



HAL
open science

Modèle d'estimation de l'irradiation solaire globale d'une surface horizontale au sol à partir des images satellitaires

A. Mechaqrane, M. Chaoui-Roquaï, J. Buret-Bahraoui

► To cite this version:

A. Mechaqrane, M. Chaoui-Roquaï, J. Buret-Bahraoui. Modèle d'estimation de l'irradiation solaire globale d'une surface horizontale au sol à partir des images satellitaires. *Journal de Physique III*, 1993, 3 (5), pp.1005-1019. 10.1051/jp3:1993178 . jpa-00248968

HAL Id: jpa-00248968

<https://hal.science/jpa-00248968v1>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
Physics Abstracts
86.10K

Modèle d'estimation de l'irradiation solaire globale d'une surface horizontale au sol à partir des images satellitaires

A. Mechaqrane ⁽¹⁾, M. Chaoui-Roquaï ⁽²⁾ et J. Buret-Bahraoui ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratoire d'énergie solaire, Faculté des Sciences, B.P. 1014, Rabat, Morocco

⁽²⁾ Ecole Nationale de l'Industrie Minérale, B.P. 753, Rabat-Agdal, Morocco

(Reçu le 9 juin 1992, révisé le 12 janvier 1993, accepté le 1^{er} février 1993)

Résumé. — Un modèle physique basé sur l'équation générale de transfert radiatif du rayonnement solaire dans le système sol-atmosphère a été utilisé pour l'estimation des irradiances globales horaires et journalières d'une surface horizontale au sol à partir des mesures dans la bande 0,4-1,1 μm du satellite Météosat-2. Dans ce modèle on ne tient compte que de la diffusion Rayleigh et de l'absorption par l'ozone et par la vapeur d'eau. Ce modèle a été utilisé pour deux sites marocains Rabat et Marrakech, pour l'année 1985. Les résultats obtenus pour les deux sites montrent que l'on peut obtenir les irradiances globales horaires à 21 % et les valeurs journalières à 15 %.

Abstract. — A physical model based on the radiative transfer equation in the earth-atmosphere system was used to estimate hourly and daily global solar irradiance on a horizontal surface from measurements in the Meteosat-2 satellite visible band (0.4-1.1 μm). In this model we only account for the Rayleigh scattering, the ozone and water vapor absorptions. This model was used for two moroccan sites : Rabat and Marrakech. Ground trusts for the two sites indicate that satellite derived values agree respectively within 21 and 15 percent for hourly and daily values.

1. Introduction.

La connaissance du gisement solaire en un site donné dépend de la disponibilité des appareils de mesure sur ce site ou à proximité. Or, le réseau météorologique est en général peu dense. Aussi, les mesures du rayonnement solaire réfléchi par le système sol-atmosphère, effectuées par les satellites météorologiques géostationnaires, offrent actuellement de nouvelles perspectives pour la cartographie du gisement solaire. Ces satellites couvrent de larges étendues du globe avec une résolution spatiale fine ($5 \times 5 \text{ km}^2$ au pixel subsatellite pour Météosat) et une répétitivité temporelle satisfaisante (une demi-heure pour Météosat).

Plusieurs études ont montré la possibilité d'estimer le rayonnement solaire global d'une surface horizontale au sol à partir des mesures satellitaires. Les différents modèles proposés sont soit physiques soit statistiques. Les modèles statistiques ([7], [12], [15], ..) posent le problème des variations des coefficients de régression avec la région étudiée ([16]). En plus de

cette variation spatiale, les coefficients de régression peuvent varier avec le temps. Les modèles physiques font appel à des paramètres d'entrée supplémentaires (contenu de l'atmosphère en ozone, en vapeur d'eau, en aérosols, . . .), mais ont l'avantage d'être applicables, à n'importe quel moment, à n'importe quel site géographique. Ces modèles sont généralement basés sur une modélisation très simplifiée des phénomènes atmosphériques ([8], [10], ...).

Nous présentons, dans cette étude, les résultats obtenus par un modèle physique basé sur l'équation générale de transfert radiatif du rayonnement solaire dans le système sol-atmosphère. Dans ce modèle, nous négligeons l'absorption par les aérosols et par les nuages et nous ne tenons compte que de la diffusion moléculaire (Rayleigh) et des absorptions gazeuses de l'ozone et de la vapeur d'eau.

2. Données utilisées.

Le modèle nécessite les données satellitaires, et pour tester sa validité, nous utilisons les mesures au sol. Ces dernières sont effectuées à l'aide des pyranomètres et sont généralement intégrées sur l'heure (irradiations horaires) ou sur la journée (irradiations journalières).

2.1 DONNÉES SATELLITAIRES. — Dans notre travail, nous avons utilisé les données numériques (compte numérique : CN) codées sur 8 bits du canal visible (0,4-1,1 μm) du satellite géostationnaire européen Météosat-2. Ce satellite peut fournir également des mesures dans les canaux vapeur d'eau (5,7-7,1 μm) et infra-rouge thermique (10,5-12,5 μm). Les données satellitaires brutes sont reçues au centre spatial européen (ESOC) à Darmstadt en Allemagne, où elles sont traitées puis stockées sous un format de 2 500 \times 2 500 pixels qui correspond à une résolution spatiale au sol de 5 \times 5 km^2 (au pixel subsatellite). Le volume de données contenues dans chaque image est énorme (6 250 000 cas), aussi l'ESOC fournit également des images réduites à des formats plus pratiques comme le format B₂ obtenu par échantillonnage en prenant un pixel sur 6 dans les images 2 500 \times 2 500 pixels. Ces images réduites à 416 \times 416 pixels sont fournies toutes les trois heures. Ce sont les données satellitaires de ce format que nous avons utilisées pour notre travail, et ce pour deux sites marocains : Rabat (34° N, 6,75° W) et Marrakech (31,62° N, 8,03° W), pour toute l'année 1985.

2.2 DONNÉES AU SOL. — Au sol, les valeurs instantanées de l'éclairement solaire global d'un plan horizontal sont mesurées puis intégrées de façon à obtenir les irradiations horaires ou journalières. Compte tenu des heures des prises de vues satellitaires, nous n'utilisons, pour les deux sites étudiés, que trois irradiations globales horaires par jour : irradiations de 8-9 h, 11-12 h et 14-15 h TSV. Nous utilisons également les irradiations journalières pour l'année étudiée.

Pour **Rabat**, les mesures sont effectuées au laboratoire d'énergie solaire de la Faculté des Sciences de Rabat. Pour **Marrakech**, les valeurs horaires des irradiations globales nous ont été fournies par l'Ecole Normale Supérieure de Marrakech, et les valeurs journalières par la Faculté des Sciences de Marrakech.

3. Présentation du modèle.

L'éclairement solaire incident hors atmosphère E_{oh} se décompose, dans le système sol-atmosphère, en trois composantes :

$$E_{\text{oh}} = E_{\text{aa}} + E_{\text{as}} + E_{\text{r}} \quad (1)$$

où E_{aa} , E_{as} et E_{r} sont respectivement les éclaircements absorbé par l'atmosphère, absorbé par le sol et réfléchi vers l'espace.

E_{as} peut s'écrire en fonction de l'éclairement incident au sol E_s^\downarrow et de son albédo A_s :

$$E_{as} = (1 - A_s) E_s^\downarrow . \quad (2)$$

En utilisant les relations (1) et (2) on obtient :

$$E_s^\downarrow = \frac{E_{oh}}{1 - A_s} \left[1 - \frac{E_{aa}}{E_{oh}} - \frac{E_r}{E_{oh}} \right] \quad (3)$$

d'où l'équation de conservation énergétique :

$$E_s^\downarrow = \frac{E_{oh}}{1 - A_s} [1 - \alpha - A] \quad (4)$$

où α est la fraction du rayonnement absorbée dans l'atmosphère et A celle réfléchiée vers l'espace (albédo planétaire) qui peut être déduite directement des mesures satellitaires.

4. Détermination des paramètres d'entrée.

La résolution de l'équation (4) nécessite la connaissance de l'albédo planétaire A , de l'albédo du sol A_s et de la fraction du rayonnement solaire absorbée dans l'atmosphère α .

4.1 ALBÉDO PLANÉTAIRE. — Le satellite reçoit le rayonnement qui se propage dans sa direction, et mesure donc une luminance. Or, les détecteurs du satellite Météosat ne sont pas étalonnés avant le vol, le compte numérique fourni ne représente pas directement la luminance reçue. Kopke (1983) [6] a utilisé un modèle de transfert radiatif tenant compte des propriétés optiques de l'atmosphère et de la surface du sol et a obtenu la relation suivante entre le CN et la luminance réfléchiée dans la bande 0,3-3 μm :

$$L = k(CN - 2) \quad (5)$$

où k est un coefficient d'étalonnage qui dépend des propriétés optiques de l'atmosphère et de la surface. Nous prenons k égal à 1,495 qui est la moyenne des valeurs données par Kopke (1983) [6] pour une surface végétative et une surface nue ou couverte de végétation sèche.

En supposant que le système sol — atmosphère est lambertien, l'albédo planétaire s'écrit :

$$A = \frac{\pi L}{E_{oh}} \quad (6)$$

où E_{oh} est l'éclairement solaire d'une surface horizontale hors atmosphère dans la bande 0,3-3 μm , corrigée des variations de la distance terre-soleil.

4.2 ALBÉDO DU SOL. — L'albédo du sol peut être déterminé à partir des mesures satellitaires par ciel clair corrigées de l'influence de l'atmosphère. Plusieurs méthodes ont été proposées pour cela ([4], [11], ..). Dans notre travail, nous utilisons la méthode proposée par Deschamps *et al.* (1983) [4], dans laquelle on néglige les diffusions multiples et l'absorption par les aérosols (très faible surtout dans le visible) et on découple les phénomènes d'absorption gazeuse et de diffusion par les gaz et par les aérosols. Théoriquement, cette méthode n'est valable que pour une longueur d'onde donnée, mais nous faisons l'approximation qu'elle est valable également, en valeur moyenne, sur l'intervalle 0,3-3 μm . En supposant le système sol-

atmosphère homogène et lambertien, l'albédo du sol peut s'écrire :

$$A_s = \frac{A - A_a \bar{\tau}_{O_3} \bar{\tau}_{H_2O}}{T(\theta_s) T(\theta_v) \bar{\tau}_{O_3} \bar{\tau}_{H_2O} + S(A - A_a) \bar{\tau}_{O_3} \bar{\tau}_{H_2O}} \quad (7)$$

où A_a et S sont respectivement l'albédo intrinsèque et l'albédo sphérique de l'atmosphère. $T(\theta_s)$ et $T(\theta_v)$ sont les coefficients de transmission après diffusion dans les trajets soleil-sol et sol-satellite. $\bar{\tau}_{O_3}$ et $\bar{\tau}_{H_2O}$ sont les coefficients de transmission moyenne après absorption par l'ozone et la vapeur d'eau dans le double trajet. θ_s et θ_v sont les zéniths solaire et satellitaire.

Nous faisons l'approximation que la paramétrisation spectrale donnée par Deschamps *et al.* (1993) [4], pour chaque fonction atmosphérique A_a , $\bar{\tau}_{O_3}$, $\bar{\tau}_{H_2O}$, S , $T(\theta_s)$ et $T(\theta_v)$, reste valable, en moyenne, sur l'intervalle 0,3-3 μm et chaque fonction est ajustée à l'aide d'un calcul approché effectué à l'aide du programme « 5S » (Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) [5].

Nous appliquons la relation (7) pour l'ensemble des données satellitaires et nous prenons comme albédo du sol la valeur minimale observée pour une série de prise de vues d'un mois. Ainsi, cette valeur aura la plus grande chance d'être observée lorsque la concentration en aérosols est la plus faible. Nous supposons donc négligeable la diffusion par les aérosols et nous ne tenons compte que de la diffusion Rayleigh.

4.3 FRACTION DU RAYONNEMENT ABSORBÉE DANS L'ATMOSPHÈRE. — L'absorption par les aérosols étant négligée, des calculs théoriques ont montré que les nuages affectent peu la transmission atmosphérique [3].

Nous négligeons l'absorption dans les nuages ce qui permet de simplifier les calculs et d'éviter la détermination d'un seuil pour séparer les cas de ciel clair et de ciel ouvert. On ne tiendra compte finalement que de l'absorption par les gaz atmosphériques : ozone et vapeur d'eau, principaux absorbants gazeux de l'atmosphère. La fraction du rayonnement absorbée dans l'atmosphère peut alors s'écrire :

$$\alpha = 1 - \bar{\tau}_{O_3} \bar{\tau}_{H_2O} \quad (8)$$

$\bar{\tau}_{O_3} \bar{\tau}_{H_2O}$ est défini comme étant le coefficient moyen de transmission atmosphérique après absorption gazeuse dans le double trajet.

Le calcul de $\bar{\tau}_{O_3}$ et $\bar{\tau}_{H_2O}$ nécessite la connaissance des contenus de l'atmosphère en ozone U_{O_3} et en vapeur d'eau U_{H_2O} . Le contenu en ozone peut être obtenu soit à partir des tables donnant les moyennes mensuelles [2] soit à partir des relations empiriques telles que la relation proposée par Heuklon (1978) [1]. Le contenu en vapeur d'eau nécessite le recours aux mesures effectuées dans les stations météorologiques. Ces stations sont souvent très dispersées et l'accès aux données est fastidieux lorsque celles-ci ne sont pas sur support informatique. Nous avons cependant remarqué que l'utilisation, pour les trois tranches horaires et pour toute l'année, des contenus constants du modèle d'atmosphère standard « mid-latitude summer » ($U_{O_3} = 0,319 \text{ cm atm}$, $U_{H_2O} = 2,93 \text{ g. cm}^{-2}$) donne des résultats du même ordre que l'utilisation des valeurs instantanées données par les stations météorologiques [14]. Nous avons donc utilisé des contenus constants pour toute l'année et pour les trois tranches horaires étudiées.

5. Résultats.

Nous présentons, dans ce paragraphe, les résultats obtenus pour les irradiations globales horaires, les moyennes mensuelles des irradiations globales horaires et les irradiations globales journalières.

5.1 IRRADIATIONS GLOBALES HORAIRES. — La figure 1 permet la comparaison entre les irradiations globales horaires mesurées au sol et celles estimées à partir des données satellitaires pour l'ensemble des deux sites (2 055 cas). Le coefficient de corrélation est de 0,90, l'écart quadratique moyen (EQM) est de 116 Wh.m^{-2} (21 % par rapport à la moyenne des mesures au sol) et l'écart moyen (EM) est de 31 Wh.m^{-2} (6 %). Ce dernier résultat montre, qu'en moyenne, la précision obtenue est de l'ordre de celle d'un pyranomètre bien étalonné et entretenu.

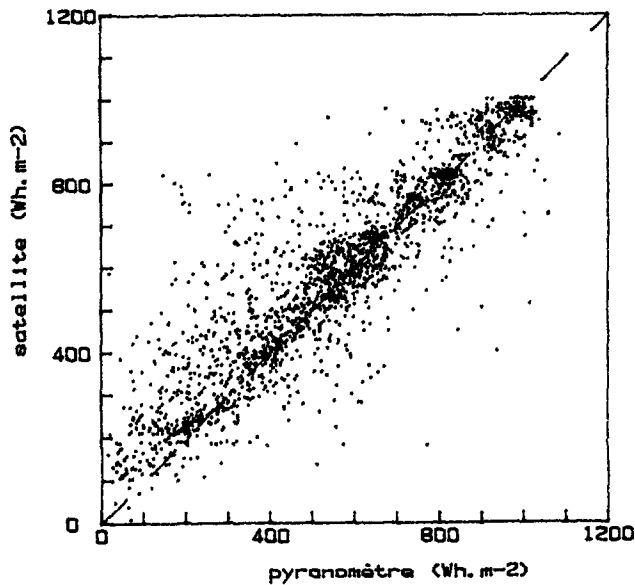


Fig. 1. — Comparaison des irradiations globales horaires mesurées au sol et estimées à partir des données satellitaires.

[Comparison of hourly global solar irradiation between ground-based measurements and satellite derived data.]

La figure 2 représente l'histogramme de la différence entre les valeurs estimées à partir du modèle et celles mesurées au sol. On remarque que plus de 86 % des cas correspondent à une différence comprise dans l'intervalle $[-150, +150 \text{ Wh.m}^{-2}]$. On note cependant quelques cas présentant des écarts importants.

Sur le tableau I, nous avons représenté, pour chacun des deux sites, les résultats obtenus pour chaque tranche horaire ainsi que pour l'ensemble des trois tranches. On note que pour les tranches 8-9 h et 11-12 h, les résultats sont proches pour les deux sites. Pour la tranche 14-15 h, les écarts obtenus pour le site de Marrakech sont notablement supérieurs à ceux obtenus pour Rabat. Ce problème sera étudié dans le paragraphe suivant.

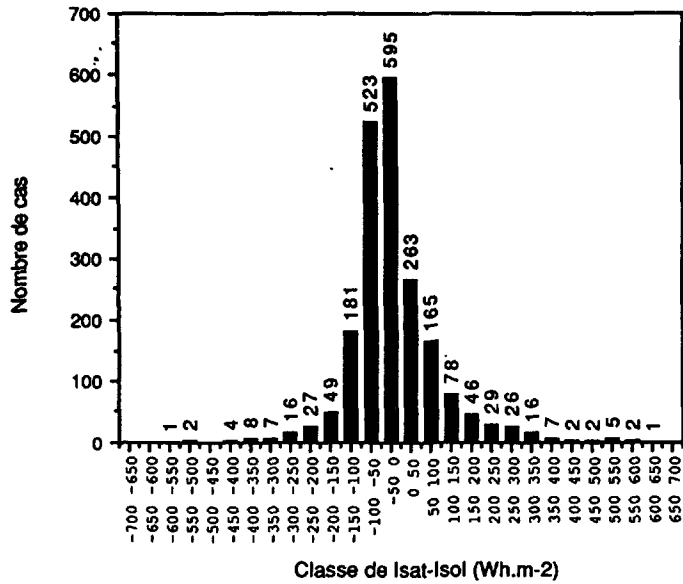


Fig. 2. — Histogramme de la différence entre les irradiations globales horaires mesurées et estimées. [Histogram of the difference between measured and estimated hourly global irradiances.]

5.2 MOYENNES MENSUELLES DES IRRADIATIONS GLOBALES HORAIRES. — Sur la figure 3, on a représenté, pour chaque site et pour chaque tranche horaire, les profils de variation annuelle des moyennes mensuelles des irradiations globales horaires mesurées au sol et calculées à partir des données satellitaires.

Pour la tranche 8-9 h, on note, pour les deux sites, une surestimation des valeurs estimées surtout en été. Pour la tranche 11-12 h, on remarque que les profils des valeurs mesurées et des valeurs estimées coïncident suffisamment bien pour les deux sites. Pour la tranche 14-15 h, on remarque que les profils coïncident assez bien pour Rabat, alors que pour Marrakech, le profil des moyennes mesurées au sol présente des fluctuations importantes contrairement aux profils observés pour les tranches horaires 8-9 h et 11-12 h d'allure plus régulière. Des anomalies sont observées pour les mois d'avril, juillet, août et septembre.

Les écarts entre les valeurs mesurées au sol et les valeurs estimées à partir des données satellitaires sont dus dans la plupart des cas aux trois problèmes suivants :

Problème de la différence spatiale et temporelle. — En présence des nuages, les valeurs mesurées au sol et estimées à partir des données satellitaires peuvent présenter des écarts importants (Fig. 4). Ces écarts peuvent être attribués, d'une part, à la différence spatiale et temporelle entre les deux types de mesures : la mesure satellitaire est instantanée et couvre une zone étendue du globe alors que la mesure au sol est intégrée sur l'heure et correspond à un point de localisation géographique précise. D'autre part, en présence des nuages, les effets directionnels sont très complexes et la mesure satellitaire qui se fait dans une direction privilégiée est assujettie à des variations aléatoires selon la structure des nuages et les positions du soleil et du satellite. De plus, lorsque l'azimut entre le soleil et le satellite est important, les effets de l'ombre sont à considérer.

En général, la présence des nuages constitue un problème majeur dans les modèles d'estimation à partir des données satellitaires.

Tableau I. — Résultats obtenus pour les irradiations globales horaires pour chaque tranche horaire et chacun des deux sites.

[Results of hourly global irradiation for each and all hourly section and for each site.]

	Tranche horaire	Nombre de cas	EM (Wh.m ⁻²) % EM	EQM (Wh.m ⁻²) % EQM	Coefficient de corrélation
R	8-9 h	338	41 11 %	98 26 %	0,88
	11-12 h	348	- 3 - 0,4 %	122 17 %	0,87
B	14-15 h	348	30 6 %	100 18 %	0,89
A T	Ensemble des trois tranches	1 034	22 4 %	107 20 %	0,91
M A	8-9 h	333	46 12 %	90 23 %	0,90
	11-12 h	346	11 2 %	135 18 %	0,82
A K	14-15 h	342	60 11 %	141 26 %	0,79
E C H	Ensemble des trois tranches	1 021	37 7 %	124 22 %	0,88

Pour le site de Marrakech, on remarque pour la tranche 14-15 h du mois de juillet (Fig. 4), plusieurs jours où la mesure au sol indique un ciel couvert, alors que la mesure satellitaire indique un ciel clair. Le même phénomène a été constaté pour les mois d'avril, août et septembre. C'est ce qui explique les anomalies observées pour ces quatre mois (Fig. 3).

Incertitude sur la détermination de l'albédo du sol. — Pour certains mois, un léger décalage a été observé entre les valeurs mesurées et estimées par ciel clair (Fig. 4). Ce problème peut être attribué à un choix mal approprié du coefficient d'étalonnage des détecteurs satellitaires ou à

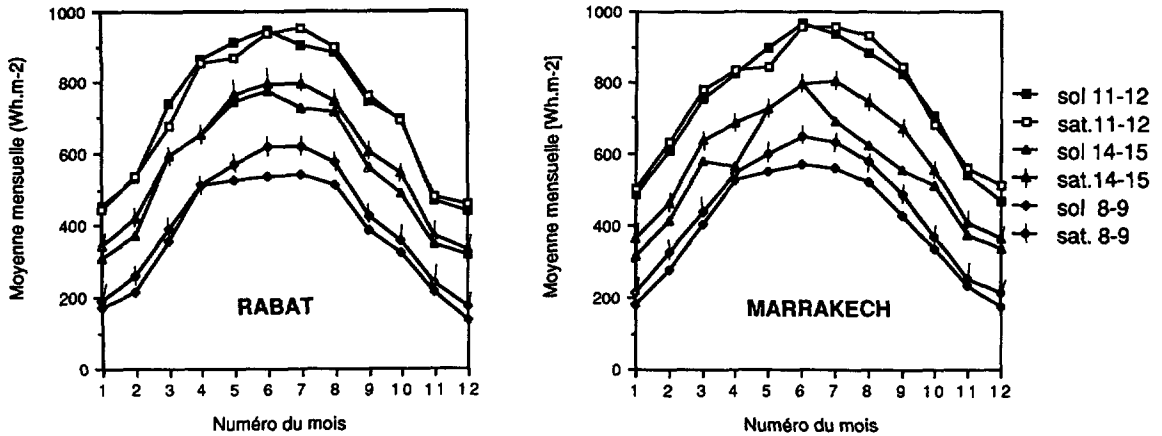


Fig. 3. — Moyennes mensuelles des irradiations globales horaires mesurées au sol et déduites des mesures satellitaires.

[Monthly mean of hourly global irradiation measured at ground level and deduced from satellite measurements.]

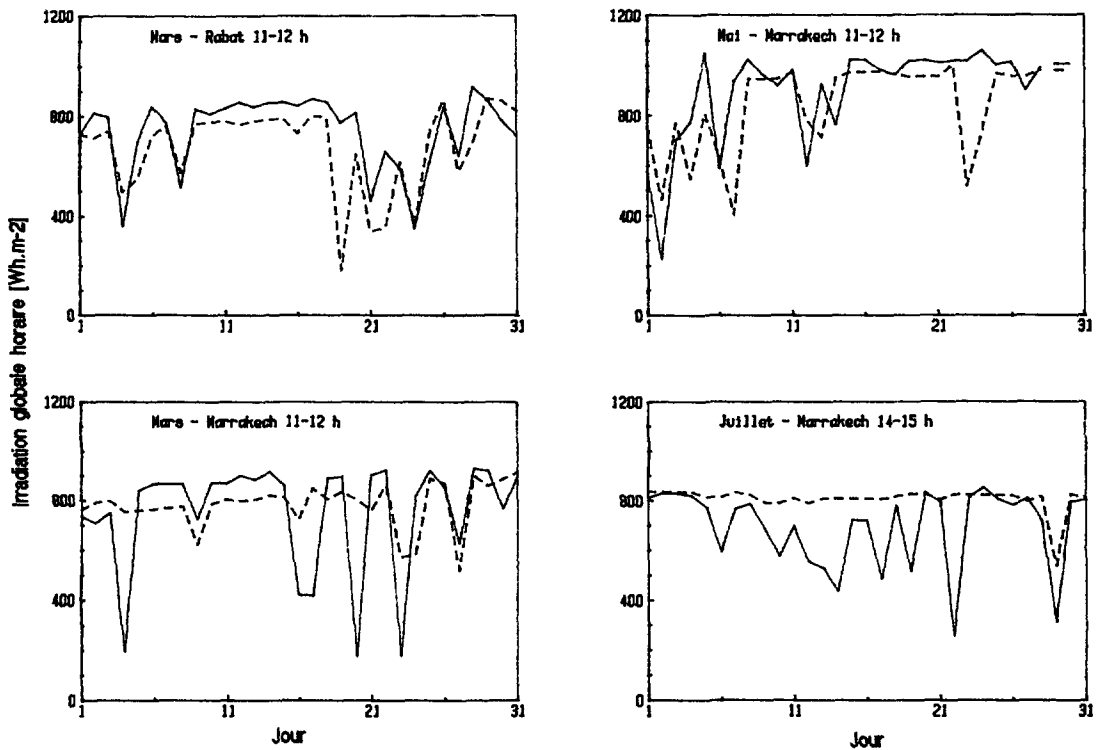


Fig. 4. — Variations des irradiations globales horaires mesurées au sol et estimées à partir des données satellitaires pour quelques mois. (—) au sol ; (----) satellite.

[Variations of hourly global irradiation as measured at ground level (—) and as derived from Meteosat (----) for same months.]

l'utilisation d'un albédo du sol constant pour tout le mois. En effet, l'albédo du sol peut varier au cours d'un même mois suite à des variations de la couverture végétale ou des conditions d'éclairement (hauteur solaire).

Problème des aérosols. — Pour le site de Rabat, une surestimation particulière est observée pour le mois de juillet pour les trois tranches horaires surtout pour la période allant du 5 au 18 juillet (Fig. 5). Pour les tranches 8-9 h et 11-12 h, on constate que même si les valeurs

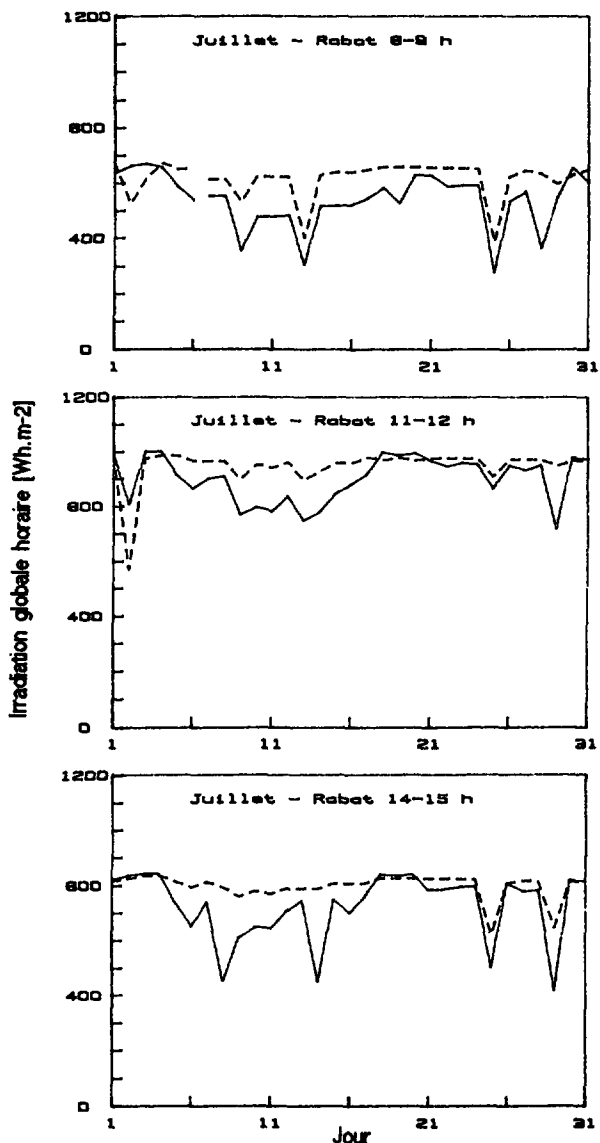


Fig. 5. — Variations des irradiations globales horaires mesurées au sol et estimées à partir des données satellitaires pour le mois de juillet pour les trois tranches horaires étudiées. Site de Rabat. (—) au sol ; (- - - -) satellite.

[Variations of hourly global irradiation measured at the ground and estimated from satellite data for the three hourly sections studied for July month. Site of Rabat. (—) at the ground ; (- - - -) satellite.]

estimées tendent à suivre les fluctuations des valeurs mesurées au sol une surestimation notable persiste. Les observations au sol indiquent la présence abondante d'aérosols pendant cette période. Les comptes numériques enregistrés dans le canal visible marquent une légère augmentation (2 à 6 comptes) qui n'est cependant pas suffisante pour mettre en évidence l'impact de ce phénomène sur l'éclairement solaire au sol. Cependant, la surestimation peut être due au fait d'avoir négligé l'absorption par les aérosols dans notre modèle et la légère augmentation des comptes numériques laisse supposer la possibilité de pouvoir détecter la présence d'aérosols dans le canal visible de Météosat. L'utilisation des données des autres canaux (vapeur d'eau et infra-rouge thermique) apporterait peut-être des informations utiles et permettrait de vérifier si l'augmentation n'est pas due à une couverture nuageuse partielle.

Enfin, nous représentons sur la figure 6, la comparaison entre les moyennes mensuelles mesurées au sol et estimées à partir des données satellitaires. Le coefficient de corrélation est de 0,98, l'EQM est de 47 Wh.m^{-2} (8 % par rapport à la moyenne des mesures pyranométriques) et l'EM est de 31 Wh.m^{-2} (6 %).

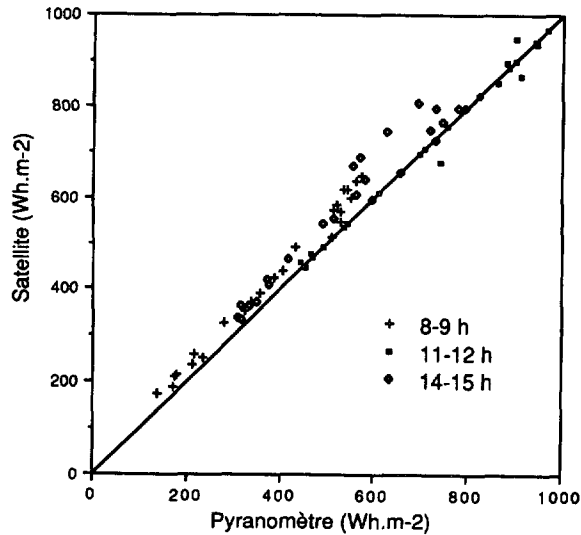


Fig. 6. — Comparaison des moyennes mensuelles des irradiances globales horaires.

[Comparison of monthly mean of hourly global irradiation.]

5.3 IRRADIATIONS GLOBALES JOURNALIÈRES. — L'estimation des irradiances globales horaires, pour les trois tranches horaires 8-9 h, 11-12 h, 14-15 h n'est pas suffisante pour déterminer l'énergie disponible en un site donné. Il faudrait disposer des irradiances des autres tranches horaires pour reconstituer le profil journalier de variation de l'énergie solaire incidente, ou, à défaut, déterminer l'irradiation quotidienne.

Dans le but de déterminer l'irradiation globale journalière nous avons retenu uniquement les jours pour lesquels on dispose des données des trois images satellitaires et nous avons appliqué la méthode des trapèzes :

$$H = \sum_{i=0}^3 (t_{i+1} - t_i) \frac{I(t_i) + I(t_{i+1})}{2} \quad (9)$$

où $I(t_i)$ est l'irradiation horaire calculée à partir des données satellitaires et t_0 et t_4 sont les temps du lever et du coucher du soleil pour lesquels $I(t_0) = I(t_4) = 0$.

Sur la figure 7, on a représenté la comparaison entre les irradiations globales journalières mesurées au sol et celles estimées à partir des données satellitaires. Le coefficient de corrélation est de 0,93, l'EQM est de 791 Wh.m^{-2} (15 % par rapport à la moyenne des mesures au sol) et l'EM est de 285 Wh.m^{-2} (5 %).

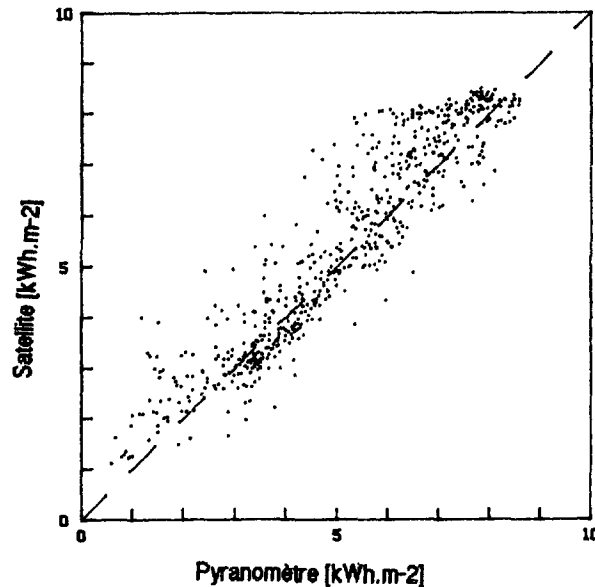


Fig. 7. — Comparaison des irradiations globales journalières mesurées au sol et déduites des données satellitaires.

[Comparison of daily global irradiation measured at the ground and deduced from satellit's data.]

Pour le site de Rabat (323 cas), le coefficient de corrélation est de 0,95, l'EQM est de 668 Wh.m^{-2} (13 %) et l'EM est de 61 Wh.m^{-2} (1 %). Pour le site de Marrakech (308 cas), le coefficient de corrélation est de 0,93, l'EQM est de 903 Wh.m^{-2} (18 %) et l'EM est de 519 Wh.m^{-2} (6 %).

Sur la figure 8, nous représentons, pour chacun des deux sites, le coefficient de corrélation, l'EM et l'EQM obtenus pour chacun des mois de l'année. Une surestimation des moyennes est observée pour tous les mois à Marrakech, avec des erreurs particulièrement importantes pour les mois de juillet et août. Pour le site de Rabat, le coefficient de corrélation est généralement meilleur qu'à Marrakech et les écarts nettement plus faibles.

Sur le tableau II, on a représenté les résultats obtenus pour différents états du ciel. La séparation est faite selon les valeurs du coefficient de clarté qui est le rapport de l'irradiation globale journalière mesurée au sol à l'irradiation journalière hors atmosphère. Le ciel est considéré clair si ce coefficient est supérieur à 0,7, couvert s'il est inférieur à 0,35 et partiellement couvert s'il est compris entre ces deux valeurs. On remarque que le modèle donne de bons résultats pour les jours clairs et partiellement couverts. Les erreurs considérables constatées pour les jours couverts ne sont pas significatives compte tenu du nombre très restreint des cas traités (45 cas seulement).

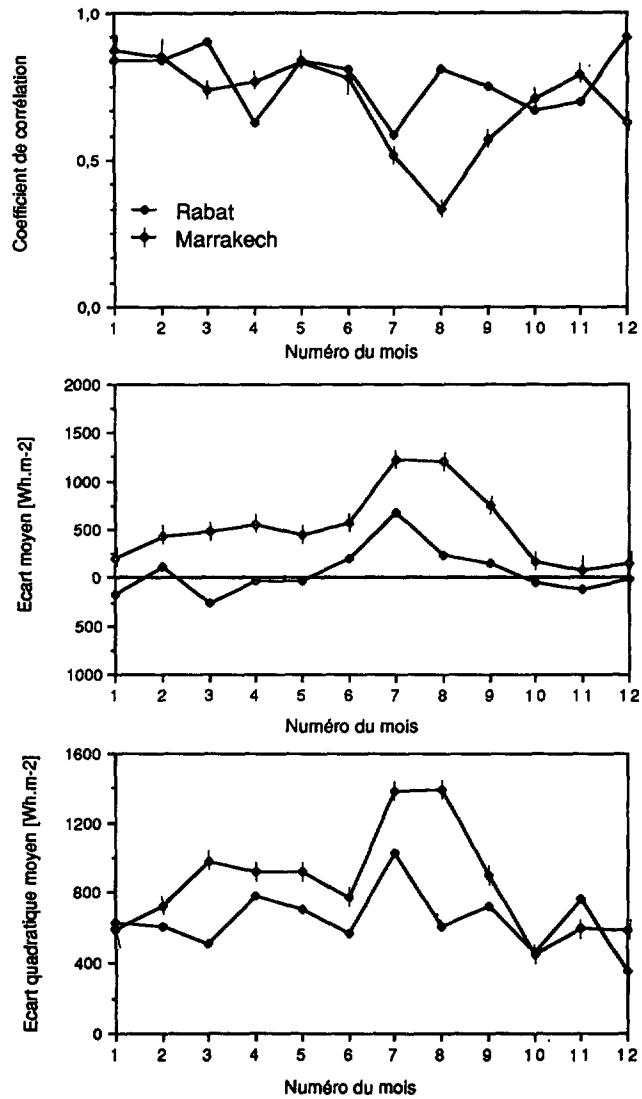


Fig. 8. — Coefficient de corrélation, écart moyen et écart quadratique moyen des irradiances globales journalières pour chaque mois de l'année et chacun des deux sites.

[Coefficient of correlation, mean bias error and standard deviation of daily global irradiation for each month and for the two sites.]

Sur la figure 9, nous représentons les variations des irradiances globales journalières mesurées au sol et déduites des données satellitaires pour le site de Rabat.

6. Conclusion.

Les résultats obtenus à partir du modèle physique que nous avons mis au point sont probants. De plus, ce modèle ne nécessite pour sa mise en œuvre que les données satellitaires, ce qui représente un avantage majeur pour les régions ne disposant pas de mesures pyranométriques

Tableau II. — Résultats obtenus pour les irradiations globales journalières pour différents états du ciel.

[Results of daily global irradiation for various sky covered.]

Etat du ciel	Nombre de cas	EM (Wh.m ⁻²) % EM	EQM (Wh.m ⁻²) % EQM	Moyenne mesurée (Wh.m ⁻²)	Moyenne estimée (Wh.m ⁻²)	Coefficient de corrélation
Ciel clair	106	- 382 - 6 %	518 8 %	6 515	6 133	0,98
Partiel. couvert	480	370 7 %	797 15 %	5 163	5 532	0,93
Couvert	45	951 59 %	1 173 72 %	1 619	2 570	0,77

ou météorologiques. Cependant, n'ayant traité que les données de deux stations, on ne peut pas se prononcer définitivement sur la validité des hypothèses simplificatrices adoptées, et particulièrement celle qui consiste à considérer les contenus de l'atmosphère en ozone et en vapeur d'eau constants dans l'espace et dans le temps, de même que le coefficient d'étalonnage des détecteurs visibles de Météosat. Une extension du modèle à d'autres sites nécessiterait peut-être une révision de ces coefficients.

La précision obtenue serait bien meilleure que celle donnée ci-dessus si l'on identifie un critère d'élimination des cas présentant des écarts importants, dus à la différence spatiale et temporelle entre les deux types de mesures et non pas à un phénomène physique. Ce problème est observé surtout pour Marrakech qui est à l'intérieur du continent donc difficile à repérer avec précision sur les images satellitaires contrairement à Rabat qui est au bord de la mer. De plus, on a travaillé sur des images réduites par échantillonnage et le pixel pris pour un site donné peut être à plusieurs kilomètres du point où sont effectuées les mesures au sol. La réduction des images en effectuant des moyennes sur des pavés bien déterminés serait peut-être plus intéressante.

La prise en compte de l'absorption dans les nuages et de l'absorption et de la diffusion par les aérosols peut conduire à une amélioration des résultats. Mais la mesure du contenu en aérosols de l'atmosphère est difficile et, le plus souvent, inexistante. Elle n'est réalisée que lors de campagnes de mesures menées par quelques laboratoires de recherche spécialisés. Cependant, nous avons remarqué, qu'en présence de fortes concentrations en aérosols, une légère augmentation des comptes numériques est enregistrée dans le canal visible de Météosat. Une étude minutieuse, à l'aide de mesures du trouble atmosphérique et d'observations météorologiques serait nécessaire pour l'étude de l'impact des différents types d'aérosols sur le signal dans le canal visible de Météosat. Par ailleurs, la modélisation des nuages est très difficile vu la variété et la complexité de la couche nuageuse.

La reconstitution des irradiations globales journalières à partir de trois images satellitaires par jour et en utilisant simplement la méthode des trapèzes est obtenue avec une bonne précision ce qui constitue un résultat très intéressant.

Enfin, cette étude montre, qu'en utilisant un modèle physique simple, on a pu remonter aux irradiations globales au sol avec une précision comparable à celle obtenue par d'autres auteurs (pour les irradiations globales horaires, l'EQM obtenu par Dedieu *et al.* (1987) [10] est de 109 Wh.m⁻², celui obtenu par Cano *et al.* (1986) [12] est de 117 Wh.m⁻², .). Nous avons

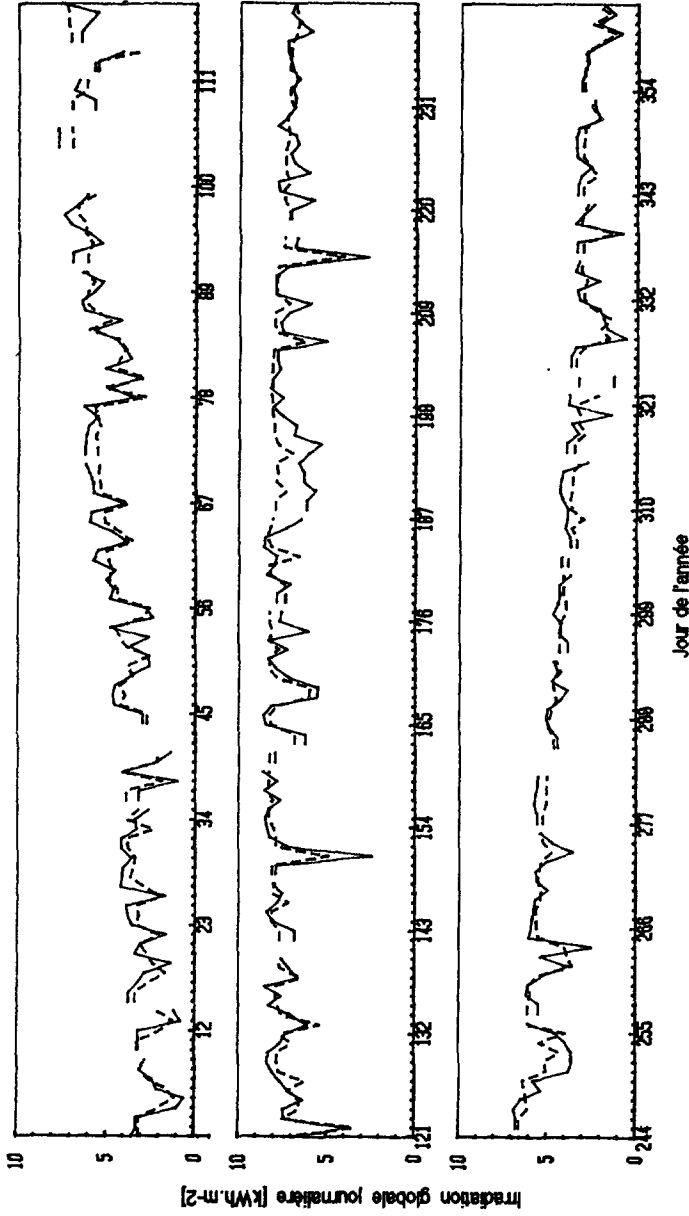


Fig. 9. — Profils de variations des irradiances globales journalières mesurées au sol et déduites des mesures satellitaires à Rabat pour l'année 1985. (—) au sol ; (---) satellite.
 [Daily global irradiances as measured at ground level (—) and as derived from Meteosat data (---) versus the day of year 1985.]

tenté de montrer surtout les problèmes auxquels se heurte l'utilisation des données satellitaires et dont le principal est la différence spatiale et temporelle avec les mesures au sol. Une étude comparative entre l'utilisation des images pleine résolution et des images réduites permettrait peut-être d'évaluer au moins l'impact de la différence spatiale. Quant à la différence temporelle, la solution proposée par certains auteurs et qui consiste à faire des moyennes sur des pavés déterminés résoudrait peut-être le problème surtout lorsque la vitesse de déplacement des masses nuageuses est faible.

Remerciements.

Nos sincères remerciements aux responsables du Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille qui ont bien voulu nous fournir les données satellitaires ainsi qu'à tous les membres du Laboratoire d'Énergie Solaire de la Faculté des Sciences de Rabat.

Bibliographie

- [1] VAN HEUKLON T. K., Estimating atmospheric ozone for solar radiation models, *Sol. Energy* **22** (1978) 63-68.
- [2] ROBINSON N., *Solar radiation* (American Elsevier, New York, 1966).
- [3] BURIEZ J. C., BONNEL B., FOUQUART Y., Theoretical and Experimental Sensitivity Study of the Derivation of the Solar irradiance at the Earth's Surface from Satellite Data, *Beitr. Phys. Atmos.*, **59** (2) (1986) 263-281.
- [4] DESCHAMPS P. Y., HERMAN M., TANRE D., ROUQUET M. C., DUPAIRE J. P., Effets atmosphériques et évaluation du signal pour des instruments optiques de télédétection, *ESA J.* **6** (1982) 233-246.
- [5] TANRE D., DEROO C., DAHAUT P., HERMAN M., MORCRETTE J. J., PERBOS J., DESCHAMPS P. Y., Effets atmosphériques en télédétection. Logiciel de simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire, Proceedings of the 3rd International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in remote sensing, Les Arcs, France (ESA SP-247, 1986).
- [6] KOPKE P., Calibration of the Vis channel of Meteosat-2, *Adv. Space Res.* **2** (1983) 93-96.
- [7] TARPLEY J. D., Estimating incident solar radiation at the Earth's surface from geostationary satellite data, *J. Appl. Meteor.* **18** (1979) 1172-1181.
- [8] GAUTIER C., DIAK G. R., MASSER S., A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data, *J. Appl. Meteor.* **19** (1980) 1005-1012.
- [9] REGAS N. M., Mise en œuvre et validation d'une méthode opérationnelle et automatique pour l'évaluation d'un atlas solaire en Europe à l'aide de mesures satellitaires Météosat (années 1983, 1984 et 1985), Thèse de doctorat es Sciences, Université de Paris VII (1986).
- [10] DEDIEU G., DESCHAMPS P. Y., KERR Y. H., Satellite estimation irradiance at the surface of earth and of surface albedo using a physical model applied to Meteosat data, *J. Clim. Appl. Meteor.* **26** (1987) 79-87.
- [11] ROCKWOOD A. A., COX S. K., Satellite inferred surface albedo over northwestern Africa, *J. Atmos. Sci.* **35** (1978) 513-522.
- [12] CANO D. *et al.*, A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data, *Sol. Energy* **37** (1986) 31-39.
- [13] PINTY B., A new technique for inferring surface albedo from satellite observation. *J. Clim. Appl. Meteor.* **24** (1985) 741-750.
- [14] MECHAQRANE A., Contribution à l'étude de l'utilisation des images du satellite Météosat pour la détermination du gisement solaire marocain, Thèse de 3^e cycle, Faculté des Sciences de Rabat (1990).
- [15] HAY J. E., HANSON K. J., A satellite-based methodology for determining solar irradiance at the ocean surface during GATE, *Bull. Am. Meteor. Soc.* **59** (1978) 1549.
- [16] RAPHAEL C., HAY J. E., An assessment of models which use satellite data to estimate solar irradiance at the earth's surface, *J. Clim. Appl. Meteor.* **23** (1984) 832-844.