

16 JANV. 1990

Cote : B

M

VIII P8

Consommation en eau et efficience hydrique d'une culture de manioc dans le sud de la Côte-d'Ivoire

N.R. YAO (1), B. GOUE (2), B. ZELLER (2)

RÉSUMÉ — A Adiopodoumé (basse Côte-d'Ivoire) la mesure des divers paramètres microclimatiques au-dessus d'un couvert de manioc a permis la détermination des différents termes du bilan d'énergie à l'échelle de la parcelle et l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) par la méthode du rapport de Bowen couplée au bilan d'énergie. La consommation en eau de la plante (ETR) a aussi été estimée par la méthode de variation des stocks hydriques du sol mesurée par la méthode neutronique. La surface foliaire développée et la disponibilité de l'eau dans le sol peuvent être des facteurs limitants des échanges de vapeur d'eau et de gaz carbonique et, par conséquent, de la production de matière sèche. Les phénomènes de transpiration du végétal et de production de matière sèche (MS) sont ainsi intimement liés, ce qui est concrétisé par l'emploi fréquent de la notion d'efficience hydrique ($EH = MS/ETR$). Les premiers résultats obtenus sur manioc montrent, pour un couvert de plus de trois mois, une relation linéaire entre les valeurs d'ETR mesurées par la méthode des variations de stocks hydriques et par la méthode du rapport de Bowen couplée au bilan d'énergie. D'autre part, le stock hydrique disponible dans le sol influence la vitesse d'émission et la sénescence foliaires, la taille des feuilles et la production de matière sèche. Enfin, l'efficience hydrique (EH) suit les mouvements de la réserve hydrique utilisable (RH), avoisinant 1 g/kg d'eau en période de sécheresse mais pouvant atteindre 8 g/kg d'eau en conditions hydriques favorables, et avec un indice foliaire optimal.

Mots clés : Evapotranspiration réelle (ETR), bilan hydrique, indice foliaire, matière sèche, manioc, efficience hydrique, Adiopodoumé (basse Côte-d'Ivoire).

En Afrique, le développement d'une culture telle que le manioc, susceptible d'une production à moindre coût, peut contribuer à atteindre l'objectif d'une indépendance alimentaire. Il doit retenir une attention particulière en raison de sa résistance à la sécheresse (CONNOR *et al.*, 1981) et de sa bonne productivité dans des conditions hydriques favorables (COCK *et al.*, 1979).

En effet, il y a quelques années il était la principale denrée des seules populations du sud de la Côte-d'Ivoire, mais aujourd'hui le manioc est consommé régulièrement par une proportion croissante de la popula-

tion du pays tout entier. Au moment même où la production agricole se trouve limitée par le manque d'eau, il convient de développer une culture connue pour sa rusticité et sa bonne productivité.

L'estimation de l'évapotranspiration réelle d'un couvert peut se faire selon plusieurs moyens : par la méthode du rapport de Bowen couplé au bilan d'énergie (ROSENBERG, 1974), par la méthode aérodynamique (PERRIER, 1975) ou par la méthode des bilans hydriques du sol (DAUDET et VACHAUD, 1977). Très souvent, les valeurs absolues diffèrent selon la méthode utilisée même si la tendance est la même.

Cet article présente quelques résultats d'estimation de la consommation en eau du manioc en basse Côte-d'Ivoire et l'effet du déficit hydrique (la sécheresse) sur la croissance et la production de la plante.

Méthodologie expérimentale

Site expérimental

Situé à Adiopodoumé, sur sol sableux (ROOSE et CHEROUX, 1966), la parcelle couvre une superficie de quatre hectares. Le travail du sol consiste en un passage au Rotavator, suivi d'un amendement de 800 kilogrammes par hectare de chaux et d'un apport de fumure azotée de 100 kilogrammes par hectare d'urée (46 %).

Matériel végétal et plantation

Les boutures de manioc, variété CB (Congo-Brazzaville), d'une longueur de 25 à 30 cm avec 3 à 5 nœuds, sont prélevées sur des plants non virosés à la station SODEPLAM de Toumodi. La plantation à plat, avec les boutures inclinées, a été faite manuellement le 5 octobre 1984, selon un écartement de 1 m × 1 m, soit une densité de 10 000 pieds par hectare. Un désherbage manuel et un traitement herbicide (paraquat, 3 litres par hectare) ont été faits sur la parcelle qui a été divisée en quatre unités égales de un hectare, comptant ainsi chacune 100 lignes de plantation.

Bilan d'énergie de la parcelle de manioc

La méthode du rapport de Bowen couplée au bilan d'énergie est appliquée à la parcelle de 4 hectares, du-

(1) ENSA, 08 BP 35, Abidjan 08, Côte-d'Ivoire.

(2) ORSTOM-Adiopodoumé, BP V-51 Abidjan, Côte-d'Ivoire.

rant les périodes diurnes, en vue de déterminer l'évapotranspiration réelle (ETR) du couvert. Cette méthode se résume aux équations suivantes qui mettent en évidence les termes de mesure nécessaires :

$$R_n = \text{LETR} + G + H \quad (\text{ROSENBERG, 1974}) \quad (1)$$

avec :

R_n = Rayonnement net ;

$\text{LETR} = L \cdot \text{ETR}$;

G = Flux de chaleur dans le sol ;

H = Flux de chaleur sensible ;

L = Chaleur latente de vaporisation ;

sachant que $H/\text{LETR} = \beta = \gamma \, dT/de$. (2)

L'évapotranspiration s'écrit :

$$\text{ETR}_{\text{Bowen}} = (R_n - G)/L(1 + \beta) \quad (3)$$

avec :

dT, de = les écarts respectifs de la température et de l'humidité de l'air entre deux niveaux ;

γ = la constante psychométrique ;

β = le rapport de Bowen.

Les mesures ont été accomplies sur des périodes d'intégration de 20 minutes : R_n est mesuré à l'aide d'un bilanmètre Schenck situé à 2 mètres au-dessus du couvert. G est mesuré à l'aide d'un fluxmètre de type SR 19, situé à 1 centimètre dans le sol, T est mesuré à l'aide de deux montages de thermocouples Cu/CT, constitués de quatre soudures en série, avec un point de référence dans un bain d'eau glacée. La pression de vapeur d'eau de l'air e , prélevée à deux niveaux au-dessus du couvert végétal, est mesurée à l'aide d'un hygromètre à effet Peltier.

Bilan hydrique du sol

Les mesures neutroniques d'humidité du sol permettent de déterminer les stocks d'eau sous la culture, en vue de calculer la consommation en eau de la plante. Cependant, un des points faibles de la méthode neutronique concerne la mesure dans les tranches supérieures du sol (0 à 20 cm) dont l'importance est considérable dans le bilan hydrique (DAUDET et VACHAUD, 1977).

Consommation en eau de la culture

Des nombreuses méthodes d'évaluation du bilan hydrique des cultures, celle retenue se base sur l'établissement du bilan hydrique du sol (bilan hydrique de la zone racinaire) à partir de la relation :

$$P + I \pm \Delta S - \text{ETR} - D + R_c \pm R = 0 \quad (4)$$

(KATERJI *et al.*, 1984)

ΔS : variation du stock d'eau du sol pour un intervalle de temps donné et une tranche de sol [ΔY] entre la surface [0] et une profondeur [Y] ;

P, I : pluies et irrigations pour le même intervalle de temps ;

D, R_c : flux profonds, drainage [D] et remontée capillaire [R_c] ;

R : apports ou pertes, latéralement par ruissellement superficiel ;

ETR : évapotranspiration réelle.

Dans cette relation on néglige la part d'eau conservée par le végétal (à peine 1% de ce qui y transite).

$I = 0$; la parcelle n'est pas irriguée, les seuls apports sont dus à la pluie P ,

$R = 0$; le terme R est généralement considéré comme nul en sols cultivés ; d'autre part, sur les sols filtrants d'Adiopodoumé, on montre (DAUDET et LESPINAT, 1968) que les phénomènes de ruissellement n'apparaissent que dans le cas de pluies abondantes et d'intensité supérieure à 30 mm/h mais compte tenu de la faible pente du terrain (1 à 2 %) le ruissellement consécutif à une pluie supérieure à 30 mm/h n'atteint pas 3 % de celle-ci, il est donc négligé par rapport à ΔS ,

$D, R_c = 0$; les flux verticaux profonds sont des données mal maîtrisées.

La nappe étant profonde on peut considérer négligeables les remontées capillaires.

Finalement :

$$\text{ETR}_s = P + (S_1 - S_2)_0^{Y_f} \quad (5)$$

La profondeur Y_f à laquelle sont calculés les stocks hydriques a été choisie égale à 100 cm après observation de profils culturaux et hydriques à plusieurs stades du cycle cultural : l'enracinement utile à l'alimentation hydrique du manioc atteint verticalement un mètre en moyenne (latéralement jusqu'à 2 mètres) ; d'autre part les profils hydriques sont très stables aux alentours de cette profondeur (KALMS et IMBERNON, 1983), ce qui peut rendre négligeables les variations de stock à partir de cette cote.

Les valeurs de consommation ainsi calculées sont comparées à celles obtenues simultanément par la méthode du rapport de Bowen couplée au bilan d'énergie ($\text{ETR}_{\text{Bowen}}$), qui sont calculées en intégrant les valeurs instantanées d'ETR sur une semaine.

La valeur du point de flétrissement (pF) a été déterminée au laboratoire par la méthode de la presse à membrane alors que celle de la capacité au champ a été déterminée au champ par la méthode de saturation et de redistribution de l'eau du sol (dispositif Müntz).

L'évaporation potentielle a été calculée selon la formule de Penman :

$$\text{ETP} = p/(p + \gamma) [R_n + f(u) (E^*a - E_a)] \quad (6)$$

(SHOUSE *et al.*, 1980)

où

p = la pente de la courbe vapeur saturante-température

γ = constante psychométrique

E^*a = pression à saturation de l'air

E_a = pression de vapeur d'eau dans l'air.

$$R_n = 0,67 R_g + 5,4 \quad (7)$$

(L'HOMME et MONTENY, 1982)

où :

Rg = rayonnement global (Wm⁻²)

$$f(u) = 0,26 (1 + 0,54 u) \quad (8)$$

MONTENY et LHOMME, 1978)

où :

u est la vitesse du vent (m/s).

Humidité neutronique et gravimétrique

Dix points de mesure d'humidité volumique (θ_v) ont été retenus sur la parcelle, et le suivi est accompli hebdomadairement, à l'aide d'une sonde à neutrons de 10 millicuries (type SOLO 20) entre les profondeurs de 15 cm et 150 cm. De 0 à 15 cm, cette mesure a été effectuée par gravimétrie (prélèvements à la tarière, pesée et séchage, θ_p) ; notons que $\theta_v = \rho\theta_p$. La densité apparente (ρ) a été mesurée avec un gammadensimètre (DR 18) et à l'aide d'un cylindre de volume $v = 250 \text{ cm}^3$.

Développement et croissance du plant de manioc

Deux types de prélèvements ont été faits : l'un destructif et l'autre non destructif. Pour le prélèvement non destructif, 40 plantes au total (10 plantes successives par parcelle) ont été marquées dès la mise en place de l'essai. Entre autre, le nombre de feuilles par tige primaire a été déterminé une fois par semaine. La vitesse d'émission foliaire (VEF) a été définie comme le rapport entre le nombre de feuilles par tige primaire et le nombre de jours écoulés depuis la précédente mesure.

Pour le prélèvement destructif, 16 plantes au total (4 plantes par parcelle de 1 ha) sont prélevées en commençant sur la sixième ligne extérieure de chaque parcelle en arrachant un plant sur deux à partir de la sixième colonne. Toutes les deux semaines, un échantillonnage est effectué alternativement sur le côté extérieur et intérieur de chacune des parcelles. D'abord, la longueur (L) en millimètre du lobe central de chaque feuille (i) par branche est mesurée. Le nombre d'apex par plante est déterminé par le nombre de branches par plante, y compris les tiges primaires. Le nombre (N) total de feuilles par plante est aussi déterminé. La surface foliaire (S) par plante est calculée à l'aide de la formule suivante (RAFFAILLAC, communication personnelle) :

$$S (\text{cm}^2) = \sum_{i=1}^N 0,0067 L_i^{2,042} \quad (9)$$

basée sur la relation présentée par CONNOR et COCK (1981). L'indice foliaire (IF) vaut S/10 000, puisque la densité de plantation est de 10 000 pieds par hectare.

Après la mesure de la longueur du lobe central de chaque feuille, chaque plante est arrachée et séparée en ses différentes parties (feuilles, tiges et tubercules), puis leurs poids secs sont déterminés après un séchage à l'étuve à 105 °C durant 8 à 10 jours et pesée. L'indice de

récolte (IR) est défini comme étant le rapport du poids des tubercules et du poids total de la plante.

L'efficacité hydrique (EH) de la plante correspond au rapport du poids total à la quantité d'eau consommée.

Résultats et discussion

Relations entre ETR_{Bowen} , ETR_{sonde} et ETP_{Penman}

Dans le but de comparer l' ETR_{Bowen} à l' ETR_{sonde} , il est nécessaire de les ramener aux mêmes unités. Ainsi, sur la même période de mesure, l' ETR_B moyenne journalière est calculée en intégrant les ETR instantanées sur la journée et en prenant la moyenne de la période considérée alors que l' ETR_s moyenne journalière est tout simplement le rapport entre la consommation totale de la période et le nombre de jours (GOUÉ *et al.*, 1987). Signalons que l'erreur commise sur l' ETR_B est calculée selon l'équation de Scarborough (1966) et qu'elle varie de 7 à 14 % pour les données présentées ici. La figure 1 montre une relation linéaire entre l' ETR_B et l' ETR_s d'équation $ETR_B = 1,195 ETR_s + 0,346$ ($r = 0,86$). Nous constatons d'une part, que la majorité des points sont au-dessus de la première bissectrice et d'autre part, que la droite de régression n'est pas parallèle à cette bissectrice. La première constatation signifie que la méthode du rapport de Bowen surestime l'ETR ou que la méthode des bilans hydriques du sol le sous-estime. La deuxième constatation indique que les écarts entre les deux types de mesure seront de plus en plus importants au fur et à mesure que l'ETR augmente. En effet, l'analyse de la régression linéaire montre que l'ordonnée à l'origine de 0,346 n'est pas significativement (5 %) différente de zéro. Ce qui signifie que les deux méthodes sont équivalentes lorsque l'évaporation est faible. L'équation de la droite qui passe par l'origine est alors :

$$ETR_B = 1,323 ETR_s \quad (r = 0,86)$$

Dans ces conditions l'hypothèse H_0 posant que la pente = 1 est à rejeter, car la valeur de t (théorique) pour 10, 0,025, serait alors de $2,28 < t$ (calculé) de 6,85. Ces résultats montrent que l'on doit faire très attention lorsqu'on compare des données de sources différentes.

Signalons que les points encadrés sont ceux pour lesquels la méthode des bilans hydriques du sol surestime l'ETR, par rapport à la méthode du rapport de Bowen, observé pendant les quatre premiers mois du développement du manioc (octobre-janvier) ; ce résultat pourrait s'expliquer par l'effet conjugué de deux facteurs : la couverture incomplète du sol en début de cycle et la sécheresse. En effet, le phénomène d'advection d'énergie (SHOUSE *et al.*, 1980) au début de la saison sèche (décembre-janvier) aurait entraîné une sous-estimation de l'énergie disponible à l'évapotranspiration par la méthode du rapport de Bowen couplée au bilan d'énergie et par conséquent ETR_B serait faible. Cependant, une

surestimation de l'ETR par le bilan hydrique n'est pas à écarter, du fait que les sols sont sableux très drainants et que le terme de drainage n'est pas maîtrisé.

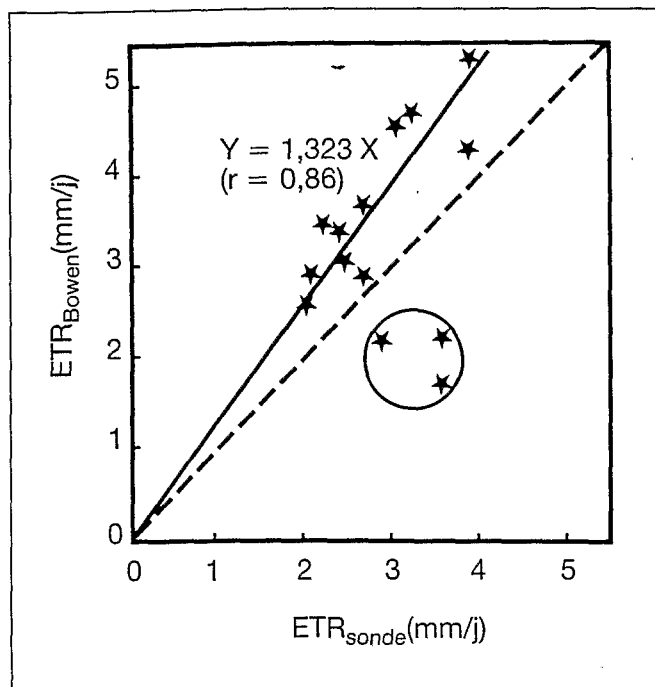


FIGURE 1 : Relation entre l'évapotranspiration réelle mesurée au-dessus du couvert de manioc (ETR_{Bowen}) et celle estimée à partir des bilans hydriques du sol (ETR_{sonde}).

La figure 2 montre l'évolution des différents termes du bilan d'énergie du couvert de manioc au cours de la journée en conditions de stress hydrique (04-12-1984) et bien alimenté en eau (23-05-1985). Dans le premier cas, du fait du stress hydrique, l'énergie utilisée dans l'évapotranspiration est relativement faible par rapport au rayonnement net. Les flux de chaleur sensible et par conduction quoique moins élevés ont des valeurs appréciables. Dans le second cas au contraire, la disponibilité élevée de l'eau du sol a favorisé une forte évapotranspiration limitant ainsi les autres flux à des valeurs très faibles. Ces résultats démontrent bien l'importance de l'eau disponible sur l'évapotranspiration de la culture.

La figure 3 montre l'évolution du stock hydrique, de l' ETR_s et de l'ETP au cours du cycle du manioc. Si aucune relation évidente n'existe entre le stock hydrique et l' ETR_s , on peut remarquer cependant que le déficit hydrique ($ETP - ETR_s$) est plus important en période de sécheresse comme c'est le cas entre le 90^e et le 160^e jour après plantation. Ce résultat est dû d'une part à l' ETR_s relativement faible (2 mm/j) du fait de la faible disponibilité de l'eau du sol, et d'autre part à l'ETP élevée pendant cette période. Pendant la phase critique de la sécheresse (stock hydrique minimum), l' ETR_s a été seulement de 0,45 ETP alors qu'elle a atteint un maximum de 1,02 ETP en condition hydrique favorable. Ces résultats corroborent très bien l'hypothèse qu'en période de déficit hydrique, la plante de manioc réduit sa transpira-

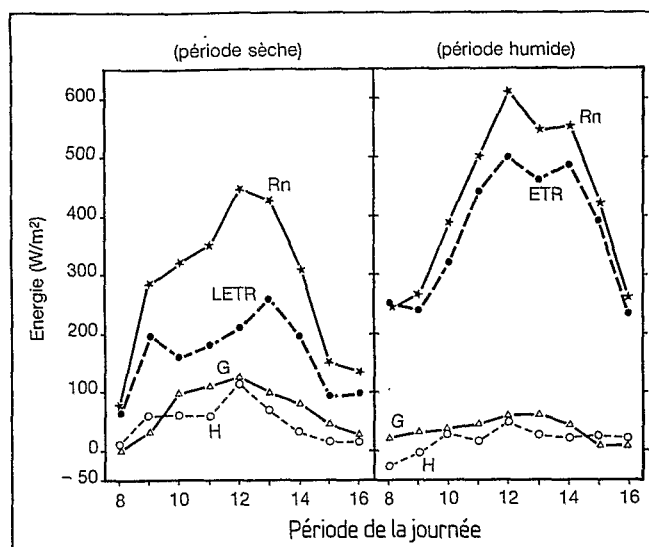


FIGURE 2 : Evolution des termes du bilan d'énergie (R_n , $LETR$, H , G) au cours de la journée en périodes sèche et humide.

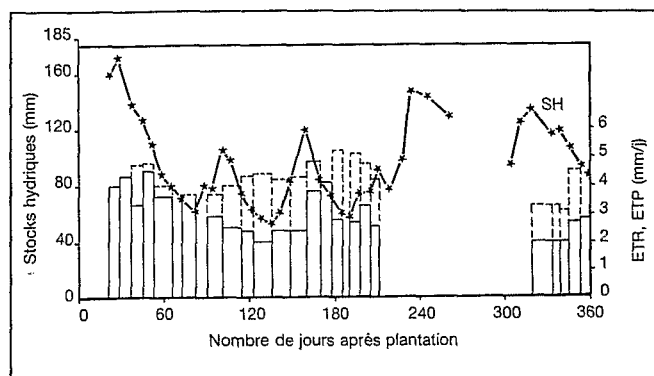


FIGURE 3 : Relation entre les stocks hydriques (SH), l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évaporation potentielle (ETP_{Penman}) au cours du développement du manioc.

tion grâce à une augmentation de la résistance somatique (PALTA, 1983) et surtout grâce à une réduction de la surface foliaire évaporante (CONNOR et COCK, 1981 ; PALTA, 1984 ; YAO *et al.*, 1988). Russel (1980) a trouvé que le rapport ETR/ETP pour l'orge reste proche de 0,6 jusqu'à ce que le déficit dépasse 30 mm d'eau. Ensuite il décroît linéairement jusqu'à 0,17. En comparant l'ETR de l'orge à l' ETP_{Penman} , Grant (1975) a trouvé que l'équation de Penman surestime l'ETR en début de cycle et pendant la maturation.

Relation entre la réserve hydrique disponible et l'indice foliaire

La figure 4 montre l'évolution de la réserve hydrique utilisable (RH) du sol sur une profondeur de 100 cm. Cette réserve hydrique est considérée comme étant la quantité d'eau du sol en plus du stock minimum de 52 mm. On constate que cette réserve hydrique utilisable est descendue trois fois vers zéro lors de la grande saison sèche allant du 60^e au 200^e jour après plantation.

La figure 4 montre aussi l'évolution de l'IF au cours du cycle de développement du manioc. L'indice foliaire présente deux pics dont le premier ($4,30 \pm 1,07$) se situe au début de la grande saison sèche (100 jours après plantation) et le deuxième ($4,43 \pm 1,95$) pendant la grande saison des pluies (environ 260 jours après plantation). Si l'IF semble ne pas avoir contrôlé l'ETR, contrairement aux résultats de BRUN *et al.* (1972) la réserve hydrique utilisable semble par contre avoir beaucoup influencé l'IF. En effet, chaque fois que la RH tend vers zéro, il y a une chute rapide de l'IF qui est la conséquence d'une sénescence rapide des feuilles âgées sous l'effet du déficit hydrique (YAO *et al.*, 1988).

Lorsque la RH augmente suite à des pluies plus ou moins importantes, l'indice foliaire s'accroît. Cet accroissement rapide de l'IF s'explique par une élévation de la vitesse d'émission foliaire (VEF, figure 4). Il est important de signaler qu'après une pluie relativement importante (10 mm), si l'ensemble du profil (0-100 cm) a une RH proche de zéro, l'émission foliaire, ralentie par les précédents déficits hydriques, semble être relancée. Cette relance de l'émission foliaire malgré une RH faible (figure 4) suggère que seulement une petite partie des racines du manioc peut assurer l'alimentation hydrique complète de la plante. Si la figure 4 permet de dire que la VEF est positivement sensible à la remontée de la RH quel que soit son niveau, elle démontre que la VEF est négativement sensible à la descente de la RH vers zéro. En effet, à chaque fois que la RH tend vers zéro, la vitesse d'émission foliaire chute brusquement (c'est le cas à 60 et 110 jours après plantation) et continue ainsi jusqu'à ce qu'il y ait remontée du niveau de la réserve hydrique.

La figure 4 démontre bien que l'évolution de l'IF a été très liée à celle du nombre de feuilles par plante, sauf au milieu de la grande saison sèche où l'IF continue de baisser alors que le nombre de feuilles augmente. Ce résultat s'expliquerait par le fait qu'il y aurait eu suffisamment de pluie pour relancer l'émission foliaire mais que l'expansion des jeunes feuilles aurait été réduite par de fréquents déficits hydriques (PALTA, 1984 ; YAO *et al.*, 1988) alors que les larges feuilles de base tombaient en sénescence. La plante de manioc devant réduire sa consommation en eau pendant les périodes sèches, est contrainte à diminuer son IF, en réduisant la VEF, la surface des nouvelles feuilles et en augmentant la sénescence foliaire dans certaines conditions d'IF trop élevé ($IF > 3$).

Si la vitesse d'émission foliaire a été déterminée par apex primaire, le nombre de feuillés par plante l'a été en tenant compte de tous les apex qui ont au moins une feuille suffisamment grande pour être mesurée. La figure 4 montre que le nombre d'apex qui était de 12 au départ a été réduit à 4 pendant la période sèche, à la fois par une sénescence de quelques grosses branches et par la régression à l'état des bourgeons dormants d'autres plus petites.

L'élévation généralisée du nombre d'apex à partir du 200^e jour après plantation a été d'une part due aux pluies

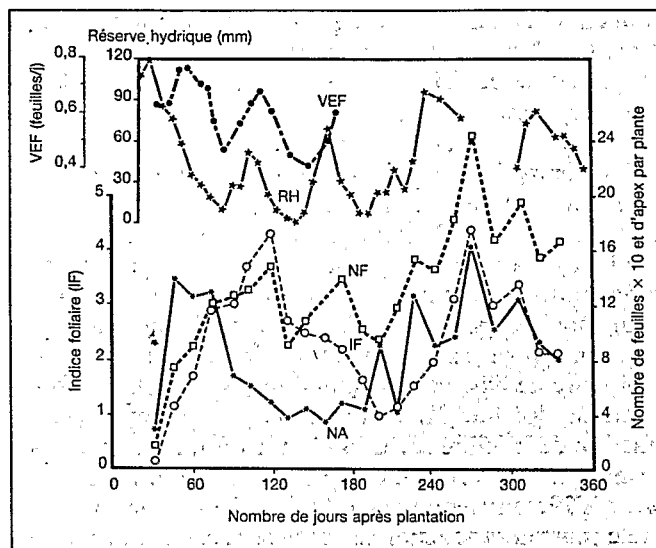


FIGURE 4 : Evolution de la vitesse d'émission foliaire (VEF), du nombre de feuilles par plante (NF), du nombre d'apex par plante (NA) et de l'indice foliaire du manioc en relation avec la réserve hydrique utilisable (RH).

fréquentes et d'autre part à une certaine levée de la dominance apicale. Deux raisons principales justifient cette levée de la dominance apicale : en effet, vers la fin de la saison sèche, une attaque de cochenilles sur un grand nombre d'apex a entraîné un développement rapide de nombreux bourgeons dans la strate supérieure des branches attaquées. La deuxième raison est que les plantes non attaquées par les cochenilles sont hautes, avec un nombre réduit de feuilles de petite taille ce qui entraîne donc une meilleure pénétration des rayons solaires dans le couvert. Cette pénétration solaire dans les meilleures conditions hydriques a entraîné l'émission de nouveaux bourgeons au niveau des strates intermédiaires et inférieures. L'oscillation du nombre d'apex est due à la régression de petites branches sous l'effet de déficits hydriques fréquents.

Il faut noter que, d'une manière générale, le nombre de feuilles par plante suit celui des apex sauf pendant la saison sèche. C'est le lieu de rappeler que le nombre de feuilles par plante est fonction de la vitesse d'émission des apex, de la vitesse d'émission foliaire par apex et de la sénescence foliaire par apex. Seuls les deux derniers facteurs ont influencé l'évolution du nombre de feuilles pendant la période sèche.

Effet de la sécheresse sur la production de matière sèche

La figure 5 montre que la matière sèche totale du manioc s'est accumulée régulièrement, sauf à deux moments, pendant tout le cycle de son développement. Signalons que tout le long de son développement, le coefficient de variation des échantillons de manioc a oscillé entre 20 et 37 % du fait de l'hétérogénéité des boutures (20 ± 7 g) utilisées pour la plantation des quatre hectares de parcelles expérimentales. Ainsi, en fin de cycle le poids sec moyen par plante a été de 1838 ± 600 g. La

réduction du taux d'accroissement pondéral à environ 100 et 150 jours après plantation a coïncidé avec une chute rapide de l'IF due à la sécheresse. En effet, la sénescence rapide des feuilles suite à des périodes sèches prolongées a entraîné une perte considérable de poids à peine compensée par les produits de photosynthèse. Au milieu de la grande saison sèche, on a observé une légère baisse de l'IF (3 à 2) alors que le taux de croissance pondérale est très élevé. Ce résultat s'explique par une modification de l'architecture foliaire qui comprend beaucoup plus de petites feuilles permettant une meilleure pénétration du rayonnement solaire aboutissant à une meilleure activité photosynthétique. Vers la fin de la sécheresse, lorsque l'IF a commencé à augmenter, la production de matière sèche est restée toujours négligeable jusqu'à ce que l'IF soit compris entre 2 et 3. IRIKURA *et al.*, (1979) ont montré que l'IF de 3 est la valeur optimale pour la production de matière sèche chez certaines variétés de manioc.

Si la sécheresse influence l'accumulation de matière sèche chez le manioc, on pourrait s'interroger sur la distribution des assimilats dans de telles conditions. La figure 5 montre que cinq mois après plantation, la matière sèche du manioc est principalement stockée dans les tubercules et les racines. Cette figure montre bien qu'avant cinq mois, les feuilles constituent une part très importante du poids total de la plante. La chute des feuilles à quatre mois après plantation explique la réduction du taux de croissance pondérale et non une diminution de l'activité photosynthétique puisque pendant cette même période, le poids des tubercules et celui des tiges ont augmenté. La réduction du taux de croissance pondérale 6 mois après plantation est due principalement à une perte importante de la masse foliaire et à une augmentation presque négligeable du poids des tiges. Nous constatons que dans le même temps, la matière sèche accumulée dans les tubercules a été affectée mais à un degré moindre. Cette tendance suggère que, dans des conditions de déficit hydrique, l'accumulation d'assimilats dans les tubercules est plus favorisée. La réduction généralisée de la croissance pondérale dans les différentes parties de la plante suggère d'une part que l'IF devenu trop faible est inefficace d'autre part que les conditions hydriques très défavorables auraient entraîné une diminution de l'activité photosynthétique au niveau de chaque feuille (PALTA, 1983).

L'indice de récolte (IR) que nous avons porté sur la figure 5 passe très rapidement de 0 à 51 % huit mois après plantation et se stabilise par la suite jusqu'à la fin de l'expérimentation. BOERBOOM (1978) a trouvé que l'IR du manioc tend vers une asymptote se situant entre 0,5 et 0,6 quand le poids total de la plante tend vers 1 800 g. On note, en effet, que la croissance des tubercules suit deux phases. Une première rapide (6 g/j) de 60 à 160 jours après plantation et une plus lente (2g/j) après. Comme nous l'avons vu, les conditions hydriques favorables et l'IF élevé en début de cycle ont conduit à un taux élevé de croissance des tubercules. Ce taux étant maintenu on aurait eu à la fin de l'expérimentation une production de plus ou moins 45 tonnes de tubercules

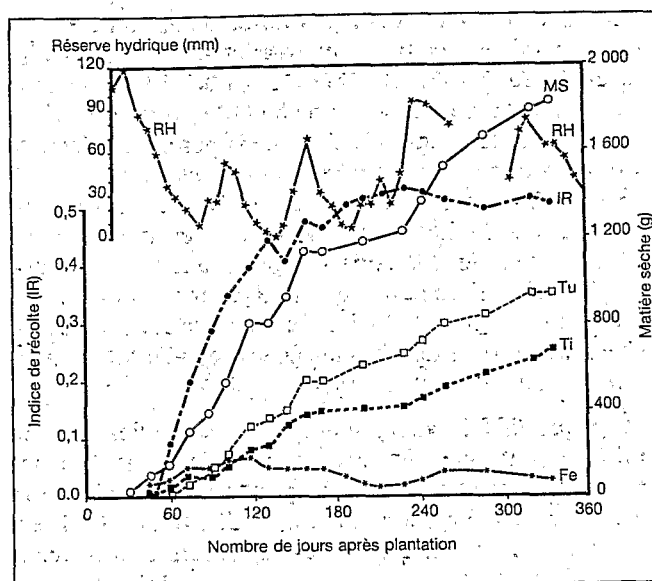


FIGURE 5 : Evolution de l'indice de récolte (IR), de la production de matière sèche totale (MS), de tubercules (Tu), de tiges (Ti) et de feuilles (Fe) en relation avec la réserve hydrique utilisable (RH) au cours du développement du manioc.

frais à l'hectare contre les 28 tonnes récoltées dues à la réduction du taux de croissance des tubercules pendant et après la période sèche. Cette réduction tient d'une part, à la diminution de l'activité photosynthétique du couvert du fait de la présence d'une proportion beaucoup plus importante de feuille virosée et de la persistance d'attaques de cochenilles sur les apex malgré la reprise des pluies et d'autre part, à l'accumulation d'une fraction plus élevée d'assimilats dans les nouvelles tiges en croissance. Si l'IR optimal est obtenu à 8 mois, il faut noter cependant que seulement 67 % du poids final ont été accumulés, alors qu'à dix mois ce chiffre s'élevait à près de 94 %. Il faut noter que les différents pourcentages obtenus à des moments précis du cycle de développement du manioc dépendent des conditions édaphoclimatiques. Comme cela a été vu, la sécheresse peut réduire le taux de croissance pondérale limitant ainsi la production de la plante (KEATING *et al.*, 1982).

Si le déficit hydrique conduit à une réduction de l'accumulation de matière sèche, l'on pourrait alors se demander comment évoluerait l'efficacité hydrique (EH) au cours du cycle de développement du manioc. Rappelons que l'EH est la variation de la quantité de matière sèche ramenée à la variation de la quantité d'eau consommée (ETR) pendant le même intervalle de temps. On observe qu'entre le 20^e et 120^e jour après plantation l'EH a augmenté très rapidement suite à une élévation à la fois de la réserve hydrique utilisable et de l'indice foliaire atteignant un maximum de 8,14 g par kilogramme d'eau (fig. 6). Une chute brutale s'ensuit due à une baisse très rapide de la masse foliaire en réponse à la chute rapide de la RH. On observe une nouvelle augmentation très rapide de l'EH qui passe de 1 à 6 g par kilogramme d'eau entre le 140^e et le 160^e jour après plantation et principalement associée à une amélioration très nette de la RH. L'EH va baisser ensuite et rester

très faible (< 1 g/kg d'eau) à cause de la longue période sèche enregistrée entre 165 et 200 jours après plantation (fig. 6). Ces résultats montrent que l'efficacité hydrique du manioc croît avec une amélioration de la réserve hydrique utilisable atteignant un maximum d'autant plus élevé que l'indice foliaire tend vers un optimum de 3 (YAO *et al.*, 1988). En revanche, une période sèche entraîne une réduction rapide de l'EH à cause de la diminution à la fois de l'activité photosynthétique (PALTA, 1983) et de la masse foliaire (YAO *et al.*, 1988). EL-SHARKAWY et COCK (1984) ont montré qu'en période sèche, le passage d'air sec peut entraîner la fermeture des stomates réduisant ainsi l'activité photosynthétique. Cependant, le comportement du manioc vis-à-vis du déficit de saturation de l'air lui permet d'avoir une EH plus élevée que celle des autres plantes à C3 (riz, soja) mais inférieure à celle des plantes à C4 (sorgho) principalement à cause du taux élevé de leur activité photosynthétique et non de leur faible consommation en eau (EL-SHARKAWY *et al.*, 1984).

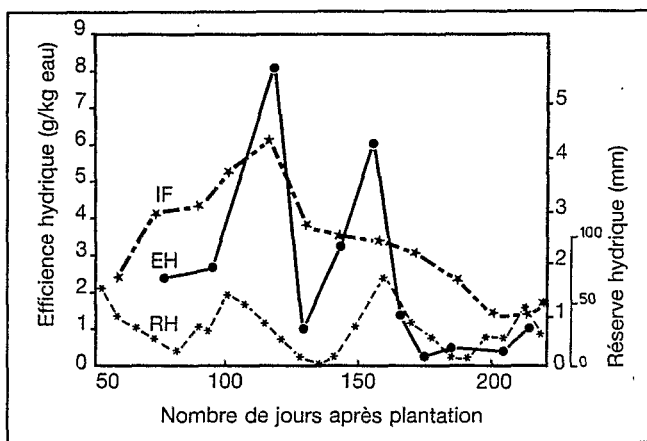


FIGURE 6 : Evolution de l'efficacité hydrique (EH) du manioc en relation avec l'indice foliaire (IF) et la réserve hydrique utilisable (RH).

LEMON (1969) a fait un inventaire de l'efficacité hydrique réelle des agrosystèmes modernes et conclut qu'en exploitation de subsistance, l'EH peut atteindre 0,10-0,24 grammes par kilogramme d'eau ; 0,72-1,2 g par kilogramme d'eau en exploitation intensive et 2,4-4,8 g par kilogramme d'eau en condition expérimentale. Il a trouvé qu'il est possible d'obtenir en théorie une EH maximale de 9,6 à 12 grammes par kilogramme d'eau. Nous pouvons donc conclure qu'en condition d'humidité favorable et d'un indice foliaire optimal l'efficacité hydrique du manioc tend vers l'efficacité maximale théorique, mais que l'EH réelle d'un couvert de manioc dépend à la fois de la réserve hydrique utilisable et de l'IF.

Conclusion

L'ETR estimée par la méthode du bilan hydrique du sol est linéairement liée à celle obtenue par la méthode

du rapport de Bowen couplé au bilan d'énergie. Mais l'écart entre les deux estimations croît avec l'ETR.

La VEF suit les mouvements de la RH quel que soit le niveau de cette dernière. Le déficit hydrique du sol peut avoir trois effets sur la production et le développement foliaire du manioc : une réduction de la vitesse d'émission foliaire, une diminution effective de la taille des feuilles émises pendant la période sèche et une sénescence accélérée des feuilles à la base entraînant une réduction de l'indice foliaire. La réduction de l'indice foliaire conduit à une diminution des échanges gazeux plante atmosphère aboutissant à une réduction de la production de la matière sèche. En conditions hydriques défavorables, l'accumulation de la matière sèche dans les tubercules est favorisée.

L'IR du manioc évolue suivant une courbe sigmoïde tendant vers une asymptote se situant entre 0,5 et 0,6 quand la matière sèche totale de la plante tend vers 1 800 g.

L'EH du manioc suit principalement les mouvements de la réserve hydrique utilisable mais est influencée par l'IF. En conditions hydriques défavorables, elle avoisine 1 g par kilogramme d'eau mais peut atteindre 8 g par kilogramme d'eau dans les conditions optimales d'humidité et d'IF.

Reçu le 7 mai 1987
 Accepté le 9 février 1989

Références bibliographiques

- BRUN L.J., KANEMASU E.T., and POWERS W.L., 1972. Evapotranspiration from soybean and sorghum fields. *Agron. J.* 64 (2) : 145-148.
- BOERBOOM B.W., 1978. A model of dry matter distribution in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Neth. J. Agric. Sci.* 26 : 267-277.
- COCK J.H., FRANKLIN D., SANDOVAL G. and JURI P., 1979. The ideal cassava plant for maximum yield. *Crop Sci.* 19 : 271-279.
- CONNOR D.J., COCK J.H., 1981. Response of cassava to water shortage. II. Canopy Dynamics. *Field Crops Res.* 4 : 285-296.
- CONNOR D.J., COCK J.H., PARRA G.E., 1981. Response of cassava to water shortage. I - Growth and Yield. *Field Crops Res.* 4 : 181-200.
- DAUDET P.A., LESPINAT P.A., 1968. *Etude des éléments du bilan hydrique naturel d'une culture et leurs interactions*. ORSTOM, Centre d'Adiopodoumé. Laboratoires de Bioclimatologie et de Radio-isotopes.
- DAUDET F.A., VACHAUD G., 1977. La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. *Ann. Agron.*, 28 (5) : 503-519.
- EL-SHARKAWY M.A., COCK J.H., 1984. Water use efficiency of cassava. I - Effects of air humidity and water stress on stomatal conductance and exchange. *Crop Sci.* 24 : 497-502.

EL-SHARKAWY M.A., COCK J.H., HELD K.A.A. 1984. Water use efficiency of cassava II. Differing sensitivity of stomata to air humidity in cassava and other warm-climate species. *Crop Sci.* 24 : 503-507.

GOUE B., YAO N.R., JANEAU J.-L. 1987. Consommation en eau d'une culture de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) à l'échelle de la parcelle. *Bull. G.F.H.N.* n° 21 : 85-103.

GRANT D.R. 1975. Comparison of evaporation from barley with Penman estimates. *Agric. Meteorol.* 15 : 49-60.

IRIKURA Y., COCK J.H., KAWANO K. 1979. The physiological basis of genotype-temperature interactions in cassava. *Field Crops Res.* 2 : 227-239.

KALMS J.M., IMBERNON J. 1983. Modalités d'alimentation en eau du riz pluvial: bilan des recherches méthodologiques effectuées à Bouaké en Côte-d'Ivoire. *L'Agron. Trop.* 38 (3) : 198-205.

KATERJI N., DAUDET F., VALANCOGNE C. 1984. Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique des cultures. Détermination et importance. *Agronomie.* 4 (8) : 779-787.

KEATING B.A., EVENSON J.P., FUKAI S. 1982. Environmental effects on growth and development of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). III. Assimilate distribution and storage organ yield. *Field Crops Res.* 5 : 293-303.

LEMON E.R. 1969. *Important microclimatic factors in soil-water-plant relationships. Modifying the soil and water environment for approaching the agricultural potential of the Great Plains.* Great Plains Agr. Council Publication n° 34 p. 95-102.

LHOMME J.P., MONTENY B. 1982. Présentation d'une formule pratique d'estimation de l'évapotranspiration potentielle, conforme aux nouvelles recommandations internationales. *Arch. Meteorol Geophys. Bioclimatol.* sér. B. 30 : 253-260.

MONTENY B., LHOMME J.-P. 1978. *Eléments de Bioclimatologie.* ORSTOM, Adiopodoumé (Côte-d'Ivoire).

PALTA, JAIRO A. 1983. Photosynthesis, transpiration and leaf diffuse conductance of the cassava leaf in response to water stress. *Can. J. Bot.* 61 : 375-376.

PALTA, JAIRO A. 1984. Influence of water deficits on gas-exchange and the leaf area development of cassava cultivars. *J. Exp. Botany.* 35 : 1441-1449.

PERRIER A. 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. 1 - Evaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles. *Ann. Agron.* 26 : 1-18.

ROOSE E., CHEROUX M. 1966. *Les sols du bassin sédimentaire de Côte-d'Ivoire.* Cahiers ORSTOM. Série Pédologie IV, 2.

ROSENBERG N.J. 1974. *Microclimate: The biological environment.* New York, John Wiley and Sons. p. 159-205.

RUSSELL G. 1980. Crop evaporation, surface resistance and soil water status. *Agric. Meteorol.* 21 : 213-226.

SCARBOROUGH J.B. 1966. *Numerical Mathematical Analysis.* Johns Hopkins, Baltimore, Md. 6^e ed.

SHOUSE P., JURY W.A., STOLZY L.H. 1980. Use of deterministic and empirical models to predict potential evapotranspiration in an advective environment. *Agron. J.* 72 : 994-998.

YAO N.R., GOUE B., MONTENY B., ZELLER B. 1988. Effect of drought on leaf development and dry matter production of the cassava (*Manihot esculenta* Crantz) plant. *Trop. Agric.* 65 : 84-88.

Summary

YAO N.R., GOUE B., ZELLER B. - **Water consumption and efficiency of a cassava crop in southern Côte-d'Ivoire.**

At Adiopodoumé, Côte-d'Ivoire, several microclimatic parameters were measured above a cassava crop canopy to determine different terms of the energy status at the plot level and to estimate actual evapotranspiration (ETR) using the Bowen ratio method connected with the energy status. The consumptive use of water by the plant (ETR) was also estimated using the method of fluctuations in soil moisture content measured by the neutron method. The leaf area and available water in the soil can be limiting factors to the exchange of water vapour and carbon dioxide and there by to dry matter production. So the phenomena of plant transpiration and dry matter production are closely linked, which is concretized by the frequent use of the idea of water use efficiency (EH = MS/ETR). The first results from a more than 3 year old cassava crop show a linear relationship between ETR values measured by the method of fluctuations in the soil moisture content and by the Bowen ratio method connected with the energy status. On the other hand, available soil moisture has an effect on the leaf development rate and senescence, leaf size, and dry matter production. Lastly water use efficiency (EH) follows the fluctuations in the available moisture capacity of the soil which is about 1g/kg water during the dry period but can reach 8 g/kg water under favorable water conditions and with an optimal leaf area index.

Key words: Actual evapotranspiration (ET), water balance, leaf area index, dry matter, cassava, water use efficiency, Adiopodoumé, Côte-d'Ivoire.

Resumen

YAO N.R., GOUE B., ZELLER B. - **Consumo y eficiencia hídricos de un cultivo de yuca en el sur de Côte-d'Ivoire.**

En Adiopodoumé (Baja Côte-d'Ivoire), la evaluación de los parámetros microclimáticos que predominan sobre un cultivo de yuca permitió determinar los distintos términos del balance de energía a nivel de la parcela y estimar la evapotranspiración real (ETR) mediante el método de la relación de Bowen asociado al balance de energía. El consumo de agua de la planta (ETR) se estimó también mediante el método de variación de los stocks hídricos del suelo calculada por el método neutrónico. La superficie foliar desarrollada y la disponibilidad del agua en el suelo pueden ser factores limitantes de los intercambios de vapor de agua y gas carbónico y por consiguiente de la producción de materia seca. Los fenómenos de transpiración del vegetal y de producción de materia seca se encuentran pues íntimamente relacionados, lo que se concretiza a través del empleo frecuente de la noción de eficiencia hídrica (EH = MS/ETR). Los primeros resultados obtenidos con la yuca demuestran, en el caso de un cultivo de más de tres meses, una relación lineal entre los valores de ETR calculados por el método de variación de los stocks hídricos y por el método de la relación de Bowen asociado al balance de energía. Por otro lado, el stock hídrico disponible en el suelo influye sobre la velocidad de emisión y la senescencia foliares, el tamaño de las hojas y la producción de materia seca. Por último, la eficiencia hídrica (EH) sigue los movimientos de la reserva hídrica utilizable (RH) que viene a ser 1 g/kg de agua en período de sequía pero que puede llegar a ser 8 g/kg de agua en buenas condiciones hídricas y un índice foliar óptimo.

Palabras-clave: Evapotranspiración real (ETR), balance hídrico, índice foliar, materia seca, yuca, eficiencia hídrica, Adiopodoumé (Baja Côte-d'Ivoire).