



Etude de performance des modèles large bande pour des conditions de ciel clair: cas de sud de l'Algérie

Said Benkaciali ^{a,*}, Gilles Notton ^b, Cyril Voyant ^{c,d}, Kacem Gairaa ^a

^a *Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria*

^b *University of Corsica, UMR CNRS 6134, Research Centre George Peri, Route des Sanguinaires, F - 20000 Ajaccio, France*

^c *CH Castelluccio, service de radiothérapie, Ajaccio (France)*

^d *Université de Corse, laboratoire SPE, UMR6134, Ajaccio (France)*

ARTICLE INFO

Article history:

Received 06 July 2020

Accepted 05 October 2020

Mots clés:

Composantes solaires,
Données météorologiques,
Modèles ciel clair,
Prédicteurs statistiques

Keywords:

Solar components,
Meteorological data,
Clear sky models,
Statistical predictors.

RESUME

Le rayonnement solaire global horizontal (GHI) est l'une des principales variables utilisées pour la gestion des installations solaires ; la connaissance de sa répartition géographique et de sa variation temporelle est d'une importance primordiale pour de nombreuses applications. Le cas du GHICs pour un ciel clair est utilisé comme fonction de normalisation dans de nombreuses prévisions de production solaire. Afin de contourner le manque de mesures au sol, diverses techniques de modélisation peuvent être appliquées pour estimer la composante globale (GHICS). Dans ce travail, cinq modèles ont été testés pour estimer le GHICs horaire : Yang, Solis, Bird-Hulstrom, ESRA et McClear. Ainsi, un classement de ces modèles est proposé sur la base des indicateurs de performances. Les résultats ont montré que les modèles de Bird-Hulstrom, McClear, présentent les performances.

ABSTRACT

The global solar radiation (GHI) is the essential energy variable for many energy systems; the knowledge of its geographic distribution and temporal repartition is paramount importance to the many applications. In case, clear-sky solar irradiance (GHICs) is used as a normalization function for many solar production forecast. In order to overcome the lack of ground measurements, five models can be applied to estimate GHICS. In this work, five clear-sky models were tested to estimate the hourly global solar irradiance (GHICs) received on horizontal surface: Yang, Solis, Bird-Hulstrom, ESRA and McClear.

* Corresponding author, E-mail address: sbenkaciali@gmail.com

Tel.: +213 672351728



1. Introduction

En raison de l'intérêt croissant pour le changement climatique et les enjeux actuels qui concernent l'efficacité énergétique et l'amélioration de la répartition des sources renouvelables, l'énergie solaire est devenue l'alternative aux combustibles fossiles la plus importante dans le Monde. À l'échelle industrielle ou au niveau individuel, les évaluations des ressources en énergie solaire doivent être effectuées par le biais d'études de faisabilité comme priorité absolue. En effet, la détermination du rayonnement solaire est requise par les exploitants de centrales solaires photovoltaïques pour estimer la puissance électrique qui sera produite à différents horizons temporels. Cette phase prédictive est absolument nécessaire pour les systèmes de gestion de l'énergie et pour augmenter la part des énergies renouvelables dans les réseaux électriques qui est actuellement limitée par la variabilité importante de ces sources. L'incertitude globale du rendement et des performances énergétiques des systèmes photovoltaïques (PV) est directement affectée par la précision de l'estimation du rayonnement solaire global [1], il en est de même pour les centrales solaires à concentration (CSP) pour lesquelles une grande source d'incertitude est liée à l'estimation du rayonnement solaire direct [2]. Il est également reconnu par les financeurs des projets solaires qu'une estimation de la ressource solaire est absolument indispensable [3] et ce d'autant plus que la part de l'énergie photovoltaïque dans la production d'électricité a considérablement augmentée au cours des dernières décennies [4,5].

Au cours des dernières années, de nombreux modèles ont été développés pour la modélisation théorique de l'éclairement solaire global horizontal (GHI) [6,7]. Ces derniers nécessitent notamment, la connaissance de l'éclairement solaire en l'absence de couverture ou d'occurrence nuageuse que l'on appelle communément le « ciel clair » (GHI_{cs}). Ce dernier peut être utilisé comme fonction de normalisation dans quelques applications solaire et qui est défini comme étant le rapport entre le GHI et l'indice de ciel clair CSI.

De nombreux modèles GHI_{cs} basés sur des mesures spectrales ont été développés, tels que ceux de Atwater-Ball [8], Hulstrom-Bird [9] et Mc-Davis-McKay [10]. Il existe également d'autres modèles de ciel clair récemment élaborés, comme ESRA [11], Solis [12], REST2 [13] et McClear [14]. Dans ce travail, cinq modèles large bande (Bird-Hulstrom, Solis, Yang, ESRA et McClear) ont été choisis et comparés avec les mesures au sol afin d'estimer l'irradiation globale horaire reçue sur un plan horizontal au site de Ghardaïa pour des journées ciel clair.

Cet article est organisé comme suit: la section 2 présente une description du site étudié ainsi que des instruments de mesure. La section 3 présente les formules astronomiques et atmosphériques adoptées. Tous les modèles sont brièvement décrits dans la quatrième section.

Les résultats et les discussions ont été rapportés dans la section 5. Enfin, la dernière section a été consacrée à la conclusion.

2. Description du site et matériels utilisés

2.1 Description du site

Ghardaïa est située au sud de l'Algérie (latitude : 32 ° N, longitude : 3.80 ° E, altitude : 450m). Son climat est sec et aride. La région de Ghardaïa est caractérisée par un potentiel solaire exceptionnel : la moyenne annuelle de DGSi reçu sur l'horizontale est d'environ 6000Wh / m² (~ 21,6MJ / m²), les irradiances solaires journalières reçues sur une surface horizontale et sur une surface inclinée à la latitude du lieu dépassent respectivement les 6400Wh / m² et 7500 Wh/m² en moyenne annuelle. Nous avons constaté durant l'année, des valeurs élevées de la fraction d'insolation comprises entre 50% et 90%. En outre, nous avons constaté aussi que pour Ghardaïa la fréquence pour laquelle le ciel est clair est élevée.

2.2 Description du site

Les données sont enregistrées à l'unité de recherche appliquée aux énergies renouvelables en utilisant une station radiométrique contenant trois systèmes de mesure ; une partie fixe contenant un pyranomètre (type EKO) pour mesurer l'éclairement solaire globale sur une surface horizontale (en W / m²), et un thermo hygromètre pour mesurer la température (en ° C) et l'humidité relative (en %). Une partie mobile, capable de se déplacer du lever au coucher du soleil et se compose d'un pyréliomètre pour mesurer l'éclairement solaire directe sur une surface normale et d'un pyranomètre EKO pour mesurer le diffus. De plus, afin de suivre les données, des appareils radiométriques entiers ont été connectés au système d'acquisition (à savoir un enregistreur de données). Tous les appareils cités ci-dessus sont reliés à une acquisition de marque CAMPBELL SCIENTIFIC Cr100x. Celle-ci est reliée par interface RS232, à un micro-ordinateur dans lequel on a installé un logiciel d'exploitation de données (datalogger).

3. Paramètres astronomiques et atmosphériques

Nous allons présenter dans ce paragraphe les principales grandeurs utilisées dans ces modèles de ciel clair.

3.1 Les paramètres astronomiques

3.1.1 La déclinaison

L'angle entre la direction terre-soleil et le plan équatorial est appelé déclinaison (δ). Elle varie au cours de l'année de $-23,45^\circ$ au solstice d'hiver à $+23,45$ au solstice d'été. La déclinaison est calculée en utilisant Eq. 1 [17,18].

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (284 + n_j)\right) \quad (1)$$

Où n_j est le numéro du jour dans l'année (1 pour le 1^{er} janvier à 365 pour le 31 décembre).

3.1.2 Excentricité de l'orbite terrestre

L'excentricité de l'orbite terrestre induit une variation de la distance Terre-Soleil de 1,7% sur l'année. Le facteur de correction d'excentricité de l'orbite terrestre (E_0) est obtenu par Eq. 2 [17-19].

$$E_0 = 1.00011 + 0.034221 \times \cos \Gamma + 0.00128 \times \sin \Gamma + 0.000719 \times \cos 2\Gamma + 0.000077 \times \sin 2\Gamma \quad (2)$$

Avec l'angle journalier donné (en radian) par $\Gamma = 2\pi \frac{n_j - 1}{365}$

3.1.3 Temps solaire vrai

Le temps solaire vrai (TSV) dépend de la longitude du lieu, et d'un terme appelé, équation du temps (E_t) qui est dû aux irrégularités dans le mouvement apparent du soleil autour de l'axe de la terre (ellipticité de l'orbite terrestre et l'obliquité de l'écliptique). Le temps solaire vrai TSV est obtenu en utilisant Eqs. 3-4 [17-19].

$$TSV = \text{temps local} + \text{longitude du lieu} - E_t \quad (3)$$

$$E_t = 229.2 \times (75.10^{-6} + 186.10^{-5}) \times \cos \Gamma - 0.03207 \times \sin \Gamma - 0.014615 \times \cos 2\Gamma - 0.04089 \times \sin 2\Gamma \quad (4)$$

3.1.4 Angle horaire

L'angle horaire (ω) est le déplacement angulaire du soleil à l'est ou à l'ouest du méridien local et est estimé par le biais de l'Eq. 5.

$$\omega = 12 \times (tsv - 12) \quad (5)$$

3.1.5 Hauteur solaire

La hauteur solaire (h) est l'angle formé par la surface horizontale du site avec la direction soleil-terre [20]. En particulier, la valeur de 0° , correspond au lever et au coucher du soleil. Son expression (Eq. 6) est donnée en fonction de la déclinaison solaire de l'angle horaire et de la latitude (φ) du lieu : (Ghardaïa : $\varphi = 32.37^\circ$).

$$h = \sin(\varphi) \times \sin(\delta) + \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) \quad (6)$$

On définit aussi l'angle zénithal (θ_z), à partir de l'équation 7 :

$$\theta_z = 90^\circ - h \quad (7)$$

3.1.6 Constante solaire et éclairage hors atmosphère

La constante solaire (I_{0c}) est définie comme la moyenne annuelle de l'éclairage solaire hors atmosphère reçu par une surface normale aux rayons du soleil. Une valeur de 1367 W/m^2 a été adoptée par le World Radiation Center (WRC) avec une précision de 1% [18]. Récemment, de nouvelles mesures ont montré que la valeur de la constante solaire est de $1361,1 \text{ W/m}^2$ [21]. L'éclairage solaire hors atmosphère (I_{0n}) s'exprime alors en utilisant Eq. 8 [20,22].

$$I_{0n} = I_{0c} \times E_0 \quad (8)$$

3.2 Les paramètres atmosphériques

Il est important de noter que les paramètres telles que le trouble de Linke pour une masse atmosphérique égale à 2 (T_{LM2}) déterminé empiriquement, et le coefficient de trouble d'Angström, déterminé à partir des épaisseurs optiques des aérosols pour une longueur d'onde, 0.55 μ m, extraites via le service HelioClim-3 (<http://www.soda-pro.com>) [15, 16] sont utilisés comme entrés dans les modèles ciel clair.

3.2.1 Masse d'air

La masse d'air est la longueur du chemin optique de l'éclairement solaire à travers l'atmosphère ; au cours de ce trajet, le rayonnement est diffusé et absorbé. La masse d'air corrigée (M_a) pour une pression atmosphérique P (mesurée sur le site) et une pression standard $P_0 = 1013.25$ mbar se calcule à partir de l'équation de Kasten [23,17] (Eq. 10; M_r masse d'air optique relative).

$$M_a = M_r \times P/P_0 = \frac{P/P_0}{(\sin h + 0.15 \times (\theta_z + 3.885)^{-1.253})} \quad (10)$$

3.2.2 Longueur du chemin optique relative à l'eau précipitable

La longueur du chemin optique relative à l'eau précipitable (U_w) est définie comme le produit de deux paramètres (Eq. 11) : l'épaisseur de la colonne d'eau précipitable (w) calculée par la formule de Leckner dans Eq. 12) [25] et la masse d'air optique relative (M_r) [9, 17, 24].

$$U_w = M_r \times w \quad (11)$$

$$w = \frac{0.493 \times 0.01 \times \eta \times \left\{ 2623 - \frac{5416}{T + 273} \right\}}{T + 273} \quad (12)$$

Sachant que, η et T sont l'humidité relative et la température de l'air ambiant mesurées respectivement en % et °C.

3.2.3 Longueur du chemin optique relative à l’ozone

La longueur du chemin optique relative à l’ozone (U_{oz}) est définie dans Eq. 13 à partir de l’épaisseur verticale de la couche d’ozone l_{oz} (en atm-cm ; Eq. 14) [26], et de la masse d’air optique relative (Eq. 10) [17].

$$U_{oz} = M_r \times l_{oz} \quad (13)$$

$$l_{oz} = \frac{1}{1000} \times \left\{ 235 + \left[150 + 40 \sin \left(0.9856 (n_j - 30) \right) + 20 \sin \left(3 (Long + 20) \right) \right] \times \sin^2(1.28 \varphi) \right\} \quad (14)$$

3.2.4 Profondeur optique spectrale des aérosols

La profondeur optique des aérosols (AOD_λ) mesure l’extinction du rayonnement solaire à travers l’atmosphère par les aérosols. Angström a suggéré une formule d’évaluation généralement connue sous le nom de formule de turbidité d’Angström donnée par Eq. 15 [17, 27].

$$AOD_\lambda = \beta(\lambda)^{-\alpha} \quad (15)$$

Dans cette équation, β est appelée coefficient de turbidité d’Angstrom et α l’exposant d’Angstrom.

Cependant, pour des études de modélisation, il est utile d’utiliser la profondeur optique totale (i.e., intégrée sur toutes les longueurs d’ondes) qui est estimée à partir des profondeurs optiques spectrales à des longueurs d’ondes de 0.38 et 0.5 μm [17, 28].

$$AOD = 0.2758 \times AOD_{0.38} + 0.35 \times AOD_{0.5} \quad (16)$$

Le coefficient β peut être déterminé à partir de l’ AOD_λ en utilisant l’Eq. 15, pour des longueurs d’onde, 0.55 et 1.24 μm via le service HelioClim-3 (<http://www.soda-pro.com>). Sachant aussi que la valeur du coefficient de l’exposant d’Angstrom qui est généralement utilisée dans divers

travaux scientifiques, est de 1.3 [17, 28]. En employant la méthode indiquée précédemment, les valeurs de β sont alors comprises entre 0.02 et 0.5.

4. Les modèles ciel clair

Cinq modèles ciel clair (Tableau 1) ont été étudiés afin d’estimer le rayonnement solaire global par pas horaire (GHI_{CS}) à partir des modèles ciel clair utilisés dans la détermination des éclairagements direct I_b et diffus I_d par rapport à un plan horizontal (Eq. 17)

$$I = I_b \times \sin h + I_d \tag{17}$$

L’énergie horaire (en Wh/m²) est alors obtenue par intégration sur l’heure comme le montre Eq. 18 (t en heure)

$$GHI_{CS} = \int_t^{t+h} I(t) dt \tag{18}$$

AOD(0.55 μ m)

AOD(1.24 μ m)

Tableau 1. Les paramètres requis pour les modèles ciel clair.

Modèles	Paramètres													
	h	T_{LM2}	w	β	ρ_a	ρ_g	AOD (0.55 μ m)	AOD (1.24 μ m)	δ_r	P	T	η	l_{oz}	ω_o
Bird-Hulstrom	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Yang	•		•	•		•	•		•	•	•	•	•	•
Solis	•		•	•		•	•		•	•	•			
ESRA	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•			
McClear														

4.1 Modèle de Bird-Hulstrom

Le modèle de Bird et Hulstrom [24] est l’un des modèles de rayonnement par ciel clair les plus utilisés dans des travaux scientifiques [17, 29, 30]. Il considère que l’éclairage hors-atmosphère I_{on} est atténué par cinq phénomènes (atténuations traduites par des termes de transmittances) : l’absorption des gaz permanents (τ_g), la diffusion de Rayleigh (τ_r), l’absorption

de la vapeur d'eau (τ_{vp}), l'absorption de l'ozone (τ_{oz}) et la diffusion des aérosols (τ_{ae}). L'expression de l'éclairement direct I_b s'écrit alors en fonction du produit des transmittances (Eq. 19). Tandis que l'éclairement diffus I_d s'exprime en fonction de la somme des divers termes (Eq. 23), provenant de la diffusion de Rayleigh (I_{dr} , Eq. 20), de la diffusion des aérosols après le premier passage à travers l'atmosphère (I_{dae} , Eq. 21), et des diffusions multiples (I_{dm} , Eq. 22) qui sont dues à diverses réflexions entre la terre et l'atmosphère.

$$I_b = 0.9662 \times I_{0n} \times \tau_r \times \tau_{oz} \times \tau_{vp} \times \tau_g \times \tau_{ae} \quad (19)$$

$$I_{dr} = \frac{0.79 \times I_{0n} \times \tau_{oz} \times \tau_{vp} \times \tau_g \times \tau_{aa} \times 0.5 \times (1 - \tau_r)}{1 - M_a + M_a^{1.02}} \quad (20)$$

$$I_{dae} = \frac{0.79 \times I_{0n} \times \tau_{oz} \times \tau_{vp} \times \tau_g \times \tau_{aa} \times Fc \times \left(1 - \frac{\tau_{ae}}{\tau_{aa}}\right)}{1 - M_a + M_a^{1.02}} \quad (21)$$

$$I_{dm} = (I_b + I_{dr} + I_{dae}) \times \left(\frac{\rho_g \times \rho_a}{1 - \rho_g \times \rho_a}\right) \quad (22)$$

$$I_d = I_{dr} \times \sin h + I_{dae} \times \sin h + I_{dm} \times \sin h \quad (23)$$

où :

ρ_g et ρ_a sont les albédos du sol et atmosphérique. Nous prendrons l'albédo du sol $\rho_g = 0.3$ pour Ghardaïa. L'albédo atmosphérique, se calcule à partir de Eq. 24 :

$$\rho_a = 0.0685 + 0.17 \times (1 - \tau_{ae}) \times \omega_0 \quad (24)$$

Fc et ω_0 , représentent respectivement les facteurs de rétrodiffusion et de diffusion unique. Les valeurs de ces paramètres ont été fixées par Bird-Hulstrom, à 0.84 et 0.9. τ_{aa} , étant la transmittance après l'absorption des aérosols atmosphérique (Eq. 25).

$$\tau_{aa} = 1 - [(1 - \omega_0) \times (1 - M_a + M_a^{1.06}) \times (1 - \tau_{ae})] \quad (25)$$

Les expressions des autres transmittances sont indiquées dans [17].

4.2 Modèle de Yang

Il s'agit d'un modèle ciel clair développé par Yang et al [15,16], basé sur les modèles spectrales de Leckner [25]. L'atténuation du rayonnement solaire à travers l'atmosphère est modélisée en

multipliant l'éclairement hors-atmosphère par les cinq coefficients de transmittance, comme cité dans la sous-section précédentes 2.3.1, mais avec des expressions différentes. Les expressions pour I_b et I_d sont données dans Eqs 26 et 27.

$$I_b = I_{0n} \times (\tau'_r \times \tau'_{oz} \times \tau'_{vp} \times \tau'_g \times \tau'_{ae} - 0.013) \quad (26)$$

$$I_d = I_{0n} \times \sin h \times (\tau'_{oz} \times \tau'_{vp} \times \tau'_g \times (1 - \tau'_r \times \tau'_{ae}) + 0.013) \quad (27)$$

Les expressions des autres transmittances sont indiquées dans [15,16].

4. 3 Modèle de Solis

Il s'agit d'un modèle de rayonnement solaire par ciel clair qui est basé sur la relation Lambert-Beer et le modèle de transfert radiatif (RTM) présenté par Ineichen et al. [12,29]. Les composantes I_b et I_d s'expriment en termes des profondeurs optiques totales de l'atmosphère (τ_b et τ_d) et sont calculées à partir de la hauteur de vapeur d'eau, de l'épaisseur optique des aérosols (AOD) pour une longueur d'onde de $0,7\mu\text{m}$ (Eq. 16), de l'éclairement hors-atmosphère modifiée (I_0), de la hauteur du soleil (h) et des constantes d'ajustement b et d comme le montre les Eqs. 28 et 29 :

$$I_b = I_0 \times \sin h \times \exp\left(\frac{\tau_b}{\sin^b h}\right) \quad (28)$$

$$I_d = I_0 \times \sin h \times \exp\left(\frac{\tau_d}{\sin^d h}\right) \quad (29)$$

Les expressions des paramètres du modèle sont indiquées dans [12].

4.4 Modèle ESRA

Ce modèle a été développé dans le cadre de l'Atlas européen du rayonnement solaire (ESRA) [11], à MINES Paris Tech en collaboration avec plusieurs partenaires européens. Ce modèle ESRA est décrit et analysé avec pour objectif principal d'être utilisé pour estimer le rayonnement solaire au niveau du sol à partir d'images satellites avec la méthode Heliosat-2. Le modèle est basé essentiellement sur la turbidité de Linke (T_{LM2}) pour une masse d'air $M_a = 2$,

sur l'épaisseur optique de Rayleigh (δ_r). Les éclairissements direct et diffus sur une surface horizontale sont donnés par les Eqs. 30 et 31.

$$I_b = I_{0n} \times \sin h \times \exp(-0.8662 \times T_{LM2} \times \delta_r \times M_a(h_c)) \quad (30)$$

$$I_d = I_{0n} \times \sin h \times T_{rd} \times F_d \quad (31)$$

$M_a(h_c)$, étant la masse d'air donnée (Eq. 10), qui s'expriment cette fois-ci en fonction de la hauteur du soleil corrigée (h_c) par un terme dû à la réfraction atmosphérique [11] comme le montre Eq. 32.

$$h_c = h + \frac{0.1594 + 1.123 \times \left(\frac{\pi}{180} h\right) + 0.065656 \times \left(\frac{\pi}{180} h\right)^2}{1 + 28.9344 \times \left(\frac{\pi}{180} h\right) + 277.397 \times \left(\frac{\pi}{180} h\right)^2} \quad (32)$$

Le coefficient de trouble de Linke est défini comme le nombre d'atmosphères sèches propres (sans particules d'aérosols) reproduisant l'atténuation du rayonnement extraterrestre causée par les couches de l'atmosphère réelle, c'est-à-dire la diffusion de Rayleigh, l'absorption par la vapeur d'eau, l'absorption par l'ozone l'absorption et la diffusion par les particules d'aérosol. Généralement, pour des raisons de simplification c'est le trouble de Linke pour une masse d'air égale à 2 qui est utilisée [31].

Dans le contexte de notre étude, la formule empirique [32] utilisée dans notre travail pour le trouble de Linke (T_{LM2} , Eq. 33), s'exprime en fonction de l'épaisseur de colonne de la vapeur d'eau (w ; Eq. 12), et du coefficient β (Eq. 15).

$$T_{LM2} = (1.8494 + 0.2425 \times w - 0.0203 \times w^2) + \beta(15.427 + 0.3153 \times w - 0.0254 \times w^2) \quad (33)$$

Dans le modèle ESRA, l'épaisseur optique de Rayleigh (δ_r) s'exprime comme suit :

- Si $M_a(h_c) \leq 20$, Eq. 34

$$\delta_r = \frac{1}{6.6296 + 1.7513 \times M_a - 0.1202 \times M_a^2 + 0.0065 \times M_a^3 - 0.00013 \times M_a^4} \quad (34)$$

- Si $M_a(h_c) > 20$, Eq. 35.

$$\delta r = \frac{1}{10.4 + 0.718 \times M_a(h_c)} \quad (35)$$

Le terme T_{rd} correspond à la transmission diffuse au zénith (Eq. 36), modulé par un facteur angulaire (F_d ; Eq. 37). Dont les paramètres ($A0$, $A1$ et $A2$) sont estimés à partir des Eqs. 38 à 40.

Sous la contrainte, $T_{LM2} > 6$, les valeurs de F_d au lever et au coucher du soleil seront acceptables,

$$T_{rd} = -1.5843 \times 10^{-2} + 3.0543 \times 10^{-2} \times T_{LM2} + 3.797 \times 10^{-4} \times T_{LM2}^2 \quad (36)$$

$$F_d = A0 + A1 \times \sin h + A2 \times \sin^2 h \quad (37)$$

$$A0 = 2.6463 \times 10^{-1} - 6.1581 \times 10^{-2} \times T_{LM2} + 3.1408 \times 10^{-3} \times T_{LM2}^2 \quad (38)$$

$$A1 = 2.0402 + 1.8945 \times 10^{-2} \times T_{LM2} - 1.1161 \times 10^{-2} \times T_{LM2}^2 \quad (39)$$

$$A2 = -1.305 + 3.9231 \times 10^{-2} \times T_{LM2} + 8.5079 \times 10^{-3} \times T_{LM2}^2 \quad (40)$$

ou encore, si cette condition n'est pas vérifiée le terme $A0$ deviendrait négatif.

4.5 Modèle McClear

C'est un modèle physique développé par Mines Paris Tech, qui est vérifié pour des conditions sans nuages [33]. Ce modèle exploite les résultats récents sur les propriétés des aérosols et le contenu total des colonnes de vapeur d'eau et d'ozone produits par le projet MACC-II (Monitoring Atmosphere Composition and Climate) [29]. Ces paramètres peuvent être implémenté dans le modèle afin d'estimer les différentes composantes du rayonnement solaire, en tous les points du globe et par pas d'une minute, d'une heure, d'un quart d'heure, etc. Cependant, nous avons eu accès directement à l'irradiation globale à partir du service copernicus, (<http://www.soda-pro.com/>). Durant l'année 2015, nous avons choisi plusieurs journées ciel clair (i.e., 80 jours) en utilisant l'approche visuelle et avec un enregistrement par pas horaire, en choisissant les coordonnées du site de Ghardaïa. En outre, afin d'éliminer les erreurs de mesures aux environs du lever et du coucher du soleil, nous avons sélectionné des journées ciel clair pour lesquelles les élévations solaires (h , Eq. 6) sont supérieures à 5° .

5. Résultats et discussion

Dans ce travail, les performances des modèles d'Hulstrom-Bird, Yang, Solis, ESRA et de McClear ont été analysées graphiquement et via l'utilisation de trois métriques de l'erreur (nMBE, nMAE et nRMSE) [34,35] et ce, afin d'estimer l'énergie solaire globale horaire par ciel clair par rapport à plan horizontal (GHI_{cs}) au site de Ghardaïa (sud de l'Algérie). Les résultats indiqués par les indicateurs de performance des cinq modèles (Bird-Hulstrom, Yang, Solis, ESRA et McClear) sont présentés dans le tableau 1 et Fig. 1.

Nous avons constaté qu'il existe de grands écarts de performances entre le modèle McClear (nMBE = -1.57%, nMAE=6.60%, nRMSE=8.18%) et les modèles de Yang, Solis et ESRA, où les valeurs des nRMSE, nMAE et nMBE dépassent 11%, 8% et $\pm 7\%$. Cependant, nous avons enregistré des valeurs basses des indicateurs nMBE, nMAE et nRMSE pour les modèles de Bird-Hulstrom (nMBE = 0.25%, nMAE = 3.61%, nRMSE = 4.46%). et McClear (nMBE = -1.25%, nMAE = 6.60%, nRMSE = 8.18%).

Nous voyons clairement qu'il y a un écart important entre les valeurs des indicateurs correspondantes au modèle de Bird-Hulstrom et celles des autres modèles. En plus, les valeurs de tous les prédicteurs d'erreur n'atteignant pas les 5%. Par contre pour les autres modèles, où les erreurs dépassent les 5%, excepté celles du modèle McClear dont la valeur du nMBE ne dépasse pas 2%. Les résultats de ce graphique indiquent aussi que seul les valeurs des sorties du modèle de Yang surestimaient le GHI_{cs} (i.e., nMBE > 0).

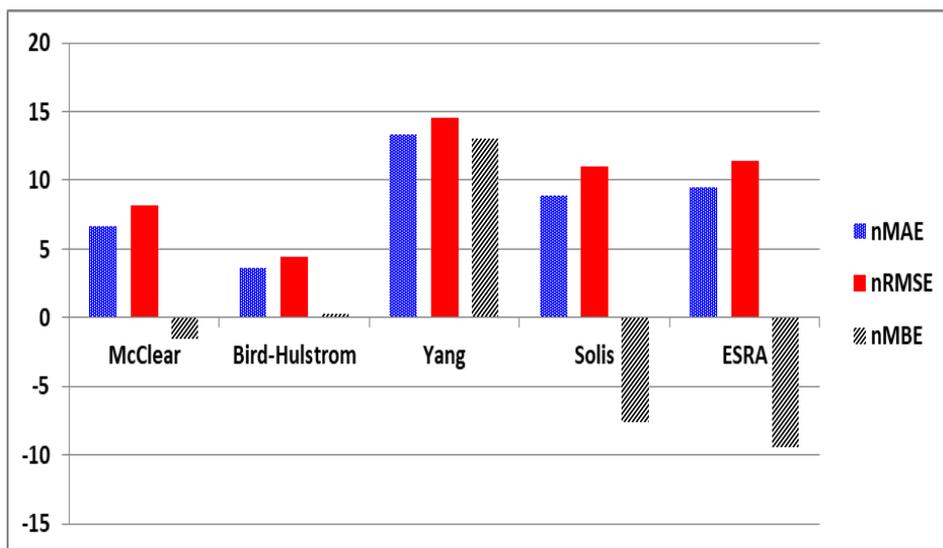


Fig 1. Comparaison des différents modèles évalués en termes de nMAE et de nRMSE pendant la période 2015

Une autre façon d'étudier la conformité des modèles, c'est de confronter les sorties issues de ces modèles avec les mesures, en utilisant les graphiques de corrélations entre la composante GHICs observée et estimée ainsi que le calcul du coefficient de corrélation (R) (Figs. 2A-2E). Les Figs. 2B-2D, montrent qu'il existe des biais systématiques entre les valeurs simulées et les mesures pour les modèles de Young, Solis et ESRA, car il y a un écart entre la ligne diagonale (autour de la droite de régression passant par l'origine: $y = x$) et la droite de régression ($y = ax + b$), bien que la corrélation est quasi-linéaire pour le modèle de Yang avec un coefficient de corrélation égale à 99.68%. Tandis que pour les modèles de Bird-Hulstrom et de McClear (Figs. 2A et 2E), les écarts entre les mesures et les estimés sont très faibles (les diagonales se confondent presque avec les droites de régressions). Nous constatons aussi que pour le modèle de Solis, cet écart est moins marqué pour des valeurs du GHICs à peu près inférieures à 600 W/m^2 (Fig. 2C). Ainsi, pour le modèle de Solis, la dégradation de la performance est proportionnelle aux mesures du GHICs.

En outre, les Figs. 2A et 2E, montrent une dispersion des points autour de la droite de régression passant par l'origine i.e., le GHICs est à la fois sous-estimé et surestimé, ce qui a entraîné une valeur faible de nMBE pour les modèles de Bird-Hulstrom et McClear (0.25% et -1.57%), sauf que la dispersion du nuage de points est plus importante dans la Fig. 2E (McClear) que dans la Fig. 2A (Bird-Hulstrom). En outre, d'après la Fig. 2B, nous constatons que la majorité de points se situe au-dessus de la droite d'ajustement ($nMBE > 0$), cela implique une surestimation du GHICs dans l'intervalle 100-500 Wh/m^2 . Alors que les Figs. 2C, 2D, indiquent la majorité de points se situe au-dessous de la droite de régression. Cela, implique une sous-estimation du GHICs par les modèles de Solis et ESRA ($nMBE < 0$). Cependant, les modèles Solis et ESRA, bien qu'ils possèdent de grands coefficients de corrélations ($R > 99\%$: ajustement linéaire), leur nuage de point correspondant sont dispersifs (Figs. 2B-2D). Globalement, les modèles de Bird-Hulstrom et de McClear offrent de meilleures performances, par rapport aux autres modèles.

Afin de visualiser le profil de mesures et d'estimations du GHICs (Figs. 3A-3C), pour les deux meilleurs modèles (Bird-Hulstrom et McClear), nous avons choisi un échantillon de 3 jours ciel clair, une en hiver (02/01/2015), une au printemps (31/03/2015) et une en été (30/06/2015). Un meilleur accord a été observé entre les modèles et les mesures avec une légère différence, notamment pour la journée d'hiver (02/01/2015) où l'erreur relative maximale observée est de l'ordre de 5% pour McClear et 4% pour Bird-Hulstrom, ce qui correspond aux alentours de midi.

La performance des meilleurs modèles de ciel clair a été comparée à quelques travaux existant dans la littérature sur la base du nRMSE et du nMBE. En comparant ces indicateurs statistiques avec ceux rapportés par Psiloglou et al. [37] qui a examiné le Modèle de Rayonnement Métrologique (MRM) et le modèle du Services de Surveillance de l'Atmosphère Copernicus (CAMS : McClear) dans le cas du ciel clair avec les mesures du rayonnement horaire GHICs sur un site en Grèce, les valeurs des indicateurs trouvées pour le modèle de McClear sont : nMBE = -8.62%, nRMSE = 11.6%. P. Ineichen [29] a comparé 8 modèles large-bande pour estimer le GHICs, sur 22 sites en Roumanie sous ciel clair. Les valeurs meilleurs de l'indicateur trouvées sont: nMBE = 2.9%, pour le modèle McClear et nMBE = 3% pour Bird-Hulstrom.

6. Comparaison avec la littérature

La précision du meilleur modèle ainsi trouvé (Bird-Hulstrom) est comparée à celle retrouvée dans la littérature, avec les mêmes conditions climatiques que Ghardaïa. La comparaison est effectuée sur la base des indicateurs nRMSE et nMBE (Tableau 2). En général, la performance du meilleur modelé ainsi trouvée se situe à une valeur acceptable par rapport aux modèles illustrés. Nous remarquons également que la précision du modèle de Bird-Hulstrom actuel est presque conforme par rapport celle du modèle de Bird-Hulstrom qui a été estimé par la Reference [40].

Tableau 2. Comparaison entre le meilleur modèle actuel avec les meilleurs modèles existants dans quelques travaux de recherches.

Réf.	Site	Climat	Latitude (degré)	Longitude (degré)	Altitude (mètre)	Modèle	nMBE (%)	nRMSE (%)
[39]	Madinat Zayed (UAE)	Désert	23.56	53.71	137	McClear	-1.00	4.00
[40]	Tamanrasset (Algérie)	Désert	29.21	47.06	1377	<ul style="list-style-type: none"> • Bird • McClear 	±0.30 +1.80	3.30 ;4.10 4.80
[41]	Tamanrasset (Algérie)	Désert	32.36	3.80	450	<ul style="list-style-type: none"> • ESRA • Solis 	-3.53 -3.39	6.26 6.32
Travail actuel	Ghardaïa (Algérie)	Désert	32.36	3.80	450	<ul style="list-style-type: none"> • Bird • McClear 	0.25 -1.57	4.46 8.18

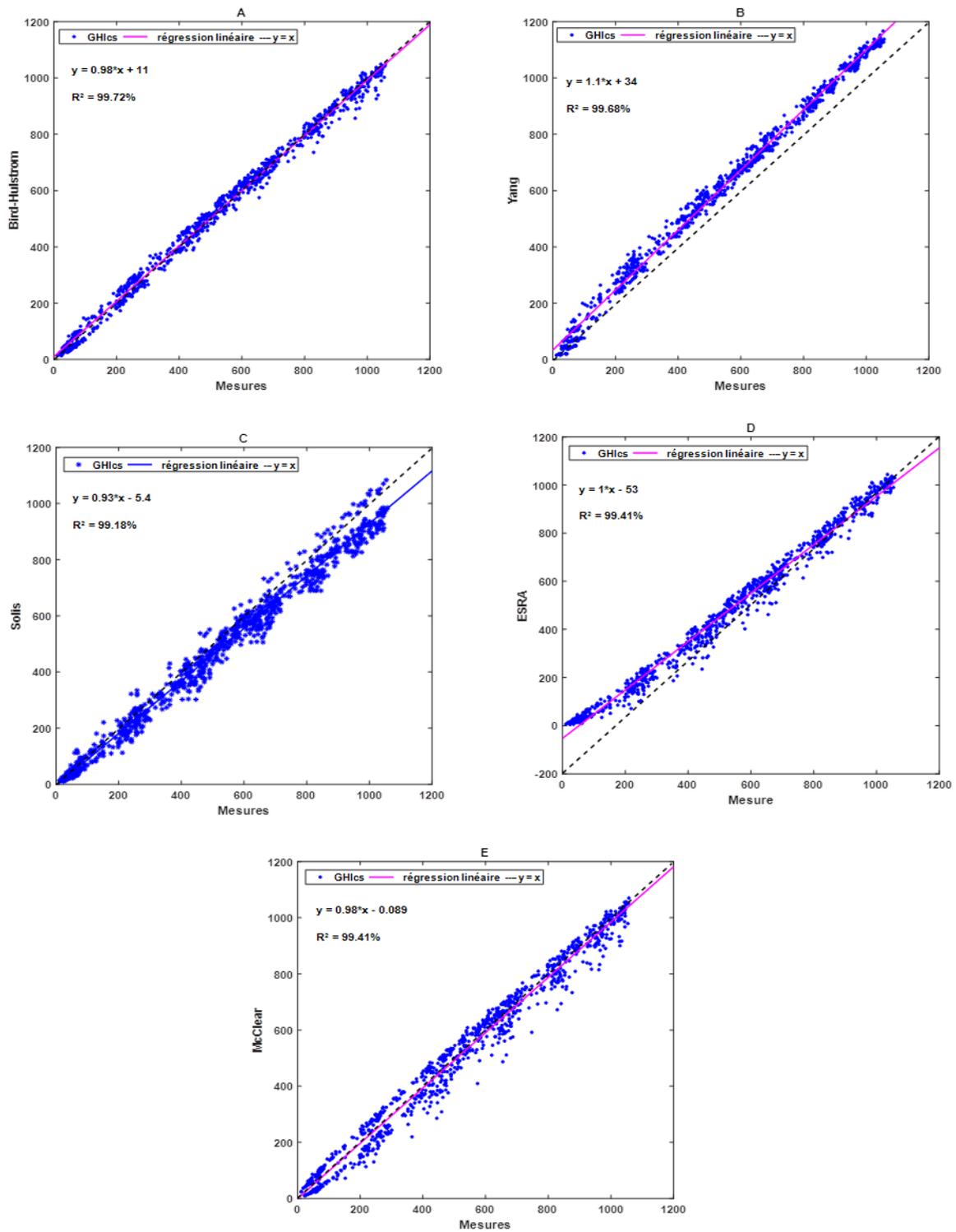


Fig. 2: Corrélations entre les irradiances horaires globales mesurées et estimées pour les cinq modèles

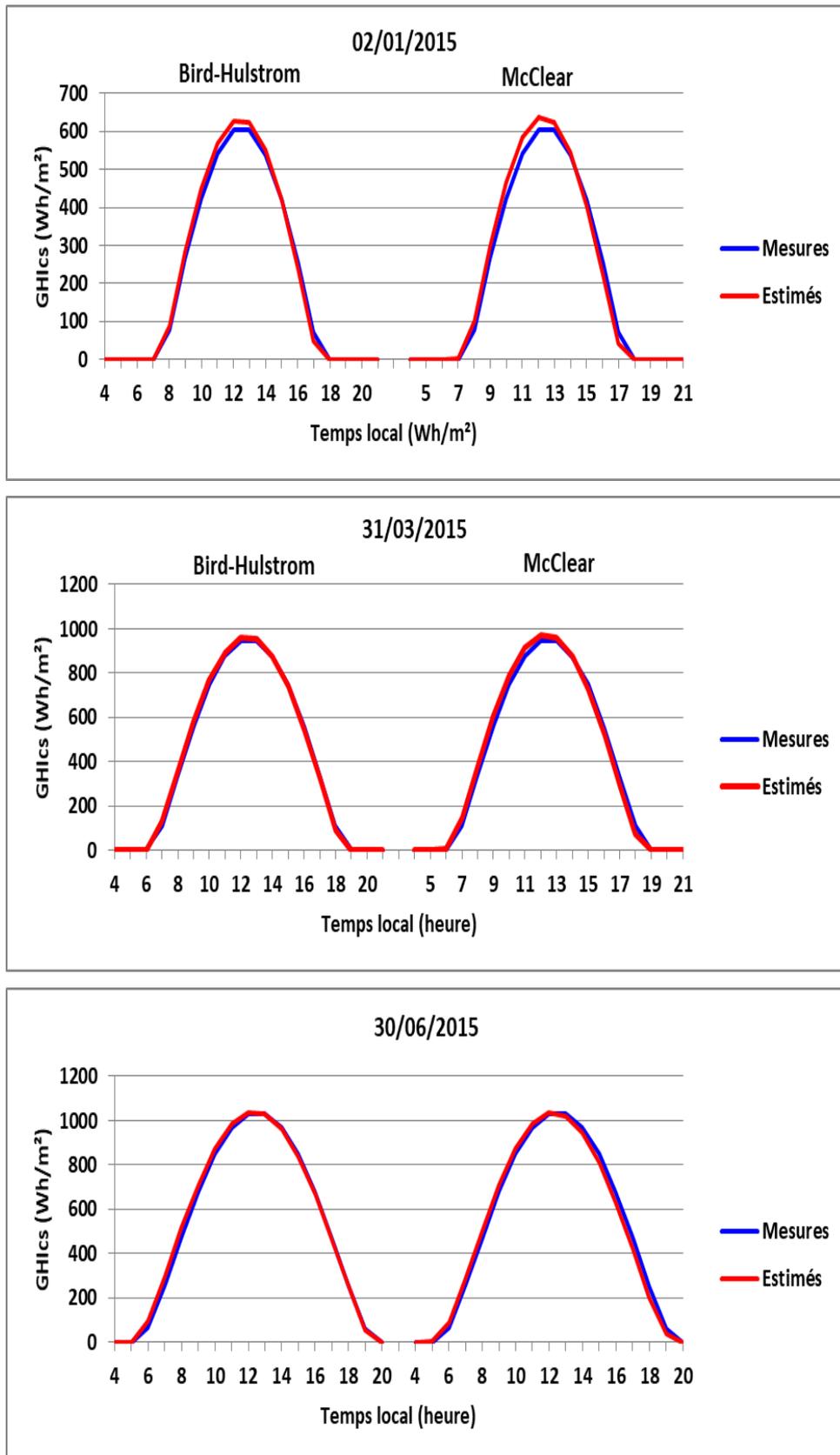


Fig. 3: Comparaison graphique entre les valeurs mesurées avec celles des modèles de Bird-Hulstrom et McClear, pour 3 journées claires

7. Conclusions

Les systèmes de conversion d'énergie PV dépendent étroitement de la composante globale GHI qui est sensible aux processus d'atténuations atmosphériques. Cependant, le GHI peut être exprimé en fonction du rayonnement global par ciel clair (GHI_{cs}) et de l'indice de ciel clair (CSI). S'il y a des erreurs dans l'estimation du GHI_{cs}, cela va se répercuter sur l'estimation du GHI [38]. Par conséquent, le choix de modèles est impératif pour une utilisation optimale des centrales PV, ainsi que des réseaux électriques intelligents.

Ce travail nous a permis alors d'évaluer les performances de cinq modèles ciel clair, appelés aussi, modèles large bande (McClear – Bird-Hulstrom – Yang – Solis – ESRA) pour estimer la composante globale du rayonnement solaire, à partir des deux composantes (diffus et direct) et de quelques paramètres astronomique, météorologique et atmosphérique par rapport aux mesures au sol, pour le site de l'URAER dans la région de Ghardaïa (sud de l'Algérie). Les résultats ont montré que les modèles de Bird-Hulstrom et McClear simulent mieux le GHI_{cs} (nMBE \approx -1.57%, nMAE \approx 6.60%, nRMSE \approx 8.18% pour McClear, et nMBE \approx 0.25%, nMAE \approx 3.61%, nRMSE \approx 4.46% pour Bird-Hulstrom).

Dans les perspectives, des études pour d'autres sites sont en cours de réflexion afin de prédire le GHI_{cs} ; Une étude sera menée afin de confronter le modèle de Bird-Hulstrom avec le modèle de ciel clair REST2 (Reference Evaluation of Solar Transmittance, 2 bands), développé par Christian Gueymard [13].

Nomenclature :

Abréviations :

AOD : Épaisseur optique totale des aérosols

AOD _{λ} : Épaisseur optique spectrale des aérosols

ESRA : atlas européen du rayonnement solaire (European Solar Radiation Atlas)

Et: équation du temps (mn)

E₀: excentricité de l'orbite terrestre

GHI : irradiation globale horaire horizontale (Wh/m²)

GHI_{cs}: irradiation globale horaire horizontale par temps clair (Wh/m²)

h : hauteur du soleil (°)

I_b : éclaircissement direct (W/m²)

I_d : éclaircissement diffus (W/m²)

I_{dae} : éclairage direct due à la diffusion des aérosols (W/m^2)

I_{dm} : éclairage direct due à la diffusion multiple (W/m^2)

I_{dr} : éclairage direct due à la diffusion de Rayleigh (W/m^2)

I_g : éclairage global (W/m^2)

I_{oc} : constante solaire ($1361.1 W/m^2$)

I_{on} : éclairage solaire hors atmosphère (W/m^2)

l_{oz} : épaisseur verticale de la couche d'ozone (atm-cm)

nMAE: erreur absolue moyenne normalisée (%)

M_a : masse d'air optique

M_r : masse d'air optique relative

nMBE : erreur de biais moyenne normalisée (%)

nRMSE : erreur quadratique moyenne normalisée (%)

P : pression atmosphérique (mbar)

P_0 : pression standard (mbar)

RTM : modèle de transfert radiatif

TSV : temps solaire vrais (heure)

T : température de l'air ambiant ($^{\circ}C$)

T_{LM2} : trouble de Linke pour $M_a=2$

T_{rd} : transmission diffuse au zénith

U_{oz} : chemin optique relatif à l'ozone (atm-cm)

U_w : chemin optique relatif à l'eau précipitable

w : Vapeur d'eau (cm)

Symbole Grec :

α : exposant d'Angström

β : coefficient de turbidité d'Angström

δ : déclinaison solaire ($^{\circ}$)

δ_r : épaisseur optique de Rayleigh

η : humidité relative (%)

θ_z : angle zénithal ($^{\circ}$)

ρ_g : albédo du sol

ρ_a : albédo atmosphérique

τ_{ae} : diffusion des aérosols

τ_g : absorption des gaz permanents

τ_{oz} : absorption de l'ozone

τ_r : diffusion de Rayleigh

τ_{vp} : absorption de la vapeur d'eau

φ : Latitude du site (°)

ω : angle horaire (°)

8. Références

- [1] Müller B, Hardt L, Armbruster A, Kiefer K, Reise C. Yield predictions for photovoltaic power plants: empirical validation, recent advances and remaining uncertainties. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2015; 24:570–583. Doi: [10.1002/pip.2616](https://doi.org/10.1002/pip.2616).
- [2] Behar O, Kellaf A, Mohammedi K. A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 23:12-39. Doi:[10.1016/j.rser.2013.02.017](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.017).
- [3] Vignola F, Grover C, Lemon N, McMahan A. Building a bankable solar radiation dataset. *Solar Energy* 2012; 86: 2218–2229. doi:[10.1016/j.solener.2012.05.013](https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.013).
- [4] World Energy Outlook. Executive summary, 2019, www.iea.org/topics/
- [5] Antonanzas J, Osorio N, Escobar R, Urraca R, Pison M, Antonanzas FJ, Torres F. Review of photovoltaic power forecasting. *Solar Energy* 2016;136:78–111. doi:[10.1016/j.solener.2016.06.069](https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.069).
- [6] Voyant C, De Gooijer JG, Notton G. Periodic autoregressive forecasting of global solar irradiation without knowledge-based model implementation. *Solar Energy* 2018;174:121-129. doi :[10.1016/j.solener.2018.08.076](https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.076).
- [7] Voyant C, Notton G, Kalogirou S, Nivet ML, Paoli C, Motte F, Fouilloy A. Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review. *Renewable Energy* 2017;105:569 582. [10.1016/j.renene.2016.12.095](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.095).
- [8] Atwater MA, Ball JT. A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations. *Solar Energy* 1978;21:163–170. doi :[10.1016/0038-092X\(78\)90018-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90018-X).
- [9] Bird RE, Hulstrom R. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. *Solar Energy Research Institute Colorado*: 1981. <http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/761.pdf>.
- [10] Davies JA, McKay, DC. Estimating solar irradiance and components. *Solar Energy*1982; 29:55-64.doi:[10.1016/0038-092X\(82\)90280-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90280-8).

- [11] Rigollier R, Bauer O, Wald L. On the clear sky model of the ESRA-European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. *Solar Energy* 2000;68:33–48. doi:[10.1016/S0038-092X\(99\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00055-9).
- [12] Ineichen P. A broadband simplified version of the Solis clear sky model. *Solar Energy* 2008;82:758–762. doi: [10.1016/j.solener.2008.02.009](https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.009).
- [13] Gueymard CA. REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation — Validation with benchmark dataset. *Solar Energy* 2008;82:272–285. doi:[10.1016/j.solener.2007.04.008](https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.008).
- [14] Zhipeng Q, Armel O, Philippe B, Bella E, Gerhard G, Gschwind B, Benoît G, Lars K, Mireille L, Schroedter-Homscheidt SLS. Fast radiative transfer parameterization for assessing the surface solar irradiance: the Heliosat-4 method. *Energy Meteorology* 2017;26:33–57. doi:[10.1127/metz/2016/0781](https://doi.org/10.1127/metz/2016/0781).
- [15] Yang D. Choice of clear-sky model in solar forecasting. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2020;12. doi:[10.1063/5.0003495](https://doi.org/10.1063/5.0003495).
- [16] Yang D. Standard of reference in operational day-ahead deterministic solar forecasting. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2019;11. doi:[10.1063/1.5114985](https://doi.org/10.1063/1.5114985).
- [17] Iqbal M. An introduction to solar radiation. 1^{ère} ed. Toronto: 1983.
- [18] Duffie JA, Beckman WA. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Fourth Edition, Wiley, New York, 1991.
- [19] Sen Z. *Solar energy fundamentals and modeling techniques*. 1^{ère} ed. Springer-Verlag London: 2008.
- [20] Benkaciali S, Haddadi M, Khellaf A. Evaluation of direct solar irradiance from 18 broadband parametric models: Case of Algeria. *Renewable Energy* 2018; 125:694-711. doi: [10.1016/j.renene.2018.02.108](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.108).
- [21] Gueymard CA. A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of space borne observations. *Solar Energy* 2018; 168:2-9. doi: [10.1016/j.solener.2018.04.001](https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.001).
- [22] Behar O, Kellaf A, Mohammedi K. Comparison of solar radiation models and their validation under Algerian climate - the case of direct irradiance. *Energy Conversion and Management* 2015; 98:236-251. doi: [10.1016/j.enconman.2015.03.067](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.067)
- [23] Kasten F, Young AT. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics* 1989; 28:4735-4738. doi: [10.1364/AO.28.004735](https://doi.org/10.1364/AO.28.004735).
- [24] Bird RE. A simple, solar spectral model for direct normal and diffuse horizontal Irradiance. *Solar Energy* 1984; 32:461-471. doi:[10.1016/0038-092X\(84\)90260-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90260-3).

- [25] Leckner B. The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface-elements of a model. *Solar Energy* 1978; 20:143–150. doi: [10.1016/0038-092X\(78\)90187-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90187-1).
- [26] Van Heuklon TK. Estimating atmospheric ozone for solar radiation models. *Solar Energy* 1978; 22:63-68. doi: [10.1016/0038-092X\(79\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90060-4).
- [27] Angstrom A. The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus* 1964; 16:64-75. doi: [10.3402/tellusa.v16i1.8885](https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i1.8885).
- [28] Gueymard CA. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 2003;74:355-379. : [10.1016/S0038-092X\(03\)00195-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00195-6).
- [29] Ineichen P. Validation of models that estimate the clear sky global and beam solar irradiance. *Solar Energy* 2016; 132:332-344. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.017>.
- [30] Koussa M, Koussa S, Hadji S. Experimental investigation of simple solar radiation spectral model performances under a Mediterranean Algerian's climate. *Energy* 2017; 120:751-773. doi:[10.1016/j.energy.2016.11.132](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.132).
- [31] Ineichen P. Conversion function between the Linke turbidity and the atmospheric water vapor and aerosol content. *Solar Energy* 2008; 82:1095-1097. doi:[10.1016/j.solener.2008.04.010](https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.04.010).
- [32] Gueymard CA. Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy* 2012;86:2145-2169. doi: [10.1016/j.solener.2011.11.011](https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.011).
- [33] Lefèvre M, Oumbe A, Blanc P, Espinar B, Gschwind B, Qu Z, Wald L, Schroedter-Homscheidt M, Hoyer-Klick C, Arola A, Benedetti A, Kaiser JW, and Morcrette JJ. McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques* 2013; 6:2403-2418. doi: [10.5194/amt-6-2403-2013](https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013).
- [34] Engerer NA, Mills FP. Validating nine clear sky radiation models in Australia. *Solar Energy* 2015; 120:9-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.044>.
- [35] Gueymard CA. A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 39:1024-1034. doi:[10.1016/j.rser.2014.07.117](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.117).

- [36] Badescu V, Gueymard CA, Cheval S, Opera C, Baci M, A. Dumitrescu, Iacobescu F, Milos I, Rada C. Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16:1636-1656.doi: doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.010.
- [37] Psiloglou BE, Kambezidis HD, Kaskaoutis DG, Karagiannis D, Polo J.M. Comparison between MRM simulations, CAMS and PVGIS databases with measured solar radiation components at the Methoni station, Greece. *Renewable Energy* 2020; 146:1372-1391.doi: [10.1016/j.renene.2019.07.064](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.064).
- [38] Cros S, Liandrat O, Sébastien N, Schmutz N, Voyant C. Clear sky models assessment for an operational PV production forecasting solution. 28th European Photovoltaic Solar Energy; Conference and Exhibition 2013; France.
- [39] Eissa Y, Munawwar S, Oumbe A, Blanc P, Ghedira H, Wald L, Bru H, Goffe D. Validating surface downwelling solar irradiances estimated by the McClear model under cloud-free skies in the United Arab Emirates. *Solar Energy* 2015; 114:17-31.doi: [10.1016/j.solener.2015.01.017](https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.017).
- [40] Gueymard CA. Clear-sky radiation models and aerosol effects. In *Solar Resources Mapping*. Springer Nature Switzerland ; p. 137-182, 2019.
- [41] Gairaa K, Benkaciali S, Guermoui M. Clear-sky models evaluation of two sites over Algeria for PV forecasting purpose. *The European Physical Journal Plus* 2019; **134**:534, 2019.doi: [10.1140/epjp/i2019-12917-2](https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12917-2).