

Choix d'un Modèle d'Ensoleillement et Détermination des Inclinaisons Optimales des Capteurs Héliothermiques pour la Ville de Gabès en Tunisie

Ridha Fethi Mechlouch, Atef El Jery et Ammar Ben Brahim

Unité de Recherche : Thermodynamique Appliquée, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès,
Rue Omar Ibn Elkhattab, 6029 Zrig, Gabès (Tunisie).

Résumé – Suite à une revue des principaux travaux effectués sur les capteurs héliothermiques plans et les modèles solaires, nous avons procédé au choix d'un modèle d'ensoleillement pour la prédiction de la densité du flux solaire global de la ville de Gabès (Tunisie). Une fois choisi le modèle, EUFRAT, d'ensoleillement ont été déterminées les inclinaisons optimales que peuvent prendre les capteurs héliothermiques, pour une bonne captation de l'énergie solaire, dans cette ville. Ces inclinaisons optimales ont été traduites par une relation les reliant au quantième du jour de l'année. En dernier elle a été définie la fonction gain d'énergie qui a été reliée au quantième du jour de l'année et à l'angle optimal.

Abstract – Following to a main work done on various collector systems and solar models, we proceeded to choose a model to predict global solar irradiance to Gabes city (Tunisia). Once EUFRAT model was chosen, the optimal tilt angle had been determined for a good captation of the solar energy in this city. These optimal tilt angles have been translated by a relation joining them to the quantum of the year. Finally it has been defined the function gain of energy that has been joined to the quantum of the year and the optimal tilt angle.

Mots clefs: Solaire – Energie – Capteur – Modèle – Optimisation.

1. INTRODUCTION

Plusieurs travaux ont été menés pour améliorer le rendement des capteurs héliothermiques. Ces travaux ont concerné le flux d'air et la modélisation du transfert thermique [1-3], la géométrie du capteur [4-11], l'illumination de l'effet de serre [12] ou l'utilisation des revêtements sélectifs [13-15]. Le coefficient d'échange et le coefficient d'absorption ont été aussi étudiés en fonction de la vitesse du vent et de la position du capteur [16].

Pour le même objectif d'autres travaux ont concerné l'optimisation de l'angle d'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale en vue d'améliorer la captation de l'énergie solaire. Pour cela plusieurs modèles de calcul du flux solaire ont été utilisés.

Parmi ces modèles on trouve celui de Liu et Jordan [17] qui a établi une relation entre l'indice de nébulosité et l'indice de clarté. Ce modèle a été ensuite développé par Klein [18].

Desnica et al [19] ont présenté une nouvelle méthode, pour le calcul du flux solaire à différentes inclinaisons, ils ont proposé une modification sur les corrélations de Liu-Jordan et celles de Klein en tenant compte de la transmissivité atmosphérique. Les calculs ont été faits pour deux régions différentes en Yougoslavie. De bons résultats ont été obtenus pour différentes inclinaisons du capteur.

Ma et Iqbal [20], ont fait la comparaison de trois modèles : Modèle isotropique [20], modèle de Hay [21] et celui de Klucher [22] pour l'estimation de la radiation solaire sur un plan incliné et pour la région de Ontario (Canada). Ils ont montré que les deux derniers modèles conviennent et peuvent ainsi être utilisés pour cette région.

Gopinathan [23] a utilisé deux modèles pour calculer le flux solaire global reçu sur un plan incliné dans les régions de Lesotho et d'Afrique du sud. Le premier modèle est celui de Liu et Jordan [18] et le second est celui de Hay [21]. La comparaison des valeurs théoriques et expérimentales des flux a permis de retenir le modèle de Liu et Jordan.

Suite à une étude expérimentale et statistique Idlimam et al [24] ont proposé des corrélations empiriques pour le calcul des flux solaires globaux et diffus. Les valeurs numériques calculées des flux globaux et diffus arrivant sur un plan horizontal et sur des plans inclinés sont en accord avec les valeurs expérimentales. Ces valeurs sont utilisables pour la conception de systèmes solaires pour la ville de Marrakech (Maroc).

Les modèles EUFRAT [25], DELORME [26], introduisent le facteur de trouble et la masse atmosphérique alors que celui de ASHRAE [27] et adopté pour des conditions moyennes de trouble. Ces modèles sont utilisés dans la zone méditerranéenne.

2. MODELES DE CALCUL DE LA DENSITE DU FLUX SOLAIRE GLOBAL DE LA VILLE DE GABES.

Disposant des données météorologiques de l'année 1997 pour la ville de Gabès nous avons procédé à un choix d'un modèle d'ensoleillement pour cette ville. Les modèles ASHRAE, EUFRAT et DELORME ont été testés pour l'année 1997 qui est caractérisée par un état du ciel très varié (la nébulosité varie de 0 à 8). Les procédures ainsi que les équations nécessaires au calcul de la densité du flux solaire global de la ville de Gabès sont présentées pour chacun des trois modèles, après l'introduction des équations communes aux trois modèles. Vu que l'angle optimal et le gain d'énergie seront calculés par la suite à Midi Solaire Vrai (flux maximal), la sélection du modèle est faite sur la base d'un calcul du flux solaire global instantané, et pour tous les jours de l'année.

2.1. Equations communes aux trois modèles

Les trois modèles nécessitent le calcul de (u):

- la déclinaison:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \cdot \left(\frac{284 + q}{365} \right) \right) \quad (1)$$

- temps solaire vrai :

$$TSV = TU + CC \quad (2)$$

- l'angle horaire

$$\omega = 15 \cdot (12 - TSV) \quad (3)$$

- la hauteur du soleil:

$$\sin h = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (4)$$

2.2. Modèle Delorme pour le calcul du flux solaire global de la ville de Gabès

2.2.1. Hypothèses du modèle

La détermination des composantes instantanées et quotidiennes de l'éclairement solaire, pour ce modèle, suppose:

- un ensoleillement réparti de façon uniforme le long de la journée ;
- que le rayonnement diffus est indépendant de l'azimut du capteur.

2.2.2. Détermination du flux global solaire

La détermination du flux global solaire (G_h) nécessite la connaissance, en plus, des grandeurs calculées par les équations communes aux différents modèles, celles nécessaires au calcul de (u) :

- la durée maximale d'ensoleillement:

$$SS_0 = \left(\frac{2}{15} \right) \cdot \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad (5)$$

- facteur d'insolation:

$$F = \frac{SS}{SS_0} \quad (6)$$

- la hauteur d'eau condensable:

$$\omega_s = 0,17.TV \quad (7)$$

- la masse atmosphérique traversée:

$$m = m' \cdot \left(1 - \left(\frac{Al}{10000} \right) \right) \quad (8)$$

$$\text{avec } m' = f(\sinh) \quad (\text{Annexe A(A-1)})$$

- la puissance du rayonnement direct non absorbé par les gaz:

$$P_1 = 0,38.(\ln(m.\omega_s))^3 - 3.(\ln(m.\omega_s))^2 - 42.\ln(m.\omega_s) + 1230 \quad (9)$$

- la puissance du rayonnement direct diffus par les molécules:

$$P_2 = 37,3.(\ln(m))^2 + 107.\ln(m) + 130 \quad (10)$$

- coefficient de trouble:

$$\beta = \beta_0 + 0,005N \quad (11)$$

- la fraction du rayonnement direct transmise après diffusion par les aérosols:

$$F_1 = f(m, \beta) \quad (\text{Annexe A(A-2)}) \quad (12)$$

- rayonnement direct- normal:

$$I_o = (P_1 - P_2)F_1 \quad (13)$$

- rayonnement diffus horizontal:

$$D_o = 0.5.(P_1 - I_o).\sinh \quad (14)$$

- rayonnement global horizontal:

$$G_o = I_o.\sinh + D_o \quad (15)$$

- rayonnement direct corrigé :

$$I_d = f(I_o, F, N) \quad (\text{Annexe A(A-3)}) \quad (16)$$

- rayonnement diffus corrigé:

$$D_h = f(D_o, G_o, F) \quad (\text{Annexe A(A-4)}) \quad (17)$$

- rayonnement global corrigé:

$$G_h = I_d.\sinh + D_h \quad (18)$$

Donc l'utilisation dans l'ordre des équations 1 à 18 permet d'atteindre les valeurs numériques de G_h .

Remarquons à ce niveau que pour ce modèle les rayonnements solaires sont corrigés par rapport à un état du ciel clair en introduisant le paramètre nébulosité (N) ou fraction d'insolation dans les équations 16 à 18.

2.3. Modèle ASHRAE pour le calcul de la densité du flux solaire global de la ville de Gabès

Ce modèle est adopté pour des conditions moyennes de troubles atmosphériques, il permet de calculer, avec une heure généralement comme pas de temps, les éclaircissements instantanés.

2.3.1. Détermination du flux global solaire

La détermination du flux global solaire nécessite en plus des grandeurs qui peuvent être déterminées par l'utilisation des équations communes aux trois modèles, celles qui sont déterminées par les équations suivantes relatives au calcul de (u) :

- rayonnement direct en incidence normale:

$$I_n = A_1 \cdot \exp\left(\frac{A_2}{\sinh}\right)^{(*)} \quad (19)$$

- rayonnement diffus horizontal:

$$D_h = A_3 \cdot I_n^{(*)} \quad (20)$$

- rayonnement global horizontal:

$$G_h = I_n \cdot \sinh + D_h \quad (21)$$

(*) Les valeurs de A_1 , A_2 et A_3 pour les différents mois de l'année sont données dans le tableau 1.

Tableau 1: Valeurs de A_1 , A_2 et A_3 pour les différents mois de l'année[25]

Mois	A_1 (W/m ²)	A_2	A_3
Janvier	1230	0.142	0.058
Février	1215	0.144	0.060
Mars	1186	0.156	0.071
Avril	1136	0.180	0.097
Mai	1104	0.196	0.121
Juin	1088	0.205	0.134
Juillet	1085	0.207	0.136
Août	1107	0.201	0.122
Septembre	1151	0.177	0.092
Octobre	1192	0.160	0.073
Novembre	1221	0.149	0.063
Décembre	1233	0.142	0.057

2.4. Modèle EUFRAT pour le calcul de la densité du flux solaire global de la ville de Gabès

Le modèle Euftrat est basé sur la synthèse de divers travaux, en particulier ceux de Brichambant, Kasten et Hay [26]. Pour le calcul des éclairagements énergétiques ce modèle fait appel au trouble atmosphérique à travers le facteur de trouble de Linke, β .

Ce facteur est estimé localement grâce à la formule[26]:

$$\beta = 1,6 + 16 \cdot \beta_a + 0,5 \cdot \ln(P) \quad (22)$$

où P est la pression de vapeur d'eau et β_a un coefficient dit, Angström fonction des conditions opératoires. Les valeurs que peut prendre β_a sont récapitulées dans le tableau 2.

Tableau 2: valeurs du coefficient β_a [26]

Type de ciel clair	β_a
Bleu profond	0,02
Bleu pur	0,05
Bleu clair	0,1
Bleu laiteux	0,2
Blanchâtre	0,5

2.4.1. Détermination de la densité du flux solaire global de la ville de Gabès

La détermination de la densité du flux solaire global (G_h) nécessite la détermination en plus des grandeurs calculées par les équations communes aux différents modèles, l'utilisation de l'équation 22 et celles nécessaires au calcul de (u):

- coefficient de correction de distance terre-soleil:

$$\alpha = 1 + 0,034 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot q}{365}\right) \quad (23)$$

- la masse atmosphérique traversée:

$$AM = \frac{(1 - 0,1 \cdot AI)}{\sinh} \quad (24)$$

- la densité du rayonnement direct en incidence normale:

$$I_n = I_0 \cdot \alpha \cdot \exp\left(\frac{-AM \cdot \beta}{0,9 \cdot AM + 9,4}\right) \quad (25)$$

- la densité du rayonnement global horizontal:

$$G_h = \alpha \cdot (1270 - 56 \cdot \beta) \cdot (\sinh)^{\frac{\beta+36}{33}} \quad (26)$$

2.4.2. Interprétations

Est reporté sur les figure 1, 2 et 3 la variation de la densité du flux solaire global calculé en fonction de la densité du flux solaire global expérimental. Les courbes de tendance des trois modèles ont été obtenus en utilisant toutes les données expérimentales de l'année 1997, toutefois pour une clarté de présentation seuls quelques points expérimentaux ont été reportés sur ces graphes. L'examen de ces figures montre que ces trois modèles conviennent pour traduire la densité du flux solaire global de la ville de Gabès. Toutefois c'est au modèle

EUFRAAT que correspond le coefficient de corrélation le plus proche de 1. Pour cela ce modèle est retenu pour le reste du travail.

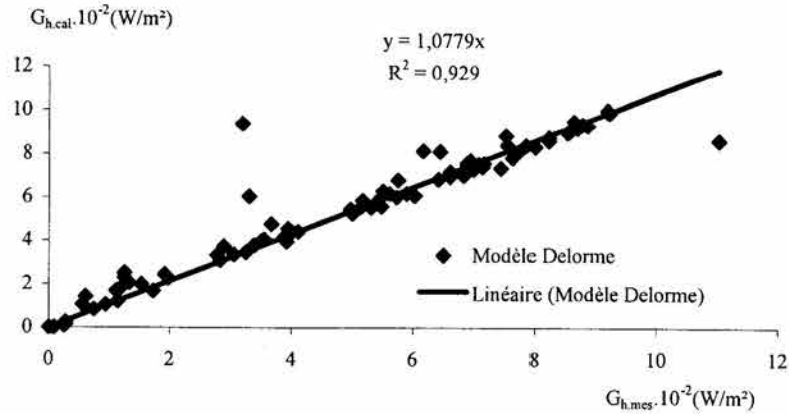


Fig. 1: Variation de la densité du flux solaire global calculée en fonction de la densité du flux solaire global mesurée: modèle DELORME.

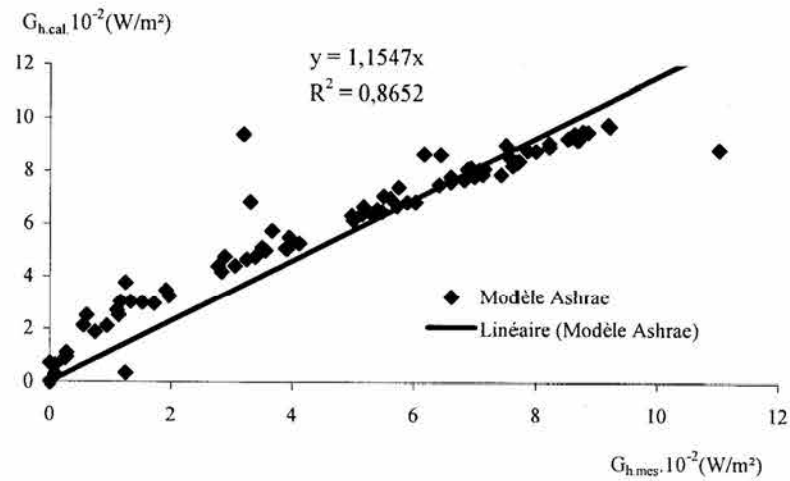


Fig. 2: Variation de la densité du flux solaire global calculée en fonction de la densité du flux solaire global mesurée: modèle ASHRAE.

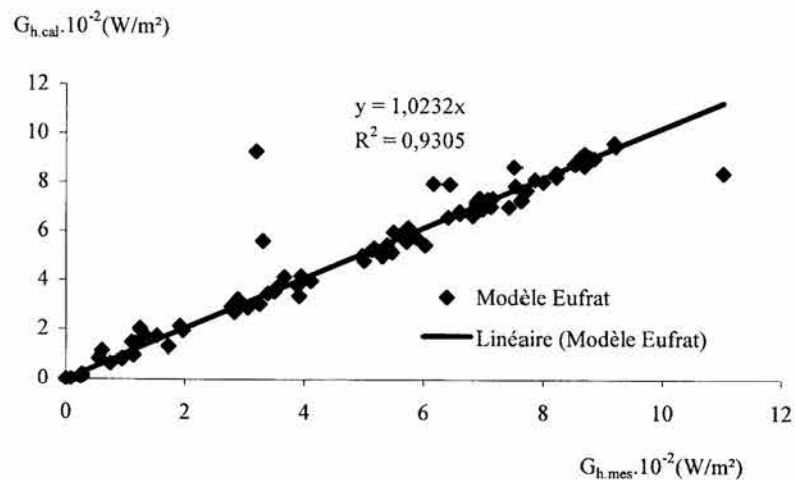


Fig. 3: Variation de la densité du flux solaire global calculée en fonction de la densité du flux solaire global mesurée: modèle EUFRAT.

3. DETERMINATION DE L'ANGLE DE CAPTATION OPTIMAL POUR UN CAPTEUR HELIOTHERMIQUE

Disposant du modèle Eufat pour le calcul de la densité du flux solaire global de la ville de Gabès et sachant que pour qu'un capteur puisse intercepter le maximum d'énergie il est nécessaire de déterminer son inclinaison optimale sachant que pour notre pays (la Tunisie) son orientation recommandée est le plein sud.

Vu que le flux solaire garde des valeurs importantes aux alentours de M.S.V., et qu'un calcul préliminaire a montré que la variation de l'angle optimal dans cet intervalle est faible on a opté à un calcul de l'angle optimal et du gain d'énergie à MSV.

Pour chaque jour q de l'année et à MSV, on calcule le flux global pour des angles d'inclinaison du capteur de 0° à 90° , ce qui nous permet de déterminer l'angle optimal et le gain d'énergie lui correspondant.

3.1. Equations utilisées pour la détermination des inclinaisons optimales

Outre les équations utilisées pour le calcul de la densité du flux solaire de la ville de Gabès viennent s'ajouter les équations suivantes nécessaires au calcul de (u) :

- rayonnement diffus horizontal :

$$D_h = G_h - I_n \cdot \sinh \quad (27)$$

- Facteur de conversion de la fraction isotrope :

$$C_p = \frac{1 - \cos i}{2} \quad (28)$$

- l'azimut :

$$\sin \psi = \frac{\cos \delta \cos \delta_s}{\cosh} \quad (29)$$

- l'angle d'incidence

$$\theta_i = \cosh \cdot \sin i \cdot \cos \psi + \sinh \cdot \cos i \quad (30)$$

- rayonnement diffus sur un plan incliné :

$$D_i = D_h \cdot \left[C_p \cdot F_2 + \frac{(1 - F_2) \cdot \theta_i}{\sinh} \right] \quad (31)$$

avec
$$F_2 = 1 - \frac{I_n}{\alpha \cdot I_0} \quad (32)$$

- rayonnement global sur un plan incliné (G_i) :

$$G_i = I_n \cdot \cos \theta_i + D_i + a \cdot G_h \cdot \left(\frac{1 - \cos i}{2} \right) \quad (33)$$

où a : albédo du sol

3.2. Résultats de calcul des densités du rayonnement global sur un plan incliné (G_i)

Les résultats de calcul des densités du rayonnement global sur un plan incliné (G_i) ont été obtenus pour tous les jours de l'année 1997.

Un exemple de résultats pour le moi d'août est donnée dans le tableau 3.

Tableau 3: Densité du flux solaire global à midi pour différents jours du mois d'août.

i(°)	01-août	05-août	10-août	15-août	20-août	25-août	30-août
0	1024,29	1017,75	1008,22	997,10	984,30	969,74	953,42
10	1052,41	1049,04	1043,98	1037,52	1029,50	1019,84	1008,54
20	1053,53	1053,42	1052,95	1051,29	1048,25	1043,73	1037,75
30	1027,63	1030,75	1034,84	1038,00	1039,99	1040,69	1040,14
40	975,48	981,72	990,21	998,05	1004,96	1010,81	1015,65
50	898,67	907,81	920,42	932,66	944,23	954,99	965,02
60	799,54	811,28	827,58	843,82	859,65	874,94	889,78
70	681,10	695,06	714,53	734,21	753,78	773,08	792,23
80	546,95	562,67	584,68	607,18	629,84	652,52	675,34
90	401,16	418 ;15	441,99	466,58	491,60	516,91	542,63

3.3. Interprétations

Pour qu'un capteur puisse intercepter le maximum d'énergie, il est nécessaire d'optimiser son inclinaison sachant que son orientation recommandée pour un pays comme le notre (LA TUNISIE) est le plein sud.

Pour cela on a déterminé les variations de la densité du flux solaire global en fonction de l'angle d'inclinaison des capteurs pour tous les jours de l'année 1997. Pour illustration nous avons reporté ces variations sur les figures 4, 5, 6 et 7 pour des jours des mois de Février, mai, août et novembre de l'année 1997.

$G_i (W/m^2)$

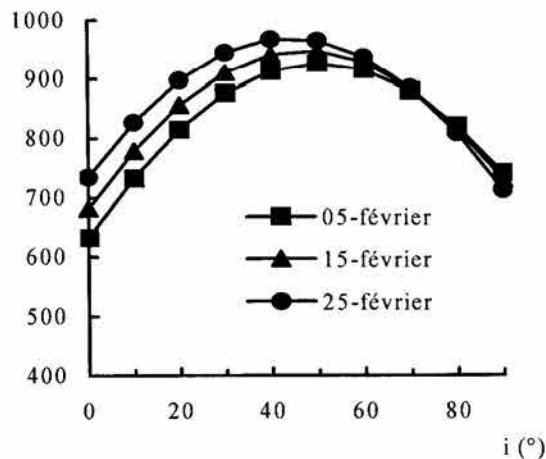


Fig. 4: Variation de la densité du flux solaire global en fonction de l'inclinaison pour trois jours du mois de février.

$G_i (W/m^2)$

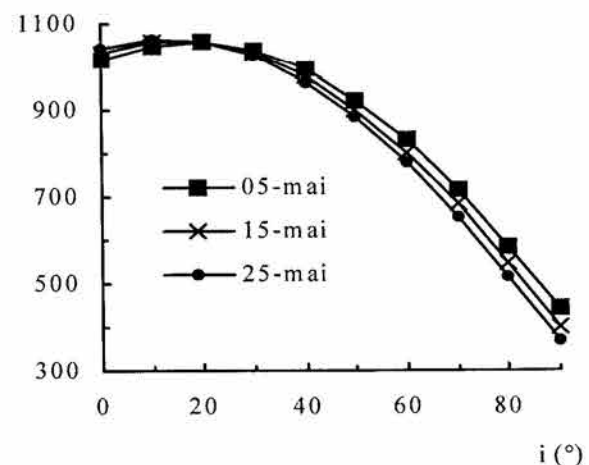


Fig. 5: Variation de la densité du flux solaire global en fonction de l'inclinaison pour trois jours du mois de mai.

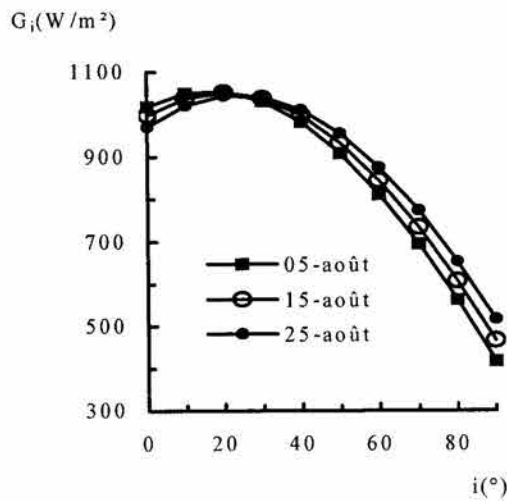


Fig. 6: Variation de la densité du flux solaire global en fonction de l'inclinaison pour trois jours du mois de août.

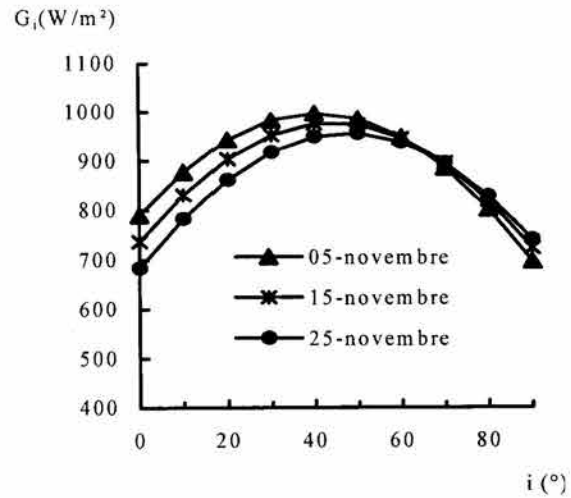


Fig. 7: Variation de la densité du flux solaire global en fonction de l'inclinaison pour trois jours du mois de novembre.

L'ensemble des résultats obtenus nous ont permis de tracer la figure (8) relative à la variation de l'angle optimal ($i_{op}(^\circ)$) pour tous les jours de l'année.

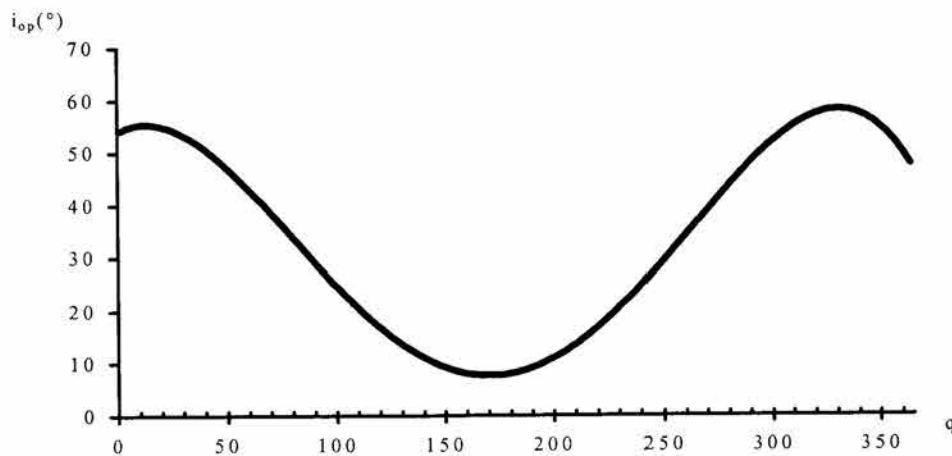


Fig. 8: variation de l'angle d'inclinaison optimal en fonction du quantième du jour de l'année

Remarque : Les jours sont comptés à partir du mois de janvier.

L'examen de cette figure montre que l'angle optimal diminue dans un premier temps en fonction du quantième du jour de l'année, passe par un minimum en été puis augmente jusqu'à la fin de l'année.

Cette variation a été traduite par la relation

$$i_{op} = 18.10^{-4}.q^2 - 0,6112.q + 66,984 \quad (34)$$

dans laquelle i_{op} : angle optimal

et q : numéro du jour de l'année

A l'aide de la relation sus-établie nous avons déterminé les angles optimaux pour tous les mois de l'année. Les valeurs numériques de ces angles sont reportées dans le tableau 4.

Tableau 4: Angle optimal moyen pour les différents mois de l'année.

Mois	Angle optimal (°)	Mois	Angle optimal (°)
Janvier	55	Juillet	8
Février	47	Août	18
Mars	37	Septembre	32
Avril	25	Octobre	44
Mai	13	Novembre	53
Juin	6	Décembre	57

Du fait que les capteurs utilisés dans les installations à conversion thermique ont, généralement, des inclinaisons fixes, il est nécessaire donc de connaître la valeur optimale moyenne annuelle de l'angle d'inclinaison. Pour cela et par simple calcul un angle moyen de 33° a été obtenu pour la ville de Gabès.

Sur la figure (9) on a représenté des courbes dont la variation est proportionnelle à celle de l'énergie reçue par un capteur plan durant toute l'année suivant des angles d'inclinaisons différents, ceci nous a permis de situer l'angle optimal moyen annuel dans l'intervalle 30° - 40° ce qui est conforme avec l'angle 33° calculé auparavant. On remarque que cette valeur est égale environ à la latitude du lieu ($33^\circ 53'$).

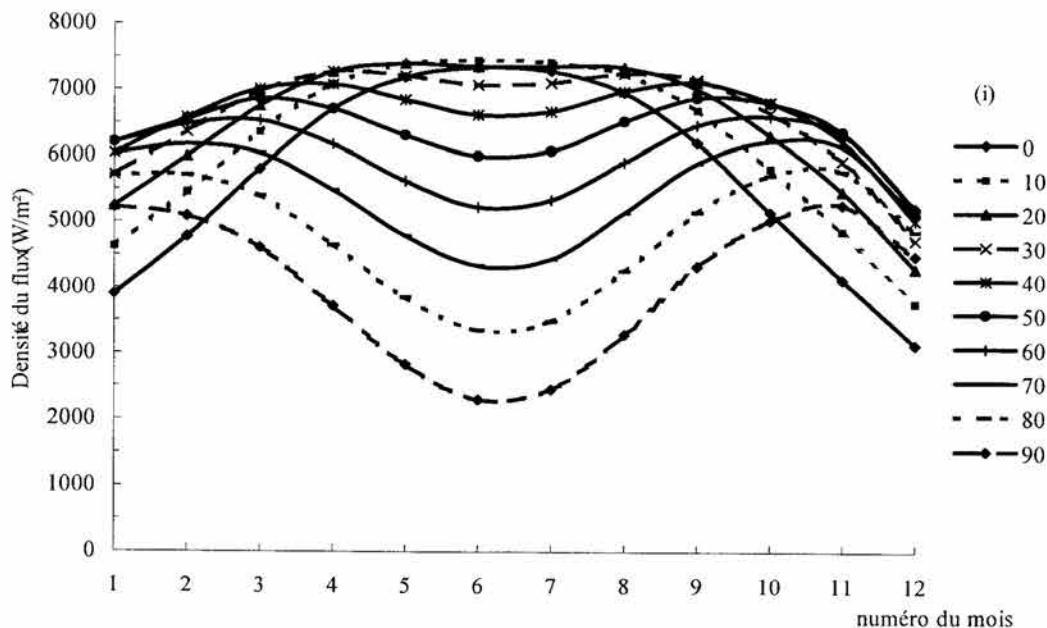


Fig. 9: Flux global en fonction d'angles d'inclinaisons pour des jours dans différents mois de l'année.

Pour mettre, une fois de plus l'intérêt de l'angle d'inclinaison on a défini la fonction gain d'énergie (g) comme étant:

$$g = \frac{G_i - G_o}{G_i} \quad (35)$$

avec G_i : densité du flux solaire global reçu par un plan d'inclinaison i .
 G_o : densité du flux solaire global reçu par un plan horizontal.

Sur la figure 10 on a représenté le gain d'énergie g en fonction du quantième du jour de l'année. L'examen de cette figure montre que le gain d'énergie diminue dans un premier temps, passe par un minimum pour les mois d'été et augmente par la suite.

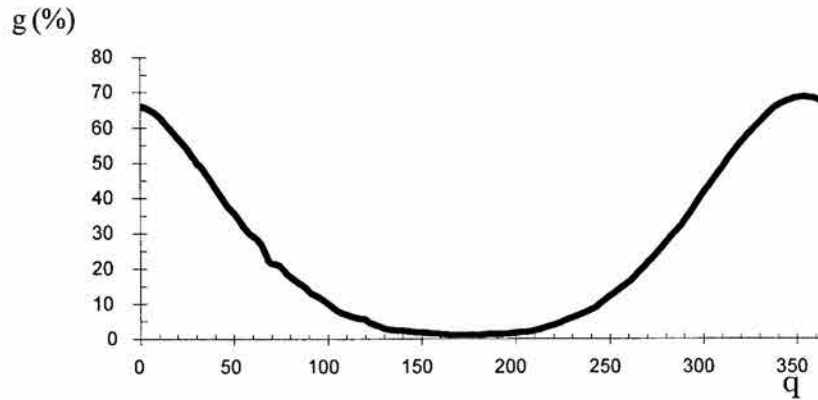


Fig. 10: Gain d'énergie en fonction du quantième du jour

L'examen de la figure (10) montre que le gain d'énergie peut atteindre des valeurs importantes pour les saisons froides, avec un maximum de 68% au mois de janvier. Ce gain décroît rapidement en se rapprochant des saisons chaudes pour prendre des valeurs négligeables de l'ordre de 1,2% au mois de juin. Toutefois il faut signaler que ce gain est instantané calculé pour chaque jour de l'année à MSV. Ce gain d'énergie a été traduit en fonction du quantième du jour de l'année et de l'angle optimal comme ci :

$$g = 0,0023q^2 - 0,7973q + 69,067 \quad (36)$$

et

$$g = 1,0061 \exp(0,0754 i_{op}) \quad (37)$$

4. CONCLUSION

Dans ce travail on a présenté les principaux travaux effectués sur les capteurs héliothermiques plans et les modèles solaires, par suite on a fait le choix d'un modèle pour le calcul du flux solaire global pour la ville de Gabès. Une fois choisi le modèle, EUFRAT, ont été déterminées les valeurs numériques des inclinaisons optimales que doit prendre un capteur héliothermique plan pour intercepter le maximum du flux solaire. Ces valeurs d'inclinaison optimales ont été traduites par une relation les reliant au quantième du jour. En fin, on a défini la fonction gain d'énergie qui a été reliée au quantième du jour de l'année et à l'angle optimal. Quoique la période de calcul soit de courte durée (une année), les corrélations trouvées fournissent une estimation de l'angle optimal et du gain d'énergie avec des précisions suffisantes pour beaucoup d'applications utilisant les capteurs héliothermiques tels que pour le chauffage sanitaire et le séchage.

NOMENCLATURE

a : albédo du sol	AM : masse atmosphérique traversée
Al : altitude du lieu (km)	CC : coefficient de correction de temps
G : gain d'énergie (%)	i : angle d'inclinaison du capteur (°)
h : hauteur du soleil (°)	I_0 : rayonnement direct-normal (W/m^2)
i_{op} : angle optimal (°)	I_d : rayonnement direct corrigé (W/m^2)
N : nébulosité	m : masse atmosphérique traversée
β : coefficient de trouble	P : pression de vapeur d'eau (bar)
β_a : coefficient d'Angström	SS : durée d'ensoleillement mesurée (heure).
ϕ : latitude du lieu (°)	F : fraction d'ensoleillement ou insolation (%).
ψ : azimut (°)	SS ₀ : durée d'ensoleillement maximale (heure).
ω : angle horaire (°)	q : quantième du jour à partir du premier Janvier.
θ_i : angle d'incidence (°)	C_p : le facteur de conversion de la fraction isotrope
δ : déclinaison (°)	α : coefficient de correction de distance terre-soleil (%)
ϕ_s : hauteur d'eau condensable	D_h : rayonnement diffus reçu par plan horizontal (W/m^2).
D_0 : rayonnement diffus non corrigé reçu par le plan horizontal (W/m^2) .	
$D_i(W/m^2)$: rayonnement diffus reçu par un plan incliné (W/m^2) .	
F_1 : fraction du rayonnement direct transmise après diffusion par les aérosols (%)	
G_0 : densité du flux solaire global reçu par un plan horizontal (W/m^2) .	
G_h : densité du flux solaire global corrigé reçu par un plan horizontal (W/m^2) .	
G_i : densité du flux solaire global reçu par un plan d'inclinaison i (W/m^2)	
P_1 : puissance du rayonnement direct non absorbé par les gaz (W/m^2)	
P_2 : puissance du rayonnement direct diffus par les molécules (W/m^2)	

Indices

d : direct	h : horizontal
i : incliné	

REFERENCES

- [1] S. Satcunanathan and S. Deonarine, "A two-pass solar air heater", Solar Energy 15 (1973) 41.
- [2] Y. Caouris et al., "A novel solar collector", Solar Energy 21 (1978) 157.
- [3] N. E. Wijesundera, Lee Lee Ah and Lim Ek Tjioe, "Thermal performance study of two-pass solar air heaters", Solar Energy 14 (1975).
- [4] R. Cadiergues, Colloque Avignon. CSTB (1978).
- [5] G. Francia, Solar Energy. 12 (1968) 51.
- [6] H. Buchberg, D. A. Lalude and D. K. Edwards, Solar Energy 13 (1971) 193.
- [7] H. Buchberg and O. A. Lalude, Solar Energy 13 (1971) 223.
- [8] E. Rauzier, "Experimentation des capteurs solaires à air à absorbeurs poreux", Rev.Phys.Appl.15 (1980) 411-415.
- [9] W. A. Beckman, J. Eng. Power. Trans. ASME series A 90 (1968) 51.
- [10] Y. Hamid and W. A. Beckman, J. Eng. Power. ASME Paper n°69-WA/Sd-6 (1969).
- [11] Y. H. Hamid and W. A. Beckman, J. Eng. POWER (1971) 221.
- [12] G. Guarracino, P. Michel et P. Morand, "Contribution à l'étude des capteurs plans sans vitrage en régime variable", Rev.Gén.Ther. Fr. n°265, janvier 1984.
- [13] G. Gouhman, M. Koudrachova, N. Milevskaya et F. Eydinova, "Surfaces sélectives: propriétés optiques et estimation de l'efficacité énergétique dans l'application aux récepteurs solaires", Rev. Phys. Appl. 15 (1980) 393-396.

- [14] B. A. Garf et L. N. Vladimirova, "Changement des caractéristiques techniques de la centrale solaire du type piège à calories dû à l'utilisation des surfaces sélectives", *Héliotechnique*, 5 (1970) 35-41.
- [15] V. A. Bahoum et M. B. Bieckteniev, "Influence des revêtements sélectifs sur le bilan thermique du récepteur solaire", (AN T.S.S.R), FTH et G.N., n°1, 1970.
- [16] A. Kanzari et D. Marchio, "Etude expérimentale d'un capteur aérosolaire", *Rev. Gén. Therm. Fr.* n°265 janvier 1984.
- [17] B. Y. Liu and R. C. Joran, "The interrelation ship and caracteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation", *Solar Energy* 4 (1960) 1-19.
- [18] S. A. Klein., "Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces", *Solar energy* 19 (1977) 325-329, and 20 (1978) 441.
- [19] U. V. Desnica, B. G. Petrovic and D. Desnica, "Calculation of monthly average daily insolation on tilted, variously oriented surfaces using analytically weighted Rb factors", *Solar Energy*, vol.37, 2 (1986) 81-90.
- [20] C. C. Y. Ma and M. Iqbal., "Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces", *Solar Energy*, vol.31, 3 (1983) 313-317.
- [21] J. E. Hay, "Study of short wave radiation on non-horizontal surfaces", Rep.79-12, Atmospheric Environment service, Downsview, Ontario 1979.
- [22] T. M. Klucher, "Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces", *Solar energy*, 23 (2) (1979) 111-114.
- [23] K. K. Gopinathan, "Solar radiation on inclined surfaces", *Solar Energy*.45 (1990) 19-25.
- [24] A. Iddimam, A. Jamali, M. Kaoua et M. Fliyou, "Etude expérimentale et statistique des puissances solaires à la ville de Marrakech", Congrès sur l'énergie solaire, Tétouan, Maroc, 2002.
- [25] C. Delorme et D. Mercier, Analyse statistique des processus météorologiques appliquée à l'énergie solaire, Edition du CNRS, France 1979.
- [26] B. Bourges, Climatic data hand book for Europe, p.285, édition Kluwer Dordrecht 1992.
- [27] P. De. Brichambaut, AFEDES-supplément cahiers N°1-1975.

ANNEXE A

A-1 Expression de m' [26]

Domaine de variation de $\sinh$	Expression de m'
$0 - 0,0437$	$m' = -413,6 \cdot \sinh + 35,2$
$0,0437 - 0,0785$	$m' = 3,94351 / \sinh$
$0,0785 - 0,14$	$m' = 1,2486 + 0,788 / \sinh$
$0,14 - 0,34$	$m' = 1,04573 / (\sinh)^{0,958}$
$> 0,34$	$m' = 1 / \sinh$

A-2 Expression de F_1 [26]

Domaine de variation de $m \cdot \beta$	Expression de F_1
$m \cdot \beta < 0,5$	$F_1 = 0,251 - 0,3356 \cdot \ln(m \cdot \beta)$
$m \cdot \beta > 0,5$	$F_1 = 0,1933 - 0,4862 \cdot \ln(m \cdot \beta) - 0,1022 \cdot (\ln(m \cdot \beta))^2$

A-3 Expression de I_d [26]

Domaine de variation de F (fraction d'insolation)	Expression de I_d
$F < 0,9$	$I_d = I_0 \cdot F \cdot (1 - 0,00247 \cdot N)$
$F \geq 0,9$	$I_d = I_0 \cdot F$

A-4 Expression de D_h [26]

Domaine de variation de F (fraction d'insolation)	Expression de D_h
$F < 0,025$	$D_h = 0,1 \cdot G_o$
$F > 0,025$	$D_h = G_o \cdot F + 0,37 \cdot G_o \cdot (1 - F) / (1,5 - F)$