

COMMISSION INTERNATIONALE DES IRRIGATIONS ET DU
DRAINAGE

INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND
DRAINAGE

SEPTIEME CONGRES
SEVENTH CONGRESS

R. 46
QUESTION 23

BESOIN EN EAU DES CULTURES IRRIGUEES
A L'EAU SAUMATRE

J.W. VAN HOORN, J.F. BIERHUIZEN, A. COMBEAU,
R. COMBREMONT et CH. OLLAT

RESUME

Dans le cas de l'irrigation à l'eau saumâtre le problème se pose de savoir, quelle est la méthode d'irrigation la plus apte pour obtenir d'une part le meilleur rendement de la culture et la meilleure valorisation de l'eau d'irrigation, d'autre part pour lessiver le sol. Afin de répondre à cette question nous avons mis en place un dispositif, qui comprend d'une part une étude du bilan hydrique en plein champ ainsi qu'une série de lysimètres pour déterminer la consommation des cultures, d'autre part des essais d'irrigation pour étudier la relation entre l'apport d'eau, le rendement des cultures et l'évolution de la salure du sol. Les résultats mentionnés dans ce rapport concernent ceux obtenus à la station expérimentale de Cherfech, située dans la Basse Vallée de la Medjerdah près de Tunis.

Le sol de Cherfech est argilo-limoneux disposant d'une réserve hydrique théorique de 100 mm jusqu'à 0,80 m de profondeur. L'eau d'irrigation provenant de la Medjerdah titre en moyenne 2,5 grammes de sels par litre en été. La pluviométrie est de 400 à 450 mm en hiver.

La consommation en plein champ a été déterminée par la méthode du bilan hydrique, dans laquelle on calcule la consommation par différence

* Water requirements of crops irrigated with brackish water.

† Of UNESCO at the Centre de Recherches sur l'utilisation de l'eau salée en irrigation, Ariana, Tunisie. Les travaux, objet de cette publication, ont été réalisés avec le concours des chercheurs du CRUESI : H. Becvarova, E. Bouaziz, A. Bouzaisi, Z. Chaabouni, H. Chaari, A. Combeau, R. Combremont, O. Nanaa, G. Novikoff, Ch. Ollat, P. Seyral, M. Saïd, H. Trabelsi, J.W. van Hoorn,

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

Nº : 29624

Cote : B

entre l'apport d'eau par l'irrigation et la pluie et la quantité d'eau drainée en tenant compte d'un changement éventuel du taux d'humidité du sol. Elle est de l'ordre de 2 mm par jour en hiver et monte jusqu'à 7 mm par jour environ en été.

Les valeurs obtenues sur les lysimètres correspondent bien en hiver et au début de l'été à celles mesurées en plein champ, mais en plein été elles dépassent largement les consommations en plein champ, atteignant des valeurs de 10 à 15 mm par jour.

Un début a été fait pour déterminer la consommation par la méthode du bilan d'énergie. La radiation nette en été est de l'ordre de $0,66 \text{ cal cm}^{-2}\text{min}^{-1}$. Si toute l'énergie absorbée par la culture, qui est de 80 pour cent pour les tomates et le sorgho fourrager, était utilisée pour la transpiration ($NR=T$), elle correspondrait à 6,9 mm par jour. Comme la vitesse du vent est en général forte, la résistance laminaire entre la feuille et l'air devient faible. Dans le cas d'une forte vitesse du vent une différence de 1°C entre la température de l'air et celle de la feuille suffit pour produire une transpiration de 3,75 mm par jour par l'apport advectif d'énergie.

L'évolution de la salure du sol montre, que sous le climat de la Basse Vallée de la Medjerdah, le lessivage en hiver et lors des premières et dernières irrigations sur les cultures d'été peut réduire la salure, qui monte en été, jusqu'à son niveau originel. Il ne semble donc pas nécessaire de donner un surplus d'eau en été afin d'obtenir un lessivage permanent.

Dans les conditions de Cherfech l'étude des rendements montre, que les différences de rendement en fonction des doses et des fréquences d'irrigation sont relativement faibles, de l'ordre de 0 à 15 pour cent et varient d'une année à l'autre. Malgré une légère baisse de rendement on a intérêt à orienter les irrigations vers l'économie d'eau en été. Comme en Tunisie les disponibilités en eau d'irrigation sont réduites et le prix est élevé, cette optique permet une meilleure valorisation de l'eau. On peut tenir l'apport d'eau pour des cultures du maïs, des tomates et du sorgho fourrager à un équivalent de 5 à 6 mm par jour et celui pour la luzerne à 4 à 5 mm par jour.

SUMMARY

In the case of irrigation with brackish water the problem is to know what is the most suitable method of irrigation to obtain the best crop yield and the best valorization of the irrigation water as well as sufficient leaching to wash out the salts. To answer this question we have studied the water balance under field conditions and on lysimeters to determine the consumptive use of the crops, as well as the relation between quantity and interval of irrigation, crop yield and soil salinity. The results of this report concern those obtained at the experimental station of Cherfech, situated in the lower Medjerdah valley near Tunis.

The Cherfech soil can be classified as a silty clayloam, which has about 100 mm available water between field capacity and wilting point up to a depth of 0.80 m. The irrigation water of the Medjerdah river contains on an average 2.5 grams of salt per liter in summer. The rainfall is about 400 to 450 mm in winter,

The consumptive use under field conditions has been determined by the water balance method, by which we have calculated the consumptive use as the difference between the sum of irrigation water and rainfall and the quantity of drained water, taking into account the change of soil humidity. The consumptive use is about 2 mm per day in winter and amounts to 7 mm per day in summer.

The values obtained on lysimeters are in good correspondence with those obtained under field conditions during winter and early summer, but in full summer the consumptive use measured on lysimeters is much higher, up to 10-15 mm per day.

A start has been made to determine the consumptive use by the method of the energy balance. The net radiation is about $0.66 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ in summer. If all the energy absorbed by the crop, which is 80 per cent for tomatoes and fodder sorghum, is utilised for transpiration ($NR = T$), the net radiation absorbed corresponds to 6.9 mm per day. As the wind velocity is generally high, the resistance of the boundary layer (r_a) becomes low. In the case of high wind velocity, difference of 1°C between the temperatures of the air and the leaf is sufficient to produce a transpiration of 3.75 mm per day by advective energy.

The study of soil salinity shows that, under the climatic conditions of the lower Medjerdah valley, the leaching in winter and during the first and last irrigations of the summer crops can reduce the salinity, which increases in summer to its original level. So it does not seem necessary to give surplus water in summer for permanent leaching.

Under the conditions of Cherfech the study of the crop yields shows that the differences in yield as the results of different treatments of water quantity and interval are relatively small, about 0 to 15 per cent and vary from one year to another. Notwithstanding a small yield depression it is better to apply water economy in summer. As in Tunisia there is not much irrigation water available and the cost is high; this policy allows a better valorization of the irrigation water. Crops like maize, tomatoes and fodder sorghum can be irrigated with a quantity equivalent to 5-6 mm per day and alfalfa with 4 to 5 mm per day.

1. INTRODUCTION

(a) BUT DES RECHERCHES

En vue de l'extension future des périmètres irrigués et de la salure des eaux d'irrigations, le Gouvernement tunisien a créé en 1962 avec la contribution du Fonds Spécial des Nations Unies un projet de recherches, dont l'UNESCO est chargé en tant qu'agence exécutive, ayant pour but d'étudier la mise au point de l'irrigation à l'eau saumâtre. Outre le bâtiment central, qui est situé à Tunis et comprend des laboratoires de chimie, de physique et de physiologie végétale ainsi qu'un centre de documentation, ce centre de recherches dispose de six stations expérimentales, installées chacune dans une région caractéristique de la Tunisie, dans le but de couvrir différentes combinaisons de sol, de qualité d'eau d'irrigation et de pluviométrie,

Par l'irrigation à l'eau saumâtre on apporte avec l'eau des quantités de sels considérables, qui en s'accumulant peuvent entraîner la dégradation du sol. Le problème qui se pose est de connaître quelle est la méthode d'irrigation la plus apte pour obtenir d'une part le meilleur rendement de la culture et la meilleure valorisation de l'eau d'irrigation, d'autre part pour lessiver le sol. En d'autres termes :

1. a-t-on intérêt à ajouter à chaque irrigation un complément qui permette de lessiver le sol, mais qui augmente en même temps la pointe du besoin en eau d'un périmètre irrigué ?
ou a-t-on au contraire intérêt à donner des apports réduits et à pratiquer le lessivage lors de certaines périodes, où les disponibilités en eau sont plus grandes ?
2. a-t-on intérêt à resserrer l'intervalle entre les irrigations pour maintenir la concentration de la solution du sel à un niveau plus bas de façon à diminuer les effets nocifs des sels ?
ou au contraire peut-on espacer les tours d'eau et faire des apports plus importants ?

Le problème essentiel n'est donc pas de lessiver des sols salés, qui seront par la suite irrigués à l'eau douce, mais d'irriguer des sols auparavant non ou peu salés à l'eau saumâtre en maintenant la salure du sol à un niveau qui permet d'obtenir des rendements raisonnables.

Afin de répondre à ces questions nous avons mis en place un dispositif qui comprend d'une part une étude du bilan hydrique en plein champ ainsi qu'une série de lysimètres pour déterminer la consommation des cultures, d'autre part des essais d'irrigation pour étudier la relation entre l'apport d'eau, le rendement des cultures et l'évolution de la salure du sol.

Les résultats mentionnés dans cet article concernent essentiellement ceux obtenus à la station expérimentale de Cherfech, située dans la Basse Vallée de la Medjerdaïh près de Tunis.

(b) CONDITIONS DU SOL ET DE L'EAU D'IRRIGATION

Le sol peut être défini comme étant à texture argilo-limoneuse et limono argileuse, comprenant environ 60 pour cent d'argile ($0,2 \mu$) et de limon ($2-20 \mu$). Il contient de l'ordre de 40 pour cent de calcaire réparti sur les différentes fractions et 2 pour cent de matière organique. Dans le profil des couches argilo-limoneuses, limono-argileuses et limono-sableuses se succèdent alternativement. La densité apparente varie de 1,3 en surface, ce qui correspond à une porosité de 50 pour cent, à 1,6 (porosité de 40 pour cent) dans la couche compacte à 50 cm de profondeur. Elle diminue ensuite jusqu'à 1,45 dans la couche limono-sableuse à 1 m de profondeur pour augmenter de nouveau vers 1,6 à 1,30 m de profondeur.

La perméabilité est de l'ordre de 0,5 à 1 m par jour jusqu'à 1,50 m de profondeur, le niveau des drains. Au-dessous de ce niveau et jusqu'à 3,50 m de profondeur la perméabilité est de l'ordre de 2,5 m par jour. A partir de cette profondeur on trouve une couche argileuse très lourde (90 pour cent d'argile et de limon), qui peut être considérée comme imperméable,

La figure 1 montre d'une part le profil hydrique au ressuyage après une pluie en hiver, profil qui correspond à celui obtenu après une irrigation en été, d'autre part le profil hydrique au point de flétrissement (pF 4,2). La différence entre les deux profils hydriques représente la réserve hydrique théorique du sol, qui est de l'ordre de 100 mm jusqu'à 80 cm et de 150 mm jusqu'à 1 m de profondeur.

Au débit de l'expérimentation la salure du sol augmentait progressivement de la surface vers la profondeur, la conductivité de l'extrait de la pâte saturée EC_e étant de 1 dans la couche 0-20 cm et de 10 dans la couche 120-150 cm.

L'eau d'irrigation provenant de la Medjerdah subit au cours de l'année des variations de salure allant de 1 à 3 grammes par litre, la moyenne en été étant de 2,5 grammes par litre, dont à peu près 60 pour cent de chlorure de sodium et 40 pour cent de sulfate de calcium et de magnésium. La valeur S.A.R. varie de 6 à 7 entre l'hiver et l'été.

(c) CONDITIONS DU CLIMAT

Le climat de la Basse Vallée de la Medjerdah se caractérise par un été chaud et sec et un hiver relativement froid et humide, la pluviométrie étant de l'ordre de 400 à 450 mm. Le Tableau 1 présente les valeurs moyennes par mois sur une période de 4 ans (Mai 1964-1968).

L'évaporation d'une surface d'eau a été mesurée d'une part par des bacs classe A, dont le bac 1 est placé sur le sol et le bac 2 dans le sol, et

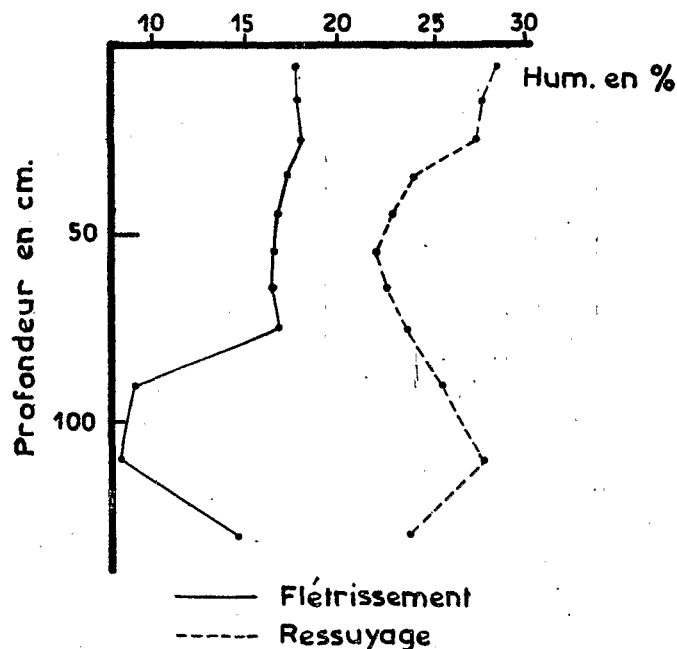


FIGURE 1 : Profils hydriques

calculée d'autre part d'après la formule de Penman à partir de la température, de l'humidité relative de l'air, de la durée d'insolation et de la vitesse du vent.

L'évaporation calculée d'après Penman est, en général, légèrement plus élevée que celle du bac 2, placé dans le sol.

TABLEAU I

Valeurs climatologiques—Station de Cherfech
(Latitude 36°50' N.)

Mois	Temp. °C	Hum. rel. %	Insol. en heures	Vent m/sec	Evaporation en mm/jour			Pluie en mm
					Bac 1	Bac 2	Penman	
Janvier	9.6	79	5.2	3.4	1.6	1.2	1.2	67.1
Février	10.5	79	5.6	3.0	2.2	1.6	1.7	69.0
Mars	11.6	78	5.6	3.2	3.1	2.5	2.6	35.6
Avril	14.5	74	7.4	3.3	4.3	3.5	3.9	26.3
Mai	18.6	70	9.5	3.3	6.3	5.1	5.5	22.4
Juin	21.9	68	9.9	3.4	7.5	5.7	6.4	11.6
Juillet	25.3	64	11.5	2.9	8.2	6.3	7.4	1.6
Août	25.3	67	10.2	2.9	7.1	5.7	6.4	19.9
Septembre	22.2	73	7.6	2.7	4.8	3.7	4.2	35.9
Octobre	19.9	72	7.1	2.9	3.8	2.9	3.2	67.4
Novembre	14.7	73	4.8	2.9	2.8	1.6	1.7	45.7
Décembre	10.7	79	4.4	3.2	1.8	1.5	1.1	57.1
Année	17.1	73	7.4	3.1	4.6	3.6	3.8	459.6

2. CONSOMMATION DES CULTURES

(a) DETERMINATION DE LA CONSOMMATION PAR LA METHODE DU BILAN HYDRIQUE

1. Consommation en plein champ

La consommation en plein champ peut être déterminée par la méthode du bilan hydrique, dans laquelle on calcule la consommation par différence entre l'apport d'eau par l'irrigation et la pluie et la quantité

d'eau drainée en tenant compte d'un changement éventuel du taux d'humidité du sol :

$$E = I + P - Dr \pm \Delta h$$

$$\begin{array}{ccc} \downarrow I+P & & \uparrow E \\ \hline & & \\ \downarrow \text{Perc.} & & \uparrow \text{Cap.} \\ \hline & & \text{O} \end{array}$$

$$\text{Dr} = \text{Perc.} - \text{Cap.} \longrightarrow$$

Pour les mesures en plein champ nous disposons à la station expérimentale de Cherfech d'une part d'une parcelle de 4 ha, qui est drainée à 1,50 m de profondeur par des drains en pôterie débouchant sur un fossé à ciel ouvert avec un plan d'eau à 1,80 m et qui est irriguée d'une façon uniforme, d'autre part des essais d'irrigation. Les irrigations en été sont espacées d'une à deux semaines en fonction de la culture et de son stade de développement.

L'évolution du taux d'humidité du sol a été suivie par des mesures des profils hydriques jusqu'à 1,50 m de profondeur. Il en est ressorti que le taux d'humidité après chaque irrigation varie très peu à condition que l'on apporte une dose suffisante permettant un drainage de l'ordre de 10 à 15 pour cent de l'apport. Comme la correction due au changement du taux d'humidité est de l'ordre de 0 à 0,5 mm/jour en été, c'est à dire moins de 10 pour cent de la consommation, on peut donc simplifier le calcul de la consommation en la calculant par différence entre l'apport d'eau et la quantité drainée sans tenir compte du changement du taux d'humidité du sol.

Dans la formule du bilan hydrique, nous n'avons pas introduit la remontée capillaire du fait que nous n'avons pas non plus tenu compte de la quantité d'eau percolée jusqu'à la nappe, mais de la quantité drainée, c'est à-dire celle mesurée à la sortie des drains. En effet, on constate quelques jours après l'irrigation un abaissement de nappe au-dessous du niveau des drains, dû d'une part au drainage vers le fossé à ciel ouvert et d'autre part à la remontée capillaire, qui serait de l'ordre de 0,2 à 0,3 mm par jour en été. Cependant, si l'on introduit une correction pour la remontée capillaire, on est en revanche également obligé de corriger la quantité drainée et de la remplacer par la quantité percolée jusqu'à la nappe. La différence entre la quantité percolée et la quantité drainée sert à faire remonter la nappe jusqu'au niveau des drains et représente donc la quantité d'eau remontée par capillarité ($\text{Per} - \text{Dr} = \text{Cap.}$), mis à part le drainage vers le fossé. C'est dire que le résultat du calcul du bilan hydrique reste le même. La correction pour le drainage vers le fossé à ciel ouvert, de l'ordre de 0,1 mm par jour, est négligeable. A cause de la présence d'une couche imperméable à 3,50 m de profondeur on peut également négliger un apport éventuel des eaux souterraines.

Le Tableau II montre la consommation des cultures d'hiver en plein champ. Il en ressort que la variation entre les cultures est faible et que la consommation moyenne en Novembre, Décembre et Janvier est de

l'ordre de 2 mm par jour, en Février et Mars de 3 mm par jour pour monter à 5 mm par jour environ en Avril.

TABLEAU II

Consommation des cultures d'hiver en plein champ, en mm par jour

Culture	Nov.	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril
Vesce-Orge 1964-1965	1.6	1.6	1.6	2.9		
Ray-grass 1966-1967		1.8	1.7	3.0	2.9	
Bersim 1967-1968	2.7	2.0	2.0	2.6	2.6	5.5
Moyenne	2.1	1.8	1.8	2.8	2.8	5.5

TABLEAU III

Consommation des cultures d'été en plein champ, en mm par jour

Culture	Mai		Juin		Juillet		Août		Sept.	
	1-15	16-31	1-15	16-30	1-15	16-31	1-15	16-31	1-15	16-30
Luzerne 1966, 67 et 68	4.6	5.3	6.1	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0		
Maïs 1965 et 1966		2.7	3.0	4.8	6.8	6.8	6.8	2.4		
Sorgho fourrager 1967			4.2	4.2	5.6	6.8	7.1	5.8		
1968			4.2	4.8	7.3	6.4	5.9	4.4	4.8	
Tomates 1967	3.3	3.8	4.7	5.3	5.3	6.8	6.2	5.1		
1968	2.7	3.1	3.9	7.9	8.5	6.8	6.1	6.1	6.6	7.1

Le Tableau III présente la consommation des cultures d'été. La luzerne et le maïs ont montré peu de variation d'une année à l'autre, de sorte que nous avons donné les valeurs moyennes calculées sur deux et trois ans. En revanche les variations pour le sorgho fourrager et les tomates ont été plus importantes d'une année à l'autre, dues d'une part à la chaleur de l'été et d'autre part au grade de développement de la culture. La consommation des tomates semble être la plus élevée au moment du grossissement des fruits et l'on observe un deuxième maximum en Septembre 1968 après la deuxième fructification. En général on peut conclure que

la consommation maximale au cours de l'été est de l'ordre de 7 mm par jour.

2. Consommation en lysimètres

Les lysimètres sont des bacs ayant une surface de 4 m² et une profondeur de 1,25 m. Ils sont remplis d'une couche drainante de sable grossier de 25 cm d'épaisseur, sur laquelle repose le profil normal du sol de Cherfech.

La consommation des lysimètres est calculée par différence entre l'apport d'eau et la quantité drainée. Pour ces bacs il faut également que le drainage soit suffisant pour que l'hypothèse d'un taux d'humidité remontant au même niveau après chaque irrigation demeure valable.

De la comparaison entre la consommation en plein champ et celle des lysimètres il ressort, qu'en hiver les deux valeurs correspondent bien. Il en est de même au début de l'été, comme le montre le Tableau IV. En revanche, en plein été, les valeurs des lysimètres dépassent largement celles obtenues en plein champ, atteignant des valeurs de 10 à 15 mm par jour.

TABLEAU IV

Comparaison des consommations en plein champ et sur lysimètre, en mm par jour

Culture	Mai		Juin		Juillet		Août		Sept.	
	1-15	16-31	1-15	16-30	1-15	16-31	1-15	16-31	1-15	16-30
Luzerne champ	4.6	5.3	6.1	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0		
1966-68 lys.			8.5	8.5	11.9	10.9	11.1	12.6		
Maïs champ		2.7	3.0	4.8	6.8	6.8				
1965-66 lys.		2.7	3.8	4.5	10.2	10.2				
Sorgho champ			4.2	4.2	5.6	6.8	7.1	5.8		
1967 lys.			4.3	4.3	7.0	10.0	11.1	11.4		
Tomates champ	2.7	3.1	3.9	7.9	8.5	6.8	6.1	6.1	6.6	7.1
1968 lys.		3.7	3.7	5.7	8.4	15.0	15.3	10.3	7.1	6.7

Ce phénomène ne peut être attribué à une remontée capillaire plus élevée et une meilleure alimentation en eau en bacs qu'en plein champ, puisque des bacs avec une nappe à 1,50 m de profondeur ont donné les mêmes résultats que ceux avec une nappe à 1,00 m, tandis qu'en plein champ la nappe se situe en moyenne à 1,30 m de profondeur.

D'après des analyses effectuées sur deux bacs en automne 1967, la densité apparente serait plus basse sur les évapotranspiromètres qu'en plein champ, donc la porosité plus élevée et la réserve hydrique du sol serait également plus élevée. Il est possible, que cette réserve hydrique plus élevée permette à la plante une plus grande consommation.

D'autre part il est aussi possible que la position des évapotranspiromètres en soit la cause. Au début tous les bacs se trouvaient au bord de la station expérimentale. Au printemps 1967 nous avons placé également des bacs à l'intérieur de la station sur les pistes au milieu des essais d'irrigation. Ces bacs ont donné les mêmes résultats que ceux placés à la station météorologique au bord de la station expérimentale. Cependant la possibilité reste ouverte, que la présence de la piste et de la cave de drainage crée des turbulences d'air, augmentant ainsi la vitesse du vent et la consommation sur les évapotranspiromètres.

(b) DETERMINATION DE LA CONSOMMATION PAR LA METHODE DU BILAN D'ENERGIE

Afin de pouvoir mieux analyser le phénomène de la différence entre la consommation en plein champ et celle sur les lysimètres, nous avons commencé en 1968 des mesures par la méthode du bilan d'énergie.

D'après cette méthode la consommation de la plante n'est plus calculée comme la différence entre apports et exportations dans le bilan hydrique, mais elle est calculée en fonction de la radiation nette (NR), de l'énergie nécessaire pour la transpiration (T , latent heat transfer) et de l'énergie transférée en chaleur sensible (S , sensible heat transfer). En outre la consommation peut être calculée par jour, alors que la méthode du bilan hydrique nous donne une valeur moyenne sur 10 à 15 jours.

$$NR = T + S = \frac{0.623\rho}{P} \left(\frac{e_{max} - e_a}{r_s + r_a} \right) L + \frac{c_p \rho}{r_a} (t_l - t_a).$$

e_{max} = tension de vapeur maximale dépendant de la température de la feuille

e_a = tension de vapeur de l'air

r_s = résistance des stomates

r_a = résistance laminaire entre la feuille et l'air

c_p = chaleur spécifique de l'air sec

ρ = densité de l'air

t_l = température de la feuille

t_a = température de l'air

P = pression atmosphérique

L = chaleur latente de vaporisation.

Sous un climat tempéré le facteur T égale environ 80 pour cent de la radiation nette, le facteur S environ 20 pour cent, la température de la feuille étant plus élevée que celle de l'air. Dans le cas d'un apport advectif d'énergie (effet d'oasis) la température de l'air est au contraire plus élevée

que celle de la feuille, le facteur S devient donc négatif et l'énergie pour la transpiration de la plante plus élevée que la radiation nette.

Afin de calculer la transpiration de la plante les mesures ont donc porté sur :

1. Radiation nette (NR) au cours de la journée et à différentes hauteurs.
2. Surface foliaire à différents étages (LAI , surface foliaire par cm^2) afin d'établir le rapport entre NR et LAI et de pouvoir calculer la transpiration totale de la plante.
3. Température de la feuille et celle de l'air.
4. Humidité de l'air.
5. Vitesse du vent à différentes hauteurs, afin d'établir le rapport entre la vitesse du vent et la résistance laminaire (r_u).
6. La résistance des stomates.

Au cours de ce premier été de mesures il a fallu d'une part calibrer les appareils et d'autre part effectuer des mesures très rapprochées afin d'établir des courbes, qui permettent par la suite de simplifier les mesures. Comme l'élaboration des résultats n'est pas encore terminée, nous ne donnerons que quelques résultats obtenus.

La radiation nette (NR) a été mesurée à différentes profondeurs dans les cultures de tomates, de maïs, de sorgho fourrager et de luzerne. La Figure 2 montre la radiation nette au cours d'une journée sans nuages, mesurée au-dessus du sorgho fourrager et de la luzerne. La radiation nette moyenne de la journée est égale à $0.66 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Il en ressort que l'on peut simplifier les mesures pour des journées pareilles en mesurant entre 12 et 13 heures et en multipliant cette valeur par $2/3$ ($2/3 \times 0.98 = 0.65$).

La Figure 3 montre la diminution de la radiation nette en fonction de la profondeur. La réduction suit plus ou moins une loi exponentielle e

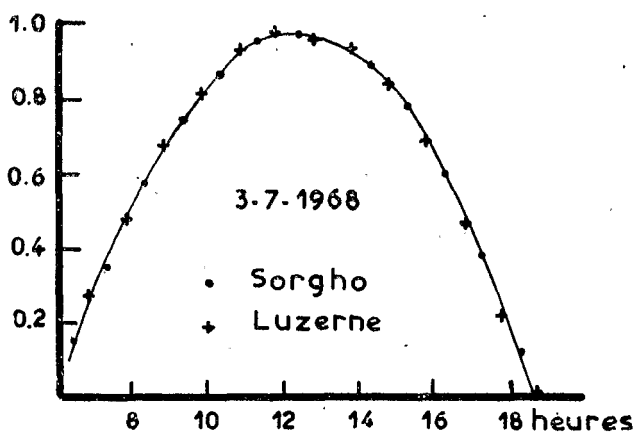


FIGURE 2 : Radiation nette en $\text{cal. cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

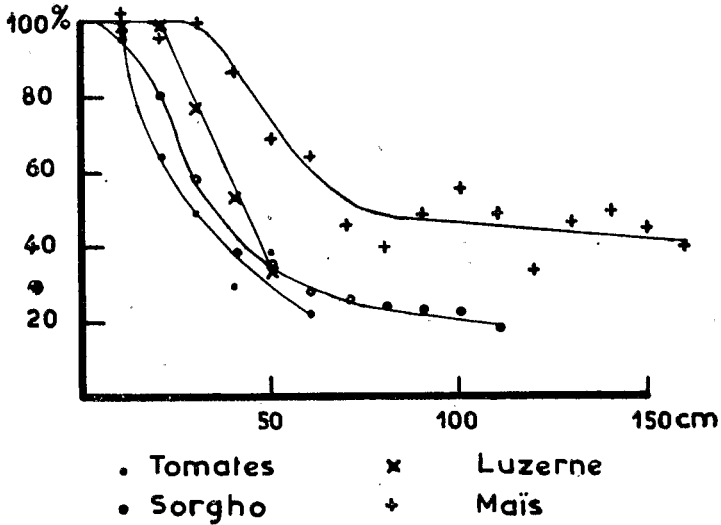


FIGURE 3 : Diminution de la radiation nette en profondeur.

elle est plus prononcée dans les tomates et le sorgho fourrager que dans le maïs et la luzerne. La quantité d'énergie absorbée est de 80 pour cent pour les tomates et le sorgho fourrager, de 65 pour cent pour la luzerne et de 60 pour cent pour le maïs. Si toute l'énergie absorbée était utilisée pour la transpiration ($NR=T$), elle correspondrait respectivement à 6,9, 5,6 et 5,1 mm par jour.

La résistance laminaire entre la feuille et l'air dépend de la vitesse du vent. Au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente, la résistance laminaire diminue et le facteur $\alpha = C_p \rho / r_a$ augmente.

r_a	0.24	0.12	0.06
α en $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1}$	0.94	1.88	3.75

C'est-à-dire que dans le cas d'une forte vitesse du vent une différence de 1°C entre la température de l'air et celle de la feuille suffit pour produire une transpiration de 3,75 mm par jour par l'apport advectif d'énergie.

3. RELATION ENTRE L'APPORT D'EAU, LES RENDEMENTS DES CULTURES ET LA SALURE DU SOL

A la station expérimentale nous avons mis en place des essais "Dose et Fréquence d'irrigation" comportant trois doses d'eau et deux fréquences en sept répétitions et un essai "Dose d'irrigation", qui met en comparaison quatre doses en huit répétitions.

Dans les essais "Dose et fréquence d'irrigation" les trois doses se rapportent de 3 sur 4 sur 5. En période de pleine croissance nous essayons de tenir ces doses respectivement à 75 pour cent (D_1), 100 pour cent (D_2) et 125 pour cent (D_3) de la consommation, c'est-à-dire que la dose

D_1 représente l'économie d'eau et la dose D_3 le lessivage permanent. Pendant le premier et le dernier stade de la culture, où la consommation est plus basse, la dose minimale D_1 est celle nécessaire pour arriver en bout de parcelle. Comme la dose minimale dépasse à ce moment là la consommation, le lessivage a donc lieu sur tous les traitements en début et souvent aussi en fin de culture. Les irrigations sont espacées de n et de 1,5 ou 2 n jours en été.

(a) MAIS

Les résultats des rendements des années 1965 (variété U 32 A) et 1966 (variété Dekalb) ont été résumés dans le Tableau V.

Les différents traitements ont été appliqués pendant une période relativement courte de 30 à 50 jours, mais importante, puisqu'elle correspond à la période de pointe des besoins, fin Juin à début Août.

L'apport d'eau d'irrigation a été plus important en 1965 qu'en 1966, car pendant la première année nous avons suivi, pour la consommation, les indications des lysimètres. Ces appareils ont donné des valeurs plus élevées que celles obtenues en plein champ, sur lesquelles nous sommes basés en 1966. Alors que du 21 Juin au 9 Août 1965 les doses ont été en moyenne équivalentes à 6,4, 8,4 et 10,5 mm par jour, elles ont été du 4 Juillet au 3 Août 1966 de 5,2, 6,9 et 8,6 mm par jour.

TABLEAU V

Rendement du maïs en qx d'épis par ha

Maïs	Fréquence	Rendement				Irrigation en mm		
		D_1	D_2	D_3	Moyen	D_1	D_2	D_3
1965 Apport uniforme de 302 mm du 17.5 au 21.6	T_1 7 à 10 jours	99.5	106.0	108.0	104.5	634	741	848
	T_2 15 à 18 jours	84.5	92.0	91.0	89.0	596	691	788
	Moyenne	92.0	99.0	99.5	97.0			
1966 Apport uniforme de 293 mm du 16.5 au 4.7	T_1 —10 jours	97.9	100.3	104.5	100.9	448	500	552
	T_2 —15 jours	97.4	96.9	92.9	95.7	448	500	552
	Moyenne	97.6	98.6	98.6	98.3			

D'après l'analyse statistique il est ressorti pour 1965 une différence entre les deux fréquences et également entre la dose D_1 d'une part et les doses D_2 — D_3 d'autre part. Ceci s'est confirmé par les mesures de l'élongation journalière de la tige du maïs, qui ont montré une croissance moins rapide dans le cas de la fréquence T_2 et de la dose D_1 . Bien que l'on constate la même tendance en 1966 (D_1 et T_2 plus faible), les différences ne sont

pas statistiquement significatives. Il est à noter qu'en Juillet 1966 il a fait moins chaud qu'en Juillet 1965 : 4°C de différence pour la température maxima moyenne, en Juillet 1965 la température a dépassé 7 fois 40°C, en Juillet 1966 jamais.

(b) TOMATES

Les résultats des rendements des années 1967 et 1968 (variété Roma) ont été résumés dans le Tableau VI.

Les différents traitements ont été appliqués en 1967 à partir du 22 Mai et en 1968 à partir du 23 Avril, le début de la culture. L'apport d'eau, y compris 50 mm de pluie en Juin 1968, a correspondu, de début Juin à début Septembre, pour les trois doses, respectivement à 5,5, 7,3 et 9,1 mm par jour en 1967 et à 5,8, 7,6 et 9,4 mm par jour en 1968. C'est-à-dire, la dose D_1 a été en moyenne équivalente à la consommation en 1967 et à 85 pour cent environ en 1968, année où la consommation a été plus élevée alors qu'en Juillet des deux années elle correspondait à 80 pour cent.

TABLEAU VI

Rendement des tomates en tonnes par ha

Tomates	Fréquences	Rendement				Irrigation en mm		
		D_1	D_2	D_3	Moyen.	D_1	D_2	D_3
1967	T_1 7 à 8 jours	41.5	44.0	43.3	42.9	760	966	1176
Irrigation du	T_2 10 à 12 jours	39.7	45.8	41.6	42.3	760	963	1176
2.5 au 31.8	Moyenne	40.6	44.9	42.4	42.6			
1968	T_1 7 à 8 jours	38.8	42.1	39.4	40.1	861	1148	1434
Irrigation du	T_2 10 à 11 jours	35.2	32.2	36.1	34.5	869	1157	1445
23.4 au 14.9	Moyenne	37.0	37.1	37.7	37.3			

D'après l'analyse statistique les différences en 1967 ne sont pas significatives, alors qu'en 1968, où la consommation a été plus élevée, les fréquences ont marqué une différence significative.

Il est à noter que les irrigations, en 1968 ont été poursuivies plus longtemps qu'en 1967, même après le 14 Septembre, afin d'étudier la production des tomates en arrière saison, dont les résultats ne sont pas encore disponibles. Le rendement se rapporte donc à la période allant jusqu'à fin Août.

(c) SORGHO FOURRAGER

Les résultats des rendements de l'année 1968 (variété Piper) ont été résumés dans le Tableau VII.

TABLEAU VII

Rendement du sorgho fourrager en tonnes de matière verte par ha

Sorgho fourrager	Fréquence	Rendement				Irrigation en mm		
		D_1	D_2	D_3	Moyen.	D_1	D_2	D_3
1968	T_1 — 10 jours	73.8	81.9	79.1	78.3	624	830	1037
Irrigation du	T_2 — 15 jours	63.7	70.0	75.1	69.6	622	825	1032
16 5 au 8.9	Moyenne	68.7	75.9	77.1	73.9			

Les différents traitements ont été appliqués à partir du 18 Mai, début de la culture. L'apport d'eau, y compris 50 mm de pluie en Juin, a correspondu, de début Juin à début Septembre, pour les trois doses, respectivement à 5,5, 7,1 et 8,8 mm par jour. C'est-à-dire, la dose D_1 a été en moyenne équivalente à la consommation, en correspondant 80 pour cent environ en Juillet.

L'analyse statistique des résultats montre une différence entre les deux fréquences et également entre la dose D_1 d'une part et les doses D_2 - D_3 d'autre part.

(d) LUZERNE

Sur une luzerne (variété de Provence), semée en 1966 sous couvert de tournesol, nous avons mis en place un essai "Dose d'irrigation" comportant quatre doses en huit répétitions. Cet essai a pour but de nous offrir une gamme de doses plus large que celle des essais "Dose et Fréquence d'irrigation" afin de mieux étudier l'économie d'eau.

En effet nous avons constaté sur les essais "Dose et Fréquence d'irrigation", qu'il était difficile d'apporter de faibles doses tous les 8 à 10 jours. Aussi avons nous adopté pour cet essai une seule fréquence, les irrigations se faisant toutes les deux semaines en été. La dose D_0 est la dose minimale pour permettre à l'eau d'arriver en bout de parcelle. Le rapport entre les quatre doses est de 1 sur 1,5 sur 2 sur 2,5. En été les doses correspondent respectivement à un apport journalier de 4, 6, 8 et 10 mm par jour, se situant donc autour de la consommation maximale de la luzerne en plein champ de 7 mm par jour.

Après le début de l'essai au printemps 1967 sept coupes ont été effectuées, dont nous avons résumé les rendements dans le Tableau VIII.

On peut en tirer les conclusions suivantes :

— D'après l'analyse statistique les doses marquent d'une façon significative sur l'ensemble de la 2e et de la 3e coupes et sur l'ensemble de toutes les coupes. Toutefois il est à signaler, que la même tendance, une augmentation du rendement à partir de D_0 vers D_2 , ensuite une diminution sur D_3 , se manifeste dans toutes les coupes,

TABLEAU VIII

Rendement de la luzerne en tonnes de matière verte par ha

Date de la coupe	Rendement				Irrigation en mm				Pluie en mm
	D_0	D_1	D_2	D_3	D_0	D_1	D_2	D_3	
17.4	17.4	18.3	19.0	18.7	94	141	188	235	20
13.5	10.0	10.4	11.9	11.2	46	69	92	115	34
9.6	9.3	9.8	10.4	10.4	88	132	174	218	17
8.7	6.8	7.1	7.7	6.8	106	159	211	264	
8.8	9.3	10.4	10.9	10.2	118	177	236	295	
4.9	5.4	6.5	7.5	6.9	109	163	217	271	
2.10	2.1	2.3	2.6	2.5	56	84	113	141	32
14.11	2.2	2.7	2.9	3.1	166	248	331	414	20
Total	62.5	67.5	72.9	69.8	783	1173	1562	1953	123

En outre les doses massives du traitement D_3 , amènent à une disparition des plantes du fait de la nature asphyxiante du sol.

—Des rendements des coupes successives et des apports d'eau il ressort qu'il faut doubler l'apport pour obtenir une augmentation du rendement de l'ordre de 15 pour cent.

—Au début Juillet environ 70 pour cent de la production totale sont atteints pour un apport d'eau équivalent à 40 pour cent de l'apport total et à 60 pour cent de l'apport donné jusqu'à fin Août.

Dans le Tableau IX nous avons calculé la productivité en kg de matière verte du mètre cube d'eau apportée par irrigation et pluie, ainsi que l'apport journalier en mm par jour, pour les quatre traitements.

Il en ressort nettement que la productivité du mètre cube d'eau baisse au cours de l'année et devient très faible à partir de début Septembre d'une part et que la productivité est la plus élevée pour la dose équivalente à 4 mm par jour d'autre part. Les résultats obtenus jusqu'à ce jour en 1968 confirment ces conclusions.

(e) EVOLUTION DE LA SALURE DU SOL

L'étude de la salure du sol sur les essais "Dose et Fréquence d'irrigation" a montré, que sous le climat de la Basse Vallée de la Medjerdah, ayant une pluviométrie de 400 à 450 mm en hiver, la variation saisonnière, à savoir une augmentation de la salure en été et une diminution en hiver, est plus importante que les effets des différents traitements. Il semble que l'apport d'un surplus d'eau par la dose D_3 en période de pointe, qui représente le lessivage permanent, n'influe pas beaucoup. Mais comme nous

l'avons déjà signalé, en hiver et lors des premières et souvent des dernières irrigations, les doses ont toujours dépassé la consommation créant ainsi un lessivage pendant ces périodes sur tous les traitements.

Sur l'essai "Dose d'irrigation", où nous avons pu donner en été des doses plus faibles par rapport à la consommation que sur les essais "Dose et Fréquence d'irrigation", des différences nettes ont été observées en Septembre 1967 comme le montre le Tableau X.

TABLEAU IX

Productivité en kg de matière verte du m³ d'eau

Période	Productivité	D ₀	D ₁	D ₂	D ₃
2e et 3e coupes 17.4 au 9.6	kg/m ³	10.4	8.0	7.0	5.6
	mm/jour	3.5	4.8	6.0	7.3
4e et 5e coupes 9.6 au 8.8	kg/m ³	7.2	5.2	4.2	3.0
	mm/jour	3.7	5.6	7.5	9.3
6e coupe 8.8 au 4.9	kg/m ³	5.0	4.0	3.5	2.5
	mm/jour	4.0	6.0	8.0	10.0
7e et 8e coupes 4.9 au 14.11	kg/m ³	1.9	1.6	1.4	1.1
	mm/jour	3.2	4.4	5.7	6.9

TABLEAU X

Evolution de la salure du sol (ECe)

Couche	print. 67	automne 67				printemps 68			
	homogène	D ₀	D ₁	D ₂	D ₃	D ₀	D ₁	D ₂	D ₃
0—20	1.9	5.9	4.8	4.2	4.2	1.6	1.5	1.8	1.4
20—40	3.6	6.1	5.7	5.1	4.5	3.4	3.2	2.8	2.3
40—80	5.6	7.6	7.2	6.4	5.3	5.5	4.4	3.7	3.5
80—120	8.5	10.5	9.1	8.2	7.6	8.8	7.1	6.7	5.9
120—150	9.3	10.2	9.2	9.1	8.5	10.3	8.3	7.4	6.7
Moyenne	6.4	8.2	7.6	6.9	6.3	6.5	5.3	4.9	4.3

Aussi bien en automne 1967 qu'au printemps 1968 il y a une différence nette sur tout le profil entre les quatre doses, dont le classement se fait dans l'ordre croissant $D_0 > D_1 > D_2 > D_3$. Mais il n'en demeure pas moins, que la salure moyenne du profil de la dose D_0 est revenue à peu près à sa valeur d'origine, la salure des couches supérieures étant un peu plus basse et celle des couches en profondeur un peu plus élevée.

Le lessivage au cours de l'automne et de l'hiver, à la suite d'un apport de 166 mm d'eau d'irrigation du 6 Octobre au 16 Novembre et de 301 mm de pluie entre les deux dates de prélèvement, a produit ce dessalement. Toutefois il est à noter que la pluviométrie a été favorable, 46 mm tombant 4 jours après l'irrigation du 16 Novembre et 160 mm en Décembre et Janvier, ce qui représente un apport d'eau nettement excédentaire par rapport à la consommation de l'ordre de 2 mm par jour. La quantité d'eau drainée serait de l'ordre de 50 à 75 mm au cours de l'hiver.

4. BESOIN EN EAU DES CULTURES D'ETE

(a) GENERALITES

L'évolution de la salure du sol montre, que sous le climat de la Basse Vallée de la Medjerdah ayant une pluviométrie de 400 à 450 mm, le lessivage en hiver et lors des premières et dernières irrigations sur les cultures d'été peut réduire la salure, qui monte en été, jusqu'à son niveau originel. Il ne semble donc pas nécessaire de donner un surplus d'eau en été afin d'obtenir un lessivage permanent.

A la station de Cherfech le sol argilo-limoneux dispose d'une réserve hydrique théorique de 100 mm jusqu'à 0,80 m et de 150 mm jusqu'à 1,0 m de profondeur. Lors des premières irrigations le déficit d'eau dans le sol, dû à la culture précédente, est complété. Dans ces conditions l'étude des rendements montre que les différences de rendement en fonction des doses sont relativement faibles et varient d'une année à l'autre :

- pour le maïs 0 à 10 pour cent pour un apport en Juillet de 5,2 à 6,4 (D_1) contre 6,9 à 8,4 (D_2) mm par jour.
- pour les tomates 0 pour cent pour un apport de 5,5 (D_1) contre 7,5 (D_2) mm par jour.
- pour le sorgho fourrager 10 à 15 pour cent pour un apport de 5,5 (D_1) contre 7,1 (D_2) mm par jour.
- pour la luzerne 10 à 15 pour cent pour un apport de 4 (D_0) contre 8 (D_2) mm par jour.

En ce qui concerne les fréquences on observe également des différences variables d'une année à l'autre :

- pour le maïs 0 à 15 pour cent pour un tour d'eau de 10 contre 15 jours.
- pour les tomates 0 à 15 pour cent pour un tour d'eau de 7 à 8 contre 10 à 12 jours.
- pour le sorgho fourrager 10 pour cent pour un tour d'eau de 10 contre 15 jours.

Bien que la dose plus faible D_1 puisse donner des rendements moins élevés, elle semble plus intéressante dans les conditions de la Tunisie, où les disponibilités en eau d'irrigation sont réduites et le prix élevé. En effet, comme cette dose permet une meilleure valorisation de l'eau, on a intérêt à orienter les irrigations vers l'économie d'eau en été. C'est-à-dire, on a intérêt à tenir l'apport d'eau pour des cultures de maïs, de tomates et de sorgho fourrager à un équivalent de 5 à 6 mm par jour et celui pour la luzerne à 4 à 5 mm par jour, soit pour un périmètre irrigué un débit fictif continu de 0,6 à 0,7 l/sec/ha. Les résultats des autres stations, où les conditions de sol et de pluviométrie diffèrent de celles de Cherfech, soulignent également cet intérêt de l'économie d'eau en été.

La dose, que l'on peut apporter dans la pratique, est fonction des paramètres d'irrigation (vitesse d'infiltration, pente, longueur et débit). En général il est plus facile d'apporter des doses de 60 à 80 mm que de 40 à 50 mm. Si la culture le permet, on a donc de ce point de vue intérêt à irriguer à un tour d'eau moins rapide pour pouvoir apporter des doses plus fortes, tout en maintenant un équivalent de 5 à 6 mm par jour. Si l'on doit reserrer les irrigations en plein été, lors des périodes de grande chaleur (sirocco), on peut donc être obligé de dépasser l'équivalent de 5 à 6 mm par jour, si les paramètres d'irrigation sont moins favorables pour apporter des doses faibles.

A la suite des résultats obtenus à Cherfech et en partant du principe d'orienter les irrigations vers l'économie d'eau, nous avons établi dans les paragraphes suivants des schémas pour les besoins en eau des cultures d'été.

Il est à noter que le déficit d'eau au début de la culture, si celle-là a été précédée par une culture d'hiver, comme dans le cas de Cherfech, est de l'ordre de 80 à 100 mm, dont nous avons tenu compte dans nos schémas. Le déficit d'eau au début de l'automne, après la culture d'été, est de l'ordre de 100 à 150 mm, dont il faut également tenir compte pour les premières irrigations des cultures d'hiver.

(b) MAIS

Sur un sol comme celui de Cherfech et pour des semis du mois de Mai, il ne semble pas y avoir intérêt à poursuivre les irrigations après la fin de la fécondation (stade barbe noire), soit 80 à 90 jours après le semis pour des variétés tardives (120 jours). Il est possible, que pour des semis plus précoces il y ait intérêt à donner une irrigation encore pour permettre au grain de mûrir correctement.

Compte tenu de ces considérations et d'un déficit d'eau au début de la culture de l'ordre de 80 à 100 mm, on peut dresser le schéma du Tableau XI pour le besoin en eau de la culture. Le rythme des irrigations sera de 15 jours, que l'on peut réduire à 10 jours en période de sirocco.

(c) TOMATES

Le schéma du Tableau XII concerne des tomates repiquées fin Avril début Mai, qui seront enlevées en Septembre pour pouvoir semer une culture d'hiver, et il ne tient donc pas compte du besoin en eau en arrière-saison (Septembre—Octobre). Le rythme des irrigations sera de 7 à 8 jours en

TABLEAU XI

Besoin en eau du maïs en mm

Mois	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
Semis précoce	100	100	130	120	—	450
Semis tardif	—	130	100	150	70	450

TABLEAU XII

Besoin en eau des tomates en mm

Mois	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
Besoin en eau	100	100	160	170	170	700

période de pointe de consommation et de 10 à 12 jours dans les autres périodes.

(d) SORGHO FOURRAGER

Le schéma du Tableau XIII concerne du sorgho fourrager semé dans la deuxième quinzaine du mois de Mai, qui sera retourné après la troisième coupe vers la mi-Septembre. Le rythme des irrigations sera de 10 jours à partir de fin Juin à mi-Août et de 15 jours pour le reste de la saison.

TABLEAU XIII

Besoin en eau du sorgho fourrager en mm

Mois	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Total
Besoin en eau	100	160	170	170	50	650

TABLEAU XIV

Besoin en eau de la luzerne en mm

Mois	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
Besoin en eau	120	120	120	120	120	600

(e) LUZERNE

Dans les conditions de Cherfech, terre lourde avec risque d'asphyxie et pluviométrie de 400 à 450 mm avec pluies de printemps et d'automne, il est préférable de commencer les irrigations en Avril avec un tour d'eau de deux à trois semaines, de les continuer ensuite à 10-15 jours suivant les coupes, qui se font une fois par mois ou une fois par trois semaines, et de les arrêter au plus tard début Septembre. On peut se permettre d'arrêter les irrigations fin Juillet, si l'on veut utiliser l'eau sur des cultures plus productives à cette époque.