



# Influence de l'Angle d'Incidence Modifié sur les Performances Thermiques des Capteurs Solaires Plans

K. Kaci<sup>1</sup>, N. Kasbadji Merzouk<sup>2</sup>; M. Merzouk<sup>3</sup>; S. Hakem<sup>1</sup>; S. Mecheri<sup>1</sup>; S. Kherour<sup>4</sup>

[kkaci2001@yahoo.fr](mailto:kkaci2001@yahoo.fr)

[nkmerzouk@gmail.com](mailto:nkmerzouk@gmail.com)

<sup>1</sup>Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, Bouzaréah, Alger, Algérie

<sup>2</sup>Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES, Bou Ismail, W. Tipaza, Algérie

<sup>3</sup>Département de génie mécanique, université Saad Dahleb, W. Blida, Algérie

<sup>4</sup>Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables, W. Ghardaïa, Algérie

**Abstract**— L'angle d'incidence et la courbe caractéristique de rendement permettent d'établir les performances thermiques instantanées d'un capteur solaire plan. Sur la base des résultats ces tests, on peut estimer aisément le rendement journalier d'une installation.

Le but du présent travail est la détermination de l'influence de l'angle d'incidence modifié sur le rendement d'un capteur solaire plan. Pour cela, un modèle mathématique a été développé pour déterminer le rendement théorique instantané d'un capteur solaire plan en fonction d'un paramètre appelé facteur  $K_{\tau\alpha}$  fonction de l'angle d'incidence du soleil. Ce dernier est directement lié à l'angle d'inclinaison du capteur solaire par rapport à l'horizontal. La dépendance du facteur  $K_{\tau\alpha}$ , de l'angle d'inclinaison du capteur a été modélisée afin de montrer le degré d'influence de l'inclinaison sur le rendement optique du capteur à l'échelle de la journée.

Une expérimentale a été menée pour déterminer la courbe de l'angle d'incidence modifié en fonction de l'angle d'inclinaison du capteur solaire plan et valider les résultats de simulation.

**Keywords**— Capteur solaire plan ; rendement, angle d'incidence modifié, angle d'inclinaison du capteur

## I. INTRODUCTION

L'angle d'incidence du soleil par rapport à un plan incliné joue un rôle important dans la détermination de la quantité d'énergie transmise par la vitre et absorbée par la plaque.

Etant donné que cet angle varie le long de la journée, les performances journalières varient simultanément, d'où l'introduction du facteur  $K_{\tau\alpha}$  permettant la correction des performances le long de la journée.

Par ailleurs, l'angle d'incidence est fonction de différents angles définissant la position du soleil, d'où la dépendance directe de l'énergie absorbée en fonction de l'angle d'incidence modifié permettant la détermination du rendement du capteur le long de la journée

## II. PARTIE THEORIQUE

La quantité d'énergie transmise et absorbée respectivement par un capteur solaire plan couvert à travers respectivement le vitrage et l'absorbeur est fonction de l'éclairement solaire global  $I_g$ , du coefficient de transmission du verre  $\tau$ , du coefficient de réflexion  $\rho$  et du coefficient d'absorption de l'absorbeur  $\alpha$ . Ces paramètres permettent aussi la détermination de l'angle d'incidence  $\theta$ .

La quantité d'énergie transmise et absorbée par la plaque absorbante d'un capteur solaire plan s'écrit [1]:

$$S(\theta) = (\tau\alpha)_{\text{eff}}(\theta) I_g \quad (1)$$

Avec  $(\tau\alpha)_{\text{eff}}(\theta)$  est le coefficient de transmission-absorption effectif du capteur, fonction de l'angle d'incidence et  $I_g$  l'éclairement solaire globale reçu sur le capteur.

Pour déterminer le facteur de correction, on doit estimer les facteurs définis précédemment.

La réflectivité directionnelle  $\rho(\theta)$  est donnée par les formules de Fresnel, tel que [2],:

$$\rho_{//}(\theta) = \frac{\tan^2(\theta - \theta_r)}{\tan^2(\theta + \theta_r)} \quad (2)$$

Pour une onde polarisée perpendiculairement au plan d'incidence. La composante perpendiculaire s'écrit [3]:

$$\rho_{\perp}(\theta) = \frac{\sin^2(\theta - \theta_r)}{\sin^2(\theta + \theta_r)} \quad (3)$$

La réflexion totale de la vitre non absorbante est égale à :

$$\rho(\theta) = \frac{1}{2} [\rho_{//}(\theta) + \rho_{\perp}(\theta)] \quad (4)$$



## Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

### The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



L'absorption du verre est exprimée par la loi de Bouguer's [4], tel que :

$$\tau_a(\theta) = \exp \left[ \frac{K_x e_v}{\cos(\theta_r)} \right] \quad (5)$$

$K_x$  : Coefficient d'extinction, (m-1).  
 $e_v$  : Epaisseur de la vitre, (m).

La transmittivité totale du vitrage étant alors égale à [5]:

$$\tau = \tau_a \rho(\theta) \quad (6)$$

Le produit ( $\tau\alpha$ ) de toutes les quantités qui traversent la couverture transparente et absorbée par la plaque [6]

$$(\tau\alpha)_{\text{eff}} = \frac{\tau\alpha(\theta)}{1 - \rho_d(1 - \alpha)} \quad (7)$$

En pratique  $\rho_d$  est souvent prise comme étant égal à  $\rho$  (60°).

Le coefficient d'absorption de la plaque est donné par l'expression suivante [5].

$$\alpha = \alpha_n (\cos(\theta))^{0.25} \quad (8)$$

Avec  $\alpha_n$  l'absorptivité de l'absorbant à une incidence normale.

En combinant les expressions précédente le facteur  $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$ , fonction de l'angle d'incidence  $\theta$  s'écrit [7]:

$$(\tau\alpha)_{\text{eff}} = \frac{\alpha_n (\cos(\theta))^{0.25} \left[ \frac{1 \left( \frac{\sin^2(\theta + \theta_r)}{\sin^2(\theta + \theta_r) + \sin^2(\theta - \theta_r)} + \frac{t_g^2(\theta - \theta_r)}{t_g^2(\theta + \theta_r)} \right) \exp \left( \frac{-K_e}{\cos(\theta_r)} \right)}{2 \left[ 1 - \left( \alpha_n (\cos(\theta))^{0.25} \right) \rho_d \right]} \right]}{1 - \left[ \alpha_n (\cos(\theta))^{0.25} \right] \rho_d} \quad (9)$$

$\theta$  : Angle d'incidence de l'éclairement solaire.

$\theta_r$  : Angle de réfraction de l'angle d'incidence.

On détermine l'angle réfraction à partir de la loi de Descartes [2], est pour un même indice du milieu, tel que :

$$\theta_r = \text{Arcsin}(\theta) \quad (10)$$

Par ailleurs, l'angle d'incidence défini à partir de la position du soleil est donné par : [8]:

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\Phi \cos\beta - \sin\delta \cos\Phi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\Phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\Phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \quad (11)$$

Par ailleurs lors des tests, le capteur solaire est orienté face au sud, ce qui entraîne une déviation azimutale  $\gamma$  nulle ( $\gamma=0$ ).

La latitude du lieu d'expérimentation est  $\Phi = 32.38^\circ$  qui correspond à celle de Ghardaïa.

Les tests se sont déroulés du 1 septembre au 31 octobre. La déclinaison du soleil  $\delta$  varie donc de  $6.6^\circ$  à  $-13.8^\circ$  et ce en fonction du numéro du jour dans l'année.

Les tests se sont déroulés à midi TSV plus ou moins une heure, ce qui correspond à  $\omega = 0$  et  $\omega = \pm 15^\circ$  et ce conformément à la norme utilisée.

Lors des tests, l'angle d'inclinaison du capteur a été varié de  $0$  à  $90^\circ$  afin de faire varier l'angle d'incidence.

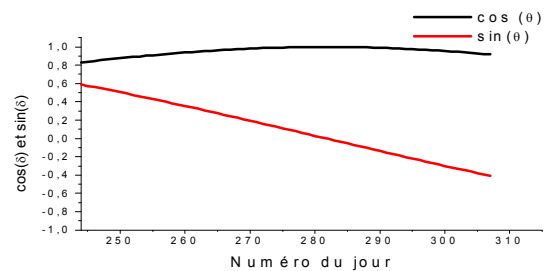


Fig.1 L'évolution  $\delta$  en fonction du numéro du jour

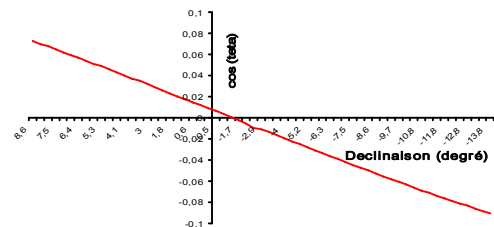


Fig. 2 Evolution de  $\cos(\theta)$  en fonction de  $\delta$



# Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

## The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012

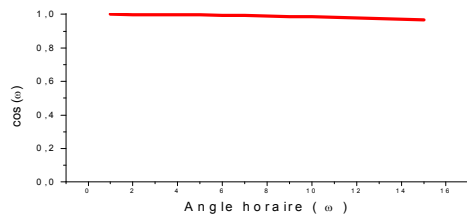


Fig. 3 L'évolution de  $\cos(\omega)$  en fonction ( $\omega$ )

En figure.4 est tracée la variation de  $\cos(\theta)$  en fonction de l'angle d'inclinaison  $\beta$ .

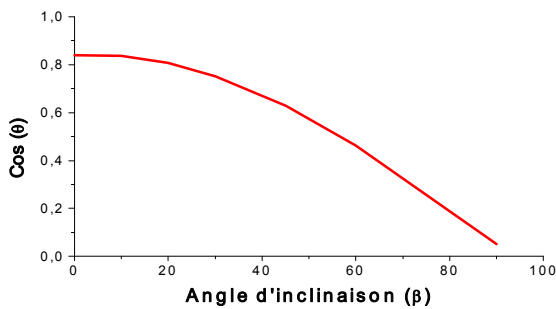


Fig. 4 L'évolution  $\theta$  en fonction de  $\beta$

En figure 5. montre l'évolution de  $\cos(\omega)$  en fonction de  $\cos(\theta)$ .

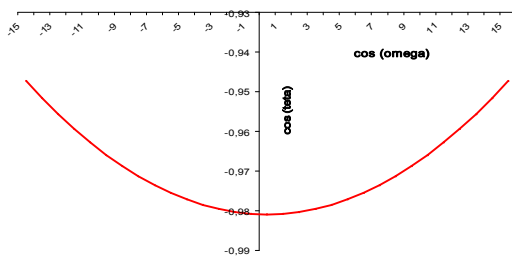


Fig 5. L'évolution de  $\cos(\theta)$  en fonction de  $\cos(\omega)$

Le récapitulatif de la variation des sinus et cosinus des angles intervenant dans l'expression de l'angle d'incidence sont donnés au tableau 2.

Table I

RECAPITULATIF DE L'INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES SUR L'ANGLE D'INCIDENCE

Angle	( $\delta$ )	( $\omega$ )	( $\beta$ )	Cos ( $\theta$ )
$\delta$	-13,8° à 6,6°	0°	32°	-0,08 à +0,08

$\omega$	0°	-15° à +15°	32°	-0,95 à +0,98
$\beta$	0°	0°	0° à 90°	0,05 à 0,84

On remarque que :

1. Les paramètres  $\cos(\delta)$  et de  $\sin(\delta)$  influent peu sur l'expression de  $\cos(\theta)$ .
2. L'influence de la déclinaison du soleil n'influe pas beaucoup sur l'angle d'incidence durant les deux moins de test.
3. La valeur de  $\cos(\theta)$  varie entre la valeur de  $-0.95$  et  $+0.98$ , son minimum est atteint à midi TSV. En effet, ceci indique la faible influence de l'angle horaire sur l'angle d'incidence autour de midi TSV.

### III. PARTIE EXPERIMENTALE

Les tests expérimentaux ont été réalisés au sein de l'unité de recherche appliqué en énergies renouvelables de Ghardaïa sur un banc d'essai en boucle fermée conformément à la norme EN 12975-2-2006 représenté en figure 6.



Fig 6. Photo du banc d'essai

#### A. Zone d'étude :

Le site de Ghardaïa, est caractérisé par un potentiel important en rayonnement solaire, avec un indice de clarté égale à 0.8 [9]. Ces caractéristiques sont :

- Latitude : 32,38°
- longitude : 3.81°
- Altitude : 450m

#### B. Condition de Tests

Les tests se sont déroulés conformément aux normes EN 12975-2. En effet :



## Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

### The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



Deux relevés au environ de midi TSV ( $\theta < 15^\circ$ );  
Deux points supplémentaires le matin et l'après midi ( $40^\circ < \theta < 50^\circ$ ).

L'angle d'incidence a été fixé aux valeurs indiquées grâce à la variation de l'inclinaison du capteur.

- Pour le test de midi TSV. le choix s'est porté sur une inclinaison  $\beta$  égale à latitude de lieu.
- Pour les points du matin où de l'après midi, l'inclinaison du capteur a été varié entre  $32^\circ$  à  $60^\circ$ .

Au moment des essais, l'éclairement solaire totale au niveau du plan d'ouverture du capteur a été maintenu à une valeur supérieure à  $790 \pm 50 \text{ W/m}^2$  et le débit a été stabilisé autour de la valeur de consigne de 187 litre /h à  $\pm 1\%$  près. Au cours du test, ce dernier ne doit pas varier de plus des 10 % de la valeur de consigne lors du passage d'un essai à un autre.

#### C. Résultats et Discussions

Le facteur de correction du rendement ou l'angle d'incidence modifié a été estimé en fonction  $\theta$  et de  $\frac{1}{\cos\theta} - 1$  tel qu :

$$K_{\tau\alpha} = \frac{\eta_i}{\eta(\theta)} \quad (12)$$

$$\left( K_{\tau\alpha} = 1 - b_0 \left( \frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \right) \quad (13)$$

$\eta_i$  : Rendement instantané à une incidence quelconque

$\eta(\theta)$  : Rendement instantané à une incidence normale

Le tableau.1 relève les valeurs expérimentales pour la détermination de l'angle d'incidence modifié du capteur étudié.

Table II

VALEURS EXPERIMENTALES RELEVÉES POUR LE CALCUL DE KTA

$\theta$ (°)	T*(Km <sup>2</sup> /W)	$\eta$	$[(1/\cos\theta)-1]$	$K_{\tau\alpha}$
-55	0.028	0.391	0.6689	0.836
-50	0.034	0.343	0.555	0.734

0	0.076	0.468	0	1
15	0.049	0.452	0.025	0.966
50	0.110	0.320	0.657	0.685
55	0.063	0.327	0.750	0.699

Les résultats de l'angle d'incidence modifié conformément à la norme EN 12975-2 donnés en fonction de :

- L'angle d'incidence  $\theta$ .
- Le coefficient  $[1/\cos(\theta)-1]$ .

L'ajustement des points de mesures de l'angle d'incidence modifié  $K_{\tau\alpha}$  en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$  se présente sous forme parabolique au deuxième ordre, tel que représenté en figure.7.

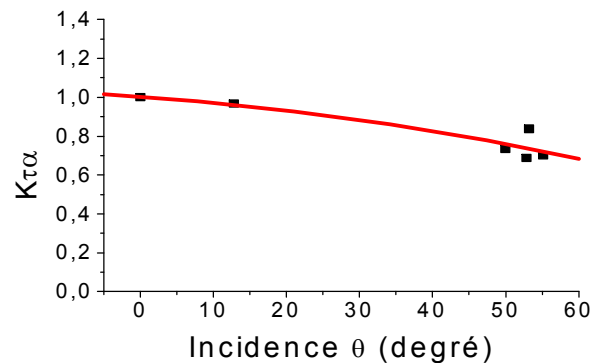


Fig. 7 Angle d'incidence modifié en fonction de  $\theta$

L'équation caractéristique de l'angle d'incidence modifié en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$  est une courbe parabolique au deuxième degré qui atteint son maximum à incidence normale et dont la pente négative varie de 0.9 à 0.8, ce qui caractérise les propriétés des du vitrage et de l'absorbeur du capteur. L'équation s'écrit :

$$K_{\tau\alpha} = 1 - 0.00261 \theta - 0.000448 \theta^2 \quad (14)$$

En figure 8, sont présentés les points de mesure l'angle d'incidence modifié en fonction du facteur  $[(1/\cos(\theta))-1]$ .

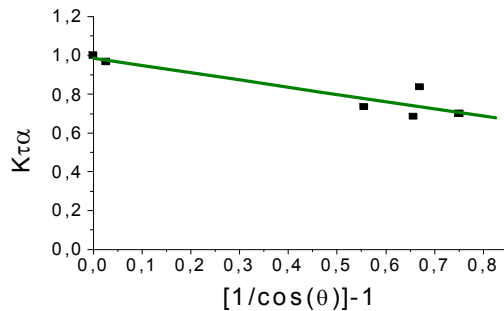


Fig.8 Angle d'incidence modifié en fonction de  $[(1/\cos\theta)-1]$

L'équation caractéristique de  $K\tau\alpha$  en fonction de  $[(1/\cos\theta)-1]$  est une droite tel que :

$$K\tau\alpha = 1 - 0.37 [(1/\cos(\theta) - 1)] \quad (15)$$

Le coefficient de corrélation estimé R est voisin de 0.83.

La valeur maximale atteint la valeur 1, ce qui représente l'incidence normale, c'est une droite d'une pente négative égale à - 0.37, ce qui permet la correction du rendement instantané du capteur le long du jour.

#### IV. Conclusions

L'angle d'incidence modifié,  $K\tau\alpha$  fonction de l'angle d'incidence ( $\theta$ ) et du facteur  $[1/\cos(\theta) - 1]$ , objet de ce travail, a permis la détermination du facteur de correction de la quantité d'énergie absorbée le long de la journée.

Ceci a montré l'importance du facteur de correction du rendement instantané du capteur le long de la journée qui permet l'estimation du rendement journalier du capteur .

Il a été montré aussi que l'inclinaison du capteur est le paramètre essentiel dans la variation l'angle d'incidence ( $\theta$ ), contrairement aux autres paramètres qui influent peu sur ce dernier durant la période des tests.

#### REFERENCES

- [1] Kaci. K « Détermination des performances expérimentales d'un capteur solaire plan selon la norme EN 12975-2 ». 1st International Seminar on Water, Energy and Environment, ISWEE'11, Algiers, Algeria, March 01-03 2011
- [2] Chassériaux J. M « Conversion thermique du rayonnement solaire ». Edition Dunot, France ; (1984)..
- [3] Sfeir A. et Garracino. G « Engineering des systèmes solaires, application à l'habitat ». Edition technique et documentation, Paris ; (1981).
- [4] Duffie J. A et W. A. Beckman « Solar Engineering of Thermal Processes » Université of Wisconsin Madison, Solar Energy Laboratory, USA; (1991).
- [5] Kasbadji. N « Etude théorique et expérimentale des performances instantanées de trois capteurs solaires plan à eau ». Thèse de Magister, HCR ; (1986).
- [6] Merzouk. M « Etude théorique et expérimentale des performances instantanées d'un capteur solaires sous vide ».Thèse de Magister, HCR ; (1986).
- [7] Kaci. K « étude théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan selon la norme EN 12975-2 ; 1er séminaire sur les énergies nouvelles et renouvelables SIENR 2010 ; Ghardaïa 2010.
- [8] Benkaciali. S « Etude expérimentale du coefficient de trouble atmosphérique sur le site de Ghardaïa ». Revue Energies Renouvelables, vol 12, N°4 ; (2009).