

4 NOV. 1983



O. R. S. T. O. M. Fonds Documentaire

N° : 3629ex1

Cote : B

Analyse et estimation du rayonnement net d'une culture de *Panicum maximum* en zone tropicale humide

B. MONTENY* et G. GOSSE*

RÉSUMÉ

Des mesures de rayonnement net effectuées sur un couvert de *Panicum maximum*, en milieu équatorial humide, ont mis en évidence deux faits importants pour ces régions :

- Importance du bilan de courtes longueurs d'onde et surtout du rayonnement global.
- Faibles variations du bilan de grandes longueurs d'onde.

Ces deux constatations permettent d'utiliser une relation du type :

$$R_n = f(R_G).$$

Les résultats obtenus sont comparés aux relations classiques citées dans la littérature. L'excellente corrélation, existant entre R_n et R_G , permet une estimation du rayonnement net à partir d'une mesure plus simple.

SUMMARY

Measurements of the net radiation made above a *Panicum maximum* canopy in a humid equatorial country, show two important results:

- The importance of short wave radiation in the net radiation budget.
- The variations in the long wave radiation are small.

These two results enable the use of a relation such as:

$$R_n = f(R_G).$$

The experimental results obtained are compared to the classical relations found in the literature. The good correlation between net and global radiation permits an estimation of the net radiation from the more easily determined global radiation.

* Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopo Doumé, B.P. V 51, Abidjan, Côte-d'Ivoire.

29 OCT. 1976

O. R. S. T. O. M.₁₂

Collection de Référence

n° 8402

Bot

B3629ex1

3629
ex1
B

1. INTRODUCTION

L'énergie solaire est un des moteurs de l'activité biologique d'un écosystème végétal, notamment en ce qui concerne la photosynthèse et la régulation stomatique. De nombreuses études sur l'utilisation de l'énergie solaire par une culture en zone tempérée ont permis des améliorations de la production de matière sèche ainsi que des réductions de la consommation en eau.

Le bilan radiatif d'un couvert ou rayonnement net s'écrit :

$$(1) \quad R_n = (1 - \alpha) R_G + \varepsilon (R_a - R_T).$$

Le but de ce travail est, dans un premier temps, d'analyser en zone subtropicale humide les différentes sources d'énergie d'origine climatique d'une part et les pertes d'énergie d'origine culturale ou végétale d'autre part qui composent le rayonnement net. Nous soulignerons à cette occasion les incidences agronomiques que l'on peut tirer de cette étude.

Puis nous dégagerons des relations statistiques du type

$$(2) \quad R_n = k R_G + l.$$

Ces relations permettent une estimation du rayonnement net, avec souvent une précision suffisante pour des applications agronomiques, à partir de mesures plus simples et généralisées au niveau de réseaux météorologiques classiques. Dans des régions où la liaison entre l'évapotranspiration et le rayonnement net est très forte, ces relations statistiques permettent aussi une estimation des besoins en eau des cultures.

2. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

2.1. SITE DE MESURES

Les mesures ont été effectuées au centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé (5° latitude Nord) à 20 km à l'Ouest d'Abidjan (RCI) sur différents types de couverts.

Le climat général de la basse Côte-d'Ivoire est de type tropical humide à deux saisons des pluies (mai à juillet et octobre-novembre).

Les campagnes de mesures ont eu lieu pendant la grande saison sèche pour diverses raisons :

- plus grande stabilité des situations météorologiques;
- c'est la période qui d'un point de vue agronomique présente les potentialités les plus grandes et les besoins en eau les plus intenses (*fig. 1*).

2.2. APPAREILLAGE SOLARIMÉTRIQUE

L'appareillage solarimétrique était le suivant :

— pour le rayonnement global, une thermopile Eppley équipée de filtres $R_G 2$, $R_G 8$. Le rayonnement diffus est obtenu en occultant la thermopile à une distance de 0,8 m;

— pour le rayonnement réfléchi par la surface, une thermopile Kipp et Zonen montée en position inversée à 1 m au-dessus de la surface.

Pluviométrie mensuelle
moyenne sur 27 ans (en mètres)

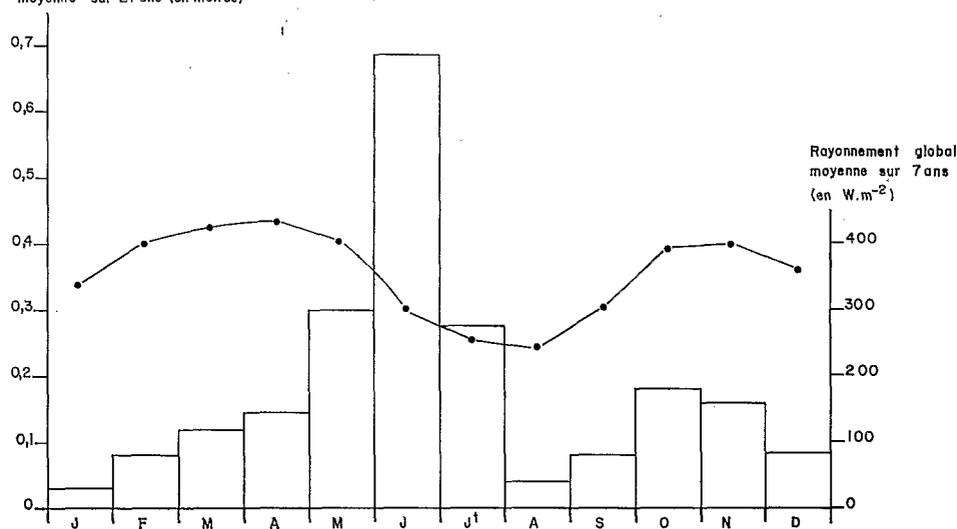


FIG. 1. — Pluviométrie et rayonnement global moyens à Adiopodoumé.

Le signal électrique des différents capteurs était soit enregistré pour les valeurs instantanées, soit intégré pour les valeurs horaires et journalières.

Les données instantanées retenues correspondent à des ciels clairs ou en grande partie dégagés; par contre les valeurs intégrées n'ont pas fait l'objet de discrimination en fonction de l'état d'ennuage du ciel.

2.3. TYPE DE COUVERTS UTILISÉS

Les mesures ont été effectuées sur deux couverts :

- un sol nu;
- une culture fourragère irriguée de *Panicum maximum* (variété O.R.S.T.O.M. K 187).

Les observations sur *Panicum maximum* ont été effectuées durant deux cycles de végétation successifs.

Deux propriétés ont été retenues afin de caractériser le couvert végétal :

- l'indice foliaire *IF*;
- la hauteur du couvert *h*.

On peut remarquer (*fig. 2*) le développement rapide en hauteur après la fauche dû à la sortie de feuilles érigées déjà présentes dans la gaine de la tige au moment de la coupe. Puis cette hauteur varie peu durant les 15 jours suivants qui correspondent à une phase

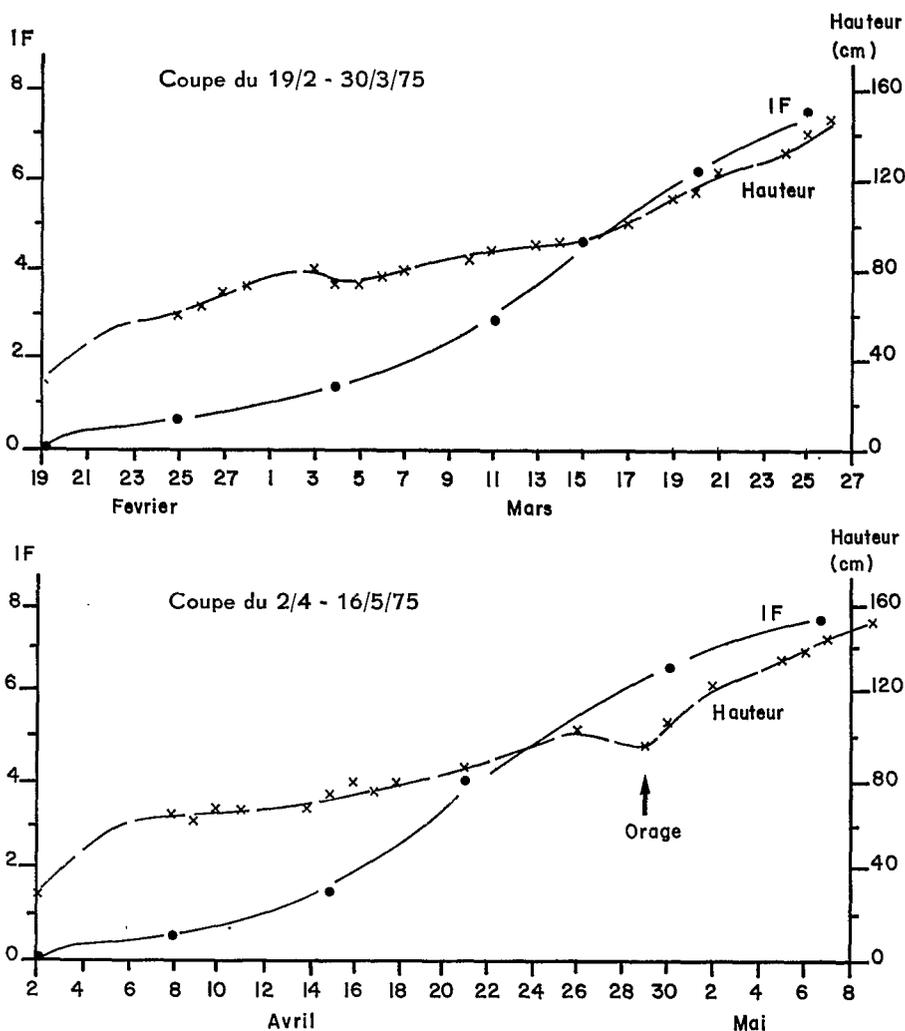


FIG. 2. — Évolution de la hauteur du couvert végétal et de son indice foliaire dans le temps.

de formation de jeunes tiges, par contre l'indice foliaire s'accroît rapidement et le sol est couvert 15-20 jours après la fauche. Il se produit ensuite l'élongation des entre-nœuds des tiges qui se traduit par une translation vers le haut de la masse foliaire.

3. ANALYSE DES SOURCES DE VARIATION DU RAYONNEMENT NET EN ZONE ÉQUATORIALE HUMIDE

L'équation (1) peut s'écrire d'une façon plus globale :

$$(3) \quad R_n = R_G^* + L^*$$

avec

$R_G^* = (1 - \alpha) R_G$, bilan de courtes longueurs d'onde ($300 < \lambda < 3\,000$ nm);

$L^* = \varepsilon (R_a - R_T)$ bilan de grandes longueurs d'onde ($\lambda > 3\,000$ nm).

Nous étudierons successivement les variations du bilan de courtes longueurs d'onde et celles du bilan de grandes longueurs d'onde.

3.1. BILAN DE COURTES LONGUEURS D'ONDE

3.1.1. Variations du rayonnement global

La basse Côte-d'Ivoire, de par sa situation géographique, reçoit au sommet de l'atmosphère une quantité d'énergie importante (de l'ordre de $840 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ en moyenne sur une journée) et relativement constante au cours de l'année; les variations sont de l'ordre de 10 %. Aussi les variations des moyennes mensuelles du rayonnement global (*fig. 1*) de l'ordre de 40 % sont imputables à des variations de transparence de l'atmosphère.

Cette transparence peut être caractérisée globalement par le rapport :

$$(4) \quad \tau = \frac{R_G}{R_{G0}}$$

La figure 3 représente les variations de transmission moyenne par décades au cours de l'année :

— elle est maximale pour certaines décades de la petite saison des pluies et du début de la grande saison des pluies. Ces maximums correspondent à des périodes de ciel clair précédées par des pluies importantes. Ces pluies ayant pour effet de lessiver l'atmosphère des poussières et aérosols qu'elle contient (MONTENY *et al.*, 1973);

— elle est minimale pendant la grande saison des pluies et la petite saison sèche d'une part et la période janvier début février d'autre part.

Dans le premier cas, le minimum est dû à un ennuagement très fort (l'insolation relative moyenne H pour la période est seulement de 0,23). Par contre, en janvier

par insolation relativement forte (de l'ordre de 0,55) l'atténuation est due à un apport de poussières d'origine saharienne en suspension dans les masses d'air venant du Nord.

La transmission moyenne pour l'année est de 0,44. MONTEITH (1972) donne des valeurs de τ pour différentes stations d'Afrique tropicale :

Kinshasa (Zaïre, 4° latitude Sud) : $\tau = 0,48$.

Samaru (Nigéria, 11° latitude Nord) : $\tau = 0,58$.

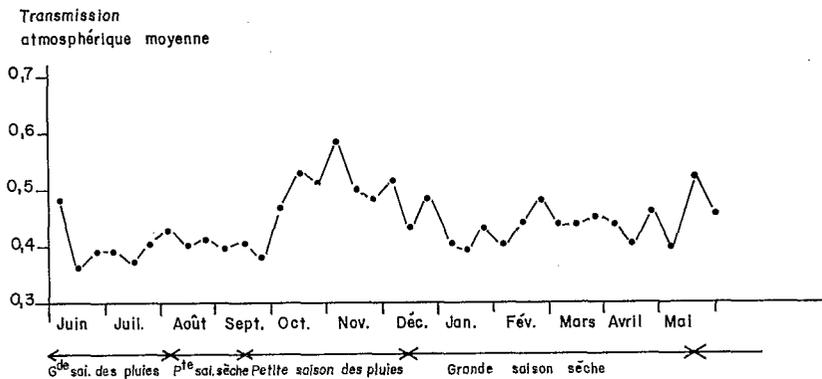


FIG. 3. — Variation annuelle de la transmission atmosphérique (valeurs décadaires moyennes).

Les valeurs d'Abidjan et de Kinshasa sont faibles et du même ordre de grandeur, ceci est dû au fait que les deux stations appartiennent à la zone subtropicale humide caractérisée par un ennuagement important mais voisin entre les deux stations. La petite différence peut être due à une couverture nuageuse plus importante dans la zone ouest du Golfe de Guinée. Par contre la transmission moyenne pour Samaru est nettement plus forte; Samaru est une station de latitude plus élevée à saison sèche plus marquée donc à ennuagement moindre. Aussi la transmission, même avec une augmentation de la quantité d'aérosols fréquente sous ces latitudes, sera plus forte.

Cette différence entre les zones forestières humides et les zones de savanes à saison sèche très marquée va se retrouver en Côte-d'Ivoire lorsque l'on passe de la zone forestière Sud à la savane Nord (10° de latitude Nord). Par ailleurs si l'on définit l'efficience en eau d'un couvert végétal par le rapport photosynthèse/évapotranspiration, cette différence de 0,14 va représenter un gain appréciable au niveau de l'efficience en eau du couvert. En effet, la différence d'atténuation du rayonnement solaire sera essentiellement due à une absorption plus grande du proche infrarouge par la vapeur d'eau dans les zones forestières sans que la fraction photosynthétiquement active qui correspond sensiblement au visible soit affectée,

aussi y a-t-il une augmentation relative de l'énergie utile à la photosynthèse par rapport à l'énergie globale disponible pour l'évapotranspiration.

Pour un couvert végétal donné, la basse Côte-d'Ivoire va être la zone présentant la meilleure efficacité en eau, cette efficacité allant en diminuant lorsque l'on se déplace vers le nord du pays.

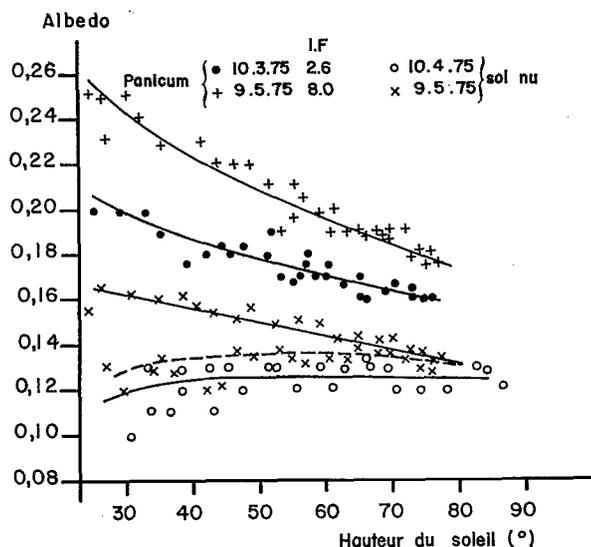


FIG. 4. — Variation de l'albédo du couvert végétal en fonction de la hauteur du soleil et de l'indice foliaire.

3.1.2. Variation de l'albédo

Après le rayonnement global, l'albédo peut être considéré comme la seconde source de variation du bilan de courtes longueurs d'onde.

L'albédo varie essentiellement avec la nature et les propriétés de la surface envisagée et la qualité du rayonnement incident.

La figure 4 représente l'évolution par ciel clair de l'albédo d'un sol nu et d'un *Panicum maximum* en fonction de la hauteur du soleil et de l'indice foliaire du végétal.

— Pour un sol nu (données du 10 avril et du 9 mai), l'albédo est caractérisé par des valeurs faibles ($\alpha = 0,13$) et par une dépendance vis-à-vis de la hauteur du soleil. Cette dépendance est d'autant plus faible, voire pratiquement nulle, que le sol est plus humide; le sol humide ayant tendance à se comporter comme un corps noir, son coefficient d'absorption devient isotrope.

— Pour un couvert de *Panicum maximum*, l'albédo moyen se situe entre 0,17 et 0,20 selon l'indice foliaire. L'influence de la hauteur du soleil, surtout pour des hauteurs inférieures à 40°, est plus marquée que pour un sol nu et est accentuée par un indice foliaire croissant.

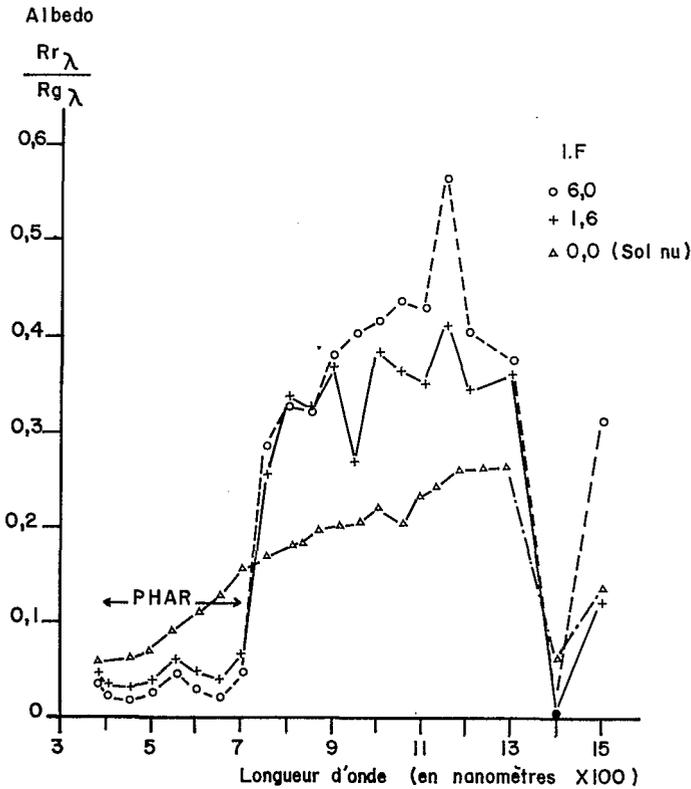


FIG. 5. — Analyse spectrale de l'albédo en fonction de l'indice foliaire.

La surface d'un couvert végétal n'étant pas assimilable à celle d'un corps noir parfait, son coefficient de réflexion ou albédo est une fonction complexe de l'angle d'incidence du rayonnement reçu et des caractéristiques optiques et géométriques des feuilles. Ce phénomène est très net aux incidences rasantes et est accru par le caractère directif dominant du rayonnement solaire par ciel clair (rapport Diffus/Global, R_D/R_G , faible). En effet, par ciel couvert R_D/R_G voisin de 1, l'albédo du *Panicum* est de 0,26 et devient indépendant de la hauteur du soleil; le rayonnement incident ayant tendance à devenir plus isotrope, à hauteur de Soleil égale, l'albédo moyen prendra des valeurs plus élevées. Par ailleurs plusieurs auteurs (STANHILL *et al.*, 1968; IDSO *et al.*, 1969; NKEMDIRIM, 1972; KALMA et BADHAM, 1972) ont constaté une dissymétrie entre la variation de l'albédo le matin et celle du soir. Ceci ne semble pas très net dans notre cas et peut être en réalité un artefact créé

par certaines incertitudes au niveau de la mesure : coefficient d'étalonnage qui varie avec la hauteur du soleil (mesure de R_G) et coefficient constant pour la mesure du rayonnement, réfléchi sans oublier les problèmes d'horizontalité des thermopiles.

Après cette analyse axée principalement sur l'influence du rayonnement incident sur l'albédo du *Panicum maximum*, nous allons aborder l'influence de la culture en elle-même; cette culture est caractérisée plus par sa structure (indice foliaire) que par un état de surface donné comme pour un sol nu. Cette influence, quoique faible quantitativement — le passage d'un indice foliaire de la valeur 2,6 à 8,0 ne provoquant qu'une augmentation de l'albédo de l'ordre de 10-15 % — est importante d'un point de vue analytique.

Cette influence du couvert végétal est bien illustrée par l'analyse spectrale de l'albédo en fonction de l'indice foliaire (fig. 5). On y constate une opposition très nette entre le rayonnement photosynthétiquement actif PHAR et le proche infrarouge :

— dans le PHAR l'albédo diminue avec l'indice foliaire mais cette diminution portant sur des quantités réfléchies faibles n'aura que peu d'effet sur l'albédo global, résultat déjà observé sous d'autres latitudes (VARLET GRANCHER, 1974);

— par contre dans le proche infrarouge, l'albédo augmente avec l'indice foliaire avec une différence très nette entre le sol nu ($IF = 0$) et un couvert d'indice foliaire 2,6. La quantité d'énergie infrarouge réfléchie dominant largement l'énergie réfléchie PHAR, ce seront les variations infrarouge qui affecteront l'albédo global d'où la figure 4. Le sol nu représente alors assez souvent une borne inférieure pour l'albédo infrarouge et une borne supérieure pour l'albédo PHAR.

Globalement, le gain de 10-15 % au niveau de l'énergie absorbée en fonction de l'augmentation de l'indice foliaire, portant principalement sur l'énergie infrarouge, et qui devrait en principe conduire à une amélioration de l'efficacité en eau du couvert est en réalité largement contrebalancé par l'augmentation des surfaces évaporantes.

Par ailleurs, des mesures faites par OGUNTOYINBO (1974) dans le sud Nigéria sur des strates graminéennes naturelles donnent des valeurs d'albédo voisines des nôtres. Ces résultats tendent à montrer que pour des couverts végétaux de port ou de développement semblables, les variations d'albédo sont très faibles. Aussi, l'albédo, intéressant d'un point de vue théorique, présente un intérêt pratique moindre et des valeurs moyennes d'albédo seront très souvent suffisantes pour les applications agronomiques courantes.

3.2. BILAN DE GRANDES LONGUEURS D'ONDE

Le bilan radiatif de grandes longueurs d'onde L^* correspond, à l'émissivité de la surface près, à la différence entre le rayonnement d'origine atmosphérique R_a et le rayonnement d'origine terrestre R_T .

Les figures 6 et 7 montrent l'importance relative de L^* par rapport au bilan de courtes longueurs d'onde R_G^* : les variations de L^* sont de l'ordre de 100-150 $W.m^{-2}$ pour des variations de R_G^* d'environ 700 $W.m^{-2}$. Aussi d'un point de vue pratique, au moins en zone tropicale humide, L^* apparaît donc comme un terme correctif du rayonnement net, de l'ordre de 15-20 %.

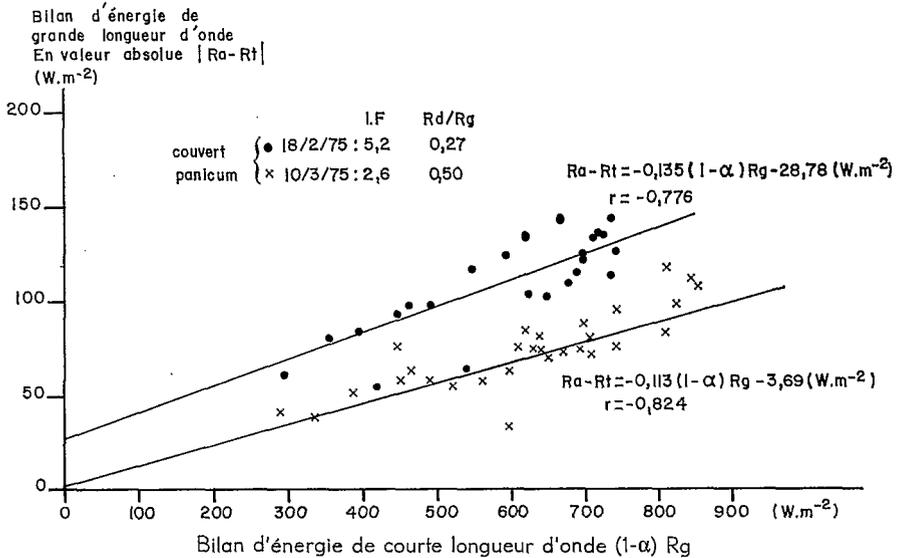


FIG. 6. — Relation entre R_G^* et L^* pour un même couvert végétal avec des conditions atmosphériques différentes.

Les figures 6 et 7 représentent respectivement les variations de L^* d'origine climatique (R_a) et celles d'origine biologique (R_T) que nous allons examiner plus en détail.

3.2.1. Rayonnement atmosphérique

Le rayonnement atmosphérique varie avec l'enneigement et la quantité d'énergie solaire absorbée par les aérosols et autres constituants atmosphériques.

En basse Côte-d'Ivoire, ce rayonnement est très important; il est en moyenne de 380 $W.m^{-2}$. Par contre ses variations seront plus faibles qu'en zone tempérée :

R_a minimal mesuré à Abidjan : 330 $W.m^{-2}$ de nuit par ciel clair;

R_a maximal en saison des pluies par ciel couvert : 430 $W.m^{-2}$.

Les faibles variations sont essentiellement dues à deux facteurs :

— température moyenne de l'air sensiblement constante (température moyenne mensuelle $\bar{T} = 26,3 \pm 1,5^\circ\text{C}$);

— variations autour d'une valeur moyenne élevée de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère ($\bar{\omega} = 5,0 \pm 1 \text{ cm}$).

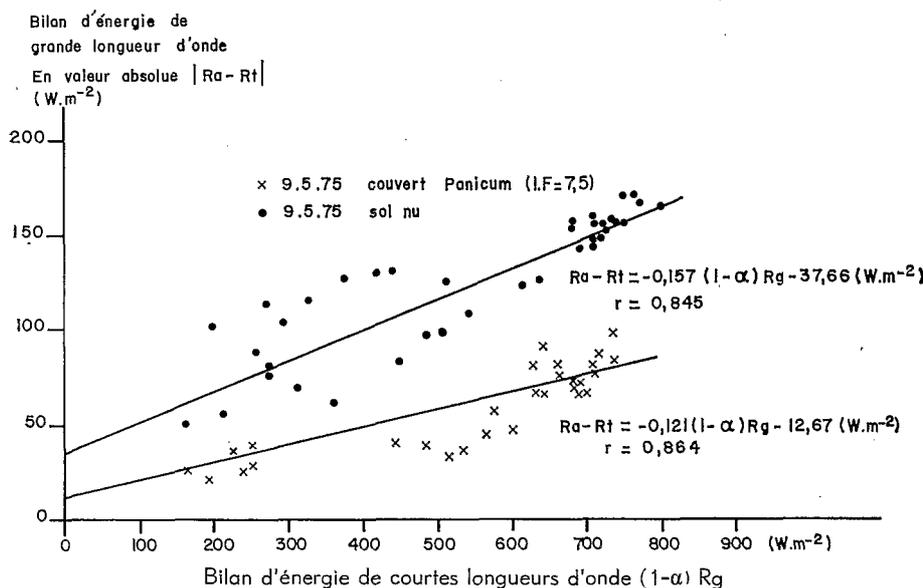


FIG. 7. — Relation entre R_G^* et L^* pour un couvert végétal et un sol, avec les mêmes conditions atmosphériques.

La figure 6 illustre l'influence d'une variation de rayonnement atmosphérique, sur le bilan de grandes longueurs d'onde de deux couverts de *Panicum* de l'indice foliaire, IF , suffisant pour avoir une bonne couverture du sol. Il ne semble pas que la variation de la quantité d'eau précipitable de l'atmosphère ω en soit responsable comme le suggérait NKEMDIRIM (1972); pour les deux journées (18 février et 10 mars), cette quantité est comprise entre 5,0 et 5,5 cm selon la formule de Hann. Les fluctuations de la température de surface de la culture ne suffisent pas à expliquer la différence. Par contre, les deux journées se caractérisent par un rapport R_D/R_G très différent, faible le 18 février ($R_D/R_G = 0,27$) et fort le 10 mars ($R_D/R_G = 0,50$). L'augmentation en valeur absolue du bilan de grandes longueurs d'onde est donc due à une augmentation d'aérosols absorbant plus d'énergie solaire.

L'ennuage, ainsi que l'augmentation du rapport R_D/R_G va se traduire par un accroissement du rayonnement atmosphérique. Sous un angle plus pratique, ce

phénomène va provoquer, à R_G et R_T constants par ailleurs, une augmentation du rayonnement net donc un effet néfaste sur l'efficacité de l'eau par un accroissement de l'énergie disponible pour l'évapotranspiration.

3.2.2. Rayonnement terrestre

Il est de la forme σT_s^4 . La température de surface pouvant être considérée comme la résultante de l'activité biologique du couvert par l'intermédiaire de la régulation stomatique et de son bilan énergétique (PERRIER, 1975), le rayonnement terrestre est donc fonction de l'état hydrique et physiologique de la surface.

La figure 7 représente simultanément, pour les mêmes conditions de rayonnement atmosphérique, la variation du bilan de grandes longueurs d'onde, donc du rayonnement terrestre pour un *Panicum* et un sol nu. Les valeurs observées, deux fois plus élevées pour le sol nu, s'expliquent par une température de surface plus élevée sur sol nu. En effet, le bilan d'énergie montre qu'une surface sèche, avec probablement en plus un mulch, comparée à une végétation bien alimentée en eau (irrigation tous les 3 jours) est toujours beaucoup plus chaude parce que l'énergie non consommée par l'évaporation au niveau du sol doit être échangée avec l'air sous forme de chaleur sensible.

En zone subtropicale humide, le rayonnement net est pour une grande part dû au rayonnement d'origine solaire, le bilan de rayonnement de grandes longueurs d'onde n'entrant que pour une faible part, de l'ordre de 20 % au plus pour un R_n de 400 W.m^{-2} .

Cette part du rayonnement de grandes longueurs d'onde aura tendance à augmenter dans des zones à climat tropical plus sec, nord Côte-d'Ivoire par exemple. En effet, pour un même couvert, le rayonnement atmosphérique sera plus faible (ennuageage moindre, hauteur d'eau précipitable plus faible) et le rayonnement terrestre plus fort (température de surface généralement plus élevée car en équilibre, par le jeu du bilan d'énergie de la culture, avec une température de l'air plus élevée), aussi les pertes par grandes longueurs d'onde seront plus fortes et conduiront à une réduction du rayonnement net, toute autre condition restant égale, et par conséquent à une légère amélioration de l'efficacité hydrique, sous l'angle de la consommation en eau.

Nous pouvons remarquer d'après les conclusions concernant le rayonnement de courtes longueurs d'onde et celles du bilan de grandes longueurs d'onde une évolution inverse de l'efficacité de l'eau : en effet elle diminue vers le nord de la Côte-d'Ivoire pour les courtes longueurs d'onde et a tendance à augmenter pour les grandes longueurs d'onde. Du fait de la grande importance du rayonnement d'origine solaire par rapport au rayonnement thermique, l'efficacité en eau d'un couvert végétal diminuera en Côte-d'Ivoire de la zone côtière à la zone Nord, mais sera légèrement tamponnée par le rayonnement thermique.

Sous un angle pratique, cela souligne l'accroissement de l'importance des problèmes de l'eau déjà posés par une pluviométrie faible et irrégulière dans le nord de la Côte-d'Ivoire.

4. RELATION DU RAYONNEMENT NET D'UN COUVERT VÉGÉTAL AVEC LE RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL

4.1. INTÉRÊT DE CE TYPE DE RELATIONS

Les relations du type $R_n = f(R_G)$ qui semblent largement justifiées par les analyses et considérations faites précédemment, peuvent être utilisées de différentes manières :

— d'un point de vue théorique, afin d'explicitier les liaisons qui existent entre le rayonnement net et ses différentes composantes afin de mieux préciser le type de relation expérimentale qu'il est souhaitable d'utiliser;

— d'un point de vue pratique, afin d'estimer ou de prévoir le rayonnement net à partir de mesures plus simples ou plus répandues. C'est alors le côté statistique de la relation qui intéresse l'utilisateur.

Dans le cadre de ce travail, après une approche théorique succincte, c'est surtout le côté pratique qui est abordé afin de pallier en Côte-d'Ivoire un manque de mesures de rayonnement net qui restent peu fiables; le réseau de mesures du rayonnement global étant maintenant étendu à l'ensemble du territoire.

4.2. PRÉSENTATION DES RELATIONS EXISTANTES

Diverses relations empiriques ont été proposées, par analogie avec l'équation (1), la plus simple d'entre elles est une relation linéaire du type :

$$(2) \quad R_n = k R_G + l.$$

Relation dans laquelle k et l représentent respectivement $(1 - \alpha)$ et le bilan de grandes longueurs d'onde $\varepsilon (R_a - R_r)$.

Or, nous avons vu au paragraphe 3.2 que l n'est pas indépendant du bilan de courtes longueurs d'onde et qu'en première approximation il existait entre l et $(1 - \alpha) R_G$ une relation linéaire (fig. 6 et 7) :

$$(5) \quad l = -c(1 - \alpha) R_G + d.$$

Soit en remplaçant l par sa valeur dans (2) :

$$(6) \quad R_n = (1 - c)(1 - \alpha) R_G + d.$$

Dans l'équation (6), d représente la valeur du bilan de grandes longueurs d'onde en absence de rayonnement global et $(1 - c)$, l'accroissement du bilan de grandes longueurs d'onde par unité de rayonnement de courtes longueurs d'onde réellement absorbé.

LINACRE (1968) a défini une équation

$$(7) \quad R_n = a(1 - \alpha)R_G + b,$$

où les coefficients a et b jouent le même rôle que dans l'équation (6). De plus Linacre (1968) a présenté un tableau récapitulatif des différentes valeurs de a et b citées dans la littérature et auxquelles il faut ajouter les résultats de RIJKS (1967), KALMA (1972), NKEMDIRIM (1972) et FITZPATRICK (1973).

Différents auteurs ont présenté des analyses de l'équation (7), notamment GAY (1971) qui, à partir d'une hypothèse de type (5), a défini un coefficient λ qu'il nomme coefficient d'échange de grandes longueurs d'onde.

(Nous avons la relation $\lambda = -c$.)

D'autres comme MONTEITH et SCEICZ (1961), à partir d'une hypothèse légèrement différente où l devient une fonction linéaire du rayonnement net et non plus du rayonnement global, aboutissent à des résultats strictement analogues et à la définition d'un coefficient β qui n'est autre que le rapport $c/(1 - c)$ et qu'ils nomment coefficient d'échauffement de la surface. En effet, β représente l'accroissement de température de surface par unité de rayonnement net.

L'analyse du bilan d'énergie de la surface permet de préciser la signification physique et d'analyser le sens de variation des coefficients c ou β que nous pouvons résumer par la relation

$$(8) \quad \beta = f(r_a, r_s),$$

avec

r_a , résistance aérodynamique entre la surface et le niveau de référence;

r_s , résistance à la diffusion vapeur à travers la surface; PERRIER (1975 b).

— β sera une fonction décroissante de la vitesse du vent. En effet r_a est fonction décroissante de la vitesse du vent : plus la vitesse sera forte, plus l'énergie sera vite dissipée et β va diminuer.

— Pour une culture donnée et r_a constant, β augmentera avec r_s , sur une culture avec ETP ($r_s = 0$) la température de surface sera minimale et si r_s augmente, T_s augmente.

Donc sur une culture bien alimentée en eau, régime hydrique voisin de l'ETP, et pour un bilan de rayonnement incident donné, l'écart de température $T_a - T_s$ sera minimal et par définition le coefficient d'échauffement β sera minimal.

— Entre deux cultures de r_a différents et pour un même r_s , le β sera plus faible sur la culture présentant le r_a le plus faible car les résistances à la diffusion, à vitesse

de vent égale, seront plus faibles donc on aura une dissipation plus rapide de l'énergie thermique.

Dans le tableau I, nous constatons en effet que le β sol nu est en moyenne 0,183 alors que pour le *Panicum* d'indice foliaire 8,0 $\beta = 0,110$.

TABLEAU I

Résultats de l'analyse des régressions des données instantanées suivant l'équation (6) (en $W \cdot m^{-2}$)

Dates	IF	(1 - c)*	d*	s**	λ	β	
7 - 1	~ 5,0	0,839	- 27	16	- 0,161	0,192	
18 - 2	5,2	0,865	- 29	18	- 0,135	0,156	
10 - 3	2,6	0,886	- 4	12	- 0,113	0,127	
9 - 5	couvert	8,0	0,882	- 12	18	- 0,121	0,137
	sol	0,0	0,845	- 39	19	- 0,157	0,185
15 - 5	couvert	8,0	0,911	- 22	15	- 0,090	0,098
	sol	0,0	0,837	- 31	24	- 0,152	0,181

* Définis par l'équation (6).

** Écart-type sur les valeurs estimées par la régression selon l'équation (6).

D'un point de vue pratique, cela signifie que pour des conditions climatiques données R_G , R_a et un albédo voisin, le rayonnement net d'une culture bien développée (IF élevé) et bien alimentée en eau sera plus fort que le rayonnement net d'un gazon ou d'un sol nu.

4.3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS OBTENUS SUR *Panicum maximum*

Dans le tableau I, nous trouvons les résultats des régressions suivant l'équation (6) portant sur des valeurs instantanées. On y retrouve le sens de variation annoncé précédemment :

— une diminution des coefficients β et λ lorsque l'on passe d'un sol nu (IF = 0) à un *Panicum maximum* d'indice foliaire 8. Ceci traduit un échauffement plus grand de la surface du sol nu, échauffement qui diminue avec le développement du végétal;

— si l'on regroupe l'ensemble des données sol nu d'une part et couvert végétal d'autre part (fig. 8-9), on retrouve globalement les résultats précédents, avec une augmentation de la dispersion pour le *Panicum maximum* car on indique une gamme de IF assez étendue.

Cette étude sur des valeurs instantanées obtenues par temps clair nous a permis de mieux analyser les effets de certains facteurs sur les échanges radiatifs du complexe couvert-atmosphère. Pour la rendre utilisable d'un point de vue agronomique, il fallait intégrer les différentes possibilités d'enneuagement, c'est ce que nous avons réalisé en travaillant sur des valeurs intégrées sur une journée.

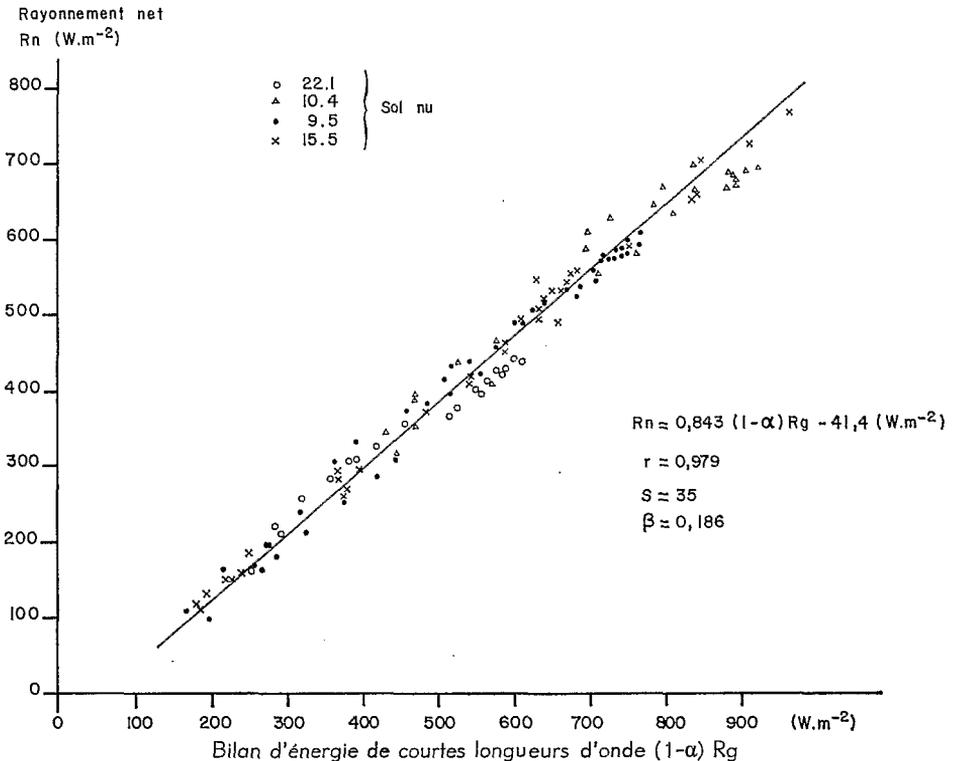


FIG. 8. — Relation entre le rayonnement net d'un sol nu et le bilan de courtes longueurs d'onde.

Pour *Panicum maximum* les résultats sont les suivants :

$$R_n = 0,896(1-\alpha)R_G - 57,4$$

avec

R_n, R_G exprimés en joules.cm⁻².jour⁻¹;

α albédo moyen égal à 0,19 l'écart-type sur la valeur estimée de R_n est de $S = 37 \text{ J.cm}^{-2}\text{.jour}$.

Par comparaison, DAVIES (1967) a obtenu un coefficient a plus faible ($a = 0,612$) pour trois stations d'Afrique de l'Ouest (2 au Nigéria, 1 au Sénégal). Ces stations

étant en zone plus sahélienne, il est probable que le couvert végétal était en situation de déficit hydrique plus fort, d'où un coefficient plus faible.

L'utilisation de cette relation est immédiate si l'on connaît la relation $ETR = f(R_n)$. Souvent le rayonnement net est suffisant pour estimer la demande en eau climatique qui correspond à la consommation maximale de la culture si

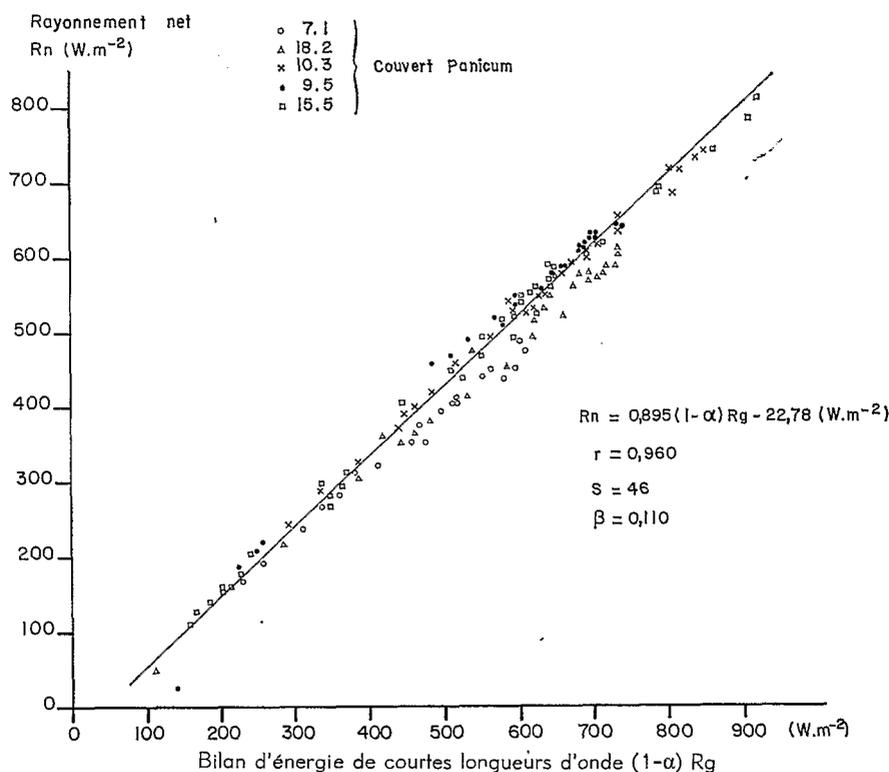


FIG. 9. — Relation entre le rayonnement net d'un *Panicum maximum* et le bilan de courtes longueurs d'onde.

l'eau n'était pas facteur limitant (PERRIER, 1975 a; BOUCHET *et al.*, 1967; MONTENY, 1972), et peut être par ailleurs utilisée dans la formule de PENMANN afin d'obtenir l'évapotranspiration potentielle ETP.

CONCLUSIONS

Cette analyse du rayonnement net permet une meilleure compréhension des interactions entre les différents flux radiatifs à la surface d'un couvert végétal en zone tropicale humide.

Le facteur de variation essentiel est d'origine climatique : c'est le rayonnement global; l'albédo ne présente que des variations faibles autour d'une valeur moyenne de 0,20, valeur moyenne qui dans beaucoup d'applications pratiques sera suffisante. Le bilan de grandes longueurs d'onde est quantitativement peu important sous ces latitudes.

Les relations statistiques dégagées, directement utilisables en pratique pour un couvert de *Panicum maximum*, pourraient être généralisées si l'on pouvait expliciter l'influence des facteurs r_a , r_s sur les coefficients β et λ , ce que nous chercherons à faire ultérieurement.

LISTE DES SYMBOLES

a, b, c, d, k, l , coefficients.

α ,	albédo de la surface.
β ,	coefficient d'échauffement (MONTEITH, SZEICZ, 1961).
ε ,	émissivité de la surface.
ETP,	évapotranspiration potentielle de la culture.
ETR,	évapotranspiration réelle de la culture.
h ,	hauteur de la culture.
H ,	insolation relative.
IF ,	indice foliaire de la culture.
λ ,	coefficient d'échange de grandes longueurs d'onde (GAY, 1971).
L^* ,	bilan de grandes longueurs d'onde.
PHAR,	rayonnement photosynthétique actif.
σ ,	constante de Stefan-Boltzmann.
R_a ,	rayonnement atmosphérique.
R_D ,	rayonnement diffus.
R_G ,	rayonnement global.
R_G^* ,	bilan de courtes longueurs d'onde.
R_{G0} ,	rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère.
R_n ,	rayonnement net au-dessus d'un couvert.
R_T ,	rayonnement terrestre.
r_a ,	résistance aérodynamique de la culture.
r_s ,	résistance à la diffusion à travers la culture.
T ,	température mensuelle moyenne.
T_s ,	température de surface du couvert.
τ ,	transmission de l'atmosphère.
ω ,	épaisseur d'eau condensable dans l'atmosphère.

BIBLIOGRAPHIE

- BOUCHET R. et ROBELIN P., 1969. — Évapotranspiration potentielle et réelle. Domaine d'utilisation. *Bull. Tech. Inform. Ing. Agr.*, **238**, 55-62.
- DAVIES J. A., 1967. — A note on the relationship between net radiation and solar radiation. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **93**, 109-115.
- FITZPATRICK E. A. et STERN W. R., 1973. — Net radiation estimated from global solar radiation. Proceeding Uppsala Symposium, UNESCO, **5**, 403-410.
- FRITSCHEN L. J., 1967. — Net and solar radiation relations over irrigated field crops. *Agric. Meteorol.*, **4**, 55-62.
- GAY L. W., 1971. — The regression of net radiation upon solar radiation. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.*, ser. B, **19**, 1-14.
- IDSO S. B., BAKER D. G. et BLAD B. L., 1969. — Relations of radiation fluxes over natural surfaces. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **95**, 244-257.
- KALMA J. D. et BADHMA R., 1972. — The radiation balance of a tropical pasture. I. The reflection of short-wave radiation. *Agric. Meteorol.*, **10**, 251-259.
- LINACRE E. T., 1968. — Estimating the net radiation flux. *Agric. Meteorol.*, **5**, 49-53.
- MONTEITH J. L. et SZEICZ G., 1961. — The radiation balance of bare soil and vegetation. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **87**, 159-170.
- MONTEITH J. L., 1972. — Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecology*, **9**, 747-766.
- MONTENY B., 1972. — Évapotranspiration de différents couverts végétaux. *Agric. Meteorol.*, **10**, 19-38.
- MONTENY B., GOSSE G., CARDON et ELDIN M., 1973. — Étude spectrale du rayonnement solaire en basse Côte-d'Ivoire; rapport O.R.S.T.O.M. multigrappié.
- NKEMDIRIM L. G., 1972. — A note on the albedo of surfaces. *J. Appl. Meteorol.*, **11**, 867-874.
- OGUNTOYINBO J. S., 1974. — Land use and reflection coefficient (albedo) map for southern parts of Nigeria. *Agric. Meteorol.*, **13**, 227-239.
- PERRIER A., 1975 a. — Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. I. Évaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles. *Annal. Agron.*, 1975, **26** (1), 1-18.
- PERRIER A., 1975 b. — Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. II. Expressions et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface « mince ». *Annal. Agron.* (sous presse).
- RIJKS D. A., 1967. — Water use by irrigated cotton in Sudan. I. Reflection of short wave radiation. *J. Appl. Ecology*, **4**, 561-568.
- STANHILL G., COX J. T. et MORESHET S., 1968. — The effects of crop and climatic factors in the radiation balance of an irrigation maize crop. *J. Appl. Ecology*, **5**, 707-720.
- VARLET-GRANCHER C., 1974. — Quantité et qualité de la lumière solaire réfléchiée par une culture. *Ann. Agron.*, **25**, 797-810.