

# Techniques de modélisations de l'irradiation solaire sur un plan incliné

S. Benkaciali<sup>#</sup>, K. Gairaa<sup>\*</sup>

<sup>#</sup>Unité de recherche appliquée aux énergies renouvelables, Centre de développement des énergies renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria

<sup>1</sup>b\_gisement1@yahoo.fr

<sup>2</sup>sisol47@gmail.com

**Abstract**— Notre étude consiste à examiner les performances des modèles de rayonnement solaire pour estimer l'irradiation globale quotidienne sur une surface inclinée pour le site de Ghardaïa (latitude = 32.23°N, longitude = 3.45°E). Ces irradiations sont calculées par intégration numérique de l'éclairement solaire obtenu à l'aide de la station radiométrique (Sun-Tracker) et de deux pyranomètres fixes, pour la mesure de l'éclairement global sur une surface horizontale et sur une surface inclinée à la latitude du lieu, orientée vers le sud. Une étude statistique est effectuée afin d'établir une conformité des modèles par rapport aux mesures. Le test statistique comprend trois formules, les erreurs moyennes (MBE et NDMBE), les erreurs quadratiques moyennes (RMSE, NDRMSE) et l'erreur relative moyenne (M.ERR). L'analyse statistique révèle les performances des modèles de La-Iqbal et de Temps & Coulson. Les valeurs statistiques moyennes obtenues sont :  $\overline{MBE} = -1.89\%$ ,  $\overline{RMSE} = 6.08\%$  (Temps & Coulson),  $\overline{MBE} = -3.16\%$ ,  $\overline{RMSE} = 5.63\%$  (Ma-Iqbal),

**Keywords**— Station radiométrique, éclairement solaire, irradiation solaire, modèles empiriques, formules statistiques

## I. INTRODUCTION

Des données précises sur le rayonnement solaire sont nécessaires pour la conception, la simulation et une bonne performance de tous les projets impliquant l'énergie solaire (systèmes photovoltaïques, systèmes thermiques, concentrateurs solaires, etc...). Mais la faible présence de stations radiométriques, entraîne une base de données insuffisante pour une étude adéquate des composantes énergétiques et météorologiques du gisement solaire.

Seulement quelques stations expérimentales sont réparties à travers l'Algérie, telles que les stations radiométriques installées au niveau du CDER (Alger) et à l'URAER (Ghardaïa). Cette dernière est dotée d'un système de poursuite tridimensionnelle [1]; comporte un pyréliomètre qui est pointé vers le disque solaire, pour la mesure de l'éclairement direct intégré sur toutes les longueurs d'ondes (entre 0.2 et 0.4 micromètre), un pyranomètre type EKO pour mesurer l'éclairement diffus sur une surface horizontale, qui est muni d'une boule sphérique afin de cacher le disque solaire. La station est constituée de deux pyranomètres fixes, l'un pour la mesure du rayonnement global incident sur une surface horizontale, l'autre pour la mesure du rayonnement global sur

une surface inclinée à la latitude du lieu. Tous ces appareils sont reliés à une acquisition de marque CAMPBELL SCIENTIFICS Cr 10x. Celle-ci est reliée par intermédiaire de l'interface RS 232 à un micro-ordinateur dans lequel nous avons installé un logiciel de traitement et d'exploitation des données.

Pour compenser le problème de manques de données, plusieurs modèles empiriques ont été conçus et étudiés afin d'estimer l'éclairement et l'irradiation solaire sur un plan incliné à partir des mesures au sol sur un plan horizontal [6, 11].

Notre travail consiste à calculer l'éclairement diffus incident sur une surface inclinée en utilisant sept modèles : Liu & Jordan, Temps & Coulson, HDKR, Ma-Iqbal, Muneer, Willmot, Gueymard. L'éclairement direct sur un plan incliné est obtenu par la méthode géométrique [3]. L'éclairement global est donné par la somme du rayonnement diffus et du rayonnement direct. L'intégration numérique des éclaircissements obtenus (méthode des trapèzes), nous permet d'avoir les irradiations journalières. Pour cela, nous avons comparé à l'aide de quelques formules statistiques, les irradiations journalières mesurées sur le plan incliné avec celles estimées par les modèles. Et ce, avec un choix convenable de plusieurs jours de l'année 2008 et pour chaque état de ciel (ciel clair, ciel moyen, ciel couvert ou perturbé, tous type de ciel ou ciel quelconque).



Fig. 1 Pyranomètres et système de poursuite

## II. FORMULES MATHÉMATIQUES

L'étude des modèles empiriques nécessite la connaissance de quelques formules astronomique et angulaires comme paramètres d'entrée, ainsi que des formules statistiques qui permettent de les tester.

### A. Formules astronomiques et angulaires

1) *Angle horaire*: L'angle horaire  $\omega$  étant l'angle forme par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu d'observation. Il est défini en fonction du temps solaire vrai, comme suit [3] :

$$\omega = 15 \cdot (tsv - 12) \quad (1)$$

2) *Déclinaison solaire*: La déclinaison solaire  $\delta$  est l'angle que fait la direction terre-soleil avec le plan équatorial de la terre [2, 3]. La déclinaison varie de  $-23.27^\circ$  au solstice d'hiver à  $+23.27^\circ$  au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. La déclinaison solaire s'écrit comme suit :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left( \frac{360}{365} \cdot j \right) \quad (2)$$

3) *Hauteur du soleil (angle zénithal)*: La hauteur du soleil  $h$  est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan horizontal du lieu.  $h = 0$  correspond au lever et au coucher, la hauteur du soleil varie entre  $-90^\circ$  (zénith) et  $-90$  (nadir), son expression est donnée comme suit [2, 3, 4]:

$$\sin h = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta \quad (3)$$

4) *Cosinus de l'angle d'incidence* : c'est l'angle formé que fait la direction du soleil avec la normale au plan considéré. Pour un plan d'inclinaison  $\beta$  orienté vers le sud, l'expression de l'angle d'incidence est la suivante [3] :

$$\cos i = \sin \delta \cdot \sin (\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (4)$$

### B. Formules des éclairements

1) *Eclairage extraterrestre* : L'éclairage extraterrestre reçu sur un plan horizontal, s'écrit en fonction de la constante solaire  $I_0$  et de la correction de distance terre-soleil, comme suit [3] :

$$g_0 = I_0 \cdot c(j) \cdot \sin h(5)$$

2) *Eclairage direct* : L'éclairage direct reçu sur un plan incliné est donné en fonction de l'angle d'incidence et de l'éclairage direct mesuré sur un plan normal à la radiation solaire [2, 3, 4]:

$$s_i = s_n \cdot \cos i \quad (6)$$

3) *Eclairage réfléchi par le sol* : Le rayonnement réfléchi par le sol s'écrit en fonction de l'albédo  $\rho$ , de l'éclairage global mesuré sur un plan horizontal :

$$d_r = \rho \cdot g_n \cdot \left[ \frac{1 - \cos \beta}{2} \right] \quad (7)$$

4) *Eclairage diffus* : L'éclairage diffus reçu sur un plan incliné est donné en fonction de l'éclairage diffus mesuré sur un plan horizontal et d'un facteur  $F_m$ , comme suit :

$$d_i = d_h \cdot F_m \quad (8)$$

5) *Eclairage global* : Son expression est donnée par la somme des éclairements diffus et direct :

$$g_i = s_i + d_i + d_r \quad (9)$$

6) *Irradiation journalière globale* : les irradiances journalières globales estimées et mesurées sont données par les intégrales des éclairements estimés et mesurés en fonction du temps, entre le lever et le coucher du soleil et s'écrivent de la façon suivante :

$$H_e = \int_{t_l}^{t_c} g_e(t) dt \quad (10)$$

$$H_m = \int_{t_l}^{t_c} g_m(t) dt \quad (11)$$

7) *Irradiation journalière globale en moyenne mensuelle* : C'est la somme des irradiances journalières globales sur le nombre de journées de mesures accumulés pendant l'année :

$$\bar{H}_e = \frac{\sum_1^n H_e}{n} \quad (12)$$

$$H_m = \frac{\sum_1^n H_m}{n} \quad (13)$$

### C. Formules statistiques

1) *Erreur moyenne (MBE ou NDMBE)* : Son expression est la suivante :

$$MBE = \frac{\sum_1^n (H_e - H_m)}{n} \quad (14)$$

Ou bien

$$NDMBE = \frac{100}{H_m} \cdot \frac{\sum_1^n (H_e - H_m)}{n} \quad (15)$$

2) *Erreur quadratique moyenne (RMSE ou NDRMSE)* : C'est une grandeur statistique qui est donnée comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n (H_e - H_m)^2} \quad (16)$$

Ou bien

$$NDRMSE = \frac{100}{H_m} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n (H_e - H_m)^2} \quad (17)$$

3) *Erreur relative moyenne*: l'utilisation de l'erreur relative moyenne est une autre façon de tester la performance d'un modèle :

$$M. ERR = \frac{100}{n} \cdot \sum_1^n \frac{(H_e - H_m)}{H_m} \quad (18)$$

### D. Modèles empiriques

Plusieurs chercheurs ont étudiés la performance des modèles isotropiques et anisotropiques afin d'estimer le rayonnement solaire incident sur une surface inclinée à partir des mesures sur un plan horizontal. Parmi les modèles qui sont traits, ceux qui tiennent en considération les différentes contributions du ciel, c'est à dire, la partie isotropique, circumsolaire et l'horizon au rayonnement diffus. Ces diverses contributions sont modélisées par un paramètre angulaire

qu'on appelle, le facteur de forme [3, 12]. Les modèles utilisés dans notre travail sont cités dans le tableau 1.

Dans ce tableau, nous avons donné les expressions des facteurs de formes et leurs références pour chaque modèle utilisé.

Nous remarquons que seul Liu & Jordan est de type isotrope, les autres sont de type anisotropique.

TABLEAU 1  
 DESCRIPTION DES MODELES

Auteur (s)	Description des modèles		
	Réf	Type	Facteur de forme
Liu & Jordan	[3]	Iso.	$\cos^2 \beta / 2$
Temps & Coulsons	[3]	Ani.	$\cos^2 \beta / 2 \cdot \left[ 1 + \sin^3 \frac{\beta}{2} \right] \cdot [1 + \cos^2 i \cdot \sin^3 \theta_z]$
HDKR	[8,]	Ani.	$\left( \frac{s}{g_0} \cdot r_b \right) + \left( 1 - \frac{s}{g_0} \right) \cdot \cos^2 \beta / 2 \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{s_i}{g_i}} \sin^3 \frac{\beta}{2} \right]$
Ma-Iqbal	[7]	Ani.	$\left( \frac{g}{g_0} \cdot r_b \right) + 1 - \frac{g}{g_0} \cdot \cos^2 \beta / 2$
Muneer	[2, 7, 9]	Ani.	Où $T_M = \cos^2 \frac{\beta}{2} + \left\{ \frac{2b}{\pi(3+2b)} \left[ \sin \beta - \beta \cdot \cos \beta - \pi \cdot \sin^2 \frac{\beta}{2} \right] \right\}$
Willmot	[7]	Ani.	Où $\left( \frac{s}{g_0} \cdot r_b \right) + \left( 1 - \frac{s_i}{g_0} \right) \cdot C_\beta$ $C_\beta = 1.0115 - 0.20293\beta - 0.080823 \beta^2$
Gueymard	[2]	Ani.	Où $r_{a1} \cdot N_G + (1 - N_G \cdot r_{a0})$ $r_0 = \exp(a_0 + a_1 \cos i + a_2 \cos^2 i + a_3 \cos^3 i) + F \cdot G$ $F = [1 + b_0 \sin^2 \beta + b_1 \sin 2\beta + b_2 \sin 4\beta] / [1 + b_0]$ $G = 0.408 - 0.323 h' + 0.384 h'^2 - 0.170 h'^3$ $a_0 = -0.897 - 3.364 h' + 3.960 h'^2 - 1.909 h'^3$ $a_1 = 4.448 - 12.962 h' + 34.601 h'^2 - 48.784 h'^3 + 27.51 h'^4$ $a_2 = -2.770 + 9.164 h' - 18.876 h'^2 + 23.776 h'^3 - 13.014 h'^4$ $a_3 = 0.312 - 0.217 h' - 0.805 h'^2 + 0.318 h'^3$ $b_0 = -0.2249$ $b_1 = 0.1231$ $b_2 = -0.0342$ $h' = 0.01 h$

### III. INTERPRETATION DES RESULTATS

Dans ce qui suit, il s'agit de comparer les irradiations globales journalières estimées par les modèles, avec celles données par les mesures sur un plan incliné à la latitude du lieu, et ce pour différents types de ciel. Pour cela, nous avons utilisé des formules statistiques, telles que, l'erreur moyenne (13), l'erreur quadratique moyenne (14,15) et l'erreur relative moyenne (16).

L'erreur moyenne donne une indication sur une sous-estimation ou une surestimation du modèle par rapport aux mesures, elle est donnée en pourcentage (NDMBE) ou en unité d'énergie (MBE). Elle est négative si le modèle est sous-estimé, inversement, s'il est surestimé.

L'erreur quadratique moyenne (RMSE ou NDRMSE), représente la fiabilité des modèles. RMSE est d'autant plus

petite que le modèle s'approche mieux des résultats de mesures. Elle est donnée en pourcent, tandis que, NDRMSE est donnée en unité d'énergie. La M.ERR est une autre manière de définir une formule d'erreur, il s'agit de l'erreur relative moyenne, elle plus petite pour un modèle plus fiable.

Le tableau 2, illustre les résultats statistiques obtenus. Nous constatons que tous les modèles choisis sous-estiment les mesures, sauf dans le cas du ciel couvert où les modèles de Temps & Coulsons et de Ma-Iqbal sont surestimés. Nous remarquons pour un ciel clair que les plus faibles valeurs des erreurs quadratiques correspondent aux modèles de Temps & Coulsons et de Ma-Iqbal. Les NDRMSE sont respectivement égales à 5.87% et 6.30%, pour des irradiations

globales en moyennes annuelles, et valent respectivement, 23.56 et 23.63 MJ/m<sup>2</sup>/jour.

Dans le cas d'un ciel moyen, les erreurs quadratiques moyennes (NDRMSE) sont les plus faibles pour les modèles de Temps & Coulson, sont égales respectivement à 4.99% et 5.43%, les irradiations journalières en moyennes annuelles sont égales à 23.42 et 23.26 MJ/m<sup>2</sup>/jour. Les plus grandes erreurs correspondent aux modèles de Willmot et de Gueymard, 8.88% et 9.69%, les énergies correspondantes valent, 22.27 et 22.17 MJ/m<sup>2</sup>/jour.

Pour le ciel perturbé, les résultats sont analogues à ceux qui ont été trouvés dans le cas d'un ciel clair, c'est-à-dire que les erreurs statistiques (NDRMSE) sont les plus faibles pour les

modèles de Temps & Coulson et de Ma-Iqbal, 7.52% et 4.85%, les énergies correspondantes valent respectivement, 17.46 et 16.96 MJ/m<sup>2</sup>/jour.

Dans le cas du ciel quelconque, les erreurs sont encore plus faibles pour les deux modèles précédents. 5.92% pour le modèle de Temps & Coulson et 5.94% pour le modèle de Ma-Iqbal. Les deux modèles donnent des irradiations, égales à 22.25 et 22.03 MJ/m<sup>2</sup>/jour.

Une synthèse de l'analyse des valeurs statistiques illustrés dans le tableau 2, montre que les modèles anisotropiques de Temps & Coulson et de Ma-Iqbal sont plus apte à être utilisés dans des applications solaires (photovoltaïques, thermiques).

TABLEAU 2  
 RESULTATS STATISTIQUES POUR LES DIFFERENTS MODELES

Auteur (s)	Valeurs statistiques					Irradiations
	MBE (MJ/m <sup>2</sup> /j)	RMSE (MJ/m <sup>2</sup> /j)	NDMBE (%)	NDRMSE (%)	M.ERR (%)	H <sub>m</sub> (MJ/m <sup>2</sup> /jour)
1) Ciel clair						
- Liu & Jourdan	-2.15	2.21	-8.35	8.59	-8.37	23.56
- Temps & Coulson	-1.37	1.51	-5.35	5.87	-5.24	24.34
- HDKR	-1.88	1.98	-7.31	7.71	-7.24	23.83
- Ma-Iqbal	-1.48	1.62	-5.78	6.30	-5.68	24.23
- Muneer	-1.76	1.86	-6.87	7.24	-6.82	23.95
- Willmot	-2.08	2.20	-8.10	8.55	-8.03	23.63
- Gueymard	-2.02	2.23	-7.85	8.67	-7.68	23.69
2) Ciel moyen						
- Liu & Jordan	-2.08	2.13	-8.57	8.78	-8.61	22.26
- Temps & Coulson	-0.92	1.21	-3.78	4.99	-3.58	23.42
- HDKR	-1.75	1.84	-7.21	7.58	-7.16	22.59
- Ma-Iqbal	-1.08	1.32	-4.43	5.43	-4.28	23.26
- Muneer	-1.63	1.72	-6.72	7.08	-6.69	22.71
- Willmot	-2.07	2.16	-8.50	8.88	-8.46	22.27
- Gueymard	-2.17	2.36	-8.94	9.69	-8.82	22.17
3) Ciel couvert						
- Liu & Jordan	-1.48	1.68	-8.91	10.0	-8.71	15.22
- Temps & Coulson	0.75	1.25	4.51	7.52	-7.82	17.46
- HDKR	-1.77	1.35	-7.04	8.08	-6.91	15.53
- Ma-Iqbal	0.25	0.81	1.52	4.85	3.02	16.96
- Muneer	-1.12	1.29	-6.74	7.73	-6.69	15.58
- Willmot	-1.68	1.81	-10.0	10.8	-10.2	15.02
- Gueymard	-1.86	2.05	-11.1	12.3	-10.7	14.85
4) Ciel quelconque						
- Liu & Jordan	-1.96	2.06	-8.52	8.99	-8.53	20.98
- Temps & Coulson	-0.68	1.36	-2.97	5.96	-1.30	22.25
- HDKR	-1.65	1.79	-7.22	7.83	-7.13	21.28
- Ma-qbal	-0.91	1.36	-3.96	5.94	-2.97	22.03
- Muneer	-1.56	1.68	-6.80	7.36	-6.75	21.37
- Willmot	-1.97	2.09	-8.60	9.12	-8.74	20.96
- Gueymard	-2.02	2.22	-8.81	9.69	-8.81	20.91

La figure 2, représente le contour des irradiations globales journalières en moyennes annuelles en fonction du couple (NDMBE, NDRMSE). On voit que les énergies sont comprises entre 14.80 et 24.35 MJ/m<sup>2</sup>/jour.

Le domaine des plus grandes énergies correspond à la plage 23.16 et 24.35 (aire en rouge). C'est le domaine où le ciel est soit clair soit moyen et que les énergies les plus importantes

sont celles qui correspondent aux modèles de Temps & Coulson et de Ma-Iqbal.

Les surfaces hachurées correspondent au domaine des faibles énergies, où le ciel est perturbé. Dans ce cas, les erreurs sont plus importantes que les cas précédents. Les erreurs maximales dépassent -11% pour la NDMBE et 12% pour la NDMRSE.

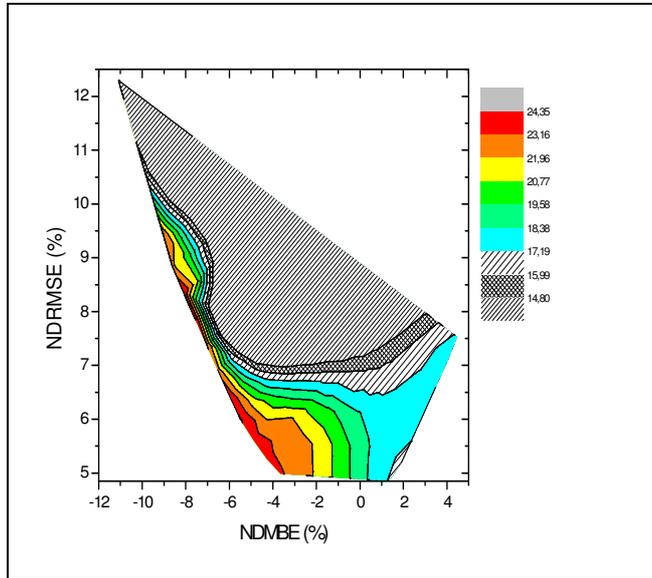


Fig. 2 Contours des irradiances globales

Pour mieux apprécier l'évolution des erreurs statistiques entre les irradiances estimées avec celles obtenues par les mesures, nous avons représenté des histogrammes pour les formules statistique (MBE, RMSE, MERR) en fonction des modèles utilisés, et ce, pour chaque état du ciel.

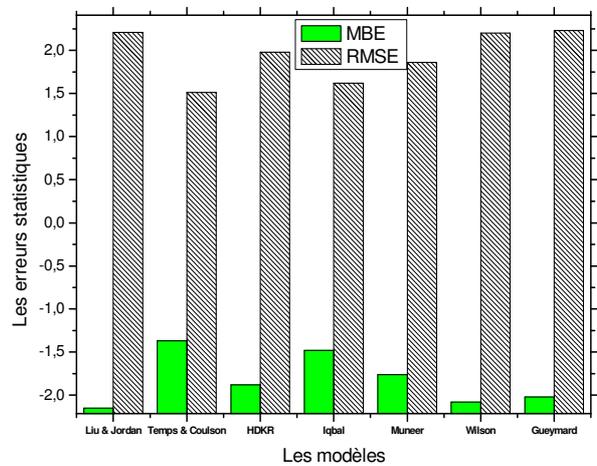
Dans le cas d'un ciel clair (Figure 3-a), on constate que les plus faibles valeurs des MBE et RMSE, correspondent aux modèles de Temps & Coulson et de Ma-Iqbal, avec une faible sous-estimation des modèles par rapport aux mesures. Des écarts importants sont observés pour les autres modèles, notamment pour le modèle de Liu & Jordan.

Ceux-ci peuvent être expliqués par le fait que dans le modèle de Liu & Jordan, le facteur de forme ne comporte pas les parties circumsolaire et le cercle de l'horizon, qui eux contribuent beaucoup au rayonnement solaire diffus. Ces deux contributions sont généralement importantes lorsque le ciel est clair. Nous pouvons conclure pour un ciel clair que les modèles de Temps & Coulson sont les plus fiables, et que le modèle de Liu & Jordan est le moins favorable.

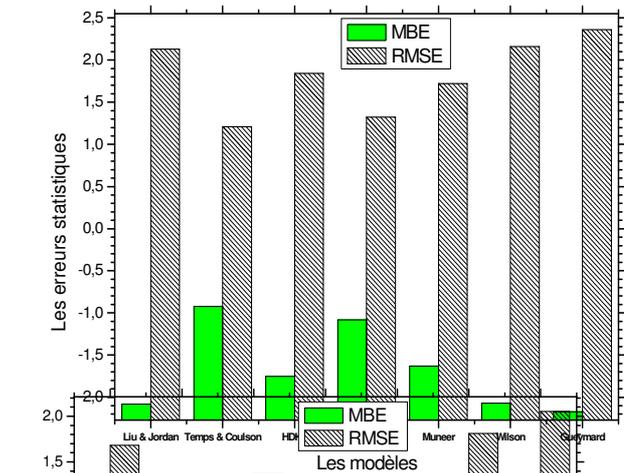
La figure 3-b, donne des histogrammes pour les erreurs moyennes (MBE) et les erreurs quadratiques moyennes (RMSE). Ce cas est similaire au cas précédent, c'est-à-dire que les faibles écarts statistiques correspondent aux modèles de Temps & Coulson et de Ma-Iqbal, avec de faibles sous-estimations des modèles. Nous notons que le modèle le plus défavorable et non pas celui de Liu & Jordan mais le modèle de Gueymard.

La figure 3-c, représente des histogrammes pour les paramètres statistiques, dans le cas d'un ciel couvert. Dans cette figure nous constatons que les plus faibles valeurs statistiques correspondent aux modèles de Temps & Coulson et de Ma-Iqbal. Cette fois-ci les erreurs MBE et RMSE diminuent pour le modèle de Liu & Jordan, c'est-à-dire que ce modèle s'améliore. Car dans ce cas, les composantes qui contribuent à l'anisotropie du ciel sont négligeables [7, 12].

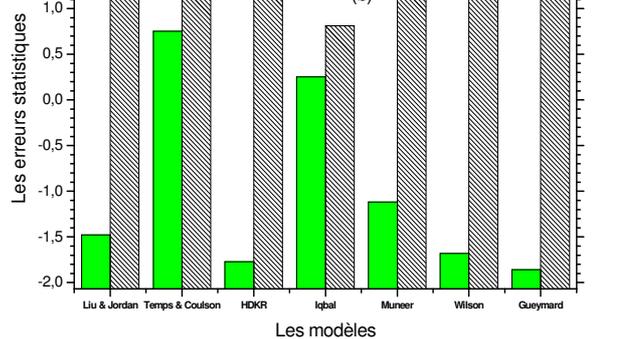
Nous remarquons sur la figure 3-d que quel que soit le type de ciel, les modèles de Temps & Coulson et de Ma-Iqbal sont les plus fiables. Ensuite, il y a les modèles de HDKR et de Muneer qui représentent de faibles erreurs statistiques par rapport aux mesures. Par contre, les modèles les plus défavorisés par rapport aux tests statistiques sont ceux de Willmot et de Gueymard.



(a)



(b)



(c)

cartes statistiques en MJ/m²/day

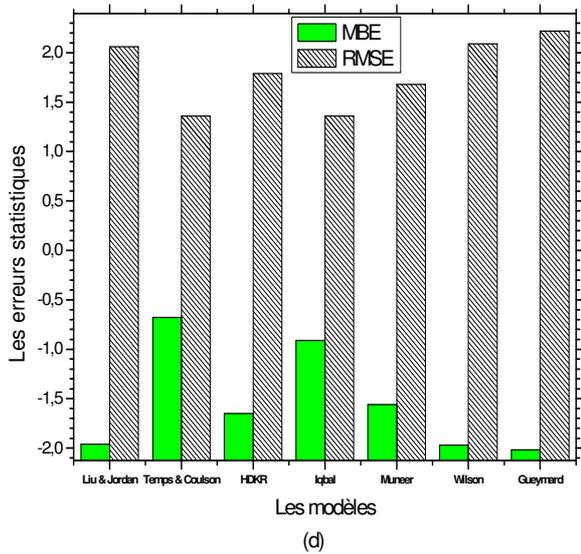


Fig. 3 Histogrammes des erreurs statistiques :

- (a) Ciel clair
- (b) Ciel moyen
- (c) Ciel clair
- (d) Ciel moyen

Les figures 4-a et 4-b, représentent une autre façon d'illustrer les variations des erreurs statistiques (MBE, RMSE, NDMBE et NDRMSE) en fonction des modèles et pour chaque type de ciel.

Les figures 4-a et 4-b, indiquent respectivement la variation des paramètres statistiques en échelles d'énergie (MBE et RMSE) et en pourcentage (NDMBE et NDRMSE) en fonction des modèles utilisés. Nous voyons que les graphes obtenus sont séparés en deux tranches ; en dessous, les MBE (NDMBE) et en dessus les RMS (NDRMSE). Nous remarquons que les modèles décrits sont tous sous-estimés par rapport aux mesures sauf pour le ciel couvert, où les modèles de Temps & Couison et de Ma-Iqbal présentent une légère sous-estimation. Nous constatons aussi que pour ces deux modèles les erreurs statistiques sont faibles, ceci explique les pics bien marqués sur les deux figures.

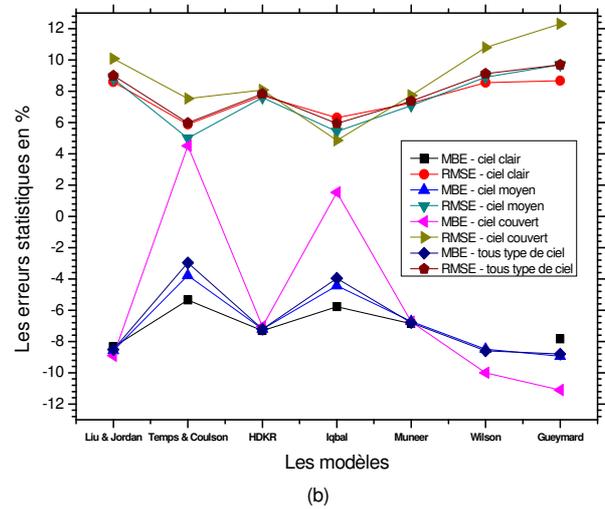


Fig. 4 Evolution des erreurs statistiques

- (a) MBE et RMSE
- (b) NDMBE et NDRMSE

#### IV. CONCLUSIONS

Après toute cette analyse qui a été faite à l'aide des formules statistiques, une sélection des modèles les plus acceptables parmi tous les modèles étudiés est accomplie et justifiée par les faibles erreurs moyennes (RMSE, MBE, NDMBE, NDRMSE, MERR). Par conséquent, les modèles les plus performants que nous avons opté pour la région de

Ghardaïa et pour des applications solaires, sont les modèles de Temps & Coulson et de Ma-Iqbal.

#### REFERENCES

- [1] S. Benkaciali, *Le gisement solaire à Ghardaïa*, Bulletin des énergies renouvelables, N°11, CDER, Juin 2007.
- [2] T. Muneer., *Solar radiation and daylight models*, Second Ed, Dunod, Elsevier, 2004.
- [3] Ma Iqbal, *An introduction to solar radiation*, Academic press, Canada, 1983.
- [4] P. Zekai.Sen, *Solar energy fundamentals and modelling techniques*, Ed. Springer, 2008.
- [5] A. K. Katiyar, A. Kumar, C. K. Pandey, B. Das, *A comparative study of monthly mean daily clear sky radiation over India*, IJEE, Volume 1, pp. 177-182, 2010.
- [6] S. Benkaciali, *Comparative study of solar radiation computational models incident on inclined surface*, JITH 2011.
- [7] K. Kerbouche et al, *Evolution de l'irradiation solaire globale sur une surface incline selon différents modèles pour le site de Bouzaréah*, Revue des énergies renouvelables, Vol 16 N°2, Alger, CDER, 2013.
- [8] A. Q. Jakharani, A. Othman, *Estimation of incident solar radiation on tilted surface by different empirical models*, IJSRP? 2012.
- [9] Christian? A. Gueymard, *Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiation for solar engineering application*, Elsevier, 2008.
- [10] Guofen. W, Yaolin .L, Tiejun, *Method and strategy for modeling daily global solar radiation with measured meteorological data, a case study in Nanchang, China*, Elsevier, China, 2007.
- [11] M. Cucuma? A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli, *Experimental testing of models for the estimation of hourly solar radiation on vertical surface at Arcavacata di Rende*, Elsevier, 2006.