

Estimation et cartographie des différentes composantes de rayonnement solaire au sol à partir des données météorologiques

Fodhil Lantri, Nour El Islam Bachari et Ahmed Hafid Belbachir

Faculté de Physique, Université des Sciences et de la
Technologie Mohamed-Boudiaf
El Mnaouar, B.P. 1505, Bir El Djir, 31000, Oran, Algérie
(reçu le 10 février 2017 - accepté le 30 Mars 2017)

Résumé - L'extraction des différentes composantes de la radiation solaire à partir des données météorologiques dépend étroitement de la connaissance exacte des coordonnées géographiques (latitude, longitude, altitude, etc.) de la position correspondante au pixel donné et les valeurs des variables météorologiques dont (la visibilité, la pression, l'humidité relative...) selon le modèle utilisé. En premier lieu, pour calculer les valeurs de radiation solaire dans une point (x, y), nous affectons les valeurs des variables météorologiques acquises par la plus proche station (latitude, longitude) et ensuite on a coloré le pixel (x, y) selon la valeur calculée. L'étude comparative entre les radiations calculées à partir des données météorologiques et les radiations mesurées au sol pour la station d'Oran (35°24, -0°36) donne les valeurs statistiques moyennes suivantes: $\overline{\text{NDMBE}}=1.68\%$; $\overline{\text{NDRMSE}}=12.44\%$; $\overline{\text{M.ERR}}=5.77\%$, $r=0.98$ pour le global, $\overline{\text{NDMBE}}=-1.66\%$, $\overline{\text{NDRMSE}}=22.72\%$, $\overline{\text{M.ERR}}=12.26\%$, $r=0.95$ pour le direct et $\overline{\text{NDMBE}}=13.4\%$, $\overline{\text{NDRMSE}}=51.07\%$, $\overline{\text{M.ERR}}=27.09\%$, $r=0.83$ pour le diffus.

Abstract - The extraction of each component of solar radiation from meteorological data strongly depends on the exact knowledge of the geographical coordinates (latitude, longitude, altitude,) of the position corresponding do the given pixel and the values of the meteorological variables, such as visibility, pressure, relative humidity, according to the model used. First, to calculate the solar radiation values for a point (x, y), we assign the values of the meteorological values obtained from the nearest station (latitude, longitude), next, we color the pixel according to the calculated value. The comparative study between radiations calculated from meteorological data and radiation measured on site in the Oran station (35°24, -0°36) gives the following mean statistical values:

$\overline{\text{NDMBE}}=1.68\%$; $\overline{\text{NDRMSE}}=12.44\%$; $\overline{\text{M.ERR}}=5.77\%$, $r=0.98$ for the global, $\overline{\text{NDMBE}}=-1.66\%$, $\overline{\text{NDRMSE}}=22.72\%$, $\overline{\text{M.ERR}}=12.26\%$, $r=0.95$ for the le direct and $\overline{\text{NDMBE}}=13.4\%$, $\overline{\text{NDRMSE}}=51.07\%$, $\overline{\text{M.ERR}}=27.09\%$, $r=0.83$ for the diffus.

Mots clés: Radiation solaire - Composantes du rayonnement - Direct - Diffus - Valeur statistique.

1. INTRODUCTION

La cartographie du bilan d'énergie à l'interface sol-atmosphère est très importante pour la gestion optimale des ressources naturelles. Les cartes solaires sont établies à partir des mesures radiométriques au sol par les stations professionnelles de mesure du rayonnement, mais le nombre de ces stations est très faible et avec une discontinuité des mesures.

L'Algérie de par sa situation géographique, située entre le 19^{ème} et le 38^{ème} parallèle nord, constitue sur le globe terrestre une zone particulièrement bien ensoleillée. Aussi

2.2 Rayonnement horaire sur une surface horizontale

Sur un jour donné, laissez I_{on} de l'irradiance extraterrestre (taux de l'énergie) sur une surface normale aux rayons du soleil, où,

$$I_{on} = I_{SC} \cdot \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = I_{SC} \cdot E_0 \tag{1}$$

Il est évident d'après la figure 5, que l'éclairement sur une surface horizontale peut être écrit,

$$I_0 = I_{on} \cos \theta_z \tag{2}$$

Où $\cos \theta_z$ est donnée par {Eq. (12)}.

$$I_0 = I_{SC} \cdot E_0 \cdot (\cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi + \sin \varphi \cdot \sin \delta) \tag{3}$$

L'unité des {Eq. (1)} et {Eq. (2)} est en W/m^2 .

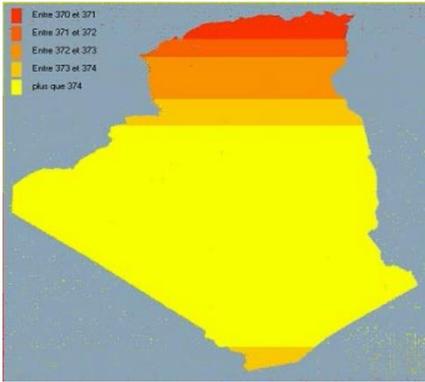


Fig. 3: Eclairement extraterrestre sur une surface horizontale à 10h TU (07/07/90)



Fig. 4: Eclairement extraterrestre sur une surface horizontale à 16h TU (07/07/90)

Les figures 3 et 4 représentent l'éclairement extraterrestre sur une surface horizontale en Algérie à 10 h et 16 h TU.

L'irradiation dI_0 , durant une courte période de temps dt , sera,

$$dI_0 = I_{SC} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_z \cdot dt \tag{4}$$

Où dt est exprimé en heures et la constante solaire I_{SC} en kJ/m^2h . Sur le côté Rithmain de cette équation, $\cos \theta_z$ contient l'angle horaire solaire ω en degrés ou en radians. Le temps en heures peut être converti en angle heures, comme suit,

$$\Omega = \text{vitessederotationde la terre autourde son axe polaire} = \frac{2\pi \text{ rad}}{24 \text{ h}} = \frac{d\omega}{dt} \tag{5}$$

$$\text{A partir de cette expression } dt = (12/\pi)d\omega \tag{6}$$

L'équation (4) se réduit maintenant à ce qui suit:

$$dI_0 = (12/\pi) \cdot I_{SC} \cdot E_0 \cdot (\cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi + \sin \varphi \cdot \sin \delta) d\omega \tag{7}$$

On peut maintenant obtenir facilement I_0 , le rayonnement sur une période de 1 h. On prend l'heure de midi solaire, ω_i l'angle horaire est au milieu de cette heure. Le rayonnement sur une période d'une heure sera écrit ci-dessous.

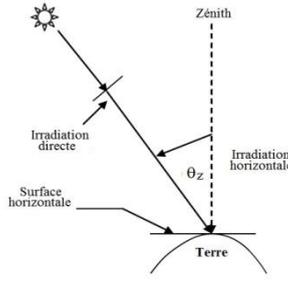


Fig. 5: Irradiance extraterrestre sur une surface horizontale

$$I_o = (12/\pi) \cdot I_{SC} \cdot E_0 \cdot \int_{\omega_1 - \pi/24}^{\omega_1 + \pi/24} (\cos\delta \cdot \cos\omega \cdot \cos\varphi + \sin\varphi \cdot \sin\delta) d\omega \quad (8)$$

où

$$I_o = I_{SC} \cdot E_0 \cdot (\sin\varphi \cdot \sin\delta + (24/\pi) \cdot \sin(\pi/24) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega_1 \cdot \cos\varphi) \quad (9)$$

$$\text{où, } (24/\pi) \sin(\pi/24) = 0.9972 \approx 1 \quad (10)$$

Nous pouvons écrire l'équation (9),

$$I_o = I_{SC} \cdot E_0 \cdot (\cos\delta \cdot \cos\omega_1 \cdot \cos\varphi + \sin\varphi \cdot \sin\delta) \quad (11)$$

Les rendements ci-dessus représentent l'irradiation extraterrestre pour 1 h centré autour de l'angle horaire ω_1

L'équation (11) peut également être écrite, peu différente de l'expression de l'angle solaire représentant le coucher du soleil sur une surface horizontale, l'angle zénithal peut être exprimé,

$$\cos\theta_z = \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot (\cos\omega \cdot \cos\omega_s) \quad (12)$$

Par conséquent, l'équation (11) se réduit à,

$$I_o = I_{SC} \cdot E_0 \cdot (\cos\delta \cdot \cos\varphi) \cdot (\cos\omega_1 \cdot \cos\omega_s) \quad (13)$$

Dans certains cas, le rayonnement dans une autre période d'une heure peut être nécessaire. On considère que le rayonnement sur une surface horizontale entre les heures t_1 et t_2 est nécessaire. On compte les heures à partir de minuit, et aussi longtemps que t_1 et t_2 sont dans la lumière du jour, le rayonnement entre deux heures est comme suit,

$$I_0|_{t_2}^{t_1} = I_{SC} \cdot E_0 \cdot \{ \sin\delta \cdot \sin\varphi (t_2 - t_1) + (12/\pi) \cdot \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot [\sin(15t_1) - \sin(15t_2)] \} \quad (14)$$

La quantité \bar{I}_0 peut être définie comme l'extraterritorial rayonnement mensuel moyenne horaire sur une surface horizontale. Dans ce texte les termes 'la moyenne mensuelle' et 'moyenne mensuelle' sont utilisés de façon interchangeable et synonyme. \bar{I}_0 est la moyenne de toute irradiation horaire reçue pendant le même temps apparent local sur une période d'un mois.

Cette quantité sera nécessaire pour calculer le rayonnement solaire sur la surface de la terre en présence de son atmosphère. \bar{I}_0 , peut être exprimé mathématiquement comme,

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{n_1}^{n_2} I_0 \quad (15)$$

Où n_1 et n_2 sont les numéros de jour au début et à la fin du mois respectivement.

Il est possible de déterminer le jour donné qui a une irradiation égale à l'irradiation mensuelle moyenne horaire. Définir une telle déclinaison particulière que la déclinaison caractéristique, nous pouvons maintenant écrire,

$$\bar{I}_0 = I_0 \quad (16)$$

2.3 Rayonnement journalier sur une surface horizontale

Quelques exemples de la variation journalier du rayonnement extraterrestre sur des surfaces horizontales sont présentés dans la figure 3. L'irradiation lors d'une journée, du lever du soleil (sr) au coucher du soleil (ss), est donnée par l'aire sous les courbes. Donc

$$H_0 = \int_{sr}^{ss} I_0 dt \quad (17)$$

$$H_0 = 2 \int_0^{ss} I_0 dt \quad (18)$$

En supposant que E_0 reste constant pendant un jour et après la conversion du temps dt de l'angle horaire, on obtient

$$H_0 = (12/\pi) \cdot I_{SC} \cdot E_0 \cdot \int_0^{\omega_s} (\cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \phi + \sin \phi \cdot \sin \delta) d\omega \quad (19)$$

$$H_0 = (24/\pi) I_{SC} \cdot E_0 \cdot [(\pi/180) \omega_s \cdot (\sin \phi \cdot \sin \delta) + (\cos \delta \cdot \sin \omega_{si} \cdot \cos \phi)] \quad (20)$$

Où ω_s en degrés. Il est possible d'écrire l'expression ci-dessus pour H_0 sous deux formes légèrement différentes. En considérant l'équation.

$$\cos \frac{\pi}{2} = \cos \delta \cdot \cos \omega_s \cdot \cos \phi + \sin \phi \cdot \sin \delta \quad (21)$$

donc

$$\cos \delta \cdot \cos \phi = -\frac{\sin \phi \cdot \sin \delta}{\cos \omega_s} \quad (22)$$

En combinant les {Eq. (22)} et {Eq.(21)}, cela donne,

$$H_0 = (24/\pi) I_{SC} \cdot E_0 \cdot (\sin \phi \cdot \sin \delta) [(\pi/180) \omega_s + \tan \omega_s] \quad (23)$$

$$H_0 = (24/\pi) I_{SC} \cdot E_0 \cdot \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot [\sin \omega_s - (\pi/180) \omega_s \cdot \cos \omega_s] \quad (24)$$

Les figures 6 et 7 représentent le rayonnement extraterrestre journalier sur des surfaces horizontales reçu au territoire national, (07/01/90) et (07/07/90)

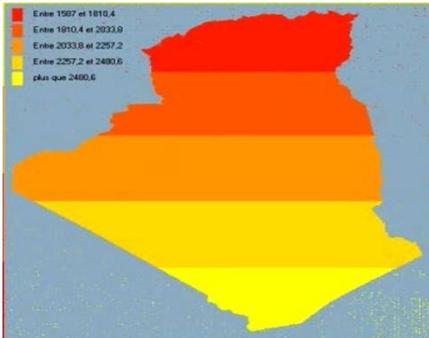


Fig. 6: Rayonnement extraterrestre sur une surface horizontale (07/01/90)

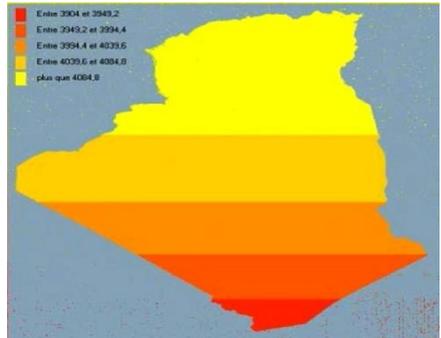


Fig. 7: Rayonnement extraterrestre sur une surface horizontale (07/07/90)

Il convient de noter que les {Eq.(23)} et {Eq.(24)} ne sont pas valables, soit à $\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 90^\circ$. Deux cas particuliers de la radiation extraterrestre quotidienne sur une surface horizontale sont dignes de mention,

◆ A l'équateur, $\varphi = 0^\circ$
 et par conséquent, $\varphi = 90^\circ$

Ainsi H_0 est réduit à,

$$H_0 = (24/\pi) I_{SC} \cdot E_0 \cdot \cos\delta \quad (25)$$

◆ Dans les régions polaires, au cours de l'été, il n'y a pas de coucher de soleil ou le lever du soleil. Le remplacement dans la figure, remplacé par ω_s , par π , pour obtenir,

$$H_0 = (24/\pi) I_{SC} \cdot E_0 \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta \cdot (\pi^2/180) \quad (26)$$

Déjà dans de nombreux calculs d'ingénierie, la moyenne mensuelle du rayonnement extraterrestre quotidiennement sur une surface horizontale, \bar{H}_0 est souvent nécessaire. Cette quantité est définie comme suit,

$$\bar{H}_0 = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{n_1}^{n_2} H_0 \quad (27)$$

Comme pour l'irradiation mensuelle moyenne horaire, la quantité \bar{H}_0 peut également être calculée à une déclinaison caractéristique. Ainsi,

$$\bar{H}_0 = H_0 \quad (28)$$

2.4 Eclairage solaire au sol

L'éclairage solaire exprime le flux instantané reçu, au niveau du sol, par unité de surface. Ses unités usuelles sont, $J.m^2$, $J.cm^2$, $Wh.m^2$ ou $kWh.m^2$.

Elle dépend de nombreux facteurs, dont principalement, la couverture nuageuse, la durée de jour, l'instant considéré dans la journée, l'orientation et l'inclinaison de la surface, la latitude du lieu, son degré de pollution et la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et dans le temps de l'éclairage solaire. Dans les régions du globe comprises entre 40° Nord et Sud, l'énergie globale annuelle reçue par une surface horizontale est comprise entre 1400 et 2500 $kWh.m^2$.

2.4.1 Eclairage direct [3]

L'expression de base pour la transmission directe totale a été suggérée par Partridge *et al.*, [4]. De là l'irradiance directe normal à moyenne distance Terre-Soleil peut être écrite,

$$\hat{I}_n = \hat{I}_{SC} \cdot (\tau_{oz} \tau_r - \alpha_w) \tau_a \quad (29)$$

Où, α_w , est l'absorption de rayonnement direct par la vapeur d'eau et

$$\alpha_w = 1 - \tau_w \quad (30)$$

Dans {Eq.(29)}, il est implicite que le coefficient d'absorption par la vapeur d'eau doit être soustrait après l'atténuation de l'éclairage directe par l'ozone et la diffusion de Rayleigh. Ce qui est raisonnable, compte tenu du fait que l'absorption par l'ozone et de la diffusion par les molécules d'air se produisent très haut dans l'atmosphère et sont confinés à courtes longueurs d'onde.

Dans ce modèle, le coefficient d'absorption léger supplément par le dioxyde de carbone et d'oxygène est inclus dans α_w . En outre, il est supposé que l'atténuation (absorption et de diffusion) par aérosols se produit au cours de la totalité du spectre solaire. La τ_{oz} , transmission due à l'absorption par l'ozone peut être écrite

$$\tau_{oz} = 1 - \alpha_{oz} \quad (31)$$

Où α_o , est le coefficient d'absorption de rayonnement direct par l'ozone. L'absorption de l'irradiance directe par l'ozone a été étudiée par un certain nombre de chercheurs. Paltridge *et al.* [4] recommandent la corrélation développée par Lacis *et al.* [3], l'absorption d'ozone est donnée par le texte suivant:

$$\alpha_{oz} = \frac{0.02118 U_{oz}}{1 + 0.042 U_{oz} + 3.23 \times 10^{-4} \cdot U_{oz}^2} + \frac{1.082 \cdot U_{oz}}{(1 + 1386 \cdot U_{oz})^{0.801}} + \frac{0.0658 U_{oz}}{1 + (103.6 \cdot U_{oz})^3} \quad (32)$$

Dans {Eq.(32)}, le premier terme du côté droit représente le coefficient d'absorption du spectre visible, et les deux derniers termes de l'expression sont relatifs au coefficient d'absorption de la partie ultraviolette du rayonnement solaire. U_o est l'ozone la longueur de trajet optique dans la couche d'ozone par rapport donné,

$$U_{oz} = 1 \times m_{oz} \quad 0.0 \leq 1 \leq 0.5 \quad (33)$$

Où 1, est l'épaisseur verticale de la couche d'ozone (en cm NTP (Normal Temperature and surface Pressure)) caractérisée, selon Thomas *et al.*, [5, 6] et m_{oz} est la masse optique relative.

Pour l'absorption par la vapeur d'eau, et Paltridge *et al.*, [4], nous recommandons l'utilisation d'une corrélation par Lacis *et al.*, [5] qui se base sur une étude de Yamamoto. Lacis *et al.*, [5], présente la corrélation suivante pour s'adapter à la courbe de Yamamoto avec une précision de 1% pour $10^{-2} < U_1 < 10$ cm.

$$\alpha_w = \frac{2.9 \cdot U_w}{(1 + 141.5 \cdot U_w)^{0.635} + 5.925 \cdot U_w} \quad (34)$$

Où, U_w , est la pression corrigée par rapport à la longueur du trajet optique de l'eau sensible proposée par,

$$U_w = W - m_r \quad (35)$$

Lorsque l'eau précipitable est obtenue dans des conditions autres que, $p_0 = 101325$ mbars et $T_0 = 273$ K, elle devrait être corrigée. Toutefois, aucune correction est appliquée à m_r .

L'atténuation due à la diffusion de Rayleigh peut être évalué par l'équation suivante.

$$\tau_r = \left(\sum_{\lambda=0}^{\infty} \hat{I}_{on\lambda} \cdot \exp(-0.008735\lambda^{-4.08} m_a) \Delta\lambda \right) / \hat{I}_{SC} \quad (36)$$

Une corrélation de régression de type qui correspond à une telle équation qui est donnée par comme ci-dessous,

$$\tau_r = 0.972 + 0.08252 m_a + 0.00933 m_a^2 - 0.00095 m_a^3 + 0.000437 m_a^4 \quad (37)$$

Davies *et al.*, [8] ont présenté sous forme de tableaux des valeurs de τ_r que l'on dit être de 2% plus précis que ceux obtenus par le biais de {Eq.(37)}. Le facteur de transmission due à l'atténuation des aérosols est difficile d'exprimer en termes simples. On part du plus simple, il peut être écrit

$$\tau_a = K^{m_a} \quad (38)$$

Où K , en fonction de la turbidité locale généralement obtenu par irradiation mesurée normale directe, s'étend de 0.6 à 1.0. Une fois la valeur de K est déterminée à un endroit, elle peut être appliquée à d'autres endroits avec des conditions de turbidité identiques. Désormais, nous n'utiliserons pas cette procédure. Une meilleure approche, cependant, est d'obtenir une équation pour τ_a à travers une analyse de régression,

$$\tau_a = \left(\sum_{\lambda=0}^{\infty} \hat{I}_{0n\lambda} \exp(-\beta\lambda^{-\alpha} m_a) \Delta\lambda \right) / \hat{I}_{SC} \quad (39)$$

L'expression suivante correspond à l'équation précédente, proposé par Mächler [8], qui est donné par la relation suivante,

$$\tau_a = (0.12445\alpha - 0.0162) + (1.003 - 0.125\alpha) \times \exp[-\beta m_a (1.089\alpha + 0.5123)] \beta < 0.5 \quad (40)$$

Il serait très utile pour exprimer {Eq.(40)} en termes de visibilité aussi; cette dernière étant liée à α, β . Encore une fois, à partir de,

$$\tau_a = \left(0.97 - 1.265 \cdot (\text{VIS})^{-0.66} \right) m_a^{0.9} \quad 5 < \text{VIS} < 180 \text{ km} \quad (41)$$

L'équation ci-dessous a été développée de telle manière que dans $0.9 < \alpha < 1.5$. τ_a est uniquement fonction de la visibilité et de la masse d'air.

L'équation (29) représente l'éclairement direct-normal au sol sur une surface normale à la direction du soleil. L'éclairement direct sur surface horizontale est obtenu en multipliant {Eq.(29)} par $\cos(\theta_z)$

$$\hat{I}_{nh} = \hat{I}_{SC} \cdot (\tau_{oz} \cdot \tau_r - \alpha_w) \cdot \tau_a \cdot \cos(\theta_z) \quad (42)$$

Les figures 8 et 9 représentent les variations instantanées dz l'éclairement direct moyennement sur des surfaces horizontales par ciel clair le 07/07/90, en appliquant l'équation (42) avec des données des stations du territoire national.

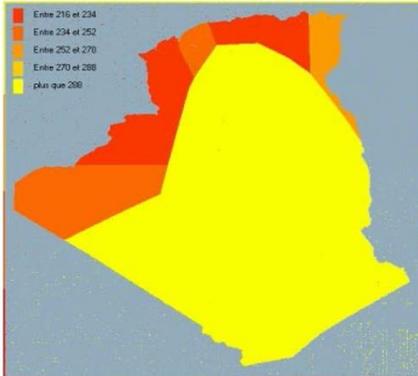


Fig. 8: Eclairement direct sur une surface horizontale par ciel clair à 10 h TU (07/07/90)

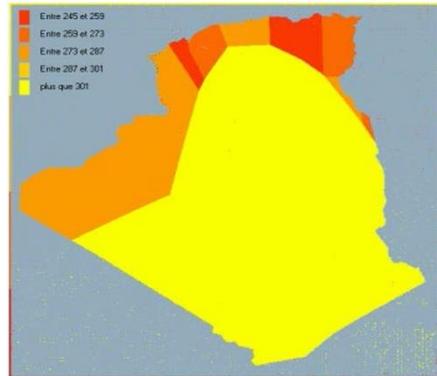


Fig. 9: Eclairement direct sur une surface horizontale par ciel clair à 12 h TU (07/07/90)

2.4.2 Eclairement diffus [10]

Nous allons maintenant faire face au rayonnement diffus, en utilisant les transmittances ci-dessus. A la suite des procédures empiriques laïques ci-dessus pour l'éclairement spectral diffuse dans la section précédente, l'éclairement diffus à large bande sur une surface horizontale peut également être écrit

$$\hat{I}_d = \hat{I}_{dr} + \hat{I}_{da} + \hat{I}_{dm} \quad (43)$$

Où \hat{I}_{dr} est l'éclairement énergétique à large bande diffuse sur le terrain en raison de la diffusion de Rayleigh, \hat{I}_{da} est l'éclairement énergétique à large bande diffuse sur le terrain en raison de la diffusion par les aérosols, et \hat{I}_{dm} est l'éclairement énergétique à large bande diffuse sur le terrain en raison des réflexions multiples entre celui de la terre surface et son atmosphère.

Les deux premiers termes de la partie droite de {Eq.(43)} représentent le flux lumineux atteignant le sol après le premier passage à travers l'atmosphère. Le rayonnement diffus en raison de la diffusion Rayleigh est la suivante:

$$\hat{I}_{dr} = \hat{I}_{sc} \cdot \cos \theta_z \cdot [0.5 \cdot \tau_a (1 - \tau_{r1})] \tag{44}$$

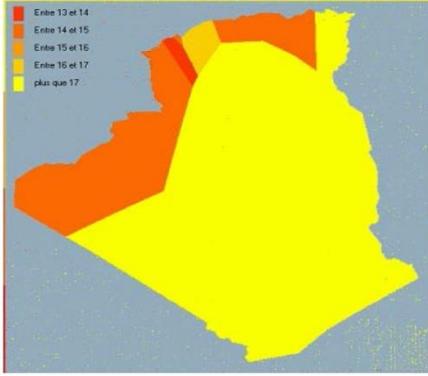


Fig. 10: Eclairage Rayleigh sur une surface horizontale par ciel clair à 10 h TU (07/07/90)

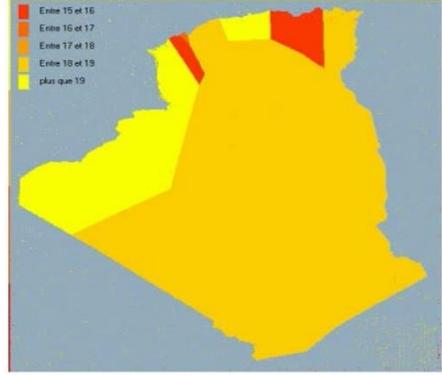


Fig. 11: Eclairage Rayleigh sur une surface horizontale par ciel clair à 12 h TU (07/07/90)

On suppose que la moitié de Rayleigh du rayonnement dispersé atteint le sol. En d'autres termes, la diffusion moléculaire est supposé symétrique dans les directions avant et arrière. Dans l'équation ci-dessus, τ_ω , la transmission due à l'absorption par la vapeur d'eau, ne semble pas, car la vapeur d'eau atténue le rayonnement dans la bande spectrale où $\tau_\omega \approx 1$.

L'équation correspondant au rayonnement diffus sur une surface horizontale en raison de la dispersion des aérosols est la suivante,

$$\hat{I}_{da} = \hat{I}_{sc} \cdot \cos \theta_z \times (\tau_{oz} \tau_r - \alpha_\omega) \times [F_c W_0 (1 - \tau_r)] \tag{45}$$

W_0 , qui est l'albédo de dispersion de l'atmosphère. Généralement pour les régions urbaines/industrielles W_0 , vaut 0.6, et il vaut 0.9 pour les régions rurales/agricoles.

F_c , est le coefficient de dispersion de l'atmosphère. Des valeurs de ce facteur ont été établies en fonction de l'angle zénithal θ_z , d'après Robinson [11].

Tableau 1: Le facteur F_c , fonction de l'angle zénithal θ_z

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	0.65

L'éclairage à la baisse due à la réflexion multiple [12] entre le sol dans l'atmosphère est le coefficient de dispersion de l'atmosphère. Des valeurs de ce facteur ont été établies en fonction de l'angle zénithal.

$$\hat{I}_{dm} = \left[\hat{I}_{sc} \cdot \cos \theta_z + \hat{I}_{dr} + \hat{I}_{da} \right] \times \frac{\rho_g \cdot \rho_a}{1 - \rho_g \cdot \rho_a} \tag{46}$$

Où, ρ_g est l'albédo du sol et ρ_a est l'albédo du ciel sans nuages. Ce dernier est calculé à partir de l'expression suivante,

$$\rho_a = 0.0685 + 0.17 \times (1 - \tau_a) W_0 \quad (47)$$

Lorsque le premier terme τ_a indique que la transmission d'aérosol doit être calculé par rapport à l'air, $\text{Masse} = 1.666 \times (p/p_0)^3$.

Le facteur 0.17 représente $(1 - F_c)$ à $\theta_z = 53^\circ$ est en backscatterance. Par conséquent, le second terme sur le côté droit de l'équation ci-dessus et représente l'albédo des nuages-ciel en raison de la présence d'aérosols, tandis que le premier terme représente l'albédo de la qualité de l'air.

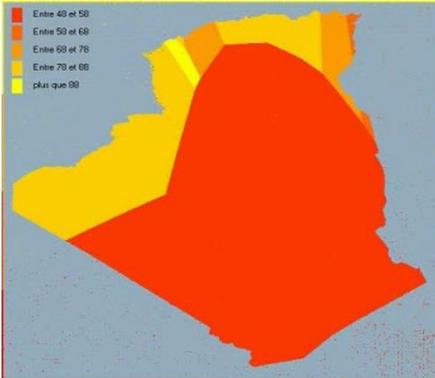


Fig. 12: Eclaircissement Mie sur une surface horizontale par ciel clair à 10 h TU (07/07/90)

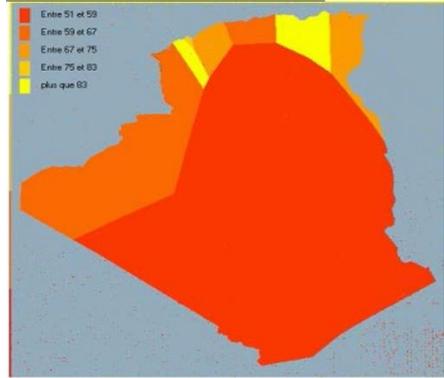


Fig. 13: Eclaircissement Mie sur une surface horizontale par ciel clair à 12 h TU (07/07/90)

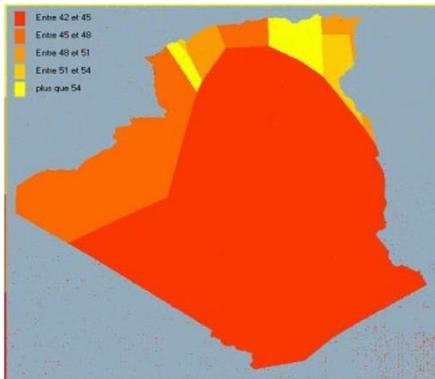


Fig. 14: Eclaircissement multi-réflexion sur une surface horizontale par ciel clair à 10 h TU (07/07/90)

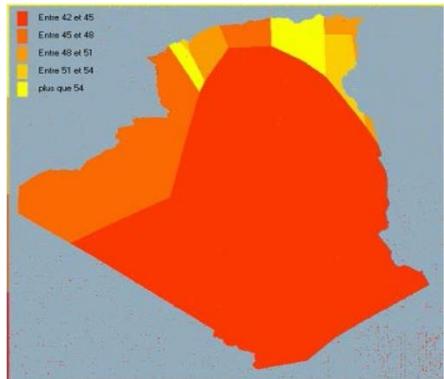


Fig. 15: Eclaircissement multi-réflexion sur une surface horizontale par ciel clair à 12 h TU (07/07/90)

D'après l'équation (43), le rayonnement solaire diffus est la somme des trois composantes (Mie, Rayleigh, et Multi-réflexion).

2.4.3 Eclaircissement Global

L'éclaircissement global (direct et diffus) sur une surface horizontale pour un jour clair peut être écrit comme suit:

$$\hat{I} = [\hat{I}_n \cdot \cos \theta_z + \hat{I}_d] = [\hat{I}_n \cdot \cos \theta_z + \hat{I}_{dr} + \hat{I}_{da}] \times \frac{1}{1 - \rho_g \cdot \rho_a} \quad (48)$$

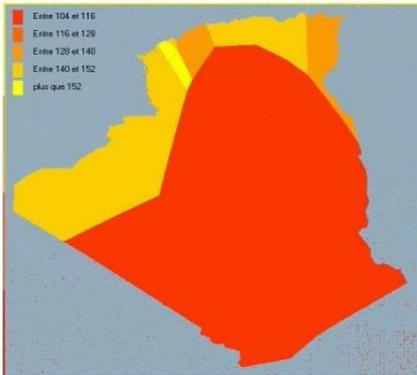


Fig. 16: Eclairage direct sur une surface horizontale par ciel clair à 10 h TU, (07/07/90)

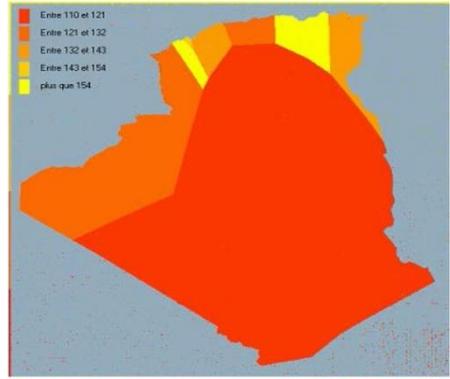


Fig. 17: Eclairage direct sur une surface horizontale par ciel clair à 20 h TU, (07/07/90)

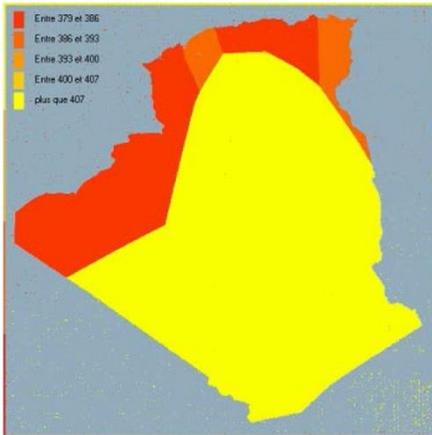


Fig. 18: Eclairage globale sur une surface horizontale par ciel clair à 10 h TU (07/07/90)

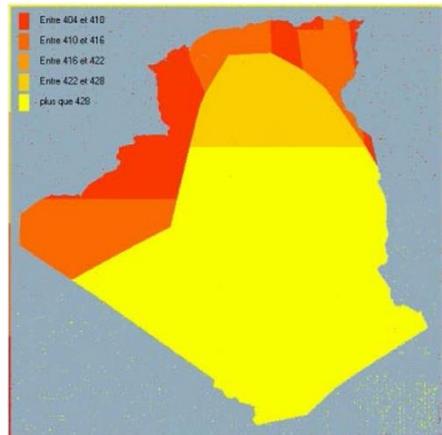


Fig. 19: Eclairage globale sur une surface horizontale par ciel clair à 20 h TU (07/07/90)

2.5 Rayonnement journalier global H , Diffus H_d et direct H_b sur une surface horizontale

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit:

- Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.

- Le rayonnement diffus est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

- Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et diffus. Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale sont données dans le **Tableau 2**.

Chacune des quantités ci-dessous est obtenu à partir de l'intégration sur une journée de ciel clair, correspondant au rayonnement horaire global H , diffus H_d , et direct H_b . Ainsi H est le rayonnement global journalier sur une surface horizontale.

Tableau 2: Rayonnement solaire sur un plan horizontal, notations utilisées

Irradiation solaire Energie reçue pendant une certaine durée W/m ² .durée-1 ou kWh/m ² .durée-1	H_b	Direct	$H = H_b + H_d$
	H_d	Diffus	
	H	Global	
Eclairement solaire Flux instantané W/m ² ou kWh/m ²	\hat{I}_{nh}	Direct	$\hat{I} = \hat{I}_{nh} + \hat{I}_d$
	\hat{I}_d	Diffus	
	\hat{I}	Global	

$$H = \int^{\text{day}} \hat{I} dt \quad (49)$$

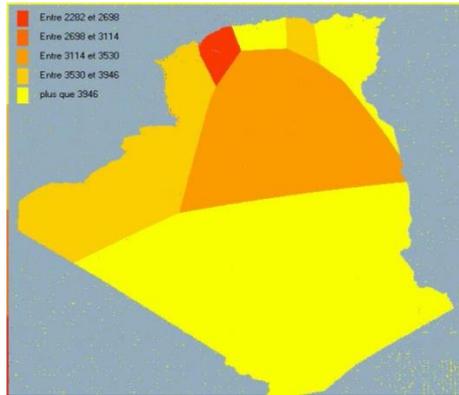


Fig. 20: Rayonnement global journalier sur une surface horizontale à ciel clair (07/07/90)

Le rayonnement diffus total journalier H_d sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles [16],

Dans ce travail, on utilise la méthode d'intégration des valeurs de H_d données par {Eq.(43)},

$$\hat{I}_d = \hat{I}_{dr} + \hat{I}_{da} + \hat{I}_{dm} \Rightarrow \int^{\text{day}} \hat{I}_d dt = \int^{\text{day}} \hat{I}_{dr} dt + \int^{\text{day}} \hat{I}_{da} dt + \int^{\text{day}} \hat{I}_{dm} dt \quad (50)$$

$$\Rightarrow H_d = H_{dr} + H_{da} + H_{dm}$$

Le rayonnement diffus total journalier H_d sur un plan horizontal est la somme des trois composantes, le diffus de Mie journalier H_{da} , le diffus de Rayleigh journalier H_{dr} et le diffus multi-réflexion journalier H_{dm} .

Le rayonnement direct journalier H_b sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles.

Parfois, le faisceau de rayonnement terme journalier est également utilisé. Elle est notée H_b et est définie comme le rayonnement de faisceau journalier sur une surface horizontale.

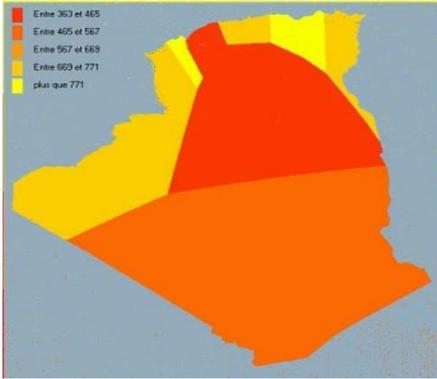


Fig. 21: Rayonnement diffus de Mie journalier sur une surface horizontale (07/07/90)

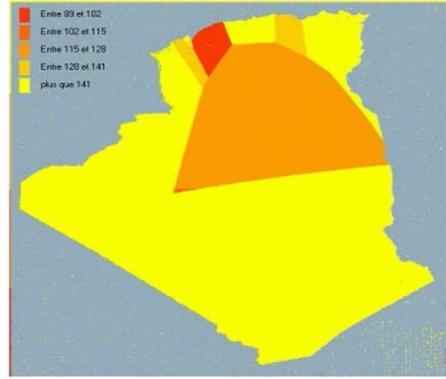


Fig. 22: Rayonnement diffus de Rayleigh journalier sur une surface horizontale (07/07/90)

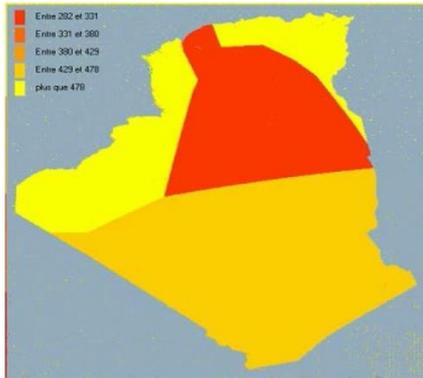


Fig. 23: Rayonnement diffus multi-réflexion journalier sur une surface horizontale, (07/07/90)

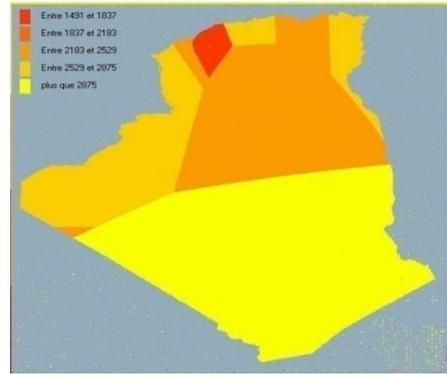


Fig. 24: Rayonnement diffus total journalier sur une surface horizontale, (07/07/90)

On utilise la méthode d'intégration des valeurs de \hat{I}_{nh} données par {Eq.(42)}.

$$H_b = \int^{\text{day}} \hat{I}_{nh} \cdot dt \quad (51)$$

Et le résultat est représentée sur la figure ci-après,

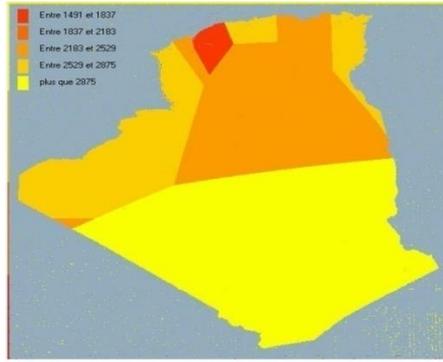


Fig. 25: Rayonnement direct journalier sur une surface horizontale à ciel clair (07/07/90)

Dans la littérature, un autre terme, le rayonnement direct normal pour tous les jours, a également été utilisé. Il représente l'intégrale de H_d sur une période d'une journée. Toutefois, dans ce cas nous n'avons pas besoin d'utiliser ce terme.

3. FORMULES STATISTIQUES

3.1 Irradiation journalière moyenne

C'est la somme des irradiations journalières globales sur le nombre de journées de mesures accumulés pendant la période de comparaison:

$$\bar{H}_c = \sum_1^n H_c \quad (52)$$

$$\bar{H}_m = \sum_1^n H_m \quad (53)$$

3.2 Erreurs statistiques

Largement utilisées, les erreurs statistiques [13] sont biaisées en erreur moyenne (MBE) et la moyenne quadratique erreur (RMSE). Ecarts en pourcentage ou une fraction de la valeur estimée par rapport à la valeur de mesure et l'erreur relative moyenne (MERR) sont définis comme suit:

-Erreur moyenne

$$MBE = \frac{\left[\sum_1^n (H_{ci} - H_{mi}) \right]}{n} \quad (54)$$

Ou bien en pourcentage

$$NDMBE = \frac{\left[\sum_1^n (H_{ci} - H_{mi}) \right]}{n} \times \frac{100}{\bar{H}_m} \quad (55)$$

L'erreur moyenne (MBE ou NDMBE) donne une indication sur une sous estimation ou une surestimation [14] du modèle par rapport aux mesures, elle est négative si le modèle est sous estimé, et inversement, s'il est surestimé.

-Erreur quadratique moyenne

$$RMSE = \sqrt{\frac{\left[\sum_1^n (H_{ci} - H_{mi})^2 \right]}{n}} \quad (56)$$

Ou bien en pourcentage

$$\text{NDRMSE} = \sqrt{\frac{\left[\sum_1^n (H_{ci} - H_{mi})\right]^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{H}_m} \tag{57}$$

L'erreur quadratique moyenne (RMSE ou NDRMSE), représente la fiabilité des modèles. RMSE est d'autant plus petite que le modèle s'approche mieux des résultats de mesures.

-Erreur relative moyenne

$$\text{M.ERR} = \sum_1^n \left(\frac{H_{ci} - H_{mi}}{H_{mi}} \right) \times \frac{100}{n} \tag{58}$$

-Coefficient de corrélation (r)

Le coefficient de corrélation [15] peut être utilisé pour déterminer la relation linéaire entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées, qui peuvent être calculées à partir de l'équation suivante:

$$r = \frac{\sum_1^n (H_{ci} - \bar{H}_c) \times (H_{mi} - \bar{H}_m)}{\sqrt{\sum_1^n (H_{ci} - \bar{H}_c)^2 \times \sum_1^n (H_{mi} - \bar{H}_m)^2}} \tag{59}$$

L'indicateur r varie entre -1 et 1. Une valeur de 1 ou proche de 1 indique un parfait accord entre la valeur mesurée et calculée. Une valeur de -1 ou proche de -1 indique un parfait lien inverse entre la valeur mesurée et calculée. Par contre, une valeur proche de 0 indique un total désaccord.

4. INTERPRETATION DES RESULTATS

4.1 Filtrage des données

Dans le cas d'un ciel clair, nous avons travaillé avec la condition (heure ou jour clair) qui oblige d'utiliser un filtrage qui consiste à éliminer les heures qui ne sont pas claires.

Dans les données disponibles, il y a un fichier horaire contenant l'insolation pour chaque heure de 07 h TU à 18 h TU. On a utilisé comme un filtre pour ignorer les heures ne sont pas claires en affectant **1** pour l'heure claire et **0** pour les autres comme il est montré dans le **Tableau 3** et on fait reproduire entre les données mesurées et les autres estimées.

Tableau 3: Heures claires pour les premiers huit jours (01-86)

7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0

Pour mieux apprécier l'évolution des erreurs statistiques entre les irradiations estimées avec celles mesurées, nous avons représenté des histogrammes, Area, line... pour les formules statistiques (MBE, RMSE, M.ERR) en fonction des modèles utilisés, et ce, pour chaque état du ciel et pour plusieurs échelles (mensuelle et saisonnier).

Les données utilisées dans ce travail sont relatives à un site algérien, Oran. Ainsi, les caractéristiques géographiques de ces sites sont données sur le tableau suivant:

Tableau 4: Caractéristiques géographiques de site d'Oran

	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (°)	Période Rec.
Oran	35.63	0.6	90	Année 1986

a- Echelle mensuelle

Tableau 5: Résultats statistiques de différentes composantes du rayonnement solaire pour chaque mois de l'année

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Global	MERR	-15,7	16,35	5,65	8,2	1,18	5,78	10,28	8,65	2,11	4,2	8,84
	NDRMSE	-15,33	13,09	3,24	-1,26	0,23	3,46	4,52	7,66	1,48	6,5	-0,05
	MBE	-126,09	50,59	31,44	-8,57	2,9	35,26	56,15	67,57	10,49	29	-0,29
	RMSE	162,47	206,67	63,71	48,1	60,32	85,15	102,8	91,19	72,15	55,59	67,54
Direct	MERR	8,22	31,27	8,2	10,99	1,84	9,44	11,76	27,95	5,38	32,72	4,1
	NDRMSE	-17,96	13,59	-3,83	-11,65	-6,66	1,11	9,63	15,43	-3,97	-0,15	-10,64
	MBE	-123,2	41,05	-31,06	-66,62	-63,79	8,4	81,02	94,63	-21,69	-0,56	-53,5
	RMSE	175,64	212,73	95,28	135,8	172,09	169,22	166,5	164,2	106,37	62,4	99,25
Diffus	MERR	8,8	8,1	38,74	43,2	27,09	28,63	8,2	8,6	27,2	37,97	78,32
	NDRMSE	-5,79	11,05	39,3	53,48	21,92	10,21	-6,19	-10,1	29,75	39,95	67,88
	MBE	-8,21	9,35	62,5	58,06	66,69	26,86	-24,87	-27,1	44,63	29,57	53,21
	RMSE	111,92	26,66	88,57	94,84	135,34	122,24	122,1	87,74	88,26	41,14	76



Fig. 26: MBE et RMSE entre les valeurs calculées et mesurées pour chaque mois (rayonnement global 1986)



Fig. 27: MBE et RMSE entre les valeurs calculées et mesurées pour chaque mois (rayonnement direct 1986)

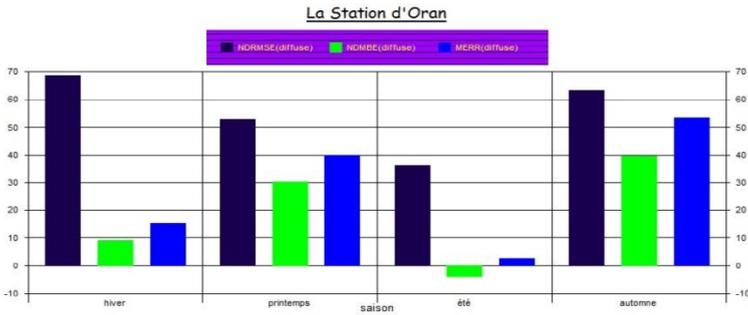


Fig. 28: MBE et RMSE entre les valeurs calculées et mesurées pour chaque mois (rayonnement diffus 1986)

L'étude à l'échelle mensuelle donne le résultat suivant,

- Pour le NDRMSE, Tous les mois donnent la composante globale comme étant la meilleure composante estimée par rapport aux deux autres composantes, sauf le mois de Février qui est donne le composante diffusé.

- Pour le M.ERR, Les mois de Janvier et de Février donnent la composante diffuse comme étant la meilleure composante estimée. Les mois Mars et Novembre donnent la composante directe comme meilleure composante estimée.

- Pour le NDMBE, Les mois de Janvier, Février, Juillet et Août donnent la composante diffuse comme la meilleure composante estimée. Les mois Juin, Octobre et Décembre donnent la composante directe comme la meilleure composante estimée et Les autres mois montrent que le globale est la composante la mieux estimée par rapport aux deux autres composantes.

La composante directe donne une sous-estimation dans la plupart des mois de l'année, comme Janvier, Mars, Avril, Mai, Septembre, Octobre et Novembre. La composante diffuse donnent une sous-estimation dans les mois de Janvier, Juillet et pour le global dans les mois de Janvier, Avril et Novembre.

Les valeurs NDMBE et NDRMSE montrent généralement que la composante globale donne les meilleures estimations.

b- Echelle saisonnière mensuelle

Tableau 6: Résultats statistiques de différentes composantes pour chaque saison de l'année

		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Global	MERR	-15,7	16,35	5,65	5,03	5,03	5,78	10,28	5,78	5,03	5,03	4,2	5,03
	NDMBE	-15,33	13,09	3,24	-1,26	0,23	3,46	4,52	7,66	1,48	6,5	-0,05	12,03
	NDRMSE		53,48										
	MBE	-126,09	50,59	31,44	-8,57	2,9	35,26	-56,15	67,57	10,49	29	-0,29	70,01
Direct	RMSE	162,47	206,67	63,71	48,1	60,32	85,15	102,8	91,19	72,15	55,59	67,54	116,27
	MERR	8,22	31,27	5,03	10,99	1,84	9,44	11,76	27,95	5,38	32,72	5,03	24,38
	NDMBE	-17,96	13,59	-3,83	-11,65	-6,66	1,11	9,63	15,43	-3,97	-0,15	-10,64	8,32
	NDRMSE	25,61	70,44	11,75	23,73	17,98	22,39	19,78	26,77	19,45	16,75	19,74	25,37
Diffus	MBE	-123,2	41,05	-31,06	-66,62	-63,79	8,4	81,02	94,63	-21,69	-0,56	-53,5	39,47
	RMSE	175,64	212,73	95,28	135,8	172,09	169,22	166,5	164,2	106,37	62,4	99,25	120,38
	MERR	5,03	5,03	38,74	43,2	27,09	28,63	5,03	5,03	27,2	37,97	78,32	54,98
	NDMBE	-5,79	11,05	39,3	53,48	21,92	10,21	-6,19	-10,1	29,75	39,95	67,88	28,4
Diffus	NDRMSE	78,92		55,69	87,36	44,49	46,45	30,39	32,59	58,84	55,59	96,95	47,09
	MBE	-8,21	9,35	62,5	58,06	66,69	26,86	-24,87	-27,1	44,63	29,57	53,21	30,54
	RMSE	111,92	26,66	88,57	94,84	135,34	122,24	122,1	87,74	88,26	41,14	76	50,64

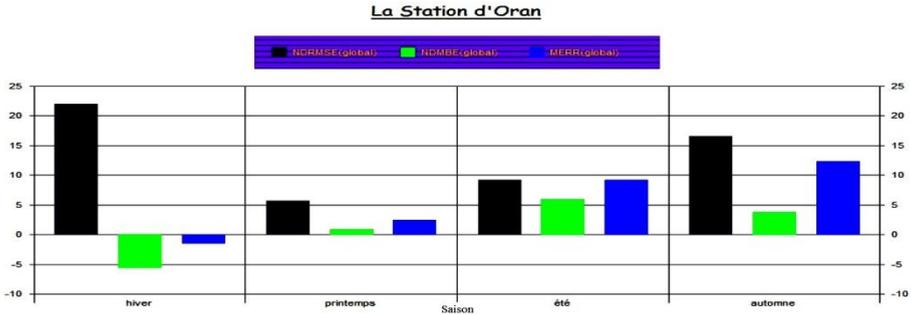


Fig. 29: Erreurs statistiques entre les valeurs calculées et mesurées pour chaque saison (global -1986)

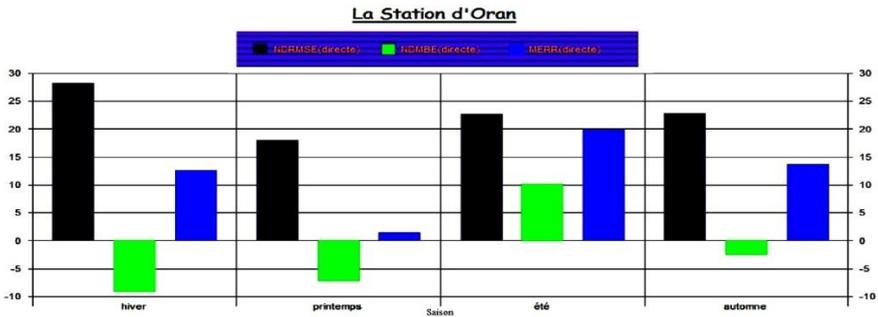


Fig. 30: Erreurs statistiques entre les valeurs calculées et mesurées pour chaque saison (direct -1986)

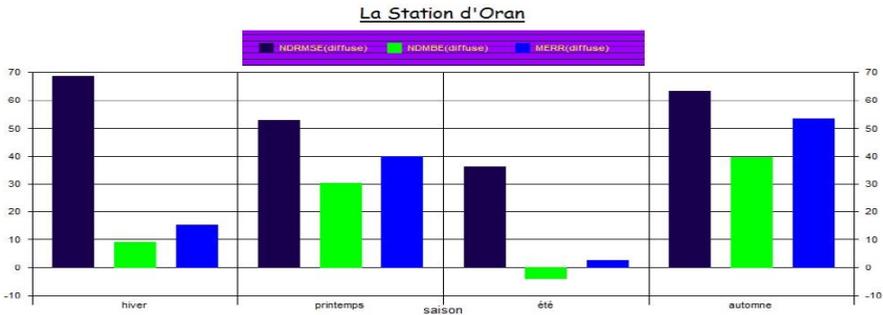


Fig. 31: Erreurs statistiques entre les valeurs calculées et mesurées pour chaque saison (diffus -1986)

L'étude à l'échelle saisonnière montre que,

- Pour le NDRMSE, Toutes les saisons donnent la composante globale comme étant la meilleure composante estimée par rapport aux deux autres composantes.

- Pour le M.ERR, L'été donne la composante diffuse comme la meilleure composante estimée. Le printemps donne la composante directe et l'hiver et l'automne donnent la composante globale comme meilleure composante estimée.

- Pour le NDMBE, L'hiver et le printemps donnent la composante globale comme la meilleure composante estimée. L'été donne le diffus et l'automne donne le direct comme la meilleure composante estimée. La sous-estimation est remarquable en l'hiver pour le global, et en été pour le diffus et dans toute l'année, sauf l'été pour le direct.

c- Etude global

Tableau 7: Résultats statistiques des trois composantes de rayonnement solaire

	Global	Directe	Diffuse
R	0.98	0.95	0.83
NDMBE	1.68	-1.66	13.4
NDRMSE	3.4	22.72	51.09
MERR	5.7	12.26	27.07
MBE	13.97	-10.69	25.2
RMSE	103.55	146.34	96.1
H _m	832.61	643.98	188.08

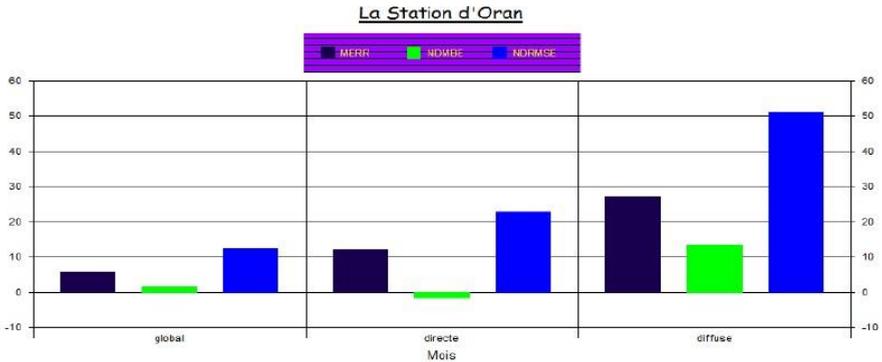


Fig. 32: Erreurs statistiques entre les valeurs calculées et mesurées pour les trois composantes (1986)

L'estimation des différentes composantes calculées par ciel clair donne des résultats appréciables par rapport aux valeurs mesurées au sol. Le rayonnement global est la composante la mieux estimée par rapport aux deux autres composantes.

L'étude comparative entre les valeurs mesurées et calculées nous a montré qu'il a une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles calculées par les différentes formules et pour les trois composantes.

4. CONCLUSION

Ce travail a pour objet le calcul et la cartographie des différentes composantes du rayonnement solaire (direct, diffus total, global, diffus de mie, diffus de Rayleigh et multi-réflexions) en utilisant les données météorologiques, coordonnées géographiques et le numéro du jour.

La méthode développée consiste à adapter des modèles classiques aux modèles qui s'appliquent à la fois aux données météorologiques au sol et coordonnées géographiques.

L'étude comparative entre les valeurs mesurées et calculées nous a montré que l'irradiance globale est la composante la mieux estimée par rapport aux deux autres composantes. L'irradiance diffuse est le paramètre le moins estimé par le modèle utilisé.

L'étude nous a montré que nous pouvons créer des cartographies pour toutes les composantes du rayonnement solaire (direct, diffus total, global, diffus de mie, diffus de Rayleigh et multi- réflexions) à partir des données météorologiques mesurées au sol et les coordonnées géographiques, et que la précision de ces cartographies est proportionnelle au nombre de stations et inversement proportionnelle à la surface totale.

REFERENCES

- [1] A. Mefti et M.Y. Bouroubi, '*Estimation et Cartographie de la Composante Globale du Rayonnement Solaire*', Rev. Energ. Ren. : Valorisation, pp. (1999) 219-224.
- [2] N. Bachari, N. Benabadji, A. Razagui et A. H. Belbachir, '*Estimation et Cartographie des Différentes Composantes du Rayonnement Solaire au Sol à Partir des Images Météosat*', Rev. Energ. Ren. Vol. 4 (2001) 35-47.
- [3] R.K. Swartman and O. Ogunlade, '*Solar Radiation Estimates from Common Parameters*', Solar Energy, Vol. 11, pp. 170 -172, 1967.
- [4] G.W. Padridge and C.M.R. Platt, '*Radiative Process in Meteorology and Climatology*', Elsevier, New York, 1976.
- [5] A.A. Lacis and J. Hansen, '*A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Atmosphere*', Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 31, N°1, pp. 118 - 132, 1974.
- [6] Thomas K. Van Heuklon, '*Estimating Atmospheric Ozone for Solar Radiation Models*', Solar Energy, Vol. 22, N°1, pp. 63 - 68, 1979.
- [7] B.E. Psiloglou, M. Santamouris, C. Varotsos and D.N. Asimakopoulos, '*A New Parameterization of the Integral Ozone Transmittance*', Solar Energy, Vol. 56, N°6, pp. 573 - 581, 1996.
- [8] J.A. Davis and D.C. Mc Kay, '*Model for Estimating of Incoming Solar Irradiation*', Report to A.E.S Department of Geography Ontario, 1978.
- [9] M. Mächer, '*Parametrization of Solar Radiation Under Clear Sky*', M.S Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1983.
- [10] S.J. Reddy, '*An Empirical Method for Estimation of Net Radiation Intensity*', Solar Energy, Vol. 13, pp. 289 - 291, 1971.
- [11] D.V Hoyt, '*A Model for Calculation of Global Insolation*', Solar Energy, Vol. 21, N°1, pp. 27 - 35,
- [12] J.A. Sabbagh, A.A.M. Sayigh and E.M.A. El-Salam, '*Estimation of the Total Solar Radiation from Meteorological Data*', Solar Energy, Vol. 19, N°3, pp. 307 - 311, 1977.
- [13] S. Benkacali et K. Gairaa, '*Techniques de Modélisation de l'Irradiation Solaire sur un Plan Incliné*', International Journal of Scientific Research & Engineering Technology, IJSET, Vol. 3, pp. 102 - 108, 2015.
- [14] K. Kerkouche, F. Cherfa, A. Hadj Arab, S. Bouchakour, K. Abdeladim et K. Bergheul, '*Evaluation de l'Irradiation Solaire Globale sur une Surface Inclinée selon Différents Modèles pour le Site de Bouzaréah*', Revue des Energies Renouvelables Vol. 16, N°2, pp. 269 – 284, 2013.
- [15] Abdul Majeed Muzathik, Wan Mohd Norsani Wan Nik, Khalid Samo , Mohd. Zamri Ibrahim, '*Hourly Global Solar Radiation Estimates on a Horizontal Plane*', Journal of Physical Science, Vol. 21, N°2, pp. 51 - 66, 2010.
- [16] M. Mesri, A. Cheknane, N. Bachari, I. Rougab, '*Estimation of Monthly Total Radiation daily by two weather approach in Algeria*', Canadian Journal of Physics, Vol. 89, N°12, pp. 1215 - 1218, 2014.