

Etude du Comportement Thermique d'une Cuve de Stockage Solaire à Echangeur de Chaleur

D. Lafri¹, A. Hamid², M. Belhamel¹ et D. Semmar¹

¹ Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de L'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

² I. G. M de l'Université de Blida, Algérie

Résumé - L'intérêt de ce travail est l'étude du comportement thermique d'une cuve de stockage dans une installation de chauffage solaire collectif. Elle permet de déterminer l'évolution du champs de températures dans une cuve de stockage. Pour cela, nous avons établi un modèle numérique qui décrit tous les modes de transferts thermiques impliqués. Les résultats théoriques obtenus du modèle sont comparés aux résultats expérimentaux. Cette confrontation a montré les limites du modèle théorique proposé.

Mots clés: Stockage - Energie - Convection naturelle - Chaleur sensible - Différences finies.

1. INTRODUCTION

Le travail que nous présentons ici est l'étude du stockage d'énergie sous forme de chaleur sensible d'une installation de chauffage d'eau solaire collective. Cela consiste à chauffer l'eau contenue dans une cuve par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur à serpentin immergé à l'intérieur.

Le circuit primaire de distribution de l'eau chaude est le champ de capteurs - échangeur. Le circuit secondaire est le stockage d'énergie - utilisation.

Le modèle numérique développé permet de déterminer l'évolution de la température au niveau de la cuve de stockage par l'influence du réchauffage d'un échangeur.

Afin de valider le modèle numérique, une étude expérimentale a été effectuée au niveau de site de Bouzaréah (Alger).

2. MODELISATION MATHEMATIQUE

Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices du modèle se base sur des considérations expérimentales :

- On considère le stockage sans puisage;
- Le volume d'eau dans la cuve reste constant malgré qu'il y ait une dilatation de l'eau;
- La pression de la cuve reste égale à la pression atmosphérique;
- Le modèle adopté sera du type unidirectionnel;
- Quelle que soit l'évolution de la température de stockage dans la zone de l'échangeur, le coefficient d'échange est supposé constant sur toute la longueur de l'échangeur;
 - L'échangeur est divisé en segments égaux, à température du fluide supposée uniforme. Chaque segment étant associé à la tranche élémentaire de la zone d'échangeur correspondante.
 - On simplifie la géométrie de l'échangeur de chaleur en serpentin par une chemise de forme d'un cylindre creux de faible épaisseur.

On définit deux zones : la zone (I) représentée par le fluide (eau) et la zone (II) qui est représentée par le fluide (eau) + échangeur de chaleur, (Fig. 1).

Les bilans thermiques des deux éléments (fluide et paroi) pour les deux zones sont donnés par les équations aux dérivées partielles suivantes :

Au niveau du fluide

Dans la Zone I :

$$M_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \lambda_f A_f dx \frac{\delta^2 T_f}{\delta x^2} - h A_l (T_p - T_f) \quad (1)$$

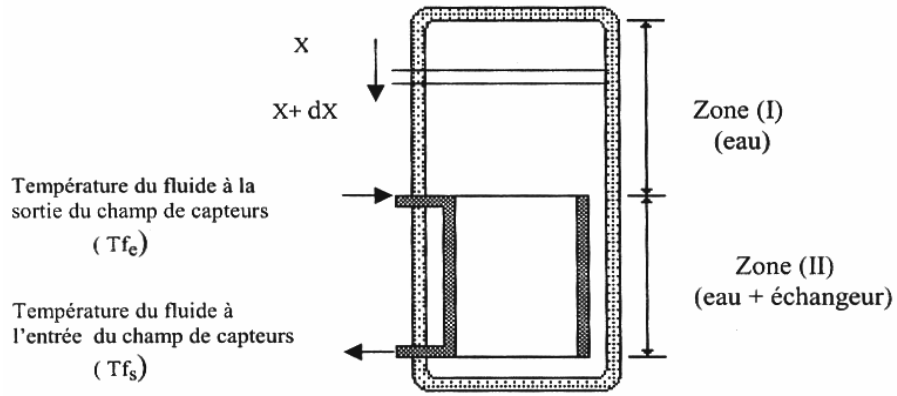


Fig. 1: Schéma du système de chauffage

et la Zone II

$$M_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \lambda_f A_f dx \frac{\delta^2 T_f}{\delta x^2} + U_{ec} A_{ec} (T_e - T_f) - h A_l (T_p - T_f) \quad (2)$$

Au niveau de la paroi

Dans les Zone (I) et Zone (II)

$$M_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda_p A_p dx \frac{\delta^2 T_p}{\delta x^2} - h A_l (T_f - T_p) - K_{ep} A_l (T_p - T_e) \quad (3)$$

où :

$$K_{eq} = \left(\frac{1}{2\pi L_c \lambda_c} \ln \left(\frac{R_c + e_a}{R_c} \right) + \frac{1}{2\pi L_c \lambda_{is}} \ln \left(\frac{R_e + e_a + e_{is}}{R_e + e_a} \right) + \frac{1}{2\pi R_c L_c h} \right)^{-1}$$

Les systèmes d'équations (1), (2) et (3) sont associés à des conditions aux limites suivantes :

- type adiabatique

$$x = 0 \quad ; \quad \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{\partial T_p}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

- on effectue le bilan thermique correspond à $x = H$,

Au niveau du fluide

$$M_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \lambda_f A_f dx \frac{\delta^2 T_f}{\delta x^2} - h A_l (T_f - T_p) \quad (5)$$

Au niveau de la paroi

$$M_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda_p A_p dx \frac{\delta T_p}{\delta x} - h A_l (T_p - T_f) - K_{ep} A_l (T_p - T_e) \quad (6)$$

et pour $x = H_{ec}$ (à l'entre de l'échangeur)

$$T_{ec}(t, x) = T_s(t)$$

$T_s(t)$ est la température de sortie du champ de captation.

Le système d'équations aux dérivées partielles (1) à (6) ont été résolus numériquement par le schéma explicite des différences finies.

3. ETUDE EXPERIMENTALE

Description du montage expérimental

Pour la validation du modèle élaboré et les hypothèses utilisées, un dispositif expérimental a été réalisé au Centre de Développement des Energies Renouvelables (Alger). Il est composé essentiellement de :

- Une cuve de stockage cylindrique (hauteur $H = 1,5$ m, rayon $R = 0,65$ m), l'isolation thermique est assurée par la laine de roche d'une épaisseur de 10 cm. Les fonds, eux, ont une isolation renforcée pour minimiser les pertes thermiques, la cuve repose sur trois cales.
- Le circuit primaire est composé d'un champ de capteurs et un échangeur.
- L'échangeur, de type serpentin, est constitué d'un tube en cuivre de 12 mm de diamètre intérieur et de 14 mm de diamètre extérieur enroulé en spires de 40 cm de diamètre. Le chauffage du fluide primaire est assuré par un champ de capteurs solaires composé de 04 capteurs plans avec possibilité de différentes configurations de branchement (en série, en parallèle ou bien mixte).

Le débit est fixé à 240 l/h. Les capteurs sont placés en série. L'échangeur est immergé à l'intérieur de la cuve de stockage d'une capacité de 400 litres.

Pour assurer la circulation de fluide dans le circuit primaire un groupe de transfert GT1 est mis en place, il est composé d'un circulateur à trois vitesses; d'un système de régulation et du vase d'expansion. La cuve de stockage est instrumentée de 38 thermocouples de type K (Cr-Al) dont 36 sont immergés dans différents endroits dans la cuve de stockage et 2 à l'entrée et à la sortie de l'échangeur, d'un débitmètre digital permettant de mesurer le débit du fluide circulant dans le circuit primaire.

L'ensemble des mesures transmis par ces capteurs est enregistré par l'intermédiaire d'une chaîne d'acquisition de données de marque Fluke. Cette dernière est connectée à un ordinateur dans lequel sont stockés les résultats.

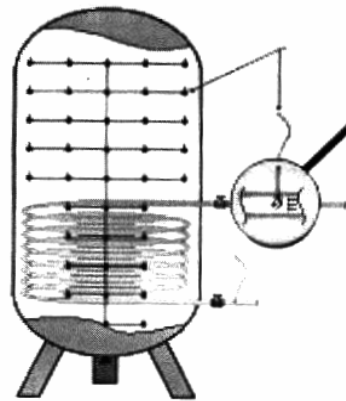


Fig. 2: Schéma de disposition des thermocouples dans le système de stockage

4 RESULTATS ET INTERPRETATION

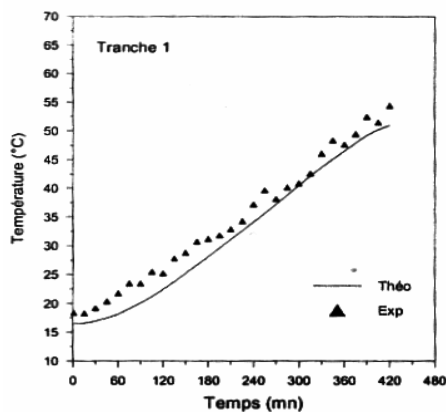


Fig. 3: Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux de la 1^{ère} tranche du fluide en fonction du temps

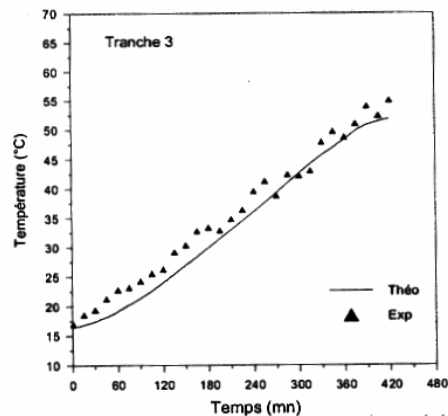


Fig. 4: Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux de la 3^{ème} tranche du fluide en fonction du temps

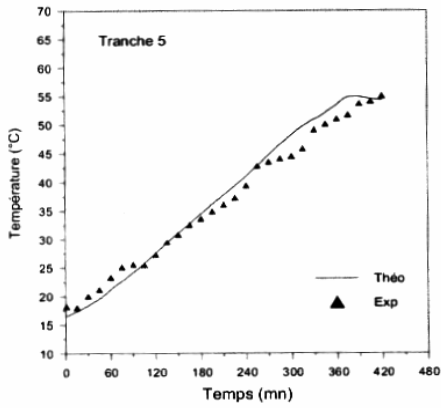


Fig. 5: Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux de la 5^{ème} tranche du fluide en fonction du temps

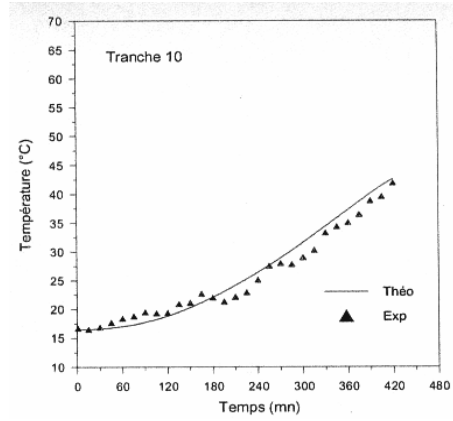


Fig. 6: Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux de la 10^{ème} tranche du fluide en fonction du temps

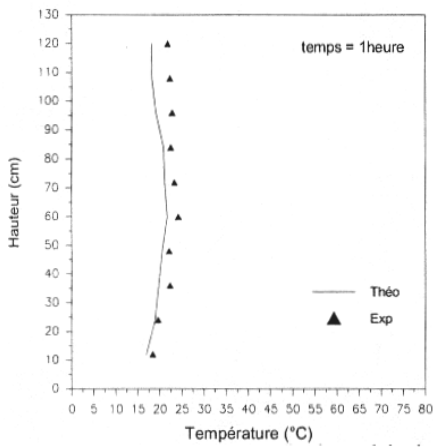


Fig. 7: Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux pour différentes hauteurs après 1 heure de chauffe

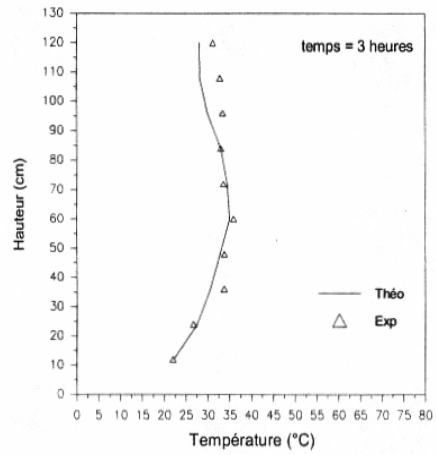


Fig. 8: Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux pour différentes hauteurs après 3 heures de chauffe

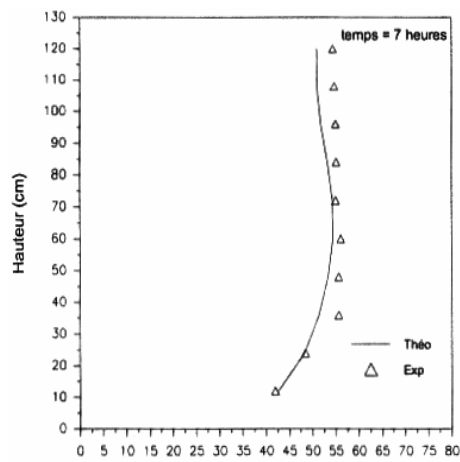


Fig. 9: Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux pour différentes hauteurs après 7 heures de chauffe

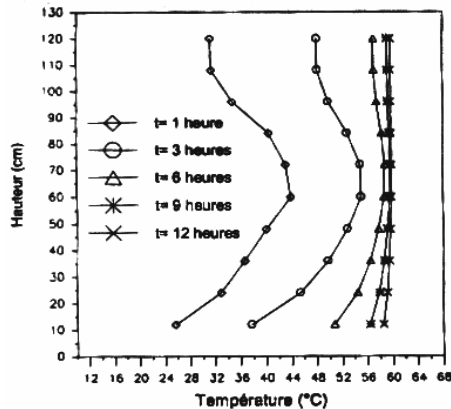


Fig. 10: Répartition des températures dans la cuve de stockage pour différents temps en cours de chauffe

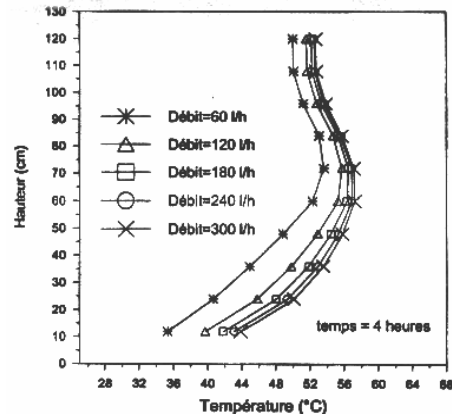


Fig. 11: Influence du débit sur la répartition de la température au niveau de la cuve de stockage

Les résultats théoriques et expérimentaux sont présentés sur les figures 2-6. Sur l'axe des abscisses, on a représenté le temps où le point 0 min correspond à 8 heures du matin. La température du fluide initiale dans la cuve varie entre 14 °C et 16 °C. Les confrontations des résultats expérimentaux et théoriques de la température de chaque tranche du fluide dans la cuve de stockage sont présentées par les figures 2-8 de la journée du 21 mars 2000.

On constate que :

- toutes les courbes ont la même allure sous forme d'une droite avec une pente importante. Autrement dit, en espace d'une période relativement courte, les températures sont passées de 15 °C à 54 °C approximativement. Ce qui explique les bonnes performances du système.

- la courbe de la figure 5 change d'allure, elles deviennent horizontales à la fin de chauffe (environ 390 minutes de chauffe). Ceci s'explique que les températures du fluide vont se stabiliser avant de passer à la phase de relaxation.

La 10^{ème} tranche reste dans la phase de chauffe par rapport aux autres tranches. Ceci est dû aux pertes thermiques de la partie inférieure de la cuve de stockage (existence des ponts thermiques). La comparaison des deux résultats théoriques et expérimentaux montre qu'ils sont pratiquement similaires pour toutes les tranches de fluides. Néanmoins, ils existent un léger écart qui est dû probablement aux causes suivantes :

- choix des corrélations empiriques dans le modèle numérique;
- inertie thermique du système;
- aux erreurs de mesures.

Nous avons représenté également sur les figures 6-8, les résultats expérimentaux et théoriques pour les variations en fonction du temps de la répartition verticale des températures à l'intérieure de la cuve de stockage. Les courbes montrent des répartitions de températures semblables.

On remarque qu'à la fin de chauffe, l'allure change de forme, elle devient presque uniforme. Les résultats montrent aussi une bonne concordance pour toutes les tranches. Néanmoins, il existe un léger écart qui a été constaté à la partie supérieure. Il est dû à la présence de la couche d'air qui renforce l'isolation thermique.

La cuve est initialement à une température uniforme de 23 °C. de débit du fluide caloporteur dans le circuit primaire est constant. La température d'entrée de l'échangeur est de 60 °C.

Une famille de courbes représentent la répartition des températures en cours de chauffe à l'intérieure de la cuve de stockage à différents instants (Fig. 9).

On peut constater que :

- pour une même période (3 heures), la vitesse de chauffe n'est pas uniforme;
- la température de la tranche du fluide secondaire située à l'entrée de l'échangeur est la plus élevée;
- on observe au cours de chauffe l'augmentation des températures des tranches de fluides au dessus de l'échangeur, relativement rapide par rapport à la zone du fluide au dessous de l'échangeur.

Ceci est dû d'une part à l'effet de la paroi latéral sur le fluide (court circuit thermique) et d'autre part aux pertes thermiques de la partie inférieure (la partie supérieure de la cuve est considérée comme adiabatique).

On constate également à partir de 7 heures de chauffage l'allure change de forme et les tranches de fluides secondaires ont tendance à avoir la même température aux environ de 55 °C, à partir de 9 heures, les courbes sont presque confondues et ont des allures d'une droite verticale parallèle à l'axe des hauteurs (température est uniforme le long de la cuve).

Les courbes de la figure 10 montrent le profil axial de la température après une durée de chauffe de $t = 4$ heures et pour différentes valeurs de débits (60 l/h, 120 l/h, 180 l/h, 240 l/h et 300 l/h).

On remarque que les courbes ont la même allure. On constate que les écarts des températures pour chaque tranche du fluide entre les débits successives (60 l/h - 120 l/h et 120 l/h - 180 l/h) sont différents, et à partir de 180 l/h les courbes sont presque confondues et l'augmentation du débit n'influe pas sur l'évolution de la température à l'intérieure de stockage.

Pour cela, il est recommandé pour un bon rendement d'une installation de chauffage d'eau solaire collective un débit de 60 l/h/capteur. Ce qui correspond à un débit total de 240 l/h.

5. CONCLUSION

Cette étude a porté sur le stockage thermique dans une cuve d'une installation de chauffage d'eau solaire collective. La modélisation mathématique basée sur les bilans thermiques de chaque zone dans la cuve de stockage a été réalisée. Les équations différentielles obtenues sont résolues par les deux schémas implicite et explicite aux différences finies. Afin de valider le modèle numérique, une étude expérimentale a été mise en oeuvre.

La confrontation des résultats théoriques et expérimentaux pour les deux phases a montré que les écarts n'excèdent pas 10 % correspondant à une concordance très satisfaisante.

Les résultats expérimentaux ont montré que le gradient de températures suivant l'horizontale à l'intérieure de la cuve pour chaque zone est négligeable.

Le débit du circuit primaire influe sur la répartition de la température dans la cuve de stockage pour les valeurs comprise entre 60 - 240 l/h. Au delà de la valeur supérieure, les températures de chaque tranche reste inchangée.

REFERENCES

- [1] D. Lafri, '*Etude du Comportement Thermique d'un Champ de Capteur d'une Installation de Chauffage d'eau Solaire*', 7^{èmes} Journées Internationales de Thermique, Marrakech, Maroc, Avril 1995.
- [2] D. Lafri, '*Contribution à l'Etude du Comportement Thermique d'une Cuve de Stockage d'une Installation de Chauffage d'eau Solaire*', Thèse de Magister, C.D.E.R., Alger, Algérie, 2001.
- [3] A. Hamid, D. Lafri, S. Sami and D. Semmar, '*Study and Realization of a Solar Water Heating Installations for Différent Remote Sites of Algeria*', Incorporating the 7th Arab Conference on Solar Energy, Sharjah, UAE, February 2001.
- [4] D. Lafri, M. Khoukhi et D. Semmar, '*Simulation Numérique d'une Installation Collective d'eau Chaude Solaire de Capacité 800 litres*', 3^{ème} Séminaire International de la Physique Energétique, SIPE4, Béchar, Novembre 1996.
- [5] D. Lafri, A. Hamid, A. Harhad et D. Semmar, '*Evolution de la Stratification Thermique dans une Cuve de Stockage de Chaleur Sensible en Phase de Relaxation*', Séminaire International de la Physique Energétique, SIPE4, Béchar, Novembre 1998.
- [6] J.A. Duffie and W.A. Beckman, '*Solar Engineering of Thermal Processes*', Second Edition, by John and Sons U.S.A., 1991.
- [7] D. Bray, '*Evolution de la Stratification Thermique dans un Accumulateur*', Revue Générale de la thermique, N°52, Février 1982.