

Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire à caloducs

Kamel HARZLI, Abdelmajid JEMNI

Laboratoire d'Etude des Systèmes Thermiques et Energétiques, Rue Ibn Eljazzar, ENIM, 5019, Monastir,
Tunisie

kimo.ener@gmail.com

abdelmajid.jemni@enim.rnu.tn

Résumé :

Dans ce travail, un modèle mathématique a été développé pour évaluer le comportement thermique d'un capteur solaire à base de caloducs. Ce modèle a été établi et résolu numériquement par la méthode des volumes finis. Il est utilisé pour étudier l'effet des différents paramètres sur les performances d'un capteur solaire à base de caloducs. L'effet des différents paramètres de fonctionnement, tels que la température de l'eau de refroidissement à l'entrée, la nature du fluide de fonctionnement piégé à l'intérieur du caloduc, le rayonnement solaire global incident et le débit d'eau à l'entrée, est étudié. Nous avons aussi mené une étude expérimentale sur un capteur solaire à base de caloducs. La comparaison entre les résultats expérimentaux et théoriques a montré un bon accord.

Mots clés : Capteur solaire; caloduc; Modèle mathématique; volumes finis.

1. Introduction :

Un caloduc est un dispositif de transfert de chaleur, avec changement de phase, très performant. Il est composé d'une enceinte hermétique contenant un fluide caloporteur. Ce fluide s'évapore au niveau de l'évaporateur. La vapeur produite est transférée ensuite vers le condenseur où elle se condense. Le retour du fluide vers l'évaporateur est assuré par pompage capillaire [1- 3]. Les applications des caloducs ne cessent de se développer jusqu'à nos jours pour trouver des solutions liées aux problèmes de régulation thermique [4- 6]. Ils sont également utilisés pour l'exploitation des énergies renouvelables. Le capteur solaire à base de caloducs suscite l'intérêt de plusieurs chercheurs [7-13]. Ils se sont intéressés à l'amélioration de leur performance en contrôlant les paramètres de transfert et ceux géométriques. Pour ce faire, il est impératif de simuler le comportement thermique de tel capteur. C'est dans ce cadre, que le présent travail s'insère. On se propose d'étudier numériquement et expérimentalement un capteur à base de caloducs.

2. Modèle physique :

Le capteur solaire objet de cette étude est de surface égale à 1.54 m^2 (figure 1). Il est formé d'une plaque en cuivre à laquelle sont fixés les évaporateurs des caloducs utilisés sur une longueur de 1.55 m. Les condenseurs, de longueur égale à 4 cm, sont réunis dans une enceinte « dite échangeur » où circule transversalement l'eau à chauffer.

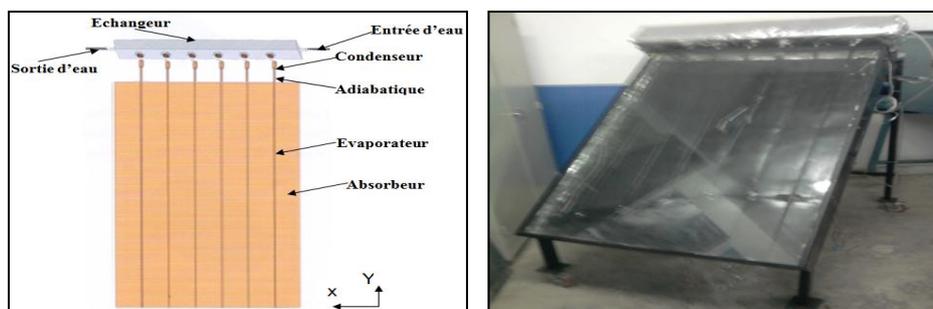


Figure 1 : vue globale et en coupe du capteur étudié

3. Formulation mathématique :

Pour simplifier l'analyse théorique, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- ✓ La température de l'évaporateur et du condenseur ne dépend pas de « y » c'est-à-dire pour chaque caloduc la température est constante tout le long de l'évaporateur et du condenseur.
- ✓ Les échanges par conduction dans l'absorbeur et le vitrage sont négligeables selon la direction « y ».
- ✓ Du fait que l'épaisseur de l'absorbeur et du vitrage sont faibles et compte tenu de la bonne isolation des surfaces latérales du capteur, nous avons négligé les échanges à travers ces surfaces.
- ✓ La température du fluide dans l'échangeur est uniforme sur un plan perpendiculaire à l'écoulement.
- ✓ Les faces de l'échangeur perpendiculaires à l'écoulement sont adiabatiques

En considérant ces hypothèses, les équations régissant le transfert dans les différents éléments du capteur sont données par :

3.1. Le bilan thermique de la vitre:

$$\rho_V C_V \delta_V \frac{dT_V}{dt} = G_t \alpha_V + k_V \delta_V \frac{dT_V}{dx^2} + h_{ccv}(T_c - T_v) + h_{rcv}(T_c - T_v) - h_{cve}(T_v - T_e) - h_{rve}(T_v - T_{ciel}) \quad (1)$$

3.2. Le bilan thermique de l'absorbeur:

$$\rho_c C_c \delta_c \frac{dT_c}{dt} = G_t \alpha_c \tau_V - h_{ccv}(T_c - T_v) - h_{rcv}(T_c - T_v) - U_b(T_c - T_e) + k_c \delta_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} \quad (2)$$

3.3. Le bilan thermique de l'évaporateur:

$$\rho_{ev} C_{ev} A_{ecs} \frac{\partial T_{ev}}{\partial t} = G_t (\alpha_c \tau_V)_{ev} - \pi d_i h_{ev} (T_{ev} - T_s) - \frac{\pi d_0}{2} (h_{rev,v} + h_{cev,v}) (T_{ev} - T_v) - \frac{\pi d_0}{2} U_b (T_{ev} - T_e) - 2k_c \delta_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \Big|_{x=w} \quad (3)$$

3.4. Le bilan thermique du condenseur:

$$\rho_{co} C_{co} A_{ccs} \frac{\partial T_{co}}{\partial t} = \pi d_i h_{co} (T_s - T_{co}) - \pi d_0 h_{fi} (T_{co} - T_w) \quad (4)$$

La vapeur utilisée à l'intérieur du caloduc peut être considérée comme totalement saturée, le bilan thermique appliqué sur cette phase vapeur est donné par:

$$\frac{\pi d_i^2}{2} \rho_L C_L l_t V_t^* \frac{dT_s}{dt} = \pi d_i l_{ev} h_{ev} (T_{ev} - T_s) - \pi d_i l_{co} h_{co} (T_s - T_{co}) \quad (5)$$

3.5. Le bilan thermique de l'eau:

$$\rho_w C_w A_w \frac{dT_w}{dt} + \dot{m}_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial x} = \pi \frac{d_0 l_{co}}{L_w} h_{fi} (T_{co} - T_w) - P_{exi} h_{fo} (T_w - T_{ex}) \quad (6)$$

3.6. Le bilan thermique de l'échangeur:

$$\rho_{ex} C_{ex} A_{excs} \frac{\partial T_{ex}}{\partial t} = P_{exi} h_{fo} (T_w - T_{ex}) - P_{exe} U_{ex} (T_{ex} - T_a) + k_{ex} A_{excs} \frac{\partial^2 T_{ex}}{\partial x^2} \quad (7)$$

Les différents coefficients d'échanges utilisés dans les équations précédentes sont reportés dans le tableau 1.

Pour résoudre le système d'équations obtenu, nous avons considéré les conditions initiales et aux limites suivantes :

- Initialement à t=0 toutes les composantes du capteur se trouvent à la même température et égale à celle de l'environnement extérieur.
- Pour x=0 et x=L, le capteur et l'échangeur sont supposés bien isolés

$$\frac{\partial T_c}{\partial x} = \frac{\partial T_v}{\partial x} = \frac{\partial T_{ex}}{\partial x} = 0$$

- En x=0, le fluide entre dans l'échangeur à une température constante $T_{entrée}$

Le système d'équations ainsi obtenu est discrétisé en utilisant la méthode des volumes finis. Le maillage utilisé est uniforme. La résolution du système d'équations algébriques ainsi obtenu est réalisée par la méthode d'élimination de Gauss.

Tableau 1 : Les coefficients de transfert de la chaleur

Coefficient de transfert	Unité
$h_{cve} = 5.7 + 3.8 * V_{vent}$	$W/m^2.K$
$h_{rve} = 5.67 * 10^{-8} \varepsilon_v (T_{ciel} + T_v) (T_{ciel}^2 + T_v^2)$	$W/m^2.K$
$h_{rcv} = 5.67 * 10^{-8} (\varepsilon_c^{-1} + \varepsilon_v^{-1} - 1) (T_c + T_v) (T_c^2 + T_v^2)$	$W/m^2.K$
$h_{ccv} = \frac{k}{D} \left(1 + 1.44 * \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\theta)^{1.6}}{R_a \cos \theta} \right] \left[1 - \frac{1708}{R_a \cos \theta} \right] \left[\frac{(R_a \cos \theta)^{1/3}}{5830} - 1 \right]^+ \right)$	$W/m^2.K$
$h_{ev} = 0.32 * \frac{\rho_L^{0.65} k_L^{0.3} C_{pL}^{0.7} g^{0.2} q_{ev}^{0.4}}{\rho_V^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_L^{0.1}} \left(\frac{P_{sat}}{P_{atm}} \right)^{0.23}$	$W/m^2.K$
$h_{co} = 0.997 - 0.334(\cos S)^{0.108} \left[\frac{k_L^3 \rho_L^2 C_{pL}^{0.7} g h_{fc}}{\mu_L l_{co} (T_s - T_{co})} \right]^{-0.25} \left[\frac{l_{co}}{d_i} \right]^{[0.254(\cos S)^{0.385}]}$	$W/m^2.K$
$h_{fi} = \frac{k}{D} \left[2.9 - 2.32(\sin \theta)^{0.8} \right] \left(\frac{Gr_D}{Gr_{Lr}} \right)^{-1/12} \left(\frac{Pr}{Pr_r} \right)^{\left[\frac{1}{4} + \left(\frac{1}{12} \right) (\sin \theta)^{1.2} \right]}$	$W/m^2.K$
$h_{fo} = \frac{k}{D} 1.86 \left(\frac{Re Pr D}{L} \right)^{1/3} \left(e^{\left[\left(\frac{1}{273} \right)^{2.9991} Ln(1.7940) (T^{2.9991} - T_p^{2.9991}) \right]} \right)^{0.14}$	$W/m^2.K$
$h_{rev,v} = 5.67 * 10^{-8} (\varepsilon_{ev}^{-1} + \varepsilon_v^{-1} - 1) (T_{ev} + T_v) (T_{ev}^2 + T_v^2)$	$W/m^2.K$
$h_{cev,v} = \frac{k}{D} \left(1 + 1.44 * \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\theta)^{1.6}}{R_a \cos \theta} \right] \left[1 - \frac{1708}{R_a \cos \theta} \right] \left[\frac{(R_a \cos \theta)^{1/3}}{5830} - 1 \right]^+ \right)$	$W/m^2.K$

4. Résultats et discussions :

4.1. Validation:

Pour valider le code de calcul développé, nous avons comparé la température de l'eau calculée à la sortie du capteur et la température moyenne calculée au niveau de l'absorbeur à celles mesurées sur un prototype disponible au laboratoire d'Etudes des Systèmes Thermiques et Energétiques (figure 2). Les conditions climatiques (température ambiante, rayonnement solaire incident G) et d'essai (température de l'eau à l'entrée) sont prises les mêmes. Un bon accord est observé.

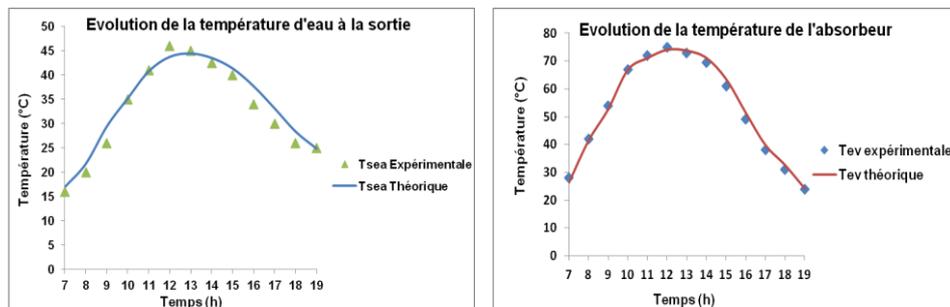


Figure 2 : Les évolutions de la température de l'eau à la sortie et celle de l'absorbeur

4.2. Effet des différents paramètres:

Une fois validé, le code est utilisé pour étudier l'influence de certains paramètres de fonctionnement sur le rendement thermique du capteur, tels que le de débit d'eau et la nature du fluide caloporteur piégé dans le caloduc. Dans ce cas, les mêmes données métrologiques, utilisées pour la validation, sont conservées.

4.2.1. Effet du débit :

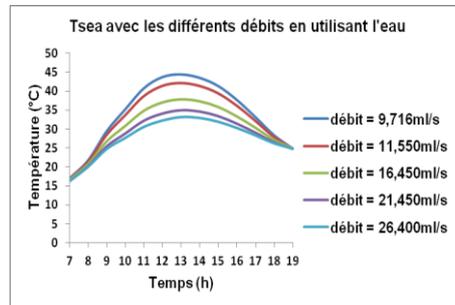


Figure 3 : Evolution de la température de l'eau à la sortie pour les différents débits

On remarque sur la figure 3 que la température de l'eau à la sortie de l'échangeur augmente avec la diminution du débit. Ceci s'explique par le fait qu'un faible débit d'eau implique une augmentation du temps de contact eau-condenseur du caloduc et par conséquent l'augmentation de la chaleur récupérée.

4.2.1. Effet du fluide caloporteur :

Quatre fluides de fonctionnement piégés dans le caloduc sont testés et ce pour deux débits d'eau différents dans l'échangeur (9.716 ml/s et 16.450 ml/s). Les résultats sont reportés sur la figure 4.

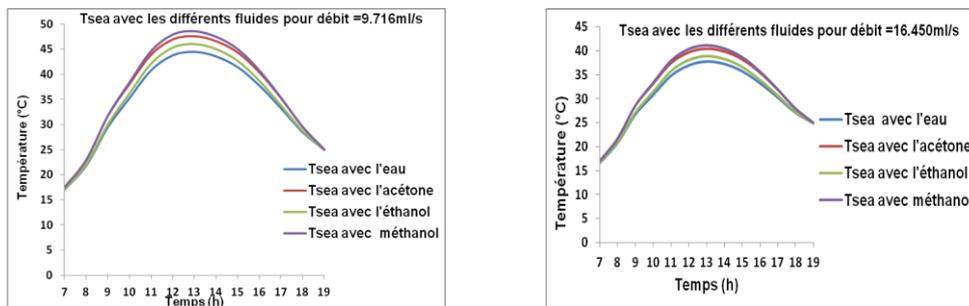


Figure 4 : Evolution de la température de l'eau à la sortie avec un débit de 9.716 ml/s et 16.450ml/s

On remarque que le méthanol permet d'avoir une température d'eau à la sortie de l'échangeur la plus importante. De plus, l'augmentation du débit d'eau entraîne la diminution de la température d'eau à la sortie et que l'effet du fluide de fonctionnement piégé dans le caloduc diminue.

5. Etude expérimentale :

Les essais ont été réalisés pour différents débits d'eau et pour plusieurs journées pendant la période estivale. Les mesures relatives à ces essais sont réalisées entre 7 h et 19 h. Sur la figure 5, nous montrons l'évolution journalière du flux solaire incident sur le capteur durant la journée du 14 mai 2012.

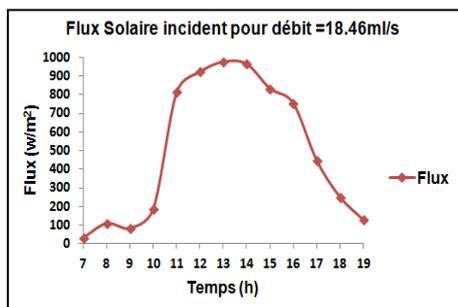


Figure 5 : Evolution journalière du flux solaire incident sur plan du capteur

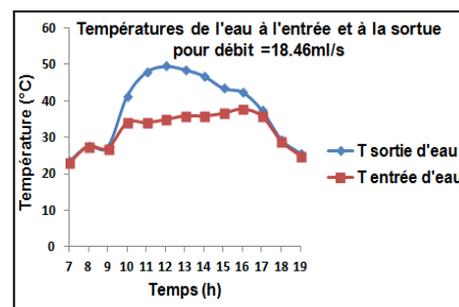


Figure 6 : Evolution temporelle de la température de l'eau à l'entrée et la sortie

Sur la figure 6, nous avons tracé l'évolution journalière des températures de l'eau à l'entrée et à la sortie. La température de l'eau à la sortie du capteur atteint une valeur maximale vers 13 h où le flux solaire est maximal. Un écart de température maximal est aussi observé entre la température d'entrée et de sortie. Cet écart augmente si le débit de circulation de l'eau dans le capteur diminue.

La figure 7 trace l'évolution journalière des températures mesurées au niveau de deux points différents de l'évaporateur placées dans une zone centrale et près du bord de l'absorbeur. Elle montre que les températures des différents tubes du caloduc dans la zone d'évaporation sont très proches. Ceci confirme que la température dans la partie d'évaporation est uniformément répartie sur l'absorbeur et les caloducs.

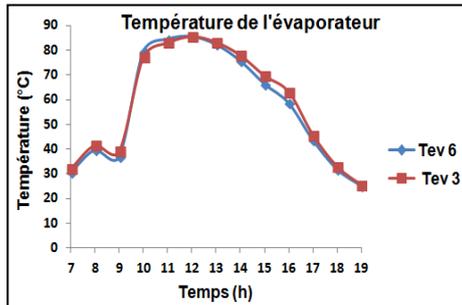


Figure 7 : Evolution temporelle de la température de deux évaporateurs différents

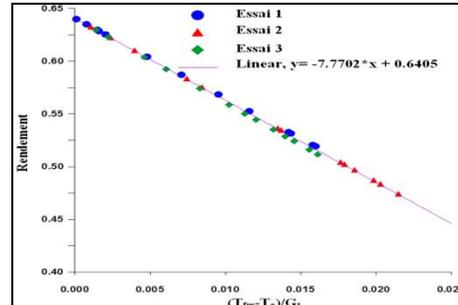


Figure 8 : Evolution du rendement du capteur pour les différents essais

Nous avons également tracé expérimentalement le rendement thermique du capteur. Ce rendement est souvent exprimé en fonction de $\frac{(T_{fm} - T_a)}{G_t}$ suivant l'expression suivante :

$$\eta = F' \tau_v \alpha_c - F' h_p \frac{(T_{fm} - T_a)}{G_t} \quad (8)$$

Nous avons tracé ce rendement pour trois essais réalisés sur des journées différentes. Une évolution linéaire de pente négative est obtenue pour les différents débits (Figure 8). L'exploitation de ce résultat permet de remonter aux coefficients caractérisant les pertes $F' h_p$ et le gain $F' \tau_v \alpha_c$ du capteur ; ces coefficients sont respectivement égaux à $7.7702 \text{ W.m}^{-2}.\text{k}^{-1}$ et 0.6405 .

6. Conclusion :

Dans le présent travail, nous avons étudié numériquement et expérimentalement un capteur solaire à base de caloducs. Un code simulant le fonctionnement du capteur a été établi et validé expérimentalement. Il a servi pour étudier numériquement l'effet de certains paramètres indispensables dans l'étude d'un capteur solaire à savoir le débit d'eau circulant dans l'échangeur et le fluide de fonctionnement du caloduc. Nous avons aussi présenté les résultats expérimentaux réalisés sur un prototype conçu et réalisé au laboratoire.

Nomenclature

Symbole	Nom,	unité		
			G	flux solaire incident, W/m^2
			h	coefficient de transfert thermique, $\text{W/m}^2.\text{K}$
			U	coefficient de transfert thermique, $\text{W/m}^2.\text{K}$
			A	section, m^2
			<i>Symboles grecs</i>	
			α	diffusivité thermique, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
			δ	épaisseur, m
			ρ	masse volumique, kg/m^3
			τ	transmissivité
			<i>Exposant, Indices</i>	
			v	vitre
			c	absorbeur
k	conductivité thermique,	W/m.K		
T	température,	K		
C	chaleur massique,	J/kg.K		
t	temps,	s		
x	coordonné cartésien			
y	coordonné cartésien			
F	facteur d'efficacité de l'absorbeur			
P	périmètre,	m		
V	taux de remplissage			
\dot{m}	débit massique,	kg/s		
l	longueur,	m		
d	diamètre,	m		

ev	évaporateur	rev,v	rayonnement entre l'évaporateur et la vitre
co	condenseur	cev,v	convection entre l'évaporateur et la vitre
s	saturation	ccs	section transversal du condenseur
w	eau	fi	convection entre le condenseur et l'eau
ex	échangeur	fo	convection entre l'eau et l'échangeur
ccv	convection entre la vitre et l'absorbeur	t	total
rcv	rayonnement entre la vitre et l'absorbeur	L	liquide de fonctionnement
cve	convection entre l'absorbeur et l'extérieur	exi	surface intérieure de l'échangeur
rve	rayonnement entre l'absorbeur et l'extérieur	exe	surface extérieure de l'échangeur
e	extérieur	ext	extérieur
ciel	le ciel	excs	section transversal de l'échangeur
b	pertes convective et rayonnement globales	a	ambient
ecs	section transversal de l'évaporateur	fm	température moyenne du fluide
i	intérieur		
o	extérieur		

Références

- [1] Rémi Bertossi, Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans les caloducs : Contribution à l'analyse des phénomènes d'interfaces intervenant dans les écoulements diphasiques, Thèse de l'école Nationale supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique (ENSMA) de Poitiers, 2009.
- [2] Zied Lataoui, Contribution à l'étude des transferts thermique au sein des caloducs rainurés : Identification de la position du front d'assèchement, Thèse de l'Université de Monastir et l'école Nationale supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique (ENSMA) de Poitiers, 2000.
- [3] Cyril Romestant, Etudes théoriques et expérimentales de caloducs et de thermosiphons soumis à forces accélérations, Thèse de l'école Nationale supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique (ENSMA) de Poitiers, 2000.
- [4] Sri Jaiandran .A ; L. Munusamy, Heat Pipes in Electronic Packaging, Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Science, January 2006.
- [5] M. Lallemand ; V. Sartre, Revue sur la Recherche et les développements Récents des Microcaloducs, Rev. Energ. Ren : Journées de Thermique (2001) 1-17.
- [6] Aymeric Lai, Conception et réalisation de caloducs silicium pour les applications spatiales, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [7] Samuel Luna Abreu ; Sergio Colle , An experimental study of two-phase closed thermosyphons for compact solar domestic hot water-systems , *Solar Energy*, Volume 76, Pages 141-145, 2004.
- [8] Mehmet Esen ; Hikmet Esen , Experimental investigation of a two-phase closed thermosyphon solar water heater , *Solar Energy*, Volume 79, Pages 459-468, 2005.
- [9] Emmanouil Mathioulakis ; Vassilis Belessiotis , A new heat-pipe type solar domestic hot water system, *Solar Energy*, Volume 72, Pages 13-20, 2002.
- [10] S.B. Riffat; X. Zhao; P.S. Doherty , Developing a theoretical model to investigate thermal performance of a thin membrane heat-pipe solar collector, *Applied Thermal Engineering*, Volume 25, Pages 899-915, 2005.
- [11] H.M.S Hussein ; M.A Mohamed ; A.S El Asfour, Optimization of wickless heat pipe flat plate solar collector, *Energy Conversion and Management*, Volume 47, Pages 1539-1549, 2006.
- [12] H.M.S Hussein, Theoretical and experimental investigation of wickless heat pipes flat plate solar collector with cross flow heat exchanger, *Energy Conversion and Management*, Volume 48, Pages 1266-1272, 2006.
- [13] John A. Duffie; William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Second Edition, 1980.