

ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION D'UNE CULTURE DE MIL À L'AIDE D'UN MODÈLE DE COUVERT ÉPARS

M. AMADOU¹, P. CELLIER², B.A. MONTENY³, J.P. LHOMME³

RÉSUMÉ

Des données bioclimatiques recueillies sur une culture de mil dans le cadre de l'expérience Hapex-Sahel 1992, ont été utilisées pour paramétrer les divers compartiments d'un modèle de couvert épars composé de deux niveaux d'échanges : la surface du sol et la végétation. Il s'agit du modèle de SHUTTLEWORTH et WALLACE (1985). Les entrées du modèle sont les données météorologiques classiques et les caractéristiques biologiques de la culture. En sortie, le modèle fournit les flux de chaleur latente et sensible, ainsi que les températures de surface du sol et de la plante. La paramétrisation a porté d'une part, sur la répartition de l'énergie disponible entre le sol et la végétation, et d'autre part, sur les principales résistances aux échanges des flux. L'utilisation du modèle sur l'ensemble du cycle du mil, permet une estimation horaire et journalière de l'évapotranspiration (ETR) satisfaisante, avec la possibilité de calculer séparément la transpiration de la plante et l'évaporation du sol. Les valeurs d'ETR estimées par le modèle concordent bien avec celles mesurées au-dessus de la culture par la méthode du bilan d'énergie/rapport de Bowen. Cette concordance est encore meilleure pendant la phase de végétation maximale. L'analyse de l'évolution de la transpiration de la plante et de l'évaporation du sol au cours du cycle cultural montre que l'évaporation du sol dépasse le seuil de 50 % ETR, du début du cycle jusqu'au stade de LAI = 1,5. Sur l'ensemble du cycle, l'évaporation du sol est de l'ordre de 40 % ETR.

¹Inran, BP 429 Niamey, Niger.

²Inra, 78850 Thiverval-Grignon, France.

³Orstom-Hydrologie, BP 5045, 34032 Montpellier, France.

INTRODUCTION

Les mils constituent un ensemble de 14 céréales dites mineures, dont le mil penicillaire est économiquement la plus importante (Siband, 1981). Leur bon comportement en conditions marginales (manque d'eau, faible fertilité, forte température, parasitisme, etc.) ont fait de ces céréales la base de l'alimentation des pays du Sahel. La production mondiale en 1982, était évaluée à 29 millions de tonnes dont 11 millions en Afrique (BENIGA, 1992). Les pays producteurs sont le Nigéria, le Soudan, le Niger, le Mali, le Burkina Faso et la Côte d'Ivoire. Au Niger par exemple, sur l'ensemble du territoire, environ 1 783 400 tonnes de graines ont été produites sur une superficie de 4 988 300 ha en 1992, contre 1 852 700 tonnes de graines sur une superficie de 4 383 900 ha en 1991, soit des rendements moyens respectifs de 358 et 423 kg/ha pour les deux années. (Rapport annuel 1992 de la Direction de l'Agriculture du Niger). Ces rendements paraissent très faibles devant les potentialités de la plante (jusqu'à 3 tonnes/ha pour certaines variétés). On attribue cette faible productivité à plusieurs contraintes qui sont d'ordre naturel (environnement physique défavorable), technique (l'utilisation de techniques culturales rudimentaires limitant toute possibilité d'intensification). De nombreux auteurs tentent de pallier à ces problèmes par la sélection de matériel végétal plus productif et adapté à ces conditions de culture, par la recherche de techniques et de systèmes permettant une valorisation maximale des ressources hydriques et minérales souvent limitées dans le contexte sahélien.

Dans cette perspective, il serait intéressant de pouvoir quantifier la consommation en eau du mil, afin d'évaluer les risques de déficit hydrique et de raisonner la pratique de certaines techniques culturales (dates de semis, densité de semis, association, labour, sarclage, paillage, etc.). L'objectif principal de cette étude, est la mise au point d'un modèle simple de bilan hydrique du mil en fonction des variables climatiques. Pour cela, après avoir passé en revue différents modèles d'estimation de l'ETR des couverts épars proposés dans la littérature, nous avons opté pour un modèle à deux couches évaporantes (sol nu + végétation) qui est le modèle de SHUTTLEWORTH et WALLACE (1985).

DESCRIPTION DU MODÈLE DE SHUTTLEWORTH ET WALLACE (1985)

SHUTTLEWORTH et WALLACE (1985) proposèrent une extension de l'équation de Penman-Monteith (1965) à un couvert épars, en formulant un modèle décrivant l'interaction entre les différents flux et séparant les bilans d'énergie à la surface du sol, au niveau de la végétation et au-dessus du couvert. Le développement

théorique du modèle utilise l'analogie électrique de la loi d'Ohm en électricité (figure 1), et aboutit à une équation combinée donnant l'évaporation totale de la culture (λE).

$$\lambda E = C_c PM_c + C_s PM_s \quad (1)$$

où PM_c et PM_s sont deux termes, chacun similaire à une équation combinée de Penman-Monteith, appliquée respectivement à un couvert continu et au sol correspondant, pondérés par deux coefficients C_c et C_s , fonctions des résistances au transfert des flux et qui prennent en compte l'interaction des flux provenant du sol et de la végétation. Les auteurs développent les formules respectives de ces 4 termes.

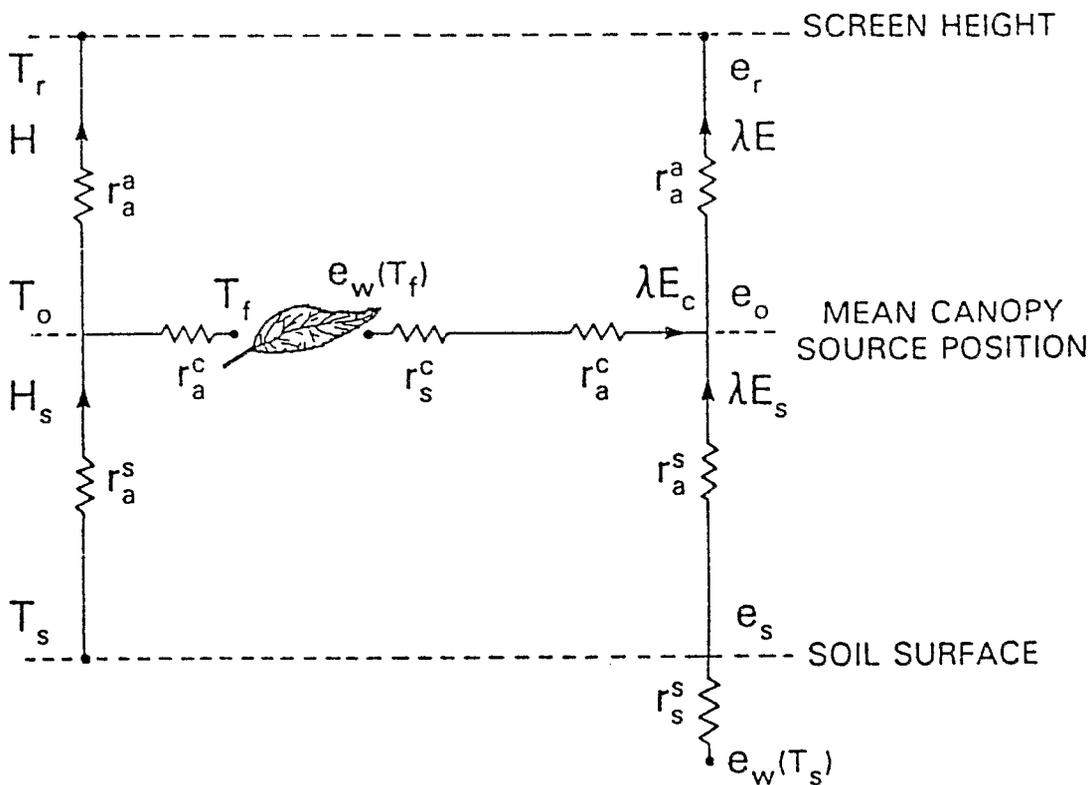


Figure 1 :

Schéma du modèle de couvert épars de SHUTTLEWORTH et WALLACE (1985).

De la description des principales innovations proposées dans ce modèle, il ressort que le modèle de SHUTTLEWORTH et WALLACE (1985) donne la meilleure expression analytique des flux d'évaporation d'un couvert épars (SAUGIER et KATERJI, 1991), mais la méconnaissance de certains paramètres d'entrée du modèle complique son utilisation sur le plan pratique. L'un des principaux obstacles à l'utilisation de ce modèle est l'estimation de la résistance de la couche sèche du sol à la diffusion du flux de vapeur d'eau provenant du sol. Aucune alternative de mesure directe de cette résistance n'est proposée dans la littérature. Les auteurs se contentent, soit d'une estimation à partir de la mesure de l'évaporation du sol ou de son humidité superficielle (WALLACE *et al.*, 1990 ; STANNARD, 1993), soit ils se placent dans des conditions de sol saturé où sa valeur est nulle (LAFLEUR et ROUSE, 1990). Par ailleurs, la variation au cours d'un cycle cultural de toutes les résistances au transfert des flux, ainsi que l'effet des épisodes pluvieux sur les valeurs de ces résistances, rendent complexe le suivi sur l'ensemble d'un cycle cultural de l'évapotranspiration d'un couvert épars à l'aide de ce modèle. Dans le présent article, nous tentons de pallier à certaines de ces difficultés et ainsi rendre opérationnel ce modèle sur l'ensemble du cycle cultural du mil. Ce travail va consister à paramétrer les divers compartiments du modèle à partir des variables climatiques classiques et de certaines caractéristiques phénologiques de la culture.

LES PARAMÉTRISATIONS EFFECTUÉES

RÉPARTITION DE L'ÉNERGIE DISPONIBLE ENTRE LE SOL ET LA VÉGÉTATION

SHUTTLEWORTH et WALLACE (1985) utilisent la loi de Beer pour calculer le rayonnement net arrivant au sol (R_{sn}) à partir du rayonnement net mesuré au dessus du couvert (R_n) et du LAI. Dans le cas du mil, WALLACE *et al.*, (1990), estiment qu'il faut prendre en compte non seulement le LAI, mais aussi le PAI (indice de surface des panicules) lorsque les épis apparaissent. On aura alors :

$$R_{sn} = R_n \cdot \exp[-K_n \cdot (LAI + PAI)] \quad (2)$$

où $K_n (=0,41)$ est le coefficient d'extinction du rayonnement net à l'intérieur du couvert (WALLACE *et al.*, (1990)).

LA FORMULATION DES RÉSISTANCES AU TRANSFERT DES FLUX

RÉSISTANCE STOMATIQUE

La résistance stomatique joue un rôle clé dans le contrôle de l'activité transpiratoire d'une plante. Son évolution diurne est gouvernée par plusieurs paramètres du climat dont le rayonnement solaire et le déficit de saturation de l'air (SQUIRE, 1979 ; HENSON *et al.*, 1982) et d'autres paramètres relatifs à l'état hydrique du sol. Plusieurs auteurs ont réalisé des mesures de résistance

stomatique sur le mil (SQUIRE, 1979 ; HENSON *et al.*, 1982 ; AZAM-ALI, 1983 ; WALLACE *et al.*, 1990). Il ressort de ces études que la résistance stomatique des feuilles de mil varie selon la face de la feuille considérée, son âge et sa position sur la plante. En ce qui concerne la dépendance de la résistance stomatique en fonction des paramètres climatiques, SQUIRE (1979) montre que c'est surtout le rayonnement global qui explique le mieux l'évolution diurne de cette résistance lorsque le mil est cultivé en conditions sèches (mil non irrigué), et que par contre, c'est le déficit de saturation de l'air qui gouverne cette évolution lorsque le mil est irrigué. Considérant que l'évolution nyctémérale de l'ouverture et de la fermeture des stomates impose une valeur minimale de la résistance stomatique en l'absence de stress hydrique dans le sol et prenant en compte les observations de SQUIRE (1979), nous avons opté pour un modèle simple de prévision de la résistance stomatique en fonction du rayonnement global. Il s'agit de l'expression proposée par AVISSAR *et al.*, (1985).

$$rs = rs_{min} + (rs_{max} - rs_{min}) \cdot f(Rg) \quad (3)$$

ou

$$rs = 200 + (2000 - 200) \cdot \exp(-0,004 \cdot Rg)$$

avec rs : la résistance stomatique équivalente des feuilles du mil, rs_{min} et rs_{max} : les résistances stomatiques équivalentes minimale et maximale des feuilles, $f(Rg)$: une fonction du rayonnement global. Les paramètres rs_{min} , rs_{max} et $f(Rg)$ ont été déterminés expérimentalement (figure 2).

Dans la figure 2, nous avons reporté également une fonction d'estimation de la résistance stomatique du mil en fonction du rayonnement global, établie par SQUIRE (1979) en Inde Centrale. Cette fonction ne diffère pas trop de celle que nous avons établie, compte tenu de conditions expérimentales différentes (climat, variétés, etc.).

LA RÉSISTANCE DE LA COUCHE SÈCHE DU SOL AU FLUX DE VAPEUR D'EAU

La résistance de la couche sèche du sol est calculée suivant la formulation de SHUTTLEWORTH et WALLACE (1985), en utilisant les mesures simultanées en début de cycle, de l'évaporation du sol nu (λE_s), de la pression de vapeur d'eau de l'air à la surface du sol (e_s), et de la température de surface du sol (T_s). λE_s et e_s sont mesurées à l'aide du « micro-bowen », e_s est considérée comme étant égale à la pression de vapeur d'eau de l'air du 1^{er} niveau du « micro-bowen » (25 cm au-dessus de la surface du sol), T_s est mesurée à l'aide d'un radiothermomètre infra-rouge. Le meilleur paramètre expliquant l'évolution de r_s^s est l'humidité de surface du sol, mais sa mesure à l'échelle de temps horaire est assez rare. Par ailleurs, pour limiter le nombre de paramètres d'entrée du modèle et être le moins dépendant possible des paramètres du sol, nous avons choisi d'exprimer les

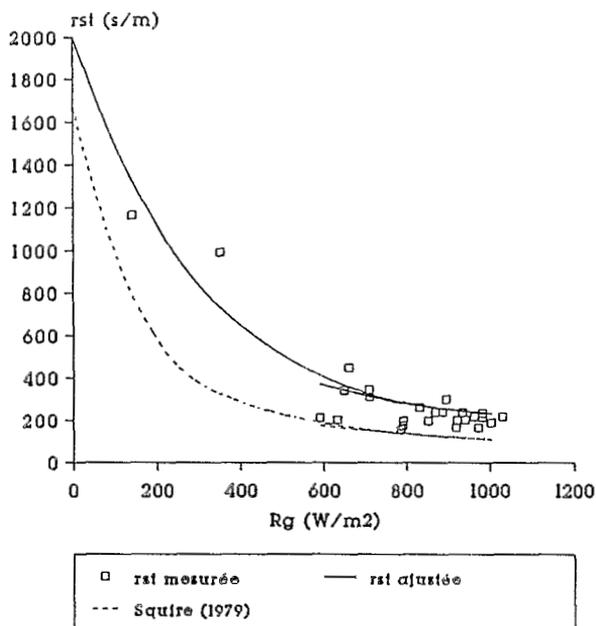


Figure 2 :
Résistance stomatique équivalente des feuilles de mil en fonction du rayonnement global.

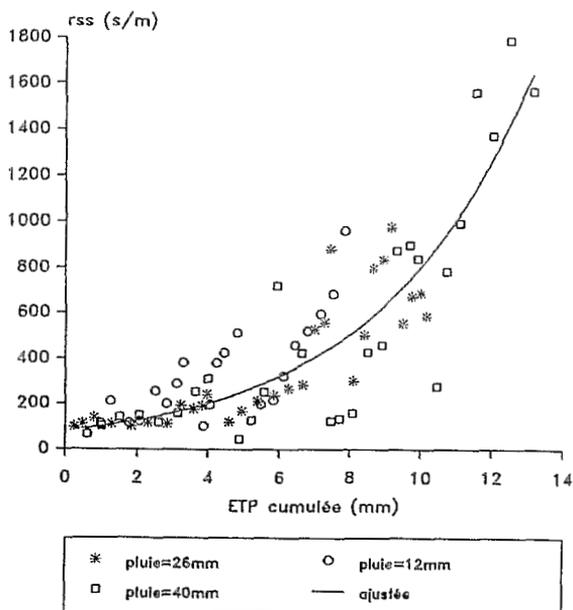


Figure 3 :
Évolution de la résistance de la surface du sol (r_{ss}) en fonction de l'ETP cumulée depuis la dernière pluie.

valeurs horaires de r_s^s en fonction de l'évapotranspiration potentielle (PENMAN ; 1948) cumulée depuis la dernière pluie, (ETPcum). La figure 3, montre les évolutions des valeurs horaires de cette résistance en fonction de l'ETP cumulée pour trois épisodes pluvieux de hauteurs pluviométriques différentes (26 mm, 12 mm et 40 mm). On peut constater que l'on retrouve le même type d'évolution pour les trois épisodes pluvieux, avec une valeur de départ de r_s^s de l'ordre de 80 s.m⁻¹ et une valeur finale dépendant du temps mis entre la dernière et la pluie suivante. Par ailleurs des réhumectations nocturnes peuvent provoquer une légère chute de r_s^s le lendemain en début de journée (figure 3). En milieu de journée la résistance reste proportionnelle à l'ETP cumulée depuis la pluie. Si nous considérons les valeurs de r_s^s entre 9 h 00 et 16 h 00 T.U, évitant ainsi l'effet des réhumectations, il est possible de représenter l'évolution diurne de r_s^s selon une fonction exponentielle de l'ETP cumulée au-dessus du couvert (équation 4). Ainsi, en début de cycle (LAI = 0), on aura :

$$r_s^s = 80. \exp(0,23.ETPcum) \quad (4)$$

avec ETPcum exprimé en mm et r_s^s en s.m⁻¹.

Comme la résistance stomatique, la résistance de la couche sèche du sol est une résistance de surface qui évolue au cours du cycle en raison inverse de la fraction de sol nu ($1-fr$), fr étant la fraction de sol effectivement recouverte par la végétation. Les valeurs de la résistance de la couche sèche du sol au cours du cycle ($r_s^{s'}$) sont obtenues en divisant r_s^s par la fraction de sol nu ($1-fr$).

$$r_s^{s'} = r_s^s / (1-fr) \quad (5)$$

LES RÉSISTANCES D'ORIGINE AÉRODYNAMIQUE

Les résistances d'origine aérodynamique (r_a^a , r_a^s et r_a^o) ont été calculées suivant les formulations de SHUTTLEWORTH et GURNEY (1990), à partir des mesures de vitesse du vent au niveau de référence et du suivi au cours du cycle cultural des caractéristiques phénologiques de la culture. Pour tenir compte de l'influence de la stabilité des basses couches atmosphériques sur les valeurs de r_a^a (TIER et KATERJI, 1983), des corrections de stabilité sur les valeurs de r_a^a ont été ajoutées. Ces corrections sont celles de CHOUDHURY *et al.*, (1986), appliquées par LHOMME *et al.*, (1994) sur le mil.

LES FONCTIONS BIOLOGIQUES

Il s'agit des variables relatives à la phénologie de la culture : LAI, hauteur du couvert et fraction de recouvrement du sol principalement. À défaut de valeurs réellement mesurées, ces paramètres peuvent être estimés pour une saison pluvieuse sans stress hydrique majeur, connaissant la date des semis. Ainsi, une fonction logistique a été retenue pour la croissance en hauteur, une loi de Gauss

pour le LAI et la fraction de recouvrement. Ces fonctions sont valables pour des densités de plantation de l'ordre de 5 000 à 7 000 poquets/ha, habituellement rencontrées sur les champs paysans.

* Hauteur du couvert (*htc*)

$$htc = \frac{245}{1 + 990 \cdot \exp^{(-0,11 \cdot JAS)}} \quad \text{en cm} \quad (6)$$

JAS : nombre de jours après semis

* Indice foliaire (LAI)

$$LAI = \frac{a}{b \cdot (2\pi)^{0,5}} \exp \left\{ -0,5 \left[\left(\frac{\text{Log} JAS - c}{b} \right)^2 \right] \right\} \quad (7)$$

avec $a = 0,769$ $b = 0,109$ $c = 1,827$

* fraction de recouvrement du sol par la végétation (*fr*)

$$fr = \frac{a}{b \cdot (2\pi)^{0,5}} \exp \left\{ -0,5 \left[\left(\frac{\text{Log} JAS - c}{b} \right)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

avec $a = 17,733$; $b = 0,127$; $c = 1,857$

LES DONNÉES D'ENTRÉE ET DE SORTIE DU MODÈLE

Le modèle utilise en entrée, l'énergie disponible au-dessus du couvert, les dates de pluie, les mesures de température de l'air et de pression de vapeur d'eau au-dessus du couvert, le calcul des différentes résistances au transfert des flux, ainsi que les fonctions biologiques, pour calculer l'évapotranspiration totale de la culture, la transpiration de la plante, l'évaporation du sol et les températures de surface des feuilles de mil et du sol.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

LE MILIEU PHYSIQUE

L'expérience a été réalisée en 1992 dans le cadre du programme Hapex-Sahel (GOUTORBE *et al.*, 1994), sur un champ de mil (*Pennisetum typhoides*), non loin du village de Banizoumbou (13°31'N, 2°39'E), dans le sud-ouest du Niger. Le climat de la zone d'étude est celui d'un régime sahélien type, caractérisé par une saison pluvieuse de juin à septembre et une saison sèche le reste de l'année (MOREL 1988, SIVAKUMAR 1989, MONTENY 1992). En 1992, il a été enregistré 422 mm de pluie à la station de Banizoumbou. L'air est relativement chaud et sec de mars à mai, moins chaud et humide de juin à octobre, et frais et sec de novembre à février (figure 4). L'ETP annuelle moyenne est de l'ordre de

2 000 mm suivant la formulation de PENMAN (1948). Les sols cultivés sont sableux, à pH acide, pauvre en matière organique, avec une profondeur variable, allant d'un simple voile de sable de 10 à 15 cm d'épaisseur à des profondeurs de 2 m (GAVAUD, 1975).

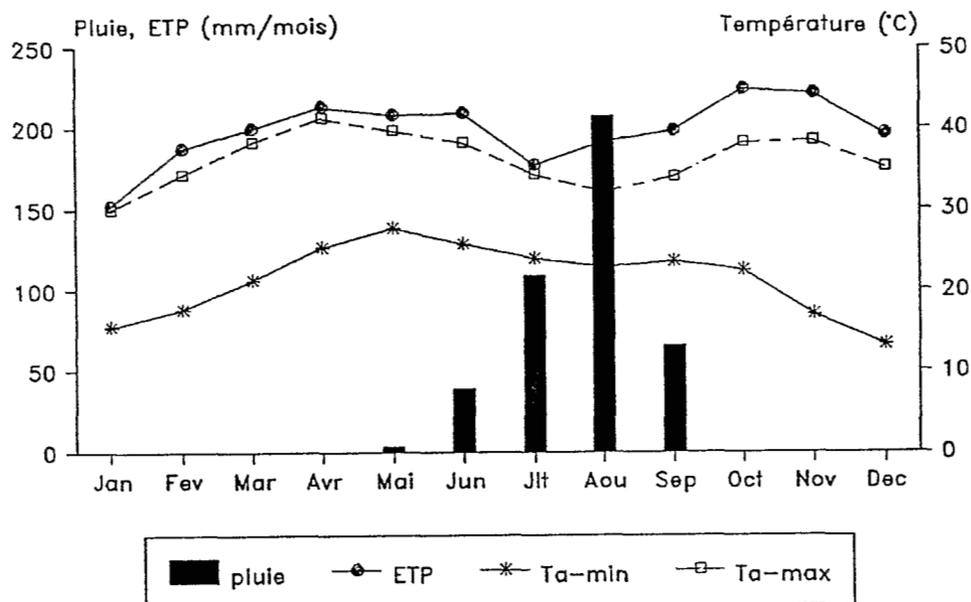


Figure 4 :

Pluviométrie, ETP-Penman et température en 1992 à la station de Banisoumbou.

SUIVI DE LA PHÉNOLOGIE DU MIL

Le mil était cultivé en milieu réel, selon les pratiques culturales paysannes. Les semis étaient réalisés le 30/06/1992 sur un champ d'environ 10 hectares de surface. La densité de plantation était de 7 040 poquets/ha. Les observations phénologiques se faisaient sur un échantillon de 8 poquets prélevés tous les 7 jours. Les paramètres étudiés ici sont la hauteur moyenne du couvert (htc), l'indice foliaire (LAI), et la fraction de sol effectivement recouverte par la végétation (fr).

MESURES MICROMÉTÉOROLOGIQUES

Les mesures micrométéorologiques concernent : les flux de chaleur sensible et latente de l'ensemble de la culture (« Grand Bowen ») et de ceux du sol nu en début de cycle (« micro Bowen ») par la méthode du bilan d'énergie/rapport de Bowen ; des mesures de résistance stomatique des feuilles de mil, et de température de surface des feuilles et du sol. Des détails sur ces mesures sont donnés dans la thèse de AMADOU (1994). La figure 5 donne des exemples d'évolutions diurnes des flux de rayonnement net (Rn) et de chaleur latente (λE) mesurés au dessus de la culture au cours de cette expérience. On notera que l'évolution de λE est gouvernée par la quantité d'énergie disponible (Rn) avec des fluctuations en fonction des épisodes pluvieux.

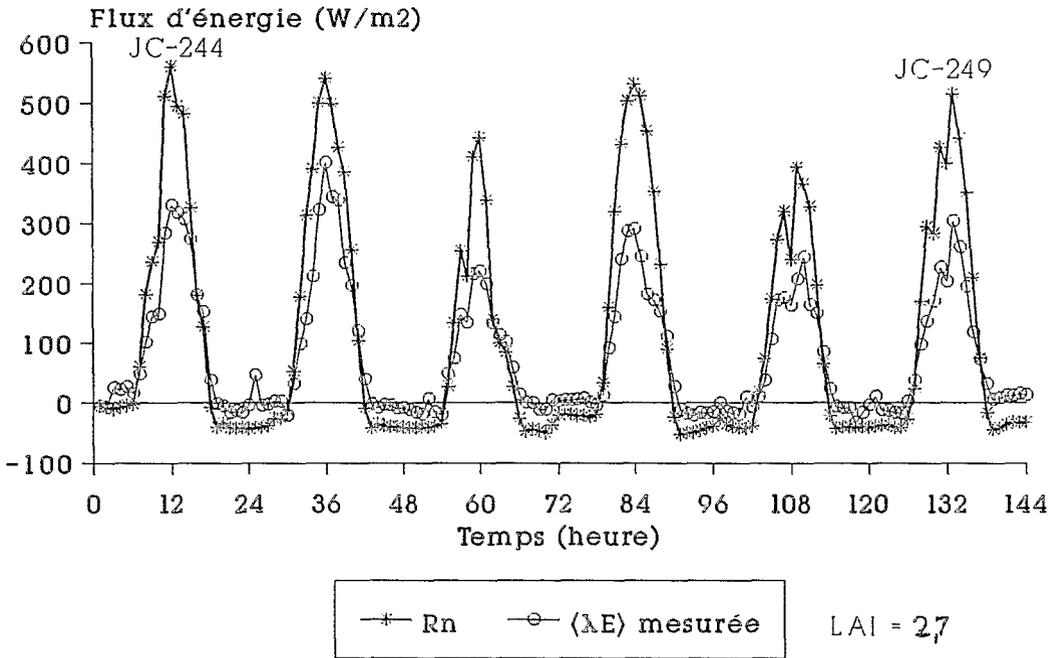


Figure 5 :
Variations journalières du rayonnement net (Rn) et de l'évapotranspiration (λE)
pour 6 journées consécutives.

VALIDATION ET RÉSULTATS

VALIDATION

La comparaison des valeurs horaires de λE , calculées et mesurées, est présentée sur la figure 6 pour 4 différentes périodes du cycle du mil. Pendant la première période ($LAI = 0$), le modèle sous-estime légèrement les valeurs de λE en milieu de journée (fortes valeurs) et c'est seulement pour les faibles valeurs qu'on observe une certaine concordance entre valeurs calculées et mesurées de λE (figure 6a). La sous-estimation observée peut s'expliquer par la fonction d'estimation de la résistance de la surface du sol, qui est une fonction moyenne, donc ne donnant pas nécessairement la vraie valeur de r_s , pour les fortes valeurs de l'évaporation du sol (λE_s). Pour les faibles valeurs de λE_s , r_s est relativement peu variable en début et en fin de journée et donc son influence sur λE_s est moindre. L'estimation de λE à l'aide du modèle est globalement satisfaisante pour cette période du cycle, elle pourra se faire avec une incertitude de $\pm 11 \text{ W.m}^{-2}$ (tableau 1), correspondant pratiquement à l'incertitude sur la mesure de λE par la méthode du bilan d'énergie/rapport de Bowen (MONTENY, 1991 ; CELLIER, OLIOSSO, 1993). La concordance entre valeurs mesurées et calculées de λE , est encore meilleure lorsque le couvert est développé, comme le montre la figure 6b pour la zone de LAI comprise entre 0,3 et 1,5 et la figure 6c pour les LAI comprise entre 1,5 et 2,8. L'estimation de λE à l'aide du modèle est relativement moins bonne au cours de la période de sénescence du mil (figure 6d). En effet, on note une surestimation systématique des valeurs d'évapotranspiration provenant de la fonction d'estimation de la résistance stomatique qui ne prend pas en compte la baisse de l'activité transpiratoire des feuilles due au vieillissement. La régression entre valeurs calculées et mesurées de λE (figure 6d) montre une bonne concordance pour les faibles valeurs de λE (inférieures à 200 W.m^{-2} environ) et une surestimation pour les valeurs supérieures. Le résultat d'ensemble est cependant bon, car la corrélation sur l'ensemble des journées de cette période conduit à un coefficient r^2 de l'ordre de 0,76 ; l'intervalle de confiance à 95 % étant de $\pm 8 \text{ W.m}^{-2}$ (tableau 1). Les résultats de ce tableau montrent également que les meilleures corrélations sont obtenues dans la zone de LAI comprise entre 0,3 et 2,8 correspondant à l'essentiel du cycle du mil. Les cumuls journaliers (de 7 h 00 à 18 h 00 T.U) des valeurs de λE calculées s'accordent également bien aux valeurs mesurées à l'exception des zones de discordance du début de cycle (sous-estimation) et de fin de cycle (surestimation) précédemment signalée. On observe une bonne corrélation linéaire positive (figure 7) avec un r^2 de 0,60 et un « RMSE » de 0,8 mm/j pour une valeur moyenne mesurée de 2,4 mm/j (tableau 2).

Tableau 1

Résultats d'analyses statistiques sur la comparaison entre valeurs mesurées de l'évapotranspiration totale ($W.m^{-2}$) et celles estimées à l'aide du modèle, pour 4 différentes périodes du cycle cultural du mil

| Période de cycle | LAI=0,0 | 0,3<LAI<1,5 | 1,5<LAI<2,8 | Sénescence |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| n | 84 | 96 | 96 | 168 |
| λE_{mes} | 147 | 119 | 169 | 103 |
| $(\lambda E_{est} - \lambda E_{mes})$ | -16 | +3 | +21 | +20 |
| RMSE | 53 | 54 | 45 | 56 |
| IC | 11 | 11 | 9 | 8 |
| $\lambda E_{est} = a\lambda E_{mes} + b$ | a = 0,61 b = 42 | a = 1,05 b = -4 | a = 1,11 b = -5 | a = 1,24 b = -5 |
| r ² | 0,72 | 0,65 | 0,88 | 0,76 |
| S _y | 36 | 55 | 39 | 50 |
| S _a | 0,04 | 0,08 | 0,04 | 0,06 |

n, est le nombre d'observations horaires ;

λE_{mes} , la moyenne des valeurs mesurées de λE ; $(\lambda E_{est} - \lambda E_{mes})$, l'écart moyen entre valeurs estimées et mesurées de λE ;

RMSE est la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts $(\lambda E_{est} - \lambda E_{mes})$;

IC, l'intervalle de confiance à 95 % ;

a et b, respectivement le coefficient de regression et l'ordonnée à l'origine de la droite de regression entre λE_{est} et λE_{mes} ;

S_y et S_a respectivement les erreurs standards sur λE_{est} et sur a.

Tableau 2

Résultats d'analyse statistique sur la comparaison des cumuls journaliers mesurés de $\langle \lambda E \rangle$ (mm/j) avec ceux estimés à partir du modèle

| n | λE_{mes} | $\lambda E_{mes} - \lambda E_{est}$ | RMSE | IC | $\lambda E_{est} = a.\lambda E_{mes} + b$ | r ² | S _y | S _a |
|----|-------------------|-------------------------------------|------|------|---|----------------|----------------|----------------|
| 46 | 2,4 | 0,3 | 0,8 | 0,23 | a = 1,02 b = 0,3 | 0,60 | 0,7 | 0,1 |

$$RMSE = [n^{-1} . \lambda (\lambda E_{est} - \lambda E_{mes})^2]^{1/2} \quad \text{WILLMOT, (1982)}$$

$$IC = 1,96 . RMSE / n^{1/2} \quad \text{LHOMME et al., (1994)}$$

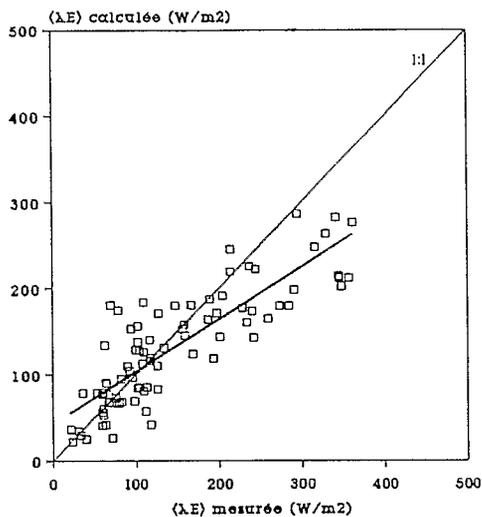


Figure 6a :
Régression linéaire entre valeurs diurnes calculées et mesurées de $\langle \lambda E \rangle$ pour la zone de LAI = 0,0.

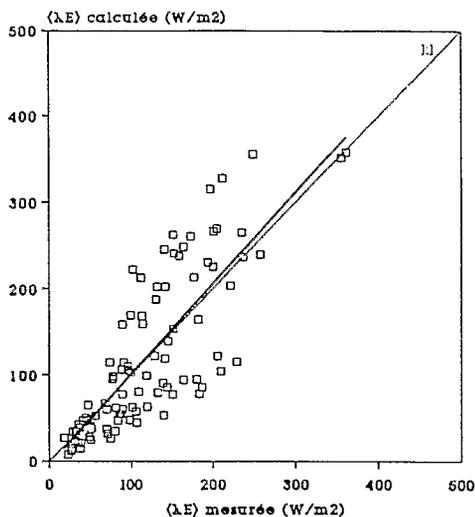


Figure 6b :
Régression linéaire entre valeurs diurnes calculées et mesurées de $\langle \lambda E \rangle$, 0,3 < LAI < 1,5.

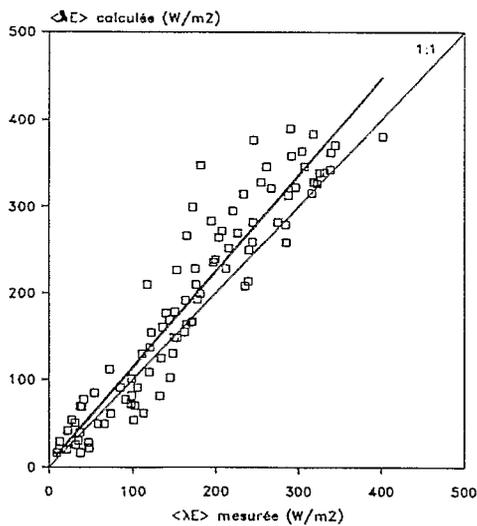


Figure 6c :
Régression linéaire entre valeurs diurnes calculées et mesurées de $\langle \lambda E \rangle$, 1,5 < LAI < 2,8.

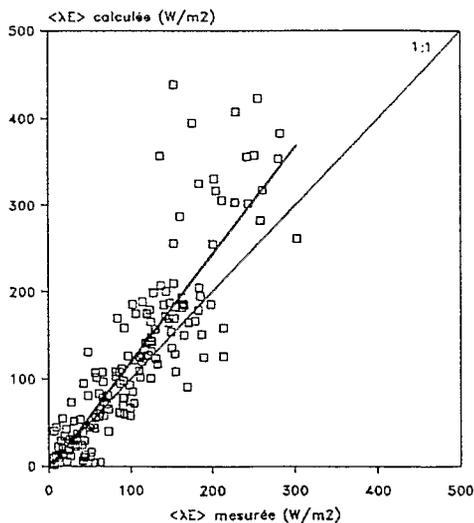


Figure 6d :
Régression linéaire entre valeurs diurnes calculées et mesurées de $\langle \lambda E \rangle$ durant la période de sénescence.

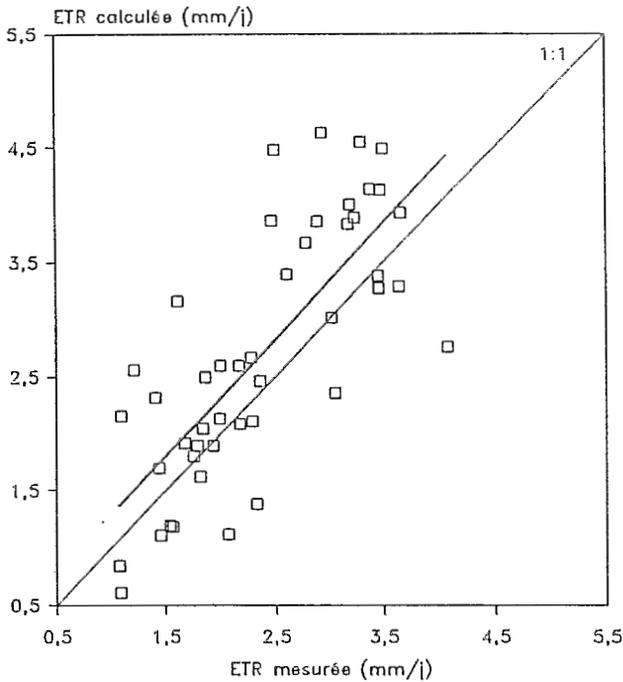


Figure 7 :

Régression entre valeurs journalières de l'ETR calculée et mesurée sur l'ensemble du cycle cultural du mil.

À la lumière de ces résultats, on peut conclure que le modèle de SHUTTLEWORTH et WALLACE (1985) ainsi appliqué à l'ensemble d'un cycle cultural du mil, donne des résultats assez satisfaisants pour l'analyse et l'estimation de l'ETR de cette culture.

ÉVOLUTION AU COURS DU CYCLE CULTURAL DE LA TRANSPIRATION ET DE L'ÉVAPORATION DU SOL CALCULÉES À L'AIDE DU MODÈLE

Une des nombreuses possibilités qu'offre le modèle de SHUTTLEWORTH et WALLACE (1985) est la séparation de l'évapotranspiration totale d'un couvert épars en ses deux composantes : l'évaporation du sol et la transpiration de la plante. L'évolution au cours du cycle cultural du mil de ces deux termes, rapportés à l'évapotranspiration totale (ETR) est représentée sur la figure 8. L'évaporation du sol varie au cours du cycle selon les épisodes pluvieux et la proportion de sol non couvert par la végétation à travers l'expression de la résistance de la surface de sol. Elle représente le terme dominant de l'ETR jusqu'aux environs du 47^{ème} JAS (LAI \approx 0,5) où elle passe en dessous du seuil de 50 % ETR. La transpiration prend ensuite le relais en tant que composante

principale de l'ETR et croît jusqu'à une valeur maximale fluctuant autour de 85 % ETR, correspondant à la zone de LAI > 1. LAFLEUR et ROUSE (1990) utilisant le modèle de SHUTTLEWORTH et WALLACE (1985) trouvent un seuil de stabilisation du rapport Tr/ETR de l'ordre de 80 % sur une culture de coton. En assimilant ces deux évolutions à des fonctions logistiques du nombre de jours après semis, on peut déterminer les paramètres correspondants par ajustement et ainsi avoir la répartition entre transpiration et évaporation du sol, selon la période du cycle du mil :

$$\frac{Tr}{ETR} = \frac{84,5}{1 + 3268 * \exp^{(-0.234 * JAS)}} \text{ en \%} \quad (9)$$

$$\frac{Ev}{ETR} = \frac{145,7}{1 + 0,06 * \exp^{(+0.074 * JAS)}} \text{ en \%} \quad (10).$$

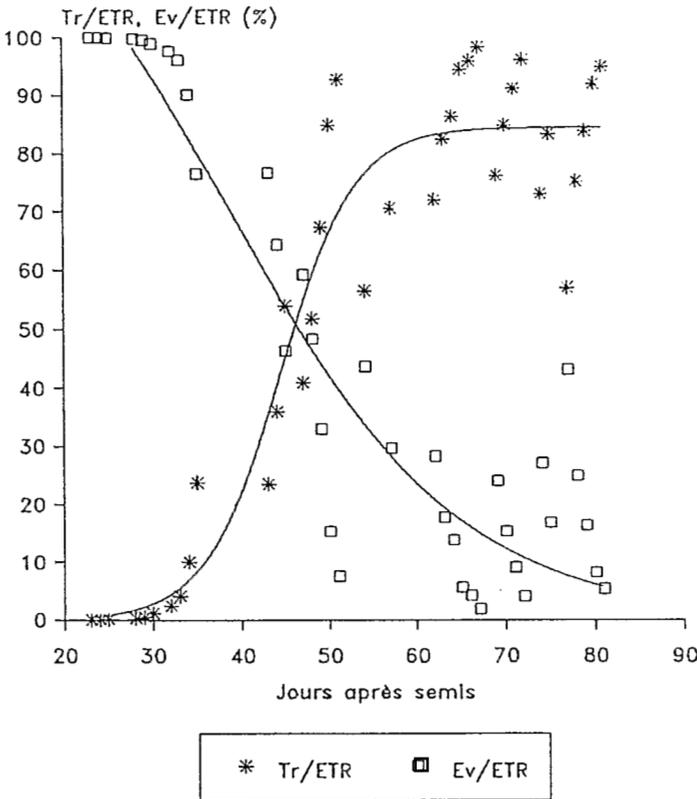


Figure 8 :
Évolution au cours du cycle cultural des rapports Tr/ETR et Ev/ETR.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le modèle de SHUTTLEWORTH et WALLACE (1985), ainsi appliqué à une culture de mil, permet une bonne estimation horaire et journalière de l'ETR, avec la possibilité de calculer séparément la transpiration de la plante et l'évaporation du sol intercalaire sur l'ensemble du cycle cultural. Comme l'ont montré WALLACE *et al.*, (1993), l'évaporation du sol intercalaire du mil représente une fraction importante de l'ETR totale de la culture. Plus de 50 % de l'ETR du début du cycle jusqu'à la zone de LAI $\approx 1,5$ (environ 47^{ème} jour après semis en 1992), et de l'ordre de 40 % sur l'ensemble du cycle.

La précision des prédictions du modèle peut être améliorée par une meilleure estimation de certains paramètres de ce modèle. Les estimations de la résistance stomatique du couvert et de la résistance de la surface du sol peuvent être améliorées par le couplage d'un compartiment sol pour tenir compte du stress hydrique pour la résistance stomatique et des réhumectations nocturnes pour la résistance de la surface du sol. Par ailleurs, une simplification de ce modèle peut également être envisagée par le couplage d'un modèle de bilan radiatif, qui permettrait de se passer des mesures de rayonnement net au-dessus de la culture. Comme l'ont suggéré LAFLEUR et ROUSE (1990), le mode de répartition de cette énergie entre le sol et la végétation doit être vérifié sur l'ensemble du cycle, à partir de mesures indépendantes de rayonnement net au-dessus et à l'intérieur de la culture.

REMERCIEMENTS

Le premier auteur tient à remercier ses autres collègues qui n'ont ménagé aucun effort pour l'aboutissement de ce travail, il remercie également l'Orstom et la coopération française qui ont bien voulu financer cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- AMADOU M., 1994. Évaluation et modélisation du bilan énergétique et hydrique d'une culture de mil en région sahélienne.
- AVISSAR R., AVISSAR P., MAHRER Y., BRAVDO B. A., 1985. A model to simulate response of plant stomata to environmental conditions. *Agri. and Forest Meteo.* 34, 21-29.
- AZAM-ALI S.N., 1983. Seasonal estimates of transpiration from a millet crop using a porometer ; *Agricultural Meteorology*, 30 (1983) 13-24.
- BENIGA M.B., 1992. Bilan des travaux d'amélioration variétale en Côte d'Ivoire. *Note de la réunion thématique sur le mil (Pennisetum glaucum L.)*, Montpellier du 24 au 26 nov. 1992.
- CELLIER P., OLIOSSO A., 1993. A simple system for automated long-term Bowen ratio measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* (0168-1923/93/\$06.00 c 1993).
- CHOUDHURY B.J., REGINATO R.J., IDSO S.B., 1986. An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux. *Agric. For. Meteorol.*, 37 : 75-88.
- DIRECTION DE L'AGRICULTURE, Niamey Niger: *Rapport de campagne 1992*.
- GOUTORBE J.P., LEBEL T., TINGA A., BESSMOULIN P., BROWER J., DOLMAN A.J., ENGMAN E.T., GASH J.H.C., HOEPFFNER M., KABAT P., MONTENY B.A., PRINCE S., SAID F., SELLERS P., WALLACE J.S., 1994. Hapex-Sahel : Large scale study of land atmosphere interaction in the semi-arid tropics. *Ann. Geophys.*, (in press).
- GAVAUD M., 1975. Études pédologiques du Niger Occidental ; Orstom-Rép. du Niger, *Service du Génie Rural, Dakar-Hann*, 2 tomes, 513 p.
- HEILMAN J.L., BRITTIN C.L., 1989. Fecht requirement for bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. *Agri. and Forest Meteo.* 44, 261-273.

- HENSON I.E., ALAGARSWAMY G., BIDINGER F.R., MAHALASHMI V., 1982. Stomatal responses of pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke) to leaf water status and environmental factors in the field. *Plant, Cell and Environment* (1982) 5, 65-74.
- ITIER B., KATERJI N., 1983. Une expression simplifiée de la résistance aérodynamique d'un couvert végétal (Application à la mesure des flux de masse et d'énergie). *Acta Ecologica*, vol. 4p. 215-227.
- LAFLEUR P.M., ROUSE W.R., 1990. Application of an energy combination model for evaporation from sparse canopies. *Agri. and Forest Meteo.* 49, 135-153.
- LHOMME J.P., MONTENY B. A., AMADOU M., 1994. Estimating sensible heat flux from radiometric temperature over sparse millet using a two layer model. *Agri. For. meteorol.* 68 : 93-105.
- MONTHEITH J.L., 1965. Evaporation and environment, *Symp. Soc. Exp. Biol.* XIX, 205-234.
- MONTENY B.A., 1991. Évaluation de la consommation en eau de la canne à sucre pour l'amélioration de la production en région soudano-sahélienne. Séminaire international sur le thème : « Influence du climat sur la production des cultures tropicales », organisé par la I.F.S et le C.T.A, Ouagadougou 23-28 septembre 1991.
- MONTENY B.A., 1992. Relevés des observations météorologiques, Banizoumbou, 1991, Orstom-Niamey.
- MOREL, R., 1988. Remarques à propos de l'effet des facteurs locaux sur la baisse de pluviométrie observée en Afrique de l'ouest sur le Sahel. veille climatique satellitaire. *Orstom. Bull.* n°23, 29-36.
- PENMAN, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. Lond., A* 193, 120-145.
- SAUGIER B., KATERJI N., 1991. Some plant factors controlling evapotranspiration. *Agric. For. Meteo.*, 54 (1991), 263-277.

- SIVAKUMAR M.V.K., 1989. Considérations agro-climatiques pour la gestion des sols et de l'eau dans la zone soudano-sahélienne. Actes du séminaire national sur l'aménagement des sols, la conservation de l'eau, et la fertilisation ; Tahoua 20-24 février 1989. 85-96.
- SHUTTLEWORTH J.W., WALLACE J.S., 1985. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Quart. J. R. Met. Soc.* (1985), 111, 839-855.
- SHUTTLEWORTH J.W., GURNEY R.J., 1990. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 116, 497-519.
- SQUIRE G.R., 1979. The response of Stomata of Pearl Millet (*Pennisetum typhoides* S. and H.) to Atmospheric Humidity. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 30, No 118, 925-933.
- STANNARD D.I., 1993. Comparison of Penman-Monteith, Shuttleworth-Wallace, and Modified Priestley-Taylor Evapotranspiration Models for Wildland vegetation in Semiarid Rangeland. *Water Res. Resear.* vol. 29, no. 5, 1379-1392.
- WALLACE J.S., ROBERTS J.M., SIVAKUMAR M.V.K., 1990. The estimation of transpiration from sparse dryland millet using stomatal conductance and vegetation area indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51 (1990) 35-49.
- WALLACE J.S., LLOYD C.R. and SIVAKUMAR M.V.K., 1993. Measurement of soil, plant and total evaporation from millet in Niger. *Agric. and For. meteo.*, 63, 149-169.
- WILLMOT C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 63, 1309-1313.