

Modélisation numérique des irradiations globale et diffuse au site de Ghardaïa

K. Gairaa et S. Benkaciali*

Unité de Recherches Appliquées en Energies Renouvelables,
B.P. 88, ZI Gart Taam, Ghardaïa, Algérie

(reçu le 09 Juillet 2007 – accepté le 30 Mars 2008)

Résumé - Dans cette étude, on propose des modèles de régressions linéaires de l'indice de clarté K_t déterminés par la méthode des moindres carrés écrits en fonction de la fraction d'insolation pour un plan horizontal et quelques plan inclinés (15° , 30° , 45°) d'orientations sud ainsi que ceux donnons la fraction diffuse K_d en fonction de la fraction d'insolation et de l'indice de clarté pour un plan horizontal. Les résultats trouvés sont en bonne concordance avec les mesures et les valeurs statistiques (erreurs relatives et coefficients de corrélations) sont satisfaisantes. Les données des éclairagements direct, diffus et global reçus sur un plan horizontal ont été mesurées au cours de l'année 2005 par une station radiométrique utilisant un système de poursuite à trois dimensions (SunTracker), installée à l'Unité de Recherches Appliquées en Energies Renouvelables de Ghardaïa et qui sont intégrées le long d'une journée pour obtenir les irradiations journalières.

Abstract - In this study, we suggest linear regression models of the clarity index K_t performed by the Root Mean Square (RMS) method, which is expressed according, to the insolation fraction factor on horizontal surface and on south facing tilted surfaces with tilt angles namely (15° , 30° and 45°), as well as those gave the diffuse fraction K_d according to the insolation fraction and the clarity index on horizontal surface. The obtained results are in conformity with the measured statistical data (relative errors and correlation coefficients). The data of the received direct, diffuse and global beam on horizontal surface have been recorded during the year 2005 throughout the three-axis tracking Sun-Tracker, which is installed at URAER/Ghardaïa.

Mots clés: Station radiométrique – Composantes horizontales du rayonnement solaire - Fraction d'insolation – Indice de clarté – Fraction diffuse – Modèle de Liu and Jordan – Modèles d'ajustements.

1. INTRODUCTION

Toute étude ou application de l'énergie solaire en un site donné nécessite une connaissance complète et la plus détaillée possible de l'ensoleillement du site. Ceci est généralement facile lorsque le site est pourvu d'une station de mesure fonctionnant régulièrement depuis plusieurs années. Cependant, dans la majorité des cas, il n'existe pas des mesures locales d'ensoleillement et de flux solaire et on doit avoir recours à certaines méthodes approchées permettant de prédire les caractéristiques du rayonnement solaire.

Beaucoup de conditions sont réunies pour que la ville de Ghardaïa bénéficie d'un climat sec et aride, caractérisé par un ensoleillement exceptionnel: sa situation géographique (30° de latitude Nord, $3^\circ 81'$ de longitude Ouest et 450 m d'altitude), le plus souvent, Ghardaïa a un taux d'insolation très important (en moyenne 75 %) et la moyenne annuelle de l'irradiation journalière globale mesurées sur un plan horizontal dépasse 6000 Wh/m^2 .

Dans cette étude, on vise à déterminer des modèles empiriques mensuels, annuels et estivaux qui vont nous permettre d'estimer les irradiations globales journalières, les irradiations diffuses journalières sur un plan horizontal et sur quelques plans inclinés et d'orientation sud dans le site de Ghardaïa.

* b_gisement1@yahoo.fr

2. PROCEDURES DE CALCUL

Il existe une relation linéaire entre le rapport de l'irradiation globale journalière H_i à l'irradiation globale journalière extraterrestre H_{0i} mesurées sur un plan horizontal et sur des plans inclinés, et la fraction journalière d'insolation σ calculée à partir de l'éclairement direct mesuré par rapport à un plan normal, ainsi qu'une relation linéaire entre la fraction diffuse

$K_d = \frac{H_d}{H_0}$ et la fraction d'insolation σ , et une relation linéaire et polynomiale entre fraction diffuse K_d et l'indice de clarté $K_t = \frac{H}{H_0}$.

Ces relations sont déterminées par la méthode des moindres carrés avec l'intermédiaire d'un logiciel de calcul (Origine 5.0 Professionnel).

Les modèles de corrélations utilisés sont les suivants:

- Modèle linéaire de l'indice de clarté en fonction de la fraction d'insolation pour un plan horizontal

$$\frac{H}{H_0} = a + b \times \sigma \quad (1)$$

- Modèle linéaire de l'indice de clarté en fonction de la fraction d'insolation pour plan incliné

$$\frac{H_i}{H_{0i}} = a_i + b_i \times \sigma \quad (2)$$

- Modèle linéaire de la fraction diffuse en fonction de la fraction d'insolation pour un plan horizontal

$$\frac{H_d}{H} = a + b \times \sigma \quad (3)$$

- Modèle linéaire de la fraction diffuse en fonction de l'indice de clarté pour un plan horizontal

$$\frac{H_d}{H_0} = a + b \times K_t \quad (4)$$

- Modèle polynomial de degré 3 de la fraction diffuse en fonction de l'indice de clarté pour un plan horizontal.

$$\frac{H_d}{H_0} = a + b \times K_t + c \times K_t^2 + d \times K_t^3 \quad (5)$$

avec: $H_0 = \int_0^{24h} g_{ne} \times \sin(h) \times dt \quad (6)$

- Irradiation extraterrestre calculée sur un plan horizontal

$$H_{0i} = \int_0^{24h} g_{ne} \times \cos(i) \times dt \quad (7)$$

- Irradiation extraterrestre calculée sur un plan incliné

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

$$\sin(h) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (9)$$

On connaît les résultats suivants:

$$g_{ne} = I_0 (1 + 0.034 \times \cos(0.986 (N - 2))) \quad (10)$$

$$I_0 = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (12)$$

S : Durée effectif d'insolation, c'est-à-dire la durée pendant laquelle le rayonnement direct reçu sur un plan normal dépasse les 120 W/m².

S₀ : Durée maximale d'insolation, appelée durée du jour.

$$S_0 = (2 / 15) \times \omega_c \quad (13)$$

$$\omega_c = \arccos(-\tan(\delta) \times \tan(\varphi)) \quad (\omega_c > 0) \quad (14)$$

L'irradiation journalière globale sur un plan incliné est donnée par la formule de Liu and Jordan suivante :

$$H_i = \int_0^{24h} \left(\cos(i) \times s_n + \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \times d_- + \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \times \rho \times g_- \right) \times dt \quad (15)$$

s_n, d₋ et g₋ sont respectivement les éclaircissements directs mesurés sur un plan normal, le diffus et le global mesurés sur un plan horizontal. Pour obtenir l'éclaircissement direct mesuré sur un plan horizontal on utilise la formule générale suivante:

$$s_- = g_- - d_- \quad (16)$$

On prendra un albédo régional, $\rho = 0.2$.

3. RESULTATS OBTENUS ET INTERPRETATION

3.1 Modèles linéaires de l'indice de clarté sur un plan horizontal.

Dans le tableau 1, on donne les ajustements linéaires de l'indice de clarté en fonction de la fraction d'insolation pour chaque mois et par rapport à un plan horizontal, ainsi que les moyennes mensuelles des irradiations globales journalières sur le même plan. On remarque que les erreurs indiquées ne dépassent pas 0.04 %, ceux-ci nous amènent à dire que les modèles proposés sont en bonne concordance avec les valeurs mesurées.

En outre, à partir de ces modèles mensuels, on peut déduire les modèles annuels et saisonniers de la manière indiquée ci-dessous:

3.1.1 Modèle annuel

$$H = H_0 (a_i + b_i \times \sigma) = H_0 (0.409 + 0.378 \times \sigma) \quad (17)$$

Les coefficients a_i et b_i de cette formule se déduisent des moyennes annuelles des coefficients d'ajustements de chaque mois.

3.1.2 Formules saisonnières

Les résultats obtenus par cette dernière corrélation sont améliorés par une formule pour la saison d'été (Avril à Septembre):

$$H = H_0 (0.433 + 0.347 \times \sigma) \quad (18)$$

et une formule pour la saison d'hiver (Octobre à Mars):

$$H = H_0 (0.405 + 0.387 \times \sigma) \quad (19)$$

Tableau 1: Valeurs des moyennes mensuelles mesurées et estimées des irradiances globales journalières sur une surface horizontale

| Mois | $K_t(\sigma) = H/H_0$ | H mesuré (Wh/m ²) | H calculé (Wh/m ²) | Erreur (%) |
|-----------|------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| Janvier | $0.361 + 0.456.\sigma$ | 3871 | 3875 | 0.1 |
| Février | $0.307 + 0.518.\sigma$ | 4842 | 4792 | 1.03 |
| Mars | $0.451 + 0.374.\sigma$ | 5926 | 5905 | 0.4 |
| Avril | $0.424 + 0.389.\sigma$ | 7339 | 7336 | 0.04 |
| Mai | $0.465 + 0.330.\sigma$ | 7745 | 7734 | 0.1 |
| Juin | $0.442 + 0.332.\sigma$ | 7812 | 7815 | 0.04 |
| Juillet | $0.453 + 0.306.\sigma$ | 7503 | 7485 | 0.2 |
| Août | $0.320 + 0.449.\sigma$ | 7090 | 6994 | 1.3 |
| Septembre | $0.369 + 0.405.\sigma$ | 6036 | 5980 | 0.9 |
| Octobre | $0.398 + 0.357.\sigma$ | 4824 | 4821 | 0.06 |
| Novembre | $0.382 + 0.398.\sigma$ | 4026 | 3971 | 1.3 |
| Décembre | $0.373 + 0.406.\sigma$ | 3437 | 3427 | 0.3 |

3.2 Modèles linéaires de l'indice de clarté sur des plans inclinés

Les tableaux 2, 3 et 4 donnent les valeurs des moyennes mensuelles des irradiances journalières mesurées et estimées, ainsi que les écarts relatifs correspondants, pour chaque inclinaison.

A partir de ces expressions, on déduit les modèles annuels et pour chaque inclinaison qui sont illustrés dans le tableau 5.

Tableau 2: Comparaison entre les valeurs des irradiances globales journalières moyennes mensuelles mesurées et estimées pour une inclinaison de 15°

| Mois | H_{15}/H_{015} | H_{15} mesuré (Wh/m ²) | H_{15} calculé (Wh/m ²) | Erreur (%) |
|-----------|------------------------|---|--|---------------|
| Janvier | $0.361 + 0.456.\sigma$ | 4202 | 4208 | 0.1 |
| Février | $0.307 + 0.518.\sigma$ | 4749 | 4735 | 0.3 |
| Mars | $0.401 + 0.254.\sigma$ | 5475 | 5464 | 0.2 |
| Avril | $0.434 + 0.221.\sigma$ | 6345 | 6344 | 0.01 |
| Mai | $0.487 + 0.176.\sigma$ | 6585 | 6582 | 0.1 |
| Juin | $0.449 + 0.220.\sigma$ | 6563 | 6565 | 0.03 |
| Juillet | $0.475 + 0.183.\sigma$ | 6482 | 6477 | 0.07 |
| Août | $0.458 + 0.148.\sigma$ | 6054 | 6056 | 0.03 |
| Septembre | $0.333 + 0.285.\sigma$ | 5431 | 5424 | 0.1 |
| Octobre | $0.320 + 0.267.\sigma$ | 4682 | 4665 | 0.3 |
| Novembre | $0.265 + 0.343.\sigma$ | 4170 | 4167 | 0.07 |
| Décembre | $0.249 + 0.357.\sigma$ | 3809 | 3800 | 0.2 |

Tableau 3: Modèles et comparaison des irradiations journalières moyennes pour une inclinaison de 30°

| Mois | H_{30} / H_{030} | H_{30} mesuré (Wh/m ²) | H_{30} calculé (Wh/m ²) | Erreur (%) |
|-----------|------------------------|---|--|---------------|
| Janvier | $0.178 + 0.580.\sigma$ | 5778 | 5784 | 0.1 |
| Février | $0.125 + 0.651.\sigma$ | 6196 | 6180 | 0.2 |
| Mars | $0.335 + 0.456.\sigma$ | 6513 | 6506 | 0.1 |
| Avril | $0.402 + 0.427.\sigma$ | 7554 | 7552 | 0.02 |
| Mai | $0.502 + 0.370.\sigma$ | 7532 | 7532 | 0 |
| Juin | $0.492 + 0.407.\sigma$ | 7493 | 7506 | 0.1 |
| Juillet | $0.497 + 0.362.\sigma$ | 7200 | 7187 | 0.1 |
| Août | $0.466 + 0.311.\sigma$ | 7033 | 7039 | 0.08 |
| Septembre | $0.305 + 0.456.\sigma$ | 6513 | 6500 | 0.1 |
| Octobre | $0.273 + 0.430.\sigma$ | 5892 | 5879 | 0.2 |
| Novembre | $0.204 + 0.506.\sigma$ | 5534 | 5436 | 1.7 |
| Décembre | $0.162 + 0.543.\sigma$ | 5180 | 5466 | 0.2 |

Tableau 4: Comparaison entre les valeurs des irradiations globales journalières mesurées et estimées pour une inclinaison de 45 °

| Mois | H_{45} / H_{045} | H_{45} mesuré (Wh/m ²) | H_{45} calculé (Wh/m ²) | Erreur (%) |
|-----------|------------------------|---|--|---------------|
| Janvier | $0.141 + 0.608.\sigma$ | 6271 | 6281 | 0.1 |
| Février | $0.085 + 0.682.\sigma$ | 6436 | 6431 | 0.07 |
| Mars | $0.307 + 0.483.\sigma$ | 6370 | 6385 | 0.2 |
| Avril | $0.422 + 0.425.\sigma$ | 7103 | 7099 | 0.05 |
| Mai | $0.561 + 0.371.\sigma$ | 6898 | 6894 | 0.05 |
| Juin | $0.559 + 0.444.\sigma$ | 6810 | 6831 | 0.3 |
| Juillet | $0.609 + 0.328.\sigma$ | 7200 | 7187 | 0.1 |
| Août | $0.498 + 0.315.\sigma$ | 7033 | 7039 | 0.08 |
| Septembre | $0.295 + 0.487.\sigma$ | 6305 | 6301 | 0.06 |
| Octobre | $0.248 + 0.453.\sigma$ | 5986 | 5975 | 0.1 |
| Novembre | $0.170 + 0.531.\sigma$ | 5886 | 5892 | 0.1 |
| Décembre | $0.145 + 0.545.\sigma$ | 5677 | 5657 | 0.3 |

Tableau 5: Modèles saisonniers pour chaque inclinaison

| | Corrélation annuelle | Corrélation valable D'Octobre à Mars | Corrélation valable d'Avril à Septembre |
|-----------------|--|--|--|
| Inclinaison 15° | $H_{15} / H_{015} = 0.363 + 0.273 \times \sigma$ | $H_{15} / H_{015} = 0.304 + 0.318 \times \sigma$ | $H_{15} / H_{015} = 0.438 + 0.209 \times \sigma$ |
| Inclinaison 30° | $H_{30} / H_{030} = 0.330 + 0.457 \times \sigma$ | $H_{30} / H_{030} = 0.235 + 0.499 \times \sigma$ | $H_{30} / H_{030} = 0.447 + 0.386 \times \sigma$ |
| Inclinaison 45° | $H_{45} / H_{045} = 0.338 + 0.472 \times \sigma$ | $H_{45} / H_{045} = 0.207 + 0.519 \times \sigma$ | $H_{45} / H_{045} = 0.499 + 0.386 \times \sigma$ |

Les figures 1, 2, 3 et 4 présentent l'évolution des irradiances globales journalières moyennes mensuelles sur plan horizontal et sur plan incliné en fonction des mois de l'année. On constate que les courbes des composantes estimées se confondent toutes avec les courbes des irradiances mesurées.

On note également que pour l'inclinaison de 30° , l'irradiation journalière globale moyenne mensuelle est plus importante par rapport aux autres irradiances globales pour les plans inclinés (15° , 45°).

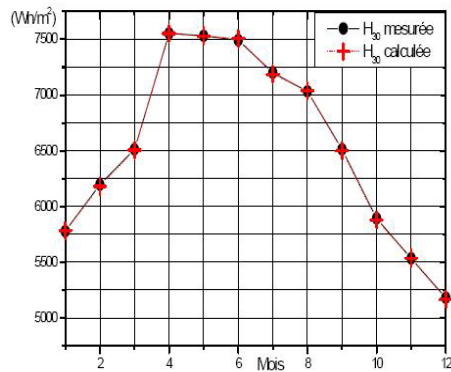


Fig. 1: Evolution des irradiances globales journalières moyennes mensuelles mesurées et estimées sur un plan incliné de 30°

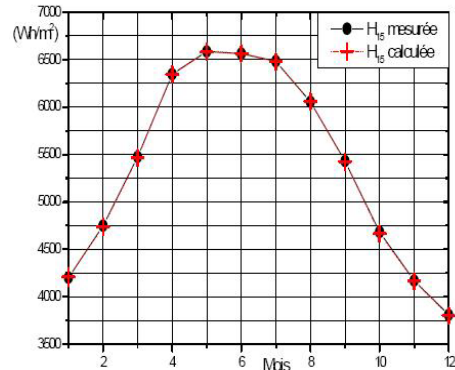


Fig. 2: Evolution des irradiances globales journalières moyennes mensuelles mesurées et estimées sur un plan incliné de 15°

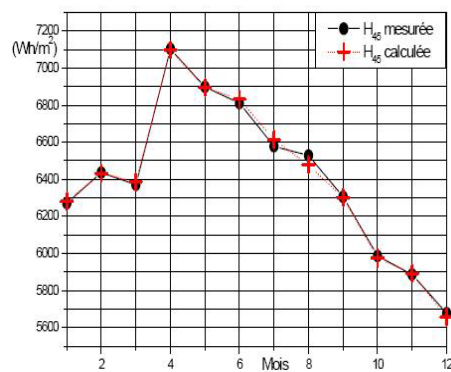


Fig. 3: Evolution des irradiances globales journalières moyennes mensuelles mesurées et estimées sur un plan incliné de 45°

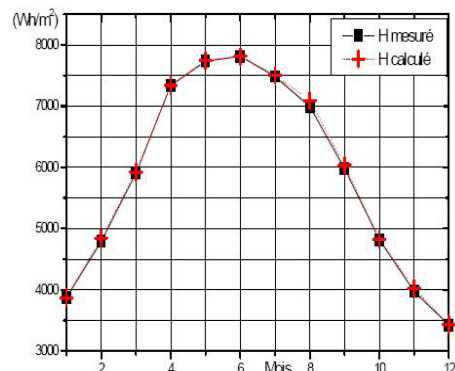


Fig. 4: Evolution des irradiances globales journalières moyennes mensuelles mesurées et estimées sur plan horizontal

3.3 Modèles linéaires et polynomiaux de la fraction diffuse sur un plan horizontal

Les tableaux 6 et 7, présentent les ajustements linéaires et polynomiaux de la fraction diffuse mesurée sur plan horizontal. On remarque que les coefficients de corrélation sont compris entre 0.64 et 0.94, prouvant par ailleurs que ces ajustements sont en bonne concordance avec les mesures. La figure 5 nous montre que les courbes obtenues par les deux modèles se confondent avec celle obtenue par les mesures.

Tableau 6: Modèles linéaires de la fraction diffuse

| Mois | $K_d(\sigma)$ | R^2 | $K_d(K_t)$ linéaire | R^2 |
|-----------|-------------------------------|-------|----------------------------|-------|
| Janvier | $1.00 - 0.986 \times \sigma$ | 0.89 | $1.670 - 1.999 \times K_t$ | 0.86 |
| Février | $1.031 - 0.946 \times \sigma$ | 0.76 | $1.400 - 1.560 \times K_t$ | 0.84 |
| Mars | $0.972 - 0.812 \times \sigma$ | 0.84 | $1.830 - 1.990 \times K_t$ | 0.81 |
| Avril | $0.975 - 0.832 \times \sigma$ | 0.80 | $1.760 - 1.970 \times K_t$ | 0.73 |
| Mai | $0.976 - 0.816 \times \sigma$ | 0.89 | $2.010 - 2.300 \times K_t$ | 0.86 |
| Juin | $0.913 - 0.715 \times \sigma$ | 0.91 | $1.800 - 2.054 \times K_t$ | 0.88 |
| Juillet | $0.929 - 0.655 \times \sigma$ | 0.78 | $1.660 - 1.782 \times K_t$ | 0.64 |
| Août | $0.985 - 0.793 \times \sigma$ | 0.79 | $2.080 - 2.550 \times K_t$ | 0.80 |
| Septembre | $0.900 - 0.734 \times \sigma$ | 0.87 | $1.290 - 1.370 \times K_t$ | 0.62 |
| Octobre | $0.920 - 0.790 \times \sigma$ | 0.90 | $1.740 - 2.125 \times K_t$ | 0.89 |
| Novembre | $0.936 - 0.831 \times \sigma$ | 0.89 | $1.665 - 1.985 \times K_t$ | 0.90 |
| Décembre | $0.940 - 0.850 \times \sigma$ | 0.95 | $1.665 - 1.985 \times K_t$ | 0.85 |

Tableau 7: Modèles polynomiaux de la fraction diffuse pour plan horizontal

| Mois | $K_d(K_t)$ polynomiale | R^2 |
|-----------|--|-------|
| Janvier | $-1.14 + 15.07 K_t - 31.22 K_t^2 + 13.9 K_t^3$ | 0.91 |
| Février | $-0.22 + 9.36 K_t - 21.17 K_t^2 + 12.6 K_t^3$ | 0.91 |
| Mars | $-2.48 + 18.56 K_t - 31.16 K_t^2 + 15.1 K_t^3$ | 0.93 |
| Avril | $-0.68 + 18.56 K_t - 1.13 K_t^2 - 3.36 K_t^3$ | 0.84 |
| Mai | $-0.7 + 7.36 K_t - 9.51 K_t^2 + 1.88 K_t^3$ | 0.90 |
| Juin | $3.75 - 14.29 K_t - 24.13 K_t^2 - 33.39 K_t^3$ | 0.90 |
| Juillet | $-10.39 + 50.16 K_t - 73 K_t^2 + 33.39 K_t^3$ | 0.74 |
| Août | $-4.79 + 27.73 K_t - 73 K_t^2 + 33.39 K_t^3$ | 0.82 |
| Septembre | $-2.47 + 19.1 K_t - 33.86 K_t^2 + 17.58 K_t^3$ | 0.82 |
| Octobre | $0.88 + 1.97 K_t - 6.15 K_t^2 + 2.94 K_t^3$ | 0.89 |
| Novembre | $0.31 + 4.7 K_t - 10.06 K_t^2 + 4.7 K_t^3$ | 0.92 |
| Décembre | $-0.95 + 10.34 K_t - 17.81 K_t^2 + 7.93 K_t^3$ | 0.91 |

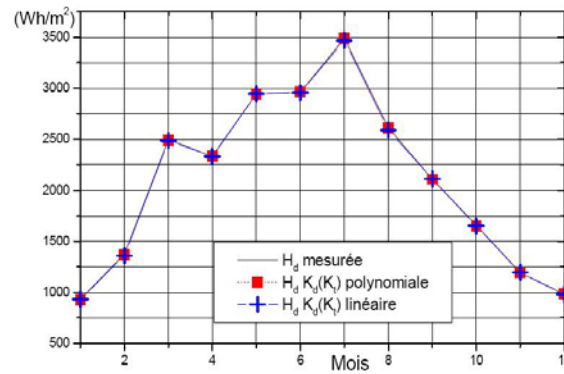


Fig. 5: Variation des irradiances diffuses journalières moyenne mensuelles mesurées et calculées sur un plan horizontal au site de Ghardaïa

4. CONCLUSION

Dans le présent travail, nous avons établi pour le site de Ghardaïa, des modèles d'ajustements linéaires, qui permettent d'estimer l'irradiation globale du rayonnement solaire sur plan horizontal et sur plan d'inclinaison de 15°, 30° et 45°, tout en connaissant la fraction d'insolation, ainsi que l'irradiation diffuse journalière par rapport au plan horizontal à partir de la fraction d'insolation et de l'indice de clarté.

Les modèles ainsi obtenus peuvent faire l'objet d'une simulation adéquate de l'irradiation globale journalière non seulement pour les inclinaisons des plans cités dans notre travail, mais aussi pour d'autres inclinaisons.

REFERENCES

- [1] M. Iqbal, '*An Introduction to Solar Radiation*', Academic Press Canada, 1983
- [2] S.J. Reddy, '*An Empirical Method for the Estimation of Net Radiation Intensity*', Solar Energy, Vol. 13, N°2, pp. 291 – 292, 1971.
- [3] A. Idlimam, A. Jamali, M. Kaoua et M. Fliyou, '*Etude Expérimentale et Statistique des Puissances Solaires à la Ville de Marrakech*', Actes du Forum International sur les Energies Renouvelables, 'FIER-2002', pp. 94 – 101, Tétouan, Maroc, 2002.
- [4] M. Capderou, '*Atlas Solaire de l'Algérie, Modèles Théoriques et Expérimentaux*', Office des Publications Universitaires, Alger, 1988.
- [5] J.A. Sabbagh, A.A.M. Sayigh and E.M.A. El-Salem, '*Estimation of the Total Solar Radiation from Meteorological Data*', Solar Energy, Vol. 19, N°3, pp. 307 – 311, 1977.
- [6] S.M.A. Ibrahim, '*Predicted and Measured Global Solar Radiation in Egypt*', Solar Energy, Vol. 35, N°2, pp. 185 – 188, 1985.