

Estimation des besoins en eau de la canne à sucre en région soudano-sahélienne pour la conduite de l'irrigation

B.A. MONTENY, B. ZELLER, G. HAINNAUX

ORSTOM, Bioclimatologie,
BP. V-51, Abidjan, République de Côte d'Ivoire

RÉSUMÉ

Durant 2 années consécutives, un programme de mesures micrométéorologiques a été réalisé sur une culture de canne à sucre dans un périmètre situé au sud de la Haute-Volta (BANFORA). L'objectif était de déterminer l'importance de l'évapotranspiration réelle pour une culture en bonnes conditions d'alimentation hydrique selon les conditions pédoclimatiques et végétales. Il a permis de déboucher sur une expression générale satisfaisante permettant d'estimer les besoins en eau de la culture basée sur la quantité d'énergie reçue au sol et sur un coefficient cultural d'efficience radiative intégrant les interactions sol-plantes-climat. D'autre part, les mesures ont mis en évidence l'effet limitant de la température du sol sur les déperditions d'eau de la culture située en condition de sécheresse extrême c'est-à-dire durant la période d'harmattan.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 22.097 ex 1

Cote : B

I. INTRODUCTION

L'évaluation de la consommation en eau de la culture de canne à sucre s'est faite jusqu'à présent selon des méthodes utilisant le lysimètre ou les profils neutroniques dans le sol THOMSON *et al.* (1967) ; CAMPBELL *et al.* (1959) ; JONES (1980) ; LANGELIER (1978) ; CHAROY *et al.* (1978) ; DANCETTE (1979) . L'exploitation des résultats obtenus ainsi à une échelle de temps égale à la journée ou à la décade s'est accomplie grâce à l'établissement de relations empiriques entre l'évaporation mesurée sur le bac "classe A" placé à proximité, et la mesure de l'évapotranspiration réelle. A l'aide de ces relations, le bac "classe A" devient ainsi une référence dont les limites sont aujourd'hui communément admises :

- d'une part, du fait de l'importance du choix de l'emplacement du bac au sein de la culture afin de respecter les conditions où la relation a été établie,

- d'autre part, du fait de la différence fondamentale entre la réponse d'une nappe d'eau libre à une demande évaporative et celle d'un couvert végétal, ce qui rend cette relation variable selon le climat, l'importance du développement végétatif et la physiologie de la plante.

En fonction des paramètres pédoclimatiques et physiologiques, il nous paraît intéressant de rediscuter les besoins en eau d'une culture de canne à sucre en analysant son comportement. Dans ce but, l'utilisation d'une méthode de mesure aérienne de l'évapotranspiration du couvert permet de suivre les interactions du système constitué par le sol, la plante et l'atmosphère et caractériser ainsi des situations typiques de consommation en eau selon ces trois éléments. En effet, l'application d'une telle méthode conduit à des calculs selon un pas de temps proche de l'heure, permettant la mise en évidence de la régulation hydrique par la plante en fonction de l'eau disponible dans le sol et de la demande climatique.

La première partie porte sur la présentation de la méthode de mesure de l'évapotranspiration réelle utilisée. Il s'agit de la méthode du rapport de Bowen dont la validité et les erreurs liées aux mesures sont discutées.

La seconde partie porte sur la présentation des résultats de mesures à différentes époques de l'année et pour différents stades de développement du couvert, aboutissant à la proposition d'un modèle de consommation en eau de la canne à sucre irriguée, extrapolable à toute la zone soudano-sahélienne.

II. PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'énergie utilisée par une surface végétale dans le processus d'évapotranspiration provient pour l'essentiel du rayonnement net et dans certains cas, d'un apport advectif d'énergie sensible. La valeur du rayonnement net (R_n) donne la limite supérieure du taux d'échange de vapeur d'eau en région humide. Toutefois, en région plus sèche, l'évapotranspiration ETRM d'une culture bien alimentée en eau est souvent plus élevée que la valeur de R_n (MONTENY, 1973).

L'équation du bilan d'énergie, au niveau du couvert végétal, peut s'écrire sous sa forme simplifiée :

$$R_n - G = L \cdot ETR + H \quad (1)$$

avec R_n : rayonnement net du couvert (Wm^{-2})

G : flux de chaleur conductif dans le sol (Wm^{-2})

L : chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J.kg^{-1}$)

ETRM : évapotranspiration réelle du couvert ($kg.m^{-2}.s^{-1}$)

H : flux de chaleur convectif à la surface de la végétation (Wm^{-2})

Le signe positif est attribué aux flux entrant dans le système.

Le rapport de Bowen correspond au rapport entre le flux de chaleur convectif dans l'air (H) et le flux de chaleur latente (L.ETR) - c'est-à-dire :

$$\beta = \frac{H}{L.ETR} = \frac{-\rho C_p K_H \frac{dT}{dz}}{-(\rho L_e/P) K_E \frac{de}{dz}} = \gamma \cdot \frac{dT}{de} \quad (2)$$

si l'on admet l'hypothèse de similarité des coefficients d'échange : $K_H = K_E$, l'expression se simplifie et dT et de correspondent aux différences de température et de vapeur d'eau mesurées entre deux niveaux identiques dans la couche limite de la surface ; γ est la constante psychrométrique ($0,67 \text{ mb} \cdot \text{C}^{-1}$).

La combinaison des équations (1) et (2) donne :

$$L.ETR = \frac{(R_n - G)}{(1 + \beta)} \quad (3)$$

$$H = \frac{\beta (R_n - G)}{(1 + \beta)} \quad (4)$$

Toutefois, en condition d'advection, les flux de chaleur latente et de chaleur sensible sont de signes opposés et les coefficients d'échange sont différents. VERMA *et al.* (1978), BRAKKE *et al.* (1978) ont montré expérimentalement; qu'en condition de stabilité, le coefficient K_H est supérieur à K_E .

Ainsi, VERMA *et al.* (1978) proposent l'introduction de l'équation suivante :

$$\frac{K_H}{K_E} = 2,95 + 3,72 \left(\frac{dT}{de} \right) + 1,72 \left(\frac{dT}{de} \right)^2 \quad (5)$$

$$\text{pour } -0,1 < \frac{dT}{de} < 0,8$$

et qui donne le rapport de Bowen corrigé suivant :

$$\beta = \gamma \left(2,95 + 3,72 \left(\frac{dT}{de} \right) + 1,72 \left(\frac{dT}{de} \right)^2 \right) \frac{dT}{de} \quad (6)$$

Lorsque les gradients sont de signes opposés, l'introduction de la valeur de β corrigé dans l'équation (3) permet de calculer le flux de chaleur latente L.ETR du couvert végétal en conditions d'advection.

Cette méthode est basée sur la mesure des gradients verticaux de température et de tension de vapeur d'eau au-dessus de la surface végétale dans la zone des flux conservatifs.

III. CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Dispositif de mesure

L'étude a été réalisée en 1983 et 1984 sur un couvert de canne à sucre irriguée dans un périmètre de 3.500 ha dans la région Sud de Haute-Volta ($10^\circ \text{ N } 4^\circ \text{ W}$). Le site de mesure retenu est une parcelle de 25 ha située à l'intérieur d'une surface irriguée totale de 1.200 ha considérée comme un anneau de garde. La culture est une repousse de huitième année.

Le dispositif expérimental mis en place pour les mesures micrométéorologiques comprend (MONTENY, 1983 a) :

- un pyranomètre thermoélectrique (Rg) pour la mesure de l'énergie solaire reçue par la culture dans la bande spectrale de 250 à 3.000 nm (type Kipp & Zonen) ;
- un pyradiobilmètre Schenck pour la mesure de la fraction d'énergie absorbée par la culture (Rn) (λ : 250 à 100.000 nm) ;
- d'un ensemble de thermocouples (Cu-Const.) disposés à différents niveaux au-dessus de la surface végétale. En prenant la glace fondante comme référence, les forces électromotrices sont enregistrées par des intégrateurs Time Electronic ;
- la vitesse horizontale du vent est enregistrée à l'aide d'anémomètres à 3 coupelles Casella étalonnés par comparaison à une référence.

L'ensemble de ces paramètres sont mesurés sur une période d'intégration de 20 minutes et ramenés à une valeur moyenne instantanée.

Quant aux mesures de la température du point de rosée, elles sont obtenues à l'aide d'un hygromètre à condensation, l'air étant aspiré aux différents niveaux par des pompes aspirantes-foulantes à membrane (débit 240 lh^{-1}). Ces données correspondent à une valeur instantanée, à cheval sur la période des 20 minutes. En outre, la température du sol est relevée à plusieurs reprises au cours de la journée à l'aide de thermomètres placés à 25 cm de profondeur. Le tableau I présente la disposition des capteurs au-dessus du couvert végétal.

TABLEAU I

Disposition des capteurs au-dessus de la surface végétale.

Disposition of the sensors on the mast and the level of measurements.

Capteurs	niveaux*			
	1	2	3	4 + 20 cm
Bilanmètre Rn				X
Pyranomètre Rg				X
Température de l'air	X	X	X	X
Température du point de rosée		X	X	X
Vitesse du vent		X	X	X
Hauteur canne +				
0,9 m	1,0 m	1,5 m	2,2 m	3,2 m
2,0 m	2,2 m	3,2 m	4,2 m	5,6 m
4,0 m	4,2 m	5,2 m	6,2 m	7,5 m

* les niveaux sont variables en fonction de la hauteur⁺ de la culture.

Les différentes valeurs des caractéristiques microclimatiques mesurées sont traitées à l'aide d'une calculatrice HP 41 CV qui calcule les différents flux énergétiques se produisant au-dessus de la culture.

Les données présentées concernent 3 périodes distinctes de l'année :

- saison sèche, froide (déc. - janv.) : $\bar{T}_{\text{max}} = 33^\circ\text{C}$; $\bar{T}_{\text{min}} = 17^\circ\text{C}$; $\bar{T}_r = 5^\circ\text{C}$
- saison sèche, chaude (mars-avril) : $\bar{T}_{\text{max}} = 37^\circ\text{C}$; $\bar{T}_{\text{min}} = 22^\circ\text{C}$; $\bar{T}_r = 12^\circ\text{C}$
- saison humide, chaude (mai-juin) : $\bar{T}_{\text{max}} = 34^\circ\text{C}$; $\bar{T}_{\text{min}} = 24^\circ\text{C}$; $\bar{T}_r = 21^\circ\text{C}$

Analyse de la validité des résultats

A. Calcul d'erreur

L'importance des erreurs dans l'estimation des flux provient des erreurs sur les mesures des différents paramètres. L'erreur relative sur les flux est déterminée en utilisant l'erreur maximale de mesure susceptible d'être faite sur chaque mesure. Ainsi, le rayonnement net est mesuré avec une précision de 6 % et le flux conductif G dans le sol à 20 %. L'ensemble thermocouple + intégrateur crée une erreur de température de l'ordre de $0,1^\circ\text{C}$; quant à la tension de vapeur d'eau de l'air, la précision est de 0,1 mb pour une température du point de rosée de 10°C et 0,2 mb à 30°C .

L'énergie accumulée par le couvert végétal sous forme de chaleur et de photosynthate, qui représentent quelques % du rayonnement net, a été négligée.

Les erreurs relatives sur les estimations du flux de chaleur latente (L.ETR) ont été calculées selon l'équation (FUCHS *et al.* 1970) :

$$\frac{\sigma \text{ L.ETR}}{\text{L.ETR}} = \frac{\sigma \text{ Rn} + \sigma \text{ G}}{|\text{Rn} - \text{G}|} + \frac{\sigma \beta}{(1 + |\beta|)} \quad (7)$$

c'est-à-dire

$$\frac{\sigma \text{ L.ETR}}{\text{L.ETR}} = \left[\frac{\sigma \text{ Rn} + \sigma \text{ G}}{|\text{Rn} - \text{G}|} \right] + \left[\frac{0,67}{(1 + |\beta|)} \left(\frac{2 \sigma T}{dt} + \frac{2 \sigma e}{de} \right) \right] \quad (8)$$

Les résultats sont présentés dans le tableau II.

Trois périodes distinctes de l'année ont été considérées avec des valeurs élevées et faibles de L.ETR. L'erreur relative sur le flux de chaleur latente L.ETR dépend de la valeur de β et donc de la valeur de la différence de tension de vapeur d'eau entre les niveaux considérés. En janvier et mars,

du fait de l'importance du déficit de tension de vapeur d'eau de l'air, l'erreur relative sur L.ETR est de 0,20 à 0,30, valeur qui s'accroît quand le gradient "de" diminue, c'est-à-dire quand la valeur du rayonnement net est faible ; ce qui ne porte pas à conséquence sur l'estimation de l'ETR journalière.

D'autre part, la méthode du rapport de Bowen fait défaut quand les gradients de températures sont très faibles, du fait de l'erreur de précision du système d'enregistrement, ceci est particulièrement remarqué au lever et au coucher du soleil ainsi que lors de certains passages nuageux importants (cumulonimbus). Avec l'accroissement de la tension de vapeur d'eau de l'air (mars à mai), l'erreur dans l'estimation de L.ETR augmente phénomène déjà observé précédemment (MONTENY, 1983 b).

TABLEAU II

Estimation des erreurs relatives sur les différents flux mesurés durant 3 périodes distinctes de l'année.

Estimation of the relative errors on the latent heat fluxes at different seasons.

Date	Heure	Rn - G Wm ⁻²	$\frac{\sigma Rn + \sigma G}{Rn + G}$	LE Wm ⁻²	$\frac{\sigma L.ETR}{L.ETR}$	$\frac{LE}{Rn}$
10.01.84	13.00	399	0,065	317	0,28	0,79
	16.15	140	0,065	125	0,51	0,88
04.03.84	13.10	564	0,07	453	0,21	0,80
	16.25	199	0,07	143	0,19	0,72
08.05.84	13.10	557	0,07	504	0,33	0,90
	17.05	148	0,07	135	0,38	0,91

B. Comparaison des flux de chaleur latente calculés selon les niveaux par la méthode du rapport de Bowen.

Les flux de chaleur latente instantanés calculés au cours de la journée avec les données mesurées entre les niveaux 2 et 3 (L.ETR₁) sont comparés avec ceux obtenus entre les niveaux 2 et 4 (L.ETR₂) (fig. 1) dont les équations de corrélation sont les suivantes : (L.ETR en Wm⁻²)

Janvier : T° rosée : - 3 à 1°C (harmattan)

$$L.ETR_2 = 0,84 (L.ETR_1) + 22 \quad r^2 = 0,96$$

(5,2/7,6 m) (5,2/6,2 m) nb = 47

Mars : T° rosée : 8 à 12°C

$$L.ETR_2 = 0,95 (L.ETR_1) + 3,2 \quad r^2 = 0,88$$

(5,2/7,6 m) (5,2/6,2 m) nb = 49

Mai : T° rosée : 16 à 20°C

$$L.ETR_2 = 1,04 (L.ETR_1) - 7,7 \quad r^2 = 0,99$$

(3,2/5,7 m) (3,2/4,2 m) nb = 55

Pour les périodes de mars et mai, il y a peu de différence entre les flux de chaleur latente calculés selon les niveaux. Toutefois, en période d'harmattan (janvier) une certaine divergence se manifeste : l'évapotranspiration calculée entre les niveaux 2-3 est plus élevée que les déperditions d'eau mesurées entre les niveaux 2 et 4. Il est possible, vu les conditions climatiques du moment, que le niveau supérieur soit à la limite de la zone de flux conservatif malgré l'importance de l'anneau de garde. C'est pourquoi, toutes les valeurs d'ETRM sont celles obtenues avec les données mesurées entre les niveaux 2-3.

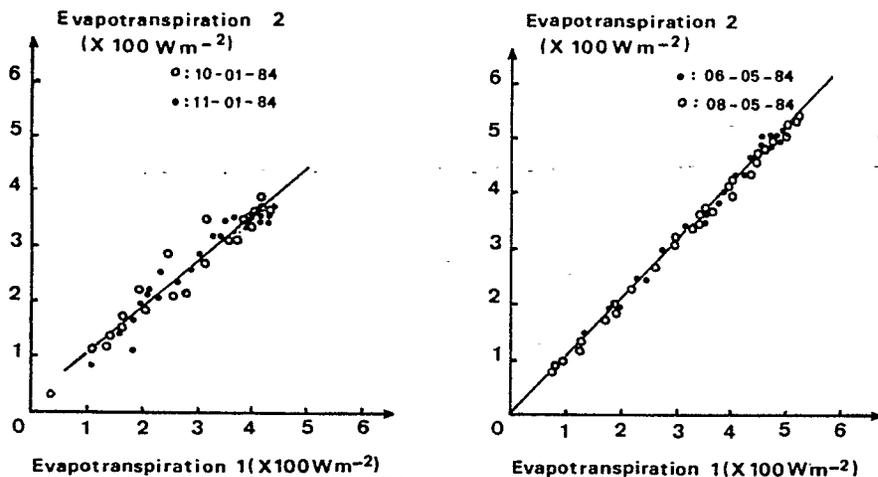


FIGURE 1

Relation entre l' ETR_1 et l' ETR_2 calculées à partir de mesures réalisées à différents niveaux (voir texte).

Relationship between evapotranspiration rates calculated with data obtained from level 2 and 3 (ETR_1) and level 2 and 4 (ETR_2).

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'évapotranspiration d'une culture de canne à sucre résulte du transfert de l'eau du sol absorbée au niveau racinaire, déplacée sous forme liquide jusqu'aux feuilles puis évaporée et diffusée au travers des stomates.

Le flux se produit en réponse à une demande climatique qui s'exprime sous forme d'énergie disponible au niveau de la feuille. Selon les coefficients d'échange au voisinage de la feuille et selon son état hydrique, celle-ci utilisera l'énergie pour évapotranspirer l'eau (LETR), ou s'échauffera et provoquera un flux de chaleur sensible (H). De façon globale pour le couvert, le suivi des différents termes du bilan d'énergie (apports radiatifs et advectifs et pertes sous forme de chaleur latente et sensible) permet de calculer l'efficacité à l'évapotranspiration du couvert.

La figure 2 représente l'évolution horaire des différents termes du bilan d'énergie mesurés durant 3 périodes distinctes de l'année sur une culture de canne bien développée sans limitation en eau. La course du rayonnement net suit le mouvement apparent du soleil avec des valeurs les plus élevées en mars car le soleil est proche de son zénith.

L'évapotranspiration, LETR, dans tous les cas, représente la forme d'échange d'énergie la plus importante quelle que soit la période considérée. Il est à remarquer qu'en décembre, l'arrivée de l'harmattan provoque un accroissement de l'ETR dû à l'apport d'énergie advective dans le système ($H > 0$).

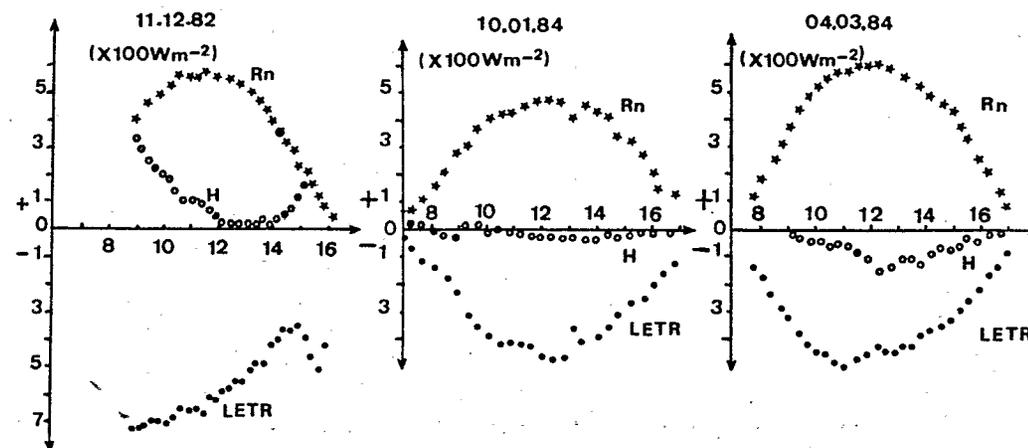


FIGURE 2

Evolution horaire du rayonnement net R_n , du flux de chaleur latente LETR et du flux chaleur sensible H au-dessus d'une culture de canne pour des journées caractéristiques de 3 périodes distinctes.

Net radiation (R_n), latent heat of evaporation (LETR) and sensible heat flux above a homogeneous canopy of sugar cane for 3 days at different periods of the year.

Le rapport des valeurs intégrées de l'évapotranspiration et du rayonnement net sur l'ensemble de la journée montre des différences notables selon les périodes considérées : (tableau III).

TABLEAU III

Comparaison du rapport $LETR/R_n$ selon les saisons.

Comparison between $LETR$ and R_n for different seasons.

Période	Date	R_n $J.cm^{-2}.j^{-1}$	$L.ETR$ $J.cm^{-2}.j^{-1}$	$L.ETR/R_n$
chaude et sèche (nov. à 1/2 déc.)	11.12	1187	1634	1,37
froide et sèche (1/2 déc. à 1/2 fév.)	10.01	1219	952	0,78
chaude et quelque peu humide (1/2 fév. - avril)	04.03	1445	1293	0,89

Avec un développement foliaire optimal et une alimentation hydrique non limitante, la consommation en eau $LETR$ de la canne à sucre est tributaire de 2 paramètres climatiques :

- d'une part, l'apport d'énergie autre que rayonnante dans le système (advection par l'harmattan) qui accroît l'évapotranspiration ($LETR/R_n = 1,37$);
- d'autre part, l'effet d'un bilan radiatif très négatif durant la période nocturne entraîne le refroidissement du système avec une diminution de la température du sol qui passe de 26-27°C à 17-18°C durant la saison froide et sèche. Le seuil de sécheresse physiologique pour la canne est de l'ordre de 10-13°C (FANCONNIER-BASSEREAU (1970)). Ainsi, l'effet de l'apport d'énergie advective au système est contrebalancé par le rôle des basses températures du sol qui freinent l'absorption de l'eau par le système racinaire. Le rapport $LETR/R_n$ correspond à 0,78;
- le retour à des conditions plus favorables (réduction du pouvoir évaporant de l'air et augmentation de la température du sol) accroît l'activité physiologique du couvert, le rapport s'élève progressivement (0,89).

L'évapotranspiration dépendant autant du régime évaporant d'une surface que de l'importance de la surface évaporante, il apparaît intéressant de suivre l'évolution du rapport selon le développement de la surface foliaire approché par le taux de couverture du sol. (fig. 3) : à faible taux de couver-

ture, les déperditions en eau sont limitées (28.01.83). Au fur et à mesure de l'accroissement de la surface foliaire, $LETR$ augmente (13.03 : culture 2/3 à 3/4 couvrante et 28.11 culture couvrante) jusqu'à atteindre un état d'équilibre où $LETR$ représente 85 à 90 % de R_n en absence d'apport d'énergie advective.

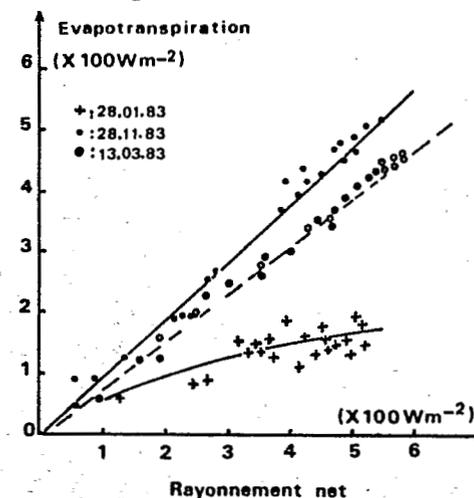


FIGURE 3

Relation entre l'évapotranspiration réelle de la culture de canne à sucre et le rayonnement net en fonction du développement foliaire.

Relationship between net radiation and latent heat of evaporation at different leaf development stages.

V. MODÉLISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE MAXIMALE DE LA CANNE À SUCRE

Pour évaluer l'évapotranspiration réelle maximale ($ETRM$) de la canne à sucre, il est nécessaire, dans le cadre d'une utilisation pratique, d'avoir un certain nombre d'informations de base tant sur le système végétal que sur les conditions climatiques.

Un modèle micrométéorologique décrivant les échanges de vapeur d'eau ($L.ETR$) entre le couvert végétal et son envi-

ronnement a été présenté par PENMAN (1956) :

$$L.ETR = \left(\frac{P}{P'+\gamma}\right) (Rn - G) + \frac{\gamma}{\gamma+P'} 0,26 (1+0,54 V) (E - ea) \quad (14)$$

Cette formulation, très générale, correspond à la somme de 2 termes, le premier à caractère radiatif, car en relation avec le rayonnement net, Rn , et le second à caractère convectif du fait de son analogie avec les expressions des flux convectifs faisant appel aux caractéristiques des masses d'air (température, tension de vapeur d'eau et vitesse du vent).

En ne considérant que le premier terme de l'équation (14) comme terme moyen autour duquel évoluerait l'évapotranspiration réelle, l'évapotranspiration standard ET_0 se définit comme suit : LHOMME *et al.* (1982) :

$$ET_0 = \frac{P'}{P'+\gamma} (Rn - G) \quad (15)$$

ce qui réduit l'influence du climat à son terme essentiel, le rayonnement net qui joue un rôle prépondérant dans l'évapotranspiration réelle comme nous l'avons vu précédemment, le coefficient $P'/P'+\gamma$ oscillant légèrement avec la température de l'air autour d'une valeur moyenne de 0,76 dans nos conditions.

PRIESTLEY et TAYLOR (1972) ont introduit la notion d'un coefficient "C" correspondant au rapport de l'évapotranspiration maximale (ETRM) à l'évapotranspiration standard (ET_0) et permettant le calcul de l'évapotranspiration potentielle climatique :

$$ETp = C \left(\frac{P'}{P'+\gamma}\right) (Rn - G) \quad (16)$$

Ce coefficient "C" dit cultural fait intervenir le pouvoir régulateur du système végétal (PERRIER, 1975 ; PERRIER *et al.* 1980) qui varie en fonction des conditions pédoclimatiques et des paramètres végétatifs (feuilles-racines).

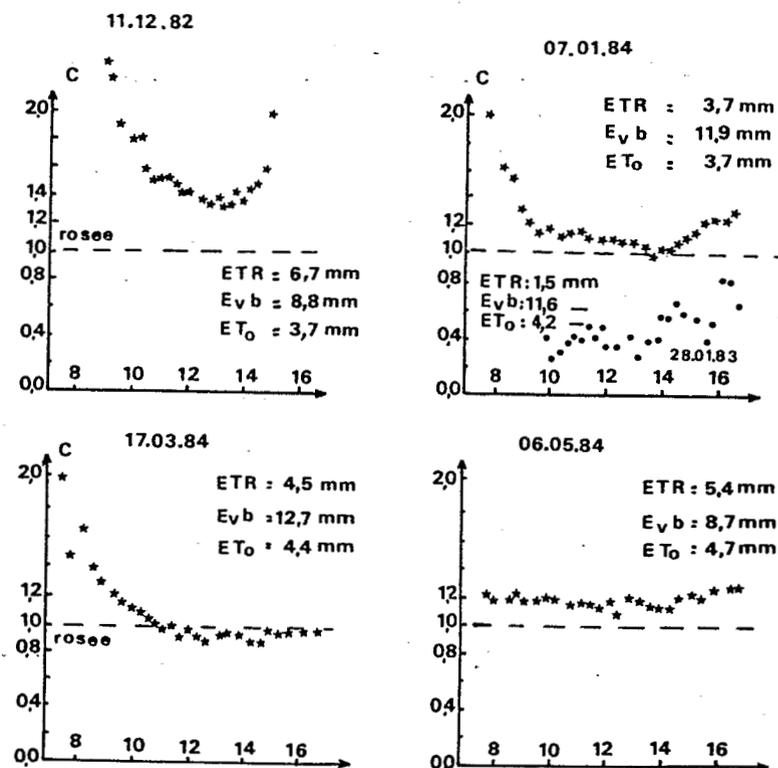


FIGURE 4

Evolution horaire du rapport $ETRM/ET_0 = C$ au cours de différentes journées en fonction des saisons et du développement foliaire de la culture.

ETR = évapotranspiration réelle de la canne

E_{vb} = évaporation d'une nappe d'eau (bac "classe A")

ET_0 = évapotranspiration standard.

Daily evolution of the $LETR/ET_0$ ratio ("C") at different leaf areas (28.01.83, 07.01.84 and 17.03.84 and during the dry (11.12.82) and humid (06.05.84) seasons.

ETR = actual evapotranspiration rate from sugar cane

E_{vb} = water evaporation from the U.S. W.B. class A pan

ET_0 = potential evapotranspiration rate.

La figure 4 représente l'évolution horaire du coefficient "C" au cours de journées caractérisées par un développement du couvert, un climat ou une température du sol différents :

- la comparaison des journées 07.01 couverture totale et 28.01 couverture 1/4 ainsi que les 17.05 couverture 2/3 - 3/4 met en évidence l'effet du développement foliaire, seul facteur divergent, sur le coefficient "C",
- en ce qui concerne les journées du 11.12 et 07.01, la comparaison rend compte de la réduction de l'alimentation hydrique du système liée à l'effet dépressif de la température du sol,
- pour les journées avec et sans harmattan (11.12 et 06.05) seule la demande évaporative du climat diffère, provoquant une augmentation du coefficient "C".

Ces résultats confirment les données obtenues sur d'autres cultures en régions tempérées. En effet, KATERJI *et al.* (1983) citent des valeurs du coefficient "C", passant de 0,94 à 1,47 selon les stades phénologiques d'une culture de blé et les conditions climatiques du moment.

Toutefois, la comparaison avec d'autres valeurs du coefficient cultural, obtenues dans d'autres régions sur la même culture de canne, doit être faite avec précaution. En effet, certains facteurs - harmattan, température du sol, développement foliaire, hauteur de la végétation... - accroissent ou réduisent les déperditions d'eau par le système végétal et sont à considérer puisque ce coefficient les intègre.

Ainsi, à partir de l'ensemble des résultats obtenus au cours des saisons pour différents stades phénologiques de la culture de canne à sucre bien alimentée en eau, une valeur moyenne de ce coefficient a pu être établie (tableau IV).

TABLEAU IV

Valeurs moyennes du coefficient cultural retenues en fonction de la période de la coupe.

Mean values of "C" proposed to determine the water supply to the sugar cane crop.

	Couverture totale toute l'année	Canne coupée en novembre	Canne coupée en mars
JANVIER	1.1	0.4	1.1
FEVRIER	1.1	0.8	1.1
MARS	1.15	1.0	-
AVRIL	1.2	1.2	0.4
MAI	1.25	1.25	0.8
JUIN	1.1	1.1	1.1
JUILLET	1.1	1.1	1.1
AOUT	1.1	1.1	1.1
SEPTEMBRE	1.1	1.1	1.1
OCTOBRE	1.2	1.2	1.2
NOVEMBRE	1.4	-	1.4
DECEMBRE	1.2	0.3	1.2

Les valeurs du coefficient reflètent la réponse de la culture aux facteurs du milieu. Malgré le caractère d'aridité prononcée dans cette région durant une période de l'année, ces coefficients sont inférieurs à ceux trouvés dans la littérature (KATERJI *et al.* 1983).

En appliquant ces coefficients culturaux "C", il nous est, dès lors, possible d'estimer les besoins en eau de la culture de canne à sucre. Toutefois, les seules données climatiques disponibles permettant d'évaluer la quantité d'énergie reçue au sol sont la durée d'insolation et parfois le rayonnement solaire global. C'est pourquoi, une relation linéaire à caractère empirique a été recherchée entre ces deux mesures pour évaluer le rayonnement solaire (MONTENY 1983 a) :

$$R_g = (0,56 \frac{n}{N} + 0,13) R_{g_0} \quad (\text{de novembre à mars})$$

$$\text{et} \quad R_g = (0,48 \frac{n}{N} + 0,20) R_{g_0} \quad (\text{d'avril à octobre}) \quad (17)$$

De même, il a été nécessaire de déterminer la relation existant

entre la quantité d'énergie solaire (R_g) arrivant au sol et la fraction d'énergie absorbée ($250 \text{ nm} < R_n < 100.000 \text{ nm}$) et qui correspond à :

$$R_n = 0,74 R_g - 34 \quad r^2 = 0,98 \quad (18)$$

$$nb = 67$$

Ainsi, la formulation générale intégrant les équations (16, 17 et 18) et pouvant permettre d'évaluer les besoins en eau de la canne à sucre dans des régions où les données climatiques sont limitées, s'écrit :

$$\overline{\text{ETRM}}_C = C \left(\frac{P'}{P+\gamma} \right) 0,74 \left(a \frac{n}{N} + b \right) \frac{R_g}{244} \quad (19)$$

$$\text{mmj}^{-1}$$

avec n = durée d'insolation

N = durée astronomique du jour

R_g = rayonnement solaire global mesuré au sommet de l'atmosphère ($\text{J.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$)

En recalculant l'évapotranspiration maximale (ETRM_C) à partir de l'équation (19) et en comparant avec les valeurs journalières d' ETRM_m correspondantes, nous obtenons une corrélation très satisfaisante :

$$\text{ETRM}_m = 0,94 \text{ETRM}_C + 0,28$$

$$\text{mmj}^{-1} \quad \text{mmj}^{-1}$$

avec $r^2 = 0,89$
 $nb = 32$

Cette formulation générale, d'une utilisation aisée, permet, à partir de la connaissance de la quantité d'énergie arrivant au sol et en considérant un coefficient cultural "C" intégrant les effets des conditions pédoclimatiques et l'activité physiologique des plantes, d'estimer les besoins en eau maximale de la culture de canne à sucre. Les besoins en eau calculés par cette expression, pour une culture coupée en novembre, s'élèvent à 1.096 mm/an et pour celle coupée en mars à 1.365 mm/an. Comparativement, les estimations des besoins en eau réalisées à partir de l'évaporation d'une nappe d'eau libre d'un bac classe "A" et utilisant les coefficients sud africains (K_a) correspondent, pour les conditions climatiques de la

région à 1.530 mm/an pour une canne coupée en novembre et 1.650 mm/an pour une canne coupée en mars.

TABLEAU V

Comparaison des valeurs de K mesurées K_m et celles appliquées K_a si le bac "classe A" est utilisé.

Comparison between values of measured K_m and previously used K_a .

M O I S	CANNE COUPEE EN NOVEMBRE		CANNE COUPEE EN MARS	
	K_m	K_a	K_m	K_a
JANVIER	0,2	0,3	0,5	1,0
FEVRIER	0,35	0,6	-	-
MARS	0,44	0,8	remplissage du profil	remplissage du profil
AVRIL	0,65	1,0	0,2	0,3
MAI	0,85	1,0	0,55	0,6
JUIN	0,90	1,0	0,90	0,8
JUILLET	1,05	1,0	1,05	1,0
AOÛT	1,15	1,0	1,15	1,0
SEPTEMBRE	1,10	1,0	1,10	1,0
OCTOBRE	-	-	1,05	1,0
NOVEMBRE	remplissage du profil	remplissage du profil	0,9	1,0
DECEMBRE	0,15	0,3	0,6	1,0
mm/an	1096	1530	1365	1650

Les différences de 30 à 35 % dans les apports d'eau nécessaires s'expliquent aisément. Le tableau V présente les coefficients, correspondant au rapport de la consommation réelle à l'évaporation du bac "classe A" considérée précédemment comme référence, tel que nous l'avons établi K_m et ceux utilisés K_a pour 2 périodes végétatives.

La divergence des valeurs est très marquée durant la période de décembre à avril. En effet, l'abaissement de la température du sol, si elle réduit l'absorption de l'eau par les racines, agit également sur les processus photosynthétiques, qui, cumulée sur une longue période, influence le développe-

ment et la croissance foliaire de la canne, paramètre qui intervient dans les échanges de vapeur d'eau comme nous l'avons remarqué.

VI. CONCLUSION

L'analyse de la validité de l'utilisation de la méthode du rapport de Bowen pour déterminer correctement l'évapotranspiration réelle maximale (ETRM) de la culture de canne à sucre a montré la nécessité de mesurer les paramètres microclimatiques entre 1 et 3 m au-dessus de l'interface végétation-atmosphère en raison des conditions climatiques des régions soudano-sahéliennes.

De l'ensemble des mesures de l'ETRM de la culture de canne à différents stades phénologiques et pour diverses conditions climatiques, une équation générale a pu être établie. Elle est basée sur le produit de la quantité d'énergie absorbée et d'un coefficient cultural "C" qui intègre les caractéristiques de la canne à sucre et l'effet de certains facteurs climatiques sur l'activité physiologique de la plante.

Tel est le cas de l'effet des basses températures du sol qui limitent l'absorption d'eau par les racines et de ce fait la consommation de la culture malgré l'importance du déficit de tension de vapeur d'eau de l'air (30-45 mb).

L'expression proposée permet de déterminer avec précision les besoins en eau de la culture de la canne à sucre dans la région soudano-sahélienne pour la conduite des irrigations. Elle contribue à une approche correcte de la consommation hydrique de la culture pouvant conduire à une meilleure gestion de l'eau dans ces régions.

SUMMARY

Accurate evaluation of sugar cane water consumption for a controlled irrigation water supplies in the soudano-sahelian region

The analysis of the magnitude of the crop evapotranspiration rate in a region permits to evaluate how it can resist to drought resulting from regional macroclimatic conditions.

Evapotranspiration measurements by a micrometeorological method were undertaken on a irrigated sugar cane crop located at Banfora (Burkina Faso). This method permits to follow the instantaneous evapotranspiration rate (ETR) during the day and the crop reaction either to soil water depletion or to some pedoclimatic factors which influence the water transfer in the soil-plant system.

The integrated evapotranspiration rates (ETR) vary from 3,5 to 6,5 mm a day depending mainly on the available energy and the importance of the leaf crop development. However, the decrease of soil temperature from 24 to 18° C during the harmattan period reduces the sugar cane water consumption in spite of the increase of the air water vapour pressure deficit from 25 to 45 mb.

The sugar cane maximum evapotranspiration rate (ETRM) for this region can be deduced with good accuracy from the available energy at the earth's surface by the following equation :

$$\begin{aligned} \text{ETRM} &= C \times \frac{0,56}{244} R_g. \\ &= \frac{0,56}{244} R_g : \text{available diurnal solar energy for the water vapour exchange } (R_g = J. \text{ cm}^{-2} \text{ j}^{-1}). \\ &= "C" : \text{crop coefficient of radiative efficiency integrating all the factors which influence the stomatal resistance.} \end{aligned}$$

This crop coefficient has been determined experimentally for different phenological crop stages at different

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- BLAD, B.L. and ROSENBERG, N.J. 1974.- Lysimetric calibration of the Bowen ratio-Energy balance method for evapotranspiration estimation in the central great plains. *J. Appl. Meteor.* 13 : 227-236.
- BRASSE, T.W. ; VERMA, S.B. and ROSENBERG, N.J. 1978.- Local and regional components of sensible heat advection. *J. Appl. Meteor.* 17 : 955-963.
- CAMPBELL, R.B., CHANG, J.M. and COX, D.C. 1959.- Evapotranspiration of sugar cane in Hawaii as measured by in field lysimeters in relation to climate 637-645. *Proc. 10th Congress of the ISSCT-Hawaii.*
- CHAROY, J., FOREST, F., LEGOUPIL, J.C. et BASSEREAU, D. 1978.- Besoins en eau de la canne à sucre. *Agron. Tropicale* 33 : 344-369.
- DANCETTE, C. 1979 a.- Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau, en zone soudano-sahélienne. *Agron. Tropicale* 34 : 331-355.
- DANCETTE, C. and HALL, A.B. 1979 b.- Agroclimatology applied to water management in the sudanian and sahelian zones of Africa - 98-118. *in "Agriculture in semi-arid Environments"* ed. HALL, A.E., CANNELL, G.H., and LAWTON, H.W.
- FAUCONNIER, R. et BASSEREAU, D. 1970.- La canne à sucre. 468p. *Coll : Techniq. agricoles et Productions tropicales.*
- FUCHS, M. and TANNER, C.B. 1970.- Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometry. *Agr. Meteor.* 7 : 329-334.

- JONES, L.A. 1980.- A review of evapotranspiration studies in irrigated sugar cane in Hawaii. *Hawaiian Planter's Record* 59 : 195-214.
- KATERJI, N. et PERRIER, A. 1983. Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne ; rôle d'un coefficient cultural. *Agron.* 3 : 513-521.
- LANGELLIER, P. 1980.- Détermination du régime hydrique d'une culture de canne à sucre de milieu, en période maturation, dans le nord de la Côte d'Ivoire. *Agron. Tropicale* 35 : 232-239.
- LHOMME, J.P. et MONTENY, B.A. 1982.- Présentation d'une formule d'estimation de l'évaporation potentielle conforme aux nouvelles recommandations internationales. *Arch. Meteor. Geogr. Bioklim. (B)* 30 : 253-260.
- MONTENY, B.A. 1973.- Evapotranspiration de différents couverts végétaux en région méditerranéenne semi-aride. *Agric. Meteor.* 10 : 19-38.
- MONTENY, B.A., HUMBERT, J., LHOMME, J.P. et KALMS, J.M. 1981.- Le rayonnement net et l'estimation de l'évapotranspiration en Côte d'Ivoire. *Agric. Meteor.* 23 : 45-59.
- MONTENY, B.A. 1983 a.- Estimation des besoins en eau d'une culture de canne à sucre durant sa période de croissance. *Rapport ORSTOM* - 15p.
- MONTENY, B.A. 1983 b.- Determination of the energy exchanges of a forest type culture - *Hevea brasiliensis*. *Forest Environmental Measurements - International Conference OAK RIDGE, Tennessee - USA.*
- PENMAN, H.L. 1956.- Evaporation : an introductory survey. *Neth. J. Agric. Sci.* 4 : 9-29.

- PERRIER, A. ; KATERJI, N. ; GOSSE, G. et ITIER, B. 1980.-
Etude "*in situ*" de l'évapotranspiration réelle
d'une culture de blé.
Agric. Météor. 21 : 295-311.
- PERRIER, A. 1975.- Etude de l'évapotranspiration dans les
conditions naturelles. III. Evapotranspiration réelle
et potentielle des couverts végétaux.
Ann. Agron. 26 : 229-243.
- PRIESTLEY, C.M. and TAYLOR, R.J. 1972.- On the assesment of
surface heat flux and evaporation using large scale
parameters.
Month. Weather Rev. 100 : 81-92.
- THOMPSON, G.D. and BOYCE, J.P. 1967.- Daily measurements of
potential evapotranspiration from fully canopied
sugarcane.
Agric. Meteor. 4 : 267-279.
- VERMA, S.B. ; ROSENBERG, N.J. and BLAD, B.L. 1978.- Turbulent
Exchange Coefficients for sensible heat and water
vapor under advective conditions.
J. Appl. Meteor. 17 : 330-338.