

## Evaluation de l'irradiation solaire globale sur une surface inclinée selon différents modèles pour le site de Bouzaréah

Karim Kerkouche <sup>1</sup>, Farida Cherfa, Amar Hadj Arab,  
Salim Bouchakour, Kamel Abdeladim et Karima Bergheul

Division Energie Solaire Photovoltaïque  
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER  
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340, Algiers, Algeria

(reçu le 29 Mars 2013 – accepté le 29 Juin 2013)

**Résumé** - *Un des facteurs majeurs dans l'évaluation du gisement solaire, pour le dimensionnement des systèmes photovoltaïques, est la disponibilité des données d'irradiation globale, horizontale et inclinée qui soient cohérentes et de haute qualité. Dans ce travail, nous analysons les résultats fournis par neuf modèles isotropiques et anisotropiques pour l'estimation des valeurs horaires de l'irradiation solaire diffuse qui seront par la suite utilisées pour l'évaluation des irradiances solaires globales inclinées horaires. La validation des modèles est effectuée par une comparaison entre l'irradiation globale calculée et celui mesuré sur une surface orientée Sud, incliné à 27° et avec un azimut de 20°. Les données des irradiances globales inclinées mesurées sont issues de la banque de données obtenues par le monitoring de la centrale photovoltaïque (PV) connectée au réseau du CDER en utilisant des méthodes à la fois graphiques et statistiques. Différents modèles ont été validés par plusieurs indicateurs statistiques pour diverses conditions de ciel. Des systèmes de notation ont été appliqués dans le but de marquer la performance relative de ces modèles. De bons résultats ont été obtenus pour le cas de l'irradiation globale inclinée, avec une erreur ne dépassant pas les 10%. Les modèles de Muneer et Ma-Iqbal donnent des résultats appréciables pour l'estimation de l'irradiation globale inclinée pour un ciel sans nuages et ceux de Ma-Iqbal et Klütcher pour un ciel très nuageux.*

**Abstract** - *A very important factor in the assessment of solar potential for the design of photovoltaic systems is the availability of data for global irradiation, must be coherent and high quality. In this work, we analyze the results from 09 models for the estimation of hourly values of solar diffuse. Model validation is assessed by a comparison between the global irradiation calculated and measured on the surface facing south, tilted at 27° with an azimuth of 20°. Global tilted irradiation data measured are available; thanks to a data acquisition which performs monitoring of the whole photovoltaic (PV) system connected to the CDER network using both graphical and statistical methods. The models performance for different sky conditions has been studied by using several statistical indicators. Different notation systems have been applied in an attempt to score the relative performance of the models. Under these conditions, the error for estimating global inclined radiation is calculated using the root mean square error which is no more than 10%. The global inclined radiation for a clear sky condition is well estimated by Ma-Iqbal and Muneer models and Ma-Iqbal and Klütcher models are well suited for a cloudy sky condition.*

**Mots-clés:** Indice de clarté - Irradiation globale horaire - Irradiation diffuse - Modèle isotropique - Modèle anisotropique.

---

<sup>1</sup> k.kerkouche@cder.dz

## 1. INTRODUCTION

Les stations météorologiques mesurent, en général, les intensités de l'irradiation solaire globale et diffuse sur des surfaces horizontales. Les systèmes stationnaires de conversion solaire, telle que les cellules photovoltaïques sont inclinées vers le soleil afin de maximiser la quantité de l'irradiation solaire incidente sur la surface du module photovoltaïque (PV). Par conséquent, l'irradiation solaire incidente sur une surface inclinée doit être déterminée par la conversion des intensités de l'irradiation solaire mesurées sur une surface horizontale afin de concevoir la taille du système et d'estimer son rendement.

L'irradiation incidente mesurée est convertie en une irradiation sur une surface inclinée par une relation géométrique relativement simple entre les deux surfaces. Il est évident que la composante diffuse de l'irradiation provient de tous les points du ciel, sauf du soleil. Il existe un nombre relativement important de modèles qui tentent de mettre en corrélation l'irradiation diffuse sur une surface inclinée à celle mesurée sur une surface horizontale. L'abondance de ces modèles témoigne de la complexité de la tâche de convertir l'irradiation solaire diffuse mesurée sur un plan horizontal à celle sur une surface inclinée. Neuf de ces modèles ont été testés en utilisant des données horaires mesurées par une acquisition de données installée au niveau de la centrale PV connectée au réseau du CDER à Alger. Ces données sont celles de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale et de l'irradiation globale sur une surface orientée sud et inclinée à  $27^\circ$  avec un azimut de  $20^\circ$ .

En traversant des obstacles, l'irradiation solaire est atténuée. Dans les modèles les plus simples, tels que celui de Liu&Jordan, l'irradiation diffuse est considérée comme isotropique, ce qui signifie que les contributions de toutes les parties du ciel sont identiques. Or ces modèles peuvent mener à des erreurs non négligeables pour certaines expositions, notamment les faces orientées sud (ce qui est notre cas) et pour certaines couvertures nuageuses [1]. Aussi pour minimiser les erreurs, il est conseillé d'utiliser des algorithmes plus évolués qui considèrent l'irradiation diffuse comme anisotropique. Ainsi certains modèles, tiennent compte des conditions d'ensoleillement pour évaluer non seulement l'intensité mais aussi la distribution de la luminosité dans le ciel qui est donné par ce qui est appelé l'indice de clarté ( $K_t$ ). On sait en effet qu'à un instant donné, la portion de l'atmosphère proche du soleil est une plus grande source d'irradiation diffuse que la zone proche du zénith de plus, cette distribution varie tout au long de la journée et elle doit être réévaluée à tout moment.

Afin d'estimer ' $K_t$ ', nous utilisons une formule empirique [2], basée sur la fraction diffuse horaire ' $K_d$ ' de l'irradiation solaire et la hauteur du soleil ' $\sinh$ '. Nous envisagerons donc deux méthodes pour estimer cette fraction diffuse: la première basée uniquement sur  $K_t$  et la deuxième sur  $K_t$  et  $\sinh$ . Ces deux méthodes vont nous permettre d'évaluer l'influence de ces 02 paramètres, sur l'estimation de l'irradiation diffuse horizontale. La confrontation pour chacun de ces neuf modèles est établie par une comparaison entre l'irradiation solaire globale calculée et celle mesurée sur la surface orientée au sud et inclinée en utilisant des méthodes statistiques et graphiques.

La présente analyse est basée sur des mesures enregistrées par le monitoring de la centrale PV connectée au réseau du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) (Fig. 1 et Fig. 2), situé à Bouzaréah (Alger) pour l'année 2007.



Fig. 1: Générateur photovoltaïque



Fig. 2: Local technique

Le générateur photovoltaïque est installé sur la terrasse du bloc administration du centre. Les coordonnées géographiques du lieu sont: latitude  $36,8^\circ$  N, longitude  $3,12$  E, azimut  $-20^\circ$  et altitude  $345$  m.

L'irradiation globale sur la surface horizontale, 'GHm', est mesurée à l'aide d'un pyranomètre 'Kipp & Zonen, type CM11', avec une précision de  $\pm 3\%$  et l'irradiation globale inclinée, 'Gicm', est mesurée à l'aide d'une cellule pilote. Ces capteurs sont connectés à une acquisition de données de 'type Agilent 34970A' qui stocke les données toutes les 15 min. Des valeurs moyennes sont par la suite calculées pour un intervalle de temps d'une heure (Fig. 3).

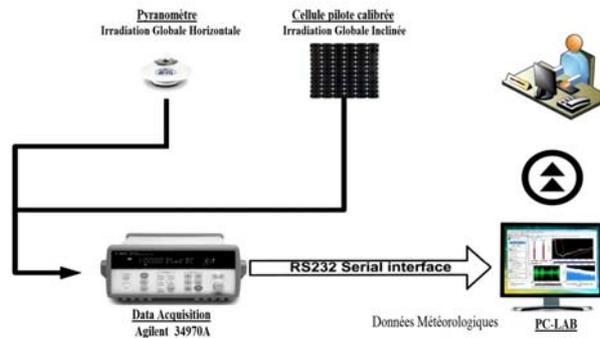


Fig. 3: Schéma synoptique de la collecte des données météorologiques

## 2. DESCRIPTION DES DIFFERENTES IRRADIATIONS

### 2.1 Irradiation extraterrestre

L'irradiation extraterrestre est directement liée aux paramètres astronomiques (déclinaison, angle horaire, latitude) sans dépendre des paramètres météorologiques.

Le rayonnement extraterrestre est donné par la relation suivante:

$$G_0 = 1367 \times \sin h \times (1 + 0.03344 \times \cos((0.98 \times N) - 2.8)) \quad (1)$$

$$\sin h = \sin(\varphi) \times \sin(\delta) + \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) \quad (2)$$

où, la constante solaire, 'Gcs' est égale à  $1367 \text{ W/m}^2$ . N représente le numéro du jour et  $\varphi$  la latitude du lieu, soit ( $36^\circ 48' \text{ N}$ ).

Calcul de 'sinh'

La déclinaison solaire,  $\delta$ , est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial terrestre ne dépendant que du lieu et de la date.

$$\delta = 23.45 \times \sin \left[ \frac{360}{365} \times (N + 284) \right] \quad (3)$$

L'angle horaire,  $\omega$ , se mesure à partir de midi solaire. Il est positif avant midi et négatif l'après-midi.

$$\omega = 15 \times (12 - \text{TSV}) \quad (4)$$

$$\text{avec, } \text{TSV} = H + (\lambda / 15) + \text{Et} \quad (5)$$

H, heure GMT ;  $\lambda$ , Longitude du lieu, (04°12' E) et Et, est l'équation du temps qui s'exprime par la relation suivante:

$$\text{Et} = (9.87 \times \sin(2B) - 7.5 \times \cos B - 1.5 \times \sin B) \times 1/60 \quad (6)$$

$$\text{avec, } B = \frac{2\pi \times (N - 81)}{364} \quad (7)$$

## 2.2 Irradiation globale inclinée

L'irradiation globale inclinée est constituée de trois composantes :

- La composante directe, Gbi
- La composante réfléchie de l'irradiation solaire, Gr
- La composante diffuse, Gdi .

La modélisation des deux premières composantes, à savoir le direct et le réfléchi peuvent être obtenus à l'aide d'une relation simple. Par contre le problème réside en la modélisation de l'irradiation diffuse. Pour le calcul de cette dernière composante, la connaissance de la position du soleil est insuffisante, il est nécessaire de tenir compte de la modélisation de l'état du ciel à tout moment de la journée, de  $K_t$  et de  $K_d$ .

## 2.3 Irradiation directe inclinée

La composante directe est donnée par la relation suivante:

$$G_{bi} = R_b \times G_b H \quad (8)$$

$$R_b = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (9)$$

avec,

$$\cos \theta = \sin \delta \times \sin \varphi \times \cos \beta - \sin \delta \times \cos \varphi \times \sin \beta \times \cos \gamma + \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos \beta \times \cos \omega + \cos \delta \times \sin \varphi \times \sin \beta \times \cos \gamma \times \cos \omega + \cos \delta \times \sin \beta \times \sin \gamma \times \sin \omega \quad (10)$$

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega \quad (11)$$

## 2.4 Irradiation réfléchie

La composante réfléchie, Gr, est donnée par la relation suivante:

$$Gr = \rho \times \frac{GH \times (1 - \cos\beta)}{2} \quad (12)$$

où,  $\rho$ , représente le coefficient de réflexion de la lumière diffuse du sol et  $\beta$ , l'inclinaison du champ PV. Pour le site de Bouzaréah,  $\rho = 0.2$  et  $\beta = 27^\circ$ .

### 2.5 Irradiation diffuse inclinée

La conversion de l'irradiation diffuse horizontale en une irradiation diffuse sur une surface inclinée peut être représentée par la relation suivante:

$$G_{di} = G_{dH} \times F_c \quad (13)$$

où  $F_c$ , est le facteur de conversion défini comme étant le rapport de l'irradiation diffuse inclinée sur l'irradiation diffuse horizontale.

Afin d'évaluer l'irradiation diffuse horizontale, la littérature propose des modèles mathématiques qui utilisent des corrélations mathématiques entre  $K_t$  et  $K_d$ . Dans cette étude, neuf modèles sont décrits et présentés en partie trois.

La fraction diffuse horaire est définie par la relation suivante:

$$K_d = G_{dH} / GH \quad (14)$$

$K_t$  est défini comme étant le rapport entre l'irradiation globale horizontale,  $GH$ , et l'irradiation extraterrestre,  $G_0$ .

$$K_t = GH / G_0 \quad (15)$$

En remplaçant  $G_0$  par la relation donnée par l'équation (4),

$$K_d = 1 - 0.14 \times K_t - 0.037 \times \sinh \quad (16)$$

Le développement de la relation entre  $K_t$  et  $K_d$  analysée dans différentes littératures [2, 3] permet d'utiliser pour le site d'Alger, trois intervalles de  $K_t$ , tels que:

$$0 \leq K_t \leq 0.175 \quad ; \quad 0.175 \leq K_t \leq 0.87 \quad ; \quad K_t \geq 0.87 \quad (17)$$

L'évaluation de  $K_d$  va se faire à l'aide d'une première méthode en tenant compte des deux variables que sont  $K_t$  et  $\sinh$  et d'une seconde méthode en négligeant l'effet de  $\sinh$  et ceci afin d'en dégager le ou les modèles qui répondent sans trop d'erreurs au calcul de l'irradiation globale inclinée pour le site d'Alger.

### 3. DESCRIPTION DES MODELES UTILISES

Afin d'évaluer la fraction diffuse, nous considérons donc deux méthodes. La première tient compte de l'effet  $K_t$  uniquement et la seconde fait intervenir non seulement  $K_t$ , mais aussi  $\sinh$ .

*Première méthode-  $K_d$  en fonction de  $K_t$*

$0 \leq K_t \leq 0.175$	$0.175 \leq K_t \leq 0.87$	$K_t \geq 0.87$
$K_d = 1 - 0.232 K_t$	$K_d = 1.17 - 1.23 K_t$	$K_d = 0.203$

(18)

Seconde méthode-  $K_d$  en fonction de  $K_t$  et  $\sinh$

$0 \leq K_t \leq 0.175$	$0.175 \leq K_t \leq 0.87$	$K_t \geq 0.87$
$K_d \leq 1$	$K_d \leq 0.97$	$K_d \geq 0$
$K_d = 1 - 0.14 K_t - 0.037 \sinh$	$1 - 0.43 K_t + 0.0237 \sinh$	$0.23 K_t - 0.74 \sinh$ (19)

En remplaçant  $K_t$  par sa valeur, on en déduit l'irradiation diffuse horizontale horaire  $GdH$ . L'irradiation directe  $GbH$  sera donnée par la relation suivante:

$$GbH = GH - GdH \quad (20)$$

Pour l'évaluation de la composante diffuse sur une surface inclinée, 'Gdi', neuf modèles [4] sont retenus parmi les plus représentatifs, figurants sur le **Tableau 1** et dont les symboles sont définis dans la nomenclature [5, 6]. Les neuf modèles utilisent le même procédé de calcul de l'irradiation direct et réfléchi, la seule différence est dans le traitement de l'irradiation diffuse [7-9].

L'irradiation diffuse inclinée, 'Gdi' ainsi calculée et les autres paramètres tels que l'irradiation directe inclinée, 'Gbi' et l'irradiation réfléchie, 'Gr' vont permettre le calcul de l'irradiation globale inclinée, 'Gic'.

**Tableau 1:** Détails et Relations mathématiques des modèles de l'irradiation diffuse sélectionnés pour l'analyse en cours

Modèle	Année	Type	Expressions mathématiques
<b>Liu&amp;Jordan</b>	1961	Iso.	$Gdi = GdH \times \cos^2(\beta/2)$
<b>Temps&amp;Coulson</b>	1977	Ani.	$Gdi = GdH \times \cos^2(\beta/2) \times [1 + \sin^2(\beta/2)] \times [1 + \cos^2\theta \times \sin^2\theta_z]$
<b>Hay</b>	1979	Ani.	$Gdi = GdH \times F \times R_b + (1 - F) \times \cos^2(\beta/2)$ $F = GbH / G0$
<b>Klütcher</b>	1979	Ani.	$Gdi = GdH \times \cos^2(\beta/2) \times [1 + F' \times \sin^2(\beta/2)] \times [1 + F' \times \cos^2\theta \times \sin^2\theta_z]$ $F' = 1 - (GdH / GHm)^2$
<b>Willmot</b>	1982	Ani.	$Gdi = GdH \times GbI \times R_b / Gcs + C_\beta \times (1 - GbI / Gcs)$ $C_\beta = 1.0115 - 0.20293\beta - 0.080823\beta^2$
<b>Ma-Iqbal</b>	1983	Ani.	$Gdi = GdH \times K_t \times R_b + (1 - K_t \times \cos^2(\beta/2))$
<b>Skartveit-Olseth</b>	1982	Ani.	$Gdi = GdH \times F \times R_b + B \times \cos\beta + (1 - F - B) \times \cos^2(\beta/2)$ $B = \max[(0.3 - 2F), 0]$

<b>Reindl et al.</b>	1990	Ani.	$G_{di} = G_d H \times F \times R_b + (1 - F) \cos^2(\beta/2) \times [1 + f \times \sin^2(\beta/2)]$ $f = (G_b H / G_{Hm})^{0.5}$
<b>Muneer</b>	1997	Ani.	$G_{di} = G_d H \times TM \times (1 - F) + F \times R_b$ $TM = \cos^2(\beta/2) + 2b / [\pi(3 + 2b)]$ $\times [\sin\beta - S \cos\beta - \pi \sin^2(\beta/2)]$ $\text{et } 2b / [\pi(3 + 2b)] = 0.00263 - 0.712 \times F - 0.688 \times F^2$

Le modèle le plus simple, de Liu & Jordan [10] suppose que le rayonnement solaire diffus est isotrope, alors que les autres modèles plus complexes introduisent différents paramètres représentant les caractéristiques inhérentes anisotropiques du rayonnement diffus. Ces derniers insèrent des paramètres qui tentent de rendre compte de tout ou d'une partie des facteurs anisotropiques, tels que le rayonnement circumsolaire, les conditions du ciel et l'état de l'horizon.

Afin de synthétiser les deux méthodes d'évaluation de l'irradiation globale inclinée appliquée aux neuf modèles devant permettre de calculer l'irradiation diffuse inclinée, un algorithme a été élaboré.

L'algorithme, de la figure 4, donne la méthode de calcul de l'évaluation des performances des irradiations globales inclinées, afin de valider les données des irradiations globales horaires mesurées au niveau de la centrale du CDER.

#### 4. FORMULES STATISTIQUES

Les modèles décrits au paragraphe précédent vont permettre d'évaluer l'irradiation globale inclinée horaire 'G<sub>ic</sub>' afin d'être comparée à l'irradiation globale inclinée horaire mesurée 'G<sub>im</sub>'.

Plusieurs indicateurs statistiques utilisés dans la littérature [11], vont nous permettre de confronter les données obtenues par les modèles d'estimation de l'irradiation solaire globale et les données mesurées.

Les indicateurs utilisés sont:

**RMSE** (Root mean square errors)- Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_{ic} - G_{im})^2}{n}} \quad (21)$$

n, Nombre d'heures d'irradiation accumulées pendant l'année.

La RMSE est une mesure de la variation des valeurs calculées, selon chaque modèle autour des valeurs mesurées. Plus sa valeur est petite, plus le modèle est meilleur.

**RMSE (%)** (Relative root mean square error)- Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne relative.

$$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{(\sum_{i=1}^n G_{ic} / n)} \times 100 \quad (22)$$

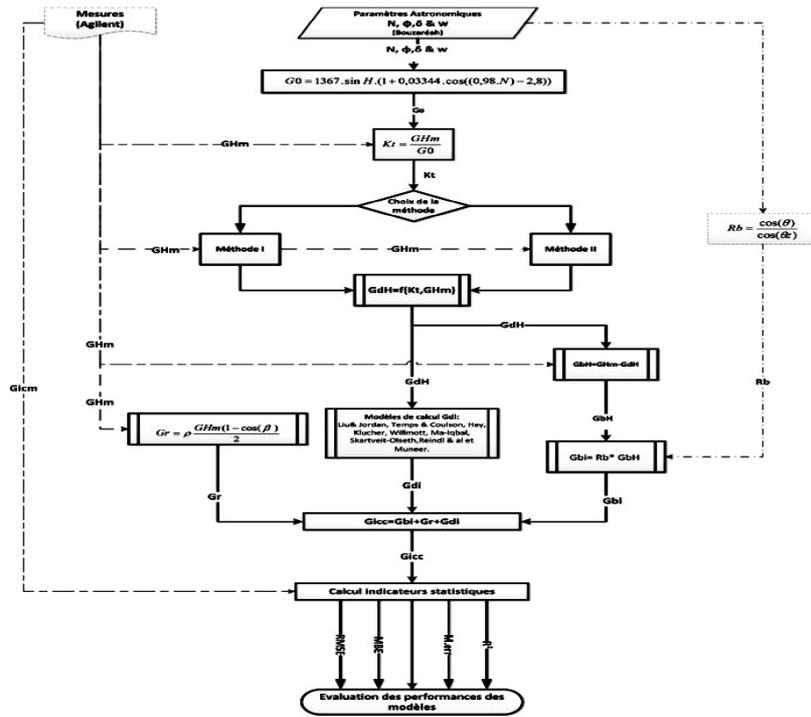


Fig. 4: Algorithme de l'évaluation des performances de l'irradiation globale inclinée

**MBE** (Mean bias error)- Erreur de biais moyen.

$$MBE = \sum_{i=1}^n \frac{(Gic - Gim)}{n} \quad (23)$$

La MBE donne une indication sur la déviation moyenne des valeurs calculées par rapport aux valeurs mesurées. Une valeur positive indique une sur-estimation par contre une valeur négative indique une sous-estimation.

**MBE (%)** (Relative mean bias error)- Erreur relative de biais moyen.

$$MBE(\%) = \frac{1}{n} \times \frac{MBE}{\left(\sum_{i=1}^n Gic\right)} \times 100 \quad (24)$$

**M.ERR** (Mean error)- Erreur moyenne.

$$M.ERR = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{Gic - Gim}{Gim} \right) \times 100 \quad (25)$$

$R^2$  (Coefficient of determination)- Coefficient de détermination.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (G_{ic} - G_{icmean}) \times (G_{im} - G_{immean})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (G_{ic} - G_{icmean})] \times [\sum_{i=1}^n (G_{im} - G_{immean})]}} \quad (26)$$

$G_{icmean}$  : Irradiation inclinée moyenne annuelle calculée et  $G_{immean}$  : Irradiation inclinée moyenne annuelle mesurée.

L'indicateur  $R^2$  varie entre 0 et 1. Une valeur de 1 ou proche de 1 indique un parfait accord entre la valeur mesurée et calculée. Par contre, une valeur proche de 0 indique un total désaccord.

## 5. INTERPRETATION DES RESULTATS

Les corrélations empiriques pour l'estimation de l'irradiation globale sur une surface inclinée sont proposées pour le site de Bouzaréah (Alger), en utilisant les données de l'irradiation solaire collectées, grâce au monitoring de la centrale PV connectée au réseau pour l'année 2007.

Les indicateurs statistiques RMSE, MBE,  $R^2$  et Erreur moyenne des différents modèles en fonction de  $K_t$  et de  $\sinh$  sont résumés dans le **Tableau 2** et représentés par les figures 5 et 6, donnent les interprétations suivantes:

On remarque que:

Le RMSE varie entre 35.85 et 47.11 W/m<sup>2</sup> dans le cas où seul  $K_t$  est pris en compte.

De même le RMSE varie de 44.43 W/m<sup>2</sup> à 75.41 W/m<sup>2</sup> dans le cas où on tient compte de  $K_t$  et  $\sinh$ .

Lorsque l'on tient compte de  $K_t$  uniquement, le RMSE et le RMSE relatif donnent le plus grand écart pour le modèle de Ma-Iqbal et le plus petit écart pour les modèles de Liu&Jordan et Klücher. Ces deux derniers modèles sont ceux qui décrivent le mieux l'irradiation sur le site de Bouzaréah.

Lorsqu'on tient compte de  $K_t$  et de  $\sinh$ , le RMSE et le RMSE relatif à l'irradiation globale inclinée calculée donnent un écart important pour le modèle de Skarveit et un écart minimum pour le modèle de Ma-Iqbal. Ce dernier est donc le modèle qui décrit le mieux l'irradiation sur le site de Bouzaréah.

Lorsque l'on tient compte de  $K_t$  uniquement, le MBE et le MBE relatif à l'irradiation globale calculée donnent étonnement une surestimation importante de l'erreur pour Ma-Iqbal et plus logiquement un écart intéressant pour Willmott et Liu&Jordan. Tous les autres modèles sont en surestimation et ou en sous-estimation.

Lorsque l'on tient compte de  $K_t$  et de  $\sinh$ , le MBE et le MBE relatif à l'irradiation globale inclinée donnent un écart important et aberrant pour le modèle de Skarveit et de Ma-Iqbal et un écart minimum pour le modèle de Muneer

Lorsque l'on tient compte de  $K_t$  uniquement, l'erreur moyenne relativement à l'irradiation globale mesurée donne une erreur maximale pour le modèle de Reindl et une erreur minimum pour les modèles de Liu&Jordan, de Klütcher et de Coulson.

Lorsqu'on tient compte de  $K_t$  et de  $\sinh$ , le modèle de Klütcher donne une grande erreur et le modèle de Ma-Iqbal la plus petite erreur.

L'indicateur  $R^2$  est inférieur à 1 pour tous les modèles quelque soit le cas. Tout en étant inférieur à 1, les modèles de Hay et de Reindl sont les plus proches de 1. Donc ces deux derniers modèles sont relativement ceux où l'irradiation calculée et mesurée sont les plus proches.

Une synthèse de l'analyse des entrées du **Tableau 2** montre que le modèle anisotropique où l'on peut tenir compte de  $K_t$  et de  $\sinh$ , est celui de Ma-Iqbal et les modèles anisotropiques de Skarveit et Klütcher ne peuvent pas être utilisés pour le site de Bouzaréah, car ils donnent de mauvaises performances.

Lorsque l'on ne dispose pas de la donnée 'hauteur du soleil' les modèles anisotropiques de Klütcher, Coulson et Willmott donnent de meilleurs résultats. Le modèle de Klütcher prédit des résultats plus précis que celui de Willmott dans le cas où seul  $K_t$  est pris en compte. Tous ces résultats peuvent être résumés dans le **Tableau 3**.

**Tableau 2:** Résultats statistiques des différents modèles

	Liu&Jordan	Coulson	Klütcher	Hay	Ma-Iqbal	Skarveit	Reindl	Muneer	Willmott
RMSE -1	35,85	37,68	36,04	38,68	47,11	38,49	39,22	36,52	37,44
RMSE -2	62,21	61,53	61,44	53,46	44,43	75,41	47,79	53,41	67,30
MBE -1	1,73	3,94	4,03	12,35	25,08	-9,30	13,64	4,61	-1,26
MBE -2	-19,84	-15,82	-18,54	-8,27	24,29	-46,30	-5,29	-1,86	-38,23
RMSE(%) -1	9,66	10,09	9,65	10,13	11,94	10,68	10,23	9,76	10,17
RMSE(%) -2	17,77	17,39	17,50	14,80	11,28	23,33	13,12	15,22	20,31
MBE (%) (1)	0,47	1,06	1,08	3,23	6,36	-2,58	3,56	1,23	-0,34
MBE (%) -2	-5,67	-4,47	-5,28	-2,29	6,17	-14,32	-1,45	-0,53	-11,54
M.ERR(%) -1	14,20	14,64	14,38	17,93	17,88	17,85	18,14	16,69	15,08
M.ERR(%) -2	17,88	18,15	25,37	20,48	17,79	22,43	19,72	19,20	18,84
$R^2$ (1)	0,9934	0,9928	0,9934	0,9935	0,9931	0,9929	0,9935	0,9933	0,9930
$R^2$ (2)	0,9842	0,9832	0,9838	0,9861	0,9940	0,9903	0,9888	0,9893	0,9899

(1) résultat en tenant compte de  $K_t$

(2) résultat avec  $K_t$  et  $\sinh$

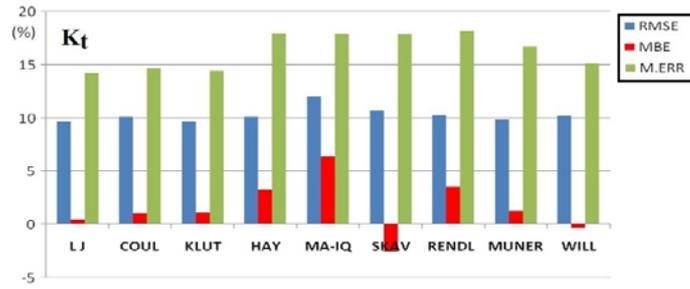


Fig. 5: RMSE, MBE et Erreur Moyenne indiquant les écarts relatifs entre les valeurs expérimentales estimées pour les différents modèles en tenant compte de  $K_t$  seul

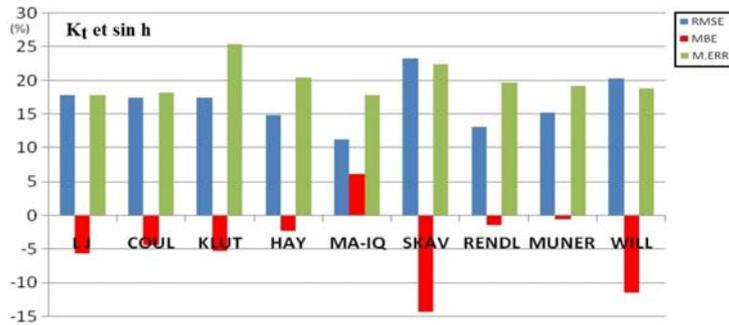


Fig. 6: RMSE, MBE et Erreur Moyenne indiquant les écarts relatifs entre les valeurs expérimentales estimées pour les différents modèles en tenant compte de  $K_t$  et de  $\sin h$

**Tableau 3:** Indicateurs statistiques des meilleurs modèles

Erreur relative	Meilleur modèle
<b>RMSE = 9.54 % -(1)</b>	Klütcher
<b>RMSE = 11.28 % -(2)</b>	Ma-Iqbal
<b>MBE = 1.06 % -(1)</b>	Coulson
<b>MBE = 6.17 % -(2)</b>	Ma-Iqbal
<b>M.ERR = 14.38 % -(1)</b>	Klütcher
<b>M.ERR = 17.79 % -(2)</b>	Ma-Iqbal

Pour une analyse plus fine et afin d'apprécier l'écart entre les différents modèles et le modèle mesuré, les graphes des figures 7 et 8 représentent l'irradiation globale mensuelle calculée pour chaque modèle et de l'irradiation globale mensuelle mesurée.

L'analyse visuelle de ces figures permet une meilleure appréciation de l'effet de  $K_t$ , mis en évidence sur ces graphes en fonction des saisons.

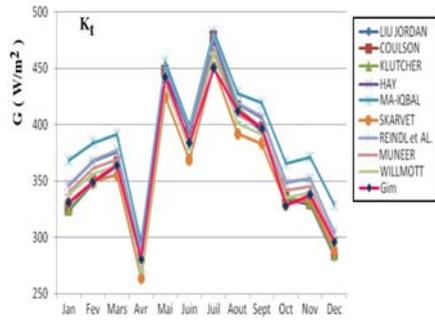


Fig. 7: Irradiation moyenne mensuelle avec  $K_t$

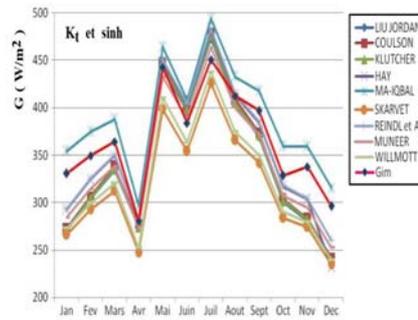


Fig. 8: Irradiation moyenne mensuelle avec  $K_t$  et  $\sinh$

C'est ainsi que les neuf modèles en fonction de  $K_t$  et de  $K_t$  et  $\sinh$  et des indicateurs statistiques RMSE relatif, MBE relatif, et Erreur Moyenne sont représentés sur les 8 graphes de la figure 9.

C'est ainsi que:

#### Pour la période de l'été (21 Juin - 21 Septembre)

- La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne relative (RMSE relatif) permet de conclure que les données de la centrale sont validées par le modèle de Liu&Jordan et Willmott dans le cas où on tient compte uniquement de  $K_t$ . Par contre le modèle de Ma-Iqbal est le meilleur modèle pour décrire le rayonnement diffus lorsqu'on tient compte de  $\sinh$  et de  $K_t$ .
- L'erreur relative de biais moyen (MBE relatif) permet de conclure que si on tient compte uniquement de  $K_t$ , le rayonnement diffus est décrit correctement par les modèles de Liu&Jordan et Muneer. Avec l'effet supplémentaire de  $\sinh$ , le rayonnement diffus est décrit pour le mieux à l'aide du modèle de Liu&Jordan et de Klütcher.
- L'erreur moyenne donne le modèle de Willmott comme meilleur modèle qui valide les données décrivant l'irradiation diffuse, lorsqu'on tient compte de  $K_t$  uniquement. De même lorsqu'on rajoute l'effet de  $\sinh$  à l'effet de  $K_t$ , le modèle de Ma-Iqbal est celui qui donne la plus petite erreur.

#### Pour la période de l'automne (21 Septembre – 21 Décembre)

- Avec le RMSE relatif, le modèle qui se rapproche le plus est celui de Klütcher lorsqu'on ne tient compte que de  $K_t$  et celui de Ma-Iqbal lorsqu'on tient compte aussi de  $\sinh$ .
- Avec le MBE relatif, le modèle se rapprochant le plus des données décrivant le rayonnement est celui de Klütcher en tenant compte de  $K_t$  et le modèle de Ma-Iqbal lorsqu'on tient compte de  $\sinh$ .

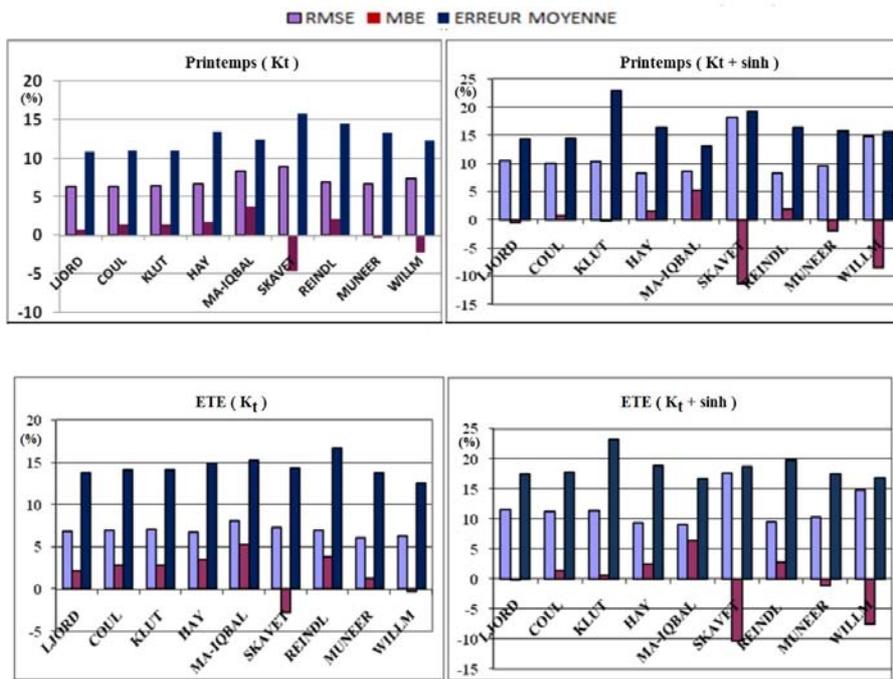
- Avec l'erreur moyenne, les modèles de Liu&Jordan et celui de Coulson donnent le plus petit écart et valident bien les données du rayonnement en tenant compte de  $K_t$  et celui de Reindl lorsqu'on tient compte de  $\sinh$  et de  $K_t$ .

**Pour la période de l'hiver** (21 Décembre – 21 Mars)

- Avec le RMSE relatif- Le modèle de Klutcher dans le cas de  $K_t$  et celui de Ma-Iqbal dans les cas de  $K_t$  et  $\sinh$ .
- Avec le MBE relatif- Le modèle de Skarveit et Willmott avec  $K_t$  et celui de Ma-Iqbal avec  $K_t$  et  $\sinh$ .
- Avec l'Erreur Moyenne: le modèle de Liu&Jordan et klütcher avec  $K_t$  et celui de Liu&Jordan et Coulson.

**Pour la période du printemps** (21 mars- 21 juin)

- Avec le RMSE relatif: le modèle de Liu&Jordan et Coulson dans le cas de  $K_t$  et celui de Hay dans le cas de  $K_t$  et  $\sinh$ .
- Avec le MBE relatif: le modèle de Liu&Jordan et Muneer dans le cas de  $K_t$  et celui de Klütcher dans le cas de  $K_t$  et  $\sinh$ .
- Avec l'Erreur Moyenne: le modèle de Liu&Jordan et Coulson dans le cas de  $K_t$  et celui de Ma-Iqbal dans le cas de  $K_t$  et  $\sinh$ .



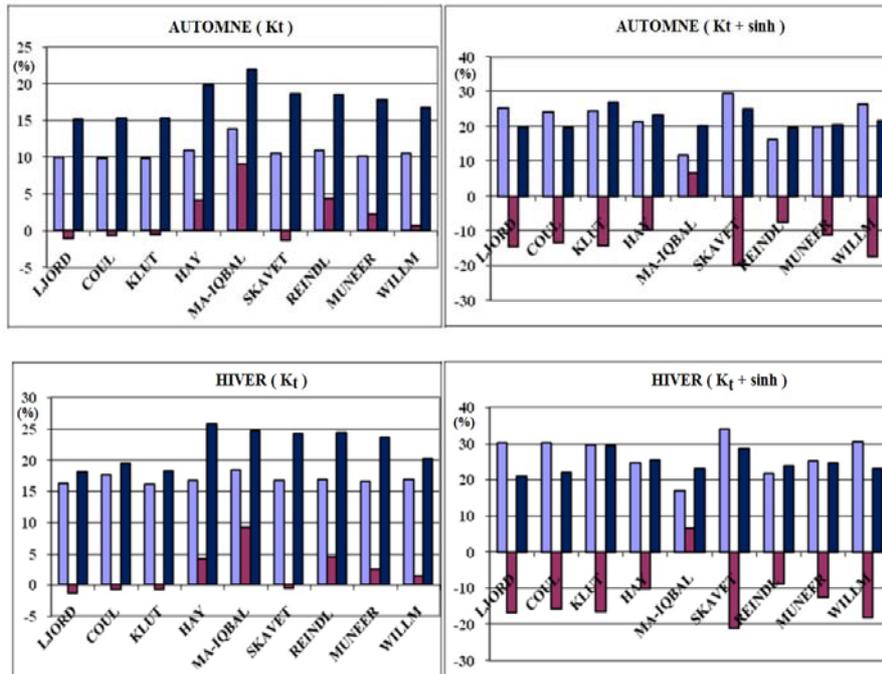


Fig. 9: Répartition des différents indicateurs statistiques relatifs en fonction des saisons

## 6. CONCLUSION

La modélisation de l'irradiation globale inclinée mesurée à l'aide du monitoring de la centrale PV connectée au réseau du CDER a été réalisée. Afin d'envisager tous les types de ciel, différentes valeurs de  $K_t$  et de la fraction diffuse permettent de définir trois grands types de ciel: ciel clair, ciel partiellement nuageux et ciel couvert. Pour évaluer correctement l'irradiation dans toutes les parties du ciel, il faut également tenir compte de  $\sinh$ .

C'est ainsi que les différentes combinaisons issues des trois paramètres que sont  $K_t$ , la fraction diffuse et  $\sinh$  appliquées aux neuf modèles connus et expérimentées de l'évaluation de l'irradiation diffuse, nous ont permis de calculer l'irradiation globale inclinée.

La comparaison de l'irradiation globale inclinée mesurée et de l'irradiation globale inclinée calculée pour chacun des modèles, nous a permis de déduire que les modèles de Klütcher et Coulson donnent un écart minimal (RMSE = 9.54%, MBE = 1,06%, M.ERR = 14,38%), lorsqu'on tient compte uniquement de  $K_t$ , quelque soit l'état du ciel durant toute l'année.

De même, le modèle de Ma-Iqbal donne une erreur minimale lorsque l'on tient compte de  $K_t$  et de  $\sinh$ , quelque soit l'indicateur statistique (RMSE = 11.28%, MBE = 6.17%, M.ERR = 17.79%).

L'étude saisonnière permet une analyse selon l'état du ciel et de  $\sin h$ , et permet de faire les déductions suivantes:

Pour l'été- Les modèles de Willmott et de Muneer sont les modèles qui décrivent le mieux l'irradiation diffuse lorsque seul  $K_t$  est considéré et le modèle de Ma-Iqbal celui qui le décrit le mieux lorsque l'on tient compte également de  $\sin h$ .

Pour l'automne- Les modèles de Klütcher et Coulson sont les meilleurs modèles lorsque l'on tient compte de  $K_t$  seul et les modèles de Ma-Iqbal et de Reindl sont ceux qui décrivent le mieux l'irradiation diffuse, lorsque s'ajoute l'effet de  $\sin h$ .

Pour l'hiver- Les meilleurs modèles sont ceux de Klütcher et de Willmott lorsque seul  $K_t$  est pris en compte et ceux de Ma-Iqbal et de Coulson lorsque s'ajoute l'effet de  $\sin h$ .

Pour le printemps- Coulson et Muneer sont les meilleurs modèles dans le cas où seul  $K_t$  est considéré et Klütcher et Ma-Iqbal avec l'effet de  $\sin h$ .

Cette étude a donc permis d'évaluer les performances de l'irradiation globale inclinée calculée grâce aux neuf modèles testés et de conclure quel est le modèle le plus adéquat à utiliser pour le site de la centrale PV connectée au réseau à Bouzaréah en fonction du type de ciel.

## NOMENCLATURE

$G_0$ : Irradiation horizontale extraterrestre, $W/m^2$	$GH_m$ : Irradiation globale horizontale mesurée, $W/m^2$
$G_{bH}$ : Irradiation directe horizontale, $W/m^2$	$G_{dH}$ : Irradiation diffuse horizontale, $W/m^2$
$G_b$ : Irradiation directe, $W/m^2$	$G_r$ : Irradiation réfléchie, $W/m^2$
$G_{im}$ : Irradiation globale inclinée mesurée, $W/m^2$	$G_{ic}$ : Irradiation globale inclinée calculée, $W/m^2$
$G_{cs}$ : Constante solaire, = 1367 $W/m^2$	$\varphi, \lambda$ : Latitude, Longitude
$\theta_z, \omega$ : Angle zénithal, Angle horaire	$\gamma, \delta$ : Angle azimuthal, Déclinaison solaire
$\beta, \rho$ : Inclinaison module, Albédo sol	$\theta, S$ : Angle d'incidence, surface module
$\sin h, N$ : Hauteur soleil, Numéro jour	$TM$ : Facteur d'inclinaison
$R_b$ : Facteur d'inclinaison de l'irradiation directe	$C_\beta$ : Facteur de réduction isotropique pour surface
$K_t, K_d$ : Indice de clarté, fraction diffuse	$F$ : Facteur de clarté du ciel de Hay
$F_c, Alt$ : Facteur de conversion, Altitude	$F'$ : Fonction de modulation de Klütcher

## REFERENCES

- [1] R. Perez, R. Stewart, C. Arbogast, R. Seals and J. Scott, 'An Anisotropic Hourly Diffuse Radiation Model for Surfaces: Description, Performance Validation, Site Dependency Evaluation', Solar Energy, Vol. 36, N°6, pp. 481 – 497, 1986.
- [2] M. Chikh, A. Malek et M. Drif, 'Corrélation de la Fraction Diffuse de l'Irradiation Solaire en Algérie', Revue des Energies Renouvelables, Valorisation, Tlemcen, pp. 125 - 129, 1999.

- [3] M. Chikh, A. Maafi et A. Malek, '*Etablissement d'un Modèle Mathématique pour la Fraction Diffuse de l'Irradiation Solaire en Algérie*', Revue des Energies Renouvelables, 'Chemss 2000, pp. 75 - 81, 2000.
- [4] Efim G. Evseev and Avraham I. Kudish, '*The Assessment of Different Models to Predict the Global Solar Radiation on a Surface Tilted to the South*', Solar Energy, Vol. 83, N°3, pp. 377 - 388, 2009.
- [5] J.F. Orgill and K.G.T. Hollands, '*Estimation Equation for Hourly Diffuse Radiation on Horizontal Surface*', Solar Energy, Vol. 19, N°4, pp. 357 - 359, 1977.
- [6] D.G. Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie, '*Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation*', Solar Energy, Vol. 28, N° 4, pp. 293 - 302, 1982.
- [7] DT Reindl, W.A. Beckman and J.A. Duffie, '*Diffuse Fraction Correlation*', Solar Energy, Vol. 45, N°1, pp. 1 - 7, 1990.
- [8] D.T. Reindl, W.A. Beckman and J.A. Duffie, '*Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models*', Solar Energy, Vol. 45, N°1, pp. 9 - 17, 1990.
- [9] J.E. Hay and J.A. Davies, '*Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface*', In Proceedings, First Canadian Solar Radiation Data Workshop, J.E. Hay and T.K. Won, Eds., Toronto, Ontario, Canada, 1978.
- [10] B.Y.H. Liu and R.C. Jordan, '*The Interrelation and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation*', Solar Energy, Vol. 4, N°3, pp. 1 - 19, 1960.
- [11] E.D. Mehleri, P.L. Zervas, H. Sarimveis, J.A. Palyvos and N.C. Markatos, '*A New Neural Network Model for Evaluating the Performance of Various Hourly Slope Irradiation Models: Implementation for the Region of Athens*', National Technical University of Athens, School of Chemical Engineering, Zographou Campus, Athens 15780, Greece, Vol. 35, N°7, pp. 1357 - 1362, 2010.