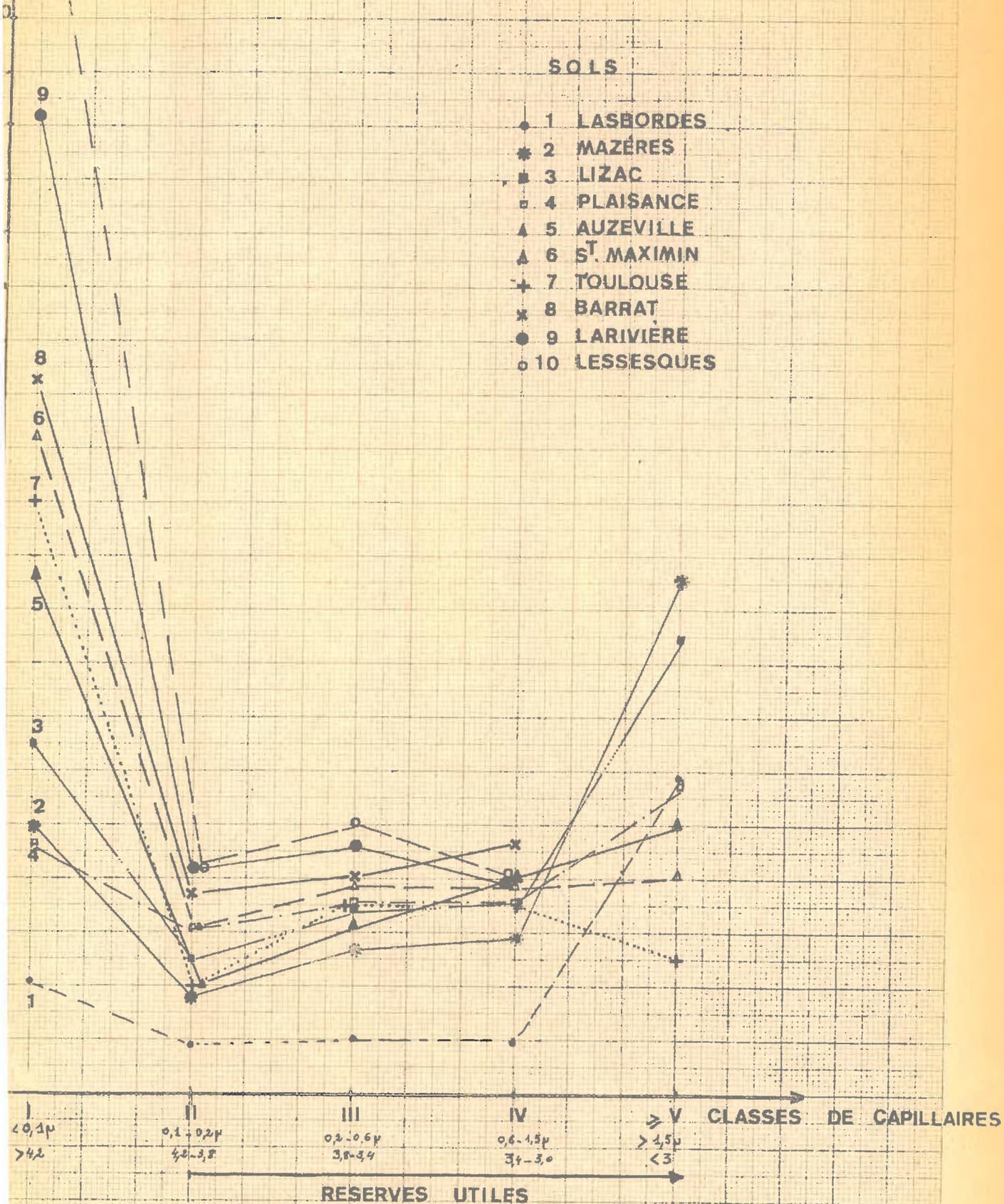


EAU (EN % T S)
CONTENUE DANS CHAQUE CLASSE

FIG. 40. EAU RETENUE DANS LES DIFFÉRENTES CLASSES DE CAPILLAIRES

SOLS

- 1 LASBORDES
- * 2 MAZÈRES
- 3 LIZAC
- 4 PLAISANCE
- ▲ 5 AUZEVILLE
- △ 6 ST. MAXIMIN
- + 7 TOULOUSE
- x 8 BARRAT
- 9 LARIVIÈRE
- 10 LESSESQUES



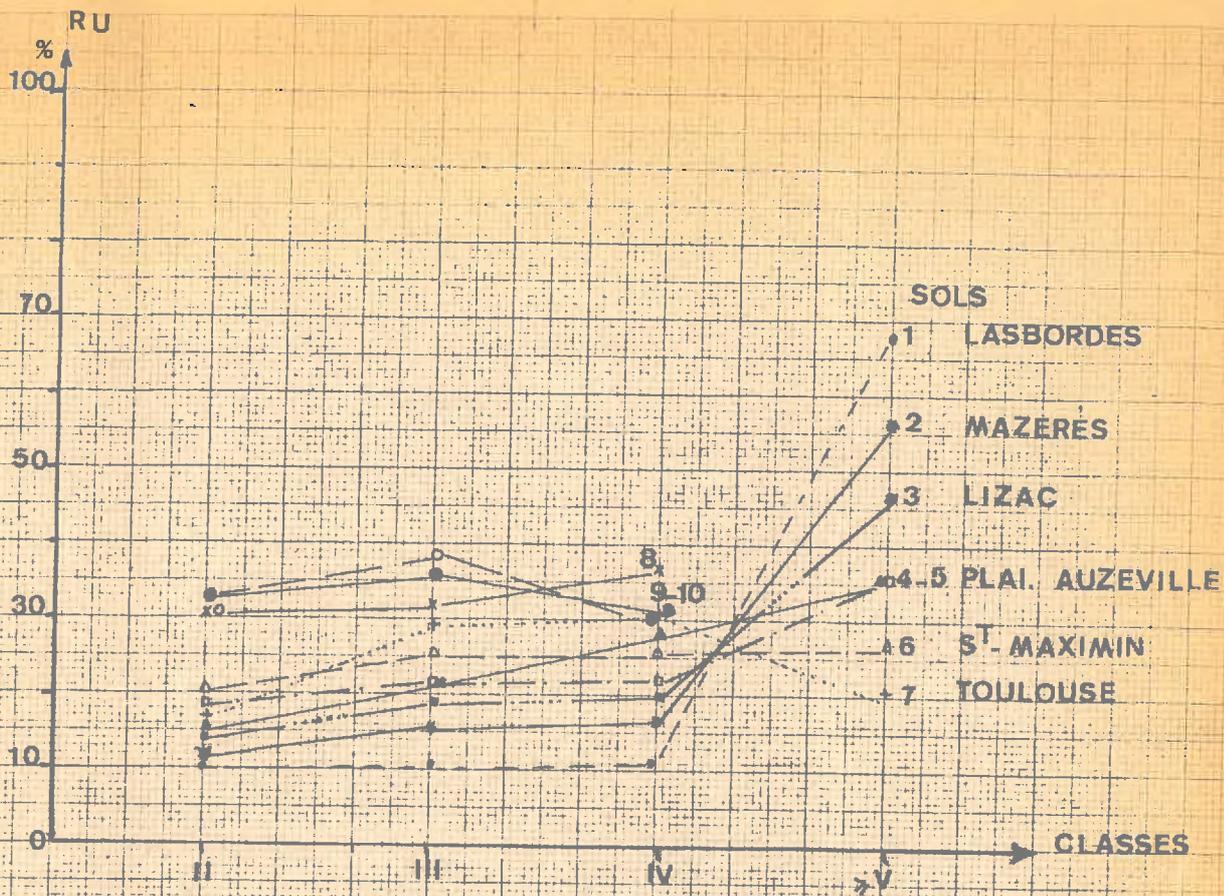


FIG. 41. POURCENTAGE DE LA RU DANS CHAQUE CLASSE DE CAPILLAIRES

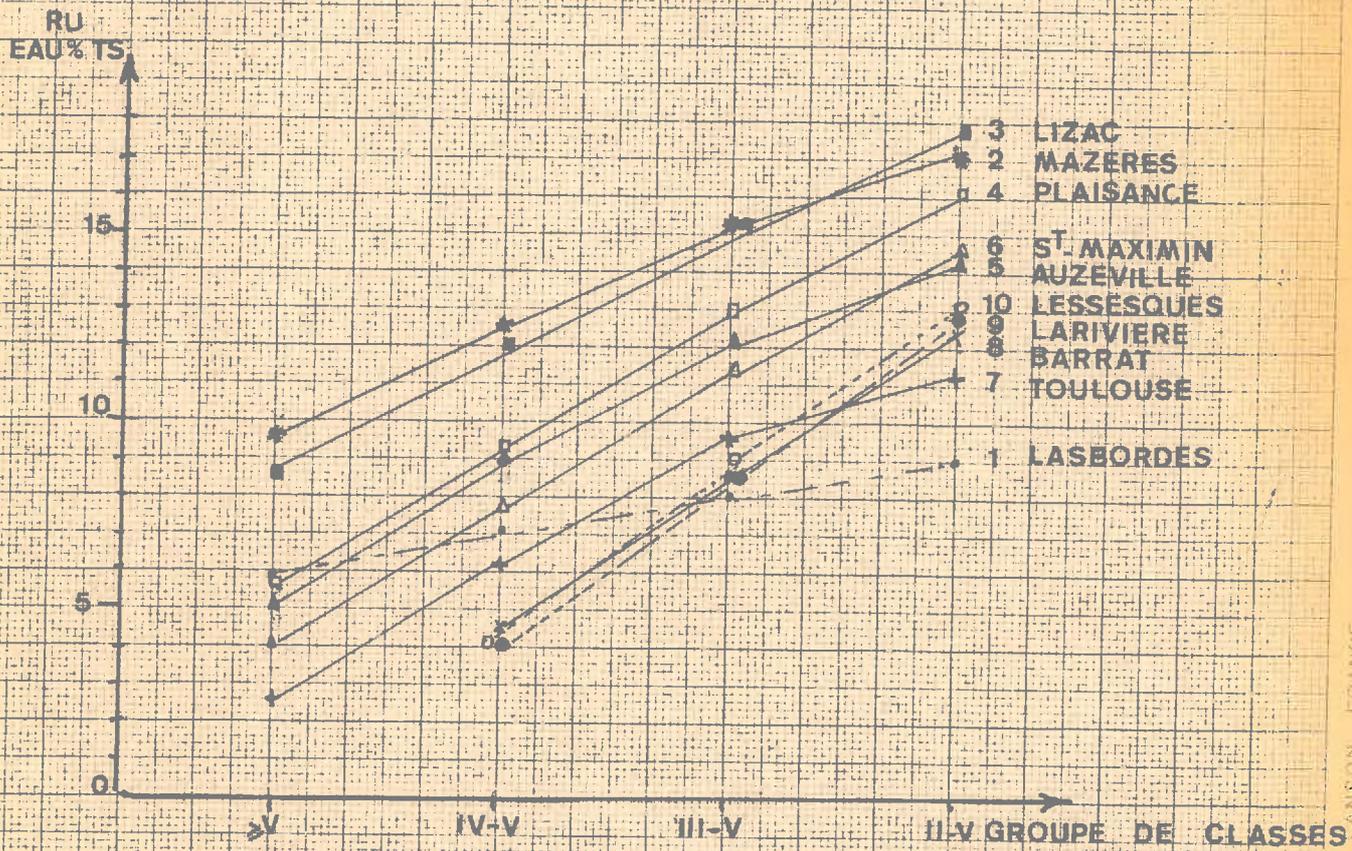


FIG. 42. CUMUL DE LA RU CONTENUE DANS LES CLASSES DE CAPILLAIRES

Ces caractéristiques se retrouvent pour l'ensemble des sols étudiés ; si nous faisons une répartition en 5 classes de capillaires, il apparaît un classement de sols (figure 40) qui rend bien compte de leur comportement global en débit, observé à la figure 12. La différenciation des terres apparaît également à la figure 41 où sont portés les pourcentages d'eau retenue successivement dans chaque classe de capillaires. Le phénomène est encore plus net si l'on représente la répartition de l'eau de la réserve utile en valeur cumulée en fonction des classes décroissantes (figure 42). On obtient de ce fait un classement des sols d'après leur réserve utile totale et leur comparaison pour des classes communes. On note alors que des sols argileux étudiés (8 - 9 - 10) ne deviennent comparables au point de vue des classes qu'à partir du groupe IV, lorsque les sols 1 et 2 ont perdu près de 70 % de leurs réserves, les sols 3 - 4 et 5 entre 40 et 50 % et les sols 6 et 7 environ 20 - 25 % (figure 43).

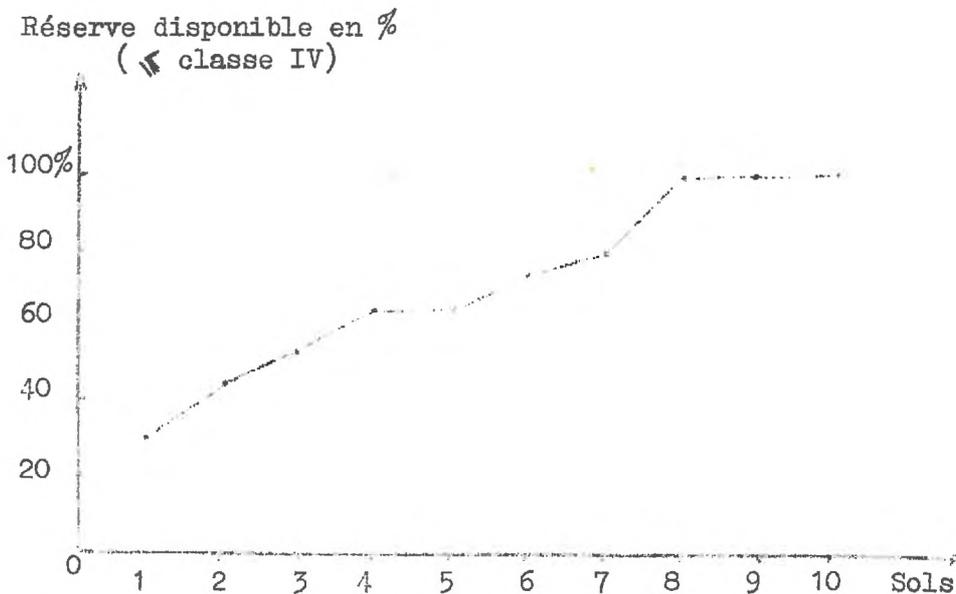


FIG. 43 : Comparaison des réserves utiles des différents sols appartenant à des classes communes comparables (≤ classe IV).

Les résultats rapportés ci-dessus faisaient apparaître des cessions d'eau montrant une grande variation avec les types texturaux ; cela peut donc s'expliquer par l'inégale répartition de l'eau de la réserve utile dans des classes de capillaires très variables.

C O N C L U S I O N

L'ensemble des résultats obtenus sur modèle, avec extraction de l'eau par le gel de silice, montre les grands traits suivants :

1°) Cession de l'eau : capacité des différents sols

a) Il existe, en conditions homologues, une grande différence dans la capacité de cession d'eau des sols étudiés (écarts d'environ 50 %). Cette capacité présente une assez bonne relation inverse avec le taux d'argile granulométrique. Le dessèchement s'effectue, très généralement, en trois phases distinctes, correspondant à des débits décroissants. La vitesse de dessèchement $\frac{\Delta H}{\Delta t}$, est d'abord importante puis décroît vite en condition de forte succion sur les limons, alors qu'elle est faible et beaucoup plus constante pour les sols argileux. L'amplitude est nettement moins forte pour les deux types avec les succions faibles.

b) Le débit instantané des sols limoneux est très supérieur à celui des sols argileux (au voisinage de la capacité au champ, ou avec une réserve d'eau assez élevée). De plus, la vitesse d'épuisement de leur réserve utile est également supérieure (d'environ 25 %, pour les cas étudiés).

c) Le phénomène de cession est très nettement influencé par les conditions expérimentales telles que : force de succion, température, humidité initiale, superposition de sols.

- dans ce dernier cas, et dans nos conditions d'essai, on constate que, pour deux éléments de même texture pris à deux humidités différentes, il n'y a pas de circulation d'eau à contre gradient; c'est-à-dire, lors de la succion, dessèchement du sol le moins humide par l'intermédiaire du plus humide.

- dans le cas de juxtaposition de plusieurs textures, le milieu argileux est celui qui présente le maximum de résistance à l'entraînement de l'eau, dans l'arrangement de ce sol avec un limon ou un sable. Si les trois textures fondamentales A.L.S sont en contact, les diverses combinaisons possibles,

montrent, en conditions hydriques comparables, que le sol argileux placé en position médiane se comporte toujours comme transmetteur d'eau, vis à vis des terres qui l'encadrent. Les superpositions les plus "prodigieuses" du point de vue de la cession d'eau sont celles avec le limon au contact de l'absorbant.

2°) Evolution des profils hydriques et mobilité de l'eau

a) En considérant le détail des mouvements de l'eau, on observe généralement sur les colonnes de sol soumises à la succion, l'existence d'un gradient d'humidité et, par conséquent, une différence de potentiel capillaire. L'ampleur de ce gradient dépend surtout des caractères texturaux mais également de l'intensité de la force d'extraction appliquée. Sur des profils hydriques présentant ce gradient, l'arrêt de la succion ne produit pas une uniformisation de l'humidité du sol, même après des temps assez longs (plusieurs jours). Par conséquent, le gradient de potentiel observé n'est pas, à lui seul, responsable des mouvements d'eau, ce qui rejoint des résultats signalés dans d'autres travaux (HALLAIRE, 1953-1964-1969). Les phénomènes d'hystérésis ne peuvent pas être invoqués puisque tous les essais ont toujours lieu en dessèchement.

b) Pour des contraintes déterminées et des conditions hydriques de sols définies, l'existence d'un gradient d'humidité traduit un manque de mobilité de l'eau sur son support. On peut donc considérer l'existence de ce gradient comme un indice comparatif, de résistance au mouvement de l'eau (ce qui rejoint, par exemple, la notion de résistance à la sécheresse).

c) Enfin, pour l'obtention de débits importants, l'humidité de la section de passage apparaît comme une notion importante. Cela suggère l'existence d'une section utile efficace dans les transports d'eau, prépondérante par rapport à des notions telles que : la réserve totale, l'humidité moyenne de l'échantillon ou même le pF moyen.

3°) Cessibilité de l'eau

L'étude de la capacité de cession ou "cessibilité" de l'eau des sols, amène à imaginer un comportement de type capillaire pour la gamme d'humidité utile aux végétaux. Cette analogie permet alors de représenter la circulation liquide de l'eau dans une gamme d'humidité, où l'importance de la phase vapeur est négligeable ; celle-ci n'intervenant beaucoup qu'aux très faibles teneurs en eau.

Pour définir la cessionabilité, il est nécessaire de connaître les sections réellement actives du point de vue des débits ainsi que la taille et le nombre moyen des pores effectivement fonctionnels dans le temps. Il existe une assez bonne concordance entre les rayons équivalents moyens obtenus par utilisation de la loi de POISEUILLE et ceux déduits de la loi de JURIN. Cette analogie capillaire, simplificatrice quant à l'explication des mécanismes, permet de rendre compte des différences de comportement des sols de textures variées, notamment en ce qui concerne l'évaluation de la vitesse relative d'évacuation des diverses fractions du stock d'eau.

La validité de ces résultats sera testée dans la partie suivante, en utilisant le végétal sur différents sols et avec des contraintes variées, en laboratoire et au champ, de manière à noter les points de convergence avec les déductions obtenues par emploi du modèle physique de racine.

T R O I S I E M E P A R T I E

MODALITES D'UTILISATION DE L'EAU NON SATURANTE

PAR LE VEGETAL

*~*****

Pour vérifier la validité des résultats obtenus sur modèle physique, les différents sols ont été mis en culture de manière à étudier les modalités de leur dessiccation, en présence du végétal et des phénomènes d'avancement racinaire. Nous distinguerons l'étude expérimentale menée en vases de végétation, sous conditions climatiques contrôlées (chambre de culture) et sous conditions naturelles (emploi d'abris grillagés). Dans le premier cas, nous envisagerons les problèmes de cession d'eau en fonction de textures de sols et dans le second cas, nous ferons intervenir d'autres paramètres comme l'humidité initiale, la porosité, les superpositions de sols, l'enrichissement en éléments, etc ...

I - COMPARAISON DES CESSIONS D'EAU DE DEUX SOLS EN CONDITIONS CLIMATIQUES
CONSTANTES ET VARIABLES

Nous avons mené simultanément deux essais : l'un (A) en conditions climatiques bien contrôlées et l'autre (B) en conditions naturelles mais sous abri, protégé de la pluie. En effet, pour s'approcher des phénomènes étudiés par l'intermédiaire d'un modèle, il est indispensable d'avoir recours à des conditions climatiques constantes. Nous avons utilisé pour cela une chambre de culture où l'on maintenait les conditions suivantes :

- température $25^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$
- humidité relative $45\% \pm 5\%$
- durée d'éclairement 13 heures
- flux lumineux 10 000 lux au niveau des plantes

L'évaporation moyenne journalière était de 8 mm, donc très forte. L'orge, variété Cérés, a été cultivée suivant la méthode STANFORD DE MENT et la transplantation a été effectuée sur des colonnes de 25 cm, contenant deux types de sols de propriétés extrêmes du point de vue des cessions d'eau : les sols 2 sablo-limoneux et 8 argileux, considérés à la capacité au champ.

La figure 44 indique les résultats obtenus dans les deux essais. On remarque que les courbes obtenues en conditions contrôlées sont très régulières, et comparables à celles que nous avons déjà observées avec le modèle physique. Les phénomènes se conservent dans l'essai B mais les courbes sont nettement moins homogènes du fait des fluctuations importantes de la demande climatique. Dans les deux cas (A et B) on remarque que le sol sablo-limoneux 2 cède plus d'eau que le sol argileux 8 dans le même laps de temps. Pour l'essai A, la figure 45 montre que le débit journalier est en début d'essai très supérieur pour le sol 2 puis diminue et finit par devenir inférieur à celui du sol 8 ; ces résultats sont beaucoup plus nets que ceux obtenus sur l'essai B en conditions non contrôlées. Mais quelles que soient les contraintes extérieures, le sol argileux maintient une vitesse de dessèchement relativement lente, et légèrement décroissante dans le temps. Ce type de sol présente donc une résistance à la dessiccation supérieure à celle du type limoneux ; ce phénomène apparaît très bien sur la figure 46 où sont comparées, pour les essais A et B, les pertes d'eau des deux sols. On note trois phases dans la cession d'eau, sous des conditions évaporantes variant de près du simple au double. En effet, si on trace sur la figure 46 la bissectrice de xoy et les tangentes aux courbes aux points I - II -

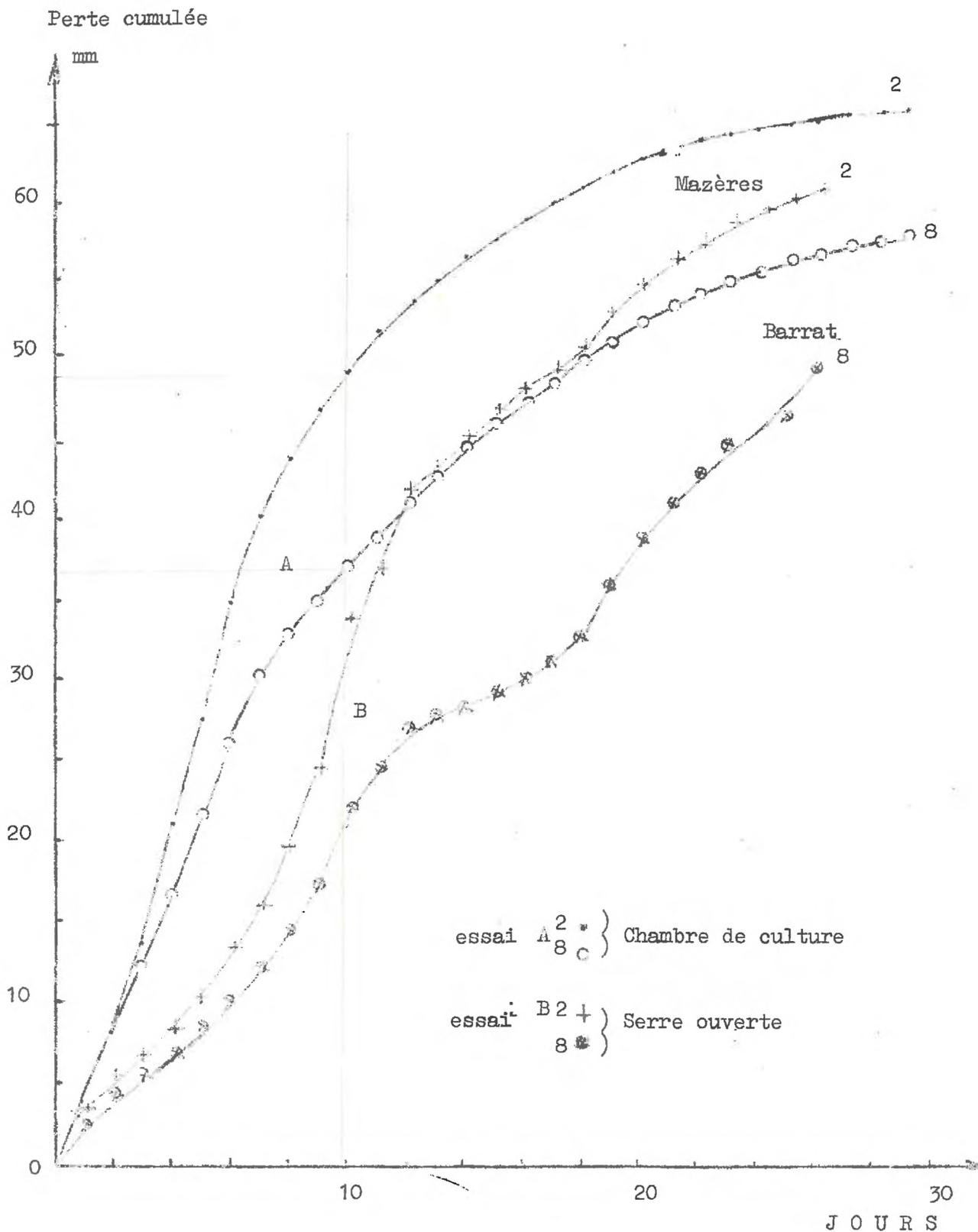


FIG. 44 : Cession d'eau dans le temps (Climat (A) constant ou (B) variable)
(Orge - Méthode STANFORD-)

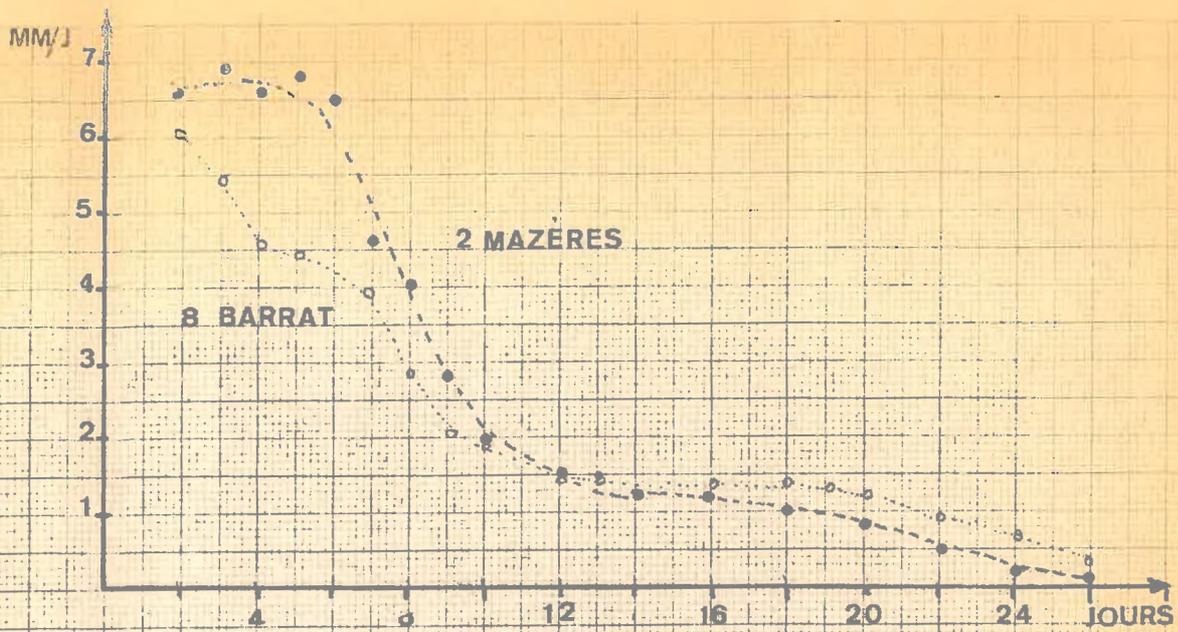


FIG 45. EVOLUTION DU DÉBIT JOURNALIER DANS LE TEMPS (ESSAI A)

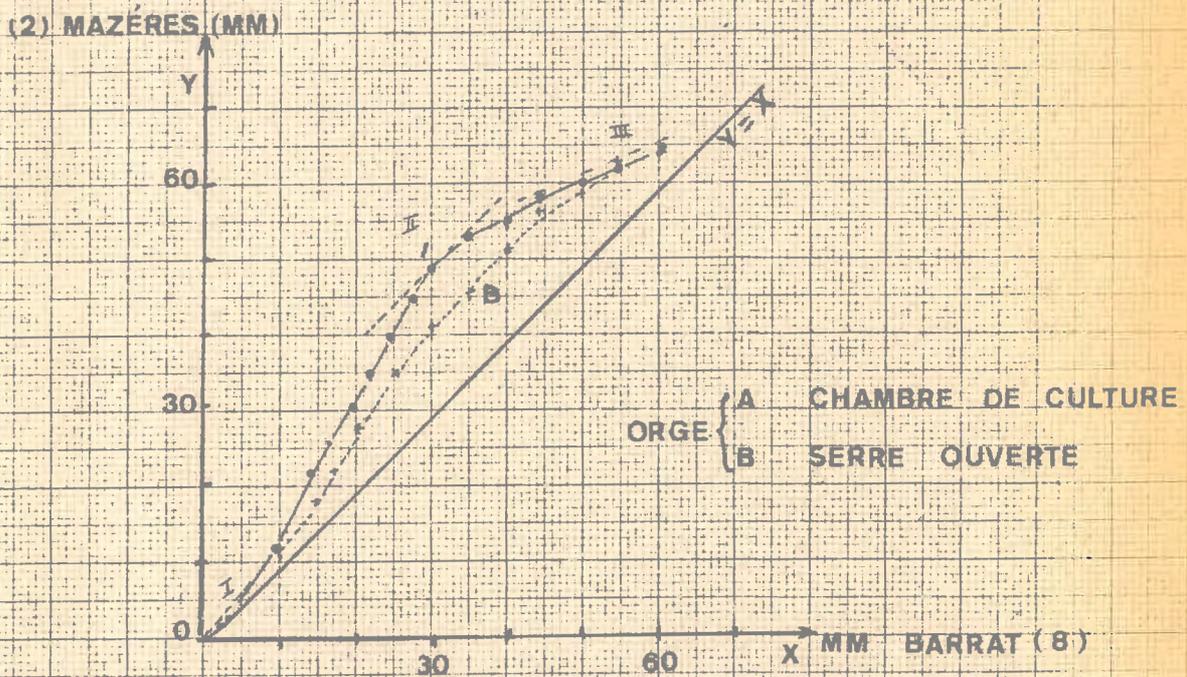
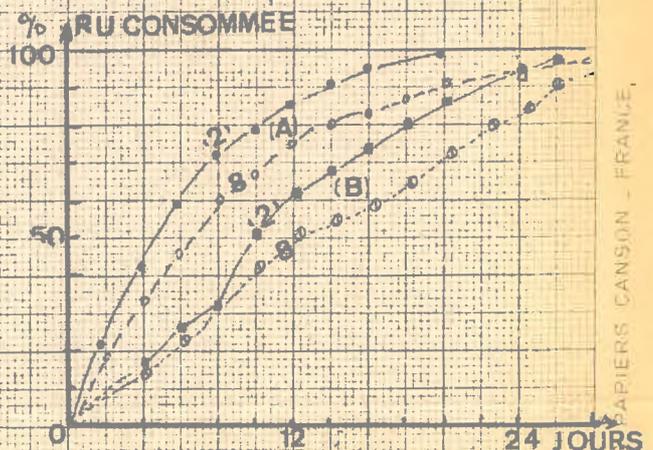
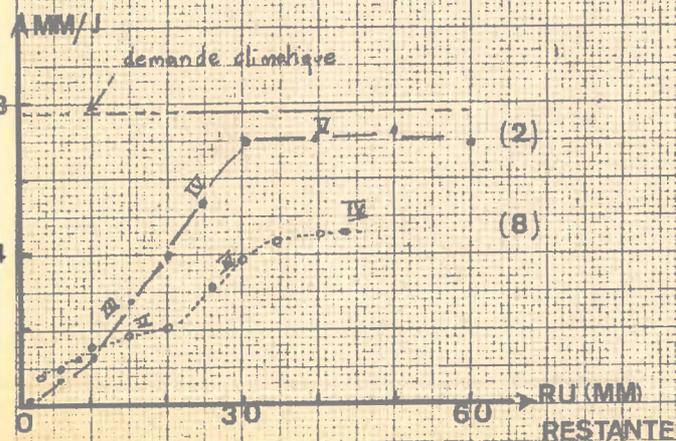


FIG 46. CESSION D'EAU COMPARÉE DE 2 SOLS (DÉPART C.C)

47. DÉBIT JOURNALIER (ESSAI A) ET CLASSES DE CAPILLAIRES

FIG 48. RU ÉPUISEE DANS LE TEMPS (ESSAIS A ET B)



III, on observe la phase I de débit rapide du sol sablo-limoneux pour les essais A et B, puis la phase II où les débits sont comparables entre les deux sols, et, enfin la phase III où le sol argileux maintient un débit résiduel assez faible mais supérieur au sol sablo-limoneux. Considérons maintenant, pour l'essai A, la variation du débit en fonction des réserves utiles restant dans le sol (figure 47), on observe, par rapport à une demande constante, l'existence d'un débit limite pour chaque sol. Il peut s'expliquer par la répartition différente, au même moment, des classes capillaires fonctionnelles; le sol 2 ayant, par exemple, plus de réserves dans les pores des classes IV et V débite instantanément plus que le sol 8. Les débits deviennent ensuite similaires pendant un temps donné, puis le sol 8 finit par avoir un débit résiduel assez important du fait de ses fortes réserves en classes II et III.

Enfin pour les essais A et B, la vitesse d'épuisement des réserves utiles est supérieure sur le sol 2 à celle notée sur le sol 8 (figure 48). Ce qui rejoint les phénomènes observés avec modèle, mais d'une manière moins tranchée du fait ici de l'avancement racinaire qui amène la prospection de zones plus humides.

On peut essayer de préciser la cinétique de la perte d'eau dans l'essai en conditions climatiques contrôlées. La courbe de la figure 44 montre une partie rectiligne, une partie incurvée, puis l'amorce d'un palier. C'est une courbe d'allure exponentielle dont on peut chercher l'expression en coordonnées semi-logarithmiques.

Soit $\frac{dx}{dt}$ la vitesse de dessiccation, c'est-à-dire la quantité d'eau perdue dans l'unité de temps. En début d'essai, la terre a une réserve d'eau utile R et à ce moment x est nul. A un moment t, une quantité déterminée x d'eau a été extraite, il reste alors dans la terre R - x. Si l'on écrit que la vitesse de dessiccation $\frac{dx}{dt}$ est, à chaque moment, proportionnelle à la quantité d'eau demeurant dans la terre, on obtient :

$$\frac{dx}{dt} = k (R - x) \quad (1)$$

En intégrant cette expression, on trouve, en passant par les logarithmes décimaux, la relation suivante :

$$2,3 \log \frac{R}{R - x} = kt \quad (2)$$

JOURS:	BARRAT		MAZÈRES	
	k_B	$2,3 \log \frac{R_B}{R_B - x}$	k_M	$2,3 \log \frac{R_M}{R_M - x}$
1	0,046	0,046	0,046	0,046
2	0,069	0,138	0,069	0,138
3	0,074	0,226	0,073	0,218
4	0,083	0,330	0,095	0,378
5	0,090	0,450	0,106	0,529
6	0,097	0,580	0,123	0,735
7	0,103	0,720	0,131	0,915
8	0,105	0,840	0,137	1,088
9	0,100	0,910	0,122	1,100
10	0,102	1,020	0,137	1,375
11	0,100	1,100	0,140	1,540
12	0,098	1,180	0,138	1,659
13	0,099	1,280	0,139	1,810
14	0,099	1,380	0,135	1,900
15	0,099	1,480	0,134	2,010
16	0,104	1,660	0,133	2,140
17	0,101	1,720	0,132	2,254
18	0,100	1,820	0,133	2,420
19	0,102	1,940	0,136	2,590
20	0,104	2,080	0,140	2,900
21	0,106	2,228	0,141	2,970
22	0,110	2,450	0,140	3,100
23	0,112	2,520	0,145	3,350
24	0,112	2,700	0,145	3,450
25	0,113	2,850	0,148	3,565
26	0,114	2,996	0,140	3,650
27	0,116	3,116	0,140	3,770
28	0,120	3,360	0,140	3,938
29	0,126	3,660	0,140	4,050
30	0,135	3,980	0,142	4,250

Tableau 18 Valeur des coefficients k_M et k_B pour les sols de Mazères et de Barrat

La constante k est une caractéristique de la vitesse de dessiccation considérée, et fonction également du type de sol. Le tableau 18 indique les résultats obtenus pour les sols de Mazères et de Barrat (essai A). Les valeurs de k Mazères sont supérieures à celles de Barrat. On obtient par ailleurs, au bout d'un certain temps t , une valeur de k pratiquement constante mais différente dans chaque cas, après une période d'évolution du coefficient k qui pourrait correspondre à l'établissement d'un gradient hydrique sur la colonne. Par conséquent, une quantité d'eau déterminée est extraite avec une vitesse plus faible lorsque la partie la plus facilement utilisable a été consommée. Ces paramètres permettent donc en conditions homogènes, de caractériser des sols différents. La cession apparaît pour une texture donnée comme une fonction assez directe de la réserve restante dans le sol, de même que nous l'avons remarqué avec l'emploi du modèle physique (figure 17).

II - CESSION D'EAU PAR DIFFERENTS SOLS AVEC UNE CULTURE D'ORGE

(CONDITIONS NATURELLES)

A partir de ces résultats, nous avons étudié, en conditions naturelles sous abri grillagé et avec la méthode STANFORD DE MENT, les caractéristiques de cession d'une gamme de sols plus étendue, en notant notamment les points suivants :

1 - Une dizaine de sols de texture différente ont été considérés à la capacité au champ au début de l'essai ; puis les colonnes ont été laissées en dessèchement permanent sous l'effet de la culture d'orge.

2 - L'influence de l'humidité initiale a été testée sur le sol 4 (plaisance) en réalisant 3 teneurs en eau au début de l'expérience. Le sol a ensuite été laissé comme précédemment en dessèchement permanent par l'intermédiaire du végétal.

3 - L'effet du maintien des sols à humidité constante a été étudié sur 3 terres (1 - 4 - 7) en procédant à l'arrosage régulier des colonnes par de fins tuyaux perforés, disposés à plusieurs niveaux dans la terre. Les résultats obtenus ont permis également des comparaisons avec les points 1 et 2.

4 - Enfin, l'effet de la porosité a été observé sur le sol 4.

La colonisation radriculaire et la production de matière sèche ont également été suivies. Enfin, les essais effectués sur 70 colonnes de 50 cm ont été réalisés avec 2 ou 3 répétitions suivant les cas (photos 1- 2-3 ; page).

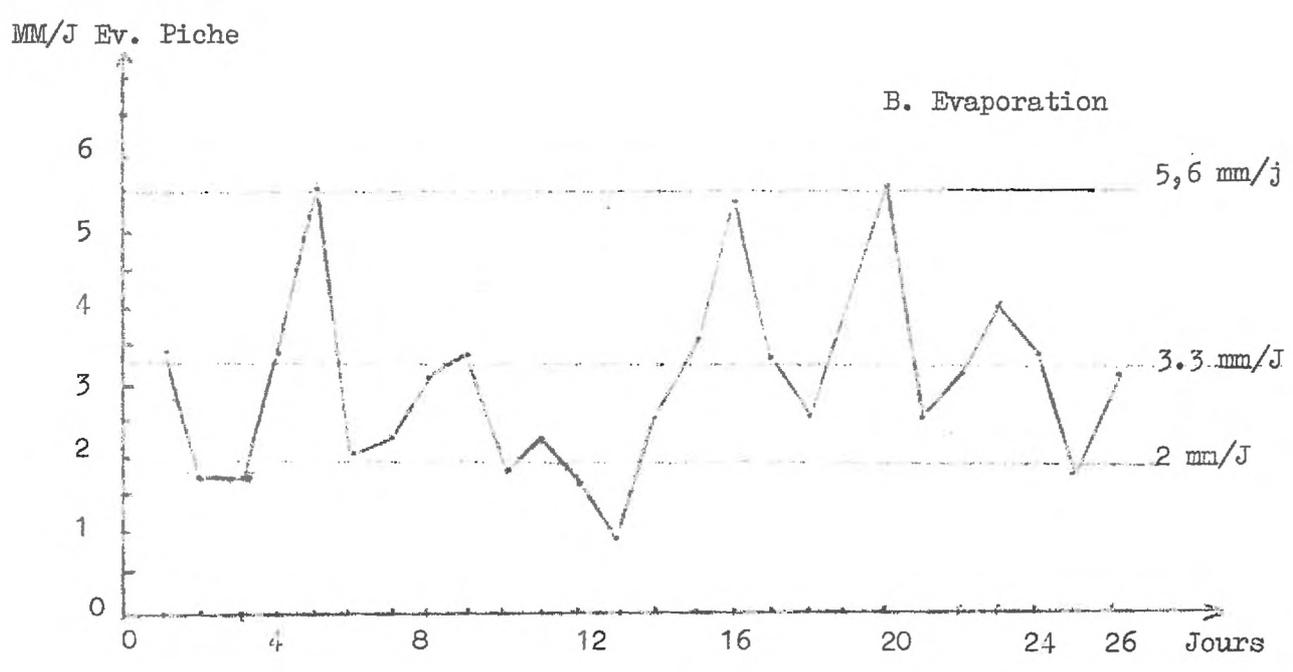
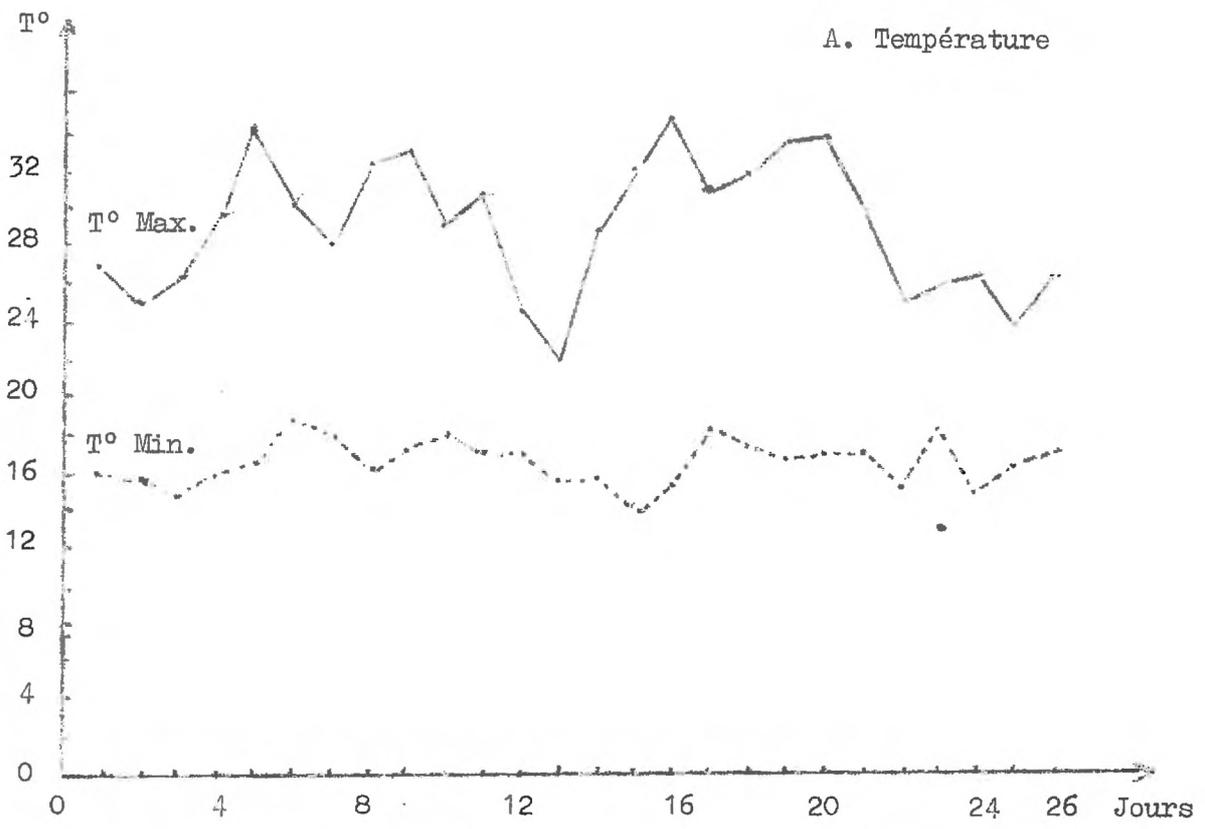
La figure 49 montre l'évolution des facteurs climatiques pour les 26 jours d'essai. Les contraintes ont été moyennes, avec une température pas très élevée et une évaporation PICHE moyenne de 3,6 mm/j. On peut toutefois regrouper trois séries de jours à demande climatique assez voisine : 2 mm/j - 3,3 mm/j - 5,6 mm/j, dont nous comparerons les incidences respectives.

A - COMPORTEMENT DES VEGETAUX

Les résultats recueillis avec les divers sols (tableau 19) concernent : la production de matière sèche, l'importance de la colonisation radriculaire, la consommation d'eau, le coefficient de transpiration (eau consommée/MS tige + feuille, avec référence à la MS produite seulement durant l'essai, c'est-à-dire poids récolte - poids à l'implantation), enfin, les teneurs en éléments minéraux des plantes.

Le coefficient de transpiration est, à part 3 cas (4 - 7 - 8) relativement voisin pour les divers sols étudiés (en moyenne 274 g d'eau consommée par gramme de matière sèche produite). Il y a un net écart des capacités de cession et un effet sur l'élaboration de matière sèche ; ainsi il existe pour la production totale une relation de type linéaire avec la consommation d'eau (figure 50). D'autre part, on remarque très peu de différence avec les racines considérées seules. Elles sont en quantité à peu près égale dans toutes les terres, de même que dans les éléments STANFORD. L'homogénéité est encore meilleure si l'on considère la totalité des racines, car il y a quelques difficultés dans leur affectation dans la zone de séparation "Sol - élément de préculture". Les différents sols peuvent être comparés entre eux puisqu'ils présentent des enrachements similaires.

Du point de vue chimique, la teneur en phosphore et en azote est assez constante ; elle est plus variable mais souvent élevée pour le potassium. Pour le calcium, les teneurs ^{sont} relativement voisines dans la plupart des traitements. Les teneurs globales en élément minéraux restent par conséquent de l'ordre de grandeur de celles rencontrées habituellement, (COIC et al., 1962) (orge âgée d'une quarantaine de jours à la récolte). La richesse initiale du sol, pour la durée et les conditions de l'essai, n'a donc pas spécialement influencé les phénomènes de cession d'eau. Le sol le plus riche (7 Toulouse) n'a pas, par exemple, les plus fortes teneurs ni la cession la plus élevée ; il reste, comme pour les essais



A Température sous abri (Max et Min)
B Evaporation Piche.

FIG. 49 : Conditions climatiques

SOLS	Production de matière sèche (g)					M.S. Totale (T + F + R)	Coefficient Transpira- tion EAU (T+F) mm	Consomma- tion d'eau (g)	Teneur en éléments (Tiges + F) % de M. S.			
	Tiges + Feuilles M.S. Totale	éléments Stanford	Racines sols	totalité racines					N	P	K	Ca
1	3,150	1,180	0,509	1,689	4,839	284	8	640	3,14	0,25	4,08	1,15
3	6,100	1,041	0,405	1,446	7,546	265	125	1380	3,52	0,32	4,17	1,40
4	3,910	0,857	0,665	1,522	5,432	355	97	1069	3,58	0,18	3,90	1,35
5	4,900	1,110	0,572	1,682	6,582	250	91	1000	3,38	0,28	4,30	1,41
6	4,230	0,840	0,675	1,515	5,945	269	88	950	3,03	0,21	4,66	0,98
7	3,150	0,905	0,565	1,470	4,620	317	65	714	3,63	0,19	4,33	1,26
8	3,540	1,195	0,0663	1,858	5,398	205	49	542	3,16	0,19	3,10	0,82
9	2,800	1,042	0,374	1,416	4,216	272	47	516	2,48	0,19	1,92	0,98
10	2,950	1,104	0,443	1,546	4,497	251	47	515	2,55	0,22	2,02	1,17
Moyennes	3,88	1,030	0,541	1,402	5,928	274						
STANFORD	0,900	0,420			1,320							
Référence	2,100	1,910			4,010							
									Départ } alimenté en eau uniquement Récolte }			

Tableau 19 Production de M.S. , consommation, coefficient de transpiration et teneurs en éléments minéraux sur les différents sols.
Comparaison avec les éléments STANFORD alimentés en eau uniquement.

sur modèle, voisin du sol 1 de Lasbordes, alors que ce dernier n'est pas très riche chimiquement. Nous aborderons toutefois, plus loin et très brièvement, l'influence des éléments minéraux sur la cession d'eau, l'apport d'éléments jouant un rôle bien connu sur la consommation d'eau par les végétaux (BLANCHET 1958 ; PERIGAUD 1967 ; BLANCHET-BOSC-MAERTENS, 1969 ; LEMAIRE, 1969).

On peut donc envisager l'étude comparative de la cession d'eau des différents sols, étant donné le comportement très régulier du végétal et l'homogénéité de l'enracinement.

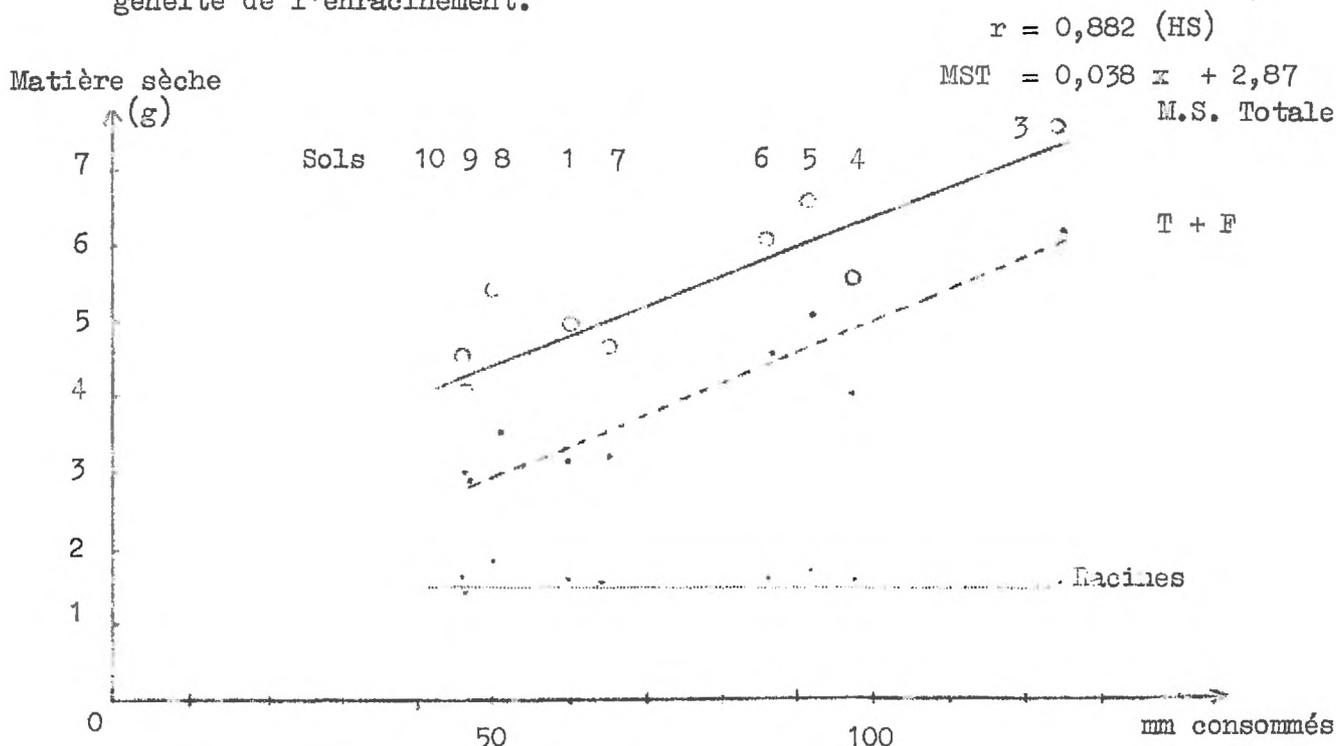


FIG. 50 : Production de matière sèche et consommation d'eau (orge - essai sur STANFORD)

B - CESSION D'EAU PAR LES DIFFERENTS SOLS

Les divers sols ont été humidifiés à la capacité au champ puis laissés en dessiccation permanente sous l'influence de la végétation. Les réserves utiles initiales sont indiquées au tableau 20 ; elles diffèrent du simple au double entre les extrêmes, mais avec une variation à peu près continue pour la gamme des sols.

Sols	Lasbordes	Toulouse	Barrat	Larivière	Lessesques	Auzeville	St Maximin	Plaisance	Lizac
Réserve:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
utile :	1,30	1,71	1,80	1,87	1,93	2,09	2,15	2,30	2,7
mm/cm :	:	:	:	:	:	:	:	:	:
Colonne:	65	85,5	90	93,5	96,5	104,5	107,5	115	135
mm :	:	:	:	:	:	:	:	:	:

Tableau 20 Réserves utiles dans les colonnes de sol (sols à la capacité au champ)

La figure 51 donne l'évolution de la cession d'eau dans le temps. On remarque que les pertes sont très différentes, il existe une classification des sols qui se conserve pendant la durée de l'essai. Les écarts sont du simple au quadruple vers le 16 - 17ème jour et du simple au triple à la fin de l'essai ; les contraintes climatiques étant identiques pour tous, la cession d'eau du sol en présence d'un végétal reste fonction du type textural, ce qui rejoint bien les déductions obtenues sur modèle.

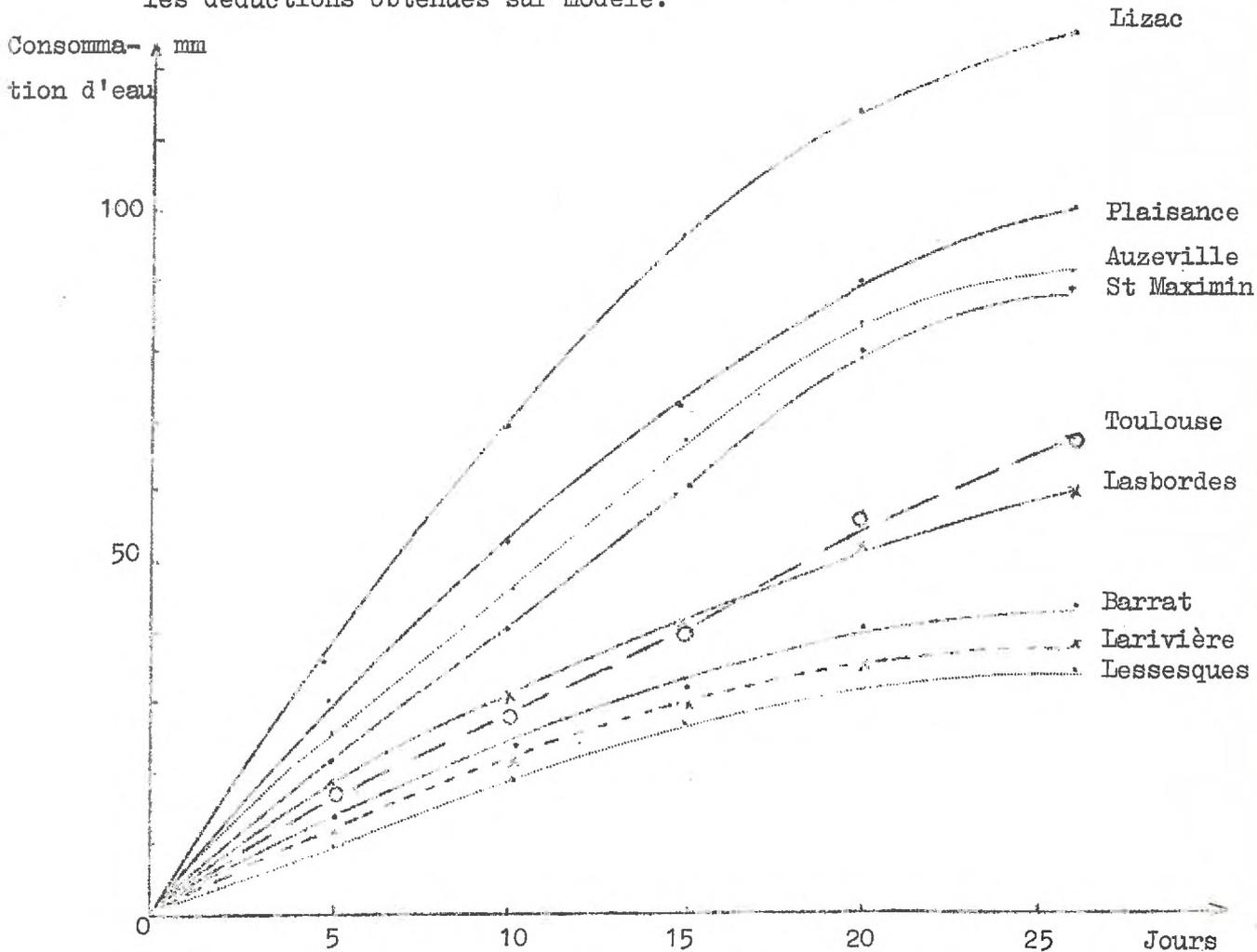


FIG. 51 : Consommation dans le temps sur les différents sols (orge).

Si l'on considère le pourcentage d'épuisement de la réserve utile dans le temps (figure 52) on arrive en fin d'essai à des écarts atteignant environ 40% entre les valeurs extrêmes. Le classement obtenu est alors très voisin de celui réalisé avec l'emploi du gel de silice (figure 14). Par conséquent, il apparaît nettement ici aussi que les sols argileux se vident beaucoup plus lentement que les sols à tendance limoneuse. Enfin, en examinant le taux d'utilisation de la RU en fonction de la teneur en argile et à 2 temps différents (10ème et 15ème jours) nous obtenons (figure 53) une représentation très similaire, quoique un peu plus accusée, de celle enregistrée avec le modèle (figure 15).

Par ailleurs, les profils hydriques effectués, en milieu et en fin d'essai, montrent des allures caractéristiques des différents sols. En effet,

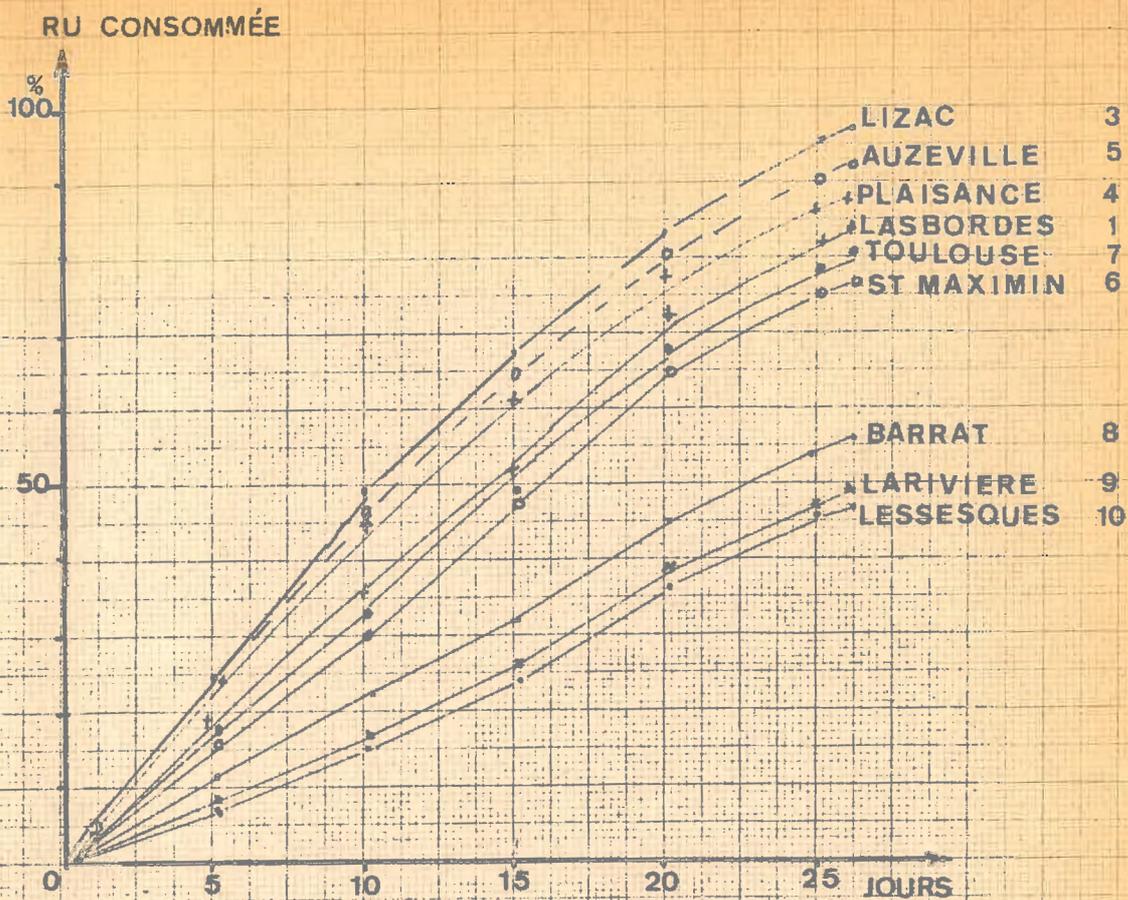


FIG.52 TAUX D'ÉPUISEMENT DE LA RU EN FONCTION DU TEMPS

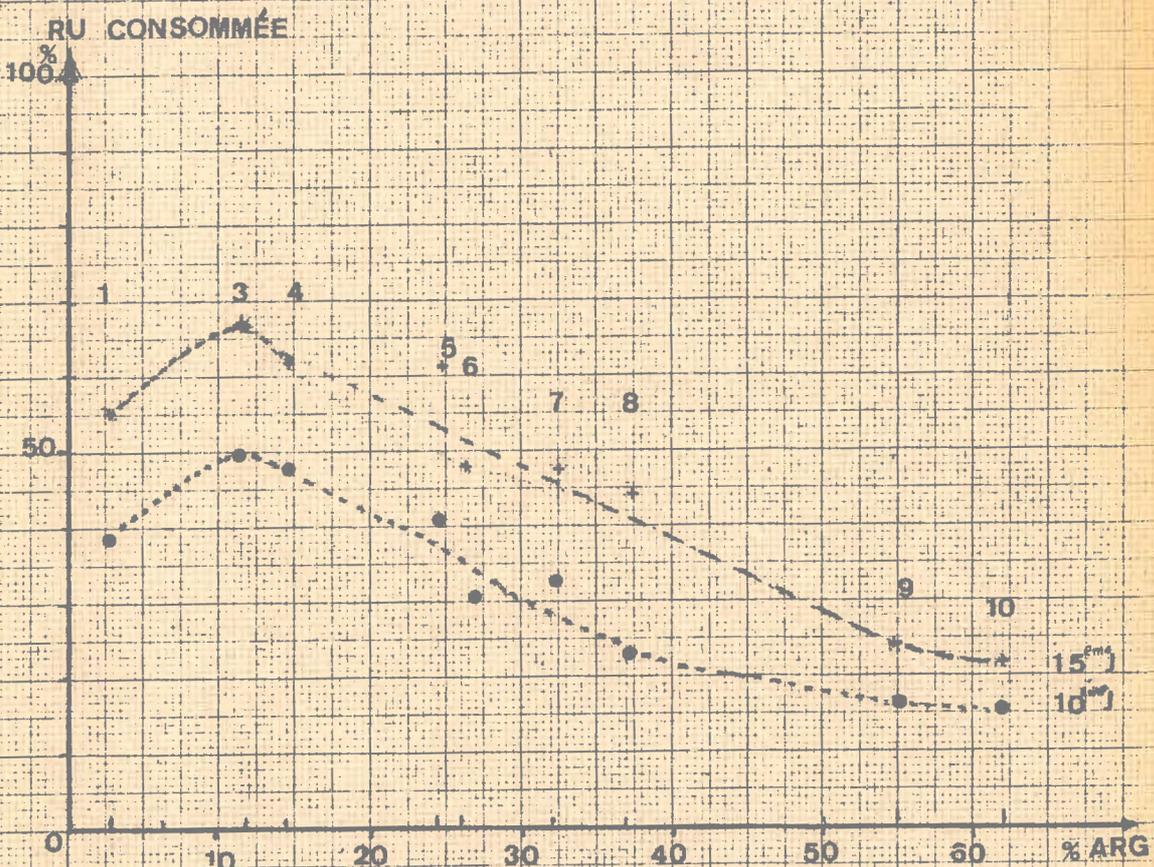


FIG.53 ÉPUISEMENT DE LA RU ET TENEUR EN ARGILE

le gradient d'humidité est d'autant plus accusé que le sol est plus argileux, et cela malgré la présence des racines (figure 54). Ces données rejoignent bien à nouveau les observations faites avec l'absorbant physique (figure 13). L'ensemble de ces résultats indique donc l'existence d'une bonne correspondance entre les phénomènes observés avec emploi du modèle de racine et avec utilisation du végétal.

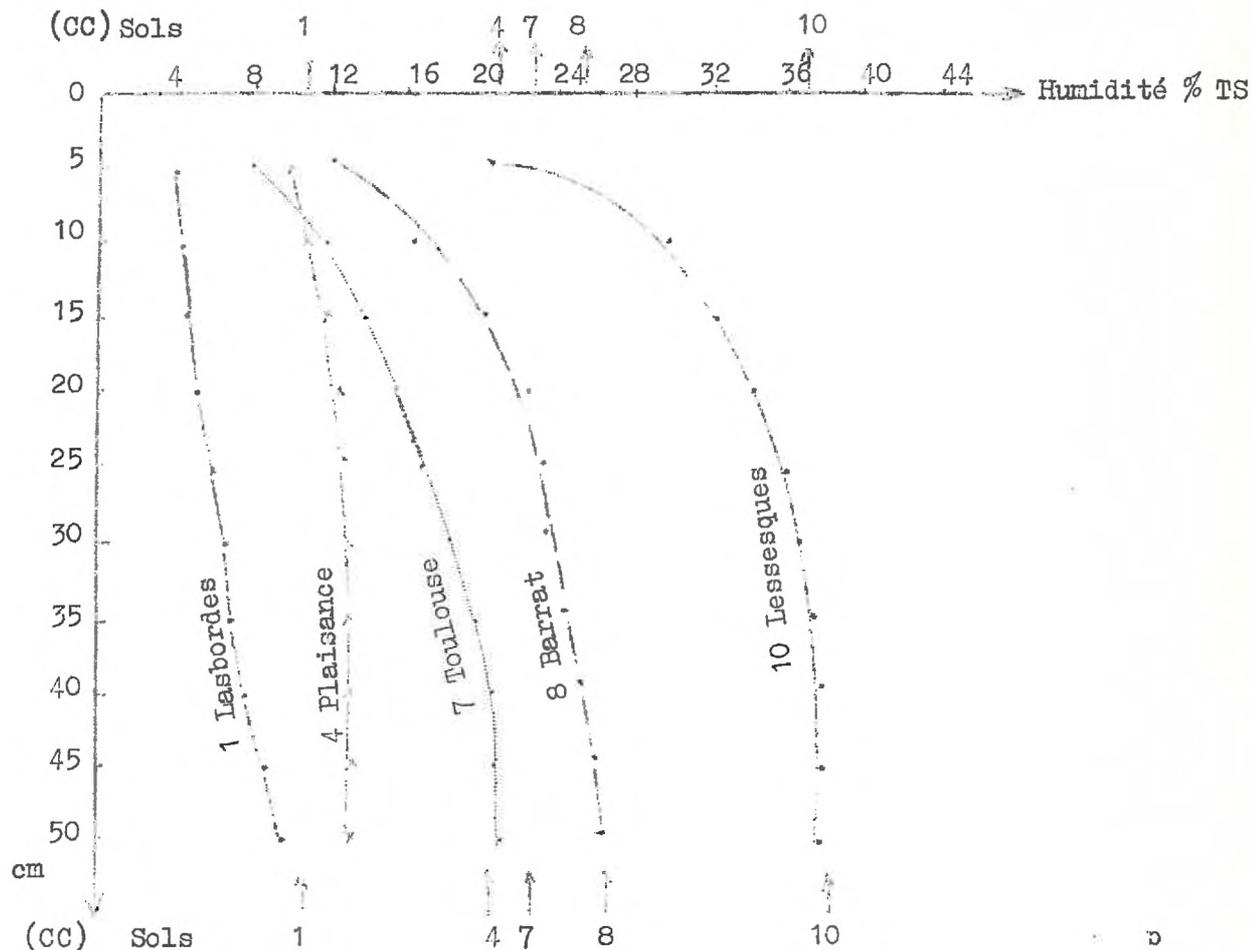


FIG. 54 : profils hydriques sur quelques sols (14ème jour de culture)

C - CESSION D'EAU EN CONDITIONS CLIMATIQUES FLUCTUANTES

Si l'on examine les pertes journalières, on remarque que les sols suivent régulièrement mais à des niveaux différents, les fluctuations climatiques (figure 55). Suivant l'intensité de la contrainte, les rapport des pertes entre les sols varient de 1 à 5 par forte demande (5ème jour) et de 1 à 3 par faible demande (7ème jour). Le regroupement de jours présentant une demande voisine permet alors d'obtenir la réaction des sols pour des conditions homologues : l'histoire

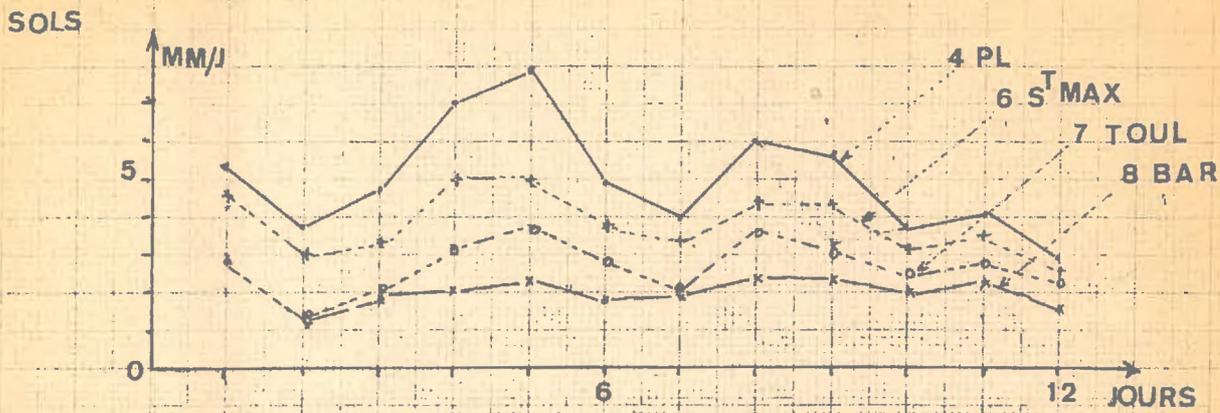
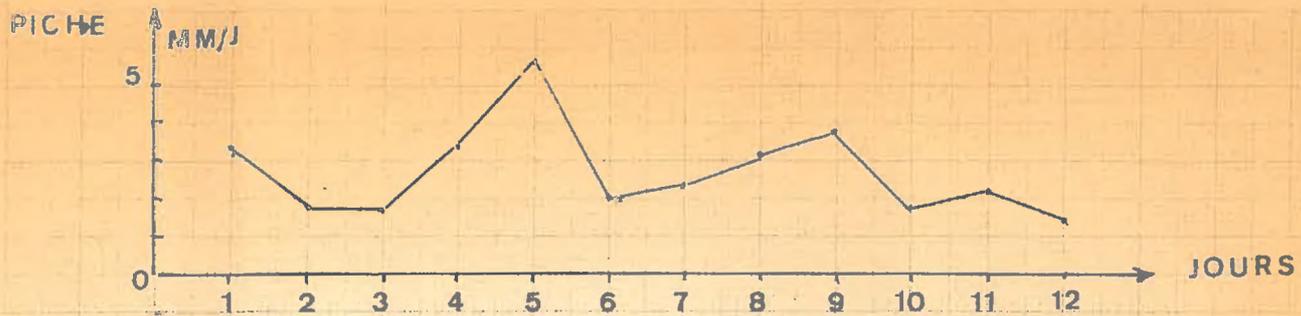


FIG. 55 CESSION JOURNALIERE D'EAU SUIVANT L'INTENSITE DE LA DEMANDE CLIMATIQUE

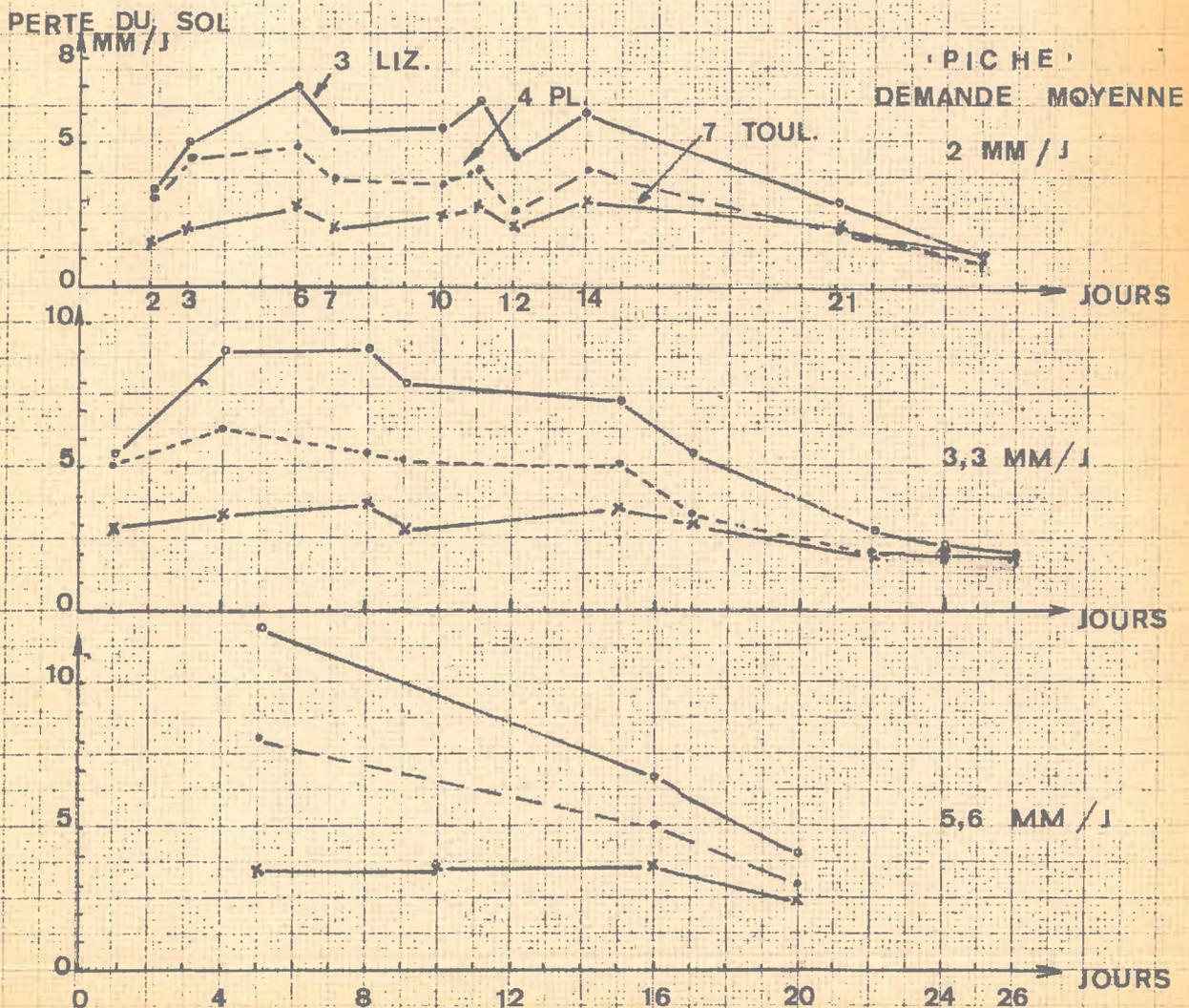


FIG. 56. PERTE JOURNALIERE DANS LE TEMPS.

climatique antérieure étant elle même identique. La figure 56 montre le comportement des sols pour trois régimes de demande ; les écarts sont moyens en faible pouvoir évaporant et élevés lorsque celui-ci devient fort. Par ailleurs, en prenant trois jours successifs à demande croissante, on note que le débit se conserve, c'est-à-dire que les sols gardent leur caractéristique de cession malgré des réserves diversement entamées. Ce fait cesserait naturellement si l'on se rapprochait de l'épuisement.

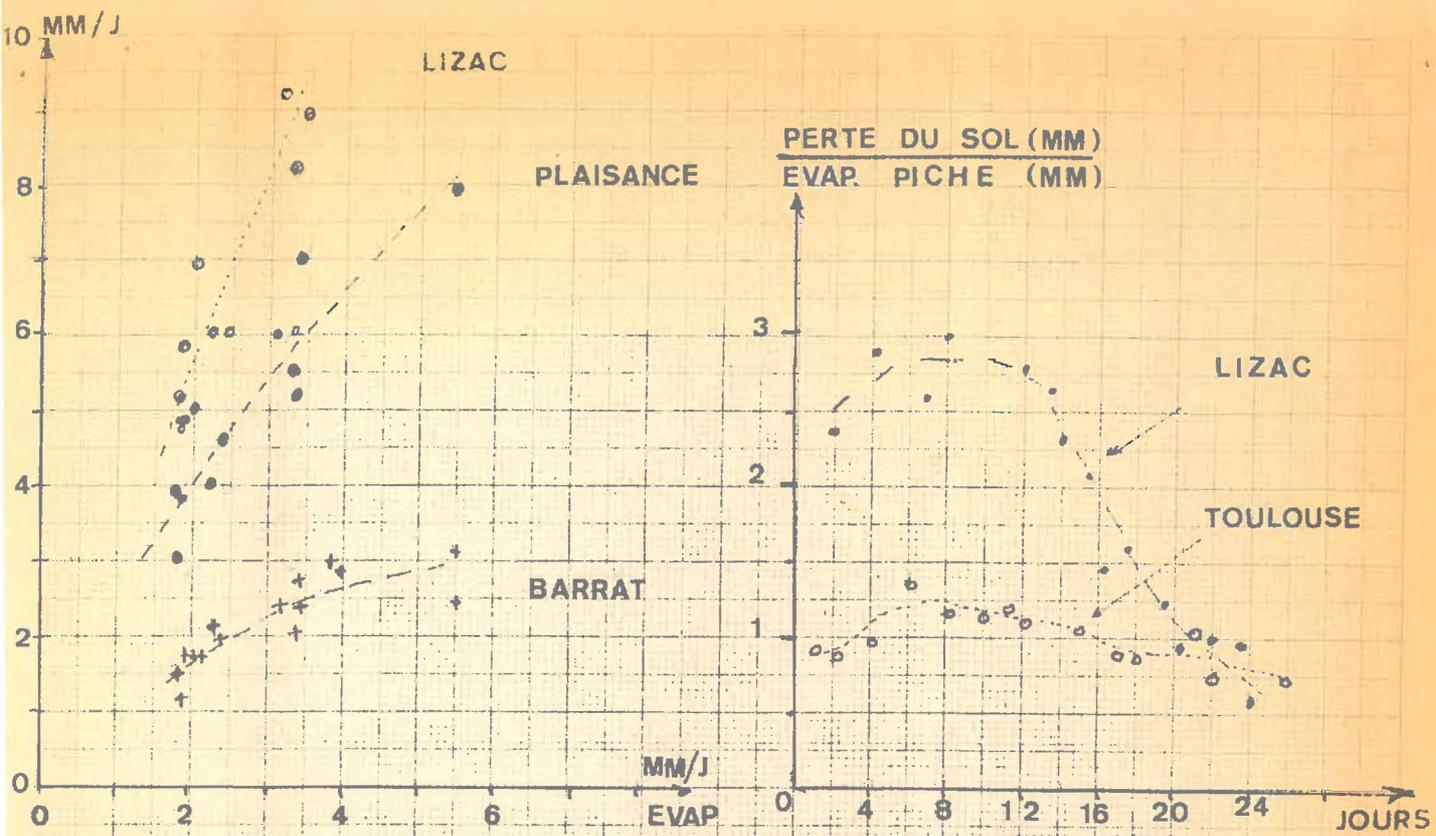
Pour un même type de demande et à deux moments différents, nous remarquons que les sols les plus argileux ne dépassent pas une cession de 4 - 5 mm/j, quelles que soient les conditions extérieures ; tandis que les sols de type limoneux atteignent une dizaine de mm. La figure 57 montre les écarts observés en fonction de ces demandes, sur une série de jours et pour quelques sols types. La pente des droites indique la faculté de réponse à la demande ; elle est élevée en sol limoneux et faible en sol argileux. Si l'on réalise alors le rapport

cession d'eau du sol (mm) on obtient une représentation schématique du taux
évaporation du Piche (mm)

de réalisation de la demande par les divers sols (figure 58). Il est normal dans les conditions spéciales de l'essai en pôt (surfaces latérales soumises aux effets d'advection) que le rapport puisse dépasser 1. Dans les conditions de l'essai, il existe un palier plus ou moins long, indice d'un débit qui suit la demande, mais à des niveaux différents selon les sols. Pour les terres argileuses, le rapport relativement faible se maintient assez longtemps pour décroître lentement en fin d'essai. Par contre, en sols limoneux, le rapport est initialement élevé puis on assiste à une chute assez brutale pour arriver à un débit résiduel qui finit par être égal puis inférieur à celui des sols argileux.

D - RELATION ENTRE LA CESSION D'EAU ET LES CARACTERES PHYSIQUES DU MILIEU

En exprimant la cession d'eau en fonction de la teneur en argile ou argile + limon fin et également en fonction des surfaces totales, on note que, excepté le cas du sol sableux, la cession diminue régulièrement entre 10 et 37 % d'argile (figure 59) ; il existe ensuite une décroissance très faible sur notre gamme de terres. On peut donc repérer l'existence d'un palier au-delà de 37 % d'argile. Ce type de comportement se retrouve en prenant la somme des éléments fins < 2 microns . En considérant les surfaces totales, le palier est obtenu à partir d'une surface d'environ 100 m²/g de terre sèche. (figure 60).



G. 57. PERTE D'EAU JOURNALIERE EN FONCTION DE LA DEMANDE

FIG. 58. RAPPORT PERTE DU SOL... EVAPORATION PICHE DANS LE TEMPS

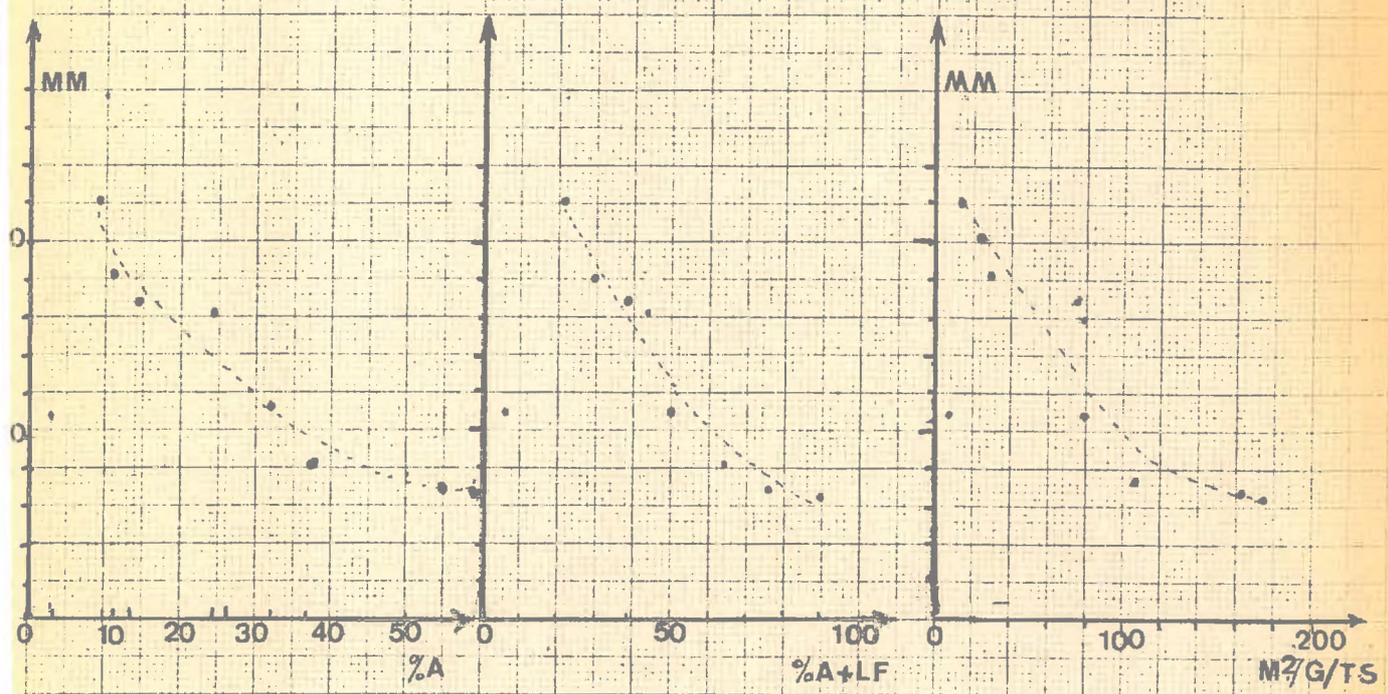


FIG. 59. PERTE D'EAU (20^{ème} JOUR) EN FONCTION DU TAUX D'ARGILE ET ARGILE + LIMON

FIG. 60. PERTE EN FONCTION DE LA SURFACE TOTALE

(écart d'environ 7 %).

Si nous comparons les profils hydriques A, B, C entre eux, on remarque (figure 62) un gradient d'humidité $\frac{\Delta H}{\Delta Z}$ plus marqué sur le sol le moins humide, ce qui rejoint les résultats précédemment rapportés dans la partie de l'étude avec modèle. Du point de vue de l'enracinement on constate une bonne colonisation sur les 30 premiers cm de la colonne, avec un poids de racines supérieur à tous les niveaux pour le sol C, le mieux pourvu en eau au départ. Ce sol a par conséquent permis un bon enracinement, lequel a accentué les possibilités

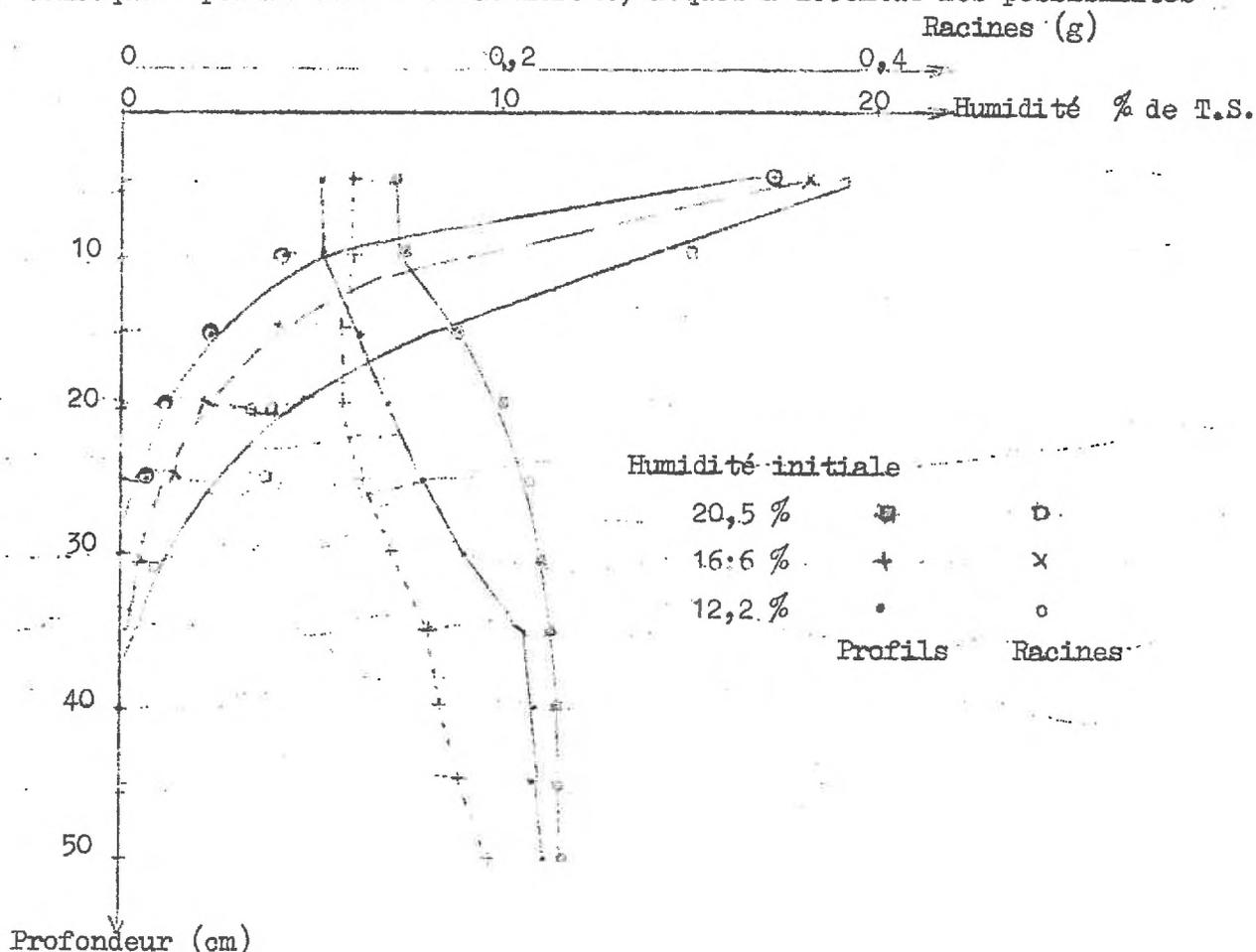


FIG. 62 : Profils hydriques 20ème jour - Limon (4) à 3 humidités initiales et profils racinaires.

de cession d'eau. En effet, si nous comparons les vitesses relatives d'épuisement des réserves, nous remarquons qu'elles sont faibles pour le milieu le plus sec A et assez élevées mais voisines pour les deux sols humides B et C (tableau 21)

	A	B	C
Humidité initiale du sol	12,2 %	16,6 %	20,5 %
Réserve utile mm	mm/cm : 1,1	1,71	2,3
	colonne : 55	85,5	115
Taux d'épuisement de la Ru	5ème jour : 10	24	24
	10ème jour : 20	42	44
	15ème jour : 33	61	60
	20ème jour : 45	79	76
	26ème jour : 53	87	91

Tableau 21 Taux d'épuisement de la réserve utile pour le sol de limon 4, à trois humidités initiales différentes.

Enfin, on peut remarquer que la cession d'eau est en définitive très nettement influencée par la réserve initiale : la figure 63 regroupe les résultats obtenus jusqu'ici avec l'ensemble des sols, plus les sols de limons A, B, C considérés à différentes humidités initiales et étudiés ci-dessus. Il existe une relation sensiblement linéaire qui se conserve lorsque l'on considère différents temps (exemple : 5ème jour, 20ème jour). On peut donc estimer que la section réellement efficace du point de vue de l'eau est supérieure dans les sols à forte RU, ce qui rejoint les phénomènes rencontrés sur modèle physique. Enfin, la colonisation racinaire est très voisine pour les sols différents (tableau 19) et ne semble donc pas effacer les différenciations propres à la texture.

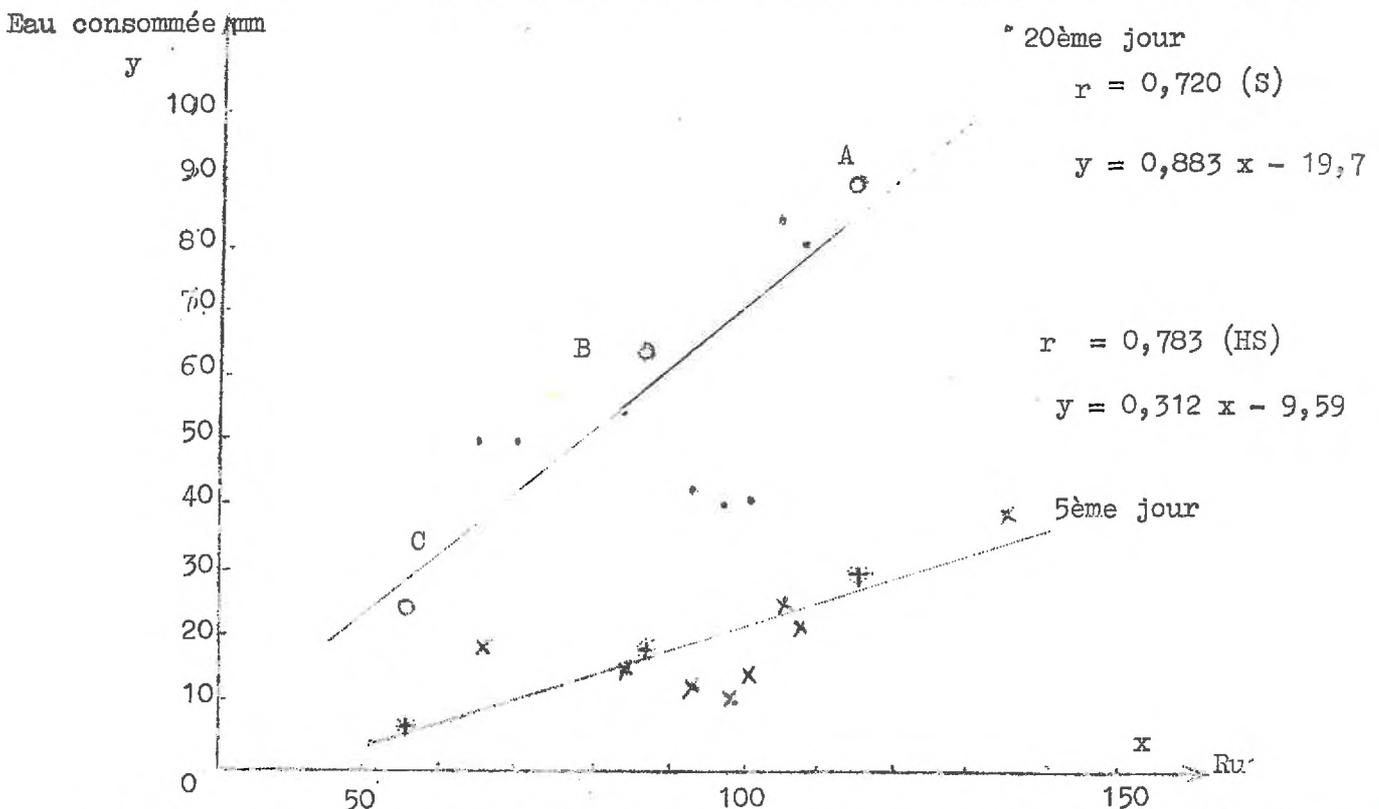


FIG. 63 : Perte totale à différents temps en fonction de la réserve utile des sols.

2°) Comparaison de sols en dessèchement permanent par rapport au sol maintenu à humidité constante

La figure 64 montre la comparaison dans le temps, des trois sols A,B,C par rapport au même sol A maintenu à humidité constante. On obtient alors la capacité de cession à chaque moment par rapport au débit potentiel réalisé sous une contrainte déterminée. Il apparaît nettement que les sols A,B,C ne peuvent pas maintenir ce débit potentiel dans les conditions de l'essai et que la décroissance est d'autant plus rapide que l'humidité de départ est faible (sol C). Le sol de Lizac est reporté à titre indicatif sur le même graphique pour mettre son comportement en parallèle avec le sol de Plaisance pris à trois humidités. Ce n'est qu'en présence d'une texture très favorable (Lizac) que le débit s'éloigne le moins de celui du milieu arrosé, ce qui confirme bien l'ensemble des faits exposés ci-dessus, débit potentiel %

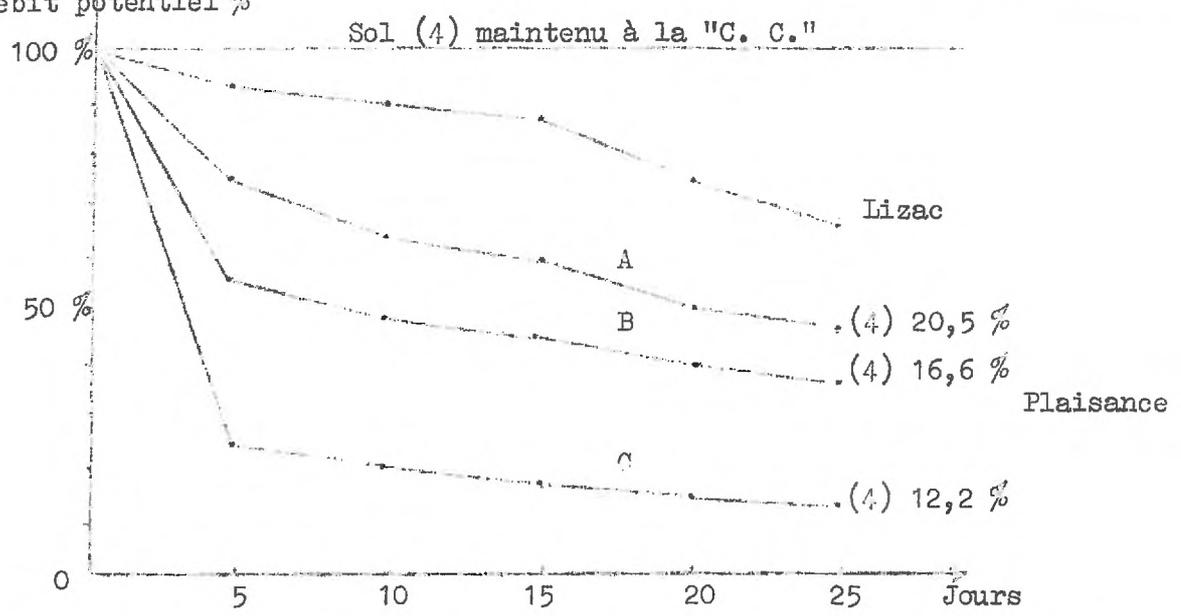


FIG. 64 : Evolution du rapport des pertes d'eau entre un sol maintenu à la C.C. et des sols en dessèchement

3°) Comparaison de sols maintenus à humidité constante (culture d'orge)

Pour connaître le potentiel de cession de l'eau du sol humide, trois terres 1 - 4 - 7 ont été maintenues à la capacité au champ par des arrosages journaliers. Il apparaît à nouveau (figure 65) que les différenciations induites par

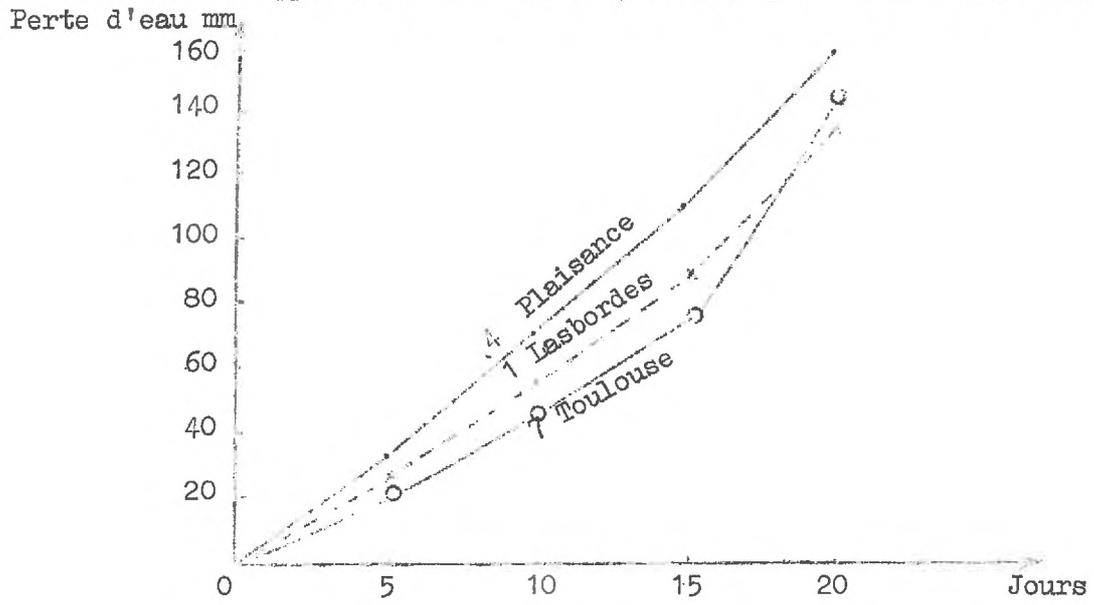


FIG. 65 : Cession d'eau pour 3 sols maintenus à la capacité au champ (Orge)

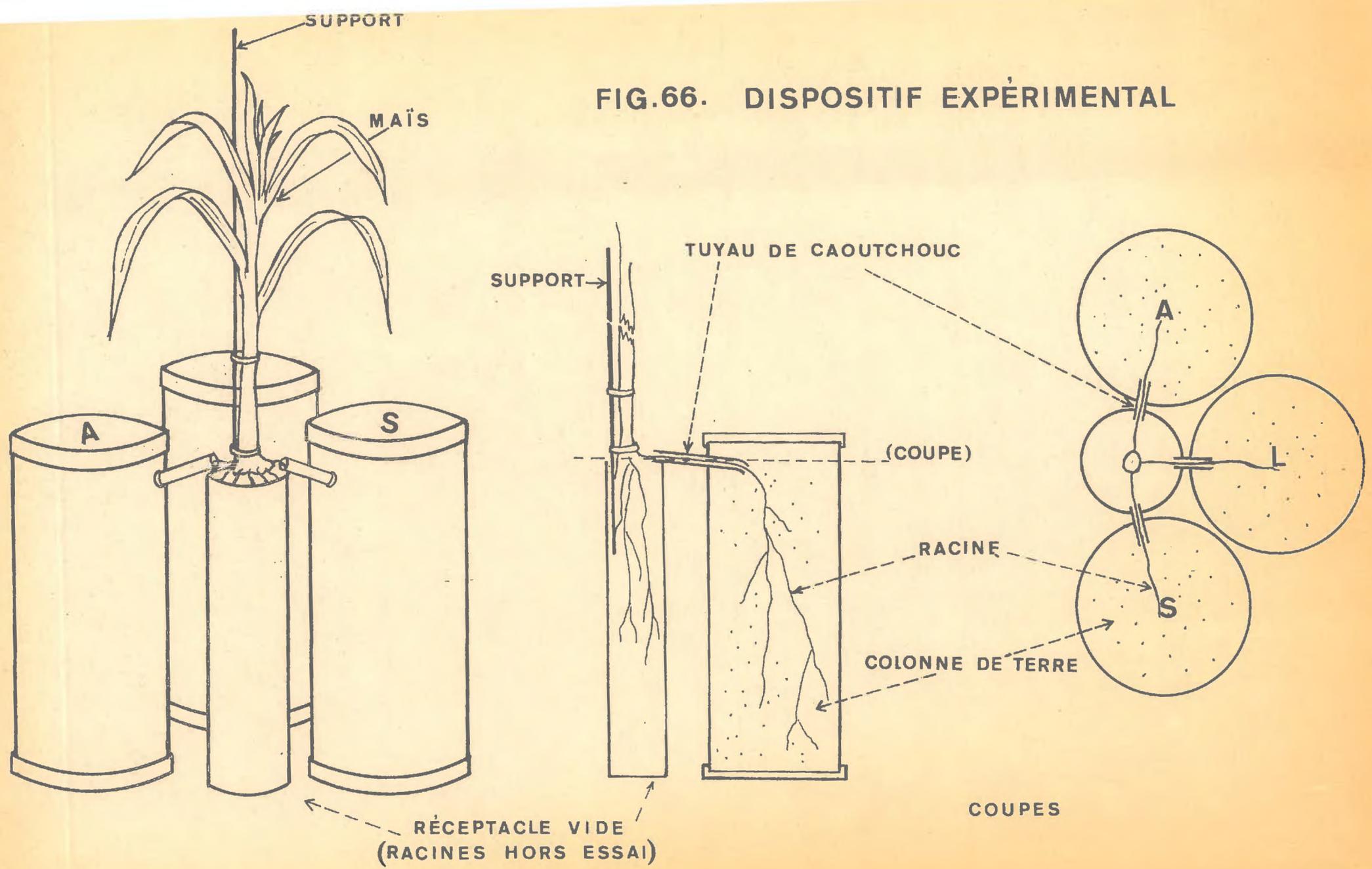
textures et déjà mentionnées pour les sols en dessiccation permanente, se retrouvent également ici quoique avec une ampleur moindre, aisément explicable par la restauration fréquente de l'humidité optimale.

III - EMPLOI DE RACINES ISOLEES POUR CARACTERISER LA CESSIBILITE DE L'EAU

Les données rapportées jusqu'ici avec un ensemble de plants(30) montrent des comportements très distincts des sols. Or, pour savoir si une plante mise en présence de plusieurs textures était capable d'effectuer des prélèvements d'eau préférentiellement sur une texture, nous avons essayé de différencier les sols en partant non plus d'essais sur des milieux séparés, mais en mettant au contraire un même végétal en contact avec plusieurs types de sols, par l'intermédiaire d'une racine par sol. Pour des raisons de manipulation, l'orge a été délaissée au profit du maïs (variété INRA 400) ; celui-ci présente, en effet, des racines résistantes, assez grosses pour être manipulées sans lésion. Nous avons d'abord fait développer des plants de maïs sur du sable grossier, de façon à obtenir des racines assez longues (15 cm) et faciles à dégager. Ces racines, après avoir été choisies pour être représentatives (MAERTENS, 1970) ont alors été placées dans trois tubes comme l'indique la figure 66. Nous avons utilisé le sable 4, le limon 4 et l'argile 7. L'essai a eu lieu avec trois répétitions et deux caractéristiques hydriques de référence : la capacité au champ (essai 1) et le pF 2,8 (essai 2). Le dispositif a été mené en chambre de culture avec les mêmes caractéristiques d'ambiance précédemment décrites. (page 90).

Les pertes totales ont été nettement supérieures pour la série des sols les plus humides (environ 1,5 fois plus) (tableau 22). Pour le premier essai, le limon a fourni la majeure partie de la consommation d'eau, précédant l'argile et le sable, qui donnent des valeurs voisines. Dans le deuxième système, l'argile est voisine de la capacité au champ., contrairement au limon et surtout au sable qui s'en écartent. Dans ce cas, les pertes restent voisines sur le limon et l'argile et sont faibles sur le sable. Or, les réserves hydriques du limon et de l'argile sont pratiquement identiques dans ce deuxième cas et les courbes de pF indiquent une énergie de rétention voisine pour la gamme d'eau utile restante. Enfin, on peut remarquer que le développement racinaire n'est pas très différent dans les deux essais. Par contre, le développement du plant est nettement plus important sur les milieux humides. On retrouve donc à nouveau, dans cet essai très particulier un classement d'ordre textural précédemment rencontré dans toutes les expériences,

FIG.66. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL



qu'il s'agisse du modèle ou des essais comparatifs avec orge. La cohérence de l'ensemble apparaît donc très bonne.

	Essai 1 Sols à la capacité au champ					Essai 2 Sols à pF 2,8				
	perte %	Ru %	Ru épuisée %	Racine C/MS	Plant G/MS	perte %	Ru %	Ru épuisée %	Racine G/MS	Plant G/MS
Sol 7 (A)	8,3	11,5	72	0,0600		6	11,5	52	0,0382	
Sol 1 (S)	6,8	8,9	76	0,0680	0,46	1,9	3,7	51,4	0,0590	0,20
Sol 4 (L)	13,1	15,8	83	0,0435		6,4	10,8	59	0,0404	

Tableau 22 Résultats obtenus avec l'extraction d'eau sur trois sols différents, à partir de trois racines issues d'un même plant de maïs (essai en conditions contrôlées -12 j).

IV - ETUDE COMPLEMENTAIRE DE QUELQUES FACTEURS INFLUENÇANT LES CESSIONS D'EAU

Au cours de l'étude sur végétal dans les différents milieux, le paramètre essentiel de variation a été l'état hydrique, néanmoins dans la réalité, les phénomènes sont beaucoup plus complexes. En effet, les potentialités de cession d'eau d'un sol portant un végétal ne peuvent être obtenues que si l'ensemble "végétal-sol" est dans les conditions optimales ; nous analyserons très rapidement quelques conditions (la porosité et le rôle de l'enrichissement du milieu par exemple) pour montrer que l'ensemble des phénomènes étudiés jusqu'ici restent valables à travers les variations de ces divers paramètres.

A - IMPORTANCE DE LA POROSITE DU SOL

Les phénomènes de cession d'eau ont été étudiés pour une porosité constante de 45 %. En conditions naturelles, l'étalement peut être relativement grand par rapport à cette valeur (DEMOLON, 1950 ; DIEHL, 1957 ; HENIN et al., 1960). Des porosités de 35 à 60 % peuvent être trouvées, par exemple, pour la gamme des sols limoneux ou argileux. Pour les diverses textures, la diffusion de l'eau est généralement moins bonne quand les terres ne sont pas tassées, mais les différences sont assez faibles (MORIZET, 1967) ; par contre, la résistance mécanique à la pénétration variant beaucoup, le facteur porosité devient important du point de vue de la colonisation radriculaire (MAERTENS, 1963-1964 ; SCHURMAN, 1965-1968). La figure 67 montre les résultats obtenus avec le sol 4 de Plaisance pris à la capacité au champ et à 2 porosités initiales. Les écarts sont relativement peu élevés.

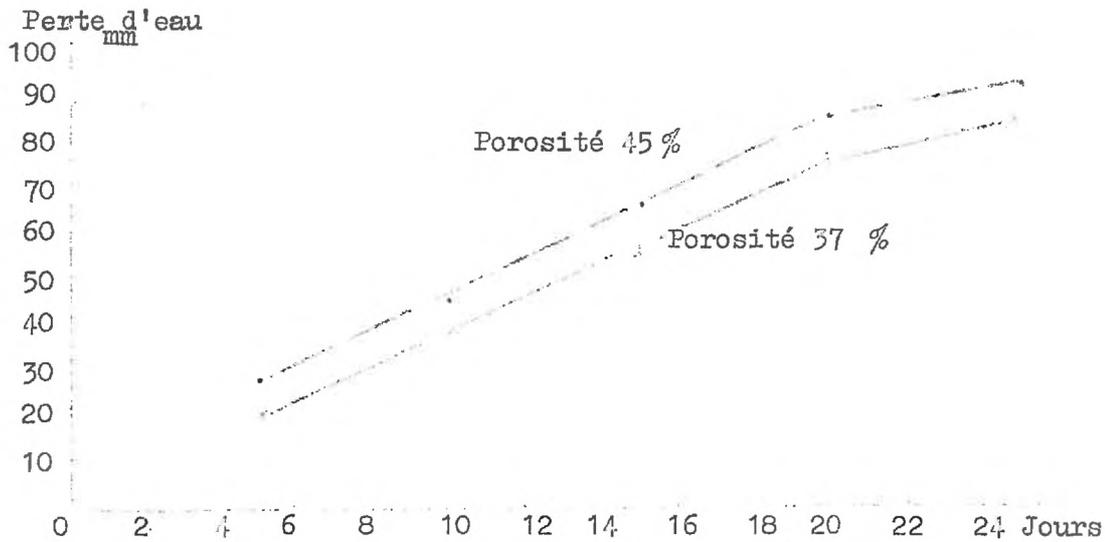


FIG. 67 : Influence de la porosité du sol (Plaisance 4) sur la cession d'eau (orge).

B - INFLUENCE DE L'ENRICHISSEMENT MINERAL DU MILIEU

Le sol sablo-limoneux de Mazères a été retenu. Il a été maintenu à la capacité au champ et amené à 2 états d'enrichissement minéral (tableau 23) le sol étant chaulé dans les 2 cas pour obtenir un pH favorable.

	N	P	K	Chaulage
Milieu pauvre	9,75 mg/kg	0 mg/kg	0 mg/kg	840 mg
Milieu riche	73,25 mg/kg	73,25 mg/kg	73,25 mg/kg	CaO/kg

Tableau 23 Enrichissement du milieu

Le tableau 24 résume les résultats en fin d'essai. Il apparaît que le végétal consomme davantage d'eau (environ 20 %) et produit plus de matière sèche sur le milieu enrichi, malgré un poids de racines identique. Outre certains effets possibles des éléments minéraux, la cause essentielle semble être un meilleur développement des organes aériens en milieu enrichi, ceux-ci captant davantage d'énergie lumineuse ont alors des consommations d'eau légèrement supérieures. On remarque une légère amélioration du coefficient de transpiration en milieu riche.

	Eau consommée (mm)	Matière sèche produite (T + F) g	Coefficient de transpiration : g eau consommée / g M.S. produite (T + F)	Racines du sol g
Milieu pauvre	45	2,16	390	0,36
Milieu riche	57	3,14	280	0,36

Tableau 24 Production de matière sèche, consommation d'eau en milieu pauvre et enrichi et coefficient de transpiration (calculé avec la matière sèche produite en cours d'essai).

C - OBSERVATION DE L'EFFET DE SUPERPOSITION DES SOLS

Dans la partie d'étude sur modèle nous avons remarqué l'effet non négligeable des types de superposition sur les modalités de circulation de l'eau (figure 31). Aussi une dernière expérimentation a été entreprise pour observer cet effet des superpositions de sol sur la cession d'eau, avec un milieu portant un végétal (orge). A partir du sol sablo-limoneux S L (2 Mazères) et du sol argileux A (8 Barrat), trois types de superpositions texturales $\frac{S L}{S L}$ $\frac{S L}{A}$ $\frac{A}{S L}$ en trois répétitions, ont été comparées. Le dispositif expérimental (colonnes de 25 cm et technique STANFORD DE MENT) est indiqué à la figure 68. Il comprend une partie supérieure peu humide (pF 3,7) en contact avec les racines et suffisamment tassée (porosité 38 %) pour éviter leur pénétration au sein du sol. La partie sous-jacente est à une porosité de 45 % et maintenue à la capacité au champ. Le dispositif a été suivi en conditions climatiques naturelles (abri grillagé).

Les résultats obtenus sont mentionnés au tableau 25. Les superpositions $\frac{A}{S L}$ et $\frac{S L}{S L}$ sont très voisines et supérieures à la dernière du point de vue de l'extraction de l'eau, bien que les racines ne soient pas plus abondantes. La superposition $\frac{S L}{A}$ donne donc la cession d'eau et la production de matière sèche les plus faibles.

Superposition	Eau consommée (mm)	Matière sèche (T + F) g	Racines g
A/S L	29,2	1,975	0,775
S L/S L	25,7	1,756	0,834
S L/A	14,5	1,288	0,844

Tableau 25 Superposition de deux sols (compartiment supérieur à pF 3,7, compartiment inférieur maintenu à la capacité au champ (orge))

Les écarts dans la consommation d'eau sont liés au fait que le pF à la capacité au champ du sol sous-jacent est différent pour les deux sols choisis, (S L Mazères = 2,1 ; A Barrat = 3,) or, même en maintenant ces milieux humides, la partie tassée supérieure maintenue à pF 3,7 donne par conséquent avec l'élément

sablo-limoneux en bas la meilleure cession possible. Nous retrouvons donc les résultats signalés dans l'étude sur modèle

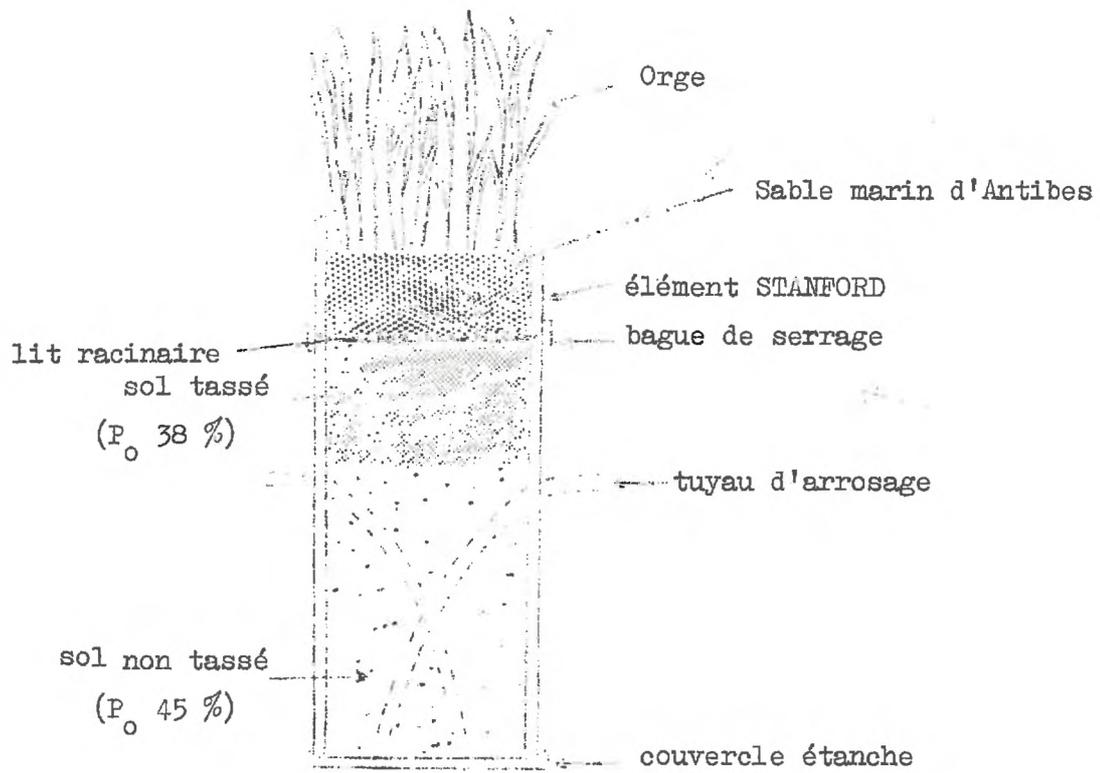


FIG. 68 : Superposition de sols ; dispositif expérimental.

C O N C L U S I O N

L'étude des modalités de l'utilisation de l'eau non saturante par le végétal a été entreprise essentiellement d'après la méthode STANFORD DE MENT. Celle-ci permet une grande homogénéité du matériel végétal et un enracinement très régulier. De plus, pour les durées et le végétal considérés, il n'apparaît pas une grande différenciation de croissance induite par les divers sols. Les expériences réalisées avec cette technique permettent de retrouver de nombreux points communs avec les résultats obtenus dans la partie précédente.

- Si les expériences sont menées en conditions contrôlées permettant la réalisation d'une demande climatique constante, on retrouve une cinétique de dessiccation très voisine de celle obtenue sur modèle. Aussi, malgré le phénomène de la progression de l'enracinement, le gradient d'humidité est d'autant plus accentué que le sol est plus argileux. De plus, au point de vue de la vitesse d'épuisement des réserves hydriques, celle des sols limoneux est supérieure à celles des sols argileux. Enfin, on observe l'existence d'un débit limite pour chaque sol, qui peut s'expliquer également par la répartition des classes capillaires fonctionnelles à différents temps.

- Par contre, quand on considère les phénomènes en conditions climatiques naturelles fluctuantes, il n'existe plus une parfaite homogénéité dans le rythme de dessiccation; autrement dit, la vitesse de dessèchement passe successivement par des valeurs faibles et fortes. Malgré cet important facteur perturbateur, il apparaît toujours nettement que la cession d'eau reste, dans nos essais, fortement dépendante du type textural et cela aux différents niveaux de demande et pour toute la gamme des sols. Le classement obtenu dans la deuxième partie se conserve presque intégralement. Il existe bien une aptitude ou une "capacité" du sol de répondre à différentes demandes, comme cela a été aussi observé avec la succion par gel de silice à différentes humidités.

- Il apparaît par ailleurs que la vitesse de cession d'eau est nettement influencée par l'état d'humidité initiale. Ces faits permettent également de retrouver la relation linéaire liant la production de matière sèche à la consommation d'eau.

- Les conclusions précédentes se retrouvent globalement lorsque l'on considère les racines d'un même plant (exemple : maïs) s'alimentant séparément dans plusieurs sols. Les extractions d'eau se réalisent suivant les critères cités ci-dessus.

- Enfin, la validité des résultats peut être étendue à des situations plus complètes notamment si l'on considère les problèmes de variation de la porosité, du peuplement végétal ou de l'enrichissement minéral ou même pour les superpositions de sols. Il apparaît donc que la texture et la notion de section efficace restent prépondérantes dans l'explication des débits d'eau obtenus.

QUATRIEME PARTIE

APPLICATIONS AU CHAMP

L'étude des modalités de la circulation de l'eau non saturante en laboratoire doit être complétée par des essais au champ. En effet, pour l'étude de ces phénomènes nous introduisons une autre échelle de dimension. D'une part, le temps est beaucoup plus long, puisque les mouvements d'eau sont considérés en fonction du développement des végétaux et d'autre part, l'échelle spatiale peut être de l'ordre du centimètre, du décimètre, du mètre, voire plus, selon les paramètres étudiés : maillage racinaire, profondeur du front de dessiccation, écartement des plantes, etc ... La difficulté essentielle à ce niveau est d'obtenir des conditions d'expériences stables et des milieux sols homogènes. Très généralement, les conditions climatiques fluctuent beaucoup dans le temps et les sols varient très souvent, tant sur le plan horizontal (types de sols juxtaposés, notés en cartographie) que vertical (horizons pédologiques). Or, les résultats précédents ont montré le rôle important de la texture ainsi que l'influence des types de superpositions. Il devient donc difficile d'obtenir des sols absolument comparables. On peut alors se demander si les données obtenues sur modèle en laboratoire sont transposables au champ. Nous avons donc envisagé de contrôler certains résultats liés aux caractéristiques texturales des sols (apparition des gradients d'humidité, modalités de dessiccation, pertes d'eau dans le temps). Les points suivants ont été alors abordés :

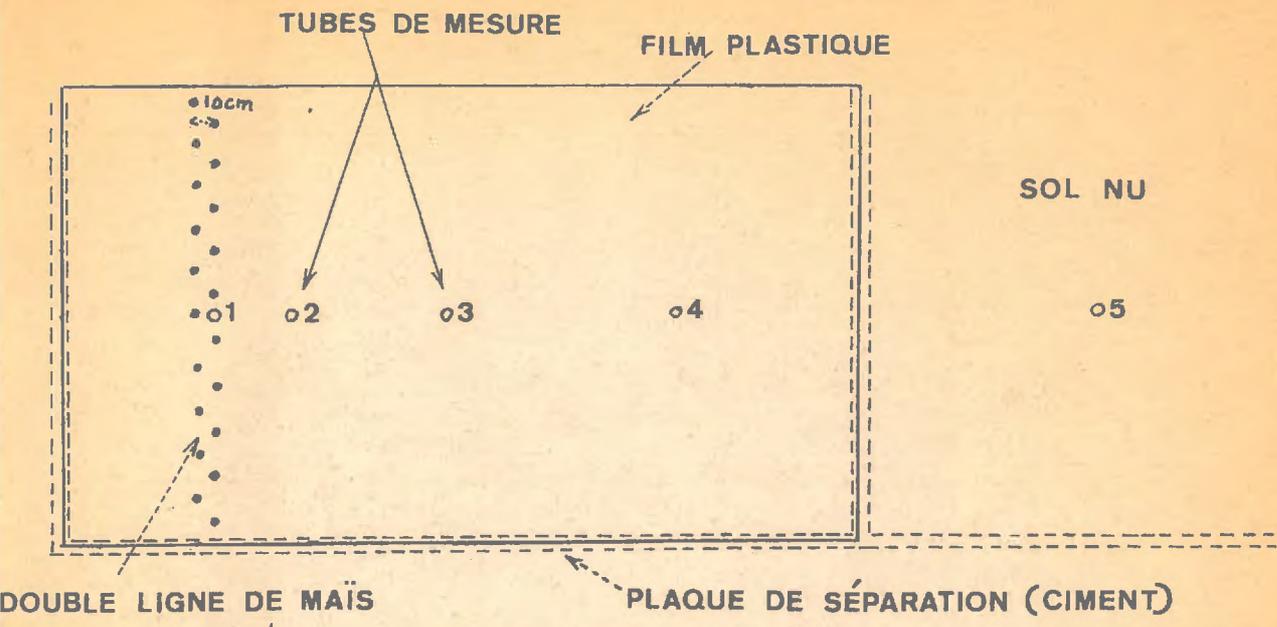
1 - Etude du mouvement de l'eau vers une zone à fort enracinement , de manière à mettre en évidence l'importance des gradients d'humidité.

2 - Evolution des profils hydriques sur différents sols portant diverses cultures (maïs, luzerne, fétuque, vergers). Cette étude permet d'aborder l'effet textural, de définir les modalités d'utilisation de la réserve utile et d'étudier les phénomènes de consommation préférentielle, dans le cas des cultures en lignes espacées.

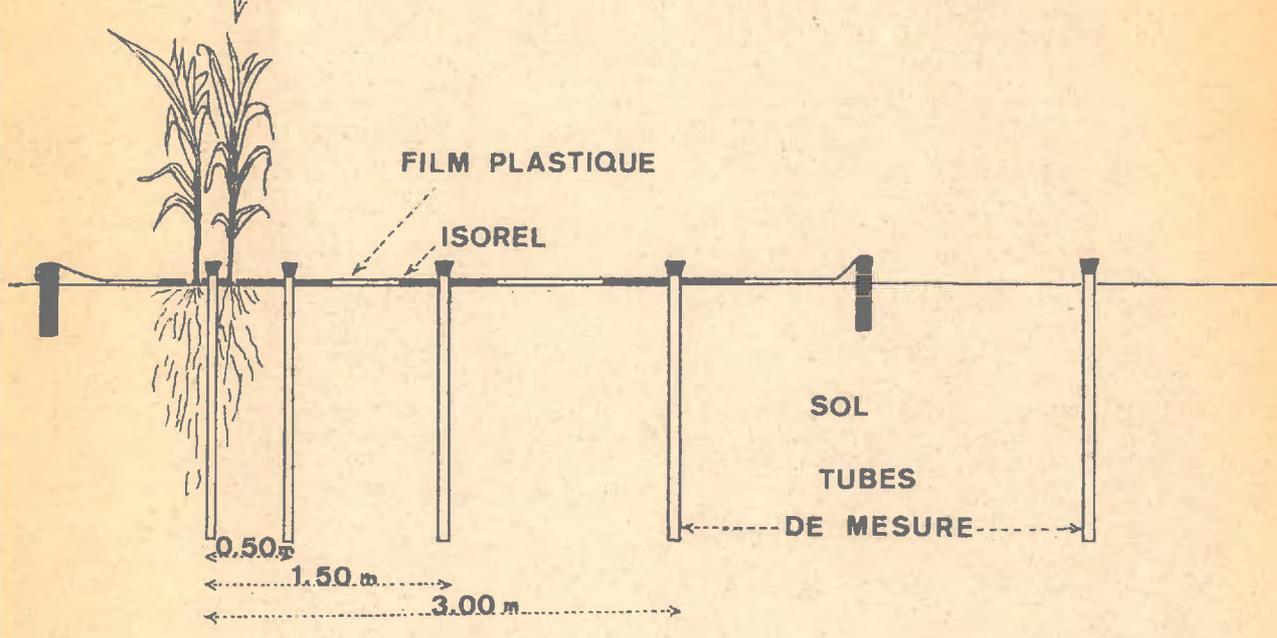
3 - Enfin, influence de l'état de dessiccation des sols et répercussions sur la consommation d'eau et la production de matière sèche. Cette étude permet alors de noter l'importance fondamentale des rythmes de consommation en liaison avec les données d'évapotranspiration, et de soulever certains problèmes liés aux modalités d'irrigation.

I - MOUVEMENT DE L'EAU VERS UNE ZONE A FORT ENRACINEMENT

Les données précédentes nous ont amené à étudier les modalités de la circulation de l'eau du sol vers une zone à forte colonisation racinaire ; nous avons utilisé une double ligne de végétation et éliminé expérimentalement les facteurs perturbateurs (pluie, évaporation du sol) de manière à mettre en



VUE DE DESSUS



COUPE

69 DISPOSITIF UTILISÉ POUR L'ETUDE DU MOUVEMENT DE L'EAU VERS
UNE ZÔNE A FORT ENRACINEMENT

évidence, simultanément, les mouvements verticaux et latéraux induits par la seule succion radiculaire.

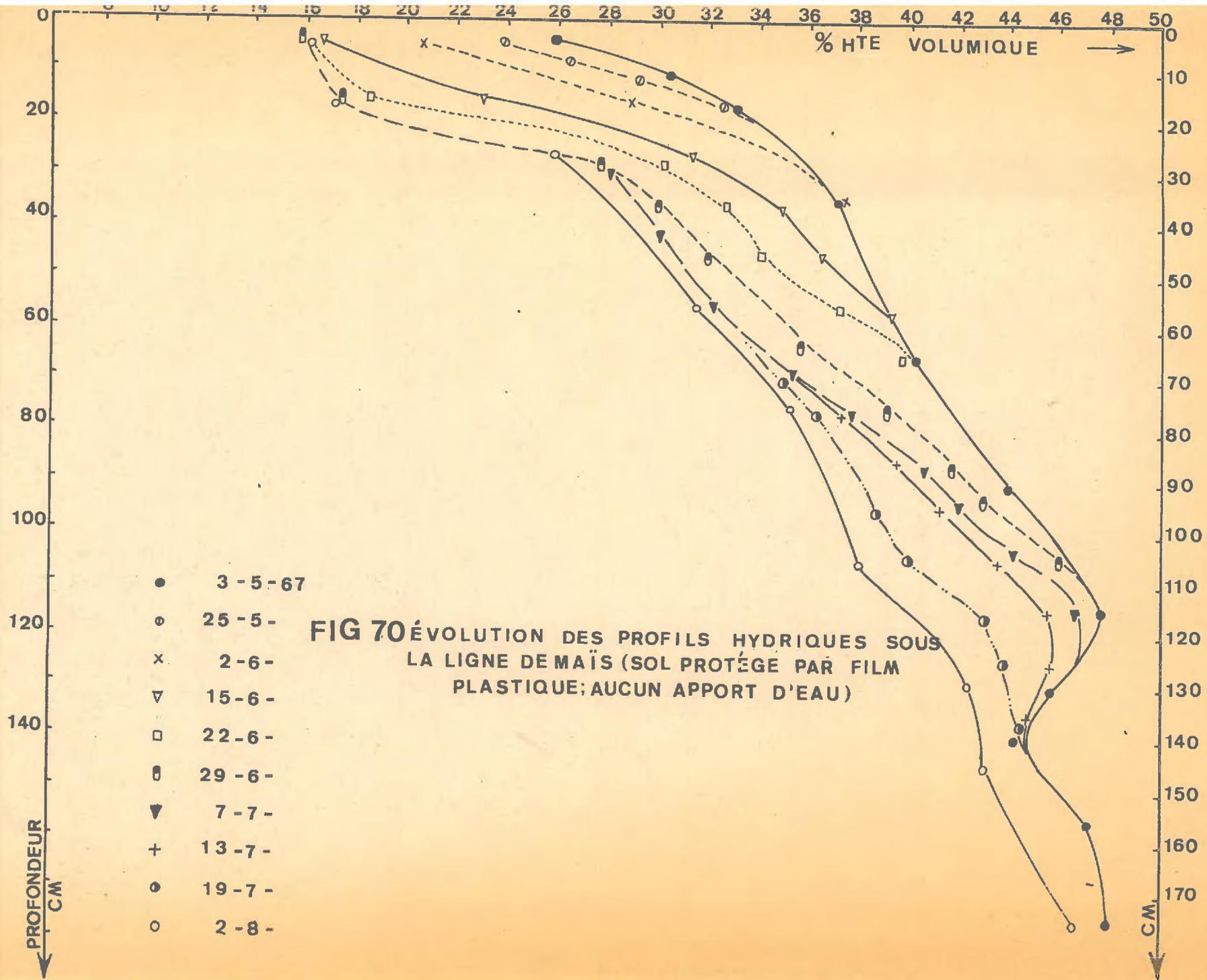
Le dispositif retenu est indiqué à la figure 69. Sur une longueur de 3 m, deux lignes de maïs (variété IOWA 44 17) ont été semées côte à côte sur le sol argileux homogène, profond et initialement à un taux d'humidité voisin de la capacité au champ. Plusieurs tubes ont été disposés perpendiculairement à la ligne de culture et à différentes distances. Les pieds de maïs étaient en disposition alternée, de façon à réaliser un bon enracinement, notamment autour du tube situé sur la ligne. Le sol était protégé de l'évaporation et des infiltrations de pluie par une feuille de polyéthylène doublée de plaques d'Isorel, ces dernières servant à réduire l'échauffement.

A - Evolution des profils hydriques

La figure 70 montre, à partir du profil hydrique initial, la progression de la dessiccation du sol sous la ligne de culture (cas du tube 1). Le dessèchement évolue régulièrement à partir de l'horizon de surface ; on obtient dans le temps un emboîtement des différents profils, le front de dessiccation avançant en profondeur au fur et à mesure de la progression radiculaire. Les autres profils en 2 - 3 - 4 montrent un aspect similaire mais de plus en plus atténué en allant de 1 vers 4. Ces profils montrent donc l'existence d'une consommation différentielle latérale des réserves du sol.

B - Dessèchement du sol, latéralement à la culture

Les pertes d'eau observées à diverses dates sur les 4 tubes de mesure sont représentées sur la figure 71. L'eau est rapidement utilisée sous la ligne ainsi que de part et d'autre sur une assez faible distance, puis beaucoup plus faiblement ensuite. Il existe par conséquent un très net gradient latéral de consommation qui dépend de la répartition spatiale des racines. Une fosse creusée perpendiculairement à la ligne (fin de floraison femelle) a permis d'observer l'enracinement. Ce dernier, surtout abondant sur les 15 premiers cm, dépassait 1 m de profondeur à cette époque, avec une colonisation importante sur une trentaine de centimètres de part et d'autre de la ligne de culture, puis très faible ensuite. Etant donnée la nature de l'enracinement, on peut déduire que l'eau circule lentement par cheminement latéral sous l'action de la succion radiculaire, développée surtout sous la ligne ; il se crée alors progressivement un gradient d'humidité. La figure 72 montre les lignes d'isohumidité obtenues à diverses dates, en fonction de la distance à la ligne de végétation. On retrouve donc ici



MM D'EAU CONSOMMÉS

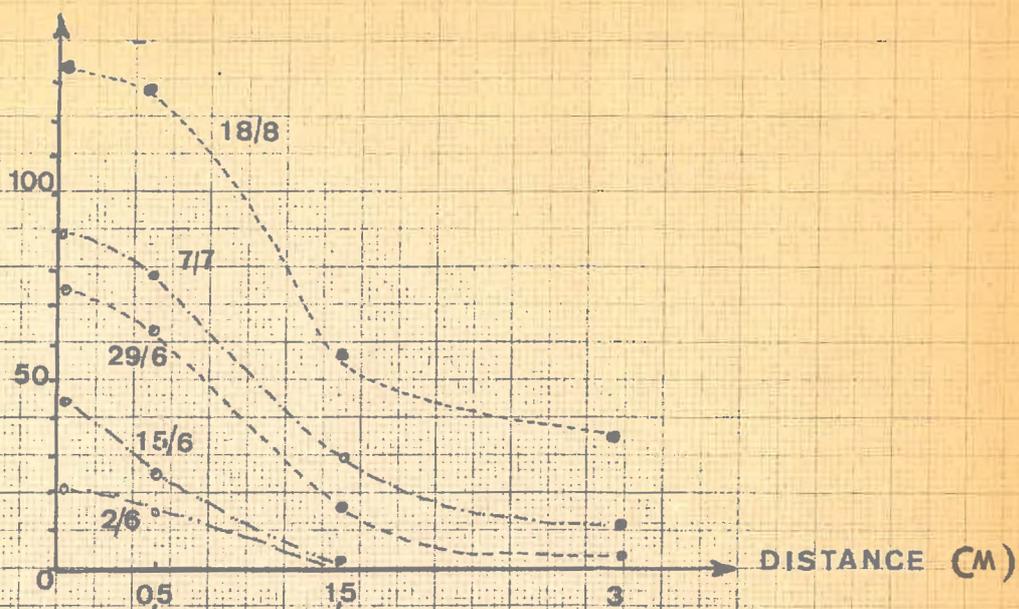


FIG. 71 - CONSOMMATION D'EAU A DIFFERENTES ÉPOQUES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA LIGNE DE CULTURE (EVAPORATION DU SOL FREINÉE PAR FILM PLASTIQUE)

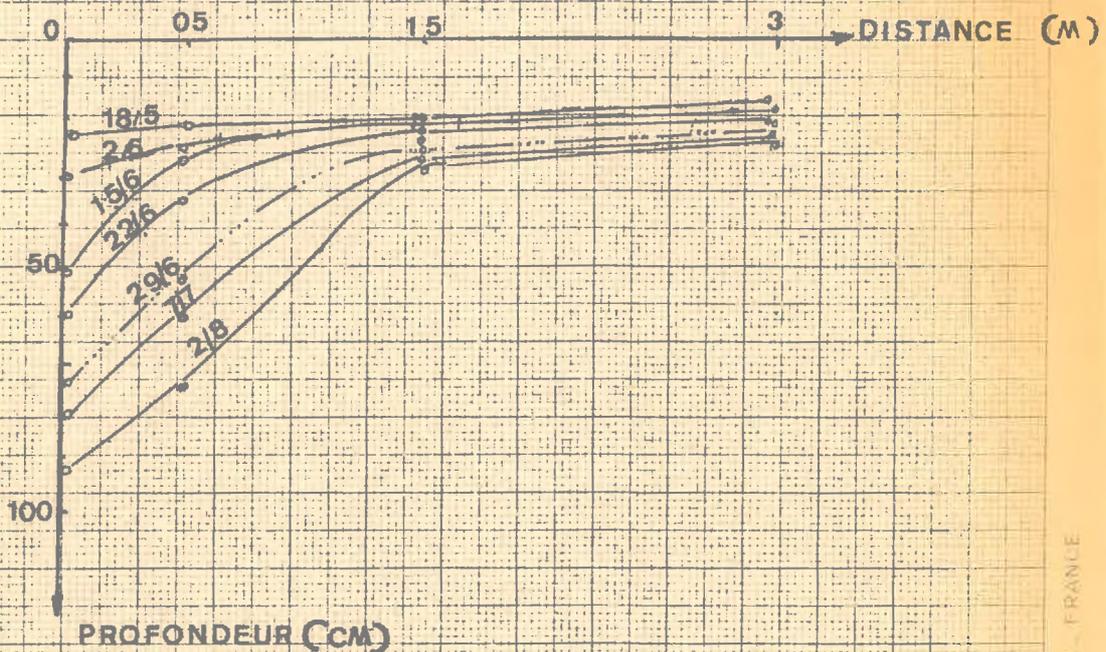


FIG. 72 - COURBES D'ISOHUMIDITÉ A DIFFÉRENTES DATES EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA LIGNE DE CULTURE

une analogie avec les résultats obtenus sur modèle (chapitre 2) et les mesures effectuées en vase de végétation (chapitre 3). D'après ces résultats, il existe donc une zone où la consommation se fait avec un gradient marqué. Ces phénomènes sont d'ampleur variable suivant les types texturaux, l'état des réserves hydriques et l'intensité des contraintes climatiques. Autrement dit, il est nécessaire de tenir compte de la mobilité de l'eau dans un milieu déterminé si l'on veut établir des bilans précis et choisir des points de mesures représentatifs. Peut-être aussi, devrait-on davantage prendre en considération ces caractères pour l'adaptation des techniques culturales aux divers types de sol. Ce problème présente de multiples aspects et il mériterait d'être abordé.

II - PHENOMENES DE CONSOMMATION PREFERENTIELLE DE L'EAU POUR LE CAS DES CULTURES PLANTEES EN LIGNES

L'existence d'un gradient d'humidité vertical précédemment signalé et variable suivant les textures de sol, n'est pas gênante quant à la détermination des consommations d'eau. Mais, pour des cultures plantées en lignes plus ou moins espacées, la consommation d'eau peut également se faire avec un gradient latéral non négligeable. Dans ce cas, se pose le problème du choix d'un point de mesure et de sa représentativité. Les forages à la tarière, ou l'implantation de tubes pour les mesures neutroniques de bilans hydriques nécessitent obligatoirement la connaissance préalable des modalités de dessèchement latéral du sol, en fonction de la culture et des caractéristiques du milieu. Ainsi, nous avons effectué des mesures au champ en vue d'analyser les modalités du dessèchement vertical et latéral en considérant des cultures annuelles et pérennes.

A- Cas des cultures annuelles à enracinement progressif

Les nombreuses mesures que nous avons effectuées par la méthode neutronique ont mis en évidence, dans le cas de cultures irriguées par exemple, une consommation différentielle entre la ligne et l'interligne (COURAU et al., 1966). La figure 73 montre les profils hydriques obtenus sur un sol argilo-limoneux, à une semaine d'intervalle, avec les tubes placés sur la ligne et l'interligne pour une culture de maïs, menée en régime voisin de l'évapotranspiration maximale, avec un peuplement de 70 000 pieds/ha et un écartement de 90 cm entre les lignes. La figure 74 montre les valeurs des consommations d'eau à partir du sol obtenues avec les deux tubes précédents ; pour la période considérée (7 jours), l'écart en faveur de la ligne représente environ 60 %. Par conséquent, cela prouve que sur les 45 cm qui séparent les 2 points de mesure, il existe un gradient d'humidité non négligeable. Aussi, pour atténuer ses effets, nous avons alors été amenés à effectuer une plantation en carré autour du tube de mesure. Cette

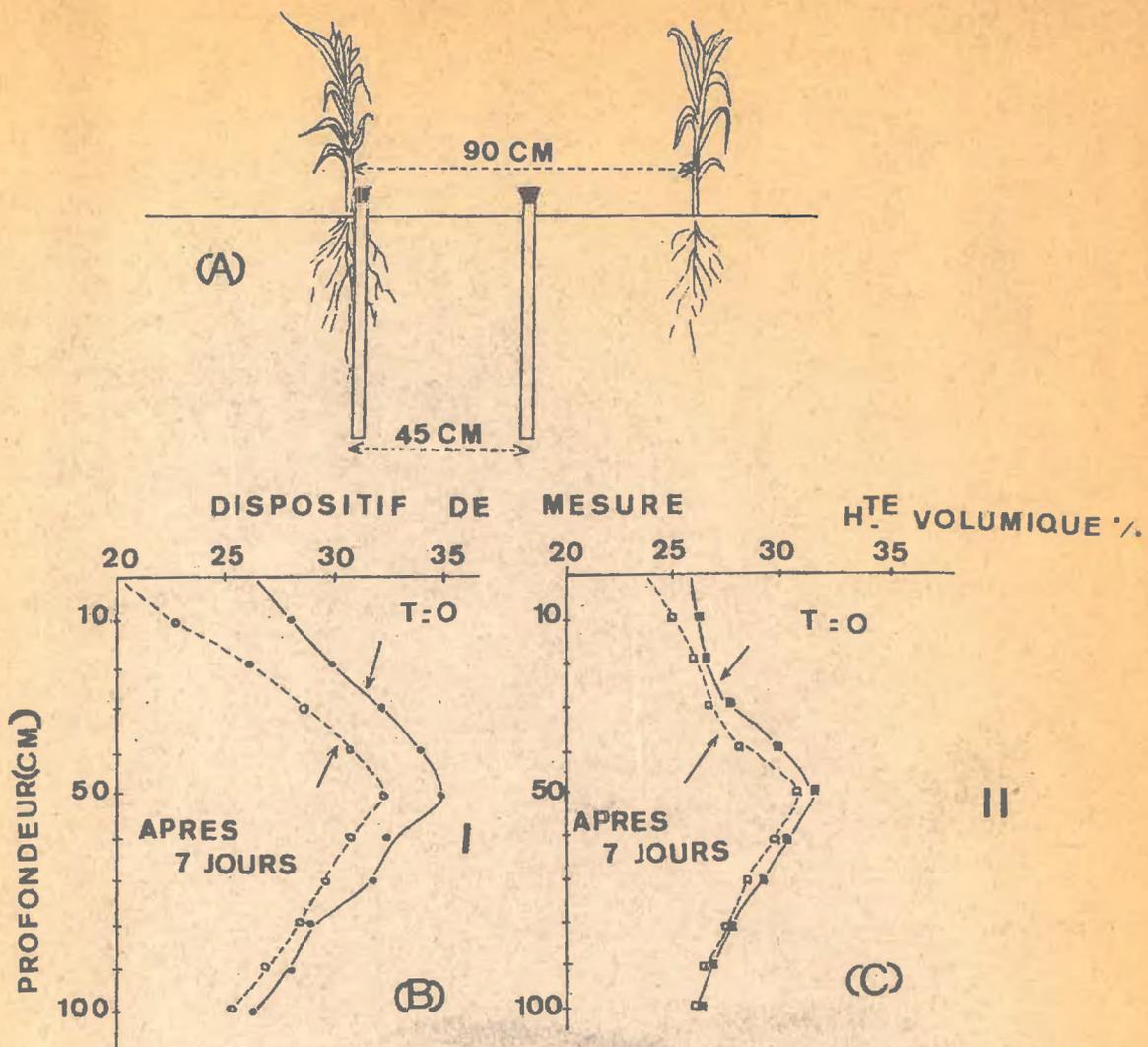


FIG. 73 MODALITES DE LA CONSOMMATION DE L'EAU PAR LE MAÏS SOUS LA LIGNE (I) ET DANS L'INTERLIGNE (II).
(ESPACEMENT DES LIGNES : 90 CM)

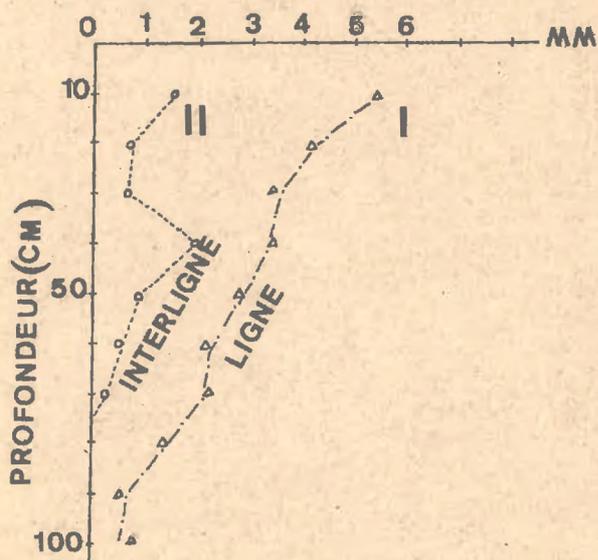
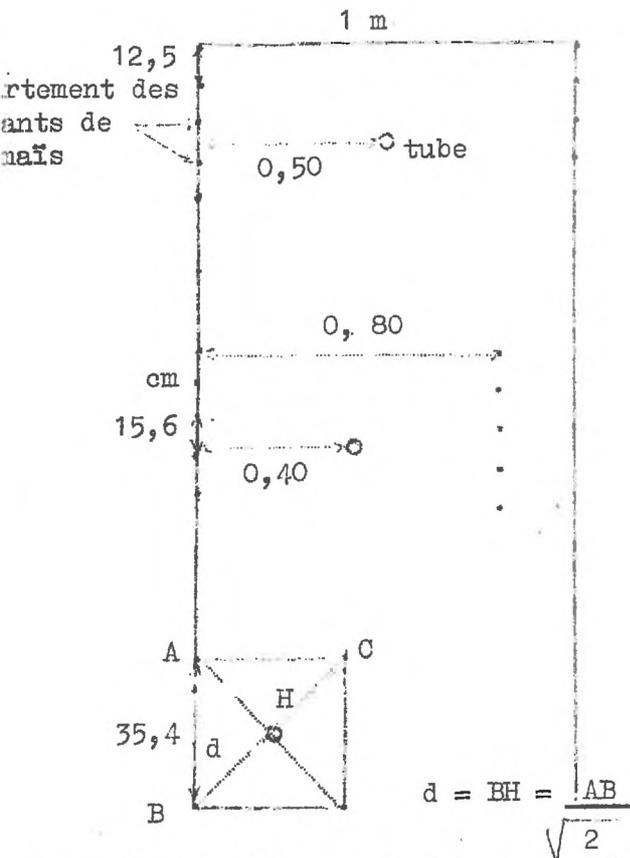


FIG. 74 CONSOMMATION D'EAU PAR LE MAÏS AU COURS D'UNE SEMAINE
(LIGNE ET INTERLIGNE, ESPACEMENT DES LIGNES : 90 CM)
(80 JOURS APRES LA LEVEE)



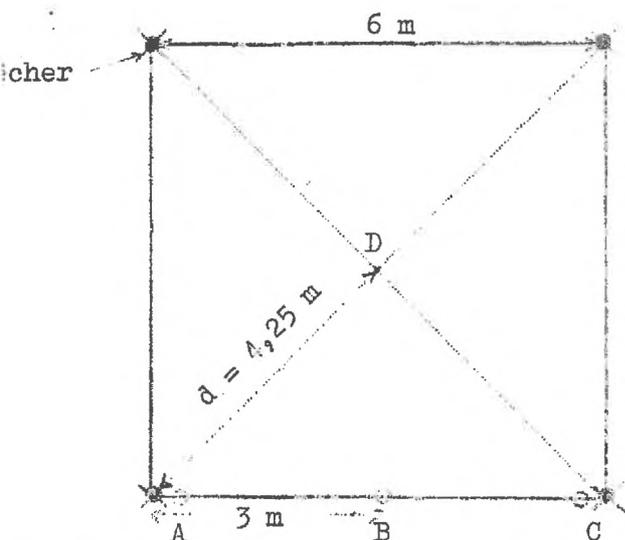
G. 75 : Dispositif de plantation en ligne et en carré (maïs 80 000p/ha).

technique qui peut avoir un aspect bénéfique au point de vue de la colonisation du sol par les racines, ne présente pas d'incidence très marquée sur les productions puisque celles-ci ont toujours été similaires dans l'ilot créé et le reste de la parcelle. Par contre, le tube étant placé au point de rencontre des diagonales formées par 4 pieds de maïs, la répartition et la consommation de l'eau sont le plus homogène possible. La figure 75 montre les modifications apportées avec ce système par rapport au dispositif en lignes classiques pour un peuplement identique donné. On peut donc réaliser valablement des bilans à partir d'un tube pour des cultures du type maïs, mais pour d'autres cultures (exemple, vergers) se pose le problème de la longueur maximale à respecter pour le côté du carré. Nous ne discuterons pas ici l'intérêt de divers modes de disposition du couvert végétal qui revêt de multiples

aspects, mais seulement la possibilité d'obtenir assez facilement des bilans hydriques valables, tout en tenant compte des modalités de dessiccation des sols.

B - Remarque : cas des vergers (culture à enracinement permanent)

Nous ne ferons qu'aborder ce problème, en l'illustrant par un exemple concret. Dans le cas d'un verger le terrain est constamment colonisé, mais étant donnés les écartements entre arbre de plusieurs mètres, souvent rencontrés, il est important de savoir s'il existe encore un gradient d'humidité entraînant des écarts de consommation dans l'espace et le temps. Pour étudier cet aspect particulier, des tubes de mesures ont été installés dans un verger de pêchers "Red Haven" sur un sol limono-argileux, irrigué sur frondaison, non enherbé et planté en carré en espacement de 6 m x 6 m. Deux tubes A et C ont été placés à 50 cm du pied de chaque pêcher et un tube B dans l'interligne à 3 m des arbres (figure 76). En considérant le bilan global établi pendant la période d'arrosage et de pleine activité végétative (entre début Juin et début Septembre) nous avons noté une consommation d'eau du sol de 170 mm en A et 174 mm en C près des arbres, contre 121 mm en B dans l'interligne. Dans ce verger, on peut alors estimer que si la consommation avait été mesurée en D au milieu du carré, elle aurait été



76 Plantation en carré (verger)

inférieure à B puisque le point D est situé à plus de 4 m de tout arbre. Par ailleurs, des traces importantes de lessivage du fer ont été repérées au centre de l'interligne humide, alors que ces caractères s'atténuaient vite en se rapprochant des arbres (MAERTENS et al., 1966). La connaissance précise des consommations nécessiterait donc une intégration dans l'espace de la courbe enveloppe obtenue à partir de plusieurs points de mesures, avec au moins les tubes A - B et D. Cette détermination peut être valable en milieu à dessèchement continu, mais en milieu irrigué sur frondaison notamment, d'autres éléments

peuvent venir perturber le bilan, par exemple, l'apport d'eau supplémentaire au pied de l'arbre par effet collecteur de la frondaison et la nature de son port, (AUSSENAC et al., 1969). Les consommations réelles seraient alors supérieures à celles mesurées ; si nous revenons au cas du maïs cité ci-dessus, nous avons déjà observé une consommation préférentielle de la ligne, or, celle-ci reçoit par effet entonnoir des feuilles de 4 à 8 fois plus d'eau que l'interligne. Par conséquent, il apparaît bien que le bilan obtenu à partir d'un seul positionnement, même répété, peut être entaché d'une erreur systématique.

III - EVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES SUR QUELQUES SOLS

A - Effet de la texture

Sur deux sols Lasbordes 1 et Toulouse 7, l'évolution des profils hydriques a été suivie par la méthode neutronique. Le premier sol est à profil sablo-limoneux en surface puis sablo-argileux ensuite. Le second est argilo-limoneux en surface puis argileux ensuite. Ces sols ont été suivis soit nus, soit avec une culture sèche de maïs INRA 260. La figure 77 donne la consommation d'eau pour quelques mois. Les deux sols étant géographiquement très proches, (moins d'un km) le climat est identique. Sur un mètre de profondeur, on observe que la perte d'eau du sol sableux par rapport au sol argileux est initialement plus rapide, puis sensiblement identique pour devenir finalement inférieure en fin de période considérée (101 jours). Les pertes totales sont voisines pour les deux systèmes mais leur cinétique a été différente, ce qui correspond bien aux faits observés avec les techniques de laboratoire ou en vases de végétation et rapportés dans les chapitres précédents. On peut également remarquer que l'évolution des profils hydriques est du même type que celle déjà décrite précédemment ; la figure 78

montre par exemple, l'allure de la dessiccation à petite échelle dans la tranche de surface entre 0 et 20 cm.

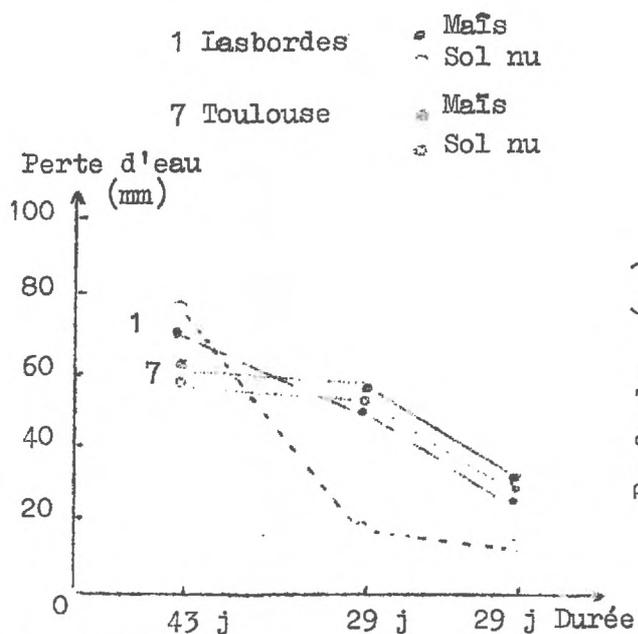


FIG. 77 : perte d'eau pour deux sols (1 et 7) nus ou cultivés (Maïs)

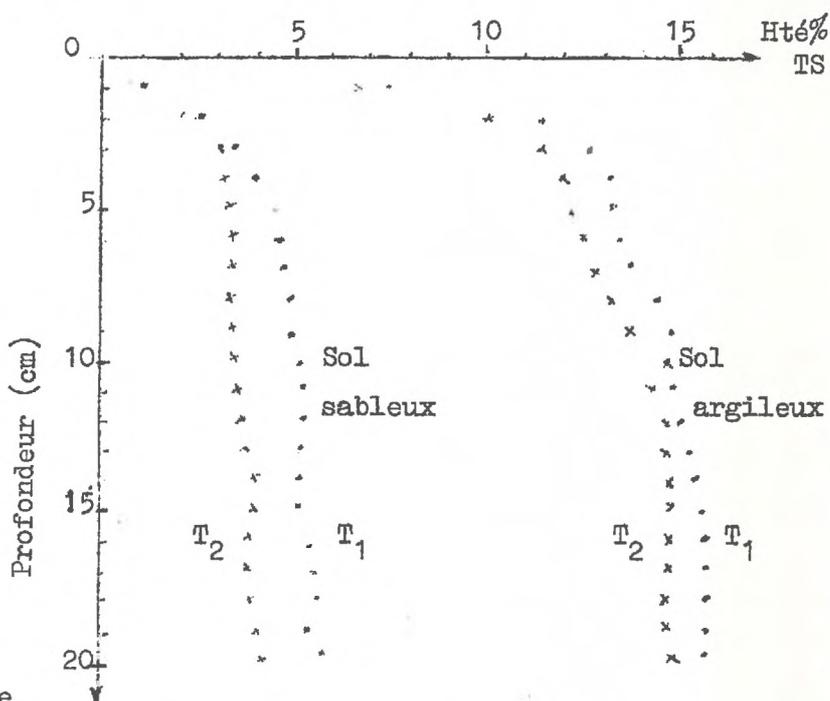


FIG. 78 : profils hydriques à 2 dates voisines (7 j) sur 2 sols nus de textures différentes.

Nous avons également suivi, sur deux autres sols de texture différente situés à Auzeville, l'évolution des profils hydriques sur deux luzernières de 2ème année et d'enracinement similaire. La figure 79 montre les différents profils obtenus. Sur le sol le plus argileux, la dessiccation se fait surtout dans la zone supérieure et dans le sol limoneux le dessèchement est plus homogène sur toute la masse de terre. Le gradient d'humidité est beaucoup plus fort dans le premier cas que dans le second cas. Par conséquent, le type textural influence nettement la forme des profils, même sous une culture pérenne à enracinement profond telle que la luzerne.

B - Participation des réserves hydriques

Nous avons déjà remarqué dans le cas de cultures sèches une évolution dans le temps, de la profondeur de sol cédant de l'eau ; le phénomène est d'ailleurs particulièrement net dans le cas des figures 70 et 79. On peut alors se demander si les modalités d'utilisation de l'eau du sol sont modifiées par l'irrigation. (FIORAMONTI et al., 1967 ; MERIAUX, 1968).

Deux cas principaux sont à considérer :

1°) Si la culture est maintenue en régime d'ETM ou d'ETP, cela suppose que le sol est presque toujours à la capacité au champ avec une marge de fluctua-

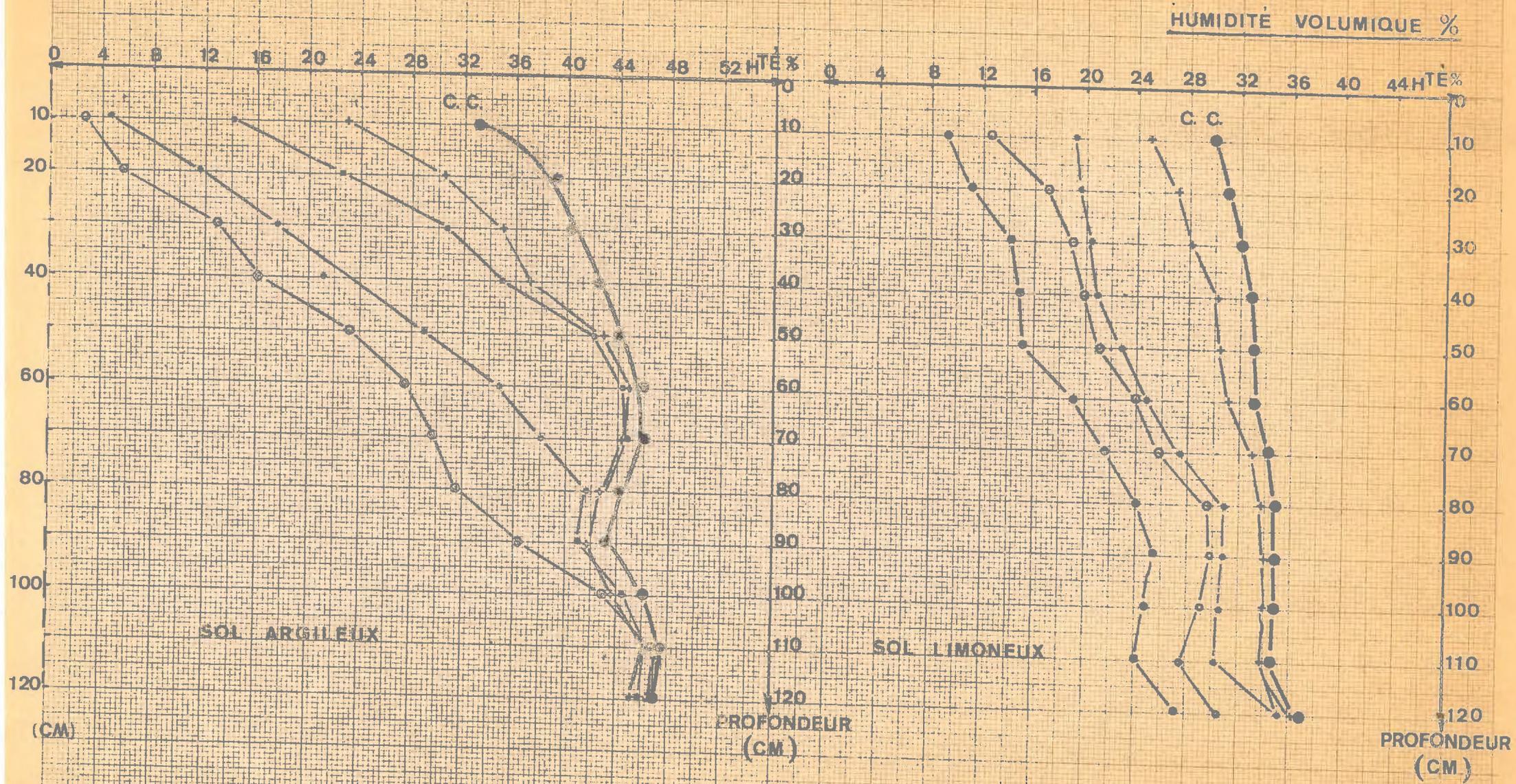


FIG 79 PROFILS HYDRIQUES SUR DEUX SOLS DE TEXTURE DIFFÉRENTE (LUZERNE DE 2^{eme} ANNÉE)
 (AUZEVILLE - PÉRIODE JUIN - SEPTEMBRE 1970)

tion assez faible. Dans ce cas, et par définition, les réserves hydriques totales du sol n'interviennent que très peu. Le sol sert de volant et la profondeur intéressée par le dessèchement est limitée.

2°) Par contre, si les irrigations sont plus espacées, les réserves hydriques participent plus ou moins longtemps. L'expérience montre que l'irrigation diminue la consommation en profondeur et l'évolution des réserves réellement utilisables ; la consommation d'eau en culture irriguée se fait plus superficiellement (CABELGUENNE -MAERTENS, 1971). Cette absorption préférentielle à partir des horizons supérieurs semble être induite par une meilleure colonisation racinaire et une plus grande possibilité d'absorption par les racines proches des parties aériennes.

Nous pouvons alors représenter schématiquement quelques cas susceptibles d'être rencontrés dans l'évolution de la profondeur de sol cédant de l'eau (figure 80).

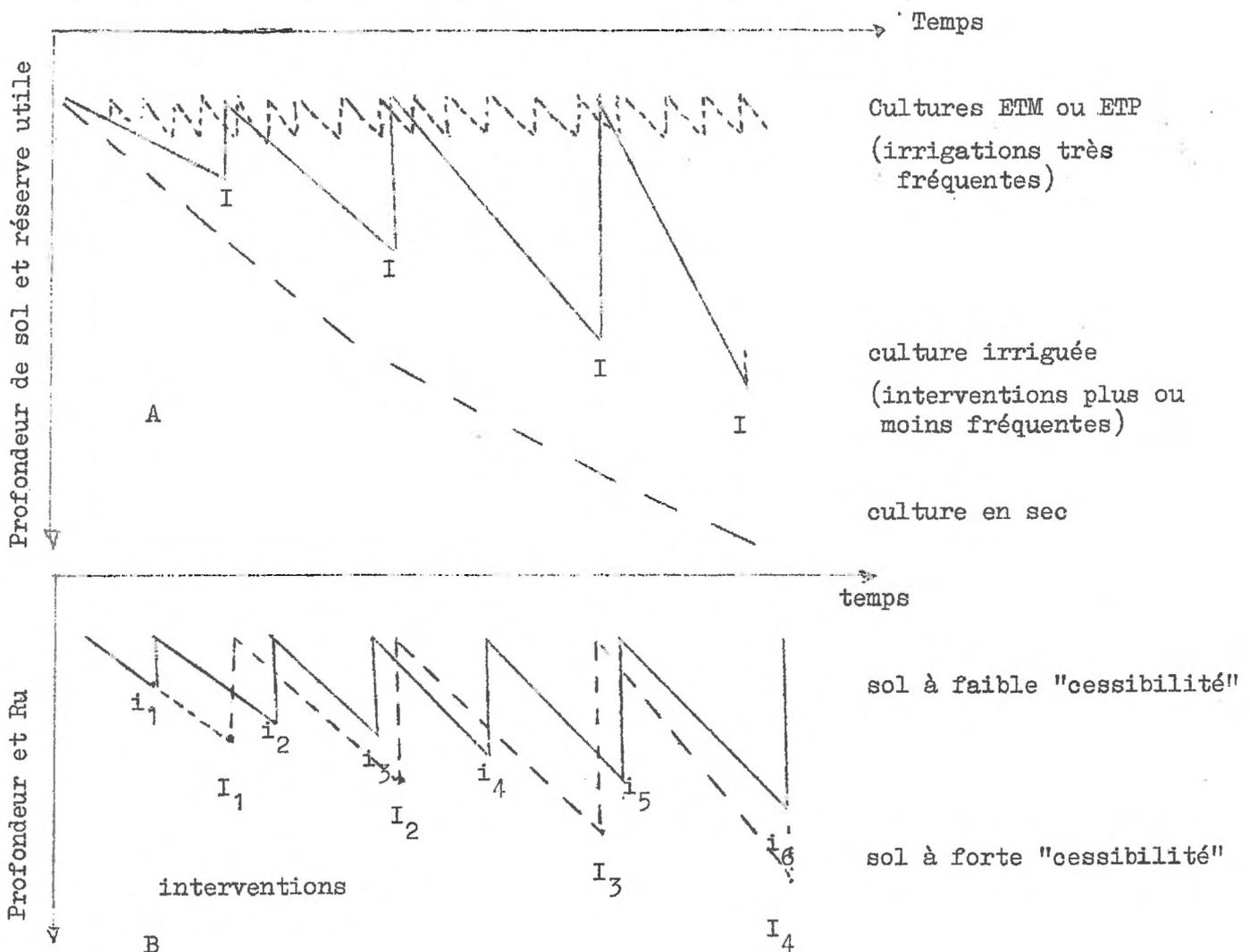


FIG. 80 : Evolution de la profondeur de sol cédant de l'eau

A - Système sec et irrigué

B - Système irrigué (ETM ou ETP) avec 2 types de sols (cas d'une demande forte).

La participation des réserves est pratiquement nulle dans le cas de végétaux menés en régime d'évapotranspiration maximale ou potentielle, elle est discontinue dans le cas d'irrigations plus ou moins espacées et elle est progressive en culture sèche. On peut surimposer à ce schéma, les caractères de cessibilité de l'eau des sols, ainsi que diverses contraintes climatiques. On peut en déduire que la réalisation de l'ETM serait possible plus longtemps par exemple, en faisant davantage participer les réserves pour les sols ayant une très bonne cessibilité. D'autre part, en fonction d'une demande climatique, plus ou moins forte, ces mêmes sols seront susceptibles sans recombement trop fréquents de leurs réserves, d'assurer l'ETM ou l'ETP. Ces données doivent avoir une incidence sur l'économie de l'irrigation ainsi que sur la définition des potentialités agronomiques des sols, nécessiteront ultérieurement un contrôle systématique au champ.

IV - REPERCUSSION DE L'INTENSITE DU DESSECHEMENT SUR LA CONSOMMATION D'EAU
DES VEGETAUX ET LEUR PRODUCTION

A- Importance des rythmes de consommation

Les résultats précédents ont surtout fait état des modalités de dessiccation du sol, mais le degré de dessèchement obtenu a naturellement des répercussions importantes sur le rythme de consommation, rapport de l'évapotranspiration du couvert étudié à l'évapotranspiration potentielle mesurée au même moment (ROBELIN, 1969 ; PUECH, 1969). Ces données sont alors très importantes à connaître à plusieurs points de vue ; on peut notamment mentionner :

- critères de résistance à la sécheresse et meilleure utilisation des réserves hydriques en culture sèche ;
- répercussions sur la production de matière sèche totale et incidences économiques suivant les spéculations envisagées (grains, matière sèche, fourrage, etc...)
- maintenance des irrigations sur une base rationnelle et possibilité d'élaborer des avertissements irrigations (PUECH-COMBRET , 1969).

Ces observations nous ont alors amené à étudier l'évolution des rythmes de consommation, à partir d'une expérimentation sur une culture de maïs (IOWA 44.17, 65000 pieds/ha). Différents états de dessiccation ont été réalisés sur un même sol limoneux, profond, très homogène, pourvu d'une fertilisation minérale assez large.

Les traitements (deux répétitions) consistaient à recombler par irrigation les réserves en eau du sol, à la suite d'une participation variable, suivant le protocole suivant :

- (- Traitement A : dessèchement égal à 20 % de la Ru, de la tranche de sol exploitée par les racines, à un stade végétatif donné (Sol maintenu au voisinage de la capacité au champ)
- (- Traitement B : dessèchement égal à 40 % de la Ru ...
- (- Traitement C : Dessèchement égal à 60 % de la Ru ...
- Régime ETR (- Traitement D : irrigation en période critique (époque encadrant la floraison, environ 15 jours avant et 15 jours après)
- (- Traitement E : témoin sec.

L'évapotranspiration potentielle était mesurée sur une parcelle voisine, à partir d'évapotranspiromètres cultivés en fétuque manade. Pendant toute la durée de l'essai, il a sévi une sécheresse exceptionnelle dans la région toulousaine (été 1967) avec des pluies très faibles et une ETP très élevée. Le tableau 26 indique les résultats relatifs aux consommations d'eau et aux contraintes climatiques.

Traitement	A 20 %	B 40 %	C 60 %	D P. C.	E Sec
Consommation totale (mm) ...	650	600	530	450	353
Participation partielle et moyenne des réserves du sol entre 2 arrosages (mm)	34	51	66	95	-
Apport d'eau (mm)	472	355	329	155	0
Nombre d'irrigation	14	7	5	2	0
ETP (mm)	942				
Pluie (mm)	181				

Tableau 26 Participation des réserves hydriques du sol et données climatiques.

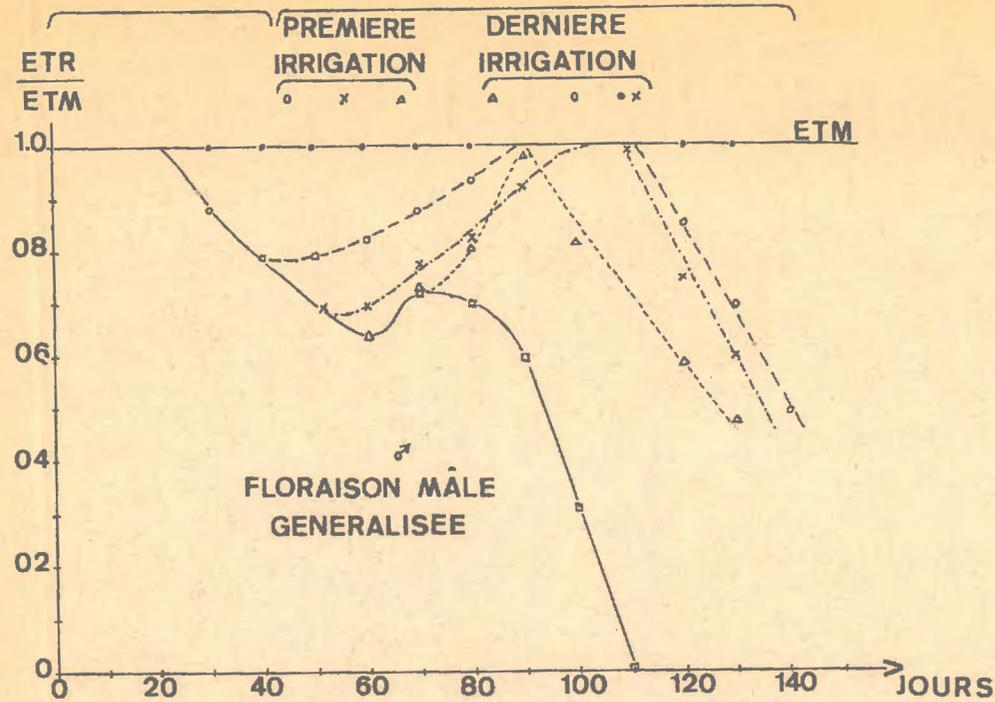
La figure 81 indique l'évolution du rapport $\frac{ET \text{ maïs}}{ETP}$; les rapports $\frac{ETM}{ETP} = 1$ ont été atteints sur des périodes d'autant plus courtes que la mise à contribution des réserves hydriques du sol a été plus longue. Le témoin sec représente le cas extrême avec un rapport nettement inférieur à 1. Pour mieux faire apparaître l'effet du sol, nous pouvons comparer les diverses évapotranspirations du maïs entre elles ; on peut remarquer que les rapports $\frac{ETR (B.C.D.E)}{ETM \quad A}$ sont fortement influencés par les possibilités d'alimentation hydriques (figure 82). Ce rapport diminue avec la dessiccation du sol avant les irrigations, pour augmenter ensuite après les premières interventions. L'influence du retard de végétation sur la consommation, impliqué par le manque d'eau, s'atténue progressivement. Pour cet essai, l'ETM est donc atteinte sur des durées variables, sauf pour le témoin sec, suivant l'importance de la participation des réserves.

B- Consommation d'eau et production de matière sèche

La figure 83 montre la production de matière sèche totale et de grain en fonction de la consommation et nous retrouvons une relation linéaire. La production de grains par rapport à la matière sèche totale est d'environ 50 %

INFLUENCE DE LA
DESSICCATION DU SOL
AVANT IRRIGATION

INFLUENCE
DES IRRIGATIONS



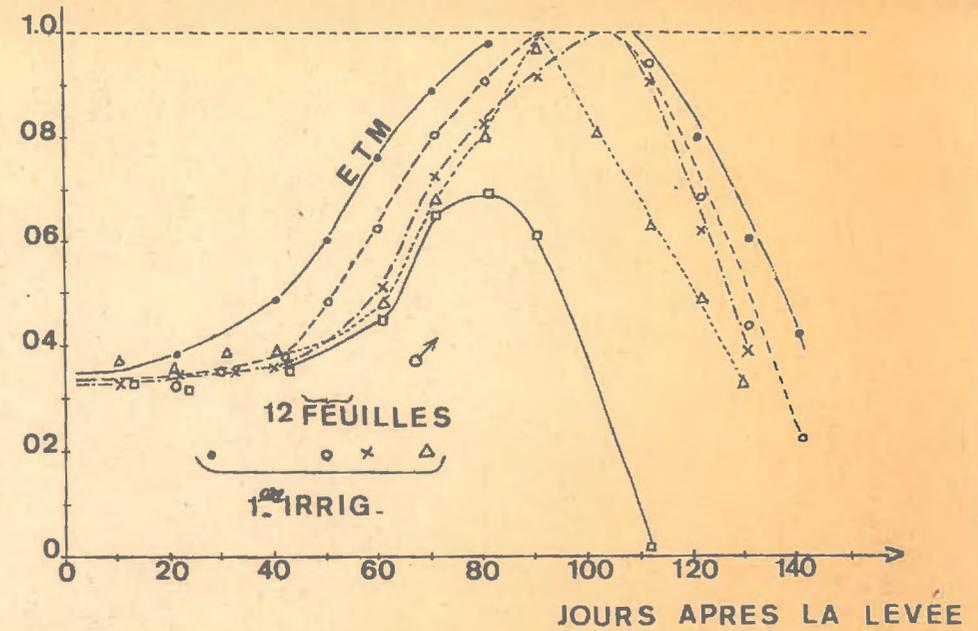
TRAITEMENT

- A • 20 %
- B ◦ 40 %
- C × 60 %
- D △ PERIODE CRITIQUE
- E ◻ TEMOIN SEC

FIG.82. ÉVOLUTION DU RAPPORT $\frac{ETR}{ETM}$ EN FONCTION DES DIFFERENTS TRAITEMENTS (MAÏS)

ET MAÏS
E.T.P

DERNIERE IRRIG.



- A • 20 %
- B ◦ 40 %
- C × 60 %
- D △ PERIODE CRITIQUE
- E ◻ TEMOIN SEC

FIG.81. ÉVOLUTION DU RAPPORT $\frac{ET}{E.T.P.}$ EN FONCTION D'UNE PARTICIPATION CROISSANTE DE LA R.U.

pour les traitements irrigués contre 12 % en sec, elle apparaît très liée à la croissance végétative du maïs et pratiquement proportionnelle à la quantité d'eau consommée. Les retards pris par certains traitements pendant la phase la plus active de la croissance n'ont pas été rattrapés.

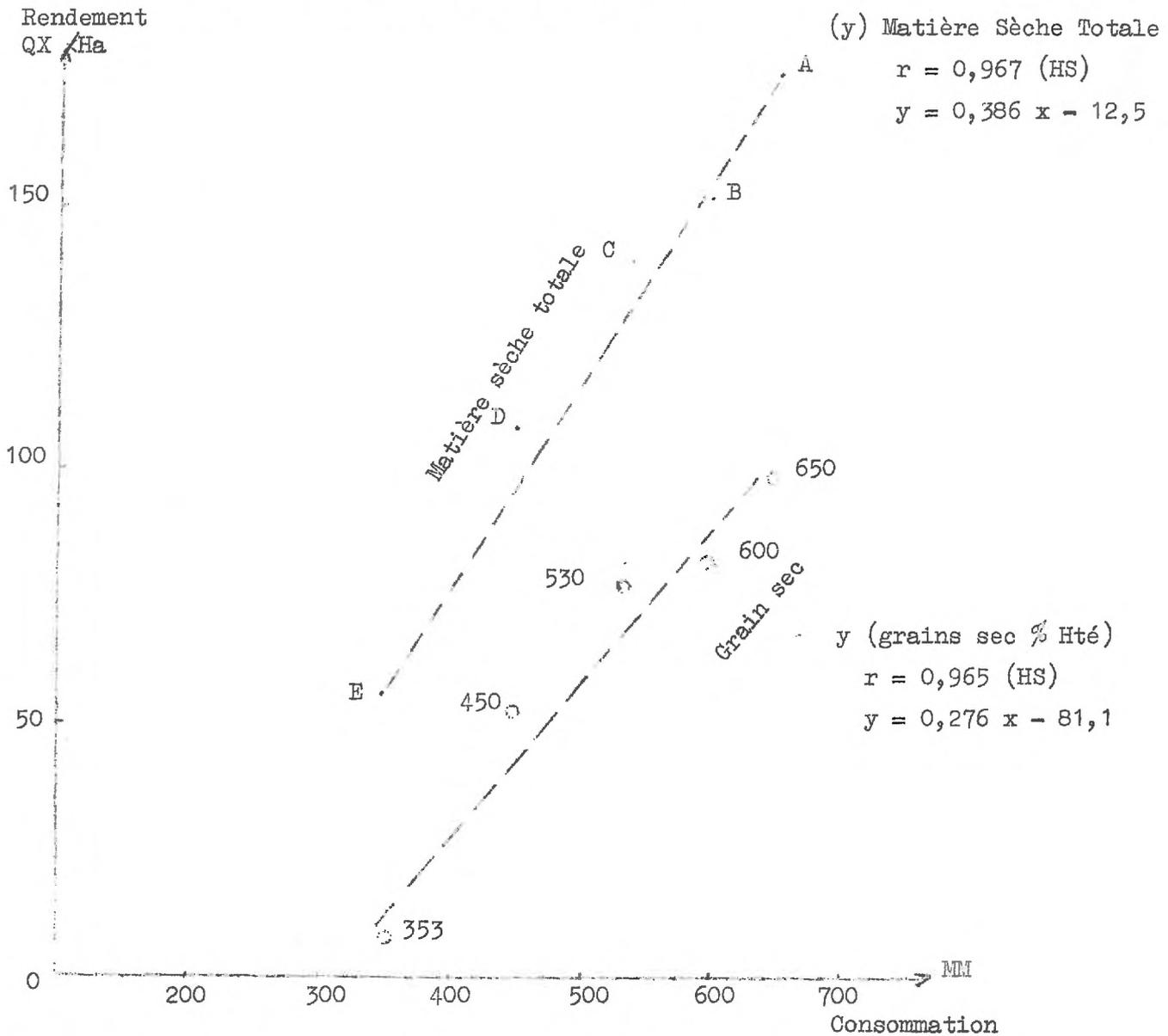


FIG. 83 : Production de matière sèche et maïs grain en fonction de l'eau consommée

L'obtention de rendements élevés nécessite, en l'absence d'autres facteurs limitants, le maintien de la culture dans des conditions voisines de l'ETM du moins pour de nombreux végétaux ; cela exclut le plus souvent, et surtout sous des climats très évaporants susceptibles d'entraîner des vitesses de dessèchement des sols élevées, un dessèchement trop marqué du sol. Dans un contexte climatique déterminé, il s'avère donc indispensable de connaître les caractéristiques de cession de l'eau des sols, suivant les types texturaux et leur état d'humidité. Les données de cet essai montrent en particulier, la manière dont l'ensemble des résultats obtenus dans les chapitres précédents en laboratoire peuvent trouver une application directe au champ. En effet, l'irrigation doit être raisonnée

d'après les besoins des végétaux en se référant notamment aux valeurs des rapports de consommation existant aux différents stades physiologiques pour une plante à cycle annuel, mais également en tenant compte des critères de cessibilité des sols. Comme nous l'avons signalé ci-dessus (figure 80), ces données peuvent influencer les époques de déclenchement de l'irrigation et entraîner des incidences d'ordre économique.

C O N C L U S I O N

Les essais entrepris au champ permettant de retrouver certains phénomènes essentiels observés dans les chapitres précédents.

- L'effet de la texture apparaît nettement en particulier sur le rythme de cession d'eau et sur la forme des profils hydriques ; ces observations se conservent même avec des cultures très différentes (pérennes ou annuelles).

- Le phénomène de gradient d'humidité, très net sur le plan vertical, coexiste avec un gradient d'humidité horizontal dans le cas de cultures en lignes espacées. Cela rejoint aussi les observations antérieures, mais ces résultats sont surtout importants car ils montrent que dans un milieu colonisé par les racines, il n'existe pas une humidité homogène partout et cela pose le problème du choix d'un point de mesure représentatif. La solution adoptée de la plantation en carré autour du tube de mesure reste très valable pour des écartements moyens. Cependant, dans le cas de grands écartements (cas des vergers par exemple), un positionnement unique est difficile à établir, si l'on ne connaît pas les caractéristiques de cession de l'eau du sol, ainsi que le type de profil pédologique (horizons de diverses textures).

- Enfin, sur une terre portant une culture les modalités de dessèchement du sol revêtent une grande importance :

1 - Il apparaît que les possibilités de cession d'eau du sol vis à vis de la plante sont fortement influencées par l'enracinement. Ce dernier, progressant en profondeur au cours de la croissance du végétal, augmente ainsi la réserve utilisable dans le temps. Par contre, pour des cultures menées en irrigation cette dernière occasionne une diminution de l'exploitation des réserves en profondeur. Cela pose donc, du point de vue pratique et pour l'élaboration d'avertissements d'irrigation, le problème de la détermination du moment optimum pour l'arrêt final des irrigations. Parmi d'autres problèmes, cet aspect nécessite en particulier la prévision, avec une bonne approximation, de la demande climatique qui existera.

2 - Le degré de dessèchement des sols conditionne, dans un contexte climatique donné, l'évolution du rythme de consommation de la culture, c'est-à-dire du rapport de l'évapotranspiration du couvert (ETM, ETR) à l'évapotranspira-

tion potentielle ETP. Ce rapport dépend en plus, à un moment donné, de l'espèce végétale considérée (stades physiologiques, variétés). La production de matière sèche étant généralement une fonction linéaire de la consommation d'eau, la connaissance précise des rapports de consommation s'avère indispensable pour mener l'irrigation. En effet ils sont susceptibles de légèrement varier avec les types texturaux de sols pour des conditions climatiques et de culture comparables.

CONCLUSIONS GENERALES

L'étude des mouvements de l'eau non saturante dans les sols a fait l'objet de nombreux travaux dans des domaines très divers quant à leurs préoccupations finales. Cependant, le sol est un milieu d'une extrême complexité, ce qui rend difficile une caractérisation simple, et l'application directe des lois physiques classiques. Généralement, les recherches effectuées en laboratoire ont permis une étude séparée de divers facteurs, mais les phénomènes sur le terrain apparaissent finalement beaucoup plus complexes et amènent souvent à des approches pratiques bien moins fines, du fait de très nombreuses interactions : l'eau du sol est en effet l'objet de transferts permanents provoqués par des gradients de succion, de potentiel chimique, de température, etc ...

Toutefois, dans le domaine agronomique, il s'avère que ces études revêtent un aspect particulier lorsque l'on considère le contexte sol-plante. En effet, une partie seulement de l'eau non saturante participe à l'alimentation des végétaux. Cette réserve utile est définie pour un sol donné par deux bornes sensiblement fixes : le point de flétrissement permanent et la capacité au champ.

A cette notion statique s'ajoute un aspect dynamique, dû à la croissance radiculaire et à l'épuisement de la réserve sous l'effet de l'intensité de la demande climatique. Dans le complexe sol-plante-climat, il est alors apparu que la caractérisation de la disponibilité de l'eau à partir des coefficients de conductibilité et de diffusivité n'était pas satisfaisante, ces paramètres variant avec divers facteurs. Par contre, l'introduction de l'aspect dynamique a conduit certains auteurs à penser que les mouvements d'eau étaient, en réalité, sous la dépendance d'un potentiel efficace ψ_e différent du potentiel capillaire classique ψ , faisant notamment intervenir la longueur de parcours de l'eau à l'intérieur des mailles du sol et la vitesse de dessèchement. Cette démarche met alors nettement l'accent sur la dynamique de l'alimentation en eau des végétaux, mais reste d'un emploi difficile en pratique. Les critères de la "cessibilité" de l'eau des sols, c'est-à-dire leur capacité à céder leur eau au végétal, restent donc importants à préciser du point de vue pratique notamment. Aussi nous avons essayé de caractériser les mouvements de l'eau vers les racines en étudiant le comportement d'une gamme étendue de sols, de caractéristiques texturales très

diverses. Plutôt que de considérer le problème des transferts d'eau dans son ensemble, nous avons limité notre étude à la gamme d'eau utile aux végétaux.

I - COMPORTEMENT DES SOLS

Cette étude a été surtout entreprise sous l'angle expérimental, de manière à observer le comportement des sols soumis à diverses contraintes bien déterminées. Nous avons suivi deux voies très différentes faisant appel l'une à un modèle physique de racine dans la phase analytique des mécanismes, l'autre au végétal dans la phase plus synthétique :

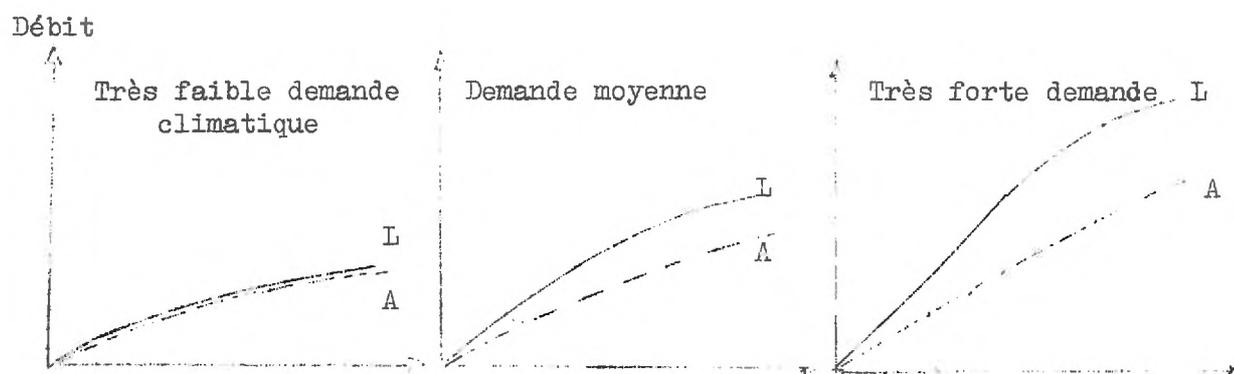
Les résultats obtenus par ces voies diverses et complémentaires sont concordants. Les sols considérés en conditions homologues montrent des capacités de cession très différentes allant du simple au triple (ex : 6 mm à 17 mm pour 24.H.d_a succion), en relation directe avec leur nature texturale. Quelque soit le type de sol considéré, il apparaît que la réserve utile des terres se trouve dans des classes de pseudocapillaires de tailles différentes. Cette réserve utile n'est pas répartie d'une façon homogène, du fait de l'inégale répartition des voies de circulation de l'eau, mais elle n'est pas distribuée au hasard, car elle dépend de la texture considérée et de la logique des arrangements internes des éléments constitutifs. Cette analogie capillaire est simplificatrice si l'on considère l'ensemble de l'eau non saturante, mais permet de représenter la circulation liquide de l'eau utile aux végétaux, dans une gamme d'humidité où la phase vapeur est négligeable.

La cession de l'eau d'une terre peut alors être caractérisée par la courbe de distribution des classes de pores du sol, en se référant, pour son élaboration, à une courbe de succion-humidité. Cette détermination permet donc, pour une réserve utile donnée, d'obtenir sa répartition en valeur absolue ou en pourcentage dans chaque classe de pseudocapillaires. Ces données conduisent également à évaluer les sections actives dans la réalisation du débit, ainsi que l'évolution du nombre et de la taille des pores fonctionnels dans le temps. Par conséquent, pour étudier un sol il est important de tester la nature de la réserve utile pour en déduire les caractères du réseau des voies de circulation et les débits possibles. Enfin, la détermination expérimentale par modèle peut être considérée comme un test, notamment dans le cas de sols spéciaux (exemple : sols très humifères, tourbe, sols de serre, etc...).

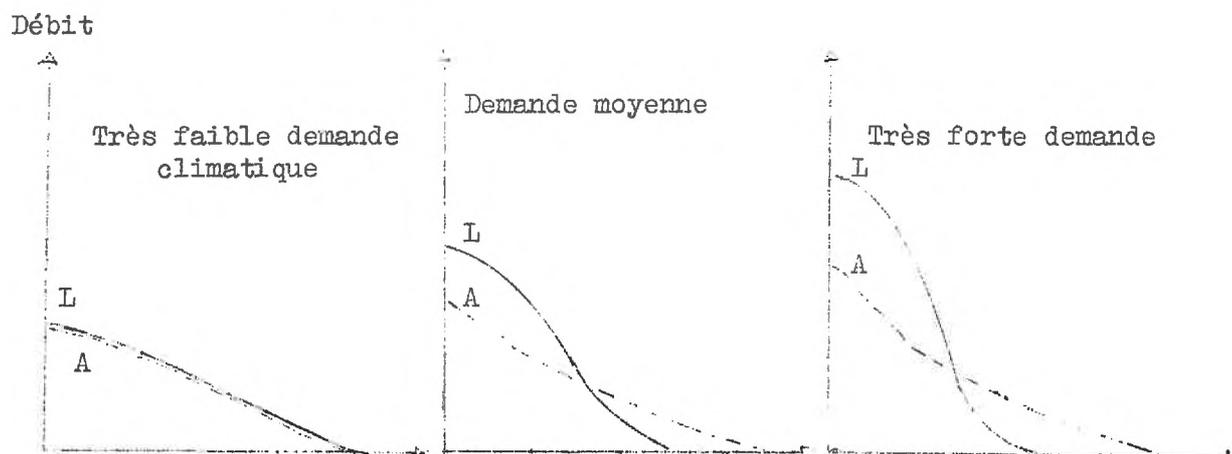
La démarche précédente permet donc de rendre compte de différences de comportement des sols de textures variées, notamment en ce qui concerne leur vitesse relative d'évacuation du stock d'eau. Les sols limoneux ont la majeure

partie de leur réserve utile dans les classes capillaires à grands rayons équivalents (par exemple supérieur à $2 - 3 \mu$), et présentent effectivement les plus forts débits initiaux. Par contre, les sols argileux ont une partie très importante de leurs réserves dans des capillaires fins, (rayon entre $0,5$ et $1,5 \mu$), ce qui explique leur débit résiduel supérieur à celui des limons. Nous pouvons alors retenir, du point de vue des débits, le comportement schématique suivant, dans le cas par exemple de deux sols de texture très différente (limoneuse et argileuse) de réserve utile voisine, soumis à diverses demandes climatiques.

Si pour des contraintes climatiques données, on suit l'évolution du débit en fonction de la réserve utile restant dans le sol (graphique A), on remarque que le sol limoneux a un débit qui s'adapte plus facilement que celui du sol argileux. Si la demande est faible, les débits restent similaires pour les deux textures. Mais, dans le cas d'une demande beaucoup plus forte, seul le limon a des débits initiaux très élevés ; toutefois, si on suit leur évolution dans le temps (graphique B) ils finissent par devenir inférieurs à ceux du sol argileux,



Graphique A : Evolution du débit en fonction de la réserve utile restant dans le sol



Graphique B : Evolution du débit en fonction du temps

lorsqu'intervient pour ce dernier l'importante réserve située dans les voies de circulation fines. Le sol argileux épuise moins vite ses réserves ce qui lui confère un caractère de plus grande résistance à la sécheresse.

Nous avons également montré que les phénomènes de cession d'eau étaient étroitement dépendants des conditions expérimentales telles que : force de succion ou intensité de la demande climatique, humidité initiale des terres, température du sol et nature des superpositions de sols. Par ailleurs il n'apparaît pas dans nos conditions d'essai une circulation à contre gradient, dans le cas de 2 éléments de même texture en contact et pris à 2 humidités différentes. D'autre part, dans le cas de plusieurs sols juxtaposés (L, A; S), le sol argileux est celui qui présente toujours le maximum de résistance à l'antraiement de l'eau, pour des sols considérés en conditions hydriques homologues.

D'autre part, en examinant le détail des mouvements de l'eau, on constate généralement l'existence d'un gradient d'humidité dont l'ampleur varie suivant les types texturaux (maximum en sol argileux) et avec l'intensité de la contrainte imposée. Il apparaît également que les profils hydriques obtenus sont généralement à profil convexe et n'ont pas tendance à se réuniformiser lors de la cessation prolongée de la succion. L'ampleur du gradient permet de caractériser globalement la mobilité de l'eau sur le sol.

Enfin, on peut remarquer que pour l'obtention de débits importants, l'humidité de la section de passage apparaît comme une donnée importante, suggérant l'existence d'une section efficace dans les transports d'eau. Cette notion complète des données comme la réserve utile, l'humidité moyenne ou le pF moyen du sol étudié.

II - UTILISATION DES RESERVES HYDRIQUES ET ALIMENTATION DES VEGETAUX

Les résultats analytiques de laboratoire ont permis d'entreprendre l'étude des répercussions sur les cultures. En effet, au champ, les possibilités de fourniture d'eau par le sol sont fortement influencées par l'enracinement. La réserve utile devient alors une notion évolutive. Cependant, la plupart des déductions sur modèle physique ou en vases de végétation se confirment au champ, notamment l'effet textural, l'existence d'un gradient d'humidité et les vitesses de cession d'eau, sous diverses contraintes climatiques. D'autre part, un certain nombre de problèmes d'ordre technique et agronomique se trouvent alors posés.

- D'une part, sous des contraintes climatiques très fortes, il pourrait s'avérer possible que certains types de sols n'assurant pas l'évapotranspiration maximale d'une culture, sauf s'il existe au niveau de l'enracinement et des écartements moyens entre racines des phénomènes de compensation liés à l'intensité de la colonisation radiculaire. Cela rejoint alors des problèmes de relation avec les caractères physiques des sols, notamment la résistance mécanique à la pénétration et la structure. Ces points devront faire l'objet de contrôles futurs en expérimentation au champ.

- D'autre part, l'existence d'un gradient d'humidité sur le plan horizontal et vertical pour les cultures plantées en ligne pose un problème technique de choix du point de mesure pour l'établissement des bilans hydriques. Mais il y a également des répercussions sur les modalités de consommation de la réserve utile, par suite des phénomènes de consommation préférentielle observée. Enfin, du point de vue de la production végétale, le degré de participation des réserves hydriques a des répercussions très nettes sur le rythme de consommation des végétaux puisque les rapports $\frac{ET \text{ Culture}}{ETP}$ ou $\frac{ET \text{ Culture}}{ETM \text{ Culture}}$ peuvent varier entre 0 et 1. Leur valeur est d'autant plus faible que le degré d'épuisement des réserves est plus important. Etant donné la relation généralement linéaire entre la production de matière sèche et la consommation d'eau, la connaissance des rapports précédents est actuellement indispensable pour la maintenance des irrigations et notamment l'établissement des avertissements. Les éléments de cette étude posent donc le problème de savoir si les rapports $\frac{ETM}{ETP}$ par exemple, peuvent être maintenus plus longtemps sur sols limoneux, avant les irrigations, ce qui permettrait de moduler ces dernières en tenant compte du critère de cessibilité de l'eau du sol. Il y aurait donc une incidence sur la périodicité des irrigations et sur la date du déclenchement de la dernière intervention, ce qui entraînerait des répercussions d'ordre économique.

Au cours de cette étude, nous avons abordé certains aspects des mouvements de l'eau du sol. Il n'en reste pas moins vrai que de très nombreux problèmes subsistent. L'effet textural doit être davantage étudié au champ avec diverses cultures, ainsi que l'influence sur la circulation de l'eau des horizons de diverses textures rencontrées en milieu naturel. Ces données seraient alors susceptibles de compléter les informations actuellement données par la cartographie des sols et les profils pédologiques. Enfin, les études portant sur les relations entre : le système radiculaire, le sol et les phénomènes connexes liés

à la structure doivent être poursuivies. Ces recherches permettraient d'analyser les modalités de consommation à petite échelle, en fonction des écartements moyens entre racines, d'élucider les phénomènes de consommation en profondeur selon les types de culture, et d'apporter encore plus de précisions dans l'élaboration des techniques d'irrigation.

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

ALVISET L., 1966

L'énergie de liaison de l'eau sur les argiles et leur aptitude au séchage.

Bulletin du groupe français des argiles, t. XVIII, p. 14, 11-32

ANDRIEUX C., BUSCARLET L., GUITTON I., MERITE B., 1962

Mesure en profondeur de la teneur en eau des sols par ralentissement des neutrons rapides. p. 187-219

I.A.E.A., Radio Isotopes in Soil Plant Nutrition Studies, Bombay

ANDREI S., 1966

Le drainage de l'eau dans les sols à granulation fine, p. 1-64

Cahiers Recherche, N° 22, Eyrolles

AUSSENAC J., PARDE J., 1969

Forêts et Climats B T 1 237. p. 93-103

BALLIF J.L., FEODOROFF A., et HENIN S., 1966

Sur les modalités de la circulation en phase liquide de l'eau non saturante dans le cas du dessèchement d'un sol.

C.R. Acad. Sci. t. 262, p. 1 866-868

BALLIF L., FEODOROFF A., et HENIN S., 1966

Distinction des transferts d'eau à l'état liquide ou vapeur au cours des dessèchements d'un sol nu.

C.R. Acad. Sci., t. 263, p. 1958-1960

BAVER L.S., 1966

In soil Physic, p. 224-303

7ème édition, John Wiley and Sons, London

BERDUCOU J., PHILPPS J., 1961

Action du sulfate de cuivre sur le début de croissance de la plantule de "Lactuca Sativa"

Bull. Soc. Hist. Nat. de Toulouse, t. 96 (1-2), p. 75-79

BERDUCOU J., MACHE R., KIREDJIAN M., 1962

Influence du molybdène sur la germination du maïs et pénétration de cet élément dans la plantule.

C.R. Acad. Sci., t, 254, p. 3890-3892

BERNARD E.A., 1956

Le déterminisme de l'évaporation dans la nature. Etude des aspects géophysique et écologique du problème dans le cadre du bilan énergétique.

I.N.E.A.C. 158 p.

BINET P., BRUNEL J.P., 1968

Physiologie végétale - 3 t. 1159 p.

BLANCHET R., 1958

Energie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes

Thèse 4 033, p. 187, Faculté de Sciences de Paris

BLANCHET R., STUDER R., et CHAUMONT C., 1962

Quelques aspects des interactions entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes.

Ann. Agro., 1962, 13, p. 93-110

BLANCHET R., 1968

La nutrition des plantes - B T I 231 p. 533-539

BLANCHET R., BOSCH M., MAERTENS C., 1969

Quelques interactions entre l'alimentation cationique et l'alimentation hydrique des plantes.

Coll. Int. "Trans. Ext. Inter. Agri" Tel-Aviv 1969

BLOODWORTH, MORRIS E., 1960

Effects of soil temperature on water use by plants

VI Transaction of 7th Int. Congress of Soil Sci. Madison, p. 153-163

BONDARENKO N.F., 1967

Etude des anomalies de filtration des liquides

In "Physique et traitements des sols", 1967, p; 28-38

BONDARENKO N.F., 1967

Influence de la résistance à la déformation d'un liquide sur son déplacement en milieu non saturé.

In "Physique et traitements des sols", 1967, p. 24-27

BONDARENKO N.F., NERFIN S.V., PAKSHINA S.M., 1967

Transfert d'humidité vers le front d'évaporation dans un processus fortement non stationnaire

In "Physique et traitements des sols", 1967, p. 39-44

BOUCHET R.J., 1965

Rendement des cultures et déficit en eau
Bull. Techn. Int., N° 201, p. 539-551

BOUCHET R.J., ROBELIN M., 1969

Evapotranspiration potentielle et réelle - Domaine d'utilisation -
Portée pratique
Bull. Techn. Int., N° 238, p. 215-223

BREXSTER J.L. and TINKER P.B., 1970

Nutrient cation flows in soil around plant roots
Soil Sci. Soc. Ame. Proc., 1970, 34, P. 421-426

BUI HUI TRI, 1968

Dynamique de la granulation du sol sous prairie
Ann. Agro., 19 (4) p. 415-439

BOSC M., 1972

Etude des mouvements d'ions K^+ vers les racines dans des sols de diverses
capacités d'échange de cations (thèse à paraître)

CABELGUENNE M., MAERTENS C., 1970

Influence de l'irrigation sur les modalités d'utilisation de l'eau du
sol par différentes cultures annuelles et pluriannuelles
Ac. Agri. 926-937

CAILLERE M., HENIN S., 1963

Minéralogie des argiles
Masson, Paris, p. 356

CAILLOUX M., 1953

Sur la localisation de la région par où l'eau pénètre dans les poils
radiculaires
Inst. Et. Univers. Montréal, Rev. Canad. , Vol. 11, N° 5, 1953

CAILLOUX M., 1966

L'absorption de l'eau par les poils radiculaires
Bull. Soc. Franç. Physiol. Végé., N° 12, p. 147-156

CARLEY H.E., WATSON R. D., 1965

A new gravimetric method for estimating -Root surface areas
Soil Sciences, Vol. 102, N° 5

CASSEL D.K., NIELSEN D.R., And BIGGAR J.W., 1969

Soil-Water movement in response to imposed temperature gradients
Reprinted from the Soil Sci. Soc. of Ame. Proc., Vol 33, p. 493-499

- CHARLOT G., 1961
Les méthodes de la chimie analytique - Analyse quantitative minérale
Ed. Masson, Paris, 4, p. 684-685
- CHARTIER P.; 1967
Lumière, eau et production de matière sèche du couvert végétal
Ann. Agro., 1967, 18, p. 301-331
- CHARTIER P., HALLAIRE M., 1969
Photosynthèse de la feuille et du couvert végétal : influence particulière de l'alimentation hydrique - Int. Soil Water Symp.
Czeckhoslovak. Nat. Committee - p. 51 - 72
- CHAUSSIDON J., HENIN S; 1962
Différents états de l'eau dans les matériaux argileux
C.R. Acad. Sci., 254, p. 1472-1474
- CHAMPION R.A., BARLEY K.P., 1969
Pénétration of clay by root hairs
Soil Sci., Vol 108, N° 6
- CHAUVETEAU G., 1965
Essai sur la loi de DARCY et les écoulement laminaires à perte de charge non linéaire
Thèse Faculté des Sciences de Toulouse, p. 189
- CHILDS E.L., COLLIS GEORGE N., 1950
Proc. RO. Soc. A; 201, p. 392-405
- COIC Y., LESAINTE M., PROLLAT T., 1962
Influence de la déficience en potassium et de la déficience en eau sur la composition minérale de l'orge.
Ann. Physiol. , 4 (3), p. 227-234
- COLLIER D., ROBELIN M., 1959
Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des substances chimiques dans les sols argilo-calcaires de Limagne
Ann. Agro., 1959, N° 4, p. 415-453
- COLLIS GEORGE N., HENIN S., KELLY J.A., 1963
Etude du mécanisme de la dessiccation des sols par évaporation
C. R. Acad. Sci., t. 273, p. 242-244
- COMBEAU A., QUANTIN P., 1963
Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques.
Rapprochement avec les courbes p^F humidité
Sci. du sol, Mai 1963, n° 1, p. 5

- COURAU M., PUECH J., FIORAMONTI S., MAERTENS C., 1966
Observations sur la consommation de l'eau et la production du maïs en culture sèche et irriguée
A.F.E.S., p. 44-59
- COWAN I.R., 1965
Transport of water in the soil-plant -atmosphere system
J. Appl. Ecol. 2, p. 221-239, Blackuell. Sci. Pot. Oxford
- DAMAGNEZ J., 1962
Conditions d'utilisation de la sonde à neutrons ~~par~~ les déterminations d'humidité dans le sol - Influence de la densité apparente et de la salure.
I.A.E.A., Radio Isotopes in Soil Plant nutrition studies, Vienne, p. 159-169
- DAUDET F.A., 1970
Méthodes et techniques d'étude de l'état de liaison et de la teneur en eau dans le sol et la plante. 283-313
In Techniques d'études des facteurs physiques de la Biosphère 543 p
I.N.R.A. Paris
- DANIOUX C., 1969
De la granulométrie à l'anisotropie de matrices poreuses
7 p., Terres et Eaux, N° 59
- DEGALLIER R., 1969
Considérations générales sur l'orientation des recherches sur les mouvements de l'eau en régime non saturé
Bull. Ass. Int. Hydr. Sci., XIX^e année N° 2, p. 15-16
- DERJAGUIN B.D., MELNIKOVA M.K., 1956
Experimental study of the migration of water through the soil under the influence of salt concentration, temperature and moisture gradients
VI^eme Cong. Int. Sci. Sol. Moscou, p. 128-136
- DEMOLON A., 1952-1960
Dynamique du sol
Vol 1, Dunod, Paris
- DEMOLON A., 1960
Croissance des végétaux cultivés
Vol 1, Dunod, Paris

DE PARCEVAUX S., 1964

Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu

In l'eau et la production végétale 455 p, I.N.R.A. (63-150)

DE ROO et WIERSUM L.K., 1963

Root training by plastic tube.

Agronomy Journal, N° 56

DIEHL R., 1957

Agriculture Générale

t. I, p. 264, Edition Baillière et Fils, Paris

DIEHL R., MORIOE, 1957

In : Agriculture Générale

t. I, p. 264, Edition Baillière et Fils, Paris

DUCHAUFOR, 1960

Précis de Pédologie, 438 P. Ed Masson

DUPEYREIX A., 1965

Etude de l'eau dans les sols organiques et minéraux à l'aide d'une plante test, Coleus Blumei Benth.

vol. A 1, p. 1-104, Thèse univers. de Genève

EYRAUD, 1965

Contribution à l'étude sur alumine et sur un gel de silice des propriétés de l'eau superficielle

Thèse Lyon, p. 1-14

EVERETT D.H., HAYNES ELROY, 1970

Colligative properties of anomalous water

Nature, Vol. 226, June 13 1970

FABRY G., 1942

Propagation de la chaleur

A. Colin. Paris 1 Vol. 215 p

FAVROT J.C., PUECH J., 1963

Etude pédologique en chalosse

I.N.R.A., S.E.S., N° 19, Montpellier, 181 p.

FEDOROFF A., 1962

Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau

Ann. Agro., 13-6

- FEODOROFF A., RAFI M., 1962
Evaporation de l'eau à partir d'un sol nu. Les 3 stades de l'évaporation.
C. R. Acad. Sci., t. 235, p. 3 220-3222
- FEODOROFF A., RAFI M., 1962
Evaporation de l'eau à partir d'un sol nu. Evolution des profils
hydriques
C. R. Acad. Sci., t. 235, p. 3468-3470
- FEODOROFF A. 1965
Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante
Thèse Paris Ann. Agro 16 (2) 127-175 et (3) 231-263
- FEODOROFF A., BALLIF J.L. 1968
Effets de la température sur la rétention de l'eau.
Note provisoire. Laboratoire des Sols. I.N.R.A. Versailles, p. 1-9
- FEODOROFF A., BALLIF J.L. 1968
La tension de l'eau à la capacité de rétention
Note provisoire. Laboratoire des Sols. I.N.R.A. Versailles, p. 1-23
- FIES J.C. 1970
Recherche de paramètres facilitant l'interprétation de l'analyse
granulométrique en physique du sol : influence de la surface
spécifique des éléments du squelette sur la stabilité structurale.
Science du sol, N° 2, p. 27
- FIORAMONTI S., MARTY J.R., COURAU M., PUECH J. 1967
Conduite et résultats de cultures expérimentales de maïs irrigué dans
trois sols différents
Acad. Agri., 11/1/67, p. 53-65
- FRIPIAT J.J., GASTUCHE M.C., BRICHARD R., 1962
Surface heterogeneity in silica gel from kinetics of isotopic exchange
(OH - OD)
J. Phys. Chem., 66, p. 805-812
- GARDNER W.R., 1958
Mathematics of isothermes water conduction in unsaturated soil
Highway. Res. Board S.R., 40, p. 78-87
- GARDNER W.R., 1960
Dynamics aspects of availability to plants
Soil Sci., 89, p. 63-73

GARDNER W.R., EHLIG C.F., 1963

The influence of soil water on transpiration by plants .

U.S. Salinity lab., Agri. Res. Ser., Jour. Of Geoph. Rese. , Vol 68, p. 20

GARDNER W.R. , 1965

Dynamics aspects of soil. Water availability to plants .

Ann. Rev. of Plant physi., Vol. 16, 1965

GESLIN L., 1934

La température du sol. Action particulière du froid... Ses conséquences du point de vue agronomique.

Physique du sol, p. 247-270

GHAZANCHAH D., 1969

Dynamique ascendante de l'eau des nappes. Influence de la profondeur, de la plante, du sol, de la concentration saline. Etude corrélative de la salinisation.

Thèse N° 47. Faculté Clermont Ferrand p. 1 - 105

GRAS R., MONNIER G., 1965

Contributions de certains éléments grossiers du sol à l'alimentation en eau des végétaux.

Sci. du Sol n° 1, p. 13-20

GRAS R., 1969

Considérations sur la porosité et l'étude des milieux poreux.

Sci. du sol, n° 2, p. 79-90

GRIM E., 1953

Clay mineralogy - 384 p.

M; Graw-Mill Book comp.

GUYOT J., 1969

Mesure des surfaces spécifiques des argiles par adsorption.

Ann. Agro. 20, 4, 333-359

HALLAIRE M., 1953

Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sur sols nus et cultivés .

Thèse Paris, Ann. Agro. 143-224

HALLAIRE M., 1956

La diffusion de l'eau dans le sol sous les deux formes liquides et vapeur au voisinage de la surface d'évaporation.

VI° Congrès. Inter. Sci. Sol, Ed. Laboureur, Paris 337-344

HALLAIRE M., HENIN S., 1958

Dessèchement du sol et évolution des profils hydriques
C.R. Acad. Sci., t. 246, N° 14, p. 2, 151-153

HALLAIRE M., 1960

Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité
de l'eau pour la végétation.

Ann. Phys. Végé., N° 2, p. 119-130

HALLAIRE M., 1964

Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement
In "l'eau et la production végétale" 26-62 I.N.R.A. Paris

HALLAIRE M., BALDY Ch., 1964

Potentiel matriciel de l'eau dans le sol et tension superficielle de
l'eau

In "l'eau et la production végétale" I.N.R.A. Paris 15-25

HALLAIRE M., 1968

Mécanisme et rythme du dessèchement du sol

Internation. Soil water Symp. Prague - 17-34

HELLER R., 1969

Biologie végétale - nutrition et métabolisme

578 p. Ed. Masson

HENIN S., 1936

Idées actuelles sur l'eau du sol et ses rapports avec la plante.

Ann. Agro. 723-741

HENIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960

Le profil cultural

320p. S.E.I.A. - Paris

HENIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969

Le profil cultural

2ème édition

332 p. Masson - Paris

HENIN et al., 1970

Etude théorique de la porosité des matériaux meubles en fonction
de leur composition granulométrique.

C.R. Acad. Sc. Paris, t. 271 - série D, 1960-1963

JACQUIN C., 1965

Etude des écoulements et des équilibres de fluides dans les sables argileux

I F P - Thèse 5272 -- Paris - 50 p

KATCHINSKI N.A., 1956

La structure du sol et sa porosité différentielle

VI^o Congrès Internationa. Sci. Sol. Moscou -45 - 52

KELLY J.A., HENIN S., 1964

Etudes sur le dessèchement des sols par évaporation

Science du sol, N^o 2, p. 69-75

KIJNE J.W., 1969

On the interaction of water molecules and Montmorillonite Surfaces

Soil Sci. Soc., vol. 33, N^o 4, Juillet Août 1969

KOSTYLEV PU V., POPOV V.I., KHABAKHPASEVA E.M., 1966

Courbes de vitesse lors de l'écoulement laminaire de liquides à viscosité de structure entre des plans parallèles

Zurn. Priklad. Mat. I tekhn. Pos. 1966, N^o 2, p. 100-103

KOLJASEV FE., 1956

Mobility of water in soils and some means to regulate it

VI^o Cong. Internation. Sci. Sol Moscou, 169-177

KRUYT H.R., 1953

Les colloïdes - 329 p. Alcan, Paris

KSENZEK O.S., KALINOVSKIJ E.A., CYENNOK C.P., 1964

Equilibre capillaire dans des milieux poreux avec pores interconnectés

Zurn. Fis. Khimii, 1964, 38, N^o 11, p. 2587 - 2593

LEMAIRE F., 1969

Contribution à l'étude des relations entre croissance et évapotranspiration

Ac. Agri. (54) p. 1056 - 1066

Mc. CLURE C.W., JACKSON W.A., 1968

Nutrient distribution in root zones

Agrochimica XII, n^o 2 - 3 - 4

MAERTENS C., 1963

Relations entre les propriétés physiques des sols et les systèmes racinaires des plantes cultivées. Répercussions sur la croissance des végétaux.

C.N.A.M. 82 p.

MAERTENS C., 1964

Influence des propriétés physiques des sols sur le développement radicaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures

Science du Sol, N° 2

MAERTENS C., 1964

La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement

Ann. Agro. 15 - 5 (539-554)

MAERTENS C., MORIZET J., STUDER R., 1965

Modalités d'utilisation en Agronomie d'un humidimètre à ralentissement de neutrons.

Ann. Agro. , 16, p. 5-23

MAERTENS C., FIORAMONTI S., COURAU M., PUECH J., 1966

Modalités d'utilisation de l'eau du sol par le maïs. Examen de la notion de réserve utilisable

Acad. Agri. p. 1338 - 1348

MAERTENS C., 1970

Influence des conditions de milieu sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les systèmes radiculaires de quelques graminées cultivées

Thèse, Toulouse, 162 p.

MAMY J., 1968

Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite. Propriétés diélectriques et structure du film d'eau .

Thèse, Paris, 113 p.

MARTY J.R., 1969

Les Boulbènes. Caractères et propriétés physiques. Conséquences agronomiques.

Thèse, Paris, 135 p.

MATHERON G., 1967

Eléments pour une théorie des milieux poreux

166 p., Ed. Masson .

MARSHALL T.J., 1958

A relation between permeability and size distribution of pores

J. Soil. Sci. 9, 1. 9

MARSHALL T.J., 1959

Relations between water and soil

G.A.B., N° 50, 91 p.

MERIAUX S., 1963

Essai d'interprétation des mesures de pression de succion des feuilles
Ann. Agro., 1963, 14, p. 535-542

MERIAUX S., 1967

Signification physiologique de la pression de succion des feuilles en
relation avec l'écologie de la plante
Ann. Agro., 1967, p. 639-651

MERIAUX S., 1968

Dynamique de l'eau sous prairie en sol argileux
Science du sol N° 1, p. 105

MOULINIER H., 1968

Relations entre la salinité réelle du sol et la croissance des racines
6° Coll. Inter. Potasse, Florence, 256-258

MORIZET J., 1967

Etude de la circulation de l'eau non saturante dans différentes terres
en régime de dessèchement
Ann. Agro., 18, p. 267-283

MORIZET J., MILLET R., 1967

Comparaison de profils hydriques obtenus sur deux terres différentes
à partir d'essais au laboratoire
Acad. Agri. p. 46-53

MORIZET J., MILLET R., 1971

Etude de la mobilité de l'eau non saturante dans des colonnes de sol
soumises à l'évaporation ; influence de la texture et de la teneur en
matière organique
Ann. Agro. (22) 197-211

NADEAU J.C., 1961

Evaluation de la proportion de la nature des réseaux expansibles dans
un mélange d'argiles
C. R. Aca. Sci. , 253, 162-164

NISEN , 1969

L'éclairage naturel des serres
198 . Ed. Duculot Gembloux

NOREL G., 1965

Etude des milieux poreux par absorption d'un rayonnement X ou émis
par une source radioactive
I F P Thèse 5342, Paris - 116 p.

- NYE P.H., and SPIERS J.A., 1964
Simultaneous diffusion and mass flow to plant roots
Int. Cong. Soil. Sci. Trans. 8th III Bucarest - Rumania, 538-541
- OSTRIKOV A.S., 1969
Etude des tensions de rétraction sur les sols au cours du processus
d'humectation et de dessiccation
Pochvovedenie, n° 8, 31 - 37
- PERIGAUD S., 1963
Contribution agronomique à la mise en valeur de la Brenne
Thèse Clermont-Ferrand. Ann. Agro. 14, 121-193
- PERIGAUD S., 1967
Effet du manque d'oxygène et de l'excès d'eau au niveau des racines sur
la croissance et la nutrition globale de la plante
Ann. Agro. 18-5, 485, 506
- PUECH J., SERVAT E., 1963
Etude pédologique du périmètre de Calvignac (Lot)
I.N.R.A. - S.E.S. n° 20, 66 p. 2 cart.
- PUECH J., 1966
Modalités de la dessiccation des sols par le gel de silice
Acad. Sci., t. 263, p. 645-648
- PUECH J., MAERTENS C., FIORAMONTI S., MARTY J.R., COURAU M., 1968
Comparaison des consommations d'eau et de productions de matière sèche
de quelques cultures irriguées
Ann. Agro. 19 (3), p. 365-377
- PUECH J., HERNANDEZ M., 1969
Etude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de diffé-
rents sols vers une zone d'absorption
Ann. Agro. 20-3 (245-261)
- PUECH J., MAERTENS C., MARTY J.R., 1969
Modalités de dessèchement du sol sur des cultures plantées en lignes
espacées
Ann. Agro. , 1969, 20, p. 597-607
- PUECH J., COMBRET M., 1969
Contraintes du milieu et besoins en eau des cultures : application à
des avertissements irrigation
B.T.A. - T. 238 (231-237)

PUECH J., MAERTENS C., MARTY J.R., 1970

Irrigation et importance des contraintes du milieu (aspects naturels et économiques de l'irrigation des terrains cultivés).

Symp. Intern. - Ac. Sci. Pol. Varsovie p. 29 - 37

QUEMENER J., 1968

Exemples d'application de la méthode Stanford - de Ment à des problèmes de fertilisation phosphatée

Ann. Agro. 19, 5 (589-604)

RAFI M., 1964

Contribution à l'étude de l'évaporation du sol nu .

Rev. Géog. Phys. Géol. Dynam. - Vol. VI, 2, p. 167-172

RICHARDS L.A., 1947

Pressure membrane apparatus. Construction and use .

Agric. Eng. 28 - 451-454

RICHARDS S., WECKS L., 1953

Capillary conductivity values from moisture yield and tension measurement on soil columns .

Soil. Sci. Ann. Proc. 206-220

ROBELIN M., COLLIER D., 1958

Evapotranspiration et rendements culturaux .

C.R. Acad. Sci. 247, 1774-1776

ROBELIN M., 1960

Le bilan de l'eau sous climat limagnais et ses répercussions agronomiques .

A.F.E.S., n° 8, Août 1960

ROBELIN M., 1961

Eléments sur la rentabilité de l'irrigation

Ann. Agro. 12, I - 65-73

ROBELIN M., 1962

Evapotranspiration réelle de différents couverts végétaux bien alimentés en eau et évapotranspiration potentielle. Détermination expérimentale.

Ann. Agro. 13 -493-522

ROBELIN M., 1969

Assistance à l'irrigation dans le val d'Allier

B.T.I., 238, 227-229

RODE A., 1956

Catégories et formes de l'eau du sol et propriétés hydrologiques des sols

VI° Cong. Internation. S; . Sol. Moscou, 69-76

SCHOFIELD R.K., 1934

Soil water (phys du sol - p. 184-191)

Imprimerie Nationale

SCHUURMANN J.J., 1958

Root development, water uptake and growth of spring wheat and perennial ray grass on three profiles

Confon supplemental IRRIG. VI, ISSS. Copenhagen 1-11

SCHUURMANN J.J., 1965

Influence of density on root development and growth of oats

Plants and Soil XXII n° 3 - 352-374

SCHUURMANN J.J., 1968

Effects of soil density on root and top growth of oats

Symp. Intern. Tchecos. - Brno 1966 - 103-120

SERVAT E., BOUZIGUES R., 1971

Etude pédologique de la moyenne vallée du Lot

I.N.R.A. - S.E.S., n° 148, Montpellier, 125 p. 2 cart.

SIFAOUI A., 1970

Etude expérimentale de l'évolution de la structure des sols au cours de leur dessiccation

Thèse Toulouse 110p.

SINE L., BENTZ A., 1963

Note sur la mesure de la conductivité capillaire des sols (cas des faibles tensions)

Bull. Inst. Agron. Stat. de Rec. Gbx, t.XXXII, n° 3, 322-358

SINE L., BENTZ A., 1965

Mesure de la conductivité capillaire des sols (cas des faibles tensions)

Bull. Inst. Agron. Stat. de Rech. Gbx, t.XXXIII, N° 3, 441-454

SLATYER R.C., 1967

In plant water relationship - 93-126 - Academic.

Press. London and New-York

SOEIRO F., 1961

Le coefficient de perméabilité des matériaux non saturés et son application à l'étude du mouvement de l'eau dans les sols.

5ème Congr. Interna. De mécanique des sols et des travaux de fondations Paris, 1961 359-365

SOEIRO P., 1964

Contribution à l'étude du mouvement de l'humidité dans les milieux poreux isothermes

Cahiers de la Recherche n° 18, 92 p. Ed Eyrolles

- SOEIRO F.A., DESSAINT A., 1969
Problèmes posés par la mesure de la pression interstitielle dans les sols
Bull. Intern. Ass. Of Scien. Hydrology, XIV, 2, P.6
- STANFORD G., DE MENT J.D., BRADFORD B.N., 1959
A method for measuring short term nutrient absorption by plants
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23, 47-50
- STUDER R., 1961
Méthodes de détermination des réserves hydriques des sols
Ann. Agro. 12-6, 599-608
- TERZACKI K., PECK H.B., 1961
Mécanique des sols appliquée
565 p. Dunod, Paris
- THIRRIOT C., HABIB J. 1971
Influence de diverses hétérogénéités sur la filtration de l'eau à
travers les argiles
Bull. Argiles t. 23 - F 1 - 63-74
- THIRRIOT C., RIZK W., 1971
Sur la pénétration de l'eau de précipitations successives dans un sol
argileux
Bull. Argiles, t. 23 - F 1- 75-89
- TURC L., 1961
Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle
Ann. Agro. 12 (13-50)
- UYTTERHOEVEN J., SLEEK M., FRIPIAT J., 1965
Le comportement thermique des gels de silice
I - Evolution de l'état d'hydratation et de la teneur en hydroxyles
de constitution
n° 274, Bull. Soc. Chim. de France, p. 1800-1804
- UYTTERHOEVEN J., ANDRE J., FRIPIAT J., 1965
Le comportement thermique des gels de silice
II - Influence de l'ion sodium sur le mécanisme de frittage
n° 275, Bull. Soc. Chim. de France, p. 1804 - 1808
- VACHAUD G., 1968
Contribution à l'étude des problèmes d'écoulement en milieux poreux
non saturés
Thèse Fac. Grenoble, 163 p.
- VANNIER G., 1970
Réactions des microarthropodes aux variations de l'état hydrique du sol.
Ecologie du sol n° 40, C.N.R.S., 319 p.

VERNET A., 1964

Evaporation de l'eau du sol

In "L'eau et la production végétale"

I.N.R.A. Paris, 415, 428

VAN WIJK W.R., GARNER W.R., 1960

Soil temperature and the distribution of heat between soil and air .

Trans. 7 th Interna. Congr. Soil Sci. 195-202