

Optimisation théorique du fonctionnement d'un distillateur solaire à film capillaire

First O. SOTEHI, Second A. CHAKER

Résumé — Dans de nombreuses régions en Algérie, la demande en eau menace de dépasser les possibilités d'approvisionnement. Les stratégies classiques visant à accroître les disponibilités ne suffisent plus à garantir la satisfaction des besoins croissants. La distillation solaire peut être envisagée comme une solution, non seulement comme un facteur écologique, mais comme une réelle alternative aux ressources énergétiques. L'objectif de notre étude, est l'optimisation théorique du fonctionnement d'un distillateur solaire à film capillaire. Pour cela nous avons élaboré un système d'équations qui gouverne le fonctionnement de ce distillateur en régime transitoire. Les résultats obtenus mettent en évidence l'effet de nombreux paramètres internes et externes sur la production de ce distillateur. Il est clair que le rayonnement solaire reste le facteur le plus influent sur la production ; son augmentation conduit à un accroissement de la production. La température de la saumure et la température ambiante influent considérablement sur la production.

Mots clés— distillateur à film capillaire, distillation solaire, optimisation théorique, production.

I. INTRODUCTION

La situation critique de l'Algérie en matière d'eau est exprimée par le ratio établi entre les ressources renouvelables et la consommation ($500 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{an}$). Les spécialistes estiment que si la ressource naturelle en eau chute à moins de $1000 \text{ m}^3/\text{hab}$ par année, elle devient une ressource rare. Les spécialistes prévoient que ce ratio serait de $420 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{an}$ en 2020 et atteindrait dangereusement $300 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{an}$ en 2025, voire $200 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{an}$, si on ne compte que les eaux de surface. Cette tendance résulte du fait que l'Algérie est un pays semi-aride, et s'appuie sur des données liées à la croissance démographique et au développement économique et social du pays.

Hors l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde, avec plus de 3.000 heures d'ensoleillement par an. L'énergie quotidienne reçue par unité de surface horizontale sur la majeure partie du territoire national est évaluée à près de 5 KWh, soit une puissance d'environ $1.700 \text{ KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ dans le Nord du pays et 2.263

$\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ dans les régions du Sud. Ainsi et pour mieux préserver l'avenir en matière de dégagement et de mobilisation des ressources en eau, il est plus judicieux de revoir la planification des ressources en eau conventionnelles dans le cadre d'une vision globale qui intègre également l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles notamment le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres.

Néanmoins, le dessalement nécessite de l'énergie dont le coût intervient pour une grande partie dans celui de l'eau. Il paraît a priori intéressant d'envisager l'utilisation de l'énergie solaire (distillation solaire) dans le processus de dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres, non plus comme un facteur écologique, mais comme une réelle alternative aux ressources énergétiques.

Les distillateurs solaires se caractérisent par leur faible rendement. L'objectif de ce travail est l'étude de l'influence des paramètres internes et externes sur le fonctionnement et la production du distillateur solaire à film capillaire, afin d'optimiser le fonctionnement de ce dernier.

II. DESCRIPTION DU SYSTEME

Le distillateur solaire à film capillaire a été conçu par C Ouahes et P. Le Goff. Il se compose d'une très mince couche de textile à mailles fines, imbibée d'eau qui se maintient d'elle même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension inter faciales nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air.

Ce distillateur est composé des éléments suivants : le capteur – évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi.

F. O. Sotehi ; Laboratoire Physique Energétique, Université Mentouri Constantine ; Algérie .phone: 05-50-55-44-21; e-mail: elwali1@yahoo.fr.

S. A. Chaker; Laboratoire Physique Energétique, Université Mentouri Constantine ; Algérie. e-mail: chakamine@yahoo.fr.

Fig. 1. Distillateur solaire à film capillaire

III. MISE EN EQUATION EN REGIME TRANSITOIRE

- Au niveau de la couverture vitrée

$$\frac{M_g \times C_p \times \frac{dT_g}{dt}}{A_g} = P_g + q_{ev-g}^c + q_{ev-g}^r - q_{g-a}^c - q_g^r \quad (1)$$

Avec [1] :

$$P_g = (1 - R_g) \times \alpha_p \times \quad (2)$$

$$q_{ev-g}^c = h_{ev-g}^c \times (T_{ev} - T_g) \times A_g \quad (3)$$

h_{ev-g}^c est le coefficient d'échange par convection entre l'évaporateur et la vitre. Il peut être calculé par [2] :

$$h_{ev-g}^c = \frac{Nu_{ev-g}}{D} \quad (4)$$

La valeur du nombre de Nusselt peut être obtenu par l'utilisation de l'expression donnée par Holland et al (1976) l'air est le fluide qui sépare la plaque et la vitre [1].

$$Nu = 1.14 \times \left[1 - \frac{4706}{Re \cos \beta} \right]^+ \times \left(1 - \frac{\sin(1.8 \times \beta)^{1.4}}{Re \cos \beta} \right) + \left[\left(\frac{Re \cos \beta}{5520} \right)^{1/4} - 1 \right]^+ \quad (5)$$

Le signe (+) indique que seule les valeurs positives sont prises en compte, les valeurs négatives sont prises égales à zéro.

$$q_{ev-g}^r = h_{ev-g}^r \times (T_{ev} - T_g) \times A_g \quad (6)$$

h_{ev-g}^r étant le coefficient d'échange par rayonnement entre l'évaporateur et la vitre calculé par [3] :

$$h_{ev-g}^r = \sigma_{ev-g} \times \sigma \times (T_{ev}^4 + T_g^4) \times (T_{ev} + T_g) \quad (7)$$

Avec :

$$\sigma_{ev-g} = \left[\frac{1}{T_{ev}} + \frac{1}{T_g} - 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

$$q_{g-a}^c = h_{g-a}^c \times (T_g - T_c) \times A_g \quad (9)$$

h_{g-a}^c : Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel donné par :

$$h_{g-a}^c = \sigma_g \times \sigma \times (T_g^4 + T_c^4) \times (T_g + T_c) \quad (10)$$

T_c est la température du ciel.

Cette température est obtenue en utilisant la relation de Swinbank [4] :

$$T_c = 0.0552 \times (T_a) \quad (11)$$

$$q_{g-a}^c = h_{g-a}^c \times (T_g - T_c) \times \quad (12)$$

h_{g-a}^c : Coefficient d'échange par convection entre la vitre et le ciel exprimé selon MACADAMS par [4, 5, 6] :

$$h_{g-a}^c = 5.7 + 3.8 \times \quad (13)$$

- Au niveau de l'absorbeur évaporateur :

$$\frac{M_{ev} \times C_p \times \frac{dT_{ev}}{dt}}{A_{ev}} = P_p - q_{ev-g}^c - q_{ev-g}^r - q_{ev-cd}^c - q_{ev-cd}^r - q_{ev-cd}^{ev} \quad (14)$$

Avec :

$$P_p = \tau_g \times \alpha_p \times \quad (15)$$

$$q_{ev-cd}^c = h_{ev-cd}^c \times (T_{ev} - T_{cd}) \times A_{ev} \quad (16)$$

h_{ev-cd}^c étant le coefficient d'échange par convection entre l'évaporateur et le condenseur calculé par la relation de Dunkle [7] :

$$h_{ev-cd}^c = 0.884 \times \left[\left(T_{ev} - T_{cd} \right) + \frac{(p_{ev}^s - p_{cd}^s)}{268.9 + T_{ev} - p_{ev}^s} \right]^{1/4} \quad (17)$$

Les valeurs de p et p pour des températures comprises entre 10°C et 90°C, peuvent être obtenues par :

$$P(T) = \exp \left(25.317 - \frac{5144}{T + 27} \right) \quad (18)$$

$$q_{ev-cd}^{ev} = h_{ev-cd}^{ev} \times (T_{ev} - T_{cd}) \times A \quad (19)$$

h_{ev-cd}^{ev} est le coefficient d'échange par évaporation entre l'évaporateur et le condenseur [7] :

$$h_{ev-cd}^{ev} = 16.276 \times 10^{-3} \times h_{ev-cd}^c \times \frac{(p_{ev}^s - p)}{(T_{ev} - T_c)} \quad (20)$$

- Au niveau du condenseur :

$$\frac{M_{cd} \times C_p \times \frac{dT_{cd}}{dt}}{A_{cd}} = q_{ev-cd}^c + q_{ev-cd}^r + q_{ev-cd}^{ev} - q_{cd-a}^c - q_{cd}^r \quad (21)$$

Le calcul des flux q_{cd}^c et q_{cd}^r est analogue à celui de q_{ev-g}^c et q_{ev-g}^r .

IV. PRODUCTION DU DISTILLATEUR SOLAIRE

La production d'un distillateur est définie par [8] :

$$m_d = \frac{h_{ev} \times (T_{ev} - T)}{L_p} \quad (22)$$

V. RESOLUTION MATHÉMATIQUES

La méthode de résolution la plus rigoureuse est une simulation " pas à pas", qui rend compte de l'évolution des températures de tous les éléments du distillateur dans le temps et dans l'espace. Les données météorologiques proviennent de fichiers (vitesse du vent et température ambiante) ou de formules approchées (température du ciel) [9,10].

VI. RESULTATS ET DISCUSSION

La résolution du système d'équations discrétisées a été menée en tenant compte des considérations suivantes:

- Les calculs sont effectués à Constantine dont les coordonnées géographiques sont une latitude de $37^{\circ}.17$ Nord, une longitude de $6^{\circ}.62$ Est et un décalage horaire d'une heure.

- Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial " t_0 " pour chaque composant du distillateur, à une température initiale et avec un pas de temps égal à une heure.

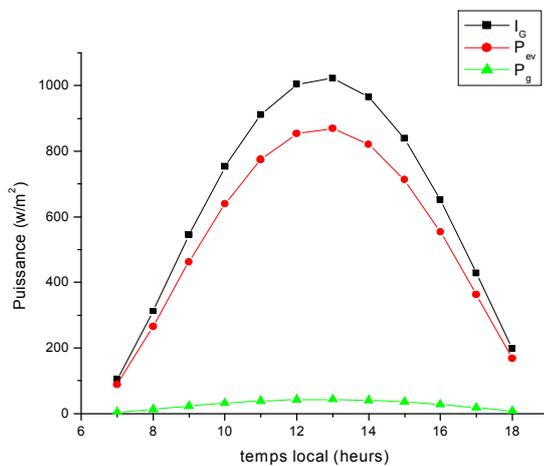
- L'inclinaison de la couverture est égale à 30° par rapport à l'horizontale et avec un azimut de 0° par rapport au sud.

- Le 16 juillet 2009 a été choisi comme jour de calcul.

A. Variation des puissances absorbées

La figure 2 illustre l'évolution temporelle du rayonnement solaire global, reçu par unité de surface du distillateur et les puissances absorbées par l'évaporateur et par la vitre. On peut remarquer que la puissance atteint son maximum à 13h00 (les valeurs maximales sont situées entre 11h00 et 15h00).

Le distillateur commence à être opérationnel dès 9h00 du matin, et la puissance absorbée par la vitre reste toujours faible à la puissance absorbée par l'évaporateur, qui est très importante, résultant des caractéristiques particulières de ce dernier à savoir, un coefficient d'absorption très important et des coefficients de transmission et de réflexion très faibles.



ig.2. Puissances incidente et absorbées

B. Variation des températures

La figure 3 représente la variation temporelle des températures de chaque composant du distillateur. La température de l'évaporateur est la plus élevée, ceci est dû à la puissance absorbée par l'absorbeur- évaporateur qui est importante et qui est supérieure à celle absorbée par la vitre. La température du condenseur est assez faible, par rapport à celle de l'évaporateur, ce qui favorise la condensation de la vapeur d'eau.

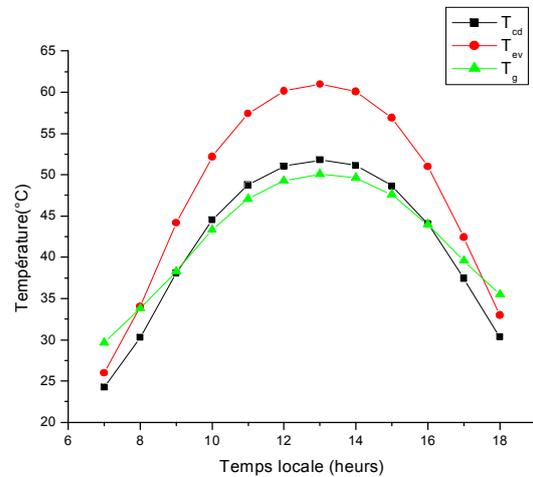


Fig. 3. Variation temporelle des températures

C. Variation des températures

L'allure de la variation temporelle de la production horaire d'eau distillée (fig. 4), est similaire à celle du rayonnement. La production commence à 9h00 du matin et atteint une valeur maximale à 13h00, où l'écart de température entre l'évaporateur et le condenseur est au maximum.

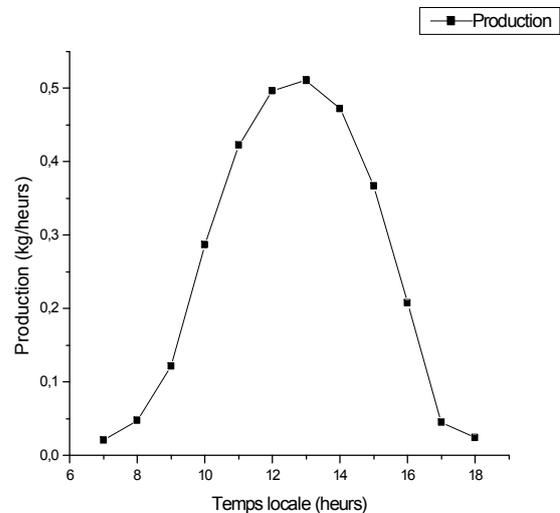


Figure 4. Variation temporelle de la production

D. Effet de l'inclinaison sur la production

L'effet de l'inclinaison sur la production est illustré par la

figure 5 qui montre que la production augmente au fur et à mesure que l'inclinaison croît jusqu'à atteindre une valeur maximale pour une inclinaison de 35°. Au-delà de cette valeur, l'effet de l'inclinaison devient défavorable.

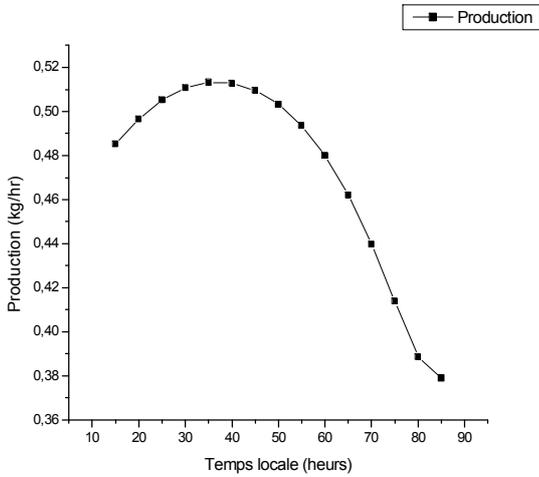


Fig. 5. Effet de l'inclinaison sur la production

E. Effet de température ambiante sur la production

L'analyse des courbes de la figure 6 permet de remarquer aisément que pour le distillateur à film capillaire l'augmentation de la température ambiante élève la production. En fait la température ambiante a un effet sur toutes les températures du distillateur, la diminution de celle-ci entraîne une chute de la température de la saumure, le système est refroidi ce qui provoque la diminution de la production. Les mêmes résultats ont été constatés par COOPER [11].

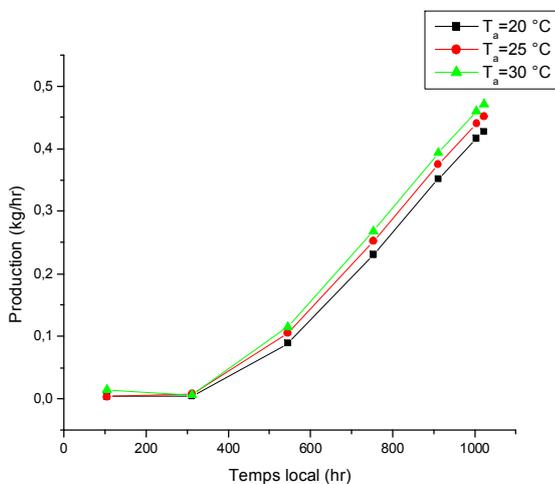


Fig. 6. Effet de la température ambiante sur la production

F. Effet de température de la saumure

La variation de la production du distillateur à film capillaire en fonction de la température de la saumure est illustrée par la figure 7 qui montre que l'augmentation de la température de saumure a un effet favorable sur la production. En effet quand la température croît, il en résulte l'augmentation de l'écart de température entre la saumure et le condenseur, d'où un accroissement de la différence des pressions partielles ce qui conduit à l'accroissement de la quantité d'eau condensée.

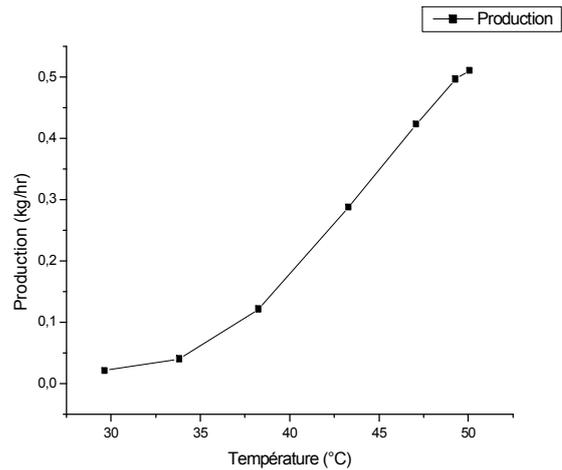


Fig. 7. Effet de la température de la saumure sur la production

VII. CONCLUSION

Dans le présent travail, nous avons élaboré un code de calcul permettant de simuler les paramètres de fonctionnement du distillateur solaire à film capillaire. L'analyse des résultats obtenus lors de la simulation du modèle ; nous permettent d'avancer les conclusions suivantes :

L'augmentation de l'irradiation solaire globale qui reste le paramètre le plus influant, conduit à un accroissement des caractéristiques de fonctionnement du distillateur.

Une température de la saumure élevée conduit à une augmentation de la production.

La température ambiante influe également sur la production du fait de sa faible inertie thermique qui lui permet d'être rapidement fonctionnel. En revanche une chute de température ambiante conduira à une baisse rapide des températures des composantes de ce distillateur.

La valeur la plus élevée de la production est obtenue pour une valeur de l'inclinaison proche de la latitude du lieu.

REFERENCES

- [1] G.N.Tiwari, "Solar energy: Fundamentals, Design, Modelling and Application", Alpha science, England, 2006.
- [2] Anil Kr. Tiwari, G.N. Tiwari, Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatic condition, *Desalination*, vol 195, 2006, pp 78-94.
- [3] Hikmet Ş. Aybar, Mathematical modeling of an inclined solar water distillation syée&stem, *Desalination*, vol 190, 2006, pp 63–70.
- [4] J Siaka Toure et Pierre Meukam", A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan (Cote d'Ivoire)", *Renewable Energy*, Vol. 11, No. 3, 1997, pp. 319-330.
- [5] Zeinab S. Abdel-Rehima, Improving the performance of solar desalination systems, *Renewable Energy*, vol 30, 2005, pp 1955–1971.
- [6] S.K. Shukla, V.P.S. Sorayan, "Thermal modeling of solar stills: an experimental, *Renewable Energy*, vol 30, 2005, pp 683–699.
- [7] Malik, M.A.S , TIWIRI. G , KUMAR. S and SLDHA. MS," Solar distillation", Oxford, pergamon press, 1982.
- [8] H.N. Singh, G.N.Tiwari, "Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions", *Desalination*, vol 168, 2004, pp 145–150.
- [9] O.Sotehi, A. Chaker, " Effet des paramètres internes sur le fonctionnement d'un distillateur solaire », 1^{ère} conférences internationale sur les énergies, matériaux et environnement CIEME'09, Khemis Miliana, 22 et 23 novembre 2009.
- [10] Kaabi Abdenacer, Smakdji Nafila, " Impact of temperature difference (water-solar collector) on solar-still global efficiency", *Desalination*, vol 209, 2007, pp 309–316
- [11] A. Chaker, O. Sotehi, "Effect of externals parameters on the working of solar stills", the international conference on renewable energy (ICRE), Damascus, 05-08 April 2010, Syrian Arab Republic.