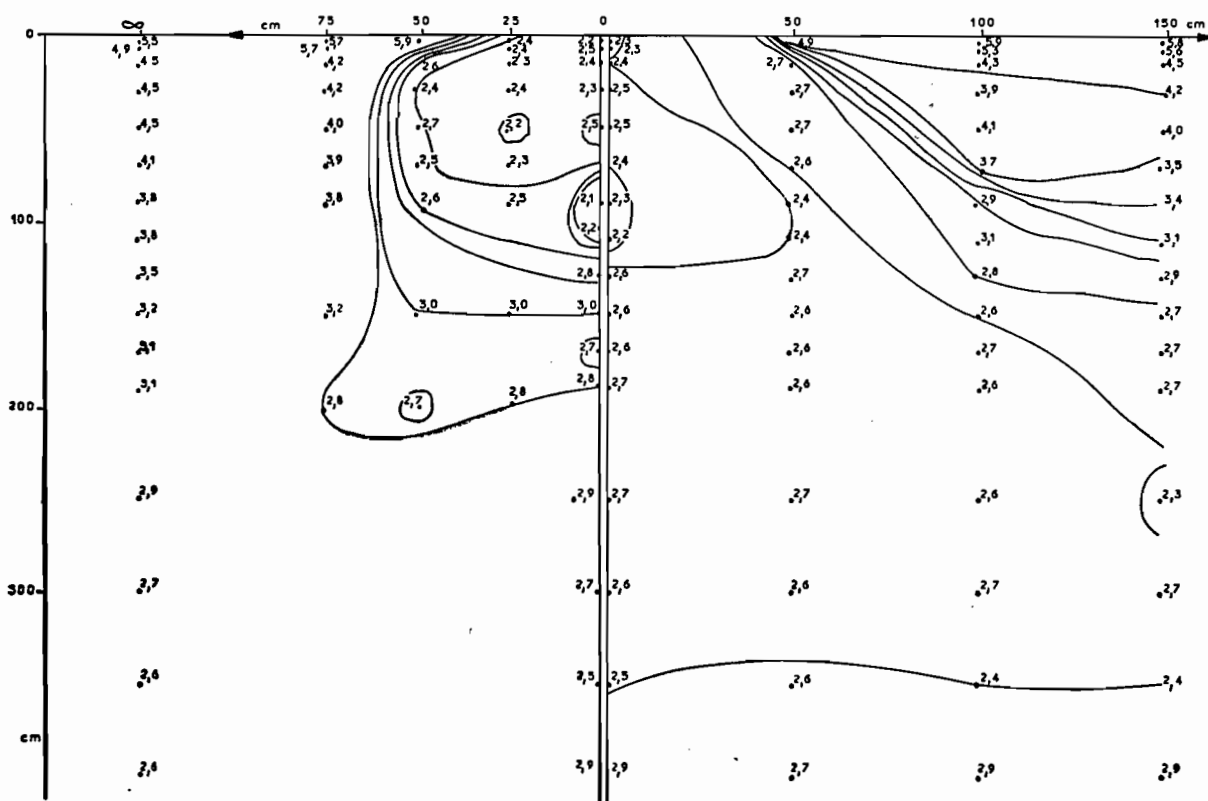
G) Capacité de rétention et diffusion de l'eau dans le sol

Dans le but initial de mesurer la capacité au champ des différents horizons, des profils hydriques ont été relevés au sol Dior et en sol Dek après saturation par l'eau. Les profils ont été relevés :

au bout de vingt-quatre heures : au centre du périmètre saturé ; à 25, 50 et 75 cm de la bordure de la zone saturée ;

au bout de quarante-huit heures : au centre du périmètre saturé ; à 50 et 100 cm de la bordure.

La connaissance de l'humidité a permis grâce aux courbes tracées *a posteriori*, de transformer les chiffres



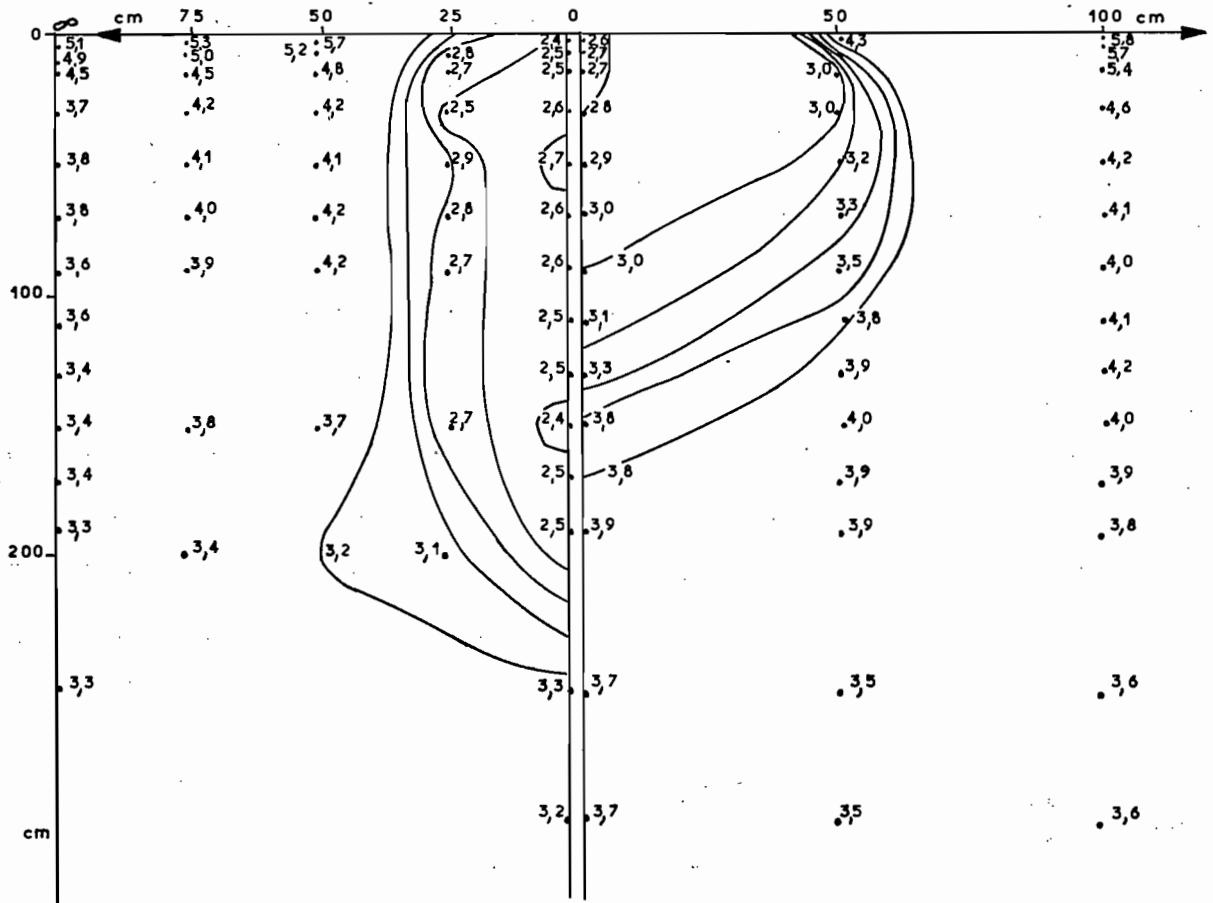
GRAPHIQUE 10.

Répartition des p F en sol Dek. Vingt-quatre heures après saturation, quarante-huit heures après saturation.

d'humidité en pF. Cette méthode, bien qu'estimative et moins précise que la mesure directe du pF, fournit cependant des résultats interprétables. Elle a été utilisée car nous ne disposions pas, au moment de l'expérimentation, de l'appareillage nécessaire pour la mesure de toute la gamme des pF.

Les graphiques 10 et 11 représentent la répartition des pF après vingt-quatre heures et quarante-huit heures de ressuyage en sol Dior et en sol Dek.

Plusieurs observations peuvent être faites à propos de ces graphiques.



GRAPHIQUE 11.

Répartition des pF en sol Dior.
Vingt-quatre heures après saturation. Quarante-huit heures après saturation.

a) MESURE DE LA CAPACITÉ DE RÉTENTION.

Celle-ci s'effectue en principe après vingt-quatre heures de ressuyage pour les sols sableux. Or qu'il s'agisse du sol Dior ou du sol Dek, le profil hydrique est loin d'être régularisé au bout de ce laps de temps ; les pF du sol Dior varient entre 2,2 et 2,8, ceux du Dek entre 2,4 et 2,8. Au bout de quarante-huit heures, par contre, les valeurs de pF sont stabilisées à 2,6 et 2,7 pour le sol Dior (exception faite d'un niveau à plus faible potentiel entre 35 et 60 cm). La valeur de pF 2,6 a été retenue comme correspondant à la capacité au champ pour les différents horizons du sol Dior. Cette valeur sera d'ailleurs confirmée par les relevés de profils hydriques effectués au cours de la saison des pluies.

En ce qui concerne le sol Dek, la mesure des pF effectuée au bout de quarante-huit heures de ressuyage ne peut servir à caractériser la capacité de rétention, car la diffusion verticale a été spécialement lente en raison de la nature plus argileuse du sol, et les pF sont anormalement élevés. La confrontation des mesures effectuées au bout de vingt-quatre heures et des profils hydriques relevés au cours de la saison des pluies tend également à placer la capacité de rétention à pF 2,6.

Il semble bien, d'après cette expérience, qu'un délai de quarante-huit heures après saturation soit insuffisant pour permettre au profil hydrique de se régulariser dans ces deux sols. Il faut sans doute attendre quatre à cinq jours.

b) DIFFUSION LATÉRALE DE L'EAU DANS LE SOL.

La comparaison des graphiques 10 et 11 montre que le comportement des deux sols est assez différent, l'eau diffuse plus facilement dans le sens latéral en sol Dior qu'en sol Dek. La zone humidifiée a un rayon de 60 cm pour le Dior, de 40 cm pour le Dek, au bout de vingt-quatre heures. Après quarante-huit heures le front de l'humidité dépasse 1 m en sol Dior. En sol Dek il n'est qu'à 60 cm.

Ceci confirme l'observation faite à propos de la mesure de MÜNTZ. En rapprochant les chiffres de vitesse de diffusion latérale obtenus dans cet essai des chiffres calculés d'après la vitesse d'avancement du front d'humidité, on observe que dans les deux cas la vitesse de diffusion latérale en sol Dior est environ deux fois plus élevée qu'en sol Dek. Le sol Dior se comporte comme un milieu sensiblement isotrope ; le sol Dek est au contraire franchement anisotrope ; ceci s'observe souvent dans le cas des sols formés à partir de dépôts alluvionnaires.

c) INFILTRATION VERTICALE.

Au bout de vingt-quatre heures, la profondeur atteinte par l'eau est d'environ 2,20 m pour le sol Dek; 1,20 m pour le Dior.

La vitesse de diffusion de l'eau dans le sens vertical à partir d'une zone saturée est donc sensiblement plus élevée en sol Dek $\frac{220}{24} = 9,2$ cm/h contre $\frac{120}{24} = 5,0$ cm/h en sol Dior. Si l'on considère les mesures effectuées au bout de quarante-huit heures de ressuyage les chiffres deviennent 3,5 cm/h en sol Dek et 4,4 en sol Dior.

Le coefficient de pénétration se définit comme le rapport de la profondeur du sol mouillé à la hauteur d'eau ayant pénétré dans le sol. Ici cette hauteur d'eau a été d'environ 50 cm (dans l'anneau central).

Le coefficient de pénétration est donc de :

$$\frac{220}{50} = 4,4 \text{ en sol Dek}$$

$$\frac{120}{50} = 2,4 \text{ en sol Dior.}$$

Il est possible de retrouver par le calcul les valeurs de ce coefficient. Celui-ci peut en effet également se définir comme le rapport d'une hauteur de sol à la capacité de stockage de l'eau sur cette hauteur.

La capacité totale du sol pour l'eau, correspondant à la quantité maximum que celui-ci peut emmagasiner, est donnée par la valeur de la porosité, corrigée de l'humidité présente dans le sol.

Si l'on retient pour la porosité la valeur moyenne de 40 % pour les deux sols, la capacité totale brute de 1 m de sol sera donc de 400 mm.

Le coefficient de pénétration a se définira donc par la formule : $a = \frac{1.000}{400 - b}$

où b représente l'humidité, en mm, sur 1 m de sol.

En faisant varier b de 0 à la capacité de rétention (90 mm pour le sol Dior, 160 mm pour le Dek), a variera de 2,5 à 4,2. On retrouve l'ordre de grandeur des chiffres expérimentaux.

On peut retenir comme valeur moyenne pour a le chiffre 3, ce qui signifie qu'une pluie de 100 mm amènera à saturation environ 30 cm de sol.

Il est intéressant de noter que lorsque la tranche de sol de 1 m de hauteur se trouve tout entière à une humidité voisine de la capacité de rétention le volume lacunaire est encore de 310 mm en sol Dior, 240 en sol Dek. Il reste donc de larges possibilités de stockage de l'eau. Les risques d'asphyxie pour les racines dans de tels sols sont à peu près nuls.

Plus que la profondeur de sol saturé, il est important de connaître la profondeur de sol amené à la capacité de rétention après une pluie. La première ne représente en effet qu'une donnée temporaire, la seconde nous permet au contraire de situer à tous moments de la saison des pluies « le front de l'humidité » dans le profil, donc de connaître :

- la profondeur accessible aux racines,
- la migration des éléments facilement solubles tels que l'azote minéral et la potasse,
- l'apparition du drainage à tel ou tel niveau.

TABLEAU 10

VALEURS COMPARÉES, EN RÉGIME PERMANENT, DU COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ K EN cm/h,
MESURÉ PAR DIFFÉRENTES MÉTHODES

Méthode utilisée	Conditions de la mesure	Nombre d'essais retenus	Sol Dior			Sol Dek		
			Moyenne	Limite inférieure	Limite supérieure	Moyenne	Limite inférieure	Limite supérieure
a) DARCY Terre tamisée ..	Sur seize horizons du profil 0-4 m	Dior : 37 Dek : 22	0,98	0,38	2,63	0,88	0,46	1,73
Echantillons in-tacts	Sur cinq horizons du profil 0-1 m	Dior : 3 Dek : 5	4,80	4,20	5,10	4,00	1,70	6,25
b) PORCHET	Trou de 50 cm	2	25,2	20,8	42,6	27,2	26,0	35,3
	Trou de 100 cm	2	69,8	68,5	89,5	76,5	65,0	150,0
c) MÜNTZ	Anneau central	Dior : 3 Dek : 2	19,7	15,8	20,8	21,0	19,0	23,0
	Diffusion verticale							
	Anneau de garde	Dior : 3 Dek : 2	34,6	31,1	39,8	30,0	26,0	39,0
	Diffusion latérale		14,9	15,3	19,0	9,0	7,0	16,0
d) CASES LYSIMÉ- TRIQUES	Sol saturé jusqu'à 2 m	1			0,55			0,55
e) DIFFUSION DE L'EAU DANS LE SOL (vitesse d'avance- ment du front d'humidité dans le sol en place)	Diffusion verticale	2	4,6	4,4	5,0	6,3	3,5	9,2
	— latérale	2	3,1	2,5	3,7	1,4	1,1	1,7

Cette profondeur y nous est donnée par la formule :

$$y = a \times \frac{1}{\Delta}$$

où a représente la hauteur d'eau ayant pénétré dans le sol.

l une hauteur de sol convenablement choisie en fonction de a exprimée en mm.

Δ le déficit de rétention, en mm, pour la hauteur l de sol considérée,

y sera exprimé dans la même unité que a.

Si par exemple nous choisissons pour l la valeur de 1.000 mm, le déficit pourra varier entre 0 et 90 pour le sol Dior, entre 0 et 160 pour le sol Dek.

La valeur du coefficient $\frac{1}{\Delta}$ pourra donc théoriquement varier dans de très larges limites :

entre ∞ et 11,1 pour le sol Dior,

entre ∞ et 6,2 pour le sol Dek.

Pratiquement la valeur la plus élevée du déficit observée a été, en 1960, de 72 mm en sol Dior et 118 mm en sol Dek pour 1 m de sol.

Les valeurs minima du coefficient $\frac{1}{\Delta}$ qui leur correspondent sont de 14 pour le sol Dior et 8,5 pour le sol Dek.

En choisissant pour ce coefficient la valeur 10 pour les deux sols on est à peu près assuré de connaître ainsi rapidement la profondeur minimum de sol amenée à la capacité de rétention. Pour des pluies isolées, séparées par plusieurs jours de sécheresse, cette profondeur sera donnée par le chiffre de hauteur de pluie multiplié par 10 ; par exemple une pluie de 50 mm amènera à rétention au minimum 50 cm de sol.

Pour avoir une idée plus précise de cette profondeur de pénétration, il est indispensable d'avoir une bonne estimation du déficit et de choisir l de façon que le rapport $\frac{a}{\Delta}$ soit aussi proche que possible de 1.

5) LES VARIATIONS DU POTENTIEL CAPILLAIRE

a) Méthode utilisée

La saison des pluies de l'année 1959 a commencé à Bambeï le 5 juin pour se terminer le 24 septembre. Le total des pluies n'a atteint que 448 mm ; l'année est donc très déficitaire par rapport à la normale qui est de 631 mm (période de 1922 à 1949). Le graphique 1 donne la répartition des pluies et les variations du pouvoir évaporant de l'air pendant cette période.

Un premier profil hydrique a été relevé en avril ; il peut être pris comme point de départ à défaut d'un profil relevé fin mai, immédiatement avant le début des pluies. L'erreur dans ce cas peut être tenue pour négligeable, car le dessèchement qui se produit au cours des derniers mois de la saison sèche est faible. Le deuxième profil a été relevé le 26 juin après la première pluie importante. Puis à dater de ce jour les profils ont été relevés chaque semaine.

Tous les profils hydriques ont été relevés par sondages effectués à faible distance les uns des autres, sous végétation naturelle. La surface de répartition des différents trous de sondages peut être estimée à 200 m². La végétation naturelle celle d'une jachère relativement ancienne (cinq ans) à dominance de Graminées : *Eragrostis tremula*, *Cenchrus biflorus*, *Aristida stipoides*, *Pennisetum* sp., auxquelles s'ajoutent de nombreuses messicoles et rudérales.

Chaque profil a été relevé jusqu'à une profondeur de 2 m et comporte douze prélèvements intéressant des couches de sol d'inégale épaisseur : 5 ou 10 cm pour les horizons superficiels (0-5, 5-10, 10-20), 20 cm ensuite (20-40, 40-60..., 180-200).

b) Les résultats

On se contenta au début d'effectuer les mesures d'humidité. Par la suite, il apparut que l'hétérogénéité du sol, dans l'espace et dans le profil, pouvait amener des erreurs importantes dans l'estimation du déficit ; à partir du 1^{er} septembre, sur chaque prise d'essai, fut déterminée, en même temps que l'humidité, l'humidité équivalente (pF 3,0). La variabilité des valeurs d'humidité équivalente apparaît dans les tableaux.

Pour chaque horizon une valeur moyenne de l'humidité équivalente a été calculée. Deux profils moyens de sol Dior et de sol Dek ont ainsi été établis et ont servi de bases de référence pour les calculs de déficit. Les

TABLEAU 18

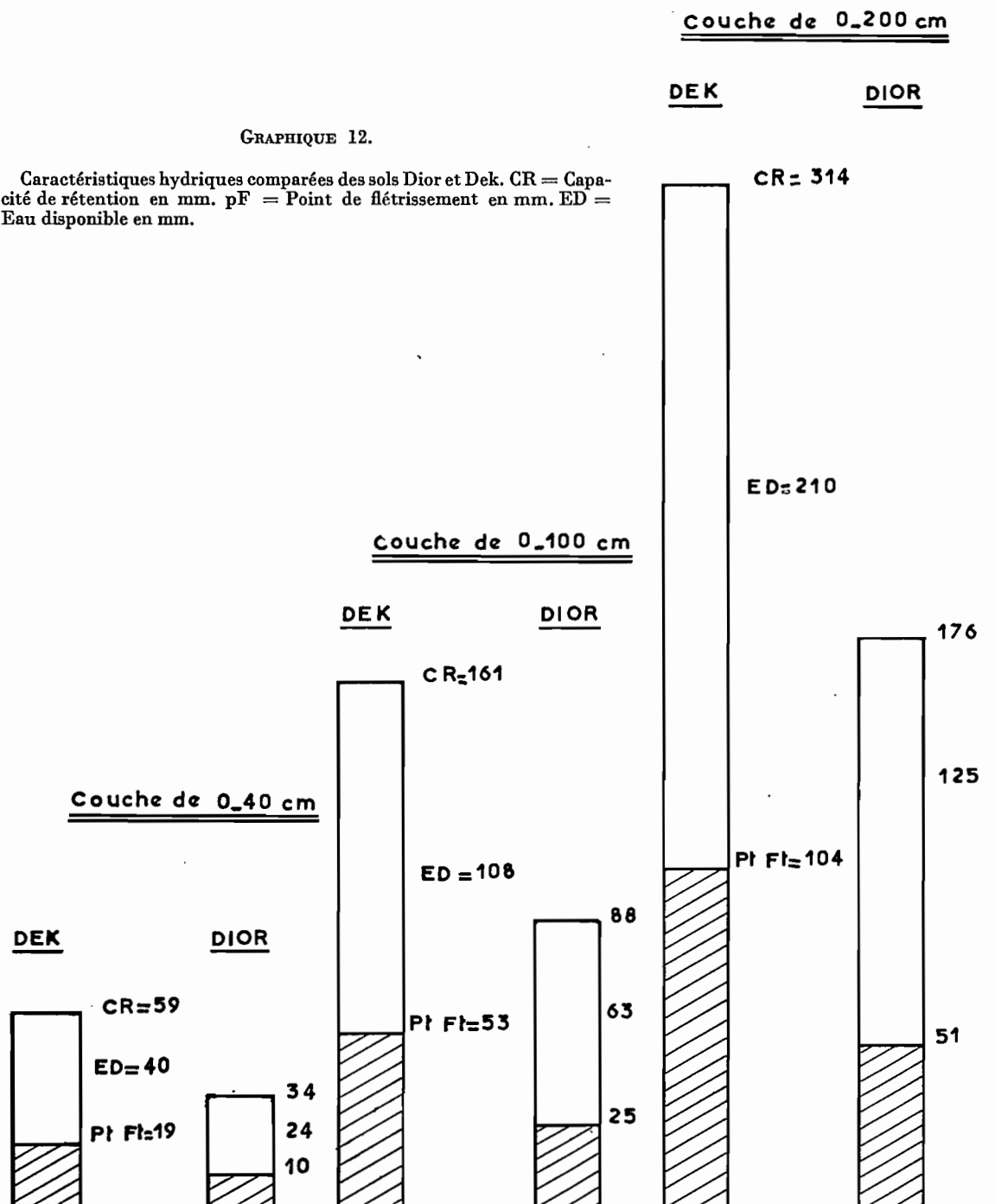
CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES COMPARÉES DE DEUX PROFILS MOYENS DE SOLS DIOR ET DEK

Profondeurs en cm	Humidités exprimées en % de poids						Humidités exprimées en hauteurs d'eau (mm)					
	Sol Dior			Sol Dek			Sol Dior			Sol Dek		
	Humidité équivalente	Capacité de rétention	Point de flétrissement	H. E.	C. R.	pF	C. R.	pF	Eau utilisable	C. R.	pF	Eau utilisable
0-5	2,92	4,38	1,24	6,33	8,23	2,72	3,3	0,9	2,4	6,6	2,2	4,4
5-10	2,93	4,40	1,24	6,13	7,97	2,64	3,3	0,9	2,4	6,4	2,1	4,3
10-20	3,86	5,79	1,68	6,95	9,03	2,99	8,7	2,5	6,2	14,4	4,7	9,7
20-40	4,18	6,28	1,82	7,51	9,76	3,23	18,9	5,5	13,4	31,2	10,3	20,9
40-60	4,43	6,65	1,93	7,84	10,19	3,37	20,0	5,8	14,2	32,6	10,8	21,8
60-80	3,52	5,28	1,53	8,44	10,97	3,63	15,8	4,6	11,2	35,1	11,6	23,5
80-100	4,01	6,01	1,74	8,39	10,91	3,61	18,0	5,2	12,8	34,9	11,5	23,4
100-120	3,82	5,73	1,66	7,80	10,14	3,35	17,2	5,0	12,2	32,4	10,7	21,7
120-140	3,62	5,43	1,57	7,28	9,46	3,13	16,3	4,7	11,6	30,3	10,0	20,3
140-160	3,86	5,79	1,68	7,10	9,23	3,05	17,4	5,0	12,4	29,5	9,7	19,8
160-180	3,92	5,88	1,71	7,24	9,41	3,11	17,7	5,1	12,6	30,1	9,9	20,2
180-200	4,32	6,48	1,88	7,34	9,54	3,16	19,4	5,6	13,8	30,5	10,1	20,4
MOYENNE	3,78	5,67	1,64	7,36	9,60	3,16						
CUMUL à 40 cm ...							34,2	9,8	24,4	58,6	19,3	39,3
» à 100 cm ...							88,0	25,4	62,6	161,2	53,2	108,0
» à 200 cm ...							176,0	50,8	125,2	314,0	103,6	210,4

valeurs de la capacité de rétention et du point de flétrissement ont été déduites de celles de l'humidité équivalente.

Pour le sol Dek la capacité de rétention a été déterminée comme valant 1,3 fois l'humidité équivalente ; pour le sol Dior le coefficient correcteur est de 1,5. Quant au point de flétrissement, il a été établi à la suite d'un certain nombre de résultats que, pour les deux sols envisagés, sa valeur était égale en moyenne à $\frac{1}{2,3}$ celle de l'humidité équivalente (H.F. = 0,435 H.E.).

Le tableau 18 et le graphique 12 donnent les caractéristiques hydriques des deux profils moyens de sol Dior et de sol Dek : humidité équivalente, capacité de rétention, point de flétrissement des différents horizons.



c) La saison des pluies

Les valeurs d'humidité ont été transformées en pF grâce aux courbes des graphiques 2 et 3 établies pour différents horizons des deux sols. Ces chiffres, de par la méthode utilisée, ne peuvent prétendre à une grande précision. Ils ont néanmoins une valeur indicative.

Il est impossible de suivre d'une façon continue les courbes de même pF au cours de cette période car les pluies introduisent une série de discontinuités. Alors que sur un même profil, certaines zones sont en voie de réhumectation, d'autres sont en voie de dessèchement. Cette alternance des phases d'humectation et de dessèchement se poursuit jusqu'à la saturation* complète du profil.

Les graphiques 13 et 14 mettent en parallèle la pluviométrie et, dans chaque profil, les zones dont les humidités sont supérieures ou égales à la capacité de rétention, inférieures ou égales au point de flétrissement ($pF < 2,6$; $pF \geq 4,2$).

La saturation* du sol Dior se produit après la grande pluie du 27 août (110 mm) alors que le sol Dek n'approche de la saturation que fin septembre. Il faut noter que, tout en l'approchant de très près, le sol Dek n'atteindra pas la capacité de rétention au cours de l'année 1959. Ce fait exceptionnel a été confirmé par les résultats des cases lysimétriques : plusieurs cases n'ont pas drainé cette année-là. La vitesse de saturation du profil et le volume du drainage ne sont d'ailleurs pas sous la seule dépendance du sol, ainsi que l'ont montré les études faites en cases lysimétriques [6] ; la végétation, par sa transpiration plus ou moins active, est un facteur tout aussi important. C'est ainsi qu'au cours de l'année 1959 seules les cases portant une culture de mil ont drainé aussi bien en sol Dior qu'en sol Dek. Les autres cases, qui se trouvaient être sous jachère, n'ont pas drainé (sauf un millimètre pour la case 5, en sol Dek).

En ce qui concerne la date de début de drainage, quatre cases ont commencé à drainer entre le 2 et le 6 septembre, deux cases le 21 septembre. Ces observations recoupent donc celles qui ont été faites au champ, d'après les relevés de profils hydriques. Mais on voit qu'il serait erroné d'interpréter les différences observées entre sol Dior et sol Dek comme imputables uniquement à la nature même des sols. L'état de la végétation naturelle (densité, activité respiratoire), que portaient les deux sols cette année-là, explique au moins aussi bien les différences observées dans la saturation des profils.

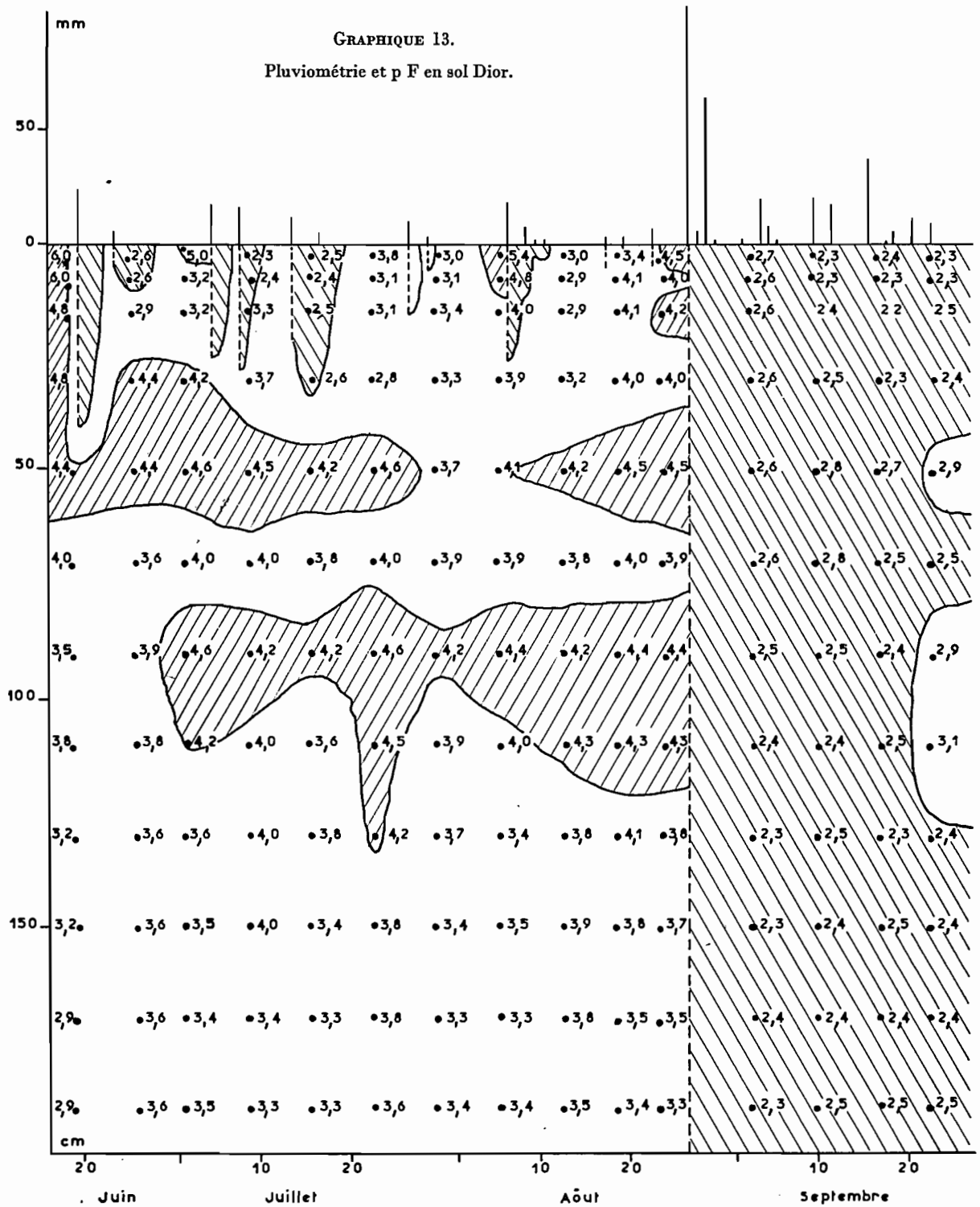
Il aura donc fallu, en 1959, 321 mm de pluie pour observer un commencement de drainage en sol Dior sous jachère naturelle et 435 mm pour amener le sol Dek au voisinage de la capacité de rétention. Ces chiffres varient d'une année sur l'autre suivant la répartition des pluies et le développement de la végétation [6].

Jusqu'au 1^{er} septembre, les zones asséchées, dont l'humidité est inférieure au point de flétrissement, n'ont pas la même importance en sol Dior et en sol Dek. Dans les deux sols il existe une zone asséchée vers 50 cm de profondeur, l'extension maximum de cette zone allant de 20 à 60 cm. Sur les graphiques 13 et 14 on constate que cette zone constitue le reliquat de la croûte desséchée qui, avant les pluies, atteignait 60 cm de profondeur. Sa limite inférieure reste à peu près fixe, mais sa limite supérieure varie beaucoup suivant les alternances de l'humectation par les pluies et du dessèchement. Le dessèchement peut également apparaître dans les 10 ou 20 premiers centimètres quand les pluies sont trop espacées. Au-dessous de 60 cm le potentiel capillaire diminue assez régulièrement, en sol Dek, avec la profondeur. Au contraire en sol Dior, il se reforme, début juillet une nouvelle zone asséchée à partir de 80 cm. La limite supérieure de cette zone reste à peu près fixe autour de 80 cm, sa limite inférieure pouvant descendre jusqu'à 130 cm. Elle semble nettement séparée de la première par l'horizon 60-80 cm, dont le pF reste constamment inférieur à 4,2. L'existence de cet horizon asséché en sol Dior peut s'expliquer de deux manières. Peut-être représente-t-il la limite de profondeur atteinte par les pluies, dont aucune n'est supérieure à 25 mm au cours de cette période. Cet horizon marquerait ainsi une discontinuité, l'assèchement se produisant à la fois au-dessous et au-dessus de lui. Ou au contraire peut-on penser que l'alimentation hydrique de la plante se fait préférentiellement vers 1 m de profondeur ; cette hypothèse peut difficilement être retenue, d'autant qu'il s'agit essentiellement ici d'une végétation graminéenne, à système racinaire fasciculé, concentré dans les premiers centimètres superficiels. La première hypothèse nous semble plus vraisemblable.

Il apparaît donc que, dans la période précédant la saturation, le dynamisme de l'eau dans le sol obéit à plusieurs causes jouant simultanément ; la complexité qui en résulte permet difficilement de déduire, à une date déterminée, d'après les seules données météorologiques (pluies et évaporation) l'allure des courbes de potentiel

* Le terme saturation est employé ici dans le sens de mise à la capacité de rétention. Dans cette acceptation, il est utilisé, bien qu'improprement, par de nombreux auteurs.

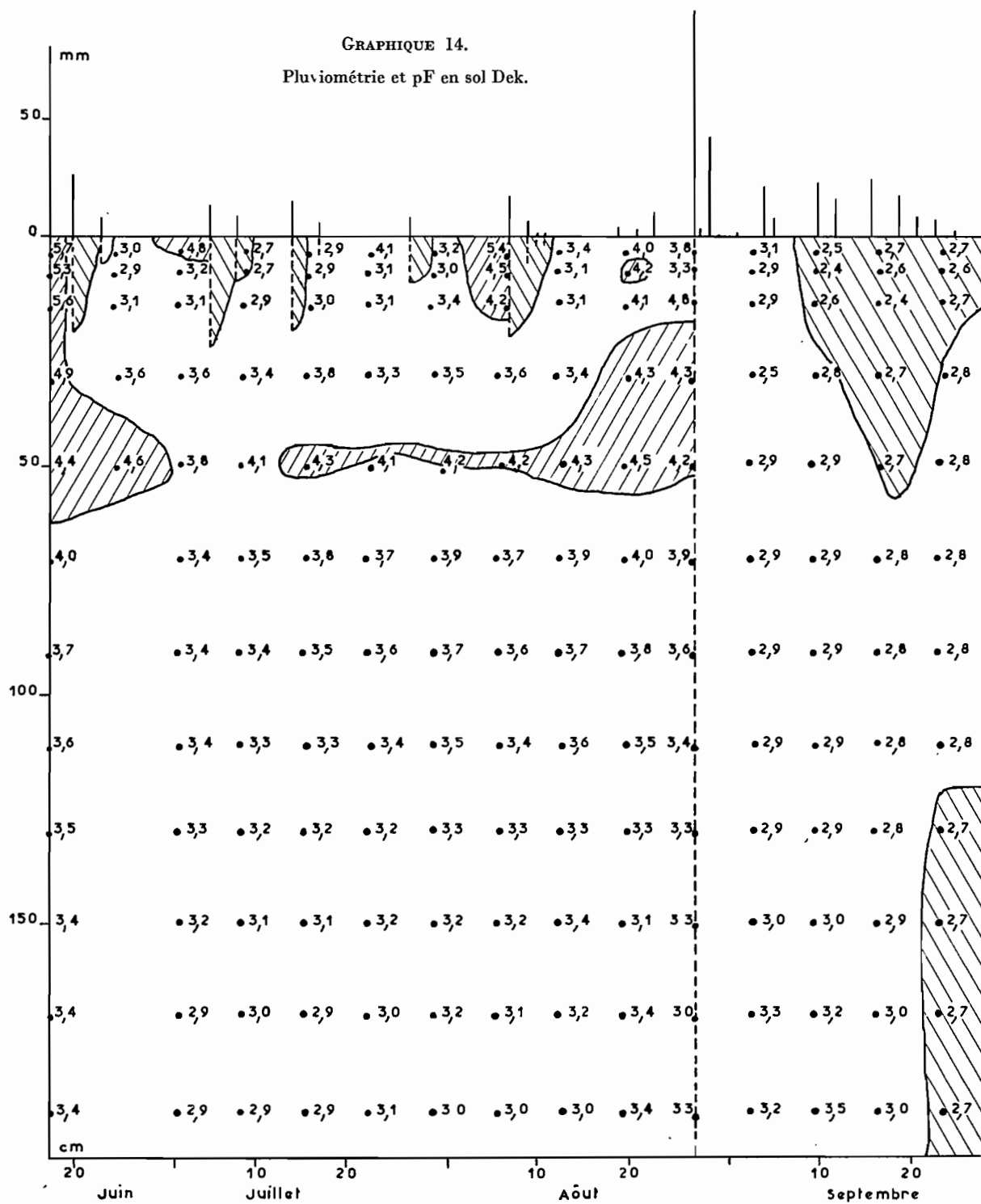
GRAPHIQUE 13.
Pluviométrie et p F en sol Dior.




Zone desséchée (pF ≥ 4,2)

Zone saturée (pF ≤ 2,6)

GRAPHIQUE 14.
Pluviométrie et pF en sol Dek.



 Zone asséchée (pF ≥ 4,2)

 Zone saturée (pF ≤ 2,7)

le long d'un profil de sol. Seules les mesures expérimentales semblent devoir nous renseigner avec certitude à ce sujet.

Il est cependant possible, grâce au calcul théorique de TURC portant sur l'évapotranspiration décadaire (tableau 23), d'évaluer la descente de l'eau et d'avoir, à tout moment, une estimation de la position du « front de saturation » dans le profil.

TABLEAU 23
CALCUL DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION D'APRÈS LA FORMULE DE TURC

Mois et décades	P	l	z	V	a	E
Mai 1959	0	50		0	3	3
Juin	33	50		0	1	30
Juillet 1	28	46	1	34	1	45
— 2	22	46	2	21	1	37
— 3	16	46	3	10	1	25
Août 1	38	41	4	5	1	30
— 2	10	41	5	17	1	26
— 3	180	41	6	5	1	40
Sept. 1	65	45	7	40	12	48
— 2	53	45	8	40	12	48
— 3	22	45	9	40	12	47
Oct. 1	0	47	10	40	12	44
— 2	0	47	11	40	1	39
— 3	0	47	12	40	1	37
Nov.	0	39		0	3	3
Décembre 1959	0	32		0	3	3
Janvier 1960	0	33		0	3	3
Fevrier	0	40		0	3	3
Mars	0	45		0	3	3
Avril	0	48		0	3	3
Mai	0	50		0	3	3

P = Pluviométrie décadaire ou mensuelle en mm.

l = Paramètre dépendant de la température et de la radiation globale (valeur décadaire).

z = Phase active de la végétation (en décades).

V = Paramètre dépendant de la végétation.

a = Hauteur d'eau susceptible d'être évaporée par le sol nu pendant une décade (en mm).

E = Évapotranspiration décadaire ou mensuelle en mm.

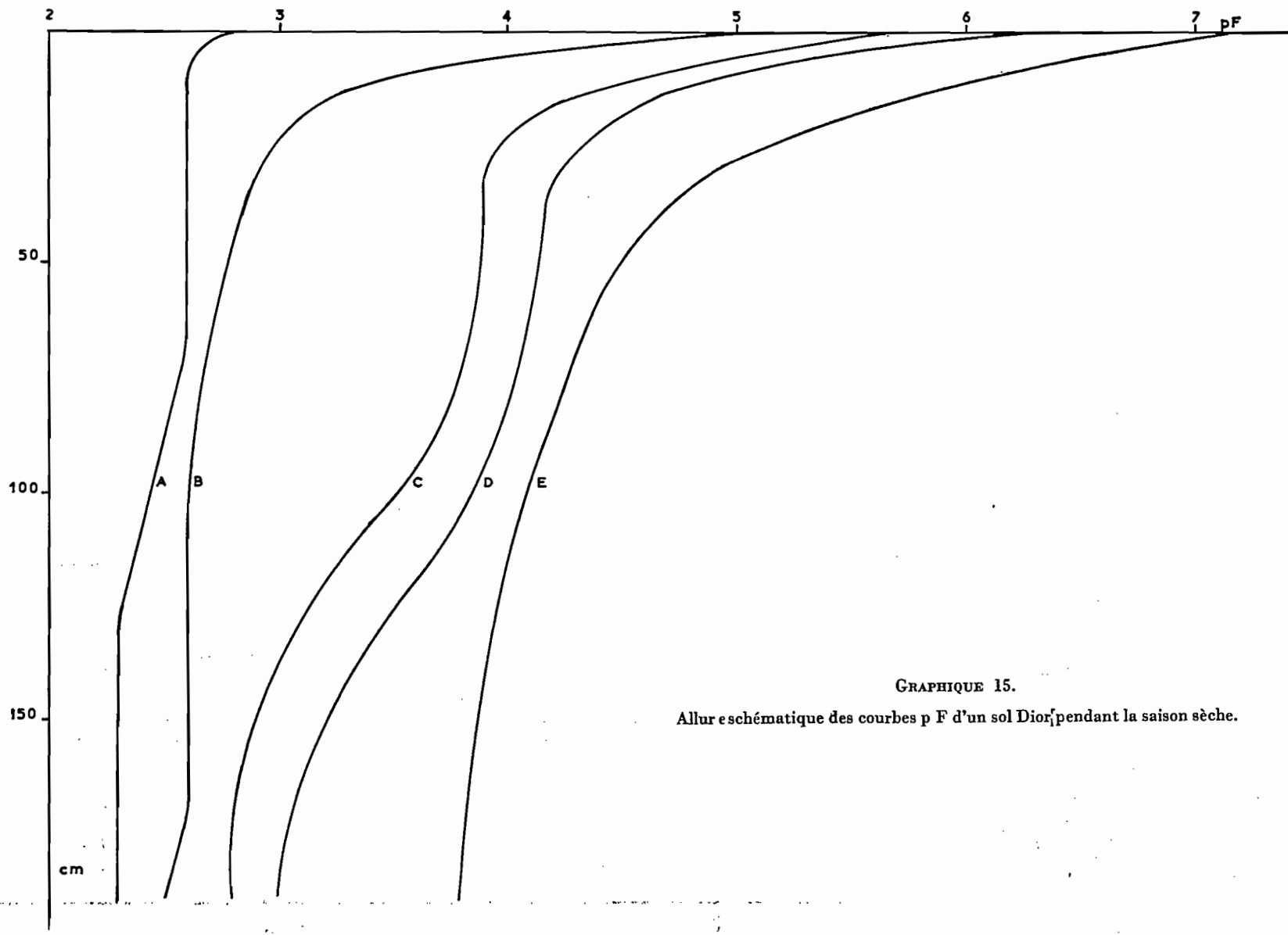
Connaissant, pour chaque décade, la pluviométrie et l'évapotranspiration, on en déduit par différence la hauteur d'eau demeurée dans le profil à la fin de la décade. Ce chiffre multiplié par le rapport hauteur de sol sur déficit correspondant donne la profondeur de sol saturée à la fin de la décade.

Ces calculs ont été faits pour les deux sols ; ils confirment ce qui a été observé au champ : jusqu'au 28 août la hauteur de sol amenée à la capacité de rétention n'a pas dépassé 10 cm ; les fortes pluies qui ont suivi ont amené une saturation complète du profil. Il serait intéressant de comparer les valeurs mesurées et calculées pour une pluviométrie plus régulièrement répartie.

Au contraire, à partir du 1^{er} septembre le processus devient moins difficile à suivre. Le profil relevé le 3 septembre montre que les potentiels capillaires diminuent avec la profondeur en sol Dior, ce qui tend à prouver que tous les horizons jusqu'à 2 m de profondeur ont atteint ou dépassé la capacité de rétention et que au delà de 2 m le mouvement de l'eau continue à se faire *per descensum*. La phase de drainage commence et se poursuivra jusqu'à l'arrêt des pluies, le 24 septembre. Il faut noter d'ailleurs qu'au cours de cette période les pluies sont de moyenne importance, l'évaporation est intense et l'on peut observer un drainage à 2 m de profondeur, alors que certains horizons du profil ont déjà un potentiel capillaire supérieur à la capacité de rétention.

Pour le sol Dek, le relevé du 3 septembre montre un profil stabilisé à pF 2,9 jusqu'à 130 cm ; au-dessous les pF dépassent 3,0. Cette situation reste sensiblement la même, avec toutefois une baisse du potentiel progressive à partir de la surface, jusqu'au 24 septembre. A cette date, de 30 à 110 cm, les pF sont à 2,8, puis ils passent, en dessous, à 2,7.

On se trouve donc très près de la capacité de rétention. Celle-ci ne pouvant être déterminée avec une certitude absolue, il se peut même qu'en sol Dek elle soit mieux définie par la valeur du pF 2,7 que par celle du pF 2,6.



GRAPHIQUE 15.

Allure eschématique des courbes $p F$ d'un sol Dior pendant la saison sèche.

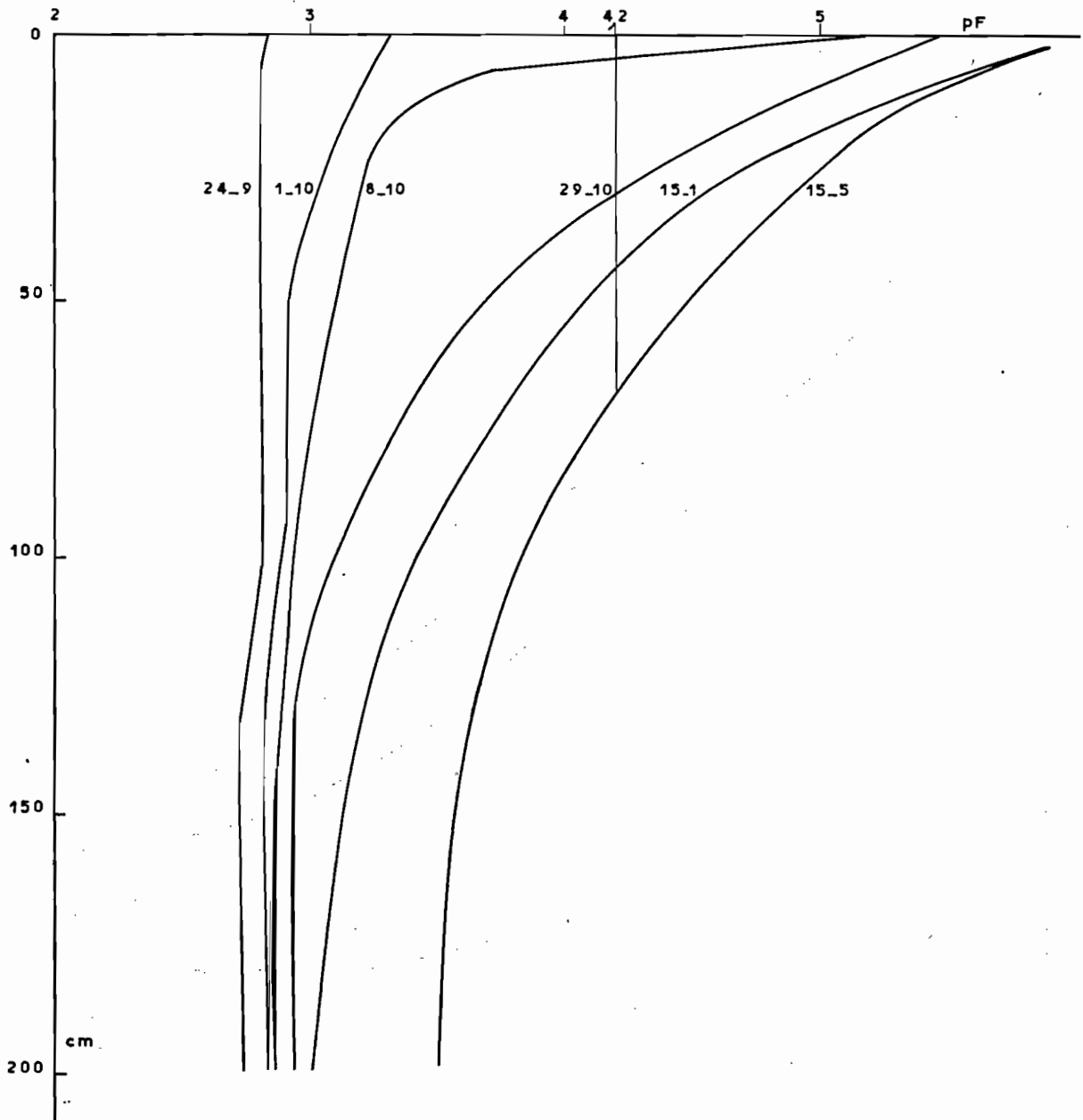
De toute façon on ne commet certainement pas une erreur grave en assimilant le profil du 24 septembre en sol Dek à un profil saturé. Cette assimilation sera faite par la suite pour le calcul du déficit et de l'évapotranspiration.

d) La saison sèche

A partir du 24 septembre, les pluies cessent ; les mouvements d'humidité dans le sol ne peuvent être qu'ascendants, sous l'influence de l'évapotranspiration. Au cours de cette période, qui va du 24 septembre 1959 à la mi-juin 1960, les relevés de profils hydriques ont été plus espacés, en raison des moindres variations d'humidité : tous les quinze jours au début de la période, puis tous les mois.

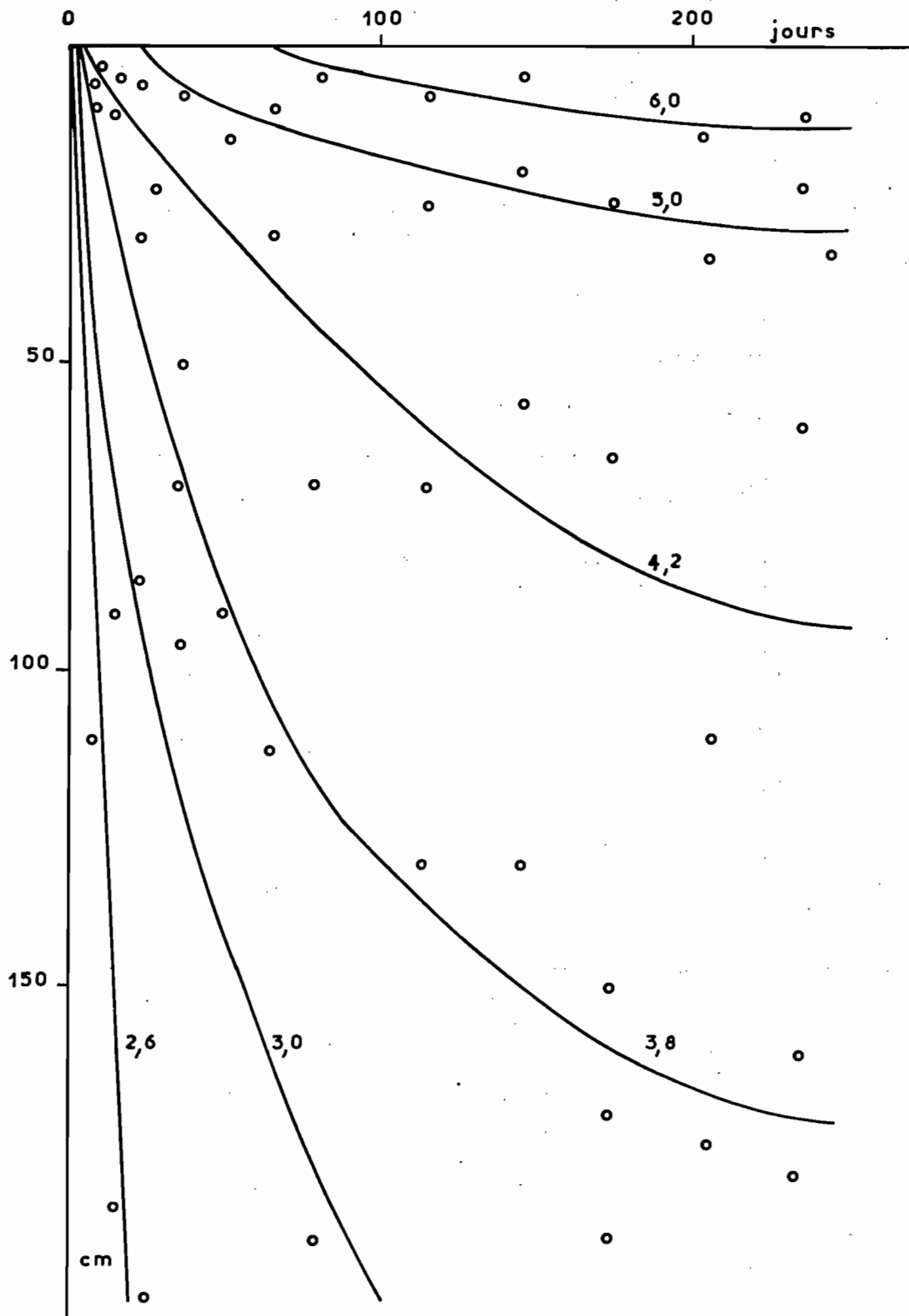
Les graphiques 15 et 16 montrent schématiquement la variation des valeurs de pF avec la profondeur.

GRAPHIQUE 16. — Allure schématique des courbes de pF dans un sol Dek pendant la saison sèche.



GRAPHIQUE 17.

Evolution du p F d'un sol Dior au cours de la saison sèche.



Pour les deux sols l'évolution des courbes est sensiblement identique mais la vitesse de dessèchement est plus grande en sol Dior. Le dessèchement des horizons superficiels est extrêmement rapide : en moins de quinze jours on atteint des valeurs de pF 5,0 dans la couche de 0 à 5 cm. Par la suite l'augmentation de pF se fait moins rapidement dans cet horizon ; à la fin de la saison sèche le pF atteint en surface les valeurs de 6,0-6,2 en sol Dek, 6,6-6,8 en sol Dior. Les courbes, au bout de quinze jours de dessèchement, marquent une cassure très nette vers 20 cm de profondeur, cette cassure étant provoquée par la disparition des variations de pF dans les horizons superficiels et en profondeur. Par la suite, cette cassure tend à s'effacer, un mouvement s'amorçant en sens inverse : les pF augmentant moins en surface qu'en profondeur.

Les sondages n'atteignent que 2 m de profondeur, mais les variations d'humidité affectent des couches plus profondes. Dès la deuxième semaine après la cessation des pluies, le pF 2,6, représentant la valeur de la capacité de rétention, se trouve à une profondeur supérieure à 2 m en sol Dior (graphique 17). En sol Dek, cette valeur ayant tout juste été atteinte par certains horizons, il n'a pas été possible de suivre sa variation avec la profondeur.

TABLEAU 17

PROFILS RELEVÉS JUSQU'À 4 m DE PROFONDEUR EN SOL DIOR ET DEK, LE 9-12-60

Profondeurs en cm	H. E. %	H %	H. E. %	H %	Dior pF	Dek pF	H mm	D. E. mm	D mm	H mm	E. D. mm	D mm
0-5	3,59	0,54	6,29	1,37	5,5	5,5	0,3	0,0	3,0	1,1	0,0	5,5
5-10	3,58	0,79	6,58	1,90	4,9	5,2	0,5	0,0	2,8	1,4	0,0	5,0
10-10	3,57	1,12	6,65	2,35	4,5	4,8	1,8	0,0	6,9	3,9	0,0	10,5
20-40	3,99	1,33	7,33	3,70	4,5	4,2	4,2	0,0	14,7	12,2	1,9	19,0
40-60	4,37	1,69	8,49	4,72	4,5	4,1	5,1	0,0	14,9	14,0	3,2	18,6
60-80	3,54	1,39	9,09	5,14	4,1	4,1	4,1	0,0	11,7	15,3	3,7	19,8
80-100	3,02	1,25	8,24	5,35	3,8	3,9	5,0	0,0	13,0	17,5	6,0	17,4
100-120	2,38	1,24	9,20	5,94	3,8	3,8	6,0	1,0	11,2	16,1	5,4	16,3
120-140	3,47	2,26	9,29	6,59	3,5	3,7	7,1	2,4	9,2	16,5	6,6	13,8
140-160	3,11	2,54	9,36	6,72	3,2	3,7	9,5	4,5	7,9	16,3	6,6	13,2
160-180	3,50	3,32	9,49	7,23	3,1	3,6	11,2	6,1	6,5	17,7	7,8	12,4
180-200	3,72	3,37	9,86	7,93	3,1	3,5	11,7	6,1	7,7	18,9	8,8	11,6
250	3,00	3,24	11,79	9,69	2,9	3,3	24,3	14,6	9,4	77,5	36,4	16,8
300	2,18	3,00			2,7		22,5	15,4	2,0			
350	2,28	3,50			2,6		26,2	18,8	0,0			
400	6,67	8,52			2,6		64,0	42,0	10,0			
CUMUL à 40 cm ...							6,8	0,0	27,4			
» à 100							21,0	0,0	67,0	18,6	1,9	40,0
» à 200							66,5	20,1	109,5	65,4	14,8	95,8
» à 300							113,3	50,1	120,9	150,9	53,4	163,1
» à 400							145,9	111,1	130,9			

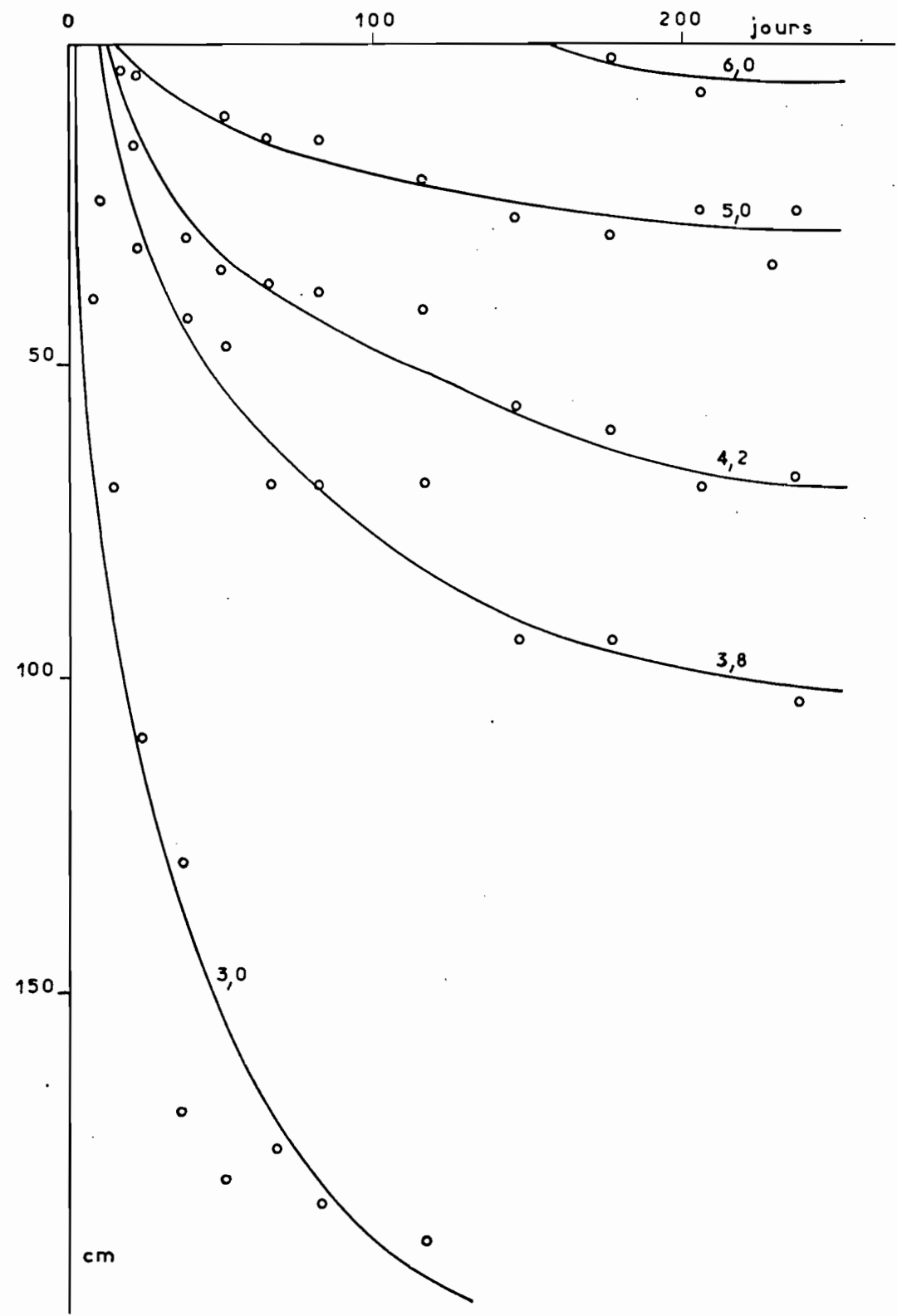
Deux profils atteignant 4 m de profondeur ont été relevés en décembre 1960 (tableau 17) ; en sol Dior, la couche où l'on trouve une humidité égale à la capacité de rétention se situe entre 3 m et 3,50 m de profondeur. Nous manquons malheureusement de données pour la fin de la saison sèche mais il est vraisemblable qu'au mois de mai on ne peut pas trouver une humidité correspondant à la capacité de rétention à moins de 4 m de profondeur. Il ressort bien, d'ailleurs, de la lecture des tableaux et graphiques, que si les pF augmentent lentement dans les horizons superficiels en fin de saison sèche, leur accroissement est nettement plus sensible en profondeur.

Les graphiques 17 et 18 montrent des différences entre le comportement du sol Dior et celui du sol Dek. Le dessèchement en sol Dior est sensiblement plus rapide. A la date du 15 mai, le pF 4,2 se situe à une profondeur moyenne de 70 cm en sol Dek, contre 90 cm en sol Dior ; le pF 3,8 à 1 m en sol Dek contre 1,70 m en sol Dior. Dès le 20 novembre, le pF 6,0 est atteint dans l'horizon superficiel du sol Dior (0-5) ; il faut attendre le 1^{er} mars pour que la même valeur soit atteinte en sol Dek.

Si l'on suit l'une des courbes de pF, par exemple celle de pF 3,8, on voit que la variation avec la profondeur est très rapide au début, jusqu'au mois de décembre ; ensuite le mouvement se ralentit et le pF ne « descend » plus que lentement dans le profil.

GRAPHIQUE 18.

Evolution des p F d'un sol Dek au cours de la saison sèche.



Il est difficile de parler d'une « croûte » desséchée en fin de saison sèche puisque les profils de pF ne mettent en évidence aucune discontinuité marquée ; cette discontinuité existe bien au début de la période d'assèchement ; mais, par la suite, le profil tend à se régulariser avec la progression du dessèchement en profondeur. Si le phénomène s'accroît encore, on peut penser que les profils de pF tendraient vers des droites. Les valeurs de pF seraient alors inversement proportionnelles à la profondeur ; la limite de la « croûte » desséchée ne pourrait être définie qu'en se fixant une valeur de pF.

Nous pouvons prendre comme valeur celle qui correspond à l'hygroscoïcité de l'air. Au mois de mai 1960 la valeur moyenne de l'hygrométrie fut de 52 %, ce qui correspond à un pF de 6,0.

L'épaisseur de la croûte desséchée, dont l'humidité est en équilibre avec l'hygrométrie de l'air, et à travers laquelle les mouvements d'humidité ne peuvent se faire que sous forme gazeuse, est de 5 cm en sol Dek, et peut atteindre 12 à 15 cm en sol Dior au mois de mai.

5) L'ÉVAPOTRANSPIRATION

a) Expression des résultats

Les chiffres d'humidité exprimés en pourcentage de poids par rapport au sol sec peuvent être transformés en chiffres de hauteur d'eau, de la façon suivante :

Soit : y l'épaisseur en cm de la couche de sol intéressée,
d la densité apparente du sol,
z l'humidité de la couche.

La valeur de x, hauteur d'eau en mm dans l'horizon, sera donnée par la formule :

$$x = z.d. \frac{y}{10}$$

Les valeurs retenues pour d ont été de : 1,6 pour tous les horizons de sol Dek et 1,5 pour tous les horizons de sol Dior.

Le tableau 18 donne les valeurs moyennes de la capacité de rétention et du point de flétrissement pour tous les horizons d'un profil de sol Dior et d'un profil de sol Dek. Ces valeurs ont été cumulées pour la couche de 0 à 40 cm, de 0 à 100, de 0 à 200. Le graphique 12 illustre ces données. On voit que la capacité de rétention de la couche 0-100 pour le sol Dek représente 314 mm d'eau, contre 176 seulement pour le sol Dior. Ces deux chiffres sont dans le rapport 1,8. Les points de flétrissement ont respectivement pour valeur 104 et 51 mm, soit un rapport de 2,0.

La quantité d'eau disponible pour les plantes est donnée théoriquement par la différence entre la capacité de rétention et le point de flétrissement, soit 210 mm pour le sol Dek contre 125 mm pour le sol Dior. Les plantes auront donc à leur disposition 1,7 fois plus d'eau en sol Dek qu'en sol Dior.

Le déficit de rétention se calcule par la différence entre la capacité de rétention et l'humidité de la couche étudiée.

Pour un intervalle de temps donné séparant deux relevés de profils hydriques, la pluviométrie, l'évapotranspiration, le drainage et les déficits des deux profils doivent satisfaire à l'équation :

$$P = E + D + \Delta 1 - \Delta 2$$

où P = Pluviométrie
E = Evapotranspiration
D = Drainage
Δ1 = Déficit au début de l'intervalle
Δ2 = Déficit à la fin de l'intervalle.

} pendant l'intervalle de temps considéré.

toutes ces valeurs étant exprimées en mm.

Connaissant P, Δ1 et Δ2 nous pouvons donc en déduire la somme E + D. Mais le drainage ayant été faible à nul au cours de l'hivernage 1959, nous avons pu soit le négliger, soit l'évaluer sans grand risque d'erreur d'après les mesures faites en cases lysimétriques.

Nous avons ainsi une mesure de E pour toutes les périodes de l'année.

b) L'évapotranspiration pendant la saison des pluies

Afin de réduire l'erreur due à l'hétérogénéité du terrain, les valeurs de l'humidité, exprimées en hauteur d'eau pour chaque profil, ont été corrigées de la façon suivante :

Soit H l'humidité de la couche étudiée,
 B son humidité équivalente,
 A l'humidité équivalente moyenne de la couche étudiée.

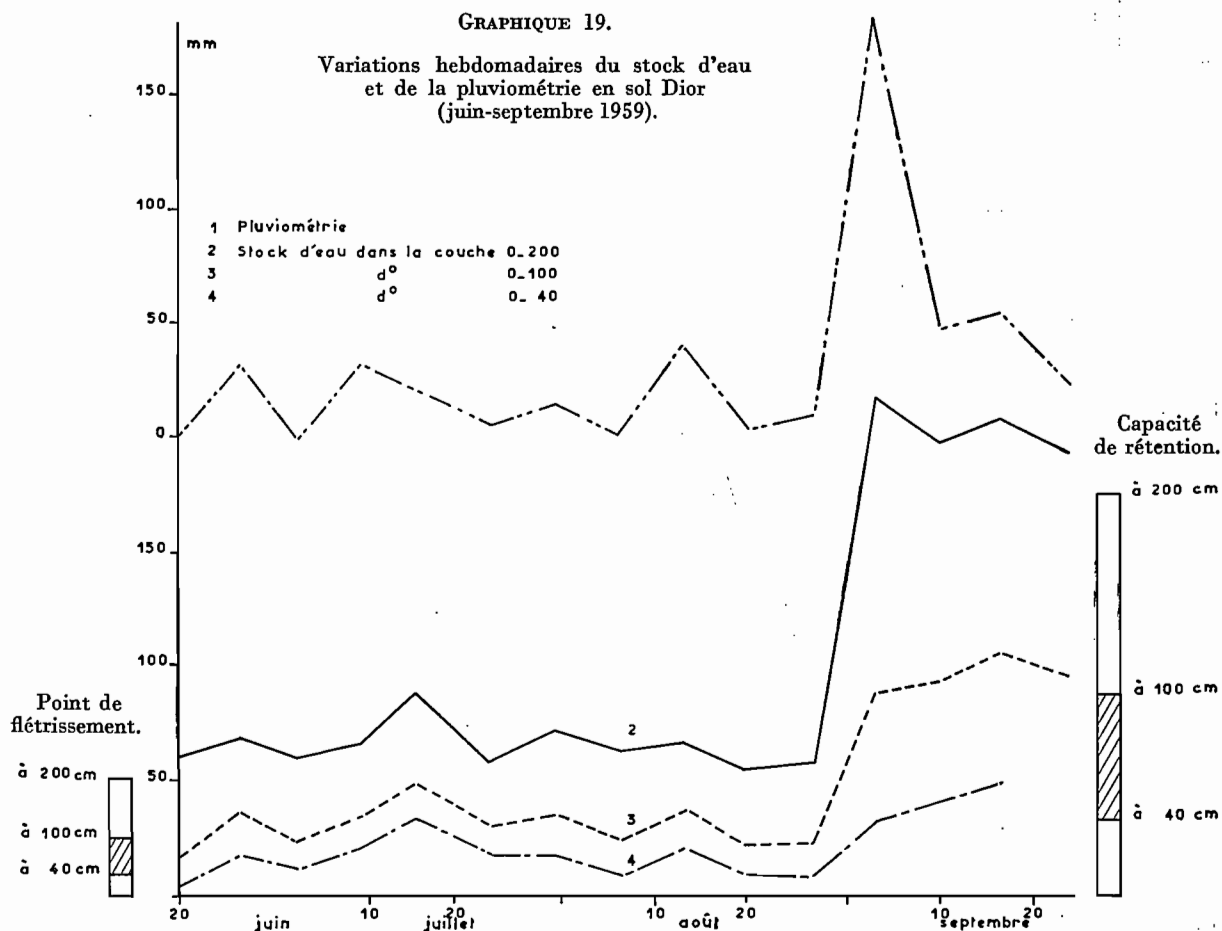
la valeur corrigée H', de l'humidité, sera donnée par la formule :

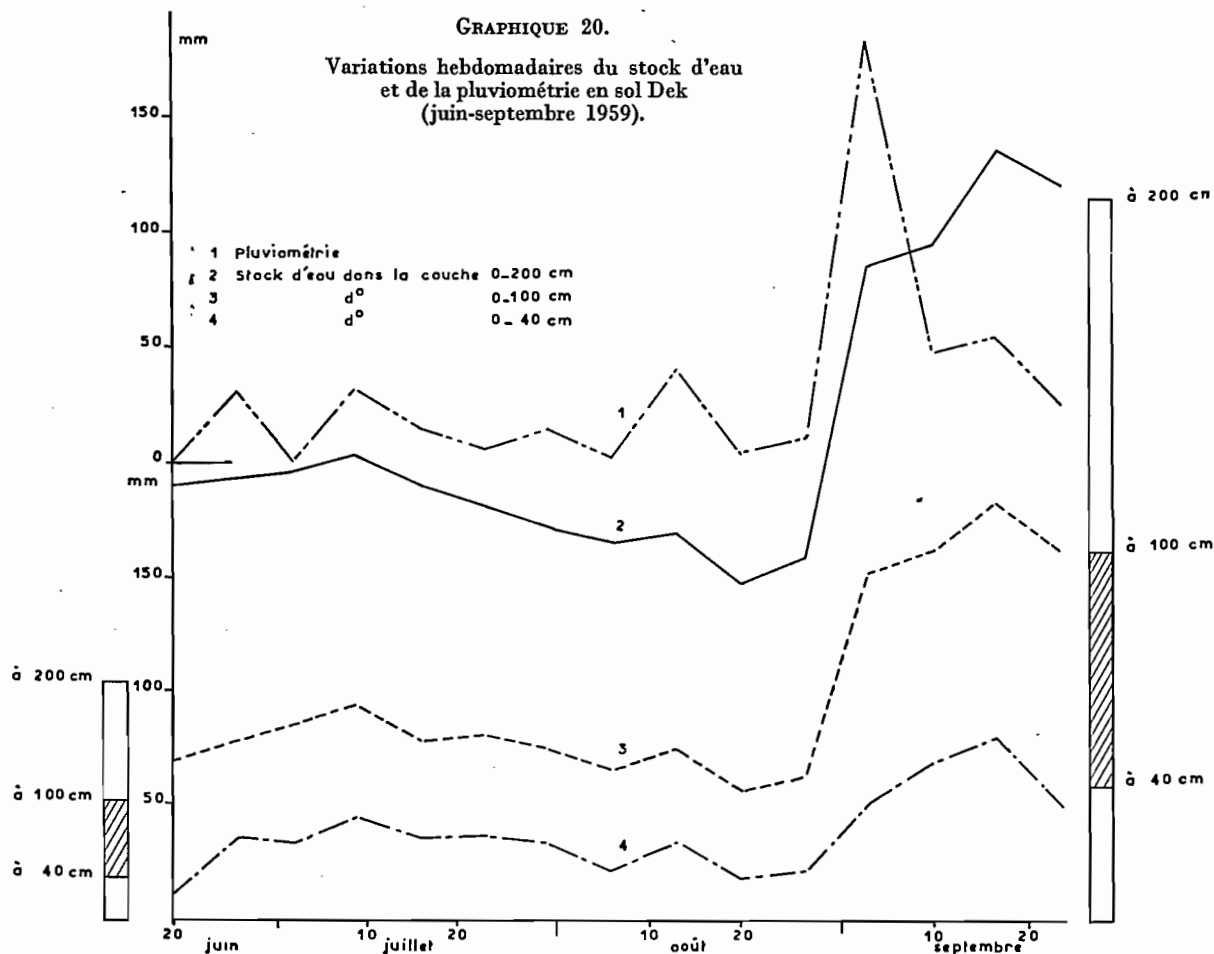
$$H' = H \times \frac{A}{B}$$

Il eût été sans doute plus rigoureux de passer par l'intermédiaire des pF, mais cette méthode présentait l'inconvénient d'être trop longue et, par ailleurs, entachée d'une autre imprécision, celle de la mesure expérimentale des pF. Telle quelle, la première méthode nous a permis d'améliorer sensiblement nos résultats. Il faut noter qu'elle n'a pu être appliquée à tous les prélèvements car les mesures d'humidité équivalente n'ont été faites systématiquement qu'à partir du 3 septembre.

Les graphiques 19 et 20 représentent les variations hebdomadaires de la pluviométrie et du stock d'eau dans les couches 0-40, 0-100 et 0-200 cm.

Les variations du stock d'eau de la couche 0-2 m, jointes à la connaissance de la pluviométrie, nous ont permis de suivre les variations de l'évapotranspiration au cours du temps. En bonne logique, il eût été préférable de connaître le stock d'eau jusqu'à 4 m de profondeur puisque, ainsi qu'on a pu l'estimer plus haut, c'est à ce niveau qu'on trouvait en fin de saison sèche une humidité égale à la capacité de rétention. Les estimations de l'évapotranspiration seront donc faites par défaut mais l'erreur ne doit pas être considérable, car, au-dessous de





2 m, les variations du déficit sont faibles par rapport à celles des couches superficielles ; on peut l'estimer au maximum à 50 mm.

Il existe d'ailleurs, ainsi que nous le verrons un excellent recouplement avec les valeurs de l'évapotranspiration calculées d'après la formule de TURC [7]. Ce calcul se fait sur les seules données météorologiques, d'après la formule :

$$E = \frac{P + a}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{l}\right)^2}} \text{ pour le sol nu}$$

$$E = \frac{P + a + V}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{l} + \frac{V}{2l}\right)^2}} \text{ pour le sol cultivé}$$

où : P représente la pluviométrie,

a la hauteur d'eau qui peut être évaporée à partir des seules réserves du sol,

l une fonction de la température et de la radiation globale,

V un facteur dépendant de la végétation.

L'intervalle choisi pour les calculs est la décade. Connaissant le déficit initial du sol et la pluviométrie, la formule de TURC permet donc d'estimer outre l'évapotranspiration, le drainage et le déficit final.

Les valeurs calculées par cette méthode ont été confrontées pendant sept années successives aux mesures de drainage effectuées en cases lysimétriques [6]. La correspondance entre les résultats s'est avérée très bonne.

Il nous a paru intéressant de mettre également en comparaison, pour l'année 1959-1960, les chiffres fournis par nos relevés de profils hydriques et les valeurs calculées d'après TURC. Ces valeurs ont été rassemblées dans le tableau 24 pour la période qui nous intéresse (1^{er} juin 1959 - 1^{er} juin 1960).

TABLEAU 24

COMPARAISON DES VALEURS CALCULÉES ET MESURÉES : DRAINAGE, DÉFICIT, ÉVAPOTRANSPIRATION

Mois et décades	Valeurs calculées et mesurées		Drainage calculé mm		Déficits (mm)				Évapotranspiration (mm)		
	Sol Dior	Sol Dek	Sol Dior		Sol Dek		Calculée	Mesurée			
			Calculés	Mesurés	Calculés	Mesurés		Sol Dior	Sol Dek		
Mai 1959.....			105	105	121	121	3	2	—		
Juin.....			102	107	118	118	30	39	36		
Juillet 1.....			119	110	135	111	45	29	21		
— 2.....			134	102	150	127	37	16	40		
— 3.....			143	103	159	143	25	18	30		
Août 1.....			135	110	151	147	30	44	42		
— 2.....			151	120	167	167	26	20	30		
— 3.....			11	3	27	32	40	18	42		
Septembre 1.....	6	0	0	4	10	31	48	85	56		
— 2.....	5	0	0	4	5	5	48	50	18		
— 3.....			25	20	30	43	47	51	79		
Octobre 1.....			69	50	74	70	44	17	24		
— 2.....			108	60	113	100	39	44	35		
— 3.....			145	81	150	120	37	19	18		
Novembre.....			148	111	153	145	3	27	27		
Décembre 1959.....			151	125	156	148	3	11	3		
Janvier 1960.....			154	130	159	160	3	7	17		
Février.....			157	130	162	180	3	1	15		
Mars.....			160	131	165	183	3	2	2		
Avril.....			163	132	168	189	3	0	7		
Mai.....			166	128	171	198	3	0	8		

Le profil initial a été relevé le 7 avril 1959 ; le stock d'eau représenté à ce moment 75 mm en sol Dior et 155 mm en sol Dek. Ces chiffres n'ont vraisemblablement pas subi beaucoup de changement jusqu'au 19 juin, date choisie pour le début de nos observations. La première pluie est tombée le 5 juin, mais elle fut de 6 mm seulement.

Il faut attendre ensuite le 20 juin pour avoir une pluie de 20 mm. Le deuxième profil fut relevé le 26 juin, et, à partir de cette date, il y eut un relevé hebdomadaire jusqu'à la fin des pluies, le 24 septembre. Pour les périodes sans pluies l'évapotranspiration est donnée par la formule :

$$E = S_1 - S_2$$

S_2 représentant le stock d'eau à la fin de l'intervalle considéré,

S_1 le stock d'eau au début de cette période.

Quand il a plu entre deux relevés, la valeur de E devient :

$$E = P + S_1 - S_2$$

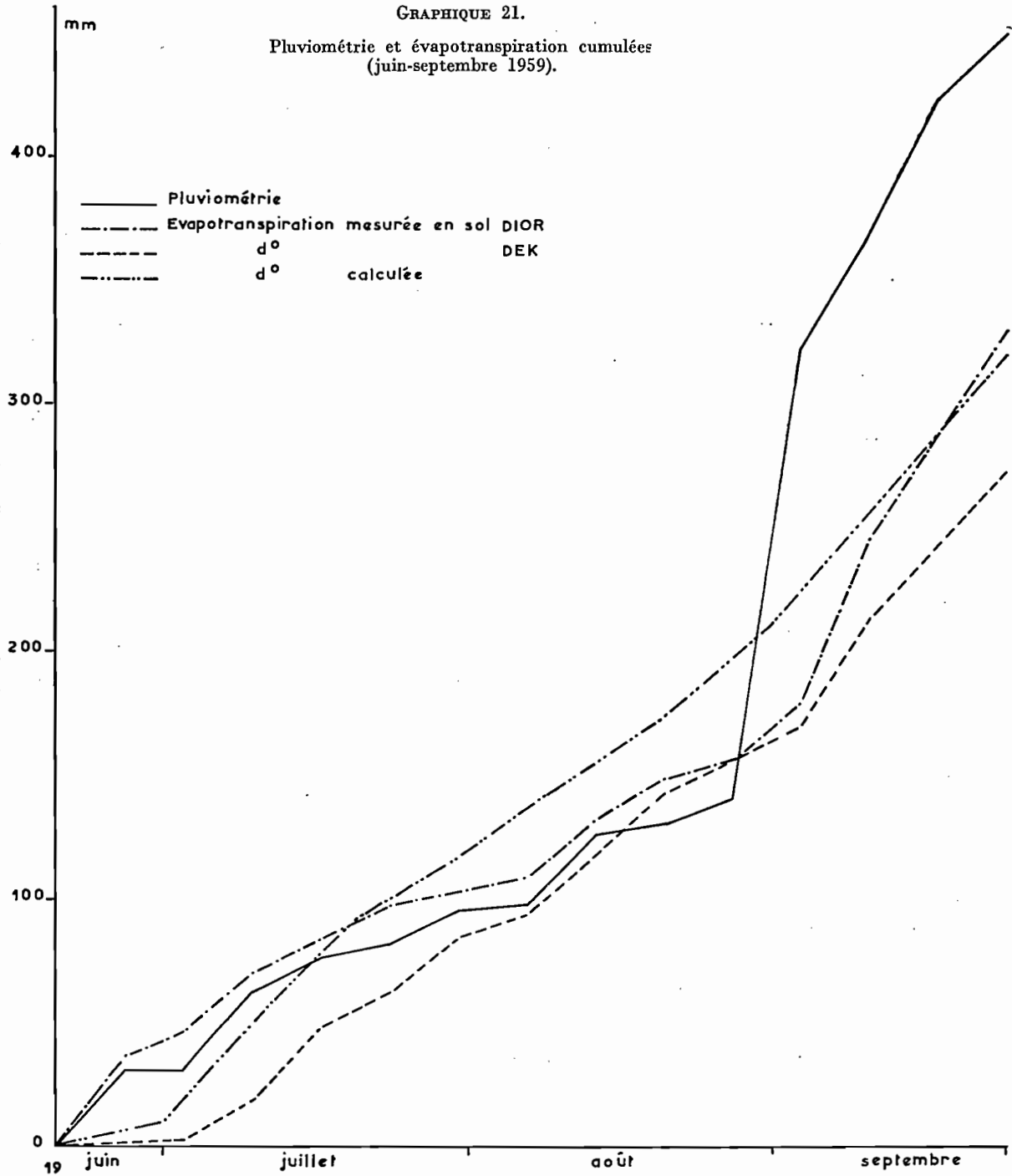
où P représente la pluviométrie dans l'intervalle considéré.

On peut suivre sur le graphique 21 les variations comparées pendant la période des pluies (1^{er} juin-24 septembre) : de l'évapotranspiration mesurée en sol Dior et en sol Dek, de l'évapotranspiration calculée par la formule de TURC et de la pluviométrie. Toutes ces valeurs ont été cumulées à partir du 19 juin.

Plusieurs constatations peuvent être faites, à la lecture de ce graphique.

Cette période peut se diviser en deux intervalles : le premier va du 1^{er} juin au 27 août ; il est caractérisé par une pluviométrie très faible (120 mm en soixante-neuf jours). Le second débute le 28 août avec les premières grandes pluies et dure jusqu'au 24 septembre, date de la fin des pluies.

Pendant la première période, l'évapotranspiration débute plus rapidement en sol Dior qu'en sol Dek, mais les deux courbes se rapprochent bientôt et encadrent étroitement la courbe de pluviométrie cumulée.



Au 27 août elles se trouvent confondues ; la valeur moyenne journalière de l'évapotranspiration pendant cette période de soixante-neuf jours est donc identique pour les deux sols à savoir : 1,8 mm par jour, valeur très peu supérieure à la moyenne journalière de la pluviométrie.

La courbe des valeurs calculées de l'évapotranspiration se situe nettement au-dessus des deux courbes de valeurs mesurées à partir de la deuxième décade de juillet. Le calcul se faisant à partir des seules données climatologiques, avec éventuellement l'adjonction d'un facteur spécial pour la végétation, ne tient pas compte de

l'influence du sol. La valeur moyenne de E ainsi calculée est de 2,7 mm jour soit sensiblement plus que les valeurs mesurées.

A partir du 27 août, la pluviométrie augmente brusquement ; l'évapotranspiration subit la même augmentation mais avec un certain retard, puisque le changement de pente dans les deux courbes ne s'observe qu'à partir du 3 septembre, et dans une moindre mesure. On observe également un net décalage entre la courbe du Dior et celle du Dek. Pour ce dernier la moyenne journalière de l'évapotranspiration observée entre le 3 et le 24 septembre est de 4,9 mm, alors que pour le Dior elle atteindrait 7,1 mm.

Quant à la courbe des valeurs calculées, le changement de pente est beaucoup moins net ; la moyenne journalière est de 4,5 mm. A la date du 24 septembre les valeurs de l'évapotranspiration, cumulées à partir du 19 juin sont les suivantes :

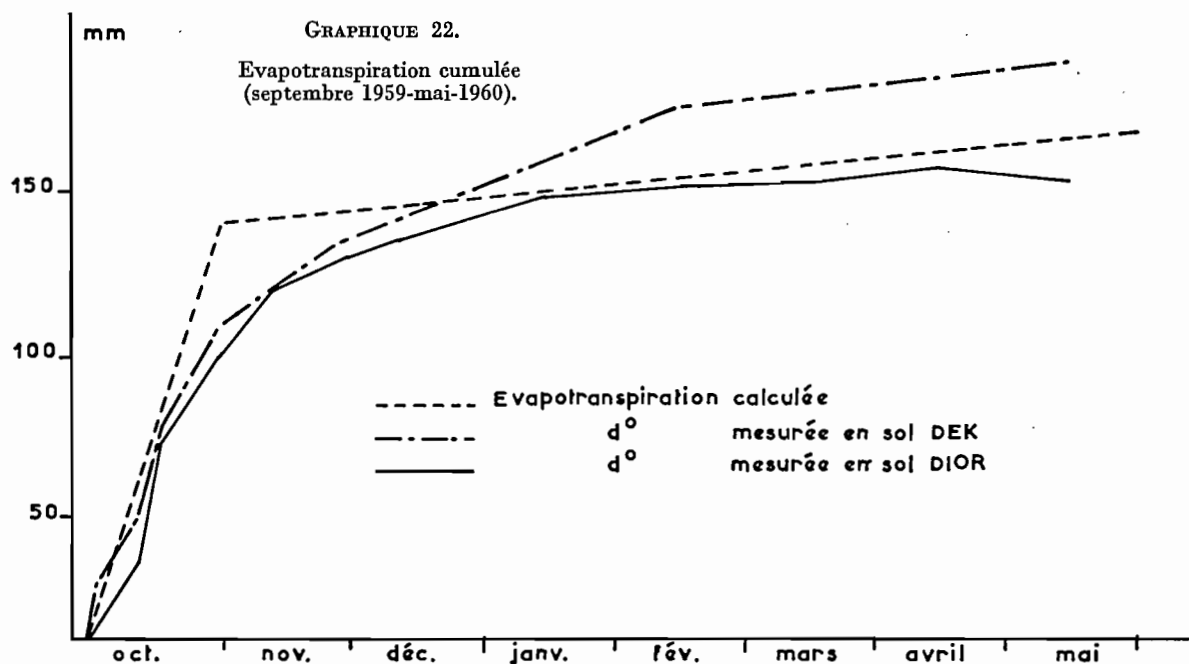
E T	en sol Dior (mesurée) :	328 mm
E T	en sol Dek (mesurée) :	272 mm
E T	calculée	: 319 mm

Les chiffres expérimentaux encadrent donc la valeur calculée.

Pendant l'intervalle considéré les moyennes journalières de l'E T mesurée en sol Dek et de l'E T calculée sont très voisines (4,9 et 4,5 mm) ; la moyenne du sol Dior est au contraire nettement plus élevée (7,1 mm). Or les mesures de pF ont montré que pendant cette période du 3 au 24 septembre, le sol Dior était susceptible de drainer, contrairement au Dek qui n'avait pas encore atteint sa capacité de rétention. Les valeurs trouvées pour l'évapotranspiration représenteraient donc en réalité la somme : évapotranspiration + drainage. La difficulté est de définir la part qui revient à chacun. Si nous supposons que l'évapotranspiration en sol Dior continue à être identique à celle du sol Dek, le chiffre trouvé pour le drainage est alors de 36 mm. Calculée par la méthode de TURC cette valeur varie de 6 à 12 mm, suivant la valeur adoptée pour le coefficient V ; enfin les mesures en cases lysimétriques s'étagent entre 0 et 41 mm pour le sol Dior, suivant l'activité de la végétation. Cette hypothèse est donc vraisemblable.

c) Evapotranspiration au cours de la saison sèche

A partir du 24 septembre les pluies s'arrêtent et le drainage cesse très rapidement pour le sol Dior. Désormais l'évapotranspiration se fera exclusivement aux dépens des réserves du sol : $E = S_1 - S_2$ (où $E = \Delta_2 - \Delta_1$, puisque $\Delta = C.R.S$).

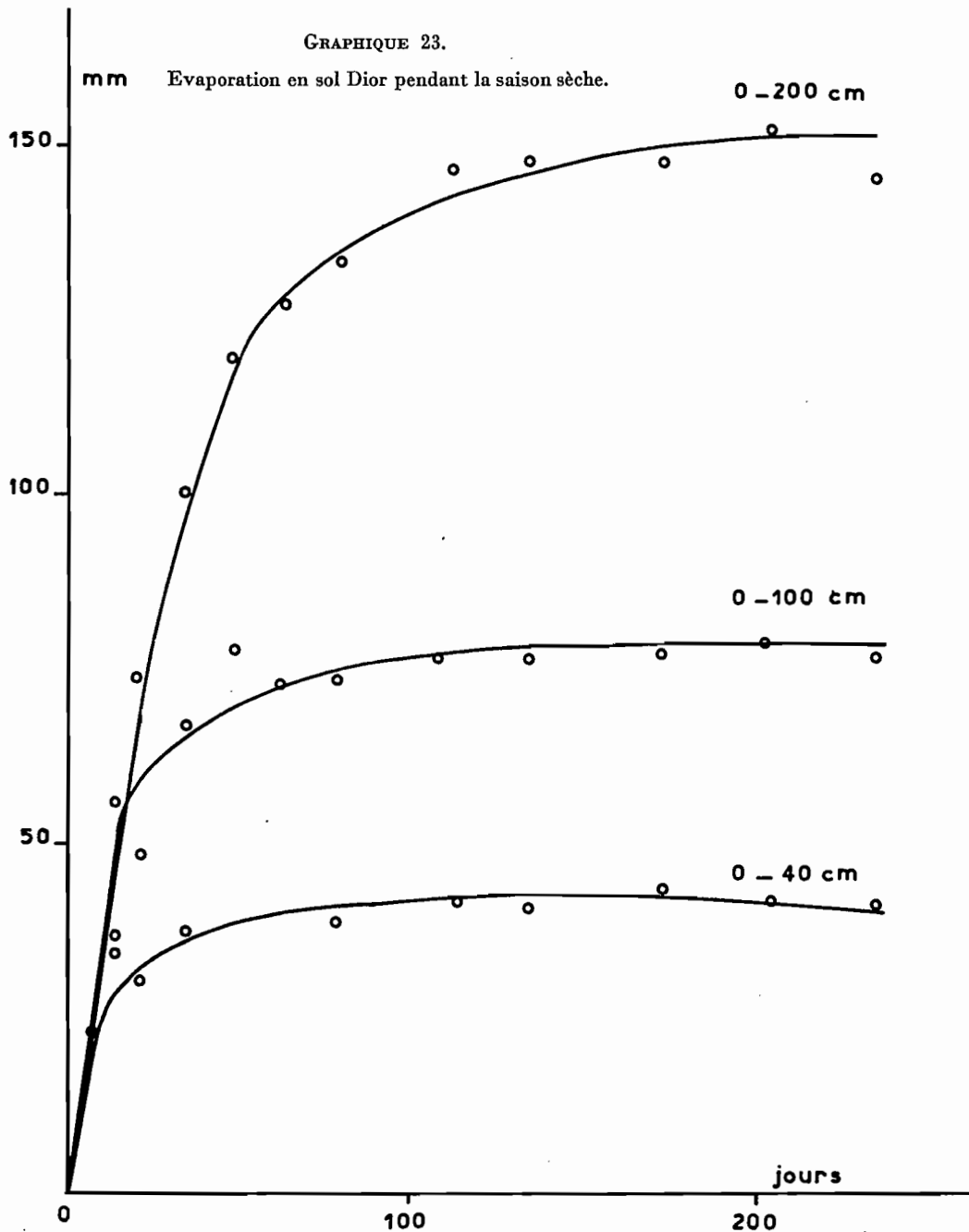


Le graphique 22 donne les courbes des évapotranspirations mesurées en sol Dior et en sol Dek, ainsi que de l'évapotranspiration calculée. Cette dernière se réduit pratiquement à deux droites, le changement de pente se produisant brutalement fin octobre avec l'arrêt de la végétation. Du 24 septembre au 31 octobre, la moyenne journalière calculée est de 3,9 mm ; début novembre la végétation ne jouant pratiquement plus aucun rôle, l'évapotranspiration est réduite à 3 mm par mois. Les valeurs mesurées suivent à peu près ces variations mais les courbes ont l'allure de fonctions logarithmiques. Ces courbes expérimentales ont pu être ajustées à des courbes d'équation :

$$\text{pour le sol Dek : } y = 78,9 \log x - 6,6 \quad \text{avec } r = 0,97 \text{ (T.H.S.)}$$

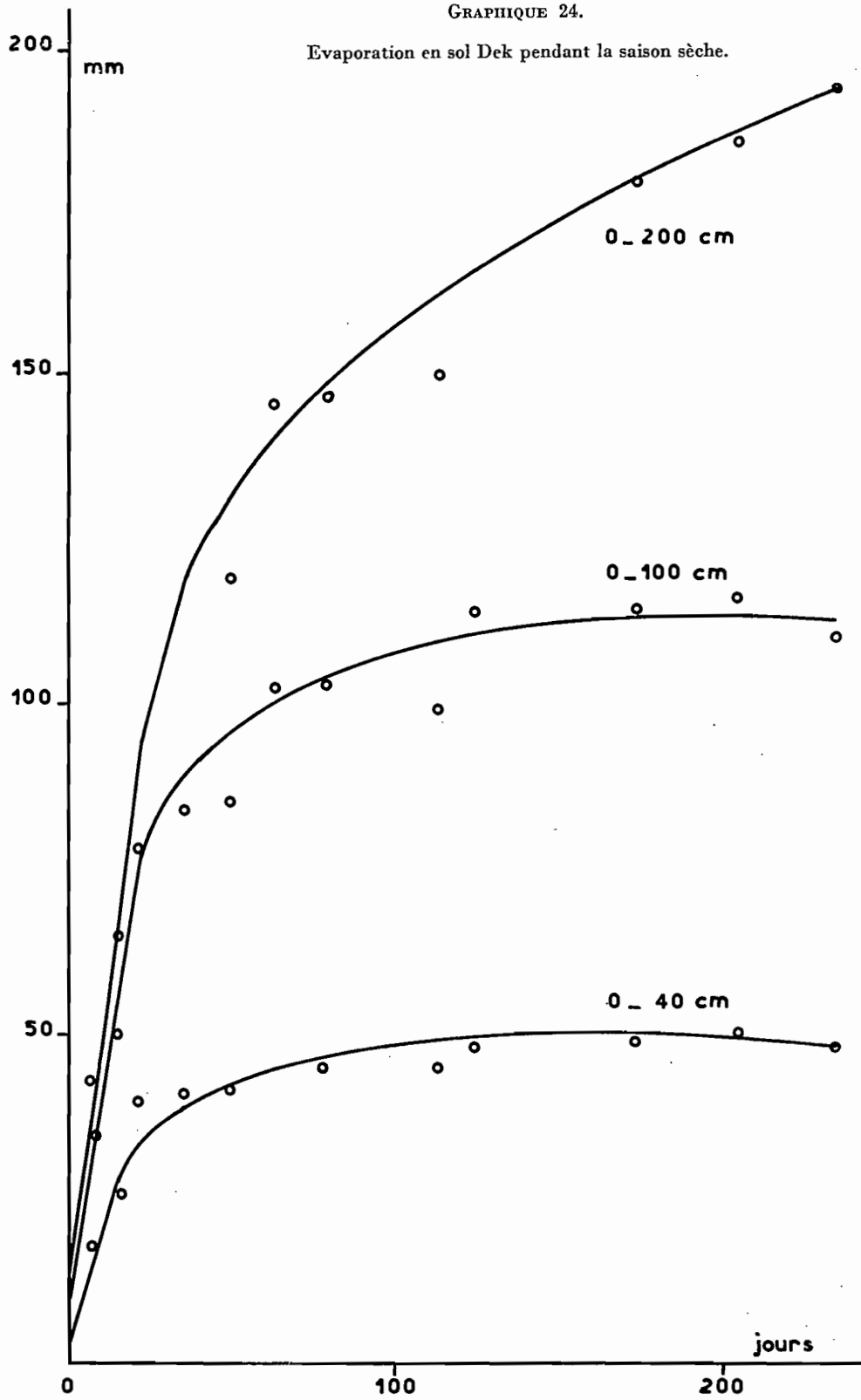
$$\text{pour le sol Dior : } y = 71,3 \log x - 15,7 \quad \text{avec } r = 0,94 \text{ (T.H.S.)}$$

où y représente l'évapotranspiration cumulée et x le temps, en jours, à partir de la fin des pluies (24 septembre) (graphiques 23 et 24).



GRAPHIQUE 24.

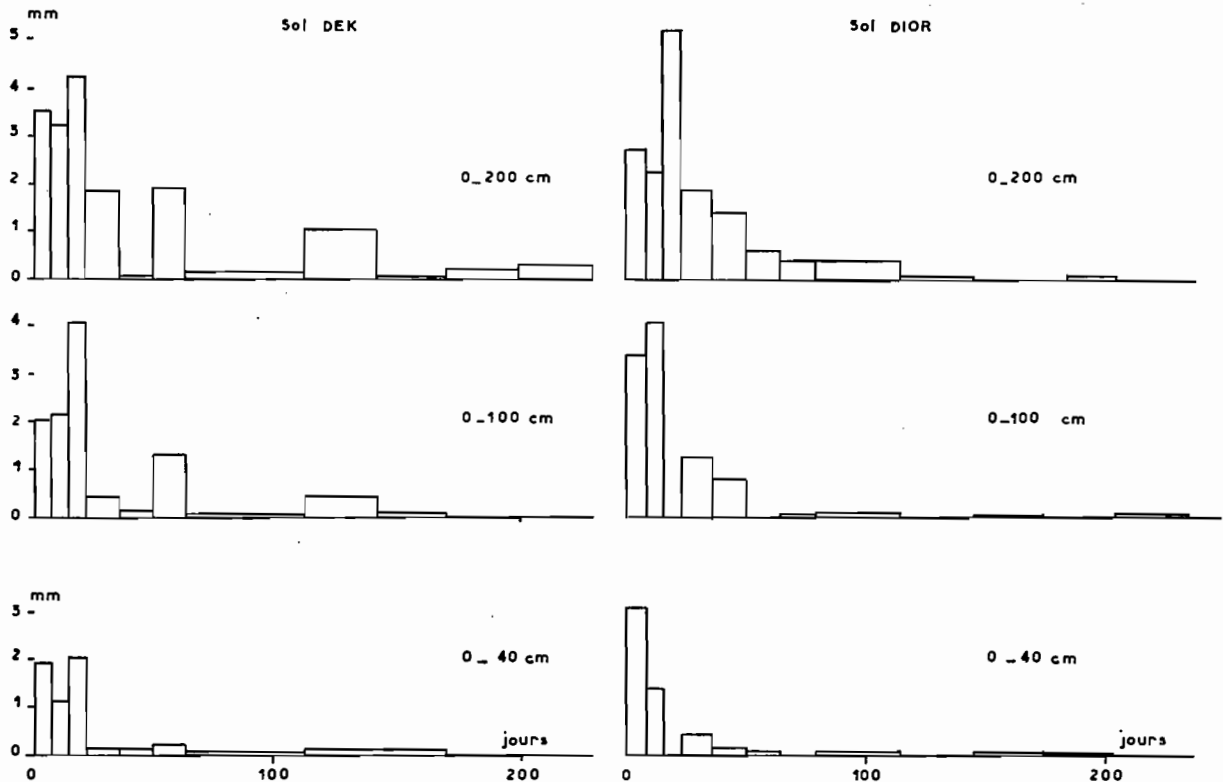
Evaporation en sol Dek pendant la saison sèche.



La diminution de l'évaporation est donc plus progressive que ne le laissait prévoir le calcul théorique. Le graphique 25 donne les valeurs de l'évaporation journalière ; le maximum est atteint dans la deuxième semaine d'octobre, soit trois semaines après la fin des pluies : 5,2 mm pour le sol Dior et 4,2 mm pour le sol Dek. Les réserves de la couche 0-40 s'épuisent en trois semaines ; ce sont ensuite les couches de plus en plus profondes qui alimentent le courant liquide ascensionnel. A partir du 1^{er} janvier, seules les couches situées en dessous de 1 m fournissent encore une quantité d'eau appréciable.

GRAPHIQUE 25.

Evaporation journalière pendant la saison sèche.



A compter de cette date le sol Dior n'évapore d'ailleurs plus que très faiblement ou même pas du tout ; il n'en est pas de même pour le sol Dek dont l'évaporation continue à être appréciable jusqu'en mai.

C'est pendant la saison sèche, et plus particulièrement de novembre à mai que les deux sols se différencient nettement l'un de l'autre. Jusqu'à la fin octobre, c'est-à-dire jusqu'à la fin de l'activité de la végétation, on peut considérer que, pour les deux sols, l'évapotranspiration a été à peu près identique et conforme à ce que le calcul laissait prévoir. L'évapotranspiration a sans doute été un peu plus active en sol Dior qui paraît céder plus facilement son eau que le Dek, mais la différence n'est pas considérable.

A partir de novembre, au contraire, la courbe d'évapotranspiration du sol Dek passe nettement au-dessus de celle du sol Dior (graphique 22).

Dès le mois de janvier l'évaporation en sol Dior tombe à des valeurs faibles ou nulles (0 à 2 mm par mois) et demeure conforme en cela au calcul théorique (3 mm par mois). En sol Dek au contraire, la valeur moyenne mensuelle de l'évaporation, de janvier à mai se situe aux alentours de 7 mm.

Comment peut s'expliquer cette différence de comportement ? Nous pensons que la cause doit en être cherchée dans l'inégalité de l'assèchement dans les deux sols.

Le relevé du 12 novembre nous montre que les déficits de rétention des deux sols ne sont pas très éloignés l'un de l'autre : 119 mm pour le Dek et 93 mm pour le Dior ; à ce moment il reste encore dans le Dek 195 mm d'eau (dont 97 disponibles pour la végétation) contre 74 mm seulement dans le Dior (dont 34 disponibles pour

les plantes). Ceci correspond en sol Dek à une humidité moyenne, dans la couche 0-200, de 6,1 %, soit un pF moyen de 3,3 et en sol Dior d'une humidité moyenne 2,4 %, soit un pF moyen de 3,5. Le 15 janvier les humidités moyennes sont respectivement de 4,4 et 1,6 %, les pF de 3,8 et 4,2.

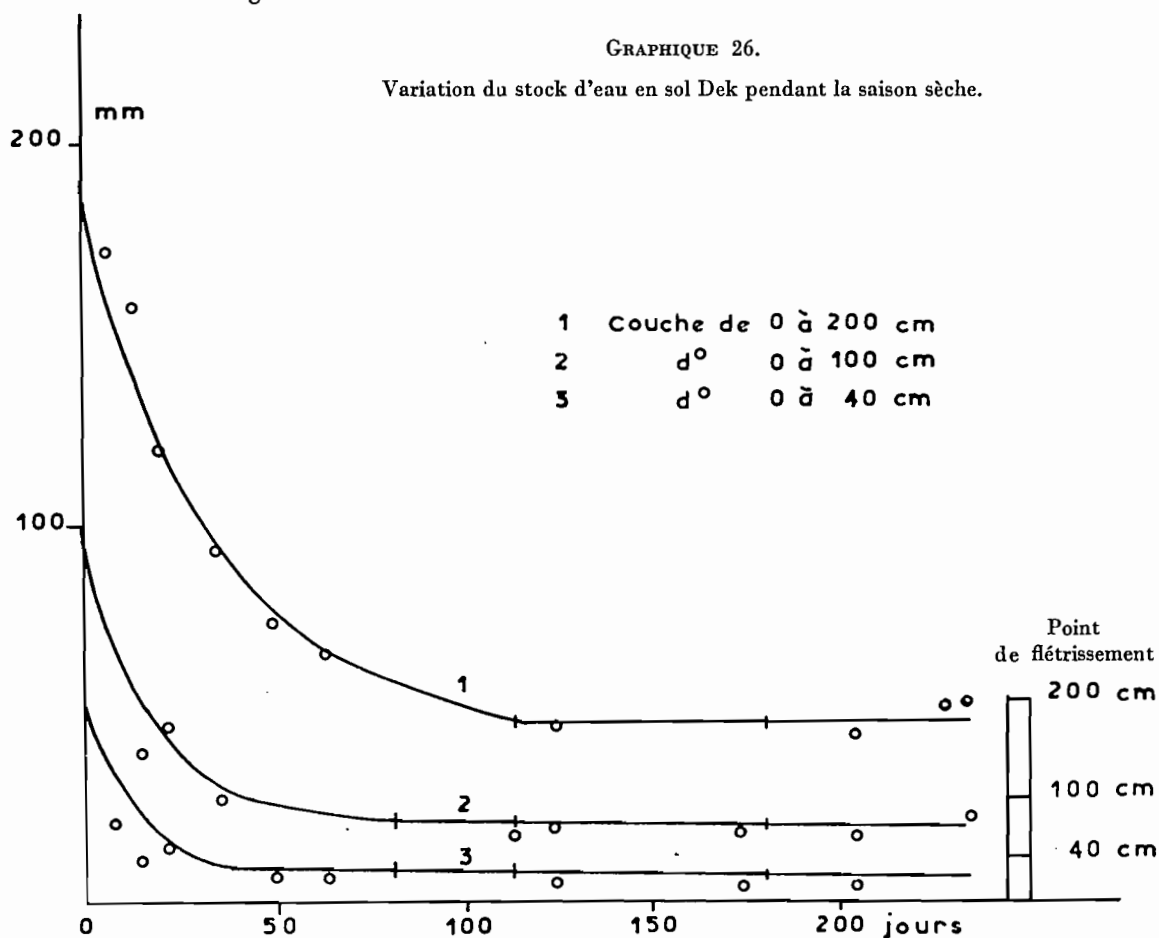
Par ailleurs la profondeur de la couche asséchée est nettement plus grande en sol Dior. Si l'on se reporte aux graphiques 17 et 18 on peut constater qu'au 12 novembre, cinquante jours après la fin des pluies, 40 cm de sol ont un pF $\geq 4,2$ en sol Dior, 35 cm en sol Dek. Le 15 janvier l'épaisseur de la couche devient : 1,20 m en sol Dior, 1,00 en sol Dek. A la même date une couche de 7 à 8 cm en sol Dior a atteint ou dépassé le pF 6,0 tandis qu'en sol Dek ce pF n'intéresse qu'une pellicule de quelques mm.

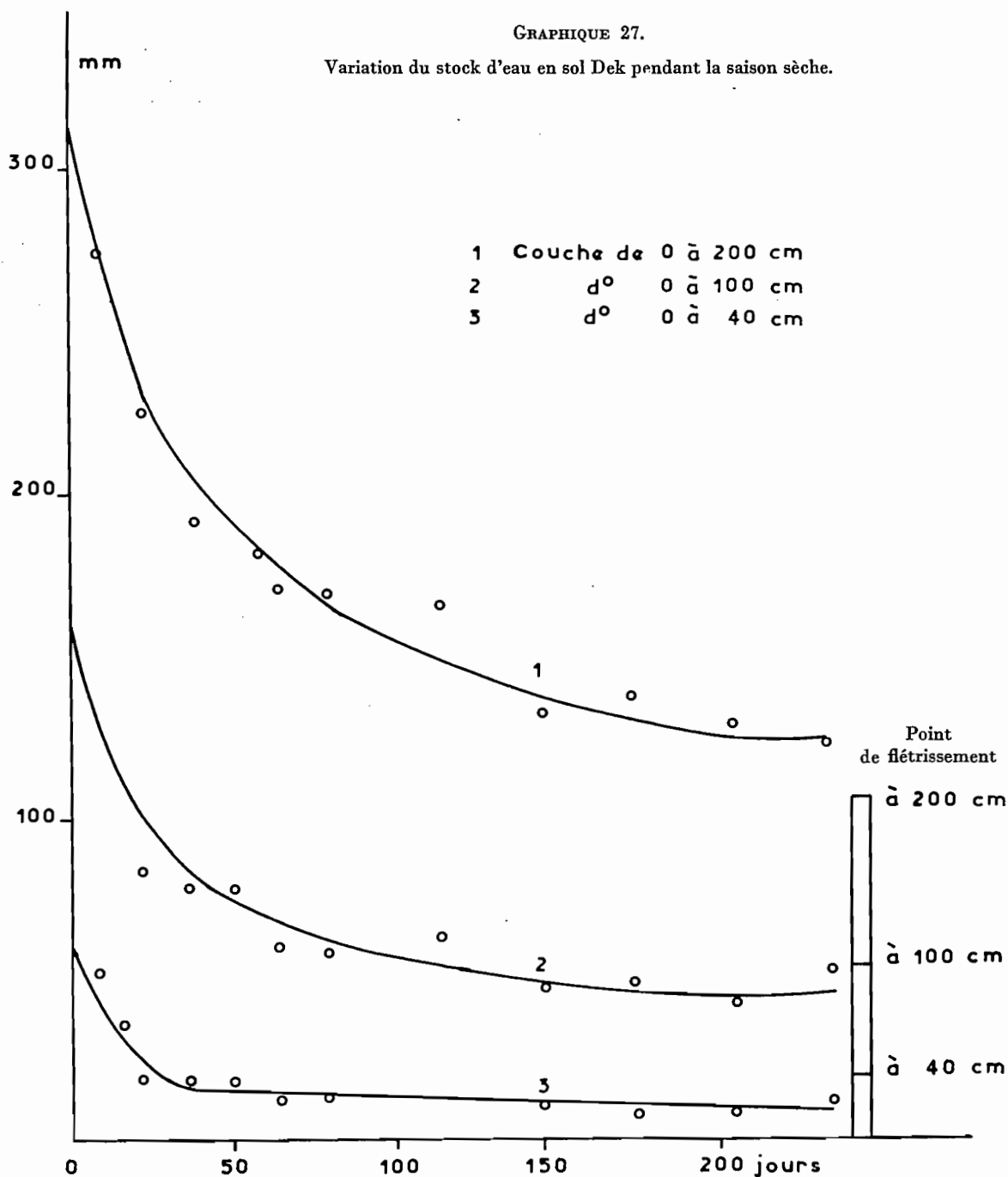
Malgré son épaisseur, la croûte superficielle asséchée ne suffit pas ici à stopper l'évaporation, ou tout au moins à la réduire à une valeur très faible. Celle-ci semble ne s'arrêter que lorsque les réserves hydriques du sol dans la couche de 0 à 2 m ont atteint un niveau correspondant au point de flétrissement.

A l'appui de cette hypothèse, l'examen des graphiques 26 et 27 montre que la variation des réserves d'eau dans les différentes couches est très rapide jusqu'au moment, où le stock d'eau, dans la couche considérée est équivalent à la valeur moyenne du point de flétrissement. Ce changement brusque apparaît avec un décalage dans le temps pour les couches 0-40, 0-100, 0-200 d'un même sol. Pour une même couche, il se produit plus tardivement en sol Dek qu'en sol Dior. Les courbes traduisant les variations des réserves d'eau sont de la forme : $y = K - \log x$ ($x =$ temps en jours) puisque la somme : stock d'eau + déficit = capacité de rétention = constante.

Le calcul théorique d'après TURC tablant sur une évaporation de 3 mm par mois paraît convenir pour le sol Dior ; il ne peut être accepté pour le Dek sans correction puisque pour la même période sans végétation l'évaporation varie entre 12 et 4 mm par mois (moyenne : 10 mm entre le 1^{er} novembre et le 1^{er} juin).

En ce qui concerne l'année 1959, le calcul convient pour le sol Dek en comptant une évaporation de 5 mm au lieu de 3 à partir de janvier, date à laquelle les évaporations mesurées et calculées, en sol Dek, exprimées en valeurs cumulées sont égales.





L'évapotranspiration totale de juin 1959 à juin 1960 a été pour le Dior de 499 mm, pour le Dek de 525 mm le chiffre calculé étant de 520 mm.

d) Evapotranspiration potentielle

Nous avons vu que l'évapotranspiration atteignait son maximum un peu après les premières grandes pluies, lorsque le sol était bien pourvu en eau. En 1959 la plus grande valeur journalière observée a été de 5 mm (deuxième semaine d'octobre). Mais la végétation avait été jusqu'à la fin du mois d'août très insuffisamment

approvisionnée en eau. On peut se demander la valeur qu'aurait atteinte l'évapotranspiration si la végétation avait été approvisionnée en eau à sa suffisance, ce qui est la définition même de l'évapotranspiration potentielle. De nombreuses formules ont été proposées par divers auteurs pour estimer cette grandeur en fonction des données climatologiques. Parmi celles-ci nous avons retenu la formule de BOUCHET [8] qui donne l'évapotranspiration potentielle en fonction de l'évaporation mesurée à l'évaporomètre PICHE :

$$E T P = \alpha E_a \lambda$$

où α est un coefficient dépendant de l'évaporomètre et de l'abri,

E_a est l'évaporation du PICHE,

λ une fonction de la température moyenne et de la température moyenne du point de rosée.

TABLEAU 25

VALEURS MENSUELLES DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (FORMULES DE BOUCHET ET DE TURC), DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE EN SOL NU ET EN SOL COUVERT

Mois	Formule de BOUCHET						Formule de TURC		Evapotr. calculée		Evapotr. mesurée	
	$\bar{\theta}_1$	$\bar{\theta}_r$	θ_2		E_p	ETP	1	ETP 1,51	Sol nu	Sol couv.	Sol Dior	Sol Dek
Juin 1959	29,2	19,0	24,1	4,16	123	189	150	225	30	30	39	36
Juillet	28,3	19,2	23,7	4,09	86	130	138	207	61	106	63	91
Août	27,5	23,9	25,7	4,44	73	120	123	185	79	94	82	114
Septembre	27,2	24,0	25,6	4,42	50	82	135	202	102	134	186	153
Octobre	28,8	23,4	26,1	4,52	98	164	141	212	14	105	80	77
Novembre	26,2	16,7	21,4	3,70	138	189	117	175	3	3	27	27
Décembre 1959	22,8	9,2	16,0	2,96	191	209	96	144	3	3	11	3
Janvier 1960	23,0	8,0	15,5	2,90	200	215	99	149	3	3	7	17
Février	26,5	13,0	19,7	3,45	181	231	120	180	3	3	1	15
Mars	26,0	12,4	19,2	3,37	219	273	135	202	3	3	2	2
Avril	27,8	16,2	22,0	3,82	200	258	134	201	3	3	0	7
Mai	29,3	18,5	23,9	4,13	208	318	150	225	3	3	0	8

$\bar{\theta}_1$ = Température moyenne mensuelle en degrés Celsius.

$\bar{\theta}_r$ = Température moyenne mensuelle du point de rosée en degrés Celsius.

$$\theta_2 = \frac{\theta_1 + \theta_r}{2}$$

= Paramètre fonction de θ_2 .

E_p = Pouvoir évaporant de l'air, en mm (PICHE).

ETP = Evapotranspiration potentielle, en mm.

ET = Evapotranspiration, en mm.

Le tableau 25 donne les résultats de l'évapotranspiration calculée par cette méthode pour l'année 1959. On constate que les valeurs trouvées en septembre et octobre sont inférieures aux valeurs trouvées pour l'évapotranspiration réelle. Cette formule ne peut donc convenir pour caractériser l'évapotranspiration potentielle sous ce climat.

L'auteur souligne d'ailleurs la limite de cette formule et fait toute réserve quant à son utilisation dans les zones arides.

La formule de TURC permet l'évaluation de l'évaporation potentielle d'un sol nu. Celle-ci est donnée par la valeur du paramètre l (valeur décadaire).

$$l = \frac{(t + 2) \sqrt{I}}{15}$$

où t : température moyenne de l'air sous abri en degrés centigrades,

I : radiation globale en calories (cm²/jour).

Les variations de l rendent également bien compte de l'évaporation au cours du temps d'une surface d'eau

libre, à condition de lui affecter un coefficient variable de 1 à 2, suivant le lieu et l'époque. Il est possible également d'avoir une estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des valeurs de 1.

En prenant pour V , facteur de végétation, une valeur élevée de 80 correspondant à une récolte de 135 quintaux de matière sèche (maximum observé à Bambey au cours des six dernières années : 120 q), il est possible de comparer les valeurs trouvées par le calcul pour l'évapotranspiration en sol nu et en sol cultivé.

Le rapport entre les deux varie dans d'assez larges limites suivant la pluviométrie qu'on s'est fixée, de 1 (forte pluviométrie) à 5 (pluviométrie nulle). Il est donc difficile de se baser sur ces indications.

Si nous nous reportons aux observations faites en 1959, nous constatons que le rapport entre les deux grandeurs varie entre 1 et 2 pendant la période qui va du 27 août à la fin septembre où le sol est saturé en eau, la moyenne pour la période de végétation étant de 1,75.

D'autre part, en calculant, avec $V = 80$, les valeurs décadaires de l'évapotranspiration pour différentes pluviométries, on trouve que ces valeurs varient entre 1,1 et 1,3 l.

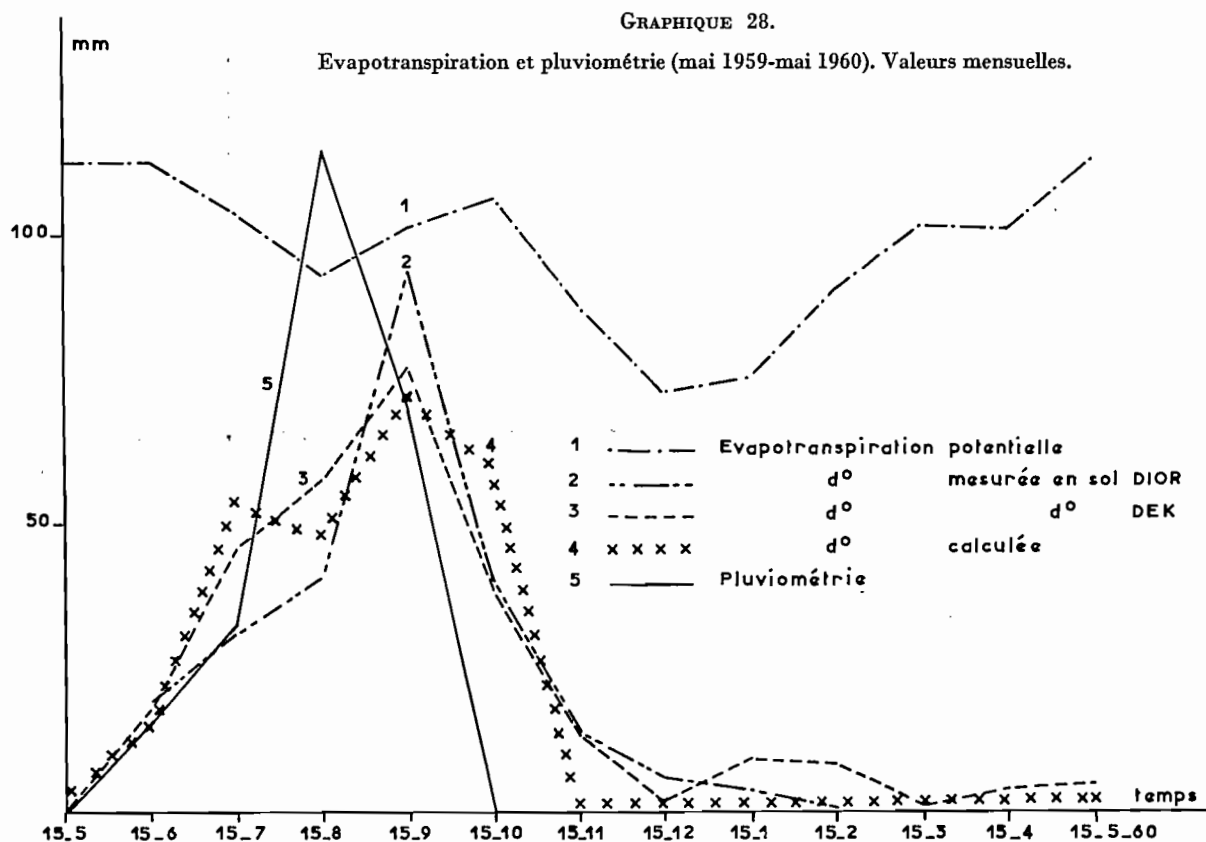
Faute de meilleure indication nous prendrons donc la valeur 1,5 l pour estimer l'évapotranspiration potentielle. Celle-ci sera prochainement définie expérimentalement.

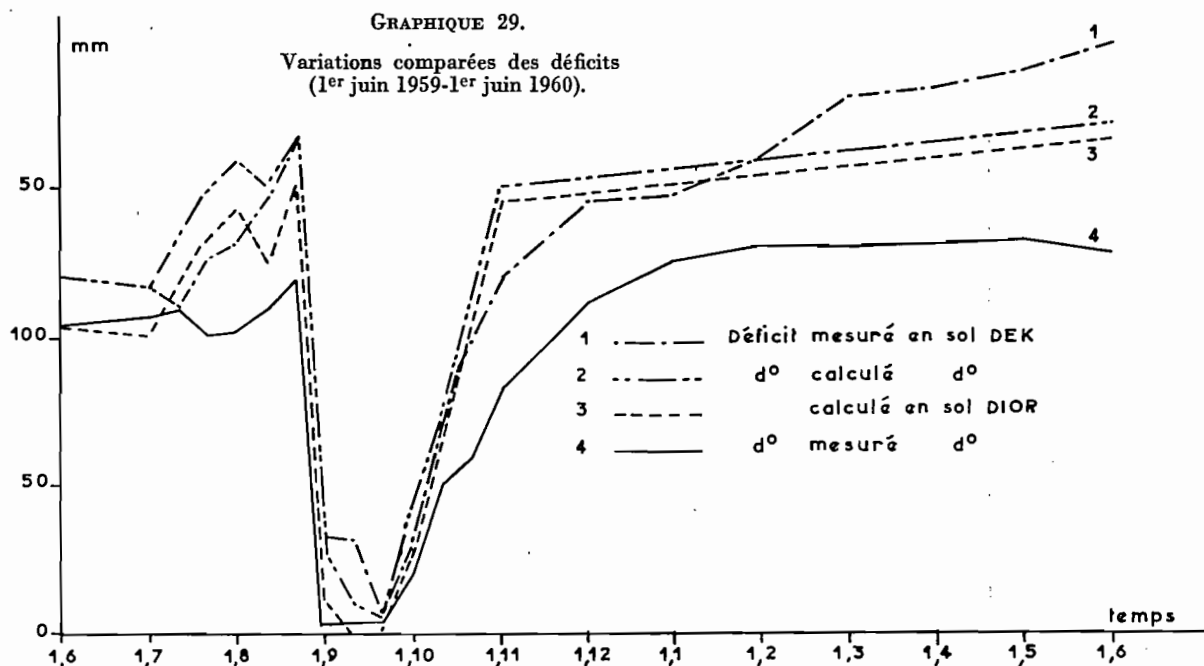
Les chiffres trouvés par cette méthode figurent dans le tableau 25. On constate que pendant la période sèche (décembre à mai) les chiffres sont inférieurs à ceux obtenus par la méthode de BOUCHET. Pendant l'hivernage, au contraire, ils sont notablement plus élevés.

L'évapotranspiration potentielle au cours de la saison humide serait donc de 6 à 7 mm par jour et atteindrait 7,5 mm en mai. Le minimum se situe en décembre avec 4,8 mm.

D'après les chiffres fournis par les études en cases lysimétriques, de 1954 à 1960, le maximum observé pour l'évapotranspiration a été de 5,5 mm au cours de l'hivernage.

Le graphique 28 montre les variations comparées au cours de l'année de la pluviométrie, de l'évapotranspiration potentielle, des évapotranspirations réelles, calculées et mesurées en sols Dior et Dek. Pour le sol Dior, le graphique présente pour le mois de septembre les valeurs ajoutées de l'évapotranspiration et du drainage, ce dernier ne pouvant, par notre méthode, être évalué avec certitude.





e) Les déficits

Le déficit se définit comme la différence entre la capacité de rétention et l'humidité du sol. Les déficits ont été calculés horizon par horizon pour chaque profil hydrique.

Le graphique 29 montre les variations au cours de l'année, des déficits mesurés en sols Dior et Dek pour la couche 0-2 m et du déficit calculé par la méthode de TURC.

Les déficits initiaux sont de 121 mm pour le sol Dek, 105 mm pour le sol Dior. Jusqu'à la fin août, ils se maintiennent ou ont tendance à augmenter légèrement en sol Dior.

Après les grandes pluies le déficit calculé devient nul en sol Dior. A ce moment la mesure du déficit au champ est assez délicate. Le profil de 0 à 2 m ne se trouve à aucun moment idéalement placé à la capacité de rétention : certains horizons ont dépassé légèrement cette valeur, d'autres se trouvent légèrement en-dessous. Si l'on ne compte pas de valeurs négatives pour le déficit de certains horizons, il sera donc exceptionnel de trouver un déficit cumulé à 2 m égal à 0. A cela s'ajoute par ailleurs l'imprécision sur la mesure de la capacité de rétention.

Ceci explique que nous trouvons le 24 septembre pour le Dior un déficit de 16 mm, alors que le stock d'eau 194 mm est supérieur à la capacité de rétention (176 mm). Nous avons estimé que cet excès d'eau, à la fin des pluies, n'avait pas le temps d'être drainé et était repris directement par l'évapotranspiration, très intense à cette époque. C'est pourquoi nous avons préféré calculer l'évapotranspiration par la différence entre les stocks d'eau et non par celle des déficits. Les deux méthodes aboutissent exactement au même résultat quand les horizons du profil sont au-dessous de la capacité de rétention ; elles donnent des résultats un peu différents quand on se trouve au voisinage de la saturation.

Ceci explique également que les différences entre les déficits calculés et mesurés pour les deux sols soient plus importantes que les différences entre évapotranspirations cumulées, à la fin de la saison sèche.

A ce moment en effet les différentes valeurs sont les suivantes .

	Mesuré		Calculé	
	Sol Dior	Sol Dek	Sol Dior	Sol Dek
Evapotranspiration cumulée	146	183	161	161
Déficit.....	128	198	166	171

En ce qui concerne le sol Dek la saturation n'a jamais été atteinte, ce qui se traduit par une valeur de déficit plus élevée que celle de l'évapotranspiration. Pour le Dior au contraire le phénomène est inverse puisque une partie de l'évapotranspiration s'est faite aux dépens de l'eau excédentaire du sol.

On voit que la différence entre les déficits (70 mm) est nettement plus forte que la différence entre les chiffres d'évapotranspiration cumulée (5 mm). Mais les valeurs calculées restent toujours comprises entre les valeurs mesurées.

Le déficit en fin de saison sèche est susceptible d'assez larges variations avec les années. Nous ne disposons malheureusement que d'une année de mesures. Mais nous pouvons avoir une idée de ces variations d'après les valeurs calculées par la méthode de TURC ; ces calculs se sont montrés concordés assez exactement avec les résultats du drainage en cases lysimétriques. Les chiffres extrêmes sont 105 et 160.

Des relevés hydriques effectués chaque année en début et en fin de saison des pluies permettront de préciser ces données.

6) ALIMENTATION EN EAU DE LA VÉGÉTATION

a) Eau disponible pour les plantes

L'alimentation en eau d'une plante dépend non seulement des réserves en eau du sol disponibles pour la plante mais aussi de la mobilité de ces réserves ou de la facilité avec laquelle le sol les cède à la plante. Il est possible de schématiser cette question en distinguant deux niveaux dans les réserves du sol :

a) Un niveau au-dessus duquel le facteur eau ne limite absolument pas la croissance de la plante, celle-ci n'étant pas affectée, jusqu'à ce niveau, par les variations de l'humidité (ou de la tension capillaire).

b) Un niveau correspondant au point de flétrissement permanent, au-dessous duquel la plante ne peut s'alimenter en eau et meurt.

Entre ces deux niveaux les réserves en eau du sol deviennent de plus en plus difficilement accessibles à la plante, au fur et à mesure que le sol s'assèche ; la croissance de la plante est alors largement influencée par une augmentation de la tension capillaire.

Le niveau supérieur est encore très mal aisément défini. Il ne peut l'être qu'en fonction d'études physiologiques intéressantes telle ou telle plante. C'est ainsi que OCHS et WORMER (cités par P. BILLAZ) [9] travaillant sur des sols du Dahomey ont trouvé que pour l'arachide il se situait à pF 2,8.

Dans les meilleurs cas, en sol Dek, cela correspondrait, entre ce niveau et la capacité de rétention (pF 2,6) à 2,5 points d'humidité, soit un stock d'eau sur 1 m de sol de : 40 mm (graphique 4, courbe B 15). Ce stock n'est pas considérable et peut être épuisé par la plante en six à sept jours, si aucune pluie ne vient le renouveler.

Toutefois il faut tenir compte du fait qu'après une pluie ou un apport d'eau, le profil hydrique met plusieurs jours à se stabiliser à la capacité de rétention, ainsi que nous l'avons vu précédemment.

Avant que le drainage ne se produise au-dessous de la frange radiale, la plante dispose de trois à quatre jours pour utiliser cette eau excédentaire. La réserve d'eau définie se trouve ainsi augmentée dans de notables proportions.

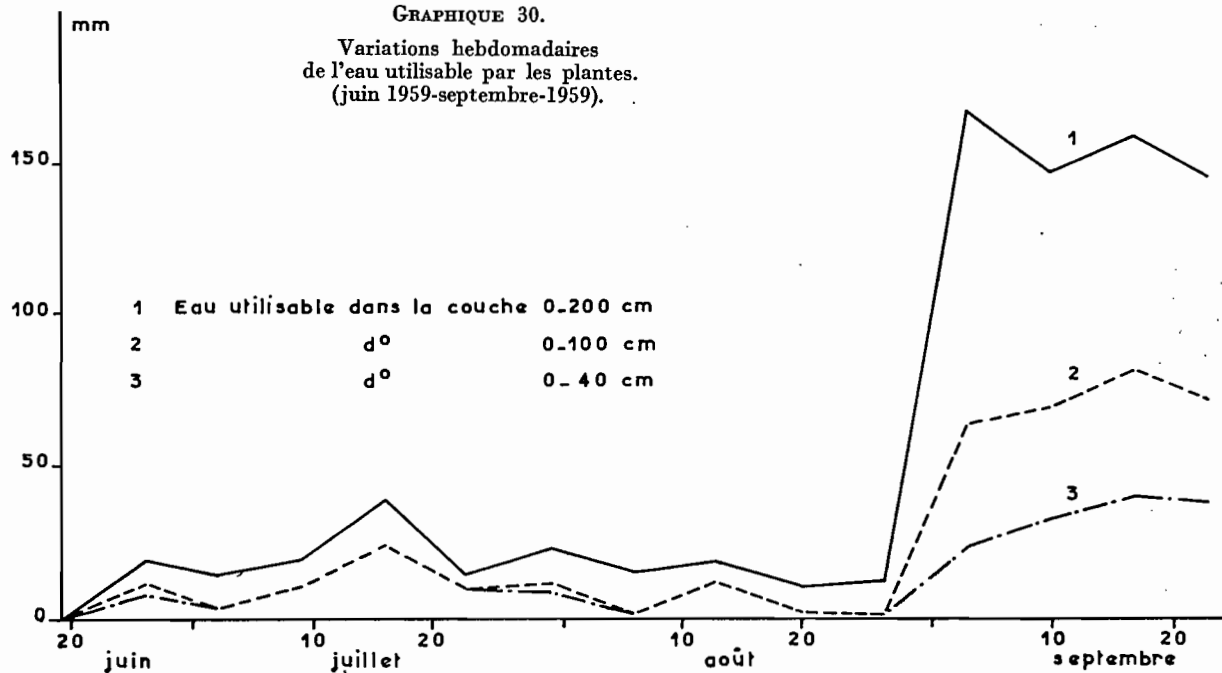
Il est tentant de faire un rapprochement entre ce niveau et l'humidité de rupture du lien capillaire définie par RODE [10]. Les données nous manquent actuellement pour confirmer l'identité des deux notions.

En ce qui concerne le point de flétrissement permanent il est classiquement admis que pour tous les sols et toutes les plantes il correspond au pF 4,2. Si cette loi se trouve vérifiée dans une large mesure pour les pays tempérés (au moins approximativement) il semble que, pour les pays tropicaux à saison sèche marquée, un certain nombre de plantes puissent utiliser les réserves d'eau du sol jusqu'à un pF plus élevé. Ceci a été montré en particulier par BILLAZ [9] pour l'arachide qui arrive à s'alimenter dans un sol Dior jusqu'à pF 5,5. Ceci est probablement le cas des mils, sorghos, doliques, niébé et des principales Graminées et Légumineuses constituant la friche naturelle après une période de culture dans notre région.

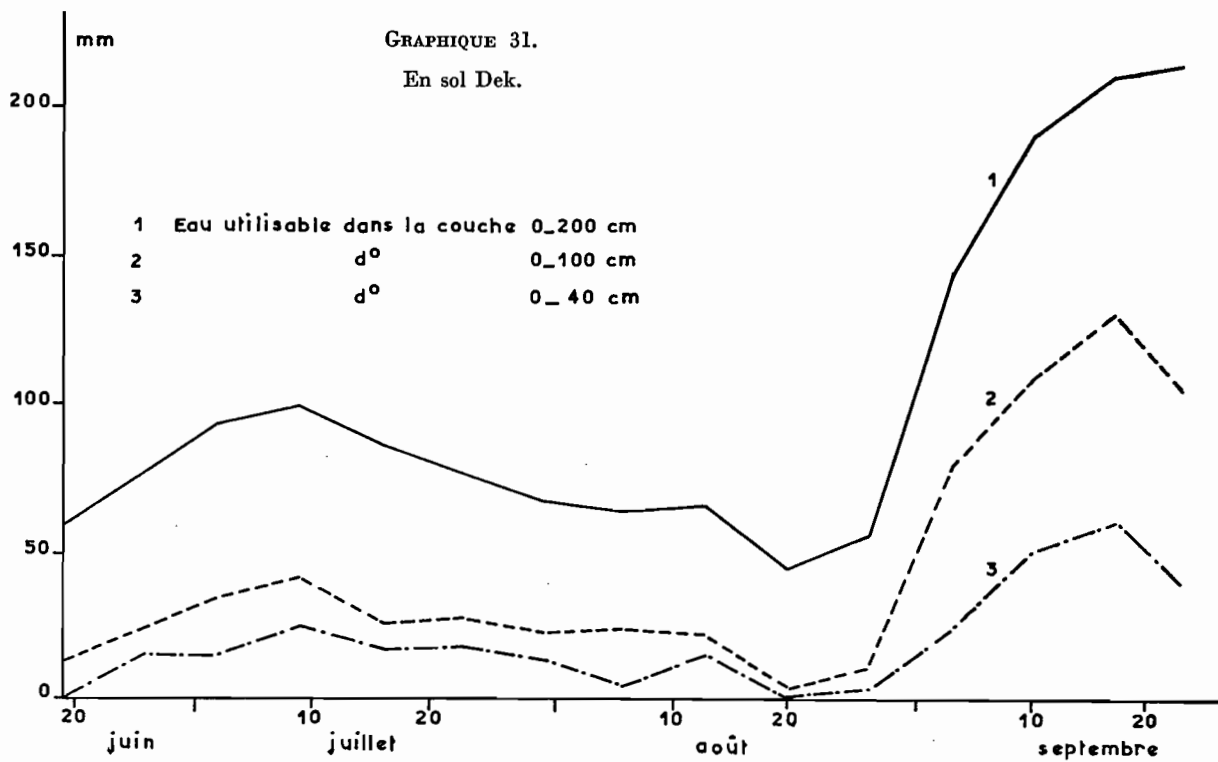
Cependant nous manquons de chiffres à ce sujet.

Si nous en possédons ils concernent généralement la plantule et non la plante adulte, ce qui peut être assez différent. Par ailleurs nos connaissances du développement racinaire de ces différentes plantes ne sont pas

GRAPHIQUE 30.
Variations hebdomadaires
de l'eau utilisable par les plantes.
(juin 1959-septembre-1959).



GRAPHIQUE 31.
En sol Dek.



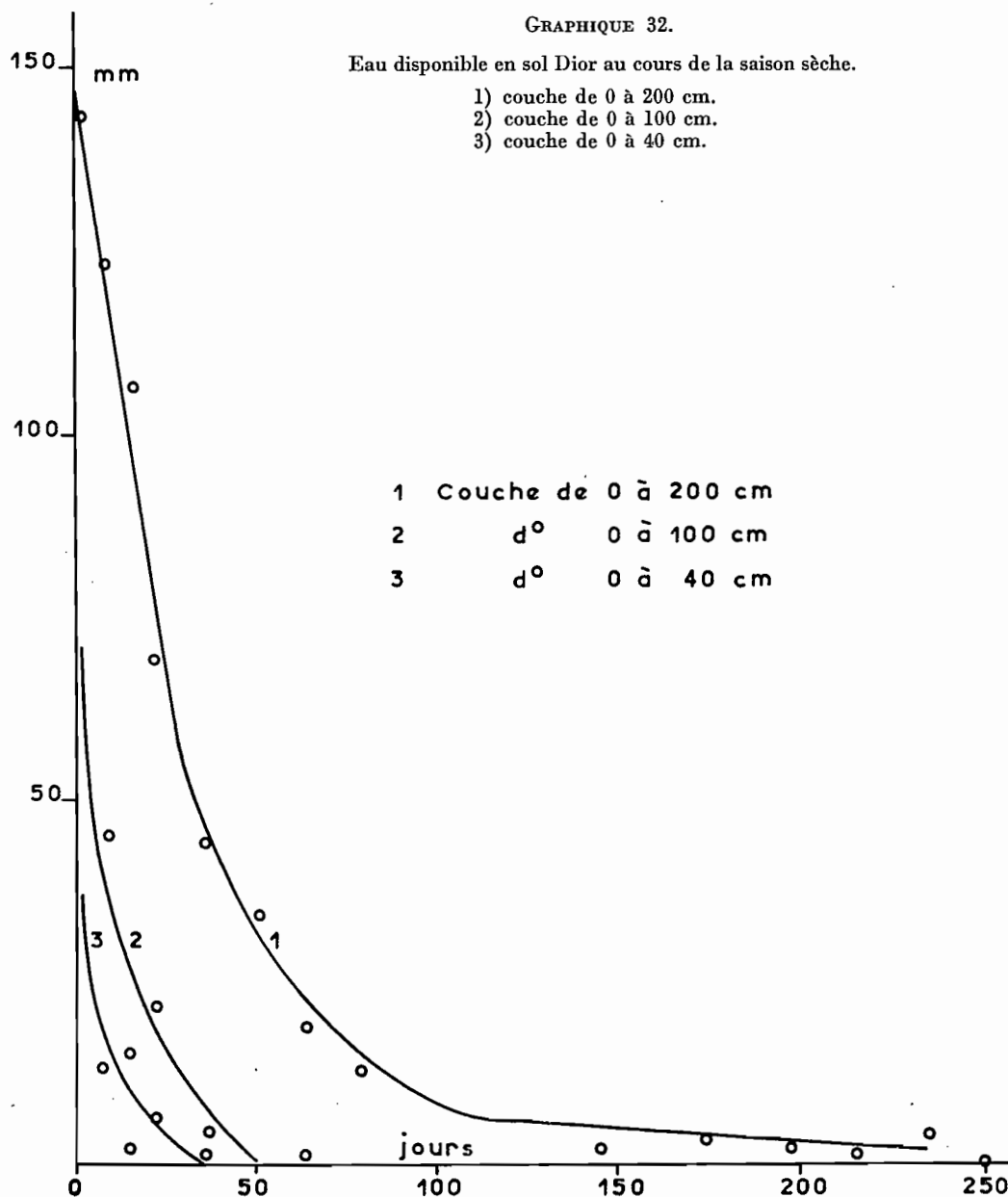
encore très fournies ; nous ne pouvons savoir avec certitude jusqu'à quelle profondeur peuvent descendre les racines en période sèche et quels sont les horizons du sol qui sont exploités par la plante.

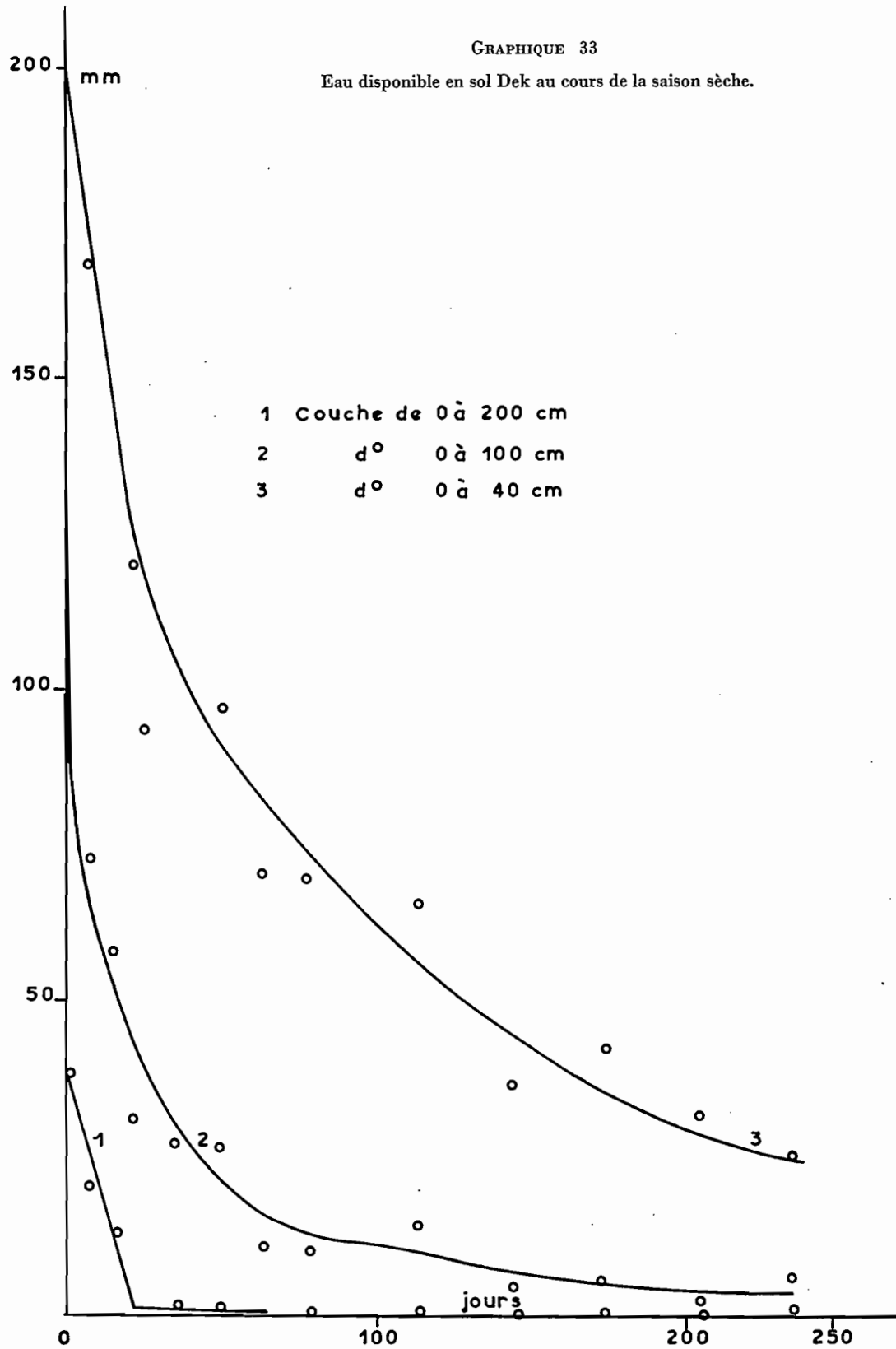
Il faut noter d'ailleurs que l'augmentation du stock d'eau disponible pour les plantes due à un abaissement du point de flétrissement ne saurait être considérable dans les sols étudiés.

D'après l'allure des courbes humidité pF (graphiques 2 et 3) les gains d'humidité sont d'autant plus faibles que les pF augmentent.

En outre l'incurvation des courbes étant de plus en plus marquée quand la capacité de rétention diminue les gains seront très médiocres pour les sols à faible capacité de rétention.

Si l'on retient le pF 5,5 par exemple à la place du pF 4,2 comme point de flétrissement permanent, le supplément d'eau pour un sol Dek moyen sur une hauteur de 1 m serait de 28 mm ; pour le sol Dior il ne serait plus que de 15 mm. Encore le pF choisi semble-t-il représenter une limite extrême.





Enfin, en ce qui concerne la mobilité des réserves du sol entre les deux niveaux considérés et l'influence de l'augmentation des tensions capillaires sur la croissance de la plante, il faut reconnaître que nous n'avons aucune donnée précise. Tout au plus avons-nous pu entrevoir que la mobilité des réserves était vraisemblablement plus grande en sol Dior, ce qui pourrait expliquer les valeurs d'évapotranspiration plus élevées observées pendant certaines périodes de la saison des pluies. On a pu d'ailleurs observer, lors d'années à pluviométrie irrégulière, une meilleure résistance à la sécheresse des plantes cultivées en sol Dior. Ceci pourrait tenir à la nature plus sableuse du sol Dior.

Notre propos n'étant pas ici d'étudier les besoins en eau de telle ou telle culture, nous nous en sommes tenus aux données classiques d'une portée plus générale et avons suivi les variations de l'eau disponible entre la capacité de rétention et le point de flétrissement à pF 4,2.

Les graphiques 30 et 31 montrent les variations de l'eau utilisable par les plantes dans les couches 0-40, 0-100 et 0-200 cm au cours de la saison des pluies. On constate que, pendant les trois premiers mois de la saison des pluies, les plantes n'ont jamais disposé de plus de 25 mm d'eau jusqu'à 1 m de profondeur en sol Dior, la valeur moyenne se situant aux alentours de 10 mm. Le 20 août, peu de temps avant les premières grandes pluies, l'eau disponible à cette profondeur devient pratiquement nulle, mais à cette date la plupart des plantes ont pu développer leurs racines au delà de 1 m. Il n'est pas étonnant dans ces conditions que la végétation ait été fortement ralentie.

En ce qui concerne le sol Dek, les réserves d'eau utilisables à 1 m de profondeur se trouvent légèrement supérieures à celles du sol Dior pendant les trois premiers mois de la saison des pluies. Le 20 août les plantes ne disposent jusqu'à 1 m de profondeur que de 4 mm.

A partir du 3 septembre les plantes sont largement alimentées en eau jusqu'au 24 septembre, date de la fin des pluies.

Les graphiques 32 et 33 nous montrent les variations du stock d'eau dans les deux sols en fonction du temps à partir de cette date. On voit que dès le cinquantième jour les plantes ne disposent plus d'eau jusqu'à 1 m de profondeur en sol Dior et que, même jusqu'à 2 m de profondeur, le stock diminue très rapidement : il se trouve réduit à 7 ou 8 mm à partir du centième jour (début janvier).

Le sol Dek, par contre, se trouve sensiblement mieux pourvu. Le stock d'eau disponible jusqu'à 1 m de profondeur ne devient jamais nul ; il demeure encore quelques mm disponibles fin mai ; quant à la réserve à 2 m de profondeur elle baisse assez régulièrement mais demeure de 25 mm à la fin de la saison sèche.

Ceci explique que les plantes se développent généralement mieux en sol Dek qu'en sol Dior au cours de la saison sèche ; ceci est le cas des doliques, ricins, niébé. On observe assez souvent des repousses de sorghos ou de mils en sol Dek, beaucoup plus rarement en sol Dior.

Les graphiques 34 et 35 traduisent d'une autre manière les mêmes faits. Ils indiquent à quelle profondeur doivent descendre les racines pour trouver 10, 25, 50 ou 100 mm d'eau dans les deux sols. Au centième jour, par exemple, soit début janvier, les plantes auront à leur disposition 10 mm d'eau à 1 m de profondeur, 25 mm à 1,35 m, 50 mm à 1,80 m en sol Dek. En sol Dior, à la même époque, il leur faudra dépasser la profondeur de 2 m pour trouver 10 mm d'eau.

b) Influence de la végétation sur le dessèchement du sol

Jusqu'à présent l'évolution des profils hydriques n'a été suivie que sous friche naturelle. Nous avons été amenés à la demande de M. TARDIEU, au cours de la même année, à suivre cette évolution sous culture de doliques. Il s'agissait de tester le rôle de la densité de semis sur le rendement et, à cette occasion, de déterminer quelle pouvait être cette influence sur le dessèchement du sol. La dolique présente cette particularité d'être semée en août pour être récoltée en février. Plus de la moitié du cycle cultural de cette plante se situe donc en pleine saison sèche.

L'expérimentation fut réalisée en sol Dek. Plusieurs traitements furent comparés : terre nue, jachère, dolique, à 40.000 pieds/ha, doliques à 80.000 pieds/ha, doliques à 120.000 pieds/ha.

Des profils hydriques furent relevés aux dates suivantes : 26 octobre, 30 décembre, 16 février, avec deux répétitions par traitement.

Le tableau 34 donne les déficits cumulés à 1 m pour ces différents traitements ainsi que les déficits des profils hydriques relevés sous friche naturelle et précédemment étudiés.

Tous ces chiffres ont été ramenés à un profil moyen pour pouvoir être comparés entre eux. On peut constater qu'au 16 février, les valeurs du déficit sont très voisines quel que soit le traitement.

GRAPHIQUE 34.
Quantités d'eau disponibles pour la plante en fonction
de la profondeur. Sol Dior. Saison sèche.

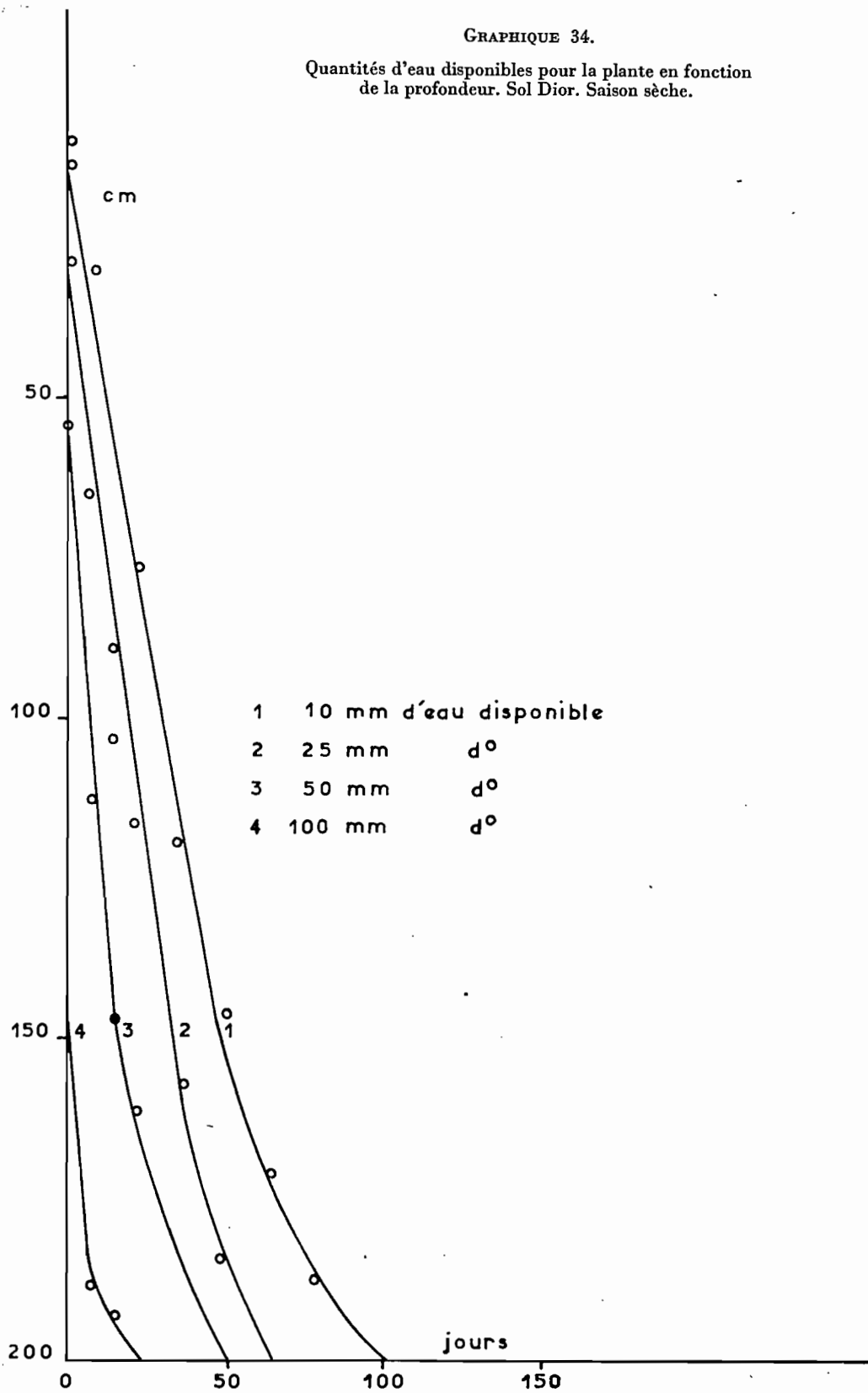


TABLEAU 34
INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION SUR LE DESSÈCHEMENT DU SOL

Déficits et pF	Déficits à 1 m			pF (horizon 40-60)		
	26-10	30-12	16-2	26-10	30-12	16-2
	Dates Traitements	1959	1959	1960	1959	1959
Terre nue :						
Premier essai	95	106	121	3,9	4,0	4,2
Deuxième essai	82	97	120	3,6	4,2	4,2
Moyenne	88	101	120	3,8	4,1	4,2
Friche :						
Premier essai.....	82	111	117	3,5	3,9	4,2
Deuxième essai	92	109	118	3,8	3,9	4,1
Moyenne	87	110	118	3,6	3,9	4,2
Doliques 40.000 pieds/ha :						
Premier essai.....	69	98	103	3,3	3,7	3,9
Deuxième essai	54	113	116	3,2	3,9	4,1
Moyenne	62	105	110	3,3	3,8	4,0
Doliques 80.000 pieds/ha :						
Premier essai.....	103	105	117	3,3	3,9	4,0
Deuxième essai	92	103	118	3,8	3,9	4,2
Moyenne	97	104	118	3,6	3,9	4,1
Doliques 120.000 pieds/ha :						
Premier essai.....	75	104	109	3,3	4,0	4,0
Deuxième essai	59	109	107	3,1	3,9	4,0
Moyenne	67	107	108	3,2	3,9	4,0
	29-10-1959	15-1-1960	15-2	29-10	15-1	15-2
Friche :	91	108	124	3,5	4,1	4,3

Il semble donc que, passée la période pluvieuse, le rôle de la végétation est à peu près négligeable dans l'évapotranspiration.

Les cultures de doliques furent malheureusement parasitées très fortement au mois de décembre, de sorte que les différences de densité de peuplement ne correspondaient pas à des différences de poids de matière sèche. Mais il est significatif de constater que les chiffres de la terre nue et de la jachère sont à peu près identiques.

On peut objecter que le déficit n'a été calculé que jusqu'à 1 m de profondeur, alors qu'à cette époque de l'année, les plantes s'alimentent principalement dans les horizons profonds. Mais, d'après les études faites précédemment, il est possible de se rendre compte que, si deux profils hydriques sont identiques jusqu'à la profondeur de 1 m, il y a toutes chances pour qu'au delà de cette profondeur, ils continuent à être identiques.

7) EXPLICATION DU DÉBIT AU COURS DE LA SAISON SÈCHE

Ainsi que nous l'avons vu plus haut, l'évapotranspiration au cours de la saison sèche peut se représenter comme une fonction logarithmique du temps. Les équations simplifiées sont :

$$\begin{aligned} E &= 79 \log 10^t && \text{pour le sol Dek,} \\ E &= 71 \log 10^t && \text{pour le sol Dior.} \end{aligned}$$

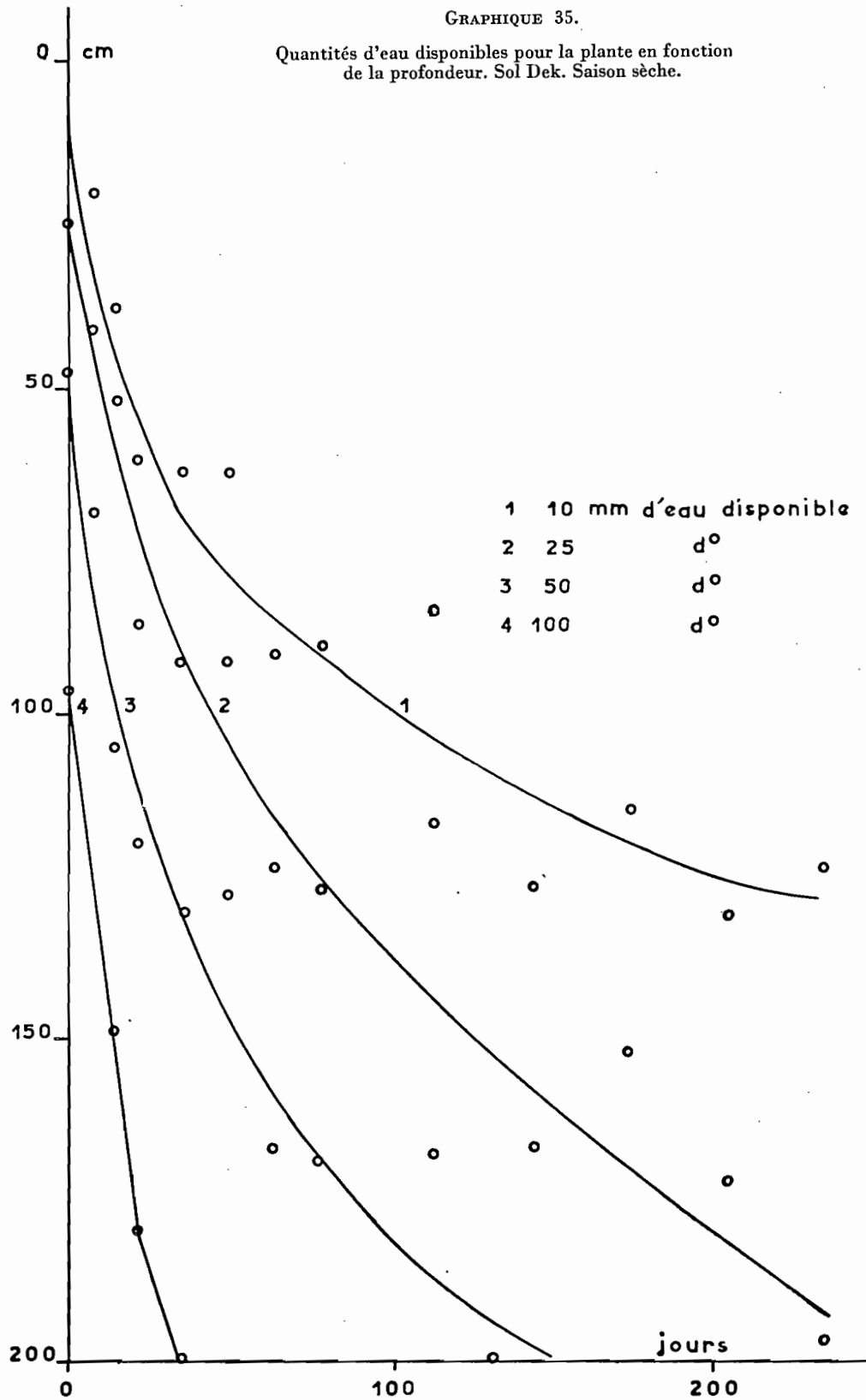
Le débit $\frac{dQ}{dt}$ représentera la dérivée de ces fonctions, soit :

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= \frac{34}{t} && \text{pour le sol Dek,} \\ \frac{dQ}{dt} &= \frac{31}{t} && \text{pour le sol Dior.} \end{aligned}$$

Le débit est donc une fonction inverse du temps.

GRAPHIQUE 35.

Quantités d'eau disponibles pour la plante en fonction de la profondeur. Sol Dek. Saison sèche.



On peut utiliser ces nouvelles équations pour en tirer une valeur approximative de l'évaporation journalière de ces deux sols à une époque déterminée de la saison sèche.

Par exemple, cinquante jours après la fin des pluies, l'évaporation journalière serait de 0,68 mm en sol Dek et 0,62 mm en sol Dior. Ces résultats ne sont pas en contradiction avec les mesures expérimentales. Toutefois, pour la période, qui suit immédiatement l'arrêt des pluies, les chiffres calculés sont beaucoup trop élevés ; il faut attendre une dizaine de jours pour avoir des chiffres plausibles.

Plusieurs théories ont été proposées pour rendre compte de l'évapotranspiration des sols entre deux périodes pluvieuses.

Nous ferons surtout référence ici aux travaux de HALLAIRE [11, 12, 13, 14] et tenteront de confronter les résultats expérimentaux obtenus ici avec les données théoriques établies par cet auteur.

A) Diffusion capillaire

HALLAIRE a tout d'abord proposé une explication du débit par la diffusion capillaire [11] et partant de la relation :

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \frac{d\psi}{dz}$$

où λ représente une variable, fonction de ψ .

Ayant établi qu'il existait une variation linéaire entre $\log(\psi - 1.000)$ et la profondeur z , il en arrive à définir la variable λ , coefficient de conductibilité par l'équation :

$$\lambda = \frac{A}{\psi - 1000} \quad \text{avec } A = \text{constante}$$

ce qui lui permet d'exprimer le débit par l'équation :

$$\frac{dQ}{dt} = A' \frac{d \log(\psi - 1000)}{dz} \quad \text{avec } A' = \text{constante.}$$

Cette équation ne peut rendre compte des phénomènes observés au cours de notre étude.

Nous avons, en effet, tenté de suivre les variations de la fonction $\log(\psi - \psi_0)$ avec la profondeur, où ψ_0 représente la valeur de ψ correspondant à la capacité de rétention.

HALLAIRE avait choisi pour ψ_0 la valeur 1000 ; nous avons adopté la valeur 500 correspondant mieux aux caractéristiques des sols étudiés. Il faut noter que les variations de $\log(\psi - 500)$ avec la profondeur sont très voisines de la courbe des pF, puisque $pF = \log \psi$. Les deux courbes peuvent pratiquement être confondues sauf pour des valeurs proches de la capacité de rétention.

Les variations de $\log(\psi - 500)$ avec la profondeur ne sont à aucun moment conformes à ce que laissait prévoir la théorie et ne présentent jamais l'allure de variations linéaires.

Par ailleurs, en établissant ces courbes, l'auteur avait mis en évidence, à faible profondeur, une cassure nette.

Il définissait ainsi une zone superficielle, où les lois de la diffusion capillaire ne jouaient plus, la diffusion de l'eau s'y faisant exclusivement sous la forme vapeur.

Cette cassure est visible sur certaines courbes $pF = f(z)$ établies peu de temps après l'arrêt des pluies (graphiques 15 et 16). L'évapotranspiration est à ce moment intense et provoque un dessèchement très rapide dans les horizons superficiels. Il y a augmentation rapide des tensions capillaires dans cette zone, augmentation beaucoup plus lente en profondeur. On obtient bien ainsi deux courbes assimilables à des droites se raccordant suivant un rayon de courbure très faible.

Mais, par la suite, au fur et à mesure que le dessèchement s'accroît, un mouvement de compensation se produit : les variations des tensions capillaires se font plus lentement dans les horizons superficiels, alors qu'elles deviennent plus sensibles en profondeur. Le raccordement entre les deux courbes se situe à une profondeur de plus en plus grande dans le profil. En même temps, il devient de moins en moins visible car il se fait suivant un rayon de courbure de plus en plus grand. Les deux courbes se trouveront bientôt confondues en une seule, sans qu'il soit possible de mettre en évidence dans un quelconque horizon du profil une discontinuité marquée.

Ces faits pourraient traduire l'importance de plus en plus grande que revêt la diffusion sous forme vapeur

quand le dessèchement du profil s'accroît. On peut se demander si, à partir d'un certain stade, l'évaporation du sol à tous les niveaux n'est pas régie exclusivement par les lois de la diffusion de la vapeur d'eau. Ce dernier point sera examiné plus loin.

De toutes façons, il ne semble pas que les lois de la diffusion capillaire, telles qu'elles ont été définies par HALLAIRE, puissent rendre compte de l'évaporation des sols au cours de la saison sèche dans les conditions climatiques du Sénégal.

Tout au plus pourraient-elles s'appliquer pendant une courte période (une à deux semaines) suivant immédiatement la fin des pluies.

Il convient de souligner ici les importantes différences entre les conditions expérimentales des études réalisées par HALLAIRE sur des sols de la région parisienne et des nôtres sur des sols du Sénégal. Outre les conditions climatiques et la nature des sols, qui sont radicalement différentes, les expérimentations d'HALLAIRE ont porté sur des profils de sols ne dépassant pas 50 cm de profondeur (contre 2 m pour les nôtres), le découpage du profil se faisant par tranches beaucoup plus fines.

Ces raisons ne semblent pas suffisantes, toutefois, pour expliquer les différences observées entre les résultats.

Par la suite HALLAIRE reconnut les limites de validité de la loi de diffusion capillaire : celle-ci ne serait valable qu'en régime d'évaporation constante, ce qui n'est évidemment pas le cas ici.

B) Vitesse d'assèchement du sol

La loi de diffusion capillaire est en particulier incapable de rendre compte du déplacement *per ascensum* de l'eau lorsqu'elle se produit à contre-gradient d'humidité.

Il a été démontré expérimentalement que cette circulation pouvait se faire à partir d'horizons profonds relativement secs vers des horizons superficiels plus humides.

HALLAIRE [13, 14] a alors mis en évidence l'intérêt de la notion de vitesse de dessèchement du sol.

Etablissant les courbes de vitesse de dessèchement du sol en fonction du taux d'humidité, $\frac{\Delta H}{\Delta t} = f(H)$,

il distingue trois phases dans le dessèchement du sol :

α) une première phase, au voisinage de la capacité de rétention, correspond à un palier plus ou moins long, où la vitesse de dessèchement est constante et correspond aux conditions de l'évapotranspiration potentielle,

β) une partie linéaire où $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ décroît avec l'humidité selon l'équation $\frac{\Delta H}{\Delta t} = \alpha (H - H_1)$,

γ) une queue de courbe observée en fin de dessèchement du sol où l'humidité peut descendre au-dessous de la valeur H_1 indiquée ci-dessus.

Nous avons tenté de retrouver ces éléments dans nos mesures expérimentales en établissant les courbes $\frac{\Delta H}{\Delta t} = f(S)$, S représentant le stock d'eau jusqu'à 2 m de profondeur.

L'humidité moyenne du profil se calcule aisément d'après le stock d'eau en mm, par la formule :

$$H \% = \frac{S}{d \times 20} \quad \text{où } d = \text{densité apparente du sol.}$$

Les courbes ainsi obtenues présentent bien les trois phases trouvées par HALLAIRE, mais légèrement modifiées :

α) Une phase d'évapotranspiration intense, sans toutefois qu'on puisse observer un palier, les valeurs de l'évapotranspiration journalière n'étant pas constantes et se trouvant nettement inférieures à l'évapotranspiration potentielle.

β) Une deuxième phase où la vitesse de dessèchement diminue rapidement ; il est difficile de préciser, à cause de l'erreur expérimentale et du trop petit nombre de chiffres, dont nous disposons, si cette variation est linéaire. Le début de cette phase est, en tous cas, facilement observable ; il correspond à un stock d'eau en sol Dek de 170 mm, en sol Dior de 80 mm, soit des humidités moyennes de 5,3 % et 2,7 %. Ces humidités représentent dans les deux sols un même pF : le pF 3,5.

γ) La troisième phase correspond à des évaporations faibles à nulles ; elle paraît débiter pour un stock

d'eau de 50 mm en sol Dior, de 100 mm en sol Dek, soit des humidités moyennes de 1,7 % et 3,1 %, ce qui représente pour les deux sols une valeur moyenne de pF voisine de 4,2.

Il apparaît donc que les valeurs de l'évaporation sont en relation étroite avec le taux d'humidité du sol, conformément à ce qu'avait établi HALLAIRE. Nous trouvons ainsi confirmation de l'hypothèse, que nous avons avancée plus haut, pour tenter d'expliquer les chiffres d'évaporation plus élevés observés en sol Dek au cours de la saison sèche : avant de parvenir au même degré d'assèchement que le sol Dior, les taux d'évaporation se maintiendront à un niveau plus élevé en sol Dek car les réserves d'eau y sont plus importantes.

Pour les deux sols, le palier correspondant aux conditions de l'évapotranspiration potentielle est court, car les valeurs de l'E T P sont ici très élevées. Le seuil au delà duquel la transpiration est réduite apparaît rapidement. La profondeur du système racinaire influe également, d'après HALLAIRE, sur l'apparition de ce seuil. Celui-ci apparaîtra d'autant plus rapidement que cette profondeur est plus faible. Nous n'avons pas eu l'occasion de vérifier ce dernier point.

HALLAIRE a établi ensuite expérimentalement une loi de variation des pertes en eau du sol avec la profondeur.

Ces pertes en eau varient avec la profondeur z selon deux courbes exponentielles successives :

$$U = U^0 \exp(-a_1 z) \quad \text{et} \quad U^0 = U'^0 \exp(-a_2 z).$$

Cette loi ne paraît pas pouvoir s'appliquer aux variations d'humidités observées dans notre étude, sinon pendant la première phase d'évapotranspiration faisant suite à l'arrêt des pluies.

Elle implique en effet que les pertes en eau par unité de temps et d'épaisseur de sol soit constamment croissantes depuis la profondeur jusqu'à la surface. Or ceci ne s'observe que pendant trois ou quatre semaines après la fin des pluies. Par la suite, les pertes d'eau dans les horizons superficiels deviennent très faibles ; les pertes d'eau en profondeur leur deviennent alors nettement supérieures, ce qui est en contradiction avec les données de HALLAIRE. Même au cours de la première phase les deux courbes exponentielles n'ont pu être établies, mais ceci peut tenir à l'imprécision des mesures effectuées sur le terrain.

Ce que nous pouvons par contre affirmer, c'est qu'à partir d'un certain degré d'assèchement des horizons superficiels, cette loi de variation des pertes en eau avec la profondeur n'a aucune chance d'être vérifiée.

C) Diffusion de l'eau sous forme vapeur

D'après HALLAIRE [12] cette diffusion doit répondre à une équation de la forme :

$$\frac{dQ}{dt} = A(t) \frac{dH}{dz} \quad A(t) = \text{fonction décroissante.}$$

En réalité les courbes expérimentales tracées dans le système de coordonnées $\frac{dQ}{dt}$, $\frac{dH}{dz}$, semblent bien traduire une relation linéaire mais celle-ci serait de la forme :

$$\frac{dQ}{dt} = A(t) \frac{dH}{dz} + B \quad (B \neq \text{constante})$$

ce qui correspond aux résultats trouvés par HALLAIRE pour les couches voisines de la surface d'évaporation. Cette relation s'explique par la superposition de la diffusion liquide et vapeur. Il serait intéressant de connaître l'importance relative de chaque forme de diffusion aux différentes profondeurs, mais les erreurs expérimentales inhérentes à notre méthode nous interdisent d'aller trop avant dans cette voie. Il est probable que la diffusion sous forme vapeur intéresse des couches de plus en plus profondes au fur et à mesure que la saison sèche s'avance et qu'elle devient le phénomène prépondérant pour toute la zone accessible aux racines.

8) APPLICATIONS PRATIQUES

A) Conservation de l'humidité dans le sol

Pour l'ensemble de la région climatique sahélo-soudanienne l'eau est généralement le premier facteur limitant la production agricole. Il est donc du plus haut intérêt de limiter les pertes par évaporation de façon à garder le maximum d'eau à la disposition des cultures.

Cette conservation de l'eau est particulièrement intéressante aux deux époques suivantes :

Début de la période des pluies : mois de juin et juillet.

Période suivant la fin des pluies : mois d'octobre et novembre.

C'est en effet le début de la saison des pluies qui constitue la période la plus critique pour l'alimentation hydrique des plantes.

La saturation du sol ne se produit en effet qu'au mois d'août ou même plus tardivement suivant la fréquence et la hauteur des pluies. D'après les études faites en cases lysimétriques [6] l'apparition du drainage à 2 m de profondeur se situe, suivant les années, entre le 1^{er} août et le 1^{er} octobre.

La plante, pendant la première phase de sa croissance est particulièrement sensible à la sécheresse et tout déficit d'alimentation hydrique se traduit alors par une baisse notable de rendement.

Plusieurs procédés peuvent être utilisés pour limiter les pertes d'eau par évaporation du sol. Parmi ceux-ci les plus efficaces semblent être :

les sarclo-binages,

l'incorporation au sol de coques d'arachides broyées.

Les sarclo-binages ont pour double effet de supprimer les mauvaises herbes et d'émietter la couche superficielle du sol. Ils se traduisent par une incontestable économie de l'eau dans le sol, obtenue, semble-t-il, d'avantage par la suppression de la concurrence des mauvaises herbes que par le binage proprement dit.

L'incorporation au sol de coques d'arachides broyées a été étudiée par BILLAZ [9]. L'efficacité de cette technique dépend de la finesse de broyage et de la quantité de coques mélangées au sol. Son utilisation, bien que très intéressante, se heurte à des considérations économiques défavorables.

Pendant la période de drainage qui suit la saturation du sol et dure généralement jusqu'à la fin des pluies, la limitation des pertes par évaporation présente moins d'intérêt. Il y aurait lieu au contraire de lutter contre un drainage excessif, qui se traduit par des pertes importantes en éléments minéraux.

Après la fin des pluies la plante s'alimente en eau uniquement à partir des réserves du sol. Si les pluies cessent précocement, début octobre, certaines plantes, devront subsister deux mois, dans ces conditions. C'est le cas du mil, par exemple, pour lequel cette période correspond à la formation des grains. C'est pourquoi le potentiel de production est étroitement lié à la capacité de rétention de l'eau du sol. C'est pourquoi également il est très important de ne pas gaspiller les réserves du sol par évaporation.

La meilleure protection contre l'évaporation est constituée à ce moment par la plante elle-même. Si elle présente un développement végétatif satisfaisant, la masse foliaire protégera le sol contre les rayons solaires et créera un microclimat à faible pouvoir évaporant. La transpiration n'en sera pas forcément augmentée, car les feuilles situées à la base de la tige, protégées par celles qui se trouvent au-dessus transpireront moins, ce qui compensera, au moins partiellement, l'effet d'une surface foliaire plus importante.

Au total les pertes par évapotranspiration seront alors plus faibles sous une végétation bien fournie, protégeant le sol par un écran continu, que sous une végétation clairsemée. C'est ce que des mesures d'humidité effectuées dans la couche superficielle du sol ont permis de vérifier à l'occasion d'une étude de l'influence de *Faidherbia albida* sur la fertilité des sols [15].

Le travail du sol permet également de conserver de façon efficace l'humidité après la fin des pluies. C'est ce qui a été montré dans une étude effectuée en collaboration avec Ph. GAUDEFROY-DEMOMBYNES [16]. Il s'agissait alors du passage d'un rotavator sur jachère d'un an, passage effectué au moment des dernières pluies. Le rotavator avait produit un émiettement poussé de la couche superficielle du sol, et son action s'était révélée plus efficace, pour la conservation de l'humidité dans le sol, que les déchaumages effectués à la charrue à disque. Toutefois la date de passage du rotavator avait une grande influence : seules les terres travaillées immédiatement après la dernière grande pluie conservèrent un taux d'humidité nettement supérieur pendant la saison sèche. Les façons culturales effectuées avant ou après cette date se révélèrent inefficaces.

La conservation de l'humidité par ce moyen ne peut être étendue aux terres en culture puisque les récoltes ont souvent lieu plusieurs semaines après la fin des pluies. L'intérêt de cette pratique réside dans les meilleures conditions de préparation du sol pour la saison culturale suivante. Cette préparation se fait en effet en sec, avant le début des pluies ; l'ameublissement étant corrélatif de l'état d'humidité du sol, les préparations effectuées mécaniquement seront sensiblement facilitées.

B) Irrigation

Celle-ci peut se concevoir soit comme irrigation de complément au cours de l'hivernage, soit comme une irrigation complète au cours de la saison sèche. Les productions végétales ne seront naturellement pas les mêmes dans les deux cas.

a) IRRIGATION DE COMPLÉMENT, PENDANT LA SAISON DES PLUIES.

Cette irrigation pourra concerner des cultures vivrières ou industrielles : arachides, mils, sorghos, ricins... Nous pouvons admettre, d'après ce qui a été vu précédemment, que les besoins journaliers de ces plantes pendant les mois de juin à novembre sont de 7 mm par jour. Le débit fictif continu serait donc de :

$$\frac{70.000}{24 \times 60 \times 60} = 0,81 \text{ litre/ha/seconde.}$$

Ce chiffre doit être diminué des précipitations tombant pendant l'hivernage.

A titre d'exemple, calculons pour l'année 1959, par périodes de dix jours le cube d'eau qui eût été nécessaire pour que la végétation ait pu atteindre son maximum de développement (évapotranspiration potentielle).

Soit une culture de mil dont le semis est effectué le 20 juin, le cycle végétatif du mil étant de cent cinquante jours.

Au 20 juin le déficit du sol Dior atteint 110 mm, celui du sol Dek 160 mm. Il conviendra, avant le semis de combler ce déficit, mais il ne sera pas nécessaire de le combler complètement.

Il sera suffisant de maintenir ce déficit aux alentours de 50 mm, le sol étant alors capable d'alimenter la plante à partir de ses réserves, sans qu'il y ait gaspillage d'eau. Cette opération aura lieu au cours de la deuxième décennie ; pendant ce temps l'évaporation du sol nu est maximum (50 mm). Par la suite, il suffira d'apporter un complément d'eau de façon à ce que l'évapotranspiration décadaire atteigne 70 mm et que le déficit se maintienne à une valeur inférieure ou égale à 50 mm. Le tableau 35 donne ces valeurs pour le sol Dek.

TABLEAU 35
CONDITIONS DE L'IRRIGATION AU COURS DE L'HIVERNAGE EN SOL DEK

Périodes	T	A m ³ /ha	d e/sec/ha	t	n	s	O.
Juin 1	10	0	—				—
— 2	10	160	1,85	16'	900	54 ha	4 h 30'
— 3	10	370	0,43	3'42"	3.900	234 ha	1 h 02'
Juillet 1	10	420	0,49	4'12"	3.400	204	1 h 10'
— 2	10	480	0,56	4'48"	3.000	180	1 h 20'
— 3	10	540	0,63	5'24"	2.700	162	1 h 30'
Août 1	10	320	0,37	3'12"	4.500	270	53'
— 2	10	600	0,70	6'	2.400	144	1 h 40'
— 3	10	0	0				
Septembre 1	10	0	0				
— 2	10	0	0				
— 3	10	200	0,23	2'	7.200	432	33'
Octobre 1	10	700	0,81	7'	2.100	126	1 h 57'
— 2	10	700	0,81	7'	2.100	126	1 h 57'
— 3	10	700	0,81	7'	2.100	126	1 h 57'

$$\begin{aligned} \text{Constantes : } K &= 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec} \\ m &= 0,10 \text{ m}^3/\text{sec} \\ s &= 600 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

On voit que fin octobre le cube d'eau nécessaire en sol Dior est de 513 mm, en sol Dek 563 mm, la différence représentant la différence entre les déficits en début d'irrigation.

L'intervalle entre deux arrosages peut être fixé à dix jours, pour les plantes considérées ; les chiffres du tableau deviennent ainsi des doses d'arrosages ; celles-ci sont exprimées en mm ; leur valeur, exprimée en m³ à l'ha s'obtient en multipliant les chiffres par 10.

La durée de l'arrosage se définit par la valeur : $t = \frac{A}{K}$ où A représente la dose d'arrosage, K la perméabilité.

En se référant aux résultats obtenus par la méthode de MUNTZ, la valeur de K varie, pour les sols considérés, entre 840 et 200 mm à l'heure, suivant que le sol est sec ou humide. Nous prendrons la valeur intermédiaire de 600 mm/heure, soit 10 mm par minute. Dans ces conditions la durée de l'arrosage pour la plus forte dose employée (160 mm) est de seize minutes, la dose la plus faible (20 mm) ne demandant pas plus de deux minutes.

L'unité parcellaire d'arrosage se définit par le rapport $s = \frac{m}{K}$ où m représente le module d'irrigation et K la perméabilité du sol. Le module d'irrigation est le débit effectivement fourni pendant la durée de l'irrigation ; sa valeur est dictée par des considérations économiques ; elle augmente avec la perméabilité des sols, mais pratiquement ne peut dépasser 100 lit/sec/ha.

La valeur de K étant de 600 mm à l'heure soit : $1,7 \cdot 10^{-4}$ m/sec on obtient : $s = \frac{0,10}{1,7 \cdot 10^{-4}} = 600 \text{ m}^2$.

Le tableau 35 donne les caractéristiques des différents arrosages en supposant constants le module d'irrigation et l'unité parcellaire d'arrosage.

Le débit caractéristique, exprimé en l/sec, s'obtient par la formule : $d = \frac{A}{T}$.

La durée de chaque irrigation t est égale à : $t = \frac{A}{K}$.

Le nombre n d'unités parcellaires par cycle d'arrosage s'obtient par le rapport : $n = \frac{T}{t} = \frac{K}{d}$.

Connaissant n et s on en déduit S, surface irriguée par le module : $S = n s$.

Enfin on peut calculer le temps O pendant lequel on fournit le module à l'ha : $O = \frac{A}{m}$.

Nous avons pris pour chiffre de perméabilité une valeur de 10 mm à la minute ; mais quand le sol est très sec, la valeur de K peut atteindre et même dépasser 15 mm à la minute. Dans ces conditions il n'est pas possible d'effectuer une irrigation par submersion. Seule reste praticable l'irrigation par aspersion en employant des doses plus faibles (250 m³ à l'ha) mais répétées.

b) IRRIGATION AU COURS DE LA SAISON SÈCHE.

L'irrigation est alors la seule source d'eau pour les plantes, puisque, pendant cette période, les précipitations sont nulles.

Par ailleurs les besoins des plantes sont accrus en fin de saison sèche car l'évapotranspiration potentielle croît sensiblement à partir de janvier. Si, jusqu'en décembre, on peut conserver le chiffre de 7 mm par jour, à partir de janvier il faut prendre 8 mm.

Les cultures maraîchères ayant, en général un enracinement superficiel, il conviendra de raccourcir les périodes d'arrosages : un intervalle de trois jours peut convenir.

Soit par exemple une culture débutant au 1^{er} janvier et occupant le terrain pendant quatre mois.

Au 1^{er} janvier le déficit en sol Dek est de 150 mm, en sol Dior de 120 mm. Il conviendra donc de réduire le déficit en apportant une dose de 100 mm, soit 1.000 m³/ha en sol Dek et 70 mm soit 700 m³/ha en sol Dior.

Par la suite des doses d'entretien seront de 240 m³/ha tous les trois jours. Le débit caractéristique est alors de :

$$d = \frac{A}{T} = 0,9 \text{ l/sec/ha.}$$

Les planches d'irrigation en culture maraîchère pourront avoir une dimension plus réduite, soit 200 m². Le module d'irrigation sera alors de : $m = s K = 200 \times 1,7 \times 10^{-4} = 0,034 \text{ m}^3/\text{sec}$, si l'on continue à prendre comme valeur moyenne de perméabilité le chiffre de $1,7 \times 10^{-4}$ m/sec (soit 10 mm à la minute).

La durée de l'irrigation sera de : $t = \frac{A}{K} = \frac{24}{10}$ soit deux minutes vingt-quatre secondes.

Le nombre d'unités parcellaires à l'hectare devient :

$$n = \frac{T}{t} = \frac{3 \times 24 \times 60}{2,4} = 1.800$$

La surface S, irriguée par le module, sera : $S = n s = 36$ hectares et le temps O pendant lequel le module est appliqué à l'hectare : $O = \frac{A}{m} = \frac{240}{0,034} = 7.005$ secondes soit une heure cinquante-huit minutes.

Au bout de quatre mois la culture aura nécessité 960 mm comme irrigation d'entretien (soit 9.600 m³/ha) et 70 à 100 mm pour réduire le déficit initial du sol, soit au total 10.600 m³/ha en sol Dek.

C) Fertilisation

Dans toute la zone sahélo-soudanienne, à courte saison des pluies, l'eau est le premier facteur limitant des cultures. Les plantes peuvent s'accommoder plus ou moins bien d'une alimentation hydrique insuffisante, leur végétation est considérablement améliorée quand la pluviométrie atteint un niveau satisfaisant. Le cas de l'arachide est bien connu : dans la région de Louga, zone limite de sa culture, son rendement peut varier du simple au quadruple d'une année sur l'autre, suivant la pluviométrie. Il est malheureusement exceptionnel, de pouvoir corriger ces aléas climatiques par une irrigation de complément, bien qu'il soit impardonnable de négliger le procédé, quand il peut être économiquement utilisé.

Par contre, il est possible d'intervenir sur la croissance de la plante par le biais de la fertilisation. Or l'absorption des éléments minéraux par la plante se trouve étroitement conditionnée par les disponibilités en eau du sol.

C'est ainsi que, dans le cadre d'une étude sur l'influence du *Faidherbia albida* sur la croissance des mils [15], les chiffres de différents éléments du sol ont été comparés aux quantités de ces mêmes éléments se trouvant dans la feuille de mil. Des corrélations positives ont été trouvées pour plusieurs éléments, en particulier : Ca, Mg échangeables, la somme S des cations échangeables, N et P₂O₅ totaux (tableau 36), mais ces corrélations

TABLEAU 36

INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ DU SOL SUR L'ABSORPTION DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX ET LE RENDEMENT DU MIL

1° Corrélations entre la quantité d'éléments du sol et la quantité d'éléments dans la feuille de mil.

ÉLÉMENTS DU SOL

VALEURS DE r

	VALEURS DE r	
	Premier cas	Deuxième cas
A) Ca échangeable.....	554	770
B) Mg échangeable	543	853
C) P ₂ O ₅ total	310	642
D) N total	652	943
E) Somme des bases échangeables	699	896

Premier cas : corrélations éléments du sol/éléments de la feuille.

Deuxième cas : corrélations éléments du sol $\times \frac{H}{HE}$ /éléments de la feuille.

2° Corrélations entre les éléments du sol et le rendement du mil.

ÉLÉMENTS DU SOL

VALEURS DE r

	VALEURS DE r		
	Premier cas	Deuxième cas	Troisième cas
N total	0,515	0,816	0,829
Somme des bases échangeables	0,673	0,838	0,847
Ca échangeable	0,701	0,811	0,860

Premier cas : corrélation éléments du sol/rendement.

Deuxième cas : corrélation éléments du sol $\times \frac{H}{rendement}$.

Troisième cas : corrélation éléments du sol $\times \frac{H}{HE}$ /rendement

deviennent beaucoup plus significatives si les chiffres des éléments du sol sont multipliée par le rapport $\frac{H}{HE}$, où H représente l'humidité du sol au moment du prélèvement (début octobre) et H E l'humidité équivalente.

Ce rapport est directement proportionnel à la quantité d'eau disponible pour les plantes. Autrement dit, pour tous ces éléments, leur absorption par la plante est fortement influencée par l'eau disponible du sol. D'autres études concernant la physiologie du mil [17] démontrent également les relations existant entre évapotranspiration, élaboration de la matière sèche, absorption des éléments minéraux. En ce qui concerne le rendement, les interactions entre alimentation hydrique et absorption minérale ont également une influence déterminante. Le tableau 36 donne les corrélations existant entre l'azote du sol, la somme des bases échangeables, le calcium échangeable et le rendement du mil. Ces corrélations ont été également calculées en multipliant les chiffres des éléments du sol par l'humidité, puis par le rapport $\frac{H}{HE}$. Le coefficient de corrélation augmente très nettement en multipliant par H les chiffres des éléments du sol ; il augmente encore légèrement quand on le multiplie

par $\frac{H}{HE}$.

Il n'est donc pas étonnant, dans ces conditions, que les réponses de la plante à l'engrais puissent être sensiblement différentes d'une année sur l'autre, suivant la pluviométrie.

Ne connaissant pas à l'avance la pluviométrie de la saison culturale, il ne sera évidemment pas possible de modifier en conséquence la formule et la dose de la fumure qui sera apportée au semis ; par contre il sera peut-être intéressant d'intervenir en cours de végétation par des apports fractionnés, judicieusement dosés. Ceci suppose qu'on soit en mesure de suivre, au cours du temps : l'évapotranspiration, l'élaboration de la matière sèche et le mouvement des solutions dans le sol. Nous avons vu que le calcul théorique par la formule de TURC permettait une estimation satisfaisante de ces données, qu'en outre il était possible de vérifier et de préciser ce calcul par la mesure périodique des déficits du sol. Une première application de cette idée est en cours ; elle concerne le fractionnement de la fumure azotée sur le mil [17].

Il sera toujours du plus grand intérêt d'interpréter les résultats expérimentaux sur les engrais minéraux en appréciant au préalable les conditions dans lesquelles s'est faite l'alimentation hydrique de la plante. Nous pensons que cette méthode devrait être source de progrès pour une utilisation plus efficace des engrais minéraux et une meilleure connaissance de leur action.

La connaissance de la vitesse d'épuisement des réserves du sol, du bilan minéral de chaque culture ou de chaque rotation permettra de concevoir une politique non plus statique mais dynamique de la fertilisation.

Ayant par ailleurs la faculté de suivre, au cours d'une saison des pluies, la « descente » dans le profil des éléments fertilisants facilement lessivés — tels que l'azote, la potasse, la chaux — il sera aisé de définir les meilleures dates d'application de l'engrais de façon à ce que les plantes aient toujours, à une profondeur accessible aux racines, une quantité suffisante d'éléments nutritifs.

C'est principalement dans cette voie que devront s'orienter, à notre avis, les recherches faisant suite à la présente étude.

CONCLUSION. RÉSUMÉ. — *Cette étude complète les données acquises sur le bilan de l'eau par l'expérimentation en cases lysimétriques.*

Les variations des humidités et des tensions capillaires ont été périodiquement suivies dans deux sols sous friche, jusqu'à deux mètres de profondeur, au cours d'une année entière.

Pour chaque profil hydrique ont été calculés : le stock d'eau du sol à différentes profondeurs, la quantité d'eau utilisable par les plantes, le déficit de rétention. La variation de ces valeurs au cours du temps a permis de calculer l'évapotranspiration réelle et d'évaluer, dans un cas particulier, le volume du drainage.

L'évapotranspiration potentielle a pu être évaluée en saison des pluies et en saison sèche.

Pour tenter d'expliquer le débit pendant la saison sèche, diverses hypothèses ont été examinées ; certaines se sont révélées nettement insuffisantes pour rendre compte des phénomènes observés : c'est le cas, en particulier, de la loi de diffusion capillaire, telle qu'elle a été exprimée par HALLAIRE.

La connaissance de ces données a permis d'aborder différents problèmes tels que celui de la conservation de l'humidité dans le sol et celui de l'irrigation.

Mais, sur le plan des applications pratiques, les conséquences les plus importantes de cette étude pourraient concerner le domaine de la fertilisation.

La confrontation des mesures expérimentales avec les données théoriques de la formule de TURC pour le calcul

de l'évapotranspiration a montré en effet la très bonne concordance entre ces deux séries de résultats. L'intérêt de cette formule ayant déjà été reconnu à l'occasion d'études en cases lysimétriques (6), son utilisation pourra donc, sous réserve de confirmation ultérieure, être généralisée au Sénégal ; elle permettra d'extrapoler, pour des sols et des régimes pluviométriques différents, les résultats expérimentaux acquis à Bambey sur l'évapotranspiration, le mouvement des solutions dans le sol et le drainage.

Ceci nous paraît devoir avoir des répercussions importantes pour la fertilisation. Celle-ci, pour être rationnelle, devrait être fondée, en effet, non seulement sur la connaissance du sol et des exigences de la plante mais aussi sur le bilan minéral de chaque culture ou de chaque rotation. Ce bilan comporte, d'une part, les exportations de la culture, d'autre part, les pertes par drainage. Or si le premier élément peut être assez facilement connu, le second a échappé jusqu'à présent à toute appréciation sérieuse. C'est cette lacune qu'il sera maintenant possible de combler grâce à l'application judicieuse de la formule de Turc. Il sera toutefois nécessaire d'estimer également la composition chimique moyenne des eaux de drainage pour chiffrer les pertes d'éléments fertilisants par hectare.

Si l'on connaît la vitesse d'épuisement des réserves du sol et l'équilibre minéral de chaque culture ou de chaque rotation, il sera possible d'envisager une politique dynamique et non statique de la fertilisation.

Avec la faculté de suivre, pendant une saison humide, la « descente » dans le profil des éléments facilement lessivés — comme l'azote, la potasse, la chaux — il sera facile de déterminer les meilleures dates pour l'application de l'engrais : ainsi les plantes auront toujours une quantité suffisante d'éléments nutritifs à une profondeur accessible à leurs racines.

Ceci nous semble être la principale orientation des recherches consécutives à la présente étude.

SUMMARY. — *This study completes the data acquired on water balance by means of experiments using a lysimeter.*

The variations in humidity and capillarity have been periodically traced in two soils from fallow ground, up to two metres in depth, during the whole of one year.

The following have been calculated for each profile of the water distribution : the water supply of the soil at different depths, the quantity of water utilizable by plants, and the shortage due to retention. The variations of these values with time have made it possible to calculate the actual evapo-transpiration and to estimate the drainage volume in any one particular case.

It was possible to estimate the potential evapo-transpiration in the rainy season as well as in the dry season.

Various hypothesis have been examined to try to explain the outflow during the dry season ; some of them proved to be quite incapable to account for the various phenomena observed : this is particularly the case for the law relating to diffusion by capillarity, as expressed by HALLAIRE.

With the knowledge of this data it was possible to tackle different problems such as that of the preservation of the humidity of the soil and the problem of irrigation.

But, from the point of view of practical applications, probably the most important results of this study concern fertilization.

A comparison between experimental measurements and the theoretical data of TURC's formula for calculating evapo-transpiration did, indeed, show good agreement between the two series of results. The advantages of this formula having already been recognized during experiments using a lysimeter device (6), its use could thus, — if it is subsequently confirmed — be generally applied in Senegal ; it would make it possible to extrapolate the experimental results obtained at Bambey on evapo-transpiration, and the movement of solutions in the soil and drainage, for different soils and for different rainfalls.

It appears to us that this should have important consequences on fertilization. For the latter to be rational, it should, in fact, be based not only on a knowledge of the soil and the requirements of the plant but also on the mineral balance of each crop and each rotation.

This balance includes, on the one hand, the exports of the crop, and on the other, losses due to drainage. Now, if the first element can be fairly easily calculated, the second has, up until now, failed to be estimated seriously. It is now possible to make up for this lack by means of the judicious application of TURC's formula.

It would, however, also be necessary to estimate the average chemical composition of the drainage waters so as to be able to calculate the loss in fertilizing elements per hectare.

Knowledge of the speed of exhaustion of the soil reserves, and of the mineral balance of each crop and each rotation will make it possible to develop a plan for fertilization that is no longer static but dynamic.

Moreover, with the ability of being able to follow, during a rainy season, the « descent » in the profile of the easily leached, fertilizing elements — such as nitrogen, potassium, lime — it should be easy to determine the best period for applying manure so that the plants always have a sufficient quantity of nutritive elements, at a depth accessible to their roots.

In our opinion, the aims of experimental research that follows on to this study should mainly follow this course.

RESUMEN. — El estudio presente completa los informes relativos al balance hídrico obtenidos con una experimentación en lisímetros.

En dos terrenos baldíos estudiáronse periódicamente durante un año las variaciones de las humedades y de las tensiones capilares hasta dos metros de profundidad.

Para cada perfil hídrico evaluáronse : el agua almacenada a varias profundidades, la cantidad de agua aprovechable por la plantas, el déficit de retención. La variación de estos valores con el tiempo permitió calcular la evapotranspiración verdadera y, en un caso especial, el volumen de drenaje.

Se ha podido evaluar la evapotranspiración potencial en época lluviosa y en época seca.

Examináronse varias hipótesis para tratar de explicar el caudal durante la época seca. Algunas se revelaron netamente insuficientes para dar cuenta de los fenómenos observados, en particular la ley de difusión capilar elaborada por HALLAIRE.

Esto dados permitieron enfrentar varios problemas como el de la conservación de la humedad en el suelo y el de la irrigación.

Desde el punto de vista práctico, las consecuencias más importantes de este estudio se aplican en el campo de la fertilización.

Confrontando las medidas experimentales con los datos teóricos de la fórmula de Turc para evaluar la evapotranspiración, observóse una concordancia muy buena entre las dos series de resultados. Los estudios en lisímetros (6) permitieron verificar el interés de esta fórmula ; por eso puede generalizarse en el Senegal, con tal que sea confirmada ulteriormente. Permitirá extrapolar, para suelos y regímenes de lluvias diferentes, los resultados experimentales obtenidos en Bambey en lo que respecta a la evapotranspiración, el movimiento de las soluciones en el suelo y el drenaje.

Las consecuencias se repercutirán, a nuestro parecer, en el campo de la fertilización. Esta, para ser racional, deberá basarse efectivamente, no sólo en el conocimiento del suelo y las necesidades de las plantas, sino también en el balance mineral de cada cultivo o de cada rotación. Este balance comporta, por una parte las exportaciones de los cultivos, por otra parte las pérdidas de drenaje. Ahora bien, si el primer elemento puede conocerse fácilmente, no se ha podido hasta hoy apreciar con seriedad el segundo. El problema puede resolverse con una aplicación juiciosa de la fórmula de Turc. Sin embargo será necesario estimar igualmente la composición química media de las aguas de drenaje para evaluar las pérdidas de fertilizantes por hectárea.

Conociendo la velocidad de agotamiento de las reservas del suelo y el balance mineral de cada cultivo o de cada rotación será posible contemplar una política dinámica y no estática de la fertilización.

Con la facultad de seguir « durante una estación húmeda, el « descenso » en el perfil de los elementos fácilmente lixiviados — como el nitrógeno, la potasa, la cal — será fácil determinar las fechas mejores para la aplicación de fertilizante : así las plantas tendrán siempre al alcance de las raíces una cantidad suficiente de elementos nutritivos.

A nuestro parecer ésta debe ser la principal orientación de las investigaciones consecutivas al estudio presente.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. BONFILS et J. FAURE. — Les sols de la région de Thiès. Annales du C R A, Bambey, 1956.
- [2] — — — Etude comparative des sols du C R A Bambey. Annales du C R A, Bambey, 1955.
- [3] PEREIRA GOMES et ANTUNES DA SILVA. — A curva teórica de pF e a sua importância na economia da água do solo. Estudos agronômicos (janvier-mars), 1960.
- [4] J. BOURALY et R. SABATHÉ. — Note sur un appareil de mesure de la perméabilité des sols. Direction des Travaux Publics de Tunisie (avril) 1955.
- [5] P. ROLLEY. — Irrigations. Baillièrre et fils éditeurs, Paris.
- [6] P. BONFILS, C. CHARREAU, M. MARA. — Etudes lysimétriques au Sénégal (A paraître dans les Annales du C R A, Bambey).

- [7] L. TURC. — Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Thèse. I N R A, 1953.
- [8] R. J. BOUCHET. — Evapotranspiration potentielle et évaporation sous abri. VI^{es} journées de l'hydraulique, Nancy, 1960.
- [9] P. BILLAZ. — L'alimentation en eau de l'arachide dans les sols Dior du Sénégal. Rapport I R H O, 1959.
- [10] A. A. RODE. — Catégories et formes de l'eau du sol et les propriétés hydrologiques. Congrès de la Science du sol, Paris, 1956.
- [11] M. HALLAIRE. — Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés. Annales Agronomiques, série A (mars-avril), 1953.
- [12] M. HALLAIRE. — La diffusion de l'eau dans le sol sous les deux formes : liquide et vapeur au voisinage de la surface d'évaporation. Congrès de la Science du sol, Paris, 1956.
- [13] — — Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. Annales de Physiologie Végétale, n° 2, 1960.
- [14] — — Circulation de l'eau dans le sol sous l'effet de l'évapotranspiration. VI^{es} journées de l'hydraulique, Nancy, 1960.
- [15] C. CHARREAU et P. VIDAL. — Influence du *Faidherbia albida* sur la fertilité du sol et la nutrition minérale du mil (A paraître dans les Annales du C R A, Bambeby).
- [16] C. CHARREAU et P. GAUDEFROY-DEMOMBYNES. — Possibilité de conservation de l'humidité dans les sols pendant la saison sèche ; influence corrélative sur le degré d'ameublissement du sol (A paraître dans les Annales du C R A, Bambeby).
- [17] P. VIDAL. — Croissance et nutrition minérale des mils (*Pennisetum*) cultivés au Sénégal (A paraître dans les Annales du C R A, Bambeby).