

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER
CENTRE D'ADIOPODOUME (Côte d'Ivoire)

Laboratoire de Bioclimatologie

BILAN D'ENERGIE D'UNE CULTURE FOURRAGERE DE
Panicum maximum EN ZONE INTERTROPICALE HUMIDE

par

M. ELDIN, B. MONTENY et J-P. LHOMME

INTRODUCTION

Cette étude a été conduite en Basse Côte d'Ivoire sur le Centre ORSTOM d'Adiopodoumé (5° latitude Nord).

Elle s'inscrit dans un programme général qui a pour but de définir les potentialités climatiques de la zone intertropicale en matière de production agricole. La finalité de ce travail est d'étudier les interactions existant entre les facteurs microclimatiques et la physiologie de la plante afin de comprendre le déterminisme climatique de la consommation en eau et de la production de matière sèche.

I. METHODE DU BILAN ENERGETIQUE : SON APPLICATION AU CALCUL DES FLUX.

I.1 - L'équation du bilan énergétique.

Le principe de conservation de l'énergie appliqué à un couvert végétal homogène de hauteur h , permet d'écrire, en considérant comme positif ce qui est gagné par le couvert et négatif ce qui est dissipé ou consommé :

$$R_n + \Phi_L + \Phi_S + \Phi_o + P + \Delta Q = 0$$

R_n est la résultante des densités de flux radiatifs au dessus du couvert ou rayonnement net

Φ_L est l'équivalent énergétique de la densité de flux de vapeur d'eau échangée par convection avec l'atmosphère

Φ_S est la densité de flux de chaleur sensible échangée par convection avec l'atmosphère

Φ_o est la densité de flux de chaleur sensible échangée par conduction avec le sol

P est la quantité d'énergie radiative utilisée par les réactions de la photosynthèse

ΔQ est la densité de flux d'énergie correspondant à la variation du stock calorifique de la culture.

Ce dernier terme sera négligé. En effet, il est nul en régime permanent et faible en régime transitoire pour des périodes courtes (de l'ordre de l'heure ou plus petites).

Ces différents termes sont exprimés en $W.m^{-2}$

I.2 - Expression des différents termes du bilan énergétique.

I.2.1 - Rayonnement net

Le rayonnement net représente le bilan radiatif de la culture :

$$R_n = (1-a) R_G + \epsilon (R_A - T_S^4)$$

R_G rayonnement solaire global ($W.m^{-2}$)

R_A rayonnement atmosphérique ($W.m^{-2}$)

T_S température de surface du couvert ($^{\circ}K$)

a albédo du couvert

ϵ émissivité du couvert

constante de Stefan-Boltzman.

I.2.2 - Flux turbulents vers l'atmosphère.

Rappelons les équations classiques de la convection turbulente:

$$\Phi_L = - L \cdot K_V(z) \cdot \frac{\partial C_V}{\partial z}$$

$$\Phi_S = - \rho \cdot c_p \cdot K_T(z) \cdot \frac{\partial T}{\partial z}$$

L chaleur latente de vaporisation de l'eau
masse volumique de l'air

c_p chaleur massique de l'air

C_V concentration volumique de l'air en vapeur d'eau

K_V et K_T diffusivités turbulentes de la vapeur d'eau et de la chaleur sensible dans l'air.

L'intégration de ces équations entre les niveaux z_1 et z_2 ($z_1 < z_2$) de la couche de flux conservatif, permet d'écrire :

$$(1) \quad \Phi_V = L \cdot \frac{C_{V2} - C_{V1}}{R_{av}} \quad \text{avec} \quad R_{av} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{K_V(z)}$$

$$(2) \quad \Phi_T = \rho \cdot c_p \cdot \frac{T_2 - T_1}{R_{aT}} \quad \text{avec} \quad R_{aT} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{K_T(z)}$$

Comme $C_V = \frac{M_V}{R \cdot \bar{T}} \cdot e$ (équation des gaz parfaits), (1) s'écrit :

$$(1') \quad \Phi_L = \frac{L \cdot M_V}{R \cdot \bar{T}} \cdot \frac{e_2 - e_1}{R_{av}}$$

e_j pression partielle de vapeur d'eau dans l'air au niveau z_j

R constante universelle des gaz parfaits

M_v masse molaire de l'eau

T_j température de l'air en degrés Kelvin au niveau z_j

R_{av} résistance à la convection de la vapeur d'eau à travers la couche d'air comprise entre les niveaux z_1 et z_2

R_{aT} résistance à la convection de la chaleur sensible à travers cette même couche d'air.

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \text{température moyenne}$$

I.2.3 - Energie radiative utilisée dans les réactions de la photosynthèse.

L'ensemble des processus photochimiques de la photosynthèse peuvent se schématiser par la réaction :



Appelons λ l'énergie radiative visible utilisée pour cette réaction. Avec nos conventions de signe, il vient :

$$P = - \lambda \cdot \Phi_c$$

Φ_c étant le flux net de CO_2 provenant de l'atmosphère. Par conséquent :

$$P = - \lambda \cdot \frac{C_{c2} - C_{c1}}{R_{ac}} \quad \text{avec} \quad R_{ac} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{K_c(z)}$$

C_{ci} concentration volumique en gaz carbonique au niveau z_i

K_c diffusivité turbulente du CO_2 dans l'air

R_{ac} résistance à la convection du CO_2 à travers la couche d'air comprise entre les niveaux z_1 et z_2 .

I.3 - Calcul des flux.

Nous poserons : $\alpha = P/\Phi_L = - \lambda \cdot \Phi_c/\Phi_L$

$$\beta = \Phi_S/\Phi_L \quad (\text{rapport de Bowen})$$

I.3.1 - Calcul de α .

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot R \cdot \bar{T}}{L \cdot M_v} \cdot \frac{R_{av}}{R_{ac}} \cdot \frac{C_{c2} - C_{c1}}{e_1 - e_2}$$

De l'équation psychrométrique :

$$e = E(\bar{T}') - p (T - T')$$

nous tirons $\Delta e = e_1 - e_2$

$$(3) \quad \Delta e = E'(\bar{T}') \cdot \Delta T' - p (\Delta T - \Delta T') \quad \text{avec} \quad \bar{T}' = \frac{T'_1 + T'_2}{2}$$

$E(T)$ tension de vapeur saturante pour la température T

$E'(T)$ dérivée de l'expression précédente par rapport à T

p constante psychrométrique (des psychromètres utilisés)

T_i température du thermomètre sec au niveau z_i

T'_i température du thermomètre humide au niveau z_i

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

$$\Delta T' = T'_1 - T'_2$$

I.3.2 - Calcul de β .

$$\beta = \frac{\rho \cdot c_p \cdot R \cdot \bar{T}}{L \cdot M_v} \cdot \frac{R_{av}}{R_a T} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta e}$$

L'air étant humide, on a :

$$\rho = \rho_a \cdot \left(1 - \frac{11}{29} \frac{e}{P}\right) = \frac{P \cdot M_a}{R \cdot \bar{T}} \left(1 - \frac{11}{29} \frac{e}{P}\right)$$

P pression atmosphérique

M_a masse molaire de l'air

β s'écrira donc :

$$\beta = \gamma \cdot \frac{R_{av}}{R_a T} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{P \cdot c_p}{L \cdot e} \left(1 - \frac{11}{29} \frac{e}{P}\right)$$

$$e = M_v / M_a$$

β peut s'écrire aussi, compte tenu de (3) :

$$\frac{1}{\beta} = \left[\frac{\Delta T'}{\Delta T} \left(\frac{E'(\bar{T}') + \gamma p}{\gamma} \right) - \frac{\gamma P}{\gamma} \right] \cdot \frac{R_a T}{R_{av}}$$

I.3.3 - Expression des flux et des efficacités.

L'équation du bilan d'énergie s'écrit maintenant :

$$R_n + \Phi_0 + \Phi_L (1 + \alpha + \beta) = 0$$

D'où :

$$\Phi_L = - \left(\frac{R_n + \Phi_0}{1 + \alpha + \beta} \right)$$

$$\Phi_S = \beta \cdot \Phi_L$$

$$P = \alpha \cdot \Phi_L \quad \text{et} \quad \Phi_C = - P / \lambda$$

A partir de ces expressions, nous définirons l'efficacité énergétique de la photosynthèse par le rapport :

$$E_e = - P / R_n$$

et son efficacité hydrique par le rapport :

$$E_h = P / \Phi_L$$

I.3 - Application au calcul de certains paramètres aérodynamiques du couvert.

Connaissant Φ_L , nous tirons directement R_{av} de (1') :

$$R_{av} = \frac{L \cdot M_v \cdot (e_2 - e_1)}{R \cdot \bar{T} \cdot \Phi_L}$$

Si nous considérons le trajet de la vapeur d'eau depuis les chambres sous stomatiques jusqu'au niveau Z_2 de la couche de flux conservatif, nous devons tenir compte, en plus de la résistance R_{av} , d'une résistance du couvert à la diffusion de la vapeur d'eau R_{cv} qui est dépendante de la structure du couvert, du développement foliaire et du degré de fermeture des stomates. La pression de vapeur d'eau dans une chambre sous-stomatique est considérée maximale à la température de celle-ci. Nous supposons, faute de mieux, la température moyenne du couvert égale à la température de surface T_1 . On peut alors écrire :

$$(4) \quad \Phi_L = - \frac{L \cdot M_v}{R \cdot \bar{T}} \cdot \frac{E(T_1) - e_2}{R_{av} + R_{cv}}$$

La division membre à membre de (4) par (1') donne :

$$R_{cv} = R_{av} \left(\frac{E(T_1) - e_1}{e_1 - e_2} \right)$$

I.4 - Expressions numériques retenues pour les calculs

- MONTEITH (1973) donne pour une température de 30°C :

$$\frac{R_{av}}{RaT} = \left(\frac{K}{D_v} \right)^{2/3} = 0,924$$

$$\frac{R_{ac}}{RaT} = \left(\frac{K}{D_c} \right)^{2/3} = 1,288$$

D : diffusivité du gaz dans l'air ($v = H_2O, c = CO_2$)

K : diffusivité thermique de l'air

- La constante P des psychromètres utilisés (tous identiques) est égale à 61,1 Pa.°C⁻¹.

- Pour les conditions au champ, où la pression atmosphérique est voisine de 1013 mb, la température moyenne de 30°C et la tension réelle de vapeur d'eau de 35 mb, on a :

$$\beta = 59,04 \frac{\Delta T}{\Delta e}, \quad \Delta e \text{ exprimé en Pa}$$

$$\alpha = 2,42 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{T} \cdot \frac{\Delta C_c}{\Delta e}, \quad \Delta C_c \text{ exprimé en p.p.m.}$$

La valeur de λ est considérée comme égale à 10,05 J par mg de CO₂ fixé par la photosynthèse du couvert.

$$- R_{av} = 5267 \frac{\Delta e}{\bar{T} \cdot \Phi_L}, \quad \Phi_L \text{ exprimé en W.m}^{-2}$$

- La pression saturante de vapeur d'eau est donnée en fonction de la température par la formule de TETENS :

$$E(t) = 611.10 \frac{at}{b+t}$$

E(t) exprimé en Pa et t en °C

$$a = 7,5$$

$$b = 237,3.$$

II. Dispositif expérimental.

II.1 - Capteurs utilisés

- Le rayonnement net est mesuré à l'aide d'un bilanmètre Schenk fixé à un mât à 4 mètres au-dessus de la surface du sol.

- Le flux de conduction à la surface du sol est mesuré par un fluxmètre Middleton placé à 1 cm de profondeur, parallèlement à la surface.

- Les gradients de température sèche et humide sont mesurés à l'aide d'un ensemble de deux psychromètres Lambrecht à ventilation forcée. Sur les thermomètres secs et humides sont fixés des thermocouples cuivre-constantan ($40\mu\text{V}.\text{°C}^{-1}$) qui fonctionnent en différentiel, permettant ainsi la mesure directe des écarts ΔT et $\Delta T'$ entre les niveaux z_1 et z_2 .

- Un troisième psychromètre placé au niveau $z_1 = h$ sert à mesurer l'écart entre la température de l'air T_1 ou la température T'_1 et une température référence T_0 mesurée à 2 m de profondeur dans le sol.

- Le gradient de concentration en CO_2 de l'air est mesuré directement par un analyseur infrarouge Hartmann-Braun. Les prélèvements de l'air se font aux deux niveaux z_1 et z_2 .

- Les signaux délivrés par ces différents capteurs sont soit intégrés soit enregistrés sur potentiomètre.

II.2 - Dispositif de mesure

- Les deux psychromètres destinés à mesurer les gradients de température sont montés sur un système mécanique qui permet d'inverser manuellement leurs positions, celui du haut passant en position basse et réciproquement. Ils sont placés aux niveaux $z_1 = h$ et $z_2 = h + \Delta h$ avec $\Delta h = 56$ cm. Les écarts ΔT et $\Delta T'$ sont obtenus en faisant la moyenne des valeurs données dans les deux positions. Cela permet d'éliminer les erreurs systématiques dues aux appareils.

- Les différents termes du bilan d'énergie sont calculés quart d'heure par quart d'heure. Une première mesure est effectuée pendant cinq minutes. Suit un intervalle de deux minutes qui correspond à l'inversion des deux psychromètres et à leur stabilisation. Pendant les cinq minutes suivantes, une deuxième mesure est réalisée. Les trois minutes restantes sont utilisées pour ramener les deux psychromètres dans leur position initiale et pour humecter les mousselines des thermomètres humides, avant de commencer le quart d'heure de mesure suivant.

- De cette façon, nous pouvons suivre l'évolution des cinq termes du bilan d'énergie au cours de la journée.

II.3 - Le matériel végétal et les conditions de l'étude

- Le couvert étudié est une culture de *Panicum maximum*. C'est une graminée fourragère tropicale dont le port est érigé et qui atteint deux mètres à maturité. Elle a un rendement en matière sèche particulièrement élevé (44 t/ha.an).

Les généticiens de l'ORSTOM ont sélectionné diverses variétés parmi lesquelles nous avons choisi K 187 qui est l'une des plus intéressantes dans nos conditions.

La parcelle expérimentale représentait une surface horizontale et homogène de plus d'un hectare.

- Les mesures ont été effectuées au cours des mois de mars, avril et mai 1976, période correspondant à la fin de la saison sèche et au début de la saison des pluies. La pluviométrie a atteint 158 mm en mars, 154 mm en avril et 430 mm en mai. On peut estimer que notre couvert était bien alimenté en eau et que l'évapotranspiration était proche de l'ETM. En effet, au cours de la période considérée, les pluies furent bien réparties, précédant en général les journées de mesure.

III. Résultats.

III.1 - Evolution des densités de flux au cours de la journée

Parmi les mesures que nous avons effectuées, nous avons retenu celles obtenues pendant quatre journées correspondant à des stades de développement différents de la culture de *Panicum maximum* étudiée.

2.4.76	IF = 6,7	h = 120 cm
22.4.76	IF = 1,1	h = 65 cm
5.5.76	IF = 3,9	h = 90 cm
18, 20.5.76	IF = 5,8	h = 130 cm

(IF : indice foliaire)

Pour ces journées nous avons représenté (fig. 1 à 4) l'évolution des différents termes du bilan d'énergie, au cours du temps, de quart d'heure en quart d'heure. On remarque :

- 1°/ La faiblesse de Φ_0 et P par rapport à Φ_L
- 2°/ La faiblesse du rapport de Bowen $\beta = \Phi_S / \Phi_L$ dont la valeur au milieu de la journée reste comprise entre 0,1 et 0,3.
- 3°/ La vitesse de réponse de l'évapotranspiration aux variations de R_n (cf. fig. 4 : passages nuageux de la journée du 24.5.76).
- 4°/ L'étroite corrélation existant entre les variations de R_n et de Φ_L et - de façon moins parfaite - entre Φ_S et R_n et entre P et R_n . L'étude plus détaillée de ces corrélations est illustrée par les figures 5 et 6.

III. 2 - Evolution des densités de flux au cours du cycle de croissance

- Quel que soit le développement du couvert et pour une alimentation en eau satisfaisante, l'évapotranspiration E.T du couvert suit linéairement les variations du rayonnement net (fig. 5).

On peut remarquer que pour un développement foliaire faible (journée du 22.4.76 avec I.F. = 1,1) les points s'alignent sur une droite d'équation :

$$E.T = 0,0010. R_n$$

$$R_n \text{ en } W. m^{-2}$$

$$E.T \text{ en } mm.h^{-1}$$

Les surfaces d'échange limitent l'évapotranspiration. Pour un indice foliaire de 3,9 (journée du 5.5.76) et au-dessus (journée du 2.4.76), les surfaces foliaires semblent suffisantes pour ne plus jouer le rôle de facteur limitant et la corrélation avec R_n est alors représentée par la droite d'équation :

$$E.T = 0,0012.R_n$$

Dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique et avec un couvert présentant un développement foliaire suffisant (indice foliaire supérieur à une valeur comprise entre 1,1 et 3,9), environ 83% du rayonnement net est consommé au cours de la journée sous forme de chaleur latente de vaporisation de l'eau.

- En ce qui concerne la corrélation entre P et R_n (fig. 6), et son évolution au cours du cycle végétatif, on peut remarquer :

1°/ Les points sont beaucoup plus dispersés autour des droites de régression. La corrélation est donc moins étroite entre Φ_C et R_n qu'entre l'évapotranspiration et R_n . Ceci est sans doute dû au fait que l'assimilation photosynthétique du gaz carbonique réagit moins rapidement aux fluctuations de R_n , que ne le fait l'évapotranspiration.

2°/ L'influence du stade de développement du couvert (I.F) sur Φ_C semble plus forte que pour l'évapotranspiration. Pour un même rayonnement net, la densité de flux de gaz carbonique fixé par le couvert augmente considérablement avec l'indice foliaire (quadruplant de valeur lorsque celui-ci passe de 1,1 à 6,7). Contrairement au cas de l'évapotranspiration il n'a pas été mis en évidence d'indice foliaire à partir duquel l'assimilation de gaz carbonique ne serait plus fonction que du rayonnement net, le développement du couvert, alors, n'apparaissant plus comme facteur limitant. Cependant des expériences antérieures nous suggèrent qu'un tel indice existe et que sa valeur se situe aux environs de 8.

III.3 - Etude de l'efficience hydrique de *Panicum maximum*

L'efficience hydrique (E_h) du couvert est définie par $E_h = P/\Phi_L$. La figure 7 représente les variations de E_h en fonction de R_n .

Pour un couvert bien développé (IF = 6,7) on remarque une augmentation de E_h avec R_n entre 0 et 300 W.m^{-2} , qui implique que, dans cette gamme de valeurs de R_n , P augmente plus vite que Φ_L . A partir de $R_n = 350 \text{ W.m}^{-2}$ l'efficience semble rester constante, de l'ordre de 8%.

Il faut noter également une augmentation importante de E_h avec le développement foliaire du couvert. Pour des rayonnements nets supérieurs à 300 W.m^{-2} , E_h passe de 3 à 8% quand l'indice foliaire augmente de 1,1 à 6,7. Ce résultat qui indique que la photosynthèse est plus sensible que l'évapotranspiration à un développement insuffisant des surfaces d'échange, a une portée agronomique intéressante. En effet, si la rentabilisation de l'eau est la préoccupation principale, il y aura intérêt à conduire l'exploitation d'une culture fourragère en maintenant le plus longtemps possible l'indice foliaire à des valeurs élevées. Ceci peut être obtenu par des densités de plantation ou de semis fortes et des techniques culturales favorisant une bonne reprise et une croissance rapide après la fauche (amendements, irrigation, désherbage).

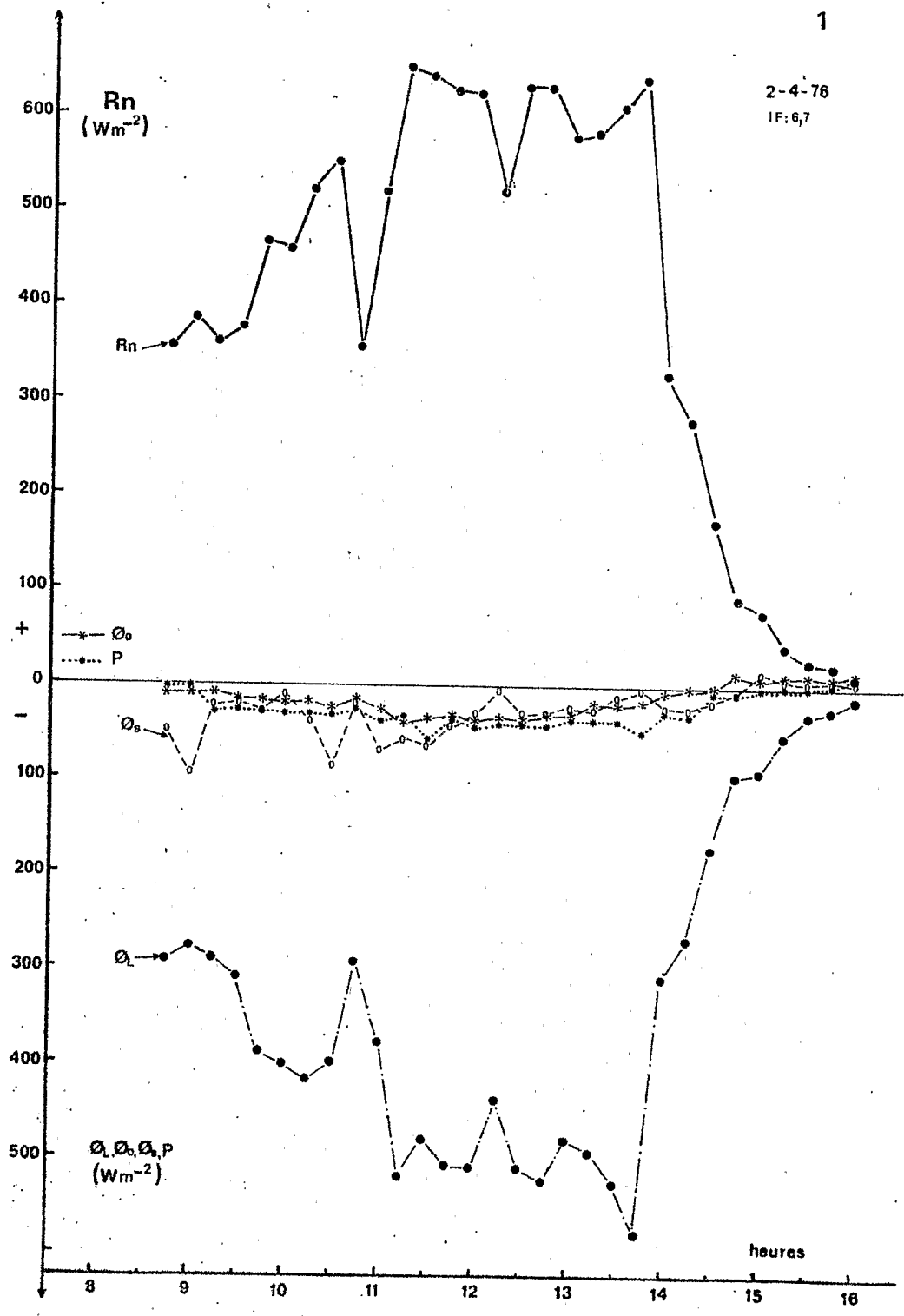
III.4 - Réaction physiologique du couvert au rayonnement

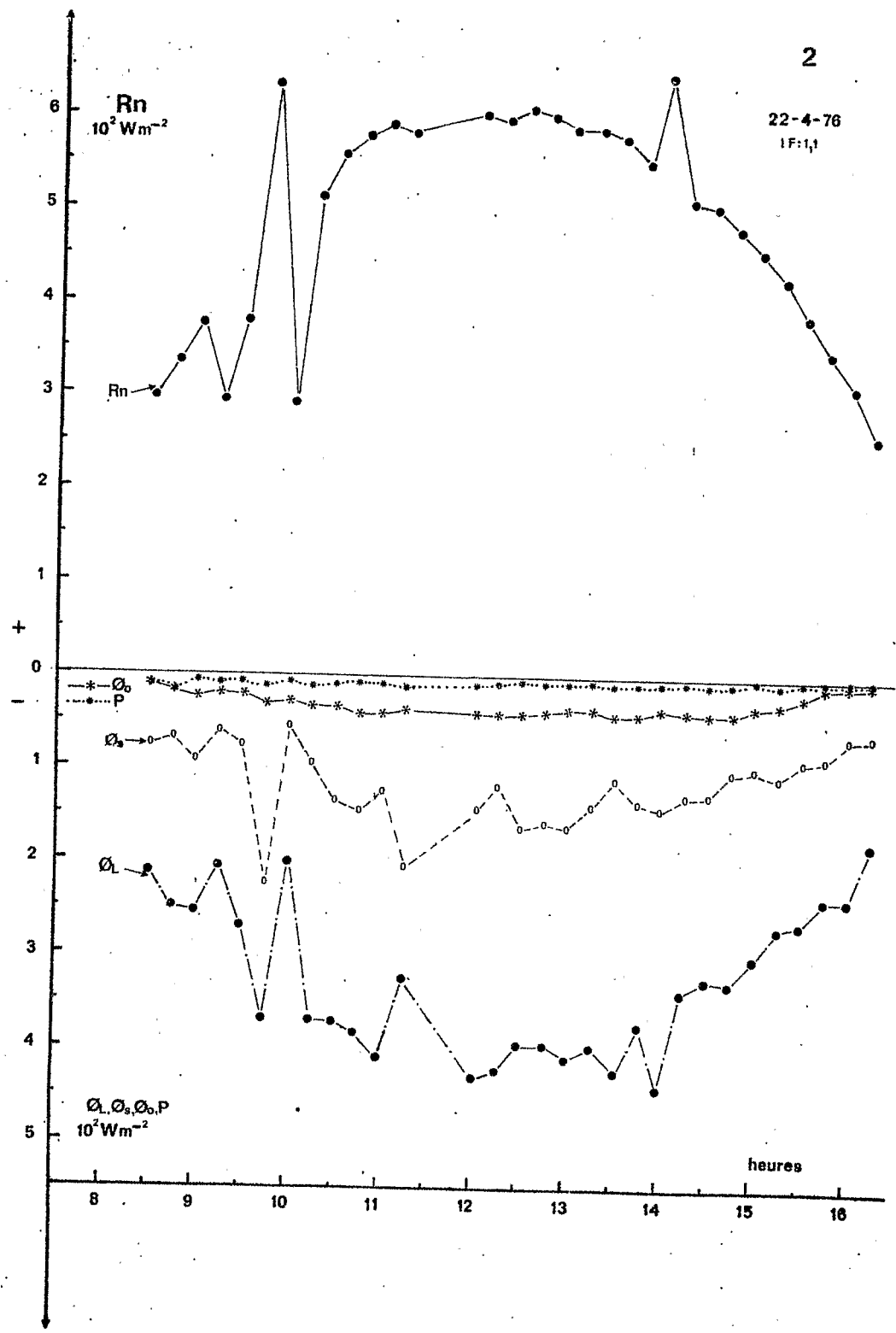
La figure 8 illustre les variations en fonction de R_n de la résistance du couvert à la diffusion de la vapeur d'eau entre les chambres sous-stomatiques et le sommet du couvert (Perrier, 1975). Cette résistance est la somme d'une résistance R_0 dues à la structure du couvert et d'une résistance R_s liée à la fermeture stomatique.

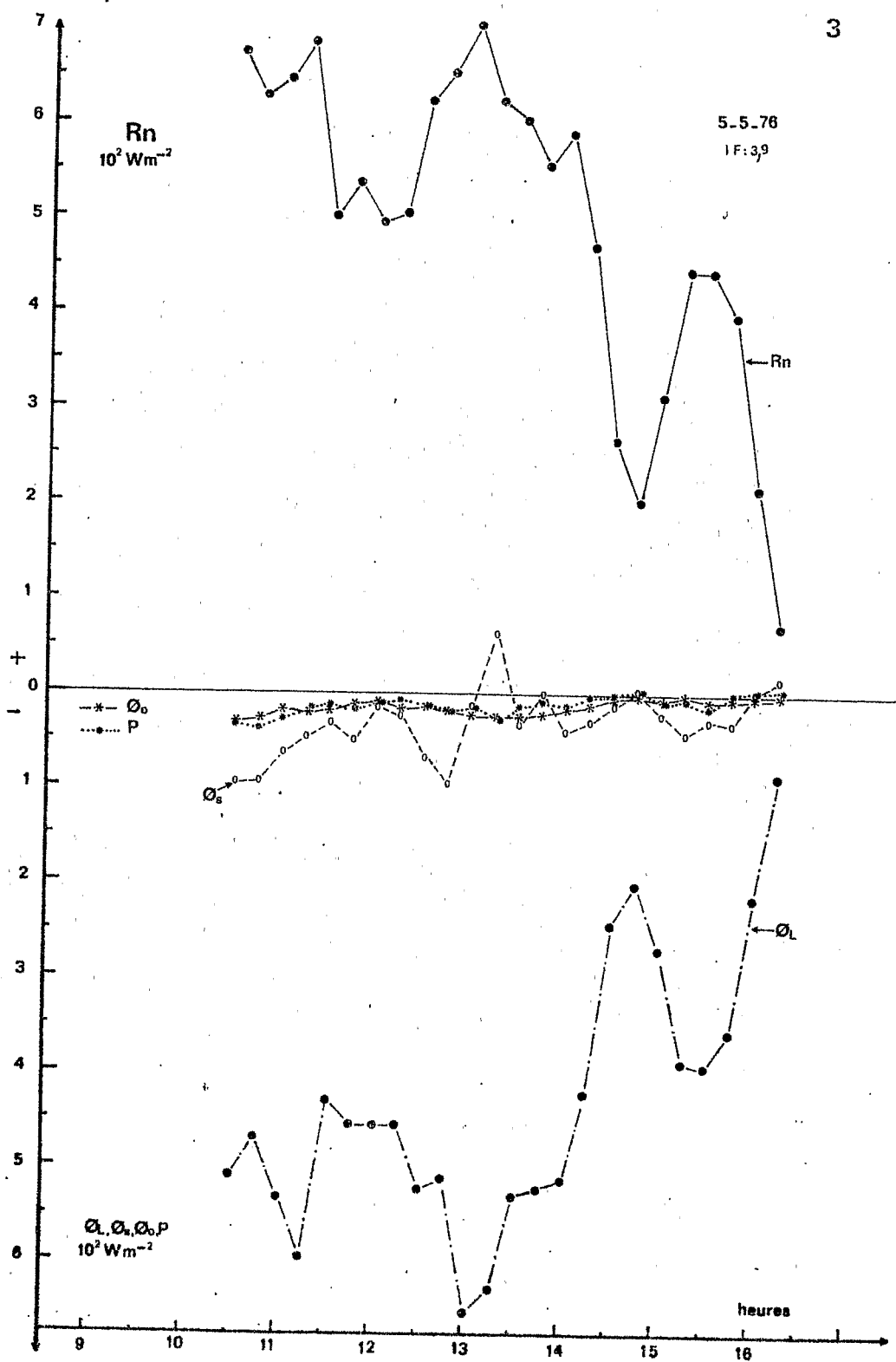
La courbe obtenue (figure 8) traduit la diminution de R_s quand R_n augmente : le rayonnement pénétrant plus profondément dans le couvert provoque l'ouverture d'un plus grand nombre de stomates. On peut remarquer, aussi, que R_{cv} se stabilise autour de la valeur

40 s.m⁻¹ lorsque R_n est supérieur à 300 W.m⁻². Cette valeur correspond donc à la valeur minimale de la résistance stomatique R_{sm} et représente la somme $R_{sm} + R_0$. Des mesures effectuées au cours et après une période d'irrigation (surfaces foliaires à saturation) suggèrent que R_{sm} est très faible devant R_0 . Ainsi pour un rayonnement net suffisant ($> 300 \text{ W m}^{-2}$), R_0 resterait constant et pratiquement indépendant de l'indice foliaire. Cette constatation suggère que la partie "active" d'un couvert de *Panicum*, c'est-à-dire celle qui participe aux échanges de vapeur d'eau, varie très peu avec le développement foliaire (tout au moins à partir d'un certain indice), se limitant à la strate supérieure. Ceci correspond au fait que l'évapotranspiration, ne dépend plus de l'indice foliaire, une fois que celui-ci a atteint une certaine valeur.

2-4-76
IF: 6,7







18, 20-5-76

1F:5,8

