

Simulation numérique d'un distillateur solaire à film capillaire multi-étages

Moussa ZERROUKI^{1,2,+}, Nouredinne SETTOU³, Yacine MARIF^{1,4}, Mohammed BENHAMMOU¹
et Moustapha BELHADJ^{1,4}

¹ *Unité de Recherche en Energies Renouvelables En Milieu Saharien, Adrar 01 000 (Algérie)*

² *Univ Ouargla, Fac. des Sciences Appliquées,*

Dépt. de Génie Civil et Hydraulique, Ouargla 30 000 (Algérie)

³ *Univ Ouargla, Fac. des Sciences Appliquées, Lab. de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes 'VPRS', Ouargla 30 000 (Algérie)*

⁴ *Univ Ouargla, Fac. des Mathématiques et des Sciences de la Matière,*

Dépt. de Physique, Ouargla 30 000 (Algérie)

⁺ Email : moussa.zerrouki@yahoo.fr

ملخص: في هذا المقال نقوم بعرض نموذج لمحاكاة رقمية تتعلق بمر دوودية مقطر شمسي ذو شريط شعيري متعدد الطوابق. كمية الماء المقطر تم تقديرها بعد الأخذ بعين الاعتبار كل ظواهر الانتقال الحراري والكتلي داخل المقطر. ومن أجل إظهار نجاعة هذا النموذج للاختبارات الرقمية أجريت من أجل تحديد القيم المثلى للمختلف عوامل التصميم على غرار عدد الطوابق تدفق ودرجة حرارة الماء المالح المغذي للمقطر ومعامل شكل المقطر والمتوافق مع مناخ ولاية أدرار بالجنوب الجزائري. النتائج الرقمية تم عرضها أيضا في هذه الورقة. هذه الأخيرة أظهرت أن كمية الماء المقطر اليومية تزداد بزيادة عدد الطوابق غير أن نسبة الزيادة الجزئية تنقص مع زيادة كل طابق إضافي.

كلمات دالة: التقطير الشمسي, شريط شعيري, طابق, إنتاج, تدفق

RESUME : Dans cet article, un modèle de simulation numérique est présenté, pour étudier la performance d'un distillateur solaire à film capillaire multi-étage. Les divers phénomènes de transfert de chaleur et de masse ont été considérés pour évaluer la production de distillat. Afin d'apprécier le modèle développé, les calculs numériques ont été faits pour optimiser différents paramètres de conception, à savoir le nombre des étages, le débit et la température d'alimentation de l'eau saumâtre et le facteur de forme des cavités correspondant au climat de Adrar, sud Algérien. Des résultats numériques sont également présentés dans ce papier ; ces résultats montrent que la production quotidienne du distillat augmente avec l'augmentation du nombre d'étages. Cependant la fraction d'augmentation partielle de la production diminue avec l'addition de chaque nouvel étage.

MOTS CLES : distillation solaire, film capillaire, étage, production, débit

ABSTRACT: In this article, a model of numerical simulation is presented, to study the performance of a solar distiller with multistage capillary film. The various phenomena of transfer of heat and mass were considered to evaluate the distillate production. In order to appreciate the developed model, the numerical calculations were made to optimize various parameters of design, namely the number of stages, flow and the power temperature of the brine water and the cavities form factor corresponding to the climate of Adrar, Algerian south. Numerical results are also presented in this paper; these results show that the daily production of the distillate increases according to the increase in the stages number. However the partial fraction increase of the production decreases with each new stage addition.

KEY WORDS: solar distiller, capillary film, stage, production, flow

1. Introduction

Le manque d'eau potable et sa rareté, causés, à la fois, par la sécheresse et la surexploitation des nappes souterraines, devient un grand problème qui menace la vie des habitants dans plusieurs régions. Or, au voisinage de certaines régions, manquantes d'eau potable, existent des sources d'eaux saumâtres contenant un certain pourcentage de sel. La distillation solaire peut être envisagée non seulement comme une solution qui respecte l'environnement et économique, mais aussi une réelle alternative aux ressources énergétiques classiques d'origine fossiles. Un examen de la littérature, Malik et al. [1] illustre qu'un nombre considérable de travaux ont été effectués pour étudier les distillateurs solaires de bassin-type conventionnel. Pour améliorer la production en distillat, plusieurs configurations ont été conçues de manière à permettre de réutiliser la chaleur

latente d'évaporation libérée : Cooper et Appleyard, R. S. Adhikari et al. [2], Ho-Ming Yeh et al. [3]. D'autres distillateurs à multi effet utilisant des films capillaires ont été proposés : B. Bouchekima [4], H. Tanaka [5]. Pour notre part, nous proposons d'étudier l'effet de certains paramètres à savoir le nombre d'étages, le débit et la température d'alimentation de l'eau de la saumure et le facteur de forme des cavités sur la production d'un distillateur solaire à film capillaire à plusieurs étages. A cet effet, nous avons établi un système d'équation régissant le fonctionnement du distillateur et les différents coefficients d'échange thermique et massique. Cette simulation mathématique nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion.

2. Modélisation et Résolution Numérique du Système

Les différents flux d'échange thermique et massique d'un distillateur solaire à film capillaire à plusieurs étages sont illustrés par la Figure 1. La température atmosphérique ambiante, les bilans énergétiques et de matière sont obtenus comme suit.

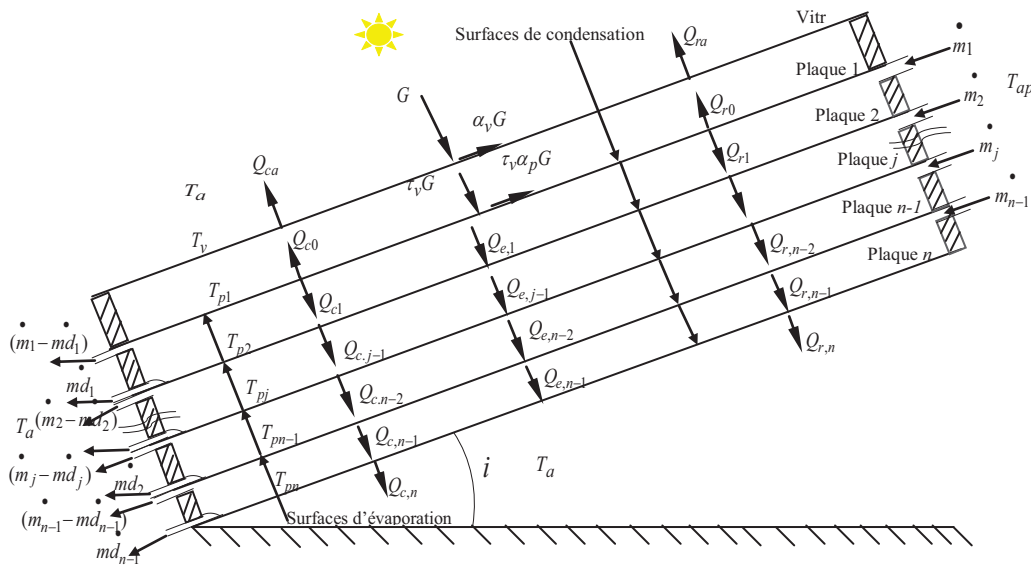


Figure 1 : Flux de chaleur et massique échangé au niveau d'un distillateur à film capillaire multi-étage

2.1. Au niveau de la vitre

$$(mC_p)_v \frac{dT_v}{dt} = Q_{r0} + Q_{c0} - Q_{ra} - Q_{ca} + \alpha_v G A_v \quad (1)$$

$$\text{La où } Q_{i,j} = h_{i,j} (T_{j+1} - T_j) A_j \quad (2)$$

L'indice i dépend du mode de transfert thermique (r) rayonnement, (c) convection ou (co) conduction.

Ils évident que la température ambiante joue un rôle important dans un processus de distillation, on propose de la calculer à l'aide de la formule suivante [6] :

$$T_a = \left(\frac{T_{aMax} + T_{aMin}}{2} \right) + \left(\frac{T_{aMax} - T_{aMin}}{2} \right) \cos \left[(14 - TSV) \frac{\pi}{12} \right] \quad (3)$$

Watmaff et al., propose une corrélation linéaire pour estimer le coefficient convectif entre la vitre et l'ambiante [7].

$$h_{ca} = 2.8 + 3V \quad (4)$$

La relation générale qui calcule le coefficient de transfert thermique radiatif entre deux plans est donnée par :

$$h_{ij,j+1} = \varepsilon_{eff} \sigma \left[(T_j + 273.15)^2 + (T_{j+1} + 273.15)^2 \right] (T_j + T_{j+1} + 546.30) \quad (5)$$

$$\text{Sachant que : } \varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_j} + \frac{1}{\varepsilon_{j+1}} - 1 \right]^{-1} \quad (6)$$

Hollandes [8] a obtenu une expression empirique pour le nombre de Nusselt dans la convection libre pour une couche inclinée d'air d'allongement élevé, chauffé par-dessous ; le résultat est :

$$h_{c0} = \frac{Nu_{as} \lambda_{as}}{d_v} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Nu_{as} = 1 + 1.44 \left[\frac{|X| + |Y|}{2} \right] \left[1 - \frac{1708(\sin(1.8i))^{1.6}}{Ra_{as} \cos i} \right] + \frac{|Y| + |Z|}{2}; i \leq 60^\circ \\ X = 1 - \frac{1708}{Ra_{as} \cos i}; Y = \left[\left(\frac{Ra_{as} \cos i}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \\ Ra_{as} = \frac{g d_v^3 \beta_{as} (T_1 - T_v)}{\nu_{as} \alpha} \end{cases} \quad (8)$$

Après substitution de tous les termes, l'équation (1) devient :

$$\frac{dT_v}{dt} = \frac{1}{(\rho E C p)_v} \left[-(h_{ra} + h_{ca} + h_{r0} + h_{c0}) T_v + (h_{r0} + h_{c0}) T_1 + (h_{ra} + h_{ca}) T_a + \alpha_v G \right] \quad (9)$$

2.2. Au niveau de la première plaque

Le bilan thermique écrit est :

$$(m C p)_{p1} \frac{dT_1}{dt} = -Q_{r0} - Q_{c0} - Q_{r1} - Q_{cl} - Q_{e1} + (\dot{m}_1 C p)(T_1 - T_{ap}) A_{p1} + (\dot{m}_1 - \dot{m} d_1) C p (T_1 - T_a) A_{p1} + \alpha_p \tau_v G A_{p1} \quad (10)$$

La où :

$$Q_{e1} = L v (T_1) \times \dot{m} d_1 A_{p1} \quad (11)$$

$$\dot{m} d_1 = h_{m1} \left((\rho_v)_{p1} - (\rho_v)_{p2} \right) \quad (12)$$

Les transferts de chaleur et de matière obéissent à l'analogie de Chilton-Colburn ; le coefficient de transfert massique vaut donc :

$$h_{m1} = \frac{h_{e1}}{(\rho C p)_{ah} Le^{2/3}} \quad (13)$$

Le coefficient transfert de chaleur pour la convection normale d'air dans un espace incliné chauffé à partir du dessus peut être estimé par l'équation empirique :

$$h_{c1} = \frac{Nu_{ah} \lambda_{ah}}{d_p} \quad (14)$$

La où :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.5 \leq Pr \leq 2 \quad ; \quad 3 \leq \frac{L}{d_p} \leq 43 \quad ; \quad 90^\circ \leq i \leq 180^\circ \\ Nu_{ah} = 1 \quad ; \quad Ra_{ah} \leq 2 \times 10^3 \\ Nu_{ah} = 1 + \left[0.197 Ra_{ah}^{0.25} \left(\frac{d_p}{L} \right)^{-1/9} - 1 \right] \sin i \quad ; \quad 6 \times 10^3 \leq Ra_{ah} \leq 2 \times 10^5 \\ Nu_{ah} = 1 + \left[0.073 Ra_{ah}^{1/3} \left(\frac{d_p}{L} \right)^{-1/9} - 1 \right] \sin i \quad ; \quad 2 \times 10^5 \leq Ra_{ah} \leq 1.1 \times 10^7 \\ Ra_{ah} = \frac{g d_p^3 \beta_{ah}}{\nu_{ah} \alpha} (T_1 - T_2) \end{array} \right. \quad (15)$$

Après substitution de tous les termes, le bilan de la première plaque devient :

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{(\rho E C p)_{p1}} \left[(h_{r0} + h_{c0}) T_v - \left[\frac{(h_{r0} + h_{c0} + h_{r1} + h_{c1})}{(2 \dot{m}_1 - \dot{m} d_1) C p} \right] T_1 + (h_{r1} + h_{c1}) T_2 + (\dot{m}_1 - \dot{m} d_1) C p T_a + \dot{m}_1 C p T_{ap} + \tau_v \alpha_p G - L v \dot{m} d_1 \right] \quad (16)$$

2.3 Au niveau de la J^{ème} plaque (j=2...(n-1))

Pour chaque plaque, l'équilibre thermique est donné par :

$$(m C p)_{pj} \frac{dT_j}{dt} = Q_{rj-1} + Q_{cj-1} + Q_{ej-1} - Q_{rj} - Q_{cj} - Q_{ej} + (\dot{m}_1 C p) (T_j - T_{ap}) A_{pj} + (\dot{m}_j - \dot{m} d_j) C p (T_j - T_a) A_{pj} \quad (17)$$

En utilisant les mêmes expressions (13), (14) et (15), l'équation précédente se simplifie à :

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{1}{(\rho E C p)_{pj}} \left[\frac{(h_{rj-1} + h_{cj-1}) T_{j-1} - \left[\frac{(h_{rj-1} + h_{cj-1} + h_j + h_{cj})}{(2 \dot{m}_j - \dot{m} d_j) C p} \right] T_j}{+ (h_{rj} + h_{cj}) T_{j+1} - L v (T_j) \dot{m} d_j + L v (T_{j-1}) \dot{m} d_{j-1} + (\dot{m}_j - \dot{m} d_j) C p T_a + \dot{m}_j C p T_{ap}} \right] \quad (18)$$

2.4 Au niveau de la n^{ième} plaque

La dernière plaque est considérée comme un simple condenseur le bilan des transferts thermique s'exprimé par :

$$(m C p)_{pn} \frac{dT_n}{dt} = Q_{m-1} + Q_{cn-1} + Q_{ej-1} - Q_m - Q_{cn} + (\dot{m}_{n-1} C p) (T_n - T_{ap}) A_{pn} + (\dot{m}_{n-1} - \dot{m} d_{n-1}) C p (T_n - T_a) A_{pn} \quad (19)$$

Après le développement de l'expression (19) par le même raisonnement des bilans précédents on obtient :

$$\frac{dT_n}{dt} = \frac{1}{(\rho E C p)_{pn}} \left[\frac{(h_{m-1} + h_{cn-1}) T_{n-1} - \left[\frac{(h_{m-1} + h_{cn-1} + h_m + h_{cn})}{(2 \dot{m}_{n-1} - \dot{m} d_{n-1}) C p} \right] T_n}{+ (h_m + h_{cn}) T_a + L v (T_n) \dot{m} d_{n-1}} \right] \quad (20)$$

Les équations décrivant les phénomènes de transfert thermique (9), (16), (18), (20), et l'équation de bilan massique dans le distillateur sont des équations différentielles ordinaires de premier ordre. Une méthode mathématique de Runge-Kutta R4 à pas variable à été choisie pour résoudre le modèle mathématique obtenu. Le pas de discrétisation de temps est variable, sa moyenne est de l'ordre de 15 s. La convergence est considérée atteinte lorsque l'erreur relative est inférieure à 10^{-4} [9].

3. Résultats et Discussion

Les calculs numériques sont effectués pour la ville de Adrar dont les coordonnées géographiques sont : latitude 27°53' Nord, longitude 0°17' Est et l'altitude 264m, et un décalage horaire, d'une heure [10], à partir d'un instant initial " $t_0=t_{ls}$ " (de lever de soleil) pour chaque composant des distillateurs, à une température initiale. Le jour type considéré est le 15 Septembre, l'angle d'inclinaison est fixé à 38°, la vitesse du vent est considérée constante et prise à 1.5 m/s, le débit d'alimentation est fixé à 1kg/h.m² sauf exception dans le cas d'étude de l'influence de débit sur la production journalière.

Les propriétés thermo-physiques et géométriques des éléments composant le distillateur sont présentées dans le tableau ci-après :

Tableau 1 : Les propriétés thermo-physiques

Paramètres	Symbole	Vitre	Plaque
Masse volumique	ρ	7864	2700
Conductivité thermique	λ	20	0.78
Chaleur massique	C_p	460	840
L'absorptivité	α	0.95	0.1
Transitivité	τ	0	0.9
Epaisseur	ϵ	0.001	0.003
Emissivité	ϵ	0.2	0.9
Surface	A	1.00	1.00

La Figure 2 illustre l'évolution de la température de la vitre et des plaques pour un distillateur solaire à film capillaire (DIFICAP) à 5étages. On constate que les courbes ont la même forme, et que la température de la plaque absorbante est la plus élevée tandis que la température de la dernière plaque (un simple condenseur) avoisinante la température ambiante.

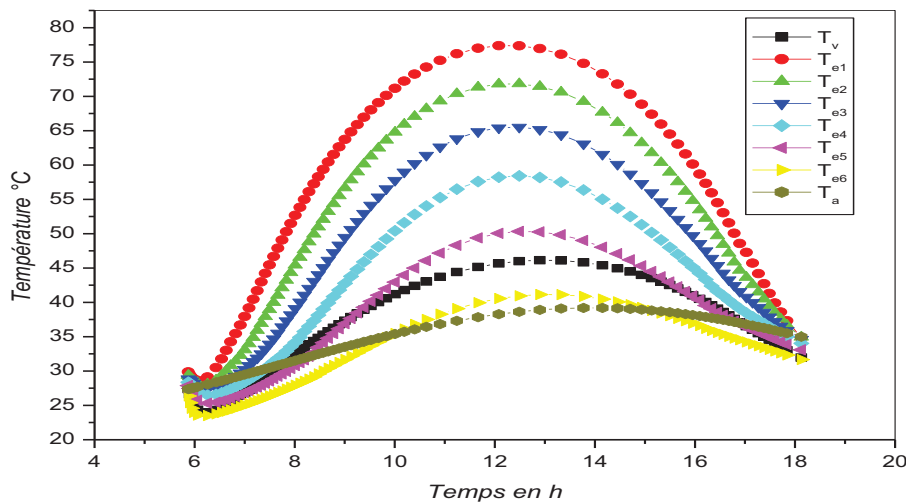


Figure 2 : Evolution de la température de la vitre et les plaques pour un DIFICAP à 5 étages

Les figures 3 et 4 montrent l'évolution de la production quotidienne en eau distillée cumulée et le débit massique dans chaque étage respectivement. Il est très clair que la quantité distillée diminue lors qu'on passe d'un étage a l'autre. Ces résultats sont on bon accord avec ceux obtenues dans la littérature.

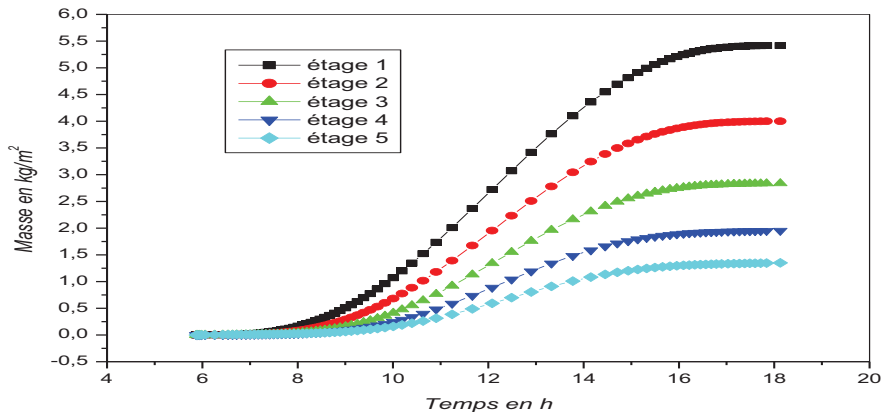


Figure 3 : Evolution du débit cumulé pour un DIFICAP à 5 étages

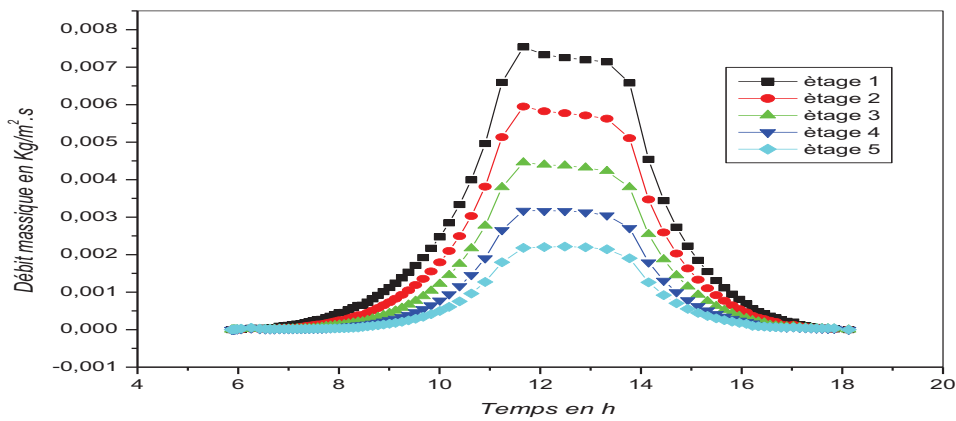


Figure 4 : Evolution du débit massique pour un DIFICAP à 5 étages

La variation de la production quotidienne du distillat en fonction du nombre des étages est représentée par la Figure 5. Nous constatons que la production augmente avec l'addition de chaque nouvel étage. Cependant la fraction de cette augmentation diminue inversement avec le nombre des étages comme il est montré dans la Figure 6. Ce comportement rend nécessaire l'optimisation du nombre d'étage en se basant sur des considérations techno-économiques.

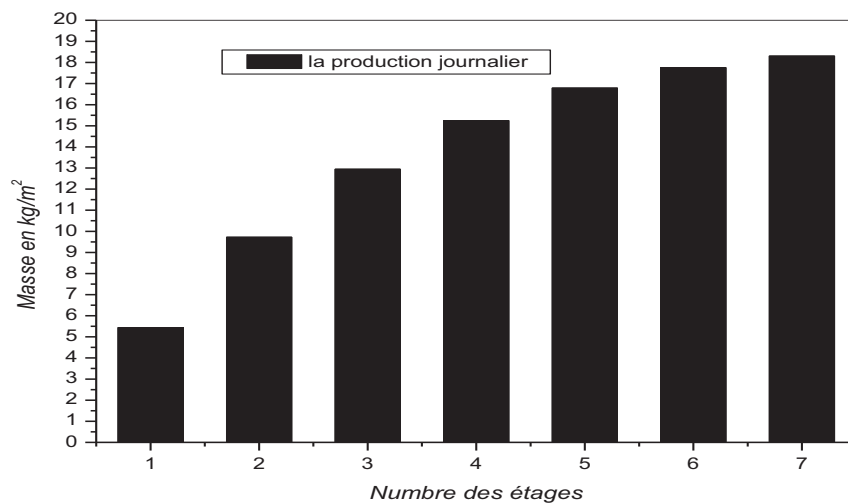


Figure 5 : Variation de la production quotidienne en fonction du nombre d'étages

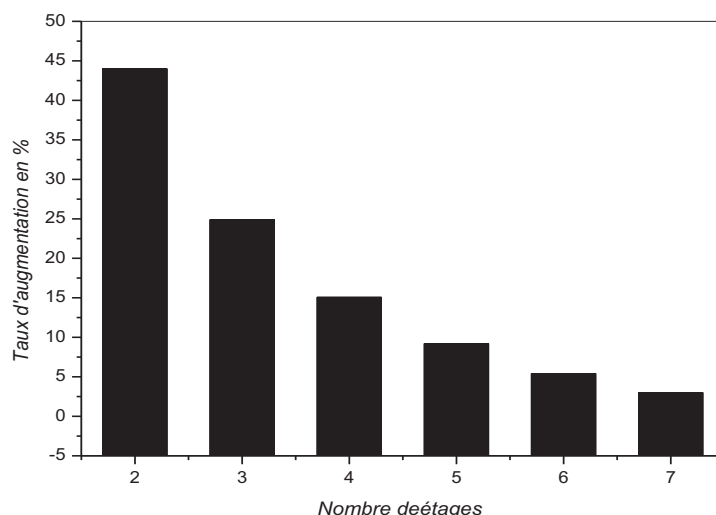


Figure 6 : Variation de la fraction d'augmentation de la production en fonction du nombre d'étages

L'analyse des courbes des figures 7 et 8 permet de remarquer aisément que la production quotidienne de distillat est très influencée par le débit d'alimentation de l'eau saumâtre. Cette production pour un DIFICAP de 5 étages décroît de 17.5 kg/j.m^2 à moins de 12 kg/j.m^2 lorsque le débit croît de 1 kg/h.m^2 à 2.2 kg/h.m^2 . D'autre part cette production est moins influencée par la variation de la température de l'eau saumâtre qui alimente le distillateur ; la quantité de distillats passe de 13.70 kg/j.m^2 à plus de 18 kg/j.m^2 lorsque la température de l'eau saumâtre augmente de 30°C à 60°C .

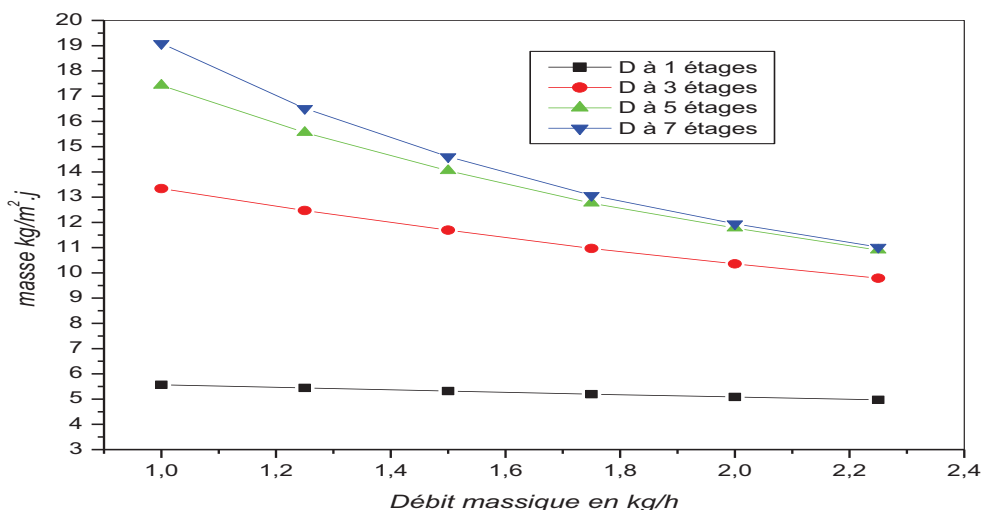


Figure 7 : Variation de la production quotidienne du DIFICAP en fonction du débit d'alimentation

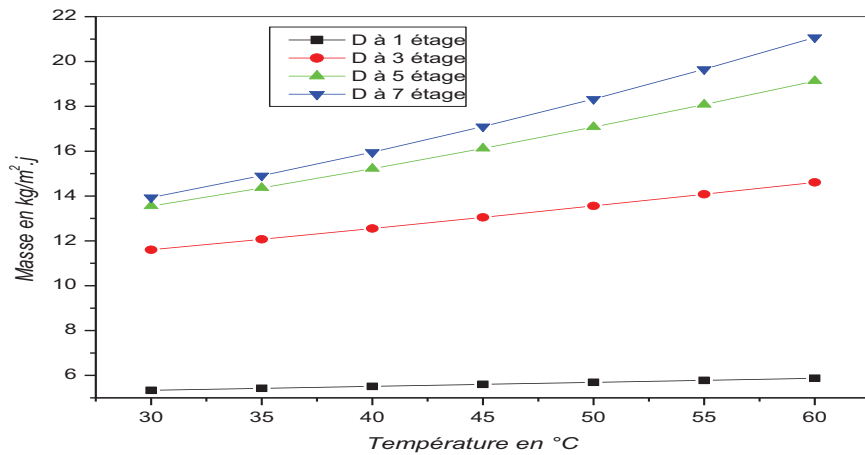


Figure 8 : Variation de la production quotidienne du DIFICAP en fonction de la température d'alimentation

L'influence de facteur de forme qui est le rapport entre la distance (évaporateur-condenseur) et la longueur de la cavité $L/d(e-c)$ est représentée sur la figure 9. Cette figure montre que la production en eau distillée augmente lorsque cette distance varie dans le sens inverse, mais d'une manière assez faible. La courbe de la figure indique que cette quantité passe de 15 kg/j.m² à moins de 13.5 kg/j.m² seulement quand la distance diminue de 4 cm à 2.5 cm.

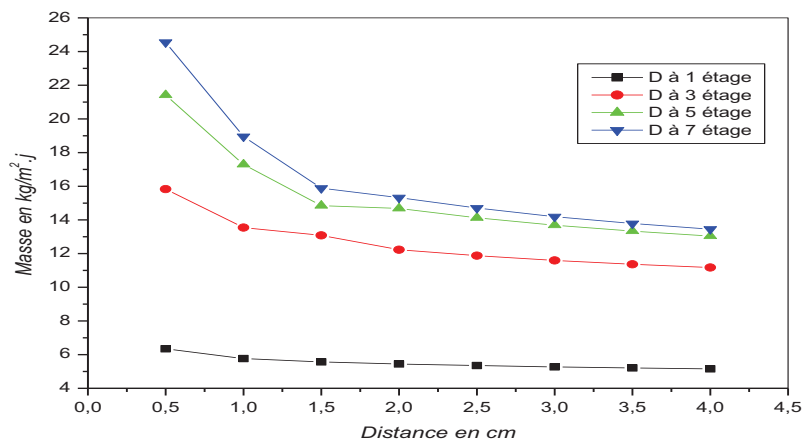


Figure 9 : Variation de la production quotidienne du DIFICAP en fonction du facteur de forme

4. Conclusions

Un modèle numérique a été développé, pour le fonctionnement d'un distillateur solaire à film capillaire DIFICAP à plusieurs étages. L'applicabilité du modèle est démontrée pour l'ensemble des paramètres typiques correspondant au site d'Adrar au sud Algérien.

L'analyse des résultats obtenus lors de la simulation numérique sur l'effet des paramètres de conception et opératoires, nous permettent de conclure ce qui suit :

La production en eau distillée augmente avec l'addition de chaque nouvel étage. Cependant que la fraction de cette augmentation diminue inversement avec le nombre des étages.

La production d'eau distillée est très influencée par le débit d'alimentation, à un degré moindre par la température d'eau d'alimentation et le facteur de forme de la cavité siège de distillation.

NOMENCLATURE :

a :	Diffusivité thermique (m ² /s)
A :	Surface (m ²)
C_p :	Chaleur massique (J/kg.°C)
d :	Distance (m)
E :	Epaisseur (m)
g :	La pesanteur (m/s ²)
G :	Rayonnement globale (w/m ²)
h :	Coefficient de transfert thermique (w/m ² °C)
h_m :	Coefficient de transfert massique (m/s)
i :	Angle d'inclinaison (°)
L :	Longueur (m)
Le :	Nombre de Lewis
L_v :	La chaleur latente (J/kg)
m :	Masse (kg)
•	Densité massique d'alimentation (kg/m ² h)
m :	
•	Densité massique de distillat (kg/m ² h)
md :	
Nu :	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl
Q	Flux de chaleur (w)
Ra :	Nombre de Rayleigh
t :	Temps (s)
T :	Température (°C)
TSV :	Temps solaire vrai (heure)
V :	Vitesse du vent (m/s)

Symboles grecs :

α :	Facteur d'absorption
β :	Dilatation thermique (1/°c)
ε :	Facteur d'émission
ε_{eff} :	Emissivité effective
λ :	Conductivité thermique (w/m°C)
ρ	Masse volumique (kg/m ³)
σ	Constante de Boltzmann (w/m ² . °C ⁴)
τ :	Facteur de transmission
ν :	Viscosité cinématique (m ² /s)

Les indices :

a :	Ambiant
ah :	Air humide
ap :	Appoint
as :	Air sec
c :	Convection
e :	Evaporation
p :	Plaque métallique
r :	Rayonnement
v :	Vitre

Références

- [1] M.A.S. Malik , G.N. Tiwari, A. Kumar et M.S. Sodha ; Solar Distillation A practical study of a range of stills and their optimum design, construction and performance, Pergamon press first edition, (1982).
- [2] R.S. Ashikari, Ashvini Kumar et G. D Sootha ; Simulation Studies On a Multi-stage Stacked Tray Still ; Solar Energy, Vol. **54**, N° 5, pp. 317-325, 1995.
- [3] Ho-Ming. Yeh & Chii-Dong Ho ; Energy and mass balances in open-type multiple-effect solar distillers with air flow through the last effect ; ENERGY, Vol. **24**, pp. 103-115, 1999.
- [4] Bachir Bouchekima, Bernad Gros, Ramdane Ouahes, Mostefa Diboun ; “Etude théorique et application pratique du distillateur solaire à film capillaire, ” Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS, 2000.
- [5] H. Tanaka et T. Nosoko et T. Nagata ; “A highly productive basin-type-multiple-effect coupled solar still”, Desalination, **130** pp 279-293, 2000.
- [6] A. Belghit, M. belhmidi, A Bennis, B.C. Boutaleb et S. Benet ; “Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection force” ; Rev. Gén. Therm., **36**, 837850 Paris 1997.
- [7] John Duffie et William A. Beckman ; "Solar Engineering thermal processes"; third edition Library of congress cataloging USA, (2006)
- [8] Adrian Bejan ; “Heat Transfer” ; Pergamon press first edition, USA 1993.
- [9] Zerrouki Moussa, Yacine Marif, Moustapha Belhadj et Nouredinne Setto ; "Simulation et expérimentation d'un distillateur solaire à film capillaire dans le sud Algérien" ; Annales des Sciences et Technologie (AST), Vol. **4** N°1 pp 46-57, Juin 2012.
- [10] Michel Capderou ; Atlas Solaire de l'Algérie, modèles théorique et Expérimentaux Tome I; OPU, Algérie, (1988).