

INFLUENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR LA PRODUCTION  
ET LA CONSOMMATION EN EAU D'UNE CULTURE FOURRAGERE  
- CONSEQUENCES AGRONOMIQUES -

M. ELDIN\*\*

B. MONTENY\*\*

J.P. LHOMME\*\*

Résumé

La méthode du bilan d'énergie a été appliquée à un couvert végétal homogène de *Panicum maximum* O.R.S.T.O.M. K. 187 pour suivre au cours du temps les échanges de cette culture avec l'atmosphère. En particulier, la consommation en eau (échanges de vapeur d'eau) et la production de matière sèche (échanges de CO<sub>2</sub>) ont été calculées et modélisées, en fonction des variables climatiques (rayonnement net, vitesse du vent, humidité et température de l'air...), et en fonction des paramètres biologiques du couvert (hauteur, indice foliaire, régulation stomatique...). On dégage à partir de ces modèles, des conclusions pratiques concernant le choix des variétés et les techniques culturales les mieux adaptées à l'objectif agronomique visé. On montre, en particulier, qu'une meilleure efficacité de l'eau peut être atteinte en maintenant l'indice foliaire de la culture à des valeurs élevées. Ceci peut être obtenu par le choix de fortes densités de plantation ou de semis, et par l'utilisation de techniques culturales favorisant une bonne reprise et une croissance rapide après la fauche (amendements, irrigation, désherbage, grande hauteur de fauche aussi souvent que possible...).

\*\*  
\*\* \*\*

---

(\*\*) Laboratoire de Bioclimatologie, Adiopodoumé, O.R.S.T.O.M.  
B.P. V51 ABIDJAN (Rép. de Côte d'Ivoire)

Cette étude porte sur les échanges de gaz carbonique et de vapeur d'eau entre une culture bien alimentée en eau et l'atmosphère. Elle a été conduite au Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé (5°19'N), près d'Abidjan, sur une parcelle d'un hectare, plantée en *Panicum maximum*, variété O.R.S.T.O.M. K 187.

Les résultats exposés ici conduisent à une estimation très simple des pertes en eau et de la production de matière sèche d'une culture de *Panicum maximum*. Ils permettent de dégager des indications concernant les techniques culturales à mettre en oeuvre et les variétés botaniques à choisir, en vue d'améliorer la production par une meilleure utilisation des facteurs climatiques.

Une méthode simple permet de définir les doses d'irrigation adaptées aux exigences climatiques et à chaque phase du cycle végétatif, et de déterminer les potentialités climatiques régionales de production. Mais au-delà des résultats concernant *Panicum maximum*, l'intérêt de ce travail est que cette méthode est applicable à toute culture irriguée de type graminéen et en particulier à la canne à sucre.

#### 1.- METHODE UTILISEE - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La méthode utilisée consiste à établir le bilan des échanges d'énergie entre la culture étudiée et le milieu environnant : air et sol.

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 :

$$R_n + E + H + S + P + \Delta Q = 0$$

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

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

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

$S$  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 permanent et faible en régime transitoire pour des périodes courtes (de l'ordre de l'heure ou plus petites).

On peut donc écrire :

$$(1) \quad R_n + E + H + S + P = 0$$

(ces différents termes sont exprimés en  $W. m^{-2}$ )

E, H et P peuvent s'exprimer par application de la loi de la convection, relative aux échanges de vapeur d'eau, de chaleur et de gaz carbonique entre le sommet de la culture (niveau  $z_1$ ) et une certaine hauteur (niveau  $z_2$ ) située dans l'air, au-dessus de la végétation.

On a donc :

$$E = L.(ET) = \frac{L.M_v}{R.\bar{T}} \frac{e_2 - e_1}{R_v}$$

$$H = \rho.C_p. \frac{T_2 - T_1}{R_T}$$

$$P = \lambda.C = - \lambda \frac{c_2 - c_1}{R_c}$$

ET évapotranspiration, exprimée en  $kg \ m^{-2} s^{-1}$

L chaleur latente de vaporisation de l'eau, exprimée en  $J.kg^{-1}$

$\rho$  masse volumique de l'air

$C_p$  chaleur massique de l'air

$e_1$  pression partielle de vapeur d'eau dans l'air au niveau  $z_1$  (en pascals)

R constante universelle des gaz parfaits

$M_v$  masse molaire de l'eau

$T_1$  température de l'air en degrés Kelvin au niveau  $z_1$

$R_v$  résistance à la convection de la vapeur d'eau à travers la couche d'air comprise entre les niveaux  $z_1$  et  $z_2$

$R_T$  résistance à la convection de la chaleur sensible à travers cette même couche d'air.

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

- $\lambda$  énergie radiative nécessaire à la fixation d'1 mg. de  $\text{CO}_2$  par photosynthèse ;  $\lambda = 10,1 \text{ J.mg}^{-1}$
- C densité de flux de gaz carbonique échangé entre la culture et l'atmosphère, exprimée en  $\text{mg. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- $R_c$  résistance à la convection du  $\text{CO}_2$  à travers la couche d'air comprise entre les niveaux  $z_1$  et  $z_2$ .

En posant :

$$\alpha = \frac{P}{E} = \frac{\lambda R \bar{T}}{L M_v} \times \frac{R_v}{R_c} \times \frac{c_2 - c_1}{e_1 - e_2} = 2,42 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{T} \cdot \frac{c_2 - c_1}{e_1 - e_2}$$

$$\beta = \frac{H}{E} = \frac{\rho C_p \bar{T}}{L M_v} \times \frac{R_v}{R_T} \times \frac{T_2 - T_1}{e_2 - e_1} = 59,4 \cdot \frac{T_2 - T_1}{e_2 - e_1}$$

D'après (1), on peut écrire :

$$R_n + S + E (1 + \alpha + \beta) = 0$$

$$\text{d'où : } E = \frac{R_n + S}{1 + \alpha + \beta} \quad P = \alpha \cdot E \quad ET = \frac{E}{L}$$

Pour déterminer ET et P, il suffit donc de mesurer:  $R_n$  avec un bilanmètre installé à quelques mètres au-dessus de la culture, S avec un fluxmètre placé à 2 ou 3 cm de profondeur dans le sol, et les gradients  $e_1 - e_2$ ,  $T_1 - T_2$  et  $c_1 - c_2$  entre les niveaux  $z_1$  et  $z_2$ .

$e_1$ ,  $e_2$ ,  $T_1$  et  $T_2$  sont mesurés avec des psychromètres à aspiration. On a collé sur les réservoirs des thermomètres, des thermocouples permettant un enregistrement à distance des températures sèches et humides.

$c_1 - c_2$  est obtenu avec un analyseur de gaz mesurant l'absorption d'un rayonnement infra-rouge par le gaz carbonique.

## 2.- RESULTATS

Ils concernent une culture bien alimentée en eau (par des irrigations bi-hebdomadaires en saison sèche) et recevant après chaque fauche une fumure minérale complète pour essayer d'éliminer tout facteur limitant non climatique, susceptible de masquer les potentialités de production.

### 21.- Evolution des pertes en eau et de l'assimilation photosynthétique au cours de la journée

Les figures 1 et 2 montrent l'évolution du rayonnement net, de l'évapotranspiration et de la fixation du gaz carbonique par la culture, à deux stades de développement foliaire très différents. Chaque point de la figure correspond à la mesure effectuée pendant 7 minutes. On peut faire les remarques suivantes :

- Dans les deux cas, E et C suivent les variations de  $R_n$  ; E de façon très étroite, C de façon beaucoup plus lâche.

- Pour les deux indices foliaires (I.F.) considérés, E représente une part importante et relativement constante de  $R_n$ , alors que C varie considérablement quand on passe de IF = 1,1 à IF = 6,7.

Ces mesures de E, C et  $R_n$  ont été effectuées pour un grand nombre de journées, pour des indices foliaires variant de 1,1 à 6,7 et ceci, sur plusieurs cycles végétatifs différents, pendant les années 1973 à 1976. Les résultats sont récapitulés sur les figures 3 et 4.

L'examen des figures 3 et 4 montre que :

211.- Pour un indice foliaire donné, les variations de E et P en fonction de  $R_n$  sont linéaires.

212.- Pour un rayonnement net donné, la valeur de E dépend peu de celle de I.F. - Pour un IF > 3 on peut considérer que l'évapotranspiration découle de la formule :

(2)  $E = 0,80. R_n$ , ce qui signifie que l'énergie utilisée pour la vaporisation de l'eau au sein du couvert représente 80 p.100 de l'énergie radiative disponible. MONTENY et GOSSE ont montré que pour une culture d'albedo a, il existe une relation entre le rayonnement net et le rayonnement global G :

$$R_n = 0,896 (1-a) G - 57,4 \quad (G \text{ et } E \text{ en } J.cm^{-2}.jour^{-1})$$

L'albedo moyen a d'un couvert de *Panicum maximum* étant de 0,19, la formule devient :

$$(3) \quad R_n = 0,726 G - 57,4$$

La combinaison de (2) et (3) permet d'arriver à :

$$E = 0,58 G - 45 \quad (G \text{ et } E \text{ en } J.cm^{-2}.jour^{-1}), \text{ ou encore :}$$

$$(4) \quad E = 2,39.10^{-3}. G - 0,19$$

avec E en mm.jour<sup>-1</sup> et G en J.cm<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup>.

La formule (4) permet donc une bonne estimation de l'évapotranspiration maximale de la culture, à partir de la simple connaissance de la valeur quotidienne du rayonnement global (G).

213.- Pour un rayonnement donné, la valeur de C est largement dépendante de la valeur de IF. Pour un même rayonnement net, la fixation de CO<sub>2</sub> quadruple quand on passe de IF = 1,1 à IF = 6,7.

Nous avons cherché, en vue d'une modélisation de la production de matière sèche, à exprimer l'efficacité photosynthétique  $\frac{P}{R_n}$  en fonction de I.F. Pour cela nous avons porté, sur la figure 5, les valeurs des pertes des droites de la figure 4 en fonction de IF. Ces valeurs s'alignent correctement, ce qui permet d'écrire :

$$\frac{P}{R_n} = 0,011. IF$$

ou encore, en tenant compte de (3) :

$$(5) \quad \frac{P}{G} = 0,0077 IF. \text{ (droite tracée sur la fig. 5)}$$

On a ainsi une expression de P en fonction de G et de IF.

## 22.- Rôle de l'architecture de la végétation sur la production

L'architecture de la culture, caractérisée par la distribution verticale des surfaces et des inclinaisons foliaires, intervient sur la répartition et l'utilisation de l'énergie radiative au sein du couvert, et donc sur son assimilation photosynthétique. VERHAGEN, KUROIWA, DUNCAN ont analysé l'impact des angles foliaires sur la productivité ; quel que soit l'angle foliaire moyen, l'assimilation photosynthétique est quasi-identique pour les faibles valeurs d'indice foliaire ( $1 < IF < 3$ ). Il n'en est plus de même aux valeurs élevées de IF, pour lesquelles l'importance de l'inclinaison devient grande. Ces auteurs ont montré que des feuilles, érigées au sommet du couvert, et horizontales à la base, constituent le type d'architecture le plus efficace, tant pour les fortes hauteurs du soleil (milieu de la journée, bonne pénétration du rayonnement en profondeur dans la végétation) que pour les faibles hauteurs (rayonnement solaire direct presque perpendiculaire aux feuilles supérieures).

Les mesures que nous avons effectuées sur *Panicum maximum* (fig.6) montrent : une inclinaison moyenne des feuilles égale à  $45^\circ$ , mais avec une forte proportion de feuilles verticales au sommet du couvert, et une forte proportion de feuilles horizontales à la base. Ainsi, la variété utilisée (K.187) est, du point de vue de l'inclinaison, proche de l'optimum.

En ce qui concerne les surfaces foliaires (fig.7), une amélioration de productivité pourrait être obtenue, par la sélection de variétés à indice foliaire total plus élevé (mais ceci peut également se faire en augmentant les densités de plantation); et surtout par la réalisation d'une meilleure distribution verticale : la variété utilisée possède trop de feuilles dans le tiers supérieur du couvert et pas assez dans la moitié inférieure. Quoiqu'il en soit et comme nous l'avons déjà montré, l'indice foliaire total conditionne grandement l'activité photosynthétique, et il importe de pouvoir déterminer sa valeur, si l'on veut estimer ou prévoir la production de la culture.

## 23.- Estimation de l'indice foliaire :

La mesure directe de l'indice foliaire est longue et difficile. C'est pourquoi nous avons cherché à estimer sa valeur à un moment donné du cycle végétatif. Nous avons tout d'abord étudié l'évolution de l'indice foliaire en fonction du nombre de jours n après la fauche, pour différents cycles de la culture (fig.3).

Les courbes représentatives de cette évolution sont des sigmoïdes, qui traduisent le fait que le développement foliaire du couvert se fait en trois phases principales :

- Pendant les 12 premiers jours après la fauche, on observe la sortie de feuilles érigées, déjà présentes dans la gaine de la tige au moment de la coupe. Le couvert augmente assez rapidement de hauteur, mais la surface des feuilles est peu importante.

- Pendant les 15 jours suivants, qui correspondent à une phase de formation des jeunes talles, l'indice foliaire s'accroît très rapidement, la hauteur du couvert n'augmentant qu'assez peu. Vers la fin de cette phase, on assiste à une élongation importante des entre-noeuds qui se traduit par une translation vers le haut de la masse foliaire.

- Dans une dernière phase, qui commence vers le trentième jour après la fauche, l'augmentation de l'indice foliaire est plus faible pour devenir assez vite quasiment nulle.

La famille de courbes de la fig.8 montre qu'il est difficile d'obtenir une estimation correcte de l'indice foliaire à partir de la simple considération du nombre de jours écoulés depuis la fauche. On remarque néanmoins sur cette figure, que l'ensemble des courbes présente un indice foliaire voisin de 0,6, le sixième jour après la fauche.

Partant du fait que le rayonnement solaire global est, en conditions d'alimentation hydrique optimales, le facteur dominant de la photosynthèse, nous avons essayé d'exprimer l'évolution de l'indice foliaire (IF)<sub>n</sub> atteint le n<sup>e</sup> jour après la fauche, en fonction du rayonnement global cumulé (G<sub>n</sub>) du 6<sup>e</sup> au n<sup>e</sup> jour après la fauche.

On remarque (fig.9) des évolutions très semblables des indices foliaires en fonction de G<sub>n</sub> pour les différents cycles végétatifs étudiés, (à l'exception de celui commençant le 28.3.73 pour lequel il n'y a eu après la fauche, ni apport d'engrais, ni irrigation).

Nous avons ajusté les points expérimentaux, obtenus pour les valeurs de G<sub>n</sub> comprises entre 0 et  $4 \times 10^3 \text{ J.m}^{-2}$ , à une fonction puissance, par la méthode des moindres carrés. Cet ajustement nous a conduit à l'expression :

$$(6) \text{ IF} = 0,60 + 0,61. (G_n)^{1,75} \quad (\text{avec } G_n \text{ exprimé en } 10^3 \text{ J.m}^{-2})$$

qui permet une estimation de IF à partir de la mesure journalière de G (courbe sur la gauche de la figure 9).

#### 24.- Expression des potentialités climatiques de production

Elle est facile à partir des résultats précédents :

Nous avons montré en 213, que :

$$P = 0,0077. \text{ IF. } G$$

et avons trouvé ci-dessus une expression de IF en fonction de  $G_n$

On peut donc écrire :

$$P = 0,0077 (0,60 + 0,61.G_n^{1,75}). G.10^8$$

$$P \text{ en } J. m^{-2}, G \text{ et } G_n \text{ en } 10^8. J.m^{-2}$$

d'où :

$$C = \frac{P}{\lambda} = (46 + 46,5 G_n^{1,75}) G$$

avec C en g. de  $CO_2$  par  $m^2$ ,  $G_n$  et G en  $10^8. J.m^{-2}$

En tenant compte du fait qu'une molécule de  $CO_2$ , de poids moléculaire 44 g, fixée par photosynthèse, se transforme par la suite des réactions métaboliques de la plante en molécules organiques dont le poids moyen est de 28 g., on peut aussi écrire :

$$(7) \quad M.S. = \frac{28}{44} C = (29 + 29,6 \times G_n^{1,75}).G$$

où M.S. est la production photosynthétique nette de matière sèche exprimée en  $g.m^{-2}$ .

G et  $G_n$  en  $10^8. J.m^{-2}$

Le tableau 1, ci-après, fournit un exemple d'utilisation de ces résultats.

La formule (7) n'est compliquée qu'en apparence. Elle permet l'évaluation de l'assimilation photosynthétique nette de la culture à n'importe quelle échelle de temps (valeurs horaires, journalières, ou pour le cycle végétatif jusqu'à  $G_n = 4.10^8. J.m^{-2}$ ), en fonction de la mesure de G et de son cumul  $G_n$  depuis le 6e jour après la fauche.



TABLEAU 1

Exemple d'estimation de la production de matière sèche d'une culture

Nombre de jours après la fauche	Dates	G en $10^8 \text{ J.m}^{-2}$	G <sub>n</sub> en $10^8 \text{ J.m}^{-2}$	IF	C en g. de CO <sub>2</sub> par m <sup>2</sup>	M.S. en g. par m <sup>2</sup>	MS cumulé en g. par m <sup>2</sup>
Fauche	20.2.73						
1	21.2						
2	22.2						
3	23.2						
4	24.2						
5	25.2						
6	26.2						
7	27.2	0,162	0,162	0,63	7,72	4,91	4,91
8	28.2	0,205	0,367	0,71	11,03	7,02	11,93
9	1.3	0,180	0,547	0,81	11,15	7,09	19,02
10	2.3	0,207	0,754	0,97	15,34	9,76	28,78
11	3.3	0,108	0,862	1,07	8,81	5,61	34,39
12	4.3	0,199	1,061	1,28	19,37	12,32	46,71
13	5.3	0,172	1,233	1,48	19,41	12,35	59,06
14	6.3	0,190	1,423	1,73	25,07	15,96	75,02
15	7.3	0,181	1,604	1,99	27,52	17,51	92,53
16	8.3	0,160	1,764	2,25	27,41	17,44	109,97
17	9.3	0,150	1,914	2,50	30,49	19,41	129,38
18	10.3	0,143	2,057	2,76	30,04	19,11	148,49

Estimation : Environ 150 g de matière sèche par m<sup>2</sup> de végétation produite par photosynthèse entre le 6e et le 19e jour après la fauche.

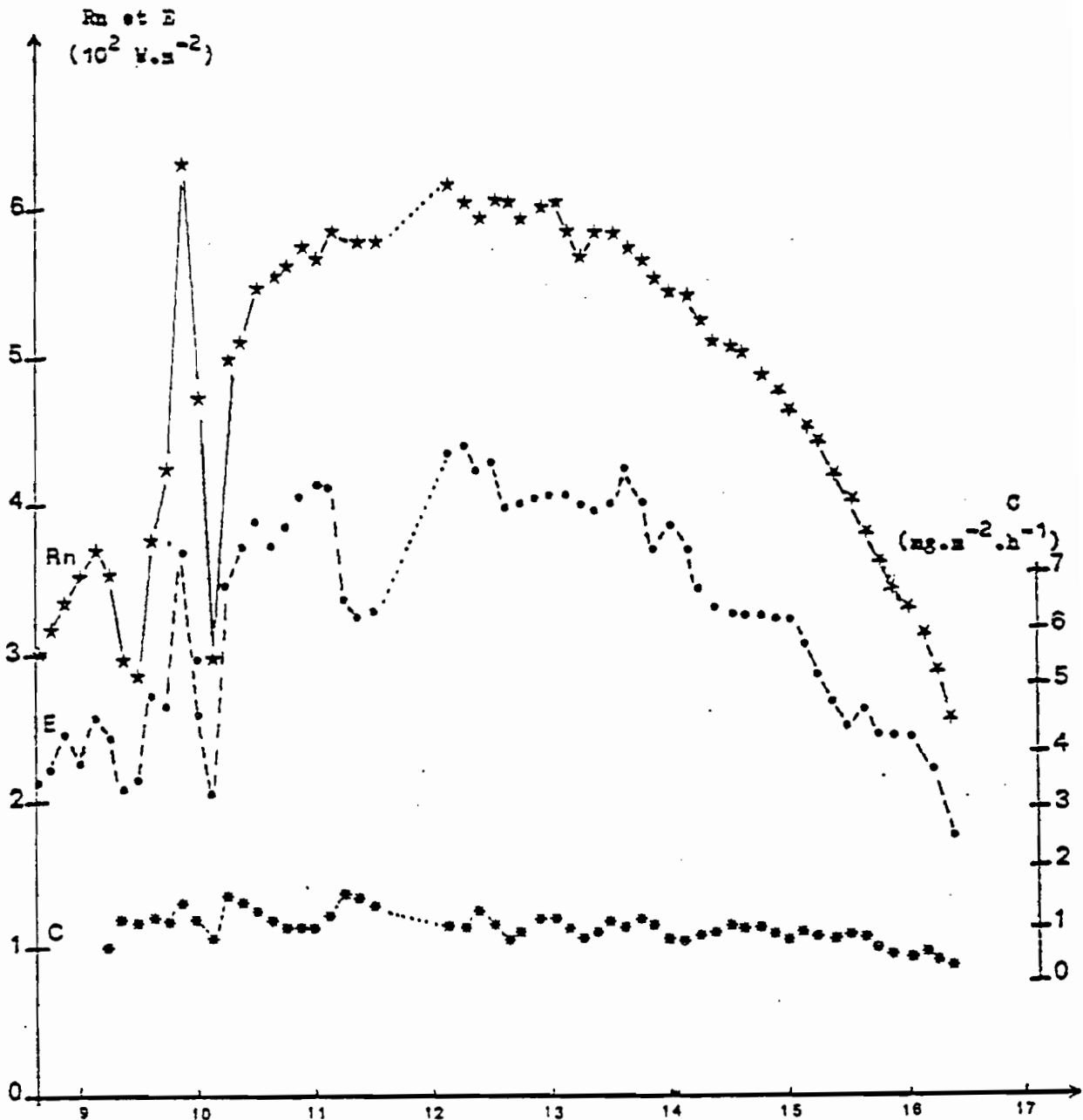


Fig. 1 : Evolution du rayonnement net (Rn), des pertes en eau (E) et de la consommation en  $\text{CO}_2$  (C) d'une culture de Panicum maximum d'un indice foliaire de 1,1.

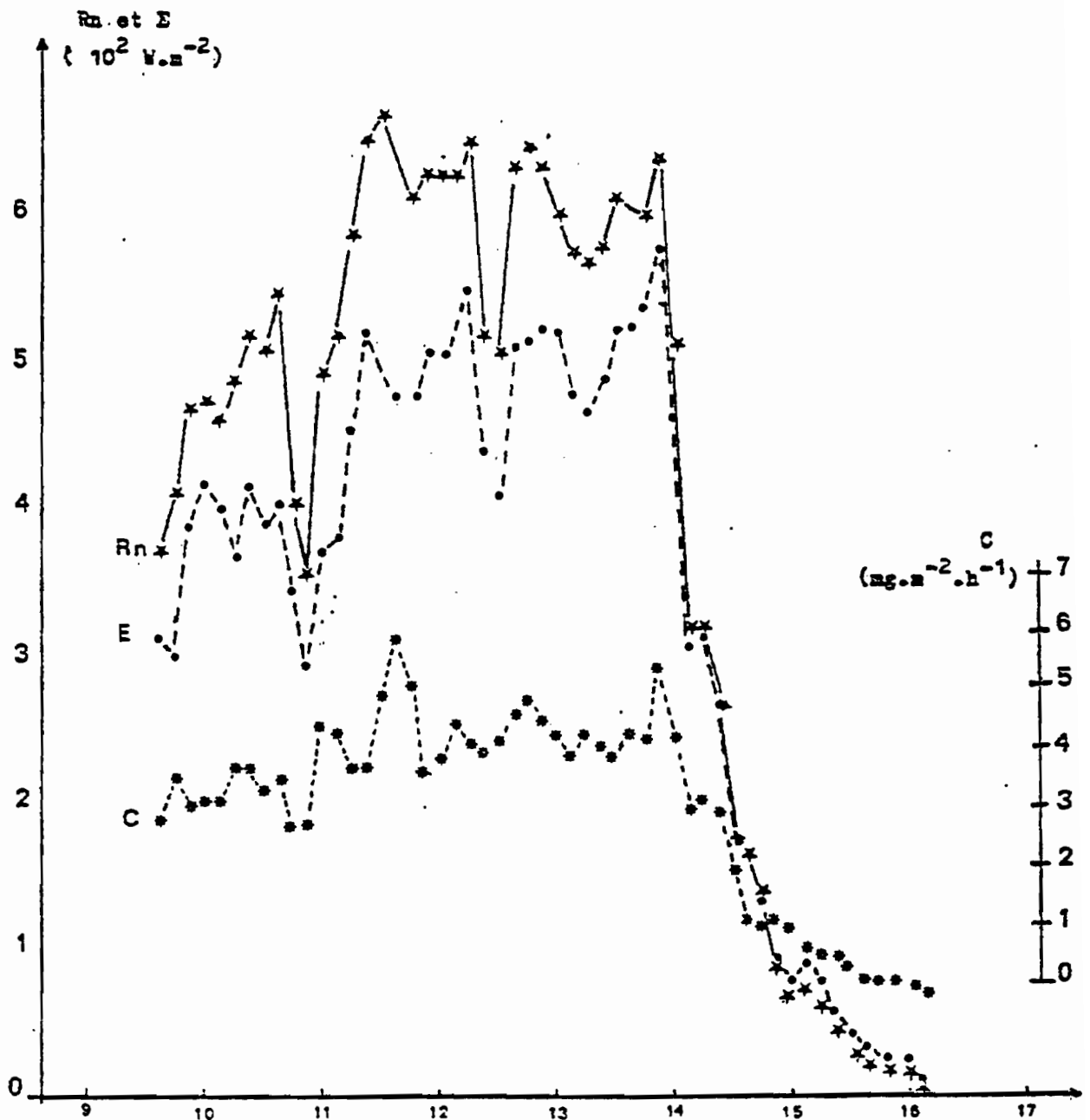


Fig. 2 : Evolution du rayonnement net (Rn), des pertes en eau (E) et de la consommation en  $\text{CO}_2$  (C) d'une culture de Panicum maximum d'un indice foliaire  $^2$  de 6,7.

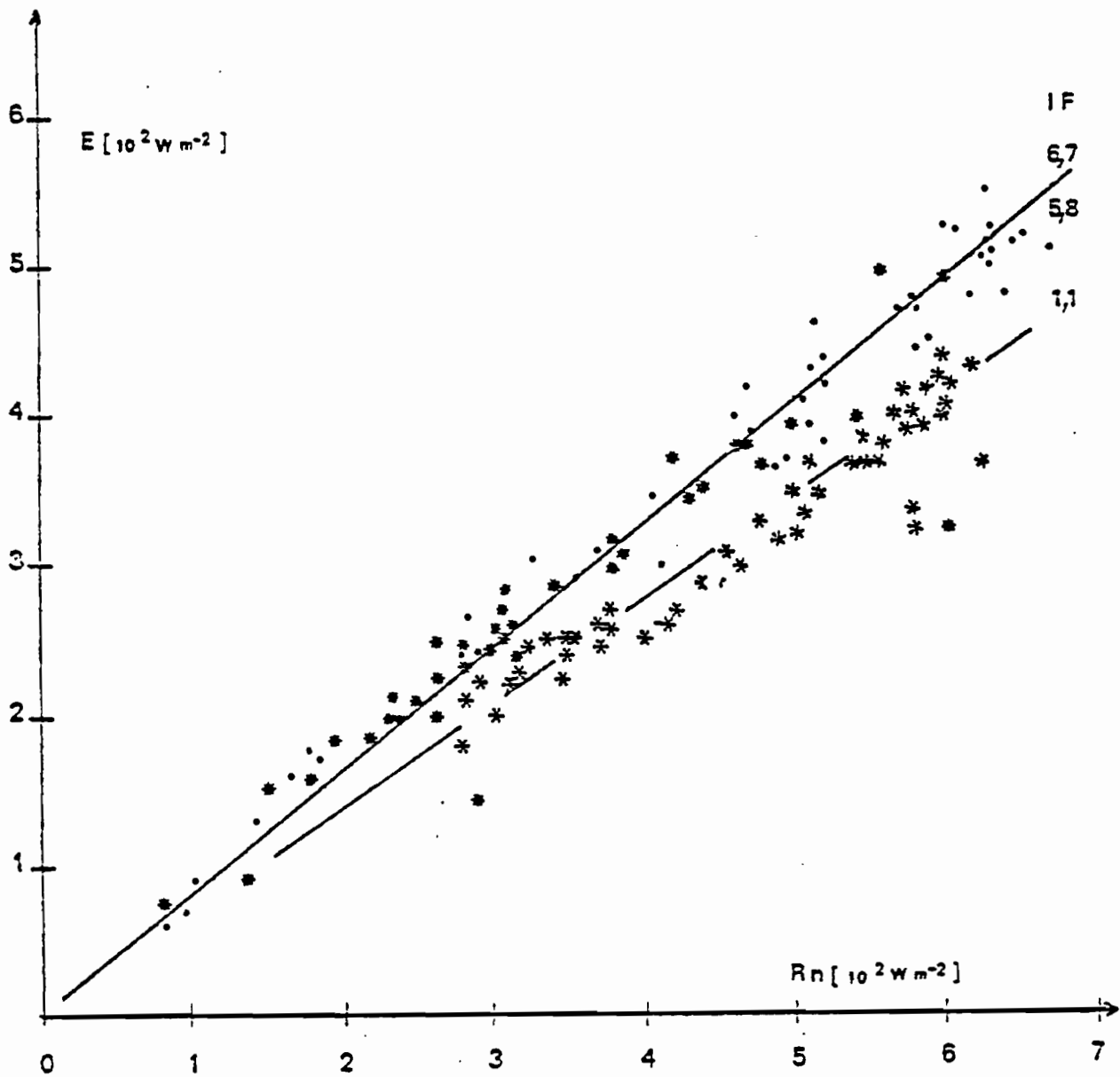


Fig. 3 : Relation entre le rayonnement net ( $R_n$ ) et les pertes en eau ( $E$ ) de la culture en fonction de son développement foliaire.

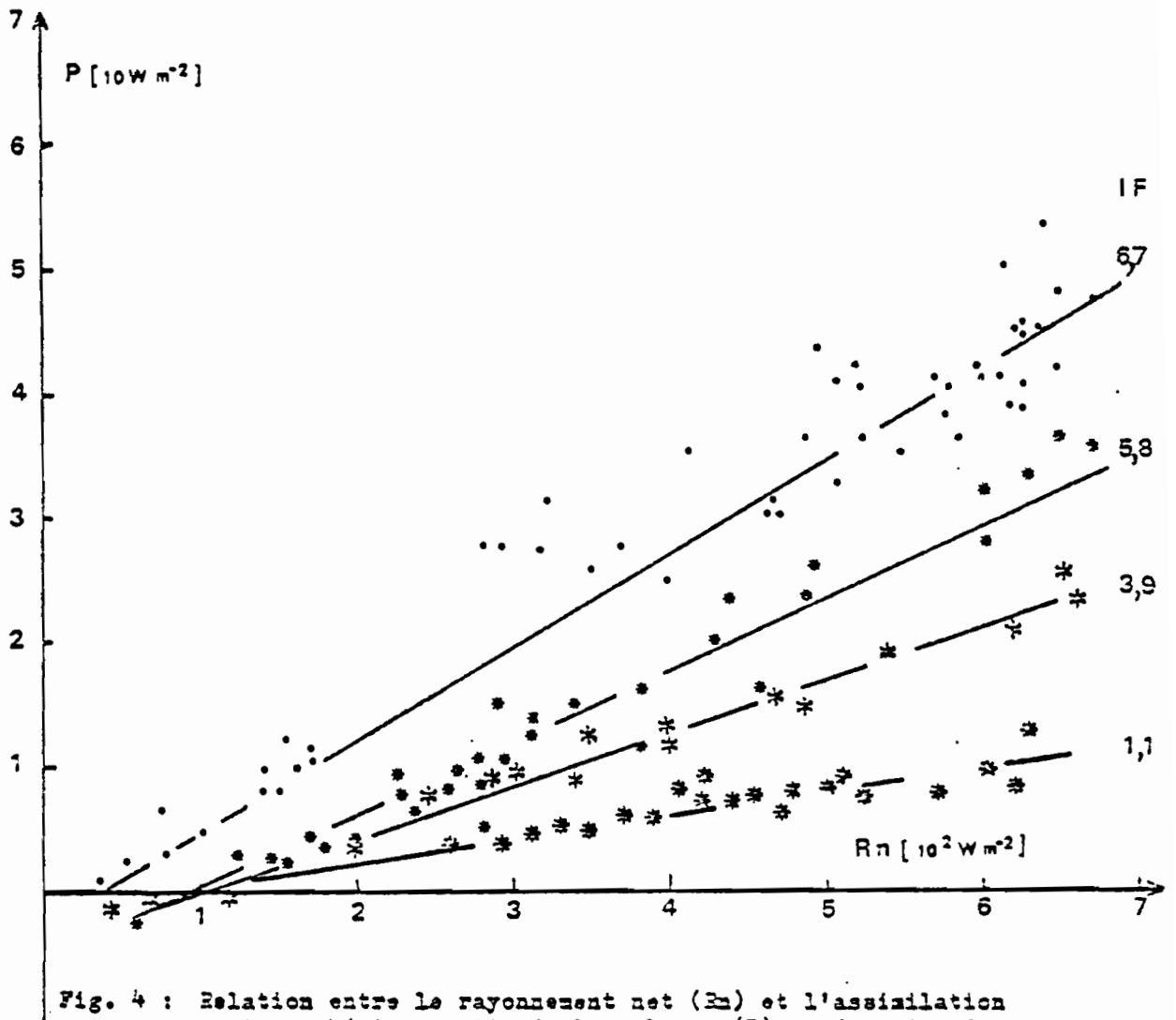


Fig. 4 : Relation entre le rayonnement net ( $R_n$ ) et l'assimilation photosynthétique nette de la culture ( $P$ ) en fonction de son développement foliaire.

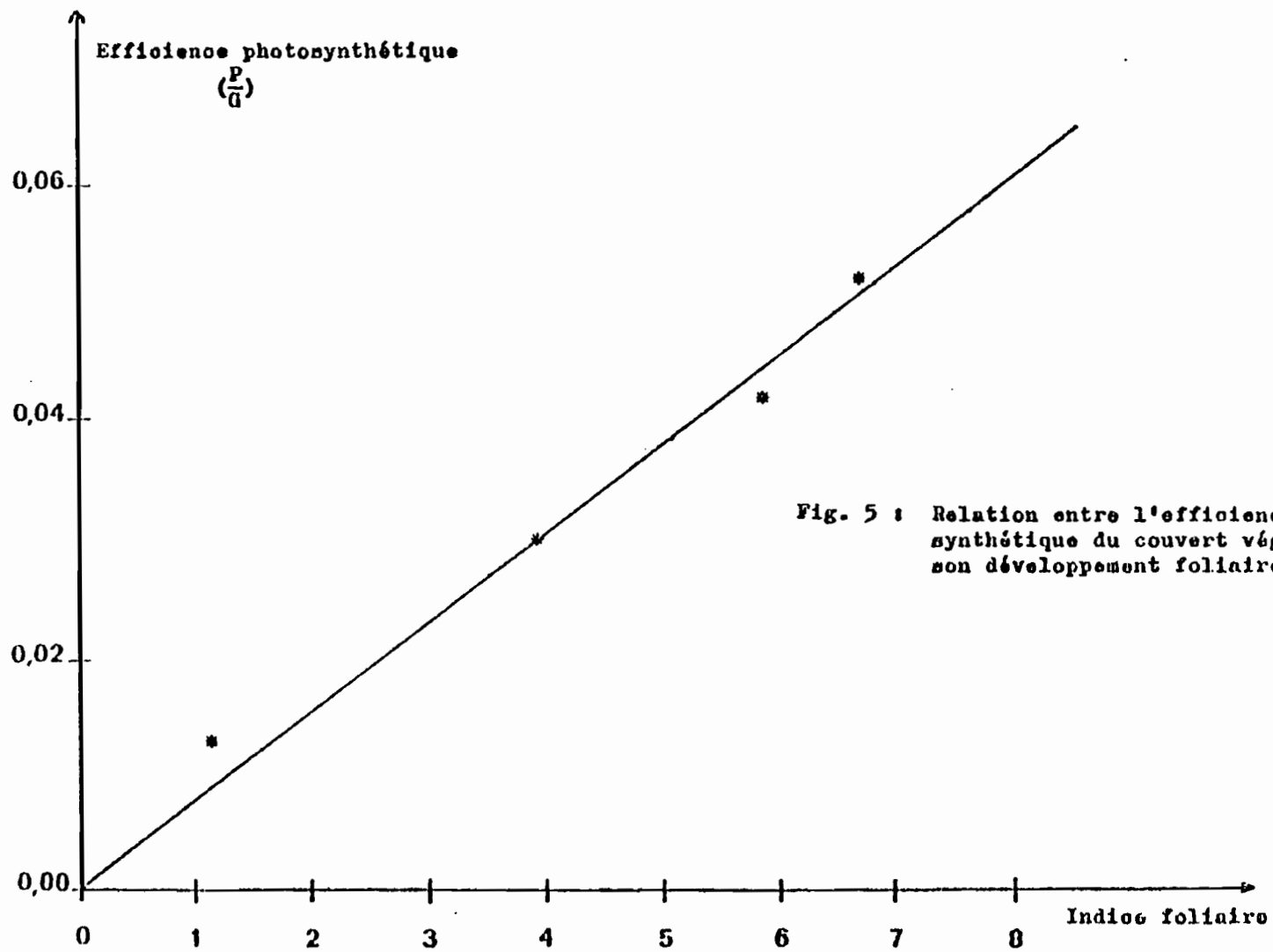


Fig. 5 : Relation entre l'efficience photosynthétique du couvert végétal et son développement foliaire.

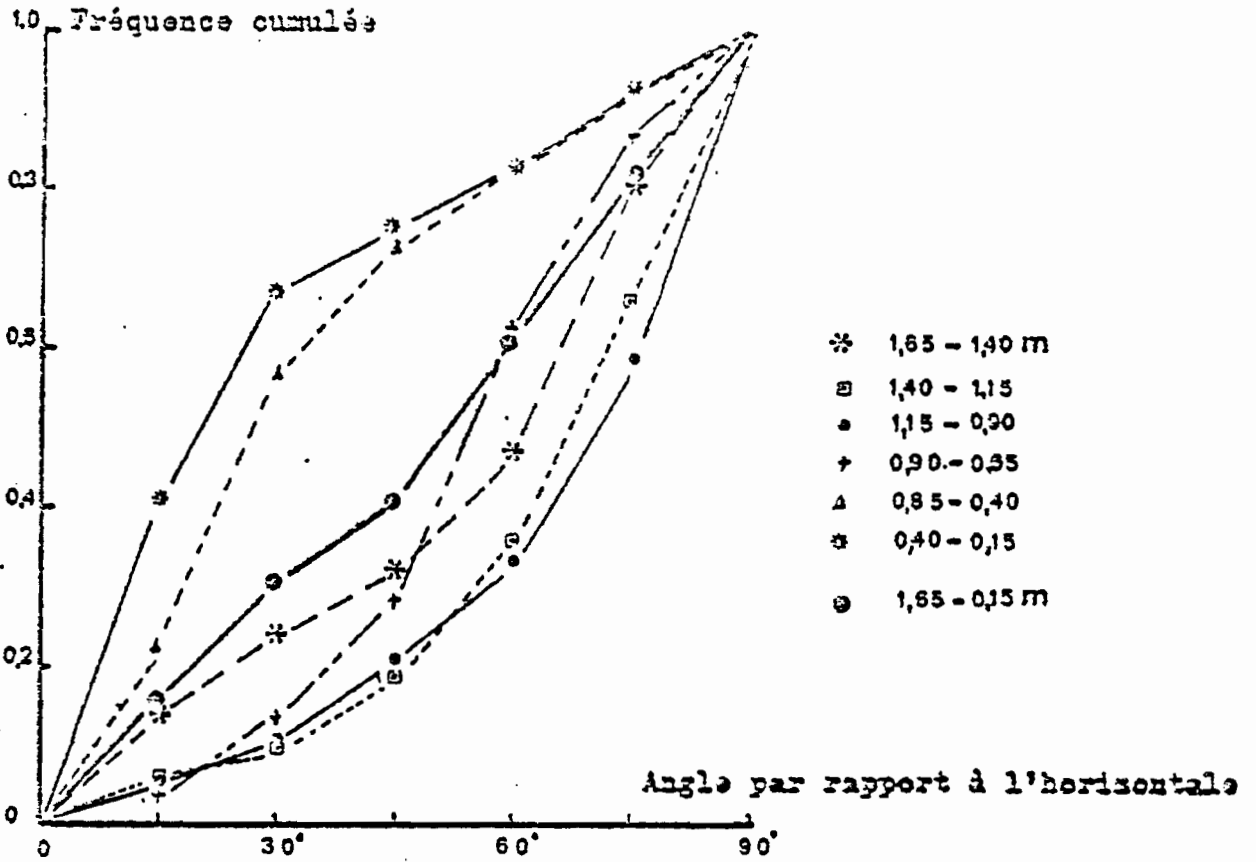


Fig. 6 | Fréquence cumulée des surfaces foliaires du couvert par niveaux suivant les angles foliaires.

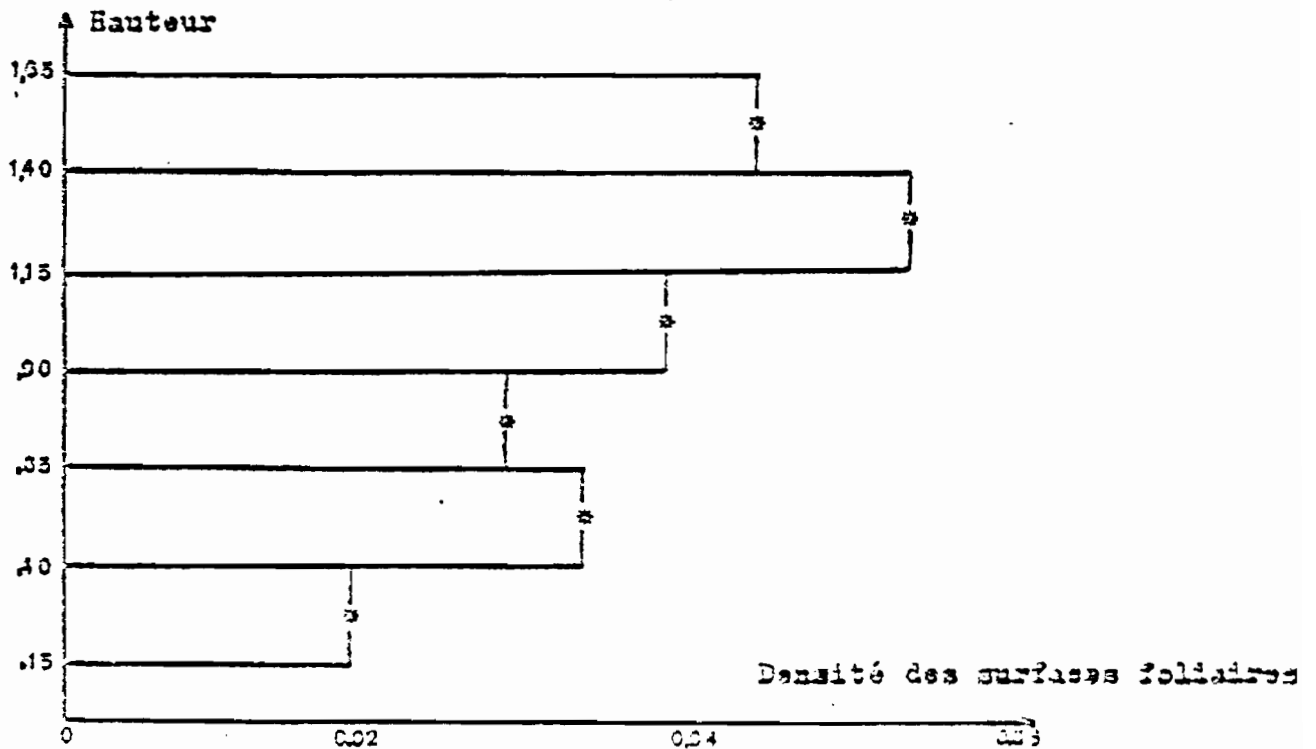


Fig. 7 : Répartition de la densité des surfaces foliaires aux différents niveaux du couvert végétal.

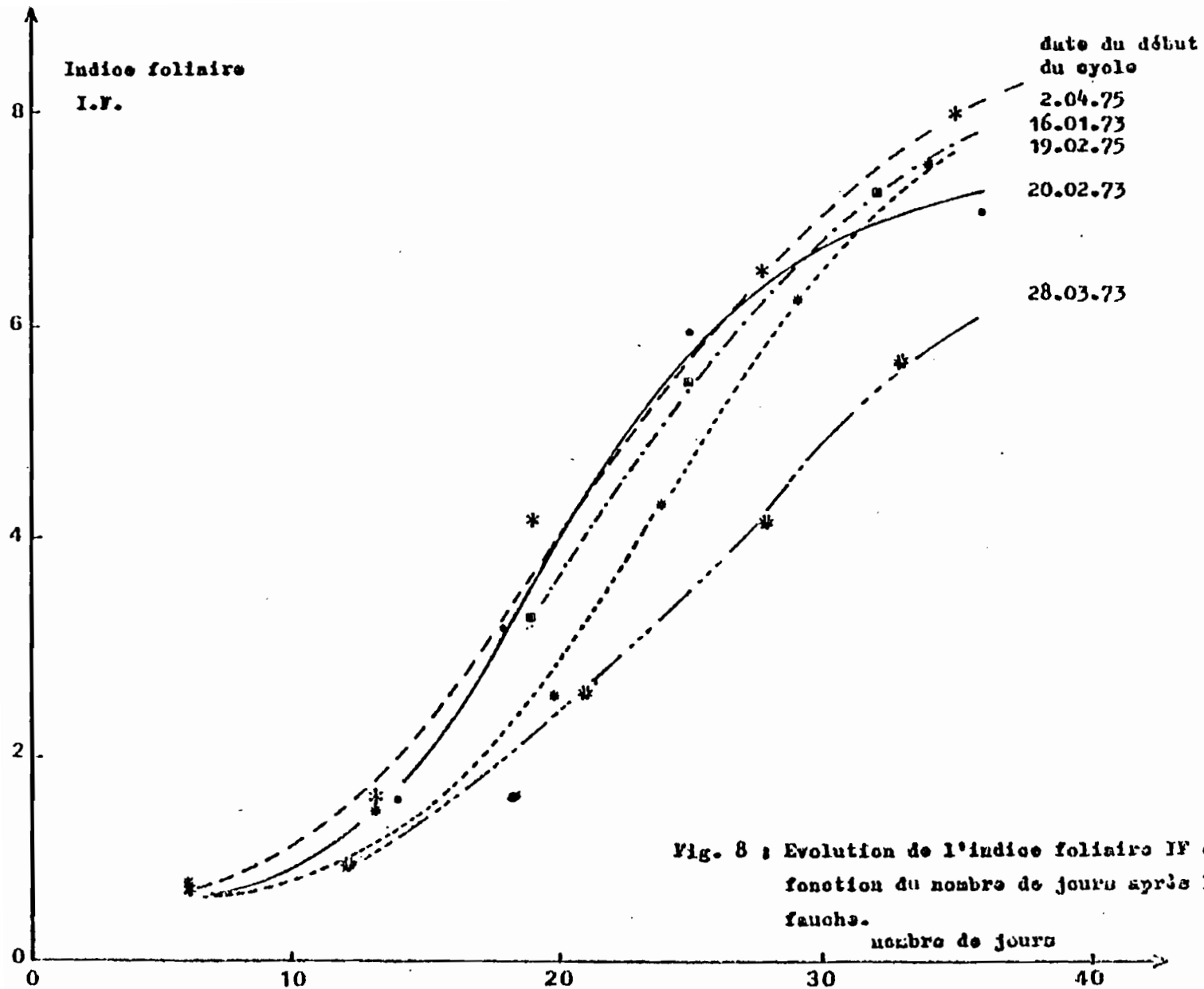


Fig. 8 : Evolution de l'indice foliaire IF en fonction du nombre de jours après la fauche.



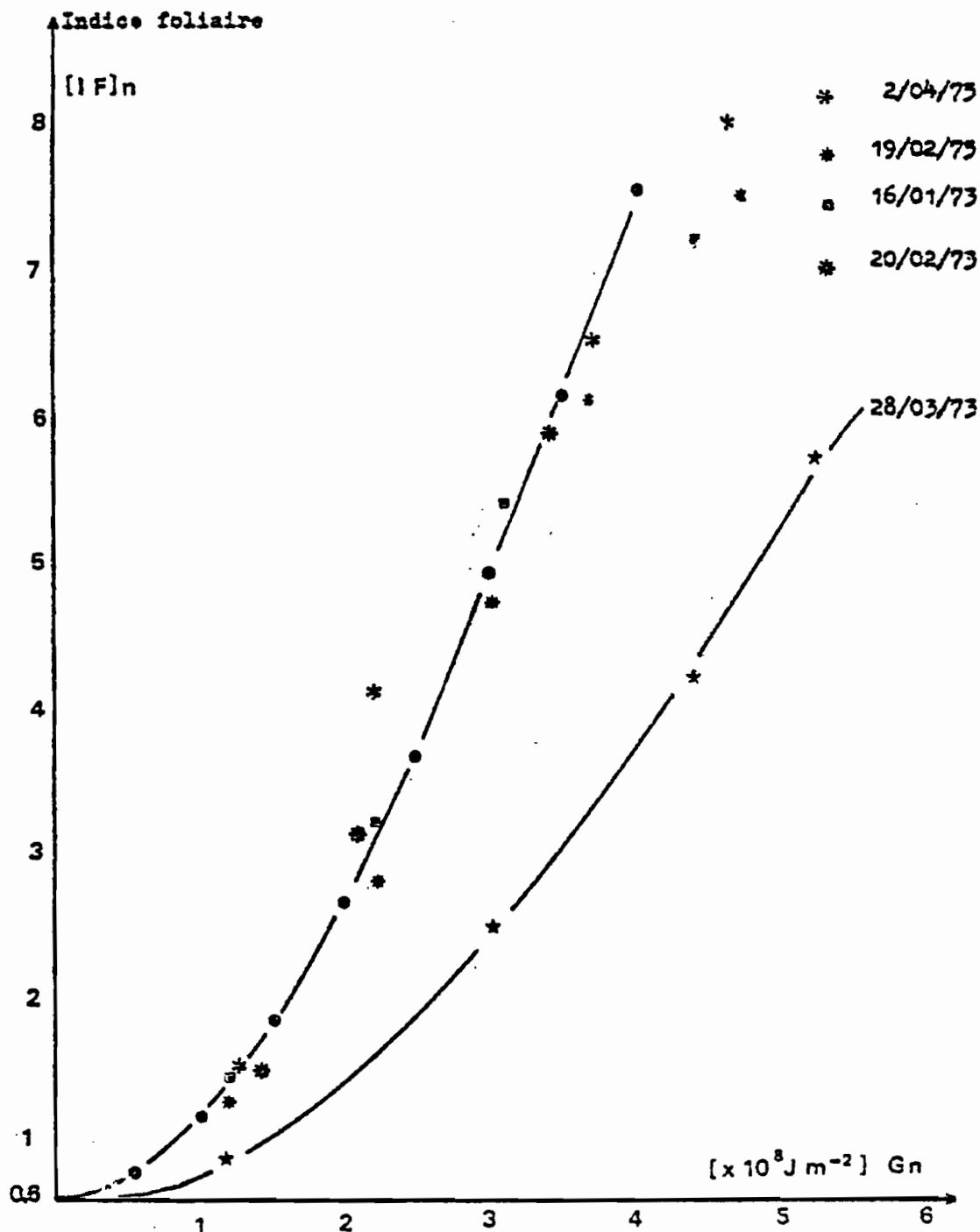


Fig. 9 : Relation entre l'indice foliaire (IF) d'une culture de Panicum maritimum et le rayonnement global cumulé (G)

PREMIER COLLOQUE INTERNATIONAL :

**RECHERCHES SUR L'ELEVAGE BOVIN  
EN ZONE TROPICALE HUMIDE**

BOUAKE 18-22 Avril 1977

Bouaké

ABIDJAN



TOME I

SEANCE INAUGURALE

THEME I : LES ECOSYSTEMES

THEME II : LE MILIEU

THEME III :  
LES RESSOURCES ALIMENTAIRES

COMITÉ GÉNÉRAL D'ORGANISATION :  
MINISTÈRE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
B.P. 1152 BOUAKÉ  
RÉPUBLIQUE DE CÔTE-D'IVOIRE

PREMIER COLLOQUE INTERNATIONAL :

**RECHERCHES SUR L'ELEVAGE BOVIN  
EN ZONE TROPICALE HUMIDE**

BOUAKE 18-22 Avril 1977

Bouaké

ABIDJAN

TOME II

THEME IV : LES PRODUCTIONS ANIMALES

THEME V :

ECONOMIE DE L'ELEVAGE

THEME VI :

RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT

ANNEXES



COMITÉ GÉNÉRAL D'ORGANISATION:  
MINISTÈRE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
B.P. 1152 BOUAKÉ  
RÉPUBLIQUE DE CÔTE-D'IVOIRE

© I.E.M.V.T. 1980

Tous droits de traduction, de reproduction par tous procédés,  
de diffusion et de cession réservés pour tous pays.

ISBN 2 - 85985 - 037 - 6