

EVALUATION DE LA CONSOMMATION EN EAU DE LA CANNE A SUCRE POUR L'AMELIORATION DE LA PRODUCTION EN REGION SOUDANO-SAHELIENNE

B.A. Monteny
ORSTOM P 11416 Niamey Niger

Résumé: Des mesures micrométéorologiques ont été réalisées sur un périmètre d'une culture de canne à sucre (Banfora) avec pour objectif d'évaluer la consommation en eau de la culture en fonction des stades phénologiques et compte tenu des conditions climatiques. La méthode de mesure est basée sur le bilan d'énergie couplé au rapport de Bowen pour la détermination de l'évapotranspiration réelle. Les résultats ont débouché sur une expression générale:

$$ETR = C * (\delta/\delta + \gamma) * 0,74 Rg/\lambda \text{ en mm.j}^{-1}$$

permettant d'évaluer correctement les besoins en eau de la culture de la canne à sucre, connaissant la quantité d'énergie solaire reçue au sol R_g et le coefficient cultural d'efficacité radiative C intégrant les interactions sol-plantes-climat. Le coefficient C varie de 0,4 à 1,3. Par ailleurs, les mesures ont mis en évidence l'importance de l'effet psychrométrique de l'irrigation sur la croissance/repousse (abaissement de la température du sol et du couvert végétal) au cours de la période novembre à janvier et donc sur la production.

Abstract: Micrometeorological measurements were taken in a sugar cane field in Banfora to evaluate water uptake in each phenological phase, with due attention to climatic conditions. The measurement method is based on the energy balance together with the Bowen relationship to determine real evapotranspiration. The results led to the following general formula,

$$ETR = C * (\delta/\delta + \gamma) * 0,74 Rg/\lambda \text{ en mm.j}^{-1}$$

that provided a capacity to correctly evaluate the water needs of the sugar cane crop, when the quantity of solar energy received by the ground R_g and the crop coefficient for radiative efficiency C that includes the soil-plant-climate interaction are known. The C coefficient varies from 0.4 to 1.3. Furthermore, measurements have brought out the importance of the psychrometric effect of irrigation on growth/regrowth (lowering the temperature of the soil and the plant canopy) during the period from November to January and thus on output.

L'évaluation de la consommation en eau de la culture de canne à sucre, dans le but d'en améliorer la productivité, s'est faite jusqu'à présent selon les méthodes utilisant le lysimètre ou les profils d'humidité dans le sol (sonde à neutron) Thomson et Boyce, (1967); Campbell *et al.* (1959); Jones (1980); Langellier (1980); 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 obtenue par un bilan hydrique. 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 (déficit de pression de vapeur d'eau, vitesse du vent...) et celle d'un couvert végétal, ce qui rend cette relation variable selon le climat, la saison, 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'évaporation-transpiration du couvert permet de suivre les interactions du système constitué par le sol, la plante et l'atmosphère et de 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 les stomates) de la plante en fonction de l'eau disponible dans le sol (importance du développement du système racinaire) et de la demande climatique.

La première partie de ce travail 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.

PRINCIPE DE LA METHODE

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:

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

avec

R_n : rayonnement net du couvert ($W \cdot m^{-2}$)

G : flux de chaleur conductif dans le sol ($W \cdot m^{-2}$)

λ : chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J \cdot kg^{-1}$)

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

H : flux convectif de chaleur à la surface de la végétation ($W \cdot m^{-2}$)

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

Le rapport de Bowen correspond au rapport entre le flux convectif de chaleur dans l'air (H) et le flux de chaleur latent ($\lambda \cdot ETR$), c'est à dire:

$$b = \frac{H}{\lambda \cdot ETR} = \frac{-\rho C_p K_H dT/dz}{-(\rho \lambda \epsilon / P) K_E de/dz} = \gamma \cdot \frac{dT}{de} \quad (2)$$

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:

$$\lambda \cdot ETR = \frac{(Rn - G)}{(1 + \beta)} \quad (3)$$

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

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) et 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 de correction suivante:

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

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

ce 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 signe opposé, l'introduction de la valeur de β corrigé dans l'équation (3) permet de calculer le flux de chaleur latente $\lambda \cdot ETR$ 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.

CONDITIONS EXPERIMENTALES

L'étude a été réalisée en 1983 et 1984 sur un couvert de canne à sucre irrigué dans un périmètre de 3 500 ha dans la région Sud du Burkina Faso (10° N 4° O). 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 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 pyradiobilanmètre Schenck pour la mesure de la fraction d'énergie absorbé par la culture (Rn) (λ : 250 à 10 000 nm);
- 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 est mesuré sur une période d'intégration de 20 minutes et ramené à une valeur moyenne instantanée. Les mesures de la température du point de rosée 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 l.h⁻¹).

Ces données correspondent à une valeur instantanée médiane sur la période de 20 minutes. 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 1 présente la disposition des capteurs au-dessus du couvert végétal. 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 trois périodes distinctes de l'année:

- saison sèche, froide (décembre-janvier)
Tmax = 33°C; Tmin = 17°C; Tr = 5°C
- saison sèche, chaude (mars-avril)
Tmax = 37°C; Tmin = 22°C; Tr = 12°C

- saison humide, chaude (mai-juin)

$T_{max} = 34^{\circ}C$; $T_{min} = 24^{\circ}C$; $T_r = 21^{\circ}C$

Tableau 1. Disposition des capteurs au-dessus de la surface végétale

CAPTEURS	N I V E A U X*			
	1	2	3	4 + 20 cm
Bilanmètre Rn				X
Pyranomètre Rg				X
Température de l'air	X	X	X	X
Température point 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⁺

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 plus intégrateur crée une erreur de température de l'ordre de 0,1°C; pour la tension de vapeur d'eau de l'air la précision est de 10 Pa pour une température du point de rosée de 10°C et 20 Pa à 30°C.

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

Les erreurs relatives sur les estimations du flux de chaleur latente (λ .ETR) ont été calculées selon l'équation décrite par Fuchs et Tanner (1970).

Trois périodes distinctes de l'année ont été considérées avec des valeurs élevées et faibles de λ .ETR. L'erreur relative sur le flux de chaleur latente λ .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 $\lambda \cdot \text{ETR}$ 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 température sont 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 (cumulo-nimbus) mais sans conséquences sur la valeur de ETR, le rayonnement net étant faible ($< 160 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Avec l'accroissement de la tension de vapeur d'eau de l'air (mars à mai), l'erreur dans l'estimation de $\lambda \cdot \text{ETR}$ augmente, phénomène déjà observé précédemment (Monteny, 1983 b).

B. Comparaison des flux de chaleur latente calculés selon les niveaux par la méthode de 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 ($\lambda \cdot \text{ETR}_1$) sont comparés avec ceux obtenus entre les niveaux 2 et 4 ($\lambda \cdot \text{ETR}_2$) dont les équations de corrélation sont les suivantes ($\lambda \cdot \text{ETR}$ en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$):

JANVIER	T° de rosée	: - 3 à 1°C	(harmattan)	
	$\lambda \cdot \text{ETR}_2 =$	0,84 ($\lambda \cdot \text{ETR}_1$) =	+ 22	$r^2 = 0,96$
	(5,2/7,6 m)	(5,2/6,2 m)		nb = 47
MARS	T° de rosée	: 8 à 12°C		
	$\lambda \cdot \text{ETR}_2 =$	0,95 ($\lambda \cdot \text{ETR}_1$) =	+ 3,2	$r_2 = 0,88$
	(5,2/7,6 m)	(5,2/6,2 m)		nb = 49
MAI	T° de rosée	: 16 à 20°C		
	$\lambda \cdot \text{ETR}_2 =$	1,04 ($\lambda \cdot \text{ETR}_1$) =	- 7,7	$r^2 = 0,99$
	(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 et 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 et 3.

RESULTATS 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 (λ .ETR) 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'efficience à l'évapotranspiration du couvert.

La figure 1 représente l'évolution horaire des différents termes du bilan d'énergie mesurés durant trois périodes distincte 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 (λ .ETR), 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 ($H > 0$). 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 (Tableau 2).

Tableau 2. Variations du rapport λ .ETR/Rn selon les saisons

Période	Date	Rn (MJ.m ⁻² .j ⁻¹)	λ .ETR (MJ.m ⁻² .j ⁻¹)	λ .ETR/Rn
chaude et sèche (nov. à mi-déc.)	11.12	11,87	16,34	1,37
froide et sèche	10.01	12,19	9,52	0,78
chaude, un peu humide (mi-fév. à avril)	04.03	14,45	12,93	0,89

Avec un développement foliaire optimal et une alimentation hydrique non limitante, la consommation en eau λ .ETR 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 harmattan) qui accroît l'évapotranspiration (λ .ETR/Rn = 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 (Fauconnier et 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 $\lambda.ETR/R_n$ 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. 2): faible taux de couverture, les déperditions en eau sont limitées (28.01.83). Au fur et à mesure de l'accroissement de la surface foliaire, $\lambda.ETR$ augmente (13.03: culture 2/3 à 3/4 couvrante et 28.11 culture couvrante) jusqu'à atteindre un état d'équilibre où $\lambda.ETR$ représente 85 à 90% de R_n en absence d'apport d'énergie advective.

MODELISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE MAXIMALE DE LA CANNE A 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 ($\lambda.ETR$) entre le couvert végétal et son environnement a été présenté par Penman (1956):

$$\lambda.ETR = \left(\frac{P}{p' + \gamma} \right) (R_n - G) + \left(\frac{\gamma}{\gamma + p'} \cdot 0,26 \right) (1 + 0,54 V) (E - ea) \quad (7)$$

Cette formulation, très générale, correspond à la somme de deux termes, le premier à caractère radiatif, car en relation avec le rayonnement net, R_n , 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 (7) comme terme moyen autour duquel évoluerait l'évapotranspiration réelle, l'évapotranspiration standard ET_0 se définit comme suit (Lhomme et Monteny, 1982):

$$ET_0 = \left(\frac{P}{p' + \gamma} \right) (R_n - G) \quad (8)$$

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 vue 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_o) et permettant le calcul de l'évapotranspiration potentielle climatique:

$$ET_p = C \left(\frac{P}{p' + \gamma} \right) (Rn - G) \quad (9)$$

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).

La figure 3 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 le 17.01, couverture 2/3 - 3/4, met en évidence l'effet du développement foliaire, seule 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 ou 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 Perrier (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 d'autres valeurs du coefficient cultural, obtenues dans d'autres régions sur 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 coefficient a pu être établie (Tableau 3).

Tableau 3. Valeurs moyennes du coefficient culturel retenues en fonction de la période de la coupe

	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, ces coefficients sont inférieurs à ceux trouvés dans la littérature (Katerji et Perrier, 1983).

En appliquant ces coefficients cultureux "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):

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

et

$$R_g = \left(0,48 \frac{n}{N} + 0,20\right) R_{g_0} \quad (\text{d'avril à octobre}) \quad (10)$$

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 ($250 \text{ nm} < R_n < 100 \text{ 000 nm}$) et qui correspond à:

$$Rn = 0,74 Rg - 34$$

$$r^2 = 0,98$$

$$nb = 67$$

(11)

Ainsi, la formulation générale intégrant les équations (9,10 et 11) 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:

$$ETRMC = C \left(\frac{p'}{p' + \gamma} \right) 0,74 \left(a \frac{n}{N} + b \right) \frac{Rg_0}{244}$$

$$mm.j^{-1}$$

(12)

avec:

n = durée d'insolation

N = durée astronomique du jour

Rg_0 = rayonnement solaire global mesure au sommet de l'atmosphère ($J.cm^{-2}.j^{-1}$)

En recalculant l'évapotranspiration maximale (ETRM_c) à partir de l'équation (12) et en comparant avec les valeurs journalières d'ETRM_m correspondantes, nous obtenons une corrélation très satisfaisante:

$$ETRM_m = 0,94 ETRMC + 0,28$$

$$r^2 = 0,89$$

$$nb = 32$$

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 maximaux 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 4. Comparaison des valeurs de K mesurées Km et celles appliquées Ka si le bac "classe A" est utilisé

Mois	Canne coupée en novembre		Canne coupée en mars	
	Km	Ka	Km	Ka
JANVIER	0,20	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	0,20	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
AOUT	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 4 présente les coefficients, correspondant au rapport de la consommation réelle à l'évaporation du bac "classe A" considérée précédemment comme référence, tels que nous les avons établi (Km) et ceux utilisés (Ka) pour deux 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, cumulés sur une longue période, influencent le développement et la croissance foliaire de la canne, paramètre qui intervient dans les échanges de vapeur d'eau.

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 sucre 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 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.

Figure 1. Evolution horaire du rayonnement net (Rn), du flux de chaleur latente (LETR) et du flux de chaleur sensible (H), au-dessus d'une culture de canne à sucre pour des journées caractéristiques de trois périodes distinctes

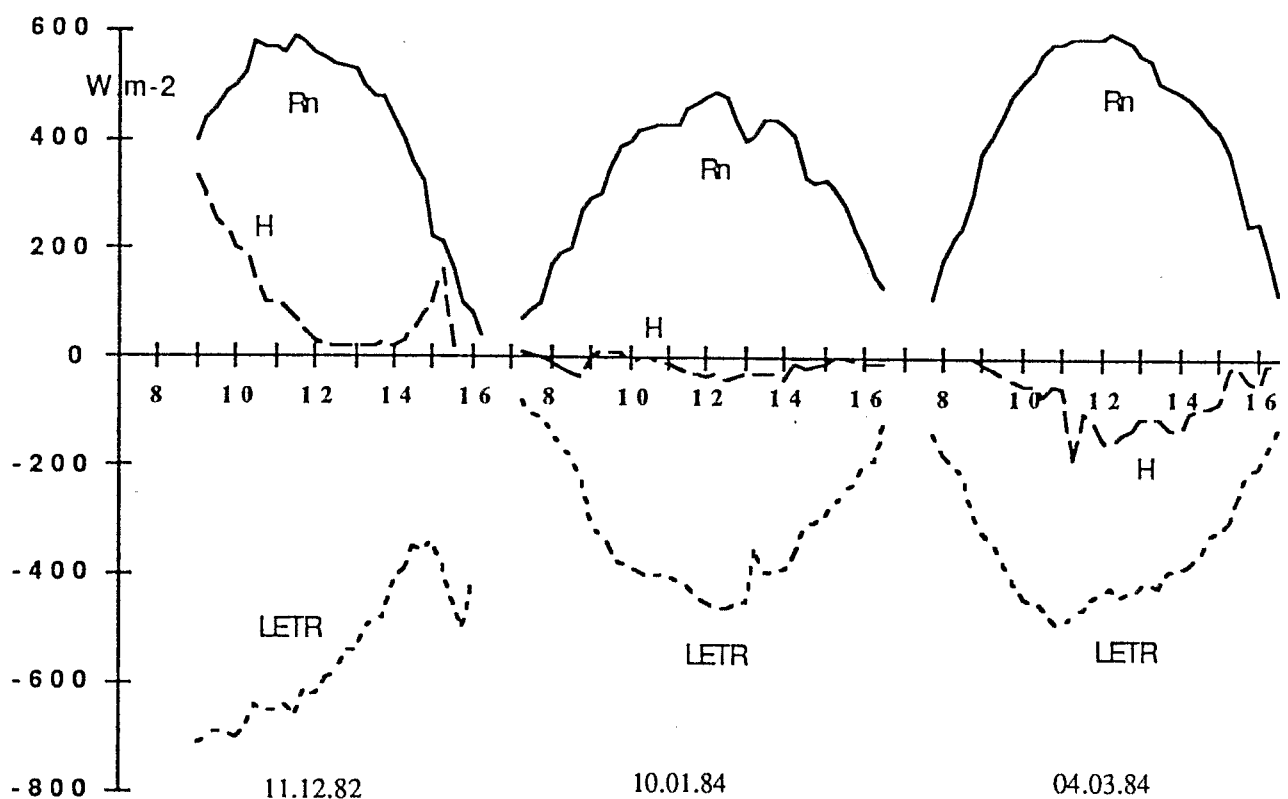


Figure 2. Relation entre l'évapotranspiration réelle de la culture de canne à sucre et le rayonnement net en fonction du développement foliaire

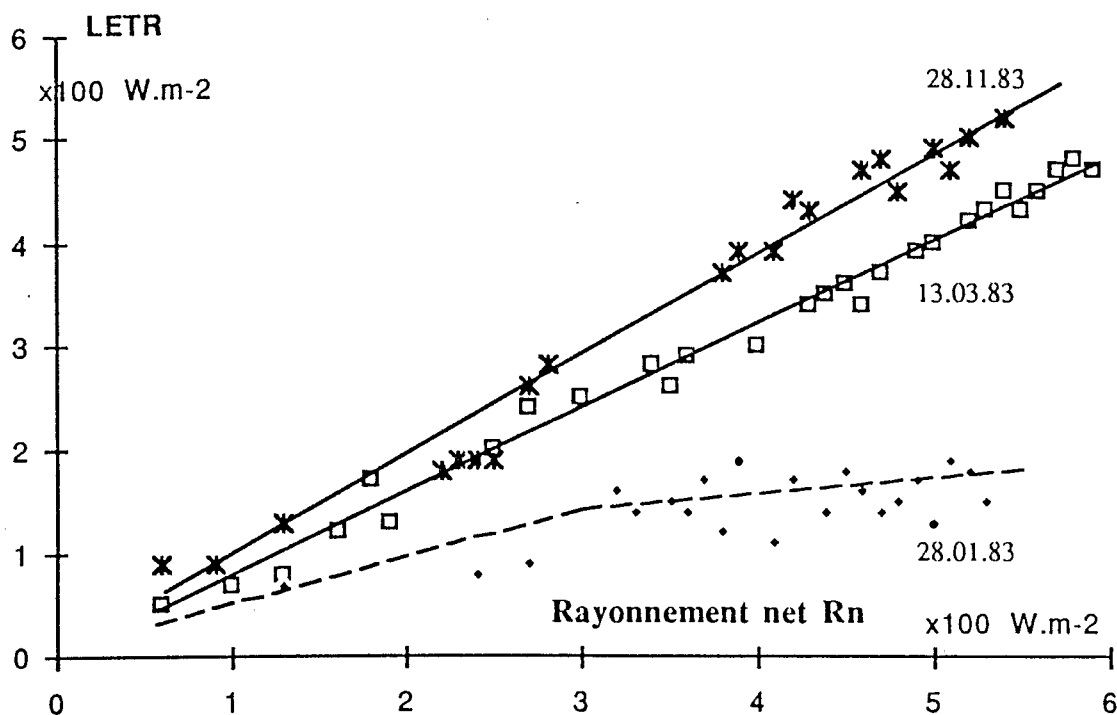
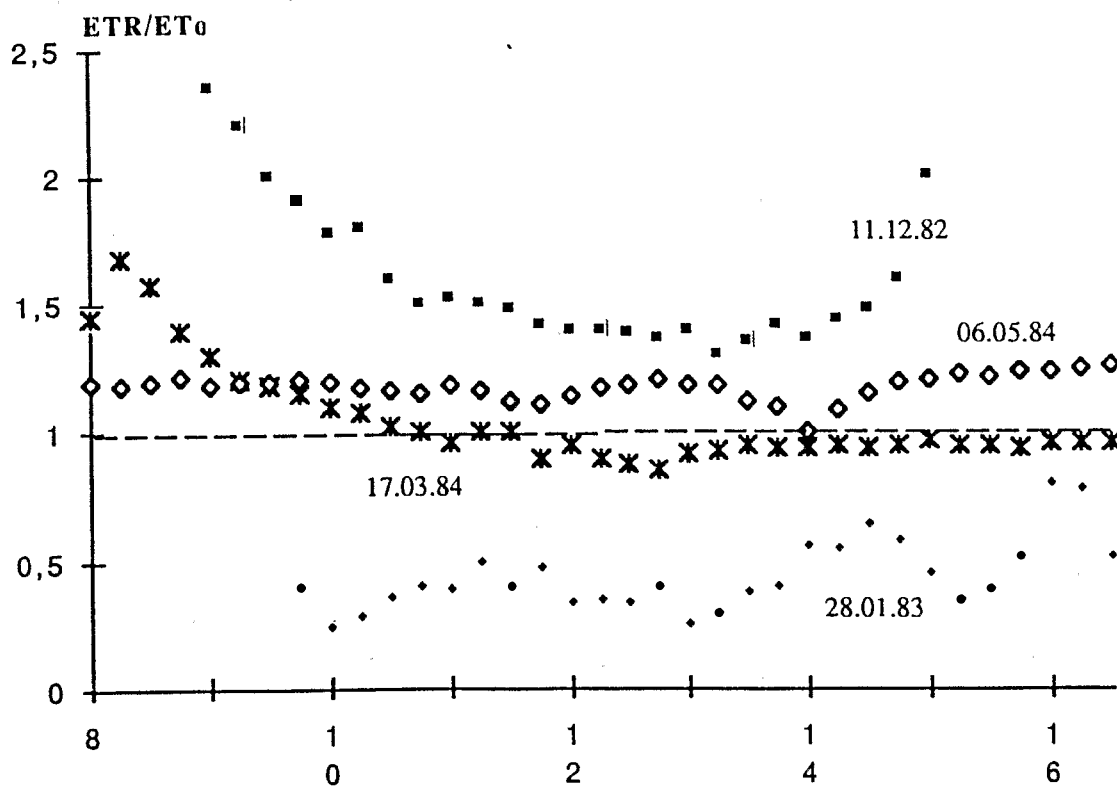


Figure 3. Evolution horaire du rapport $ETR_m/ET_0 = C$ au cours de différentes journées en fonction des saisons et du développement foliaire de la culture



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Blad, B.L. et 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.
- Brakke, T.W., Verma, S.B. and Rosenberg, N.J. (1978). Local and regional components of sensible heat advection. *J. Appl. Meteor.* 17: 995-963.
- 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. *Proc. 10th Congress of the ISSCT-Hawaii*: 637-645.
- Charoy, J., Forest, F. Legoupil, J.C. et Basserau, D. (1978). Besoins en eau de la canne à sucre. *Agron. Tropicale* 33: 344-369.
- Dancette, C. (1979). Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau en zone soudano-sahélienne. *Agron. Tropicale* 34: 331-355.
- Dancette, C. and Hall, A.B. (1979). Agroclimatology applied to water management in the sudanian and sahelian zones of Africa in A.E. Hall, G.H. Cannel and H.W. Lawton eds. "Agriculture in semi-arid environments". pp. 98-118.
- Fauconnier, R. et Bassereau, D. (1970). *La canne à sucre*. Coll. Techniques agricoles et production tropicales. 468 pp.
- Fuchs, M. and Tanner, C.B. (1970). Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometry. *Agric. 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 du coefficient cultural. *Agron.* 3: 513-521.
- Langellier, P. (1980). Détermination du régime hydrique d'une culture de canne à sucre de milieu, en période de 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'évapotranspiration 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. Météor.* 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. Météor.* 23: 45-59.
- Monteny, B.A. (1983a). *Estimation des besoins en eau d'une culture de canne à sucre durant sa période de croissance*. Rapport ORSTOM. 15 pp.
- Monteny, B.A. (1983B). Determination of the energy exchanges of a forest type culture. *Hevea brasiliensis. Forest Environmental Measurements*. International Conference Oak Ridge, Tennessee. U.S.A.
- Penman, H.L. (1956) Evaporation: an introductory survey. *Neth. J. Agric. Scie.* 4: 9-29.

- Perrier, A. (1975). Etude de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III. Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. *Ann. Agron.* 26: 229-243.
- Perrier, A., Katerji, N., Gosse, G. et Itier, B. (1980). Etude *in situ* de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé. *Agric. Météorol.* 21: 295-311.
- Priestley, C.M. and Taylor, R.J. (1972). On the assessment 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.D. and Blad, B.D. (1979). Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions. *J. Appl. Meteor.* 17: 330-338.

DISCUSSION

MONTTEITH: Can you explain how you have managed to combine all the effects of aerodynamic resistance, surface resistance and saturation deficit in a single constant (*c*). This does not seem to be consistent with your presentation of the Penman formula in terms of separate terms for radiation and the product of saturation deficit and a wind function, nor is it consistent with the more complete formula often referred to as the Penman-Monteith equation.

MONTENY: A partir de l'équation de Penman, formulation de l'évapotranspiration climatique ajustée pour les couverts végétaux, Pr Monteith a introduit le rôle régulateur des stomates et le frein joué par les masses d'air au transfert de vapeur d'eau à l'aide de concept de "résistance".

- résistance climatique: *rc*
- résistance aérodynamique: *ra*
- résistance du couvert: *rv*

L'équation générale de Penman-Monteith (1965) s'écrit

$$ET_{PM} = \frac{1 + (\gamma/\gamma + \Delta) * (rc/ra)}{1 + (\gamma/\gamma + \Delta) * (rv/ra)} - (\Delta/\gamma + \Delta) - (Rn-G)$$

Rn: rayonnement net

G: flux conductif dans le sol. Pour une végétation couvrant totalement le sol, le flux *G* peut être négligé.

La formulation proposée par Priestly & Taylor (1972) s'écrit:

$$ET_{PT} = C - (\Delta/\gamma + \Delta) - (Rn-G)$$

$$\text{avec le coefficient } C = \frac{1 + (\gamma/\gamma + \Delta) * (rc/ra)}{1 + (\gamma/\gamma + \Delta) * (rv/ra)}$$

Ainsi, le coefficient *C* intègre les diverses résistances liées à l'effet du développement du couvert et de son alimentation hydrique (*rv*), à l'action des caractéristiques climatiques (*rc*) et au déficit de pression de vapeur d'eau entre la surface végétale et l'air à un niveau de référence (*ra*). Pour de larges surfaces comme les périmètres irrigués de canne à sucre (8000 ha), il s'établit un équilibre des caractéristiques de la couche limite qui tend à maintenir les valeurs du rapport *rc/ra* relativement constantes, *C* traduisant alors le comportement hydrique du couvert végétal au travers du rapport *rv/ra*. Cette simplification n'est peut-être pas "scientifique", mais elle permet d'estimer correctement les besoins en eau de la canne par des non spécialistes, si les valeurs

du coefficient C, déterminées pour les différentes saisons d'une région en relation avec la phénologie du couvert végétal, sont fournies. Les travaux réalisés sur le périmètre de la SOSUKO à Banfora ont confirmé ces résultats.

BALDY: Quelle est la relation entre l'utilisation des mesures effectuées sur les cannes et l'emploi des bacs classe A utilisés par la Sosuko et l'irrigation optimale de la canne à Banfora. Que pensez vous du problème plus général de la définition des besoins en eau réels de la canne à partir des coefficients établis à l'origine dans les conditions d'Afrique du sud pour le bac A.

MONTENY: Les données du bac classe A correspondent à l'évaporation d'une nappe d'eau libre et sont donc fonction du pouvoir évaporant de l'air c'est à dire du déficit de pression de vapeur d'eau et de la vitesse du vent. Son bilan radiatif est très différent de celui d'un couvert végétal. Ce dernier transpire durant la période diurne alors que l'évaporation est un processus continu 24h/24h. Par ailleurs, en période d'harmattan (décembre à février), si le pouvoir évaporant de l'air est élevé (évaporation bac = 9 à 14 mm/j), la canne consomme peu d'eau en raison des faibles valeurs du rayonnement net et de l'effet "dépressif" de la température nocturne.

Selon la situation du parc climatique, à l'extérieur ou dans le périmètre irrigué, les données d'évaporation du bac classe A seront différentes. Selon l'importance de la surface du périmètre irrigué, il se forme une couche limite au dessus de cette surface avec un microclimat qui réduit le pouvoir évaporant de l'air. Cet effet joue sur l'évaporation du bac classe A tout comme sur l'évapotranspiration du bac d'une région par rapport à une autre. Le réajustement des coefficients sur les résultats des mesures du bilan énergétique est nécessaire. En conclusion, des précautions doivent être prises quant à l'utilisation des coefficients du bac classe A pour l'évaluation des besoins en eau des cultures.

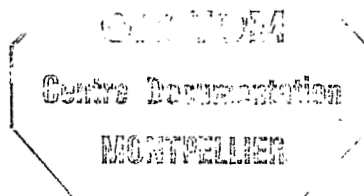
R 02 + 92
← CEDID -

**INFLUENCE DU CLIMAT SUR LA PRODUCTION
DES CULTURES TROPICALES**

***INFLUENCE OF THE CLIMATE
ON THE PRODUCTION OF
TROPICAL CROPS***

Compte rendu du séminaire régional organisé par
la Fondation Internationale pour la Science (IFS)
et le Centre Technique de Coopération
Agricole et Rurale (CTA)

Ouagadougou, Burkina Faso
23-28 septembre 1991



39.213

Er 2