Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°2 (2006) 91 - 97
DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v9i2.818

Reconstitution du rayonnement solaire par ciel clair

Djohra Saheb-Koussa*, Mustapha Koussa et Maiouf Belhamel

Centre de Développement des Energies Renouvelables
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

(reçu le 05 Avril 2006 - accepté le 21 Juin 2006)

Résumé - *Ce travail traite la reconstitution du rayonnement solaire par ciel clair. Après une synthèse bibliographique, nous avons retenu le modèle Bird et Hulstrom [1]. Ce dernier tient compte des données météorologiques telle que la température, l'humidité relative, la durée d'insolation, la pression, etc. Les résultats expérimentaux et théoriques obtenus par l'utilisation du modèle sus élaboré présentent une bonne concordance.*

Abstract - *This work treats the reconstitution of the solar radiation by clear sky. After a bibliographical synthesis, we retained the model Bird and Hulstrom [1]. This last takes account of the weather data such as the temperature, the relative humidity, the duration of insolation, pressure, etc. The experimental and theoretical results obtained by the use of the elaborate model known present a good agreement*

Mots clés: Rayonnement solaire - Modélisation - Paramètres météorologiques - Paramètres radiomètriques.

1. INTRODUCTION

Le dimensionnement des systèmes solaires [4] nécessite la connaissance d'une part des paramètres météorologiques, dont la température, la vitesse du vent, l'humidité relative et d'autre part les différentes composantes du rayonnement solaire.

Sur le territoire national, les stations météorologiques collectent les différentes données météorologiques et quelques données radiomètriques seulement. A cet effet, nous avons jugé nécessaire d'appliquer les modèles destinés à estimer les principales composantes du rayonnement solaire incident sur le sol et utilisant comme paramètres d'entrées des données météorologiques à savoir: la température, l'humidité, la durée d'insolation, la pression, etc.

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont proposé des relations empiriques qui lient les paramètres météorologiques aux différents paramètres radiométriques (irradiation globale, diffuse et directe). Ainsi, pour notre travail, nous avons retenu le modèle de Bird et Hulstrom [1]. Dans ce modèle, ont été proposées des relations empiriques permettant d'estimer les différents coefficients de transmission du rayonnement solaire, ainsi que les relations menant au calcul des différentes composantes du rayonnement solaire. Il est à noter ici que ce modèle n'est applicable que pour une journée claire.

2. MODELE DE BIRD ET HULSTROM

2.1 Eclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal [9]

Dans ce modèle, l'éclairement dû au rayonnement direct est donné par la relation suivante:

$$B_n = 0{,}975 \cdot I_{sc} \cdot \tau_r \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_a \quad (1)$$

avec BH est l'éclairement dû au rayonnement direct calculé sur un plan horizontal, tel que:

* dkoussa@cder.dz

$$BH = B_n \sin h \tag{2}$$

Nous donnons ci-dessous les différentes équations des coefficients de transmission.

2.1.1 Diffusion de Rayleigh

Le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire est donné par la relation suivante:

$$\tau_r = \exp[-0{,}0903 \cdot ma^{0{,}84} \cdot (1{,}0 + ma - ma^{1{,}01})] \tag{3}$$

2.1.2 Diffusion par les aérosols

Dans ce modèle, le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols concerne uniquement les deux longueurs d'onde ($\lambda = 0{,}38$ μm et $\lambda = 0{,}50$ μm). Ce sont ces longueurs d'onde où il existe un minimum d'absorption par l'ozone. Il est donné par la relation suivante:

$$\tau_a = \exp[-k_a^{0{,}873} \cdot ma^{0{,}9108} \cdot (1{,}0 + k_a - k_a^{0{,}7088})] \tag{4}$$

où

$$k_a = 0{,}2758 \cdot k_{a\lambda/\lambda = 0{,}38\mu m} + 0{,}35 \cdot k_{a\lambda/\lambda = 0{,}8\mu m} \tag{5}$$

2.1.3 Absorption par l'ozone

Le coefficient de transmission après absorption par l'ozone est donné par la relation suivante:

$$\tau_0 = 1 - \alpha_0 \tag{6}$$

où α_0 le coefficient d'absorption par l'ozone donné par:

$$\alpha_0 = 0{,}1611 \cdot U_3 \cdot (1{,}0 + 139{,}48 \cdot U_3)^{-0{,}3035} + 0{,}02715 \cdot U_3 \cdot (1{,}0 + 0{,}044 \cdot U_3 + 0{,}0003 \cdot U_3^2)^{-1} \tag{7}$$

avec U_3 qui est l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire dans la couche d'ozone, est défini comme suit:

$$U_3 = L_3 \cdot m_r \tag{8}$$

2.1.4 Absorption par la vapeur d'eau

Le coefficient de transmission après absorption par la vapeur d'eau est donné par la relation suivante:

$$\tau_w = 1 - \alpha_w \tag{9}$$

où α_w est le coefficient d'absorption par la vapeur d'eau, donné par:

$$\alpha_w = 1 - 2{,}4959 \cdot U_1 \left[(1 + 79{,}034 \cdot U_1)^{0{,}6828} + 6{,}385 \cdot U_1\right]^{-1} \tag{10}$$

avec U_1 qui est l'épaisseur d'eau condensable corrigée par la longueur du trajet optique, elle peut être calculée par la relation donnée ci-dessous:

$$U_1 = w \cdot m_r \tag{11}$$

où w est la hauteur d'eau condensable.

$$w = \frac{0{,}493 \cdot \phi_r \cdot P_s}{T} \tag{12}$$

avec

$$P_s = \exp\left(26{,}23 - \frac{5416}{T}\right) \tag{13}$$

2.2 Eclairement dû au rayonnement diffus sur un plan horizontal [8]

Dans ce modèle, l'éclairement dû au rayonnement diffus sur un plan horizontal est la somme des trois composantes diffuses dues aux divers types de diffusion du rayonnement solaire par la pellicule atmosphérique:

$$DH = Dr + Da + Dm \tag{14}$$

2.2.1 Eclairement dû au rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh

$$Dr = 0{,}79.I_{0h}.\cos\theta_z\,\tau_o.\tau_g\,\tau_w.\tau_{aa}.0.5.(1-\tau_r)/(1-ma-ma^{1.02}) \tag{15}$$

τ_{aa} donné par:

$$\tau_{aa} = 1-(1-w_0).\left(1-ma+ma^{1.06}\right)(1-\tau_r) \tag{16}$$

Bird et Hulstrom recommandèrent que $w_0 = 0.90$.

2.2.2 Eclairement dû au rayonnement diffus après diffusion par les aérosols

$$Dr = 0{,}79.I_{oh}\cos\theta_z.\tau_o.\tau_g.\tau_w.\tau_{aa}.F_c.(1-\tau_{as})/(1-ma-ma^{1.02}) \tag{17}$$

avec $F_c = 0.84$, valeur recommandée par ce modèle et τ_{as} donné par:

$$\tau_{as} = \tau_a / \tau_{aa} \tag{18}$$

2.2.2 Eclairement dû au rayonnement dû au phénomène de multi réflexion terre atmosphère [6]

L'éclairement dû au rayonnement issu du phénomène de multi - réflexion est donné par l'expression suivante:

$$Dm = (BH + Dr + Da).\rho_g.\rho'_a/(1-\rho_g.\rho'_a) \tag{19}$$

2.3 Eclairement dû au rayonnement global sur un plan horizontal

L'éclairement dû au rayonnement global [10, 11] sur un plan horizontale est comme suit:

$$GH = BH + DH \tag{20}$$

3. MISE EN ŒUVRE DU MODELE ET RESULTATS

Pour valider ce modèle, nous avons effectué la simulation sous Simulink représenté sur la figure suivante [2].

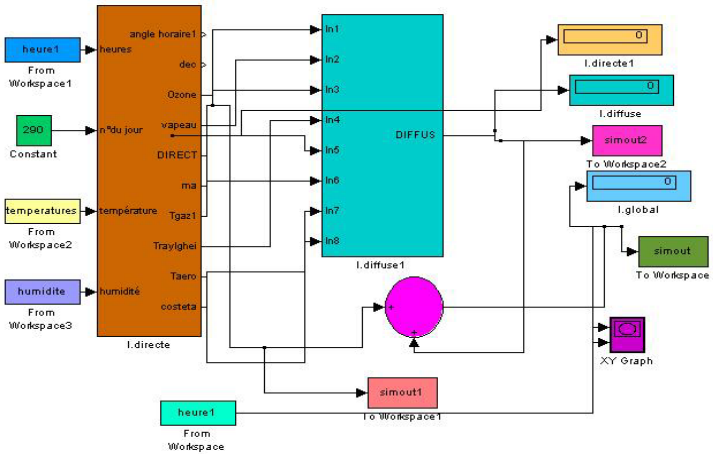

Fig. 1: Modélisation sous Simulink

Ainsi, nous avons utilisé des valeurs collectées sur le site de Ghardaïa pour une journée claire [5] (22 juin 2004), auxquelles nous avons confronté les valeurs estimées par ce modèle. Cette comparaison consiste d'une part à dresser sur un même diagramme ces valeurs. Il s'agit ainsi des composants suivants:

a) Eclairement dû au rayonnement direct sur un plan normal (Fig. 2);
b) Eclairement dû au rayonnement diffus sur un plan horizontal (Fig. 3);
c) Eclairement dû au rayonnement global sur un plan horizontal (Fig. 4).

D'autre part, nous avons calculé l'écart relatif maximal entre les valeurs mesurées et celles estimées. L'écart relatif maximal se calcule par la relation suivante [3, 7]:

$$E_{max} = \left| \frac{V_c - V_m}{\min(V_c, V_m)} \right| \tag{21}$$

Les résultats obtenus sont donnés sur le Tableau 1.

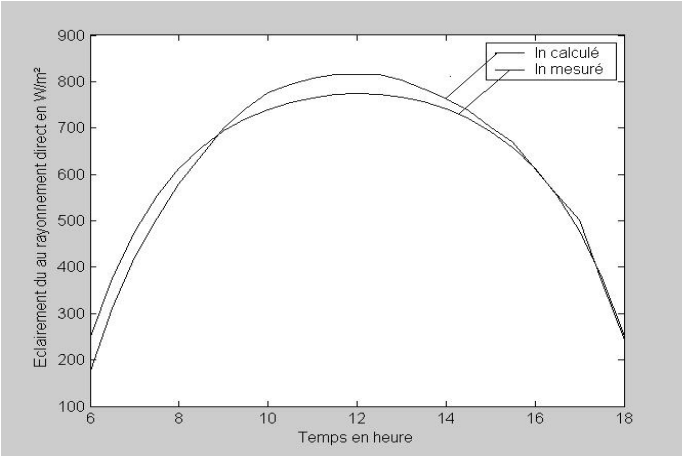

Fig. 2: Comparaison des valeurs de l'éclairement dû au rayonnement direct, sur un plan normal, mesurées et estimées

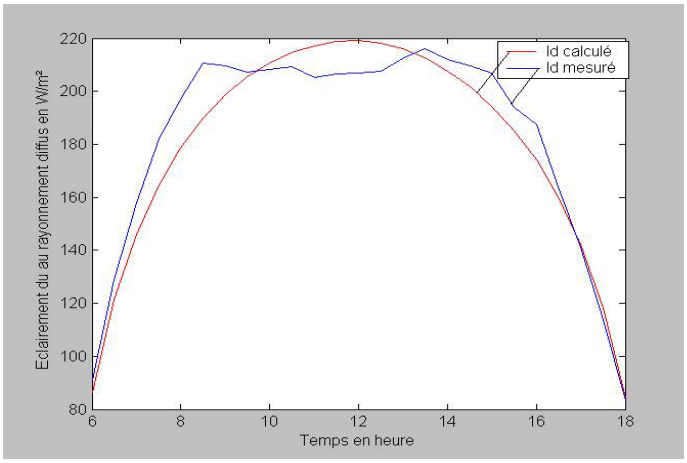

Fig. 3: Comparaison des valeurs de l'éclairement dû au rayonnement diffus mesurées et estimées

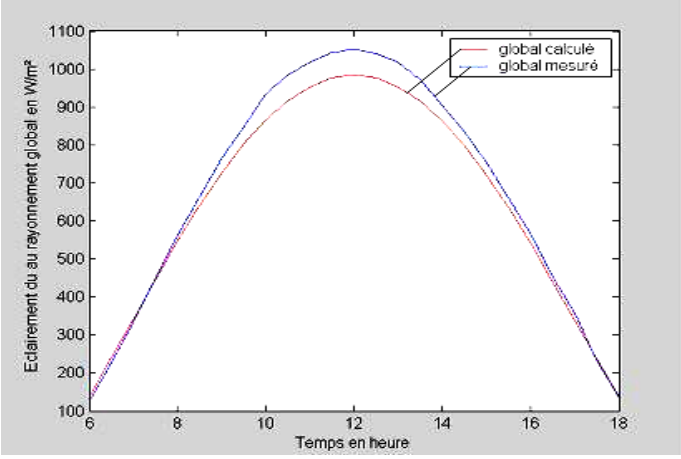

Fig. 4: Comparaison des valeurs de l'éclairement dû au rayonnement global mesurées et estimées

Tableau 1: Ecart maximal (%) entre les valeurs estimées et mesurées

	Global	**Diffus**	**Direct**
heures	E_{max} (%)	E_{max} (%)	E_{max} (%)
6h00	9.16	5.29	42.04
6h30	5.99	6.41	21.02
7h00	2.16	8.17	12.95
7h30	0.94	10.6	9.44
8h00	2.44	10.24	5.83
8h30	3.39	10.9	2.95
9h00	5.25	5.41	0.84
9h30	5.49	0.82	2.94
10h00	7.89	1.16	4.87
10h30	7.49	2.51	5.10
11h00	6.91	5.75	5.55
11h30	6.87	5.84	5.62
12h00	6.94	5.82	5.28
12h30	6.64	5.02	5.50
13h00	6.81	1.67	4.73
13h30	6.32	1.64	3.64
14h00	4.95	2.07	2.90
14h30	4.50	3.85	2.44
15h00	4.60	6.5	1.41
15h30	4.05	4.80	1.92
16h00	4.56	7.77	0.30
16h30	2.86	2.29	0.39
17h00	5.52	0.73	5.12
17h30	1.66	3.75	2.82
18h00	2.12	1.32	3.44
E_{max} moyenne (%)	5.02	4.82	6.36

4. DISCUSSION DES RESULTATS

A partir des courbes tracées précédemment, nous constatons que:

Pour l'estimation des éclairements dus au rayonnement global, diffus et direct, nous remarquons sur les figures 2, 3 et 4, que les courbes de distribution des valeurs mesurées et celles estimées par le modèle sont quasiment superposées l'une sur l'autre. Par ailleurs, si on se réfère au tableau 1, là où sont portées les valeurs de E_{max} les erreurs relatives maximales sont vraiment réduites pour les éclairements dû au rayonnement global et diffus, alors que pour l'éclairement dû au rayonnement direct, au lever du soleil, des valeurs de E_{max} sont relativement élevées. Ce qui est dû à notre sens d'une part au fait que les valeurs de cet éclairement sont faibles au lever et au coucher du soleil et d'autre part vu que ce dernier dépend fortement des caractéristiques physiques des différents constituants de l'atmosphère.

Une confirmation de ceci se traduit par le fait qu'à Ghardaïa, au lever ou au coucher du soleil, la masse d'air étant importante et souvent il y a présence d'une pellicule faiblement troublée qui apparaît à l'horizon. A notre sens, cette couche n'est qu'un nuage de petits grains de sable dû à une brise de vent matinale. Ce qui ne correspondait pas à la valeur du coefficient de trouble d'Angstrom choisi ($\beta = 0.2$). Mais des faibles valeurs de cette composante n'aura pas une incidence notable sur le calcul de la respective de la composante globale sur un plan horizontal ou sur un plan incliné. Parce que ces faibles valeurs seront multipliées encore respectivement par $\sin(h)$ ou par $\cos(\theta_i)$ (faibles le matin). Ainsi nous pouvons dire qu'il existe une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles estimées par le modèle.

5. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons appliqué un modèle qui permet de reconstituer les différentes composantes du rayonnement solaire par ciel clair moyennant des relations empiriques, permettant d'estimer les différents coefficients de transmission du rayonnement solaire.

Pour valider ce modèle, nous l'avons confronté à des valeurs collectées sur le site de Ghardaïa. Ainsi, nous avons constaté une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles estimées.

NOMENCLATURE

B_H : Eclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal (Wh/m^2)

B_n : Eclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal (Wh/m^2)

D_m : Irradiation diffuse issue du phénomène de multi réflexion terre - atmosphère (Wh/m^2)

D_a : Irradiation diffuse provenant de la diffusion par les aérosols (Wh/m^2)

D_H : Eclairement dû au rayonnement diffus sur un plan horizontal (Wh/m^2)

D_r : Irradiation diffuse provenant de la diffusion de Rayleigh (Wh/m^2)

I_{0h} : Eclairement solaire extraterrestre sur un plan horizontal

L_3 : Epaisseur de la couche d'ozone réduite (cm)

P_s : Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air saturé

T : Température ambiante (K)

V_c : Valeur calculée

V_m : Valeur mesurée

ϕ_r : Humidité relative

τ_a : Coefficient de transmission, après Diffusion par les aérosols

τ_g : Coefficient de transmission, après Diffusion par les gaz

τ_o : Coefficient de transmission, après absorption par l'ozone

τ_r : Coefficient de transmission, après Diffusion moléculaire de Rayleigh

m_r	: Masse d'air optique relative	τ_w	: Coefficient de transmission, après absorption par la vapeur d'eau
N	: Nombre de valeurs	ρ_g	: Albédo du sol considéré
h	: Hauteur du soleil (degré)	ρ'_a	: Albédo du ciel clair
I_{sc}	: Constante solaire (W/m^2)	θ_i	: Distance zénithale

REFERENCES

[1] M. Iqbal, '*An Introduction to Solar Radiation*', Academic Press, 1983.

[2] D. Saheb-Koussa, '*Contribution à l'Etude Théorique du Comportement d'un Système Hybride (Eolien - Photovoltaïque - Diesel) de Production d'Electricité sans Interruption*', Mémoire de Magister, Blida, Septembre 2005.

[3] M. Koussa, '*Détermination du Gisement Solaire Alger-Bouzaréah*', Thèse de Magister, CDER, Alger, Mars 1990.

[4] O. Gergaud, '*Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et Associé à un Accumulateur*', Thèse de Doctorat, Antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 9 décembre 2002.

[5] M. Koussa et al., '*Recueil des Paramètres Astronomiques Relatifs aux Sites d'Algérie*', Tome1 et 2, CDER, Alger.

[6] A.A.M. Sayigh, '*Estimation of the Total Solar Radiation from Meteorological Data*', Solar Energy, Vol. 19, pp. 307 - 311, Ed. Pergamon Press, 1977.

[7] M. Koussa and D. Saheb, '*Applicability of Models to Estimate Solar Radiation Components as Function of Meteorological Data*', American Solar Energy Society, Solar World Congress, August,1991, Denver, Colorado, U.S.A.

[8] S.J. Reddy, '*An Empirical Method for Estimation of Net Radiation Intensity*', Solar Energy, Vol. 13, pp. 289 - 291, 1971.

[9] R.K. Swartman, '*Solar Radiation Estimates from Common Parameters*', Solar Energy, Vol. 11, pp. 170 - 172, 1967.

[10] H.P. Garg et S.N. Garg, '*Prediction of Global Solar Radiation from Bright Sunshine Radiation Hours and Other Meteorological data*', Energy Conversion, Vol. 23, N°2, pp. 113 - 118, 1983.

[11] Hussain et al, '*Estimation of Global and Diffuse Irradiation from Sunshine Duration and Atmospheric Water Vapour Contents*', Solar Energy, Vol. 33, N°2, pp. 217 - 220, USA 1984.