



## MODELISATION THERMIQUE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN A EAU

**S.M.A. BEKKOUCHE<sup>(1)</sup>, T. BENOUAZ<sup>(2)</sup>, F. BOUAYAD<sup>(2)</sup>**

<sup>1</sup> Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable. URAER. Ghardaïa. Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire de Physique Electronique et Modélisation, Faculté des Sciences, Université Abou Bakr Belkaïd Tlemcen, Algérie

*Email : smabekkouche@yahoo.fr*

### 1-INTRODUCTION

Le but de cette communication est de présenter trois modèles mathématiques qui décrivent le comportement thermique du capteur. Pour effectuer ce travail, on a adopté une approche théorique (modèle de Capderou) pour le rayonnement solaire durant une période d'ensoleillement (08/06/2006) au niveau de la station de Ghardaïa.

La modélisation mathématique, basée sur la méthode des bilans globaux des énergies, prend en compte les conditions initiales associées au capteur. Les résultats de simulation numérique permettent de découvrir les profils de température de l'absorbeur, le vitrage et le fluide caloporteur.

Au-delà d'un certain point, la présence de nombreux grandeurs ou l'ajout de paramètres supplémentaires, ne font qu'augmenter la complexité du modèle. Ce sont souvent non linéaires et innombrables et présentent en général des effets complexes et surprenants. Donc, il convient de préférer un nombre réduit de paramètres dont les incertitudes ne peuvent qu'oblitérer la qualité du modèle. Une modélisation par la dérivée optimale par exemple, peut faire apparaître les comportements émergents. Elle a été introduite par Benouaz-Arino en 1995, basée sur le principe des moindres carrés et qui permet d'associer une application linéaire. Celle-ci étant conçue comme une alternative à la dérivée au sens de Fréchet, indispensable au cas d'équations comportant des fonctions non régulières et, en général, non dérivables. Ces approches (dérivée optimale et dérivées au sens de Fréchet) sont prédestinées pour évaluer les performances du capteur : rendement instantané, coefficient de pertes thermiques vers l'avant... Les résultats expérimentaux et théoriques seront confrontés.

### 2-IRRADIATIONS REÇUES SUR UN PLAN INCLINÉ

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffusé de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimés par des facteurs des troubles; à partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directes et diffusées par ciel clair. La connaissance de facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les irradiances par ciel clair. Ce facteur est le

rapport entre l'extinction du rayonnement directe traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke

$$T_L^* \text{ par ciel clair est donné par : } T_L^* = T_0 + T_1 + T_2$$

$T_0$  : est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante :

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1(2 + \sin(\varphi)) A_{he} - 0.2 z - (1.22 + 0.14 A_{he})(1 - \sin(h)) \quad (2.1)$$

$$A_{he} = \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right) (j - 121)\right)$$

Z: l'altitude de lieu.

$T_1$  : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère ( $O_2$ ,  $CO_2$ , et  $O_3$ ) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche:

$$T_1 = 0.89^z \quad (2.2)$$

$T_2$  : est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplées à une légère absorption (dépendent la fois de la nature et de la quantité des aérosols). En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom  $\beta$ ,  $T_2$  est donnée par :

$$T_2 = (0.9 + 0.4 A_{he}) (0.63)^{\beta} \quad (2.3)$$

#### 2-1- Le directe

C'est la projection de la composante normale sur un plan incliné.

$$I = I_n \cos(i) = I_0 C_{t-s} \exp\left[-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h)\right)^{-1}\right] \cos(i) \quad (2.4)$$

#### 2-2- Le diffus de ciel

Il est composé de trois parties :

##### a- Composante directe ou circumsolaire

Elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demi angle au sommet compris entre  $3^\circ$  et  $15^\circ$  qui peut être considéré comme provenant exactement du soleil.



$$b = \log(T_L^* - T_0) - 2.8 - 0.5 \log(\sin(h)) \quad a = 3.1 - 0.4b$$

$$\delta_d = I_0 C_{t-s} \exp\left(-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2}\right) \quad (2.5)$$

### b- Composante isotrope

Elle correspond un ciel de luminance uniforme

$$\delta_i = D - \delta_d \sin(h) \quad (2.6)$$

D est le diffus sur un plan horizontal.

### c- Composante du cercle de l'horizon

Provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6°. Elle semble associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques.

$$b = \exp(0.2 - 1.75 \log(\sin(h)))$$

$$a = \log(T_L^* - T_0) - 3.1 - \log(\sin(h))$$

$$\delta_h = I_0 \frac{-0.02}{a^2 + ab + 1.8} \exp(\sin(h)) \quad (2.7)$$

Le diffus du ciel, le rayonnement diffus incident en provenance du ciel.

$$d_{ciel} = \delta_d \cos(i) + \delta_i \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} + \delta_h \cos(\gamma) \quad (2.8)$$

### 2-3- Le diffus du sol

L'albédo du sol  $\rho$  caractérise la réflexion de la lumière incidente. Pour un plan quelconque  $(\alpha, \gamma)$

$$d_{sol} = \delta_a \frac{1 - \sin(\gamma)}{2} \quad \delta_a = \rho G \quad (2.9)$$

### 2-4- Le diffus rétrodiffusé

Le diffus du sol est rétrodiffusé, (diffusé à nouveau par le ciel vers le sol). Selon le raisonnement de Capderou, cette composante a la forme suivante :

$$\delta_i' = 0.9(\rho - 0.2) G \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L^* - T_0}}\right) \quad (2.10)$$

Il est clair que cette composante s'annule pour un albédo égal à 0.2 et par conséquence le diffus rétrodiffusé est nul.

$$D = d_{ciel} + d_{sol} + \delta_i' \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} \quad (2.11)$$

D'où la puissance du rayonnement global incident, à un instant donné sur un plan  $(\alpha, \gamma)$  est :  $G = I + D$  (2.12)

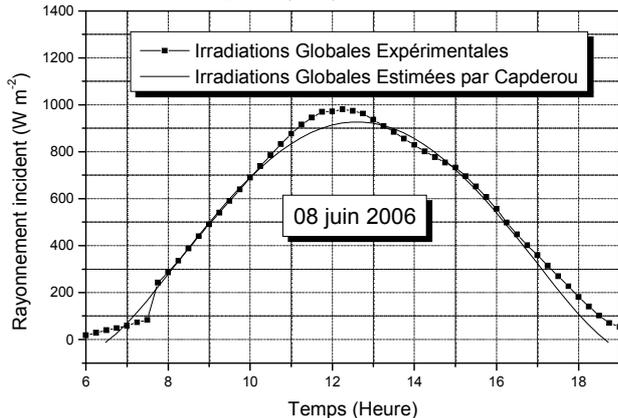


Fig. (2.1) : Irradiations globales incidentes sur le plan incliné du capteur (Ghardaïa, 08/06/2003).

### 3- Etude thermique appropriée

En partant du principe de la variation de l'énergie interne d'un milieu et en développant les différents échanges thermiques au sein de ce milieu, on peut construire un modèle sous forme d'un système d'équations différentielles ordinaires non linéaires avec excitation.

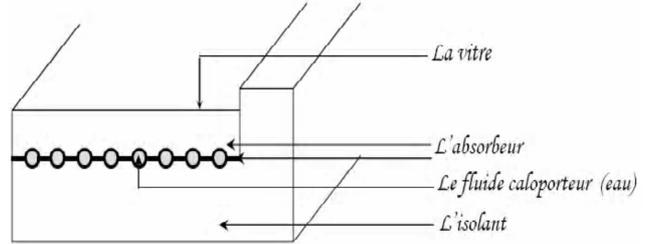


Fig. (3.1) : Coupe longitudinale de notre capteur

### 3-1 Flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le vitrage

$$Q_{c12} = S_1 h_{c12} (T_1 - T_2) \quad h_{c12} = N_u \frac{K_{air}}{b} \quad (3.1)$$

$$N_u = 1 + 1.44 \left(1 - \frac{1708}{G_r P_r \cos \beta}\right) \left(\frac{|x| + x}{2}\right) \left(\frac{|y| + y}{2}\right)$$

$$x = 1 - \frac{1708 \sin(1.8 \beta)}{G_r P_r \cos \beta} \quad y = \frac{(G_r P_r \cos \beta)^{1/3}}{5830}$$

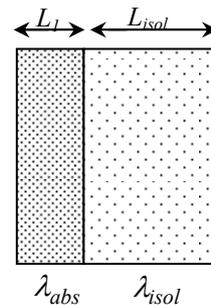
### 3-2 Flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage

$$h_{r12} = \frac{\sigma (T_2 + T_1)(T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad Q_{r12} = S_1 h_{r12} (T_1 - T_2) \quad (3.2)$$

### 3-3 Flux de chaleur échangé par conduction entre l'absorbeur et l'isolant

$$Q_{d14} = \frac{T_1 - T_{isol}}{\frac{L_1}{S_{14}^a \lambda_{isol}} + \frac{L_{isol}}{S_{14}^a \lambda_{abs}}} + \frac{T_1 - T_{isol}}{\frac{L_1}{S_{14}^l \lambda_{isolat}} + \frac{L_{isolat}}{S_{14}^l \lambda_{abs}}} \quad (3.3)$$

Echanges aux niveaux des surfaces horizontales      Echanges aux niveaux des surfaces latérales



### 3-4 Flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur



$$N_u = \frac{\Omega}{8} \frac{(R_e - 10^3) P_r}{1 + 12.7 \left(\frac{\Omega}{8}\right)^{0.5} (P_r^{2/3} - 1)} \left[ 1 + \left(\frac{d_i}{l}\right)^{2/3} \right] \quad (3.4)$$

Cette corrélation est utilisable pour  $0.6 < P_r < 2000$ ,  $2300 < R_e < 10^6$  et  $R_e = \frac{V D}{\mu}$ . Pour un écoulement turbulent hydraulique lisse, le coefficient de Darcy est donné par des relations différentes, suivant le nombre de Reynolds.

$2300 \leq R_e \leq 10^5$ , on applique la formule de Blasius.

$$\Omega = 0.3164 R_e^{-0.25}$$

$10^5 \leq R_e \leq 10^6$ , on applique la relation de Herman.

$$\Omega = 0.0054 + 0.3964 R_e^{-0.3}$$

Le coefficient d'échange de chaleur interne est donné par:

$$h_{c13} = \frac{N_u \lambda}{d_i} \quad Q_{c13} = h_{c13} S_{13} (T_1 - T_3) \quad (3.5)$$

### 3-5 Flux de chaleur incident reçu par l'absorbeur

$$\alpha_1 \tau_2 S_1 G \quad (3.6)$$

### 3-6 Flux de chaleur incident absorbé par la vitre

$$\alpha_2 S_2 G \quad (3.7)$$

### 3-7 Flux de chaleur échangé par convection entre le vitrage et l'air ambiant

$$Q_{c2am} = h_{c2am} S_2 (T_2 - T_{am}) \quad (3.8) \quad h_{c2am} = 5.67 + 3.86 V_{vent}$$

### 3-8 Flux de chaleur échangé par rayonnement entre le vitrage et le ciel

$$Q_{r2ciel} = h_{r2ciel} S_2 (T_2 - T_{ciel}) \quad (3.9)$$

$$h_{r2ciel} = \varepsilon_2 \sigma (T_{ciel} + T_2) (T_2^2 + T_{ciel}^2) \left( \frac{T_2 - T_{ciel}}{T_2 - T_{am}} \right)$$

$$T_{ciel} = 0.0552 T_{am}^{1.5}$$

Le bilan total qui décrit le comportement thermique du capteur, est donné par le système excité suivant :

$$\begin{cases} m_1 C_1 \frac{dT_1}{dt} = \alpha_1 S_1 \tau_2 G - S_1 (h_{c12} + h_{r12}) (T_1 - T_2) \\ \quad - (\psi_1 + \psi_2) (T_1 - T_{isol}) - h_{c13} S_{13} (T_1 - T_3) \\ m_2 C_2 \frac{dT_2}{dt} = \alpha_2 S_2 G + S_1 (h_{c12} + h_{r12}) (T_1 - T_2) \\ \quad - h_{c2am} S_2 (T_2 - T_{am}) - h_{r2ciel} S_2 (T_2 - T_{ciel}) \\ m_3 C_3 \frac{dT_3}{dt} = h_{c13} S_{13} (T_1 - T_3) - h_{c13} S_{34} (T_3 - T_{isol}) \end{cases} \quad (3.10)$$

Au-delà d'une certaine limite, il s'ensuit qu'on peut constituer des fonctions d'interpolation qui évaluent et estiment la température ambiante en fonction du temps.

## 4- Modélisation numérique par deux méthodes

En 1892, Lyapunov a publié sa thèse (Problème général de la stabilité du mouvement) où il a introduit une définition très rigoureuse du problème de la stabilité du mouvement. Cette méthode est basée sur la recherche d'une fonction scalaire de signe défini à valeur réelle. Dans quelques classes de systèmes physiques, elle peut être choisie comme étant l'énergie du système. Malheureusement, la difficulté de la recherche constitue un vrai handicap puisqu'on ne connaît pas de procédé pour la construction dans le cas général; cependant, il existe des techniques de constructions applicables à des cas particuliers. Alors, on peut dire que l'étude de la stabilité dans le cas des systèmes non linéaires pose un problème très difficile; c'est pourquoi, on utilise la méthode la plus classique basée sur la linéarisation.

On précède deux dialectiques de notre système, au terme de laquelle le système tel qu'il est modélisé, peut être conçu comme une abstraction de la dynamique des différentes températures. Cette évolution permet d'aider et de comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système au cours du temps et appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques dans l'objectif d'évoluer différentes décisions.

### 4-1 Présentation de la méthode de la dérivée optimale

On considère l'équation différentielle ordinaire non linéaire de la forme :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = F(x(t)) \\ x(0) = x_0 \end{cases} \quad (4.1)$$

$x \in R^n$ ,  $F$  est définie dans un certain ouvert  $\Omega$  à valeurs dans  $R^n$ , avec les hypothèses suivants:

H1)  $F(0) = 0$ .

H2) Le spectre  $\sigma(DF(x))$  est contenu dans l'ensemble  $z : \text{Re} z < 0$  pour tout  $x \neq 0$  dans un voisinage de 0, où  $DF(x)$  existe.

H3)  $F$  est Lipschitzienne, de constante de Lipschitz  $\gamma$ .

-Première étape : Calcul de  $A_0 = DF(x_0)$

-Deuxième étape : Calcul de  $A_1$  à partir de la solution de l'équation :

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = A_0 y(t) \\ y(0) = y_0 \end{cases} \quad (4.2)$$

En minimisant la fonctionnelle  $A_1$  est déterminée d'une manière unique par la formule :

$$G(A) = \int_0^{+\infty} \|F(y(t)) - A y(t)\|^2 dt. \quad (4.3)$$

$$A_1 = \left[ \int_0^{+\infty} [F(x(t))] [x(t)]^T dt \right] [\Gamma(x)]^{-1} \quad (4.4)$$

Où  $x$  est la solution de l'équation (4.1). On voit ainsi que mis à part la matrice initiale, les matrices déterminées par la procédure ne sont pas les matrices Jacobiennes de  $F$  en un point donné.



Par la suite, il est nécessaire que les conditions du début de cette section soient satisfaites à chaque pas. Si nous supposons que cela est vrai, alors la procédure marche comme suit :

-Troisième étape : Pour calculer  $A_j$  à partir de  $A_{j-1}$ , on doit d'abord résoudre :

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = [A_{j-1}]y(t) \\ y(0) = x_0 \end{cases} \quad (4.5)$$

On note  $y_j(t)$  la solution de l'équation (4.5). En minimisant de nouveau la fonctionnelle

$$G_j(A) = \int_0^{+\infty} \|F(y_j(t)) - Ay_j(t)\|^2 dt. \quad (4.6)$$

et en supposant que  $\Gamma(y_j)$  et inversible, on aboutit à :

$$A_j = \left[ \int_0^{+\infty} [F(y_j(t))][y_j(t)]^T dt \right] [\Gamma(y_j)]^{-1} \quad (4.7)$$

Si  $A_j$  converge vers une matrice  $A$ , on dit que  $A$  est la dérivée optimale de  $F$  en  $x_0$ .

#### 4-2 Modélisation numérique par deux méthodes

Le système (3.10) est un système excité. On peut le réécrire par :

$$\begin{pmatrix} \frac{dT_1}{dt} \\ \frac{dT_2}{dt} \\ \frac{dT_3}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\alpha_1 S_1 \tau_2 G}{m_1 C_1} \\ \frac{S_2}{m_2 C_2} [\alpha_2 G - h_{c2am}(T_2 - T_{am}) - h_{r2ciel}(T_2 - T_{ciel})] \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{m_1 C_1} [S_1(h_{c12} + h_{r12})(T_1 - T_2) + (\psi_1 + \psi_2)(T_1 - T_{isol}) + h_{c13} S_{13}(T_1 - T_3)] \\ \frac{S_1}{m_2 C_2} [(h_{c12} + h_{r12})(T_1 - T_2)] \\ \frac{1}{m_3 C_3} [h_{c13} S_{13}(T_1 - T_3) - h_{c13} S_{34}(T_3 - T_{isol})] \end{pmatrix}$$

La linéarisation de la deuxième partie du système par la méthode de Jacobi (linéarisation au sens de Fréchet) pour des conditions initiales  $(x_0, y_0, z_0) = (51, 28, 48)$  donne une matrice carrée  $DF[(50, 50, 50)]$  qui possède trois valeurs propres négatives. Donc, le système est asymptotiquement stable et fait apparaître l'équilibre comme un nœud stable.  $X_{eq}(50, 50, 50)$  est le point d'équilibre du système.

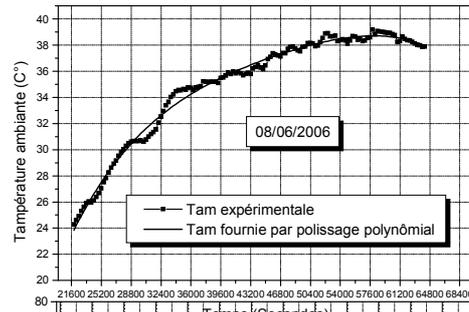
$$DF(X_{eq}) = \begin{bmatrix} -0.00112327 & 0.4718 \cdot 10^{-5} & 0.001012 \\ 1.21915 \cdot 10^{-4} & -1.21915 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0.10484 & 0 & -0.10743 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -0.1084 \\ \lambda_2 &= -0.0002 \\ \lambda_3 &= -0.0001 \end{aligned}$$

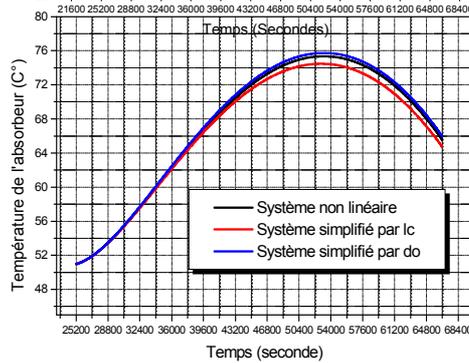
De même, la procédure de calcul de la dérivée optimale donne à l'issue de 16 itérations et pour un  $\varepsilon = 10^{-6}$  une autre matrice carrée qui s'écrit par :

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -0.00111986 & 0.47201 \cdot 10^{-5} & 0.001017 \\ 1.220364 \cdot 10^{-4} & -1.220369 \cdot 10^{-4} & 5.369781 \cdot 10^{-8} \\ 0.104796 & 0 & -0.10742 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

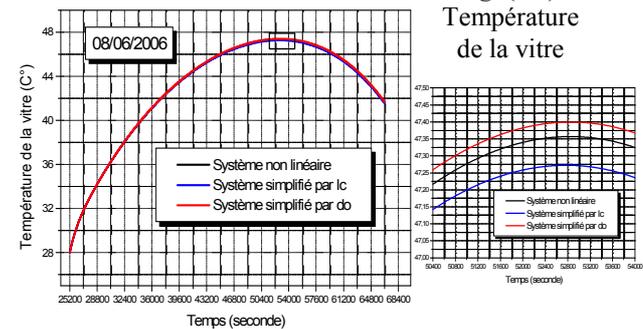
$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -0.1084 \\ \lambda_2 &= -0.0001 \\ \lambda_3 &= -0.0001 \end{aligned}$$



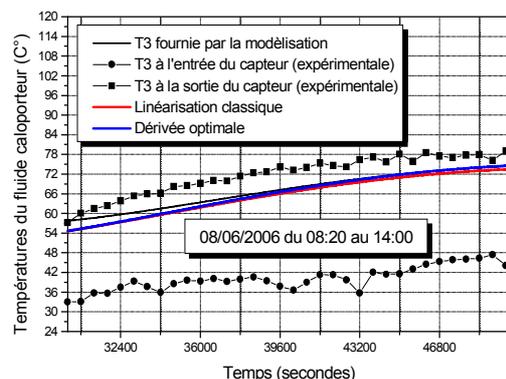
**Fig. (4.1):**  
Température ambiante



**Fig. (4.2):**  
Température de l'absorbeur



**Fig. (4.3):**  
Température de la vitre



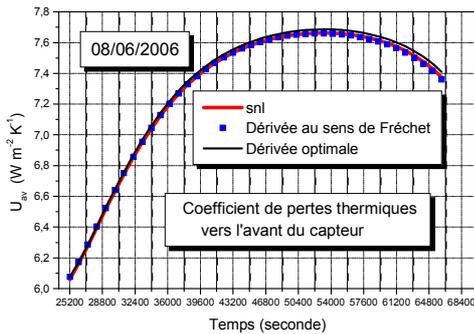
**Fig. (4.4):** Température du fluide caloporteur



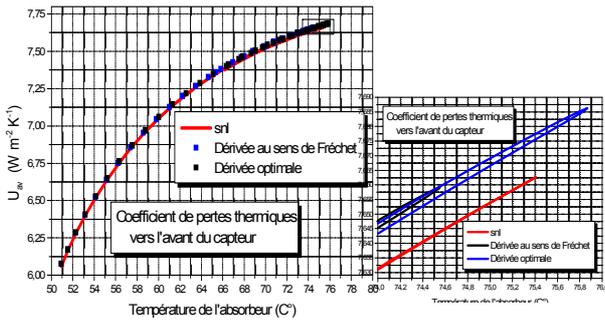
### 5- Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur

En s'appuyant sur le circuit électrique équivalent relative à un capteur solaire plan, on peut identifier le coefficient de pertes thermiques global vers l'avant du capteur:

$$U_{av} = \frac{1}{\frac{1}{h_{r2ciel} + h_{c2am}} + \frac{1}{h_{c12} + h_{r12}}} \quad (5.1)$$



**Figs. (5.1) :** Coefficient de pertes thermiques vers l'avant



**Figs. (5.2) :** Coefficient de pertes thermiques vers l'avant en fonction du température de la plaque

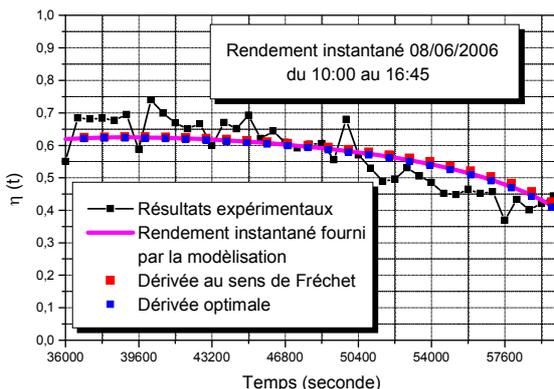
### 6- Rendement instantané du capteur solaire

L'analyse faite dans ce domaine par Hottel, Willier, Wortz et Bliss permet d'aboutir à une équation unique donnant le rendement instantané du capteur que l'on définit par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{\text{Puissance thermique utile par } m^2 \text{ du capteur}}{\text{Flux solaire incident sur le plan du capteur}} = \frac{Q_u}{A_c G}$$

En fonction du débit massique :

$$\eta = \frac{\theta C_p (T_{\text{sortie}} - T_{\text{entrée}})}{A_c G} \quad (6.1)$$



**Fig (6.1) :** Variation du rendement instantané

### 7- Conclusion

La comparaison entre les valeurs du rayonnement global incident sur le plan incliné du capteur prévu par la simulation de Capderou et les mesures effectuées au sein de notre unité (Ghardaïa), montre que la simulation est une bonne approximation de la réalité malgré quelques perturbations climatiques (nuages).

La température de la plaque absorbante est la plus élevée. Ceci peut être justifié par son pouvoir d'absorption qui est important pour le rayonnement solaire.

Une autre étude est consacrée toujours à l'aspect numérique, nous avons réussi d'avoir deux autres modélisations analytiques (approchées) par deux méthodes de linéarisation. La dérivation au sens de Fréchet et la dérivée optimale. Ces approches sont prédestinées pour évaluer les performances du capteur: rendement instantané, coefficient de pertes thermiques vers l'avant en fonction du temps et de la température de l'absorbant.

A la lumière de cette étude, nous voulons montrer qu'une bonne utilisation d'une méthode de linéarisation (choix des conditions initiales et des paramètres climatiques adéquats) permet la description qualitative et quantitative (nature et stabilité du système) du comportement des températures des éléments étudiés.

Les résultats expérimentaux et théoriques ont été confrontés. La concordance s'avère acceptable et les écarts qui existent sont dus d'une part, aux erreurs de mesures, à l'inertie thermique et aux perturbations du système (par des passages nuageux).

### 8- Nomenclature

$G$  : irradiation globale incidente ( $W/m^2$ )

$I_n$  : rayonnement direct ( $W/m^2$ ).

$I_0$ : constante solaire ( $W/m^2$ ).

$C_{t-s}$ : correction du distance terre soleil

### Indice

1 : absorbeur. 2: vitre. 3: fluide caloporteur. am: ambiante  
 isol : isolant.

$T_i$  : température ( $^{\circ}C$ )

$h_{cij}$  : coefficient d'échange par convection ( $W m^{-2} C^{-1}$ )

$h_{rij}$  : coefficient d'échange par rayonnement ( $W m^{-2} C^{-1}$ )

$P_r$  : nombre de Prandtl

$G_r$  : nombre de Grashof

$R_e$  : nombre de Reynolds

$\Omega$  : coefficient de Darcy

$I$  : angle d'incidence (degrés)

$\beta$  : inclinaison du capteur (degrés)

$\alpha_i$  : coefficient d'absorption

$\varepsilon_i$  : émissivité



- $\sigma$  : constante de Stéphane Boltzman ( $W m^{-2} K^{-4}$ )  
 $S_{14}^a$ : surface de contact absorbeur isolant face avant ( $m^2$ )  
 $S_{14}^l$ : surface de contact absorbeur isolant pour la face latérale ( $m^2$ )  
 $S_{13}$  : surface de contact absorbeur fluide caloporteur ( $m^2$ )  
 $S_i$  : surface ( $m^2$ )  
 $\lambda_{isol}$  : conductivité thermique de l'isolant (laine de roche) ( $W m^{-1} C^{-1}$ )  
 $\lambda_{isollat}$  : conductivité thermique de l'isolant (laine de verre) ( $W m^{-1} C^{-1}$ )  
 $\lambda_{abs}$  : conductivité thermique de l'absorbeur ( $W m^{-1} C^{-1}$ )  
 $K_{air}$  : Conductivité thermique de l'air ( $W m^{-1} C^{-1}$ )  
 $L_l$  : épaisseur de l'absorbeur (m)  
 $L_{isol}$  : épaisseur de l'isolant (laine de roche) (m)  
 $L_{isollat}$  : épaisseur de l'isolant latéral (laine de verre) (m)  
 $d_i$  : épaisseur de tube (m)  
 $l$  : longueur du tube (m)  
 $b$  : épaisseur de la lame d'air séparant la vitre de la plaque absorbante (m)  
 $D$  : diamètre du tube (m)  
 $\mu$  : viscosité dynamique de l'eau (Pa s)  
 $V$  : vitesse moyenne du fluide (m/s)  
 $V_{vent}$  : vitesse du vent (m/s)  
 $m$  : masse (kg)  
 $C$  : chaleur spécifique ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )  
 $\theta$  : débit massique (kg/s)

### 9- Bibliographie

- [1] **JM. Chasseriaux**, « Convection Thermique et Rayonnement Solaire ». E.d. Dunod 1984.  
 [2] **JA.Duffie and W.A. Beckman**, « Solar Energy Thermal Processes ». Wiley-Interscience, New York (1974).  
 [3] **T. Cabirol et D. Roux**, « Chauffage de l'Habitat et Energie Solaire ». E disud. Cop 1982, 1984. 2 Vd.  
 [4] **T. Cabirol, A. Pélissou et D. Roux**, « Le Chauffe au Solaire ». E disud. Cop 1980.  
 [5] **M.Capderou**, « Atlas Solaire de l'Algérie». Tome1, voll et 2 : Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.  
 [6] **A.Mefti et al**, « Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie». Rev. Energ. Ren. Vol. 2 (1999) 69-85  
 [7] **Kasten F**, « The Linke Turbidity Factor Based on Improved Values of the Integral Rayleigh Optical Thickness. Solar Energy». Vol 56, N° 3, 239-244 (1996)  
 [8] **T. Benouaz**, «Contribution à l'Approximation et la Synthèse d'une Equation Différentielle Ordinaire Non Linéaire». Thèse de Doctorat d'état, Tlemcen. (1996)  
 [9] **J.P. Demailly**, «Analyse Numérique et Equations Différentielles». (1991)  
 [10] **S. M.A. Bekkouche**, «Contribution à l'Etude de la Stabilité des Systèmes Ratio-Dépendants par la Dérivée Optimale». Thèse de Magister en Physique Electronique et Modélisation. Université de Tlemcen. (1994).



Description du banc d'essai