



# Estimation du rayonnement solaire en utilisant le modèle Bird et Capderou dans la région d'Adrar

Djelloul Benatiallah,\*Ali Benatiallah, \*\*Kadda Bouchouicha, \*AEK Harrouz

\*Faculté des sciences et technologie, Université d'Adrar, Algérie

\*\*Unité de recherche en Energie Renouvelables en milieu saharien URERMS Adrar, Algérie

djellouldhw@gmail.com

**Résumé – Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables connues un développement très important dans le monde avec une croissance important de potentiel et d'utilisation qui dépasse 100 GW.**

*Estimer le rayonnement solaire sur une localité géographique terrestre est d'une extrême importance, d'une part pour choisir le site approprié où placer les installations solaires (centrales solaires pour production d'électricité par exemple) et d'autre part pour le dimensionnement et l'analyse des performances de tout système utilisant l'énergie solaire.*

*En outre, les mesures du rayonnement solaire sont limitées à quelques zones seulement dans l'Algérie. Ainsi, on a recours à des approches théoriques pour évaluer le rayonnement solaire sur un lieu donné.*

*La région d'Adrar est l'un des sites les plus favorables à l'utilisation d'énergie solaire avec un flux moyenne qui dépasse 7 KWh/m<sup>2</sup>/j et d'ensellement de plus de 3500 h par ans.*

*Dans cet article on va faire une estimation. L'une consiste à déterminer les deux modèles empiriques (Capderou et Bird & Hulstrom) qui vont nous permettre d'estimer les irradiances globales journalières sur un plan horizontal et ont le comparer par les résultats mesuré dans le site d'Adrar au moment de quatre saisons.*

**Mot clé— Rayonnement, Adrar, Capderou, Bird & Hulstrom, irradiation**

## NOMENCLATURE

Ghc : Rayonnement global (w/m<sup>2</sup>)  
Ihc : Rayonnement direct (w/m<sup>2</sup>)  
Dhc : Rayonnement diffus (w/m<sup>2</sup>)  
I<sub>0</sub> : Constante solaire (°)  
m<sub>A</sub> : Masse d'aire  
T<sub>L</sub> : Facteur de trouble atmosphérique de linke  
δ<sub>R</sub> : Epaisseur optique de Rayleigh  
T<sub>n</sub> : Facteur de transmission  
F<sub>d</sub> : Fonction du diffus  
γ : hauteur du soleil  
θ : Latitude (°)  
δ : Déclinaison (°)  
ω : Angle horaire ah (°)

## I.INTRODUCTION

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la flambée des cours de pétrole, le réchauffement climatique qui est la conséquence de l'exploitation massive des hydrocarbures qui produisent de grandes quantités de gaz

à effet de serre, à cet effet et pour mieux préserver l'avenir de l'humanité, il est de rigueur de consommer rationnellement les énergies conventionnelles et d'utiliser et développer les énergies renouvelables qui sont inépuisables et propres.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme mais aussi dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...) [2].

L'Algérie a lancé des programme très importants pour l'utilisation d'énergie solaire pour divers secteur comme les villages éloigné, le projet SONELGAZ.....etc, ainsi elle renforce les centres et laboratoires de recherche sur cette thématique [11].

## II. DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Les stations de mesures sont rares à travers le territoire national. Pour l'estimation de l'irradiation solaire, on a recours aux modèles théoriques. Ces modèles sont établis sous forme de corrélation. Pour qu'ils soient applicables aux sites considérés, ces derniers doivent être confrontés aux valeurs réellement mesurées sur le site considéré sur une période qui couvrira les déférentes saisons de l'année.

Cependant, une étude comparative a été exécutée sur les éclairagements solaires sur un plan horizontal. Pour ce faire, plusieurs journées ont été sélectionnées pour comparer les valeurs calculées par les deux modèles et celles données par la station radiométrique d'Adrar.

Nous avons choisi le site d'Adrar (lat. 27.88° N, Long. 0.18° W) pour cette étude, le choix de ce site s'est porté sur la disponibilité des données radiométriques recherchées.

En effet, Adrar est une ville saharienne située au milieu du Sahara, cette région connue par des températures diurnes très élevées en été, et des températures basses en hiver.

Les données expérimentales du rayonnement solaire global utilisées de l'année 2014 proviennent d'unité de recherche en



# Le 4<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

## The 4<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2016



énergies renouvelables en milieu saharien d'Adrar (URER.MS) [1].

Signalons que, outre l'incidence de l'atmosphère, l'irradiation solaire dépend de [2]:

- l'orientation et l'inclinaison de la surface,
- latitude du lieu et son degré de pollution,
- la saison ou période de l'année,
- l'instant considéré dans la journée,
- nature des couches nuageuses.
- les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité, vent, température).

### III. COMPOSANTES DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Le rayonnement solaire appelé également rayonnement électromagnétique émis par le soleil est grandement perturbé par l'atmosphère. Ce qui ne permet que la réception au sol des composants les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus, une fois arrivé au sol une partie du rayonnement est réfléchi comme représentés dans la figure suivante [3]:

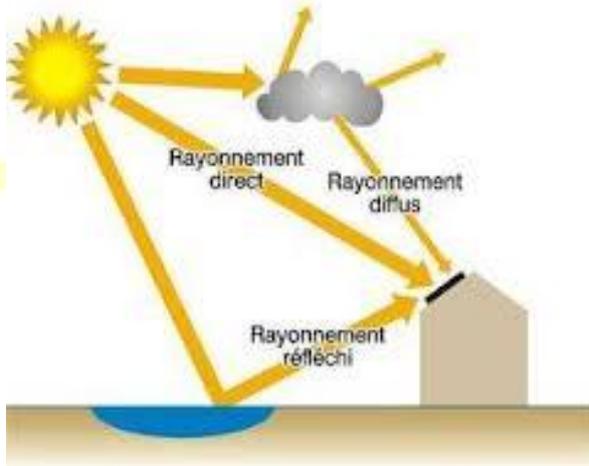


Fig. 1 : Les différents composants du rayonnement solaire [4]

### IV. MODELISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE SUR UN PLAN HORIZONTAL PAR CIEL CLAIR

#### IV.1 Rayonnement hors atmosphère

Le rayonnement solaire extraterrestre ; fonction de la constante solaire  $I_0$  et de la correction de distance entre la terre et le soleil  $C_{t-s}$  est donné par l'équation suivante [5,6]:

$$G_0 = I_0 \cdot C_{t-s}$$

### V. MODELE DE CALCUL DU RAYONNEMENT SOLAIRE

#### V.1 Présentation du modèle de Capderou

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffusé de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs des troubles ; à partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directes et diffusées par ciel clair. La connaissance de facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les irradiances par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement directe traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke  $T_L^*$  par ciel clair est donné par [7]:

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (1)$$

$T_0$  est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo - astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante :

$$A_{he} = \sin \left( \frac{360}{365} \cdot (j - 121) \right) \quad (2)$$

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\theta) + 0.1 (2 + \sin(\theta)) A_{he} - 0.2h - (1.22 + 0.14A_{he})(1 - \sin(\gamma)) \quad (3)$$

$h$  : Altitude du lieu,  $j$  : Numéro du jour dans l'année,  $\theta$  : Latitude du lieu,  $\gamma$  : Hauteur du soleil.

$T_1$  est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère ( $O_2$ ,  $CO_2$ , et  $O_3$ ) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche :

$$T_1 = 0.89^h \quad (4)$$

$T_2$  est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplées à une légère absorption dépendent à la fois de la nature et de la quantité des aérosols. En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom  $\beta$ ,  $T_2$  est donnée par :

$$T_2 = (0.9 + 0.4A_{he}) (0.63)^h \quad (5)$$

#### V.1.1 Masse Atmosphérique

On appelle masse d'air la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par



rapport à une traversée verticale au niveau de la mer. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante [5,6] :

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma) + 9.40 \cdot 10^{-4} [\sin(\gamma) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (6)$$

#### V.1.2 Epaisseur Optique de l'Atmosphère

En 1922, Linke définit l'épaisseur optique de Rayleigh  $\delta_R$  comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols [8]. Kasten, en 1980 a utilisé les données spectrales publiées par Feussner et al en 1930 Il a proposé aussi l'expression (7) pour  $\delta_R$  connue sous le nom de pyréliométrique de Kasten, dont la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte [9,10].

$$\delta_R = 9.4 + (0.9 \cdot m_A) \quad (7)$$

Dans cette formule, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que : CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> et le CO n'est pas prise en compte. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule pyréliométrique de Kasten.

#### V.1.3 Irradiation globale reçue sur un plan horizontal

$I_0$  représente la constante solaire qui est par définition le flux énergétique reçu par une surface unité, sa valeur est 1367 W/m<sup>2</sup>. L'irradiation directe par ciel clair obtenue sur un plan horizontal est donnée par [5,6]:

$$I = I_0 C_{t-s} \exp \left[ -T_L^* \left( 0.9 + \frac{9.4}{0.89^h} \cdot \sin(\gamma) \right) - 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

L'irradiation diffuse sur un plan horizontal

$$a = 1.1 \quad (9)$$

$$b = \log ( T_L^* - T_0 ) - 2.8 + 1.02 (1 - \sin(\gamma))^2 \quad (10)$$

$$D = I_0 \cdot \exp(-1 + 1.06 \log(\sin(\gamma))) + a \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \quad (11)$$

L'irradiation globale reçue sur un plan horizontal est donnée par :

$$G = I + D \quad (12)$$

#### V.1.4 Irradiation globale reçue sur un plan incliné

##### V.1.4.1. Irradiation directe

C'est la projection de la composante normale sur un plan incliné.

$$I = I_n \cos(i) = I_0 C_{t-s} \exp \left[ -T_L^* \left( 0.9 + \frac{9.4}{0.89^h} \cdot \sin(\gamma) \right) - 1 \right]^{-1} \cdot \cos(i) \quad (13)$$

$I_n$  est le rayonnement direct normal et  $i$  l'angle d'incidence.

##### V.1.4.2 Irradiation diffuse du ciel

$$D = d_{ciel} + d_{sol} + \delta_i' \cdot \frac{1 + \sin(\xi)}{2} \quad (14)$$

D'où la puissance du rayonnement global incident, à un instant donné sur un plan ( $\alpha$ ,  $\xi$ ) est :

$$G = I + D \quad (15)$$

#### VI.2 Modèle de Bird & Hulstrom

##### VI.2.1 Calcul du rayonnement direct

L'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal est donné par la relation [9] :

$$I = 0.9751 \cdot I_0 \cdot \tau_r \cdot \tau_g \cdot \tau_0 \cdot \tau_w \cdot \tau_a \cdot \cos(z) \quad (16)$$

où, le coefficient d'absorption par la couche d'ozone  $\tau_0$  est donné par :

$$\tau_0 = 1 - 0.1611 \cdot U_0 \cdot (1.0 + 139.48 \cdot U_0)^{-0.3035} - 0.002715 \cdot U_0 \cdot (1 + 0.044 \cdot U_0 + 0.0003 \cdot U_0^2)^{-1} \quad (17)$$

et,  $U_0$  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:

$$U_0 = L \cdot m_r \quad (18)$$

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

$$m_r = [\cos(z) + 0.15(93.885 - z)^{-1.253}]^{-1} \quad (19)$$

Et,  $L$  représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d'ozone réduite (cm)) [12, 13].

$$L = \{ 235 + [150 + 40 \sin(0.9856(j' - 30)) + 20 \sin(3\phi)] [\sin^2(1.28 \theta)] / 1000 \quad (20)$$



Le coefficient de transmission après absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau est donné par :

$$\tau_w = 1 - 2.4959 \cdot U_w \cdot [(1 + 79.03 \cdot U_w)^{0.6828} + 6.385 \cdot U_w]^{-1} \quad (21)$$

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

$$U_w = \frac{0.493}{T} \cdot HR \cdot \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \quad (22)$$

$T$ , la température ambiante (K) et  $HR$ , l'humidité relative (%).

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 :

$$\tau_g = \exp(-0.0127 \cdot m_a^{0.26}) \quad (23)$$

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

$$m_a = \frac{p}{p_0} \quad m_r = \frac{\exp(-0.0001184 \cdot h)}{\cos(z) + 0.15(93.885 - z)^{-1.253}} \quad (24)$$

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

$$\tau_r = \exp[-0.0903 \cdot m_a^{0.84} (1.0 + m_a \cdot m_a^{1.01})] \quad (25)$$

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

$$\tau_a = \exp\left[-k_a^{0.873} \cdot m_a^{0.9108} \cdot (1.0 + k_a - k_a^{0.7088})\right] \quad (26)$$

Où

$$k_a = 0.2758 \cdot k_{a\lambda/\lambda=0.38 \mu m} + 0.35 \cdot k_{a\lambda/\lambda=0.5 \mu m} \quad (27)$$

$k_{a\lambda/\lambda=0.38 \mu m}$  et  $k_{a\lambda/\lambda=0.5 \mu m}$  sont deux coefficients d'atténuation déterminés à partir des mesures expérimentales déduites par l'équation :

$$k_a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (28)$$

où,  $\alpha$  et  $\beta$  sont respectivement le coefficient caractérisant la visibilité du ciel et le coefficient de trouble d'Angstrom. Leur calcul est basé sur la détermination expérimentale de deux coefficients d'atténuation  $k_{a\lambda 1}$  et  $k_{a\lambda 2}$  correspondant aux

longueurs d'onde où l'absorption par la vapeur d'eau n'intervient pas ( $\lambda_1 = 380$  nm et  $\lambda_2 = 500$  nm respectivement).

Les mesures utilisées dans ce travail nous ont été fournies par le NCDC (National Climatic Data Center) à Asheville en Caroline du Nord [13,14].

Ces valeurs  $\alpha$  et  $\beta$  de nous ont permis de calculer  $k_{a\lambda/\lambda=0.38 \mu m}$  et  $k_{a\lambda/\lambda=0.5 \mu m}$ .

#### VI.2.2 Calcul du rayonnement diffus

Dans ce modèle aussi, le rayonnement diffus sur un plan horizontal est la somme des trois composantes diffuses dues aux divers types de diffusion du rayonnement solaire par la pellicule atmosphérique.

$$D = D_r + D_a + D_m \quad (29)$$

Le rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh est donné par :

$$D_r = 0.79 \cdot I_0 \cdot \cos(z) \cdot \tau_0 \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_{aa} \cdot 0.5 \cdot \frac{(1 - \tau_r)}{(1 - m_a + m_a^{1.02})} \quad (30)$$

où,  $\tau_{aa}$  est donnée par l'expression suivante :

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_0) \cdot (1 - m_a + m_a^{1.06}) \cdot (1 - \tau_a) \quad (31)$$

et,  $\omega_0$  est le coefficient de réflexion unitaire relatif à la diffusion par les aérosols. Dans ce modèle, Bird & Hulstrom recommandèrent  $\omega_0 = 0,90$ .

Le rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols est donnée par :

$$D_a = 0.79 \cdot I_0 \cdot \cos(z) \cdot \tau_0 \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_{aa} \cdot F_c \cdot \frac{(1 - \tau_{as})}{(1 - m_a + m_a^{1.02})} \quad (32)$$

où,  $F_c$ , est le coefficient de dispersion de l'atmosphère.  $F_c = 0.84$  est la valeur recommandée par ce modèle [15].

$\tau_{as}$  est donné par la relation suivante :

$$\tau_{as} = \tau_a / \tau_{aa} \quad (33)$$

Le diffus dû au phénomène de multi réflexion terre atmosphère est donné par :

$$D_m = \frac{(1 + D_a + D_r) \cdot \rho \cdot \rho'_a}{(1 - \rho \cdot \rho'_a)} \quad (34)$$

avec,  $\rho$  est l'albédo terrestre, et  $\rho'_a$  est l'albédo du ciel clair donné par :

$$\rho'_a = 0.0685 + (1 - F_c) \cdot (1 - \tau_{as}) \quad (35)$$



### VI.2.3 Calcul du rayonnement global

Le rayonnement global sur un plan horizontal est la somme des deux composantes solaires directe et diffuse soit :

$$G = D + I$$

## VII. Résultats et interprétations

### VII.1 Résultats obtenus

Pour obtenir une validation du rayonnement solaire, nous allons confronter quelques valeurs; par ciel clair, du rayonnement solaire fournies par la station radiométriques d'Adrar, avec des valeurs, sur plan horizontal.

On présentera sur les figures suivantes, des graphes comparatifs relatifs au rayonnement global, des modèles Capderou et Bird & Hulstrom, avec les données expérimentales de l'année 2014 site d'Adrar. Le graphe d'erreur relative en fonction du temps (TSV) est également donné pour le rayonnement global.

L'expression de l'erreur relative moyenne en (%) est donnée par l'équation suivante:

$$E_{T_r} = \frac{|G_{mesuré} - G_{calculé}|}{G_{mesuré}} \quad (36)$$

G : éclairement solaire (w/m<sup>2</sup>)

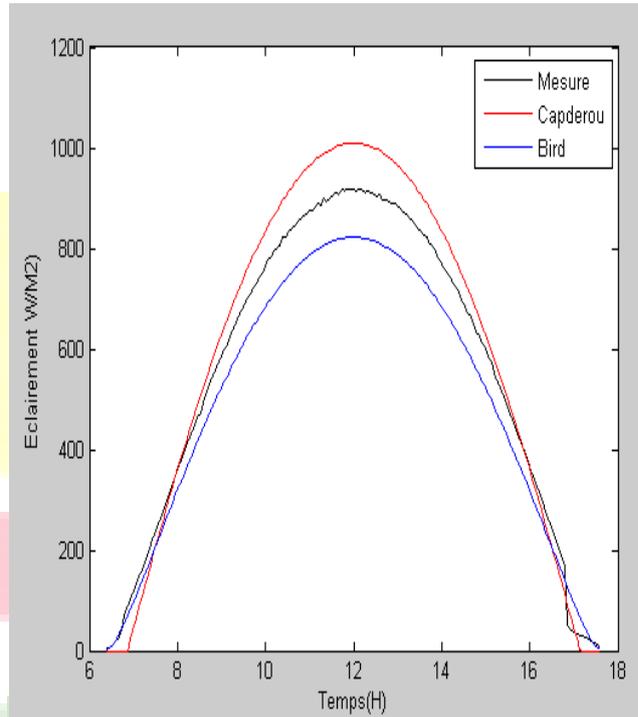


Fig. 2 : Eclairement Global

### VII.1.1 Résultats obtenus pour la journée du 24 Février

Les données expérimentales relatives aux composantes du rayonnement solaire globale sur plan horizontal, et par ciel clair et pour une journée hivernale sur la ville d'Adrar sont présentées sur les figures en dessous sous forme de graphes, et en les comparants aux données issues des deux modèles étudiés.

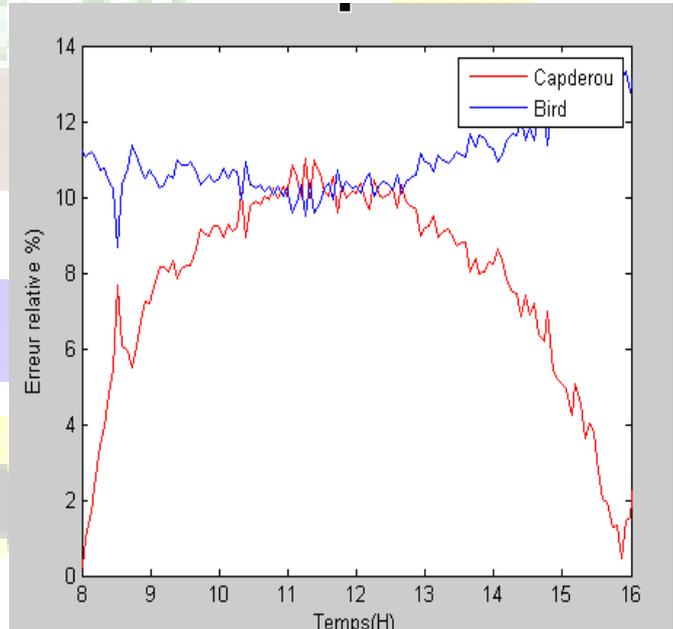


Fig. 3: Erreur relative instantanée

### VII.1.2 Résultats obtenus pour la journée du 12 Mai

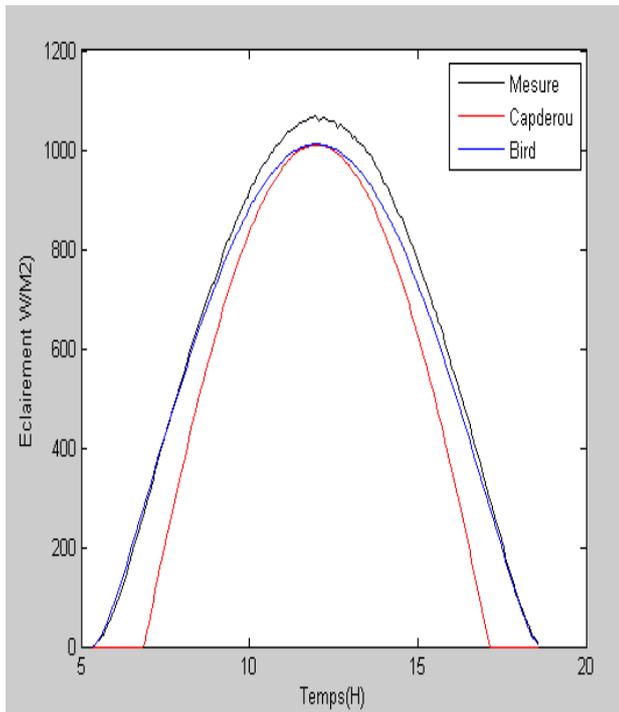


Fig. 4 : Eclairement global

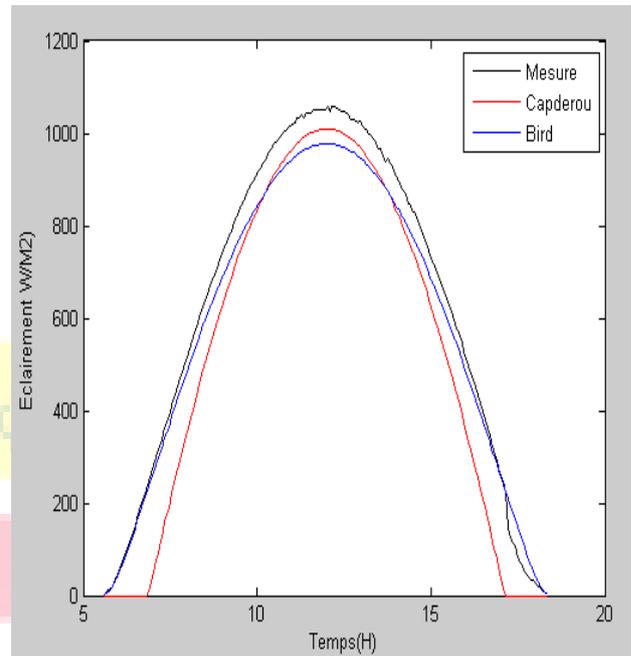


Fig. 6 : Eclairement global

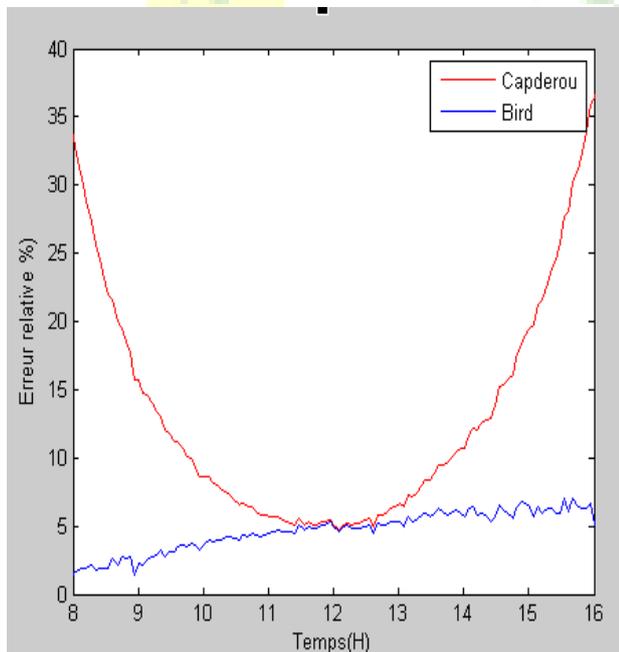


Fig. 5 Erreur relative instantanée

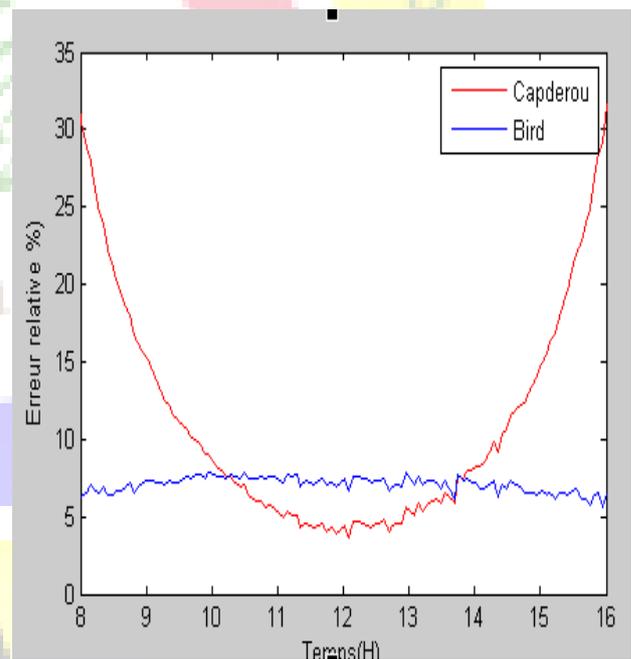


Fig. 7 Erreur relative instantanée

VII.1.3 Résultats obtenus pour la journée du 23 Aout

VII.1.4 Résultats obtenus pour la journée du 13 Novembre



Jour	Erreur relative moyenne journalière (%) Par Modèle	
	Bird H.	Capderou
24-02-2014	10.37	8.92
12-05-2014	2.76	19.60
23-08-2014	7.10	15.06
13-11-2014	8.15	34.33

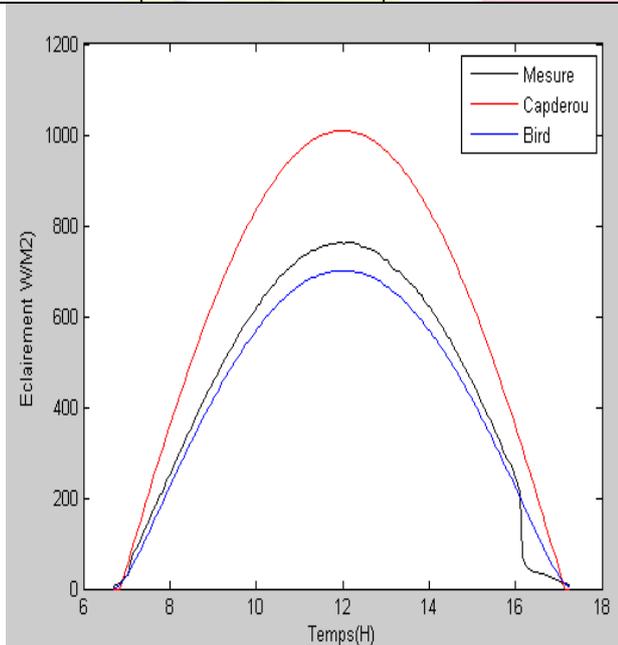


Fig. 8 : Eclairage global

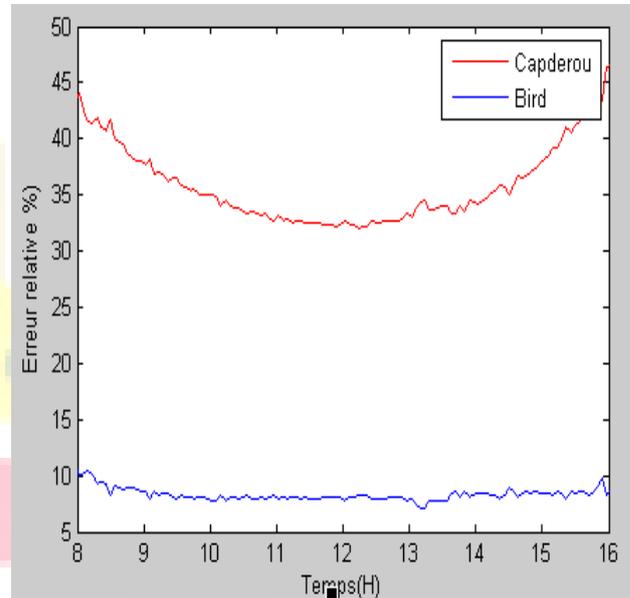


Fig. 9 Erreur relative instantanée

### VII.2 Etude comparative et analyse critique

Afin de réaliser une analyse critique des résultats obtenus, il a été effectué une comparaison des données expérimentales avec celles issues des deux modèles. Il a été donc également calculé l'erreur relative du rayonnement global sur le site d'Adrar.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau 1 ci-après.

L'erreur relative moyenne journalière étant donnée par la relation suivante :

$$E_m (\%) = \sum_i \frac{E_i (\%)}{i} \quad (45)$$

**Tableau 1:** Résultats de calcul des erreurs relatives du rayonnement solaire horizontal pour quelques jours clairs, sur le site.

## VIII. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

En analysant les résultats représentés dans les figures (2 jusqu'au 9) on déduit ce qui suit:

- Le rayonnement solaire global augmente avec la croissance du temps jusqu'à atteindre une valeur maximal



## Le 4<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

### The 4<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016



aux environs de 12h:00 puis commence à diminuer jusqu'à atteindre zéro (couche de soleil).

- Nous avons remarqué que le flux solaire varie autour de 1000 (W/m<sup>2</sup>), avec une augmentation aux mois de juin et août, une légère baisse durant les mois de septembre et mars et une baisse considérable au mois de décembre. Cette variation est due essentiellement à l'angle de déclinaison et au changement de température.
- Le modèle de Bird est généralement le plus favorable pour l'estimation de l'éclairement solaire sur un capteur horizontal surtout dans le mois de mai.
- Le modèle Capderou donne parfois des résultats qui divergent radicalement par rapport aux valeurs mesurées au niveau de site (mois aout, mai et surtout novembre).
- Pour le modèle de Bird, on remarque que pour la plupart des situations, les valeurs de la composante globale estimée sont proches des valeurs mesurées. L'erreur relative moyenne est faible. Un exemple typique apparaît le 15 mai où la courbe simulées par le modèle sont en très bonne concordance avec la courbes des valeurs mesurées, si bien que l'erreur relative est très faible (l'erreur ne dépasse pas 3% pour ce jour).
- Nous avons constaté aussi que le modèle Bird est le plus avantageux pendant la plupart des saisons de l'année (l'erreur ne dépasse pas 11 %).
- En générale, on peut dire que le modèle Capderou donne une estimation divergente du rayonnement solaire global pour les mois d'automne (erreur >34%) par rapport aux mois d'été où le facteur de Linke a augmenté remarquablement ces dernières années, principalement à cause des changements climatiques
- Le modèle Bird est incontournable pour l'estimation du rayonnement solaire horozontale (Tableau 1), ce qui est intéressant pour effectuer le dimensionnement des systèmes thermiques (chauffe-eau) et des installations photovoltaïques, plus particulièrement en Algérie. Car il est utilisé le plus souvent le rayonnement solaire horizontal dans le dimensionnement des systèmes solaires.

#### VII. CONCLUSION

Dans cet article, une modélisation du rayonnement solaire par les modèles Capderou, et Bird & Hulstrom est présentée et réalisée. Chacun des modèles a utilisé des équations propres pour calculé les paramètres atmosphériques (masse, épaisseur optique de l'atmosphère et facteur de trouble), et pour calculé l'éclairement directe, diffus et globale.

Ce travail nous a permis de confronter des valeurs mesurées et celles estimées par les deux modèles paramétrés. Nous avons constaté que le modèle Bird & Hulstrom donne une bonne estimation du rayonnement solaire. Les résultats

obtenus pour le site se rapprochent avec une grande précision des données réelles.

Par ailleurs, l'utilisation du modèle Capderou peut conduire à des valeurs qui divergent, ce qui influe considérablement sur le dimensionnement des systèmes énergétiques solaires.

Pour ce site, ce modèle s'avère donner des valeurs estimées inférieures ou supérieures à celles mesurées.

#### REFERENCES

- [1] Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharienne à Adrar
- [2] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes, 2007
- [3] L.MILOUDI, « Etude et simulation de la trajectoire du soleil par un panneau solaire photovoltaïque », Thèse de Magister en automatique, Université Boumerdès, 2011.
- [4] C.DELORME, « le rayonnement solaire utilisable », université d'Avignon publication- France
- [5] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie', Modèles Théoriques et Expérimentaux, Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [6] F. Yattou, « Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie », Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2, pp. 331 – 346, 2009.
- [7] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, « Conception et Validation d'un Programme sous Excel pour L'estimation du Rayonnement Solaire Incident en Algérie ». Cas d'un Ciel Totalemt Clair, Revue des Energies Renouvelables Vol, 11 N°3, 2008, 423 - 436.
- [8] R. Dogniaux, « L'influence de L'estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique sur L'évaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair », Application aux Données Radiométriques de l'IRM à Uccle, Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C, N° 20, 1984.
- [9] E .R. Bird, R.L.Hulstrom, « A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insulation on Horizontal Surfaces », Seri Tr -642-761, 1981.
- [10] J.Hofierka, M.Suri, « The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications », Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference 2002 - Trento, Italy, 11-13, 2002.
- [11] BENATAILLAH Djelloul, « Etude et simulation de flux solaire avec intégration d'un système d'information géographique (S.I.G) pour la wilaya d'Adrar », Thèse de Magistère, Université Adrar, 2014.
- [12] T.K. Van Heuklon, « Estimating Atmospheric Ozone for Solar Radiation Models », Solar Energy, Vol. 22, N°1, pp. 63 – 68, 1979.
- [13] A. Mefti, « Contribution à la Détermination du Gisement Solaire par Traitement de Données Solaires au Sol et d'Images Météosat », Thèse de Doctorat d'Etat, USTHB, Alger, 2007
- [14] www.ncdc.noaa.gov
- [15] Hussain et al, « Estimation of Global and Diffuse Irradiation from Sunshine Duration and Atmospheric Water Vapour Contents », Solar Energy, Vol. 33, N°2, pp. 217 - 220, USA 1984.