

Bot.

INFLUENCE DE L'ÉNERGIE ADVECTIVE SUR L'ÉVAPOTRANSPIRATION

BRUNO MONTENY

Chargé de Recherches à l'O.R.S.T.O.M.
Laboratoire de Bioclimatologie de l'I.N.R.A., Tunis

RÉSUMÉ

Les flux de chaleur latente et sensible ont été déterminés expérimentalement à l'aide du bilan énergétique dans un climat de zone semi-aride.

L'évapotranspiration est connue au moyen de cases lysimétriques ; quant au flux de chaleur sensible, il est estimé suivant la théorie du bilan énergétique alors que le rayonnement net est obtenu par un pyrradiobilanmètre.

Cette étude a été effectuée sur un couvert de *Pennisetum purpureum* (Napiergrass) bien alimenté en eau. Le taux d'évapotranspiration varie suivant le stade végétatif et s'accroît avec la vitesse du vent, le rayonnement net variant peu.

Si les vitesses moyennes de vent sont relativement identiques, les pertes d'eau par le couvert végétal sont fonction du taux d'humidité de l'air entrant dans la végétation.

Une expérience conduite sur la luzerne confirme les résultats obtenus sur le *Pennisetum purpureum*. Toutefois, la luzerne a un taux d'évapotranspiration supérieur à celui du Napier dans les mêmes conditions climatiques.

SUMMARY

Experimental evaluation of latent and sensible heat flow is made in semi-arid climate conditions. The potential evapotranspiration is measured with lysimeters. The sensible heat flow is estimated by the energy balance theory in which net radiation is obtained with a pyrradiobilmeter.

This study has been conducted on a cropped surface of Napiergrass (*Pennisetum purpureum*) well supplied with water.

The evapotranspiration rate varied with the stage of development and increased with wind speed for days of similar energy input (net radiation) and for the same relative humidity of the air mass passing through the vegetation.

An experiment on alfalfa produced the same conclusion. The alfalfa did, however, lose more water than the Napiergrass under the same conditions.

ZUSAMMENFASSUNG

Die latenten und wahrnehmbaren Wärmeflüsse wurden mit Hilfe der Energiebilanz unter semi-ariden Bedingungen experimentell gemessen.

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 13611

9 DEC. 1960

Die Evapotranspiration wurde mit Lysimetern bestimmt. Der wahrnehmbare Wärmefluss wurde unter Anwendung der Energiebilanztheorie ermittelt. Die Strahlung wurde dagegen mit einem Pyrradiobilanmeter gemessen.

Diese Untersuchungen wurden an einer mit Wasser gut versorgten *Pennisetum purpureum* (Napierrgras)-Decke ausgeführt. Die Höhe der Evapotranspiration ist vom dem Entwicklungsstadium abhängig und steigt mit der Windgeschwindigkeit. Die Nettostrahlung ändert sich kaum.

Wenn die Mittelgeschwindigkeiten des Windes nahezu gleich sind, hängen die Wasserverluste der Pflanzendecke von der Feuchtigkeit der Luft ab.

Untersuchungen an Luzerne haben die mit dem *Pennisetum purpureum* gewonnenen Ergebnisse bestätigt. Doch ist unter gleichen Klimabedingungen die Evapotranspiration der Luzerne höher als die des Napiers.

INTRODUCTION

L'étude des besoins en eau d'un couvert végétal a fait l'objet d'importantes recherches tant expérimentales que théoriques.

On sait que l'évaporation d'une surface d'eau est fonction des facteurs climatiques tels que les rayonnements, la vitesse du vent, la température et l'humidité relative de l'air.

En 1944, THORNTON a défini l'évapotranspiration potentielle comme étant la perte d'eau par la végétation si, à aucun moment, le sol ne se trouve en déficit hydrique. Par après, il constate la nécessité de spécifier un certain nombre de conditions climatiques et végétales (1954). C'est ainsi qu'il fait intervenir les facteurs tels que l'albédo de la surface évaporante et l'énergie qu'elle utilise effectivement.

En 1956, une définition plus précise encore a été proposée : c'est, pour un temps donné, la perte maximale d'eau en phase gazeuse d'un couvert végétal abondant et uniforme, de faible hauteur, en pleine croissance, largement alimenté en eau, sans qu'il y ait intervention de la régulation stomatique (ANON, 1956). PENMAN (1956) considère que l'évapotranspiration potentielle définie de cette façon ne dépend que de l'albédo de la surface quels que soient le type de sol ou l'espèce végétale. Ces pertes d'eau évapotranspirée sont tout au plus égales à l'évapotranspiration d'une surface d'eau libre dans les mêmes conditions climatiques. C'est dire que la consommation en eau d'un couvert végétal ne dépend que des facteurs physiques du milieu.

De ce fait, d'autres chercheurs ont aussi assimilé l'évapotranspiration au niveau d'un couvert à un modèle énergétique et proposent des formules basées sur les données climatiques mesurables (PENMAN, 1956 ; TURC, 1961 ; BOUCHET, 1964 ; RIJTEMA, 1965). Celles-ci ont rendu de grands services pour le contrôle des irrigations dans les pays situés en zone tempérée, notamment par les relations

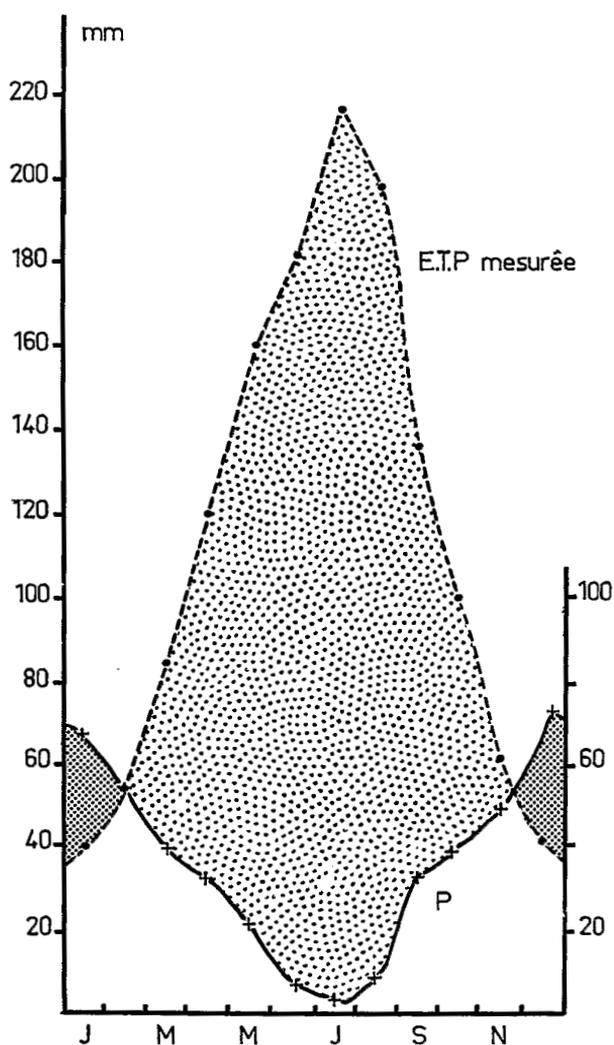


FIG. 1. — Bilan d'humidité climatique annuel caractérisant la région semi-aride de Tunis.

entre évapotranspiration et productivité (BOUCHET & ROBELIN, 1969). En zone semi-aride, l'évapotranspiration potentielle calculée ne correspond pas aux valeurs mesurées. La différence pourrait être attribuée à l'apport d'énergie advective provenant d'un passage de l'air avoisinant vers la culture. TANNER et PELTON (1960), STANHILL (1965), FRITSCHEN et VAN BAVEL (1966) ont constaté que la quantité d'énergie cédée par l'air (S) pour l'évapotranspiration croît avec la hauteur du couvert végétal. LEMON, GLASER et SATTERWHITE (1965) ont observé que l'influence de l'énergie advective sur les cultures pouvait s'étendre sur une distance

de plusieurs kilomètres et que son effet diminue en fonction de l'épuisement de l'eau dans le sol.

Ce travail a été entrepris dans une région qui, selon EMBERGER (1955), appartient à l'étage méditerranéen semi-aride à hivers tempérés recevant une précipitation annuelle de 420 mm. L'évolution annuelle du bilan d'humidité climatique est représentée par la figure 1. Dans ce cas, les valeurs de l'évapotranspiration potentielle mesurée sont obtenues à l'aide de l'évapotranspiromètre (type THORNTHWAITTE) d'une superficie de 4 mètres carrés, couvert d'un gazon (*Pennisetum clandestinum*).

Cette étude effectuée dans la région de Tunis (longitude Est 10°15' ; latitude Nord 36°50') met en évidence une différence de consommation d'eau suivant le type et le stade végétatif du couvert végétal. Ces connaissances sont importantes pour une utilisation plus économique et plus rationnelle de l'eau dans les régions où le déficit hydrique est élevé.

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

En zone semi-aride, le facteur climatique primordial pour la détermination des besoins en eau des cultures est la quantité d'énergie utilisable pour le changement d'état de l'eau. Si on néglige la quantité d'énergie utilisée par la photosynthèse, le bilan énergétique traduisant l'ensemble des échanges de différentes natures entre le couvert végétal et le milieu environnant peut s'écrire :

$$R_n = LE + S + G$$

R_n : bilan des rayonnements de courtes et de grandes longueurs d'onde

L : chaleur latente de vaporisation

E : flux d'évapotranspiration

S : flux de chaleur sensible

G : flux de chaleur à la surface du sol.

Dans cette équation, toute forme d'énergie se dirigeant vers la culture est considérée comme positive, l'énergie sortante est négative et l'ensemble est exprimé en $\text{cal/cm}^{-2}/\text{mn}^{-1}$ (h^{-1} ou j^{-1}). Sur un cycle de 24 heures, les gains d'énergie par le sol en période diurne peuvent être considérés comme compensés par les pertes dues au rayonnement propre de la surface du sol qui a lieu de jour comme de nuit.

Le rayonnement net est mesuré avec un pyrradiobilanmètre (type FUNK) placé à 0,50 m de la surface du couvert végétal. Les rayonnements global (R_g)

et réfléchi (R_r) sont également mesurés au-dessus de l'aire entourant le lysimètre ainsi que la vitesse du vent, la température de l'air et l'humidité relative.

Le terme LE de l'équation (c'est-à-dire évapotranspiration potentielle exprimée sous forme énergétique) est déterminé par le bilan hydrique : à l'aide de pesées de cases lysimétriques, on établit la consommation en eau horaire de la végétation cultivée ; la consommation maximale est obtenue par la mesure du drainage. Ce dispositif est entouré d'un anneau de garde en culture continue et uniforme, irrigué régulièrement.

Des segments de rhizome de *Pennisetum purpureum* ou Napier ont été plantés en mars 1968. L'écartement des rangées est de un mètre ; les pieds sont espacés de 0,80 m dans le lysimètre et alentour. La levée a débuté en avril. Dans les semaines suivantes, une coupe d'homogénéisation a eu lieu.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. — BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UNE CULTURE IRRIGUÉE.

L'évolution du bilan énergétique d'une culture irriguée de *Pennisetum purpureum* ainsi que la vitesse du vent et l'humidité relative de l'air sont représentées sur la figure 2.

Les deux journées retenues (2 juillet et 10 juillet) sont caractérisées par des valeurs quasi identiques du rayonnement global (658 et $643 \text{ cal cm}^{-2} \text{ j}^{-1}$) avec un maximum respectif de $1,29$ et $1,27 \text{ cal cm}^{-2} \text{ mn}^{-1}$ aux heures où le soleil passe au méridien du lieu. Le rayonnement net est également fort identique (424 et $407 \text{ cal cm}^{-2} \text{ j}^{-1}$). Il est négatif durant la période nocturne, sa valeur est proche de $0,08 \text{ cal cm}^{-2} \text{ mn}^{-1}$.

L'indice de surface foliaire ou LAI a augmenté durant le temps qui sépare les deux journées de mesure. Il est passé de $9,5$ à $13,9$, la hauteur de la végétation passant de $0,80 \text{ m} \pm 0,10 \text{ m}$ à $1,10 \text{ m} \pm 0,10 \text{ m}$. L'évapotranspiration pour les deux journées étudiées est élevée mais non égale : l'énergie utilisée pour l'évapotranspiration durant 24 heures est de 720 cal cm^{-2} (soit environ 12 mm) pour un indice de surface foliaire de $9,5$ et de $1\,068 \text{ cal cm}^{-2}$ (soit environ $17,7 \text{ mm}$) pour un indice de surface foliaire de $13,9$. Les courbes d'évapotranspiration ont des maximums qui ne sont pas simultanés à ceux du rayonnement net. Dès que ce dernier devient faible, voire négatif, l'évapotranspiration réelle (LE) diminue, mais ne s'annule pas immédiatement.

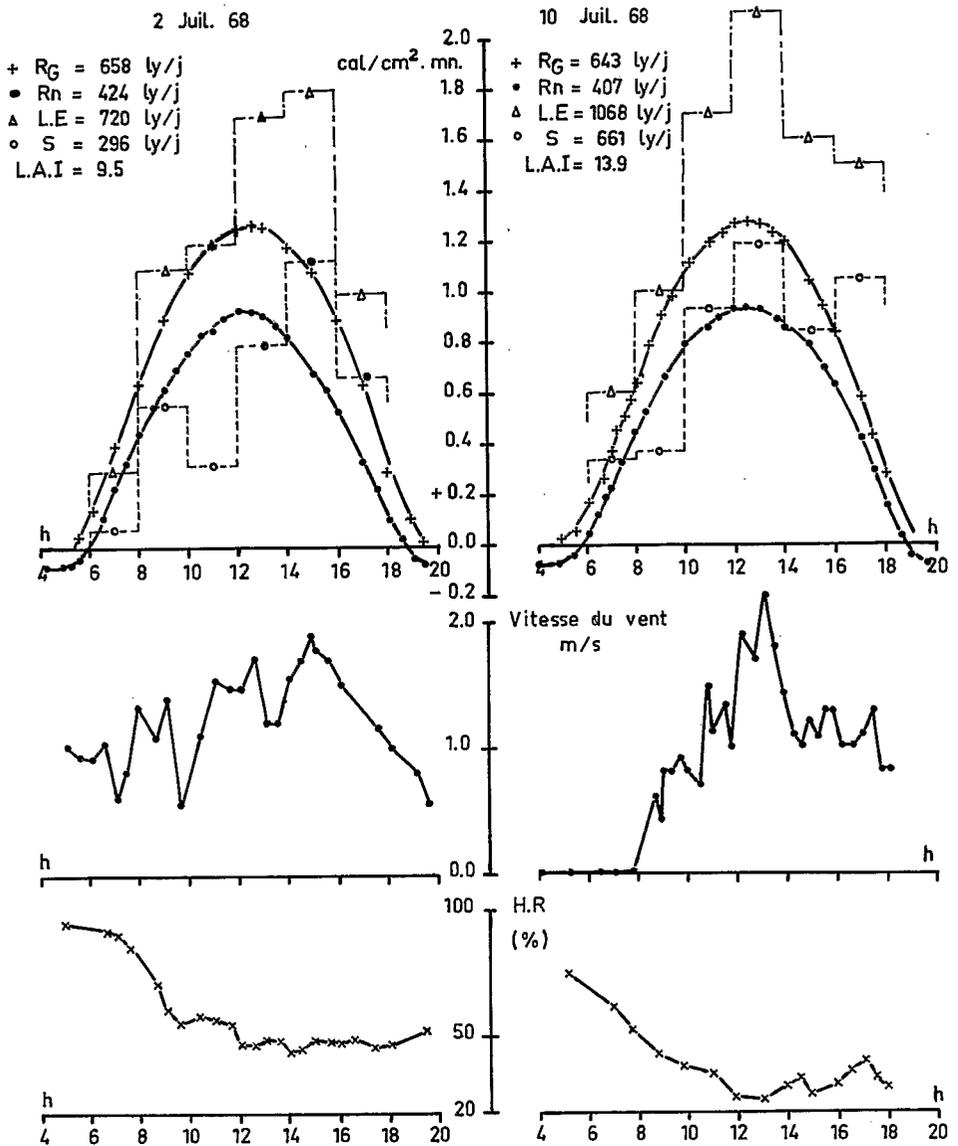


FIG. 2. — Bilan énergétique d'une culture irriguée de *Pennisetum purpureum*.

La quantité totale d'énergie dissipée sous forme de vapeur d'eau dépasse la quantité d'énergie fournie au système par le rayonnement net. Il existe donc une autre source d'énergie, extérieure à la culture et son importance varie suivant les déplacements des masses d'air (direction et vitesse du vent).

L'écart pouvant exister entre l'apport d'énergie par rayonnement net (R_n) et la déperdition par le flux de chaleur latente (LE) est appelé flux de chaleur

sensible (S) ou énergie de type advectif et est responsable de l'« effet oasis ». A ce point de vue, la différence entre les deux journées retenues est nette. Le 2 juillet, la vitesse du vent d'origine maritime était de 3,7 km/h en moyenne et le minimum d'humidité relative de 48 % (température maximale de l'air : 32,7 °C) ; la chaleur sensible extraite de l'air est de 296 cal cm⁻²j⁻¹ pour un LAI de 9,5. Par contre, le 10 juillet, le vent d'origine continentale avait une vitesse moyenne de 3,9 km/h et un minimum d'humidité relative de 21 % (température maximale de l'air : 37,8 °C) ; la chaleur sensible extraite de l'air est cette fois de 661 cal cm⁻²j⁻¹ pour un LAI de 13,9.

B. — IMPORTANCE DE L'ADVECTION AU NIVEAU DE LA CULTURE.

L'importance du transfert de chaleur sensible à partir des régions sèches avoisinantes vers les cultures irriguées vient d'être mise en évidence à l'échelle de la journée.

Si on suit l'évolution du flux de chaleur latente en fonction de la croissance de *Pennisetum purpureum* (fig. 3), on constate que sa consommation en eau (LE)

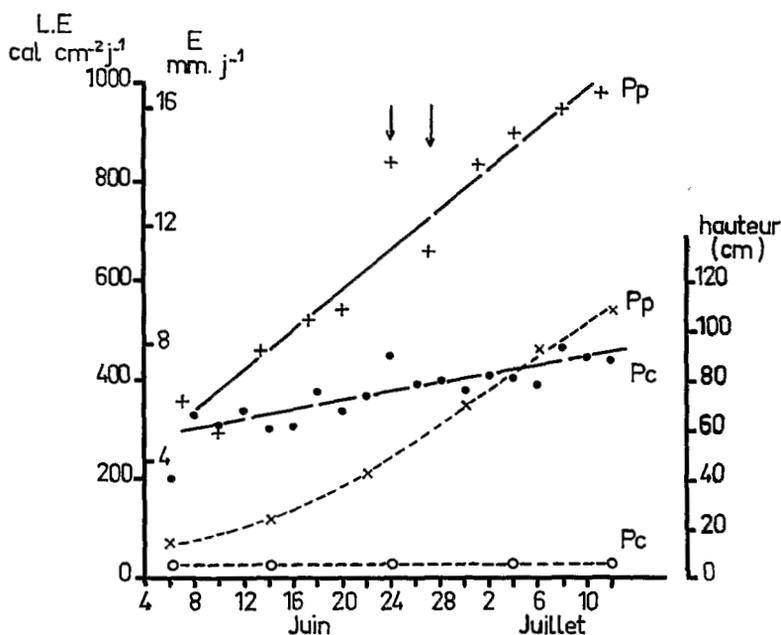


FIG. 3. — Evolution de l'évapotranspiration potentielle (—) mesurée durant une même période sur les couverts de *Pennisetum purpureum* (Pp) et *Pennisetum clandestinum* (Pc) et hauteurs correspondantes de ces cultures (-----).

croît plus rapidement que celle d'un gazon de *Pennisetum clandestinum* durant la même période végétative.

Au niveau du gazon, le rapport LE/Rn fluctue entre 0,97 et 1,1. L'évapotranspiration potentielle calculée suivant la formule de Penman est quasi identique aux valeurs données par son bilan hydrique. L'effet de l'énergie advective ne se manifeste pas sur un couvert végétal de très faible hauteur. Les résultats de VAN BAVEL et FRITSCHEN (1965) obtenus au niveau d'un sol nu irrigué semblent confirmer cette idée puisqu'ils n'ont pas pu mettre en évidence l'effet advectif dans ce cas.

La figure 4 donne la relation entre le rapport LE/Rn et l'indice de surface foliaire pour le *Pennisetum purpureum*. On constate que pour de faibles valeurs de la surface foliaire, le rapport est proche de l'unité. Avec l'augmentation du feuillage du *Pennisetum purpureum*, la consommation en eau augmente et la part de l'énergie advective s'accroît ; elle peut doubler pour un rayonnement net quasi identique, lorsque le LAI passe de 1 à 12.

Bien que la relation LE/Rn en fonction de l'indice de surface foliaire soit pratiquement linéaire, deux points s'écartent sensiblement de la droite ; ils correspondent à des journées à conditions climatiques particulières :

a) Le 24 juillet, pour un LAI de 7,2 l'évapotranspiration est plus élevée que la moyenne ; un vent de 15,7 km/h de moyenne suivi d'un sirocco (chaud et sec) augmente l'advection ;

b) Le 27 juillet, pour un LAI de 10, la consommation d'eau est assez faible ; on note un vent de 4,3 km/h de moyenne avec pluie sur l'ensemble de la région qui diminue l'apport de chaleur sensible au système considéré.

Dans les régions où les cultures sont irriguées, la surface alimentée en eau est en général trop faible par rapport à l'étendue des zones voisines sèches, compte tenu de la vitesse de déplacement des masses d'air chaud. Dans ce cas, l'influence de l'effet advectif se répartissant sur toute la culture se remarque par l'augmentation de la consommation d'eau de l'ordre de 20,5 % alors qu'une pluie s'étendant sur toute la région n'affecte les déperditions que de 9,6 %.

L'évolution de l'évapotranspiration potentielle mesurée au niveau d'un couvert de *Pennisetum purpureum* a été obtenue durant un cycle végétatif complet allant d'une culture basse ne recouvrant pas le sol jusqu'à une hauteur de 1,20 m ayant un recouvrement total du sol à partir d'une hauteur de 0,40 à 0,50 m.

L'influence de la hauteur et du stade végétatif ne peut être déterminée que par des études simultanées sur différents types de recouvrements forts semblables.

Une expérience semblable à celle effectuée sur le *Pennisetum purpureum* a été conduite sur *Medicago sativa* (luzerne) (voir fig. 4). La culture est subdivisée de telle façon qu'on ait en permanence quatre parcelles avec lysimètre à différents stades végétatifs. Les mesures correspondent à deux journées distinctes : les 22 juin et 21 juillet 1968.

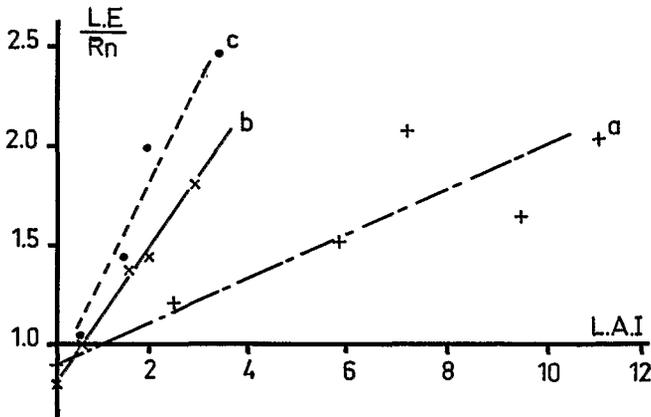


FIG. 4. — Relation entre LE/R_n et le stade végétatif du napier et de la luzerne :

- a) napier durant un cycle de végétation ;
- b) luzerne le 22/6/68. Vitesse moyenne du vent : 4,5 km/h.
Humidité relative de l'air : 59 % ;
- c) luzerne le 21/7/68. Vitesse moyenne du vent : 9,8 km/h.
Humidité relative de l'air : 57 %.

Pour un rayonnement net quasi identique, le flux de chaleur latente (LE) varie suivant la hauteur du couvert végétal ; il augmente suivant l'indice de surface foliaire. Les courbes *b* et *c* correspondent à deux journées qui ont permis de montrer que l'apport d'énergie advectionnelle dans la culture augmente avec la vitesse du vent. Pour les mêmes taux d'humidité relative, l'augmentation de la vitesse du vent provoque une captation plus élevée d'énergie advectionnelle. Ces résultats confirment le travail effectué sur le *Pennisetum purpureum*, à savoir que la quantité d'eau consommée par un couvert végétal en région semi-aride dépend des caractéristiques des masses d'air.

Dans notre expérience, la quantité d'eau utilisée par la luzerne est supérieure à celle utilisée par le Napier. FRITSCHEN (1965-1966) arrive à la même observation en calculant la consommation d'eau par la méthode de Bowen. Cette différence est probablement due à la morphologie des feuilles, limbe de forme acuminée et de dimension importante pour le Napier et trois folioles de forme ovale et de dimensions restreintes pour la luzerne.

Il semble que dans le cas d'une vitesse de vent relativement élevée et suivant la différence de température entre l'air et la feuille, la résistance laminaire au niveau de la luzerne diminue beaucoup plus qu'au niveau du Napier. Ce fait est complété par une meilleure régulation stomatique. Au cours de la journée, le Napier montre

une forte augmentation de la résistance des stomates vers 11 heures avec un maximum vers 13-14 heures (MONTENY, 1968). La résistance des stomates de la luzerne augmente au cours de l'après-midi : ce qui laisse supposer qu'ils restent plus ouverts et sur une durée plus longue que ceux du Napier.

CONCLUSION

En zone semi-aride, l'évapotranspiration, quand le sol se trouve à sa capacité au champ, dépend non seulement des conditions climatiques et microclimatiques mais aussi de l'espèce végétale cultivée, de son rythme de croissance et de l'importance du développement foliaire et racinaire.

Dans ces régions, la détermination de l'évapotranspiration potentielle doit tenir compte du rôle joué par l'advection. En fait, ce n'est plus seulement la surface d'un couvert végétal, mais aussi le volume occupé par la culture ainsi que la disposition du feuillage dans ce volume qui interviennent. Ainsi, la différence entre l'évapotranspiration mesurée et celle calculée par la formule de Penman modifiée en tenant compte de la vitesse du vent en fonction de la nature de la surface, devrait être attribuée à l'énergie advective dont les effets sont difficilement estimables par le calcul.

BIBLIOGRAPHIE

- ABDEL-AZIS M. H., TAYLOR S. A. et ASCHROFT G. L., 1964. — Influence of advective energy on transpiration. *Agron. J.*, **56**, 139-143.
- ANON J., 1956. — Proceedings of the informal meeting on physics in agriculture. *Netherl. J. Agric. Sci.*, **4**, 1-162.
- Van BAVEL Ch. et FRITSCHEN L. J., 1965. — Energy balance of bare surfaces in an arid climate. *UNESCO, Méthodologie de l'Ecophysiologie végétale, Colloque de Montpellier*, XXV, 99-107.
- BOUCHET R. J., 1964. — Evapotranspiration réelle et potentielle et production agricole. In : *L'eau et la production végétale*. INRA, Versailles, 151-232.
- FRITSCHEN L. J., 1965. — Accuracy of evapotranspiration determinations by the Bowen ratio method. *Bull. Internat. Ass. of Sci. Hydrol.*, **2**, 38-47.
- FRITSCHEN L. J., 1966. — Evapotranspiration rates of field crops determined by the Bowen ratio method. *Agron. J.*, **58**, 339-342.
- FRITSCHEN L. J. et Van BAVEL Ch., 1963. — Experimental evaluation of models of latent and sensible heat transport over irrigated surfaces. *Bull. Internat. Ass. of Sci. Hydrol.*, **62**, 159-171.

- FRITSCHEN L. J. et Van BAVEL Ch., 1964. — Energy balance as affected by height and maturity of sudangrass. *Agron. J.*, **56**, 201-204.
- LEMON E. R., GLASER A. H. et SATTERWHITE E. L., 1957. — Some aspects of the relationships of soil, plant and meteorological factors to evapotranspiration. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, **21**, 464-468.
- MONTENY B. A., 1968. — *Echanges énergétique et hydrique d'un couvert végétal*. Thèse de 3^e cycle, Faculté des Sciences d'Orsay, Université de Paris (manuscrit).
- PENMAN H. L., 1956. — Evaporation : an introductory survey. *Netherl. J. Agric. Sci.*, **4**, 9-30.
- RIJTEMA P. E., 1965. — An analysis of actual evapotranspiration. *Agric. Res. Reports*, n° 659.
- STANHILL G., 1958. — Evapotranspiration from different crops exposed to the same weather. *Nature*, London, **182**, 125.
- STANHILL G., 1965. — The concept of potential evapotranspiration in arid climate. *UNESCO, Méthodologie de l'Ecophysiologie végétale, Colloque de Montpellier*, **XXV**, 109-117.
- TANNER C. B. et PELTON R., 1960. — Potential evapotranspiration estimated by the approximate energy balance method of Penman. *J. Geophys. Res.*, **65**, 3391-3413.
- THORNTHWAITE C. W., 1944. — Report of the committee on transpiration and evaporation. *Trans. Amer. Geophys. Un.*, **5**, 687.
- THORNTHWAITE C. W., 1954. — A reexamination of the concept and measurement of potential evapotranspiration. Johns Hopkins University. *Public. in Climatol.*, **7**, 200-209.
- TURC L., 1961. — Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle, formule simplifiée. *Ann. Agron.*, **12**, 13-49.