

Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire incident en Algérie. Cas d'un ciel totalement clair

M.R. Yaïche¹ et S.M.A. Bekkouche²

¹ Centre de Développement des Energies Renouvelables,
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

² Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, 'URAER'
B.P. 88, ZI, G. Taam, Ghardaïa, Algérie

(reçu le 30 Juin 2008 – accepté le 30 Septembre 2008)

Résumé - Le rayonnement solaire au niveau du sol est formé principalement du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Le rayonnement direct parvenant directement de l'angle solide délimité par le disque solaire. Tandis que le rayonnement solaire diffus parvient de toute la voûte céleste et n'a pas d'orientation privilégiée. A cause des effets de l'atmosphère, le rayonnement solaire au niveau du sol possède un caractère aléatoire. L'ensemble forme le rayonnement global. Le but de cet article est la simulation des différents flux du rayonnement solaire. Pour ce faire, nous avons adopté et choisi deux approches théoriques qui sont valables pour un ciel totalement clair. Pour l'estimation des irradiances incidentes sur un plan horizontal, nous avons utilisé le modèle de Capderou. De ce fait, nous allons ensuite exploiter ces valeurs afin d'estimer le mieux possible le rayonnement solaire incident sur un plan incliné, mais en utilisant dans ce cas le modèle de Liu & Jordan. Dans ce contexte, un programme de calcul des rayonnements sous Excel pour les 48 wilayas d'Algérie a été conçu et développé. La comparaison entre les valeurs des rayonnements incidents sur les différents plans du capteur prévu par la simulation de deux approches et les mesures effectuées, montre que la simulation est une bonne approximation de la réalité, malgré quelques perturbations climatiques (nuages).

Abstract - The solar radiation at ground level is formed mainly from direct radiation and radiation diffuse. The direct radiation coming directly from the solid angle bounded by the solar disc. While diffuse solar radiation reaches across the sky and has no preferred direction. Because of the effects of the atmosphere, solar radiation at ground level has a randomness. The whole form global radiation. The aim of this article is the simulation of different streams of sunlight. To do this, we have adopted and chose two theoretical approaches that are valid for a completely clear sky. For estimating radiation incident on a horizontal plane, the model Capderou have been. Obtain values from Capderou model are used to acheiave a best possible estimation of solar radiation incident on an inclined plane using Liu & Jordan model. A program for calculating radiation in Excel for 48 wilayas of Algeria have been designed and developed. The comparison between the values of radiation incidents on the various plans sensor provided by simulating two approaches and measurements, shows that the simulation is a good approximation of reality even in the presence of some weather disturbances such as clouds.

Mots clés: Logiciel de Calcul - Capderou - Liu & Jordan - Rayonnement solaire.

1. INTRODUCTION

Le soleil est l'origine principale de l'énergie disponible sur terre. Ceci inclut l'énergie thermique directe, l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et même

l'énergie générée par les hydrocarbures puisque ces derniers sont la conséquence de la photosynthèse. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher, ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer des grandeurs, telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation hors atmosphère.

Lors de sa traversée dans l'atmosphère, le rayonnement solaire est atténué par des phénomènes d'absorption et de diffusion par les molécules gazeuses, la vapeur d'eau et les particules atmosphériques solides ou liquides appelées 'aérosols'. Cette atténuation est fonction du nombre, de la taille et de la nature des molécules et des particules rencontrées. Elle varie aussi avec la longueur de la trajectoire des rayons solaires à travers l'atmosphère. La longueur de cette trajectoire est caractérisée par la 'masse atmosphérique', notée AM, appelée aussi 'masse d'air optique'.

Tableau 1: Constituants de l'atmosphère et leurs effets sur le rayonnement solaire

Constituants	Taille	Effet
Les molécules de gaz (O ₂ , CO ₂ , O ₃ , H ₂ O)	1 Å°	Absorption élevée Diffusion faible
Les aérosols	10 ⁻³ à 10 ² µm	Absorption faible Diffusion élevée
Les gouttelettes et les cristaux de nuages	Fraction du Mm	Absorption non négligeable Diffusion assez faible

2. PRINCIPALES CAUSES D'ATTENUATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

2.1 Diffusion

La diffusion par les molécules décrite par la théorie de Rayleigh est due aux particules sphériques de diamètre inférieur à 0.2 L (L est la longueur d'onde de la radiation incidente). Le coefficient d'extinction due à la diffusion moléculaire (ou diffusion de Rayleigh) s'écrit comme suit:

$$M_c = \beta \cdot L^{-c} \quad (1)$$

Les valeurs de β et c dépendent de la nature des particules causant la diffusion. La part du rayonnement solaire diffusé par les constituants de l'atmosphère (molécules et aérosols) n'est pas entièrement perdue comme c'est le cas de l'absorption. Elle est en partie récupérée au sol.

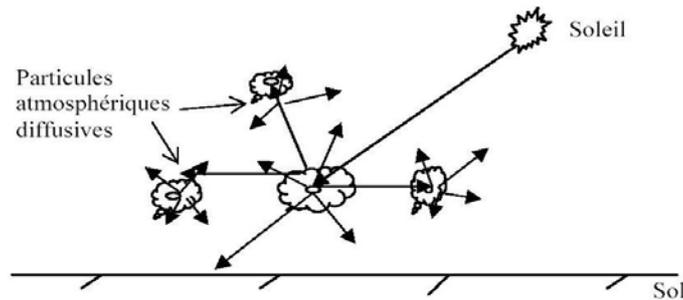


Fig. 1: Diffusion du rayonnement solaire

2.2 Absorption

Parmi les constituants qui absorbent d'une manière sensible le rayonnement solaire, nous citerons l'ozone, la vapeur d'eau, l'oxygène et le gaz carbonique.

3. PRESENTATION DU MODELE 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 exprimés 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:

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (2)$$

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:

$$A_{he} = \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right) \times (j - 121)\right) \quad (3)$$

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1(2 + \sin(\varphi)) A_{he} - 0.2z - (1.22 + 0.14A_{he})(1 - \sin(h)) \quad (4)$$

z : Altitude du lieu, j : Numéro du jour dans l'année, φ : Latitude du lieu, h : 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:

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

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

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

3.1 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. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue est 1367 W/m². L'irradiation directe par ciel clair obtenue sur un plan horizontal est donnée par:

$$I = I_n \cos(i) = I_0 C_{t-s} \exp\left[-T_L^* \cdot \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \cdot \sin(h)\right)^{-1}\right] \cdot \cos(i) \quad (6)$$

L'irradiation diffuse sur un plan horizontal

$$a = 1.1 \quad (7)$$

$$b = \log\left(T_L^* - T_0\right) - 2.8 + 1.02(1 - \sin(h))^2 \quad (8)$$

$$D = I_0 \cdot \exp(-1 + 1.06 \log(\sin(h))) + a - \sqrt{a^2 + b^2} \quad (9)$$

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

$$G = I + D \quad (10)$$

3.2 Irradiation globale reçue sur un plan incliné

3.2.1 Irradiation directe

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

$$I = I_n \cos(i) = I_0 C_{t-s} \exp\left[-T_L^* \cdot \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \cdot \sin(h)\right)^{-1}\right] \cdot \cos(i) \quad (11)$$

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

3.2.2 Irradiation diffuse du ciel

Il est composé de trois parties:

a- Composante directe ou circumsolaire

Elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demi angle au sommet compris entre 3° et 15° , et qui peut être considéré qu'elle provient directement du soleil.

$$b = \log\left(T_L^* - T_0\right) 2.8 - 0.5 \log(\sin(h)) \quad \text{et} \quad a = 3.1 - 0.4b \quad (12)$$

$$\delta_d = I_0 \cdot C_{t-s} \exp\left(-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2}\right) \quad (13)$$

b- Composante isotrope

Elle correspond à un ciel de luminance uniforme.

$$\delta_i = D - \delta_d \sin(h) \quad (14)$$

D est le diffus sur un plan horizontal.

c- Composante du cercle de l'horizon

Elle provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6° . Elle semble associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques.

$$b = \exp(0.2 - 1.75 \log(\sin(h))) \quad (15)$$

$$a = \log\left(T_L^* - T_0\right) - 3.1 - \log(\sin(h)) \quad (16)$$

$$\delta_h = I_0 \cdot \frac{-0.02}{a^2 + ab + 1.8} \cdot \exp(\sin(h)) \quad (17)$$

Le diffus du ciel, le rayonnement diffus incident en provenance du ciel.

$$\gamma = 90 - \beta$$

$$d_{\text{ciel}} = \delta_d \cdot \cos(i) + \delta_i \cdot \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} + \delta_h \cdot \cos(\gamma) \quad (18)$$

β est l'inclinaison du plan.

3.2.3 Irradiation diffuse du sol

L'albédo du sol ρ caractérise la réflexion de la lumière incidente. Pour un plan quelconque (α, γ) ,

$$d_{\text{sol}} = \delta_a \cdot \frac{1 - \sin(\gamma)}{2}, \quad \delta_a = \rho \cdot G \quad (19)$$

G est le global horizontal.

3.2.4 Irradiation diffus rétrodiffusé

L'irradiation diffuse du sol est rétrodiffusée, (diffusé à nouveau par le ciel vers le sol). Selon le raisonnement de Capderou, cette composante a la forme suivante:

$$\delta'_i = 0.9 \cdot (\rho - 0.2) G \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L^* - T_0}}\right) \quad (20)$$

ρ est l'albédo du sol.

Il est clair que cette composante s'annule pour un albédo égal à 0.2 et par conséquent le diffus rétrodiffusé est nul.

$$D = d_{\text{ciel}} + d_{\text{sol}} + \delta'_i \cdot \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} \quad (21)$$

D'où la puissance du rayonnement global incident, à un instant donné sur un plan (α, γ) est:

$$G = I + D \quad (22)$$

4. PRESENTATION DU MODELE DE LIU & JORDAN

La relation de Liu & Jordan généralisée est donnée sous la forme suivante:

$$G = S_h R_b + d \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) + \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \quad (23)$$

L'irradiation directe sur un plan incliné est exprimée par la relation (24) suivante:

$$S_i = S_h R_b \quad (24)$$

où, le facteur d'inclinaison R_b du rayonnement direct est:

$$R_b = \frac{\cos(L - \beta)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(L - \beta)\sin(\delta)}{\cos(L)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(L)\sin(\delta)} \quad (25)$$

δ : Déclinaison du soleil, ω : Angle horaire, L : Latitude, β : Inclinaison du plan.

L'irradiation diffuse sur un plan incliné est :

$$d_i = d_h \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) \quad (26)$$

D'autre part, l'irradiation réfléchi sur un plan incliné est estimée par l'expression:

$$d_{re} = \rho \cdot (S_h + d_h) \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \tag{27}$$

S_h et d_h sont respectivement les éclairement direct et diffus horizontal.

5. PRESENTATION DU LOGICIEL CONÇU – DEMONSTRATION DE L'INTERFACE GRAPHIQUE DU PROGRAMME

Le programme a une interface simple et conviviale. Il permet à l'utilisateur d'introduire le numéro du jour de l'année et de visualiser la position de la terre par rapport au soleil et sa déclinaison, calculer l'équation du temps et la déclinaison du soleil de manière interactive.

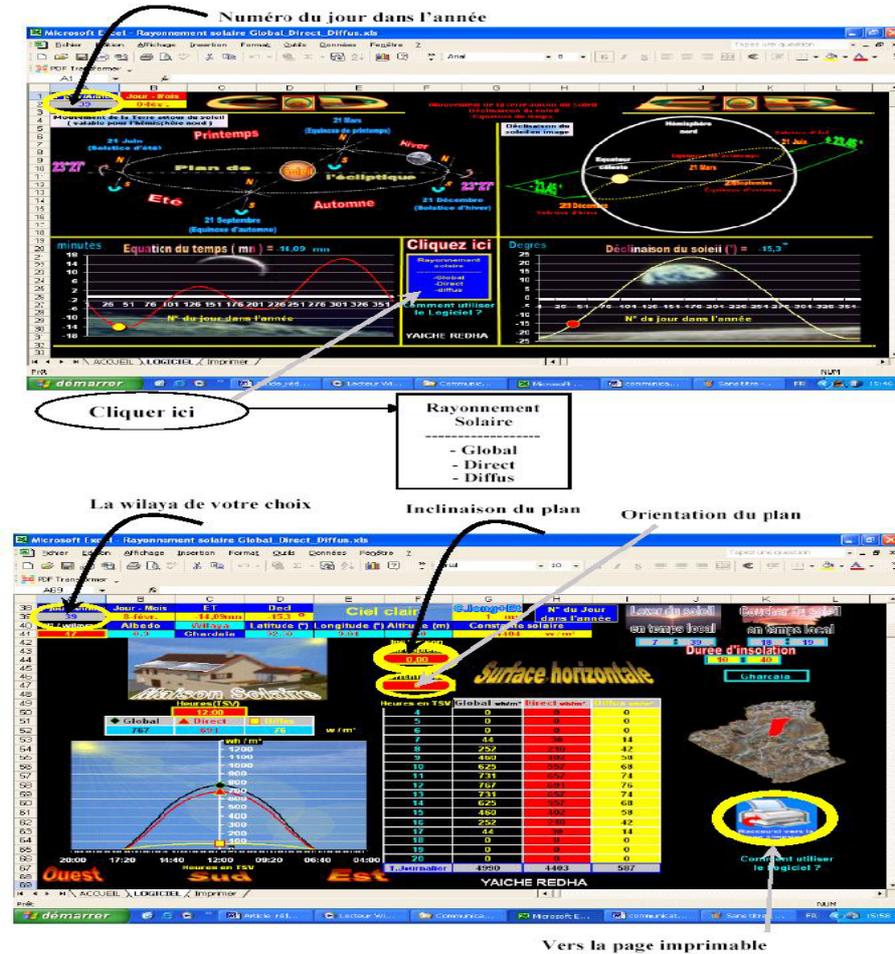


Fig. 2: Vue sur l'interface graphique du programme de calcul du rayonnement

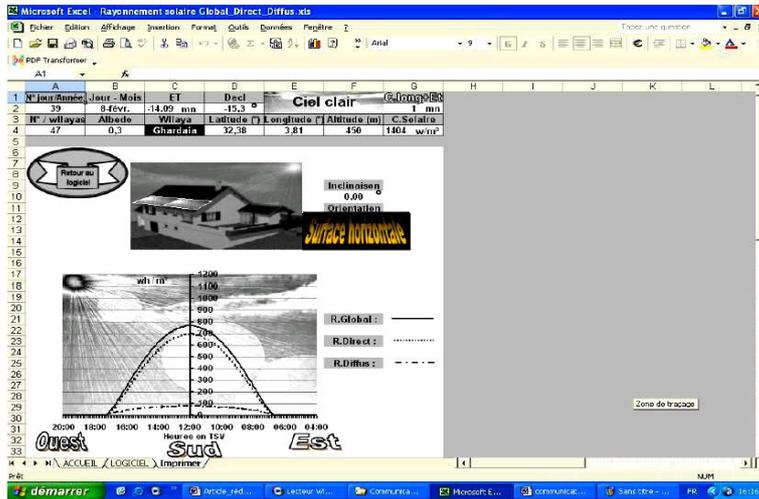


Fig. 3: Vue sur les courbes du rayonnement solaire par l'interface graphique

6. CONFRONTATION DES RESULTATS ET EXEMPLES D'APPLICATION

Cette partie est consacrée à l'aspect théorique et expérimental. Nous avons confronté quelques valeurs du rayonnement solaire fournies par les deux stations radiométriques de Ghardaïa (URAER) et de Bouzaréah (CDER) avec des valeurs délivrées par le programme développé. Cette étape incontournable sera suivie par un calcul d'erreur relative instantanée. L'expression de cette dernière est donnée par l'équation suivante:

$$Err = \frac{|\Delta G|}{G_{\text{mesuré}}} \tag{28}$$

Un autre programme de calcul présenté en annexe sera exploité pour le calcul des irradiations horaire et journalière.

6.1 Site de Ghardaïa (URAER)

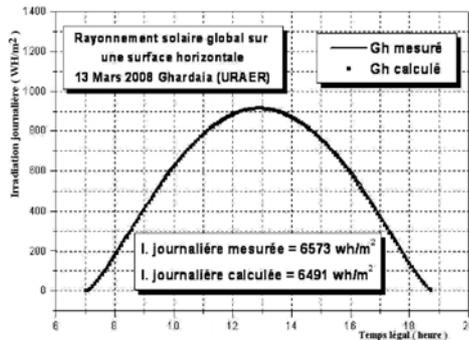


Fig. 4: Rayonnement global sur surface horizontale - 13/03/2008

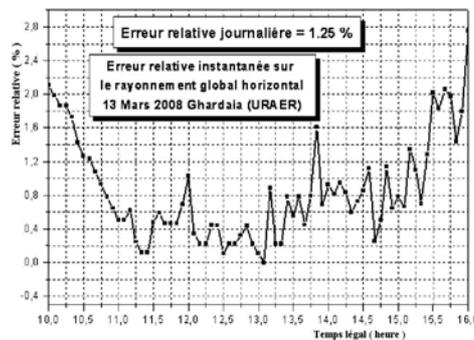


Fig. 5: Erreur relative du rayonnement global sur surface horizontale- 13/03/2008

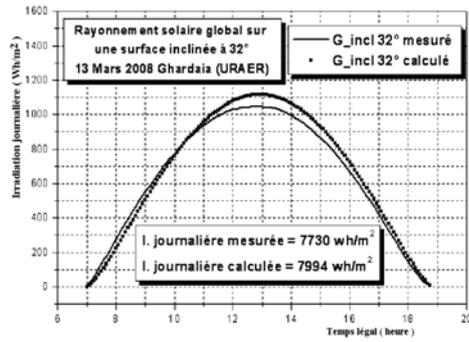


Fig. 6: Rayonnement global sur surface inclinée à 32° - 13/03/2008

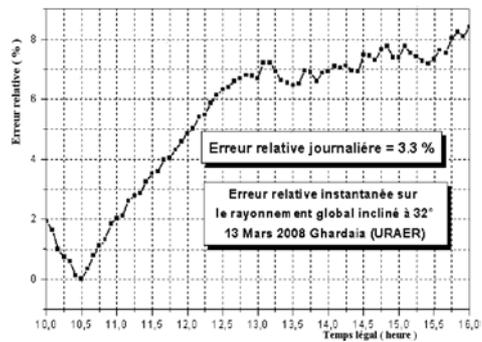


Fig. 7: Erreur relative du rayonnement global incliné à 32° - 13/03/2008

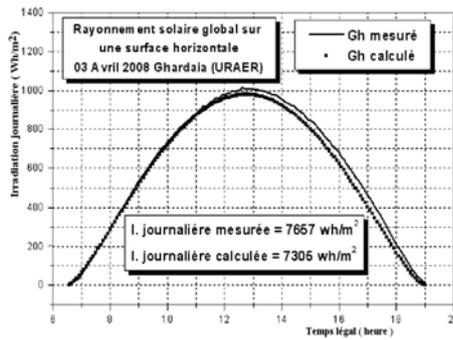


Fig. 8: Rayonnement global sur surface horizontale - 03/04/2008



Fig. 9: Erreur relative du rayonnement global sur surface horizontale-03/04/2008

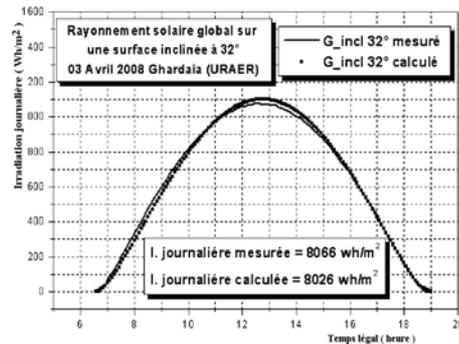


Fig. 10: Rayonnement global sur surface inclinée à 32° - 03/04/2008

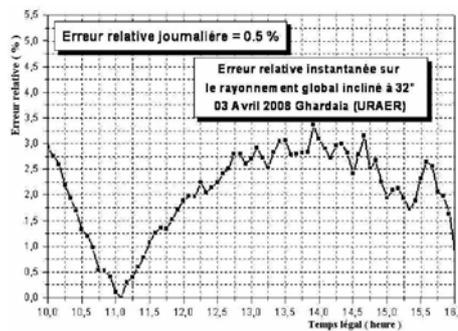


Fig. 11: Erreur relative du rayonnement global incliné à 32° - 03/04/2008

6.2 Site de Bouzaréah, Alger (CDER)

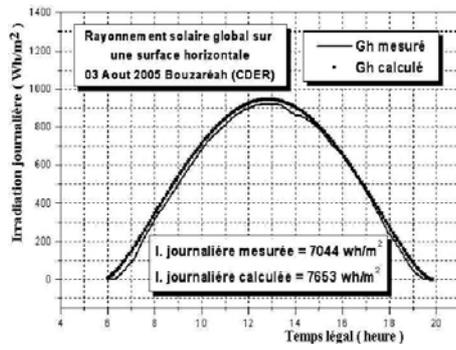


Fig. 12: Rayonnement global sur surface horizontale - 03/08/2005

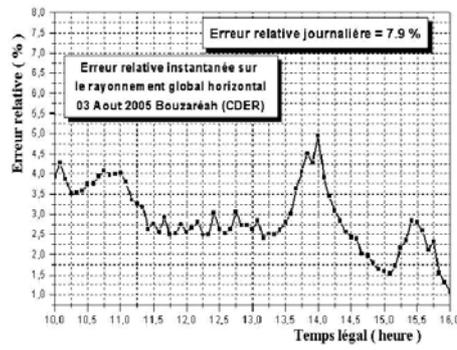


Fig. 13: Erreur relative du rayonnement global sur surface horizontale- 03/08/2005

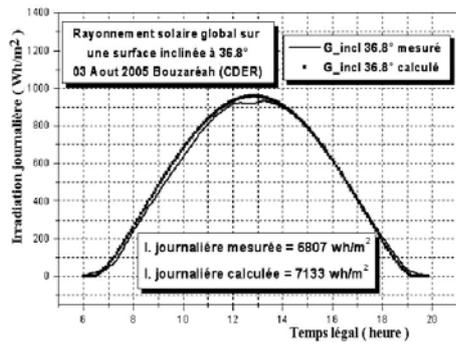


Fig. 14: Rayonnement global sur surface inclinée à 36.8° - 03/08/2005

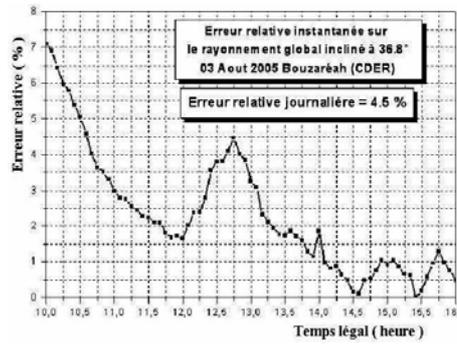


Fig. 15: Erreur relative du rayonnement global inclinée à 36.8° - 03/08/2005

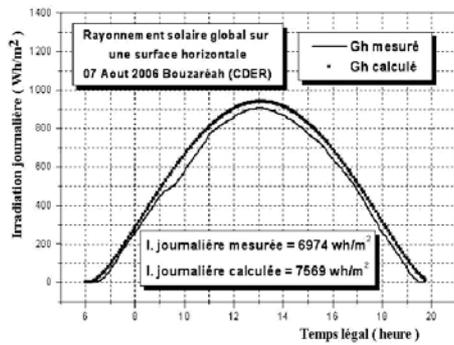


Fig. 16: Rayonnement global sur surface horizontale - 07/08/2006

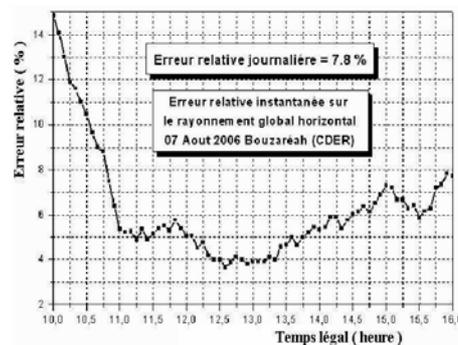


Fig. 17: Erreur relative du rayonnement global sur surface horizontale - 07/08/2006

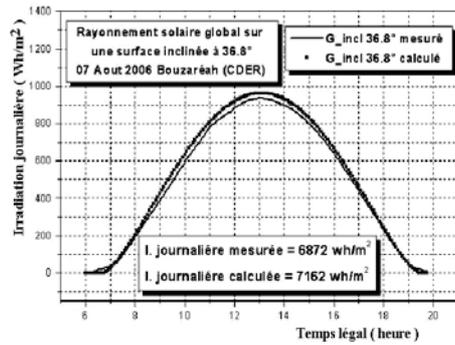


Fig. 18: Rayonnement global sur surface inclinée à 36.8° - 07/08/2006

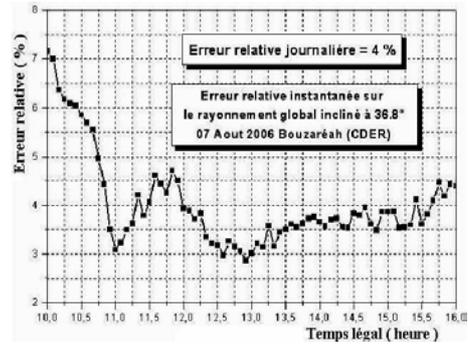


Fig. 19: Erreur relative du rayonnement global incliné à 36.8° - 07/08/2006

Il est à noter que ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche qui consiste à l'étude de l'influence et de l'effet de l'orientation d'un habitat en site semi aride. A l'aide de ce programme de calcul, il a été déterminé les divers apports relatifs aux irradiances solaires incidentes au niveau des parois opaques de l'habitat. A cet effet, quelques résultats sont présentés dans le cas de ce projet.

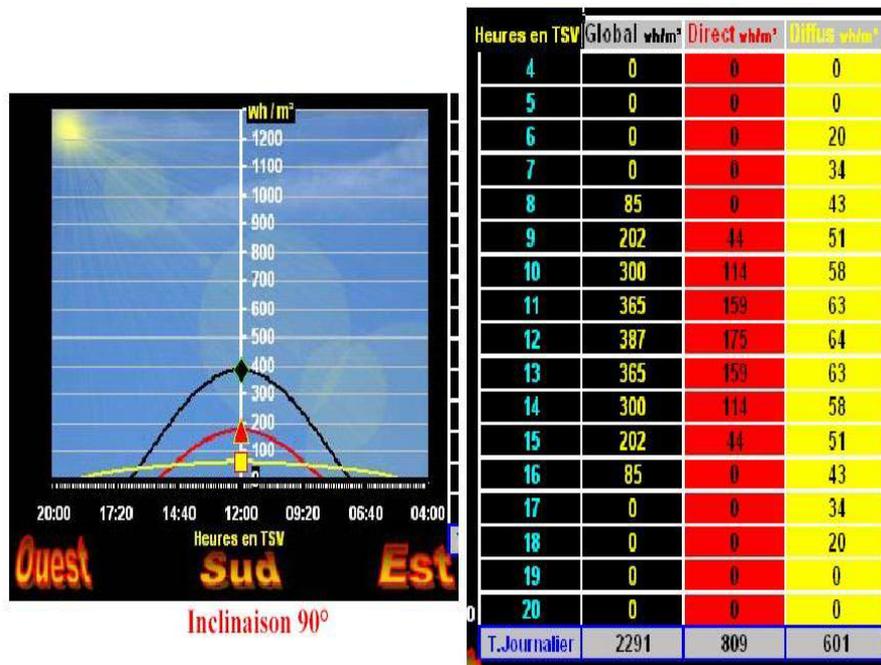


Fig. 20: Différentes irradiances incidentes sur mur 'Sud' de l'habitat - 21/06/2008

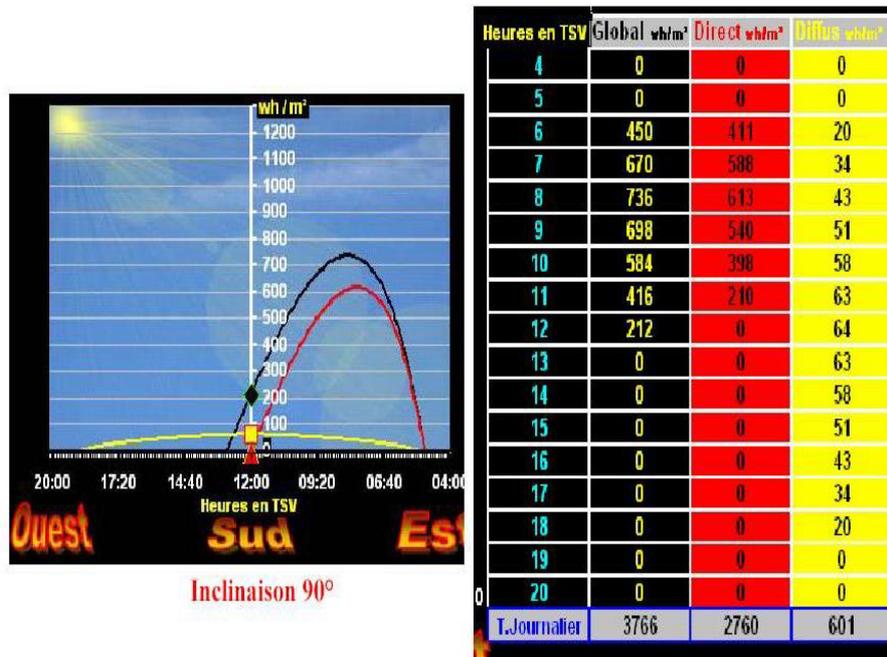


Fig. 21: Différentes irradiations incidentes sur le mur 'Est' de l'habitat – 21/06/2008

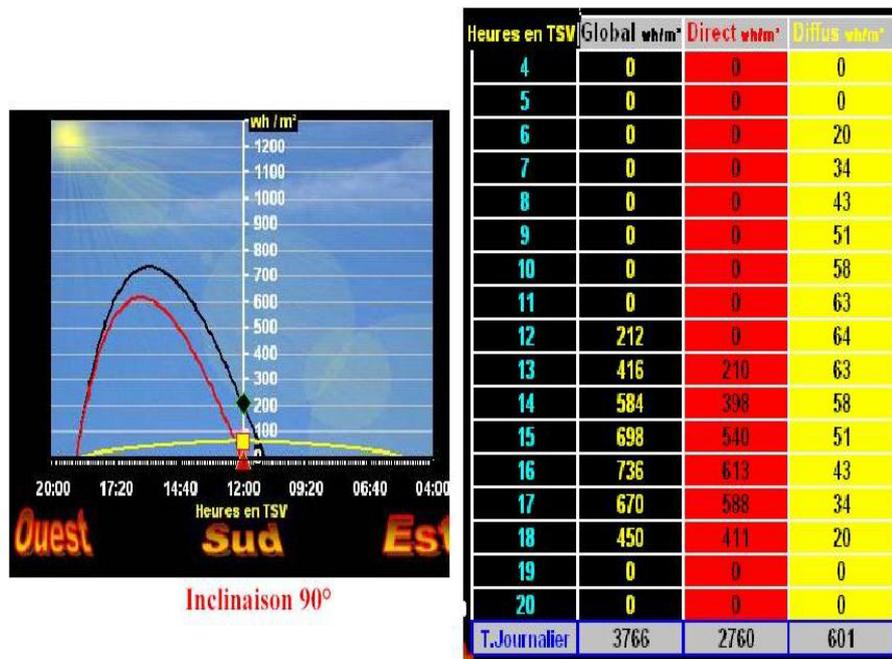


Fig. 22: Différentes irradiations incidentes sur mur 'Ouest' de l'habitat – 21/06/2008

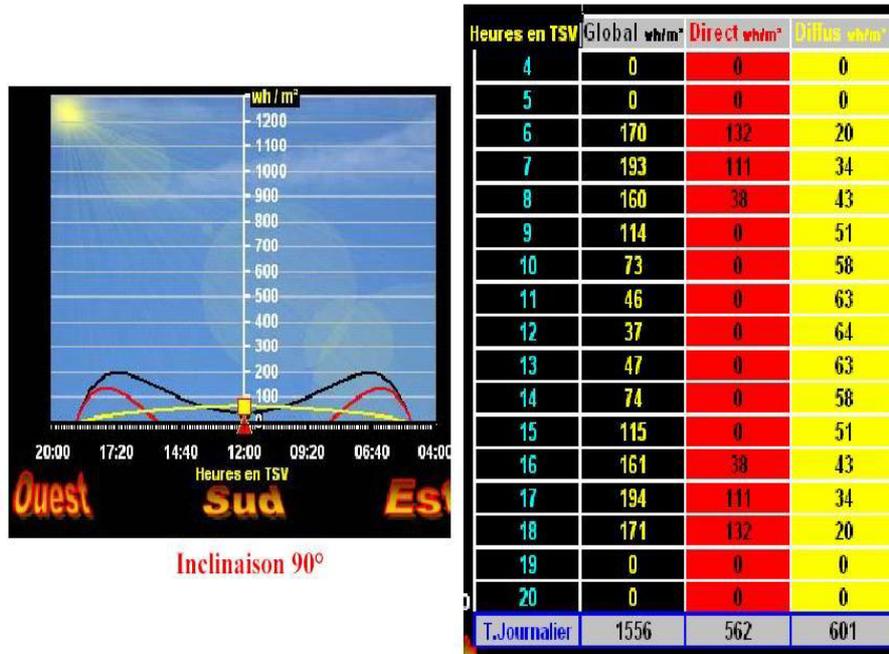


Fig. 23: Différentes irradiations incidentes sur mur 'Nord' de l'habitat – 21/06/2008

7. CONCLUSION

Le travail effectué dans cet article a pour objectif d'une part d'identifier les deux modèles de connaissance relatifs pour la détermination du rayonnement solaire global (modèle de Liu & Jordan et celui de Capderou), et d'autre part de participer au développement de l'outil de simulation correspondant. Cet outil de simulation (design du programme de calcul) a pour finalité d'être ensuite couplé à une interface professionnelle, qui soit manipulable de manière conviviale par les chercheurs et autres.

Les études, les programmes et le logiciel de calcul développé démontrent qu'il est possible de persévérer les évolutions instantanées des différents composants du flux solaire incident sur une surface d'orientation et d'inclinaison quelconque. Les modèles de Liu & Jordan et de Capderou, par exemple, peuvent apparaître les comportements émergents des différentes irradiations incidentes.

Selon E. Guyon, modélisation et simulation restent des démarches distinctes. La modélisation, vu ses outils, garde plus de latitude par rapport au réel que la simulation. Les conditions du mimétisme absolu ne sont pas respectées, puisque le modèle opère une simplification du phénomène, ne retenant que les variables les plus caractéristiques. Ceci constitue une approximation, mais qui suffit souvent pour réussir. C'est pour cette raison qu'on peut dire que les erreurs commises sont dues aussi au modèle lui-même. Mais, dans l'ensemble, la comparaison des valeurs estimées par les deux modèles et celles mesurées fournies par les deux stations radiométriques de Ghardaïa (URAER) et de Bouzaréah (CDER) s'avère acceptable.

Remerciements: Les auteurs remercient Mrs A. Mefti, M. Koussa et F. Chellali, respectivement du CDER et de l'URAER, pour leurs contributions, soutiens et conseils.

REFERENCES

- [1] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie', Tome 1, Vol 1 et 2, Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [2] A. Mefti, M.Y. Bouroubi et A. Khellaf, 'Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 2, pp. 69 – 85, 1999.
- [3] F. Kasten, 'The Linke Turbidity Factor Based on Improved Values of the Integral Rayleigh Optical Thickness', Solar Energy. Vol 56, N°3, pp. 239 – 244, 1996.
- [4] M.R. Yaïche, 'Logiciel de Calcul des Paramètres Astronomiques à l'Usage des Installations Solaires', Congrès International sur les Energies Renouvelables et le Développement Durable, 'ICRESO_07, Tlemcen, Algérie, 21 – 24 Mai 2007.
- [5] A. Moumami et al., 'Estimation du Rayonnement Solaire par Deux Approches Semi Empiriques dans le Site de Biskra', Proceeding du 8^{ème} Séminaire International sur la Physique Energétique, SIPE'06, Centre Universitaire de Béchar, Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.
- [6] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, F. Bouayad, 'Modelisation Thermique d'un Capteur Solaire Plan à Eau', Proceeding du 8^{ème} Séminaire International sur la Physique Energétique, SIPE'06, Centre Universitaire de Béchar, Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.

ANNEXE

Quelques interfaces du programme de calcul utilisé pour la détermination des irradiations solaires horaire et journalière.

Avant l'injection des données radiométriques

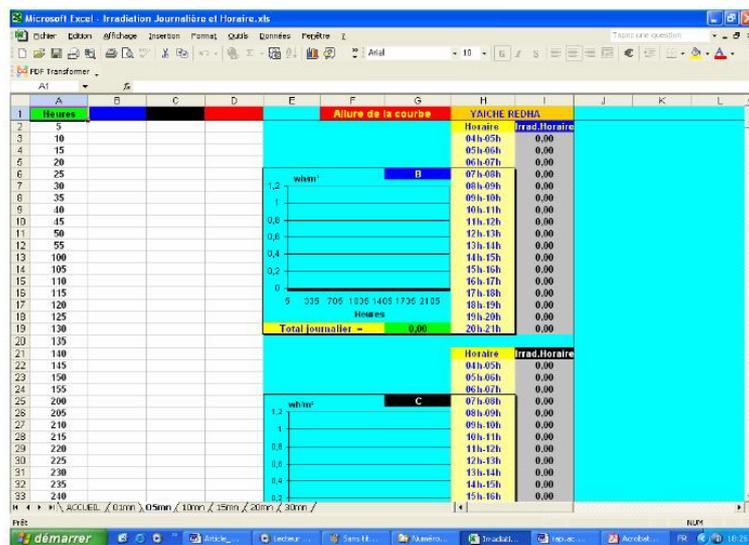


Fig. 24: Vue de la fenêtre du programme de simulation développé, avant l'injection des données radiométriques

Après injection des données radiométriques

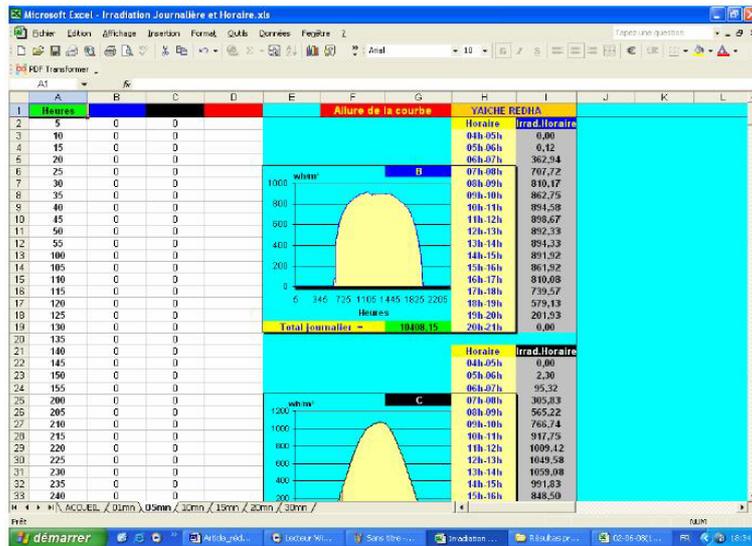


Fig. 25: Vue de la fenêtre du programme de simulation développé, après injection des données radiométriques