

## EVAPOTRANSPIRATION DE DIFFERENTS COUVERTS VEGETAUX EN REGION MEDITERRANEENNE SEMI-ARIDE

BRUNO A. MONTENY\*

*Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Paris (France)*

(Reçu le 31 décembre, 1970)

### ABSTRACT

Monteny, B. A., 1972. Evapotranspiration de différents couverts végétaux en région méditerranéenne semi-aride. (Evapotranspiration of different crops in a Mediterranean semi-arid region.) *Agric. Meteorol.*, 10: 19-38.

The potential evapotranspiration (*ETP*), as defined by Thornthwaite, is considered as a physical process and it does not take into account the complexities of the interactions between crop, soil and climatological factors.

A better definition, given by Penman, introduces some factors related to the crop characteristics.

Bouchet and Robelin consider that the potential evapotranspiration is the envelope of the different crops' maximum evapotranspirations (*ETM*) with non-limiting leaf area: it gives an indication of the water requirements of the ecological environment.

The value of the maximum evapotranspiration in an arid region depends on the kind of crop chosen.

This study gives an analysis of some data obtained with different crops in the Mediterranean region of Tunis (Tunisia).

The energy balance method has shown the importance of another source of energy in this semi-arid region — advection. Under conditions of large scale advection (oasis effect), the ratio between maximum evapotranspiration and net radiation exceeds generally unity.

The water loss from the different crops receiving optimum irrigation treatment, varies widely. The factors which could influence the maximum crop evapotranspiration are described as follows: (a) the air characteristics (temperature, humidity, wind-speed) flowing from a dry area into the experimental irrigated area; (b) the solar energy interception and the crop architecture; and (c) the extent of the transpiring surface (leaf development, leaf area index) and its characteristics (geometry, stomatal density, tropism).

It is concluded that, for a large area, cultivated with a defined crop, the measured evapotranspiration from this crop would be a more accurate method of irrigation control. It is difficult in those arid conditions to evaluate the water requirements for a cropped surface by climatological formulae because of the importance of the physiological factors.

### RÉSUMÉ

L'application du concept de l'évapotranspiration potentielle en région méditerranéenne semi-aride présente quelques difficultés, provenant soit de la définition même de l'évapotranspiration, soit de

\* Adresse actuelle: Laboratoire de Bioclimatologie, ORSTOM BP 20, Abidjan, Côte d'Ivoire.

25 JAN. 1974  
O. R. S. T. O. N.

Collection de Référence  
n° 6614 Bot.

l'existence de l'effet "oasis". En effet, les résultats montrent que cette donnée n'est pas uniquement sous la dépendance des conditions climatiques mais qu'elle est également déterminée par certaines caractéristiques du végétal formant le couvert.

La détermination de l'évapotranspiration potentielle se heurte donc au choix du type de végétal qui devrait représenter, par son évapotranspiration maximale, la "demande en eau" du milieu écologique. Dans ce choix, il faut tenir compte des surfaces d'échanges du couvert (indice foliaire, géométrie du port foliaire), qui influencent l'interception et la pénétration de l'énergie solaire et des masses d'air ainsi que la quantité d'énergie réfléchie, et de certaines particularités de l'espèce végétale (résistance stomatique, système racinaire . . .).

Pour chaque type de couvert, il existe une évapotranspiration maximale correspondante. L'ensemble des courbes d'*ETM* peut être enveloppé dans une courbe représentant, en assez bonne approximation, la demande en eau du climat, c'est à dire l'évapotranspiration potentielle de la région.

## INTRODUCTION

En raison de l'importance du déficit hydrique en région semi-aride, une meilleure connaissance des conditions climatiques et édaphiques est nécessaire à toute introduction de nouvelles espèces ou extension des cultures sur grands périmètres.

La croissance des plantes cultivées est particulièrement importante durant la saison post-hivernale (janvier à avril). Toutefois, du fait de la variabilité quantitative et qualitative des précipitations, des irrigations sont nécessaires pour éviter que l'eau ne devienne un facteur limitant. Il importe dans ce cas de préciser les conditions d'alimentation en eau de couverts végétaux aussi différents que la luzerne ou le blé, afin de permettre l'adaptation des techniques d'irrigation à la physiologie de la plante. Ceci nécessite l'évaluation de l'évapotranspiration de ces couverts, ce qui, en ces régions, présente un certain nombre de difficultés. Nous verrons l'importance non seulement de l'influence des facteurs climatiques et édaphiques sur l'évapotranspiration mais également celle de la plante et de son rythme de croissance.

## DEFINITIONS

L'évapotranspiration des cultures concerne non seulement l'eau évaporée par le sol, mais également celle transpirée par le couvert végétal. La quantité d'eau retenue par les divers organes de la plante représente à peine 1% de la quantité totale évapotranspirée durant le cycle complet de croissance du végétal. Cette évapotranspiration est sous la dépendance des énergies radiative et advective.

Thornthwaite (1944) a défini l'évapotranspiration potentielle (*ETP*) comme étant la perte d'eau maximale par la végétation si, à aucun moment, le sol ne se trouve en déficit hydrique. Après, il constate la nécessité de préciser un certain nombre de conditions climatiques et végétales (Thornthwaite, 1954). Dès lors, il fait intervenir des facteurs tels que l'albédo de la surface évaporante et l'énergie qu'elle utilise effectivement.

En 1956, une définition plus précise de l'*ETP* est proposée: c'est, pour une unité de temps donnée, la perte maximale d'eau en phase gazeuse d'un couvert végétal, abondant et uniforme, de faible hauteur, en pleine croissance, bien alimenté en eau (Anon, 1956).

Penman (1956) considère que l'évapotranspiration potentielle définie comme précédemment ne dépend que de l'albédo de la surface quels que soient le type de sol ou l'espèce végétale. Le coefficient  $f$  dans l'équation  $Et = fE_0$  ( $Et$  = évapotranspiration;  $E_0$  = évaporation d'une nappe d'eau libre) n'exprime que la différence d'albédo entre l'eau (0,05-0,08) et le couvert végétal (0,20-0,30). La valeur de  $f$  (facteur de réduction de Penman) varie au cours de l'année; il est généralement compris entre 0,6 et 0,9 et ne peut dépasser l'unité car les pertes d'eau évapotranspirée par le couvert sont tout au plus égales à l'évaporation de la surface d'eau libre dans les mêmes conditions climatiques.

L'équation proposée par Penman est la suivante:

$$E_0 = \frac{\Delta Rn}{\Delta + \gamma} + \frac{\gamma Ea}{\Delta + \gamma} \quad [1]$$

$E_0$  (mm jour<sup>-1</sup>) = évaporation d'une surface d'eau libre;  $\Delta$  (mm Hg °C<sup>-1</sup>) = pente de la courbe température-pression de vapeur saturante à la température de l'air à 2 m de hauteur ( $T_a$ );  $Rn$  (cal. jour<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>) = rayonnement net;  $\gamma$  (mm Hg °C<sup>-1</sup>) = constante psychrométrique;  $Ea$  (mm jour<sup>-1</sup>) = constante  $u$  ( $e_a - e_a$ );  $u$  (m sec<sup>-1</sup>) = vitesse du vent à 2 m;  $e_a$  (mm Hg) = pression de vapeur saturante à la température  $T_a$ ;  $e_a$  (mm Hg) = pression de vapeur réelle à 2 m.

Le rayonnement net, pour une région donnée et pour une surface évaporante, présente une limite supérieure; tout accroissement de l'évapotranspiration provient d'une captation d'énergie des masses d'air pénétrant dans le système; le second terme de la somme permet d'évaluer cette quantité supplémentaire.

Bouchet (1961-1963) définit l'évapotranspiration potentielle comme une donnée dépendant uniquement des facteurs climatiques où seule l'énergie serait facteur limitant. Le schéma proposé assimile l'ensemble de cette énergie à une "demande en eau" imposée par le climat. Ce schéma simplifie le problème, car en fait l'évapotranspiration représente la résultante d'un ensemble d'interactions agissant soit simultanément, soit successivement entre le milieu (climat et sol) et le couvert végétal.

En 1969, Bouchet et Robelin reprennent cette notion d'évapotranspiration potentielle en introduisant le facteur "surface d'échange" à propos des surfaces foliaires. Ces surfaces d'échanges captent, outre l'énergie solaire, l'énergie d'origine advective. La définition de l'évapotranspiration potentielle donnée précédemment doit donc être modifiée: l'*ETP* traduirait la perte d'eau maximale d'un couvert végétal abondant, en pleine croissance et bien alimenté en eau, ayant de très nombreuses surfaces d'échanges. Toutefois l'importance des surfaces d'échanges ne peut faire oublier que la transpiration foliaire est fonction de la physiologie de l'espèce végétale. Peut-on admettre a priori que deux couverts formés de plantes différentes, à même surface foliaire, évapotranspirent les mêmes quantités d'eau?

Dans le cas où le facteur limitant n'est plus l'énergie disponible mais une des conditions reprises dans la définition de l'*ETP* telle que l'alimentation hydrique ou les surfaces d'échanges, les quantités effectivement consommées correspondent à l'évapotranspiration réelle. Cette *ETR* atteindra sa valeur maximale *ETM* si les conditions tendent à être

optimales ( $ETR = ETM$ ). C'est ainsi que Bouchet et Robelin (1969) ont été amenés à considérer que l'*ETP* peut être représentée par une enveloppe des *ETM* des différents types de couverts.

#### CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Le Centre d'Étude de l'Eau (CEE), créé par Vernet (1957), est une parcelle expérimentale d'un hectare et demi, située dans la proche banlieue de Tunis (Ariana) et est entourée d'un ensemble de terrains de culture.

#### *Dispositif de mesures*

On y dispose pour les essais d'un ensemble de différentes parcelles ayant un ou plusieurs évapotranspiromètres du type Thornthwaite. Cette case lysimétrique a une superficie de  $4 \text{ m}^2$  et a un niveau d'eau permanent à  $0,60 \text{ m}$  de la surface du sol. La réserve en eau du sol reste sensiblement la même après chaque irrigation ou pluie.

Les premières mesures effectuées concernent l'évaporation d'un sol nu et l'évapotranspiration maximale d'un *Pennisetum clandestinum* (kikuyu). Leurs anneaux de garde correspondent à une superficie de  $10 \times 20 \text{ m}^2$  (Damagnez et al., 1963).

Une parcelle, d'une superficie de  $30 \times 30 \text{ m}^2$ , supporte une culture de *Medicago sativa* (luzerne de Provence), mise en place par de la Sayette (1967); quatre évapotranspiromètres y sont répartis à  $7,5 \text{ m}$  de la bordure et à  $15 \text{ m}$  l'un de l'autre. Ils fournissent l'évapotranspiration maximale de ce couvert. Les premiers essais ont montré l'homogénéité de ces quatre cases lysimétriques dont le couvert était coupé de façon synchrone. Les essais effectués les années suivantes étaient conduits de manière à obtenir par rotation quatre stades végétatifs différents en coupant  $1/4$  de la parcelle avec sa case évaporante chaque semaine.

Quatre autres évapotranspiromètres, disposés en file dans une tranchée bétonnée, permettent la détermination de l'évapotranspiration maximale d'un couvert de *Pennisetum purpureum* (napier). L'anneau de garde, d'une superficie de  $6 \times 5 \text{ m}^2$ , est un compromis entre les possibilités pratiques et la nécessité d'avoir un certain microclimat. Une des cases située à l'extrémité ouverte de la tranchée, sert à assurer une certaine homogénéité de l'ambiance de la culture, c'est-à-dire à supprimer les effets de bord.

Un dernier évapotranspiromètre, installé en 1968 dans une parcelle de  $20 \times 40 \text{ m}^2$  nous a permis de mesurer l'évapotranspiration maximale d'un couvert de *Triticum sativum* (blé mexicain — Tobari 66) au cours de sa croissance.

#### *Situation climatique*

La région de Tunis, dans la basse vallée de la Medjerda, appartient à l'étage méditerranéen semi-aride à hivers tempérés (Emberger, 1955) et reçoit une précipitation annuelle de  $420 \text{ mm}$ .

Cette région se caractérise par un déficit hydrique climatique important (Fig.1). Le bilan hydrique, suivant la conception de Thornthwaite, caractérise l'écart entre la quantité d'eau fournie par les pluies et celle dont un couvert végétal couvrant bien le sol aurait besoin pour se développer correctement.

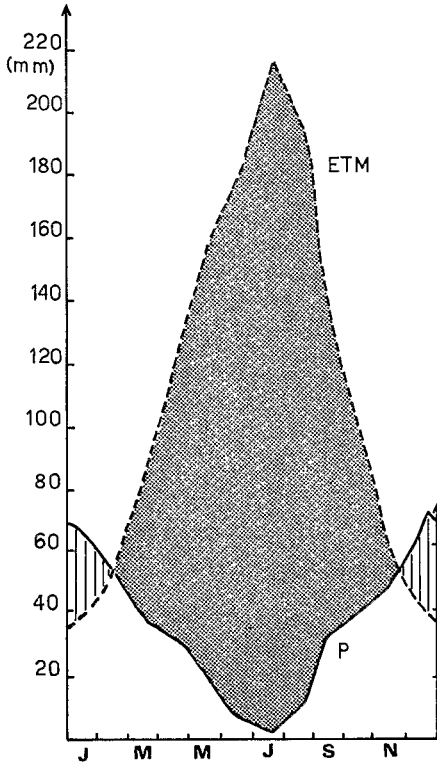


Fig.1. Déficit hydrique annuel pour la région de Tunis. Evapotranspiration maximale d'un gazon de kikuyu (moyenne de 1959 à 1968) et pluies (moyenne de 1959 à 1968).

Fig.1. Annual water deficit of the region of Tunis (average of the maximum evapotranspiration (*ETM*) from a kikuyugrass and the precipitation from 1959 to 1968).

Ce bilan annuel est complété par le complexe héliothermique représenté par la Fig.2, qui donne l'évolution du rayonnement solaire et de la température moyenne,  $(T_{\max} + T_{\min})/2$ , qui en dépend en partie.

#### Méthode de mesure

##### Bilan hydrique

L'évapotranspiration journalière *ET* est obtenue à partir de la détermination des différents termes du bilan hydrique:

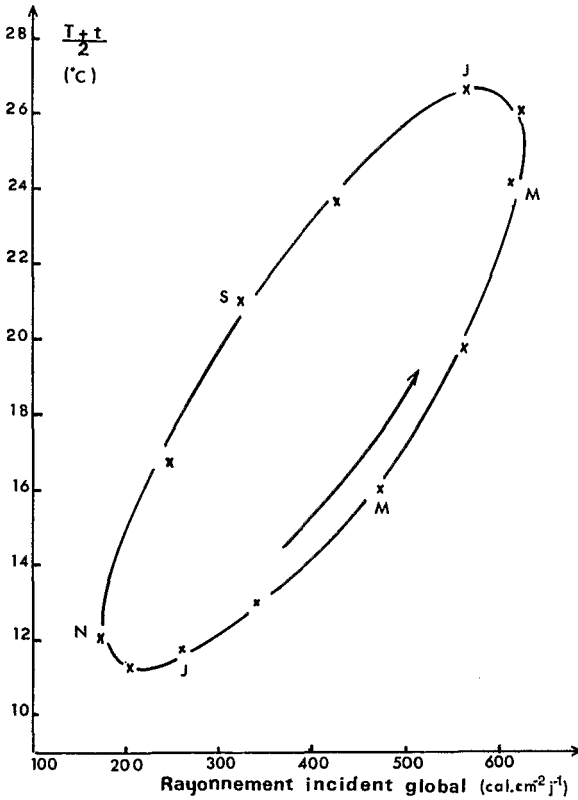


Fig.2. Complexe héliothermique pour la région de Tunis (moyenne de 1965 à 1968).

Fig.2. Relationship between global radiation and the average temperature  $[(\text{max.} + \text{min.})/2]$  for Tunis (1965 to 1968).

$$ET = I + P \pm dW - D \quad (2)$$

$I$  = irrigation;  $P$  = pluie;  $dW$  = variation de la réserve hydrique du sol;  $D$  = drainage.

L'évapotranspiration  $ET$  est mesurée par la différence entre les quantités d'eau fournies au système ( $I$  et  $P$ ), quotidiennement en surface, et la quantité drainée le lendemain à la même heure. L'apport d'eau doit être légèrement supérieur à l'évapotranspiration. Le couvert végétal est placé dans des conditions telles que l'évapotranspiration réelle soit la plus proche possible de l'évapotranspiration maximale ( $ETR = ETM$ ).

Trois sources d'erreur peuvent affecter les résultats: (a) la surface de l'évapotranspiromètre pourrait représenter une proportion trop grande de la surface de l'ensemble de la culture; (b) le rapport entre la hauteur du couvert et la distance du bord d'attaque est trop faible, si on se rapporte aux travaux de Stanhill (1965); (c) l'espèce végétale choisie pour la détermination de l'évapotranspiration maximale pourrait ne pas être représentative de

l'évapotranspiration régionale, soit qu'elle ait une activité physiologique de durée limitée (quelques mois) (Robelin, 1962), soit qu'elle ne supporte pas une irrigation continue.

### *Bilan énergétique*

Le facteur climatique primordial pour la détermination des besoins en eau est l'énergie disponible pour l'évaporation de l'eau par le système étudié.

Le système choisi est délimité dans un couvert de surface uniforme, dense, en période de croissance active et bien alimenté en eau. Ses limites correspondent à un volume arbitraire dont la base est située sous la surface du sol et limitée par quatre plans verticaux imaginaires. Sa hauteur est déterminée par un plan parallèle à la base, elle est égale à celle de la végétation.

Si les quantités d'énergie utilisées pour la photosynthèse sont négligées (environ 1% de l'énergie totale), l'équation du bilan énergétique qui traduit l'ensemble des échanges de différente nature entre le système (couvert végétal) et le milieu environnant peut s'écrire d'après Penman et al. (1967) sous la forme:

$$R_g(1 - a) + R_a - R_s - lE - S - Q = 0 \quad (3)$$

$R_g$  = rayonnement global;  $a$  = albédo de la surface;  $R_a$  = rayonnement thermique atmosphérique (descendant);  $R_s$  = rayonnement thermique du sol (ascendant);  $l$  = coefficient de chaleur latente de vaporisation de l'eau;  $E$  = flux de vapeur d'eau;  $S$  = flux de chaleur sensible dans l'air;  $Q$  = flux de chaleur sensible dans le sol; ou encore, en groupant les rayonnements dans le même membre:

$$R_g(1 - a) + R_a - R_s = lE + S + Q \quad (4)$$

Le bilan des rayonnements de petites et de grandes longueurs d'onde est appelé rayonnement net,  $R_n$ , tel que:

$$R_n = R_g(1 - a) + R_a - R_s \quad (5)$$

Des équ. 4 et 5 nous obtenons une expression simplifiée du bilan d'énergie:

$$R_n = lE + S + Q \quad (6)$$

Les énergies se dirigeant vers le couvert végétal sont considérées comme positives, les énergies qui s'en écartent sont négatives. Le terme  $S$  peut comprendre outre la convection verticale, l'apport supplémentaire d'énergie sous forme d'advection (échanges horizontaux des masses d'air en provenance d'une zone plus chaude et atteignant une surface irriguée); l'éq. 6 reste d'application. Cependant, il convient de considérer que  $(R_n - S)$  représente les apports ( $S$  sera dans ce cas négatif) et que  $(lE + Q)$  représente la dépense d'énergie.

Sur un cycle de 24 h, on peut supposer que les gains d'énergie par le sol en période diurne sont compensés par les pertes dues au rayonnement propre de la surface du sol qui a lieu de jour comme de nuit. Pour des périodes de 24 h, l'éq. 6 devient dès lors:

$$R_n - S = lE$$

Le rayonnement net est mesuré à l'aide d'un pyrradiobilanmètre de type Funck (1959), mis au point par le CSIRO en Australie. La quantité d'eau évapotranspirée par le couvert et qui est déterminée par le bilan énergétique sous le terme de flux de chaleur latente de vaporisation ( $IE$ ). En mesurant le bilan de rayonnement  $R_n$  et connaissant le bilan hydrique ( $IE$ ), il est possible de calculer la valeur du flux de chaleur sensible ( $S$ ).

#### RESULTATS EXPERIMENTAUX – INTERPRETATION

##### *Evolution des évapotranspirations maximales mensuelles*

Le Tableau I résume les données concernant les évapotranspirations maximales mensuelles mesurées sur *Pennisetum clandestinum* (kikuyu), *Medicago sativa* var. *provence* (luzerne), *Pennisetum purpureum* (napier) et *Triticum sativum* (blé).

TABLEAU I

Evapotranspirations maximales mensuelles (mm) au CEE (Tunis) (périodes de coupes incluses)

Date	<i>P. clandestinum</i>		<i>Medicago sativa</i>			<i>P. purpureum</i>		<i>T. sativum</i>	
	moy. 59/67	1968	1969	1966	1968	1969	1968	1969	1969
Janv.	48	33	22	96	—	—	—	—	40
Fév.	53	37	59	73	—	—	—	—	67
Mars.	86	63	68	111	—	—	—	—	98
Avr.	119	113	104	146	158	166	—	—	171
Mai.	169	144	163	205	182	190	—	—	57
Juin.	183	167	188	259	242	258	326	302	—
Juil.	220	209	197	336	362	256	332	306	—
Août	197	182	194	315	253	244	268	240	—
Sept.	137	128	—	194	—	—	182	—	—
Oct.	101	87	—	113	—	—	—	—	—
Nov.	62	56	—	60	—	—	—	—	—
Déc.	45	33	—	52	—	—	—	—	—

Les évapotranspirations maximales évoluent suivant la période de l'année: faibles en saison hivernale (novembre à mars), elles atteignent une valeur maximale durant l'été au cours du mois de juillet.

L'ensemble des données reprises au Tableau I montre de nettes différences dans les valeurs de l' $ETM$  suivant l'espèce étudiée, au cours de l'année pour les espèces pérennes (*P. clandestinum* et *M. sativa*) ou au cours de leur période de végétation pour *P. purpureum* et *T. sativum*.

Ces différences sont-elles dues à l'action différentielle des conditions du milieu sur le type de couvert; un couvert gazonné tel que le kikuyu possède-t-il une surface foliaire suffisante pour intercepter tout le rayonnement solaire, le type de surface d'échange est-il en cause?



Depuis la création du Centre d'Etude de l'Eau, Vernet (1957), Damagnez et al. (1962, 1963), de la Sayette (1967), Damagnez (1968) et Baldy (1968) ont toujours exprimé la "demande en eau du climat" par l'évapotranspiration maximale du kikuyu, qui a servi de référence pour l'irrigation des autres cultures. Toutefois, ils ont observé que certaines cultures consomment temporairement ou constamment plus d'eau que la culture de référence.

#### *Validité du dispositif de mesure des ETM*

La dimension des parcelles et en particulier de l'anneau de garde des cases lysimétriques pourrait affecter les résultats. Stanhill (1965) a déterminé, en région semi-aride, jusqu'à quelle distance du bord d'attaque les conditions extérieures peuvent modifier le micro-climat. Il trouve environ 100 m dans le cas d'une culture de maïs. Pour Tanner (1968), cette distance est approximativement égale à cent fois la hauteur de la végétation. Nous avons dès lors comparé les résultats obtenus sur les parcelles du CEE avec d'autres provenant du plus grand périmètre irrigué du pays, situé au nord de Tunis, dans la même zone climatique (CRUESI, 1968; Bierhuizen et Trabelsi, 1969). (Tableau II.)

TABLEAU II

*ETM* mesurées sur différents couverts (1968) ( $\text{mm j}^{-1}$ )

	CRUESI		CEE	
	juillet	août	juillet	août
luzerne	13,0	13,0	13,4	12,9
kikuyu	—	—	7,0	6,1
napier-sorgho	8,9	11,3	11,4	11,2

Le rapport entre la hauteur de la végétation et la distance séparant le point de mesure de la bordure de la parcelle est de 1/10 dans les parcelles du CEE et de 1/200 dans celles du CRUESI.

L'observation des valeurs moyennes présentées révèle qu'il n'y a pas d'augmentation de l'évapotranspiration causée par la dimension restreinte de la parcelle d'expérimentation et la méthode utilisée peut être considérée comme satisfaisante à ce sujet.

#### *Choix de l'espèce de référence*

Les mesures de l'*ETM* mensuelle effectuées durant la même période sur deux espèces pérennes (luzerne et kikuyu) montrent des écarts importants (Tableau III).

Les cultures de luzerne subissent une coupe toutes les quatre semaines. Les résultats peuvent être présentés de deux manières:

(a) Pour un échantillon de culture allant de 0 à 4 semaines, l'*ETM* moyenne mensuelle ( $L_{c-c}$ ) subit une réduction due à ce que les premières valeurs après la coupe correspondent à peu près à l'évaporation d'un sol nu.

(b) Par le jeu des coupes successives, on possède toujours au moins un échantillon âgé de 3 à 4 semaines.  $L_{ETM}$  dans ce cas ( $L_c$ ) correspond à une végétation ayant un indice foliaire compris entre 2,8 et 3,4.

TABLEAU III

Variation des évapotranspirations (mm)

Date	Kikuyu K	Luzerne		$L_{c-c}/K$	$L_c/K$
		avec coupes	sans coupes		
7/6-10/6/68	23	16	29	0,70	1,25
11/6-20/6	51	53	77	1,04	1,50
21/6-30/6	61	89	100	1,44	1,64
1/7-6/7	42	72	72	1,70	1,70
7/6-6/7	177	230	278	1,30	1,57
7/7-10/7	27	26	46	0,97	1,70
11/7-20/7	75	100	132	1,33	1,75
20/7-31/7	67	96	129	1,43	1,90
1/8-4/8	31	69	69	2,22	2,22
7/7-4/8	200	291	376	1,46	1,88

Les rapports entre l' $ETM$  de la luzerne et celle du kikuyu ( $L_{c-c}/K$  et  $L_c/K$ ) restent supérieurs à l'unité sauf au moment de la coupe de la luzerne (0,70 en juin et 0,97 en juillet) — (Fig.3).

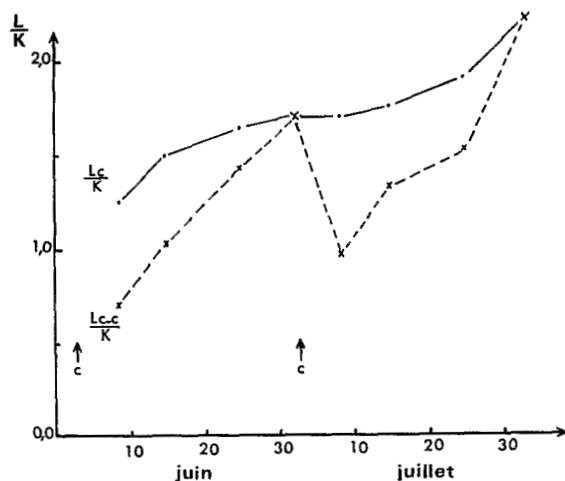


Fig.3. Evolution du rapport des  $ETM$  luzerne et kikuyu en fonction du temps.  $L_c$  = luzerne de même âge dont l'indice foliaire varie entre 2,6 et 3,4;  $L_{c-c}$  = luzerne âgée de 0 à 4 semaines dont l'indice foliaire varie de 0 à 3,4.

Fig.3. Modification of the ratio of the  $ETM$  alfalfa ( $M_s$ ) and kikuyugrass ( $P_c$ ).  $L_c$  = alfalfa (4 weeks old); the leaf area index fluctuates between 2,6 and 3,4;  $L_{c-c}$  = alfalfa aged from 0 to 4 weeks; the leaf area index fluctuates between 0 and 3,4.

Les mesures des bilans hydriques et énergétiques journaliers et leur rapport confirment le fait que la consommation en eau de la luzerne est, à tout moment, supérieure à celle du kikuyu (Tableau IV). Il n'est donc pas exclu qu'il existe d'autres espèces présentant le même phénomène.

Il est difficile de décider de critères permettant d'affirmer quel couvert exprime effectivement la demande en eau du milieu.

#### *Facteurs susceptibles d'influencer l'ETM*

Rijtema (1965), Penman et al. (1967), et Gates (1967) ont analysé un certain nombre de facteurs microclimatiques susceptibles d'affecter l'évapotranspiration, ainsi que l'importance de certaines caractéristiques physiologiques des plantes formant les couverts. La variabilité des propriétés des surfaces d'échanges peut jouer un rôle important dans la répartition et la captation des différentes énergies.

#### *Mouvements des masses d'air*

Comparons les *ETM* journalières du kikuyu et de la luzerne à quatre âges différents. Les deux journées citées à titre d'exemple (Tableau IV) se caractérisent par des taux d'humidité relative presque identiques mais les vitesses de vent sont différentes: 4,5 km/h le 22/6 et 9,8 km/h le 21/7.

TABLEAU IV

Evapotranspirations maximales journalières (mm)

	Kikuyu	Sol nu	Luzerne			
			1 sem.	2 sem.	3 sem.	4 sem.
Le 22/6/68:						
Ind. foliaire	1	0	0,40	1,50	1,95	2,60
$R_n$ (cal. $\text{cm}^{-2} \text{j}^{-1}$ )	332	353	372	365	370	375
$IE$ (cal. $\text{cm}^{-2} \text{j}^{-1}$ )	360	332	375	497	516	672
$IE/R_n$	1,08	0,80	1,00	1,36	1,39	1,79
$IE/IE_K$	1,00	0,92	1,04	1,35	1,43	1,86
Le 21/7/68:						
Ind. foliaire	1	0	0,45	1,40	1,80	3,30
$R_n$ (cal. $\text{cm}^{-2} \text{j}^{-1}$ )	384	391	412	424	418	415
$IE$ (cal. $\text{cm}^{-2} \text{j}^{-1}$ )	366	426	450	612	850	990
$IE/R_n$	0,95	1,08	1,10	1,44	2,00	2,40
$IE/IE_K$	1,00	1,16	1,23	1,66	2,32	2,70

Dans le cas des surfaces nues ou engazonnées (kikuyu et luzerne 1 semaine), le rapport  $IE/R_n$  est voisin de l'unité: toute l'énergie incidente reçue par le couvert est utilisée pour l'évapotranspiration de l'eau. Pour la luzerne âgée de deux semaines, qui recouvre totalement le sol, le rapport atteint 1,36 et 1,44. Avec l'accroissement des surfaces

d'échanges, l'évapotranspiration augmente sans qu'il y ait de modification du bilan énergétique (la surface réfléchissante ne se modifie guère). Les valeurs du rapport  $IE/R_n$  supérieures à l'unité résultent d'un transfert d'énergie sensible du milieu extérieur vers le couvert évapotranspirant. Etant donnés les résultats analogues obtenus au CEE et au CRUESI pour un même couvert végétal (luzerne), on peut admettre l'existence d'un apport d'énergie sensible du type advectif de très grande échelle. Ce phénomène est également rapporté par Lemon et al. (1957) et McIlroy et Angus (1964). Il provient des mouvements des masses d'air chaud qui traversent des régions entières sans modifications notables de leurs propriétés physiques (température, humidité relative et vitesse).

Au niveau d'un couvert de faible hauteur comme le kikuyu, cette captation d'énergie sensible n'est pas perceptible et le rapport  $IE/R_n$  est proche de l'unité.

L'effet du vent est quasi nul sur un couvert gazonnant et l'action de l'énergie advective n'est pas décelable. Van Bavel et Fritschen (1965) ne mesurent pas d'énergie advective au niveau d'un sol nu irrigué. Toutefois, la température dans le couvert peut être de 7°-11°C supérieure à la température extérieure, ce qui semble indiquer que toute l'énergie solaire n'est pas utilisée pour l'évaporation de l'eau. Sur un couvert présentant un feuillage horizontal tel la luzerne, les mouvements dus au vent provoquent des modifications des caractéristiques des masses d'air emprisonnées dans le volume occupé par la culture et réduisent la couche limite au niveau des feuilles. La différence de température entre l'air extérieur et intérieur est très faible.

Dans le cas du napier dont les feuilles sont dressées, la turbulence est plus forte à la surface du couvert. Du fait de sa rugosité, la vitesse de l'air est fortement diminuée et son action en profondeur plus limitée. La température dans le couvert est légèrement inférieure à la température extérieure (1° à 3°C).

#### *Energie réfléchie*

Penman (1956) a introduit, dans sa définition, un facteur correctif, qui est fonction de la réflexion d'énergie par le couvert. Cette énergie réfléchie varie suivant les propriétés physiques et optiques de la surface des couverts (couleur, degré de recouvrement, architecture spatiale de la culture . . .).

Le Tableau V donne quelques exemples de quantité d'énergie réfléchie par les différents types de couverts en pleine phase de croissance.

La réflexion de l'énergie par les surfaces végétales varie entre 18 et 22%; les valeurs les plus faibles proviennent des couverts à port dressé où le piégeage de la lumière est plus efficace (napier) ainsi que pour des sols humides dont le couvert vient d'être coupé. Dans le cas du blé en pleine phase de croissance, l'énergie réfléchie correspond également à ces valeurs (de 19,6 à 20,5%). A l'épiaison et à maturation, la réflexion n'est plus que de 14,4%. Fritschen (1967) fait remarquer que les plantes dont les feuilles ont un faible rapport longueur sur largeur (ex. luzerne, coton) réfléchissent plus d'énergie que les plantes pour lesquelles ce rapport est élevé (ex. graminées). Toutefois, les différences entre les énergies réfléchies par le couvert sont insuffisantes pour expliquer les variations importantes des évapotranspirations maximales.

TABLEAU V

Pourcentage de l'énergie totale réfléchiée par les couverts (à 12 h)

Couvert	1967		1968				1969			
	16/6	25/3	22/6	10/7	21/7	1/8	10/3	25/3	25/4	20/6
Kikuyu	—	—	21	—	21	—	22	—	—	—
Luzerne A	—	22	19	—	20	—	—	—	—	—
B	—	22	20	—	20	—	—	—	—	20
C	—	22	20	—	20	—	—	—	—	20
D	—	22	21	—	21	—	—	—	—	—
Coton	—	—	—	—	—	21	—	—	—	—
Napier	20	—	—	19	19	—	—	—	—	—
Blé	—	—	—	—	—	—	20	19	14	—

*Interception de l'énergie solaire par le couvert*

L'absorption de l'énergie solaire par le couvert dépend du développement des surfaces d'échanges et surtout de leur distribution verticale. La Fig.4 montre la réduction du bilan énergétique en fonction de l'indice foliaire pour deux cultures distinctes (napier et luzerne).

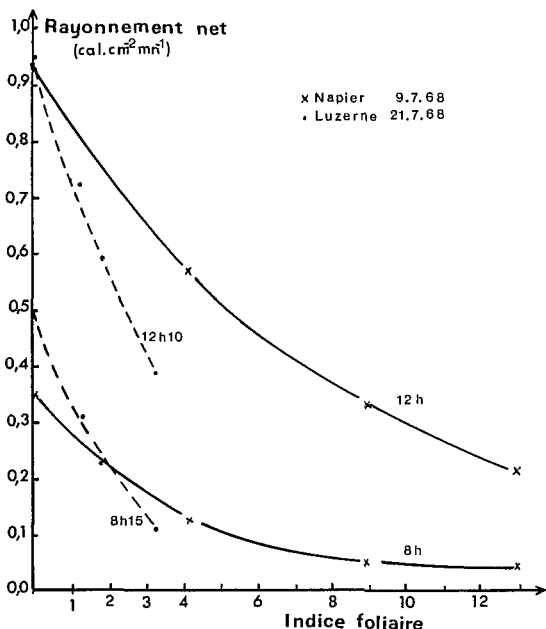


Fig.4. Relation entre le rayonnement net et l'indice foliaire dans les couverts de luzerne et de napier à 08h00 et 12h00.

Fig.4. Interception of the net radiation by the leaf area for two different canopies (alfalfa and napier-grass) at 08h00 and 12h00.

Aux premières heures de la journée, l'absorption du rayonnement solaire est élevée pour les deux couverts (luzerne 80%; napier 85%). Aux heures où le soleil est au zénith, la pénétration de l'énergie solaire est plus élevée qu'en début de journée. Le pourcentage d'énergie captée a peu varié pour le napier alors qu'il a diminué pour la luzerne (65%), par suite du mouvement des folioles qui se ferment et qui se redressent, au niveau supérieur de la plante.

Des mesures complètes, effectuées pour chaque heure de la journée par Bierhuizen et Trabelsi (1969) confirment les quelques résultats cités. A indice foliaire égal (jusqu'à 3,2), l'extinction est plus complète dans le couvert de luzerne.

#### *Etat de développement de la plante et type de port foliaire*

L'évolution du flux de chaleur latente  $IE$  en fonction de la croissance de *Pennisetum purpureum*, *P. clandestinum* et *Medicago sativa* est représentée dans la Fig.5 à partir de laquelle on peut faire les constatations suivantes:

(1) L'évolution de l'évapotranspiration maximale mesurée sur le gazon croît avec l'augmentation du rayonnement net qui est lui-même fonction du rayonnement solaire global.

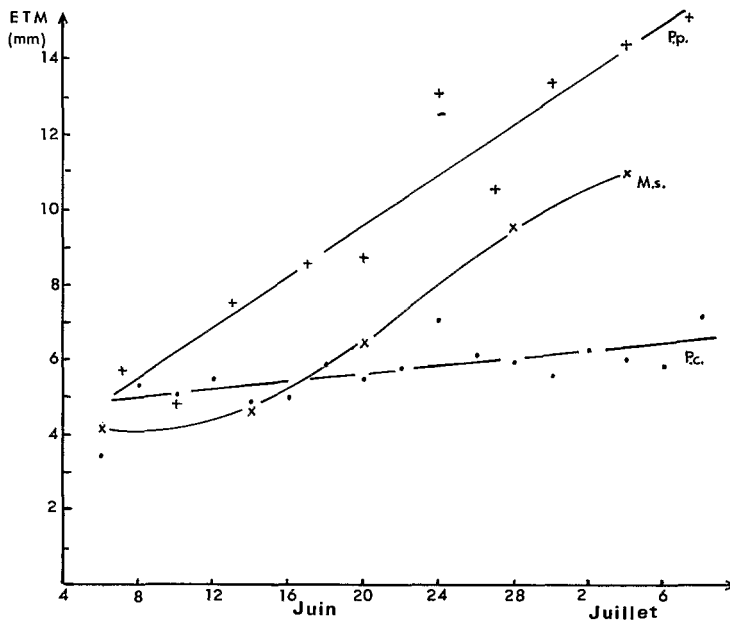


Fig.5. Evolution de l'évapotranspiration maximale mesurée durant une même période sur les couverts de *Pennisetum clandestinum* (Pc), *P. purpureum* (Pp) et *Medicago sativa* (Ms).

Fig.5. Evolution of the maximum evapotranspiration measured during the same time on different covers: *Pennisetum purpureum* (Pp), *P. clandestinum* (Pc) and *Medicago sativa* (Ms).

(2) L'évapotranspiration du couvert dressé est plus élevée que celle d'un couvert gazonnant durant la même période.

(3) L'accroissement du volume occupé par le couvert entraîne une augmentation de l'évapotranspiration maximale.

Exprimons ces mêmes résultats en fonction de la relation entre le rapport  $IE/R_n$  et l'indice foliaire (Fig.6):

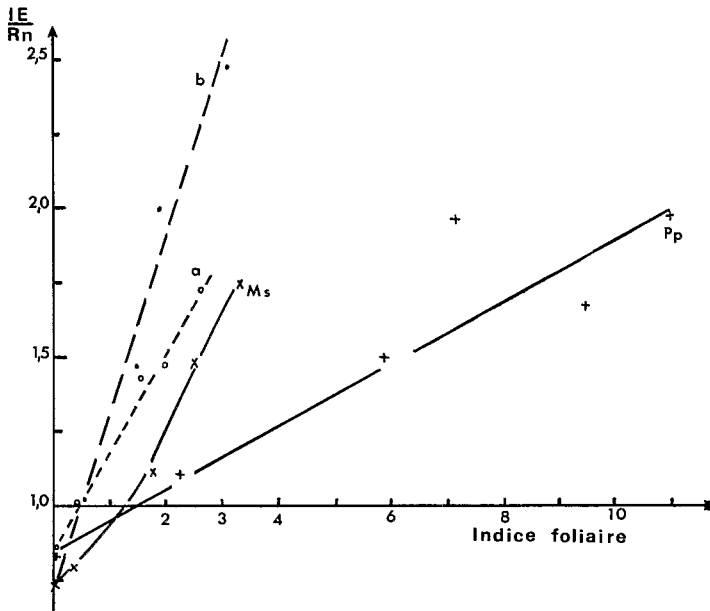


Fig.6. Relation entre le rapport  $IE/R_n$  et l'indice foliaire du napier ( $P_p$ ) et de la luzerne ( $M_s$ ) au cours d'une même période végétative (7/6 au 10/7/1968);  $a$  = luzerne du 22/6/68, vitesse moyenne du vent 4,5 km/h, humidité relative 59%;  $b$  = luzerne du 21/7/68, vitesse moyenne du vent 9,8 km/h, humidité relative 57%.

Fig.6. Relationship between the ratio  $IE/R_n$  and the leaf area index of napiergrass and alfalfa during the same vegetative period of growth (June 7 to July 10, 1968);  $a$  = alfalfa (06/22/68); average wind speed 4,5 km/h, relative humidity 59%;  $b$  = alfalfa (07/21/68); average wind speed 9,8 km/h, relative humidity 57%.

(1) Pour des valeurs d'indice foliaire faible, le rapport est inférieur ou égal à l'unité.

(2) L'évapotranspiration maximale augmente en fonction de l'accroissement des surfaces d'échanges qui captent, en plus de l'énergie solaire, de l'énergie sensible advective.

(3) Suivant les types de surfaces d'échanges, l'évapotranspiration maximale sera différente: plus élevée pour un couvert tel que la luzerne que pour celui d'un napier à même indice foliaire.

En reprenant les journées du 22/6 et 21/7/68 (Tableau IV), les courbes  $a$  et  $b$  de la Fig.5 permettent de constater que l'apport d'énergie advective dans la culture augmente

avec le brassage des masses d'air (4,5 km/h et 59% HR le 22/6 et 9,8 km/h et 57% HR le 21/7). La captation de cette énergie sensible advective par le couvert est sous la dépendance des mouvements d'air et de certaines caractéristiques géométriques du feuillage.

### Caractéristiques de la plante

L'influence du type de couvert sur l'évapotranspiration maximale a été vue précédemment. En fait, la résistance à la diffusion de vapeur d'eau ne dépendra pas uniquement de l'effet de la vitesse du vent sur la couche limite des feuilles, mais aussi de la quantité d'énergie qui influence l'ouverture stomatique (Kuiper, 1961). La Fig.7 montre la

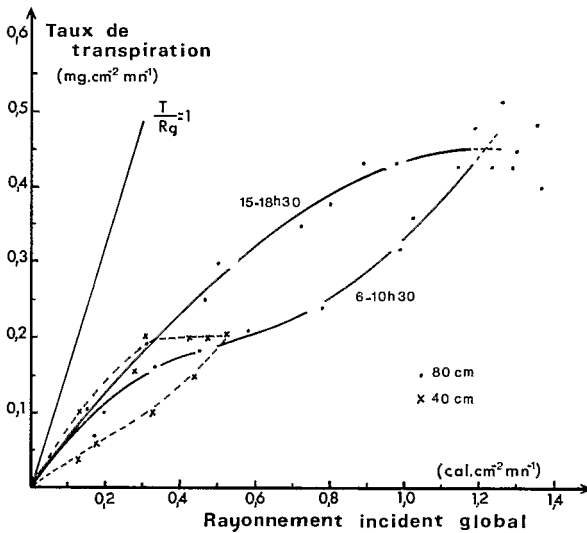


Fig.7. Evolution de la transpiration foliaire et du rayonnement incident global à deux niveaux (0,80 et 0,40 m) dans un couvert de napier.

Fig.7. Relationship between leaf transpiration and global radiation at 2 heights (0,80 and 0,40 m) in a napiergrass cover.

variation de la transpiration du napier en fonction du rayonnement global. La réaction photoactive provoque l'ouverture des stomates jusqu'à un palier obtenu vers 0,3 cal.  $\text{cm}^{-2} \text{mn}^{-1}$  au niveau de 0,80 m. L'accroissement des pertes d'eau transpirée semble provenir d'une augmentation de la tension de vapeur d'eau entre la feuille et l'air, qui atteint 32 mm Hg; la fluctuation autour de la valeur de 0,3 cal.  $\text{cm}^{-2} \text{mn}^{-1}$  semblerait due, soit à la température foliaire (Fig.8) qui intervient en augmentant la résistance stomatique (Stalfelt, 1962), soit au potentiel hydrique qui est voisin de 12 atm (Monteny, 1968). Quant à la luzerne, Van Bavel (1966) a montré qu'un tel couvert, bien alimenté en eau n'offrait aucune résistance stomatique à l'évapotranspiration durant la journée.



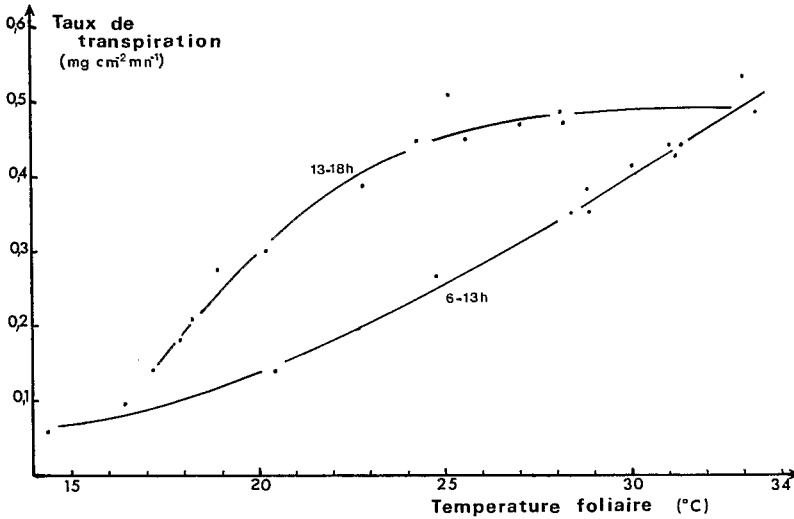


Fig.8. Température foliaire en fonction de la transpiration de la feuille de napier à 0,80 m du sol.

Fig.8. Leaf temperature in relation with the leaf transpiration at 0,80 m high of a napiergrass cover.

Non seulement les facteurs microclimatiques interviennent dans la consommation en eau de la plante, mais également les facteurs morphologiques et physiologiques de la plante elle-même (de Parcevaux, 1963). En effet, la résistance à la diffusion de vapeur d'eau au niveau des stomates est également sous la dépendance de la morphologie foliaire, donc de l'espèce végétale.

Le nombre de stomates par millimètre carré varie: un comptage moyen sur une feuille de napier donne 180 stomates pour l'épiderme supérieur et 270 pour l'inférieur, c'est-à-dire 450 au total. Ils sont disposés en files parallèles à l'axe de la feuille et leur longueur est approximativement de 0,04 mm. Au niveau de la feuille de luzerne, la densité stomatique est très élevée sur les faces des folioles: entre 300 et 360 stomates par millimètre carré, c'est-à-dire plus de 600 au total. Ils sont disposés d'une façon quelconque et leur longueur est de 0,025 mm.

Il est vraisemblable que le type de système racinaire (ramifié ou pivotant) influence différemment l'évapotranspiration réelle de la plante.

#### *Caractéristiques physiques du sol*

Le sol, suivant ses caractéristiques (structure, humidité, potentiel matriciel, température et vitesse de dessèchement . . .) influence le comportement et la physiologie de la plante et en fin de compte son évapotranspiration. En fonction de la demande en eau du milieu, les plantes du couvert réagiront suivant la vitesse de diffusion de l'eau dans le sol ( $dH/dr$ ) en réduisant leur perte d'eau au niveau des feuilles (Hallaire, 1963). Il semble bien qu'au

niveau du système racinaire du napier, les valeurs élevées de  $dH/dt$  au début de la journée aient provoqué une zone à forte résistance à la diffusion de l'eau du sol vers les poils absorbants, affectant ainsi l'évapotranspiration du couvert malgré une bonne alimentation hydrique.

Il est à remarquer que, quelle que soit l'espèce végétale cultivée en plein champ, le couvert qu'elle forme évapotranspire moins que les plantes en évapotranspiromètres à plan d'eau constant. Le potentiel hydrique du sol pourrait provoquer une réduction des ouvertures stomatiques, ce qui n'est pas le cas en présence d'une nappe d'eau pour la luzerne.

## CONCLUSION

Nous avons vu que pour une espèce végétale déterminée, l'évapotranspiration maximale (*ETM*) varie au cours de l'année.

Les différents facteurs climatiques qui, pour cette même espèce, contribuent à faire varier l'évapotranspiration, pourraient avoir des actions différentes sur d'autres espèces. Ainsi l'interaction des conditions climatiques (rayonnement net, advection, température et tension de vapeur de l'air, vitesse du vent . . .) et de celles propres au couvert végétal (densité des surfaces d'échanges, port et indice foliaire, tropisme, réactions stomatiques système racinaire . . .) se traduira par des courbes différentes au cours du temps suivant les plantes étudiées.

D'après Bouchet et Robelin (1969), l'évapotranspiration potentielle, qui traduit la "demande en eau" du climat, peut être représentée par l'enveloppe des diverses courbes d'évapotranspiration maximale spécifiques (Fig.9). Le tracé exact de cette courbe ne peut être connu avec certitude car il dépend de l'ensemble des espèces végétales susceptibles de se développer dans la région choisie, mais on pourrait se contenter, en première approximation de la courbe obtenue à partir de quelques espèces bien adaptées aux conditions du climat local et qui serait certainement plus proche de la réalité que ne l'est l'évapotranspiration maximale d'une seule espèce.

L'évapotranspiration dépendant d'un grand nombre de facteurs, on conçoit les difficultés qui se présentent lorsqu'on veut déterminer une évapotranspiration potentielle représentative du climat d'une région.

En région semi-aride, l'influence d'un apport d'énergie advective de grande échelle est très importante et ne peut être sous-estimée lors de la conduite des cultures irriguées.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre gratitude à Monsieur Lemée, Professeur à la Faculté des Sciences d'Orsay et à Monsieur de Parcevaux, Maître de Recherches à la Station de Bioclimatologie de Versailles pour nous avoir conseillé et suivi pendant la durée de ce travail.

Notre reconnaissance va également à Monsieur Bierhuizen, Professeur à l'Institute for Land and Water Management Research — Wageningen — qui, durant son séjour en Tunisie, nous a guidé dans l'exploitation des résultats.

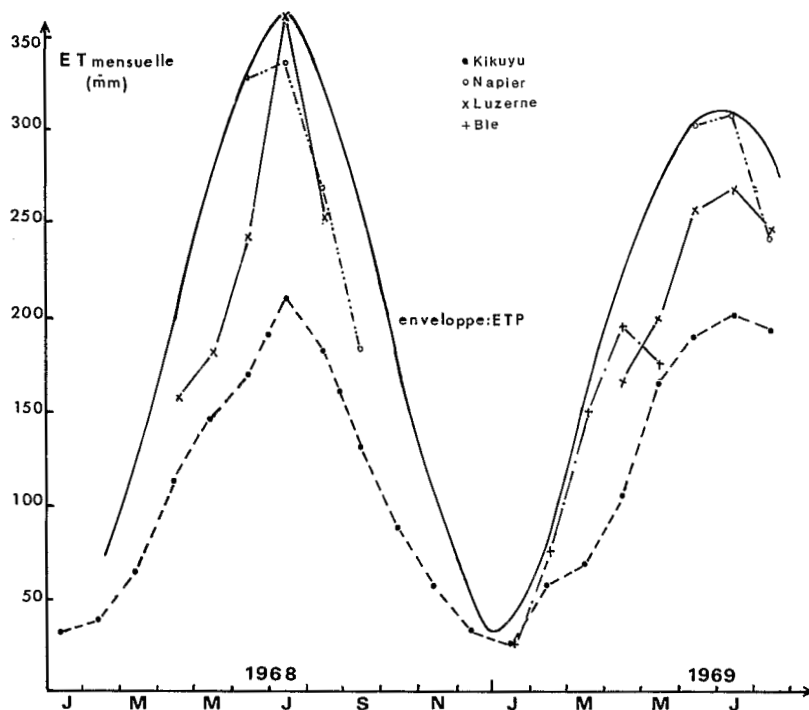


Fig.9. Evolution de l'évapotranspiration potentielle, enveloppe des évapotranspirations maximales de différents types de couverts au cours de l'année 1968 et 1969.

Fig.9. Evolution of the potential evapotranspiration, outer curve of these of the maximum evapotranspiration of the different canopies during 1968 and 1969.

#### BIBLIOGRAPHIE

- Anon, J., 1956. Proceeding of the informal meeting on physics in agriculture. *Neth. J. Agric. Sci.*, 4: 162 pp.
- Baldy, Ch., 1968. Cultures fourragères intensives et irrigation de complément. *Ann. Inst. Natl. Rech. Agron. Tunis*, 41(4), sous presse.
- Bierhuizen, J. F. et Trabelsi, H., 1969. Distribution de l'énergie nette dans une couverture végétale. *CRUESI, Note Tech.*, 2.
- Bouchet, R. J., 1961-1963. Signification et portée agronomique de l'évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, 12: 51-63.
- Bouchet, R. J. et Robelin, P., 1969. Evapotranspiration potentielle et réelle. Domaine d'utilisation. Portée pratique. *Bull. Tech. Inform. Ing. Serv. Agr.*, 238: 55-62.
- CRUESI, Centre de Recherche pour l'Utilisation de l'Eau Salée en Irrigation, 1968. Consommation en eau des cultures. *UNESCO, Note Tech.*, 11.
- Damagnez, J., Riou, O., de Villèle, Ch. et El Ammami, S., 1962. Problèmes d'évapotranspiration potentielle en Tunisie. *Ann. Inst. Natl. Rech. Agron. Tunis.*, 35: 161-184.
- Damagnez, J., Riou, Ch., de Villèle, O. et El Ammami, S., 1963. Estimation et mesure de l'évapotranspiration potentielle en Tunisie. *Publ. A.I.H.S.*, 62: 98-119.

- Damagnez, J., 1968. Evapotranspiration potentielle, évapotranspiration réelle et rendement des cultures en zone aride méditerranéenne. In: *Agroclimatological Methods*, UNESCO, *Actes Coll. de Reading*, 7: 89-95.
- Emberger, L., 1955. Une classification biogéographique des climats. *Rec. Trav. Lab. Bot. Zool. Fac. Sci. Montpellier, Ser. Bot.*, 7: 3-44.
- Fritschen, L. J., 1967. Net and solar radiation relations over irrigated field crops. *Agric. Meteorol.*, 4: 55-62.
- Funck, J. P., 1959. Improved polythene-shielded net radiometers. *J. Sci. Instr.*, 36: 267-270.
- Gates, D. M., 1967. Plant factors affecting evapotranspiration. In: *Irrigation of Agricultural Lands. Agronomy*, 11: 506-521.
- Hallaire, M., 1963. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. In: *L'Eau et la Production Végétale. Inst. Natl. Recherche Agron., Sect. Bioclimatol.*, pp. 27-62.
- McIlroy, I. C. et Angus, D. E., 1964. Grass, water and soil evaporation at Aspendale. *Agric. Meteorol.*, 1: 201-224.
- Kuiper, P. J., 1961. The effects of environmental factors on the transpiration of leaves, with special reference to stomatal light response. *Mededel. Landbouwhogeschool Wageningen*, 61: 49 pp.
- Lemon, E. R., Glaser, A. H. and Satterwhite, L. E., 1957. Some aspects of the relationship of soil, plant and meteorological factors to evapotranspiration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 21: 464-468.
- Monteny, B. A., 1968. *Echanges Energétiques et Hydriques d'un Couvert Végétal*. Thèse, Fac. Sci. d'Orsay, Université de Paris, Paris, 42 pp. (manuscrit).
- Monteny, B. A., 1969. Influence de l'énergie advective sur l'évapotranspiration. *Oecol. Plant. Gauthier Villars*, 4: 295-306.
- Parcevaux, S. de, 1963. Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu. In: *L'eau et la Production Végétale. Inst. Natl. Recherche Agron., Sect. Bioclimatol.*, pp. 63-150.
- Penman, H. L., 1956. Evaporation: an introductory survey. *Neth. J. Agric. Sci.*, 4: 9-30.
- Penman, H. L., Angus, D. E. and Van Bavel, C. H., 1967. Microclimatic factors affecting evaporation and transpiration. In: *Irrigation of Agricultural Lands. Agronomy*, 11: 483-505.
- Rijtema, P. E., 1965. An analysis of actual evapotranspiration. *Agric. Res. Rept., Wageningen*, 659.
- Robelin, M., 1962. Evapotranspiration réelle de différents couverts végétaux bien alimentés en eau et évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, 13: 493-522.
- Sayette, Ph. de la, 1967. Evapotranspiration mesurée sur luzerne. *Ann. Inst. Natl. Rech. Agron. Tunis*, 40: 1-18.
- Stalfelt, M. G., 1962. The effect of temperature on opening of the stomatal cells. *Physiol. Plantarum*, 15: 772-779.
- Stanhill, G., 1965. The concept of potential evapotranspiration in arid climate. In: *Méthodologie de l'Écophysiologie Végétale. UNESCO, Actes du Coll. de Montpellier*, 25: 109-117.
- Tanner, C. B., 1968. Evaporation of water from plants and soil. In: T. T. Kozlowski (Editor), *Water Deficits and Plant Growth*. 1: 73-104.
- Van Bavel, CH., 1966. Potential evaporation: The combination concept and its experimental verification. *Water Resources Res.*, 2: 455-467.
- Van Bavel, CH. and Fritschen, L. J., 1965. Energy balance of bare surfaces in an arid climate. In: *Méthodologie de l'Écophysiologie Végétale. UNESCO, Actes du Coll. de Montpellier*, 25: 99-107.
- Vernet, A., 1957. Organisation et premiers résultats du Centre d'Etude de l'Eau de Tunis. *Ann. Inst. Natl. Rech. Agron. Tunis*, 30: 73-116.
- Thornthwaite, C. W., 1944. Report of the committee on transpiration and evaporation. *Trans. Am. Geophys. Union*, 5: 687 pp.
- Thornthwaite, C. W., 1954. A reexamination of the concept and measurement of potential evapotranspiration. *Johns Hopkins Univ., Publ. Climatol.*, 7: 200-209.