

Étude fréquentielle du rayonnement global journalier en deux localités de Côte d'Ivoire

J.P. LHOMME, B. MONTENY et J.M. KALMS
Laboratoire de Bioclimatologie ORSTOM, Abidjan

RÉSUMÉ

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie nécessite des informations concernant ses fluctuations au cours de l'année. Celles-ci dépendent des paramètres astronomiques et des caractéristiques de l'atmosphère liées à la circulation générale. Un pays comme la Côte d'Ivoire où les utilisateurs potentiels sont de plus en plus nombreux est particulièrement intéressé par ce genre d'étude. Dans ce cadre, une analyse fréquentielle du rayonnement global journalier a été conduite pour deux localités de ce pays : Abidjan en région forestière et Bouaké en région de savane. Ces deux localités présentent des séries d'enregistrement relativement longues : 9 années pour la première et 7 années pour la seconde. Les distributions empiriques mensuelles du rayonnement global journalier sont unimodales et présentent le plus souvent une asymétrie négative. Le traitement statistique a consisté en l'ajustement de lois théoriques du type Béta incomplète. Pour chaque mois et les deux localités nous donnons, d'une part les probabilités que le rayonnement global journalier soit supérieur à certains seuils compris entre 1 000 et 2 250 $J \cdot cm^{-2}$, d'autre part les seuils de rayonnement global dépassés avec certaines probabilités (0,25 ; 0,50 ; 0,75 ; 0,90).

SUMMARY : *Statistical study of solar radiation in Ivory Coast.*

The need for more information about the available solar energy has increased in recent years with the development of research programs on solar sensors. In this paper geographical and seasonal variations of global radiation in Ivory Coast are surveyed. Fluctuations in the daily global radiation are examined from a 9 years sequence of measurement at Abidjan (in the tropical rain forest region) and from a 7 years sequence at Bouaké (in the savanna region). The monthly frequency distributions of daily totals of solar radiation are unimodal and are most of time skewed towards low values. We have fit incomplete Beta function on empirical data distributions. And for each month we give :

— *the expected number of days in which daily global radiation is above specified values (between 1.000 and 2.250 $J \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$).*

— *the expected values of daily global radiation which are exceeded with given probabilities (25, 50, 75, 90%).*

1. INTRODUCTION

La nécessité des mesures de rayonnement solaire n'est plus à démontrer. Dans de nombreux domaines, il est en effet particulièrement utile de connaître la répartition de l'énergie solaire disponible au sol. Outre son rôle primordial dans la genèse des climats [1], elle intervient directement dans des secteurs économiques aussi importants que l'agriculture ou l'industrie : la recherche agronomique s'intéresse à sa bioconversion représentée par les processus de photosynthèse et d'évapotranspiration [2] ; l'industrie est de plus en plus concernée par sa conversion en énergie directement utilisable (calorique ou photovoltaïque).

Cet article doit contribuer à une meilleure connaissance du gisement solaire en Côte d'Ivoire. Il présente une étude fréquentielle du rayonnement global journalier pour deux localités de ce pays (fig. 1) : Abidjan (5,3 °N) en région de forêt, au sud, et Bouaké (7,7 °N) en région de savane, au nord [3]. Les séries d'enregistrement de ces deux localités sont relativement fiables et suffisamment longues. Ce sont en outre des mesures directes et non pas des valeurs estimées à partir de la durée d'insolation [4].

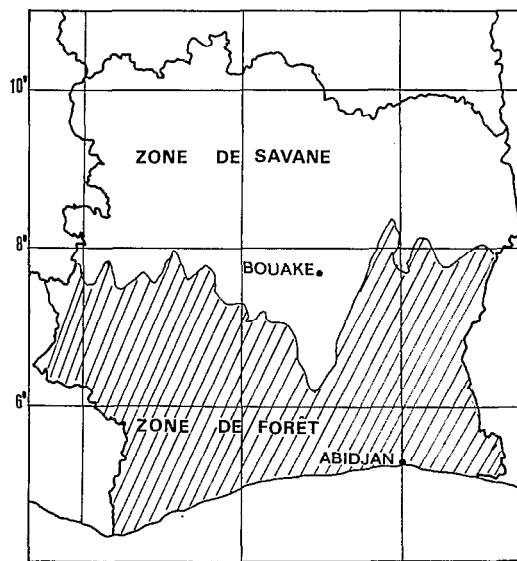


Fig. 1. — Implantation en Côte d'Ivoire des stations actinométriques d'Adiopodoumé (Abidjan) et de Bouaké

2. LES MESURES

Les données de base utilisées dans cette étude sont les valeurs journalières du rayonnement global mesurées au Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, près d'Abidjan, sur la période 1971-1979 (9 années) et à Bouaké (IRAT) sur la période 1973-1979 (7 années).

A Adiopodoumé les mesures de rayonnement global sont effectuées à l'aide d'un pyranomètre thermoélectrique du type Moll (Kipp-Zonen) couplé à un intégrateur (Lintronic). L'étalonnage de l'ensemble est contrôlé régulièrement au moyen d'une thermopile de référence (Eppley). Les éventuelles défaillances techniques de ce système d'enregistrement peuvent être palliées grâce à des mesures effectuées en parallèle avec un pyranomètre à distillation du type Gun-Bellani [5]. A Bouaké, les mesures proviennent pour une part d'un pyranomètre Gun-Bellani et pour le reste d'un pyranomètre thermoélectrique Lambda étalonné à l'ORSTOM. Dans les deux localités, les pyranomètres à distillation sont placés en position aérienne, à 1,6 m au-dessus du sol engazonné.

La figure 2 donne sous forme de graphiques les moyennes mensuelles interannuelles du rayonnement global journalier à Bouaké et à Adiopodoumé. L'évolution au cours de l'année est sensiblement la même dans les deux régions : deux maxima encadrent deux minima. Le maximum absolu se situe en avril et le minimum absolu en août. Les rapports correspondants entre la moyenne mensuelle du rayonnement global et la fraction extra-terrestre sont de 0,53 et 0,32 à Adiopodoumé, 0,54 et 0,38 à Bouaké. Les valeurs mesurées sont systématiquement plus élevées à Bouaké (en novembre elles sont approximativement égales), ce qui s'explique par un ennuagement moins important.

Cette évolution du rayonnement solaire reçu au sol est en relation avec la déclinaison solaire et le mouvement des masses d'air caractérisant la zone de convergence intertropicale. Cette zone de convergence entre l'alizé continental sec et chaud (harmattan) et l'alizé océanique humide et frais (mousson) subit un déplacement au cours de l'année qui détermine sur toute l'Afrique de l'Ouest le rythme saisonnier ainsi que le régime pluviométrique [6].

L'atténuation importante du rayonnement solaire en juillet et août est due à la formation d'une couverture nuageuse assez homogène à basse altitude en relation avec les remontées d'eau froide le long de la Côte du Golfe de Guinée. Au cours de cette période les ascendances thermiques génératrices des précipitations sont fortement ralenties : c'est la petite saison sèche. La réduction observée en décembre et janvier a pour cause essentielle la présence de poussières en suspension dans les masses d'air d'origine saharienne [7].

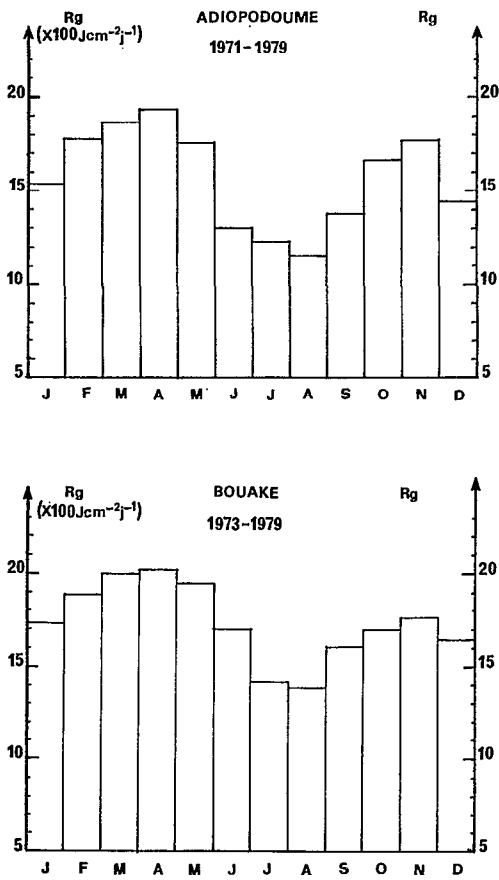


Fig. 2. — Moyennes mensuelles du rayonnement global journalier ($J \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) à Adiopodoumé (période 1971-79) et Bouaké (période 1973-79)

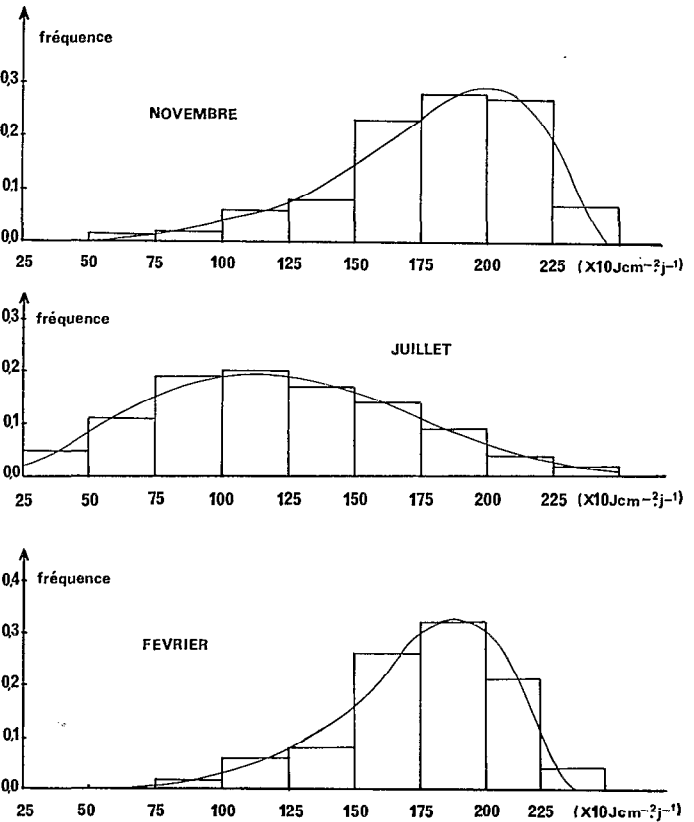


Fig. 3. — Histogrammes du rayonnement global journalier de quelques mois à Adiopodoumé et courbes d'ajustement correspondantes

3. L'ANALYSE STATISTIQUE

Les distributions empiriques mensuelles du rayonnement global journalier sont unimodales et présentent une asymétrie le plus souvent négative. La figure 3 présente les histogrammes des fréquences de quelques mois, l'intervalle de classe étant de $250 J \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$. Des distributions semblables ont été obtenues par Goh à Singapour [8] et Exell à Bangkok [9].

Le choix d'une loi théorique représentative des distributions empiriques est généralement suggéré par l'examen des histogrammes. Il semble que, dans notre cas, la loi Bêta incomplète soit la mieux appropriée. Elle est représentative, en effet, des distributions unimodales, à asymétrie positive ou négative, platicurtiques ou leptocurtiques. Ses deux paramètres de forme (p et q) lui confèrent beaucoup de souplesse.

La fonction de répartition de la loi Bêta s'écrit [10] :

$$F(x) = \frac{1}{B(p, q)} \int_0^u u^{p-1} \cdot (1-u)^{q-1} \cdot du \quad \text{avec } u = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

p et q sont les deux paramètres de forme, strictement positifs.

x_0 et x_1 les deux bornes de l'intervalle de définition de la variable.

$B(p, q) = \Gamma(p) \cdot \Gamma(q) / \Gamma(p + q)$, où Γ est la fonction Gamma complète.

Lorsque x varie de x_0 à x_1 , $F(x)$ croît de 0 à 1.

TABLEAU 1

VALEURS CALCULÉES DES PARAMÈTRES DES LOIS B INCOMPLÈTES
 ADAPTÉES AUX ÉCHANTILLONS MENSUELS DU RAYONNEMENT GLOBAL JOURNALIER
 ($J \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) ET VALEURS CORRESPONDANTES DES COEFFICIENTS γ_1 (ASYMÉTRIE)
 ET γ_2 (APLATISSEMENT). L'ASTÉRISQUE * INDIQUE QUE LA BORNE SUPÉRIEURE A ÉTÉ FIXÉE

<i>Adiopodoumé</i>	x_0	x_1	p	q	γ_1	γ_2
J	-1 136	2 100 *	13,36	2,98	-1,17	0,48
F	-11 017	2 400 *	66,83	3,35	-1,77	1,37
M	-5 807	2 541	23,00	1,87	-1,60	1,94
A	-96	2 621	3,63	1,19	-0,79	0,14
M	-45	2 546	2,71	1,17	-0,59	-0,33
J	154	2 286	1,50	1,22	-0,14	-1,01
J	6	2 995	3,33	4,82	0,31	-0,47
A	53	2 855	2,79	4,21	0,34	-0,51
S	83	2 957	4,52	5,41	0,16	-0,45
O	-180	2 678	4,66	2,48	-0,51	-0,38
N	-14 352	2 468	66,97	2,85	-1,80	1,67
D	-858	2 200 *	13,47	3,84	-1,03	0,21
<i>Bouaké</i>	x_0	x_1	p	q	γ_1	γ_2
J	-10 172	2 394	78,01	4,35	-1,76	1,04
F	-11 545	2 350	46,97	1,60	-1,81	3,01
M	-11 875	2 500 *	68,09	2,43	-1,82	2,02
A	-3 164	2 734	24,32	3,37	-1,44	0,82
M	-3 849	2 835	33,77	5,17	-1,41	0,51
J	-515	2 491	10,12	3,61	-0,86	0,03
J	-113	2 478	5,49	3,78	-0,32	-0,43
A	-1 238	3 950	33,73	32,81	-0,03	-0,09
S	-410	2 500 *	10,19	4,48	-0,71	-0,11
O	-330	2 600 *	8,92	3,90	-0,70	-0,12
N	908	2 388	2,29	1,63	-0,25	-0,78
D	-610	2 263	11,82	3,19	-1,05	0,29

Nous avons choisi de telles lois pour représenter les distributions mensuelles du rayonnement global journalier. L'ajustement a été fait par la méthode des moments. Elle consiste à écrire les équations donnant les moments en fonction des paramètres de la loi. Comme il y a quatre paramètres à estimer, on a besoin des quatre premiers moments.

Dans les tableaux 1 sont présentées les valeurs calculées des paramètres x_0 , x_1 , p et q , du coefficient d'asymétrie γ_1 et du coefficient d'aplatissement γ_2 , pour les deux localités et pour chacun des douze mois de l'année. Rappelons que γ_1 est positif si la distribution est étalée sur la droite et négatif si elle est étalée sur la gauche et que γ_2 est positif quand la distribution est moins aplatie que la courbe de Gauss et vice versa.

Pour quelques mois (trois à Adiopodoumé et trois à Bouaké) la détermination des quatre paramètres par les moments a été impossible. Il a fallu se fixer l'un d'eux. Un essai avec $x_0 = 0$ n'ayant pas donné entière satisfaction, nous nous sommes fixé la borne supérieure x_1 . Nous l'avons arrondi à la centaine supérieure à la valeur maximale de l'échantillon (en $J \cdot cm^{-2} \cdot j^{-1}$).

La justification a posteriori du choix de la loi théorique et de la méthode d'ajustement se trouve dans l'adéquation des courbes obtenues aux polygones empiriques des fréquences (fig. 3).

4. LES RÉSULTATS

La figure 4 montre pour deux mois distincts (juillet et novembre à Adiopodoumé) les courbes intégrales des fréquences déduites des distributions théoriques. Ce mode de représentation permet de déterminer aisément le seuil énergétique correspondant à une certaine fréquence au dépassement ou, inversement, la fréquence correspondant à un seuil énergétique donné. Les principaux résultats qui sont regroupés sous forme de figures et de tableaux ont été obtenus à partir de ce mode de représentation.

La figure 5 donne, pour chacune des deux localités, l'évolution annuelle de la probabilité que le rayonnement global journalier soit supérieur à une certaine valeur. Trois seuils ont été retenus : 1 000, 1 500 et 2 000 $J \cdot cm^{-2}$. Les tableaux 2 sont complémentaires de ces figures. Ils précisent, pour chaque mois, le nombre théorique de jours où le rayonnement global dépasse certaines valeurs choisies entre 1 000 et 2 250 $J \cdot cm^{-2}$. Une colonne totalise ces nombres de jours pour l'année.

La figure 6 précise, quant à elle, l'évolution au cours de l'année du rayonnement global journalier qu'on peut espérer voir dépassé avec une certaine probabilité. Quatre niveaux de probabilité ont été retenus :

- 0,25, c'est-à-dire 1 jour sur 4
- 0,50, c'est-à-dire 1 jour sur 2
- 0,75, c'est-à-dire 3 jours sur 4
- 0,90, c'est-à-dire 9 jours sur 10.

5. CONCLUSION

Les résultats qui viennent d'être présentés constituent sans aucun doute des informations essentielles pour les constructeurs et usagers de systèmes solaires, confrontés aux problèmes d'efficacité et de rentabilité. La connaissance précise des fluctuations du gisement solaire détermine souvent en effet leur utilisation.

L'analyse fréquentielle du rayonnement global contribue également à la caractérisation agroclimatique du milieu naturel. Elle permet de mieux appréhender les potentialités de production photosynthétique comme l'analyse fréquentielle des pluies permet de préciser les disponibilités en eau pour les cultures.

D'une façon générale cette étude conduit à une meilleure connaissance du climat radiatif en zone tropicale humide, et en particulier en Côte d'Ivoire.

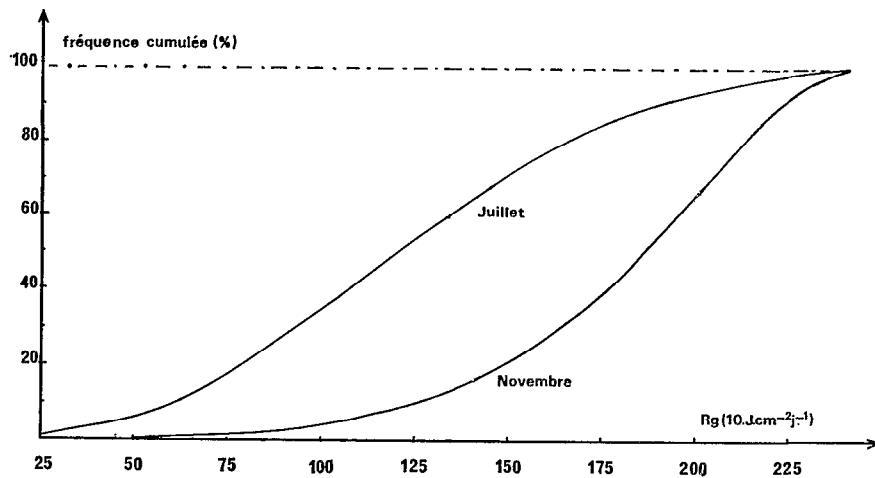


Fig. 4. — Distributions fréquentielles cumulées du rayonnement global journalier pour deux mois distincts à Adiopodoumé

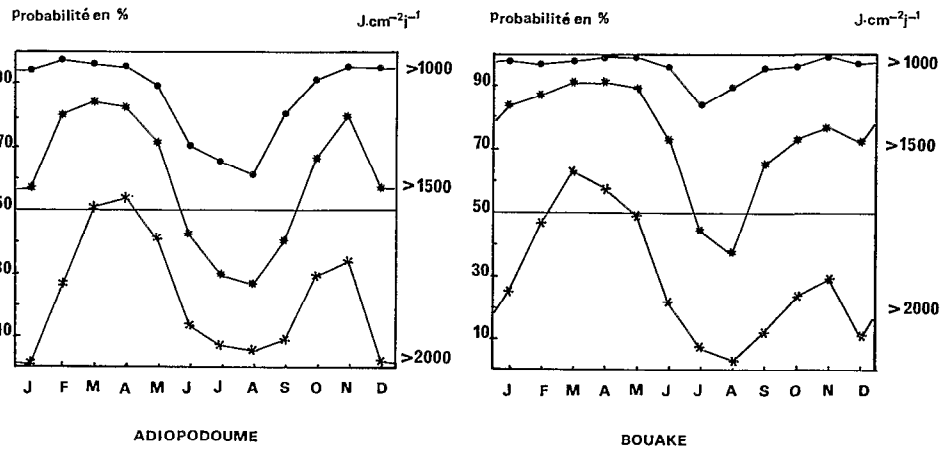


Fig. 5. — Evolution annuelle de la probabilité que le rayonnement global journalier soit supérieur à $1\,000\text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$, $1\,500\text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ et $2\,000\text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$

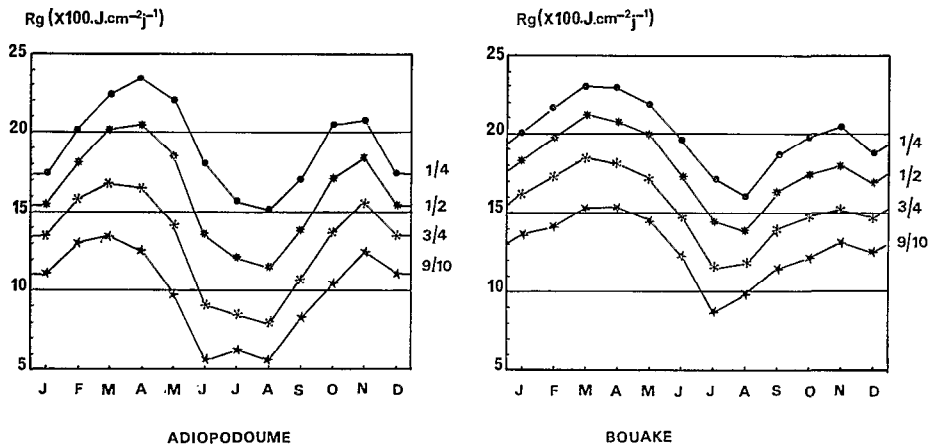


Fig. 6. — Evolution annuelle du seuil de rayonnement global ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) qui est dépassé 1 jour sur 4 ($1/4$), 1 jour sur 2 ($1/2$), 3 jours sur 4 ($3/4$) et 9 jours sur 10 ($9/10$)

TABLEAU 2
 NOMBRES THÉORIQUES DE JOURS DE CHAQUE MOIS
 OU LE RAYONNEMENT GLOBAL EST SUPÉRIEUR A CERTAINS SEUILS ($J \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$)

Adiopodoumé	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total annuel
> 2 250	0	1	7	10	7	0	1	0	1	4	2	0	33
> 2 000	0	7	16	16	12	4	2	2	3	9	10	1	82
> 1 750	7	16	22	21	18	8	5	4	6	15	18	7	147
> 1 500	18	22	26	25	22	13	9	8	12	21	24	18	218
> 1 250	25	26	29	27	25	17	15	13	18	25	27	25	272
> 1 000	29	27	30	29	28	21	20	19	21	28	29	29	310

Bouaké	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total annuel
> 2 250	1	3	10	9	7	1	0	0	0	2	2	0	35
> 2 000	8	13	20	17	15	6	2	1	4	7	9	3	105
> 1 750	19	20	25	24	23	14	7	4	11	15	16	13	191
> 1 500	26	24	28	27	28	22	14	11	19	23	23	22	267
> 1 250	29	26	30	29	30	27	21	21	24	27	28	28	320
> 1 000	30	27	30	30	31	29	26	28	28	30	30	30	349

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] MONTENY B., B. DJOULET et J.P. LHOMME – 1979 – L'énergie solaire, paramètre important du climat et sa mesure. *Annales du Service Météorologique de Côte d'Ivoire*, 1, 21-25.
- [2] MONTENY B., J. HUMBERT, J.P. LHOMME et J.M. KALMS – 1980 – Le rayonnement net et l'estimation de l'évapotranspiration en Côte d'Ivoire. *Agric. Meteorol.*, sous presse.
- [3] KALMS J.M., B. MONTENY et J. HUMBERT – 1979 – Climat radiatif en région centre de Côte d'Ivoire. *Annales du Service Météorologique de Côte d'Ivoire*, 1, 26-29.
- [4] MONTENY B., M. EL DIN et J.P. LHOMME – 1976 – La mesure de la durée d'insolation et du rayonnement solaire global en Côte d'Ivoire. Rapport multigr., Centre ORSTOM d'Adiopodoumé.
- [5] EL DIN M. et B. MONTENY – 1972 – Utilisation du pyranomètre sphérique à condensation du type Bellani pour la mesure du rayonnement global. *L'Agronomie tropicale*, XXVII, 388-395.
- [6] EL DIN M. – 1971 – Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Chapitre : le climat. Mémoire ORSTOM, n° 50.
- [7] MONTENY B. et G. GOSSE – 1978 – Trouble atmosphérique et rayonnement solaire en Côte d'Ivoire. *Agric. Meteorol.*, 19, 121-136.
- [8] GOH T.N. – 1979 – Statistical study of solar radiation information in an equatorial region (Singapore). *Solar Energy*, 22, 105-111.
- [9] EXELL R.H. – 1976 – The fluctuation of solar radiation in Thailand. *Solar Energy*, 18, 549-554.
- [10] BRUNET-MORET Y. – 1969 – Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. *Cahiers ORSTOM, sér. Hydrologie*, VI, 3.