



Étude thermique d'un capteur solaire sous vide à eau à stockage thermique sensible/latent

Salwa BOUADILA, Safa SKOURI, Mariem Lazaar

Centre de Recherche et des Technologies de l'Énergie, Laboratoire des Procédés Thermiques,
BP 95 Hammam Lif 2050, Tunisie

bouadilasalwa@yahoo.fr

Résumé : Plusieurs configurations de systèmes de stockage de l'énergie solaires sont étudiées dans la littérature. Au cours de cette étude nous allons adopter celle d'un capteur solaire à tubes sous vide (à Caloduc) pour le chauffage de l'eau sanitaire à double stockage sensible et latent. Ce type des capteurs solaires présentent des problèmes de surchauffe pendant les périodes chaudes qui s'accompagnent de perte d'énergie (sous forme de vapeur d'eau).

En effet, l'ajout d'un système de stockage de l'énergie solaire par chaleur latente constitue une application très intéressante pour le stockage de l'énergie thermique et pourrait constituer une amélioration dans la conception et le rendement des chauffe-eaux solaires. Pour ce faire, une étude comparative entre trois systèmes solaires fonctionnant en circuit ouvert a été réalisée au Laboratoire des Procédés Thermiques (LPT) du Centre de Recherches et des Technologies de l'Énergie (CRTE) de Borj Cédria. Le système à Caloduc avec MCP a permis de stocker l'excès d'énergie d'origine solaire pendant le jour, soit 4500 kJ, qui est libéré et fournie à l'eau pendant la nuit.

Mots clés :

Stockage thermique, Caloduc, Matériaux à Changement de Phase (MCP), Chaleur latent, Chaleur sensible.

1. Introduction

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agit d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Le stockage thermique peut se faire de deux manières : le stockage thermique sensible et le stockage thermique latent.

Les systèmes de stockage de l'énergie par chaleur latente, dans lesquels sont utilisés des matériaux à changement de phase, font l'objet de nombreux travaux. Les techniques de stockage et leurs applications sont présentés par Sharma et al. [1].

Pour résoudre le problème de stockage de l'énergie thermique d'origine solaire pour la production de l'eau chaude sanitaire, divers chercheurs ont étudié le stockage dans des chauffe-eau-solaires contenant les matériaux à changement de phase. Prakesh et al. (1985) ont réalisé un chauffe-eau à accumulation contenant une couche de MCP. Pendant les heures d'ensoleillement, l'eau est chauffée et transfère à son tour la chaleur vers le MCP en dessous. En dehors des heures de l'ensoleillement, l'eau froide récupère l'énergie du PCM. Ce type de système n'est pas efficace en raison du faible transfert de la chaleur entre le MCP et l'eau [2]. Une unité de stockage cylindrique en boucle fermée avec un capteur plan a été étudiée théoriquement par Bansal et Buddi (1992) pendant la période de charge et de décharge. Le mouvement de l'interface et la température du fluide ont été examinés pour deux MCP : la paraffine wax et l'acide stéarique. A cet effet, deux unités de stockage identiques ont été utilisées. Une première unité de stockage contenant 17,5 kg de paraffine (température de fusion de 54 °C) enfermées dans un échangeur de chaleur en tubes d'aluminium et une deuxième unité contenant de l'eau en tant que matériau de stockage. Les deux unités ont été étudiées séparément au cours de la journée avec des capteurs solaires plans ayant la même surface de captation. Cette étude a révélé que le système de

stockage par chaleur latente a un rendement relativement plus élevé par rapport au système de stockage approprié [3]. Dans le même contexte, Kayguz et al. (1995) ont mené des études théorique et expérimentale pour déterminer la performance d'un chauffe-eau solaire utilisant le $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ comme MCP pour le stockage de l'énergie [4]. Kurklu et al. (2002) ont réalisé un nouveau type de capteur solaire. Ce capteur présent deux sections. La première est remplie avec de l'eau et l'autre avec un matériau à changement de phase (de la paraffine dont la température de fusion est située entre 45 et 50°C) [5]. Une autre étude a été faite par Canbazoglu et al. (2005). En effet, ces chercheurs ont présenté un système de chauffe-eau solaire classique, un capteur en boucle ouverte passive et un autre combiné avec des MCP. Les performances de stockage de chaleur du système de chauffe-eau solaire combiné avec des sels hydratés ont été examinées théoriquement en utilisant les données météorologiques et les propriétés thermo-physiques du MCP avec certaines hypothèses. Ces chercheurs ont trouvé que le temps de stockage de l'eau chaude, la quantité d'eau chaude produite et l'énergie totale emmagasinée (dans le chauffe-eau solaire avec un réservoir de stockage de chaleur combinée avec MCP) sont 2,6 à 3,5 fois plus élevés que ceux du système de chauffe-eau solaire conventionnel [6]. Mettawee et Assassa (2006) ont présenté une conception, une réalisation et une étude expérimentale d'un système compact de capteur solaire-MCP. L'énergie solaire a été stockée dans la paraffine solide et a été déchargée dans l'eau froide entrant dans des tubes à l'intérieur de la cire. Ils ont étudié l'effet du débit de l'eau sur la chaleur récupérée ; les auteurs ont déterminé les coefficients de transfert thermique pendant le processus de charge et la propagation du front de fusion et de solidification durant le processus de charge et de décharge. Les résultats expérimentaux ont montré que le coefficient moyen de transfert thermique augmente avec l'épaisseur de la couche de paraffine fondue. Des analyses énergétique et exergétique ont été menées sur ce système au cours de la phase de stockage durant 3 jours du mois d'octobre. Les résultats expérimentaux montrent que l'efficacité moyenne de l'énergie nette et de l'exergie sont respectivement 45 % et 22 % [7].

Après avoir réalisé une station solaire pilote pour tester le comportement des MCP dans des conditions réelles et fonctionnant en continu avec le système solaire ou avec un appoint électrique, Cabeza et al. (2006) ont conclu que l'inclusion d'un module MCP dans des réservoirs d'eau pour l'approvisionnement en eau chaude domestique est une technique prometteuse. En effet, ils ont montré que cette station permet d'avoir de l'eau chaude pendant de longues périodes même sans apport d'énergie [8].

Dans ce travail on présentera un système, appelé «Capteur Solaire à eau à Stockage Thermique Latent», est conçu et réalisé au Laboratoire des Procédés Thermiques (LPT) du Centre de Recherches et des Technologies de l'Énergie (CRTE) au technopôle de Borj Cédria en Tunisie.

Il s'agit d'apporter des modifications, à un capteur solaire à eau à tubes sous vide existant (commercialisé en Tunisie), par l'intégration :

- d'une couche isolante adaptée à l'enceinte existante du capteur commercial, et
- d'une nouvelle enceinte contenant un matériau à changement de phase. Le MCP utilisé est de la paraffine dont la température de fusion est de 56 °C.

Une étude expérimentale de caractérisation des performances de ce système modifié, $\text{CS}_{\text{STL}}^{\text{eau}}$ suivie d'une étude comparative avec le système existant sont effectuées afin d'identifier l'influence du matériau à changement de phase utilisé (paraffine) sur le rendement thermique de capteur solaire à tube sous vide.

2. Bilan thermique du capteur solaire a eau

En régime permanent de fonctionnement, on obtient l'équation caractéristique d'un capteur solaire type sous vide industriel (sans stockage) en écrivant son bilan énergétique global :

$$Q_a = Q_u + Q_{st} + Q_{pert} \quad (1)$$

avec : Q_a est la puissance solaire absorbée (W), Q_u est la puissance utile cédée au fluide caloporteur et Q_{pert} est la puissance correspondante aux pertes thermiques.

On suppose qu'on travaille dans un régime permanent donc l'accroissement de l'énergie stockée au niveau du collecteur Q_{st} est négligeable. On suppose que $Q_{st} = 0$.

2.1. Energie utile

La quantité de chaleur récupérée par le fluide caloporteur (eau) lors de son passage au niveau du collecteur est donnée par l'équation suivante (Duffie, 1991) [9]:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_s - T_e) = A_c F_R \left[I_T (\alpha_{abs} \tau_{cov}) - U_{pert} (T_e - T_{amb}) \right] \quad (2)$$

F_R : facteur de conductance du capteur caractérisant le contact entre les tubes et l'absorbeur,

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_{pert}} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c U_{pert} F'}{\dot{m}C_p} \right) \right] \quad (3)$$

$F' = \frac{1/U_{pert}}{1/U_{amb}}$ est l'efficacité de l'absorbeur, il est généralement très proche de 1.

2.2. Energie absorbée

La quantité de l'énergie solaire transmise par la vitre et absorbée par la surface absorbante des tubes sous vide est :

$$Q_a = A_c \alpha_{abs} \tau_{cov} I_T \quad (4)$$

Souvent l'approximation $\eta_0 = \alpha_{abs} \tau_{cov}$ est le rendement optique du capteur.

2.3. Energie perdue

Les pertes thermiques sont données par la relation générale suivante :

$$Q_{pert} = U_{pert} A_c (\overline{T_{abs}} - T_{amb}) \quad (5)$$

2.4. Rendement thermique instantané

À un instant donné, l'équilibre thermique entre le flux énergétique solaire reçu par le capteur, le flux d'énergie utile que l'on peut extraire et ses pertes propres thermiques, permet d'écrire l'expression suivante du rendement instantané :

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c I_T} \quad (6)$$

A partir de l'équation (2), l'expression (6) peut se mettre sous la forme :

$$\eta_c = \eta_o - \frac{F_R U_{pert} (T_e - T_{amb})}{I_T} \quad (7)$$

En divisant l'équation (II.1) par $A_c I_T$ et en utilisant les équations (4), (5) et (6) on peut encore écrire :

$$\eta_c = \eta_o - \frac{U_{pert} (\overline{T_{abs}} - T_{amb})}{I_T} \quad (8)$$

Si l'on suppose que le coefficient de déperdition peut s'écrire sous la forme.

$$U_{pert} = a_1 + a_2 (\overline{T_{abs}} - T_{amb}) \quad (9)$$

où a_1 et a_2 sont deux constantes.

D'après l'équation (8) et (9) on peut donc écrire :

$$\eta_c = \eta_o - a_1 \left(\frac{\overline{T_{abs}} - T_{amb}}{I_T} \right) - a_2 I_T \left(\frac{\overline{T_{abs}} - T_{amb}}{I_T} \right)^2 \quad (10)$$

Si l'on pose $T_r = \frac{\overline{T_{abs}} - T_{amb}}{I_T}$, (Km^2 / W).

T_r , représentant la température réduite. Alors le rendement peut encore se mettre sous la forme suivante :

$$\eta_c = \eta_o - a_1 T_r - a_2 T_r^2 \quad (11)$$

Selon la norme internationale (ISO 9459-5), le rendement du capteur solaire peut être caractérisé par trois coefficients indépendants de la température.

η_0 : le rendement optique,

a_1 : le coefficient de déperditions thermiques par conduction, ($W / m^2 K$),

a_2 : le coefficient de déperditions thermiques par convection ($W / m^2 K^2$).

3. Description des capteurs solaires sous vide à eau utile

Description du Capteur solaire sous vide à eau industriel $CS_{\text{industriel}}^{\text{eau}}$

Le capteur solaire à eau industriel est un capteur sous vide à Caloduc (Figure 1). Il est constitué d'une série de 15 tubes de verre alignés, séparés et maintenus sur une plaque réfléchissante. Chaque tube est fixé à une buse en cuivre dont le condenseur est fixé à un échangeur de chaleur. L'ensemble de ces échangeurs est regroupé dans un collecteur, thermiquement isolé par du polyuréthane et couvert par une enceinte en aluminium.

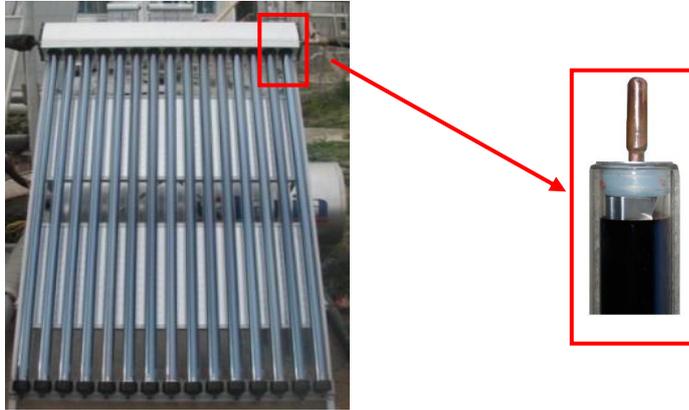


Figure 1 : Capteur sous vide à Caloduc de type WEL-CH-15

3.1. Description du Capteur solaire sous vide avec une nouvelle isolation $CS_{\text{industriel} + \text{isolation}}^{\text{eau}}$

L'ancien revêtement du collecteur (Figure 2) a été remplacé par une nouvelle enceinte en acier dans laquelle une couche isolante en polyuréthane a été injectée (Figure 3). La couche isolante est d'épaisseur 5 cm, supportant -40 à 150°C et de conductivité thermique 0,038 W/mK. Le système ainsi obtenu après cette première modification est appelé « Capteur Solaire à Eaux avec Isolation ». Il est noté $CS_{\text{industriel} + \text{isolation}}^{\text{eau}}$.



Figure 2 : Collecteur du capteur solaire sous vide



Figure 3 : Enceinte avec une nouvelle isolation et comportant le collecteur

3.2. Description du Capteur solaire sous vide contenant du MCP, nommé $CS_{\text{STL}}^{\text{eau}}$

Le capteur solaire sous vide industriel ou commercial, à Caloduc, présente des problèmes de surchauffe pendant les périodes chaudes qui s'accompagnent de perte d'énergie (sous forme de vapeur d'eau). De plus, ce capteur solaire ne garantit pas des gains énergétiques hors ensoleillement. Pour remédier à ces problèmes, des améliorations techniques ont été faites par l'ajout d'une nouvelle enceinte en cuivre contenant un matériau à changement de phase permettant de faire le stockage thermique latent (en addition au stockage thermique sous forme sensible dans l'eau).

La cavité en cuivre est remplie de 20 kg de paraffine solide (soit 80 % de son volume). Le reste du volume, de la cavité, est du vide pour tenir compte de l'expansion de la paraffine lors de son passage de la phase solide à la phase liquide.

La réalisation du capteur solaire à eau à stockage thermique latent, a nécessité plusieurs étapes :

- Le collecteur en cuivre, auquel sont fixés les condenseurs des tubes du capteur, a été placé dans une cavité en cuivre entrouverte par le haut (Figure 4), pour permettre le remplissage de la paraffine.



Figure 4 : Photo de la cavité

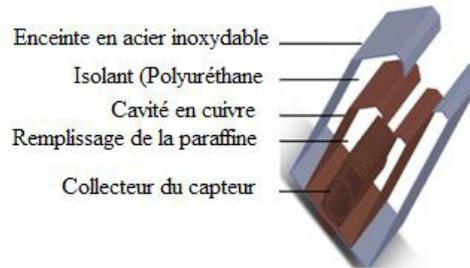


Figure 5: Assemblage de l'unité de stockage

- b) Après avoir isolé la cavité par une couche de polyuréthane d'épaisseur 5 cm, pour minimiser les déperditions thermiques (même type d'isolant utilisé dans le système $CS_{\text{industriel} + \text{isolation}}^{\text{eau}}$), nous avons recouvert le tout par une enceinte en acier inoxydable (Figure 5); elle aussi entrouverte par le haut.
- c) Afin de faciliter le remplissage et la vidange de la paraffine, une plaque isolée en alliage d'acier a été vissée sur les bouts supérieurs de l'enceinte (Figure 6).
- d) Pour éviter les risques d'entrée de l'eau pluviale, l'ensemble a été fermé par un couvercle en alliage d'acier facilement démontable (Figure 7).



Figure 6 : Photo de la plaque de couverture de l'enceinte



Figure 7 : Photo réelle du couvercle renfermant l'enceinte

- e) Puisque le volume de l'enceinte reconfigurée est plus important, nous avons renforcé le support initial par deux bras métalliques soudés sur la face extérieure de la cavité.
- f) La forme finale du nouveau capteur est présentée par la Figure 8.



Figure 8 : Photo réelle du système à stockage latent réalisé

4. Etude comparative des trois systèmes

Nous nous proposons de déterminer les performances de trois capteurs solaires sous vide avec les trois configurations différentes suivantes (Figure 9).

- Capteur solaire sous vide industriel, nommé $CS_{\text{industriel}}^{\text{eau}}$
- Capteur solaire sous vide avec une nouvelle isolation, nommé $CS_{\text{industriel} + \text{isolation}}^{\text{eau}}$
- Capteur solaire sous vide contenant le MCP, nommé $CS_{\text{STL}}^{\text{eau}}$.



Figure 9 : Dispositif expérimental des trois systèmes

Une étude comparative entre les trois systèmes a été effectuée. Les tests sont réalisés pendant quatre jours (de 2 jusqu'à 5 juin 2012) dans les mêmes conditions et fonctionnent en circuit ouvert d'entrée/sortie instantané de l'eau. Le débit de l'eau à l'entrée de chaque système est fixé à 2 litre/min fixé par des limiteurs de débit.

Sur la Figure 10, nous représentons les conditions climatiques dans lesquelles les mesures ont été prises (la variation du rayonnement solaire global et de la température ambiante en fonction du temps).

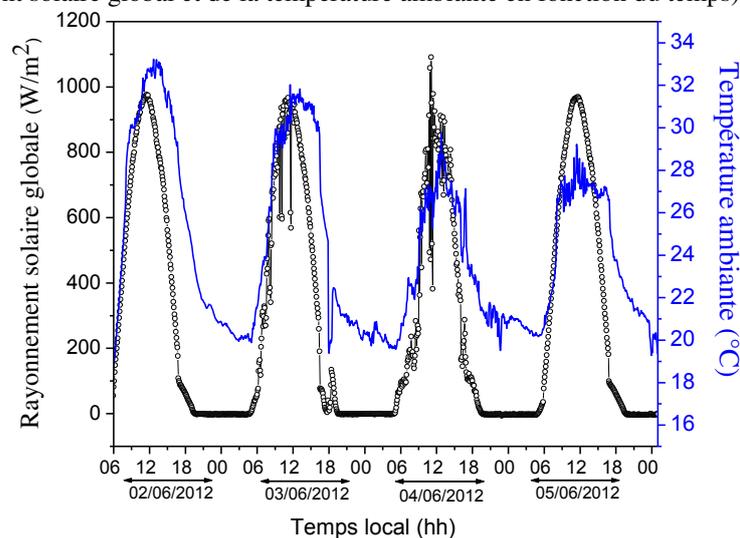


Figure 10 : Ensoleillement et température ambiante (02/06/2012 – 05/06/2012)

4.1. Variation de la température de l'eau à la sortie des trois systèmes

La Figure II.26 représente la variation des températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de chaque système pour un débit de 2 litre/min. Nous remarquons que, pendant le jour, la température de sortie du $CS_{\text{industriel} + \text{isolation}}^{\text{eau}}$ est la plus élevée que celle du $CS_{\text{industriel}}^{\text{eau}}$. En effet, une différence maximale de température de 5 °C est mesurée à 12h. Cette différence est due à l'isolation thermique qui a été introduite dans le premier système. Quant aux températures de l'eau à la sortie des capteurs $CS_{\text{industriel}}^{\text{eau}}$ et $CS_{\text{STL}}^{\text{eau}}$, elles sont proches l'une à l'autre.

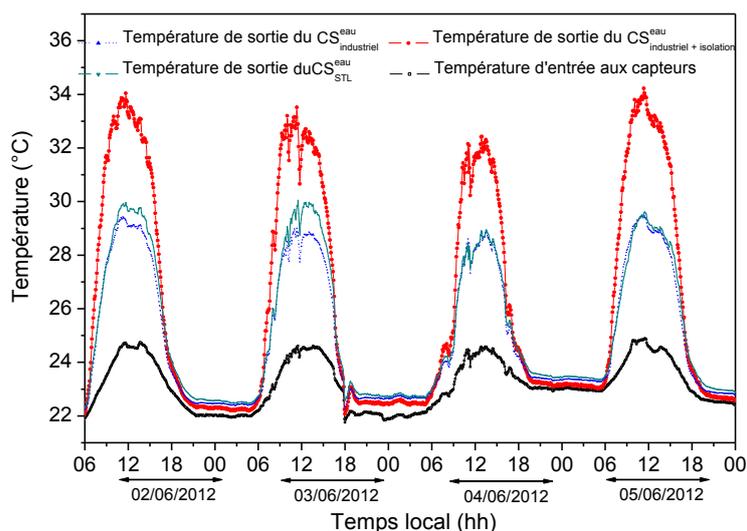


Figure 11 : Variation des températures d'entrée et de sortie de l'eau dans les 3 systèmes

4.2. Effet de l'isolation sur la variation de l'énergie utile

Une étude comparative entre les deux systèmes $CS_{\text{industriel}}^{\text{eau}}$ et $CS_{\text{industriel + isolation}}^{\text{eau}}$ a été effectuée. La Figure II.27 représente la variation de la puissance utile du $CS_{\text{industriel + isolation}}^{\text{eau}}$ sur la période de 02/06/2012 à 05/06/2012. Cette Figure montre que pendant le jour (vers midi) la puissance maximale atteinte par le $CS_{\text{industriel + isolation}}^{\text{eau}}$ est de 1300 W alors que celle du $CS_{\text{industriel}}^{\text{eau}}$ est de 700W (le 02/06/2012). La puissance de la quantité d'énergie utile est doublée par l'effet de l'isolation. Ainsi l'ajout d'une couche isolante d'épaisseur 5 cm a permis un gain supplémentaire d'énergie par rapport à la configuration initiale (avant intervention).

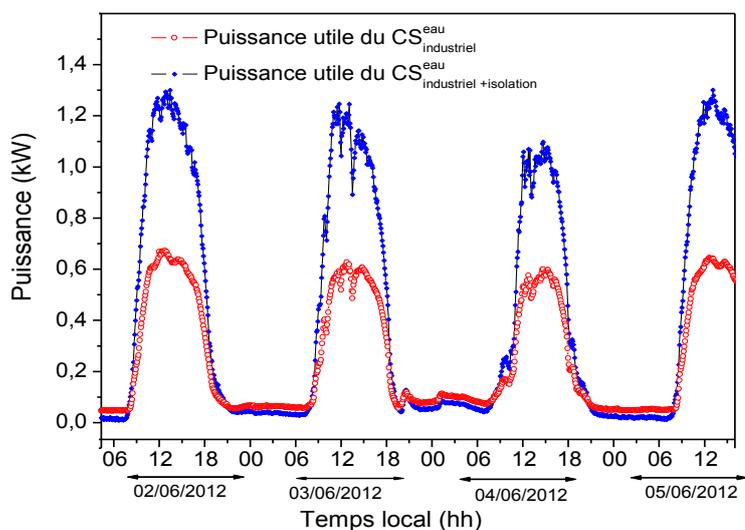


Figure 12 : Quantité de chaleur fournie par les deux systèmes $CS_{\text{industriel}}^{\text{eau}}$ et $CS_{\text{industriel + isolation}}^{\text{eau}}$

4.3. Effet de MCP sur la variation de l'énergie stockée

La variation de la puissance d'énergie stockée dans le MCP et celle de la quantité d'énergie simultanément fournie à l'eau durant la période d'expérimentation par le $CS_{\text{STL}}^{\text{eau}}$ sont présentées sur la Figure 13. Cette figure montre que la puissance maximale de la quantité d'énergie utile fournie à l'eau par le système solaire à stockage latent est de l'ordre de 750 W vers midi (le 02/06/2012).

Quant à la quantité de l'énergie stockée dans le MCP pendant une durée de stockage de 12 h est de l'ordre de 25920 kJ.

Une quantité d'énergie de 4320 kJ est alors fournie à l'eau toute la nuit. Cette quantité d'énergie correspond à l'énergie libérée par la paraffine pendant la période de déstockage.

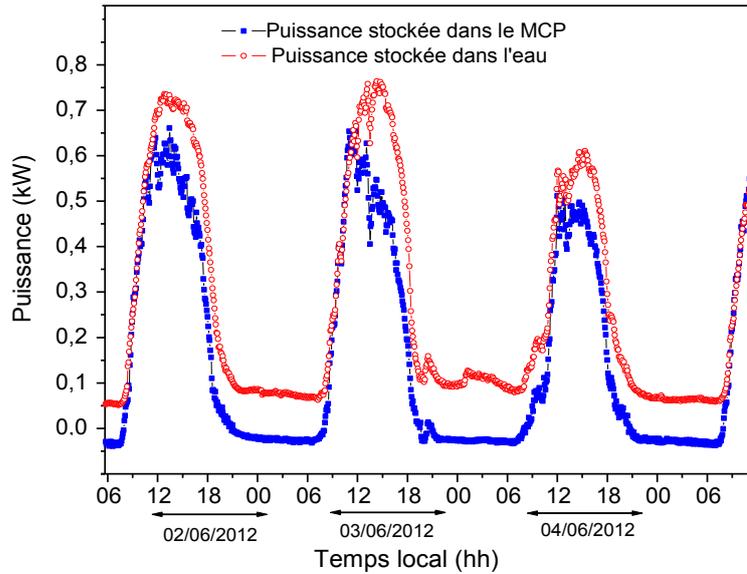


Figure 13 : Variation de l'énergie stockée dans le MCP et dans l'eau par le CS_{STL}^{eau}

Conclusion

L'étude des performances d'un nouveau capteur solaire à eau conçu et réalisé au sein au CRTEn en comparaison avec un système industriel existant a été faite. L'amélioration apportée au capteur existant consiste à ajouter une couche isolante et un matériau de stockage latent au niveau de la cavité comportant le collecteur. Cette étude a montré que l'amélioration de l'isolation au niveau du collecteur a engendré une augmentation de la température de l'eau chaude à la sortie de 5 °C. Quant à l'introduction d'une quantité de paraffine dans la cavité en vue d'emmagasiner l'excès d'énergie d'origine solaire pendant le jour et de le fournir à l'eau pendant la nuit; elle permet de stocker une quantité d'énergie de l'ordre de 4300 kJ qui sera libérée et fournie à l'eau pendant la nuit.

Nomenclature

A	surface, (m^2)	Q	flux de chaleur, (W)
C_p	chaleur massique, (J / kgK)	t	temps, (s)
I_T	irradiation totale (W / m^2)	T	température, (K)
\dot{m}	débit massique, (kg / s)	\bar{T}	température moyenne, (K)
Lettres grecques			
α	absorptivité	U	coefficient global des pertes ($W / m^2 K$)
η	Rendement énergétique, (%)	τ	transmission
η_0	Rendement optique (%)		
Indices			
a	absorbée	s	sortie
abs	absorbeur	st	stockée
amb	ambient extérieur	MCP	matériaux à changement de phase
$pert$	perdue	u	utile

Références

1. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D., "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13: 318-345.
2. Paraksh J., Garg H.P., Datta G., "A solar water heater with a built-in latent heat storage". Energy Conversion and Management 1985;25:51-56.
3. Bansal N.K., Buddhi D., "An analytical study of a latent heat storage system in a cylinder," Energy Conversion and Management 1992;33:235-242.
4. Kaygusuz K., "Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems", Energy Conversion and Management 1995;36:315-323.

5. Kurklu A., Ozmerzi A., Bilgin S., “Thermal performance of a water-phase change material solar collector”, *Renewable Energy* 2002;26:391–399.
6. Canbazođlu S., řahinaslan A., Ekmekyapar A., Aksoy Ý.G., Fatih A., “Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heating system”, *Energy and Buildings*, 2005;37:235-242.
7. Mettawee E.B.S., Assassa G.M.R., “Experimental study of a compact PCM solar collector”, *Energy* 2006;31:2958–2968.
8. Cabeza L.F., Ibanez M., Solé C., Roca J., Nogués M., “Experimentation with a water tank including a PCM module”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006;90:1273-1282.
9. Duffie J.A., Beckman W.A., “Solar Engineering of Thermal Processes”, 4nd Edition. John Wiley and Sons. New York: USA;2013.