

## Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire à stockage intégré dans des conditions réelles

B. Chaouachi\* et S. Gabsi

Laboratoire d'Analyse des Procédés  
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès,  
Rue Omar Ibn El Khettab, 6029 Gabès, Tunisie

(reçu le 26 Décembre 2005 - accepté le 21 Juin 2006)

**Résumé** - Le présent travail représente une étude expérimentale d'un chauffe eau solaire à stockage intégré, d'une nouvelle et simple conception, dans un climat tunisien. Ce chauffe eau est équipé d'un système de concentration comportant trois branches paraboliques favorisant une meilleure absorption du rayonnement solaire. Grâce à la libre rotation du système de concentration, on peut minimiser les pertes au moyen d'un dispositif de commande permettant de renverser le système pendant les périodes non ensoleillée. Les résultats expérimentaux ont montré des performances thermiques acceptables malgré la simplicité du capteur. Enfin, une amélioration peut être facilement apportée que ce soit par le perfectionnement de l'isolation thermique ou l'utilisation des surfaces sélectives de captation.

**Abstract** - This work represents an experimental study of an integrated collector/storage solar water heater, with a new and simple design, in a tunisian climate. This water heater is equipped with a concentration system comprising three parabolic branches supporting better solar radiation absorption. Thanks to the concentration system free rotation, we can minimize the losses by means of a control device allowing reversing the system for the no sunny periods. The experimental results showed acceptable thermal performances in spite of the collector simplicity. Lastly, an improvement can be easily made that it is by the improvement of the heat insulation or the use of selective surfaces of collecting.

**Mots clés:** Energie solaire - Chauffe-eau solaire - Performance thermique - Stockage intégré - Amélioration.

### 1. INTRODUCTION

La production d'eau chaude à l'aide des chauffe-eau solaires représente l'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire. Ces chauffe-eau solaires qui permettent d'offrir entre 100 et 200 l/j d'eau chaude environ pour une gamme de température allant de 40-70 °C sont de types à éléments séparés et à stockage intégré (ICS) [1, 2]. Les capteurs plans, les concentrateurs paraboliques (CPC) avec et sans stockage de l'eau sont utilisés dans ces systèmes [3].

Le système à stockage intégré représente une simple construction, installation et manipulation. Il est compact, moins encombrant et esthétiquement meilleur que celui à éléments séparés, mais il est moins utilisé que celui-ci car le réservoir de stockage d'eau chaude présente des pertes thermiques importantes durant la nuit et les périodes de faible ensoleillement. Ceci arrive car la protection totale du réservoir stockeur est difficile étant donné que ce dernier constitue aussi la surface absorbante du rayonnement solaire contrairement au système à éléments séparés ou le réservoir de stockage est totalement isolé thermiquement. Les nouvelles conceptions visent la réduction des pertes avant en intégrant des mécanismes permettant de réduire ces pertes non seulement à la face éclairée mais aussi à l'intérieur des cavités des collecteurs ou sur les surfaces du réservoir de stockage du chauffe-eau à stockage intégré.

Baer [4] prévoit un couvercle, isolant opaque et pivotant, placé sur la face avant du collecteur pendant la nuit et enlevé pendant le jour. Ce dispositif donne de bons résultats, seulement il

---

\* bechi.chaouachi@enig.rnu.tn

demande des interventions manuelles tous les jours. L'utilisation d'une commande automatique de ce couvercle résout le problème de manœuvre et de fiabilité du système mais elle augmente le coût de l'installation et nécessite un entretien poussé et un apport d'énergie électrique pour alimenter le système de commande. D'autres techniques comme l'usage d'une couverture sélective [5], d'un isolant transparent [6-8] et d'un multiple vitrage [9] ont été essayées avec des degrés de succès variables mais ces techniques ont comme conséquence l'augmentation des coûts des installations et la réduction de la fraction d'ensoleillement absorbée dans certains cas. Des nouvelles techniques sont aussi utilisées, l'une consiste en l'emploi d'une enveloppe perforée limitant les pertes thermiques de l'intérieur du réservoir vers ses parois extérieures [10], l'autre prévoit une isolation partielle du réservoir de stockage en sa partie supérieure ce qui réduit les pertes thermiques [11, 12].

La géométrie des réflecteurs et la disposition du réservoir stockeur à l'intérieur de la cavité sont aussi utilisées pour réduire les pertes thermiques en calorifugeant en partie ou en complètement la surface absorbante du réservoir exposée directement au rayonnement solaire [13-16]. Cet arrangement demande une grande réflectivité des miroirs pour maintenir un rendement optique élevé et la disposition horizontale du réservoir réduit la fraction d'insolation absorbée par rapport à une disposition verticale [12].

Dans le présent travail, nous proposons une nouvelle conception d'un chauffe-eau à stockage intégré avec un système de concentration parabolique compact (CPC) dans le but d'élever le niveau de la température de l'eau pendant le jour et réduire les pertes thermiques nocturnes moyennant un certain manœuvre du système de concentration.

## 2. ETUDE EXPERIMENTALE

### 2.1 Description du dispositif expérimental

Il s'agit d'un chauffe-eau solaire à stockage intégré sans échangeur de chaleur, constitué d'un réservoir cylindrique en inox (acier inoxydable inerte vis-à-vis de l'eau sanitaire) de volume égal à 95 litres. Ce réservoir est placé à l'intérieur d'un coffre isolé thermiquement et comportant un réflecteur composé de trois branches paraboliques. L'ensemble est fermé par une couverture transparente dont la surface de captation est de  $3,7 \text{ m}^2$ . Le réservoir de stockage ou l'absorbeur est placé dans le foyer d'un système de concentration ou capteur de rayonnement solaire au moyen d'un support permettant la libre rotation du système à concentration autour de l'axe de l'absorbeur et une inclinaison variable de l'ensemble. Grâce à ce système de supportage, il est possible de choisir une position horizontale ou inclinée du chauffe-eau selon l'ensoleillement et la consommation d'eau chaude. Sur la figure 1, on a représenté le chauffe eau solaire type capteur à stockage intégré.

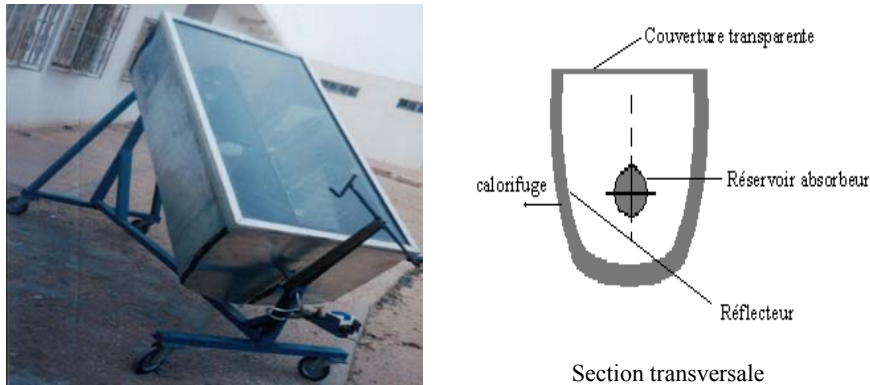


Fig. 1: Dispositif expérimental

## 2.2 Protocole expérimental

Grâce à une station météorologique locale équipée d'une unité d'acquisition de données Testo 950, on a pu relever directement les mesures des différents paramètres climatiques : vitesse de vent, température ambiante et flux solaire sur micro-ordinateur. Le capteur est orienté vers le sud-est et l'angle d'inclinaison est fixé à 36°. Les mesures des températures sont faites par des thermocouples type K. Les mesures commencent de 6 h jusqu'à 18 h, en relevant chaque heure la température à l'entrée et à la sortie du réservoir.

Pour déterminer la production journalière en eau chaude de notre capteur, on a suivi la procédure suivante.

On fixe la température de soutirage. On effectue à chaque heure, à la température souhaitée, le soutirage au niveau de la sortie du réservoir jusqu'à la première chute de la température de soutirage désirée. Pour plusieurs températures de soutirage, on a étudié la production horaire de notre système pour savoir le moment opportun pour l'exploitation de l'eau chaude. Cette procédure décrit bien les conditions réelles de l'utilisation de l'eau chaude.

Pour déterminer le coefficient de déperditions thermiques du système, on laisse chauffer l'eau durant toute la journée, on mesure la température en bas et en haut du réservoir à 18 h et on calcule la température moyenne  $T_{m,i}$ , puis on laisse refroidir le système durant toute la nuit, à 6 h on calcule la température  $T_{m,f}$ . La température ambiante moyenne  $T_{a,m}$  durant le refroidissement de notre système est déterminée à l'aide de l'unité d'acquisition Testo 950. La température moyenne de l'eau est :

$$T_m = \frac{T_{f,m} + T_{i,m}}{2} \quad (1)$$

Le rendement du capteur est mesuré par la méthode input-output. Celle-ci consiste à laisser le capteur s'échauffer pendant toute la journée et à mesurer le flux solaire incident. Chaque heure, on mesure la température atteinte de l'eau et on déduit l'énergie thermique stockée, pour ce faire on procède à soutirer un échantillon de 1 litre. Le rendement énergétique est calculé à partir du bilan énergétique de notre système [12, 15].

$$\eta = \frac{Q_u}{C Q_R} \quad (2)$$

avec:

$$Q_R = A_c \int_{t_i}^{t_f} G(t) \cdot dt \quad (3)$$

$$Q_u = M_e \cdot C_{p,e} \cdot (T_{f,m} - T_{i,m}) \quad (4)$$

D'autre part, on peut exprimer  $Q_u$  par:

$$Q_u = Q_a - Q_p \quad (5)$$

avec:

$$Q_a = G C \rho \tau \alpha \quad (6)$$

$$G = G_m A_c \Delta t \quad (7)$$

$$G_m = \frac{\int_{t_i}^{t_f} G(t) \cdot dt}{\Delta t} \quad (8)$$

$$Q_p = A_a \cdot U (T_m - T_{a,m}) \quad (9)$$

Le coefficient de perte U est donné par [15] :

$$U = \left( \frac{\rho C_p V_T}{\Delta t} \right) \text{Ln} \left[ \frac{T_{i,m} - T_{a,m}}{T_{f,m} - T_{a,m}} \right] \quad (10)$$

D'où

$$G_m A_c \Delta t \alpha \rho \tau - A_a \cdot U (T_m - T_{a,m}) \quad (11)$$

et

$$\eta = \frac{G_m A_c \Delta t \alpha \rho \tau - A_a \cdot U (T_m - T_{a,m})}{C Q_R} \quad (12)$$

$$\eta = \eta_{\text{opt}} - \frac{A_a \cdot U (T_m - T_{a,m})}{C Q_R} \quad (13)$$

avec:

$$\eta_{\text{opt}} = \rho \tau \alpha \quad (14)$$

$$C = \frac{A_c}{A_a} \quad (15)$$

### 2.3 Résultats et discussions

Un exemple de résultats, obtenus durant le mois de mai 2005, sont représentés sur les figures suivantes.

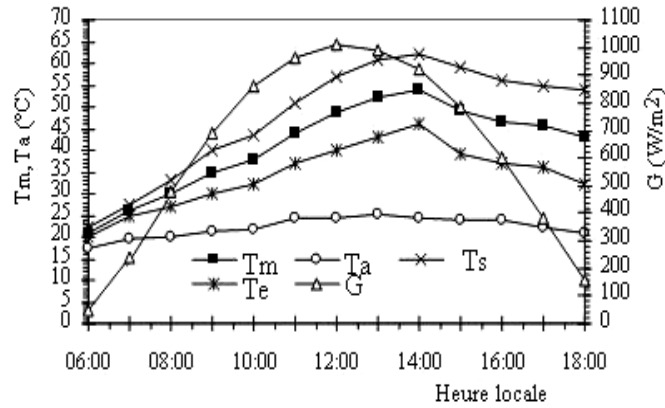


Fig. 2: Variation de la température moyenne du réservoir, de la température ambiante et du flux solaire en fonction du temps pour local

Les courbes de variation de la température moyenne au niveau du réservoir, de flux solaire incident et de la température ambiante en fonction du temps local permettent d'étudier l'influence de ces dernières sur le profil de la température de l'eau dans le réservoir. En effet, la densité de flux solaire atteint son maximum (de l'ordre de  $1000 \text{ W/m}^2$ ) vers 12 pour arriver jusqu'à  $150 \text{ W/m}^2$  vers 18 h.

D'après cette figure, on remarque que les températures de l'eau augmentent au début en fonction du temps local, passent par un maximum et diminuent vers la fin de la journée. Ceci est dû à l'évolution du flux solaire en fonction du temps qui a la même allure à peu près que celles des températures, sauf pour la température ambiante qui varie peu en fonction du temps. Le capteur nous permet d'atteindre une température maximale de  $62 \text{ }^\circ\text{C}$  et une température moyenne de  $55,5 \text{ }^\circ\text{C}$  dans ces conditions.

On remarque que le moment convenable pour l'exploitation de l'eau chaude commence à 10 h mais ceci n'empêche pas l'utilisation de l'eau tiède avant cette heure.

D'après la figure 3, on constate que le volume de soutirage est inversement proportionnel à la température de soutirage. Ceci est dû au fait que l'augmentation de la qualité entraîne une diminution de la quantité. D'autre part, on remarque que le volume de soutirage augmente avec le temps local pour atteindre un maximum vers 12 h puis il diminue par la suite. Ceci peut être expliqué par la dépendance entre le volume de soutirage et le flux solaire qui ont une variation semblable en fonction du temps.

La figure 4 montre que le coefficient de pertes global augmente avec  $T_{m,N}$  (différence entre la température moyenne du réservoir mesurée à la fin de la journée et la température moyenne ambiante). On peut dire que la température ambiante a un grand effet sur le coefficient des pertes. La valeur moyenne de ce dernier est de l'ordre de 3,5 W/K. Certes, cette valeur est un peu élevée par rapport au volume du réservoir (95 litres), mais elle reste acceptable comparée aux autres modèles étudiés [1]. Le taux d'ensoleillement journalier en Tunisie permettra à l'utilisateur de couvrir environ 70 % de ses besoins en eau chaude [11].

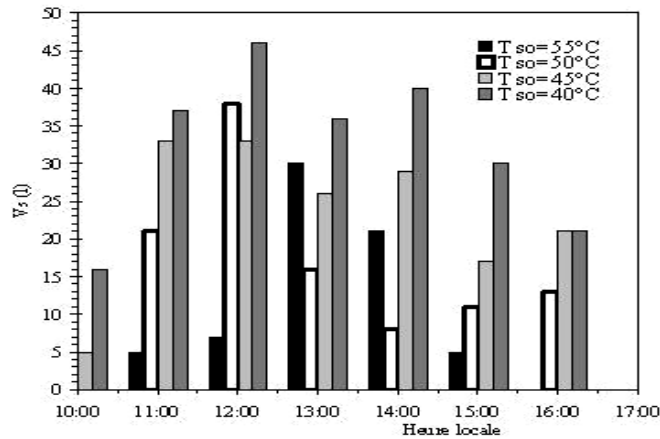


Fig. 3: Evolution des volumes de soutirages en fonction du temps local pour différentes températures de soutirages

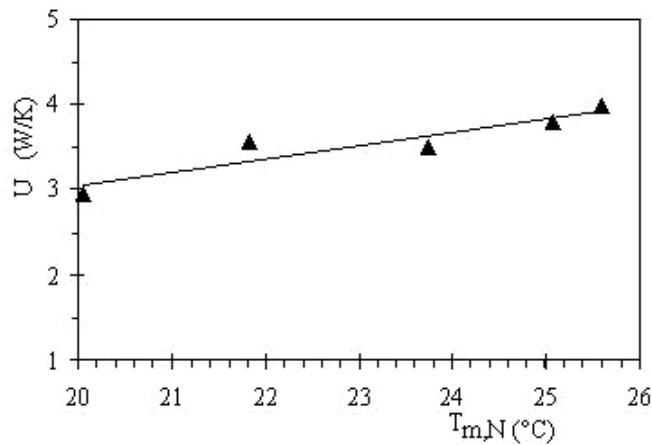


Fig. 4: Evolution du coefficient des pertes global au cours de la nuit en fonction du  $T_{m,N}$

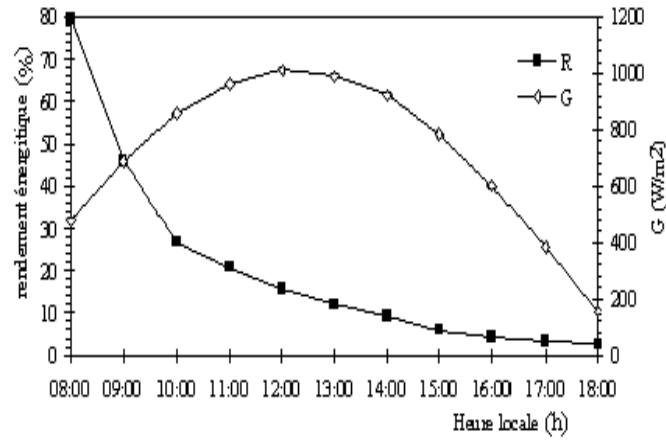


Fig. 5: Evolution du rendement énergétique en fonction du temps local

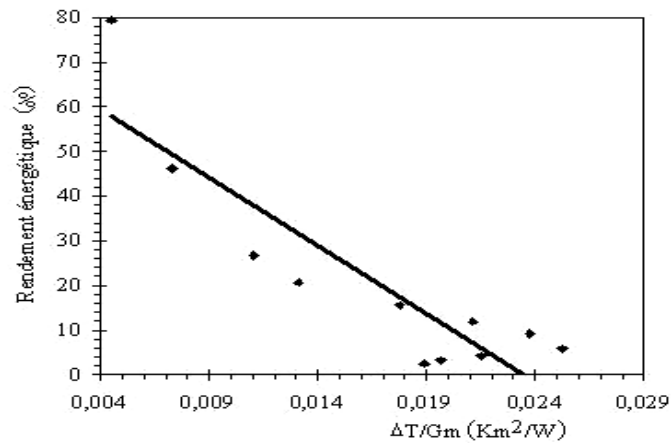


Fig. 6: Evolution du rendement énergétique en fonction du gain normalisé

D'après les figures 5 et 6, on remarque que pour des faibles valeurs du flux solaire, au début de la journée, et du faible gain normalisé, le rendement atteint des valeurs maximales puis il diminue. Ceci peut être expliqué par le fait que plus la différence entre la température moyenne du réservoir et la température ambiante moyenne est faible plus le rendement est important.

### 3. CONCLUSION

Au cours de ce travail, on a étudié les performances de notre chauffe-eau à stockage intégré. D'après les résultats obtenus sur ce dispositif, on remarque que les niveaux de températures du réservoir sont satisfaisants et la production d'eau chaude est suffisante pour l'utilisateur. Ces performances peuvent être améliorées par l'utilisation des surfaces sélectives de captation et d'absorption, le perfectionnement de l'isolation thermique et l'ajout d'un dispositif de commande du système de concentration permettant la diminution des pertes nocturnes.

## NOMENCLATURE

$A_a$ : Surface d'absorption ( $m^2$ )	$\Delta T / G_m$ : Gain normalisé ( $Km^2/W$ )
$A_c$ : Surface de captation ( $m^2$ )	$T_a$ : Température ambiante ( $^{\circ}C$ )
$C_{p,e}$ : Chaleur spécifique de l'eau ( $J/kg K$ )	$T_{e,s}$ : Températures d'entrée et de sortie d'eau ( $^{\circ}C$ )
$C$ : Facteur de concentration géométrique	$T_{a,m}$ : Température ambiante moyenne ( $^{\circ}C$ )
$G$ : Flux solaire incident par unité de surface ( $W/m^2$ )	$T_{f,m}$ : Température moyenne mesurée à 6 h ( $^{\circ}C$ )
$G_m$ : Flux solaire moyen ( $W/m^2$ )	$T_{i,m}$ : Température moyenne mesurée à 18 h ( $^{\circ}C$ )
$Q_a$ : Puissance solaire absorbée (W)	$T_m$ : Température moyenne du réservoir ( $^{\circ}C$ )
$Q_R$ : Quantité de chaleur reçue (J)	$T_{so}$ : Température du soutirage ( $^{\circ}C$ )
$Q_u$ : Puissance utile (W)	$U$ : Coefficient des pertes pendant la nuit ( $W/Km^2$ )
$Q_p$ : Puissance perdue (W)	$V_s$ : Volume du soutirage (l)
$M_e$ : Masse de l'eau dans le réservoir (kg)	$\alpha$ : Absorptivité des surfaces absorbantes (%)
$t_i$ : Temps initial de mesure (s)	$\tau$ : Transmissivité (%)
$t_f$ : Temps final de mesure (s)	$\rho$ : Réflectivité (%)
$\eta$ : Rendement énergétique (%)	

## REFERENCES

- [1] M. Souliotis and Y. Tripanagnostopoulos, 'Experimental Study of CPC type ICS Solar Systems', Solar Energy, Vol. 76, pp. 389 - 408, 2004.
- [2] M. Smyth, P.C Eames and B. Norton, 'Techno-Economic Appraisal of an Integrated Collector / Storage Solar Water Heater', Renewable Energy, Vol. 29, pp. 1503 - 1514, 2004.
- [3] A. Ferrière et G. Flamant, 'Captation, Transformation et Conversion de l'Energie Solaire par les Technologies à Concentration', IMP-CNRS, Centre du Four Solaire, B.P. 5, 66125 Font-Romeu, France.
- [4] S. Baer, 'Breadbox Water Heater Plans, Zomeworks Transparent Insulation', Solar Energy, Vol. 41, N°5, pp. 487 - 494, 1975.
- [5] B.L. Stickney and C. Nagy, 'Performance Comparisons of Several Passive Solar Water Heaters', In Proc. of the 5<sup>th</sup> National Passive Solar Conference, Amherst, Massachusetts, USA, Oct. 16 - 26, pp. 1071 - 1075, 1980.
- [6] D.A. Bainbridge, 'The Integral Passive Solar Water Heater Book', The Passive Solar Institute, PO. Box 722, Davis, CA 95616, USA, 1981.
- [7] C. Schmidt, A. Goetzberger and J. Schmidt, 'Test Results and Evaluation of Integrated Collector Storage Systems with Transparent Insulation', Solar Energy, Vol. 41, N°5, pp. 487 - 494, 1988.
- [8] C. Schmidt and A. Goetzberger, 'Single-Tube Integrated Collector Storage Systems with Transparent Insulation and Involutes Reflector', Solar Energy, Vol. 45, N°2, pp. 93 - 100, 1990.
- [9] R.C. Bishop, 'Super Insulated Batch Heaters for Freezing Climates', In Proc. of the 8<sup>th</sup> National Passive Solar Conference, Sante Fe, New Mexico, USA, Sept. 7 - 9, pp. 807 - 810, 1983.
- [10] M. Smyth, P.C. Eames and B. Norton, 'A comparative Performance Rating for an Integrated Solar Collector / Storage Vessel with Inner Sleeves to Increase Heat Retention', Solar Energy, Vol. 66, N°4, pp. 291 - 303, 1999.
- [11] M. Smyth, P.C Eames and B. Norton, 'Integrated Collector Storages Solar Water Heaters', Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 1 - 36, 2004.

- [12] M. Smyth, P.C Eames and B. Norton, '*Annual Performance of Heat Retaining Integrated Collector / Storage Solar Water Heaters in a Northern Maritime Climate*', Solar Energy, Vol. 70, N°5, pp. 391 - 401, 2001.
- [13] Y. Tripanagnostopoulos and P. Yianoulis, '*Integrated Collector / Storage Systems with Suppressed Thermal Losses*', Solar Energy, Vol. 48, N°1, pp. 31 - 43, 1992.
- [14] Y. Tripanagnostopoulos and M. Souliotis, '*ICS Solar Systems with Horizontal (E-W) and Vertical (N-S) cylindrical Water Storage Tank*', Renewable Energy, Vol. 29, pp. 73 - 96, 2004.
- [15] Y. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis and Th. Nousia, '*CPC Type Integrated Collector Storage Systems*', Solar Energy, Vol. 72, N°4, pp. 327 - 350, 2002.
- [16] Y. Tripanagnostopoulos, P. Yianoulis, S. Papaefthimiou and S. Zafeiratos, '*CPC Solar Collectors with Flat Bifacial Absorbers*', Solar Energy, Vol. 69, N°3, pp. 191 - 203, 2000.