

Laboratoire de Bioclimatologie ORSTOM, Abidjan et Station Centrale de
Bioclimatologie C.N.R.A. Versailles

Variations du rayonnement photosynthétiquement actif en région tropicale humide

rom
B. Monteny et G. Gosse *histair*

Avec 5 figures

Reçu le 26 Septembre 1977

Résumé

L'analyse du rapport rayonnement solaire visible ou *PHAR*/rayonnement solaire global fait apparaître en région tropicale humide une variation selon la nature de la masse d'air (harmattan ou air océanique). Compte tenu de la bonne stabilité de ce rapport pour chacune des masses d'air, nous proposons une méthode d'estimation du *PHAR* à partir d'une simple mesure de rayonnement global et de données astronomiques. L'étude a été ensuite approfondie afin de dissocier les parts respectives du diffus et du direct dans ce rayonnement solaire visible, une méthode d'estimation du rayonnement diffus visible est présentée.

En conclusion, une application de cette analyse à l'étude de l'efficience photosynthétique d'un couvert végétal est abordée.

Summary

Variations of the Photosynthetic Active Radiation in a Humid Tropical Region

The study of the ratio between the photosynthetic active radiation *PHAR* and the global radiation shows a variation of this ratio according to the kind of the air mass (harmatta. or oceanic). As this ratio is very constant for a given air mass, we propose a method of estimation of the *PHAR* using a measurement of global radiation and astronomic data.

Then, this study is more elaborated in order to dissociate the part of the diffuse radiation in photosynthetic active radiation, a method of estimation of the visible diffuse radiation is presented. An application of these analysis to the study of the photosynthetic efficiency of a canopy is approached in the last part of this paper.

Fonds Documentaire ORSTOM



010015740

Fonds Documentaire ORSTOM

25*

Cote : B x 15740 Ex 1

Zusammenfassung

Veränderungen der photosynthetisch aktiven Strahlung in einem feuchten tropischen Gebiet

Die Untersuchung des Verhältnisses zwischen der photosynthetisch aktiven Strahlung *PHAR* und der Globalstrahlung zeigt eine Veränderung dieses Verhältnisses entsprechend der Art der Luftmasse (Harmattan oder ozeanische Luft). Da dieses Verhältnis für eine gegebene Luftmasse sehr konstant ist, schlagen wir eine Methode zur Schätzung von *PHAR* auf Grund einer Messung der Globalstrahlung und astronomischer Daten vor. Da diese Untersuchung mehr darauf ausgerichtet ist, den Anteil der diffusen Strahlung an der photosynthetisch aktiven Strahlung abzusondern, wird eine Methode zur Schätzung der sichtbaren diffusen Strahlung dargelegt.

Im letzten Teil der Arbeit wird eine Anwendung dieser Analyse zur Untersuchung der photosynthetischen Wirksamkeit einer Pflanzendecke gezeigt.

1. Introduction

Le rayonnement solaire est la source principale d'énergie pour un grand nombre de processus biologiques et de phénomènes atmosphériques. L'atmosphère, de par ses propriétés optiques, atténue l'énergie de ce rayonnement en particulier la fraction photosynthétiquement active (*PHAR*: 400 à 700 nm), absorbée par tout couvert végétal. La fluctuation de ce rayonnement et ses conséquences sur le bilan de masse de ce couvert ont déjà fait l'objet de diverses analyses [5, 9, 10, 13] en région tempérée.

En première approximation, la fraction *PHAR* du rayonnement global est considérée dans un contexte général, comme constante [11, 12, 13]. Toutefois, elle est susceptible de varier [1, 2, 4] en fonction de la saison ou des conditions climatiques comme nous allons le montrer.

Nous présentons ici la synthèse des résultats obtenus sur la fluctuation du rayonnement photosynthétiquement actif en basse Côte d'Ivoire. Un mode de calcul du *PHAR* est proposé sur la base d'une relation établie à partir des mesures du rayonnement global et tenant compte de l'influence du trouble atmosphérique. Cette évaluation est donnée pour deux bases de temps: valeurs instantanées et valeurs journalières intégrées.

L'équation est utilisée pour suivre l'efficacité photosynthétique d'un couvert végétal en fonction de son développement et met en évidence l'efficacité accrue d'un rayonnement riche en énergie diffuse. Ce travail fait suite à l'analyse de la variation de l'énergie solaire directe visible dans cette même région.

2. Expression et mesure des rayonnements

Au niveau du couvert végétal, la densité du flux énergétique reçue sur une surface horizontale correspond à:

$$G = I \cdot \sin h + D. \quad (1)$$

G = rayonnement global, I = rayonnement solaire direct atteignant la surface suivant un angle h , D = rayonnement diffus provenant du ciel. L'atténuation de l'énergie du rayonnement solaire direct provient de l'absorption et de la diffusion par les molécules constituant l'air atmosphérique, de la réflexion et diffusion par les aérosols et de l'absorption par certains gaz comme la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone. En fait, c'est la part de l'énergie qui est effectivement captée par les feuilles qui nous intéresse à propos des échanges entre le couvert végétal et l'atmosphère, énergie qui intervient dans les réactions de photosynthèse et de transpiration. Dans ce cas, il faut tenir compte de l'albédo au niveau global du couvert et des coefficients de réflexion, diffusion et transmission pour une feuille. En réalité, dans cette étude, on se limitera à la partie incidente du rayonnement photosynthétiquement actif. Seules les bandes spectrales de 400 à 700 nm, appelées rayonnement photosynthétiquement actif *PHAR* [4], sont utiles pour traiter de la photosynthèse. Nous aurons alors:

$$PHAR = I_v \cdot \sin h + D_v \quad (2)$$

L'indice v signifie qu'il s'agit de la fraction visible du spectre.

L'appareillage solarimétrique utilisé comprend: une thermopile Kipp et Zonen qui permet la mesure du rayonnement global, le rayonnement diffus étant obtenu en occultant l'élément sensible de l'appareil à aide d'un disque de 0,08 m de diamètre placé à une distance de 0,8 m; et une thermopile Eppley munie d'un filtre RG8 pour la mesure de la quantité d'énergie dans la bande spectrale du proche infrarouge (700 à 3000 nm) et en occultant, nous obtenons la fraction diffuse du rayonnement infra-rouge global. La fraction *PHAR* du rayonnement global est obtenue par différence:

$$PHAR = G - G_{IR};$$

de même la fraction diffuse visible correspond à:

$$D_v = D - D_{IR}.$$

Si les mesures du *PHAR* ne sont effectuées qu'en de rares stations climatiques bien équipées, la seule donnée généralement disponible est le rayonnement global. Nous avons cherché à l'utiliser pour estimer sa fraction *PHAR* atteignant le couvert végétal.

3. Resultats et Discussions

Les mesures des différentes composantes du rayonnement global, visible et global toutes longueurs d'onde, nous ont permis de mettre au point une méthode d'estimation du rayonnement visible, paramètre délicat à mesurer,

à partir de mesures plus simples notamment le rayonnement global et ceci pour deux bases de temps: en valeurs instantanées et en valeurs journalières intégrées.

3.1 Estimation du rayonnement photosynthétiquement actif instantané par ciel clair

La détermination de la fraction visible du rayonnement global peut être obtenue à partir d'une mesure du rayonnement global connaissant les densités de flux $PHAR_0$ et G_0 au sommet de l'atmosphère. En tenant compte de l'énergie reçue sur une surface horizontale située au sommet de l'atmosphère, les variations introduites par la position du soleil par rapport à la surface réceptrice sont supprimées.

L'équation calculée représente la relation entre le rayonnement global et le $PHAR$ pour les conditions moyennes du climat radiatif général en basse Côte d'Ivoire (Fig. 1). Elle a été établie sur 14 journées types choisies en saison sèche:

$$PHAR = 1,04 \left(\frac{G}{G_0} \right) \cdot PHAR_0 \quad (3)$$

$$n = 262, r = 0,98.$$

Les valeurs $PHAR_0$ et I_0 sont des grandeurs astronomiques calculables en un lieu déterminé [3]. Cette relation permet de présenter simultanément la fluctuation de la transmission du rayonnement solaire global par l'atmosphère et celle de sa fraction visible.

Toutefois, il faut signaler deux divergences par rapport à la relation (3):

a) les valeurs obtenues les jours où l'atmosphère est particulièrement transparente (jours suivant une forte pluie), le rapport Diffus/Global est faible ($D/G = 0,20 \pm 0,05$). La relation (3) devient alors:

$$PHAR = 1,19 \left(\frac{G}{G_0} \right) PHAR_0 \quad (4)$$

$$n = 43 \text{ (Points pleins de la fig. 1), } r = 0,96$$

b) les valeurs obtenues les jours où l'atmosphère est très chargée en poussières sahariennes (harmattan caractérisé, ciel blanc à jaunâtre), le rapport D/G est élevé, égal en moyenne à $0,70 \pm 0,15$. La relation (3) s'écrit alors:

$$PHAR = 0,92 \left(\frac{G}{G_0} \right) PHAR_0 \quad (5)$$

$$n = 29 \text{ (étoiles de la fig. 1), } r = 0,86.$$

La validité de cette équation générale (3) a été testée pour des journées dont les données n'ont pas été prises en considération dans la figure précédente.

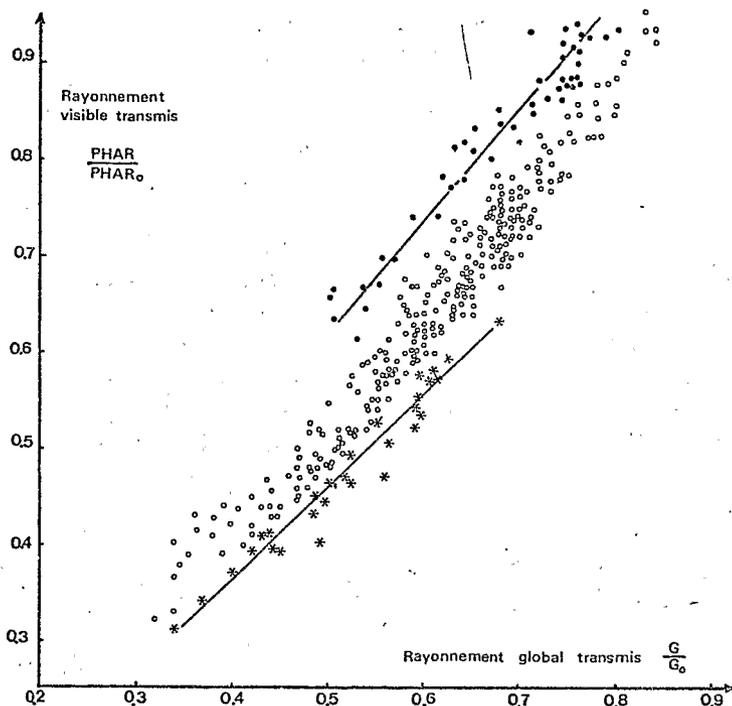


Fig. 1. Relation entre la transmission de la fraction *PHAR* et celle du rayonnement global correspondant pour l'ensemble des journées étudiées

La corrélation entre le *PHAR* ainsi calculé et le *PHAR* mesuré correspond à :

$$PHAR \text{ calculé} = (PHAR \text{ mesuré} \times 1,047)^{-13,31} \\ W.m^{-2} \quad r = 0,99, \sigma = 6,06 W.m^{-2}$$

Les résultats obtenus en région équatoriale sont peu comparables à ceux des régions tempérées [9, 13] du fait des caractéristiques atmosphériques trop différentes.

Conclusion. Il est possible, en première approximation, de considérer à cette échelle de temps la valeur du rayonnement visible comme directement proportionnelle au rayonnement global, en effet :

$$PHAR = \alpha \cdot G \text{ avec } \alpha = 1,04 PHAR_0 / G_0.$$

Si l'on désire une estimation plus fine, il est possible de moduler ce coefficient α en fonction de la masse d'air avec notamment:

$\alpha = 1,19 \text{ PHAR}_0/G_0$ par ciel très clair (début de saison des pluies),

$\alpha = 0,92 \text{ PHAR}_0/G_0$ par temps d'harmattan (masse d'air d'origine saharienne).

3.2 Estimation du rayonnement photosynthétiquement actif journalier

Les valeurs journalières correspondent à l'intégration dans le temps des différents phénomènes pouvant provoquer une réduction de l'énergie solaire visible comme notamment la présence d'aérosols et de nuages.

La figure 2 représente la fraction $PHAR$ du rayonnement global au sol en fonction de la proportion d'énergie diffuse de ce même rayonnement global. On retrouve, à l'échelle de la journée, le résultat énoncé pour des valeurs instantanées:

$$PHAR = C^{te} \cdot G.$$

Pour des valeurs journalières, les deux exceptions — ciel très clair et temps d'harmattan — se trouvent minimisées car il faudrait une stabilité parfaite de ces types de temps sur toute la journée pour en constater les effets, or au voisinage de la mer en basse Côte d'Ivoire il existe au moins à partir de midi un ennuagement venant perturber ces conditions idéales.

Sur 41 journées de mesure, le facteur de proportionnalité existant entre $PHAR$ et le rayonnement global a pour valeur:

$$PHAR = 1,08 \left(\frac{PHAR_0}{G_0} \right) \cdot G \quad (6)$$

$$n = 41, r = 0,99$$

3.3 Etude des variations de la fraction diffuse visible D_v

La fig. 3 montre la part de chacun des termes de l'équation (4) pour trois journées présentant des caractéristiques optiques atmosphériques différentes, l'une à ciel légèrement brumeux (11. 12. 1975), l'autre à ciel plus transparent (27. 12. 1974) parce qu'ayant été précédée d'une pluie de 87 mm et la troisième journée avec brume sèche (2. 12. 1976).

La diminution de la quantité d'aérosols dans l'atmosphère, consécutive au lessivage par la pluie, entraîne une répartition différente de ces termes, leur somme $PHAR$ étant également modifiée. La quantité de $PHAR$ atteignant le sol est plus élevée lorsque la diffusion est faible, car la transformation de l'énergie directe en énergie diffuse s'accompagne d'une réflexion plus importante de l'atmosphère.

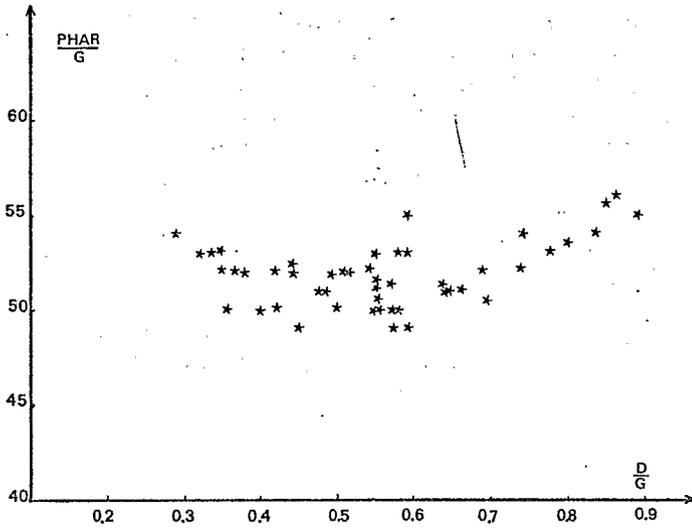


Fig. 2. Relation entre la fraction $PHAR$ du rayonnement global et le trouble atmosphérique représenté par le rapport D/G pour les valeurs journalières

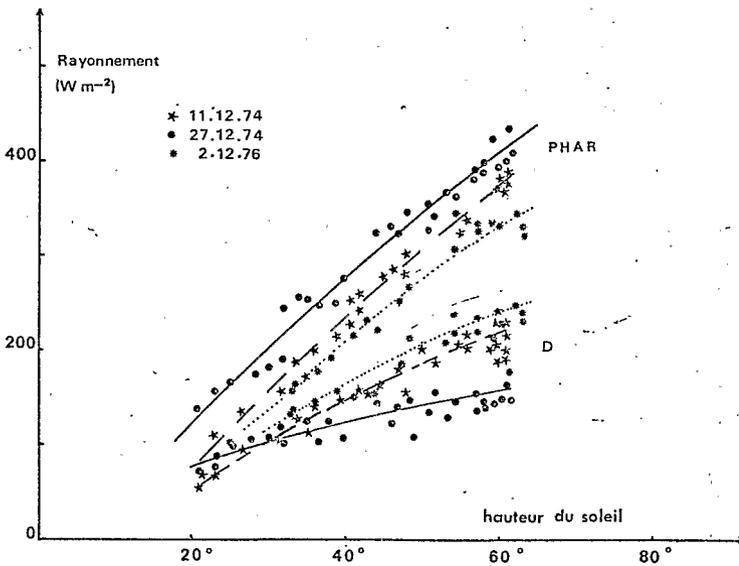


Fig. 3. Evolution du $PHAR$ et de sa fraction diffuse en fonction de la hauteur du soleil pour des transparences optiques différentes de l'atmosphère

Lors d'un travail précédent [8], il avait déjà été mis en évidence l'effet d'une augmentation de la concentration des aérosols sur la distribution spectrale de l'énergie solaire directe: le rapport D/G passant de 0,23 à 0,41 entraînant une réduction de l'énergie solaire directe visible d'environ 20%.

L'énergie de ce rayonnement direct visible est partiellement compensée par une augmentation du rayonnement diffus. Cette fraction d'énergie diffuse dans la bande spectrale du visible, du fait de son caractère omnidirectionnel, pénètre plus profondément dans le couvert végétal. Ce paramètre ne peut être sous-estimé lors des calculs de productivité photosynthétique des couverts végétaux.

La fraction d'énergie diffuse D_v du $PHAR$ peut être estimée par rapport à l'énergie diffuse D du rayonnement global G suivant la relation expérimentale illustrée par la fig. 4:

$$\begin{aligned} D_v &= 0,97 \left(\frac{D}{G} \right) PHAR \\ r &= 0,94 \end{aligned} \quad (7)$$

Compte tenu de la relation (3) reliant le $PHAR$ et le rayonnement global:

$$PHAR = \alpha \left(\frac{PHAR_0}{G_0} \right) \cdot G.$$

Il est possible d'exprimer de la relation (7) de la manière suivante:

$$D_v = 0,97 \cdot \alpha \left(\frac{PHAR_0}{G_0} \right) \cdot D$$

$$\text{soit:} \quad D_v = C^{te} \cdot D. \quad (8)$$

Ce résultat important montre que moyennant une mesure du diffus, il est possible d'estimer simplement la part du rayonnement visible de ce rayonnement diffus. Les relations (3) et (7) permettent une estimation de la part visible des rayonnements global et diffus.

4. Application à l'étude de l'efficacité photosynthétique d'un couvert végétal

Suite aux différentes mesures qui ont permis de déterminer une équation pour l'estimation de la fraction $PHAR$ du rayonnement global et une autre pour la quantité visible du rayonnement diffus, il nous a été possible de calculer l'efficacité photosynthétique d'un couvert végétal.

Cette efficacité photosynthétique correspond au rapport de la quantité d'énergie fixée pour l'élaboration des hydrates de carbone à la quantité de $PHAR$ reçue et elle est un terme important exprimant la potentialité du couvert végétal à utiliser l'énergie solaire pour la synthèse de la matière sèche. Les

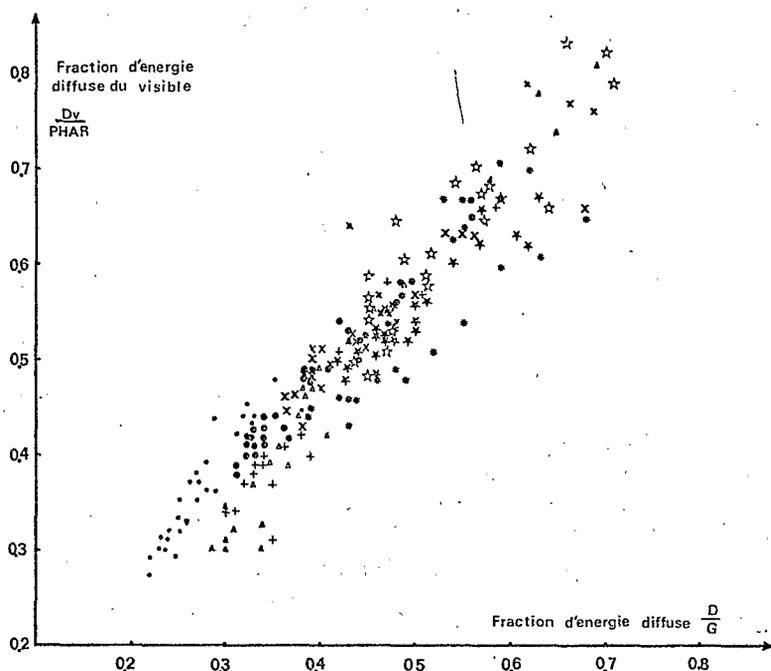


Fig. 4. Relation entre la fraction diffuse du rayonnement visible et la fraction diffuse pour l'ensemble du spectre du rayonnement global

données obtenues sur *Panicum maximum* avec irrigations [7], montrent l'effet du développement foliaire du couvert végétal sur l'interception de l'énergie photosynthétiquement active et de l'efficacité de son appareil photosynthétique à utiliser cette énergie (Fig. 5). Les efficacités sont relativement élevées. En effet, si la pénétration du rayonnement solaire direct visible est sous la dépendance de la distribution verticale du feuillage et du mouvement apparent du soleil, la quantité d'énergie diffuse visible atteignant le bas de la culture est quasiment indépendante de la hauteur du soleil. Cette quantité d'énergie, relativement importante en basse côte, est un facteur favorisant le fonctionnement photosynthétique du feuillage à un stade de développement foliaire avancé comme dans le cas du couvert érectophile de *Panicum maximum*.

McCree et Keener [6] ont calculé la productivité photosynthétique nette d'un couvert de sorgho. En comparant leurs données aux nôtres, il est intéressant de constater que les efficacités photosynthétiques nettes des deux couverts sont voisines (Tableau 1) alors que les caractéristiques radiatives des conditions expérimentales ou simulées sont différentes, notamment le rapport $D_v/PHAR$.

Tableau 1. Comparaison des mesures faites sur *Sorghum bicolor* [6] et sur *Panicum maximum*

| | <i>Sorghum bicolor</i> (P 407) | <i>Panicum maximum</i> (K 187) |
|--|--|--|
| Productivité nette | 57 g MS.m ⁻² .j ⁻¹ | 43,8 g MS.m ⁻² .j ⁻¹ |
| I.F | 8,5 | 7,5 |
| PHAR | 1250 J.cm ⁻² .j ⁻¹ (suivant figure) | 1015 J.cm ⁻² .J ⁻¹ |
| D _v /PHAR | 0,20 | 0,55 |
| Durée du jour | 12 h | 11 h |
| Efficience photosynthétique | 0,076 | 0,072 |
| Efficience photosynthétique par unité de surface foliaire | 0,00897 | 0,00958 |

On peut penser qu'une partie non négligeable du rayonnement solaire direct, absorbée par le feuillage supérieur du couvert de sorgho est perdue pour les réactions de photosynthèse des niveaux sous-jacents. Les aérosols atmosphériques, en convertissant une fraction de l'énergie directe en diffuse, à caractère omnidirectionnel, augmentent son pouvoir de pénétration dans le couvert végétal. En effet, si l'on exprime les efficacités photosynthétiques par unité de surface assimilatrice, le couvert de *Panicum maximum*, qui reçoit une plus grande quantité de son énergie PHAR sous forme diffuse, présente une meilleure efficacité.

5. Conclusion

La réduction de l'énergie du rayonnement solaire direct visible est partiellement compensée par l'augmentation de l'énergie du rayonnement diffus, la valeur totale du PHAR est sensiblement proportionnelle à l'énergie globale incidente. Les équations présentées permettent de calculer la fraction PHAR totale du rayonnement global ainsi que la fraction diffuse à partir de sa mesure.

La démarche de Zceicz [13] considérant la fraction PHAR du rayonnement global comme indépendante des conditions climatiques, a été confirmée dans la plupart des cas, il faut néanmoins moduler ce résultat en milieu équatorial pour les conditions extrêmes décrites précédemment.

Dans l'exemple présenté de l'estimation du PHAR, l'efficacité photosynthétique du couvert végétal a pu être calculée: les valeurs maximales obtenues sont proches de 0,072 pour un indice foliaire de 7,5.

Ainsi donc, l'équation proposée peut être introduite dans une expression mathématique traduisant la relation entre l'assimilation photosynthétique globale du couvert végétal et l'énergie PHAR reçue pour l'estimation des quantités de matière organique élaborée par les plantes afin de permettre l'établissement de cartes de potentialité agricole.

A l'échelle plus fine, il serait possible de suivre l'évolution de l'efficacité photosynthétique suivant l'état de développement de la communauté végétale et permettrait une meilleure organisation des différentes interventions nécessaires à l'obtention de hauts rendements agronomiques.

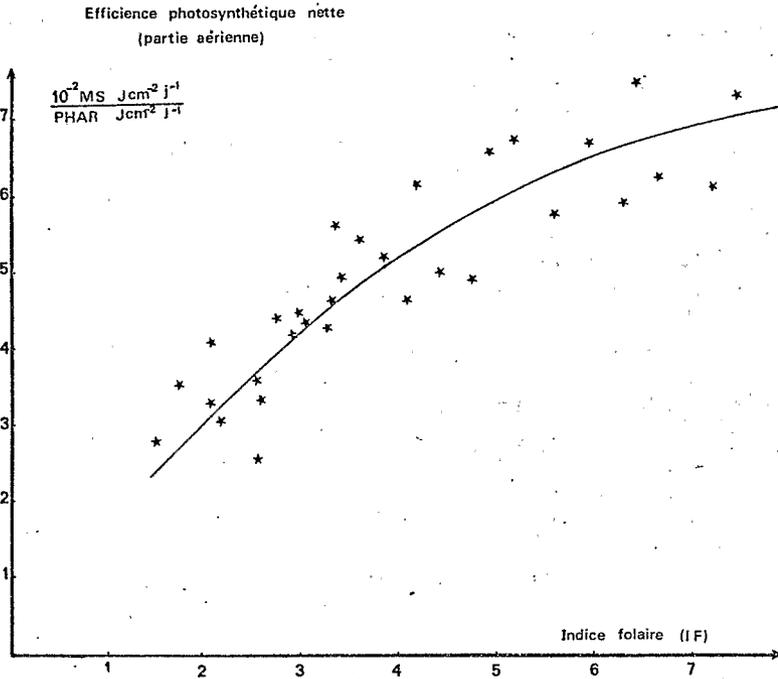


Fig. 5. Evolution de l'efficacité photosynthétique nette (partie aérienne) du couvert en fonction de son développement végétatif

Bibliographie

1. Britton, G., and J. Dodd: Relationship of Photosynthetically Active Radiation and Shortwave Irradiance. *Agric. Meteor.*, *17*, 1-7 (1976).
2. Drummond, A., and A. Ångström: Solar Radiation Measurements on Mauna Loa (Hawaii) and Their Bearing on Atmospheric Transmission. *Solar Energy*, *11*, 133-141 (1967).
3. List, R.: *Smithsonian Meteorological Tables* 527 pp., 1968.
4. McCree, K.: Test of Current Definitions of Photosynthetically Active Radiation Against Leaf Photosynthesis Data. *Agric. Meteor.*, *10*, 443-453 (1972).
5. McCree, K., and M. Keener: Effect of Atmospheric Turbidity on the Photosynthetic Rates of Leaves. *Agric. Meteor.*, *13*, 349-357 (1974).

6. McCree, K., and M. Keener: Simulations of the Photosynthetic Rates of Three Selections of Grain Sorghum With Extreme Leaf Angles. *Crop Sciences*, *14*, 584-587 (1974).
7. Monteny, B.: Mesure de la productivité d'un couvert végétal par une méthode gravimétrique. Rapport ORSTOM multigr. 27 p. (1971).
8. Monteny, B., G. Gosse, D. Cardon, and M. Eldin: Etude spectrale du rayonnement solaire en basse Côte d'Ivoire. Rapport multigr. 22 p. (1974).
9. Unsworth, M., and J. Monteith: Aerosol and Solar Radiation in Britain. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, *98*, 778-797 (1972).
10. Unsworth, M., and H. McCartney: Effects of Atmospheric Aerosols on Solar Radiation. *Atmos. Environ.*, *7*, 1173-1185 (1973).
11. Williams, J.: Small Variations in the Photosynthetically Active Fraction of Solar Radiation on Clear Days. *Arch. Met. Biocl.*, Ser. B, *24*, 129-176 (1976).
12. Yocum, C., L. Allen, and E. Lemon: Photosynthesis Under Field Conditions. *Agron. J.*, *56*, 244-253 (1974).
13. Zceicz, G.: Solar Radiation for Plant Growth. *J. Appl. Ecol.*, *11*, 617-636 (1974).

Adresses des auteurs: M. B. Monteny, Laboratoire de Bioclimatologie ORSTOM BP V51 Abidjan RCI; M. G. Gosse, Station Centrale de Bioclimatologie C.N.R.A., Versailles, France.