

ÉVAPOTRANSPIRATION ET CARACTÉRISTIQUES D'ÉCHANGE D'UN GAZON EN CLIMAT ÉQUATORIAL HUMIDE

G. GOSSE*

*Office de la Recherche scientifique et Technique Outre-Mer,
Centre de Recherches d'Adiopodoumé,
Côte d'Ivoire*

RÉSUMÉ

La méthode du bilan d'énergie est utilisée pour déterminer les différents flux d'énergie (sensible et latente) au niveau d'un gazon en milieu équatorial. De plus, le flux de chaleur latente ainsi obtenu a été comparé à ceux obtenus par d'autres techniques. L'utilisation simultanée des méthodes du bilan d'énergie et aérodynamique a permis d'expliquer, en termes de résistances, les variations du flux de chaleur latente et de mettre en évidence l'importance des phénomènes radiatifs. Des formules donnant l'évapotranspiration réelle maximale d'un gazon sont proposées pour des bases de temps de la journée et du mois.

LISTE DES SYMBOLES

- a, a' coefficients divers
A énergie consommée ou dégagée par les systèmes biologiques
 b, b' coefficients divers
C, Ca, Cs concentration au niveau de référence et au niveau de la surface de la culture (kg m^{-3})
D hauteur de déplacement (m)

* Adresse actuelle : Station de Bioclimatologie, Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A., 78000 Versailles.

$\frac{dQ}{dt}$	variation d'énergie calorifique du système ($W m^{-2}$)
E_a	évaporation qu'aurait la surface si sa température était celle de l'air T_a , classiquement appelé pouvoir évaporant de l'air ($W m^{-2}$)
E_{TP_0}	évapotranspiration potentielle théorique au sens de Penman ($W m^{-2}$)
E_{TP}	évapotranspiration potentielle théorique d'un couvert à développement vertical ($W m^{-2}$)
E_{TRM}	évapotranspiration réelle maximale de la culture ($W m^{-2}$)
E_{TR}	évapotranspiration réelle d'une culture ($W m^{-2}$)
Φ_L	flux de chaleur latente ($W m^{-2}$)
Φ_o	flux de chaleur échangé par conduction avec le sol ($W m^{-2}$)
Φ_s	flux de chaleur sensible ($W m^{-2}$)
Φ_{HE}	flux de chaleur latente déterminé par la méthode du bilan d'énergie ($W m^{-2}$)
Φ_{BAS}	flux de chaleur latente mesuré à l'évapotranspiromètre pesable ($W m^{-2}$)
Φ_{AERO}	flux de chaleur latente déterminé par la méthode aérodynamique ($W m^{-2}$)
γ	Constante psychrométrique
h	hauteur de la culture (m)
H	coefficient d'échange de la culture ($m s^{-1}$)
$HR.$	humidité relative (%)
I_{ga}	valeur du rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère ($W m^{-2}$)
k	constante de Karman ($k = 0,42$)
k', k''	coefficients divers
$K(z)$	diffusivité turbulente au niveau z ($m^2 s^{-1}$)
L_v	chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J kg^{-1}$)
M	masse moléculaire de l'eau ($M = 18 \cdot 10^{-3} kg Mole^{-1}$)
$P'(T)$	dérivée de l'expression de la tension de vapeur saturante pour la température T (Pascal $^{\circ}C^{-1}$)
r_a	résistance aérodynamique entre la surface du couvert et le niveau de référence z_r ($s m^{-1}$)
r_c	résistance critique du couvert ($s m^{-1}$)
r_o	résistance de structure du couvert ($s m^{-1}$)
r_s	résistance stomatique du couvert ($s m^{-1}$)
R	constante des gaz parfaits ($R = 8,32 J mole^{-1} ^{\circ}K^{-1}$)
R_g	rayonnement solaire global ($W m^{-2}$)
R_n	rayonnement net de la culture ($W m^{-2}$)
S	durée de la période d'insolation (heures)
S_{max}	durée du jour (heures)
t	temps
T	température absolue ($^{\circ}K$)

T_a, T_{a1}, T_{a2}	température de l'air au niveau de référence z_r et aux niveaux z_1 et z_2 ($^{\circ}\text{C}$)
T_h, T_{h1}, T_{h2}	température du thermomètre mouillé au niveau de référence z_r et aux niveaux z_1 et z_2 ($^{\circ}\text{C}$)
u^*	vitesse de frottement (m s^{-1})
$u(z)$	vitesse du vent (m s^{-1})
z_1, z_2	hauteurs au-dessus de la culture des mesures de gradients destinées à la méthode du bilan d'énergie (m)
z_r	hauteur de référence au-dessus de la culture (m)
z_0	hauteur de rugosité (m)

INTRODUCTION

L'utilisation de l'énergie d'origine solaire et atmosphérique par un couvert végétal débouche sur deux grandes fonctions d'intérêt agronomique :

— la production de matière sèche par l'intermédiaire de l'ensemble des phénomènes photosynthétiques,

— la consommation en eau qui est le résultat d'une évaporation passive (sol-feuille humide) et d'une évaporation active ou transpiration, cette dualité étant résumée par le concept d'évapotranspiration.

Dans le cadre de cette étude réalisée en Côte d'Ivoire, nous présenterons les méthodes qui nous ont permis de mesurer ou d'estimer l'évapotranspiration d'un gazon à des échelles de temps de l'ordre de l'heure, puis nous dégagerons pour le couvert étudié, les relations existant entre la consommation en eau et des paramètres climatiques plus simples à mesurer (rayonnement net et global).

L'intérêt d'une telle étude est double :

— d'un point de vue théorique, une analyse fine du déterminisme de l'évapotranspiration d'un couvert permet surtout par l'intermédiaire des résistances du couvert (r_a, r_o, r_s) de mieux comprendre les interactions plante-atmosphère.

— d'un point de vue plus pratique, cette analyse permet une modélisation et une prévision de l'évapotranspiration d'une culture grâce à des paramètres climatiques simples, pour des zones géographiques présentant un climat semblable. Ce type de démarche présente un intérêt non négligeable, dans des régions où, comme en Côte d'Ivoire, les problèmes de maintenance de mesures délicates en réseau sont complexes.

Nous concluons sur la présentation d'une formule d'évapotranspiration réelle maximale d'un gazon pour des périodes de temps utilisées en pratique (journée, décade ou mois). Cette ETRM gazon est actuellement considérée dans de nombreux pays comme la mesure servant de référence aux calculs de coefficients dits culturaux (ETRM culture/valeur de référence de l'évapotranspiration) ; de plus, pour d'autres auteurs (PERRIER, 1975), l'ETRM gazon pourrait être considérée comme l'enveloppe maximale des consommations en eau des cultures classiques, surtout pour des zones à climat humide.

I. — RAPPELS THÉORIQUES

Les échanges d'énergie d'une culture homogène et infinie avec l'atmosphère obéissent à la relation dite du bilan d'énergie qui traduit le principe de conservation de l'énergie :

$$Rn + \Phi_s + \Phi_L + \Phi_o + A = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

Dans le cadre de la présente étude, couvert végétal à faible développement vertical assimilable à une surface mince et base de temps faible, l'équation précédente se réduit à :

$$Rn + \Phi_s + \Phi_L + \Phi_o = 0 \quad (2)$$

En effet, pour des surfaces minces, l'énergie A consommée ou dégagée par les systèmes biologiques est négligeable ; de plus, pour des régimes transitoires voisins du régime permanent, la variation d'énergie calorifique $\frac{dQ}{dt}$ est pratiquement nulle.

Dans ce cas, PERRIER et SEGUIN (1970) ont explicité la technique d'obtention des flux Φ_L et Φ_s , à partir des mesures Rn , Φ_o , $T_{a1}-T_{a2}$, $T_{h1}-T_{h2}$, T_{a1} et T_{h1} , soit :

$$\Phi_s = -\frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot (Rn + \Phi_o) \cdot \frac{\Delta T_a}{\Delta T_h}$$

$$\Phi_L = - (Rn + \Phi_o) \left(1 - \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{\Delta T_a}{\Delta T_h} \right)$$

$$\text{avec } \Delta T_a = T_{a1} - T_{a2}$$

$$\Delta T_h = T_{h1} - T_{h2}$$

La seule détermination des flux Φ_s et Φ_L ne permet pas une interprétation théorique des échanges ; il est nécessaire à cet effet d'introduire une information nouvelle et moins globale que le flux : le coefficient d'échange H de la culture.

En effet, un flux peut s'exprimer de trois manières différentes :

$$\Phi(z) = K(z) \cdot \frac{dC(z)}{dz} \quad (3a)$$

$$\Phi = H(C_a - C_s) \quad (3b)$$

$$\Phi = \frac{C_a - C_s}{r_a} \quad (3c)$$

La diffusivité turbulente $K(z)$ est une caractéristique des échanges turbulents au niveau z alors que le coefficient d'échange H présente un intérêt plus général car il caractérise les échanges pour toute la tranche d'atmosphère comprise entre le sommet de la végétation et le niveau de référence z_r .

Le coefficient d'échange H ou son inverse r_a , apparaissent alors comme une caractéristique du flux pour des conditions atmosphériques données (vitesse du

vent, type de turbulence) et des conditions de surface données (type de culture, rugosité). H est alors un paramètre indispensable à la modélisation des échanges au-dessus d'une culture.

La méthode aérodynamique permet de définir ce coefficient d'échange H . En effet, en régime turbulent et pour des conditions thermiques voisines de la neutralité, le profil de vent au-dessus d'une surface uniforme est donné par la loi logarithmique :

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \cdot \text{Log} \cdot \left(\frac{z + z_0 - D}{z_0} \right) \quad (4)$$

L'ajustement à cette loi de profils de vent expérimentaux, permet une détermination des paramètres de surface u^* , z_0 et D .

L'expression du coefficient d'échange H en fonction des paramètres de surface est la suivante :

$$H = k u^* \cdot \frac{1}{\text{Log} \frac{z_r - D}{h - D}} \quad (5)$$

L'utilisation de la méthode du bilan d'énergie permet la détermination des différents flux d'énergie et de plus, l'emploi simultané de la méthode aérodynamique permet l'analyse et la modélisation des échanges d'énergie au-dessus d'un couvert.

2. — SITE ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les mesures ont été effectuées au Centre Orstom d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire, 5° de latitude nord). Le climat général de la région est de type tropical humide à deux saisons des pluies. Le régime des vents est un régime de brise de mer (vents de secteur S. S.-O.), renforcé en saison des pluies par les alizés et contrarié en période d'harmattan par des vents de secteur N.E.

Le couvert végétal étudié est un gazon (*Paspalum notatum*). Les résultats présentés au cours de cette étude concernent un gazon ayant un développement vertical supérieur à 0,15 m ($h_{\text{max}} = 0,20$ m) ; aussi, les 4 ou 5 jours suivant la coupe ($h_{\text{min}} = 0,10$ m) sont exclus de l'analyse.

La parcelle d'étude de superficie un hectare est irriguée en moyenne tous les 3 ou 4 jours. Les mesures ont eu lieu en saison sèche (janvier-février) pendant la phase diurne de la végétation et elles ont été réalisées sous forme de profils établis sur 30 minutes. Cette durée de 30 minutes correspond sensiblement :

- à une borne supérieure pour des considérations théoriques (régime permanent),
- à une borne inférieure pour des raisons pratiques : résolution de l'évapotranspiromètre pesable et des anémomètres à coupelles utilisés.

a) les mesures de vitesse de vent étaient réalisées avec des anémomètres type Casella ; les tops émis par les capteurs étaient totalisés sur une batterie de compteurs. Le profil de vent était réalisé entre 0 et 6 mètres aux hauteurs suivantes : 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 6 m. La direction du vent était notée à partir d'une girouette appartenant au parc météo voisin.

b) le dispositif utilisé pour la détermination du bilan d'énergie en lui-même était le suivant :

- mesure du rayonnement net par un bilanmètre type Csiro, ventilé et monté à un mètre au-dessus de la culture ;
- mesure du flux de chaleur dans le sol, avec des fluxmètres type Csiro, situés à 0,03 m de profondeur ;
- mesure des gradients de température sèche et humide, avec des thermo-couples Cuivre-Constantan montés dans des psychromètres Assman à ventilation électrique et humectation manuelle toutes les 2-3 minutes. Ces mesures de gradients se faisaient entre

deux niveaux $z_1 = 0,30$ m et $z_2 = 1,00$ m au-dessus de la culture. La référence de température, utile pour la détermination des températures absolues, était située à deux mètres dans le sol ($T_{ref} = 28,7^\circ\text{C} \pm 0,1^\circ\text{C}$);

c) la mesure directe du flux de vapeur d'eau a été réalisée grâce à un évapotranspiromètre pesable, conçu et réalisé au laboratoire (ELDIN, 1970).

Les données autres que celles concernant l'anémométrie étaient collectées soit sur un intégrateur pour le rayonnement net, soit sur enregistreur potentiométrique pour l'ensemble des forces électromotrices.

Les données complémentaires de type météorologique proviennent du parc météo situé à une cinquantaine de mètres de la parcelle expérimentale.

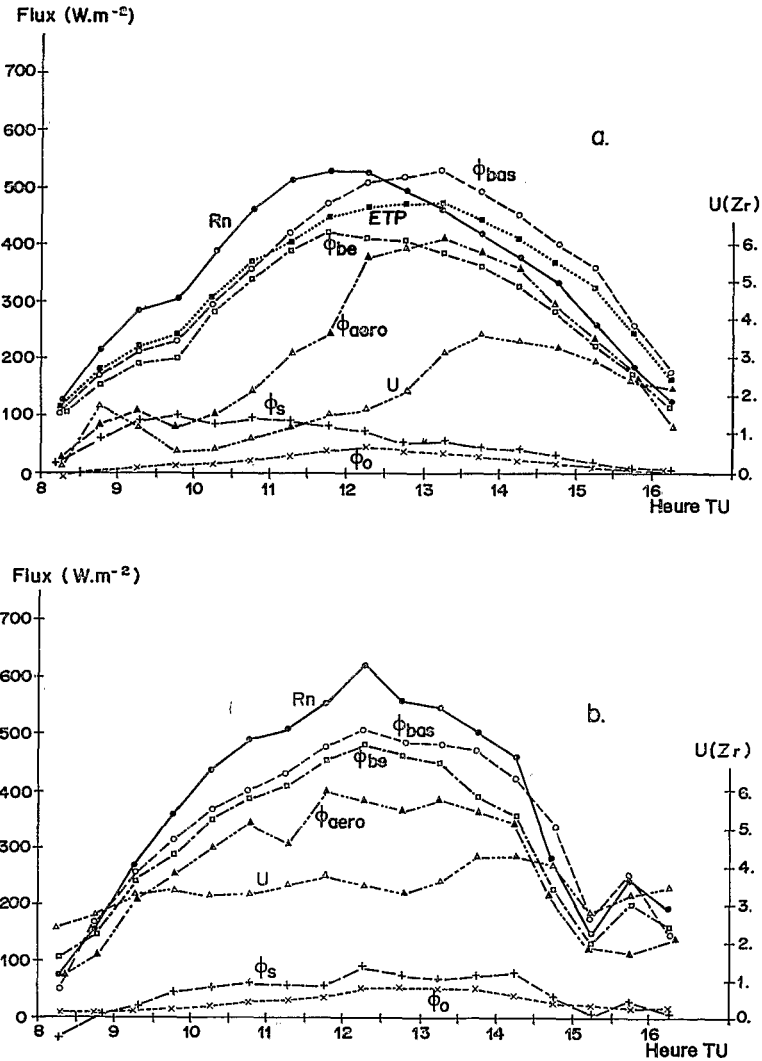


FIG. 1. — Évolution au cours de la journée des différents flux R_n , Φ_s , Φ_L , Φ_o , de la vitesse du vent à 3 mètres et du flux de chaleur latente déterminé par la méthode aérodynamique et par mesure directe :

a) pour une journée d'harmattan (1-2-1975)

b) pour une journée classique de saison sèche (4-2-1975)

3. — ÉVOLUTION ET ÉTUDE DES DIFFÉRENTS FLUX :

Ordre de grandeur et évolution

Les figures 1 (a, b) représentent l'évolution au cours de différentes journées du rayonnement net Rn , du flux de chaleur dans le sol Φ_o , du flux de chaleur sensible Φ_s et du flux de chaleur latente Φ_L déterminé de différentes manières : par la méthode du bilan d'énergie Φ_{BE} , par la méthode aérodynamique Φ_{AERO} et par mesure directe Φ_{BAS} . La figure 2 montre, pour des valeurs intégrées sur la phase diurne de la journée (Rn positif), l'importance du flux de chaleur latente par rapport aux deux autres flux (chaleur sensible et flux de chaleur dans le sol). La valeur 100 affectée au rayonnement net est arbitraire.

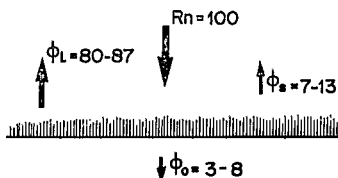


FIG. 2. — Schéma de répartition de l'énergie selon les différents flux pour un gazon irrigué

Estimation du flux de chaleur dans le sol

Avant de passer à l'étude plus approfondie du flux de chaleur latente, l'étude de Φ_o , flux de faible importance au point de vue énergétique par rapport au flux de vapeur d'eau, appelle quelques remarques.

Le flux de chaleur dans le sol est étroitement lié au rayonnement net, relation quasi linéaire, mais de plus, il semble être fonction :

- du stade de développement de la culture,
- de l'état hydrique du sol en surface.

Il existe effectivement une tendance à la décroissance du rapport Φ_o/Rn avec le développement de la culture. A cette décroissance générale se superpose une variation en fonction de l'état hydrique de la surface du sol. Sur un sol humide, au lendemain d'une irrigation, le flux de chaleur dans le sol est plus important, et de plus, l'effet de la sécheresse se fait sentir assez vite.

A l'échelle de la journée, sur la période de végétation envisagée et les conditions d'humidité rencontrées, on peut écrire :

$$\Phi_o = - 0,06 Rn \quad (6)$$

Comparaison des différentes techniques mises en œuvre pour la détermination des flux de vapeur d'eau.

Les graphiques 1 (a, b) montrent, pour deux journées caractéristiques, l'évolution des flux de vapeur d'eau déterminés de trois manières indépendantes :

- Méthode directe par évapotranspiromètre pesable ;

- Méthode du bilan d'énergie;
- Méthode aérodynamique.

Simultanément, nous avons porté la vitesse du vent à 3 mètres.

Sur l'ensemble des conditions météorologiques rencontrées, la méthode du bilan d'énergie sera retenue comme méthode de référence pour la détermination de l'ETRM du gazon à l'échelle de la parcelle ; en effet, c'est la seule méthode qui rassemble les deux qualités suivantes :

- fiabilité dans le temps,
- représentativité de conditions pratiques (mode d'irrigation, niveau de la nappe) existant à l'échelle de la parcelle.

La comparaison entre l'évapotranspiromètre et la méthode du bilan d'énergie met en évidence la faiblesse de l'évapotranspiromètre vis-à-vis des deux qualités énoncées précédemment.

Le matin, l'évapotranspiromètre et la méthode du bilan d'énergie semblent bien concorder mais lorsque la vitesse du vent et le déficit de saturation augmentent, le rapport Φ_{BAS}/Φ_{BE} augmente et devient nettement supérieur à 1 (cf. fig. 3).

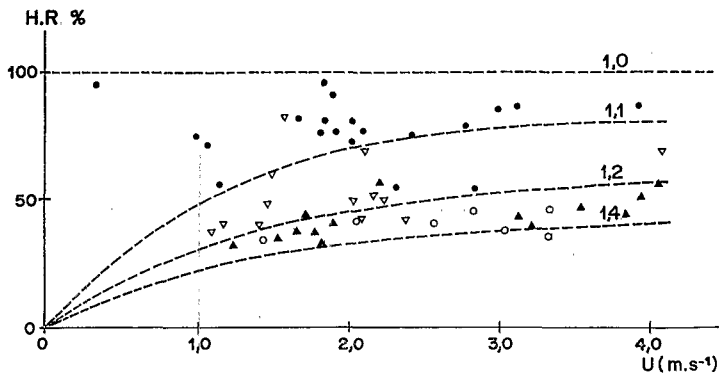


FIG. 3. — Évolution du rapport Φ_{bas}/Φ_{be} en fonction de l'humidité relative HR et de la vitesse du vent à 3 mètres :

$$\begin{aligned}
 1,0 &\leq \Phi_{bas}/\Phi_{be} \leq 1,1 \\
 1,1 &\leq \Phi_{bas}/\Phi_{be} \leq 1,2 \\
 1,2 &\leq \Phi_{bas}/\Phi_{be} \leq 1,4 \\
 \Phi_{bas}/\Phi_{be} &\geq 1,4
 \end{aligned}$$

Ce phénomène semble être dû à deux effets agissant dans le même sens :

— Du fait de l'existence de conditions hydriques différentes (niveau d'eau dans la bascule à 0,60 m et irrigation tous les jours) entre les deux surfaces de mesure lorsque les conditions climatiques deviennent plus sévères ($T_a - T_r$ plus grand, vitesse de vent plus forte) ex. : journée du 1-2-1975-figure 1 a, les réactions des deux surfaces ne seraient pas les mêmes. L'évapotranspiromètre se trouve dans des conditions d'ETRM plus proches de l'évapotranspiration potentielle du gazon définie plus loin et portée sur le graphique 1 a.

Ce seul effet ne peut expliquer toute la différence ; en effet, sur la figure 1 a, on constate que la valeur du Φ_{BAS} dépasse l'ETP gazon.

— Un effet d'advection très locale au niveau de la bascule qui se surajoute au

phénomène précédent. En effet, l'évapotranspiromètre et l'ensemble de la parcelle, mais surtout la zone directement avoisinante à la bascule, ne sont pas irrigués de la même façon; cette pratique culturale crée des gradients de température horizontaux favorisant des transferts latéraux d'énergie sur la bascule.

La validité de la méthode aérodynamique est étroitement liée à la valeur de la vitesse du vent : par vent fort ($u_{3m} = 3-4 \text{ m s}^{-1}$), l'après-midi, en régime de brise de mer, elle donne de bons résultats; par contre, par vent faible (u_{3m} inférieur à $1,5 \text{ m s}^{-1}$), elle est totalement inapplicable même en corrigeant le coefficient d'échange par une fonction du nombre de RICHARDSON, Ri :

$$Ri = \frac{g}{T} \cdot \frac{\Delta T / \Delta z}{(\Delta u / \Delta z)^2}$$

où g représente l'accélération de la pesanteur.

LUMLEY et PANOFKY (1964) propose comme correction du coefficient d'échange :

$$F(Ri) = 7 Ri (1 - 18 Ri)^{-0,25}$$

Lorsque la correction par une fonction du nombre de Richardson n'est pas suffisante, nous devons nous trouver dans des régimes de convection mixte très voisins de la convection libre; il faudrait alors utiliser des modes d'exploitation plus élaborés. Par contre, pour les valeurs de vent intermédiaires, une correction du coefficient d'échange par une fonction de Ri devrait permettre une meilleure coïncidence entre Φ_{BE} et Φ_{AERO} .

La méthode aérodynamique, inutilisable par vent faible selon le modèle employé, reste donc d'un emploi limité pour la détermination des flux en zone équatoriale où la vitesse de vent moyenne est faible.

Il est possible d'augmenter la fiabilité de la mesure directe des flux, en prenant de grandes précautions au niveau de la maintenance du dispositif :

- réduction des effets advectifs,
- meilleure définition de la surface évaporante, la végétation du lysimètre ayant tendance à déborder du périmètre. L'influence de ce phénomène est surtout notable pour de petites surfaces évaporantes.

4. — ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES D'ÉCHANGE DU PASPALUM NOTATUM

Nous avons appliqué la méthode aérodynamique, en particulier la loi logarithmique, à l'ensemble de nos profils de vent. L'hypothèse de neutralité thermique étant assez bien vérifiée, car au-dessus d'une culture irriguée, les gradients de température sont faibles et seuls les profils par vent faible s'écarteront des limites admises; en effet, nous avons dû éliminer les profils pour lesquels la vitesse du vent, à 3 mètres au-dessus de la culture, était inférieure à 1 m s^{-1} , car très souvent ces profils étaient aberrants.

L'exploitation des profils de vent suivant la loi logarithmique a été réalisée numériquement selon une méthode des moindres carrés adaptée et mise au point

par COVEX (1963) et pour laquelle nous avons écrit un programme Fortran-IBM 360. L'ensemble des résultats obtenus sur *Paspalum notatum* est résumé par les figures 4 a, b, c, d :

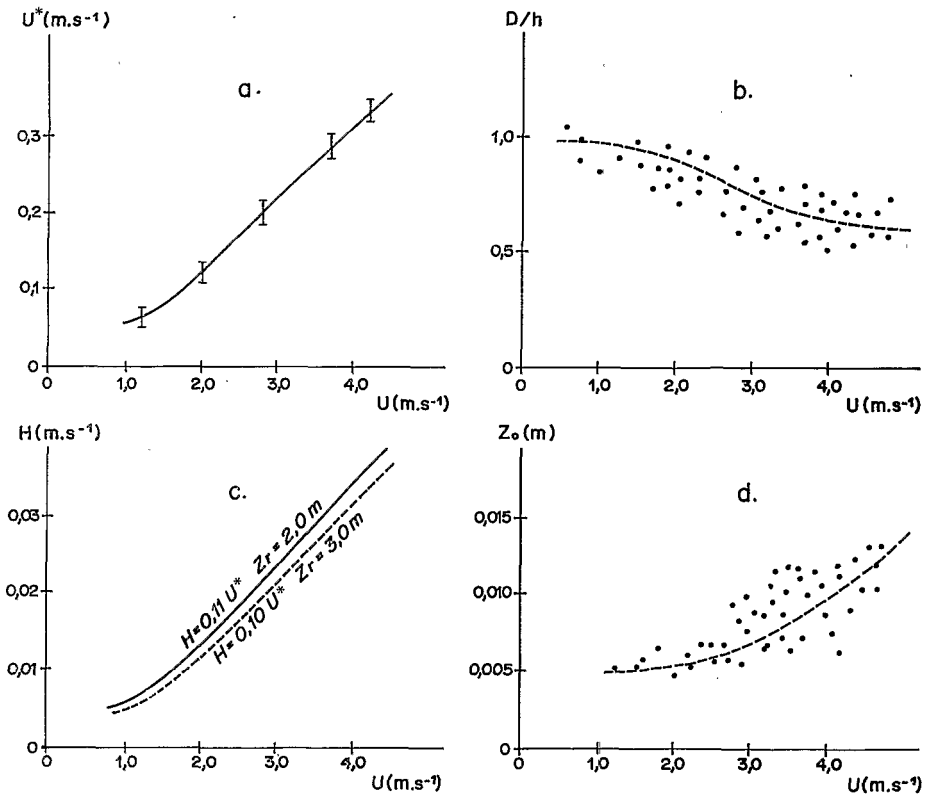


FIG. 4. — Caractéristiques aérodynamiques d'une culture de *Paspalum notatum* :

- Évolution de la vitesse de frottement avec la vitesse du vent au niveau de référence ;
- Évolution du coefficient d'échange H avec la vitesse du vent pour deux niveaux de référence $z_r = 3,0$ m et $z_r = 2,0$ m ;
- Évolution du paramètre de rugosité z_0 avec la vitesse du vent au niveau de référence ;
- Évolution du rapport D/h en fonction de la vitesse du vent au niveau de référence.

— La vitesse de frottement u^* présente une variation pratiquement linéaire pour des vitesses de vent supérieures à 2 m s⁻¹, avec en outre une courbure pour les faibles vitesses. Ce type de variation est semblable à celui trouvé dans la littérature (PERRIER, 1975) quoique la valeur de u^* *Paspalum* reste toujours inférieure aux valeurs trouvées pour des couverts similaires. La précision sur la vitesse de frottement est de l'ordre de $1,2 \cdot 10^{-3}$ m s⁻¹.

Pour un gazon bien développé et pour des vitesses de vent au niveau de référence comprises entre 1,5 m et 4,5 m s⁻¹, la vitesse de frottement peut être estimée par la formule suivante (cf. fig. 4 a) :

$$u^* = 0,097 u(z_r) - 0,07$$

— La hauteur de déplacement D , présente une décroissance avec la vitesse du vent (cf. fig. 4 *b*) mais la liaison semble lâche du fait du manque de précision avec laquelle la hauteur de déplacement D est obtenue. Sur l'ensemble de nos profils et en négligeant l'influence de la vitesse du vent, la valeur moyenne de D est de 0,15 m. Diverses formules empiriques donnent des résultats semblables :

$$\text{STANHILL (1969) : } \text{Log}_{10} D = 0,9793 \text{ Log}_{10} h - 0,1536$$

$$\text{Soit pour } h = 0,20 \text{ m, } D = 0,15 \text{ m}$$

$$\text{MONTEITH (1973) : } D = 0,63 h$$

$$\text{Soit } D = 0,15 \text{ m pour } h = 0,20 \text{ m}$$

— Les deux résultats précédents $u^* = f(u)$ et $D_{\text{moyen}} = 0,15$ m appliqués à la relation (5) définissant H , coefficient d'échange de la culture, permettent d'expliciter la relation $H(u)$ (cf. fig. 4 *a*). Les deux courbes représentent la variation $H(u)$ pour deux niveaux de référence $z_r = 2,0$ m et $z_r = 3,0$ m.

— La hauteur de rugosité z_0 , présente une variation avec la vitesse du vent mais la précision avec laquelle z_0 est obtenue ne permet pas de caractériser la fonction $z_0 = f(u)$ (cf. fig. 4 *d*). En valeur moyenne, on peut écrire :

$$\text{soit : } z_0 = 8 \cdot 10^{-3} \pm 9 \cdot 10^{-4} \text{ m.}$$

$$z_0 = 10^{-2} \pm 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ m.}$$

Cette valeur de z_0 apparaît plus faible que les valeurs obtenues par des formules empiriques :

$$\text{TANNER et PELTON (1960) : } \text{Log } 10 z_0 = 0,997 \times h - 0,883$$

$$\text{Soit pour } h = 0,20 \text{ m, } z_0 = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$\text{MONTEITH (1973) : } z_0 = 0,13 \times h$$

$$\text{Soit } z_0 = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ m pour } h = 0,20 \text{ m}$$

MONTEITH (1973) propose aussi une formule où intervient la structure du couvert par l'intermédiaire de la hauteur de déplacement :

$$z_0 = 0,35 (h-D)$$

$$\text{Soit avec } h = 0,20 \text{ m et } D = 0,15 \text{ m, } z_0 = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

cette dernière formule se rapproche nettement plus des valeurs obtenues sur *Paspalum notatum*.

— L'étude aérodynamique précédente a été réalisée sur un gazon présentant un développement important (quelques jours avant la fauche) ; aussi, les diverses relations et valeurs numériques citées ne seront valables et extrapolables que pour des gazons à développement semblable ($0,15 < h < 0,20$ m).

En conclusion, la détermination de ces paramètres aérodynamiques D , u^* , z_0 et surtout l'étude de leurs variations avec la vitesse du vent et le stade de végétation du couvert vont permettre de caractériser le couvert végétal au point de vue des échanges d'énergie. Ces paramètres sont à la base de toute étude analytique des échanges et de leur modélisation ultérieure.

5. — ÉTUDE ANALYTIQUE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE MAXIMALE D'UN GAZON

L'exploitation des résultats obtenus, pour des valeurs instantanées, par la méthode aérodynamique d'une part et du bilan d'énergie d'autre part, va nous permettre l'étude de l'influence des différents facteurs climatiques sur l'évapotranspiration d'un gazon ; au préalable, il fallait se définir un modèle théorique d'évapotranspiration.

Choix d'un modèle d'évapotranspiration potentielle

PERRIER (1975) propose deux modèles d'évapotranspiration potentielle :

— un modèle ETP_o, ne faisant intervenir qu'une résistance à la diffusion r_a , dite résistance atmosphérique. Ce modèle correspond à une surface à saturation sans développement vertical. Ce modèle conduit à une formule du type PENMAN :

$$ETP_o = \frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \Phi_o) + \frac{\gamma}{P' + \gamma} E_a \quad (7)$$

E_a étant défini comme suit :

$$E_a = \frac{LM}{RT} \cdot P' \cdot H(T_a - T_r) \quad (7 \text{ bis})$$

avec H = coefficient d'échange obtenu à partir d'une mesure de vent au niveau z_r et de la relation présentée sur la figure 4 c.

— un modèle ETP plus complexe à deux résistances, r_a et r_o , correspondant au cas d'une structure à développement vertical et dont toutes les surfaces sont à saturation ; r_o traduisant l'effet de la structure de la surface sur la diffusion de l'eau.

L'expression de ETP est alors :

$$ETP = \frac{ETP_o}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{r_o}{r_a}} \quad (8)$$

avec ETP_o, défini comme précédemment.

Selon PERRIER (1975), la résistance de structure d'un gazon serait comprise entre 0 et 5 s m⁻¹. La valeur de r_o déterminant le choix de l'un ou l'autre des modèles d'évapotranspiration, nous nous proposons de déterminer cette résistance de structure r_o . Nous avons, lorsque toutes les surfaces du gazon sont à saturation (rosée, après pluie), d'une part calculé la valeur de ETP_o par la formule de PENMAN (7), et d'autre part, retenu les valeurs correspondantes du flux de chaleur latente mesuré par la méthode du bilan d'énergie, soit ETP.

Il est alors possible, à partir des équations 7 et 8 d'explicitier r_o , sur 8 profils retenus (5 avec rosé, 3 après pluie) ; les résultats sont les suivants :

$$r_o = 2,5 \pm 4,0 \text{ s m}^{-1}$$

ce qui, compte tenu de la dispersion, ne nous permet pas de dire que r_o est différent de zéro. Il faut tout de même signaler que les profils retenus avec la rosée sont à l'origine de la grande dispersion, car effectivement, l'on travaille avec des flux faibles et donc une précision faible. Si l'on retenait les profils obtenus après la pluie, réalisés de 11 h 30 à 12 h 30, la valeur de r_o deviendrait significativement différente de zéro.

Vu la précision de notre dispositif de mesure, il semble raisonnable de choisir un modèle d'ETP à une seule résistance r_a .

Etude analytique de l'évapotranspiration réelle maximale d'un gazon

L'évapotranspiration potentielle $ETP_o(r_o = 0)$ peut être considérée comme un paramètre climatique de référence, au r_a près. Mais pratiquement, si l'on veut rendre compte de l'évapotranspiration d'une culture pour l'ensemble des conditions climatiques rencontrées, il faut parler d'évapotranspiration réelle et compléter le modèle précédent par l'introduction d'une nouvelle résistance r_s (PERRIER, 1975).

L'évaporation réelle, dans le cas où r_o est nulle, s'écrit comme précédemment :

$$ETR = \frac{ETP_o}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{r_s}{r_a}} \quad (9)$$

Dans le cadre de cette étude, nous avons travaillé sur un gazon irrigué régulièrement pour lequel l'alimentation en eau de la culture était sensiblement la même au cours de l'expérience. Cette alimentation étant la moins limitante possible, nous parlerons d'évapotranspiration réelle maximale ETRM.

Variation journalière de la résistance stomatique

La figure 5 a représente la variation au cours de la journée de la résistance stomatique r_s et de la résistance critique r_c , r_c étant définie comme la résistance stomatique qui correspondrait à une ETR égale au terme radiatif $\frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \Phi_o)$ de l'équation de PENMAN, soit ;

$$r_c = \frac{LM}{RT} \cdot \frac{(T_a - T_r)}{(Rn + \Phi_o)} \cdot (P' + \gamma)$$

DAUDET et PERRIER (1966) ont montré par ailleurs, l'intérêt de cette résistance.

La résistance stomatique est calculée à partir de la relation 9 :

$$r_s = \frac{P' + \gamma}{\gamma} \left[\frac{ETP_o}{ETRM} - 1 \right] \cdot r_a$$

Dans le cadre de cette analyse, le flux de chaleur latente déterminé par la méthode du bilan d'énergie Φ_{BE} a été retenu comme valeur de ETRM. Les valeurs et les dispersions portées sur le graphique correspondent à 8 journées de mesures.

On constate que :

— r_c varie au cours de la journée : elle est minimale en milieu de journée (Rn maxi), et maximale le matin et le soir (Rn de l'ordre de zéro).

— Lorsqu'il n'y a pas de rosée (courbe en pointillés), la végétation présente le matin une fermeture stomatique ; vers 10 heures TU, il y a une ouverture stomatique qui est très probablement d'origine photique. La courbe pleine le matin, représente plusieurs journées avec rosée ; dans ce cas, le gazon évapore pratiquement comme si la résistance stomatique était nulle ; par ailleurs, il y a régulation stomatique vers 13 heures et qui va en augmentant vers le soir.

— r_s est toujours inférieure à la résistance critique ; pratiquement, l'évapotranspiration augmentera avec la vitesse du vent et ceci aux dépens du flux de chaleur sensible (PERRIER *et al.*, 1975).

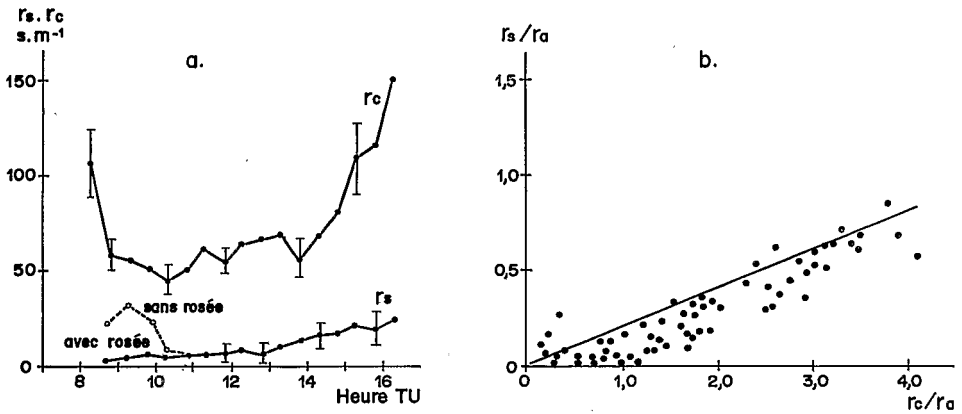


FIG. 5. — Résistances caractéristiques du couvert

- a) Évolution au cours de la journée des résistances critiques r_c et stomatiques r_s du couvert (moyenne sur 8 journées de mesure)
 b) Évolution du rapport r_s/r_a en fonction du rapport r_c/r_a

Au niveau de l'interprétation des variations de l'ETRM, ce n'est pas r_s en elle-même qui est intéressante mais la valeur du rapport $\frac{r_s}{r_a}$; en effet, suivant la relation (8), nous avons :

$$ETRM = f\left(Rn + \Phi_o, Ea, \frac{r_s}{r_a}\right)$$

Compte tenu, d'une part, des variations de r_s au cours de la journée mises en évidence sur le graphique et d'autre part, de l'évolution journalière de r_a liée à la vitesse du vent, il semble intéressant de corrélérer le rapport $\frac{r_s}{r_a}$ aux différents paramètres climatiques Rn , $T_a - T_r$, u , soit chercher une relation :

$$\frac{r_s}{r_a} = f(Rn + \Phi_o, T_a - T_r, u)$$

Dans un premier temps, il est possible de regrouper ces paramètres en un seul, plus synthétique, qui peut être le rapport r_c/r_a .

En effet :

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{E_a}{Rn + \Phi_o} \cdot \frac{P' + \gamma}{P'}$$

La figure 5 b représente la variation du rapport $\frac{r_s}{r_a}$ en fonction de r_c/r_a .

En première approximation, $\frac{r_s}{r_a}$ peut être ajusté à la relation :

$$\frac{r_s}{r_a} = 0,18 \frac{r_c}{r_a} = 0,239 \frac{E_a}{Rn + \Phi_o}$$

La relation (9) prend alors la forme :

$$\text{ETRM} = f'(Rn + \Phi_o, E_a)$$

Soit en explicitant $f'(Rn + \Phi_o, E_a)$:

$$\text{ETRM} = \frac{\frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \Phi_o) + \frac{\gamma}{P' + \gamma} E_a}{1 + 0,239 \cdot \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{E_a}{Rn + \Phi_o}} \quad (9 a)$$

La figure 6 représente, en fonction de $\frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \Phi_o)$, deux types de résultats :

— ETRM calculées suivant la formule 9 a pour différentes valeurs de E_a ($E_a = 0, 100, 200, 500, 1\ 000 \text{ W m}^{-2}$) : ce sont les courbes en pointillés. La courbe A représente l'enveloppe des ETRM calculées pour les conditions expérimentales rencontrées et caractérisées par :

$$\frac{r_c}{r_a} \text{ maxi} = 4,2$$

soit

$$E_{a \text{ maxi}} = 3,15 (Rn + \Phi_o) \quad (9 b)$$

— les valeurs expérimentales de ETRM obtenues par la méthode du bilan d'énergie et les différentes droites de régression (courbes pleines) calculées à partir de ces données.

Il existe une bonne concordance entre les deux résultats : *primo*, la dispersion expérimentale correspond sensiblement à la dispersion prévue par les relations 9 a et 9 b ; *secundo*, les valeurs obtenues par temps d'harmattan (E_a fort) se placent dans la zone supérieure du nuage de points et celles obtenues par temps humide

(E_a faible) se situent au voisinage de $\frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \Phi_o)$.

La détermination de l'ETRM à partir du modèle défini par la relation 9 a nécessite, d'une part la connaissance de $(Rn + \Phi_o)$ et d'autre part de E_a . Or E_a , est un paramètre difficile à déterminer en pratique ; aussi, il serait intéressant de pouvoir l'estimer à partir d'une mesure plus simple.

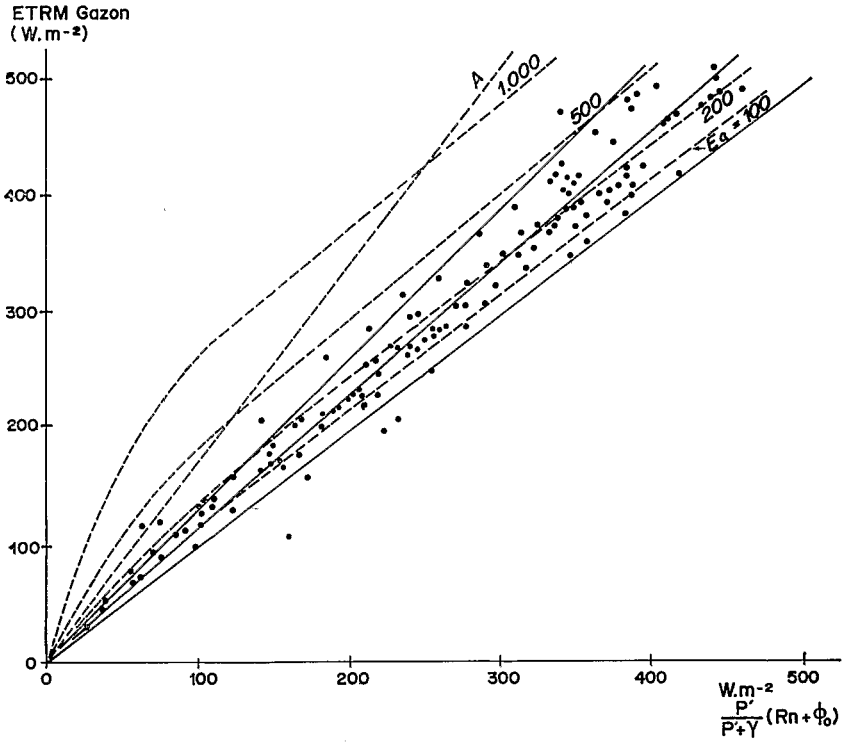


FIG. 6. — Évolution de l'ETRM instantanée du Paspalum notatum en fonction du terme radiatif de l'ETP Penman

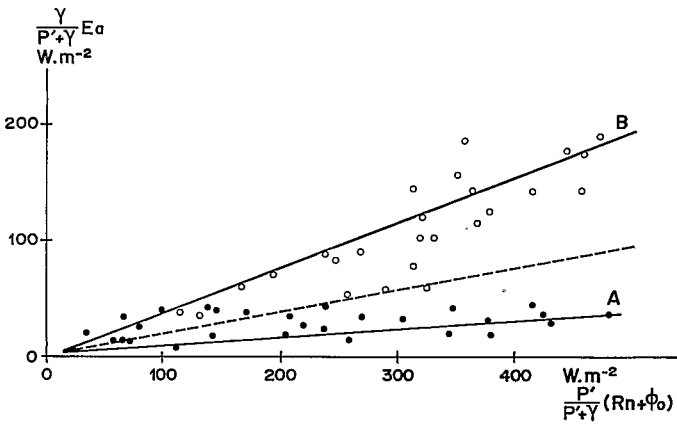


FIG. 7. — Évolution pour des valeurs instantanées du terme convectif $\frac{\gamma}{P'+\gamma} E_a$ en fonction du terme radiatif de l'ETP Penman pour deux types de masse d'air :

B : masse d'air sec saharienne
A : masse d'air humide océanique

La figure 7 montre la variation du terme convectif $\frac{\gamma}{P' + \gamma} E_a$ en fonction du terme radiatif $\frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \Phi_0)$ de la formule de PENMAN. Il existe une relation entre ces deux facteurs, mais il y a aussi une seconde source de variation caractérisée sur la figure par les droites A et B : la masse d'air, A représentant la masse d'air humide, et B, la masse d'air sec (harmattan).

D'où
$$E_a = f(Rn, \text{Masse d'air})$$

En première approximation, pour une masse d'air donnée, il est possible d'estimer E_a à partir d'une relation linéaire du rayonnement net. Nous avons obtenu :

$$\frac{\gamma}{P' + \gamma} E_a = k_1 \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \Phi_0)$$

Les valeurs de k_1 étant :

masse d'air humide	$0 < k_1 < 0,07$
masse d'air sec	$k_1 = 0,35$
valeur moyenne	$k_1 = 0,20$

Appliquons la relation linéaire $E_a = f(Rn + \Phi_0)$ ci-dessus au modèle d'ETRM défini par l'équation 9 a.

Soit :

$$\text{ETRM} = k \frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \Phi_0) \quad (10)$$

le coefficient k caractérisant la masse d'air en présence au niveau du site de mesure.

Les valeurs expérimentales du coefficient k , pour le site d'Adiopodoumé, sont les suivantes :

- masse d'air sec (Harmattan) $k = 1,25$
- masse d'air humide $k = 0,98$
- valeur moyenne pour la période de mesure $k = 1,10$

La valeur 0,98 obtenue avec une masse d'air humide n'est pas statistiquement différente de 1,00.

PRIESTLEY et TAYLOR (1972) citent des valeurs de k obtenues sous différentes conditions :

- Wangara Data : $k = 1,33 \pm 0,21$
- Fluxatron Measurements (Dyer) : $k = 1,08 \pm 0,01$
- University of Wisconsin : $k = 1,30 \pm 0,03$
- Csiri lysimeters : $k = 1,34 \pm 0,05$

Les valeurs obtenues en basse Côte d'Ivoire se situent dans cet éventail de données. Une relation linéaire du type $\text{ETRM} = k \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (Rn + \Phi_0)$ présente un intérêt certain en Côte d'Ivoire où seules, deux masses d'air (donc 2 coefficients k) sont en présence ; la linéarité de la relation étant intéressante pour l'intégration dans le temps.

6. — DÉTERMINATION PRATIQUE DE LA CONSOMMATION EN EAU DU PASPALUM NOTATUM EN CÔTE D'IVOIRE

En pratique, de nombreux auteurs (PENMAN, TURC, BROCHET et GERBIER) ont proposé pour des échelles de temps du mois ou de la décade des formules du type :

$$\begin{aligned} \text{ETRM} &= kR_g + b \\ \text{ETRM} &= kR_g + b \text{ Piche} \end{aligned}$$

Ces différentes formules sont des adaptations de la formule théorique de PENMAN (éq. 7) à des échelles de temps utilisées pratiquement. Nous allons procéder à cette adaptation à partir de la formule d'ETRM définie au paragraphe précédent :

$$\text{ETRM} = k' \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \Phi_o) \quad (10)$$

Compte tenu de la relation linéaire existant entre ETRM et $(R_n + \Phi_o)$ pour une masse d'air donnée, l'intégration dans le temps de cette relation donnera une relation linéaire de même type.

Aussi, lorsque pour des bases de temps de la journée, de la décade et du mois, les données de rayonnement net et de flux de chaleur échangé par conduction avec le sol sont disponibles, la relation (10) donnera la meilleure estimation de ETRM gazon (les valeurs du coefficient k' seront explicitées dans la suite du texte). Mais la relation (10) renferme deux termes qui ne sont pas couramment mesurés : R_n et Φ_o ; aussi, nous avons dû estimer le rayonnement net à partir d'une mesure plus simple : le rayonnement global R_g .

Les résultats pour Adiopodoumé sont les suivants (MONTENY et GOSSE, 1975) (cf. figure 8) :

$$R_n = 0,803 R_g - 25$$

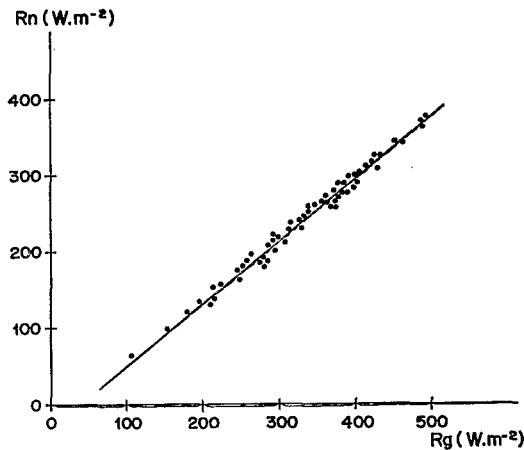


FIG. 8. — Phase diurne du rayonnement net d'un gazon en fonction du rayonnement global à Adiopodoumé

Les valeurs de rayonnement net correspondent à la phase diurne de ce dernier. La précision de cette relation est très bonne (coefficient de corrélation $r = 0,987$) et cette estimation n'introduira aucune perturbation dans le modèle ; de plus, au paragraphe 3 b, nous avons trouvé qu'à l'échelle de la journée :

$$\Phi_o = -0,06 Rn$$

D'où

$$Rn + \Phi_o = 0,755 Rg - 23,5$$

Soit

$$ETR_M = k' \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (0,755 Rg - 23,5) \quad (II)$$

expression dans laquelle le coefficient k' intègre deux variables :

1° Le rapport r_s/r_a dont nous avons défini la loi de variation au paragraphe précédent en fonction de r_o/r_a pour l'ensemble des conditions météorologiques rencontrées pendant l'expérience. Pour la suite de l'étude, nous adopterons comme hypothèse que ce rapport suit la même loi au cours de l'année, ce qui pratiquement équivaut à dire que le gazon, dans les conditions rencontrées en basse Côte d'Ivoire, ne connaît pas de phase de repos végétatif.

2° La liaison existant entre le terme convectif E_a et le terme radiatif Rn pour une masse d'air donnée.

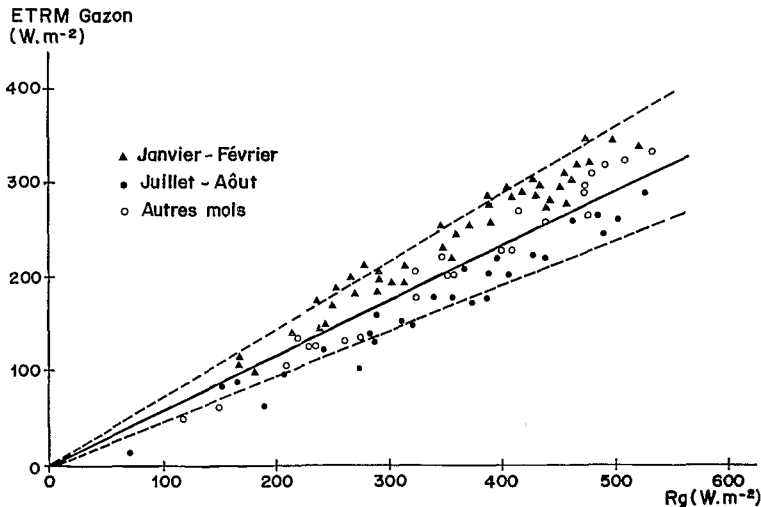


FIG. 9. — Évolution de l'ETRM journalière du *Paspalum notatum* en fonction du rayonnement global

Avec l'hypothèse adoptée précédemment, les variations de k' seront donc liées au déficit de saturation ($T_a - T_r$) qui caractérise la masse d'air. En effet, comme le montre la figure 9, les journées de janvier (air sec saharien) sont au-dessus de l'ensemble des données alors que les journées de saison des pluies (juillet) sont à la limite inférieure. Compte tenu de la valeur moyenne de $\frac{P'}{P' + \gamma}$ égale à 0,75, le

coefficient k' prend les valeurs extrêmes et moyennes suivantes pour des valeurs journalières de ETRM et R_g :

$$k'_{\text{maxi}} = 1,27$$

$$k'_{\text{mini}} = 1,06$$

$$k'_{\text{moyen}} = 0,91$$

Le coefficient $k'_{\text{mini}} = 0,91$, inférieur aux valeurs attendues, semblerait montrer que l'hypothèse concernant le rapport r_s/r_a n'est pas strictement vérifiée en pleine saison des pluies.

Sur une période de temps de l'ordre du mois, il est possible de préconiser la relation (II) avec un coefficient k' , correspondant au k'_{moyen} journalier = 1,06. En effet, nous avons appliqué la relation (II) avec $k' = 1,06$ aux valeurs moyennes du rayonnement global d'Adiopodoumé et nous avons comparé l'ETRM ainsi calculée à l'évapotranspiration calculée selon TURC (1961) et à la mesure par évapotranspiromètre pesable (cf. fig. 10). Il existe une bonne concordance entre les trois manières d'estimer l'ETRM gazon (l'ETP au sens de TURC pouvant être considérée comme l'ETRM gazon).

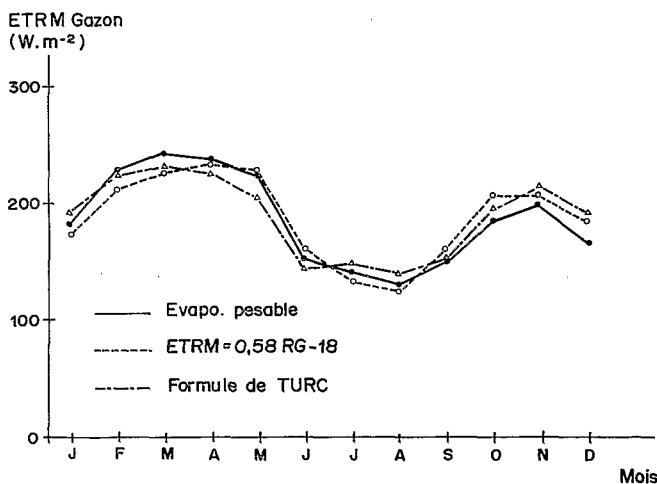


FIG. 10. — Comparaison de l'ETRM mensuelle du gazon déterminé de différentes manières :
mesurée à l'évapotranspiromètre pesable
estimée par la formule de TURC
estimée par la formule $ETRM = 0,58 R_g - 18$

Pour la décade et le mois, il est possible, compte tenu de la précision requise au niveau de certaines applications agronomiques, de se contenter d'une estimation du rayonnement global à partir d'une corrélation entre le rayonnement global et la durée d'insolation :

$$\frac{R_g}{I_{ga}} = a + b \frac{S}{S_{\text{maxi}}}$$

Cette formule (relation II) donnant l'évapotranspiration réelle maximale d'un gazon établie pour un lieu donné, peut être étendue à l'ensemble de la Côte d'Ivoire, en ayant au préalable, réalisé trois études :

— étude de la liaison existant entre le rapport r_s/r_a et les paramètres climatiques ($R_n, T_a - T_r, u$),

- étude de la relation $E_a = f(Rn, \text{masse d'air})$,
- étude de la relation $Rn = f(Rg)$.

Ces études sont nécessaires pour ajuster les différents coefficients. Dans le cas précis de la Côte d'Ivoire, elles devront être réalisées selon un axe Nord-Sud.

CONCLUSION

L'ETRM du gazon est encore considérée comme valeur de référence pour l'évapotranspiration ; aussi, une bonne connaissance de son déterminisme, donnée par des études analytiques, permet d'en mieux analyser les variations et d'en prévoir l'évolution dans le temps et l'espace. Il semble, malgré tout, qu'elle puisse avoir un intérêt plus général ; en effet, selon PERRIER, il semblerait qu'en climat humide (E_a faible) et à vitesse de vent égale, lors du passage d'un gazon à une culture haute classique (Panicum, Maïs...), le poids des résistances r_o et r_s serait prépondérant et alors :

$$\text{ETRM}_{\text{culture haute}} \leq \text{ETRM}_{\text{gazon}}$$

L'ETRM gazon peut alors être considérée comme l'enveloppe des ETRM des cultures hautes. Dans certains cas, cette borne supérieure de la consommation en eau est suffisante pour l'utilisateur mais il est bien évident qu'il faudra essayer d'approcher au plus près l'ETR de la culture lorsque le facteur réserve en eau va devenir limitant (ex. zone sahélienne).

Par ailleurs, cette étude nous a permis de mettre en évidence l'importance des phénomènes radiatifs dans l'évapotranspiration. Il apparaît donc préférable et surtout plus aisé de maintenir en réseau des mesures de rayonnement net ou global dans le cas où la relation entre Rg et Rn est bonne plutôt que des mesures avec évapotranspiromètres qui s'avèrent peu fiables à l'usage.

Il faut souligner, en plus, l'importance de l'étude de l'évolution du rapport r_s/r_a au cours du développement de la végétation, car il permet, d'une part, de suivre l'évolution du rapport ETR/ETRM et d'autre part de définir les stades critiques de la culture.

Reçu pour publication en avril 1976.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement le personnel de la Station de Bioclimatologie de l'I.N.R.A. (C.N.R.A., Versailles) et plus précisément M. PERRIER dont les nombreux conseils et suggestions nous ont permis de réaliser ce travail.

SUMMARY

EVAPOTRANSPIRATION AND AERODYNAMIC PARAMETERS OF A LAWN IN AN EQUATORIAL HUMID COUNTRY

The energy balance method is used to determine the different energy fluxes (sensible and latent) above a lawn in an equatorial humid country. The latent heat flux measured by different methods are compared. The simultaneous use of the energy budget and aerodynamic methods

enables an explanation of the variations in the latent heat flux in terms of a changing resistance. The importance of the net radiation in this process is stressed. Formulas giving the maximum actual evapotranspiration for daily and monthly periods are given.

ZUSAMMENFASSUNG

EVAPOTRANSPIRATION UND AUSTAUSCHEIGENSCHAFTEN EINES RASENS UNTER FEUCHTEM ÄQUATORIALKLIMA

Die Methode der Energiebilanz ist gebraucht, um die verschiedenen (wahrnehmbaren und latenten) Energieströme an einem Rasen in äquatorialer Umwelt zu bestimmen. Daneben wurde der so erzielte latente Wärmestrom mit den durch andere Techniken erzielten Strömen verglichen. Der gleichzeitige Gebrauch der Energiebilanzmethode und der Aerodynamikmethode erlaubte, die Schwankungen des latenten Wärmestroms als Widerstände zu erklären und die Bedeutung der Strahlungserscheinungen klarzustellen. Formeln, die die maximale tatsächliche Evapotranspiration eines Rasens liefern, werden für tägliche und monatliche Zeitabschnitte vergestellt.

РЕЗЮМЕ

Эвапотранспирация и характеристики обмена происходящего в газоне во влажном экваториальном климате.

Г. ГОСС.

Метод баланса энергии применялся для определения разных потоков энергии (чувствительной и латентной) на уровне газона в экваториальной среде. Кроме того, латентный поток тепла, полученный таким образом, сравнивался с потоками полученными с помощью других технологий. Совместное применение аэродинамического метода и метода баланса энергии, позволило об'яснить в терминах устойчивости, изменения латентного потока тепла, и выявить важность явлений излучения. Предлагаются формулы реальной максимальной эвапотранспирации, выведенные на базе одного дня и одного месяца.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- COVEY W., 1963. A method for the computation of logarithmic wind profile parameters and their standard errors. In « *The energy budget at the earth's surface* », 28-32.
- DAUDET F. A., PERRIER A., 1968. Étude de l'évaporation ou de la condensation à la surface d'un corps à partir du bilan énergétique. *Rev. Gen. Thermique*, 7, 76, 353-364.
- ELDIN M., 1970. Évapotranspiromètre à bascule mécanique enregistreuse. In *Technique d'étude des facteurs physiques de la biosphère*. 273-279, I.N.R.A., Édit. Paris.
- LUMLEY, PANOFKY, 1964. *The structure of turbulence*. New York Interscience Édit., 239 p.
- MONTENY B., GOSSE G., 1975. Analyse et estimation du rayonnement net d'une culture de *Panicum maximum* en zone subtropicale humide. *Ecologia Plantarum* sous presse.
- PERRIER A., 1975. Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. I. L'évaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles. *Ann. agron.*, 26 (1), 1-18. II. Expressions et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface mince. *Ann. agron.* III. Évapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. *Ann. agron.*, 26 (3), 229-243.

- PERRIER A., ITIER B., BERTOLINI J.-M., BLANCO DE PABLOS, 1975. Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture. Exemples d'application. *Ann. agron.*, **26** (1), 19-40.
- PERRIER A., SEGUIN B., 1970. Méthodes et techniques de détermination des coefficients de transferts et des flux dans l'air. In *Technique d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, 425-445. I.N.R.A., Édit. Paris.
- PRIESTLEY C. M. B., TAYLOR R. J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly weather Review*, **100** (2), 81-92.
- TANNER C. B., PELTON W. L., 1960. Potential evapotranspiration estimate by the approximate energy balance method of PENMAN. *J. Geophys. Res.*, **65**, 3391-3413.
- TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **12**, 13-49.
-

ÉVAPOTRANSPIRATION
ET CARACTÉRISTIQUES D'ÉCHANGE
D'UN GAZON EN CLIMAT ÉQUATORIAL HUMIDE

G. GOSSE*

*Office de la Recherche scientifique et technique Outre-Mer,
Centre de Recherches d'Adiopodoumé,
Côte d'Ivoire*

Annales agronomiques
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, 75007 Paris

17 FEV. 1978
O. R. S. T. O. M.
Collection de Référence
n° B 9037 BBV.