DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v4i1.993 *Rev. Energ. Ren. Vol.4 (2001) 1-9*

Modélisation de la Densité du Flux Solaire Global de la Ville de Gabès

Ridha Fethi Mechlouch et Ammar Ben Brahim

Unité de Recherche : Thermodynamique Appliquée aux Machines
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès, Rue Omar Ibn Elkhattah, 6029 Zrig , Gabès, Tunisie

Résumé - *Disposant des données météorologiques de l'année 1997 pour la ville de Gabès (Tunisie), un modèle de calcul de la densité du flux global solaire pour cette ville a été élaboré. Il tient compte de la nébulosité N, du quantum des jours de l'année q ainsi que du temps t et est de la.forme : $G_H = A(N) . B(q) . C(t)$.*
Les résultats expérimentaux et théoriques obtenus par l'utilisation du modèle sus-élaboré présentent une bonne concordance. Enfin ce modèle a été comparé à celui de Sivkov.

Abstract - *Arranging the meteorological data of the year 1997.for the city of Gabès (Tinisia), a model of calculation of the density of the solar global flux for this city has been elaborated. It takes account of the nebulosity N, the quantum of days of the year q as well as of the time t and can be expressed as : $G_H = A(N) . B(q) .C(t)$.*
The experimental and theoretical results gotten by the utilization of the know-elaborate model present a good concordance. In short this model has been compared to the one of Sivkov.

Mots clés: Solaire énergie - Flux - Modélisation.

1. INTRODUCTION

Le dimensionnement d'unités solaires dépend de la puissance demandée par l'utilisateur ainsi que de la densité du flux solaire. Etant donnée la variation aléatoire de la densité du flux solaire une modélisation est jugée nécessaire. Dans ce sens plusieurs travaux ont été menés soit pour établir des corrélations reliant la densité du flux global aux paramètres météorologiques tels que, nébulosité, insolation, humidité etc... ou bien pour utiliser des modèles pour l'analyse de la situation énergétique solaire dans un lieu donné.

Au Yemen, Khogali et al. [1] ont testé les corrélations d'Angstrom [2] et de Barbaro et al. [3] pour la détermination des densités des flux solaires global et diffus. Pour cela ils ont déterminé les coefficients de régression et les paramètres de zone respectivement pour les deux modèles. Les résultats théoriques obtenus par utilisation de ces deux modèles pour cinq stations en Italie sont en bonne concordance avec les données expérimentales. Aux Etats-Unis, Sherry et Justus [4] ont développé le modèle G.T (Georgia tech) pour le calcul de la radiation solaire horaire en utilisant quelques paramètres météorologiques. La comparaison des résultats obtenus par ce modèle, et de ceux obtenus par les modèles de Watt [5] et Bird et Hulstrom [6] a montré que le modèle de G.T est le mieux placé pour la détermination du flux global solaire de Georgia.

En France J. Adnot et al. [7] ont utilisé la relation de De boer [8] pour déterminer l'irradiation global horaire en fonction de la durée d'insolation. Le calcul a conduit à une précision de l'ordre de 50 % pour les faibles valeurs d'insolation.

En Espagne D. Tinaut et al. [9] ont utilisé des données du service national de la météorologie pour établir un modèle exponentiel permettant le calcul de la radiation solaire globale.

D'autres chercheurs ont utilisé différents modèles pour calculer la radiation solaire reçue par un plan incliné. Desnica et al. [10] ont présenté une méthode pour le calcul du flux global solaire reçu à différentes inclinaisons. Ils ont utilisé les corrélations de Liu-Jordan [11] et de Klein [12] modifiées en tenant compte de la transmissivité atmosphérique.

Tableau 1: Expressions de modèles

Auteur	Expression du modèle	Ref.
Angstrom (1950)	$\overline{H} = H_o\,(a + b\,D)$	[14]
De boer (1961)	$G^* = G_o^*\left(\alpha + (1-\alpha)\sigma_h\right) \quad ; \quad G_o^* = 342{,}5\,(\sin h)^{1.15}$	[8]
Liu-Jordan (1962)	$\overline{H}_T = \overline{R}\,.\,\overline{H} \quad ; \quad \overline{R} = \dfrac{\int_{jour} I_T(t)\,dt}{\int_{jour} I(t)\,dt}$	[11]
Sivkov (1964)	$H_m = 4.9\,(n_m)^{3.1} + 10500\,(\sin h)^{2.1}$	[17]
Swartman - Ogunlade (1967)	$H = a\,D^b\,R^c \quad H = a\,.\,460^{(D-R)} \quad H = a + b\,D + cR$	[15]
Tinaut et Berjano (1977)	$Q = \int_{t1}^{t2} R\,t\,dt$ $R\,t = A\exp\left[-b\left(t - \dfrac{t1+t2}{2}\right)\right] - a\exp\left[-b\left(\dfrac{t1+t2}{2}\right)\right]$	[9]
Sabbagh (1978)	$H = a\,k\exp[b\,(\phi/57.296)\,.\,(DR^{1/2}/100 - 1/t)]$	[16]
Barbaro (1978)	$H_m = K\,(n_m)^{1.24}\,.\,h^{-0.19} + 10550\,(\sin h)^{2.1} + 300\,(\sin h)^3$	[3]
Sherry et al. (1983)	$I_{ghc} = I_{dnc}\cos(z) + I_{dhc}$ $I_{dnc} = I_o\,T_{oz}\,T_{wa}\,T_{aal}\,T_{aau}\,T_{rs}\,T_{asl}\,T_{asu}$ $I_{dhc} = DS + DB$ $DS = I_o\cos(z)\,T_{oz}\,T_{wa}\,T_{aal}\,T_{aau}\,[(0.5\,T_{asl}\,T_{asu}\,(1-T_{rs})) + F_s\,T_{rs}$ $F_s = 1 - 10[(-0.798\cos(z)) - 0.332]$ $DB = A_g\,(I_{dnc}+DS)\,T_{wab}\,T_{aalb}[(0.5\,T_{aslb}^2\,T_{wab}\,T_{aalb}\,(1-T_{rsb}))$ $+ (0{,}16(1-T_{aslb})) + (0{,}16\,T_{wab}\,T_{aalb}\,T_{rsb}\,T_{aaub}\,T_{aslb}^2\,(1-T_{asub}))]$	[4]
Desnica (1986)	$H_T = (H - H_{d,h})\,R_b + H_{d,h}\,(1+\cos\beta)/2 + H\,(1-\cos\beta)/2$ avec $R_b = \cos\theta/\cos\theta_z$ et $\cos\theta = A_1 + A_2\cos\omega + A_3\sin\omega$ où $A_1 = \sin\phi\sin\delta\cos\beta - \cos\phi\sin\delta\sin\beta\cos\gamma$ $A_2 = \cos\phi\cos\delta\cos\beta + \sin\phi\cos\delta\sin\beta\cos\gamma$ $A_3 = \cos\delta\sin\beta\sin\gamma$ et $\cos\theta_z = B_1\sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos\omega$	[10]

Les calculs ont été faits pour deux régions en Yougoslavie. De bons résultats ont été obtenus pour les différentes inclinaisons.

A Ibadan (Nigeria), Bamiro [13] a testé les expressions présentées par Angstrom [14], Swartman et Ogunlade [15] et Sabbagh [16] avec une modification sur l'expression de Sabbagh. Il a été constaté que l'expression de Sabbagh se trouve la mieux placée pour prédire le flux global avec une erreur de l'ordre de 10 %.

L'ensemble des expressions des modèles utilisés sont regroupés dans le tableau 1.

Dans l'optique des différents travaux de modélisation du flux solaire global a été entrepris le présent travail. Il concerne comme sus-indiqué la modélisation de la densité du flux solaire global de la ville de Gabès.

Tableau 2: Densité du flux global horaire et nébulosité (janvier 1997)

Densité du flux global horaire (W / m^2)												**Nébulosité**				
Heure Jour	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**6**	**9**	**12**	**15**	**16**
1	0	53	214	369	478	547	561	492	367	178	19	0	0	0	0	1
2	6	50	194	386	286	233	272	286	336	178	31	1	3	4	4	5
3	0	42	197	347	461	547	544	483	367	183	28	2	1	0	0	0
4	0	53	225	386	500	57	58	514	389	183	25	0	1	0	0	0
5	0	42	222	372	494	561	569	508	383	169	25	0	4	3	3	3
6	0	47	142	386	489	500	569	456	331	119	19	4	3	3	4	7
7	0	50	122	142	464	578	528	525	392	156	28	2	6	1	0	0
8	0	39	219	383	500	567	572	508	389	164	28	0	1	2	3	3
9	36	111	203	475	539	394	272	214	97	47	0	6	4	5	7	5
10	0	31	67	208	431	572	489	122	169	158	28	6	3	5	6	7
11	19	56	247	247	258	278	278	436	344	86	28	5	5	6	4	3
12	0	42	136	217	467	617	147	128	272	122	19	5	6	7	6	7
13	28	58	103	258	408	469	306	267	150	83	36	8	6	7	7	7
14	33	92	225	361	483	556	458	497	375	167	28	5	2	2	2	1
15	22	64	214	347	456	542	544	481	339	161	33	1	1	3	3	4
16	56	89	169	292	314	522	403	497	369	197	50	5	7	7	5	6
17	42	86	222	306	278	169	286	522	406	203	39	3	6	7	2	2
18	42	92	217	311	353	186	72	258	292	100	11	2	5	8	7	7
19	0	67	247	375	492	603	594	536	428	219	31	1	1	1	2	2
20	0	44	250	406	56	628	619	475	331	164	42	2	3	4	4	6
21	0	67	275	389	472	433	389	336	325	192	36	5	5	5	5	6
22	6	47	186	272	394	344	339	281	278	139	39	6	5	6	7	7
23	22	83	239	447	558	567	603	297	186	119	86	5	5	5	7	7
24	0	58	242	411	531	606	617	872	339	189	81	3	3	5	5	4
25	11	39	100	175	206	133	147	217	142	114	58	7	8	8	8	8
26	11	36	128	208	214	253	278	253	294	147	56	7	7	6	7	7
27	0	47	161	403	519	586	617	553	422	208	67	6	7	4	3	3
28	11	28	81	236	369	558	617	542	417	206	50	8	6	4	3	4
29	31	103	289	322	483	522	606	550	408	200	53	2	3	4	3	1
30	17	78	267	433	556	617	617	553	433	208	47	0	1	0	0	0
31	67	81	272	442	561	617	622	558	439	217	47	2	2	2	1	1

2. MODELISATION DE LA DENSITE DU FLUX SOLAIRE GLOBAL

2.1 Résultats expérimentaux

Les résultats bruts qui nous ont servi pour la modélisation de la densité du flux solaire global de la ville de Gabès nous ont été fournis par la station météorologique de Gabès. Ces résultats sont relatifs à l'année 1997 et concement le flux global horaire ainsi que la nébulosité pour tous les jours de l'année.

A titre d'exemple sont donnés sur le tableau 2, les résultats expérimentaux bruts du mois de janvier 1997.

2.2 Modélisation de la densité du flux solaire global

Dans cette partie, nous avons cherché à traduire les densités des flux solaires globaux G_H par une relation les reliant aux seuls facteurs : nébulosité N, quantum des jours de l'année q et temps t dont on dispose. La relation obtenue est de la forme :

$$G_H = A(N).B(q).C(t) \tag{1}$$

Dans laquelle

$$A(N) = 0.1412\,N - 23.04 \qquad \text{pour } N \le 4 \tag{2}$$

$$A(N) = 3.7209\,N - 37.853 \qquad \text{pour } 4 < N \le 4 \tag{3}$$

$$B(q) = 0.01407 \sin[360/365(284+q)] - 0.0357 \tag{4}$$

et

$$C(t) = t^4 - 47.958\,t^3 + 795.68\,t^2 - 5291\,t + 12158 \tag{5}$$

avec G_H exprimée en W/m^2.

Nous avons reporté sur les figures 1 et 2, les densités des flux globaux horaires théoriques et expérimentaux pour différentes valeurs de la nébulosité.

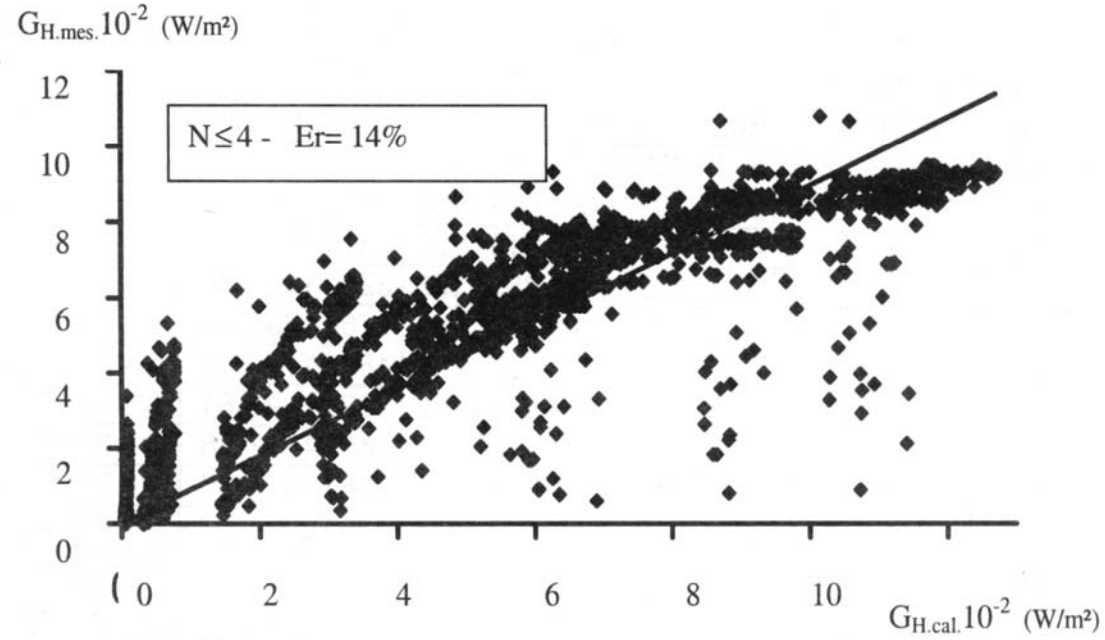

Fig. 1: Densités des flux globaux horaires mesurés en fonction des densités des flux calculées

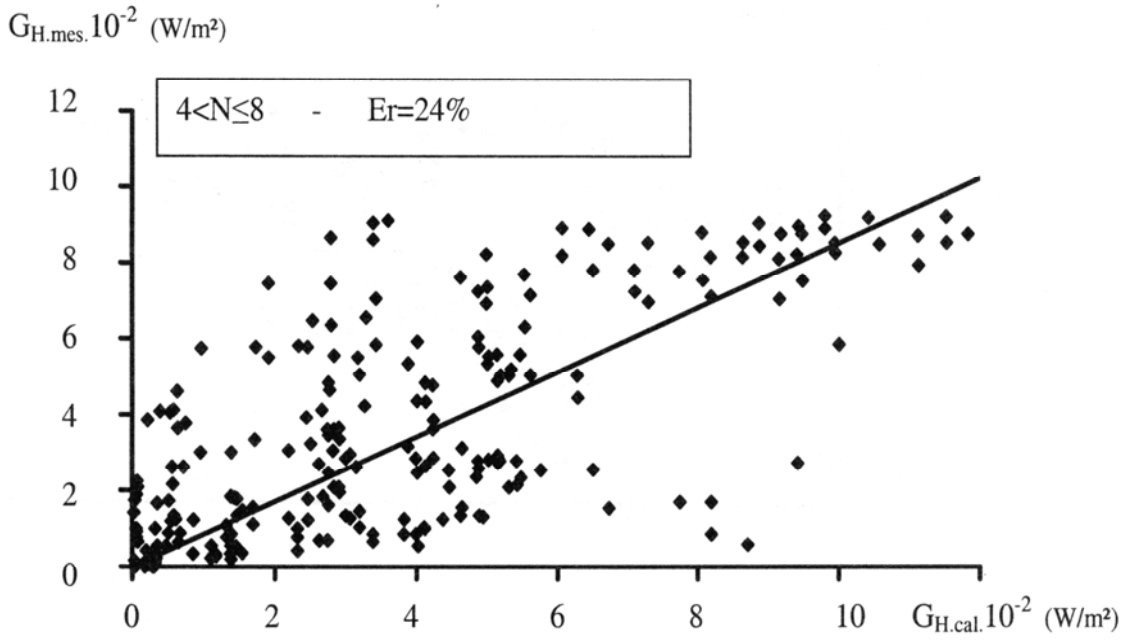

Fig. 2: Densités des flux globaux horaires mesurées en fonction des densités de flux calculés

L'examen de ces figures montre une bonne concordance entre valeurs expérimentales et théoriques bien que les écarts relatifs sont différents pour les deux gammes de nébulosité, ceux-ci demeurent acceptables. De même ont été reportés sur les figures 3 et 4, les densités des flux globaux journaliers mesurés en fonction des densités des flux globaux calculés.

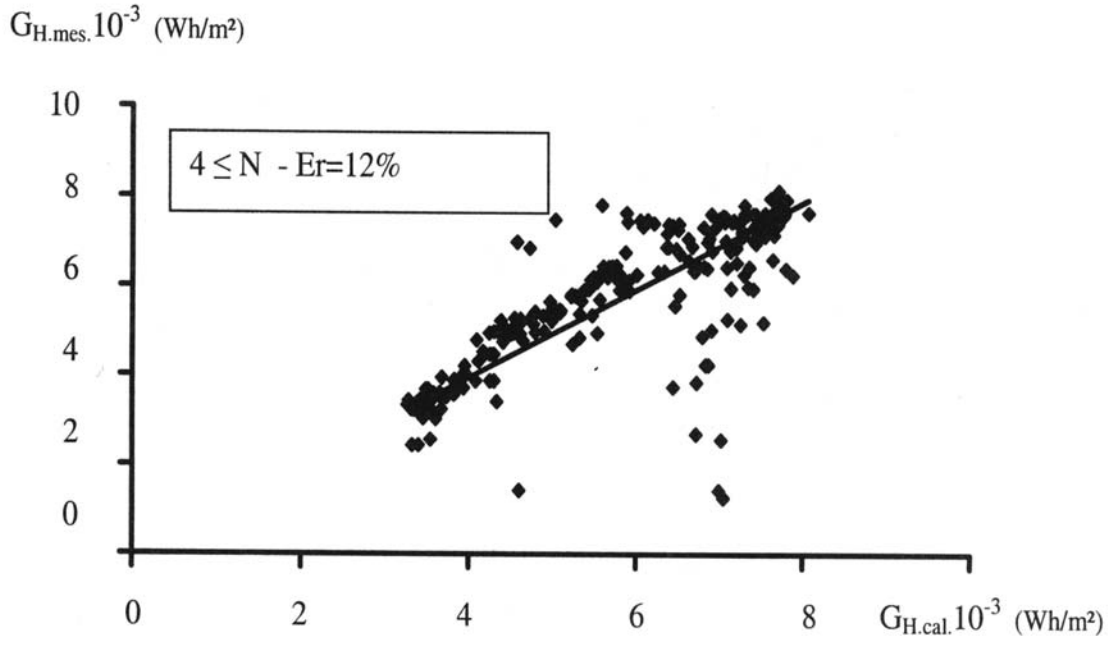

Fig. 3: Densités des flux globaux journaliers mesurées en fonction des densités des flux calculées

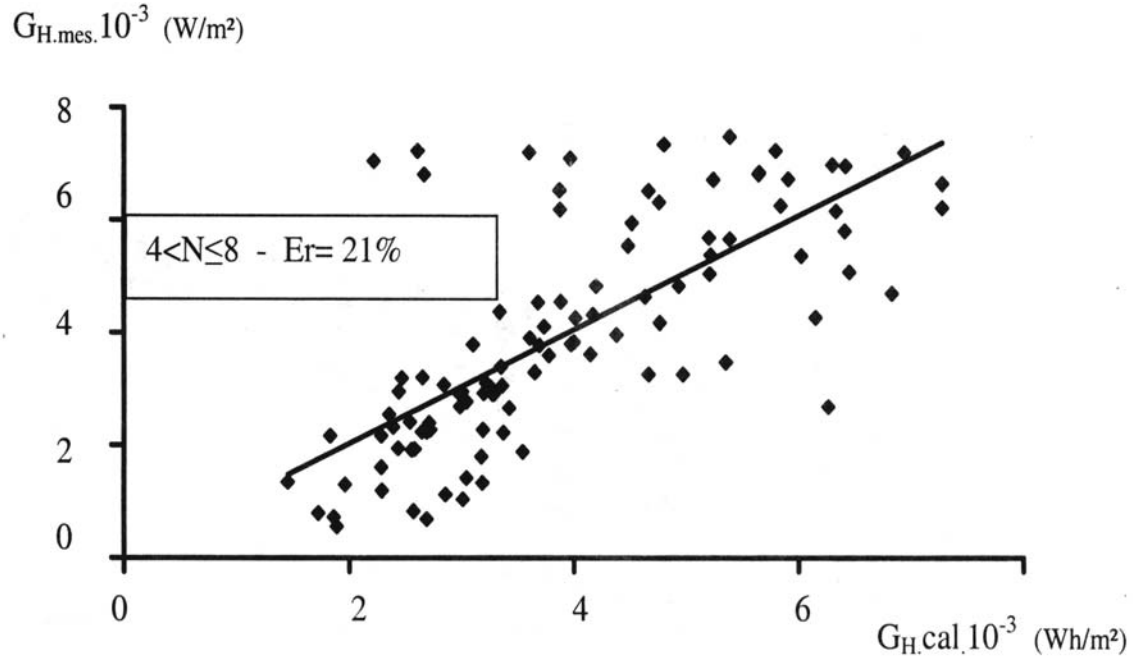

Fig. 4: Densités des flux globaux journaliers mesurées en fonction des densités des flux calculées

Les résultats de calcul obtenus par le modèle sus-élaboré ont été comparés à ceux obtenus par l'utilisation du modèle de Sivkov qui est proposé pour des latitudes élevées (35° - 65°N) et validé pour différentes stations en Italie et pour lequel on dispose de données suffisantes. Ce modèle permet le calcul de la radiation solaire globale mensuelle et est de la forme :

$$H_m = 4.9\,(n_m)^{3.1} + 10500\,(\sin h)^{2.1} \qquad (6)$$

Avec :

H_m : radiation globale mensuelle (cal/cm^2)

n_m : ensoleillement mensuel (h)

h : hauteur du soleil (°) à midi pour le 15^{ième} ou le 16^{ième} jour du mois

Pour faire cette comparaison, nous avons calculé, par utilisation de notre modèle, comme suit, la radiation solaire globale mensuelle.

$$G_m = \sum_j G_j \qquad (7)$$

avec j : jour du mois

$$G_j = \sum_{\text{levé du soleil}}^{\text{couché du soleil}} G_H = \sum_{\text{levé du soleil}}^{\text{couché du soleil}} A(N).B(q).C(t) \qquad (8)$$

Les résultats théoriques obtenus par utilisation de ces deux modèles sont reportés sur la figure 5, pour les 12 mois de l'année 97. L'examen de cette figure montre une bonne concordance entre les valeurs des flux globaux mensuels G_m obtenues par l'utilisation des deux modèles.

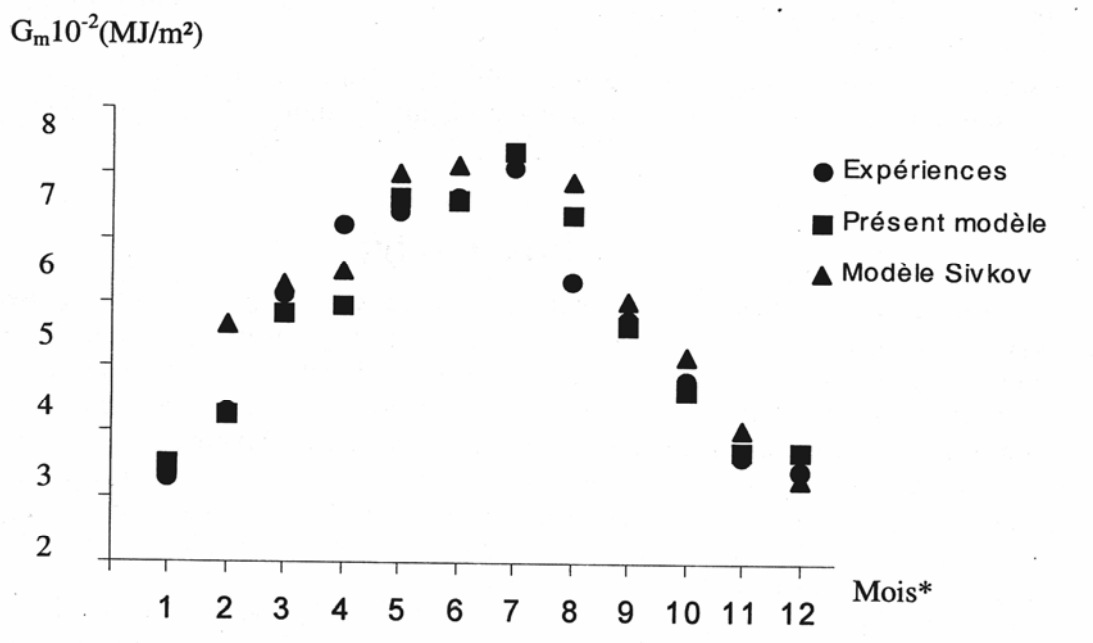

Fig. 5: Densités des flux globaux calculées et mesurées
(*) les mois sont comptés à partir de Janvier

L'ensemble des résultats expérimentaux et théoriques donnant G_m, obtenus par l'utilisation du modèle sus élaboré et le modèle de Sivkov et ayant servis à la figure 5 sont récapitulés sur le tableau 3 ci-après :

Tableau 3: Résultats expérimentaux et théoriques des densités des flux globaux mensuels G_m pour les deux modèles

Mois	**Résultats expérimentaux**	**Résultats théoriques**	
		Présent modèle	**Modèle de Sivkov**
Janvier	329.969	352.923	346.716
Février	431.806	427.994	565.482
Mars	610.063	581.073	628.285
Avril	720.034	592.265	648.711
Mai	739.008	760.342	798.19
Juin	762.951	757.044	813.753
Juillet	808.261	834.466	833.463
Août	630.763	735.307	786.978
Septembre	572.289	566.46	602.491
Octobre	481.637	464.839	518.583
Novembre	364.777	373.892	404.719
Décembre	343.224	371.25	330.032
Moyenne	**566.232**	**568.155**	**606.450**

L'examen du tableau ci-dessus montre que les valeurs théoriques de G_m sont proches. Toutefois les écarts relatifs sont légèrement différents 5,8 % pour notre modèle et 8,1 % pour le modèle de Sivkov.

A signaler à ce niveau que le modèle sous-estime la densité mensuelle du flux global en avril et le surestime en août, ceci est probablement lié aux conditions météorologiques de l'année 1997.

3. CONCLUSION

Disposant des données météorologiques de l'année 1997 pour la ville de Gabès, nous avons établi un modèle de calcul des densités des flux globaux solaires en fonction de la nébulosité, du quantum des jours de l'année ainsi que du temps. Les résultats expérimentaux et théoriques obtenus par utilisation du modèle élaboré présentent une bonne concordance. Enfin afin de pouvoir comparer notre modèle au modèle de Sivkov, et du fait que notre modèle prédît les flux globaux instantanés et non les flux globaux mensuels seul, nous avons calculé les densités des flux globaux solaires mensuelles, leurs comparaisons à celles données pai- le modèle de Sivkov montrent que ce dernier peut aussi être utilisé pour la ville de Gabès pour prédire uniquement le flux olobal mensuel.

Enfin le modèle développé doit être généralisé en tenant compte d'autres variables opératoires et pour beaucoup plus de données expérimentales (données de 3 à 5 ans).

NOMENCLATURE

a,b,c : paramètres
A : paramètre
A_g : albedo
Er : écart relatif moyen (%)
k : facteur d'altitude
K : coefficient de zone
t_1 : lever du soleil
t_2 : coucher du soleil
T: température (°C)
R : humidité relative (%)
z : zénith du soleil
ϕ : latitude du lieu
δ : déclinaison du soleil
γ : azimuth

Q : radiation globale journalier (cal/cm^2)
H : radiations globales (W/m^2)
$\overline{H}$: radiation globale moyenne (W/m^2)
H_o : radiation extra-terrestre (W/m^2)
I_{dhc} : radiation diffuse
$I_{d,h}$: composante horaire diffuse à surface horizontale
$\overline{H}_T$: radiation journalière moyenne à surface inclinée (W/m^2)
H_T : radiation solaire instantanée à surface inclinée (W/m^2)
R_t : radiation global horaire (cal/cm^2.h)
σ_h : durée d'insolation pour l'heure considérée
ρ : coefficient de réflexion du sol
β : inclinaison de la surface de captation
D : rapport durée d'insolation sur durée théorique du jour
T_i : fonctions de transmission

G_H : rayonnement global instantané reçu par un plan horizontal (W/m^2)
G_m : rayonnement global mensuel reçu par un plan horizontal (MJ/m^2)
G* : somme horaire du rayonnement global reçu par un plan horizontal
G_o^* : somme horaire du rayonnement global pour les heures complètement ensoleillées, en fonction de la hauteur du soleil au milieu de la tranche horaire (J/cm^2.h)
α : coefficient déterminé par régression linéaire pour chaque tranche horaire de chaque mois

REFERENCES

[1] A. Khogali, M.R.I. Ramadan, Z.E.H. Ali and Y.A. Fattah, '*Global and Diffuse Solar Irradiance in Yemen*', Solar Energy, Vol. 31, N°1, pp. 85-94, 1983.

[2] A. Angstrom, '*Solar and Terrestrial Radiation*', Q.J. Roy. Meteor. Soc. 50, 121, 1924.

[3] S. Barbaro, S. Coppolino, C. Leone and E. Sinagra, '*Global Solar Radiation in Italy*', Solar Energy, 20, pp. 431-435, 1978.

[4] J.E. Sherry and C.G. Justus, '*A Simple Hourly Clear-sky Solar Radiation Model Based on Meteorological Parameters*', Solar Energy, Vol. 31, N°4, pp. 427-428, 1983.

[5] A.D. Watt, '*On the Nature and Distribution of Solar Radiation*', HCP/T2552-01, U.S.Departement of Energy, Washington, D.C., U.S.G.P.O., 1978

[6] R.E. Bird and R.L. Hulstrom, '*A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces*', SERI/TR-642-761, Solar Energy Research Institute, Golden, Colarodo, 1981.

[7] J. Adnot, B. Bourges, D. Canpana et R. Gicquel, '*Utilisation de Courbes de Fréquences Cumulées d'Irradiation Globale pour Calculer des Installations Solaires*', Analyse Statistique des Processus Météorologiques Appliqués à l'Energies, Editions de CNRS, 1978.

[8] De Boer, '*Calculation of Global Radiation with the Aid of the Relative Duration of Sunshine*', Archiv fur Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, Bd10, Heftu, 1961.

[9] D. Tinaut and F. Ranos Berjano, '*Hourly Values of the Solar Radiation Determined by an Exponentiel Function*', Conference on the Physics of Solar Energy, Arab Development Institute, Tripoli, 1977.

[10] U.V. Desnica, B.G.Petrovic and D. Desnica, '*Calculation of Monthly Average Daily Insolation on Tilted, Variously Oriented Surfaces using Analytically Weighted Rb Factors*', Solar Energy, Vol. 37, N°2, p. 81-90, 1986.

[11] B.Y. Liu and R.C. Jordan, '*Daily Insolation on Surfaces Tilted Toward the Equator*', Trans. ASHRAE 67, 529, 1962.

[12] S.A. Klein, '*Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces*', Solar Energy, Vol. 19, pp. 325-329, 1977 and vol. 20, pp.441, 1978.

[13] S.I. Slvkov, '*To the Methods of Computing Possible Radiation in Italy*', Trans. Main Geophys. Obs., 160, 1964.

[13] O.A. Bamiro, '*Empirical Relation fbr the Determination of Solar Radiation in Ibadan, Nigeria*', Solar Energy, Vol. 31, N°l, pp. 85-94, 1983.

[14] A. Angstrom, '*On Computation of Global Radiation from the Records of Sunshine*', Arkiv. Geophysik, 3 (23), pp. 551-556, 1950.

[15] R.K. Swartman and 0. Ogunlade, '*Solar Radiation estimates from common parameters*', Solar Energy, 11, pp. 170-172, 1967.

[17] J.A. Sabbagh, A.A.M. Saygh and E.M.A. El-Salam, '*Estimation of the Total Radiation from Meteorological Data*', Solar Energy, Vol. 19, pp. 307-311, 1977.