DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v6i2.962 Rev. Energ. Ren. Vol.6 (2003)69-76

Simulation de la Position Apparente du Soleil et Estimation des Energies Solaires Incidentes sur un Capteur Plan pour la Ville de Tlemcen en Algérie

Chafika Zidani, Fethi Benyarou et Boumediene Benyoucef

Laboratoire de Matériaux et Energies Renouvelables (LMER),
Faculté des Sciences, Université de Tlemcen, B.P 119, Tlemcen 13000

Résumé – *L'Algérie possédant un gisement solaire important, de part son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1 kW/m² (soleil au zénith). L'énergie journalière maximale (ciel clair mois de juillet) dépasse les 6 kWh/m² et l'énergie annuelle maximale en Algérie dépasse 2500 kWh/ m².*
Afin d'exploiter au mieux, cette ressource énergétique et pour un bon dimensionnement des installations solaires, il est nécessaire de connaître avec précision, la position apparente du soleil à chaque instant de la journée et de l'année.
Outre, la détermination des énergies sur un capteur d'orientation quelconque, notre objectif consiste à repérer la position du soleil en coordonnées cartésiennes et établir un programme de simulation de cette position apparente du soleil en tout point de la terre. Ce programme permet la conception des systèmes photo solaires adaptés à chaque site.

Abstract – *Algeria possesses an important solar layer. The average maximum solar power in any point of our country is of about 1 kW/m² (sun to the zenith). The maximum daily energy (sky clear in the month of July) passes the 6 kWh/m² and the maximum yearly energy in Algeria passes 2500 kWh/m². In order to exploit to best this energizing resource, and for a good conception of solar installation, it is necessary to know with precision, the position of the sun at every instant of the day and the year.*
Beyond the determination of energies on a collector having random orientation, our objective consists in marking the position of the sun in Cartesian coordinates and to make simulation program of the obvious movement of the sun over the earth. This program permits the conception of photo solar systems adapted to every site.

Mots clés: Simulation – Optimisation – Capteur – Energie Solaire.

1. INTRODUCTION

La modélisation du rayonnement solaire d'un site a été depuis longtemps la préoccupation principale des chercheurs dans les systèmes photosolaires tel que Brichambaut [1], lieu et Jordan [2], Klein [3]. Le modèle adéquat du rayonnement solaire dépend d'un grand nombre de paramètres : de la hauteur d'eau condensable, de la masse atmosphérique, de l'indice de clarté, du facteur de trouble et de la nébulosité.

Pour le climat méditerranéen un groupe de chercheurs Marocains [4] ont proposé un modèle basé sur des corrélations empiriques des études expérimentales. Récemment un autre groupe Tunisien (Mechlouch et al. [5]) se basant sur les trois modèles utilisés en zone méditerranéenne (Modèle Eufrat, modèle de Selarme et modèle Ashrae) [6] ont proposé un modèle basé sur la masse atmosphérique et le facteur de trouble.

Notre travail consiste à reprendre le modèle de Perrin de Brichambaut [1] qui utilise des valeurs moyennes des paramètres influençant le rayonnement solaire en insistant sur la notion de masse atmosphérique. Pour cela la connaissance de la position du soleil à chaque instant de la journée et de l'année est nécessaire, alors nous avons réalisé un programme de simulation de la position apparente du soleil en n'importe quel lieu de la terre. Ce programme permet l'estimation des énergies incidentes sur un capteur d'orientation quelconque, sa durée d'ensoleillement et une optimisation de cette énergie.

2. CHOIX DU REPERE

Pour simuler la position apparente du soleil, on considère un repère cartésien (OXYZ) et repérer le soleil en un instant (t), un jour (N) de l'année et un lieu de latitude (φ) de la surface de la terre. Ce repère est défini par :

- Origine : C'est le point de captation du rayonnement solaire.
- L'axe (OX) est la direction du Sud (pour un observateur à Tlemcen), L'axe (OY) est la direction de l'Est. Enfin l'axe (OZ) est la verticale du lieu.
- Le plan (XOY) est le plan horizontal et les plans (YOZ, XOZ) sont des plans verticaux.

3. ORIENTATION DU CAPTEUR

Le capteur est placé en O, origine des axes, pour recevoir le soleil, il sera dirigé vers le Sud (Fig1) s'il se trouve dans l'hémisphère Nord ou vers le Nord s'il se trouve en hémisphère Sud. La position du capteur est définie par les cosinus directeurs de la normale ($\vec{N}$) en O telle que [7]:

$$\vec{N} \begin{vmatrix} \text{Cos}\gamma\ \text{Cos}\alpha \\ \text{Cos}\gamma\ \text{Sin}\alpha \end{vmatrix} \qquad (1)$$

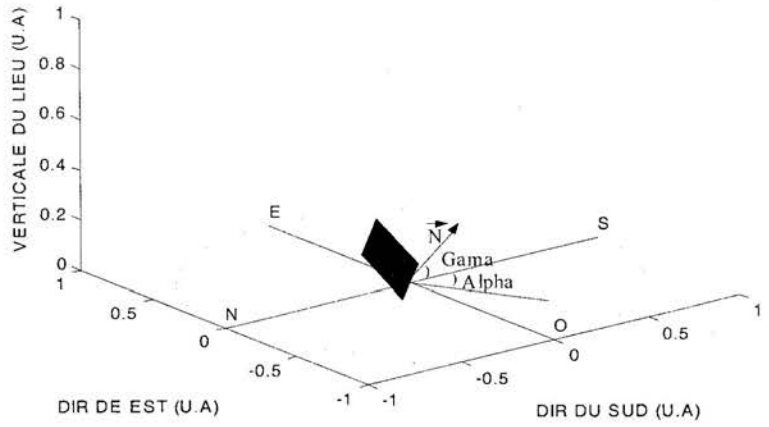

Fig.1: Orientation du capteur.

Avec :

1. UA = unité astronomique = 149597890 km

γ : Angle entre la normale $\vec{N}$ et sa projection sur le plan horizontal.

α : Angle entre la projection de $\vec{N}$ sur le plan horizontal et la direction Sud.

β : Angle entre le capteur et sa projection sur le plan horizontal = 90°- γ

Pour la représentation graphique, nous traçons un capteur plan rectangulaire en position verticale (α =0°, γ =0°) dont chaque point est défini par ses coordonnées (X_v, Y_v, Z_v), ensuite avec une rotation autour de OY nous obtenons la valeur de γ . Chacun des points de sommet du rectangle aura alors les coordonnées ($X\gamma$, $Y\gamma$, $Z\gamma$). Enfin on fait une rotation autour de

(OZ) jusqu'à l'obtention de la valeur de α désirée, chacun des points de sommets du capteur aura les coordonnées ($X\alpha\gamma$, $Y\alpha\gamma$, $Z\alpha\gamma$) définie par :

$$\begin{pmatrix} X_\gamma \\ Y_\gamma \\ Z_\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cos}\gamma & 0 & \text{Sin}\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sin}\gamma & 0 & \text{Cos}\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_V \\ Y_V \\ Z_V \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} X_{\alpha\gamma} \\ Y_{\alpha\gamma} \\ Z_{\alpha\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cos}\alpha & -\text{Sin}\alpha & 0 \\ \text{Sin}\alpha & \text{Cos}\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_\gamma \\ Y_\gamma \\ Z_\gamma \end{pmatrix} \tag{2}$$

4. COORDONNEES DU SOLEIL

Pour un observateur en O (origine des axes), le soleil décrit un arc de cercle dans le ciel durant la journée à raison de 15° par heure. Le soleil peut être repéré à chaque instant de la journée et de l'année par ses coordonnées cartésiennes (X, Y, Z) [4] qui sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} X &= D_{TS}\ \text{Cos(h)}\ \text{Cos(a)} \\ Y &= D_{TS}\ \text{Cos(h)}\ \text{Sin(a)} \\ Z &= D_{TS}\ \text{Sin(h)} \end{aligned} \tag{3}$$

Avec : D_{TS} : La distance terre-soleil, h : La hauteur du soleil et a : L'azimut du soleil.
Un programme permettant de déterminer les coordonnées du soleil à n'importe quel instant de la journée et de l'année a été mis au point. Les résultats de simulation aux équinoxes printemps et automne (EP, EA) sont donnés sur le Tableau 1:

Tableau 1: Coordonnées du soleil aux Equinoxes et Solstices pour le site de Tlemcen.

S. H.				E. P - E. A.				S. E.			
TSV(h)	X(UA)	Y(UA)	Z(UA)	TSV(h)	X(UA)	Y(UA)	Z(UA)	TSV(h)	X(UA)	Y(UA)	Z(UA)
7,159	0,475	0,861	0	6,000	0	0,996	0	4,841	-0,491	0,890	0
8,000	0,578	0,781	0,149	7,000	0,146	0,962	0,212	5,000	-0,470	0,900	0,030
9,000	0,684	0,638	0,303	8,000	0,282	0,862	0,410	6,000	-0,333	0,932	0,229
10,000	0,765	0,451	0,421	9,000	0,399	0,704	0,580	7,000	-0,196	0,900	0,428
11,000	0,816	0,233	0,495	10,000	0,489	0,498	0,710	8,000	-0,068	0,807	0,613
12,000	0,834	0	0,521	11,000	0,545	0,257	0,792	9,000	0,040	0,659	0,772
13,000	0,816	-0,233	0,495	12,000	0,565	0	0,820	10,000	0,125	0,466	0,894
14,000	0,765	-0,451	0,421	13,000	0,545	-0,257	0,792	11,000	0,177	0,241	0,971
15,000	0,684	-0,638	0,303	14,000	0,489	-0,498	0,710	12,000	0,195	0	0,997
16,000	0,578	-0,781	0,149	15,000	0,399	-0,704	0,580	13,000	0,177	-0,241	0,971
16,841	0,475	-0,861	0	16,000	0,282	-0,862	0,410	14,000	0,125	-0,466	0,894
				17,000	0,146	-0,962	0,212	15,000	0,040	-0,659	0,772
				18,000	0	-0,996	0	16,000	-0.068	-0,807	0,613
								17,000	-0,196	- 0,900	0,428
								18,000	-0,333	- 0,932	0,229
								19,000	-0,700	- 0,900	0,030
								19,159	-0,491	- 0,890	0

Nous avons aussi réalisé un logiciel de simulation des rayons solaires pour un capteur situé en n'importe quel point de la terre et à n'importe quel instant de la journée et de l'année [8]. Si dessous les résultats de simulation pour le site de Tlemcen (Fig. 2, Fig. 3).

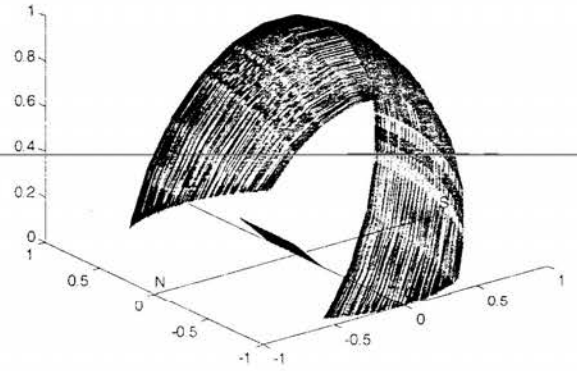

Fig. 2: Calotte balayée par le soleil au site de Tlemcen

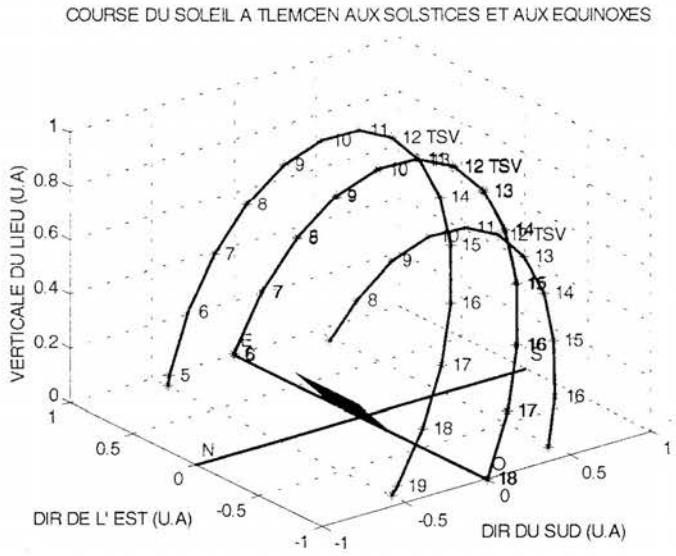

Fig. 3: La course du soleil aux Solstices et Equinoxes au site de Tlemcen

5. ANGLE D'INCIDENCE

L'angle d'incidence (i) sur un capteur (α ,γ) peut être déterminé [9,10] par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident ($\vec{U}_0$) et la normale $\left(\vec{N}\right)$.

$$\vec{U}_0 \begin{cases} \alpha_R = \text{Cos h Cos a} \\ \beta_R = -\text{Cos h Sin a} \\ \gamma_R = \text{Sin h} \end{cases} \tag{4}$$

$$\vec{N} \begin{cases} \alpha_N = \text{Cos}\,\gamma\,\text{Cos}\,\alpha \\ \beta_N = -\text{Cos}\gamma\,\text{Sin}\,\alpha \\ \gamma_N = \text{Sin}\,\gamma \end{cases} \tag{5}$$

Le produit scalaire de $\vec{U}_0$ et $\vec{N}$ détermine l'angle d'incidence (i) tel que:

$$\vec{U}_0 . \vec{N} = \text{Cos i} \quad (6)$$

$$\text{Cos i} = \text{Cos(h) Cos(a) Cos}(\gamma) \text{ Cos}(\alpha) + \text{Cos(h) Sin(a) Cos}(\gamma) \text{ Sin}(\alpha) + \text{Sin(h) Sin}(\gamma) \quad (7)$$

6. ENERGIE REÇUE PAR UN CAPTEUR

Le rayonnement global (G) reçu par un capteur (α , γ) est composé du rayonnement direct (S) et diffus (D). Ces rayonnements varient aléatoirement en fonction de la hauteur du soleil, de l'angle d'incidence, des intempéries et de l'état de visibilité de l'atmosphère. La méthode approchée de Perrin de Brichambaut [1] a donné de bons résultats pour l'estimation de l'énergie incidente sur un capteur d'orientation quelconque. Pour plus de précision de l'énergie incidente sur un capteur nous avons adopté cette méthode en introduisant la notion de masse atmosphérique.

6.1. Estimation de l'énergie instantanée

Les énergies des rayonnements direct (E_S), diffus (E_D) et global (E_G) sont estimées par :

$$\begin{cases} E_S = A \text{ Cos } i \text{ } e^{-\frac{1}{B \text{ Sin } (h+2)}} \\ E_D = \left(\frac{1 + \text{Cos } \beta}{2}\right) D_H + \left(\frac{1 - \text{Cos } \beta}{2}\right) a^* G_H \\ E_G = E_S + E_D \end{cases} \quad (8)$$

Avec $\begin{cases} D_H = A'(\sinh)^{0,4} \\ G_H = A''(\sinh)^{B''} \end{cases}$

A, B, A', A"et B" sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère et du facteur de trouble [10], pour le site de Tlemcen elles sont données sur le tableau suivant :

Tableau 2: Différents états de l'atmosphère.

Etat de l'atmosphère	A	B	A'	A"	B"
Ciel très pur	1300	6	87	1150	1,15
Ciel moyen	1230	4	125	1080	1,22
Ciel pollué	1200	2,5	187	990	1,25

a* étant l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol).

$$\begin{cases} 0,9 \text{ à } 0,8 & \text{neige} \\ 0,8 \text{ à } 0,4 & \text{sol claire} \\ 0,4 \text{ à } 0,2 & \text{verdure} \end{cases}$$

a* = 0,2 pour Tlemcen.

Pour un ciel moyen, le programme de simulation donne les résultats suivants pour un capteur TEL (α =0, γ =90°-34.56°) sur le site de Tlemcen (Fig 4).

Le maximum de puissance incidente au site de Tlemcen se situe à midi TSV et varie entre 800 et 1000 W/m^2 durant toute l'année. D'après ces graphes (Fig. 4), on constate que le capteur (0, 90-34.56) reçoit le soleil à partir de 6h TSV pour (EP-EA) et à partir de 7h TSV environ pour SH.

La puissance instantanée incidente sur ce capteur pour le site de Tlemcen est presque la même pour (EP-EA), elle est maximale à 12h est égale à 1000 W/m^2.

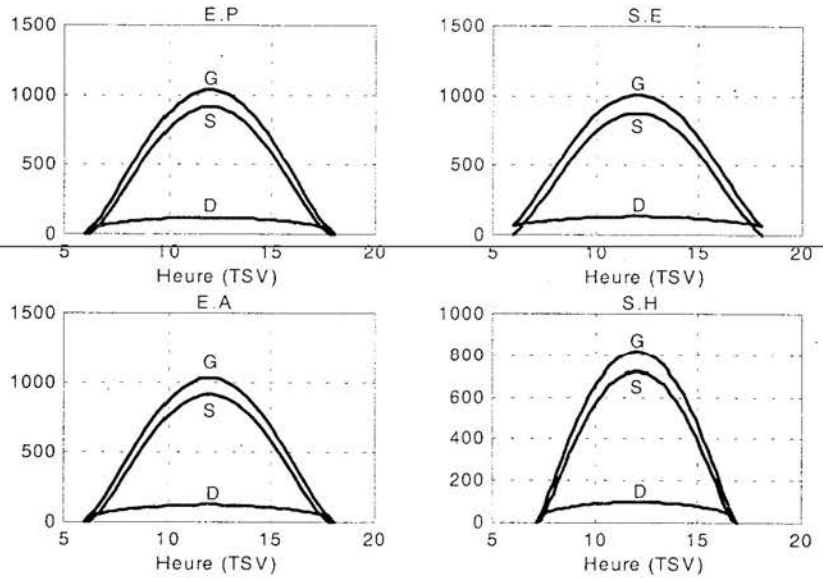

Fig. 4: Estimation de la puissance instantanée aux Solstices et Equinoxes Capteur Tel - site de Tlemcen.

6.2. Estimation de l'énergie journalière

Pour un capteur d'orientation quelconque, l'énergie journalière (E_{JS}=directe, E_{JD}=diffuse et E_{JG}=globale) reçue dépend du nombre d'heures d'ensoleillement D_J' qu'on ne peut prévoir. Pour l'estimation, on utilise les relations [1] :

$$E_{JS}=\frac{1}{n}D_J'\sum_n E_S \qquad E_{JD}=\frac{1}{n}D_J'\sum_n E_D \qquad E_{JG}=\frac{1}{n}D_J'\sum_n E_G \tag{9}$$

Avec n = nombred'itération

Pour un ciel moyen, nous avons simulé la variation de l'énergie journalière pour différentes orientations du capteur, nous présentons les résultats du site de Tlemcen sur la figure 5. Avec N est le quantième de l'année compté à partir du premier janvier.

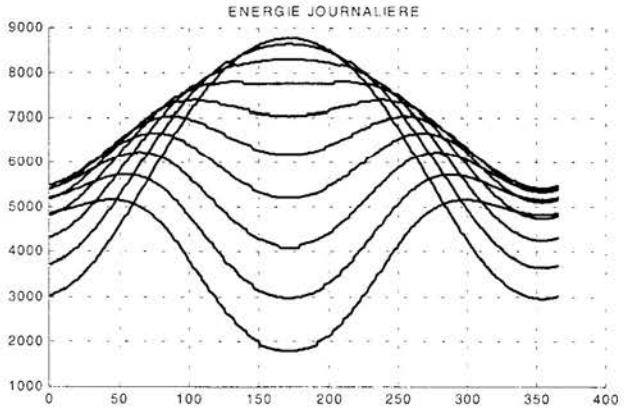

Fig. 5: Estimation des énergies journalières pour différentes orientations du capteur (site de Tlemcen).

Sur la figure 5 on remarque que l'écart d'énergie journalière devient important entre l'hiver et l'été dès qu'on s'écarte de l'inclinaison $\beta=\varphi$. A partir de cette courbe on constate que

l'énergie journalière est maximale pour le capteur (0, 90) et minimale pour le capteur (0, 0) au Solstice été, tel que :

$$G_J(\max) \cong 9000 \text{ Wh/m}^2. \text{ Et } G_J(\min) \cong 2000 \text{ Wh/m}^2.$$

Pour un ciel moyen, au site de Tlemcen et pour un capteur Tel (α =0, β=34,56°), le programme de simulation a donné des résultats suivants :

Tableau 3: Estimation de l'énergie journalière.

	E_{jS}(Wh/m²)	E_{jD}(Wh/m²)	E_{jG}(Wh/m²)
S.H	4188,6	723,09	4911,7
E.A – EP	6138.4	1090,6	7229,0
S.E	6159,7	1309,6	7469,3

6.3. Estimation de l'énergie annuelle

L'énergie annuelle reçue pour un capteur d'orientation quelconque est déterminée par le programme de simulation en faisant la somme des énergies journalières [1].

$$E_{aS}=\sum_{1}^{N}E_{jS} \qquad E_{aD}=\sum_{1}^{N}E_{jD} \qquad E_{aG}=\sum_{1}^{N}E_{jG} \qquad (10)$$

Avec N=365(où366)

Pour un ciel moyen, et au site de Tlemcen, le programme de simulation a donné les résultats suivants (Fig6). On remarque sur cette figure que le maximum d'énergie reçue par un capteur se situe au voisinage d'une inclinaison $\beta=\varphi$.

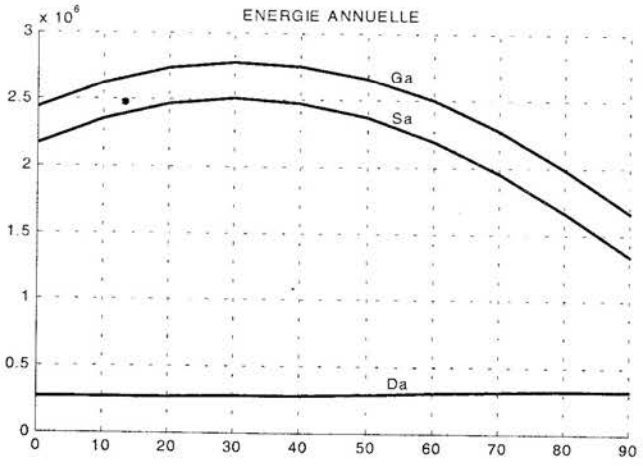

Fig. 6: Estimation de l'énergie annuelle

Les énergies annuelles : E_{aS} = direct, E_{aD} = diffus, E_{aG} = globale

Ce programme permet aussi l'optimisation de α, γ pour l'obtention des valeurs maximales de E_{aS}, E_{aD} et E_{aG}. Les résultats d'optimisation de l'énergie journalière globale d'un capteur Sud (α=0, β=90°- γ) obtenus pour le site de Tlemcen sont [8] :

- Le maximum annuel de l'énergie directe captée:

$$E_{aS}=E_{aS\max}=2{,}0610^{6}\text{ Wh/m}^2 \qquad \text{pour}\begin{cases}\alpha=0\\ \gamma=(90-30)^\circ\end{cases}$$

- Le maximum annuel de l'énergie diffuse captée:

$$E_{aD} = E_{a\,D\,max} = 3{,}89.10^5 \text{ Wh/m}^2 \qquad \text{pour} \begin{cases} \alpha = 0 \\ \gamma = (90 - 7)° \end{cases}$$

- Le maximum annuel de l'énergie globale captée:

$$E_{aG} = E_{a\,G\,max} = 2{,}45.10^6 \text{ Wh/m}^2 \qquad \text{pour} \begin{cases} \alpha = 0 \\ \gamma = (90 - 30)° \end{cases}$$

La simulation des énergies annuelles maximales pour le site de Tlemcen a donné l'inclinaison optimale du capteur obtenue pour une orientation face au Sud $\alpha = 0$, incliné d'environ $\beta \approx \varphi - 5°$, au lieu de $\beta \approx \varphi$ trouvé dans la littérature solaire.

7. CONCLUSION

Le travail présenté consiste en une simulation de la position apparente du soleil à chaque instant de la journée et de l'année et en n'importe quel lieu de la terre. Ce travail est enrichi par un calcul d'estimation des énergies instantanée, journalière et annuelle sur un capteur d'orientation quelconque placé sur le site de Tlemcen.

Enfin une optimisation des coordonnées du capteur a été présentée pour une réception optimale d'énergie annuelle. La simulation effectuée pour l'optimisation d'énergie captée au site de Tlemcen peut être étendue à d'autres sites, moyennement des corrections qui permettent de prédire les énergies solaires relatives au site concerné. Ces corrections sont : La latitude du lieu, l'altitude du site et l'inclinaison du capteur.

Le travail présenté peut contribuer au dimensionnement adéquat des générateurs photosolaires en zone méditerranéenne.

REFERENCES

[1] Ch. Perrin de Brichambaut et G. Lamboley, "*Le rayonnement solaire et ses mesures*", Cahiers de l'AFEDES, Thermique et Industrie, Paris, 1974.

[2] B. Y. Liu et R C. Jordan, "*The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse and total radiation*", Solar Energy 1.4 (1961) 1-9.

[3] S. A. Klein, "*Calculation of monthly average insolation on tilted surface*", Solar Energy 19 (1961)325.

[4] A. Idlimam, "*Etude théorique d'un système de séchage des peaux et des cuirs pour la région de Marrakech constitué d'une serre agricole jouant le rôle de générateur solaire d'air chaud et d'un séchoir conventionnel*", Thèse de 3ème cycle, E.N.S, Marrakech, 1990.

[5] R. Mechlouch, A. F. El Jery et A. Benbrahim, *"Choix d'un modèle d'ensoleillement et détermination des inclinaisons optimales des capteurs héliothermiques pour la ville de Gabès en Tunisie"*, Rev. Energ. Ren. 6 (1) (2003) 1-15.

[6] J. E. Braun, E. Groll, et Klein, "*Modeling And Design of Vapor Compression Systems*" Short Course, June 1-4, Ray W. Herrick Laboratories, School of Engineering, Purdue University, 1999.

[7] M. Capderou "*Atlas solaire de l'Algérie*", Tome 2, OPU 1986.

[8] C. Zidani et A. Lachgueur "*Simulation du mouvement apparent du soleil*", Mémoire DES;Université de Tlemcen, Juin 2000.

[9] C. C. Y. Ma and M. Iqbal, "*Statistical Comparison of Models for Estimating Solar Radiation on Inclined Surfaces*", J. Solar Energy 31(2)(1983) 313-17.

[10] A. Ricaut, "*Photopiles solaires*", Edition: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1999.