REVUE DE PHYSIQUE APPLIQUÉE

Revue Phys. Appl. 24 (1989) 1023-1027

NOVEMBRE 1989, PAGE 1023

Classification
Physics Abstracts
86.10K

Détermination d'une irradiation solaire journalière à partir de trois irradiances horaires à 9, 12 et 15 h

C. Delorme, C. Mohamed et A. Otmani

Energie-Climat, Université d'Avignon, 33 rue Louis Pasteur, 84000 Avignon, France

(Reçu le 17 janvier 1989, révisé et accepté le 5 septembre 1989)

Résumé. — Une étude théorique montre que par beau temps l'irradiation journalière est proportionnelle à la somme des trois éclairagements aux heures H , $H - 3$ et $H + 3$, H voisin du midi solaire. Si on remplace les trois éclairagements par les irradiances horaires correspondantes la variation du coefficient de linéarité est négligeable. La validité de la méthode, étendue à des jours quelconques, a pu être vérifiée en comparant les irradiances journalières mesurées à celles estimées à partir de trois irradiances horaires mesurées. Le coefficient de corrélation est égal à 0,94 pour la station d'Abidjan où l'atmosphère est constamment perturbée par les nuages et il est supérieur ou égal à 0,98 pour une vingtaine de stations en France.

Abstract. — By a theoretical analysis it is pointed out for clear sky the linearity of the relationship between the daily global irradiance and the added values of the instantaneous global radiation at each hour: H , $H - 3$ and $H + 3$ with H near solar noon. If the instantaneous radiations are replaced by the hourly irradiances the modification of the linearity coefficient is negligible. The validity of this method has been checked by comparing measured daily irradiances to computed values from three measured hourly irradiances. The correlation factor is about 0.94 for data from Abidjan where clouds are constantly crossing the sky and it is greater than or equal to 0.98 about twenty French stations.

1. Introduction.

Pour connaître le gisement solaire, c'est-à-dire les fluctuations du rayonnement solaire utilisable au cours des années passées sur l'étendue d'un pays il existe trois sources d'informations : les mesures de rayonnement effectuées dans les stations actinométriques, les observations des stations météorologiques et l'imagerie satellitaire. La première est la plus directe donc la plus précise mais rarement suffisante. En Afrique, par exemple, dans la plupart des pays, les stations actinométriques sont peu nombreuses et parfois très distantes les unes des autres. Les deux autres méthodes font appel à des modèles d'estimation du rayonnement à partir de données, mesures ou observations qui, initialement ne sont pas destinées à cet usage. La seconde n'offre des données que toutes les trois heures et seulement en certains points du pays ; le réseau des stations météorologiques est cependant en général plus dense que celui

des stations actinométriques. Les satellites géostationnaires tel METEOSAT fournissent, toutes les trente minutes, une image dans le canal « visible » dont la résolution spatiale est de l'ordre de $2,5 \times 2,5$ km² sous le satellite. Cette information abondante ne peut pratiquement être utilisée qu'en temps réel au fur et à mesure de la réception des images à l'aide d'un dispositif P.D.U.S. sur le lieu où s'effectue le traitement informatique.

Les seules images archivées qui peuvent être utilisées en routine pour une étude du gisement solaire au cours des six années passées, par exemple, sont les images du type B2 I.S.C.C.P. Le nombre d'informations de l'image totale du globe terrestre a été divisé par 144. La résolution spatiale est donc réduite [1] mais elle reste suffisante pour étudier une région étendue. L'intervalle de temps séparant deux images successives dans le canal « visible » est égal à trois heures. Diverses méthodes d'estimation des

irradiations à partir de ces images ont été proposées, par exemple [2] et [3].

Il existe aussi des images du type WEFAX qui conservant la résolution spatiale de la prise de vue sur une partie du globe ne sont pas archivées mais peuvent être reçues par l'utilisateur à l'aide d'un dispositif S.D.U.S. (antenne et récepteur). Pour l'Afrique ces images ne sont cependant disponibles que toutes les trois heures, elles peuvent être utilisées pour cartographier le rayonnement au sol au fur et à mesure de leur réception [4].

Ainsi pour accéder à la connaissance du gisement solaire dans les années antérieures là où on ne dispose pas de mesures horaires de rayonnement on est contraint de se contenter d'informations à heures fixes au pas de trois heures.

Nous nous sommes donc posé le problème général suivant : connaissant au cours d'une journée quelconque les irradiations horaires aux heures $H - 3$, H et $H + 3$, H étant voisin du midi solaire, comment peut-on en déduire l'irradiation journalière et quelle précision peut-on espérer atteindre ?

Nous avons essayé de traiter le problème d'abord par un calcul théorique puis par une exploitation de plusieurs séries de mesures d'irradiations en nous limitant au rayonnement global.

2. Notations employées.

Nous avons représenté chaque grandeur par un mot dans lequel les différents caractères ont la signification suivante :

G : rayonnement global tel qu'il est mesuré à l'aide d'un pyranomètre placé sur un plan horizontal

E : éclairement

1 : « beau temps » ou « ciel clair »

H : horaire

J : journalier

m : grandeur mesurée

(i) : indice caractérisant l'instant

$i = 1$ à l'heure $H - 3$

$i = 2$ H

$i = 3$ $H + 3$

K : coefficient

A : atténuation

Ainsi les principales grandeurs utilisées sont :

$EG1(i)$: éclairement global calculé

$GH1(i)$: irradiation horaire calculée

$GJ1$: irradiation journalière calculée

$GHm(i)$: irradiation horaire mesurée

GJm : irradiation journalière mesurée.

3. Etude théorique.

Divers modèles atmosphériques [1] sont utilisables pour calculer l'éclairement $EG1(t)$ à chaque instant. Ils prennent en compte les teneurs des composants variables de l'atmosphère qui caractérisent le « beau temps », notamment l'eau condensable et les aéro-

sols. Pour une journée de beau temps dont le quantième dans l'année est QJ , en un lieu de latitude X et de longitude Y on peut ainsi calculer les trois valeurs instantanées $EG1(1)$, $EG1(2)$ et $EG1(3)$. Par intégration numérique on calcule les irradiations horaires puis l'irradiation journalière $GJ1$. Pour simplifier, ici nous utilisons le modèle synthétique préconisé par l'O.M.M. [5].

L'éclairement en global est calculé à partir de la formule suivante :

$$EG1 = (1\,300 - 57 \times TL)(\sin \gamma)^{(36 + TL)/33}.$$

γ est l'angle de hauteur solaire fonction de X , Y , QJ , t .

TL est le facteur de trouble de Linke qui peut s'exprimer en fonction de la teneur en eau et du coefficient de trouble β d'Angström de l'atmosphère. Des valeurs de TL comprises entre 3 et 5 sont considérées comme normales. Une valeur de $TL = 3$ signifie que le ciel est bleu avec des teneurs en eau et en aérosols faibles. Le tableau I montre l'influence du facteur de Linke sur le calcul des irradiations journalières en global, en direct et en diffus. A titre d'exemple, nous y donnons les résultats obtenus en prenant les valeurs 3 et 4 du facteur de Linke pour un choix de trois journées, sous les latitudes de 15 et 45°. L'énergie journalière du rayonnement global, la seule qui nous intéresse ici, varie donc de 6 à 9 % quand ce facteur de trouble TL change d'une unité.

Tableau I. — Influence du facteur de Linke.

[Influence of Linke's factor.]

Latitude	QJ	TL	Irradiations journalières			Coefficient KE1
			Global	Direct	Diffus	
15	30	3	6 400	8 850	930	3,023
15	30	4	6 000	7 480	1 260	3,018
15	90	3	7 950	9 720	1 000	3,110
15	90	4	7 480	8 340	1 380	3,102
15	180	3	8 200	9 960	1 030	3,203
15	180	4	7 720	8 550	1 420	3,193
45	30	3	2 610	5 490	650	2,877
45	30	4	2 400	4 260	870	2,878
45	90	3	5 880	8 930	950	3,146
45	90	4	5 490	7 440	1 300	3,138
45	180	3	8 840	11 420	1 200	3,521
45	180	4	8 300	9 710	1 640	3,505

Nous cherchons à établir une relation permettant de calculer une valeur approchée de $GJ1$ en ne connaissant que les trois valeurs instantanées $EG1(i)$, la latitude du lieu et le quantième du jour. Il s'agit donc de remplacer l'intégration numérique à pas fin par la somme de trois aires ayant chacune une hauteur moyenne égale à l'éclairement correspondant. Une première modélisation consiste à choisir trois rectangles de même largeur c'est-à-dire à ne

considérer que le coefficient :

$$KE1 = GJ1 / (EG1(1) + EG1(2) + EG1(3)) .$$

La figure 1 illustre la variation de ce coefficient KE1 en fonction du quantième du jour QJ pour les latitudes 0 ; 25 et 50° Nord. L'amplitude de la variation maximale annuelle par rapport à la valeur commune aux équinoxes croît avec la latitude. Le coefficient KE1 a été calculé ici en choisissant un beau temps caractérisé par un facteur de trouble TL = 4. L'effet de ce paramètre est d'ailleurs négligeable, comme on peut s'en rendre compte sur le tableau I. Le coefficient KE1 varie donc essentiellement avec la latitude et le quantième du jour tout comme la durée théorique du jour.

La similitude entre les variations de KE1 et de la durée du jour DJ nous a amené à chercher une relation simple entre ces deux grandeurs. Ainsi la relation linéaire suivante :

$$KE1 = KE1(EQ) + 0,1(DJ - 12)$$

où KE1(EQ) = 3,134 est la valeur constante aux équinoxes donne des résultats très satisfaisants tout au long de l'année pour les latitudes inférieures à 35°. Pour conserver des écarts relatifs de l'ordre de 2 à 3 % entre les valeurs de KE1 calculées soit par le modèle O.M.M. soit directement à partir de la durée du jour pour des latitudes supérieures à 35° nous avons établi la formule suivante :

$$KE1 = KE1(EQ) + 0,1(DJ - 12) + 2 \times 10^{-4} X(DJ - 12)^2$$

où X est la latitude en degrés.

Fig. 1. — Evolution du coefficient de linéarité KE1 (entre l'irradiation journalière GJ1 et la somme des 3 éclaircissements EG1(i) calculés par ciel clair) pour chacune des latitudes 0,25 et 40° en fonction du quantième du jour.

[Annual evolution of the linearity factor KE1 between daily irradiation GJ1 and the added instantaneous radiations EG1(i) computed by clear sky at latitudes 0,25 and 40°.]

Il est possible de considérer un autre coefficient :

$$K1 = GJ1 / (GH1(1) + GH1(2) + GH1(3))$$

qui ne présente qu'un écart relatif de 2 % avec KE1 lorsque la latitude est inférieure à 45°. Dans ces conditions on peut donc confondre l'éclairement à l'heure H avec l'éclairement moyen durant l'heure autour de H.

4. Etude expérimentale.

Les relations que nous venons de proposer ci-dessus ont été établies pour des journées de beau temps. Il est nécessaire de vérifier que l'on peut également les utiliser pour des journées au cours desquelles le ciel est plus ou moins couvert. La modélisation de telles journées quelconques étant difficile, nous avons entrepris d'exploiter un grand nombre de mesures d'irradiations journalières et horaires effectuées dans diverses stations actinométriques. Nous comparons donc le coefficient théorique KE1 à un coefficient expérimental Km tel que :

$$Km = GJm / (GHm(1) + GHm(2) + GHm(3)) .$$

Pour éviter un effet saisonnier nous avons effectué une normalisation pour ne comparer que les atténuations AJm et AJ dont les définitions sont les suivantes :

$$AJm = GJm / GJ1$$

et

$$AJ = KE1 (GHm(1) + GHm(2) + GHm(3)) / GJ1 .$$

Les valeurs numériques de ces deux atténuations restent dans l'intervalle 0,07 à 1,2.

Compte tenu des mesures disponibles dans les stations actinométriques nous avons choisi les irradiations horaires

GHm(1) : entre 8 et 9 h

GHm(2) : entre 11 et 12 h

GHm(3) : entre 14 et 15 h

les heures sont ici en temps solaire vrai.

Les quelque dix mille journées étudiées ont été classées en sept lots principaux :

10 stations françaises année 1984 (1) ; année 1985 (2) ;

10 autres en France année 1984 (3) ; année 1985 (4) ;

station de St-Quentin année 1984 (5) ;

station d'Abidjan 1983-84 (6) ;

station de Niamey 1983-84 (7).

Puis les quatre premiers lots ont été subdivisés en trois classes à l'aide de la fraction d'insolation S (rapport de la durée d'insolation mesurée avec un héliographe à la durée théorique du jour) soit :

$$S \geq 0,7 ; \quad 0,3 < S < 0,7 \quad \text{et} \quad S \leq 0,3 .$$

Pour chaque lot ou classe de journées nous avons systématiquement tracé le nuage de points (AJm, AJ) et calculé :

le coefficient de régression	R
la pente de la droite de régression	c
l'ordonnée à l'origine	d
l'écart type	e

Nous présentons ici à titre d'exemple les résultats obtenus à partir des mesures de rayonnement effectuées en 1984 dans les stations françaises suivantes :

Ajaccio, Perpignan, Carcassonne, Carpentras, Limoges, La Rochelle, Mâcon, Auxerre, Trappes et Caen.

Les points de la figure 2 se rapportent aux 2 374 journées quelle que soit la fraction d'insolation. Le coefficient de régression correspondant est égal à 0,984. Si on sélectionne les journées selon la fraction d'insolation on constate en lisant le tableau II que le coefficient de régression reste voisin de 0,95 tant que la fraction d'insolation S reste inférieure à 0,3 ou supérieure à 0,7. Par contre pour les journées intermédiaires avec passages nuageux, c'est-à-dire quand S reste comprise entre 0,3 et 0,7, le coefficient R devient inférieur à 0,9.

Fig. 2. — Corrélation entre les atténuations des irradiances journalières : AJm mesurées et AJ calculées à partir de la somme des 3 irradiances horaires mesurées.

[Correlation between both daily normalized irradiances : AJm measured and AJ computed from added hourly measured irradiances.]

Tableau II. — Résultats concernant 10 stations en France 1984.

[Results about 10 stations in France 1984.]

Classes	Nombre	R	c	d	e
$S \leq 1$	2 374	0,984	0,96	0,03	0,05
$S \geq 0,7$	869	0,934	0,87	0,12	0,03
$0,3 < S < 0,7$	701	0,881	0,75	0,19	0,05
$S \leq 0,3$	804	0,948	0,88	0,04	0,05

Le tableau III montre que les résultats sont presque identiques pour les trois autres lots importants de mesures de stations françaises. Pour tester l'influence du nombre de mesures sur les résultats nous avons traité à part, à titre d'exemple, un lot réduit de 244 journées de la station de St-Quentin, dans le nord de la France ; le coefficient de régression obtenu est encore égal à 0,983. En ce qui concerne les deux stations africaines les nombres de journées dépouillées sont inférieurs à ceux des lots complets des stations françaises mais du même ordre que celui du lot de St-Quentin. Il semble donc que l'on puisse se satisfaire des résultats obtenus en attendant ceux d'une étude complémentaire. Le coefficient R de Niamey est très voisin de ceux de France. On peut estimer que la valeur plus faible à Abidjan est due aux passages nuageux fréquents et très rapides.

Tableau III. — Divers lots de journées.

[Some sets of days.]

Lots	Nombre	R	c	d	e
1	2 374	0,984	0,96	0,03	0,05
2	2 362	0,981	0,94	0,04	0,05
3	2 177	0,985	0,95	0,03	0,05
4	2 262	0,981	0,95	0,03	0,05
5	244	0,983	0,94	0,03	0,05
6	269	0,937	0,85	0,07	0,06
7	576	0,981	1,06	- 0,06	0,03

5. Précision de la méthode.

La précision a été estimée pour chacune des classes définies plus haut. Pour chaque couple de valeurs mesurée et calculée nous avons calculé l'erreur relative. Pour chaque classe nous considérons d'une part une erreur : e.r.m. égale à la moyenne des valeurs absolues des erreurs relatives et d'autre part l'écart quadratique moyen (e.q.m.). Toutes ces erreurs sont rassemblées dans le tableau IV. La meilleure précision est obtenue lorsque les journées sont relativement homogènes ($S \geq 0,7$). La plus mauvaise correspond aux journées inhomogènes ($S \leq 0,3$) avec une forte nébulosité. Il est à noter que quand on passe de la classe des journées intermédiaires ($0,3 < S < 0,7$) à celle des journées inhomogènes l'erreur e.r.m. telle que nous l'avons définie, augmente alors que l'écart quadratique moyen diminue. Cette différence d'évolution est due au fait que les irradiances des journées inhomogènes sont les plus faibles. On peut globalement considérer que la précision moyenne de 7 % est correcte si on la compare à celle des modèles proposés dans la littérature.

Tableau IV. — *Précision des différentes classes.*
[Accuracy about each class.]

Classes	e.r.m. (%)	e.q.m. (Wh/m ²)
$S \leq 0,3$	11	310
$0,3 < S < 0,7$	8	390
$S \leq 0,7$	3	210
$S \leq 1$	7	310

6. Applications.

Nous avons montré que l'intégration numérique de la courbe de l'éclairement global au cours de la journée pouvait être correctement approchée par la somme des aires de trois rectangles ayant pour hauteur l'irradiation moyenne à chacune des heures H , $H - 3$ et $H + 3$ et pour largeur commune le coefficient $KE1$ fonction de la durée du jour.

Si en un lieu donné on ne dispose, pour chacune des journées d'une séquence, que de trois mesures de rayonnement global réparties autour des heures H , $H - 3$ et $H + 3$ avec H voisin du midi solaire local on peut déterminer une valeur approchée de l'irradiation journalière en effectuant le produit de la somme des trois irradiances horaires par un coefficient $KE1$. Ce coefficient est lui-même calculé soit en utilisant un modèle atmosphérique de beau temps, soit à partir de la durée théorique du jour.

Dans le cas du traitement de l'imagerie satellitaire du type B2 de METEOSAT, qui nous intéresse spécialement pour l'étude du gisement solaire de l'Afrique, une méthode telle que GISTEL [6] ne fournit initialement que trois atténuations instantanées du rayonnement global par jour. Le calcul de l'irradiation journalière présenté ici complète alors la méthode GISTEL.

Il est évident que la précision obtenue dépend beaucoup de la « forme » de la journée solaire. Si le ciel a été régulièrement clair ou couvert la précision sera maximale ; par contre elle sera faible si les passages nuageux ont été irréguliers. Une indication du degré d'irrégularité est donnée par la comparaison des trois atténuations du jour à des intervalles de temps de trois heures. La conservation en mémoire de ces atténuations est aussi utile pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire. Dans l'estimation du gisement solaire par une méthode satellitaire l'imprécision due à l'instantanéité de l'information locale est compensée par la connaissance des atténuations en des points dont la distance au lieu étudié est de l'ordre de 30 à 40 km.

Remerciements.

Les auteurs remercient d'une part J. L. Plazy de l'A.F.M.E. de leur avoir communiqué les données des stations françaises et d'autre part la direction de l'organisme international AGRHYMET pour les mesures effectuées à Niamey.

Bibliographie

- [1] DELORME C., Le Gisement Solaire (G.D.T.A. Toulouse) 1987, p. 188.
- [2] TUZET A., MOSER W., RASCHKE E., *J. Rech. Atmos.* **18** (1984) 31-39.
- [3] DEDIEU G., DESCHAMPS P. Y., KERR Y. H., *J. Climate Appl. Meteor.* **26** (1987) 79.
- [4] CANO D., MONGET J. M., ALBUISSON M., GUILLARD H., REGAS N., WALD L., *Sol. energy* **37** (1986), 31-39.
- [5] W. M. O. Meteorological aspects of the utilization of Solar Energy as an energy source, Technical Note N° 172 (1981).
- [6] DELORME C., GROS N., *Veille Climatique Satellitaire* **18** (1987).