



**Journal de Physique de la Soaphys**  
**Volume 2, Numéro 2, Décembre 2020**

**Directeur de publication**

- Prof. Jean KOULIDIATI

**Comité scientifique**

- Prof. Jean CHABI OROU (Benin)
- Prof. Félix HONTINFINDE (Benin)
- Prof. Dieudonné Joseph BATHIEBO (Burkina Faso)
- Prof. Frédéric OUATTARA (Burkina Faso)
- Prof. Adama DIAWARA (Côte d'Ivoire)
- Prof. Vafi DOUMBIA (Côte d'Ivoire)
- Prof Abdramane BA (Mali),
- Prof. Badié DIOURTHE (Mali),
- Prof. Saïdou MADOUYOU (Niger)
- Dr. Haoua AMADOU, MC (Niger)
- Prof. Kossi NAPO (Togo)
- Prof. Magolmèèna BANNA (Togo)
- Prof. Oumar KA (Sénégal)
- Prof. Diouma KOBOR (Sénégal)

**Rédacteur en chef**

- Prof. Antoine BERE (Burkina Faso)

**Rédacteur en chef adjoint**

- Dr. Milohum Mikesokpo DZAGLI, MC, (Togo),

**Secrétaire technique**

- Dr. Sié Zacharie KAM, MA, (Burkina Faso)

# Journal de Physique de la Soaphys

## Volume 2, Numéro 2, Décembre 2020

### SOMMAIRE

Thermal destruction of gas generated from household waste <i>Palm et al.,</i>	.....	C20A15 :1-5
Energy calculations of the (2p <sup>2</sup> 1D); (3d <sup>2</sup> 1G) and (4f <sup>2</sup> 1I) doubly excited states of helium isoelectronic sequence ( $Z \leq 20$ ) via the modified atomic orbital theory <i>Sow</i>	.....	C20A16 :1-7
Potentiel érosif de la pluie : identification du meilleur estimateur d'énergie cinétique de la pluie à partir des données de dropsize distribution (DSD) de pluies mesurées au nord-ouest du Bénin <i>Adjikpe et al.,</i>	.....	C20A17 :1-5
Le carbone 14 ( <sup>14</sup> C) un traceur idéal pour la surveillance de la pollution atmosphérique en dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) anthropogénique dans la zone de Dakar <i>Sène et al.,</i>	.....	C20A18 :1-8
Influences of local materials on the building behavior and evaluation of the cooling loads <i>Amadou et al.,</i>	.....	C20A19 :1-7
Evaluation du potentiel en petite hydroélectricité du bassin versant de Wassadou en utilisant le modèle hydrologique SWAT <i>Ndiaye et al.,</i>	.....	C20A20 :1-9
Modélisation de la distribution granulométrique des gouttes de pluie par la loi gamma généralisée <i>Kougbeagbede et al.,</i>	.....	C20A21 :1-5
Adaptive proportional integral controller based on ANN for DC link voltage control single-phase inverter connected to grid <i>Traoré et al.,</i>	.....	C20A22 :1-6
Evaluation du pouvoir méthanogène de la jacinthe d'eau sur le lac Nokoué à Ganvie au Bénin <i>Dohou et al.,</i>	.....	C20A23 :1-5
Evaluation du potentiel de production du biogaz émanant des déchets organiques : cas de Bamako <i>Koné et al.,</i>	.....	C20A24 :1-6
Modélisation du rayonnement solaire global incident sur un plan horizontal et incliné par quatre modèles semi-empiriques sur le site de la ville de Ouagadougou <i>Ouédraogo et al.,</i>	.....	C20A25 :1-9
Modélisation et simulation d'un bâtiment classique vers un bâtiment à énergie positive (BEPOS) <i>Sawadogo et al.,</i>	.....	C20A26 :1-7
Recherche de tendances récentes dans les séquences sèches : cas des stations synoptiques du Bénin <i>Gnihatin et al.,</i>	.....	C20A27 :1-17
Theoretical and experimental analysis of a boost converter <i>Badiane et al.,</i>	.....	C20A28 :1-9

## MODÉLISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL INCIDENT SUR UN PLAN HORIZONTAL ET INCLINÉ PAR QUATRE MODÈLES SEMI-EMPIRIQUES SUR LE SITE DE LA VILLE DE OUAGADOUGOU.

Ouédraogo Souleymane <sup>\*,1</sup>, Zongo S. Augustin <sup>1</sup>, Nzihou Jean-Fièle <sup>1,2</sup>, Daho Tizane <sup>1</sup>,  
and Béré Antoine <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique et de Chimie de l'environnement (LPCE), Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso.

<sup>2</sup> Laboratoire de Recherche Énergétique et de Météorologie de l'Espace (LAREME), Université Norbert ZONGO de Koudougou, Burkina Faso

\* [souley1010@yahoo.fr](mailto:souley1010@yahoo.fr)

### INFOS SUR L'ARTICLE

#### Historique de l'article:

Reçu le : 24 novembre 2020

Reçu en format révisé le : 29 avril 2021

Accepté le : 10 mai 2021

**Mots-Clés :** Rayonnement solaire, modèle semi-empirique, Estimation, Modèle de Liu et Jordan, Modèle de Capderou, Modèle d'Euphrat, Modèle de r.sun, Ouagadougou.

**Keywords :** Solar irradiation, Semi empiric model, Estimation, Liu and Jordan model, Capderou model, Euphrat model, r. sun model, Ouagadougou.

### RÉSUMÉ

Les paramètres météorologiques et radiométriques tels que le rayonnement solaire influencent fondamentalement la rentabilité et la performance des systèmes de conversion de l'énergie solaire. L'optimisation des convertisseurs d'énergie solaire dépend du modèle de rayonnement solaire utilisé. Cette étude porte sur l'estimation du rayonnement solaire incident global sur le plan horizontal et incliné sur le site de la ville de Ouagadougou. L'étude des quatre modèles de rayonnement solaire permet d'estimer le rayonnement solaire global incident sur un plan horizontal et incliné. Les différents modèles sont évalués sur une base graphique et statistique, en utilisant les indicateurs du coefficient de détermination de  $R^2$ , de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le pourcentage de l'erreur absolue moyenne (MAPE). Les résultats obtenus avec les quatre modèles semi-empiriques ont été comparés avec les valeurs expérimentales instantanées mesurées sur le site de Ouagadougou. Les résultats montrent que le modèle semi-empirique d'Euphrat présente la meilleure estimation du rayonnement solaire global pour le site de Ouagadougou.

### I. INTRODUCTION

Le Burkina Faso, pays sahélien au cœur de l'Afrique de l'Ouest avec un taux d'électrification national estimé à 17% en 2014 dont 4% en milieu rural[1], fait face à une demande énergétique due au développement des activités économiques et à la croissance démographique.

La part de l'énergie solaire dans l'Approvisionnement Total en Énergie Primaire (ATEP) est négligeable et la part de l'Énergie solaire dans la consommation nationale totale d'énergie en 2011 est de 0,10 % [2]. Cependant, avec un fort potentiel d'ensoleillement estimé à une moyenne de  $5,5 \text{ KWh/m}^2/\text{jr}$  pour une durée d'ensoleillement variant de 3000 à 3500 h/an, le Burkina peut réduire considérablement sa facture en énergie fossile en se tournant vers la production de l'énergie solaire.

Toutefois, le passage à l'énergie solaire comporte des contraintes. En effet, l'aspect aléatoire et discontinu de l'énergie solaire ainsi que le déphasage de sa disponibilité, dans le temps, par rapport aux besoins d'une exploitation énergétique, montre son importance et la nécessité de

connaître le gisement solaire avant de procéder au dimensionnement et à l'installation d'un quelconque système de captation solaire. La meilleure approche pour connaître le gisement solaire sur un site donné est de disposer d'une bonne série de mesures du rayonnement au sol. Il est nécessaire de connaître les méthodes de collecte, de traitement et d'analyse des données de cet rayonnement afin d'évaluer convenablement le potentiel d'énergie solaire de la région [3]. Or au Burkina c'est seulement la station de l'agence nationale de la météorologie du Burkina (ANAM-BF) qui effectue des mesures sur ces types de données sur toute l'étendue du territoire national et en plus elle ne dispose que des données du rayonnement global incident sur un plan horizontal. Or pour un bon dimensionnement et l'installation sur un site les données du rayonnement sur le plan horizontal et sur le plan incliné sont indispensables. Pour le moment le recours à des modèles empiriques s'avère nécessaire pour surmonter ces contraintes. À cet effet, de nombreuses études et travaux de recherches basés sur des modèles empiriques ont été utilisés pour les estimations du rayonnement solaire sous diverses conditions météorologiques et géographiques [4-



6]. La présente étude cherche à déterminer un modèle fiable pour l'estimation du rayonnement solaire global sur le plan horizontal et sur le plan incliné sur le site de l'Université Joseph KI-ZERBO à Ouagadougou à l'aide de mesures expérimentales instantanées et de quatre modèles semi-empiriques. Une étude comparée entre les résultats expérimentaux et les modèles semi-empiriques permettra de déterminer le meilleur modèle d'estimation du rayonnement solaire au plan incliné et horizontal. Pour cela, nous avons comparé à l'aide de quelques formules statistiques, les irradiances journalières mesurées sur les plans horizontal et incliné avec celles estimées par les modèles semi-empiriques.

## II Matériels et Méthodes

### II.1 Modèles semi-empiriques

Les modèles semi-empiriques font appel à plusieurs formules faisant intervenir plusieurs paramètres géométriques et astronomiques.

#### II.1.1 Les formules astronomiques

Parmi les formules astronomiques intéressantes, nous ne considérons dans le cas de notre travail que celle du facteur de trouble de Linke

##### -La déclinaison du soleil

Elle est obtenue par la formule :

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + j) \right] \quad (1)$$

où  $j$  est Le numéro du jour.

Dans le modèle r.sun, la déclinaison du soleil (rad) est donnée par la formule (2) :

$$\delta = \arcsin(0.398 \sin(N' - 14 + 0.0355 \sin(N' - 0.0489))) \quad (2)$$

$$\text{Où : } N' = 2\pi j / 356,25 \quad (3)$$

##### -L'angle horaire

Il est obtenu par la formule suivante :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (4)$$

##### - La hauteur apparente du soleil

La hauteur du soleil  $h$  est l'angle que fait le plan horizontal avec la direction du soleil. Elle est obtenue par :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (5)$$

Avec  $\varphi$  la latitude du lieu

##### - L'azimut du soleil

L'azimut  $\psi$  du soleil est représenté, suivant le modèle de Capderou en fonction de la déclinaison solaire  $\delta$ , de la latitude du lieu  $\varphi$ , et de l'angle horaire  $\omega$  de la manière suivante :

$$\cos(\psi) = \frac{\sin(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) - \sin(\varphi) \sin(\delta)}{\cos(h)} \quad (6)$$

Les détails pour la prise en compte des autres paramètres peuvent être obtenus dans la littérature[7].

L'azimut pour le modèle d'Euftrat est donné

$$\cos(\psi) = \frac{\cos(\delta) \cos(\varphi)}{\cos(h)} \quad (7)$$

##### -L'angle d'incidence

L'angle d'incidence  $\theta_i$  est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré, elle est définie par l'inclinaison du plan  $\beta$  et l'Azimut de la normale du plan  $\alpha$  (orientation du plan). Il est calculé sur la base de la formule (8 ou 9)

$$\cos(\theta_i) = \sin(\varphi - \beta) \sin(\delta) + \cos(\varphi - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (8)$$

-Pour le modèle d'Euftrat l'angle d'incidence s'obtient par la formule :

$$\theta_i = \cos(h) \sin(\beta) \cdot \cos(\psi) + \sin(h) \cos(\beta) \quad (9)$$

$\beta$ : L'angle d'inclinaison.

##### - La masse atmosphérique

La masse atmosphérique relative est donnée par Capderou par la formule suivante[8]:

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

$m_{Ak}$  est la masse atmosphérique suivant le modèle de Kasten, elle est donnée par l'équation suivante :

$$m_{Ak} = \frac{1 - 0.1 \text{Alt}}{\sin(h_{sk}) + 0.15(h_{sk} + 3.885)^{-1.253}} \quad (11)$$

$\text{Alt}$  : L'altitude du lieu.

Le modèle d'Euftrat estime la masse atmosphérique traversée par la formule

$$m_A = \frac{(1 - 0.1 \cdot \text{Alt})}{\sin(h)} \quad (12)$$

Le modèle de r.sun donne la formule de la masse atmosphérique par la relation suivante :

$$m_A = \frac{\exp\left(\frac{-\text{Alt}}{8434.5}\right)}{\sin(h) + 0.50572(h + 0.7995)^{-1.6364}} \quad (13)$$

##### - L'épaisseur optique de l'atmosphère

L'épaisseur optique de Rayleigh est l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols[8]. Kasten, en 1980 proposa la formule suivante pour  $\delta_R$ , connue sous le nom de formule pyréliométrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte[9].

$$\delta_R = \frac{1}{9.4 + 0.9 m_A} \quad (14)$$

Le modèle de r.sun donne l'épaisseur optique par la formule :

$$\delta_R = \frac{1}{6.6296 + 1.7513m_A - 0.1202m_A^2 + 0.0065m_A^3 - 0.00013m_A^4} \quad (15)$$

$si \ m_A \leq 20$

$$\delta_R = \frac{1}{10.4 + 0.718m_A} \quad (16)$$

$si \ m_A > 20$

### - Le facteur de trouble de Linke

Le facteur de trouble atmosphérique de linke  $T_L$  représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle [10].

Pour le rayonnement direct, Capderou estime le facteur de trouble de linke en fonction des propriétés climatiques locales du site ainsi que de la hauteur du soleil. Il est représenté par la somme des trois facteurs de trouble auxiliaires.

$$T_L = T_1 + T_2 + T_3 \quad (17)$$

où  $T_1$  : 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. Pour le calcul de ce facteur, Capderou a proposé l'expression suivante :

$$T_1 = 2.4 - 0.9\sin(\varphi) + 0.1(2 + \sin(\varphi))A_h - 0.2Alt - (1.22 + 0.144A_h)(1 - \sin(\varphi)) \quad (18)$$

Où :

$$A_h = \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right)(j - 121)\right) \quad (19)$$

représente la variation saisonnière (degré).

$T_2$  : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par :

$$T_2 = 0.89^{Alt} \quad (20)$$

$T_3$  : est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption, il dépend à la fois de la nature et de la quantité des aérosols contenue dans l'atmosphère. Il est obtenu par la relation suivante :

$$T_3 = (0.9 + 0.4A_h)(0.63)^{Alt} \quad (22)$$

Où Alt : l'altitude du lieu

et  $A_h$  : la variation saisonnière (degré)

Pour estimer le rayonnement diffus, Capderou emploie le facteur de trouble diffusif

$$T'_L = T_L - T_1 \quad (23)$$

Le modèle d'Euftrat est basé sur la synthèse de divers travaux, en particulier ceux de Brichambaut, Kasten et Hay. Ce modèle fait appel au facteur de trouble de Linke corrigé par Kasten  $T_{LK}$ . Ce facteur est estimé localement [11] grâce à la formule (23)

$$T_{LK} = 2.5 + 16\beta_a + 0.5\ln(P) \quad (24)$$

dans laquelle  $P$  est la pression de vapeur d'eau et  $\beta_a$  un coefficient dit, coefficient d'Angström obtenu en fonction des conditions opératoires.

**Tableau 1 : valeurs du coefficient  $\beta_a$  [11]**

	Type de ciel clair	Coefficient $\beta_a$
01	Bleu profond	0,02
02	Bleu pur	0,05
03	Bleu clair	0,1
04	Bleu laiteux	0,2
05	Blanchâtre	0,5

### -Le coefficient de correction de distance Terre-Soleil

Le coefficient de correction de distance Terre-Soleil est donné par la formule (25):-

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360j}{365}\right) \quad (25)$$

Dans le modèle de r.sun, La correction Terre-Soleil est donnée par la formule (26) [12-13].

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos(N' - 0.048869) \quad (26)$$

$$N' = 2\pi \frac{j}{356,25} \quad (27)$$

### II.1.2. Les formules des rayonnements

Les formules des rayonnements solaires direct diffus et global par modèle et selon le plan horizontal ou incliné sont consignés dans les tableaux 2 et 3 :

**Tableau 2 :** Description des modèles sélectionnés pour l'estimation du rayonnement solaire direct diffus et global sur un plan Horizontal [6] [4, 14-16] [12, 17-18] [7] [8] [12-13]

Auteurs	Type de Modèle	Modèle	Type
<b>Liu and Jordan(1960)</b>	Isotropique	$S_h = A \exp\left(\frac{-1}{B \sin(h+C)}\right) \sin(h)$	Direct
		$D_h = E(\sin h)^{0.4}$	Diffus
		$G_h = S_h + D_h$	Global
<b>Capderou (1987)</b>	Anisotropique	$S_H = I_0 C_{t-s} \sin(h) \exp\left[\frac{-T_L}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^{Alt}} \sin(h)}\right]$	Direct
		$D_H = I_0 C_{t-s} \exp(-1 + 1.06 \log(\sin(h)) + a - \sqrt{a^2 + b^2})$	Diffus
		$G_H = S_H + D_H$	Global
<b>Euftrat (1990)</b>	Anisotropique	$I_n = I_0 C_{t-s} \exp\left(\frac{-m_A T_{LK}}{0.9 m_A + 9.4}\right)$	Direct
		$D_h = G_h - I_n \sin(h)$	Diffus
		$G_h = C_{t-s} (1270 - 56 T_{LK}) (\sin(h))^{\frac{T_{LK}+36}{33}}$	Global
<b>r. sun (2002)</b>	Anisotropique	$I_{bn} = B_{oc} \cdot \sin(h_0)$	Direct
		$D_{hc} = I_c \cdot T_n(T_{LK}) \cdot F_d(h_0)$	Diffus
		$G_{hc} = B_{hc} + D_{hc}$	Global

**Tableau 3 :** Description des modèles sélectionnés pour l'estimation du rayonnement solaire direct diffus et global sur un plan incliné [6] [4, 14-16] [12, 17-18] [7] [8] [12-13]

Auteurs	Type de Modèle	Modèle	Type
<b>Liu and Jordan(1960)</b>	Isotropique	$R_d(\beta) = I_h R_b$	Direct
		$D_c(\beta) = D_h \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right)$	Diffus
		$D_s(\beta) = G_h \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \rho$	Global
<b>Capderou (1987)</b>	Anisotropique	$G_i = R_d(\beta) + D_c(\beta) + D_s(\beta)$	Direct
		$S_i = C_{t-s} \exp\left[\frac{-T_L}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^{Alt}} \sin(h)}\right] \cos(\beta)$	Diffus
		$D_i = d_{ciel} + d_{sol} + \delta'_i \frac{1 + \sin(\gamma)}{2}$	Global
<b>Euftrat (1990)</b>	Anisotropique	$G_i = S_i + D_i$	Direct
		$I_d = I_n \cos(\theta_i)$	Diffus
		$D_i = D_h \left[C_p \cdot F_2 + \frac{(1 - F_2) \theta_i}{\sin(h)}\right]$	Global

Auteurs	Type de Modèle	Modèle	Type
r. sun (2002)	Anisotropique	$G_i = I_n \cos(\theta_i) + \rho \cdot D_i \cdot G_h \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right)$	Global
		$B_{ic} = B_{hc} \sin(\delta_{exp}) / \sin(h_0)$	Direct
		$D_{ic} = D_{hc} \{ F(\gamma_N)(1 - K_b) + K_b \sin(\delta_{exp}) / \sin(h_0) \}$	Diffus
		$(h_0 \geq 0.1 \text{ rad})$ $D_{ic} = D_{hc} \{ F(\gamma_N)(1 - K_b) + K_b \sin(\delta_{exp}) / \sin(h_0) \}$ $(h_0 < 0.1 \text{ rad})$ $G_{ic} = B_{ic} + D_{ic}$	Global

## II.2 Méthode expérimentale

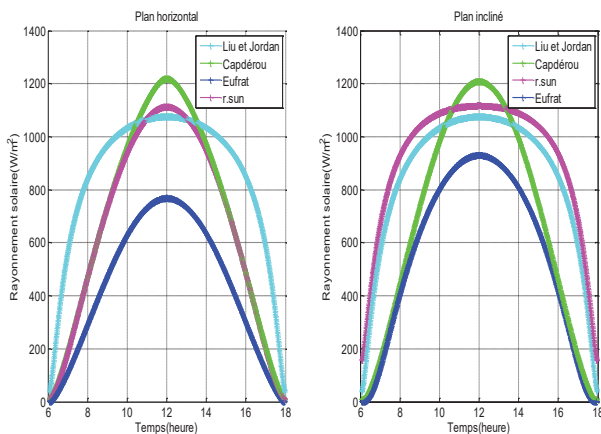
Les données expérimentales instantanées ont été mesurées au Laboratoire de Physique Chimie de l'environnement (LPCE) de l'Université de Ouagadougou en mars, avril et mai 2019, période de fort ensoleillement avec des conditions climatiques favorables au Burkina Faso. Les mesures ont été réalisées avec le solarimètre de type *STANDARD ST-1307*. Les valeurs du rayonnement pour le plan horizontal et le plan incliné (à la latitude du lieu) sont obtenues en plaçant le solarimètre sur le plan horizontal ou incliné toutes les 15 mn. Les valeurs du rayonnement instantanées obtenues sont directement lues sur le solarimètre et enregistrées à l'aide d'un datalogger.

## III. Résultats et discussions

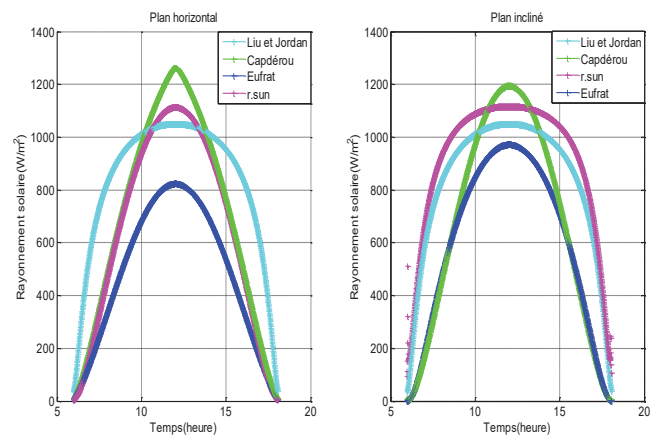
Le logiciel Matlab a été utilisé pour la programmation des différentes équations régissant le rayonnement solaire global des quatre modèles sur le site de l'Université Joseph KI-ZERBO à Ouagadougou.

### III.1 Résultats théoriques

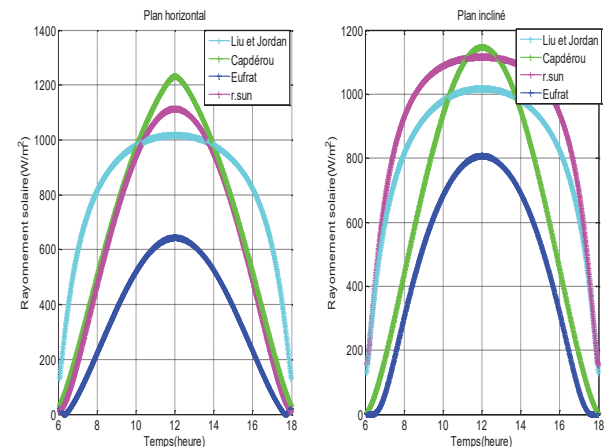
Les figures 1-3 montrent les variations des rayonnements globaux sur les plans horizontal et incliné à la latitude du lieu pour trois journées différentes. Les courbes théoriques ont été obtenues à l'aide du logiciel Matlab.



**Figure 1 :** Rayonnement global des quatre modèles sur un plan horizontal et incliné pour la journée du 30 mars 2019



**Figure 2 :** Rayonnement global des quatre modèles sur un plan horizontal et incliné pour la journée du 15 avril 2019



**Figure 3 :** Rayonnement global des quatre modèles sur un plan horizontal et incliné pour la journée du 08 mai 2019

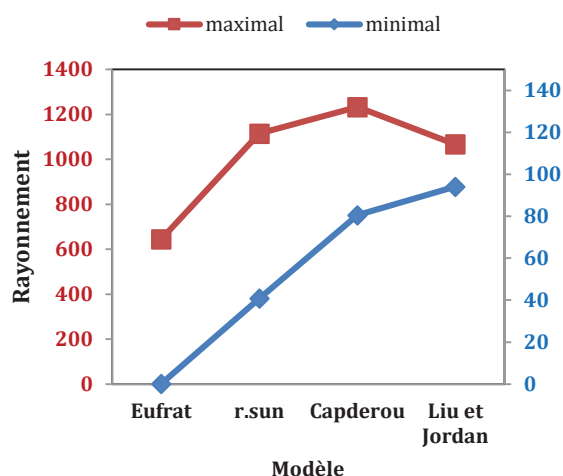
Les rayonnements globaux des quatre modèles semi empiriques suivent les mêmes variations pour les deux plans considérés et pour les trois jours considérés. En effet, toutes les courbes ont la même allure en forme de cloche. Le sommet est atteint au midi solaire et les valeurs les



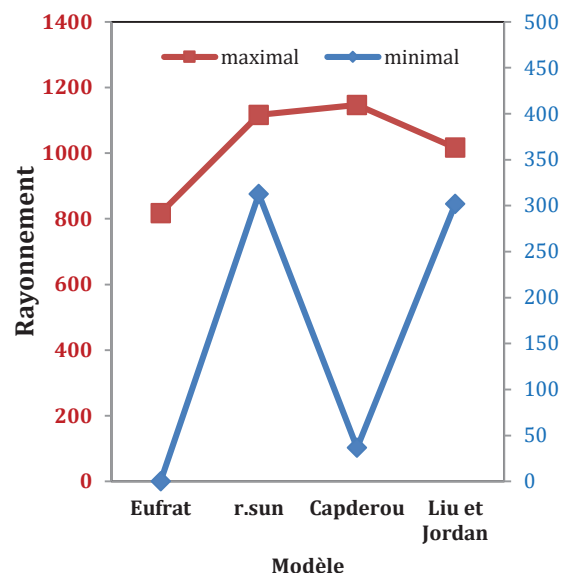
moins élevées du rayonnement sont observées au moment du lever et du coucher du soleil. Que ce soit le plan horizontal ou le plan incliné, le modèle de Capderou présente le rayonnement le plus élevé à midi alors que le modèle d'Euftrat a le rayonnement le plus faible à midi. La comparaison des différentes courbes des deux plans montre que les valeurs des rayonnements sont quasiment identiques pour les deux plans avec les modèles de Liu et Jordan et r.sun. Pour le modèle de Capderou, les rayonnements obtenus avec le plan horizontal sont au-dessus de ceux du plan incliné. En effet le modèle de Capderou donne des valeurs de rayonnement d'environ  $1200 \text{ W/m}^2$  pour le plan horizontal alors que pour le plan incliné les valeurs de rayonnement sont en deca. Quant au modèle d'Euftrat, les valeurs du rayonnement sur le plan incliné sont largement au-dessus de celles du plan horizontal d'au moins  $120 \text{ W/m}^2$ .

Le modèle de Liu et Jordan sur le plan horizontal présente une pente plus raide que les trois autres modèles tandis que sur le plan incliné en plus du modèle de Liu et Jordan, le modèle de r.sun présente également une pente bien raide. Cela s'explique par l'estimation du facteur de trouble de Linke. En effet, le modèle isotrope de Liu et Jordan n'intègre pas le facteur de trouble de Linke dans le calcul du rayonnement solaire tandis que sur le plan incliné, le modèle anisotrope de r.sun présente des facteurs de trouble élevés que les modèles anisotropes de Capderou et d'Euftrat.

Les figures 4 et 5 montrent les variations des différentes valeurs minimales et maximales sur le plan horizontal et incliné des quatre modèles. Le modèle d'Euftrat possède la plus petite des valeurs minimales et la plus petite des valeurs maximales parmi les quatre quelque soit le plan tandis que le modèle de Capderou présente la deuxième plus petite valeur minimale après celle d'Euftrat et la plus grande des valeurs maximales.



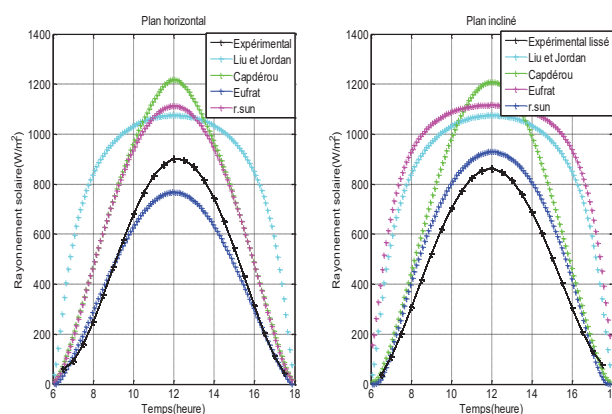
**Figure 4 :** Courbes des valeurs minimales et maximales du rayonnement solaire sur un plan horizontal



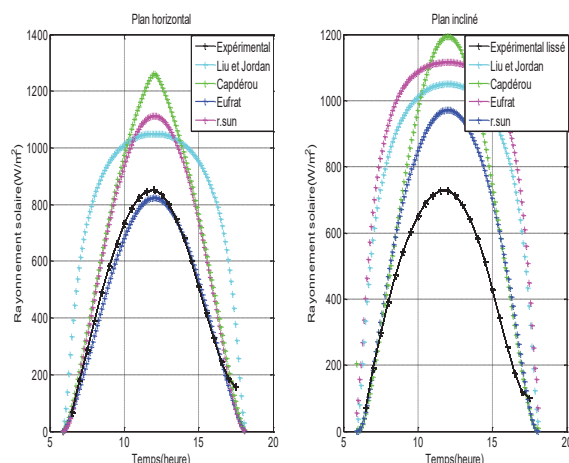
**Figure 5 :** Courbes des valeurs minimales et maximales du rayonnement solaire sur un plan incliné

### III.2 Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques

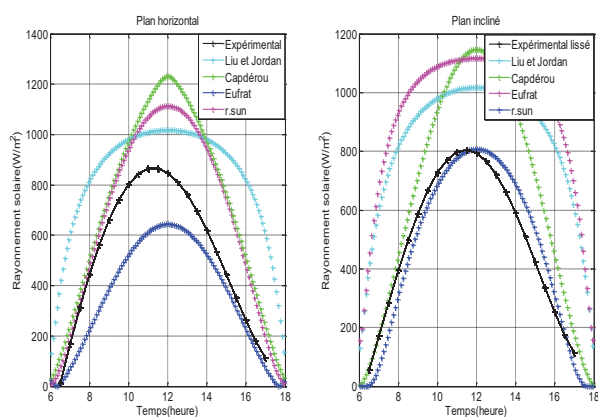
Les figures 6-8 présentent la juxtaposition des courbes expérimentales et théoriques. Les courbes expérimentales du rayonnement solaire global ont été lissées et remplacées par des courbes de tendance dont les coefficients de détermination de  $R^2 = 0,97$ .



**Figure 6 :** Rayonnement solaire global théorique et expérimental de la journée du 30 mars 2019



**Figure 7 : Rayonnement solaire global théorique et expérimental de la journée du 15 avril 2019**



**Figure 8 : Rayonnement solaire global théorique et expérimental de la journée du 08 mai 2019**

Les courbes expérimentales et théoriques montrent toutes que le rayonnement solaire varie au cours de la journée. Il prend des valeurs faibles pendant le lever et le coucher du soleil et il atteint le maximum au milieu de la journée de ciel clair. Les résultats obtenus indiquent la présence d'un écart minimal au lever et au coucher du soleil et cet écart devient important en milieu de journée. Il ressort que sur le plan horizontal hormis le modèle d'Eufrat, les autres modèles surestiment le rayonnement global calculé. Tandis que sur le plan incliné tous les quatre modèles surestiment le rayonnement global avec des écarts de puissance élevés dans certains cas sur le site de Ouagadougou, néanmoins que ce soit sur le plan horizontal ou sur le plan incliné le modèle d'Eufrat se rapproche plus de l'expérimental.

Les tableaux 4 et 5 donnent les résultats statistiques pour trois types d'erreurs telles que, le coefficient  $R^2$ , l'erreur quadratique et le pourcentage de l'erreur absolue moyenne définies plus haut.

L'analyse des tableaux montre que sur le plan horizontal en période de ciel clair les modèles de Liu et Jordan,

Capderou et r.sun surestiment largement les valeurs calculées sauf le modèle d'Eufrat où les valeurs calculées sont sous-estimées. Les courbes expérimentales de tendance et les courbes théoriques du modèle d'Eufrat se confondent à certaines périodes de la journée ou présentent de faibles écarts.

La comparaison des valeurs estimées par les différents modèles avec les valeurs mesurées montre de façon générale que sur le plan incliné les quatre modèles donnent une surestimation des valeurs calculées.

Il apparaît aussi que les coefficients de détermination de  $R^2$  les plus élevés et des RMSE et MAPE les plus bas sont obtenus dans le cas du modèle d'Eufrat.

Le modèle de Liu et Jordan donne dans certains cas des valeurs de  $R^2$  négatives ou divergentes, des valeurs élevées de RMSE et des valeurs divergentes de MAPE. Ceci s'explique par le fait que dans le modèle isotrope de Liu et Jordan les composantes qui contribuent à l'anisotropie du ciel sont négligeables. Le facteur de forme ne comporte pas les parties circumsolaires 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.

Le modèle de Capderou et le modèle de r.sun présentent des coefficients de détermination de  $R^2$  moins élevés et des RMSE et MAPE les plus grands comparés à ceux du modèle d'Eufrat. Une explication de ces résultats peut être liée aux différentes méthodes utilisées par chacun des modèles dans l'estimation du facteur de trouble de Linke.

Pour un ciel clair, il ressort que parmi les quatre modèles proposés pour le site de Ouagadougou le modèle d'Eufrat présente la meilleure estimation du rayonnement solaire global quel que soit le plan utilisé.

#### IV. CONCLUSION

Dans le présent article, il a été question d'estimer l'irradiation solaire incidente sur un plan horizontal et incliné par quatre modèles semi-empiriques, le modèle de Liu et Jordan, le modèle de Capderou, le modèle d'Eufrat et le modèle de r.sun, et de comparer ces valeurs théoriques aux valeurs expérimentales instantanées mesurées sur le site afin de déterminer un modèle fiable. Les valeurs du rayonnement global sur un plan horizontal et incliné ont été estimées par ces quatre modèles. Une analyse statistique a été réalisée en employant le coefficient de détermination de  $R^2$ , l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le pourcentage de l'erreur absolue moyenne (MAPE). Il ressort que parmi les quatre modèles proposés, les meilleurs résultats du rayonnement solaire global sont obtenus par le modèle d'Eufrat sur le site de Ouagadougou.

**Tableau 4 :** Les résultats statistiques des quatre modèles de rayonnement global sur un plan horizontal

Type d'erreur	Date	Modèle de Liu et Jordan	Modèle de Capderou	Modèle d'Euphrat	Modèle de r.sun
<b>R<sup>2</sup></b>	30 Mars	0,65128453	0,51601698	0,89442122	0,5180663
	15 Avril	0,61986402	0,03892554	0,99740994	0,3843291
	08 Mai	0,59360031	0,35341051	0,60324253	0,5681627
<b>RMSE</b>	30 Mars	180,428779	1026,34721	99,2792582	212,111323
	15 Avril	164,344602	261,315078	53,750083	209,151155
	08 Mai	192,682015	243,040591	190,382512	198,620727
<b>MAPE</b>	30 Mars	1,0413755	0,94655158	0,42227027	0,80075619
	15 Avril	0,76373389	0,46218539	0,08062286	0,35805306
	08 Mai	0,56480337	0,61026991	0,36490337	0,42883192

**Tableau 5 :** Les résultats statistiques des quatre modèles de rayonnement global sur un plan incliné

Type d'erreur	Date	Modèle de Liu et Jordan	Modèle de Capderou	Modèle d'Euphrat	Modèle de r.sun
<b>R<sup>2</sup></b>	30 Mars	-1,05310403	0,21241717	0,84187587	-2,30818896
	15 Avril	-2,55596853	-0,85664806	0,1697281	-4,00500477
	08 Mai	-1,19276394	0,18650788	0,90719921	-2,37035216
<b>RSME</b>	30 Mars	165284,098	251,801422	112,825986	516,065958
	15 Avril	429,570774	310,39918	207,570648	509,633561
	08 Mai	394,62733	240,363155	81,1833658	489,247776
<b>MAPE</b>	30 Mars	2,53392755	0,59965428	0,30675267	3,32380678
	15 Avril	1,51574418	0,52597835	0,42216425	1,80866877
	08 Mai	1,56391389	0,44656746	0,2735312	1,83822945

## REFERENCES

1. BAMBARA, B., Atlas des énergies renouvelables du Burkina Faso, 2iE. 2015: p. 89.
2. YAMEOGO, J.d.D., Expériences du Burkina Faso: place des politiques, des financiers et des entreprises privées dans le développement de la filière solaire en Afrique. (Ministère des Mines et de l'énergie). AFRICASOLAR 2015.
3. F. Yettou, A.G., K.Bouaraour, H.Baroud, H.Djekaoua., Estimation de l'ensoleillement par deux modèles semi-empiriques dans la région de Ghardaïa. Le 5ème séminaire international sur les énergies nouvelles et renouvelables, 2018.
4. YETTOU, F.A.M., M. HADDADI ., Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie. Revue des Energies Renouvelables, 2009. **vol. 12, no 2**: p. 331-346.
5. Yettou, F., Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude. 2009, Ecole Nationale polytechnique, Alger: Algérie.
6. Bouchouicha, K., Modélisation multi spectrale des images satellitaire, application : quantification du bilan d'énergie sol-atmosphère. 2017, Université Mohammed Boudiaf: Oran. Algérie.
7. N.Fezzioui, B.D., M.Benamine, S.Larbi., Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique au sud algérien. Revue des énergies renouvelables, 2008. **Vol 11 N°1**: p. 25 - 34.
8. Capderiou, M., Atlas solaire en Algérie (tome 1, 2 et 3). Revue des énergies renouvelables. Office des publications universitaires. Alger, 1988.
9. Dogniaux, R., 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. 1984, Institut royal météorologique de Belgique (IRM): Miscellanea.
10. A. Louche, G.P.A.M.I., An analysis of linke turbidity factor. Solar energy 70 334-359, 1986. **Vol 37, N°6**: p. 393 – 396.
11. Bourges, B., Climatic data hand book for Europe, ed. K. Dordrecht. 1992.
12. K. Scharmer, J.G., The european solar radiation Atlas, fundamentals and maps. Les presses de l'école des mines de Paris, 2000. **Vol 01**.

13. J. Hofierka, M.s., the solar radiation model for open source GIS: implementation and applications, proceedings of the open source GIS-GRASS users conference, Italy. 2002.
14. E .R. Bird, R.L.H., A simplified clear sky model for direct and diffuse insulation on horizontal surfaces. Serie Tr -642-761. February 1981.
15. Bekkouche, S.M.A., Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires. Mai 2009, Université de Tlemcen. Algérie.
16. K-Messaitfa, Evaluation de l'apport quantitatif des inclinaisons optimales d'un système de pompage photovoltaïque. ENERSOLE01-ADRAR- ALGERIE 2001: p. 255-272.
17. M.hamdani, étude et effet de l'orientation de deux Pièces d'un habitat en Pierre Situé à Ghardaïa. 2011, Université de Tlemcen: Algérie.
18. ; Available from:  
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solmod3.htm>.



Journal de Physique de la Soaphys  
Volume imprimé avec la contribution de :

