

Reconstitution des irradiations globale et diffuse en fonction de quelques paramètres météorologiques pour un ciel quelconque

Mustapha Koussa^{1*}, Mourad Haddadi² et Ali Malek¹

¹ Centre de Développement des Energies Renouvelables,
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

² Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque,
Ecole Nationale Polytechnique, 10, Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger, Algérie

(reçu le 24 Décembre 2006 - accepté le 25 Janvier 2007)

Résumé - L'objectif de ce travail est de vérifier l'application des modèles permettant de reconstituer les moyennes mensuelles par jour des irradiations globales et diffuses sur un plan horizontal. Les modèles choisis ont été proposés dans la littérature par différents scientifiques et relatifs à plusieurs sites dans le monde. Ces modèles sont fonction des principaux paramètres météorologiques, comme la température ambiante, l'humidité relative, la durée d'insolation et de quelques paramètres astronomiques, tels que la déclinaison du soleil, la durée astronomique du jour, la constante solaire, la variation de la distance terre soleil et de la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation extraterrestre calculée sur un plan horizontal à la limite de l'atmosphère. Ainsi, nous avons confronté ces modèles aux valeurs réellement mesurées sur plusieurs sites du territoire national; Bouzaréah, comme site côtier, Batna sur les Hauts Plateaux, Ghardaïa et Adrar au Nord et au Sud du Sahara. Comme résultats, nous avons constaté que selon les caractéristiques climatiques respectives au site considéré, certains modèles sous-estiment ces composantes, d'autres surestiment alors que d'autres sont en bonne concordance avec les valeurs mesurées. Ainsi les modèles, que nous avons retenus, sont respectivement les modèles de Hussain et al. et celui de Garg et al. pour l'estimation de l'irradiation globale et les modèles de Erbs, Klein et Duffie et celui de Liu & Jordan pour la reconstitution de la composante diffuse.

Abstract - The objective of this work is to verify the application of models which allow reconstituting monthly averages a day global and diffuse radiations on a horizontal plan. Chosen models were proposed in the literature by various scientists and relative to several sites in the world. This models are a function of main meteorological parameters of which ambient temperature, relative humidity, sunshine duration and about astronomical parameters such as the declension of the sun, the astronomical duration of day, the constant solar, the earth sun distance variation and the monthly average a daily of the extraterrestrial radiation calculated on a horizontal plan on the atmosphere limit. So we confronted these models with values really measured on several Algerian's sites which Bouzareah, as coastal site, Batna on the high trays, Ghardaïa and Adrar in the North and in the South of Sahara respectively. As results, we noticed that according to respective climatic characteristics in the considered site, some models underestimate these constituents; the others overestimate them while the others are in good agreement with moderate values of error. So the models retained respectively are Hussain's models and al. and that of Garg and al. for the estimation of the global radiation and the models of Erbs, Klein and Duffie and Liu & Jordan for the reconstruction of the diffuse constituent.

Mots clés: Irradiation diffuse - Irradiation globale - Indice de clarté - Durée d'insolation.

1. INTRODUCTION

L'évaluation à long terme des performances des systèmes de conversion de l'énergie solaire s'établit par l'intermédiaire de programmes de simulation numérique. Pour cela, suivant le système considéré, les concepteurs utilisent généralement comme un pas de temps des moyennes mensuelles par jour ou par heure dans la mesure de disponibilité. Ainsi, les composantes du

* mustaphakoussa@hotmail.com

rayonnement solaire requises sont les irradiances globales incidentes sur le capteur selon l'inclinaison considérée. Cette composante peut être déterminée avec précision si les composantes diffuses et globales sont disponibles.

Par ailleurs, les stations de mesures de ces composantes sont rares à travers le territoire national. Alors, pour leur estimation, on a recours aux modèles théoriques. Ces modèles sont établis sous forme de corrélation en d'autres sites. Pour qu'ils soient applicables aux sites considérés, ces modèles doivent être confrontés aux valeurs réellement mesurées sur le site considéré sur une période qui couvrira les différentes saisons de l'année.

Notre travail consiste en première étape en une étude bibliographique qui nous permet de regrouper quelques modèles théoriques établis en d'autres sites à travers le monde. Ces modèles sont sous forme de relations empiriques qui relient les composantes du rayonnement solaire aux principaux paramètres météorologiques, comme la température ambiante, l'humidité relative, la durée d'insolation et des paramètres astronomiques, comme la durée maximale du jour, la déclinaison du soleil, la variation distance terre - soleil et l'irradiation solaire à la limite de l'atmosphère.

Dans une seconde étape, les modèles retenus ont été confrontés avec des valeurs mesurées sur les sites de Adrar, Ghardaïa, Bouzaréah, Tamanrasset et Batna pour la composante globale, alors que pour la composante diffuse, vu la disponibilité de valeurs mesurées que sur quelques sites, notre étude s'est limitée à ces trois sites: Adrar, Ghardaïa et Bouzaréah. Ceci nous permet de conclure que la concordance entre les valeurs mesurées et celles calculées dépend fortement des caractéristiques climatiques sur lesquelles est basé le modèle considéré et celle du site considéré, ainsi que celles caractérisant le site considéré. Ainsi, généralement les modèles de Hussain [1], de Garg [2] restent les modèles les plus adéquats pour les sites considérés pour la reconstitution de la composante globale, alors que les modèles de Erbs, Klein et Duffie [13] et le modèle de Liu & Jordan [5] sont les modèles qui conduisent à des valeurs les plus proches des valeurs mesurées de l'irradiation diffuse.

2. DESCRIPTION DES MODELES RETENUS

2.1 Moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale

2.1.1 Relation de A.A.M. Sayigh [6]

Le modèle de Sayigh *et al.* a été développé moyennant les données relatives à plusieurs sites indiens, où la latitude est comprise entre 8°Nord et 28.6°Nord et la longitude comprise entre 72°Est et 88°Est. Cette relation tient compte des paramètres géographiques, comme la latitude et la longitude. Il tient compte aussi de quelques paramètres astronomiques, à savoir, la durée du jour théorique, l'irradiation extraterrestre calculée sur un plan horizontal. Les paramètres météorologiques relatifs au site, et qui sont utilisés dans ce modèle, sont: la durée d'insolation DI, l'humidité relative HR et la température maximale T_{max} .

Dans ce modèle, Sayigh *et al.* ont caractérisé des zones climatiques par un facteur $\Psi_{i,j}$. Ainsi suivant la moyenne mensuelle par jour de l'humidité relative et suivant le mois considéré, ils définissent trois zones climatiques respectivement caractérisées par les plages de l'humidité relative, $HR \leq 65 \%$, $HR \geq 70 \%$ et $65 \% < HR < 70 \%$. Connaissant ainsi la valeur de HR à partir du graphe reliant les paramètres HR et le numéro du mois considéré, on détermine la valeur de $\Psi_{i,j}$ correspondante. Cependant, le modèle de Sayigh est donné par la relation suivante:

$$G_H = 11.6KN \exp \left(\phi \left(\frac{DI}{T_m} \right) - \left(\frac{HR}{15} \right) - \left(\frac{1}{T_{max}} \right) \right) \quad (1)$$

avec

$$N = 1.7 - 0.458 \phi \quad (2)$$

ϕ étant la latitude du site exprimée en radians.

$$K = 100 \left(n T_m + \Psi_{ij} \cos(\phi) \right) \quad (3)$$

$$n = \frac{1}{(1 + 0.1\phi)} \quad (4)$$

Tableau 1: Valeur de $\Psi_{i,j}$ en fonction du numéro du mois (J) et de la zone climatique (I)

I ↓	J →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		1.28	1.38	1.54	1.77	2.05	2.30	2.48	2.41	2.36	1.73	1.38	1.17
2		1.46	1.77	2.05	2.15	2.05	2.05	2.10	2.17	2.14	1.96	1.60	1.43
3		1.60	1.81	2.00	2.17	2.25	2.26	2.24	2.20	2.10	1.92	1.74	1.60

2.1.2 Relation de Reddy [7, 8]

Cette relation a été aussi établie pour plusieurs sites indiens. Les mêmes paramètres utilisés dans le modèle de Sayigh *et al.* ont été reconduits dans ce modèle, mais, en plus Reddy a tenu compte du nombre de jours pluvieux dans le mois. Ainsi le modèle proposé est décrit par la relation suivante:

$$G_h = K \left[1 + 0.8 \left(\frac{DI}{T_m} \right) \right] \frac{(1 - 0.2t)}{\sqrt{HR}} \quad (5)$$

avec

$$K = 100 \left(n t + \psi_{ij} \cos(\phi) \right) \quad (6)$$

$$n = \frac{1}{(1 + 0.1\phi)} \quad (7)$$

avec ϕ en degrés.

2.1.3 Relation de Swartman [10]

De même, moyennant les données relatives de 14 stations indiennes, deux relations ont été établies par Swartman. Ces relations permettent d'estimer l'irradiation globale sur un plan horizontal à partir de la durée d'insolation et de l'humidité relative. Dans ce modèle, comme durée astronomique du jour, l'auteur suppose que cette dernière est égale à 12 heures par jour pour chacun des mois de l'année. Ces deux relations sont données comme suit:

$$G_{h1} = 11.6 \cdot 490 \left(\frac{DI}{12} \right) (0.357HR)^{-0.262} \quad (8)$$

$$G_{h2} = 11.6 \cdot 460 \exp 0.607 \left(\frac{DI}{12} - HR \right) \quad (9)$$

2.1.4 Relation de Garg *et al.* [2]

A partir de la courbe de saturation de l'air, Garg *et al.*, moyennant la méthode des moindres carrés, ont développé une relation multilinéaire reliant l'humidité absolue H_a à l'humidité relative HR , à la température ambiante T_a . A partir de cette corrélation et de la fraction d'insolation définie par le rapport : durée d'insolation DI à la durée astronomique du jour T_m et à partir de l'irradiation extraterrestre G_{h0} calculée sur un plan horizontal, Garg *et al.* ont développé la relation suivante:

$$G_h = G_{h_0} \left(0.14 - 0.4 \left(\frac{DI}{T_m} \right) - 0.0055 H_a \right) \quad (10)$$

avec H_a est l'humidité absolue.

$$H_a = HR \left(4.7923 + 0.3647 T_a + 0.0055 T_a^2 + 0.0003 T_a^3 \right) \quad (11)$$

T_m : durée astronomique du jour et T_a : température ambiante.

Dans ces relations, G_h est exprimé en Wh/m^2 .

2.1.5 Relations de Sabbagh *et al.* [9]

En se basant sur des données relatives à plusieurs pays du Golfe, en particulier, les sites d'Arabie Saoudite, Sabbagh *et al.* ont développé deux relations empiriques liant les différents paramètres météorologiques qui affectent l'atténuation du rayonnement solaire, à savoir: la durée d'insolation DI , l'humidité relative HR , la température maximale T_{max} , l'altitude alt , la situation géographique (longitude L , latitude ϕ et sa situation par rapport à la mer et un lac d'eau caractérisé par le facteur de zone caractéristique, qui sont données par les relations suivantes:

$$G_h = 18.1 K \exp \left[\varphi \left(\frac{DI}{12} \right) - \left(\frac{HR}{100} \right)^{1/3} - \left(\frac{1}{T_{max}} \right) \right] \quad (12)$$

$$G_h = 18.4 [419.391 DI - 292.73 HR + 330.571] \quad (13)$$

DI , HR , et T_{max} sont respectivement les moyennes mensuelles par jour de la durée d'insolation, de l'humidité relative et de la température moyenne maximale du mois considéré.

2.1.5 Relation de Hussain *et al.* [1]

Le modèle de Hussain est basé sur le modèle de Garg *et al.* Ainsi, cette expression permet d'estimer l'irradiation globale en fonction des moyennes mensuelles par jour de l'humidité absolue et de la durée d'insolation. Cette expression est donnée comme suit:

$$G_h = G_{h_0} \left(0.394 + 0.364 \left(\frac{DI}{T_m} \right) - 0.0035 H_a \right) \quad (14)$$

2.1.6 Relation de A.S Sambo [10]

Une période de 60 mois de mesure de la durée d'insolation, des températures maximales et minimales, de la température moyenne et de l'humidité spécifique, a été utilisée pour développer 12 différentes corrélations avec lesquelles la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale pourra être calculer pour le site de Kano au nord du Nigeria.

Les corrélations obtenues ont été combinées pour aboutir à une forme d'équation type d'Angström simplifiée, cette corrélation est donnée comme suit:

$$K_T = 0.62 - 0.294 \frac{DI}{T_m} + 0.178 \left(\frac{DI}{T_m} - HR - \frac{T_{min}}{T_{max}} \right) + 0.491 \left(\frac{DI}{T_m} \frac{T_{min}}{T_{max}} \right) \quad (15)$$

2.1.7 Modèle de W.E. Alnaser [11]

Pour la reconstitution de la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale sur un plan horizontal, Alnaser a développé un nouveau modèle pour Bahrayn. Dans ce modèle, il utilise six

paramètres (astronomiques et météorologiques). Ainsi il a essayé de mettre en évidence l'effet du choix du nombre de paramètres sur la précision de ce modèle. Ainsi, il propose:

$$G_h = 1066.167 + 0.5133G_{h_0} - 8.924HR + 2647.32 \frac{DI}{T_m} - 34.604T_a + 31.202TSol \quad (16)$$

2.2 Moyenne mensuelle par jour de l'irradiation diffuse

Une recherche bibliographique a été effectuée dans le but de trouver des modèles analytiques ou empiriques qui permettent de reconstituer la composante diffuse à partir des principales données météorologiques. La seule relation trouvée dans la littérature, c'est celle proposée par Hussain [1]. Comme pour la composante globale, cette relation exprimant l'irradiation diffuse dépend aussi de la durée d'insolation et de l'humidité absolue. Par contre d'autres, ceux sont limités à utiliser la durée d'insolation et respectivement l'irradiation extraterrestre et l'irradiation globale mesurée sur un plan horizontal [15]. Tandis que d'autres ont mentionné que la partie diffuse du rayonnement solaire dépend essentiellement de l'irradiation globale, ainsi ils ont exprimé cette quantité seulement en fonction de l'indice de clarté K_T .

Nous citons ci-dessous les différents modèles que nous avons retenus dans notre travail.

2.2.1 Modèle de Liu & Jordan [5]

Une première relation a été établie par Liu & Jordan qui exprime la fraction de l'irradiation diffuse par rapport à l'irradiation globale K_D en fonction de l'indice de clarté K_T . Les données utilisées sont relatives au site de Blue Hill Massachusetts (USA), cette corrélation est donnée comme suit:

$$K_D = 1.39 - 4.027 K_T + 5.531 K_T^2 - 3.108 K_T^3 \quad \text{pour } 0.30 < K_T \leq 0.70 \quad (17)$$

2.2.2 Modèle de Page [3, 4]

Page, utilisant les données relatives à dix sites, dont la latitude s'étale entre 40°Nord et 40°Sud, a établi une corrélation linéaire reliant l'irradiation diffuse à l'indice de clarté, donnée par la relation suivante:

$$K_D = 1.0 - 1.13 K_T \quad (18)$$

2.2.3 Modèle de Collares-Pereira *et al.* [12]

Collares-Pereira & Rabl, moyennant les données relatives de cinq sites aux Etats-Unis, a proposé une corrélation polynomiale d'ordre 4, donnée comme suit:

$$K_D = 1.188 - 2.272 K_T + 9.473 K_T^2 - 21.856 K_T^3 + 14.648 K_T^4 \quad \text{pour } 0.17 < K_T \leq 0.80 \quad (19)$$

$$K_D = 0.99 \quad \text{pour } K_T \leq 0.17 \quad (20)$$

Une autre relation a été développée par Collares-Pereira & Rabl qui dépendra, cette fois-ci, de l'angle horaire du lever du soleil ω_s , paramètre caractérisant la saison considérée. Cette relation est donnée comme suit:

$$K_T = 0.775 + 0.347 \left(\frac{\pi}{180} \right) (\omega_s - 90) - \left[0.505 + 0.261 \left(\frac{\pi}{180} \right) (\omega_s - 90) \right] \cos[2(K_T - 0.9)] \quad (21)$$

ω_s est l'angle horaire du lever du soleil en degrés; $\omega_s \approx 90^\circ$ pour les mois de Février, Mars, Avril, Août, Septembre et Octobre, $\omega_s \approx 100^\circ$ pour les mois de Mai, Juin et Juillet et $\omega_s \approx 80^\circ$ pour les mois de Novembre, Décembre et Janvier.

2.2.4 Relation de Erbs, Klein et Duffie [13]

Erbs *et al.* ont utilisé des mesures à l'échelle horaire établis sur quatre stations américaines, des irradiances globale et diffuse pour développer un modèle dépendant de la saison reliant les deux grandeurs indiquées. Ainsi ils proposent les relations suivantes:

$$K_D = 1.391 - 3.560 K_T + 4.189 K_T^2 - 2.137 K_T^3 \quad (22)$$

pour $\omega_s \leq 80^\circ$ et $0.30 \leq K_T \leq 0.80$.

$$K_D = 1.311 - 3.022 K_T + 3.427 K_T^2 - 1.821 K_T^3 \quad (23)$$

pour $\omega_s > 80^\circ$ et $0.30 \leq K_T \leq 0.80$.

2.2.5 Relation d'Iqbal [14, 15]

Iqbal a utilisé des données relatives à différents sites canadiens, et établit une relation linéaire donnée par:

$$K_D = 0.958 - 0.982 K_T \quad \text{pour } 0.30 \leq K_T \leq 0.60 \quad (24)$$

2.2.6 Relation de Hussain [1]

De même, pour la reconstitution de l'irradiation diffuse, Hussein a proposé un même type de relation que celle établie pour l'estimation de l'irradiation globale. Cette relation est fonction de la durée d'insolation, de la température ambiante, de l'humidité et de la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation extraterrestre calculée sur un plan horizontale. Elle est donnée par :

$$D_h = G_{h0} \left(0.306 - 0.165 \left(\frac{DI}{T_m} \right) - 0.0025 H_a \right) \quad (25)$$

3. DONNEES UTILISEES

Les données utilisées dans ce travail sont relatives aux sites indiqués ci-dessous:

Site	Bouzaréah	Ghardaïa	Tamanrasset	Adrar	Batna
Latitude (°)	36.8 N	32.43 N	22.78 N	27.82 N	35.55 N
Longitude (°)	3.17 E	3.8 E	5.52 E	0.18 O	6.18 E
Altitude (m)	345	468	1370	263.9	1051.9

4. METHODES DE COMPARAISON

Pour la comparaison des valeurs mesurées et celles estimées, nous avons élaboré, pour chacun des modèles étudiés, un programme sous Matlab. A partir de chacun de ces programmes, pour chaque site étudié, nous avons d'une part dressé sur un même graphe, les courbes représentatives des valeurs mesurées et celles estimées par chacun des modèles et d'autre part nous avons calculé l'écart relatif moyen entre les valeurs mesurées et celles estimées par chacun des modèles. Cet écart est calculé par la relation suivante:

$$\text{Err} (\%) = \text{Abs} \left(\frac{\text{Val}_{\text{me}} - \text{Val}_{\text{es}}}{\text{Val}_{\text{me}}} \right) \times 100 \quad (26)$$

5. RESULTATS

Nous donnons sur le tableau suivant la liste des figures représentatives de la comparaison mesures - calculs pour chacun des modèles, chacune des composantes du rayonnement solaire et pour chacun des sites (Tableau 2).

Tableau 2: Liste des figures de comparaison mesures – calculs pour les sites étudiés

<u>Irradiation Globale</u>	Site Adrar (Fig. 1); Site Ghardaïa (Fig. 2); Site Bouzaréah (Fig. 3); Site Tamanrasset (Fig. 4); Site Batna (Fig. 5).
<u>Irradiation Diffuse</u>	Site Adrar (Fig. 6); Site Ghardaïa (Fig. 7); Site Bouzaréah (Fig. 8).

5.1 Irradiation globale

5.1.1 Site d'Adrar

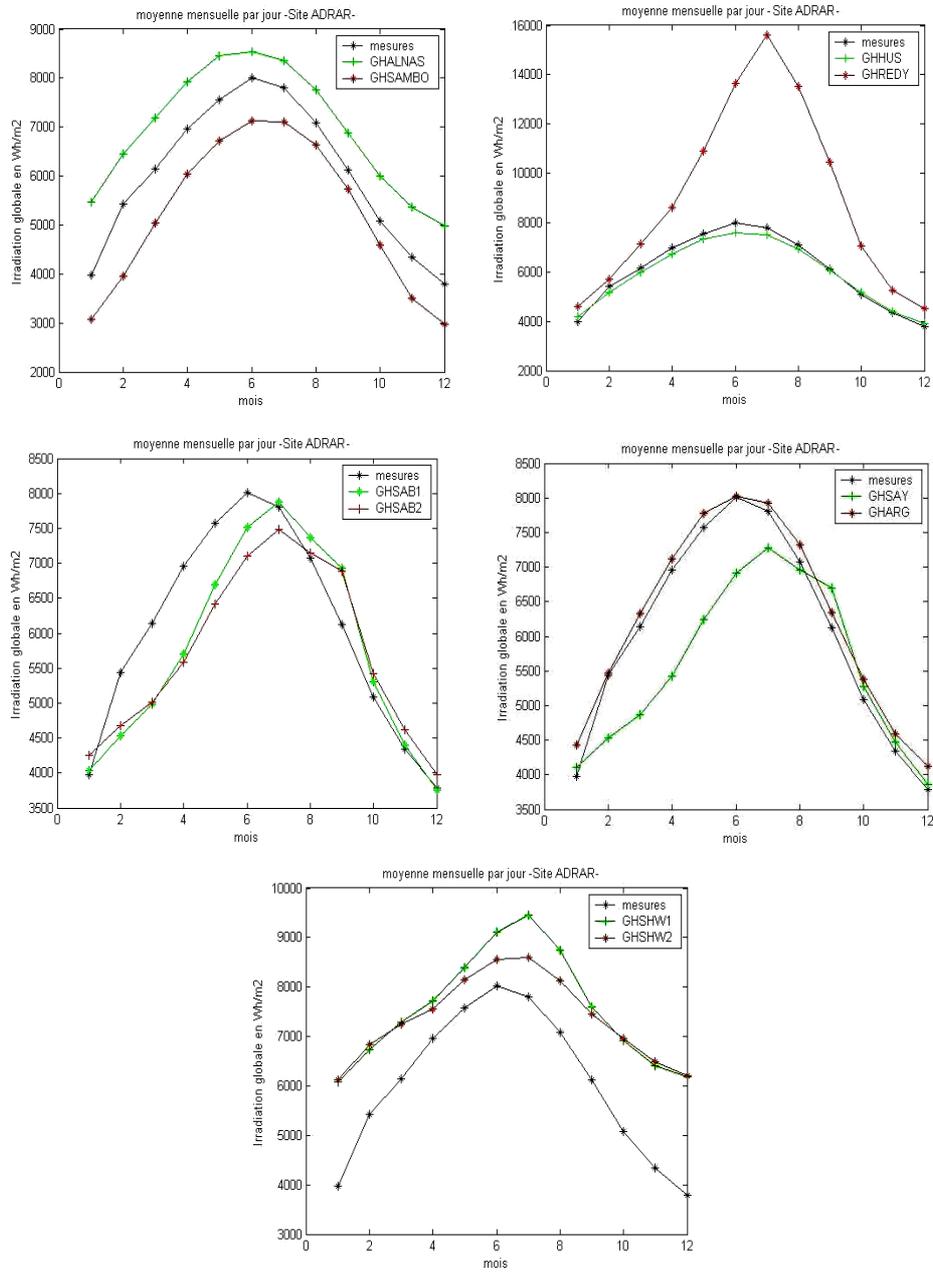


Fig. 1: Comparaison des différents modèles avec les valeurs mesurées - Adrar (Globale)

5.1.2 Site de Ghardaïa

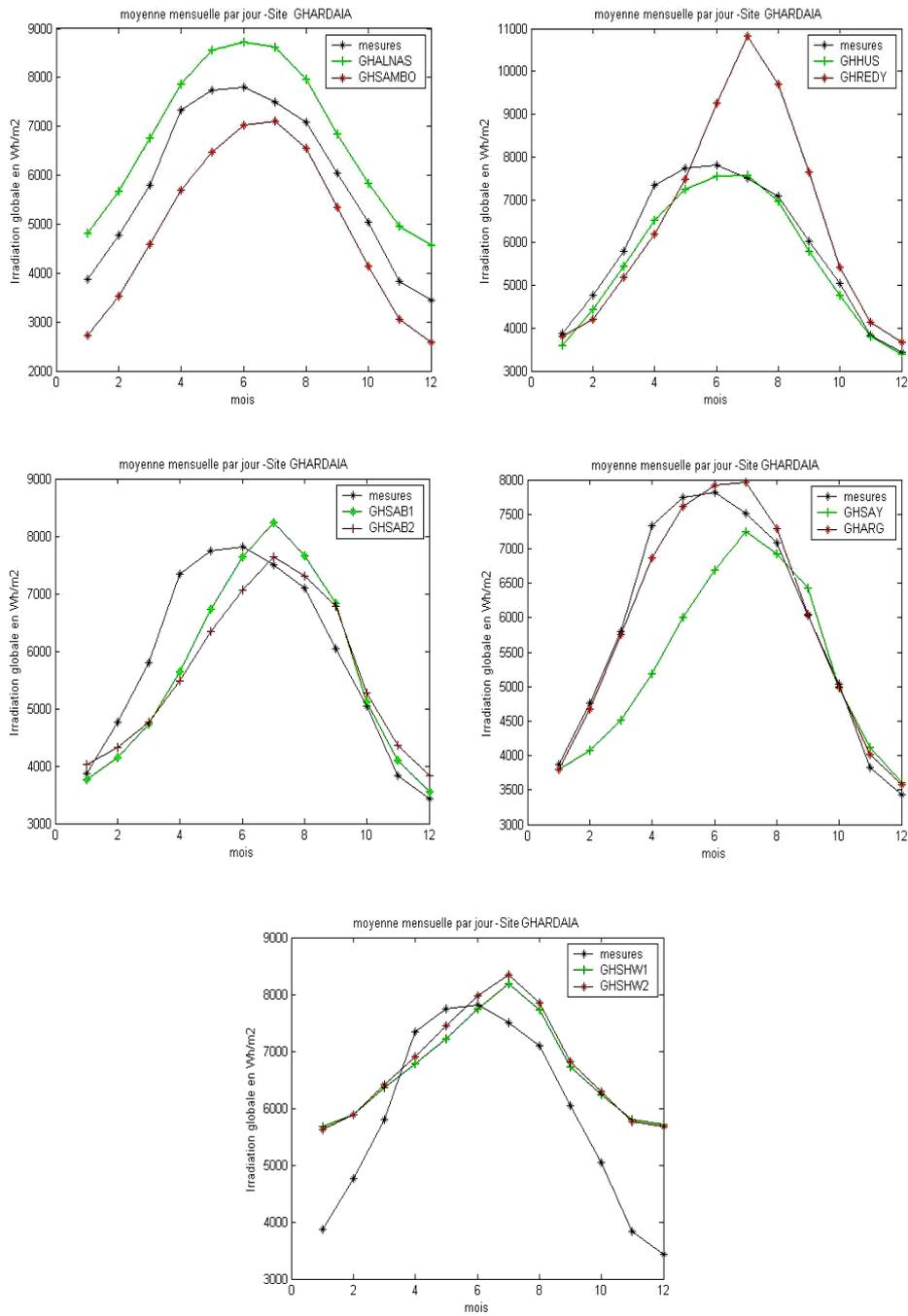


Fig. 2: Comparaison des différents modèles avec les valeurs mesurées - Ghardaïa (Globale)

5.1.3 Site de Bouzaréah

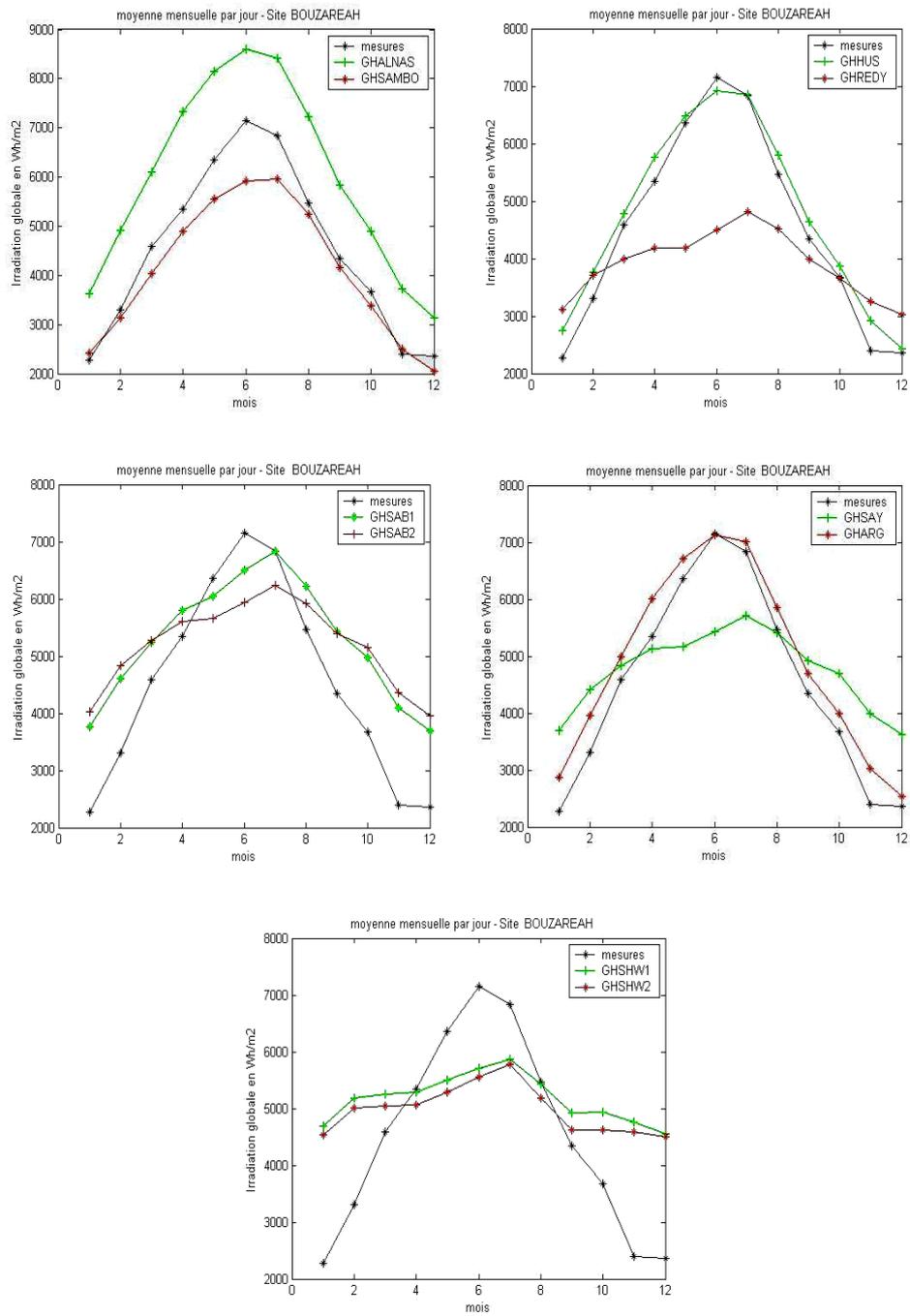


Fig. 3: Comparaison des différents modèles avec les valeurs mesurées - Bouzaréah (Globale)

5.1.4 Site de Tamanrasset

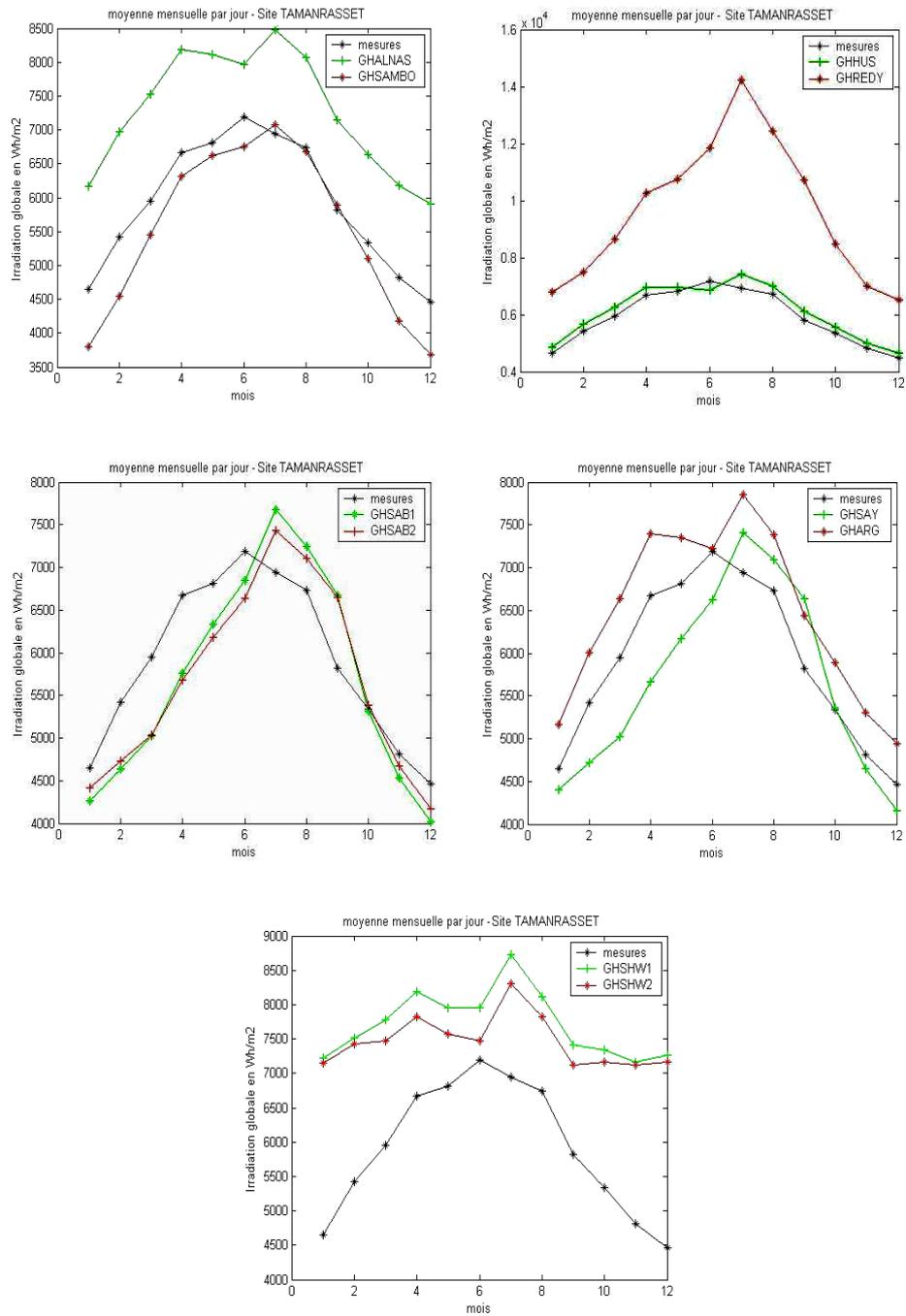


Fig. 4: Comparaison des différents modèles avec les valeurs mesurées – Tamanrasset (Globale)

5.1.5 Site de Batna

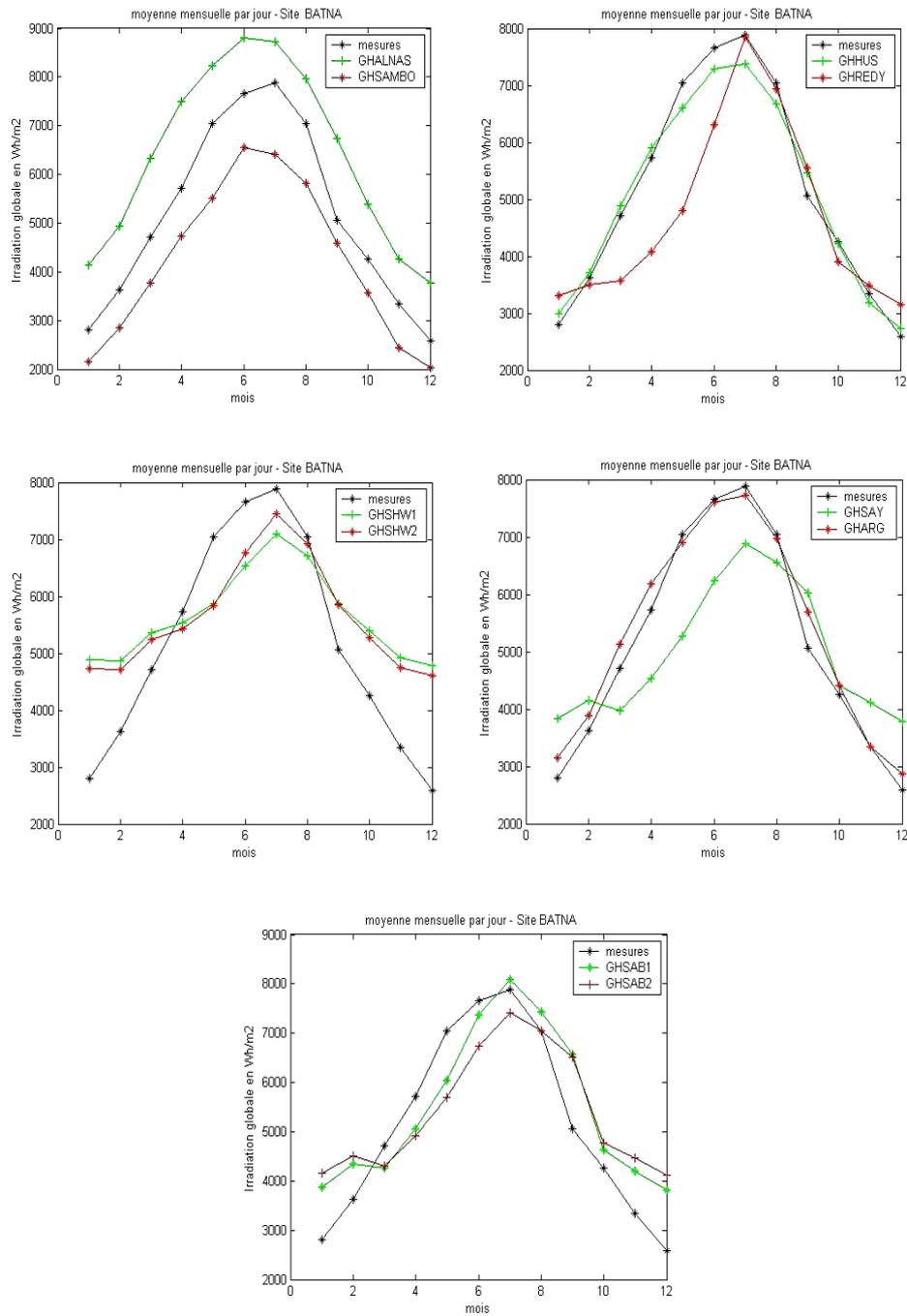


Fig. 5: Comparaison des différents modèles avec les valeurs mesurées - Batna (Globale)

Tableau 3: Valeur de l'erreur relative entre les valeurs estimées et mesurées de l'irradiation globale (%)

Modèle	Err (%)	Adrar	Ghardaïa	Bouzaréah	Tamanrasset	Batna
Sahigh	Err (%)	16.00	15.85	27.28	08.60	20.60
Reddy	Err (%)	43.02	15.93	22.87	60.75	14.13
Swartman1	Err (%)	28.93	22.13	39.00	33.17	28.88
Swartman2	Err (%)	26.44	22.28	36.79	29.09	25.88
Garg	Err (%)	04.14	02.72	11.15	09.75	05.82
Sabagh 1	Err (%)	08.13	09.56	28.78	09.46	18.10
Sabagh 2	Err (%)	10.09	10.97	33.66	08.52	22.16
Hussain	Err (%)	03.08	0.462	08.05	04.39	04.82
Alsalam	Err (%)	17.27	17.34	36.70	24.19	28.19
Sambo	Err (%)	14.61	17.68	08.98	08.06	19.06

5.2 Irradiation diffuse

5.2.1 Site d'Adrar

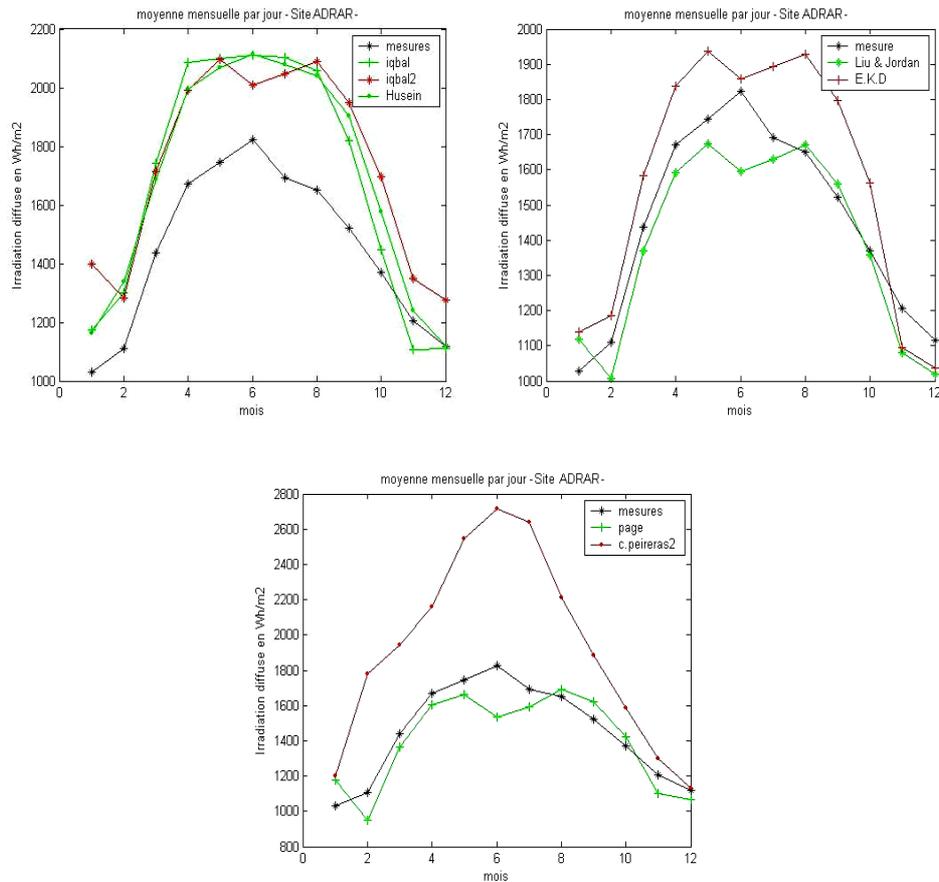


Fig. 6: Comparaison des différents modèles avec les valeurs mesurées – Adrar (Diffuse)

5.2.2 Site de Ghardaïa

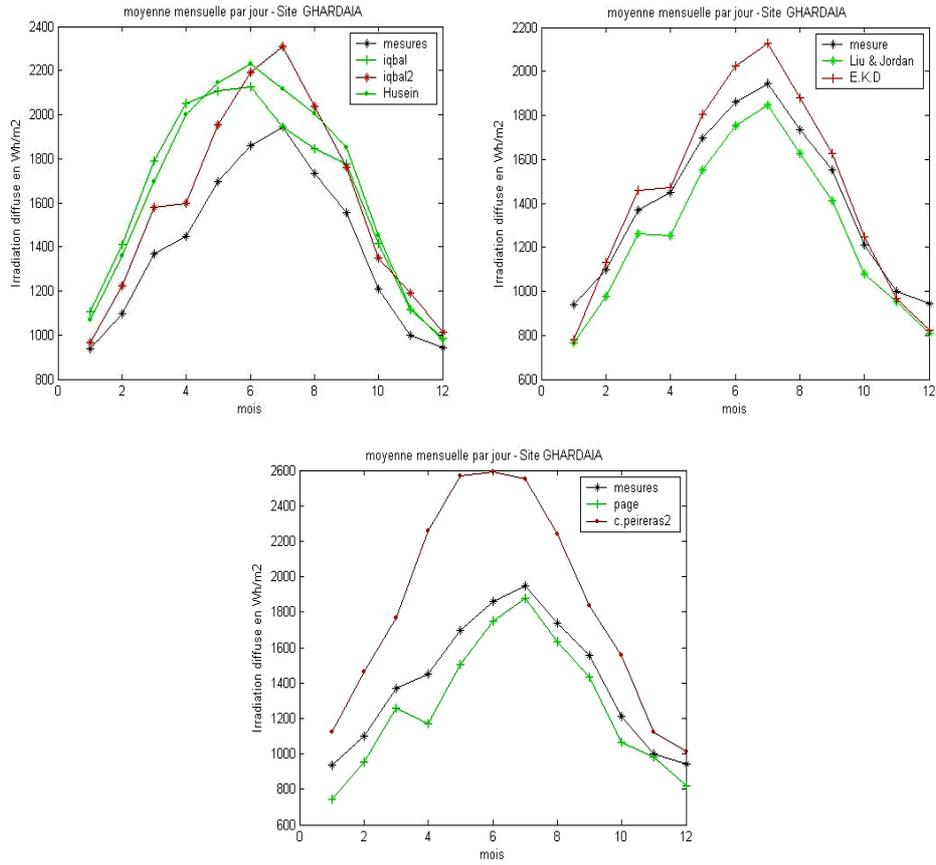
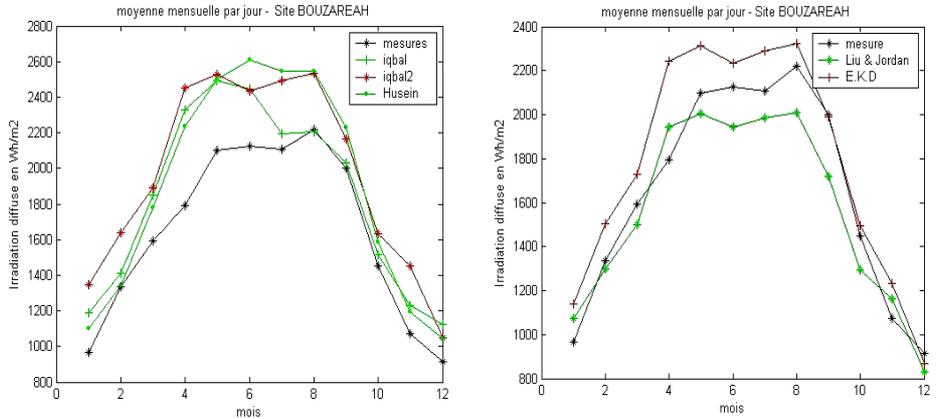


Fig. 7: Comparaison des différents modèles avec les valeurs mesurées – Ghardaïa (Diffuse)

5.2.3 Site de Bouzaréah



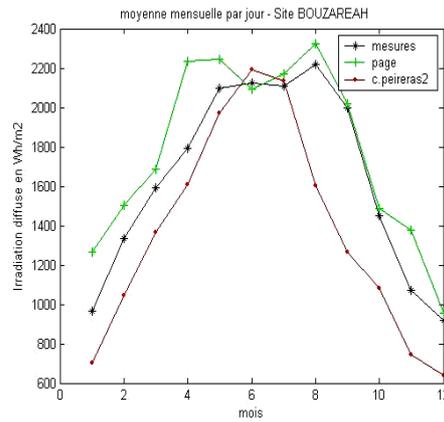


Fig. 8: Comparaison des différents modèles avec les valeurs mesurées – Bouzaréah (Diffuse)

Tableau 4: Valeur de l'erreur relative entre les valeurs estimées et mesurées de l'irradiation diffuse (%)

Modèle	Err (%)	Adrar	Ghardaïa	Bouzaréah
Iqbal 1	Err (%)	17.20	17.37	36.70
Hussain	Err (%)	14.61	17.68	08.98
Iqbal 2	Err (%)	16.40	17.63	13.08
Page	Err (%)	16.23	18.85	14.47
Collares-Pereira	Err (%)	20.51	13.42	21.33
Liu & Jordan	Err (%)	07.63	10.14	10.48
Erbs, Klein and Duffie	Err (%)	10.66	07.08	09.78

6. DISCUSSION DES RESULTATS

6.1 Irradiation globale

A partir des résultats obtenus, nous constatons que d'un site à un autre, certains modèles surestiment ou sous-estiment, alors que d'autres sont en bonne concordance avec les valeurs mesurées.

Cependant, le modèle de Sayigh sous-estime la composante globale pour les sites d'Adrar, Ghardaïa et Tamanrasset durant les mois de Février à Juillet, alors qu'il est en bonne concordance avec les valeurs mesurées pour la période restante de l'année. Pour le site de Bouzaréah, considéré comme un site côtier, les valeurs calculées par ce modèle sont nettement supérieures aux valeurs mesurées sur ce site.

Pour le modèle de Reddy *et al.*, suivant les courbes de distribution des valeurs mesurées et celles estimées, nous constatons que ce modèle surestime l'irradiation globale le long de l'année sur les sites d'Adrar, Ghardaïa, Tamanrasset et Batna, sauf que l'écart reste très réduit pour la période hivernale, ne dépassant pas les 13 %, alors que l'écart relatif reste notablement élevé et atteint les 120 % pour le mois de Juin pour le site d'Adrar. Par contre, comme le modèle de Sayigh, ce modèle sous-estime les valeurs de l'irradiation globale durant la période Avril-Août et surestime ces valeurs durant les périodes Janvier-Février et Novembre-Décembre pour le site de Bouzaréah.

Les deux modèles proposés par Shwartzman, conduisent à des résultats quasiment similaires, mais à leur tour, la composante globale est surestimée sur tous les mois de l'année sur le site

d'Adrar, Tamanrasset et Batna. Par contre, pour le site de Ghardaïa, à l'exception des mois d'Avril, Mai et Juin, les mêmes remarques restent valables. Concernant le site de Bouzaréah, ces modèles surestiment cette composante durant la période hivernale (Janvier à Mars et Octobre à Décembre) et la sous-estiment durant la période estivale (Avril à septembre).

De même, les deux relations proposées par Sabbagh *et al.* conduisent à des résultats similaires, mais en les comparant aux valeurs mesurées sur les sites d'Adrar, Ghardaïa, Tamanrasset et Batna, elles sous-estiment la quantité considérée pour la période s'étalant entre le mois de Février et le mois de Juin. Par contre, elles sont en bonne concordance avec les valeurs mesurées pour le reste des mois. Pour Bouzaréah, les mêmes observations évoquées pour les modèles de Shwartzman ont été faites.

Le modèle de Alnaser surestime la composante globale pour tous les sites considérés, sauf que les écarts restent relativement modérés pour les sites d'Adrar et de Ghardaïa, de l'ordre $\text{Err}(\%) = 17, 24$ pour les sites de Tamanrasset et de Batna et de 36 pour le site de Bouzaréah.

La reconstitution de l'irradiation globale par le modèle de Sambo conduit aux résultats suivants: nous remarquons que ce modèle sous-estime cette composante sur toute l'année pour les deux sites d'Adrar et de Ghardaïa. Pour le site de Bouzaréah, il sous-estime cette composante durant la période estivale (Avril-Septembre) et il est en bonne concordance avec les valeurs mesurées durant la période hivernale. Alors l'inverse a été observé pour les sites de Tamanrasset et de Batna, là où les valeurs estimées par le modèle sont proches des valeurs mesurées durant la saison estivale et surtout pour les mois de Juillet à Octobre, là où l'écart relatif est proche de 2 %.

Garg a proposé, quant à lui un modèle ne dépendant que de deux paramètres météorologiques, à savoir: l'humidité relative et la température ambiante. Dans ce travail, nous constatons que ce modèle est en très bonne concordance avec les valeurs réellement mesurées sur les sites d'Adrar et de Ghardaïa. Alors qu'il sous-estime ces valeurs avec un écart réduit variant entre 1 % pour mois de Juin à 15 % pour les mois d'Avril et Novembre.

Hussain donne de meilleurs résultats pour les différents sites considérés. Cette relation utilise comme paramètres d'entrées, la température, l'humidité relative, quelques paramètres astronomiques, comme la constante solaire, la distance terre soleil et la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation à l'extérieur de l'atmosphère.

Du point de vue écart relatif moyen $\text{Err}(\%)$ (Tableau 3), nous constatons que le modèle de Hussain conduit à des résultats meilleurs, dont l'erreur ne dépasse pas les 8.5 % pour tous les sites, suivis par le modèle de Garg dont l'écart ne dépasse pas les 11.5 %. Les autres modèles conduisent à des résultats qui dépendent des saisons et parfois des mois de l'année pour être en bonne concordance avec les valeurs mesurées.

6.2 Irradiation diffuse

A partir des résultats obtenus, nous constatons que les relations d'Iqbal surestiment relativement l'irradiation diffuse sur les sites d'Adrar et de Ghardaïa, alors que pour le site de Bouzaréah, le modèle 'Iqbal2' conduit aux mêmes résultats que pour le site d'Adrar et de Ghardaïa, alors que le modèle 'Iqbal1' surestime la composante diffuse pour les mois de Janvier, Mars, Avril, Mai et Juin, et qu'il est en bonne concordance avec les valeurs mesurées pour le reste des mois de l'année. Ce qui est dû à notre sens, par le fait que les deux modèles d'Iqbal ont été établis, moyennant des données mesurées sur des sites canadiens, caractérisés par des conditions climatiques très différentes de notre pays, particulièrement pour des sites situés au sud du pays. Dans ce pays, l'hiver est caractérisé par un climat très froid, par contre l'été est caractérisé par un climat très humide, dont l'évapotranspiration est très élevée durant cette période.

Pour le modèle de Hussain, nous constatons qu'il surestime la composante diffuse sur les trois sites considérés, en particulier sur le site d'Adrar dont l'écart atteint les 38 % pour les mois de Mai et Août. Ce qui est dû, à la différence climatique des deux pays et surtout à la quantité dans l'atmosphère, des facteurs intervenant à la diffusion du rayonnement, comme le trouble atmosphérique, qui se caractérise par la quantité de poussière dans l'atmosphère, où nous supposons qu'il est notablement plus important sur les sites indiens.

Par ailleurs, d'après les courbes de distribution des irradiances diffusées calculées par le modèle de Collares-Pereira et celles mesurées, nous constatons que ce modèle surestime cette composante sur les deux sites d'Adrar et de Ghardaïa, alors qu'il la sous-estime pour le site de Bouzaréah.

Les mêmes observations ont été faites pour le modèle de Erbs, Klein et Duffie, sauf que pour ce dernier, les écarts sont relativement nettement plus modérés.

Pour les modèles de Page établis moyennant les données relatives à plusieurs sites où la latitude est comprise entre 40°N et 40°S, et le modèle de Liu & Jordan, établis sur quelques sites américains, et d'après les diagrammes de distribution mesures - calculs, nous constatons que ces deux modèles conduisent respectivement à de meilleurs résultats pour les trois sites considérés.

Par ailleurs, du point de vue écart relatif maximal, nous constatons que ces deux derniers modèles conduisent à de meilleurs résultats. Ainsi, d'après le tableau 4, nous constatons que les écarts entre les valeurs mesurées et estimées respectivement par le modèle de Page reste relativement réduit et en moyenne comprise entre 8.63 % pour le site d'Adrar et 10.47 % pour le site de Bouzaréah et pour le modèle de Liu & Jordan, ceci reste en moyenne compris entre 7.68 % pour le site d'Adrar et 10.48 % pour le site de Bouzaréah. Le deuxième modèle de d'Iqbal 'Iqbal2', en matière de Err vient en troisième position. Le reste des modèles présentent des écarts moyens Err relativement notables surtout pour le modèle de Collares-Pereira & Rabl.

7. CONCLUSION

Ce travail nous a permis de confronter des valeurs mesurées et celles estimées par des différentes corrélations proposées dans la littérature et dont nous avons retenu dans ce travail. Ainsi, nous avons constaté d'une part que certains de ces modèles surestiment, d'autres sous-estiment les composantes globale et diffuse.

Par ailleurs, moyennant seulement les moyennes mensuelles par jour des principaux paramètres météorologiques dont la température sèche et l'humidité relative, les modèles de Hussain, de Garg *et al.* et ceux de Erbs, Klein et Duffie et de Liu & Jordan peuvent respectivement nous conduire avec une grande précision aux valeurs des moyennes mensuelles par jour des irradiances globales et diffuse.

D'autre part, nous pouvons affirmer que sur un site donné, l'utilisation directe d'un modèle proposé dans la littérature, peut conduire à des valeurs erronées pouvant influencer considérablement sur le dimensionnement des systèmes solaires, d'où le surdimensionnement ou le sous dimensionnement du système considéré. Ce qui est dû à notre sens que le choix du modèle dépend fortement des caractéristiques climatiques du site considéré par rapport à celles sur lequel on envisage son application.

Citant le cas des modèles de Reddy et de Swartman pour l'estimation de l'irradiation globale et les modèles de Collares-Pereira et celui d'Iqbal 1 pour l'estimation de l'irradiation diffuse.

Du point de vue application, bien que ces modèles aient été confrontés sur des sites appartenant aux différentes zones climatiques algériennes, nous considérons que les modèles de Hussain et celui de Garg, ainsi que les modèles de Erbs *et al.* et celui de Liu & Jordan ont donné une satisfaction suffisante pour qu'ils puissent être appliqués sur n'importe quel site algérien pour reconstituer respectivement la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale et également l'irradiation diffuse.

Remerciements - Nous tenons à remercier les responsables des Unités de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, d'Adrar et ceux du Centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzaréah, ainsi que le personnel qui s'occupe de la collecte et du traitement des données météorologiques et radio métriques sur ces sites, pour avoir mis à notre disposition les données, qui sont utilisées dans notre travail.

NOMENCLATURE

D_h	: Moyenne mensuelle par jour de l'irradiation diffuse
G_h	: Moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale
G_{h0}	: Irradiation extraterrestre calculée sur plan horizontal
DI	: Durée d'insolation
K_D	: Fraction de l'irradiation diffuse
K_T	: Indice de clarté
H_a	: Humidité absolue
HR	: Humidité relative
T_a	: Température ambiante
T_m	: Température moyenne
T_{max}	: Température maximale durant le mois considéré
T_{sol}	: Température du sol
t	: Nombre de jours pluvieux par mois
Ψ_{ij}	: Facteur climatique
ω_s	: Angle horaire du lever du soleil
ϕ	: Latitude du lieu
Val_{me}	: Valeur mesurée
Val_{es}	: Valeur estimée
Err	: Erreur relative

REFERENCES

- [1] M. Hussain, 'Estimation of Global and Diffuse Irradiation Form Sunshine Duration and Atmospheric Water', Vapor Content, Vol. 33, N°2, pp. 217 – 220, 1984.
- [2] H.P. Garg and S.N. Garg, 'Prediction of Global Solar Radiation from Bright Sunshine Hours and Other Meteorological Data', Energy Conversion and Management, Vol. 23, N°2, pp. 113 – 118, 1983.
- [3] A. Zeroual, M. Ankrim and A.J. Wilkinson, 'The Diffuse-Global Correlation: Its Application to Estimating Solar Radiation on Tilted Surface In Marrakesh, Morocco', Renewable Energy, Vol. 7, N°1, pp. 1 – 13, 1996.
- [4] C.P. Jacovides, L. Hadjoannou, S. Pashirdis and L. Stefannou, 'On the Diffuse Fraction of Daily and Monthly Global Radiation for the Island of Cyprus', Solar Energy, Vol. 56, N°6, pp. 565 – 572, 1996.
- [5] B.Y.H. Liu and R.C. Jordan, 'The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation', Solar Energy, Vol. 4, N°1, 1960.
- [6] A.A.M. Sayigh, Solar Energy Engineering, Academic Press, INC (London) LTD, 1977.
- [7] B. Boldbeg, W.H. Klein and R.D. Mc Cartney, 'A Comparison of Some Samples used to Predict Solar Irradiance on a Horizontal Surface', Solar Energy, Vol. 23, N°2, pp. 81 – 83, 1978.
- [8] S.J. Reddy, 'An Empirical Method for the Estimation of Total Solar Radiation', Solar Energy, Vol. 13, N°3, pp. 289 – 294, 1971.
- [9] J.A. Sabbagh, A.A.A.M. Sayigh and E.M.A. El Salam, 'Estimation of Total Solar Radiation from Meteorological Data', Solar Energy, Vol. 19, pp. 307 – 311, 1976.
- [10] A.S. Sambo, 'Empirical Models for the Correlation of Global Solar Radiation with Meteorological Data for the Northern Nigeria', Solar Energy, Vol. 3, N°2, pp. 89 – 93, 1986.

- [11] W.E. Alnaser, 'New Model to Estimate the Solar Global Irradiation using Astronomical and Meteorological Parameters', *Renewable Energy*, Vol. 3, N°2/3, pp. 175 – 177, 1993.
- [12] M. Collares-Pereira and A. Rabl, 'The Average Distribution of Solar Radiation Correlations between Diffuse an Hemispherical Ans between Daily and Hourly Insolation Values', *Solar Energy*, Vol. 22, pp. 155 – 164, 1978.
- [13] D.G. Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie, 'Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation', *Solar Energy*, Vol. 28, N°4, pp. 293 – 302, 1982.
- [14] M. Iqbal, 'Prediction of Hourly Diffuse Solar Radiation from Measured Hourly Radiation on Horizontal Surface', *Solar Energy*, Vol. 24, pp. 491 – 503,
- [15] C.C.Y. Ma and M. Iqbal, 'Statistical Comparison of Solar Radiation Correlations, Monthly Average Global and Diffuse Radiation on Horizontal Surfaces', *Solar Energy*, Vol. 33, N°2, pp. 143 – 148, 1984.