

Modélisation du rayonnement solaire diffus en zone sahélienne au Burkina Faso

Seydou OUEDRAOGO², Ayité Sénah Akoda AJAVON^{1*}, Mawugno Koffi KODJO¹, Adekunlé Akim SALAMI¹ et Koffi-Sa BEDJA¹

¹ Equipe de Recherches en Sciences de l'Ingénieur (ERSI), Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs (ENSI), Université de Lomé, O1 BP 1515 Lomé O1, Lomé TOGO ² Equipe de Recherches en Sciences de l'Ingénieur (ERSI), Département de Génie Electrique, Institut Universitaire de Technologie (IUT), Université Nazi BONI de Bobo-Dioulasso, O1 BP 1091 Bobo-Dioulasso O1, Bobo-Dioulasso, BURKINA FASO

* Correspondance, courriel : *asajavon@yahoo.fr*

Résumé

Dans ce travail, nous avons développé six modèles qui permettent d'estimer le rayonnement solaire diffus reçu au sol sur le site de Ouahigouya, au Burkina Faso. Ces modèles sont obtenus à partir de données mesurées sur le site. La fraction du rayonnement solaire diffus a été analysée pour la période de l'harmattan, la période chaude et la période pluvieuse. L'efficience des modèles proposés a été vérifiée par les tests de performance du coefficient de détermination (\mathbb{R}^2), de la variance de l'erreur d'interpolation (σ^2) et de l'erreur moyenne quadratique (\mathbb{RMSE}). Les résultats ont révélé que les modèles ajustent bien les données mesurées. La comparaison des modèles du rayonnement solaire diffus obtenus avec la méthode des moindres carrés et le modèle de Lacis & Hansen a donné un écart acceptable. Cela nous permet de dire que ces modèles peuvent alors être recommandées comme des modèles valables pour évaluer le rayonnement solaire global durant les trois (3) périodes de l'année, dans la zone sahélienne pour l'exploitation optimale de l'énergie solaire.

Mots-clés : rayonnement global, rayonnement diffus, climat sahélien, modèle statistique, exploitation optimale, moindres carrés.

Abstract

Modeling solar diffuse radiation in sahelian area in Burkina Faso

In this work, we have developed six models to estimate the diffuse solar radiation received on the ground at the Ouahigouya site in Burkina Faso. These models are obtained from data measured on the site. The fraction of the diffuse solar radiation was analyzed for harmattan period, warm period and rainy period. The efficiency of the proposed models was verified by the performance tests of coefficient of determination (R^2), variance of the interpolation error (σ^2) and quadratic mean error (RMSE). The results revealed that the models fit the measured data well. The comparison of diffuse solar radiation models obtained with the least-squares method and the Lacis & Hansen model yielded an acceptable deviation. This allows us to say that these models can then be recommended as valid models to evaluate the global solar radiation during the three (3) periods of the year, in the Sahelian zone for the optimal exploitation of the solar energy.

Keywords : global radiation, diffuse radiation, sahelian climate, statistical model, optimal exploitation, least-squares method.

1. Introduction

L'énergie solaire est une source d'énergie inépuisable et propre. L'une des possibilités de l'exploitation de l'énergie solaire est sa transformation directe en une énergie électrique, au moyen des modules photovoltaïques [1]. Certaines grandeurs telles que le rendement, l'efficacité ou la productivité des modules photovoltaïques restent liées aux fluctuations spatio-temporelles de la source solaire [2]. C'est pour cette raison que la connaissance et la caractérisation de la source énergétique doivent être étudiées de manière très précise [3]. La précision de la conception et du dimensionnement des systèmes de conversion de l'énergie solaire dépend fortement du pas de temps utilisé. L'utilisation des moyennes mensuelles par jour conduisent souvent à un surdimensionnement, ou à un sousdimensionnement 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. Le rayonnement solaire est constitué d'un ensemble de rayonnements infrarouge (IR), visible, ultraviolet (UV) et à l'autre extrémité du spectre solaire, de rayonnement X [4, 5]. Le rayonnement solaire global est celui qui est converti en électricité au moyen de modules photovoltaïques. Il est composé du rayonnement solaire diffus et du rayonnement solaire direct [6 - 8]. Le rayonnement solaire diffus arrive sur le plan récepteur après avoir été réfléchi par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol. Il est la seule source de rayonnement solaire qui arrive sur la surface des récepteurs photovoltaïques, lorsque le soleil est masqué. Pour l'exploitation optimale des systèmes solaires, la connaissance de la variation temporelle et spatiale de la fraction du rayonnement solaire diffus d'un site est importante [9 - 12]. Cependant, on ne dispose pas toujours de modèles horaire, journalier et mensuel du rayonnement solaire diffus, pour un site donné. Pour caractériser un site d'implantation de générateur photovoltaïque, l'étude de la corrélation entre le rayonnement solaire diffus et les paramètres tels que la position du soleil, la couverture nuageuse, l'indice de clarté, etc., est nécessaire [13]. Plusieurs modèles de prédiction du rayonnement diffus ont été développées. L'estimation du rayonnement diffus est un peu plus compliqué selon le modèle à utiliser, vu le caractère anisotropique de ce dernier.

En outre, ces modèles cités ci-dessus ne sont pas toujours adaptés à toutes les zones climatiques. Le modèle de la fraction du rayonnement solaire diffus doit ainsi, être estimé par analyse statistique [14]. Plusieurs modèles ont été développés pour estimer le rayonnement solaire global sur une surface horizontale, utilisant des paramètres climatiques comme l'insolation, la couverture nuageuse, l'humidité, la température ambiante maximale et minimale, la vitesse du vent [15 - 17], etc. WU et al., [18] ont utilisé des données météorologiques de 1994 à 2005, de la station de Nanchang (Chine) pour prédire le rayonnement solaire global journalier à partir du rayonnement horaire, de la température ambiante, de la précipitation, etc. AL-AYED et al., [19] ont proposé une corrélation empirique pour calculer la moyenne mensuelle du rayonnement solaire global, direct et diffus sur une surface horizontale à Riyadh (Arabie Saoudite), utilisant des données d'une année (1986). Plusieurs Auteurs ont présenté des corrélations empiriques pour estimer la moyenne mensuelle de la fraction du rayonnement solaire diffus par jour, sur une surface horizontale où la fraction de rayonnement solaire diffus Hd/H est corrélée avec la moyenne journalière de l'indice de clarté (kt) ou avec le nombre d'heure d'ensoleillement (S/SO) [20 - 22]. De OLIVEIRA et al., [23] ont validé un ensemble d'expressions empiriques pour simuler les variations annuelle et mensuelle des valeurs moyennes du rayonnement solaire global et diffus sur une surface incliné au sol à São Paulo. Récemment, SOARES et al., [24] ont utilisé la technique de réseau de neurones pour estimer les valeurs horaires du rayonnement diffus sur une surface horizontale à São Paulo (Brésil), utilisant le rayonnement global et autres paramètres météorologiques. Le calcul précis du rayonnement global sur un plan incliné, indispensable à la conversion photovoltaïque nécessite la connaissance du rayonnement diffus sur le même plan. 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 (la température sèche, l'humidité relative et la pression atmosphérique), spécifiques à chaque zone climatique sont disponibles dans des bases de données. Il suffit donc d'utiliser les données mesurées du rayonnement solaires sur un site et des modèles mathématiques pour reconstituer les différentes composantes du rayonnement solaire. Ce travail a pour objectif de proposer des modèles du rayonnement solaire diffus pour un site situé en zone sahélienne, en utilisant la méthode des moindres carrés [25] et des données mesurées qui prend en compte les spécificités climatiques de la zone d'étude, dont le but est l'optimisation de l'exploitation de l'énergie solaire [26].

2. Matériel et méthodes

2-1. Données pour l'étude

Pour notre étude, nous avons eu recours à des données provenant de base de données et des résultats de mesures sur le terrain.

2-1-1. Données obtenues à l'aide de logiciels

Les données météorologiques utilisées dans cette étude sont des données recueillies sur la base de données de la NASA, obtenues à l'aide des logiciels "googleearth" et "PVSyst" [27, 28]. Le logiciel "googleearth" permet d'obtenir les coordonnées géographiques du lieu d'étude, (Latitude : 13° 6 Nord, longitude : 2° 4 Ouest, altitude : 339 mètres) pour le site de Ouahigouya. Avec ces coordonnées, les données météorologiques du site de Ouahigouya sont disponibles sur la base de données de la NASA en utilisant le logiciel "PVSyst". La fiche de données se présente sous forme de tableau, comportant pour chaque enregistrement : le nom du site de mesure, la date et l'heure d'enregistrement, l'albédo, le début de l'intervalle, le rayonnement global horizontal (GlobHor) en W/m², le rayonnement diffus horizontal (DiffHor) en W/m², le rayon horizontal (BeamNor) en W/m², le rayon normal (BeamNor) en W/m², le rayonnement global sur un plan incliné à 15° (GlobInc) en W/m², l'indice de clarté (T_L) et la température ambiante (T. Amb.), en degré Celsius. La totalité des données utilisées pour la modélisation s'élève à huit mille sept cent soixante (8760) points de mesure et la durée de la collecte des données et d'un (1) an. Un exemple type de fiche de données horaires fournie par la base de données set illustré par le *Tableau 1*.

Données synthétiques OUAHIGOUYA (Latitude : 13°6 Nord, longitude : 2°4 Ouest, altitude : 339 mètres). Plan : inclinaison 0°, azimut 0°, Albédo 0.20							
Date heure	GlobHor [W / m²]	DiffHor [W / m²]	BeamHor [W / m²]	BeamNor [W / m²]	GlobInc [W / m²]	Τι [-]	T Amb [°C]
01/01 06:00	0	0	0	0	0	0	20.66
01/01 07:00	151	87	64	313.1	195	0.523	20.38
01/01 08:00	256	198	58	140.4	275	0.439	22.62
01/01 09:00	105	110	-5	0	104	0.127	22.74
01/01 10:00	231	239	-8	0	228	0.229	24.01
01/01 11:00	416	373	43	54.5	420	0.373	25.25
01/01 12:00	617	321	296	369	675	0.545	28.09
01/01 13:00	528	339	189	250.5	566	0.496	30.06
01/01 14:00	395	312	83	127.9	412	0.431	30.74
01/01 15:00	184	187	-3	0	181	0.264	31.23
01/01 16:00	137	132	5	16.8	138	0.326	30.82
01/01 17:00	22	23	-1	0	22	0.197	29.18
01/01 18:00	0	0	0	0	0	0	25.89

Tableau 1 : Évolution des rayonnements solaires et de la température ambiante

GlobHor : Rayonnement global horizontal [W / m²] ; DiffHor : Rayonnement diffus horizontal [W / m²] ; BeamHor : Rayon horizontal [W / m²] ; BeamNor : Rayon normal à la surface horizontale [W / m²] ; GlobInc : Rayonnement global incliné de 15° [W / m²] ; T_L : indice de clarté ; T Amb : Température ambiante [°C]

Pour compléter les données météorologiques fournies par la base de données, nous avons utilisé les coordonnées géographiques de Ouahigouya (Latitude 13°6 Nord, longitude 2°4 Ouest) dans le logiciel

"Diagsol" [29], pour obtenir la position du soleil (azimut et hauteur) chaque heure de la journée, de 6 heures à 18 heures, à raison de 13 mesures par jour ; ce qui nous donne au total 4745 points de mesure de hauteur et d'azimut du soleil. A titre d'exemple, le *Tableau 2* donne des points de mesure de la position du soleil sur le site d'étude. Les résultats des mesures, surtout ceux de la hauteur du soleil, permettront d'étudier les corrélations du rayonnement solaire diffus *(Voir Paragraphe 2)*.

Heures	Hauteur [°]	Azimut [°]
6h	0	-90
7h	8.26	-63.72
8h	20.09	-58.12
9h	32.87	-50.41
10h	43.31	-38.51
11h	51.07	-21.36
12h	54.1	0
13h	51.07	22.41
14h	43.48	39.56
15h	33.2	50.76
16h	21.24	58.47
17h	8.09	64.42
18h	0	90

 Tableau 2 : Position du soleil dans le ciel obtenu avec le logiciel Diagsol

2-1-2. Données obtenues par mesurage direct

Le *Tableau 3* contient quelques données mesurées sur le terrain. Le rayonnement solaire global est mesuré avec un solarimètre et la hauteur du soleil dans le ciel, avec un clinomètre.

OUAHIGOUYA (Latitude : 13°6 Nord, longitude : 2°4 Ouest,						
aititude : 339 metres). Pian : inclinaison V , azimut V , Albeao V.20						
Date - heure	GlobHor [W / m²]	DiffHor [W / m²]	Hauteur [°]			
01/01 - 06:00	0	0	0			
01/01 - 07:00	151	87	8.26			
01/01 - 08:00	256	198	20.09			
01/01 - 09:00	105	110	32.87			
01/01 - 10:00	231	239	43.31			
01/01 - 11:00	416	373	51.07			
01/01 - 12:00	617	321	54.1			
01/01 - 13:00	528	339	51.07			
01/01 - 14:00	395	312	43.48			
01/01 - 15:00	184	187	33.2			
01/01 - 16:00	137	132	21.24			
01/01 - 17:00	22	23	8.09			
01/01 - 18:00	0	0	0			

Tableau 3 : Mesures des rayonnements solaires global et diffus

216

2-1-3. Prétraitement des données

Pour être conforme aux formats de Matlab [30], les données ont été prétraitées dans Excel [31]. Ce prétraitement est d'autant plus nécessaire que, d'une part, certaines données se présentent dans le logiciel sous forme de chaine de caractères, alors qu'il nous faut des données numériques, et d'autre part, il existe des informations se présentant sous des formats non utilisables par Matlab.

2-2. Méthodes

A partir de données météorologiques provenant des bases de données et des résultats de mesures obtenues sur le terrain *(Tableau 3)*, nous avons calculé le taux de rayonnement solaire diffus dans le rayonnement solaire global (Voir *Formules au Paragraphe 2-2-2)*. Nous proposons, grâce à la méthode des moindres carrés, un modèle mathématique du taux de rayonnement solaire diffus, en fonction du rayonnement solaire global et en fonction de la hauteur (*h*) du soleil pour les trois (3) périodes de l'année, selon les spécificités climatiques : la période de l'harmattan (de Novembre à Février), la période sèche et chaude (de Mars à Juin), la période pluvieuse (de Juillet à Octobre).

2-2-1. Méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés [25] consiste en une prescription (initialement empirique), qui est que la fonction $f(x_i, \theta)$ qui décrit « le mieux » les données. Cette fonction est celle qui minimise la somme quadratique des déviations des mesures aux prédictions de $f(x_i, \theta)$. La méthode des moindres carrés permet de comparer des données expérimentales à un modèle mathématique censé décrire ces données. La fonction $f(x_i, \theta)$ qui décrit le mieux les données, est celle qui minimise la somme quadratique des déviations de $f(x_i, \theta)$. Si, nous disposons de N mesures $(y_i)_{i=1,...,N}$, les paramètres optimaux, au sens de la méthode des moindres carrés, sont ceux qui minimisent la variance de l'erreur d'interpolation donnée par *l'Équation (1)*.

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^{N} (y_i - f(x_i, \theta)^2) = \sum_{i=1}^{N} r_i^2(\theta)$$
(1)

 $r_i(\theta)$ étant les résidus du modèle, c'est-à-dire les écarts entre les points de mesure, y_i et $f(x_i, \theta)$ le modèle.

La quantité $s(\theta)$ est une mesure de la distance entre les données expérimentales et le modèle théorique qui prédit ces données. La prescription des moindres carrés commande que cette distance soit minimale. Si on dispose d'une estimation de l'écart-type σ_i du bruit qui affecte chaque mesure y_i , on l'utilise pour « peser» la contribution de la mesure au χ^2 , indiqué par l'*Équation (2)*.

$$\chi^{2}(\theta) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{y_{i} - f(x_{i}, \theta)}{\sigma_{i}} \right)^{2} = \sum_{i=1}^{N} \omega_{i} \left(y_{i} - f(x_{i}, \theta) \right)^{2}$$
(2)

Les quantités ω_i , inverses des variances des mesures sont appelés poids des mesures. L'**Équation (2)** est appelée khi carré ou khi-deux.

Dans le cadre de cet article, nous avons développé un programme dans l'environnement Matlab qui utilise des fonctions propres au traitement de données, au graphisme, ainsi que celles relatives à l'interpolation *(polyfit, polyval, etc.)*, au sens des moindres carrés. Afin de tester les différents modèles, les paramètres d'analyse statistique que sont le coefficient de détermination (R^2), la variance de l'erreur d'interpolation (σ^2) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sont calculés avec les *Équations (3), (4)* et *(5)*.

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (K_{Dim} - K_{Dic})^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (K_{Dim} - \overline{K_{Dim}})}$$
(3)

$$\sigma^{2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} \left(K_{D\,im} - \overline{K_{D\,ic}} \right)^{2}$$
(4)

$$RMSE = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \left(K_{Dim} - K_{Dic}\right)^{2}\right)^{0.5}$$
(5)

N étant le nombre total de données de rayonnement solaire, κ_{Dim} les données de rayonnement solaire diffus mesurées, κ_{Dic} la valeur du rayonnement solaire diffus obtenue par calcul (modèle) et $\overline{\kappa_{Dim}}$ la valeur moyenne de κ_{Dim} . Un modèle est dit idéal, s'il est caractérisé par une valeur 1 pour le paramètre R², une valeur nulle pour la variance de l'erreur d'interpolation et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.

2-2-2. Le rayonnement solaire

2-2-2-1. Le rayonnement solaire direct normal

Le rayonnement solaire direct sur un plan récepteur ($\kappa_{dirNorm}$) s'exprime par *l'Equation (6)*[32].

$$K_{dirNorm} = K_{glob} e^{-E_R m T_L} = K_{glob} e^{\frac{-T_L}{0.9 + 9.4 \sinh}} [W/m^2]$$
(6)

 κ_{glob} étant le rayonnement global, E_R l'épaisseur optique de Rayleigh, T_L le trouble de Link, m la masse d'air optique relative et h la hauteur du soleil dans le ciel.

Le coefficient d'incidence C_i est l'angle formé par le rayonnement solaire avec la perpendiculaire d'une surface. Le calcul du coefficient d'incidence est obtenu avec *l'Équation (7)*[32].

$$C_{i} = \sin(i)\cos(h)\cos(o-a) + \cos(i)\sin(h)$$
(7)

i étant l'inclinaison de la surface, o l'orientation de la surface et h la hauteur du soleil.

Le rayonnement solaire direct sur un plan récepteur incliné est donné par l'*Équation (8)* [32].

$$\mathbf{K}_{dir} = K_{dirNor}C_i \tag{8}$$

2-2-2-2. Le rayonnement solaire diffus

Le rayonnement solaire diffus arrive sur le plan récepteur après avoir été réfléchi par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol. Sur un plan récepteur d'inclinaison *i*, le rayonnement solaire diffus (K_{dif}/est donné par *l'Équation (9)*[32].

$$K_{dif} = 125 \sin\left(h^{0.4}\right) \frac{1 + \cos\left(i\right)}{2} + 211.86 \sin\left(h^{1.22}\right) \frac{1 - \cos\left(i\right)}{2}$$
(9)

 K_{dif} étant le rayonnement solaire diffus en W/m^2 , h la hauteur du soleil et i l'inclinaison.

2-2-2-3. Le rayonnement global

Le rayonnement global est la somme des rayonnements solaires direct et diffus *Équation (10)*[32].

$$K_{glob} = K_{dir} + K_{dif}$$
(10)

 κ_{dir} étant le rayonnement solaire direct et κ_{dif} le rayonnement solaire diffus.

Le rayonnement solaire global en fonction du jour de l'année est calculé avec *l'Équation (11)* [32].

$$K_{glob} = 1367 \left(1 + 0.0334 \cos \left(360 \frac{j - 2.7206}{365.25} \right) \right)$$
(11)

où : j étant le numéro d'ordre du jour dans l'année (1 pour le 1^{er} janvier).

Le taux de rayonnement diffus (K_p) est donné par *l'Équation (12)*[33].

$$K_D = 100 \left(K_{dif} / K_{glob} \right)$$
(12)

3. Résultats et discussion

La station considérée est le site de Ouahigouya. Nous avons appliqué la méthode des moindres carrés en utilisant les séries de données collectées sur ce site où nous disposons de données d'une année, mesurées chaque heure. Nous avons trouvé à l'aide d'une programmation dans l'environnement *Matlab* et dans l'option graphique d'*Excel*, des modèles mathématique traduisant l'évolution du taux de rayonnement solaire diffus reçu sur une surface horizontal, en fonction du rayonnement solaire global et en fonction de la hauteur du soleil dans le ciel pour les trois périodes l'année.

3-1. Modèles du rayonnement solaire diffus pour la période de l'harmattan

Les *Figures 1* et *2* représentent respectivement les modèles du rayonnement solaire diffus en fonction du rayonnement solaire global et en fonction de la hauteur du soleil dans le ciel, pour la période de l'harmattan. Sur ces *Figures*, le trait continu rouge représente le modèle obtenu par ajustement et les croix noires les valeurs mesurées du taux de rayonnement solaire diffus à Ouahigouya.



Figure 1 : Modèle du rayonnement diffus en fonction du global pour la période de l'harmattan



Figure 2 : Modèle du rayonnement diffus en fonction de la hauteur du soleil pour la période de l'harmattan

Pour la période de l'harmattan (de Novembre à Février), on observe que le taux de rayonnement solaire diffus (K_0) dans le rayonnement solaire global (K_{glob}) augmente pour les faibles valeurs du rayonnement global (*Figure 1*). Dans cette période, le taux de rayonnement solaire diffus (K_0) est surtout fonction de la hauteur (h) du soleil dans le ciel (*Figure 2*). Il convient de mentionner que dans la période de l'harmattan, le site de Ouahigouya se caractérise par des épisodes fréquentes des niveaux élevés de pollution de l'air (vents froids et secs, suspensions poussiéreuses, etc.). De OLIVEIRA et al., [23] ont montré que pendant les périodes de niveaux élevés de concentration de particules dans le ciel, on observe une augmentation du rayonnement solaire diffus. Le site Ouahigouya est situé à environ 339 m au dessus du niveau moyen de la mer et 13°6 Nord de latitude, 2°4 Ouest de longitude (*Tableau 1*). La longueur du trajet des rayons du soleil, en raison des effets de l'altitude, peut expliquer la forme des courbes de corrélation pour les valeurs du taux de rayonnement solaire diffus trouvé dans ce travail (*Figures 1 et 2*). Dans le *Tableau 4* sont inscrits les modèles (*Équations (13)* et (*14*)) et les indicateurs statistiques de précision R^2 , σ^2 et *RMSE*, pour la période de l'harmattan.

Relation	Modèle	R^2	σ^2	RMSE
$K_{D}\left(K_{glob}\right)$	$K_{D} = 716.37 \left(K_{glob} \right)^{-0.513}$ (Equation (1)	<i>3))</i> 0,9218	0,0063	0,0081
$K_{D}(h)$	$K_D = -37.89 \ln(h) + 176.88$ (Equation (1)	<i>4))</i> 0,9887	0,0673	0,0272

 Tableau 4 : Modèles et indicateurs statistiques de précision pour la période de l'harmattan

D'après les résultats du **Tableau 4**, les valeurs de σ^2 et du *RMSE* sont très proche de zéro et la valeur de R^2 est très proche de un (1) pour le modèle de K_0 en fonction de K_{glob} pour la période de l'harmattan. Cela indique un très bon accord entre le modèle et les valeurs mesurées sur le site. Pour le modèle du rayonnement solaire diffus en fonction de la hauteur (*h*) du soleil dans le ciel, les valeurs trouvées de σ^2 du *RMSE* ne sont pas très proches de zéro, mais nous semblent de valeurs acceptables. La valeur de R^2 est très proche de un (1) de $K_D(h)$. On peut donc dire que le modèle du rayonnement solaire diffus en fonction de la hauteur du soleil ajuste bien les données mesurées sur le site. Les modèles du rayonnement solaire diffus en fonction du global et de la hauteur du soleil dans le ciel trouvés pour la période de l'harmattan peuvent servir de modèle valables pour évaluer le rayonnement global reçu à la surface des capteurs solaires à cette période de l'année (Harmattan) [34].

3-2. Modèles du rayonnement solaire diffus pour la période chaude

Les *Figures 3* et *4* représentent respectivement les modèles du rayonnement solaire diffus en fonction du rayonnement solaire global et en fonction de la hauteur du soleil dans le ciel, pour la période chaude. Sur ces figures, le trait continu rouge représente le modèle obtenu par ajustement et les croix noires les valeurs mesurées du taux de rayonnement solaire diffus à Ouahigouya.



Figure 3 : Modèle du rayonnement diffus en fonction du global pour la période chaude



Figure 4 : Modèle du rayonnement diffus en fonction de la hauteur du soleil pour la période chaude

221

Pour la période chaude (de Mars à Juin), on observe que le taux de rayonnement solaire diffus (K_D) dans le rayonnement solaire global (K_{glob}) est faible comparé à la période de l'harmattan. Dans cette période, le rayonnement global est essentiellement constitué du rayonnement direct (*Figure 3*). Dans cette période, le taux de rayonnement solaire diffus (K_D) est diminue considérablement avec la hauteur (h) du soleil dans le ciel. Le taux de rayonnement diffus tend à s'annuler lorsque la hauteur du soleil tend vers 90° (*Figure 4*). Il convient de mentionner que dans la période chaude, le site de Ouahigouya se caractérise par un ciel clair. Dans le *Tableau 5* sont inscrits les modèles (*Équations (15)* et (*16)*) et les indicateurs statistiques de précision R^2 , σ^2 et *RMSE*, pour la période chaude.

Relation	Modèle	R^2	σ^2	RMSE
$K_{D}\left(K_{glob}\right)$	$K_{D} = 298.36 \left(K_{glob} \right)^{-0.371}$ (Equation (15))	0,9187	0,0013	0,0037
$K_{D}(h)$	$K_D = -15.86 \ln(h) + 90.395$ (Equation (16))	0,9697	0,0580	0,0252

 Tableau 5 : Modèles et indicateurs statistiques de précision pour la période chaude

D'après les résultats du **Tableau 5**, les valeurs de σ^2 et du *RMSE* sont très proche de zéro et la valeur de R^2 est très proche de un (1) pour le modèle de K_D en fonction de K_{glob} pour la période chaude. Cela indique un très bon accord entre le modèle et les valeurs mesurées. Pour le modèle du rayonnement solaire diffus en fonction de la hauteur (*h*) du soleil dans le ciel, les valeurs trouvées de σ^2 du *RMSE* ne sont pas très proches de zéro, mais nous semblent de valeurs acceptables. La valeur de R^2 est très proche de un (1) de $K_D(h)$. On peut donc dire que le modèle du rayonnement solaire diffus en fonction de la hauteur du soleil aiuste bien les données mesurées sur le site. Les modèles du rayonnement solaire diffus en fonction du global et de la hauteur du soleil dans le ciel trouvés pour la période chaude peuvent servir de modèle valables pour évaluer le rayonnement global reçu à la surface des capteurs solaires à cette période chaude de l'année [34].

3-3. Modèles du rayonnement solaire diffus pour la période pluvieuse

Les *Figures 5* et *6* représentent respectivement les modèles du rayonnement solaire diffus en fonction du rayonnement solaire global et en fonction de la hauteur du soleil dans le ciel, pour la période pluvieuse (Juillet à Octobre). Sur ces figures, le trait continu rouge représente le modèle obtenu par ajustement et les croix noires les valeurs mesurées du taux de rayonnement solaire diffus à Ouahigouya.



Figure 5 : Modèle du rayonnement diffus en fonction du global pour la période pluvieuse



Figure 6 : Modèle du rayonnement diffus en fonction de la hauteur du soleil pour la période pluvieuse

Dans la période pluvieuse (de juin à Octobre), on observe une augmentation systématique du rayonnement solaire diffus *(Figures 5 et 6)*. Cela est du au fait qu'à hauteur du soleil constant, les valeurs du taux de rayonnement diffus et l'intensité de (κ_{glob}) dépendent essentiellement de la couche nuageuse (son type, son épaisseur et sa nébulosité) [2, 5]. La période pluvieuse sur ce site est caractérisée par un taux d'humidité très élevé et parfois par des brouillards. Or une augmentation de l'humidité dans l'atmosphère augmente l'intensité du rayonnement solaire diffus au détriment de la composante directe du rayonnement solaire au sol [35]. Cette tendance indique que le taux de rayonnement diffus à Ouahigouya pendant la période pluvieuse est plus grand que pendant les périodes chaude et de l'harmattan. L'explication de ce comportement est que, pendant la période plus humide, l'activité des nuages est plus intense et l'humidité atmosphérique est plus grande que pendant la période plus sèche. Cet effet a également été observé dans plusieurs autres lieux [9, 35]. Dans le *Tableau 6* sont représentés les modèles *(Equations (17)* et *(18))* et les indicateurs statistiques de précision R², σ^2 et *RMSE*, pour la période pluvieuse.

Relation	Modèle		R^2	σ^2	RMSE
$K_{D}\left(K_{glob}\right)$	$K_D = 427.12 \left(K_{glob} \right)^{-0.385}$	(Equation (17))	0,9308	0,0027	0,0053
$K_D(h)$	$K_D = -17.52 \ln(h) + 108.01$	(Equation (18))	0,9882	0,1177	0,0360

Tableau 6 : Modèles et indicateurs statistiques de précision pour la période pluvieuse

Selon les *Équations (17)* et *(18)* du *Tableau 6*, pour une valeur donnée de (K_{glob}) , le (K_{D}) correspondant dans la période pluvieuse est plus élevé que le (K_{D}) correspondant des deux (2) autres périodes de l'année. D'après les résultats du *Tableau 6*, les valeurs de σ^2 et du *RMSE* sont très proche de zéro et la valeur de R^2 est très proche de un (1) pour le modèle de K_{D} en fonction de K_{glob} pour la période chaude. Cela indique un très bon accord entre le modèle et les valeurs mesurées sur le site. Pour le modèle du rayonnement solaire diffus en fonction de la hauteur (*h*) du soleil dans le ciel, les valeurs trouvées de σ^2 du *RMSE* ne sont pas très proches de zéro, mais nous semblent de valeurs acceptables. La valeur de R^2 est très proche de un (1) de $K_{D}(h)$. On peut donc dire que le modèle du rayonnement solaire diffus en fonction de la hauteur du soleil ajuste bien les données mesurées sur le site. Les modèles du rayonnement solaire diffus en fonction du global et de la hauteur du soleil dans le ciel trouvés pour la période pluvieuse peuvent servir de modèle valables pour évaluer le rayonnement global reçu à la surface des capteurs solaires à cette période pluvieuse de l'année [34].

3-4. Validation

223

Nous avons comparé les modèles obtenus par la méthode des moindres carrés avec le modèle de Lacis & Hansen [13] *(Équation (9)),* une méthode numérique de calcul, mettant en jeu les coefficients de trouble atmosphérique mesurés expérimentalement. Cette comparaison a donné un écart faible entre le modèle obtenu par la méthode des moindres carrés et le modèle de Lacis & Hansen. Le résultat de cette comparaison permet de valider ces modèles.

4. Conclusion

Le but principal de cet article était de trouver des modèles du rayonnement solaire diffus adaptés au site de Ouahigouya. Les mesures de rayonnement solaire global et diffus au sol sur le site étudié sont utilisées pour proposer ces modèles du rayonnement solaire diffus, par la méthode des moindres carrés. Ces modèles sont obtenus sur la base de la corrélation entre la fraction du rayonnement solaire diffus et global d'une part, entre la fraction du rayonnement solaire diffus et la hauteur du soleil dans le ciel, d'autre part. L'analyse de milliers de séries de données horaires du rayonnement solaire global et du rayonnement solaire diffus, montre que la fraction du rayonnement solaire diffus dans le global dépend des conditions climatiques, de façon générale. Il dépend beaucoup plus du type de nébulosité en période pluvieuse (nuages, indice de clarté) et de la hauteur du soleil dans ciel. L'analyse des indicateurs statistiques de précision et une comparaison entre les modèles obtenus par la méthode des moindres carrés et ceux de Lacis & Hansen a permis de valider ces modèles.

Références

- [1] E. KECHAR, E. AZZAG and I. TOUAÏBIA, "Influence des rayonnements solaires sur le rendement des panneaux photovoltaïques", 2ème conférence Internationale des énergies renouvelables CIER-2014, *International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET)*, Vol. 3, (2015) 71-77, Copyright - IPCO
- [2] J. BEAUMET, S. DOUTRELOUP, X. FETTWEIS and M. ERPICUM, "Modélisation du rayonnement solaire incident en présence de brouillard ou de stratus bas : évaluation et comparaison des performances des modèles climatiques régionaux WRF-ARW et MAR", XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège, (2015)
- [3] B. O. BILAL, V. SAMBOU, C. M. F. KEBE, M. NDONGO and P. A. NDIAYE, "Etude et Modélisation du potentiel solaire du site de Nouakchott et de Dakar", J. Sci, Vol. 7, N°4 (2007) 57 - 66
- [4] P. S. KORONAKIS, G. K. SFANTOS, A. G. PALIATSOS, A. G., J. K. KALDELLIS, J. E. GAROFALAKIS and I. P. KORONAKI, "Interrelations of UV-global/global/diffuse solar irradiance components and UV-global attenuation on air pollution episode days in Athens, Greece", *Atmospheric Environment*, Vol. 36, (2002) 3173 3181
- [5] M. R. YAÏCHE and S. M. A. BEKKOUCHE, "Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 13, N°4 (2010) 683 - 695

- [6] Philippe LAURET, John BOLAND and Barbara RIDLEY, "Derivation of a Solar Diffuse Fraction Model in a Bayesian Framework", CS-BIGS, 3 (2) (2010) 108 122
- [7] A. M'RAOUI, S. MOUHOUS, A. MALEK and B. BENYOUCEF, "Etude statistique du rayonnement solaire à Alger", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 14, N°4 (2011) 637 648
- [8] www.ifremer.fr/lpo/cours/mouvement/sab06.html : "Mesure du rayonnement solaire", (Mars 2017)
- [9] M. MESRI-MERAD, I. ROUGAB, A. CHEKNANE and N. I. BACHARI, "Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 15, N°3 (2012) 451 - 463
- [10] J.-A. GONZALEZ and J. CALBÓ, "Influence of the global radiation variability on the hourly diffuse fraction correlations", *Solar Energy*, Vol. 65, N°2 (1999) 119 - 131 p.
- [11] A. MEFTI, M.Y. BOUROUBI and A. KHELLAF, "Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 2, (1999) 69 - 85
- [12] Zhipeng QU, "La nouvelle méthode Heliosat-4 pour l'évaluation du rayonnement solaire au sol", Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, (2013)
- [13] M. KOUSSA, A. MALEK and M. HADDADI, "Validation de Quelques Modèles de Reconstitution des Eclairements dus au Rayonnement Solaire Direct, Diffus et Global par Ciel Clair", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 9, N°4 (2006) 307 - 332
- [14] K. DAHMANI, G. NOTTON, R. DIZENE and C. PAOLI, "Etat de l'art sur les réseaux de neurones artificiels appliqués à l'estimation du rayonnement solaire", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 15, N°4 (2012) 687 - 702
- [15] V. V. SATYAMURTY and P. K. LAHIRI, "Estimation of symmetric and asymmetric hourly global and diffuse radiation from daily values", *Solar Energy*, Vol. 48, N°1 (1992) 7-14
- [16] Barbara RIDLEY, Philippe LAURET and John W BOLAND, "Modeling of diffuse solar fraction with multiple predictors", *Renewable Energy xxx*, (2009) 1 - 6
- [17] Cyril VOYANT, "Prédiction de séries temporelles de rayonnement solaire global et de production d'énergie photovoltaïque à partir de réseaux de neurones artificiels", Thèse de doctorat de l'Ecole Doctorale Environnement et Société, Université de Corse-Pascal PAOLI, (2011)
- [18] G. WU, Y. LIU, and T WANG, "Methods and strategy for modeling daily global solar radiation with measured meteorological data - A case study in Nanchang station, China", *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, N°9 (2007) 2447 - 2452
- [19] S. AL-AYED, A. M. AL-DHAFIRI and M. B. MAHFOODH, "Global, direct and diffuse solar irradiance in Riyadh, Saudi Arabia", *Renewable Energy*, Vol. 14, N°1-4 (1998) 249 - 254
- [20] Luis MERINO, "Modélisation du rayonnement solaire pour la simulation thermique en milieu urbain", Thèse de doctorat de l'École Doctorale 71, Sciences pour l'ingénieur, Compiègne, (2013)
- [21] J. BOLAND, B. RIDLEY, and B. BROWN, "Models of diffuse solar radiation", *Renewable Energy*, Vol. 33, N°4 (2008) 575 - 584
- [22] H. ARAS, O. BALLI and A. HEPBASLI, "Estimating the horizontal diffuse solar radiation over the Central Anatolia Region of Turkey", *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, N°15 (2006) 2240 2249
- [23] A. P. De OLIVEIRA, A. J. MACHADO, J. F. ESCOBEDO and J. SOARES, "Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo : seasonal variation and modeling", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 71, N°3 (2002) 231 - 249
- [24] J. SOARES, A. P. OLIVEIRA, M. Z. BOŽNAR, P. MLAKAR, J. F. ESCOBEDO and A. J.MACHADO, "Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique", *Applied Energy*, Vol. 79, N°2 (2004) 201 - 214
- [25] www.decformations.com/mathematique/moindres_carres.php, "Méthode des moindres carrés", (Mai 2017)
- [26] M. CHEGAAR and A. CHIBANI, "Global solar radiation estimation in Algeria", *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, N°8 (2001) 967 973

Afrique SCIENCE 13(6) (2017) 212 - 225

- [27] www.googleearth.com : "*Coordonnées géographiques"*, (Novembre 2016)
- [28] www.pvsyst.com, "Bases de données météorologiques", (Avril 2010)
- [29] www.diagsol.com, "Diagramme solaire, position du soleil", (Novembre 2016)
- [30] G. LINDFIELD and J. PENNY, "Numerical methods : using MATLAB". *Academic Press*, (2012)
- [31] www.ybet-informatique.com/Excel/fonction, "Excel d'YBET Informatique", (Décembre 2016)
- [32] A. A. EL-SEBAII, F. S. AL-HAZMI, A. A. AL-GHAMDI and S. J. YAGHMOUR, "Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia", *Applied Energy*, Vol. 87, N°2 (2010) 568 - 576
- [33] C. P. JACOVIDES, F. S. TYMVIOS, V. D. ASSIMAKOPOULOS and N. A. KALTSOUNIDES, "Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation", *Renewable Energy*, Vol. 31, N°15 (2006) 2492 - 2504
- [34] Laurent LINGUET, "De la modélisation du rayonnement solaire à la production d'énergie : recherches sur l'optimisation de la production photovoltaïque en contexte amazonien", Rapport de synthèse de l'Université de Guyane, (2016)
- [35] A. P De OLIVEIRA, J. F. ESCOBEDO, A. J. MACHADO and J. SOARES, "Correlation models of diffuse solarradiation applied to the city of Sao Paulo, Brazil", *Applied Energy*, Vol. 71, N°1 (2002) 59-73