

Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire auto-stockeur à intégrer au mur de l'habitation saharienne

Arezki Harmim *, Mebarek Boukar, M'hammed Amar et Abdelkader Haida

Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
B.P 478, Route de Reggane, 11000 Adrar, Algérie

(reçu le 28 Juin 2018 - accepté le 30 Juin 2018)

Résumé - La construction et l'étude expérimentale d'un nouveau chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur doté d'un concentrateur en forme de branche parabolique linéaire sont présentées. Le concentrateur est constitué de petits miroirs rectangulaires montés sur un cadre en bois. Le dispositif a été conçu pour permettre son intégration au mur de l'habitation en milieu saharien Algérien et ainsi répondre aux besoins des ménages en matière d'eau chaude sanitaire en période hivernale uniquement. Les miroirs du concentrateur peuvent être pilotables selon le principe des abat-jours vénitiens et le dispositif permettra alors l'aération de l'habitation en période estivale. L'étude expérimentale a montré que le système est robuste et efficace.

Abstract - The construction and the experimental study of an innovative integrated collector solar water heater equipped with a concentrator in the shape of a linear parabolic branch are presented. The concentrator is made of small rectangular mirrors assembled on a wooden framework. The device was designed for integration into building facade in Algerian Sahara and thus to satisfy needs of warm water for households in wintry time only. The mirrors of the concentrator can be pivoting according to the principle of venetian blind and the device will then allow the dwelling ventilation in summer period. The experimental study showed that the system is robust and effective.

Mots Clés: Chauffe-eau solaire auto-stockeur - Concentrateur parabolique linéaire - Intégration au bâtiment - Etude expérimentale.

1. INTRODUCTION

Dans la crise écologique actuelle induite par la consommation irrationnelle des énergies fossiles produisant des gaz à effet de serre, les chauffe eau solaires semblent la solution idéale pour répondre aux besoins d'eau chaude des ménages dans les milieux ruraux. Les chauffe eau solaires les plus couramment utilisés sont constitués d'éléments séparés: le capteur plan et la cuve de stockage.

De ce fait, le coût de ce genre de système reste toujours élevé même si leurs performances atteignent des niveaux très appréciables. Une simplification consiste à la réalisation de systèmes rustiques où les fonctions captation et stockage sont assurées par le même élément. Ils sont dits auto-stockeurs ou capteur-stockeurs et leurs performances sont en général plus faibles par rapport à ceux à éléments séparés.

Afin d'améliorer les performances de ce genre de systèmes, beaucoup de travaux ont été menés à bien par plusieurs chercheurs. Smyth *et al.* [1] et récemment, Devanarayanan *et al.* [2] et puis Singh *et al.* [3] ont présenté en détail le développement des chauffe eau solaires auto-stockeurs dans le monde entier.

Entre 2000 et 2006, nous avons réalisé et expérimentés trois (03) chauffe eau solaires de type capteur-stockeur plans [4-7]. Les études expérimentales ont montré que la contribution de tels systèmes à l'économie d'énergie est fort intéressante. En

* arezki.harmim@yahoo.fr

moyenne, la température maximale de l'eau en fin de journée ensoleillée a été de l'ordre de 50 °C et la température minimale de l'eau au matin et après les pertes thermiques a été de l'ordre de 25 °C.

En milieu saharien, les besoins en eau chaude sont concentrés en période hivernale. Il est alors nécessaire de développer des systèmes efficaces et adaptés à cette réalité. Il y a lieu de proposer un nouveau design permettant de booster l'irradiation solaire absorbée par le capteur-stockeur tout en réduisant les pertes thermiques nocturnes.

Pour plus de convivialité et dans le but de les adapter au milieu saharien, il faut également proposer de chauffe eau solaires intégrés au bâtiment et fonctionnant principalement en période hivernale.

Dans ce contexte, un prototype de chauffe eau solaire de type capteur-stockeur doté d'un réflecteur en forme de branche parabolique linéaire a été développé et réalisé à l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, 'URER/MS' à Adrar.

Dans ce papier, nous présentons le prototype réalisé et son étude expérimentale effectuée en période hivernale sur la plate forme des essais expérimentaux de l'URERMS à Adrar.

2. DESCRIPTION DU SYSTEME ETUDIE

Le schéma descriptif de notre chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur est montré sur la figure 1.

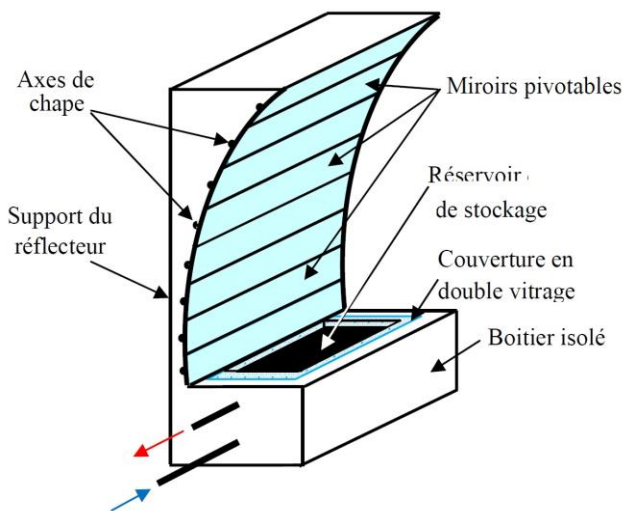


Fig. 1: Schéma descriptif du chauffe eau solaire capteur-stockeur avec réflecteur en forme de branche parabolique linéaire

Ce chauffe-eau solaire se compose principalement d'un absorbeur capteur-stockeur, de forme parallélépipédique, déposé dans un boîtier thermiquement isolé sur les côtés et à l'arrière et doté d'une couverture transparente en double vitrage sur sa face supérieure.

La collecte du rayonnement solaire est assurée par un réflecteur en forme de branche parabolique linéaire fixé sur le côté de la surface vitrée du boîtier comme montré sur la figure 1.

La face supérieure du réservoir de stockage (plaque absorbante) est peinte en noir mat pour absorber le rayonnement solaire. Les écarts entre les deux vitres et entre la vitre interne et la surface supérieure de l'élément capteur-stockeur ont été arrêtés conformément aux recommandations de minimisation des pertes thermiques [8].

C'est-à-dire, l'écart entre l'absorbeur et le vitrage de l'ordre de 40 mm et l'écart entre les deux vitres et de l'ordre de 25 mm. Pour notre cas et afin de réduire l'effet d'ombre nous avons opté, respectivement, pour 38 mm et 18 mm.

Les propriétés géométriques du réflecteur ont été calculées pour un système à installer à Adrar qui est situé au Sahara algérien. La surface du réflecteur est faite de petits miroirs rectangulaires et pivotants assemblés sur un cadre en bois.

Le dispositif est conçu pour l'intégration dans la façade verticale d'un bâtiment orienté plein sud au Sahara Algérien (figure 2) et la géométrie de réflecteur a été optimisée pour permettre au système de maximiser l'irradiation solaire qui atteint la surface absorbante du réservoir au cours de la période d'hiver.



a- Côté extérieur en hiver



b- Côté intérieur (dispositif non utilisé)

Fig. 2: Représentation 3D du chauffe eau solaire développé pour une intégration au mur de l'habitat.

En période d'été, le rayonnement solaire direct n'est pas intercepté par la plaque absorbante et le chauffe eau n'est pas exploité. Quand on pivote les miroirs du réflecteur vers la position horizontale, nous pouvons utiliser le dispositif pour aérer l'intérieur du bâtiment, selon le principe des abat jour vénitiens. Les propriétés géométriques du système sont résumées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1: Propriétés géométriques du système étudié

Largeur de l'absorbeur stockeur (récepteur), S	300 mm
Epaisseur de l'absorbeur stockeur	200 mm
Capacité de l'absorbeur stockeur, par m de long	60 litre/m
Largeur du vitrage, $\overline{MN}$	1139 mm
Distance focale de la branche parabolique, f	286 mm
Ouverture de la branche parabolique, $\overline{NT}$	999 mm
Angle d'inclinaison de la surface d'ouverture, β	65°
Coefficient de concentration du collecteur, C	3.3

3. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL

Durant les différents tests expérimentaux, le prototype du chauffe eau solaire capteur-stockeur avec réflecteur en forme de branche parabolique linéaire a été installé sur la plate forme des essais expérimentaux de l'URER/MS d'Adrar et a été exposé à l'ensoleillement naturel en position fixe.

Le système a été disposé sur un support métallique orienté plein sud. Les différents tests ont été effectués au cours de la période allant du mois de Novembre 2017 au mois d'Avril 2018. Durant ces tests, nous avons mesuré-

- La température ambiante;
- La température de l'eau à l'entrée de l'élément capteur-stockeur;
- La température de l'eau à la sortie de l'élément capteur-stockeur;
- La température de l'eau à l'intérieur de l'élément capteur-stockeur en trois points: près de la paroi du fond, au centre et près de la paroi supérieure (plaque absorbante);
- La température du vitrage de la couverture transparente;
- La température des parois du réservoir de stockage;
- L'éclairement solaire global sur plan horizontal;

L'éclairement solaire global sur plan horizontal a été mesuré à l'aide d'un pyranomètre de type classe 2 CMP11 de Kipp et Zonen (rang, 0-1400 W/m², Précision, ± 2 W/m²) installé sur un plan horizontal.

Les différentes températures ont été mesurées à l'aide de thermocouples de type K (précision $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$). Le thermocouple de la température ambiante a été installé dans un abri météorologique construit à cet effet.

Le prototype du système, sous test réel, a été installé sur la plate forme des essais de l'URER/MS est montré sur la photographie de la figure 3.

Le chauffe eau solaire a été disposé sur un support métallique fixe et orienté plein sud. L'alimentation en eau a été assurée par un petit réservoir d'eau doté d'un flotteur pour fixer la hauteur de pression à environ 0.1 bar (1 m).



Fig. 3: Photographie du dispositif expérimental

Tous les transducteurs ont été reliés à une acquisition de données qui fait des relevés de tous les paramètres mesurés avec un pas de temps préalablement fixé. Pour notre cas, l'intervalle de scrutation a été fixé à 5 minutes. Ceci nous a permis de suivre l'évolution des différents paramètres lors d'éventuelles perturbations climatiques.

Les valeurs des paramètres stockées au niveau de l'acquisition de données ont été par la suite transférées à un micro-ordinateur pour traitement et analyse. Durant la campagne des tests, cinq séries de tests ont été effectuées. Il s'agit de-

- Série N°1- Sans soutirage d'eau;
- Série N°2- Avec soutirage d'eau selon le profil de puisage suivant:
20 litres à 08h 00, 10 litres à 14h 00, 20 litres à 17h 00 et 10 litres à 20h 00
- Série N°3- Avec soutirage continu à 08h 00;
- Série N°4- Stagnation sur trois jours;
- Série N°5- Avec soutirage continu à 20h 00.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Vérification du design opto-géométrique

Les essais expérimentaux ont débuté le 05 Novembre 2017. Durant les premiers jours des tests, nous avons remarqué que la tache focale formée par le réflecteur, en forme de branche parabolique, sur la surface absorbante de l'élément capteur-stockeur a été nette, d'une largeur de l'ordre de 8 cm le long de la plaque.

Cette tache focale se déplaçait sur la largeur de la plaque en fonction de la hauteur du soleil du matin au soir. Cette tache a été nettement localisée à partir de 9 heures 30 minutes jusqu'à 17 heures temps local. Ceci assure un fonctionnement de plus 6 heures par jour. Ce résultat est en accord avec les calculs effectués pour arrêter le design du système.

4.2 Résistance aux intempéries

Durant la période des différents tests qui s'est étalée du mois de Novembre 2017 au début du mois d'Avril 2018, notre chauffe-eau a résisté de façon remarquable aux intempéries (pluies torrentielles du 1 au 2 février 2018 et vent de sable très fort à la mi-février 2018). En effet, le vitrage ne s'est pas brisé et l'étanchéité n'a pas été affectée.

4.3 Comportement thermique

La variation, au cours d'un test de 24 heures, de la température de l'eau stockée donne une indication sur l'efficacité du chauffe eau solaire auto-stockeur pour le chauffage d'eau et la rétention de la chaleur [9].

Sur les figures 4 et 5, on montre l'évolution des températures de l'eau stockée mesurées dans le réservoir de stockage durant deux journées de test, le 8 Novembre 2017 sous un ciel dégagé et le 7 Novembre 2017 sous un ciel partiellement voilé.

On constate, sur les deux figures, que la stratification est bien développée durant la période de charge. Mais en période de décharge, la stratification est perdue à cause des pertes thermiques nocturnes, essentiellement à travers la couverture transparente car l'élément capteur-stockeur est thermiquement bien isolé à l'arrière.

Nous constatons également que la température de l'eau stockée atteint des niveaux très intéressants même sous ciel partiellement couvert. En effet, lors de la journée du 7 Novembre 2017 et après toute la nuit (sans puisage), la température moyenne minimale de l'eau stockée a atteint 36°C à 8 heures du matin.

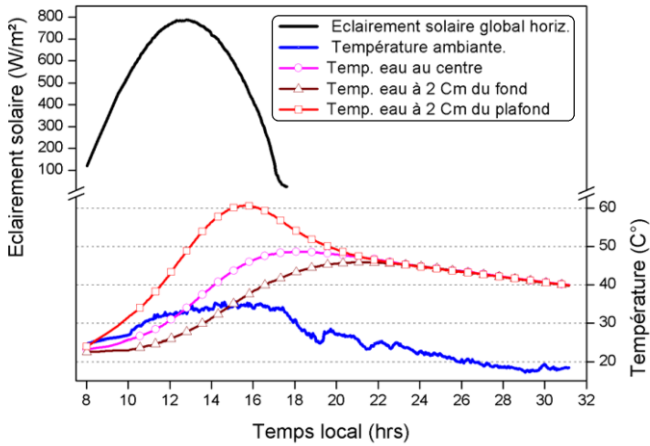


Fig. 4: Evolution de la température de l'eau stockée dans l'élément capteur-stockeur lors de la journée du 8 Novembre 2017 (sans puisage)

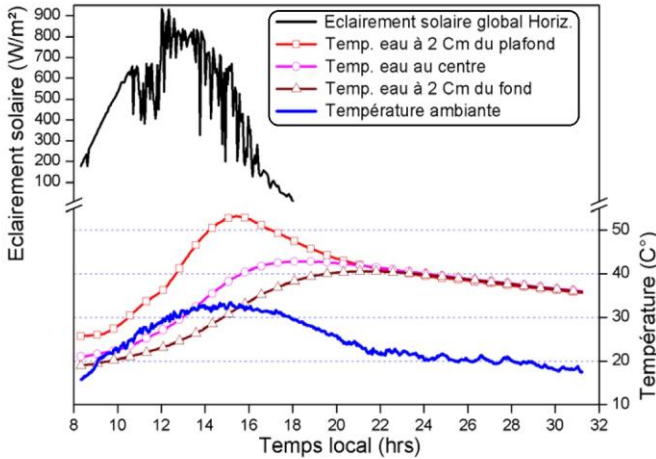


Fig. 5: Evolution de la température de l'eau stockée dans l'élément capteur-stockeur lors de la journée du 7 Novembre 2017 (sans puisage)

Lors de la journée du 17 Janvier 2018 à ciel clair, les évolutions des températures des différents composants du système, ainsi que la température de l'eau stockée sont montrées en figure 6.

Durant cette journée, la température ambiante a atteint le maximum de 24°C à 16 h 30 et le minimum de 12 °C à 3 h du matin (Figure 7).

Sur la figure 6, nous remarquons que durant la période de charge, la température de la plaque absorbante (tôle supérieure de la cuve) est largement supérieure à celle de l'eau stockée dans la cuve et qu'elle est également supérieure à celles des tôles latérales et arrière.

On note également que durant la période de décharge, la température de la plaque absorbante est nettement inférieure à celle de l'eau chaude stockée dans la cuve.

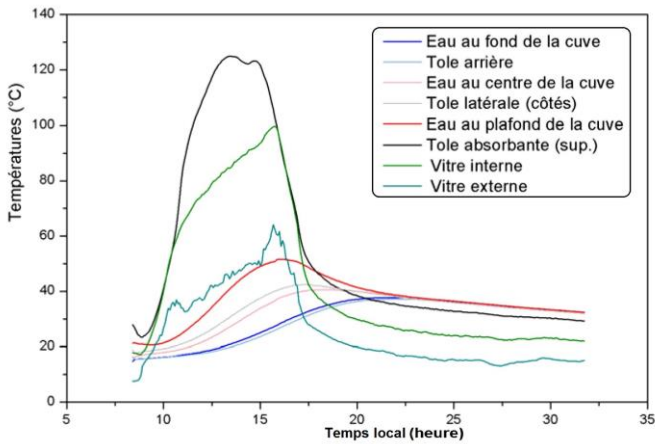


Fig. 6: Evolution de la température des composants du chauffe eau expérimenté lors de la journée du 17 Janvier 2018 sans soutirage d'eau

En figure 8, on présente les résultats obtenus lors d'un test relatif à la série N°2 avec puisage sous ciel clair (journée du 14 Novembre 2017). A titre indicatif, on estime, pour la journée du 14 Novembre 2017, la contribution du système pour satisfaire les besoins en eau chaude fixés à 60 litres avec une température de consigne T_c de 50 °C.

La contribution du système est donnée par-

$$f = Q / L \quad (1)$$

Q et L sont respectivement l'énergie fournie par le système et la charge à satisfaire.

$$Q = m C_p (T_p - T_r) \quad (2)$$

$$L = m C_p (T_c - T_r) \quad (3)$$

Les résultats obtenus sont présentés au **Tableau 2**.

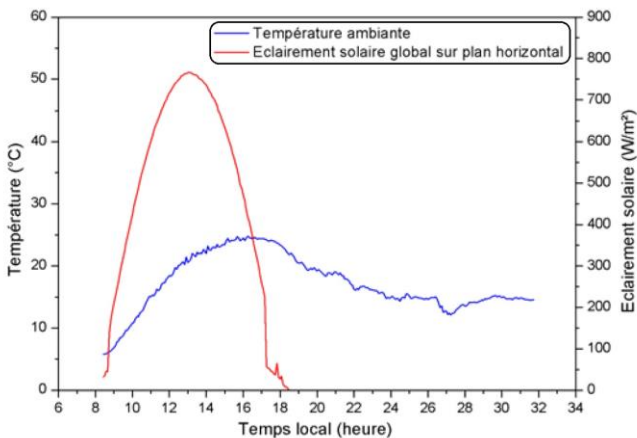


Fig. 7: Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global sur plan horizontal durant la journée de test du 17 Janvier 2018

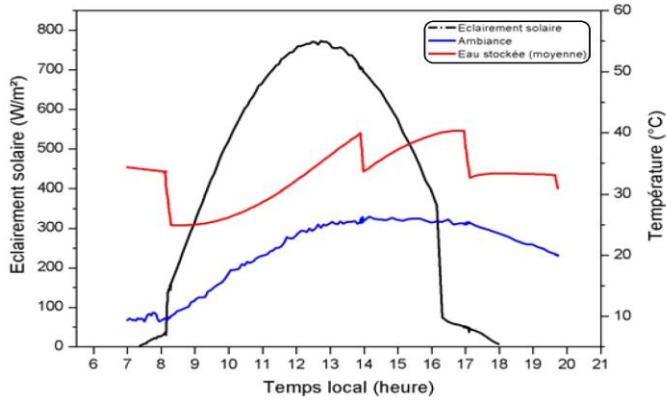


Fig. 8: Evolution de la température moyenne de l’eau stockée dans l’élément capteur-stockeur lors de la journée du 14 Novembre 2017 (Avec puisage)

Tableau 2: Résultats obtenus lors de la journée du 14 Novembre 2017 (ciel clair)

Horaire De Puisage	Masse Puisée (l)	Tr (°C) Réseau	Tp (°C) Puisage	Ta (°C) Ambiante	Q (kJ)	L (kJ)
8 h 00	20	13.70	33.25	9.71	1634.38	3037.68
14 h 00	10	24.82	54.42	25.78	1237.28	1052.52
17 h 00	20	28.69	45.99	25.25	1446.28	1781.51
20 h 00	10	23.38	33.07	20.05	405.04	1112.71
Total					4722.98	6984.42
La contribution du système <i>f</i>					0.676	

La contribution solaire du système est de **0.676**. Ce qui est fort apprécié au vu de la température ambiante nocturne minimale moyenne de l’ordre de 10 °C et de la masse d’eau soutirée qui s’élève à 60 litres par jour.

En figure 9, on présente, à titre indicatif, les résultats obtenus lors d’un test avec puisage continu relatif à la série N°3. Ce test a été effectué au matin du 9 Novembre 2017, sachant que la veille (durant toute la journée du 8 Novembre), aucun puisage n’a été effectué. Le puisage continu a été effectué avec un débit relativement faible pour ne pas affecter la stratification de l’eau stockée dans l’élément capteur-stockeur. Nous avons pu soutirer un volume d’eau chaude de 45 litres dont la température est supérieure à 36°C.

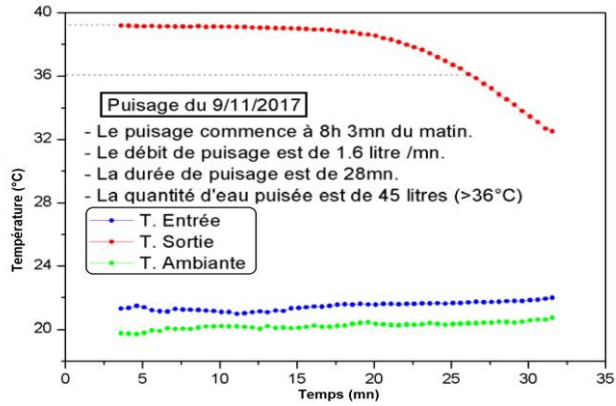


Fig. 9: Evolution de la température de l’eau chaude puisée en fonction du temps 08h du matin le 09 Novembre 2017

Sur la figure 10, on présente les résultats du test effectué au cours de trois (03) journées consécutives du 30 Novembre 2027 au 02 Décembre 2017 sans puisage d'eau chaude.

On remarque que les pertes thermiques nocturnes sont importantes et que la stratification d'eau chaude dans l'élément capteur-stockeur est bien établie en période de charge, alors qu'elle s'élimine complètement en période de décharge.

On remarque, également que l'écart entre la température de l'eau chaude au plafond est celle de l'eau chaude au centre est très important. Ceci s'explique par un mauvais transfert de chaleur vers l'intérieur du capteur-stockeur.

Il y a formation d'une zone de concentration de chaleur au niveau de la plaque absorbante et aux couches d'eau situées à côté du plafond du capteur-stockeur. Ceci se traduit par de grandes pertes thermiques à travers la couverture transparente qui devient fragile et sujette aux bris.

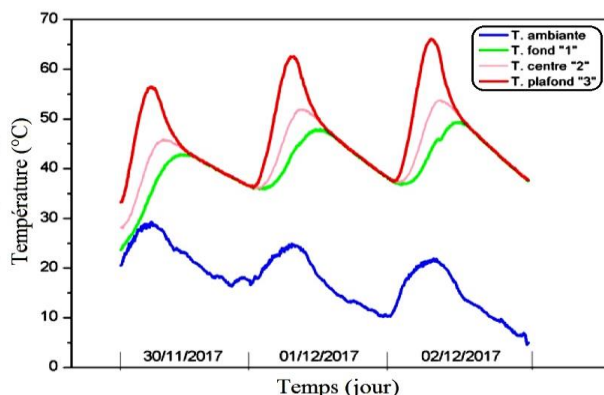


Fig. 10: Evolution de la température de l'eau stockée dans le capteur-stockeur pendant trois jours sans puisage du 30 Novembre 2017 au 02 Décembre 2017

On montre aux figures 11 à 13, les résultats obtenus lors de la journée du 25 Janvier 2018 avec un puisage de 30 litres entre 19h 59mn à 20h 5mn (Série de tests N°5). Cette journée a été caractérisée par un ciel totalement clair et un vent très calme. Le chauffe eau solaire a pu délivrer 30 litres d'eau dont la température est supérieure à 37 °C.

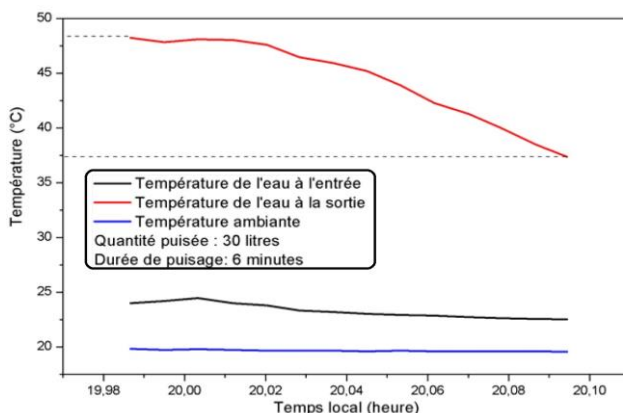


Fig. 11: Evolution de la température de l'eau puisée lors du soutirage continu à 20h le 25 Janvier 2018

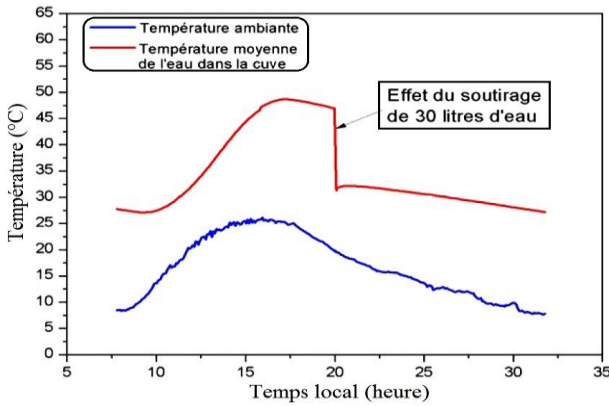


Fig. 12: Evolution de la température moyenne de l'eau stockée dans la cuve du système lors de la journée du 25 Janvier 2018

Malgré que le puisage d'eau s'est effectué avec un débit de l'ordre de cinq (05) litres/minute (assez fort), la stratification de l'eau chaude à l'intérieur de la cuve a été instaurée (figure 13) grâce à la disposition appropriée des canalisations d'entrée et de sortie d'eau, diagonalement opposées et dotées de distributeur en forme de clarinette.

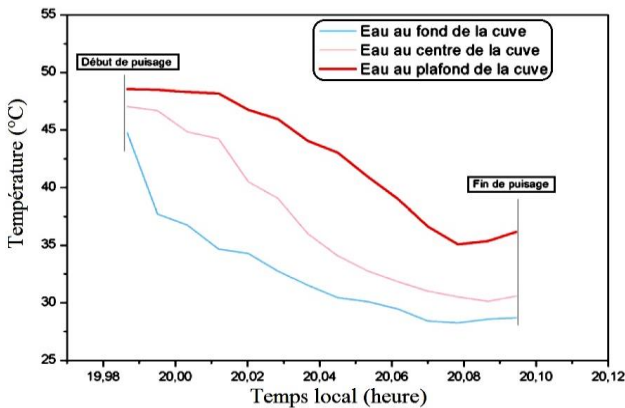


Fig. 13: Stratification de l'eau chaude à l'intérieur de la cuve pendant le puisage d'eau avec un débit de l'ordre de (05) l/mn lors de la journée du 25 Janvier 2018

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Dans cet article, un nouveau chauffe eau solaire de type capteur-stockeur conçu pour une intégration au mur de l'habitat en milieu saharien a été présenté. Un prototype a été ainsi réalisé et testé expérimentalement sous les conditions hivernales réelles d'Adrar.

Les résultats obtenus confirment la faisabilité de ce genre de système pour satisfaire les besoins des ménages sahariens en matière d'eau chaude sanitaire en période hivernale uniquement.

En période estivale et quand le dispositif n'est pas utilisé, il peut être alors exploité pour l'aération de l'habitation, lorsqu'on pivote les miroirs de son réflecteur vers la position horizontale selon le principe des abat-jour vénitiens.

Le système, tel que conçu, présente les avantages suivants-

- Simple de construction;
- Robuste et adapté aux conditions climatiques hostiles du milieu saharien;
- Ces performances thermiques sont assez bonnes;

Son efficacité peut être améliorée au moyen d'ailettes fixées sur la surface inférieure de la paroi supérieure du réservoir de stockage (plaque absorbante). Cette configuration permettra un meilleur transfert de chaleur vers les couches d'eau au fond du réservoir de stockage.

REFERENCES

- [1] M. Smyth, P.C. Eames and B. Norton, '*Integrated Collector Storage Water Heaters*', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 1010, pp. 503 - 538, 2006.
- [2] K. Devanarayanan and K. Kalidas Marugavel, '*Integrated Collector Storage Solar Water Heater with Compound Parabolic Concentrator-Developments and Progress*', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 39, pp. 51 - 64, 2014.
- [3] R. Singh, I.J. Lazarus and M. Souliotis, '*Recent Developments in Integrated Collector Storage (ICS) Solar Water Heaters: A Review*'. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 54, pp. 270 - 298, 2016.
- [4] A. Harmim et M. Boukar, '*Simulation et Expérimentation d'un Capteur Solaire Auto-Stockeur pour la Production d'Eau Chaude*', Colloque sur l'Héliothermie, l'Environnement et la Maîtrise des Systèmes solaires' CHEMSS 2000, Alger, Algérie, du 13 au 15 Mai 2000.
- [5] A. Harmim et M. Boukar, '*Etude Expérimentale Comparative de Trois Chauffe Eau Solaires de Type Capteur-Stockeur*', Séminaire sur les Technologies Avancées, Université de Tlemcen du 07 au 08 Décembre 2003.
- [6] A. Harmim et M. Boukar, '*Développement d'un Chauffe Eau Solaire Capteur-Stockeur dont l'Isolation est Assurée par l'Ecorce du Palmier*', Congrès National de la Physique et de ses Applications, CNPA-2004, Université de Tizi-Ouzou, 05 au 07 Décembre 2004.
- [7] A. Harmim, M. Boukar et M. Amar, '*Détermination Expérimentale des Performances de Trois Chauffe - Eau Solaires de Type Capteur-Stockeur*', Cinquièmes Journées de Mécanique JM'05, Ecole Militaire Polytechnique, 28 au 29 Mars 2006.
- [8] M. Al-Khaffajy and R. Mossad, '*Optimisation of the Air Gap Spacing in a Solar water heater with double glass cover*', 9th Australian Heat and Mass Transfer conference, Melbourne, Victoria, Australia, November 02-04, 2011.
- [9] M. Souliotis, D. Chemisana and Y.G. Gaouris and Y. Tripanagnostopoulos, '*Experimental study of integrated collector storage solar water heaters*', Renewable Energy, Vol. 50, N°C, pp. 1083 - 1094, 2013.