

Etude d'un système de dessalement solaire à étages multiples avec récupération de la chaleur

Hacène ABDENEBI et Pr. Hocine BEN MOUSSA
Département Mécanique ; Faculté de Technologie Université de Batna (Algérie)
 E-mail: abdenneh05@yahoo.fr

Résumé- Le dessalement solaire est restera sans doute marginal dans la production globale d'eau potable pour l'humanité. Une dizaine de techniques de dessalement de l'eau sont utilisées, mais la distillation à étages multiples peut être la méthode la plus appropriée pour la stimulation par énergie solaire.

Notre travail est consiste à étudier un nouveau modèle des distillateurs solaires à plusieurs étages choisis, avec récupération de la chaleur ; on développant un modèle de calcul numérique ; basée sur les transferts thermiques et massiques, visant à déterminé les différents paramètres thermodynamiques énumérés du distillateur. L'alimentation en énergie est fait avec un champ des capteurs cylindro-parabolique (CCPs).

Les résultats de cette simulation seront peut être exploités pour développer un prototype fiable et approprie aux pays en voie de développement

Keywords: *Solar still; Multistage; Numerical modelling.*

I-INTRODUCTION

On constate que 99.3 de l'eau sur la terre est soit salée (océans), soit située dans des régions inaccessibles (calottes glacières). De plus le reste de l'eau est réparti inégalement sur le globe terrestre. Il faut donc, dans certaines régions, traiter les eaux saumâtres ou de traiter les eaux de mer.

Les diverses méthodes de dessalement sont analysées en ce qui concerne leur consommation d'énergie primaire, condition de traitement d'eau de mer et coût d'équipement. De cette analyse, le distillateur à étages multiples peut être la méthode la plus appropriée pour la stimulation par énergie solaire. Le collecteur solaire cylindro- parabolique est principalement choisi en raison de ses capacités de fonctionnement à températures élevées avec un rendement élevé.

La distillation solaire de l'eau a pour but de séparer l'eau des matières solides qu'elle tient en dissolution. C'est une opération consiste à faire chauffé l'eau saumâtre jusqu'à la température d'évaporation sous l'action d'un flux thermique (solaire), et à condenser sa vapeur en la refroidissant sur les parois de température inférieure à celle de l'eau chauffé.

Le but de ce travail est donc de développer une modélisation mathématique pour un modèle nouveau des distillateurs solaires à plusieurs étages choisis, qui est alors résolu prévoir numériquement la performance du distillateur ; lorsque l'alimentation en énergie est se fait avec un champ des capteurs cylindro- parabolique (CCPs).

II-DESCRIPTION DU DISTILLATEUR

Le développement de systèmes de distillation à plusieurs étages fonctionnant à l'énergie solaire avec récupération de chaleur est relativement nouveau.

Le distillateur est basé sur la construction d'un bâti constitué de plusieurs bassins contenant de l'eau saline, superposé les uns sur les autres et qu'on qualifie d'étages. Chaque bassin utilise la chaleur de condensation de la vapeur d'eau provenant de l'étage inférieur Voir figure (1).

Seul, le bassin inférieur (1) est alimenté en énergie thermique. Voir figure (2). Lorsque l'eau de ce bassin est réchauffée par un échangeur de chaleur qu'est alimenté par le champ des CCPs auquel peut être combiné un système de stockage thermique, elle s'évapore et se condense à la surface inférieure du bassin conique situé au-dessus. Il y a une formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers une gouttière qui les conduit au stockage.

A la condensation de la vapeur d'eau, l'énergie de conversion de phase, appelée aussi la chaleur latente d'évaporation, est libérée. Cette énergie réchauffe l'eau contenue dans l'étage supérieur qui s'évapore à son tour et se condense à la surface inférieure de l'étage suivant et ainsi de suite...

De cette manière, l'énergie, prévue pour réchauffer l'eau du bassin inférieur, est récupérée, du moins en grande partie,

pour être plusieurs fois utilisée. Ce processus de récupération de chaleur a un effet multiplicateur sur la production d'eau potable. Le remplissage du distillateur s'effectue à partir du dernier étage avec un tube : le système est alimenté en eau saline à un débit a peut près deux fois élevé que à celui de l'eau évaporé [32]. Cette quantité d'eau injectée continuellement à travers les tuyaux de débordement a pour but :

- de compenser la quantité d'eau évaporée,
- d'éviter une accumulation des sels dans les bassins
- et de contribuer à conserver les gradients de température entre les étages.

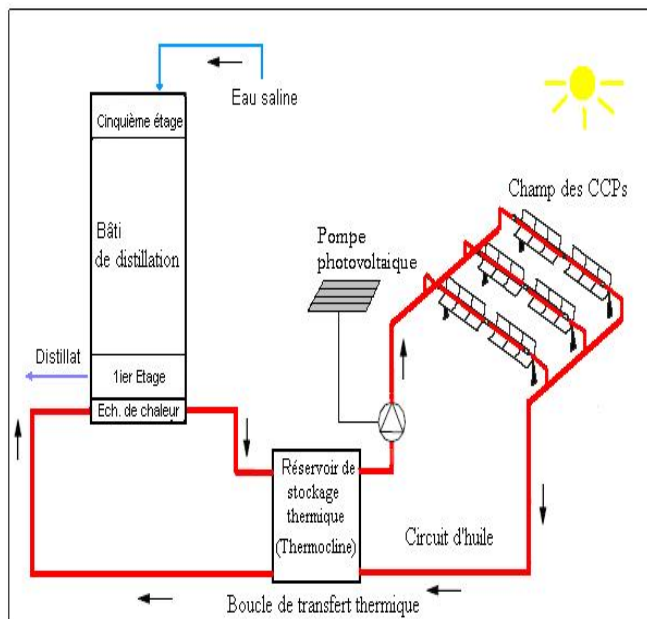


Fig1. Schémas de distillateur solaire à cinq étages avec récupération de chaleur

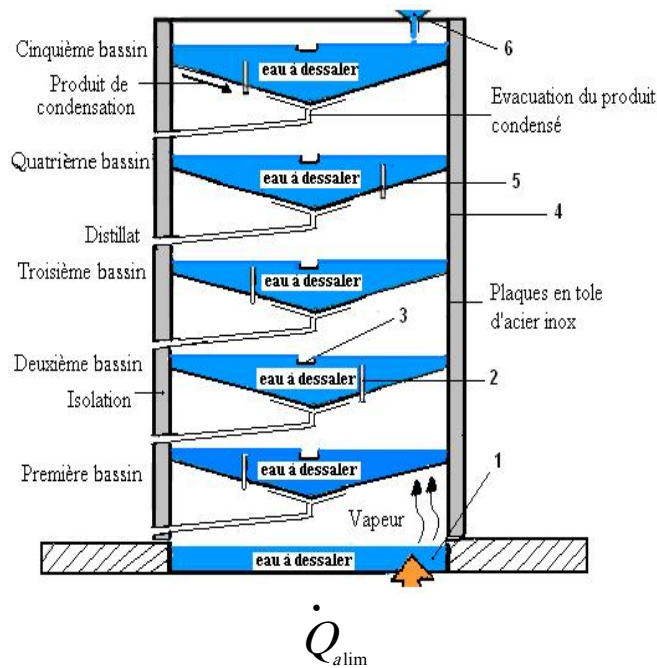


Fig2. Vue intérieure de distillateur (côté ouvert).

III- MODELISATION MATHÉMATIQUE

Afin d'éviter de compliquer l'étude de ce type de distillateur solaire, nous avons permis aux hypothèses suivantes:

- - Le système fonctionne à la pression atmosphérique pour éviter tous frais liés à l'augmentation de la pression.
- - On néglige les pertes de vapeur dans le distillateur
- La température de la paroi du bassin constante sur toute la surface
- La vapeur est saturée.

- La condensation sur les parois des bassins se fait uniquement sous forme de film homogène et continu.

- La concentration en sel de la saumure est faible ; n'intervient pas dans la masse et le transfert thermique

Le bilan des flux thermiques de l'échangeur de chaleur est représenté par l'équation suivante:

$$Cp_{eau} \cdot m_{Ech.chal} \cdot \frac{dT_{Ech.chal}}{dt} = \dot{Q}_{entrée} - (\dot{Q}_{Evap,i} + \dot{Q}_{Conv,i} + \dot{Q}_{Rad,i}) - \dot{Q}_{cond,i}$$

Equation de bilan dans les différents étages:

$$Cp_{eau} \cdot m_{Etage,n} \cdot \frac{dT_{Etage,n}}{dt} = (\dot{Q}_{Evap,n-1} + \dot{Q}_{Conv,n-1} + \dot{Q}_{Rai,n-1}) -$$

$$(\dot{Q}_{Evap,n} + \dot{Q}_{Conv,n} + \dot{Q}_{Rai,n}) - \dot{Q}_{Cond,n}$$

L'équation de bilan du dernier étage s'écrit ainsi:



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



$$Cp_{eau} \cdot m_{Etage,n} \cdot \frac{dT_{Et...n}}{dt} = (\dot{Q}_{Evap...n-1} + \dot{Q}_{Conv...n-1} + \dot{Q}_{Ra...n-1}) - (\dot{Q}_{Conv...n} + \dot{Q}_{Ra...n}) - \dot{Q}_{Cond...n}$$

Pour établir la modélisation du distillateur, il faut connaître les expressions des divers coefficients d'échanges thermiques par rayonnement, par convection naturelle, par évaporation et par conduction. Il sont présentent comme suit:

Par rayonnement :

$$h_{rad} = (T_{eau,i+1} + T_{eau,i})(T_{eau,i+1}^2 + T_{eau,i}^2) \sigma \cdot \epsilon_{eff}$$

Le flux de chaleur échangée est donné

$$\text{par : } \dot{Q}_{rad} = h_{rad} \cdot A_{ra} \cdot (T_{eau,i+1} - T_{eau,i})$$

Par convection :

$$h_{conv} = 0.884 \left[T_{eau,i+1} - T_{eau,i} + \frac{(P_{eau,i+1} - P_{eau,i})(T_{eau,i} + 27315)}{2689 \cdot 10^3 - P_{eau,i}} \right]^{1/3} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Le flux de chaleur échangée est donné par :

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} \cdot A_{conv} (T_{eau,i+1} - T_{eau,i})$$

Par évaporation :

$$h_{evap} = 16.273 \cdot 10^{-3} \cdot h_{conv} \cdot \left(\frac{P_{eau,i+1} - P_{eau,i}}{T_{eau,i+1} - T_{eau,i}} \right)$$

Le flux de chaleur échangée est donné par :

$$\dot{Q}_{evap} = h_{evap} \cdot (T_{eau,i+1} - T_{eau,i})$$

$$\text{Par conduction } k_{cond} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \left[\frac{r_{i+1}}{r_i} \right]}$$

Le flux de chaleur échangée est donné par :

$$\dot{Q}_{cond} = k_{cond} \cdot A_{cond} \cdot (T_{eau} - T_{ambiance})$$

Pour cela, nous remplaçons les différents flux par leurs expressions explicites, puis nous écrivons les équations des bilans thermiques au niveau de chaque partie composant le distillateur, en fonction des températures ; et le système s'écrit comme suit:

✓ pour le bassin inférieur :

$$\frac{dT_{eau1}}{dt} = \frac{1}{Cp_{eau} \cdot m_{eau1}} \left[\begin{aligned} &\dot{Q}_{entrée} - (k_{cond} \cdot A_{cond})(T_{eau1} - T_{amb}) - \\ &(\alpha_{ra} \cdot A_{ra})(T_{eau1} - T_{eau2}) - \\ &(\alpha_{conv} \cdot A_{conv})(T_{eau1} - T_{eau2}) - m_{conv} \cdot L_v \end{aligned} \right]$$

✓ pour tous les étages i :

$$\frac{dT_{eau,i}}{dt} = \frac{1}{c_{p,eau} \cdot m_{eau,i}} \left[\begin{aligned} &\dot{Q}_{alim,i} - (k_{cond} \cdot A_{cond})(T_{eau,i} - T_{amb}) - \\ &(\alpha_{ra} \cdot A_{ra})(T_{eau,i-1} - T_{eau,i}) - \\ &(\alpha_{conv} \cdot A_{conv})(T_{eau,i-1} - T_{eau,i}) - m_{conv,i} \cdot L_v \end{aligned} \right]$$

Avec : $i = 2 ; 5$

Pour le dernier étage :

$$\frac{dT_{eau6}}{dt} = \frac{1}{c_{p,eau} \cdot m_{eau6}} \left[\begin{aligned} &\dot{Q}_{alim,6} - (k_{cond} \cdot A_{cond})(T_{eau6} - T_{amb}) - \\ &(\alpha_{ra} \cdot A_{ra})(T_{eau5} - T_{eau6}) - \\ &(\alpha_{conv} \cdot A_{conv})(T_{eau5} - T_{eau6}) \end{aligned} \right]$$

Le système d'équations se compose de six équations différentielles du 1^{er} ordre, sont résolues par une approche numérique basée sur la méthode de RUNGE-KUTTA du 4^{ème} ordre; a fin de déterminer les six distributions des températures pour chaque étage : $Teau1(t)$, $Teau2(t)$, $Teau3(t)$, $Teau4(t)$, $Teau5(t)$, $Teau6(t)$.

Pour les étages supérieurs l'énergie thermique d'alimentation ($\dot{Q}_{alim,i}$) se compose de flux thermiques par convection, radiation et évaporation, provenant de la surface d'eau du bassin inférieur.

$$\dot{Q}_{alim,i} = m_{conv,i-1} \cdot L_v + (\alpha_{ra} \cdot A_{ra})(T_{eau,i-2} - T_{eau,i-1}) + (\alpha_{conv} \cdot A_{conv})(T_{eau,i-2} - T_{eau,i-1})$$

En ce qui concerne la capacité thermique de l'eau en fonction de la température on a retenu la formule suivante:

$$Cp_{eau} = 999.2 - 0.1434T + 1.101 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 6.7581 \cdot 10^{-8} \cdot T^3$$

Dans les séries de calculs, on détermine la température de chaque étage, la production d'eau distillée. Il s'agit, en outre, de déterminer le rapport entre cette production et le changement de température entre les étages. Ensuite on calcul que le rendement et la performance de système.

IV- RRSULTATS ET DISCUSIONS

La figure (3) montre le trace des niveaux de température durant une journée. Nous voyons clairement qu'après un certain temps, un niveau de température constant peut être atteint pour chaque étage.

On remarque clairement que c'est l'étage le plus bas qui subit la plus forte élévation de température après celle de l'échangeur de chaleur. Puis, ces températures baissent de plus en plus au fur et a mesure que l'étage s'éloigne de la source de chaleur.



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



Les valeurs des coefficients d'échanges qu'ont été déterminés montrent que la variation de ces coefficients dans chaque étage est tellement faible, ce qui nous a permis de dire qu'on puise de faire le calcul de ces coefficients pour des valeurs des températures moyennes, et de les considérer constants dans chaque étage.

Ainsi que les résultats obtenus montrent une influence importante des températures des étages ainsi que les différences des températures entre chaque deux étages successives sur la production d'eau distillée. Cette dernière dépend évidemment de l'énergie d'alimentation (énergie solaire) et aussi de la surface d'évaporation ; entre autre un volume de plus de 41 litres de distillat de très bonne qualité a pu être récupéré en fin de journée- basé sur l'opération de 8 h -

On a constaté également un fort gradient de température entre le bassin inférieur et le premier étage, ce qui favorise la condensation avec un bon rendement environ 95%.

Autrement dit, on constat que le système fournit un bon rendement lorsque :

- l'étage inférieur atteint une température variant entre 95°C et 98°C,
- la différence de température varie entre 7°C et 13°C.

Aussi, il faut minimiser les pertes thermiques par conduction en utilisant une bonne isolation des parois du distillateur.

Le débit d'eau distillée aux conditions énumérées est de : 5.2 kg / h, avec une efficacité de distillation de 78% - correspondant à une énergie d'alimentation de 15 kWh ; correspondant à une quantité d'énergie solaire captée par une surface d'ouverture d'environ (6 m²).

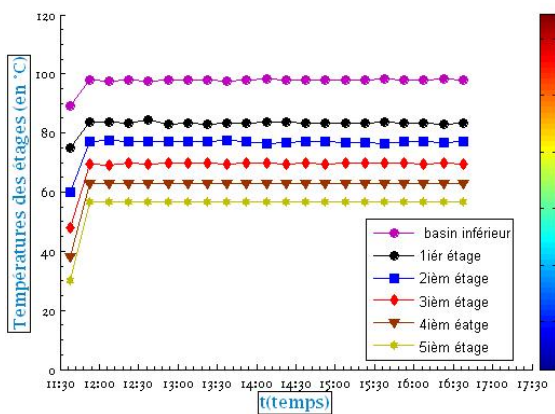


Fig 3. Tracés de la température d'un distillateur à Cinq étages durant six heures

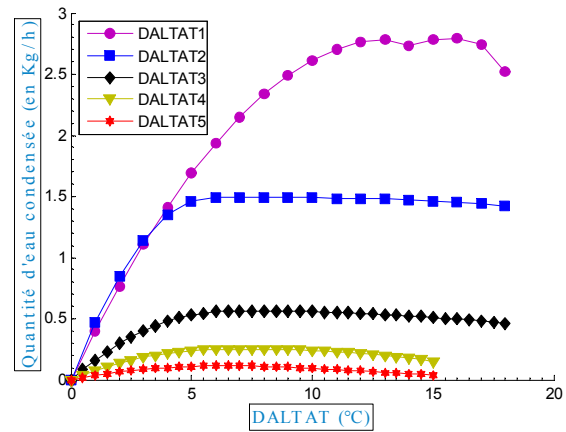


Fig4. Quantité d'eau distillée en fonction des différents des températures entre les étages

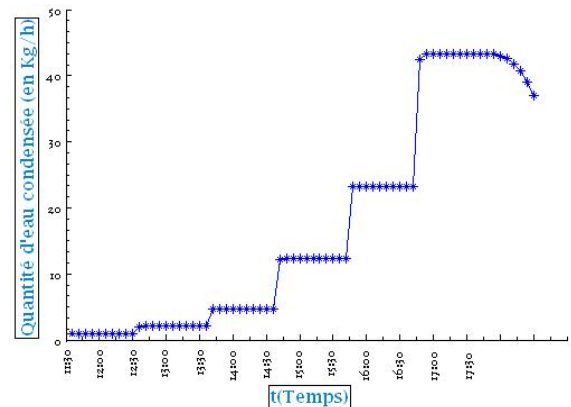


Fig5. Production d'eau condensée par intervalle de 30 min.



**Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 2nd International Seminar on New and Renewable
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012

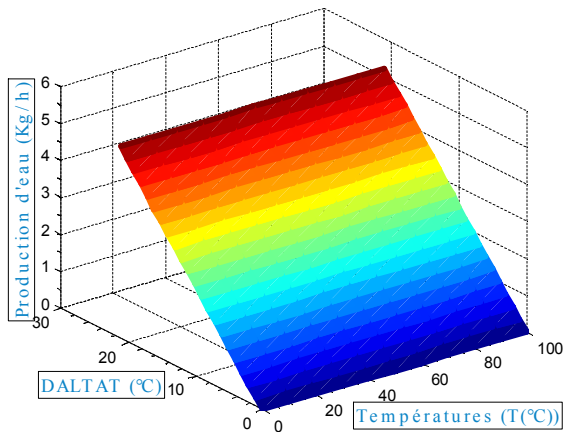


Fig6. Production d'eau condensée en fonction des températures des étages et des (ΔT).

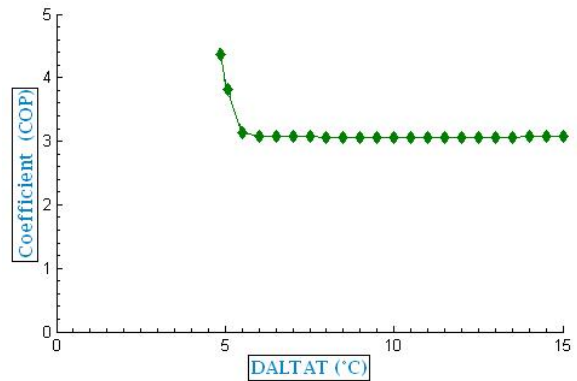


Fig 9. Le coefficient COP en fonction des différences Des températures

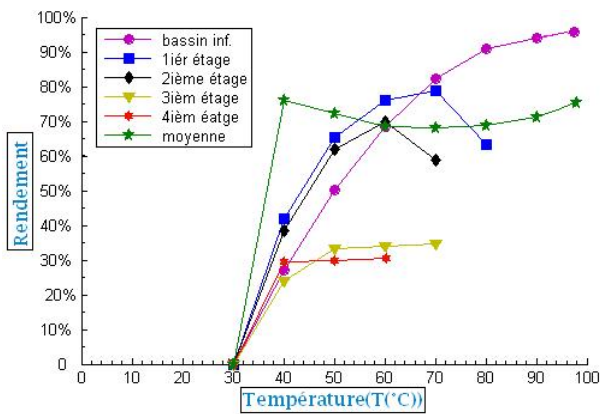


Fig7. Le rendement pour chaque étage distillateur en fonction des Températures des étages.

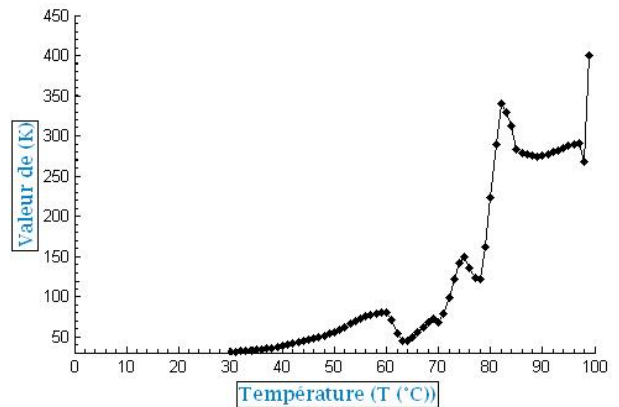


Fig10. Valeur de (K_{int}) en fonction des températures des étages

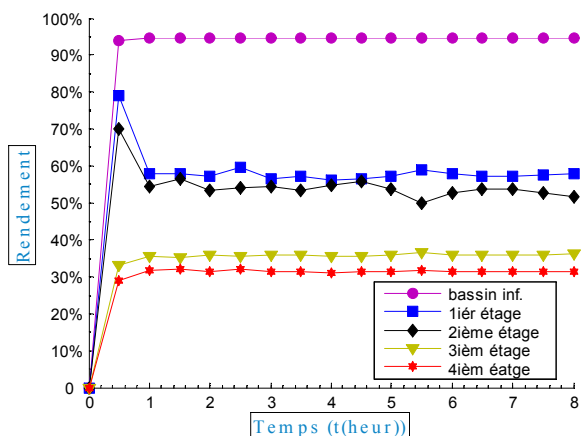


Fig 8. Le rendement pour chaque étage distillateur en fonction de Temps

VI- CONCLUSION

Le problème de la production d'eau douce par voie solaire est important à deux points de vue : nécessité d'économiser l'énergie et souci d'assurer les ressources hydrauliques. Nous avons montré que le principe des distillateurs solaire est très simple

Le gros avantage des procédés par évaporation est que l'eau est très pure, il faut même la recharger en éléments minéraux, et que sa consommation énergétique est indépendante de la salinité.

Les résultats de cette simulation peuvent être transférés aux résultats des travaux pratiques. En outre, il est significatif qu'on puisse, à travers la théorie, tirer conclusion sur la construction du prototype de distillateur à étages multiples fiable et approprié surtout aux pays en voie de développement.



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



NOMENCLATURE

A_{cond} : Surface d'échange par conduction
 A_{conv} : Surface d'échange par convection
 A_{ra} : Surface d'échange par radiation
 C_p : Capacité thermique [J/(kg.K)]
 COP : Coefficient de Performance
 h : Coefficient d'échange de chaleur [W/(m². K)]
 $h_{M, ev}$: Coefficient de transfert massique [s/ m]
 h_{conv} : Coefficient d'échange thermique par convection [W / (m². K)]
 h_{rad} : Coefficient d'échange thermique par radiation [W / (m². K)]
 h_{evap} : Coefficient d'échange thermique par évaporation [W / (m². K)]
 k_{cond} : Résistance du passage thermique par conduction [(m². K)/W]
 k_{int} : Coefficient de transmission thermique à l'intérieur du distillateur [W/ (m². K)]
 k_{ext} : Coefficient de transmission thermique à l'extérieur du distillateur [W/ (m². K)]
 L_v : Chaleur latente de la vaporisation [KJ/Kg]
 M : Masse molaire [g / mole]
 \dot{m}_{cond} : Débit de masse de condensation [Kg/h]
 m_{eau} : La masse d'eau dans un bassin [Kg]
 $T_{eau, i}$: Température de bassin (i) [°C]
 ΔT : Différence de température [°C]
 P : Pression de saturation [Pa]
 $\dot{Q}_{entrée}$: Flux thermique d'alimentation [W/m²]
 $\dot{Q}_{évapo}$: Flux thermique par évaporation [W/m²]
 \dot{Q}_{rad} : Flux thermique par radiation [W/m²]

\dot{Q}_{conv} : Flux thermique par convection [W/m²]
 \dot{Q}_{cond} : Flux thermique par conduction [W/m²]
 \dot{Q}_{eau} : Flux thermique absorbée par l'eau [W/m²]
 P_{vap} : Pressions de la vapeur [Pa]
 σ : La constant de stefan – Blotzmann = 5.6697×10⁻⁸ [W/(m² .K⁴)]
 λ : Conductivité thermique [W/m.K]

REFERENCES

- [1] H. Ben Bacha, T. Dammak, A.A. Ben Abdalah, A.Y. Maalej, H. Ben Dhia; « Desalination unit coupled with solar collectors and a storage tank: modelling and simulation », ELSEVIER, Desalination 206 (2007) 341–352.
- [2] A. Scrivani, T. El Asmar, U. Bardi; « Solar trough concentration for fresh water production and waste water treatment», ELSEVIER, Desalination 206 (2007) 485–493.
- [3] Salah Al-Hengari, Mohamed El-Bousiffi, Walid El-Mudir, «Performance analysis of a MSF desalination unit », ELSEVIER, Desalination 182 (2005) 73–85.
- [4] Ahmed Khedim, Klemens Schwarzer, Christian Faber, Christoph Müller ; « Production Décentralisé de l'eau potable à l'énergie solaire » ELSEVIER, Desalination, 168, 2004.
- [5] H.T.El-dessouky and H.M.Ettouney, « Fundamentals of Salt Water Desalination », ELSEVIER, First Edition, The Netherlands, 2002.
- [6] Javier Uche, Javier Artal, Luis Serra, « Comparison of heat transfer coefficient correlations for thermal desalination units », ELSEVIER, Desalination 152 (2002) 195–200.
- [7] A. Sadi, « Le Dessalement : Procédés et Energie Solaire » *Division Thermique Solaire, CDER, Alger, Bulletin N°6 Décembre*, 2004.
- [8] K. Schwarzer, M.E. Vieira, Ch. Faber, Ch. Müller, « Solar thermal desalination system with heat recovery », ELSEVIER, Desalination 137 (2001) 23–29.
- [9] R. Tchinda, et E. Kaptouom, « Simulation numerique des performances d'un distillateur solaire fonctionnant en mode indirect », African Journal of Science and Technology (AJST), Science and Engineering Series Vol. 5, No. 1, pp . 79 – 91, 2004.
- [10] K.S. Spiegler, Y.M. El-Sayed; « The energetics of desalination processes», ELSEVIER, Desalination 134 (2001) 109–128.

[9]