

# Modélisation de rayonnement solaire par le modèle de Bird Hulstrom et le modèle de Atwater & Ball.

Nour El Isslam KERROUMI <sup>1\*</sup>

## Abstract

Le rayonnement solaire global horizontal (GH) est l'une des principales variables utilisées pour la gestion des installations solaires. La connaissance de sa répartition géographique et de sa variation temporelle est d'une importance primordiale pour de nombreuses applications. Le cas du GH pour un ciel clair est utilisé comme fonction de normalisation dans de nombreuses prévisions de production solaire. Afin de contourner le manque de mesures au sol, diverses techniques de modélisation peuvent être appliquées pour estimer la composante globale pour ciel clair. Dans ce travail, nous avons évalué deux modèles théoriques du calcul de rayonnement solaire à savoir le modèle de Bird & Hulstrom et celui d'Atwater & Ball. Les résultats ont été comparés par rapport aux données radiométriques observées par la station de l'Unité de Recherche en Energie Renouvelables en Milieu Saharien (URER-MS) d'Adrar. L'évolution du rayonnement global sur un plan horizontal a été représentée pour des journées typiques caractérisées par un ciel clair durant l'année 2018. Les résultats obtenus ont montré que le modèle Atwater-Ball présente une meilleure estimation des composantes directe, diffus et global par rapport au modèle de Bird-Hulstrom avec une faible erreur relative par rapport aux données observées (rMBE  $\approx -0.17\%$ , MAPE  $\approx 1.42\%$ , rRMSE  $\approx 1.71\%$  pour Atwater-Ball et rMBE  $\approx 4.37\%$ , MAPE  $\approx 4.60\%$ , rRMSE  $\approx 5.58\%$  pour Bird-Hulstrom).

## Keywords

Variation temporelle, rayonnement solaire globale GH, modelisation, model de BIRD & HULSTON, modele d'ATWATER & BULL

<sup>1</sup> Office national de la météorologie, Dar El Beida, Alger

\*Correspondant: kerrouminourelislam2019@gmail.com

## Contents

1	<b>Introduction:</b>	1
2	<b>Modélisation de rayonnement Solaire</b>	2
	Modèle de Bird & Hulstrom	
2.1	Modèle de Atwater & Ball . . . . .	3
3	<b>Résultats et Discussions</b>	3
4	<b>Conclusion</b>	6
	<b>References</b>	6

## 1. Introduction:

Le rayonnement solaire est à l'origine de plus de 90% de l'énergie consommée. L'homme, pour ses besoins, puise dans le cycle énergétique naturel (hydro-électricité, biomasse). Les problèmes engendrés par l'utilisation des énergies fossiles produites à des époques lointaines (charbon, gaz, pétrole) sont bien connus : pollution de l'air, effet de serre, production d'aérosols, etc. Face à cela, un effort accru existe depuis ces dernières décennies pour développer l'utilisation directe de l'énergie solaire afin de la transformer en chaleur, en électricité ou en une forme d'énergie chimique plus facilement stockable (hydrogène par exemple).

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de

l'atmosphère terrestre. La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Une connaissance précise de la distribution de l'irradiation solaire sur un site géographique particulier est d'une grande importance pour le développement des systèmes photo thermiques ou photovoltaïques. Le manque de moyens de mesure et la faible densité du réseau d'observation météorologiques à l'échelle global, représentent des difficultés qui ont obligé les chercheurs à penser à une mise au point des modèles permettant d'estimer les différentes composantes du rayonnement solaire. L'Algérie dispose l'un des gisements les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara [1].

Les systèmes de conversion d'énergie PV dépendent étroitement de la composante globale GH qui est sensible aux processus d'atténuations atmosphériques. Cependant, le GH peut être exprimé en fonction du rayonnement global par ciel clair. Par conséquent, le choix de modèles est impératif pour une utilisation optimale des centrales PV, ainsi que des réseaux électriques intelligents. De nombreux modèles GH basés sur des mesures spectrales ont été développés, tels que ceux de Atwater-Ball [2], Hulstrom-Bird [3] et Mc-Davis-McKay [4]. Il existe également d'autres modèles de ciel clair récemment élaborés, comme ESRA [5], Solis [6], REST2 [7] et McClear [8].

Dans ce travail, nous allons évaluer les performances des deux modèles Bird-Hulstrom et Atwater-Ball par rapport aux observations. Pour ce faire, nous avons tout d'abord codé ces deux modèles en langage machine en utilisant le logiciel R (<http://www.r-project.org>). Puis, pour faire les tests de validation, nous avons comparé les simulations par rapport aux mesures de rayonnement global horaire prises par la station de l'Unité de Recherche en Energie Renouvelables en Milieu Saharien (URER-MS) d'Adrar durant des journées typiques de ciel clair durant toute l'année de 2018. En premier lieu, nous avons pris un échantillon de données de rayonnement de quatre jours de ciel clair soigneusement choisis : une en hiver (13/01/2018), une au printemps (15/04/2018), une en été (25/06/2018) et une en automne (29/09/2018) et nous avons représenté les résultats sous forme de courbes d'évolution horaire afin de mettre en évidence le comportement des deux modèles pour chaque saison. Ensuite, nous avons généralisé la méthode sur les douze mois en prenant une journée de ciel clair pour chacun, soit douze jours de simulation. Puis nous avons calculé les scores.

## 2. Modélisation de rayonnement Solaire

Pour l'estimation du rayonnement solaire il est nécessaire de bien préciser les paramètres géométriques du lieu qui sont la latitude, la longitude et l'altitude et aussi des paramètres du capteur qui sont l'inclinaison et l'orientation. Le rayonnement dépend aussi des mouvements de la terre qui sont la rotation et la translation et le mouvement apparent du soleil dans le ciel qui est caractérisé par sa hauteur et sa déclinaison.

Nous allons présenter dans ce paragraphe les principales formules des deux modèles choisis :

### 2.0.1 Modèle de Bird & Hulstrom

Le modèle de Bird-Hulstrom [9] est l'un des modèles de rayonnement par ciel clair les plus utilisés dans des travaux scientifiques [10] et [11]. Ce modèle a été conçu en 1987 par Bird et Hulstrom. Les formules utilisées dans ce modèle sont les suivantes : L'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal est donné par la relation :

$$I_d = 0.9751 * I_o * \tau_r * T_q * \tau_o * \tau_w * T_A * \cos(h * \pi / 180) \quad (1)$$

où, le coefficient d'absorption par la couche d'ozone  $\tau_o$  est donné par :

$$\tau_o = 1 - 0.1611 * X_o (1 + 139.48 * X_o)^{-0.3035} - 0.002715 * X_o * (1 + 0.044 * X_o + 0.0003 * X_o^2)^{-1} \quad (2)$$

et,  $\tau_o$  est l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et définie par l'équation suivant:

$$X_o = U_o * M \quad (3)$$

où,  $M$  est la masse d'air optique relative donnée par l'équation :

$$M = |\cos * (h * \pi / 180) + 0.015 * (93.885 - h)^{1.25}|^{-1} \quad (4)$$

Et,  $U_c$  représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d'ozone réduite (cm): Avec :  $U_o = 0.3$  Le coefficient de transmission après absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau est donné par :

$$\tau_w = 1 - 2.4959 X_w [(1 + 79.034 X_w)^{0.6828} + 6.385 X_w]^{-1} \quad (5)$$

$X_w$  est l'épaisseur d'eau condensable corrigé à la verticale du lieu (cm) donnée par l'équation suivant :

$$X_w = U_w * M \quad (6)$$

avec :  $U_w = 1.5$  Le coefficient de transmission après absorption par les gaz permanents ( $CO_2$  et  $O_2$ ) s'exprime en fonction de la masse d'air corrigée à l'aide de l'équation :

$$T_{UM} = \exp(-0.0127 M^{0.26}) \quad (7)$$

où,  $M$  est la masse d'air corrigée exprimée par l'équation suivant :

$$M = (MP) / (1013.25) \quad (8)$$

Le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire s'exprime aussi en fonction de la masse d'air par :

$$\tau_r = \exp(-0.090 M^{0.84} [1 + M - M^{1.01}]) \quad (9)$$

Et le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols peut se calculer par :

$$T_A = \exp[-\tau_a^{0.873} (1 + \tau_a - \tau_a^{0.7088}) M^{0.9108}] \quad (10)$$

Où :  $\tau_a = 0.2758 \tau_{a,0.38} + 0.35 \tau_{a,0.5}$  Avec :  $\tau_{a,0.38}$  et  $\tau_{a,0.5}$  sont des coefficients d'atténuation déterminés à partir des mesures expérimentales:  $\tau_{a,0.38} = 0.38 \mu m$  et  $\tau_{a,0.5} = 0.5 \mu m$

Dans ce modèle aussi, le rayonnement diffus sur un plan horizontal est composé de trois types de diffusion du rayonnement solaire (Rayleigh, Aérosols et phénomènes multi réflexion terre-atmosphère), la relation générale est donnée par :

$$I_{diff} = 0.79 * I_o * \cos(h * \pi / 180) * \tau_o * T_{UM} * \tau_w * T_{AA} \quad (11)$$

où,  $T_{AA}$  est donnée par l'expression suivante :

$$T_{AA} = 1 - K_l (1 - M + M^{1.06}) (1 - T_A) \quad (12)$$

Avec :  $K_l$  est le coefficient de réflexion unitaire relatif à la diffusion par les aérosols : Le calcul du rayonnement global GH est exprimé par :

$$GH = (I_d - I_{diff}) / (1 - r_s r_g) \quad (13)$$

avec,  $r_g$  est l'albédo terrestre, et  $r_s$  est l'albédo du ciel clair donné par :

$$r_s = 0.0685 + (1 - B_A)(1 - T_{AS}) \quad (14)$$

avec :  $r_g$  où,  $B_A$  est le coefficient de dispersion de l'atmosphère.  
Avec :  $B_A = 0.85$

Et  $T_{AS}$  est donné par la relation suivante :

$$T_{AS} = T_A / T_{AA} \quad (15)$$

## 2.1 Modèle de Atwater & Ball

D'après ce modèle, l'éclairement dû au rayonnement direct et totale sur un plan horizontal sont donnés respectivement par :

$$I_d = I_o * \cos\left(\frac{h * \pi}{180}\right) * (T_{Md} - a_w) * T_A \quad (16)$$

$$I_d = I_o * \cos\left(\frac{h * \pi}{180}\right) * (T_M - a_w) * T_A / (1 - r_s r_g) \quad (17)$$

Où, Les différents coefficients d'absorption sont donnés par : La relation du coefficient de transmission direct de tous les effets moléculaires sauf de la vapeur d'eau est donnée par :

$$T_{Md} = 1.041 - 0.16[M(949 * 10^{-6}P + 0.051)]^{0.5} \quad (18)$$

Où,  $M$  est la masse d'air optique relative donnée par l'équation :

$$M = 35 / [(1224 \cos^2 h) + 1]^{0.5} \quad (19)$$

La relation du coefficient de transmission globale de tous les effets moléculaires sauf de la vapeur d'eau est donnée par :

$$T_M = 1.021 - 0.0824[M(949 * 10^{-6}P + 0.051)]^{0.5} \quad (20)$$

Le coefficient de l'absorption de la vapeur d'eau est donné par :

$$a_w = 0.077(U_w M)^{0.3} \text{ avec : } U_w = 1.5$$

La relation du coefficient de transmission de l'absorption et la diffusion des aérosols est donnée par :

$$T_A = \exp(-\tau_a M) \quad (21)$$

Où,  $M$  est la masse d'air corrigée exprimée par l'équation suivant :

$$M = PM / (1013.25) \quad (22)$$

Avec :  $\tau_a = 0.2758\tau_{a,0.38} + 0.35\tau_{a,0.5}$

$$\tau_{a,0.38} = 0.38 \mu m, \tau_{a,0.5} = 0.5 \mu m$$

Et  $r_g$  est l'albédo terrestre, et  $r_s$  est l'albédo du ciel clair donné par :

$$r_g = 0.0685, r_s = 0.35$$

## 3. Résultats et Discussions

Pour donner une idée générale sur l'évolution horaire du rayonnement, nous avons tracé les courbes du rayonnement global calculés par les deux modèles Bird & Hulstrom et Atwater & Ball et observés par la station de l'URER-MS d'Adrar pour un échantillon de 4 jours de ciel clair soigneusement choisis : une en hiver (13/01/2018), une au printemps (15/04/2018), une en été (25/06/2018) et une en automne (29/09/2018). Ces courbes du rayonnement sont représentées par les figures 1, 2, 3 et 4.

Le premier constat qu'on peut tirer de ces quatre figures est que les courbes de d'évolution horaire du rayonnement global calculées par les deux modèles suivent la même allure que celle de l'observation. En terme de quantité, nous constatons des écarts et des différences entre les valeurs du rayonnement calculés et observés selon les journées et selon la période dans la journée.

Pour la journée du 13 janvier 2018 (Fig. 1), le rayonnement estimé par les deux modèles sont très proches de l'observation durant la période matinale et vers le couché de soleil avec une légère sous-estimation. Du 10h à 15h, les deux courbes du rayonnement calculé commencent à se détacher entre elles et les écarts par rapport aux observations se distinguent. Le rayonnement maximal mesuré est  $741 \text{ w/m}^2$ , par contre les valeurs maximales du rayonnement calculées par les deux modèles, Bird & Hulstrom et Atwater & Ball sont:  $649 \text{ w/m}^2$  et  $689 \text{ w/m}^2$ , respectivement, soit une sous estimation de  $178 \text{ w/m}^2$  et  $52 \text{ w/m}^2$ , respectivement.

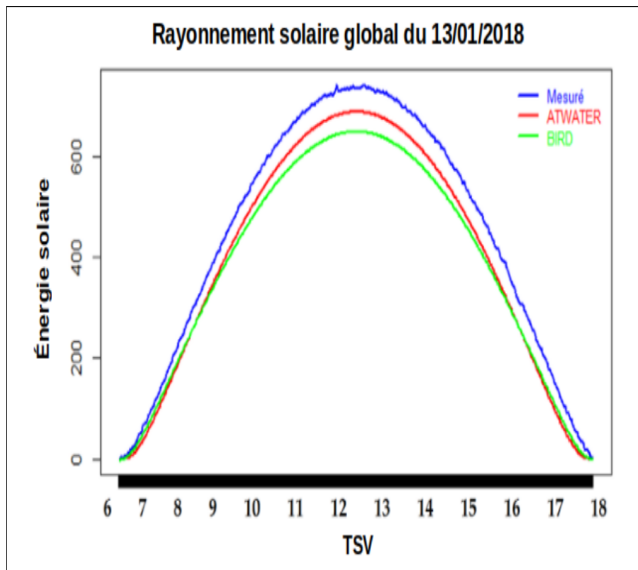
Pour le cas de la journée du 15 avril 2018 (Fig. 2), le même comportement par rapport aux observations est constaté pour les deux modèles mais avec des valeurs du rayonnement relativement fortes. Le rayonnement maximal mesuré atteint  $1075 \text{ w/m}^2$  à midi, par contre les valeurs maximales du rayonnement calculées par les deux modèles, Bird & Hulstrom et Atwater & Ball sont:  $974 \text{ w/m}^2$  et  $1035 \text{ w/m}^2$ , respectivement.

Pour la journée du 25 juin 2018 (Fig. 3), l'écart entre le rayonnement maximal mesuré et calculé par le modèle de Atwater & Ball est relativement faible, soit  $1088 \text{ w/m}^2$  contre  $1068 \text{ w/m}^2$ , respectivement. Mais cet écart reste très fort pour le cas du modèle de Bird & Hulstrom avec une valeur de  $1009 \text{ w/m}^2$ .

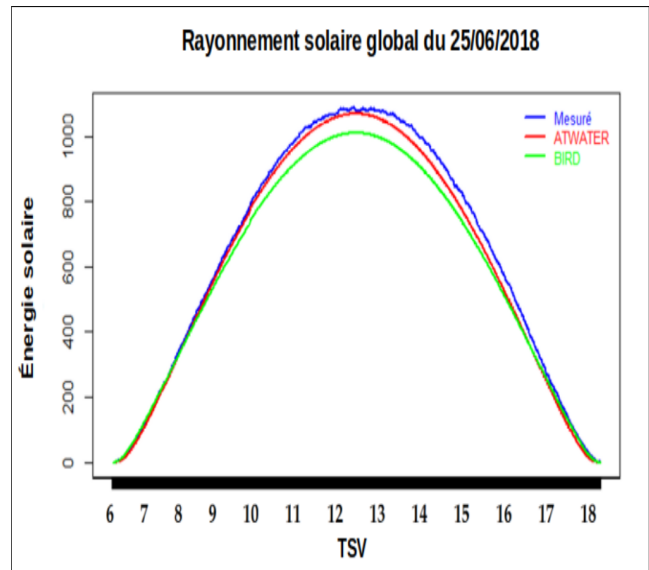
De très bons résultats ont été obtenus pour la journée du 29 septembre 2018 avec le modèle Atwater & Ball. Nous avons observé des valeurs de  $926 \text{ w/m}^2$  contre  $925 \text{ w/m}^2$  calculées par ce modèle. La valeur maximale calculée par le modèle de Bird & Hulstrom est sous-estimée ( $871 \text{ w/m}^2$ ).

Nous avons, ensuite, calculé quelques indicateurs de performance à savoir : le biais (MBE), l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le score de menace (TS) et le coefficient de corrélation (R). Cette fois ci, nous avons pris une journée de ciel clair pour chaque mois de l'année. Les résultats sont donnés dans le tableau 1. Deux remarques majeures peuvent être tirées de tableau 1 :

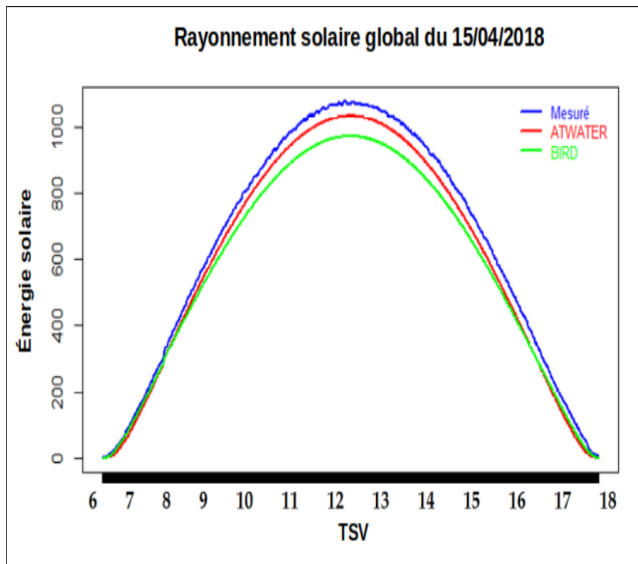
Les biais obtenus avec les deux modèles sont tou-



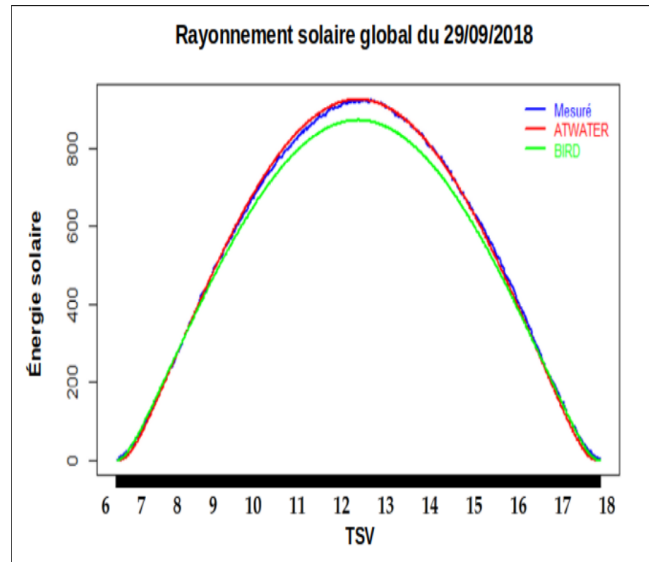
**Figure 1.** Evolution horaire du rayonnement solaire global (en w/m<sup>2</sup>) mesuré (ligne bleue) et calculé par les deux modèles : Bird & Hulstrom (BRD) en vert et Atwater & Ball (ATWATER) en rouge pour la journée du 13/01/2018.



**Figure 3.** Evolution horaire du rayonnement solaire global (en w/m<sup>2</sup>) mesuré (ligne bleue) et calculé par les deux modèles : Bird & Hulstrom (BRD) en vert et AtwaterBall (ATWATER) en rouge pour la journée du 25/06/2018.



**Figure 2.** Evolution horaire du rayonnement solaire global (en w/m<sup>2</sup>) mesuré (ligne bleue) et calculé par les deux modèles : Bird & Hulstrom (BRD) en vert et Atwater & Ball (ATWATER) en rouge pour la journée du 15/04/2018.



**Figure 4.** Evolution horaire du rayonnement solaire global (en w/m<sup>2</sup>) mesuré (ligne bleue) et calculé par les deux modèles : Bird & Hulstrom (BRD) en vert et Atwater & Ball (ATWATER) en rouge pour la journée du 29/09/2018.

jours négatifs pour tous les mois de l'année. Ce que nous permet d'avancer que les deux modèles sous-estiment le rayonnement global.

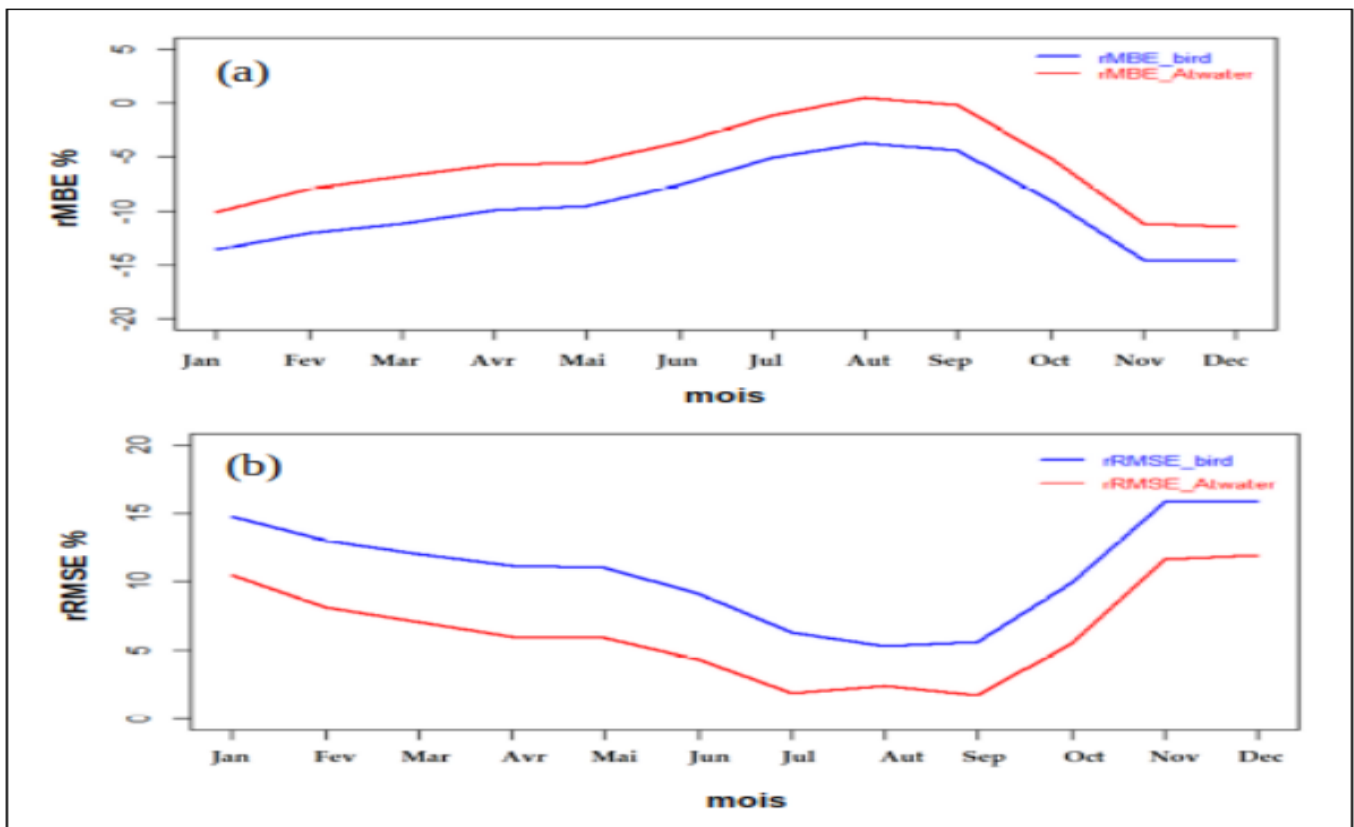
Pour toutes les situations, le modèle Atwater & Ball semble être plus meilleur que le modèle Bird & Hulstrom.

Afin de donner plus d'illustration aux scores obtenus, nous avons représenté dans la figure 5 la variation du biais nor-

malisé (rMBE) et de l'erreur quadratique moyenne normalisée (rRMSE). Les scores confirment bien la qualité du modèle Atwater-Ball par rapport à celui de BirdHulstrom. Il est aussi bien de noter que les deux modèles se comportent mieux durant la période estivale (juillet, août et septembre) que d'autre période de l'année.

**Table 1.** Résultat d'évaluation statistique de quelques jours de l'année 2018.

Date	Modèle	MBE	MAE	RMSE	TS	R
13/01/2018	BIRD	-60.816	60.816	66.079	59.163	0.9994
	ATWATER	-45.336	45.336	46.943	93.592	0.9990
18/02/2018	BIRD	-63.604	63.604	68.849	62.739	0.9997
	ATWATER	-41.762	41.762	42.837	113.833	0.9995
12/03/2018	BIRD	-65.179	65.179	70.417	65.121	0.9997
	ATWATER	-39.854	39.854	41.006	109.978	0.9995
15/04/2018	BIRD	-64.108	64.108	71.995	54.117	0.9997
	ATWATER	-36.772	36.772	38.328	94.090	0.9996
18/05/2018	BIRD	-63.167	63.348	72.730	49.994	0.9996
	ATWATER	-36.328	36.394	38.710	77.528	0.9995
25/06/2018	BIRD	-48.466	49.604	58.889	41.768	0.9993
	ATWATER	-23.659	23.660	27.795	46.747	0.9992
19/07/2018	BIRD	-31.738	32.916	39.178	39.495	0.99973
	ATWATER	-6.968	10.023	11.389	22.111	0.99975
26/08/2018	BIRD	-22.391	27.569	31.969	27.176	0.9992
	ATWATER	<b>2.756</b>	12.618	14.131	5.508	0.9993
29/09/2018	BIRD	-23.884	25.126	30.462	33.752	0.9996
	ATWATER	<b>-0.915</b>	7.757	9.340	2.632	0.9997
14/10/2018	BIRD	-48.389	48.393	52.931	59.253	0.9995
	ATWATER	-27.481	27.481	29.379	69.479	0.9993
11/11/2018	BIRD	-70.864	70.943	29.379	59.152	0.9989
	ATWATER	-54.319	54.344	56.709	84.694	0.9986
16/12/2018	BIRD	-63.517	63.517	68.902	59.318	0.999
	ATWATER	-49.932	49.932	51.813	90.006	0.998


**Figure 5.** Variation mensuelle du : (a) biais normalisé (rMBE) et (b) de l'erreur quadratique moyenne normalisée (rRMSE).

## 4. Conclusion

Ce travail a permis d'évaluer les performances de deux modèles à ciel clair, Bird-Hulstrom et Atwater-Ball pour estimer la composante globale du rayonnement solaire par rapport aux mesures au sol du site URER-MS d'Adrar. Les résultats ont montré que les deux modèles reproduisent avec satisfaction l'allure de la courbe d'évolution du rayonnement global mais avec des valeurs sous-estimées par rapport aux observations. Par ailleurs, il est bien de noter que le modèle de Atwater-Ball simule mieux le rayonnement global par rapport à celui de Bird-Hulstrom notamment durant la période estivale. De ce fait, dans des conditions de ciel clair et en absence des mesures réelles, nous recommandons fortement pour un usage opérationnel (parque photovoltaïque) l'utilisation du modèle Atwater-Ball pour l'estimation du rayonnement global.

## References

- [1] Benbouza Naima. *Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna*. PhD thesis, Batna, Université El Hadj Lakhder. Faculté des sciences de l'ingénieur, 2008.
- [2] M A\_ Atwater and JT Ball. A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations. *Solar Energy*, 21(3):163–170, 1978.
- [3] Richard E Bird and Roland L Hulstrom. Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. Technical report, Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA), 1981.
- [4] John A Davies and Donald C McKay. Estimating solar irradiance and components. *Solar Energy*, 29(1):55–64, 1982.
- [5] Christelle Rigollier, Olivier Bauer, and Lucien Wald. On the clear sky model of the esra—european solar radiation atlas—with respect to the heliosat method. *Solar energy*, 68(1):33–48, 2000.
- [6] Pierre Ineichen. A broadband simplified version of the solis clear sky model. *Solar Energy*, 82(8):758–762, 2008.
- [7] Christian A Gueymard. Rest2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation—validation with a benchmark dataset. *Solar Energy*, 82(3):272–285, 2008.
- [8] Zhipeng Qu, Armel Oumbe, Philippe Blanc, Bella Espinar, Gerhard Gesell, BENOiT GSCHWIND, Lars Klüser, Mireille Lefèvre, Laurent Saboret, Marion Schroedter-Homscheidt, et al. Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The heliosat-4 method. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(1):33–57, 2017.
- [9] Richard E Bird. A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance. *Solar energy*, 32(4):461–471, 1984.
- [10] Pierre Ineichen. Validation of models that estimate the clear sky global and beam solar irradiance. *Solar Energy*, 132:332–344, 2016.
- [11] Mustapha Koussa, Djohra Saheb-Koussa, and Seddik Hadji. Experimental investigation of simple solar radiation spectral model performances under a mediterranean algerian's climate. *Energy*, 120:751–773, 2017.