

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

## 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

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

$\Phi_S$  est la densité de flux de chaleur sensible échangée par convection avec l'atmosphère

$\Phi_o$  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

$\Delta Q$  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

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

I.2.1 - Rayonnement net

Le rayonnement net représente le bilan radiatif de la culture :

$e_j$  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  $\lambda$  l'énergie radiative visible utilisée pour cette réaction. Avec nos conventions de signe, il vient :

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

$\Phi_c$  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 $\alpha$ .

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

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 $\beta$ .

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

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

$\beta$  s'écrira donc :

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

$$\epsilon = M_v / M_a$$

$\beta$  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  $\Phi_L$ , 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<sup>-1</sup>.

- 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  $\lambda$  est considérée comme égale à 10,05 J par mg de CO<sub>2</sub> 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

## 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  $\Delta T$  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  $\text{CO}_2$  de l'air est mesuré.

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



### 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  $\Phi_0$  et P par rapport à  $\Phi_L$

2°/ La faiblesse du rapport de Rayon  $R = \Phi_0 / \Phi_L$  dont la valeur

- 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  $\Phi_C$  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  $\Phi_C$  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.

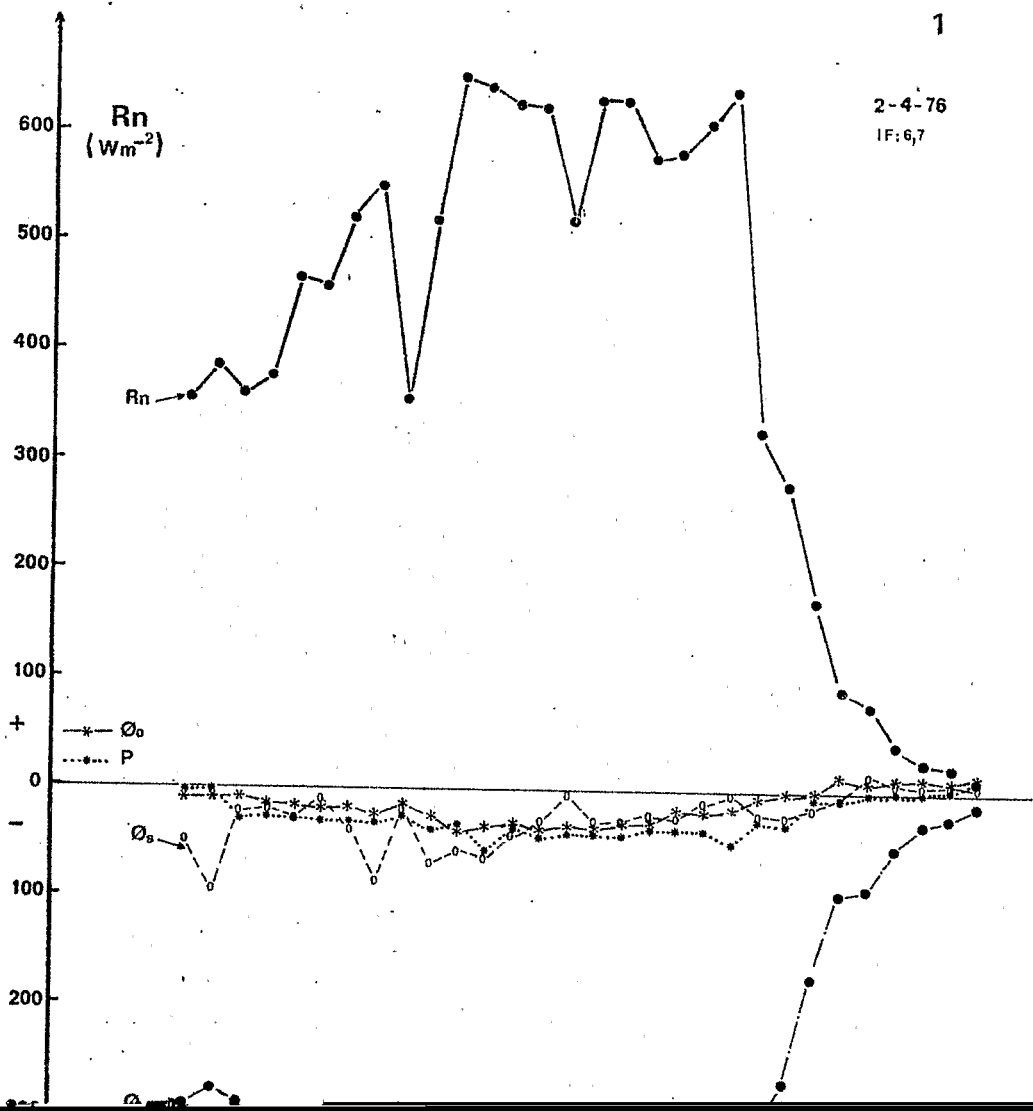
### III.3 - Etude de l'efficience hydrique de *Panicum maximum*

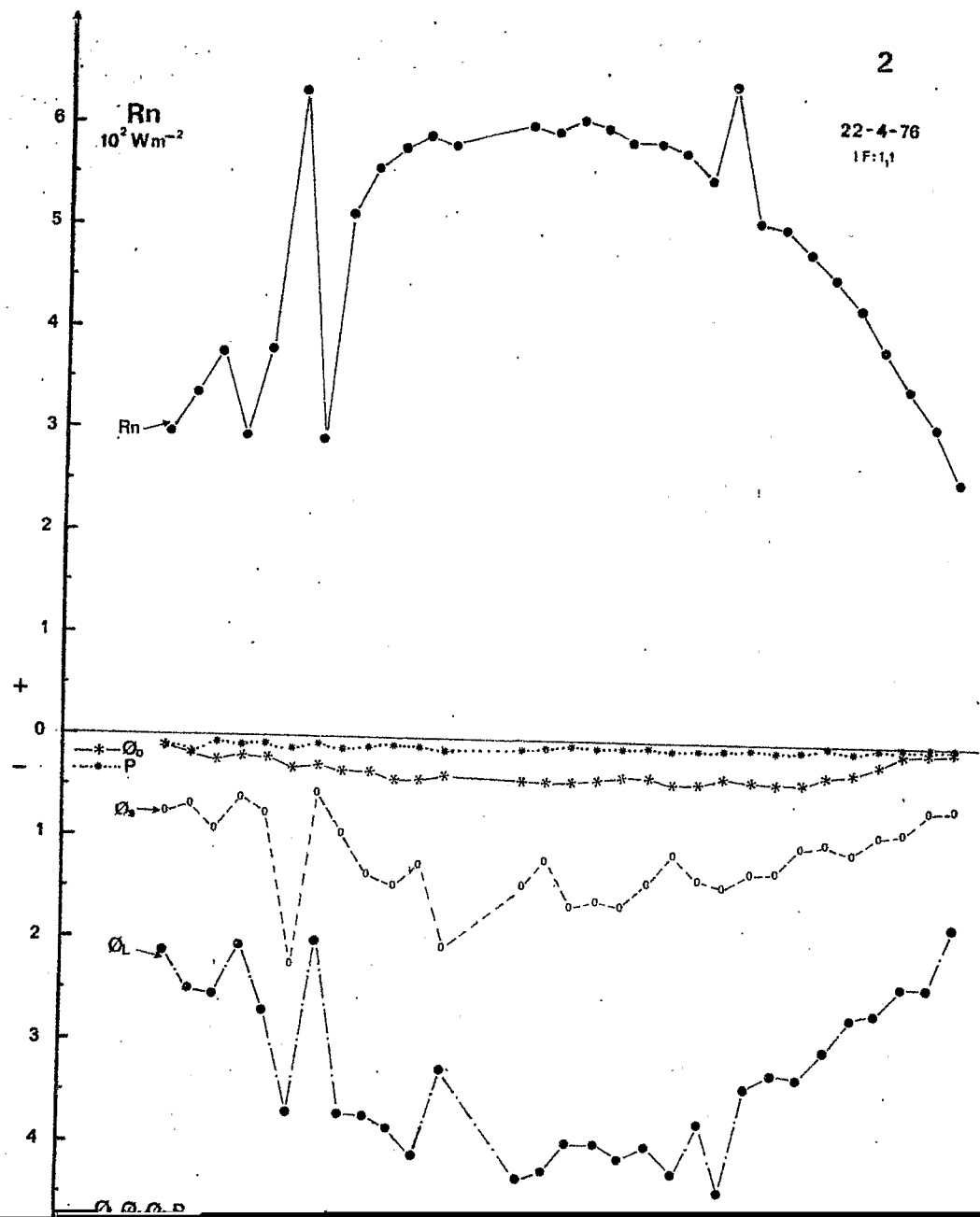
L'efficience hydrique ( $E_h$ ) du couvert est définie par  $E_h = P/\Phi_L$ . La figure 7 représente les variations de  $E_h$  en fonction de  $R_n$ .

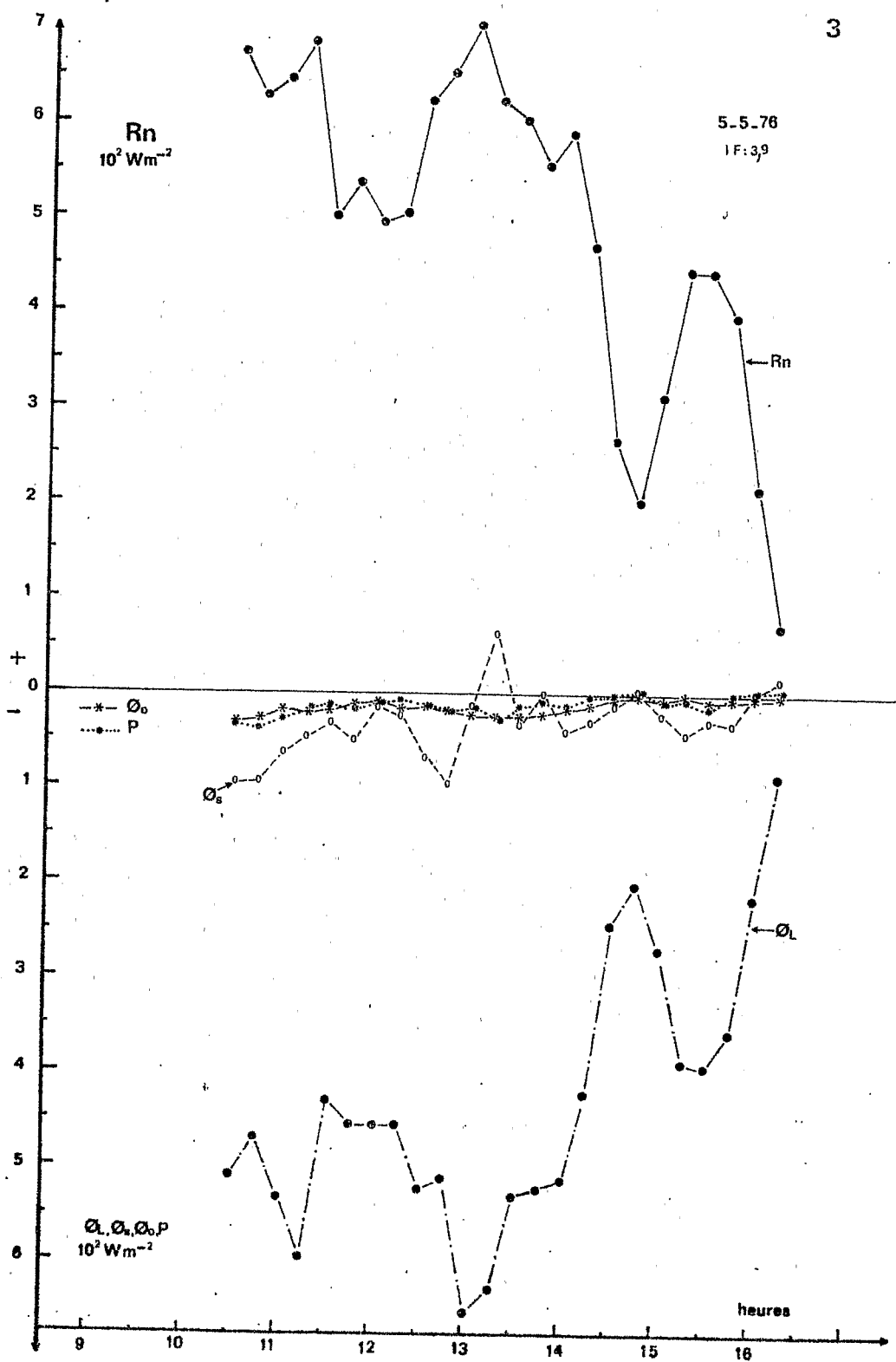
Pour un couvert bien développé (IF = 6,7) on remarque une aug-

40 s.m<sup>-1</sup> lorsque  $R_n$  est supérieur à 300 W.m<sup>-2</sup>. 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

2-4-76  
IF: 6,7

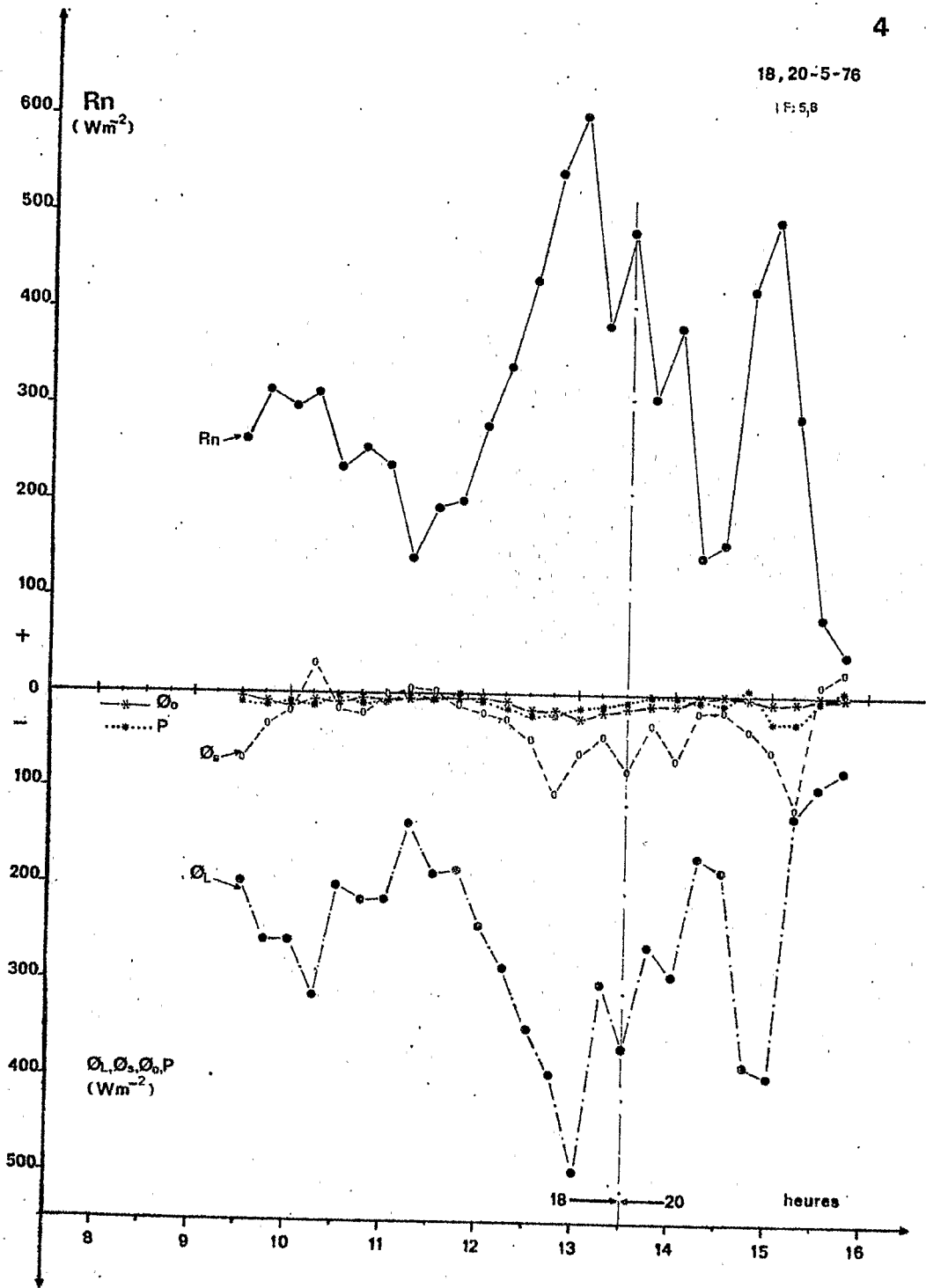


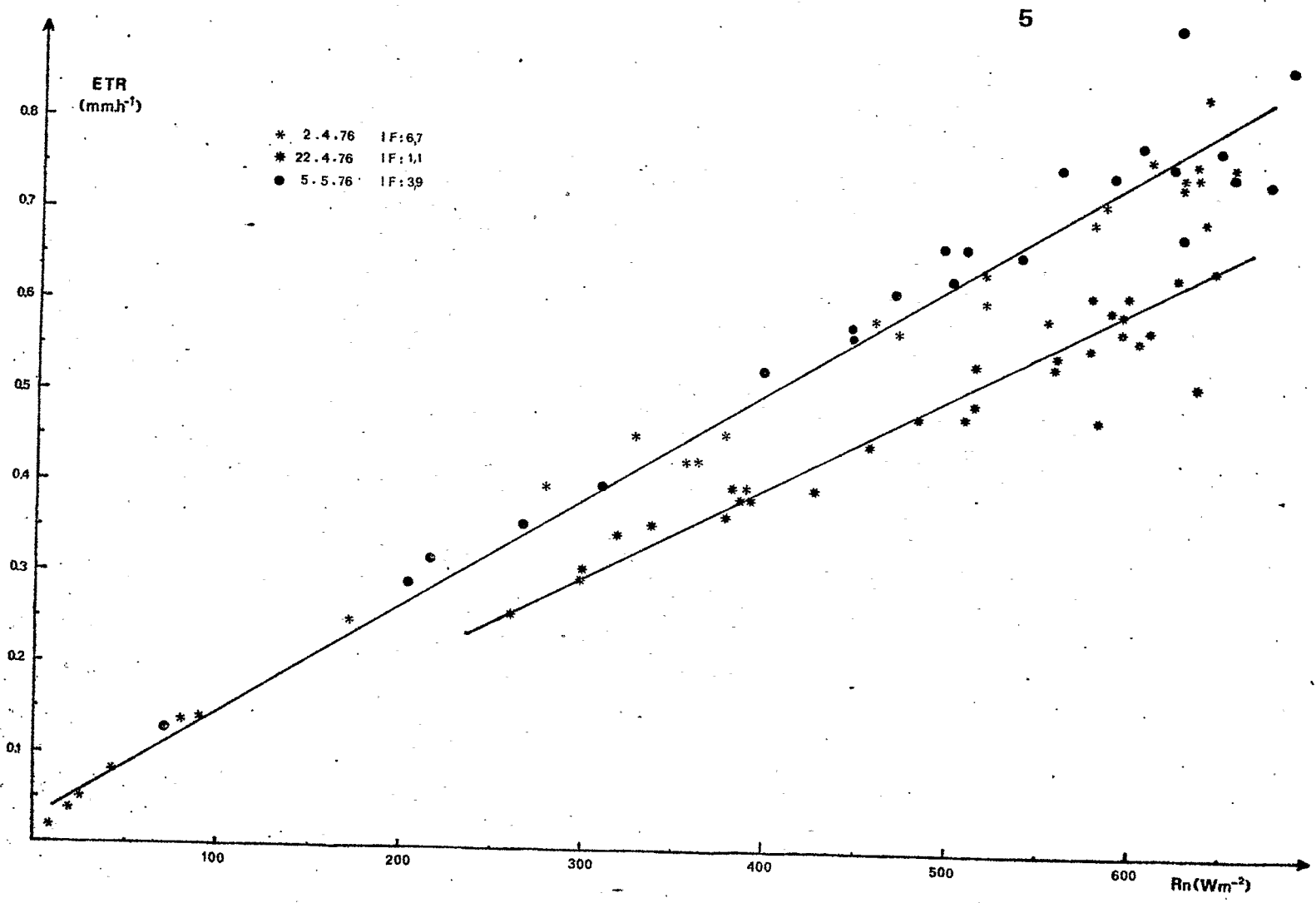




18, 20-5-76

1F:5,8







$\Phi_c$   
( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

- \* 2. 4. 76
- 22. 4. 76
- 5. 5. 76

5  
4  
3

1 F: 6,7

