

Validation de quelques modèles de reconstitution des éclairagements dus au rayonnement solaire direct, diffus et global par ciel clair

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

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

² Département Electronique, Ecole Nationale Polytechnique,
10, Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger

(reçu le 29 Septembre 2006 - accepté le 20 Décembre 2006)

Résumé - Dans ce travail, nous avons élaboré une confrontation entre des valeurs mesurées sur deux sites algériens et des valeurs estimées par des modèles théoriques proposés dans la littérature par divers scientifiques et qui ont prouvé leur validité sur plusieurs sites dans le monde. Il s'agit d'une part des sites de Bouzaréah et de Ghardaïa comme sites sur lesquels on collecte continuellement des données météorologiques et radiométriques. D'autre part, parmi les modèles de reconstitution retenus, nous citons le modèle de Sasamori et al., le modèle de Bird and Hulstrom, le modèle de G.W. Padridge et al., et celui de Ashrae. Nous avons alors constaté que pour certains, il existe une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles estimées par certains modèles pour le site de Bouzaréah, alors qu'ils ne le sont pas avec les valeurs mesurées pour le site de Ghardaïa. L'inverse a été observé pour d'autres modèles. Alors que parmi ces modèles, pour les valeurs calculées par d'autres modèles, ils sont en bonne concordance avec les valeurs mesurées sur les deux sites considérés.

Abstract - In this work, we elaborated a confrontation between values measured in two Algerian sites and the estimated values by theoretical models proposed in the literature by different scientists and which proved their validity in several sites in the world. They involve on one hand the sites of Bouzaréah and Ghardaïa as sites on which one collects constantly meteorological and radio metrics data. On the other hand, among the models of reconstitution retained are those of Sasamori et al., Bird and Hulstrom, G.W. Padridge and al., and Ashrae. We then noticed that for certain models we have a good agreement between value measured and those estimated by certain models for the site of Bouzaréah while they are not with the value measured on Ghardaïa's site. The opposite was observed for the other models. Among these models, for the calculated values by other models, they correspond to the measured values for the considered two sites.

Mots clés: Eclaircement normal - Diffus - Global - Atténuation - Diffusion - Absorption - Trouble atmosphérique.

1. INTRODUCTION

La connaissance du potentiel énergétique solaire sur un site donné est un paramètre important pour les concepteurs des systèmes de conversion de l'énergie solaire. Par ailleurs, la précision de la conception et du dimensionnement de ces systèmes dépend fortement du pas de temps utilisé. Les moyennes mensuelles par jour peuvent être utilisées dans ce sens, mais elles conduisent souvent à un surdimensionnement, ou à un sous-dimensionnement ou à la non-maîtrise du comportement du système. Ainsi, il est préférable d'avoir recours à un pas de temps le plus petit que possible. Dans notre cas, le pas de temps proposé est celui de l'heure.

D'autre part, les stations de mesure des différentes composantes du rayonnement solaire sont rares ou quasi inexistantes à travers le territoire national. Alors que, généralement les différents paramètres météorologiques sont disponibles au niveau des stations de l'Office National de la Météorologie qui sont environ au nombre de 35 stations. Il suffit donc d'utiliser des modèles

* mustaphakoussa@hotmail.com

mathématiques qui permettent de reconstituer les différentes composantes du rayonnement solaire en fonction de ces paramètres. Aussi, après une recherche bibliographique, nous avons retenu quatre (04) modèles de reconstitution des différentes composantes du rayonnement solaire et qui utilisent comme paramètres d'entrée, les paramètres météorologiques les plus usuels à savoir, la température sèche, l'humidité relative et la pression atmosphérique. Il est à noter que ces modèles ne sont utilisés que dans certains cas particuliers et qui correspondent à un état de ciel clair.

En effet, suivant leur dépendance du nombre de paramètres météorologiques caractérisant les coefficients d'atténuation du rayonnement solaire, ces modèles peuvent être plus ou moins précis dans la reconstitution des différentes composantes. Dans cette étude, nous présentons ci-dessous les quatre (04) modèles, et nous confronterons chacun d'eux avec les valeurs réellement mesurées sur deux sites algériens. Les modèles retenus sont: le modèle de T. Sasamori *et al.* [1], le modèle de Bird and Hulstrom [2-3], le modèle de G.W. Padridge *et al.* [4] et celui de Ashrae [5]. Dans le texte, ces modèles sont désignés respectivement modèle 1, 2, 3 et Ashrae.

Une présentation de ces divers modèles est effectuée dans ce qui suit, ainsi que les résultats de la confrontation des valeurs mesurées et celles estimées par les différents modèles. Les principaux résultats obtenus de ce travail sont discutés et commentés.

2. DESCRIPTION DES MODELES UTILISES

Les modèles présentés ci-dessous sont des modèles basés sur les divers coefficients d'atténuation du rayonnement solaire par les éléments constituant l'atmosphère.

2.1 Modèle 1

2.1.1 Calcul de l'éclairement dû au rayonnement direct

La relation proposée pour la reconstitution de l'éclairement dû au rayonnement direct a été proposée par Padridge et Platt [4]:

$$I_{nl} = I_{sc} (\tau_o \tau_r - \alpha_w) \tau_a \quad (1)$$

où α_w est le coefficient d'absorption de l'éclairement dû au rayonnement direct par la vapeur d'eau et il est donné par la relation suivante:

$$\alpha_w = 1 - \tau_w \quad (2.a)$$

$$\alpha_w = \frac{2.9 U1}{(1 + 141.5 U1)^{.635} + 5.925 U1} \quad (2.b)$$

U1 est l'épaisseur d'eau condensable corrigée par trajet optique du rayonnement à travers cette couche, il est donné par la relation suivante:

$$U1 = \omega . m_r \quad (2.c)$$

avec ω et m_r sont respectivement la hauteur d'eau condensable et le trajet optique relatif, et sont données respectivement en Annexes 1 et 2.

τ_o est le coefficient de transmission après absorption par l'ozone:

$$\tau_o = 1 - \alpha_o \quad (3.a)$$

α_o est le coefficient d'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone, il est calculé par le modèle proposé par Lacis et Hansen [6] et qui est donné par la relation suivante:

$$\alpha_o = \frac{0.02118 U_3}{1 + 0.042 U_3 + 3.23 \cdot 10^{-4} U_3^2} + \frac{1.082 U_3}{(1 + 138.6 U_3)^{0.805}} + \frac{0.658 U_3}{1 + (130.6 U_3)^3} \quad (3.b)$$

U_3 est le trajet optique parcouru par le rayonnement solaire à travers la couche d'ozone.

$$U_3 = 1.m_r \quad (3.c)$$

l est l'épaisseur verticale de la couche d'ozone (en cm NTP (Normal Temperature and surface Pressure)) caractérisée, selon K. Thomas and Van Heuklon [7-8], et donnée en Annexe 3.

τ_r est le coefficient de transmission après diffusion moléculaire ou de Rayleigh. Davies *et al.*, [9] ont repris ces dits et présenté la relation suivante:

$$\tau_r = 0.972 - 0.08262 . m_a + 0.00933 . m_a^2 - 0.00095 . m_a^3 + 0.000437 . m_a^4 \quad (4)$$

avec m_a étant la masse d'air corrigée par la pression. La relation exprimant ce paramètre est donnée en Annexe 1.

τ_a est le coefficient de transmission après diffusion par les aérosols qui est proposé par Mächler [10] et donné par la relation suivante:

$$\tau_a = (0.12445 . \alpha - 0.0162) + (1.003 - 0.125 . \alpha) . \exp[-\beta . m_a (1.089 . \alpha + 0.5123)] \quad (5)$$

Avec α et β qui sont respectivement le paramètre caractérisant la visibilité du ciel et le coefficient de trouble d'Angström.

2.1.2 Calcul de l'éclairement dû au rayonnement diffus

L'éclairement dû au rayonnement diffus sur une surface horizontale est calculé à partir de la relation suivante:

$$I_{dl} = I_{dr1} + I_{da1} + I_{dm1} \quad (6.a)$$

avec I_{dr} l'éclairement dû au rayonnement diffusé par les différentes molécules d'air. Cette composante est calculée par la relation suivante:

$$I_{dr1} = I_{sc} \cos \theta_z \tau_0 [0.5(1 - \tau_r)] \tau_a \quad (6.b)$$

θ_z étant la distance zénithale.

I_{da} est l'éclairement dû au rayonnement diffusé par les aérosols:

$$I_{da1} = I_{sc} \cos \theta_z (\tau_0 \tau_r - \alpha_w) [F_c \omega_o (1 - \tau_a)] \quad (6.c)$$

avec ω_o qui est l'albédo de dispersion de l'atmosphère. On suppose généralement que, pour les régions urbaines/industrielles ω_o vaut 0.6, et il vaut 0.9 pour les régions rurales/agricoles; et F_c le coefficient de dispersion de l'atmosphère. Des valeurs de ce facteur ont été établies en fonction de l'angle d'incidence, d'après Robinson [11]:

Tableau 1: Valeurs du facteur F_c en fonction de la distance zénithale

θ_z	0	10	20	30	40	50	60	70	80	85
F_c	0.92	0.92	0.90	0.90	0.90	0.85	0.78	0.68	0.60	0.50

I_{dm} est l'éclairement dû au rayonnement diffusé par multi réflexions terre-atmosphère.

$$I_{dm1} = (I_n \cos \theta_z + I_{dr} + I_{da}) \rho_g \rho'_a / (1 - \rho_g \rho'_a) \quad (6.d)$$

avec ρ_g l'albédo du sol et ρ'_a l'albédo de l'atmosphère clair du site considéré, donnée par comme suit:

$$\rho'_a = 0.0685 + 0.17(1 - \tau'_a) \omega_o \quad (6.e)$$

τ_a' correspond au coefficient de transmission du rayonnement solaire après diffusion par les aérosols pour une valeur de masse d'air $= 1.66P / P_0$.

$$m_a = 1.66 \times (P / P_0) \quad (6.f)$$

avec P et P_0 sont respectivement la pression atmosphérique du site considéré et celle correspondante au niveau de la mer (1013 mb).

2.1.3 Eclairage dû au rayonnement global

Dans ce modèle, l'éclairage dû au rayonnement global est calculé par la relation suivante:

$$I_{gl} = I_{nl} \cos(\theta_z) + I_{dl} \quad (7)$$

2.2 Modèle 2

2.2.1 Calcul de l'éclairage dû au rayonnement direct

Ce modèle a été proposé par [1] et [11], les formulations de calcul de l'éclairage dû au rayonnement direct sur un plan normal sont données comme suit:

$$I_{n2} = I_{sc} \left(1 - \sum_{i=1}^4 \alpha_i \right) \tau_r \tau_{as} \quad (8)$$

avec $\alpha_1 = \alpha_w$, le coefficient d'absorption de l'éclairage dû au rayonnement direct par la vapeur d'eau proposée par Iqbal [12]:

$$\alpha_w = 0.11 \left(U1 + 6.31 \cdot 10^{-4} \right)^{0.3} - 0.0121 \quad (9)$$

$$U1 = \omega \cdot m_{\omega}$$

m_{ω} étant définie par l'équation A2 (Annexe2).

$\alpha_2 = \alpha_g$ est le coefficient d'absorption de l'éclairage dû au rayonnement direct par le mélange des gaz constituant l'atmosphère proposé par Iqbal [12]:

$$\alpha_g = 0.00235 \left(126 m_a + 0.0129 m_a \right)^{0.26} - 7.5 \cdot 10^{-4} + 7.5 \cdot 10^{-3} m_a^{0.875} \quad (10)$$

Dans cette équation, les deux premiers termes sont liés à l'absorption par le gaz carbonique et le troisième terme est lié à l'absorption par l'oxygène.

$\alpha_3 = \alpha_o$ est le coefficient d'absorption de l'éclairage dû au rayonnement direct par l'ozone, dont la relation est proposée par Manabe et Stricker [13]:

$$\alpha_o = 0.045 \left(U_3 + 8.34 \cdot 10^{-4} \right)^{0.38} - 3.110 \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

$$U_3 = 1 \cdot m_r$$

m_r et 1 sont calculés par les équations A1.2 et A3 (Annexes 1 et 3).

$\alpha_4 = \alpha_a$ est le coefficient d'absorption de l'éclairage dû au rayonnement direct par les aérosols, donné par la relation suivante:

$$\alpha_a = (1 - \omega_o) [g(\beta)]^{m_a} \quad (12.a)$$

$$g(\beta) = -0.914 + 1.909267 \exp(-0.667023\beta) \quad (12.b)$$

ω_0 est le coefficient de réflexion unitaire relatif à la diffusion par les aérosols. Dans ce modèle, une valeur de $\omega_0 = 0.95$ a été recommandée. Il est à noter que cette expression n'est valable que pour les valeurs de $0 < \beta < 0.5$ avec β étant le coefficient de trouble d'Angström.

τ_{as} est le coefficient de transmission de l'éclairement dû au rayonnement direct après diffusion par les aérosols, il est calculé par la relation suivante:

$$\tau_{as} = [g(\beta)]^{m_a} \quad (12.c)$$

2.2.2 Eclairement dû au rayonnement diffus

De même dans ce modèle, l'éclairement dû au rayonnement diffus sur une surface horizontale est calculé à partir de la relation suivante:

$$I_{d2} = I_{dr2} + I_{da2} + I_{dm2} \quad (13)$$

Le premier terme représente l'éclairement du rayonnement solaire après diffusion de Rayleigh durant le premier passage du rayonnement à travers l'atmosphère. Cette quantité est exprimée par la relation suivante:

$$I_{dr2} = I_{sc} \cos \theta_z \left(1 - \sum_{i=1}^4 \alpha_i \right) [0.5 (1 - \tau_r)] \quad (14.a)$$

La quantité originare de la diffusion par les aérosols après le premier passage du rayonnement solaire est donnée par la relation suivante:

$$I_{da2} = I_{sc} \cos \theta_z \left(1 - \sum_{i=1}^4 \alpha_i \right) [0.75 (1 - \tau_{as})] \quad (14.b)$$

Dans ce modèle, l'éclairement diffus dû aux multi réflexions sol - atmosphère est quantifié par la relation suivante:

$$I_{dm2} = \rho_u Q \left(1 - \sum_{i=1}^4 \alpha'_i \right) [0.5(1 - \tau'_r) - 0.25(1 - \tau'_{as})] \quad (14.c)$$

avec α'_i , τ'_{as} et τ'_r correspondent aux différents coefficients d'absorption, de transmission après diffusion et absorption par les aérosols, qui sont calculés en fonction de la masse d'air donnée par la relation (6.f).

$$Q = I_{n2} \cos \theta_z + I_{dr} + I_{da} \quad (14.d)$$

2.2.3 Eclairement dû au rayonnement global

Ainsi, l'éclairement dû au rayonnement global est la somme de l'éclairement dû au rayonnement direct projeté sur un plan horizontal et l'éclairement dû au rayonnement diffus total:

$$I_{g2} = I_{n2} \cos(\theta_z) + I_{d2} \quad (15)$$

2.3 Modèle 3

2.3.1 Eclairement dû au rayonnement direct

Dans ce modèle, le direct normal est donné par:

$$I_{n3} = 0.975 \cdot I_{sc} \cdot \tau_r \cdot \tau_o \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_a \quad (16)$$

où τ_r est le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire de Rayleigh; τ_g : Coefficient de transmission après la diffusion par les gaz uniforme; τ_o : Coefficient de

transmission après absorption par l'ozone; τ_w : Coefficient de transmission après absorption par la vapeur d'eau; τ_a : Coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols.

Et I_{h3} est l'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal tel que:

$$I_{h3} = I_{n3} \cdot \cos\theta_z \quad (17)$$

2.3.1.1 Absorption par l'ozone

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

$$\tau_o = 1 - \alpha_o \quad (18)$$

où α_o est le coefficient d'absorption par la couche d'ozone, sa quantification peut être effectuée par la relation suivante:

$$\alpha_o = 0.1611 U_3 (1.0 + 139.48 U_3)^{-0.3035} - 0.002715 U_3 (1 + 0.044 U_3 + 0.0003 U_3^2)^{-1} \quad (19)$$

2.3.1.2 Absorption par la vapeur d'eau

Le coefficient de transmission après absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau est donné comme suit:

$$\tau_w = 1 - 2.4959 U_1 [(1 + 79.034 U_1)^{0.6828} + 6.385 U_1]^{-1} \quad (20)$$

Nous donnons ci après les différentes équations des coefficients de transmissions.

2.3.1.3 Absorption par les gaz

Dans ce modèle, le coefficient de transmission après absorption par les gaz est donné par l'expression suivante:

$$\tau_g = \exp(-0.0127 m_a^{0.26}) \quad (21)$$

2.3.1.4 Diffusion de Rayleigh

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

$$\tau_r = \exp[-0.0903 \cdot m_a^{0.84} \cdot (1.0 + m_a - m_a^{1.01})] \quad (22)$$

2.3.1.5 Diffusion par les aérosols

Dans ce modèle, le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols concerne uniquement les deux longueurs d'onde ($\lambda = 0.38 \mu\text{m}$ et $\lambda = 0.50 \mu\text{m}$). C'est les longueurs d'ondes où il existe un minimum d'absorption par l'ozone. Il est donné par:

$$\tau_a = \exp[-k_a^{0.873} \cdot m_a^{0.9108} \cdot (1.0 + k_a - k_a^{0.7088})] \quad (23)$$

où

$$k_a = 0.2758 \cdot k_{a\lambda|\lambda=0.38\mu\text{m}} + 0.35 \cdot k_{a\lambda|\lambda=0.8\mu\text{m}}$$

2.3.2 Eclairement dû au rayonnement diffus

La procédure d'estimation de l'éclairement dû au rayonnement diffus est similaire à celle proposée dans le modèle 1.

$$I_{d3} = I_{da3} + I_{dr3} + I_{dm3} \quad (24.a)$$

où

I_{dr} est l'irradiation diffuse provenant de la diffusion de Rayleigh;

I_{da} est l'irradiation diffuse provenant de la diffusion par les aérosols;

I_{dm} est l'irradiation diffuse issue du phénomène de multi réflexion terre- atmosphère.

Les éclairagements dus au rayonnement diffus après diffusion par les aérosols, par les molécules d'air et la multi réflexion sont donnés par les relations ci-après.

2.3.2.1 Eclairage du au rayonnement diffus par les aérosols

$$I_{da3} = 0.79 I_{sc} \cos \theta_z \tau_0 \tau_g \tau_w \tau_{aa} F_c (1 - \tau_{as}) / (1 - m_a + m_a^{1.02}) \quad (24.b)$$

2.3.2.2 Eclairage dû au rayonnement solaire après diffusion moléculaire

$$I_{dr3} = 0.79 I_{sc} \cos \theta_z \tau_0 \tau_g \tau_w \tau_{aa} 0.5(1 - \tau_r) / (1 - m_a + m_a^{1.02}) \quad (24.c)$$

avec τ_{aa} et τ_{as} sont respectivement les coefficients de transmission après absorption et diffusion du rayonnement solaire par les aérosols.

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_0) (1 - m_a + m_a^{1.06}) (1 - \tau_a) \quad (24.d)$$

Bird et Hulstrom ont recommandé une valeur de 0.9 pour ω_0 .

Et dans ce modèle, τ_{as} , le coefficient de transmission du rayonnement solaire après diffusion par les aérosols est calculé par la relation suivante:

$$\tau_{as} = \frac{\tau_a}{\tau_{aa}}$$

2.3.2.3 Eclairage issu du phénomène de multi réflexion terre atmosphère

L'irradiation diffuse issue du phénomène de multi réflexion est donnée par l'expression suivante:

$$I_{dm3} = (I_{h3} + I_{dr3} + I_{da3}) \cdot \rho_g \cdot \rho'_a / (1 - \rho_g \cdot \rho'_a) \quad (24.e)$$

Où I_{h3} est l'éclairage dû au rayonnement direct sur un plan horizontal; ρ_g est l'albédo terrestre; et ρ'_a est l'albédo du ciel clair donné par:

$$\rho'_a = 0.0685 + (1 - F_c) \cdot (1 - \tau_{as}) \quad (24.f)$$

2.3.3 Eclairage dû au rayonnement global

Ainsi, pour les trois modèles, l'éclairage dû au rayonnement global sur un plan horizontal est calculé comme suit:

$$I_{g3} = I_{h3} + I_{d3} \quad (25)$$

I_{h3} est l'éclairage dû au rayonnement direct calculé sur un plan horizontal, et I_{d3} comme étant la somme des éclairagements dû au rayonnement diffusé par les aérosols, les molécules d'air et le phénomène de multi réflexions.

2.4 Modèle Ashrae

Le modèle de Ashrae [17] pour un ciel clair dans sa version proposée par G.L. Powell [18], a été utilisé par S. Barbaros [5] pour tester sa validité sur le site de Palerme. Ainsi, l'auteur a relevé le constat que les valeurs calculées par ce modèle sont relativement supérieures à celles mesurées sur le site considéré. Pour que ce modèle soit appliqué sur les sites du bassin méditerranéen en particulier Palerme et Gênes, il proposa alors une nouvelle corrélation relative au coefficient d'atténuation du rayonnement solaire.

Ce modèle est donné par la relation suivante:

$$I_{gh} = I_n * (\cos(\theta_z) + C) \quad (26.a)$$

θ_z est la distance zénithale; C est le facteur de diffusion de l'atmosphère et I_n étant l'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan normal.

$$I_n = A \exp(-B \cdot M \cdot r) \quad (26.b)$$

avec:

A : la constante solaire apparente à l'extérieur de l'atmosphère

$$A = I_{sc} \text{ Cdts} \quad (26.c)$$

I_{sc} étant la constante solaire prise égale à 1367 W/m²

Cdts est la correction du à la variation distance terre - soleil calculée par la relation A4.

M est le trajet optique du rayonnement solaire, dans ce modèle il est calculé par l'expression suivante:

$$M = \frac{35}{\left[1224 \cos(\theta_z)^2 + 1\right]^{0.5}} \quad (27)$$

r est le facteur de correction d'altitude, donné par:

$$r = \left[1 - \frac{h}{44308}\right]^{5.257} \quad (28)$$

Avec h étant l'élévation du site considéré en mètre.

Dans le modèle original, les coefficients respectifs d'extinction et de diffusion sont donnés respectivement comme suit:

$$B_a = -1.9925 \cdot 10^{-15} N^6 + 2.22076 \cdot 10^{-12} N^5 - 8.33643 \cdot 10^{-10} N^4 + 1.07543 \cdot 10^{-7} N^3 - 4.6 \cdot 10^{-7} N^2 - 131.45 \cdot 10^{-6} N + .14323 \quad (29.a)$$

$$C_a = -5.19886 \cdot 10^{-15} N^6 + 5.7539 \cdot 10^{-12} N^5 - 2.2713 \cdot 10^{-10} N^4 + 3.70022 \cdot 10^{-7} N^3 - 2.1351 \cdot 10^{-5} N^2 - 0.000511 \cdot N + 0.05363 \quad (29.b)$$

Par ailleurs, Barbaros *et al.* ont proposé une nouvelle relation pour le calcul du coefficient d'atténuation du rayonnement solaire pour que le modèle de Ashrae peut être applicable sur les sites du bassin méditerranéens, cette corrélation est donnée comme suit:

$$B_b = -2.8616 \cdot 10^{-15} N^6 + 3.34233 \cdot 10^{-12} N^5 - 1.31784 \cdot 10^{-10} N^4 + 1.8162 \cdot 10^{-7} N^3 - 1.51758 \cdot 10^{-6} N^2 - 3.45545 \cdot 10^{-4} N + .17028 \quad (29.c)$$

3. DONNEES UTILISEES

Les données utilisées dans ce travail sont relatives à deux sites algériens, Bouzaréah et Ghardaïa. Ainsi, les caractéristiques géographiques de ces sites sont données sur le tableau suivant:

Tableau 2: Coordonnées des sites utilisés

Site	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Bouzaréah	36.8	3.08	345
Ghardaïa	32.4	3.80 E	468.4

Il est à noter alors que 5 minutes et 60 minutes sont respectivement les pas de temps de mesure des paramètres météorologiques et radio métriques sur les sites choisis. Ainsi pour chacun des sites, nous avons choisi quatre journées claires sur toute l'année. Ainsi, nous avons essayé de trouver pour chacune des saisons, une journée correspondante (**Tableau 3**).

Tableau 3: Journées claires sélectionnées pour les deux sites

Bouzaréah		Ghardaïa	
Hiver:	19 Novembre 1988	Hiver:	06 Janvier 2005
Printemps:	30 mars 1988	Printemps:	13 Mars 2005
Eté:	17 Juillet-1988	Eté:	06 Août 2005
Automne:	22 Octobre 1988	Automne:	31 Septembre 2005

4. METHODES DE COMPARAISON

Pour la comparaison des valeurs mesurées et celles estimées, nous avons dressé pour chacun des modèles un programme en Matlab. A partir de chacun de ces programmes, pour chacun des sites et pour chaque journée considérée, nous avons d'une part dressé sur un même diagramme, 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:

$$\text{Err} = \text{Abs} \left(\frac{\text{Val}_{\text{me}} - \text{Val}_{\text{es}}}{\text{Val}_{\text{me}}} \right) \times 100 \quad (30)$$

5. RESULTATS

Nous donnons, sur le tableau suivant, la numérotation des figures représentatives de la comparaison mesures - calculs pour chacun des modèles étudiés, pour chacune des composantes du rayonnement solaire et les deux sites choisis.

Tableau 4: Liste des figures de comparaison mesure – calculs

Bouzaréah	Ghardaïa
Rayonnement Direct: Fig. 1 à Fig. 4	Rayonnement Direct: Fig. 5 à Fig. 8
Rayonnement Diffus: Fig. 9 à Fig. 12	Rayonnement Diffus: Fig. 13 à Fig. 16
Rayonnement Global: Fig. 17 à Fig. 20	Rayonnement Global: Fig. 21 à Fig. 24

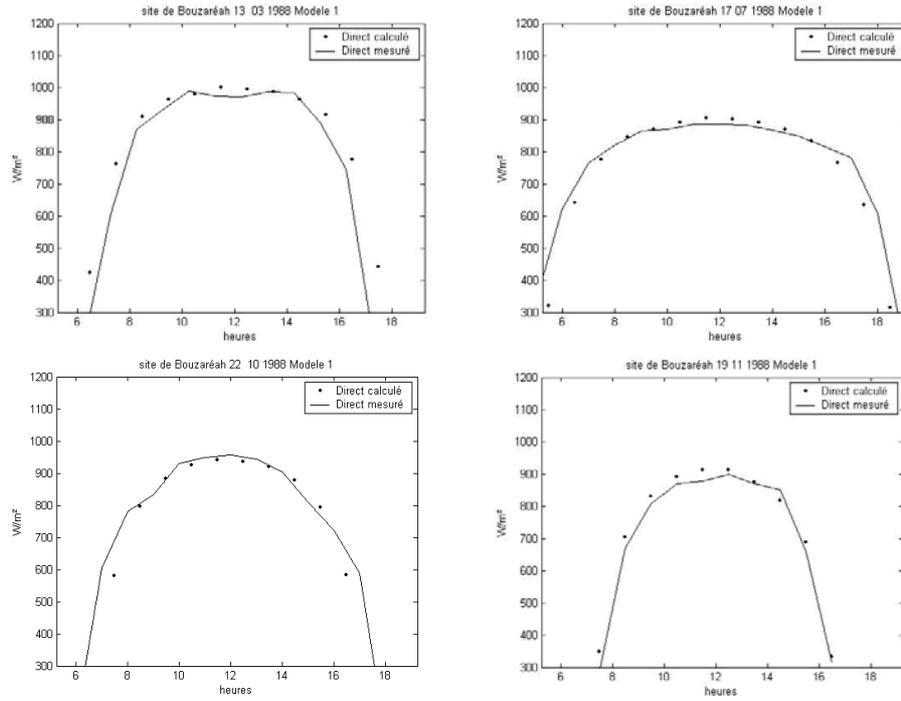


Fig. 1: Comparaison du modèle 1 avec les valeurs mesurées – Site: Bouzaréah (Direct)

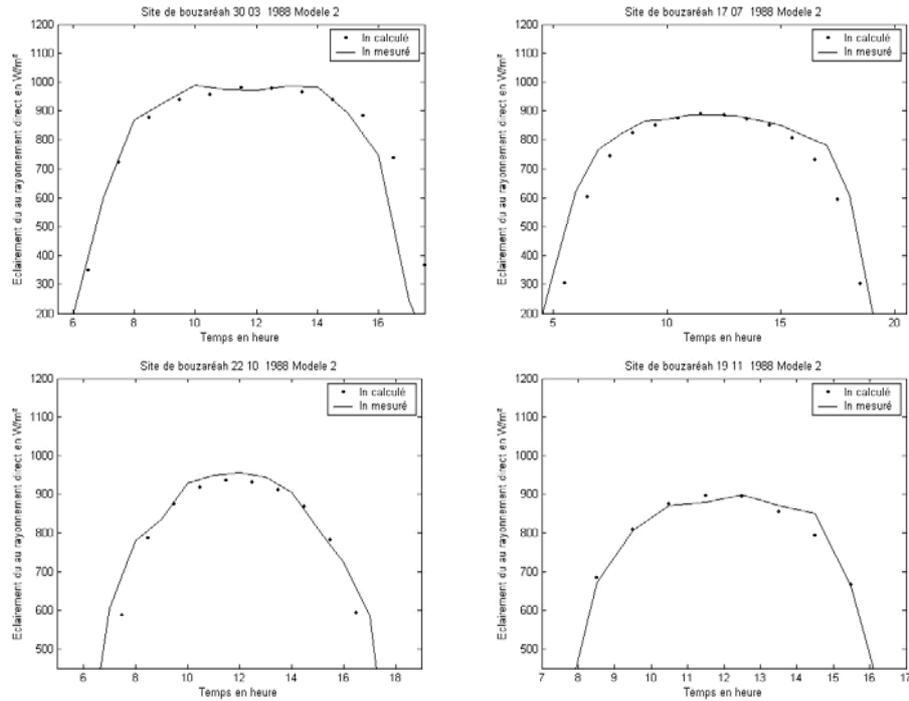


Fig. 2: Comparaison du modèle 2 avec les valeurs mesurées – Site: Bouzaréah (Direct)

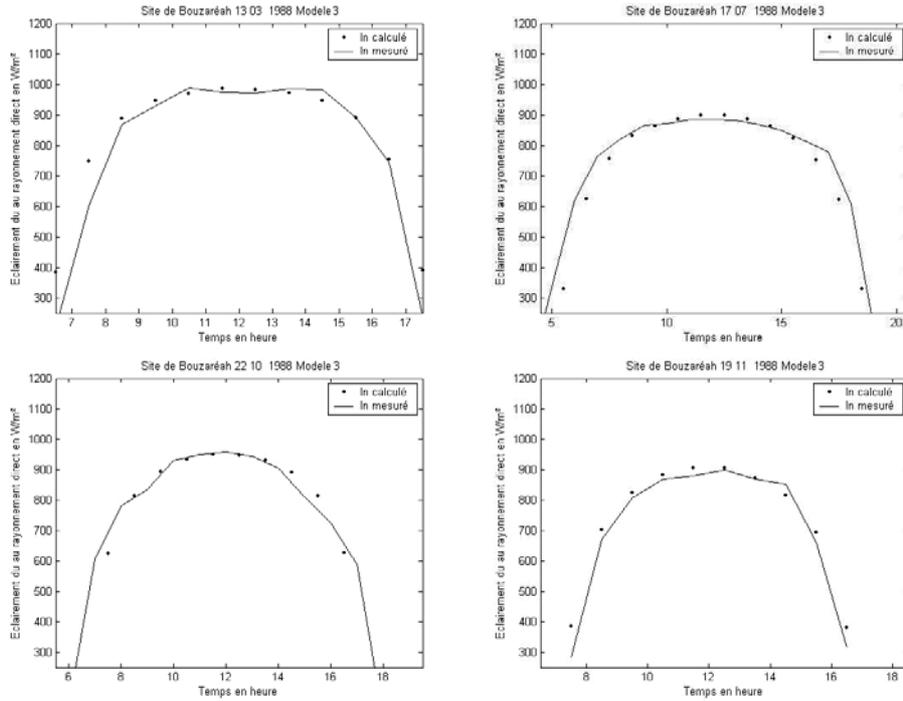


Fig. 3: Comparaison du modèle 3 avec les valeurs mesurées – Site: Bouzaréah (Direct)

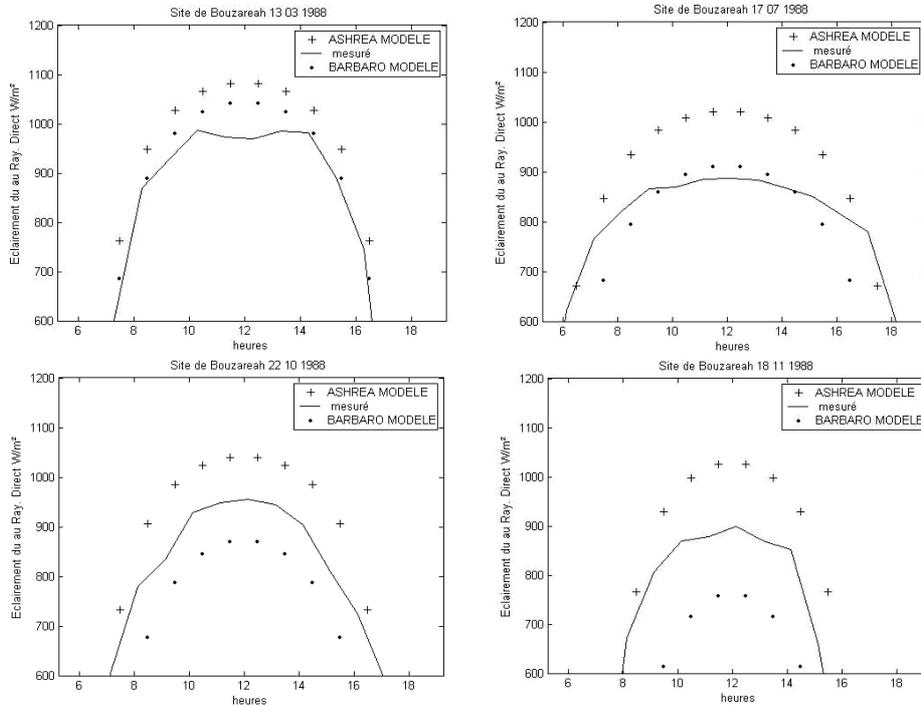


Fig. 4: Comparaison du modèle Ashrae et Barbaros avec les valeurs mesurées Site: Bouzaréah (Direct)

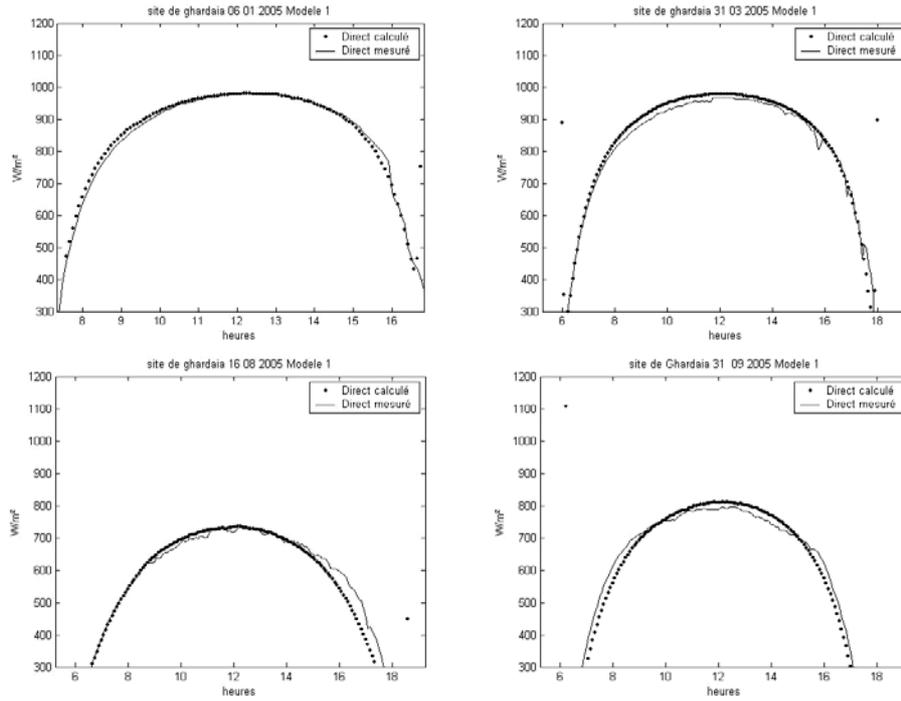


Fig. 5: Comparaison du modèle 1 avec les valeurs mesurées – Site: Ghardaïa (Direct)

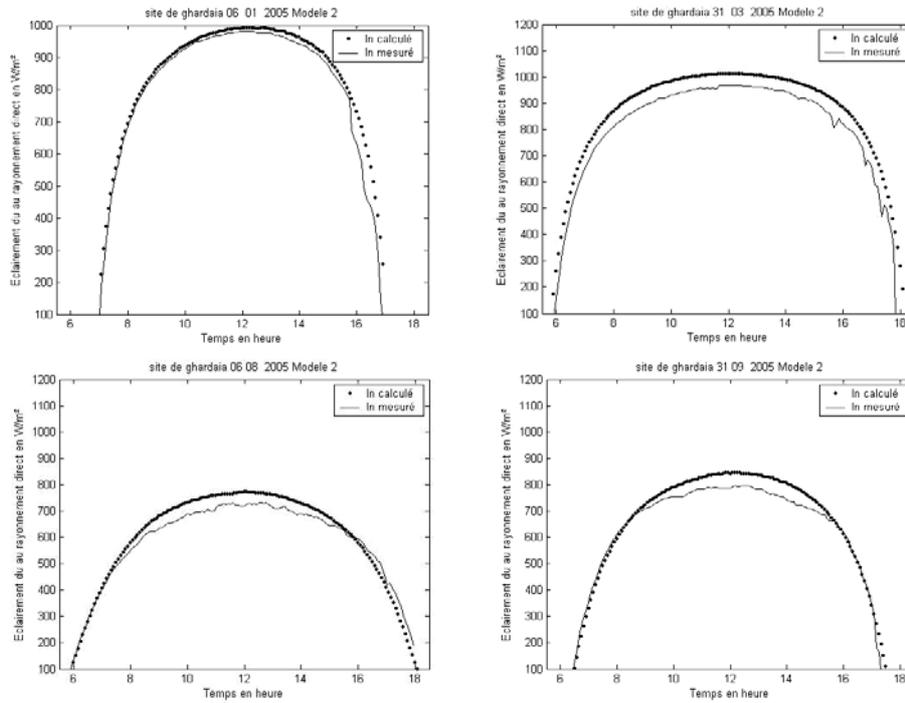


Fig. 6: Comparaison du modèle 2 avec les valeurs mesurées – Site: Ghardaïa (Direct)

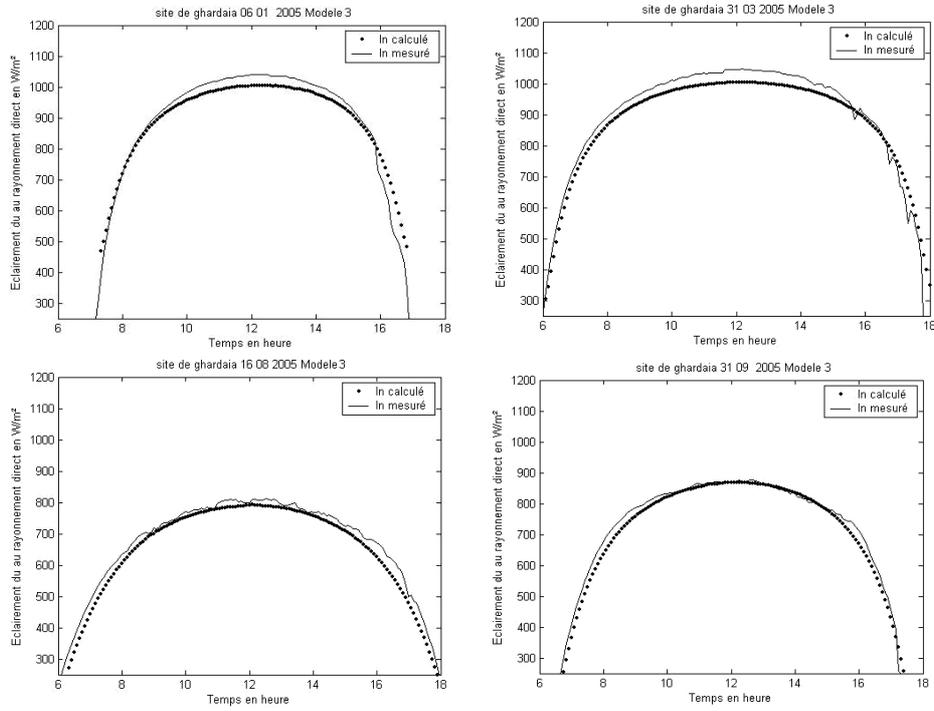


Fig. 7: Comparaison du modèle 3 avec les valeurs mesurées – Site: Ghardaïa (Direct)

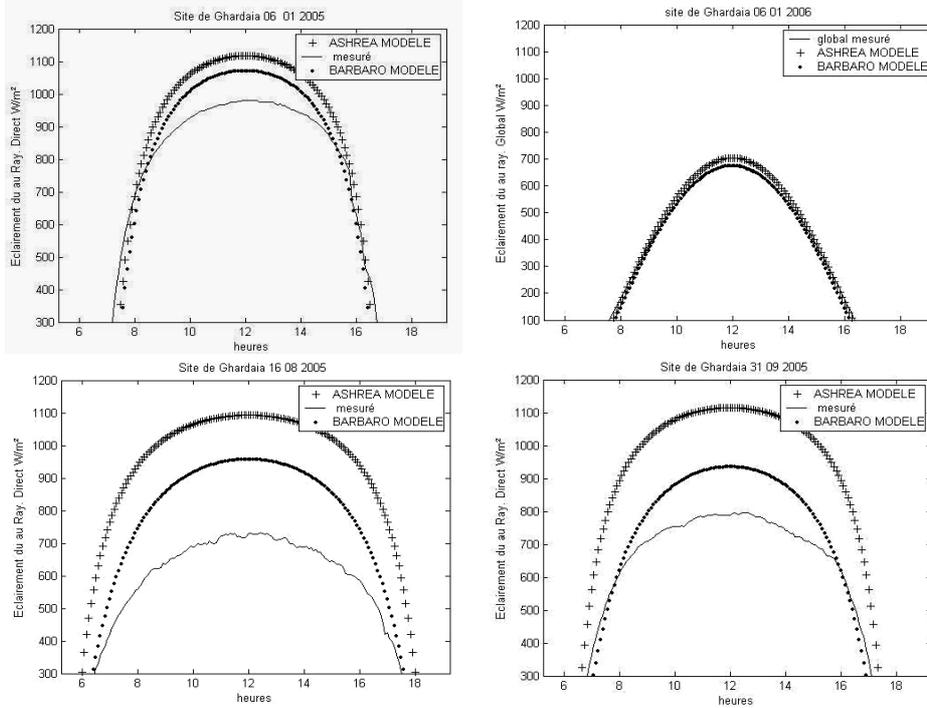


Fig. 8: Comparaison du modèle Ashrae et Barbaros avec les valeurs mesurées Site: Ghardaïa (Direct)

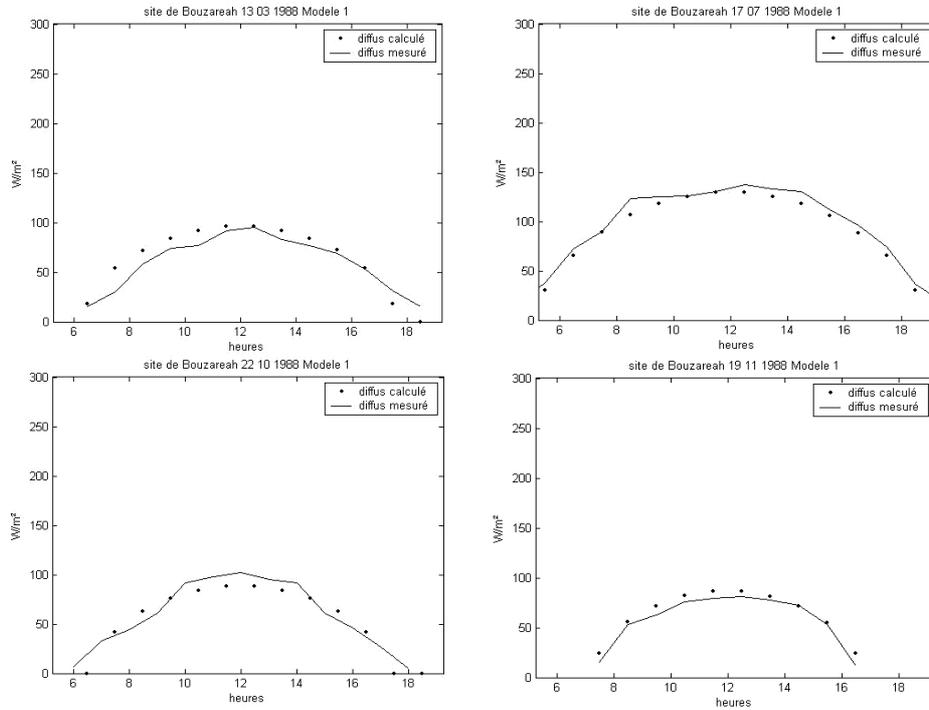


Fig. 9: Comparaison du modèle 1 avec les valeurs mesurées – Site: Bouzaréah (Diffus)

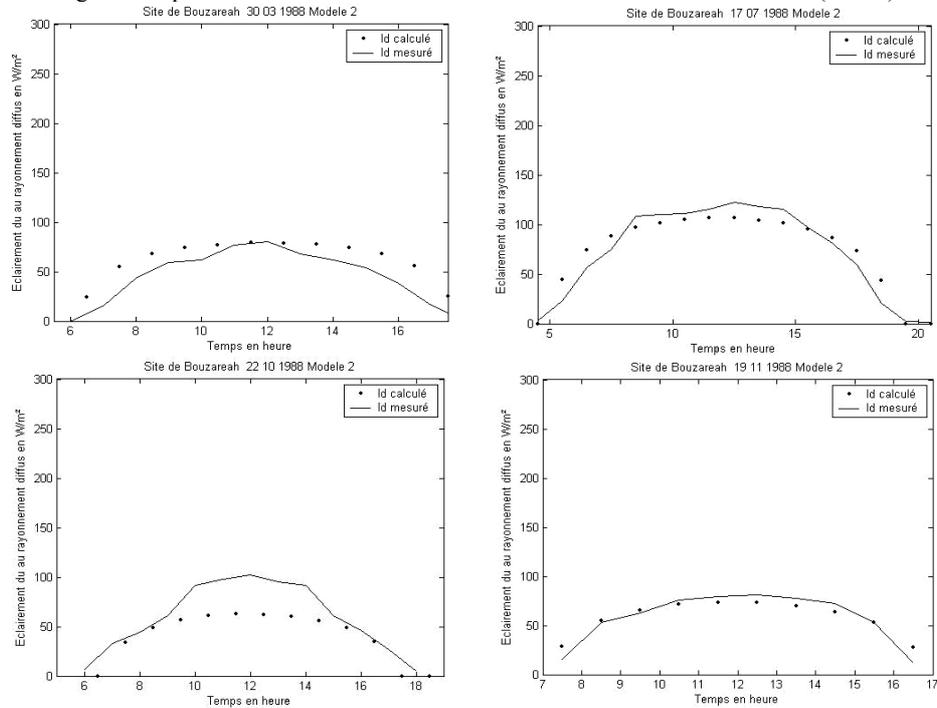


Fig. 10: Comparaison du modèle 2 avec les valeurs mesurées
Site: Bouzaréah (Diffus)

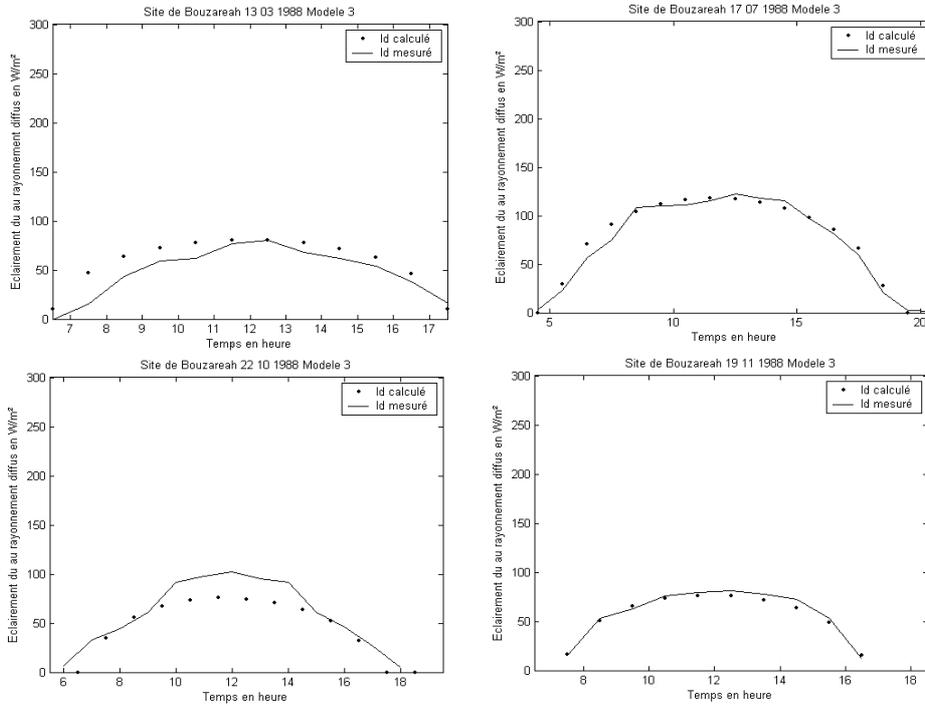


Fig. 11: Comparaison du modèle 3 avec les valeurs mesurées – Site: Bouzaréah (Diffus)

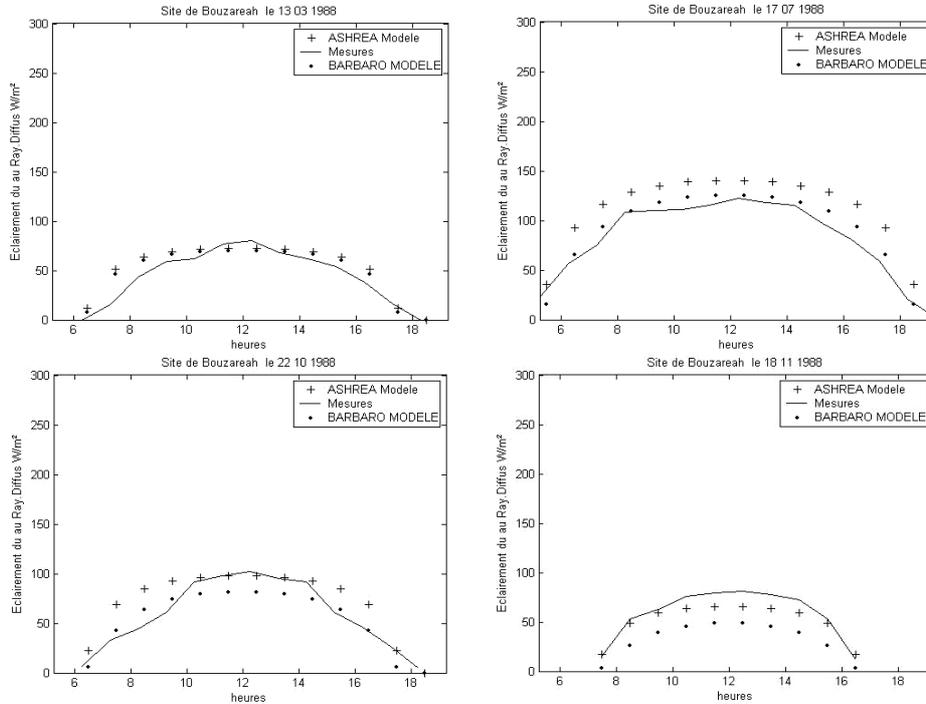


Fig. 12: Comparaison du modèle Ashrae et Barbaros avec les valeurs mesurées Site: Bouzaréah (Diffus)

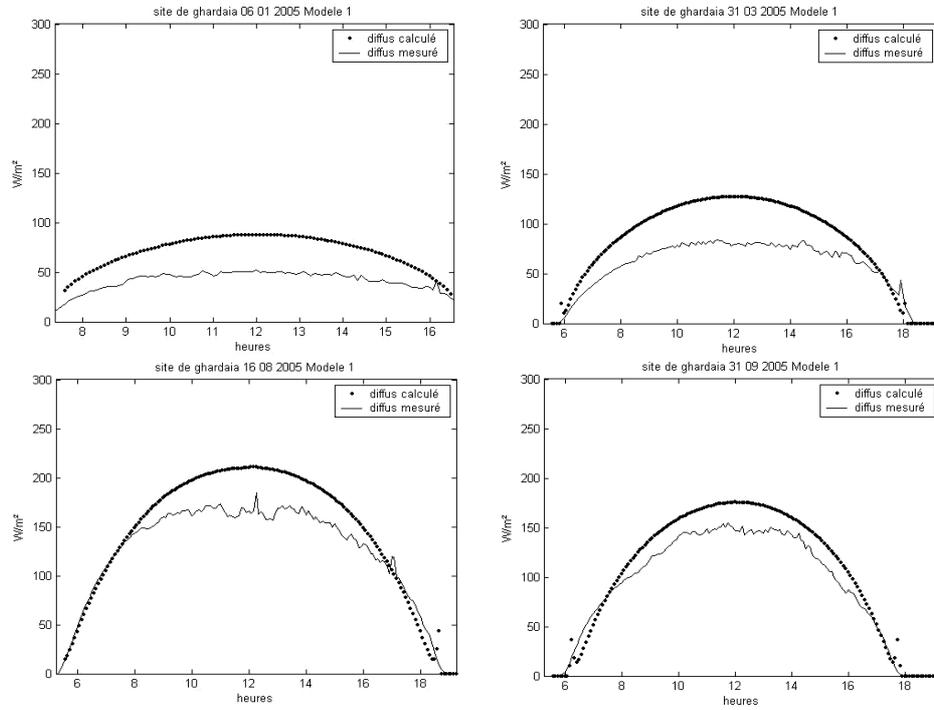


Fig. 13: Comparaison du modèle 1 avec les valeurs mesurées – Site: Ghardaïa (Diffus)

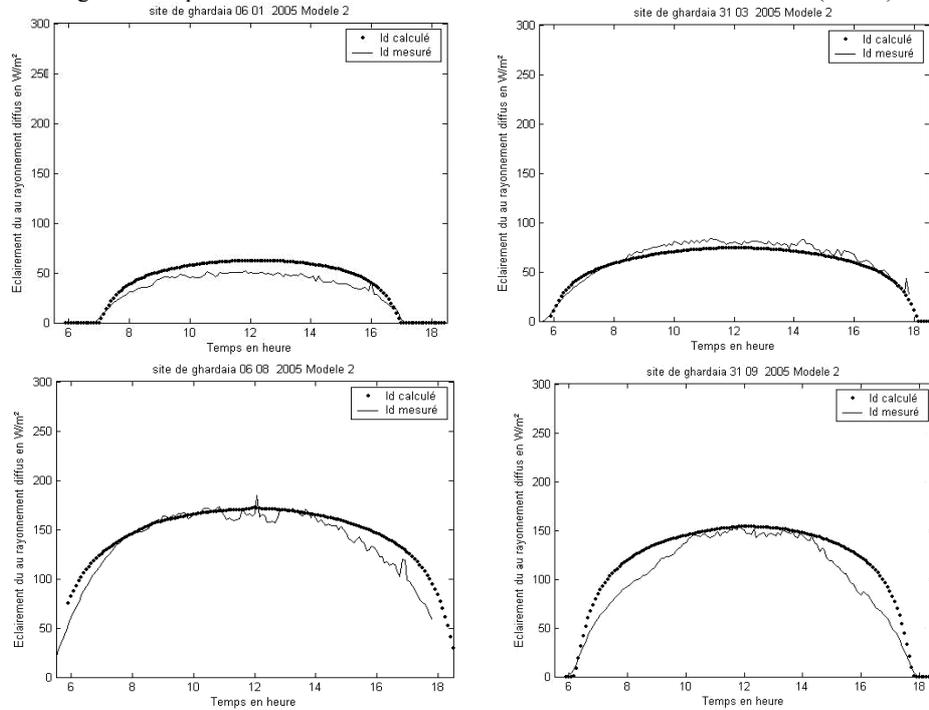


Fig. 14: Comparaison du modèle 2 avec les valeurs mesurées – Site: Ghardaïa (Diffus)

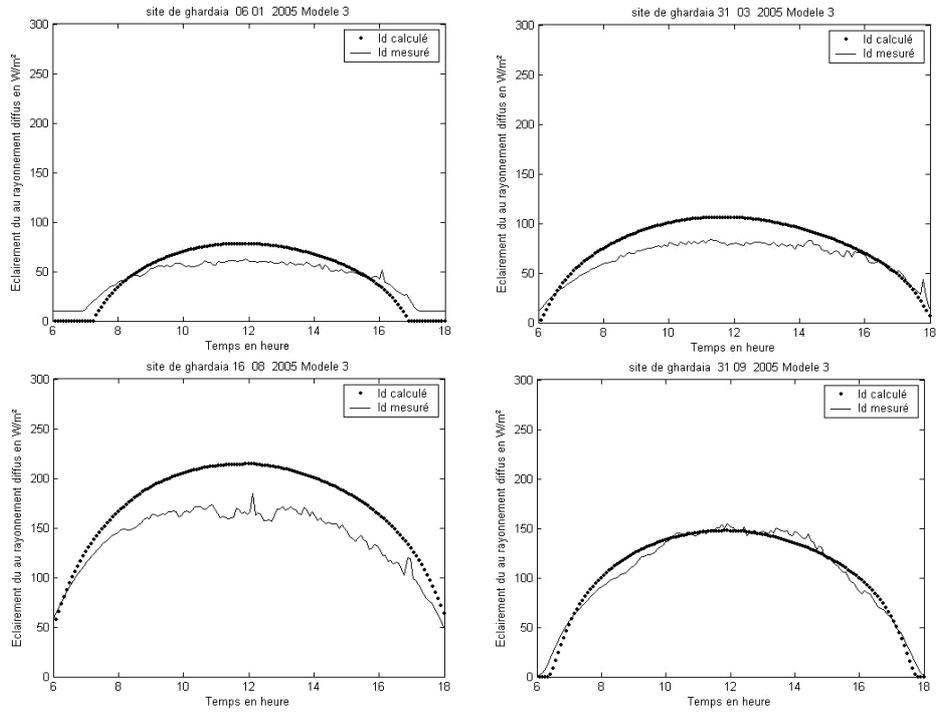


Fig. 15: Comparaison du modèle 3 avec les valeurs mesurées – Site: Ghardaia (Diffus)

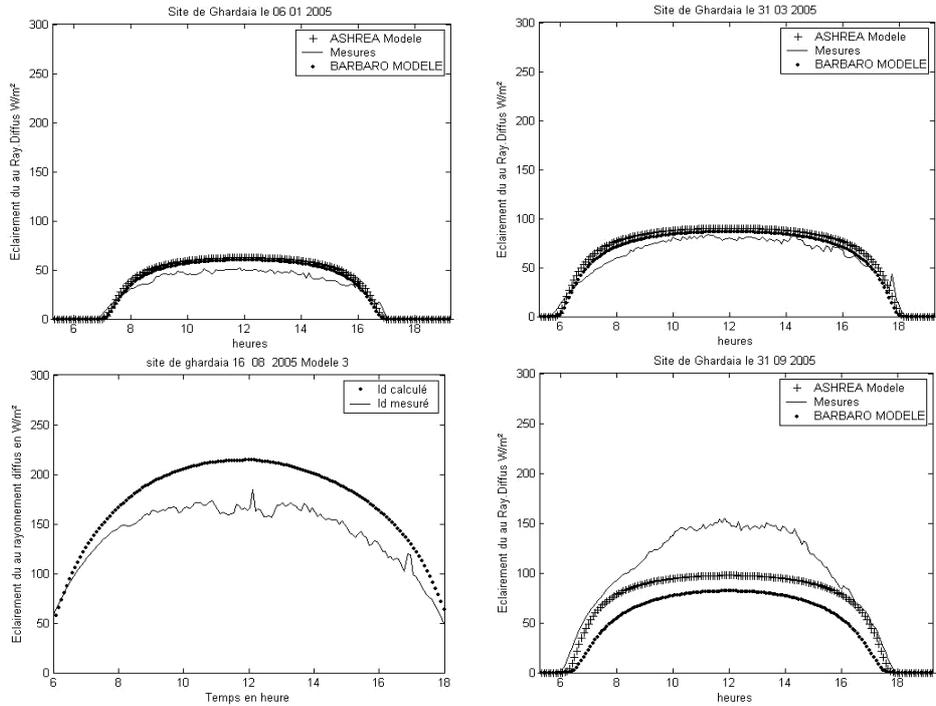


Fig. 16: Comparaison du modèle Ashrae et Barbaros avec les valeurs mesurées Site: Ghardaia (Diffus)

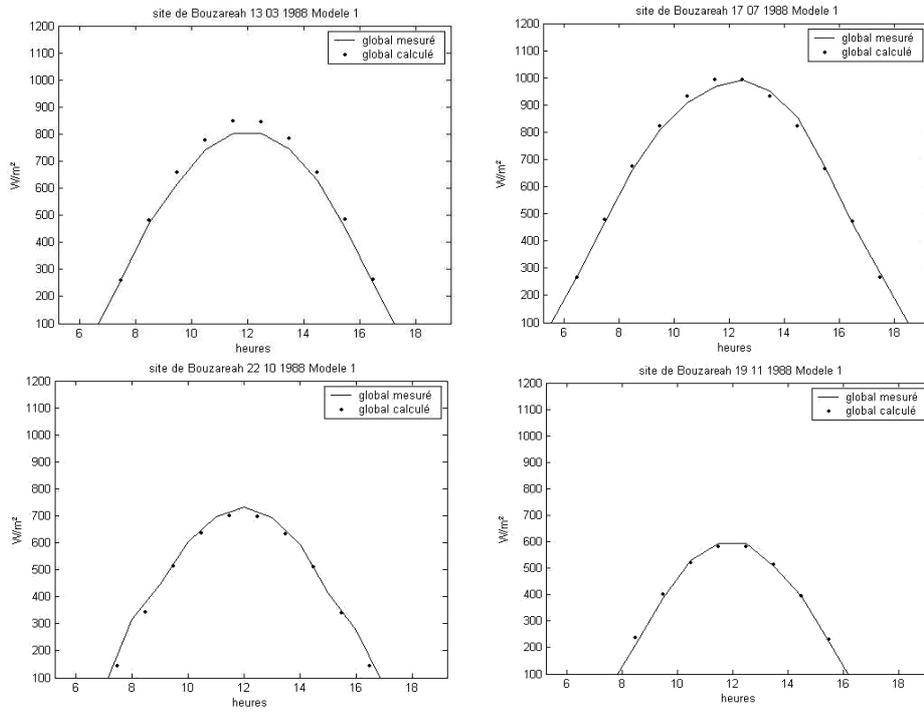


Fig. 17: Comparaison du modèle 1 avec les valeurs mesurées – Site: Bouzaréah (Global)

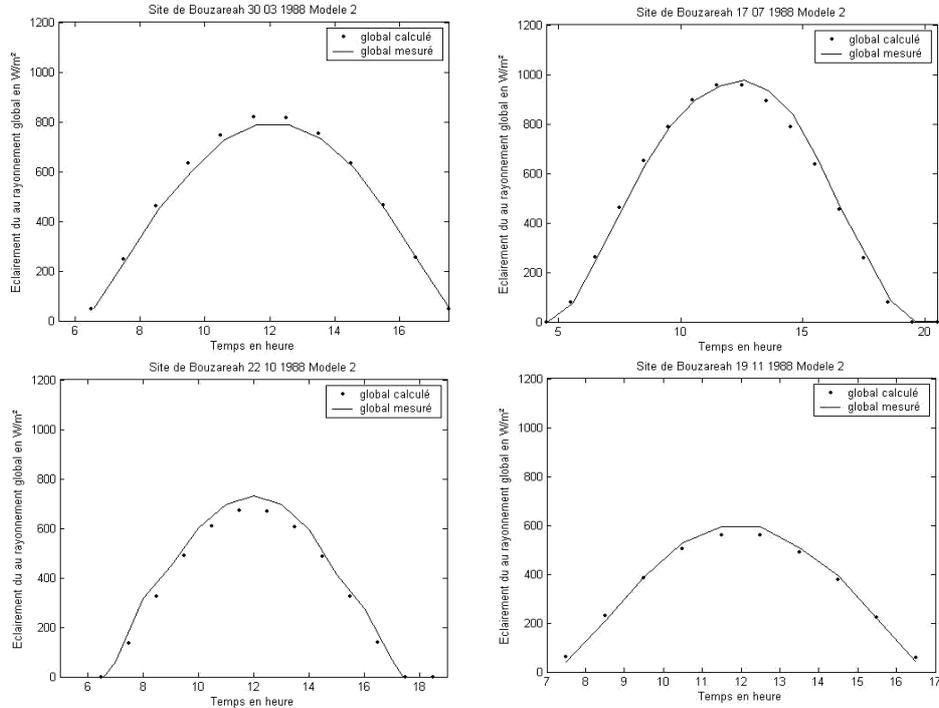


Fig. 18: Comparaison du modèle 2 avec les valeurs mesurées – Site: Bouzaréah (Global)

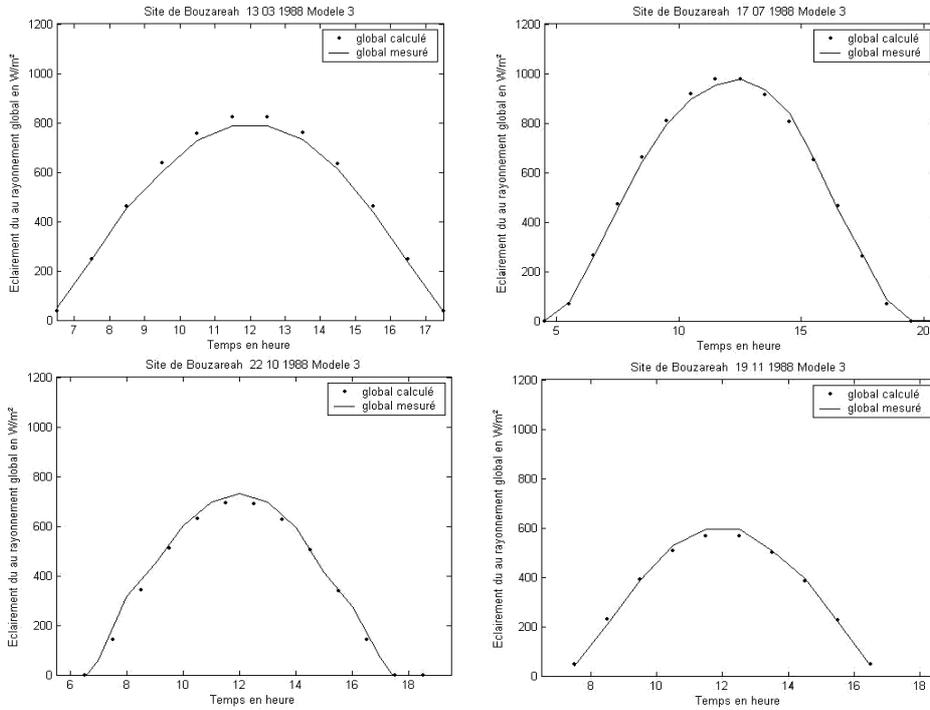


Fig. 19: Comparaison du modèle 3 avec les valeurs mesurées – Site: Bouzaréah (Global)

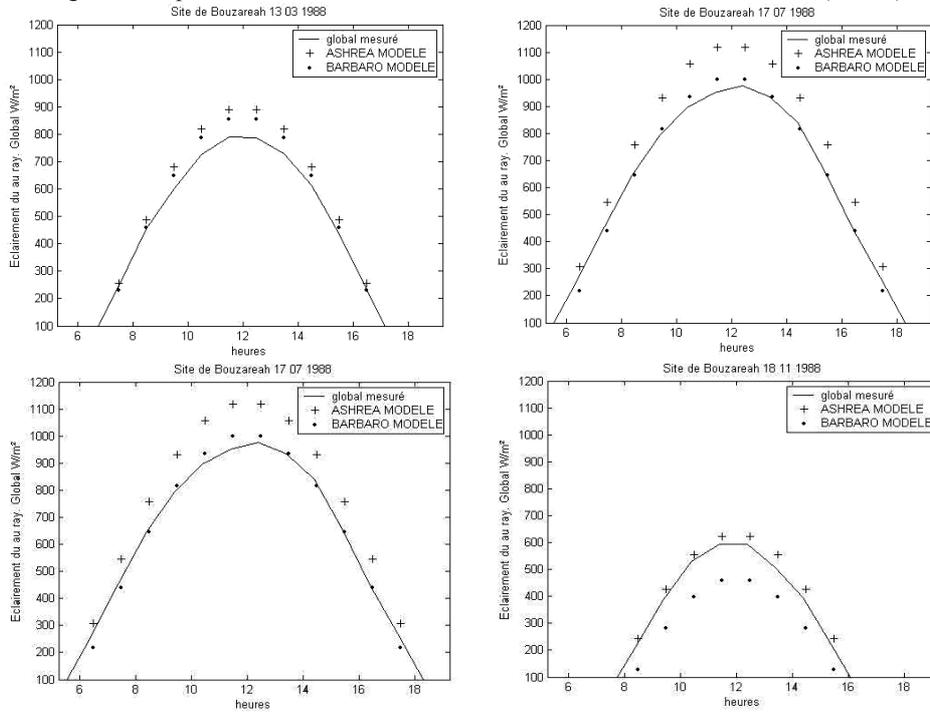


Fig. 20: Comparaison du modèle Ashrae et Barbaros avec les valeurs mesurées Site: Bouzaréah (Global)

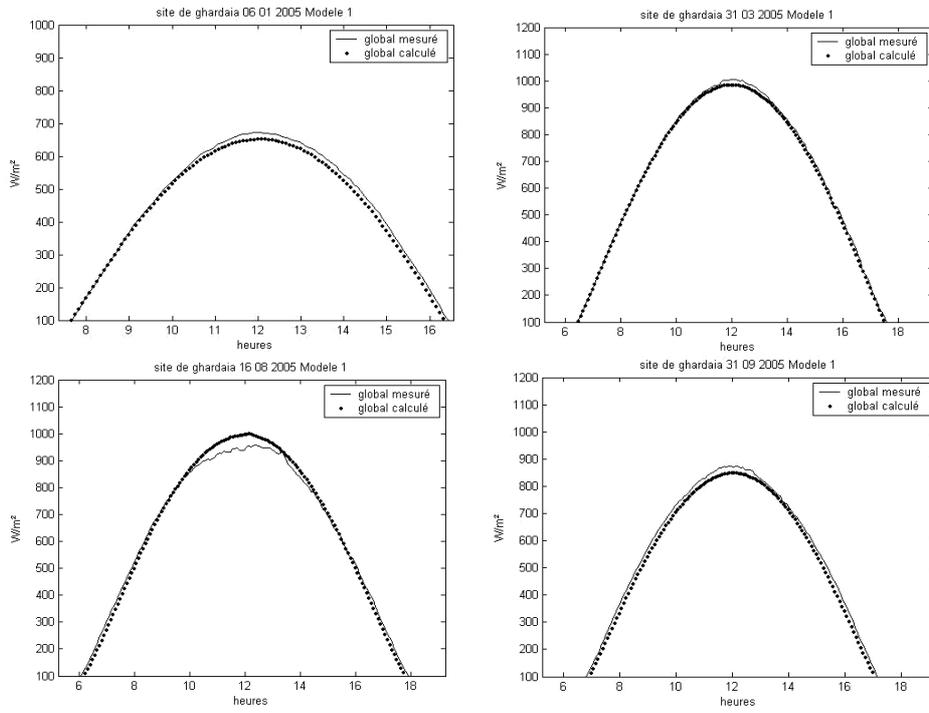


Fig. 21: Comparaison du modèle 1 avec les valeurs mesurées – Site: Ghardaïa (Global)

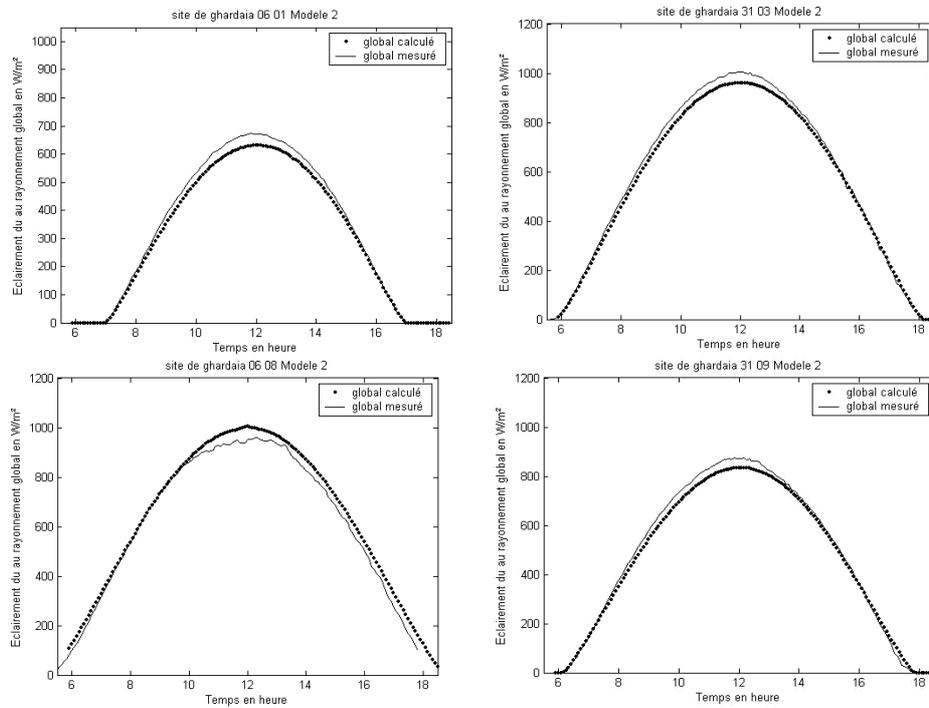


Fig. 22: Comparaison du modèle 2 avec les valeurs mesurées – Site: Ghardaïa (Global)

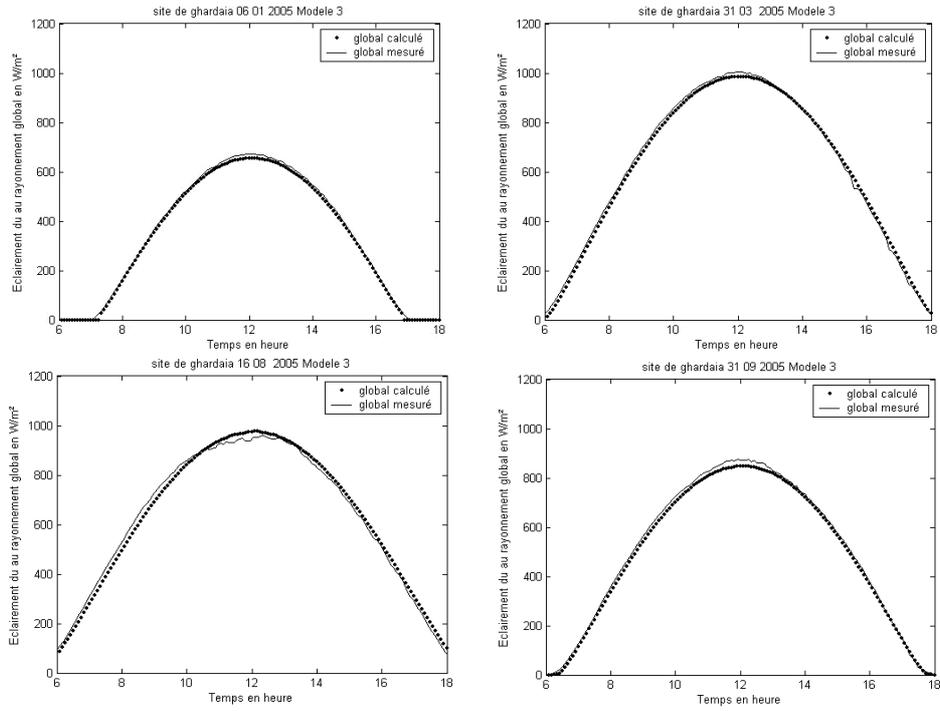


Fig. 23: Comparaison du modèle 1 avec les valeurs mesurées – Site: Ghardaia (Diffus)

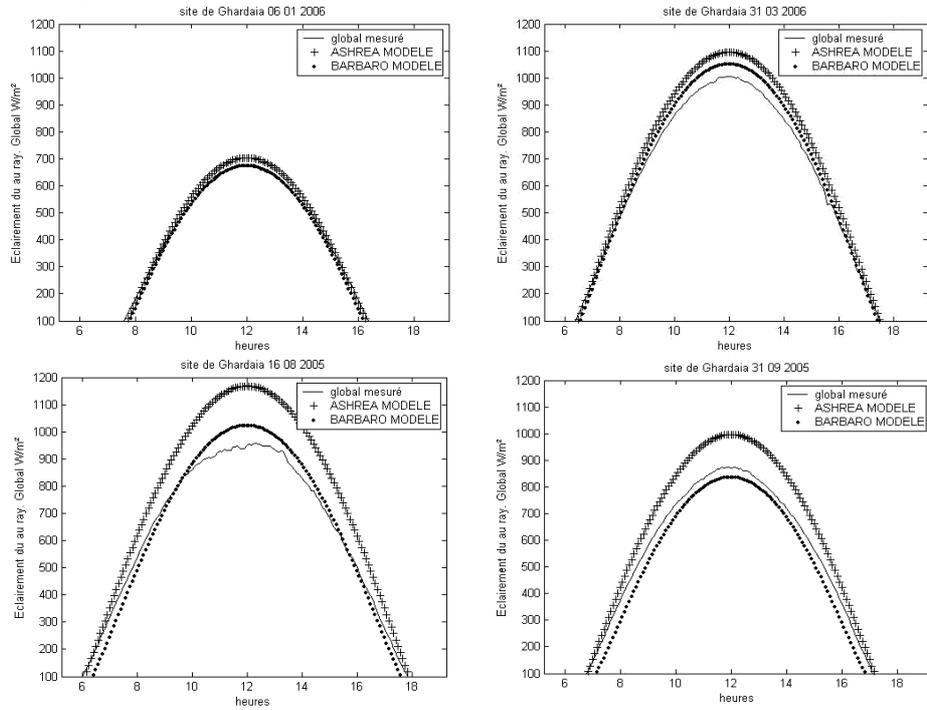


Fig. 24: Comparaison du modèle Ashrae et Barbaros avec les valeurs mesurées Site: Ghardaia (Global)

Tableau 6: Erreur relative moyenne entre les valeurs mesurées et celles calculées par les modèles 1, 2 et 3 – Site: Bouzaréah

	Eclairage dû au Rayonnement Direct			Eclairage dû au Rayonnement Diffus			Eclairage dû au Rayonnement Global		
	Mod1	Mod2	Mod3	Mod1	Mod2	Mod3	Mod1	Mod2	Mod3
13/03	11.82	9.45	8.22	31.35	24.41	20.53	8.8	6.05	6.74
17/07	8.26	7.07	5.06	16.12	28.87	7.71	4.6	2.39	2.95
22/10	3.25	5.68	3.17	11.01	14.33	18.55	4.3	9.41	7.53
18/11	2.68	4.81	8.67	17.24	15.7	11.14	5.52	9.27	6.27

Tableau 7: Erreur relative moyenne entre les valeurs mesurées et celles calculées par les modèles 1, 2 et 3 – Site: Ghardaïa

	Eclairage dû au Rayonnement Direct			Eclairage dû au Rayonnement Diffus			Eclairage dû au Rayonnement Global		
	Mod1	Mod2	Mod3	Mod1	Mod2	Mod3	Mod1	Mod2	Mod3
06/01	8.83	7.11	6.43	20.83	8.51	13.37	6.32	13.4	6.25
13/03	6.08	8.08	7.22	21.09	10.49	14.38	4.25	14.76	6.72
06/08	6.75	11.19	5.81	20.18	16.71	11.77	3.68	15.46	3.33
31/09	5.48	12.09	6.33	18.75	21.46	10.68	1.78	11.53	2.93

Tableau 8: Erreur relative moyenne entre les valeurs mesurées et celles calculées par les modèles de Barbaros et Ashrae Site: Ghardaïa et Bouzaréah

	Site: Ghardaïa			Site: Bouzaréah				
	Direct	Diffus	Global	Direct	Diffus	Global		
06/01	3.98	6.85	7.43	4.6	14.07	8.38	13/03	Barbaros
	4.99	8.31	7.55	6.69	15.55	7.44		Ashrae
30/03	6.6	6.95	9.9	6.51	5.99	3.44	17/07	Barbaros
	8.31	8.26	10.18	7.78	16.42	10.01		Ashrae
16/08	13.7	15.2	10.2	11.28	12.99	10.61	22/10	Barbaros
	19.2	9.67	12.05	7.75	15.80	12.23		Ashrae
31/09	6.78	17.95	6.29	19.57	34.8	22.8	18/11	Barbaros
	13.07	11.48	7.51	10.05	11.14	6.28		Ashrae

6. DISCUSSION DES RESULTATS

6.1 Eclairage dû au rayonnement global

A partir des diagrammes représentatifs des valeurs mesurées sur le site de Bouzaréah et celles estimées par chacun des modèles (Fig. 17-Fig. 20), nous remarquons que les modèles 1, 2 et 3, parfois surestiment, parfois sous-estiment cette quantité surtout au voisinage de midi et parfois, sont en bonne concordance avec les valeurs estimées.

Ceci est dû à notre sens au fait que nous ne disposons pas de valeurs précises du coefficient de trouble d'Angström et que nous avons pris des valeurs générales proposées dans la littérature.

Il faut noter que ce coefficient de trouble est le paramètre qui influe considérablement sur le coefficient d'extinction du rayonnement solaire d'une part et d'autre part aussi sur les erreurs commises lors du lissage des paramètres météorologiques, comme la température et l'humidité relative, collectés sur un intervalle de trois heures.

Par ailleurs, si on observe le tableau 4, nous constatons que les écarts entre les valeurs mesurées et celles estimées restent modérés.

Pour ce qui est du site de Ghardaïa (Fig. 21-Fig. 24), nous remarquons que les modèles 1 et 2 sous-estiment la composante globale pour les journées du 06/01, 31/09, 31/03 de l'année 2005, alors qu'ils la surestiment pour la journée du 16/08/2005. Cependant, le modèle 3 est en très bonne concordance avec les valeurs mesurées sur chacune des journées. De même, les valeurs des écarts relatifs restent toujours modérées et ne dépassent pas les 10 %.

Il est à noter aussi que de ce point de vue le modèle de Bird et Hulstrom reste le plus adéquat pour pouvoir être utilisé sur les deux sites.

6.2 Eclairage dû au rayonnement direct

A partir des diagrammes représentatifs de l'éclairage dû au rayonnement direct relatifs aux deux sites, (Fig. 1-Fig. 4 et Fig. 5-Fig. 8), nous remarquons que la différence entre les valeurs mesurées et celles estimées est nettement plus apparente. Ce qui est dû à notre sens aux causes soulevées pour l'éclairage dû au rayonnement global.

Il est à mentionner que ceci est aussi dû à notre sens par le fait que l'éclairage dû au rayonnement direct est plus sensible aux effets d'extinction, c'est qu'il dépend fortement de la présence du disque solaire, des quantités des composantes de l'atmosphère contribuant à son atténuation (comme la vapeur d'eau et les aérosols) et du trajet optique (masse d'air correspondante).

L'effet du trajet optique apparaît surtout au voisinage du lever et du coucher du soleil, c'est ce qui est constaté sur les diagrammes considérés. Pour ces conditions, les écarts peuvent dépasser les 50 %. Ce qui peut s'expliquer par le fait qu'au lever et au coucher du soleil, les appareils de mesure sont soumis à des effets masqués et à de réflexions causés par l'environnement, ce qui conduit généralement à des erreurs de mesures considérables.

Il est aussi à noter que le trajet optique étant très élevé à ces heures, alors, une petite erreur sur la quantification de l'un des principaux constituants de l'atmosphère, engendrerait une erreur sur le calcul des composantes du rayonnement solaire.

Par contre, si on observe les tableaux représentatifs des écarts relatifs moyens entre les valeurs mesurées et celles estimées (**Tableau 6** et **7**), pour chacun des modèles, nous constatons qu'elles sont relativement modérées pour les composantes globale et directe, et qu'elles sont sensiblement plus importantes pour la composante diffuse. Ce qui est dû simplement d'une part pour les raisons évoquées précédemment et de plus, par le fait que pour les journées claires, la composante diffuse étant relativement faible, ainsi les 100 Watts mesurées auxquelles correspond les 50 Watts calculées engendreront une erreur très élevée, mais on observe le côté quantitatif, la valeur de cette composante restera relativement très faible devant l'éclairage dû au rayonnement direct, donc, sans effet sur la composante globale et par conséquent sans effet considérable sur le calcul des performances des systèmes solaires.

Pour le modèle de Ashrae et même celui de Barbaros (**Tableau 8**), ces modèles conduisent à des valeurs qui sont nettement supérieures aux valeurs mesurées sur chacun des sites. Ce qui peut s'expliquer par le fait que les coefficients d'atténuation B et de diffusion C dépendent fortement du micro climat du site considéré, comme surtout l'humidité relative et du degré de pollution, chose qui n'apparaît pas dans ce modèle.

7. CONCLUSION

Ce travail nous a permis de confronter des valeurs mesurées et celles estimées par différents modèles paramétrés. A travers ceci, nous avons constaté que ces modèles peuvent se rapprocher avec une grande précision de la réalité moyennant seulement quelques données météorologiques.

Cela nous permettrait de combler les lacunes en matière de mesures pour les différentes composantes du rayonnement solaire dans le cas de besoin. Il faut rappeler que ces modèles étudiés sont spécifiques à des journées caractérisées par un état de ciel clair.

Par ailleurs, l'utilisation directe des modèles proposés dans la littérature peut conduire à des valeurs erronées. Ce qui influe considérablement sur le dimensionnement des systèmes solaires. C'est le cas du modèle de Ashrae, qui est souvent utilisé pour des raisons de simplicité par plusieurs concepteurs. Pour les deux sites, ce modèle s'avère donner des valeurs estimées nettement supérieures à celles mesurées.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les responsables de l'Unité de Recherche Appliquée des Energies Renouvelables de Ghardaïa et le personnel qui s'occupe de la collecte et du traitement des données météorologiques et radio métriques de ce site, ainsi que celui du site de Bouzaréah pour avoir mis en notre disposition les données qui sont utilisées dans notre travail.

NOMENCLATURE

I_d	Eclairement dû au rayonnement diffus total, normal, (W/m^2)
I_{da}	Eclairement dû au rayonnement diffus par les aérosols, normal, (W/m^2)
I_{dm}	Eclairement dû au rayonnement diffus après multi réflexions, normal, (W/m^2)
I_{dr}	Eclairement dû au rayonnement diffus par les molécules d'air, normal, (W/m^2)
I_g	Eclairement dû au rayonnement global calculé sur un plan horizontal, normal, (W/m^2)
I_n	Eclairement du au rayonnement direct calculé sur un plan normal, (W/m^2)
I_{sc}	Constante solaire corrigé par la variation distance terre-soleil, normal, (W/m^2)
l	Epaisseur de la couche d'ozone
m_a	Masse d'air corrigé
m_r	Masse d'air relative
p	Pression atmosphérique, (mb)
p_o	Pression atmosphérique au niveau de la mer, (mb)
U_1	Epaisseur d'eau condensable corrigée
U_3	Trajet optique du rayonnement solaire à travers la couche d'ozone

Lettres grecques

α	Coefficient d'absorption	ρ_a	Albédo de l'atmosphère
α_v	Caractéristique de visibilité	ρ_g	Albédo du sol considéré
β	Coefficient de trouble d'Angström	τ	Coefficient de transmission
θ_z	Distance zénithale		

Indices

1	Modèle 1	3	Modèle 3
2	Modèle 2	w	Vapeur d'eau

a	Aérosols	g	Gaz
o	Ozone	m	Multi réflexions
r	Rayleigh		

REFERENCES

- [1] T. Sasamori et al, 'Radiation Budget of Southern Hemisphere, Am Meteorology', Soc. Mon. Boston, Vol. 13m, pp. 9 - 23, 1972.
- [2] R.E. Bird and R.L. Hulstrom, 'Direct Insolation Models', Trans. ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 103, pp. 182 - 192, 1982.
- [3] R.E. Bird and R.L. Hulstrom, 'A Simplified Clear Sky Model for a Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surface', Golden Colorado, 1981.
- [4] G.W. Padridge and al., 'Radiative Process in Meteorology and Climatology', Elsevier, New York, 1976).
- [5] S. Barbaros et al., 'The Ashrae Clean Sky Model, An Evaluation in the Mediterranean Zone', Solar and Wind Technology, Vol. 1, pp. 111 - 116, 1988.
- [6] A.A. Lacis et al., 'A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Atmosphere', J. Atmos. Sc., Vol. 31, pp. 118 - 132, 1974.
- [7] K. Thomas K.an Van Heuklon, 'Estimating Atmospheric Ozone for Solar Radiation Models', Solar Energy, Vol. 22, pp 63 - 68, 1979.
- [8] B.E. Psiloglou et al., 'A New Parameterization of the Integral Ozone Transmittance', Solar Energy, Vol. 56, N°6, pp. 573 - 581, 1996.
- [9] J.A. Davis et al., 'Model for Estimating of Incoming Solar Irradiation', Report to A.E.S Department of Geography Ontario, 1978.
- [10] M. Mächer, 'Parametrization of Solar Radiation Under Clear Sky', M.S Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1983.
- [11] D.V Hoyt, 'A Model for Calculation of Global Insolation', Solar Energy, Vol. 21, N°1, pp. 27 - 35,
- [12] M. Iqbal, Academic Press, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, British Columbia, Canada, 1983.
- [13] S. Manabe et al., 'Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Convective Adjustment', J. Atmos. Sc, Vol. 21, pp. 361 - 385, 1964.
- [14] A. Louche et al., 'Experimental Verification of Some Clear Sky Insolation Models', Solar Energy, Vol. 41, N°3, pp. 273 - 279, 1988.
- [15] Shah Alam, 'Prediction of Direct and Global Solar Irradiance Using Broad Band: Validation of RESET Model', Renewable Energy, Vol. 31, pp. 1253 - 1263, 2006.
- [16] R. Pedros et al., 'Values of Broad Band Turbidity Coefficient in Mediterranean Coastal Site', Solar Energy, Vol. 66, N°1, pp. 11 - 20, 1999.
- [17] R. King et al., 'Direct Solar Transmittance for Clear Sky', Solar Energy, Vol. 22, pp. 297 - 301, 1979.
- [18] H.C. Hottel, 'A Simple Model for Estimating Solar Radiation Through Clear Atmosphere', Solar Energy, Vol. 18, pp. 129 - 134, 1976.

Annexe 1

- Masse d'air relative à la hauteur d'eau condensable

$$m_{\omega} = \frac{1}{\left[\cos\theta_z + 0.0548 (92.65 - \theta_z)^{-1.452} \right]} \quad (\text{A1.1})$$

avec θ_z étant la distance zénithale.

- Masse d'air relative m_r

$$m_r = \left[\cos \theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253} \right]^{-1} \quad (\text{A1.2})$$

- Masse d'air corrigée

$$m_a = m_r \left[\exp(-0.000184 \times z) \right] \quad (\text{A1.3})$$

avec z est l'altitude du site considéré.

Annexe 2

- Hauteur d'eau condensable

$$\omega = 0.493 \cdot \varphi_r \cdot \exp \left[\frac{0.23 - \left(\frac{5416}{T} \right)}{T} \right] \quad (\text{A2})$$

avec φ_r l'humidité relative et T la température ambiante en K.

Annexe 3

- Epaisseur de la couche d'ozone réduite

$$l = J + \{ A + C \cdot \sin [D(E + F)] + G \cdot \sin [H(\lambda + I)] \} \cdot \left[\sin^2 (\beta \phi) \right] \quad (\text{A3})$$

Paramètres	Hémisphère Nord	Hémisphère Sud
A	150	100
β	1.28	1.5
C	40	30
D	0.9865	
E	Jour de l'année	
F	-30	152.625
G	20	
H	3	2
I	20 si λ est positif 0 si λ est négatif	-75
J	235	
ϕ latitude	+	-
λ longitude	Est = + ; Ouest = -	

Les paramètres ci-dessus ont été déterminés dans l'hémisphère Nord, à la latitude 70° et ont été corrigés pour l'hémisphère Sud. Ici A et β sont des constantes qui tiennent compte de l'augmentation de l'ozone en fonction de la latitude. C , D , E et F sont des facteurs appréciant les variations saisonnières. G , H , λ et I prennent soin de corriger la variation longitudinale Est/Ouest. J est la valeur moyenne annuelle équatoriale du contenu de l'ozone atmosphérique.

Annexe 4

Correction distance Terre - Soleil

$$Cdts = 1 + 0.034 \cos(0.984 N) \quad (\text{A4})$$