

ETUDE DE L'INCIDENCE DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES ET DES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES SUR LES PERFORMANCES D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE A SAUMURE DYNAMIQUE

Reçu le 01/03/2000 - Accepté le 06/11/2001

Résumé

Cet article présente la modélisation mathématique d'un distillateur solaire à effet de serre et à double vitrage. La modélisation est basée sur les bilans thermiques et l'utilisation de coefficients de chaleur et de masse appropriés. La simulation numérique, basée sur la méthode de Newton-Raphson, a été utilisée pour étudier l'influence des paramètres physiques et géométriques sur les performances du distillateur. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les résultats expérimentaux publiés.

Mots clés: Distillateur solaire, modélisation d'un distillateur solaire, dessalement des eaux saumâtres, distillateur à effet de serre, distillateur solaire à saumure dynamique.

Abstract

A mathematical model of a double-glazed solar still for desalinating sea water is presented. The modelisation begins by writing the energy balances using appropriate heat and mass transfer coefficients. Numerical simulation, based on the Newton-Raphson method, was used to study the effects of physical and geometrical parameters on the efficiency of the still. The obtained results are in good agreement with published experimental ones.

Key words: Solar still, sea-water desalination, solar distillation, mathematical model, performance analysis.

K. NEHAL

Centre universitaire de Médéa
Quartier Ain-Dheb
26000 Médéa, Algérie

L'eau a tendance à devenir un bien rare car la consommation ne cesse de croître par suite de l'augmentation de la population et de l'élévation du niveau de vie. La demande en eau dépasse l'offre constituée par les ressources naturelles. Parallèlement, on constate souvent des disponibilités en eaux salines, soit de type eau de mer, soit de type eaux saumâtres. Pour équilibrer l'offre à la demande, plusieurs pays ont eu recours au dessalement en utilisant différents procédés conventionnels tels que: l'osmose inverse, l'électrodialyse ou la distillation à multiples effets [1, 2].

D'importants travaux de recherches centrés soit sur la diminution de la consommation d'énergie des procédés de dessalement conventionnels, soit sur l'utilisation des sources d'énergies renouvelables (solaire, éolienne) sont menés dans le monde [3, 4, 5].

Pour le cas de l'Algérie, il est indispensable de penser dès maintenant à la valorisation des énergies renouvelables en procédant à la quantification des gisements et à l'étude des différentes applications possibles.

I- DISTILLATEUR SOLAIRE A EFFET DE SERRE A SAUMURE DYNAMIQUE

La distillation des eaux saumâtres ou marines est effectuée à grande échelle dans des distillateurs de type serre, dont certaines réalisations atteignent des surfaces de plusieurs milliers de mètres carrés [6].

Le distillateur étudié est du type serre à double vitrage à saumure dynamique (fonctionnement en continu). Dans cet appareil, le rayonnement solaire traverse le double vitrage et vient chauffer le fond horizontal du bassin sur lequel se trouve l'eau saumâtre à distiller coulant lentement dans une mèche noire. La vapeur qui s'en échappe va se condenser sur le vitrage interne et les gouttes qui s'y forment ruissellent jusqu'à une gouttière de récupération. L'eau saumâtre non évaporée est aussi récupérée du côté bas du distillateur (Fig.1).

ملخص

يتمثل هذا العمل في وضع نموذج رياضي خاص بمقطر شمسي ذي صفيحتين زجاجيتين. استخدمت المعادلات الخاصة بهذا النموذج بناء على طريقة « نيتون-رافسن » قصد تعيين كفاءة المقطر و تطوير مردوده. فكانت النتائج النظرية المتحصل عليها مطابقة تماما للنتائج التجريبية المنشورة. **الكلمات المفتاحية:** مقطر شمسي، تحلية مياه البحر، نموذج رياضي، كفاءة و مردود المقطر.

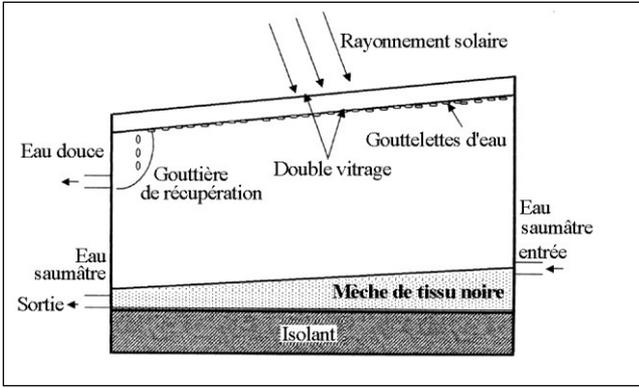


Figure 1: Distillateur solaire à effet de serre à double vitrage et à saumure dynamique.

II- MODELISATION MATHEMATIQUE DU DISTILLATEUR SOLAIRE

II.1- Approche

L'approche adoptée pour la modélisation de notre distillateur est le développement des équations des bilans énergétiques en régime permanent pour les trois surfaces: la mèche noire (surface A), la couverture interne (surface B) et la couverture externe (surface C).

Pour le développement de ces bilans, on considère que l'écart de température entre la face externe et interne du vitrage est négligeable, les températures du vitrage et saumures sont uniformes, les effets de bord sont négligés et finalement le phénomène de condensation n'influe pas sur la transmittivité du vitrage.

II.2- Formulation du modèle

La formulation mathématique du modèle est basée sur la figure 2 qui illustre les principaux mécanismes d'échange d'énergie dans notre distillateur:

1. Energie solaire incidente sur la surface C.
2. Energie solaire transmise à travers la surface C.
3. Energie solaire transmise à travers les surfaces C et B.
4. Energie solaire réfléchiée par la surface A.
5. Energie solaire réfléchiée par la surface A et transmise à travers la surface B.
6. Radiation thermique émise par la surface A (perte de chaleur par rayonnement).
7. Radiation thermique de la surface A transmise à travers la surface B (vitrage).
8. Convection libre entre la surface A et la surface B.
9. Conduction entre la surface B et la surface C.
10. Convection entre la surface C et l'air ambiant.
11. Conduction entre l'isolant et l'air ambiant.
12. L'énergie apportée par la saumure froide (à l'entrée du distillateur).
13. L'énergie emportée par la saumure tiède (à la sortie du distillateur).
14. L'énergie apportée de la surface A à la surface B par la vapeur d'eau.
15. L'énergie emportée par le distillat froid.

L'unité de distillation reçoit de l'énergie solaire (directe et diffuse). Cette énergie est soit transmise, absorbée ou

réfléchiée par les différents éléments du distillateur qui vont échanger de la chaleur selon différents processus (conduction, convection et rayonnement).

Lorsque le distillateur fonctionne en régime permanent, l'accumulation d'énergie pour les trois surfaces (A, B, C) est nulle.

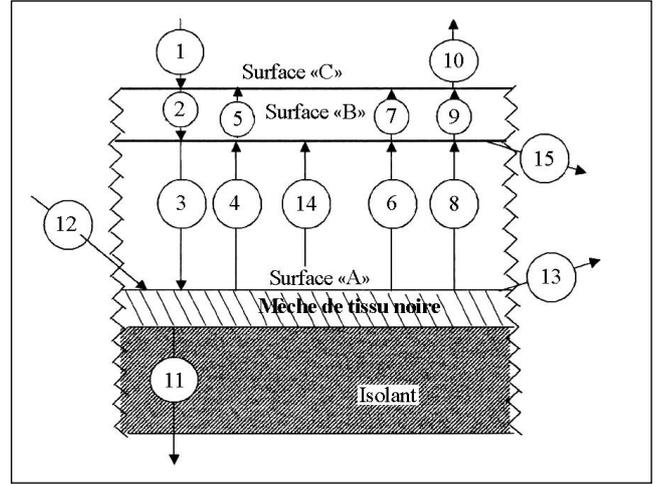


Figure 2: Mécanismes d'échange d'énergie dans le distillateur.

1/ Bilan thermique au niveau de la surface A

$$(12) + (3) = (11) + (8) + (13) + (6) + (14) \dots\dots\dots (1)$$

En remplaçant chaque flux de chaleur de l'équation (1), on obtient le bilan énergétique pour la surface A:

$$\tau^2 \alpha_A q + (\dot{m}_d + \dot{m}_s) C_p T_s = \frac{K_i}{l_3} (T_A - T_a) + \frac{K_m}{l_2} (T_A - T_B) + \dot{m}_s C_p T_A + \alpha_A \sigma T_A^4 + \dot{m}_d H_v \dots\dots\dots (2)$$

2/ Bilan thermique au niveau de la surface B

$$(2) + (4) + (6) + (8) + (14) = (9) + (15) \dots\dots\dots (3)$$

En remplaçant chaque flux de chaleur de l'équation (3) on obtient le bilan énergétique pour la surface B:

$$\tau \alpha_B q + \tau^2 (1 - \alpha_A) \alpha_B q + \alpha_{in} \alpha_A \sigma T_A^4 + \frac{K_m}{l_2} (T_A - T_B) + \dot{m}_d H_v = \frac{K_a}{l_1} (T_B - T_C) + \dot{m}_d C_p T_B \dots\dots\dots (4)$$

On précise que les flux de chaleur (5) et (7) ne sont ni absorbés, ni perdus par la surface B (flux transmis), et c'est pour cette raison qu'ils ne figurent pas dans le bilan (3) et (4).

3/ Bilan thermique au niveau de la surface C

$$(1) + (5) + (9) + (7) = (10) \dots\dots\dots (5)$$

En remplaçant chaque flux de l'équation (5) on obtient le bilan pour la surface C:

$$\alpha_B q + \tau^3 (1 - \alpha_A) \alpha_B q + \frac{K_a}{l_1} (T_B - T_C) + (1 - \alpha_{in}) \alpha_{in} \alpha_A \sigma T_A^4 = h (T_C - T_A) \dots\dots\dots (6)$$

4/ Coefficients de transfert de chaleur et de masse

Pour le flux (8), on a un transfert de chaleur et de masse

combiné, on utilise le nombre de Grashof qui caractérise le régime d'écoulement [7, 8]:

$$Gr = \frac{g l^3 \rho_B}{\nu^2} \left[\left(\frac{\rho_B}{\rho_A} - 1 \right) + \beta (T_A - T_B) \right] \dots \dots \dots (7)$$

avec : $\beta = \frac{1}{T}$ (8)

a) Conduction pure ($0 < Gr < 2000$)

Le transfert de masse est donné par l'équation de STEFAN [7]:

$$\dot{m}_d = \frac{D}{l_2} \frac{P}{RT} \ln \left(\frac{P - P_B}{P - P_A} \right) \dots \dots \dots (9)$$

où D est le coefficient de diffusivité [7]:

$$D = 2.26 \cdot 10^{-5} \frac{1}{P} \left(\frac{T_A}{273} \right)^{1.81} \dots \dots \dots (10)$$

Les pressions saturantes pour les surfaces A et B peuvent être déterminées par [9]:

$$P_{A,B} = \text{Exp} \left(\frac{17.488 T_{A,B}}{239.78 + T_{A,B}} + 6.414 \right) \dots \dots \dots (11)$$

b) Régime laminaire ($2000 < Gr < 2,10^5$)

Le transfert de masse est donné par:

$$\dot{m}_d = \delta (W_A - W_B) \dots \dots \dots (12)$$

Avec la densité partielle de la vapeur d'eau donnée par [7]:

$$W_{A,B} = \frac{M}{R} \frac{P_{A,B}}{T_{A,B}} \dots \dots \dots (13)$$

Le coefficient de transfert de masse δ est déterminé à partir du nombre de Nusselt massique [10]:

$$Nu_M = \delta \frac{l_2}{D} = C \cdot (Gr \cdot Sc)^n \dots \dots \dots (14)$$

Le nombre de Schmidt est donné par:

$$Sc = \frac{\nu}{D} \dots \dots \dots (15)$$

Le coefficient de transfert de chaleur est donné par [7]:

$$K_{ef} = K_a \cdot C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \dots \dots \dots (16)$$

Pour ce régime d'écoulement: $C = 0,20$ et $n = 0,25$.

Le nombre de Prandtl est:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \dots \dots \dots (17)$$

c- Régime turbulent ($2,10^5 < Gr < 10^7$)

Les équations (12), (14) et (16) sont utilisées pour déterminer le transfert de masse, le coefficient de transfert de masse ainsi que le coefficient de transfert de chaleur, mais pour un régime d'écoulement turbulent, on a [7]: $C = 0,071$ et $n = 0,33$.

5/ Rendement du distillateur

Le rendement d'un distillateur est défini par le rapport [10]:

$$\eta = \frac{\dot{m}_d \cdot H_v}{q} \dots \dots \dots (18)$$

III- SIMULATION NUMERIQUE DU DISTILLATEUR SOLAIRE

A partir des équations des bilans d'énergie et de masse (équations non-linéaire et couplées), nous avons mis en œuvre un programme informatique pour simuler le comportement thermique du distillateur.

La résolution du modèle mathématique, basée sur la méthode de Newton-Raphson a permis l'étude de l'incidence des paramètres météorologiques (puissance solaire incidente) et des paramètres de conception sur les performances du distillateur.

La figure 3 illustre les variations des températures des trois surfaces (surface d'évaporation A, surface de condensation B et la surface externe du vitrage C) en fonction de la puissance solaire incidente [11]. Pour de grandes valeurs de cette puissance l'écart de température entre la surface A et la surface B est plus important, ce qui engendre une augmentation de la production d'eau distillée et du rendement (Fig. 4).

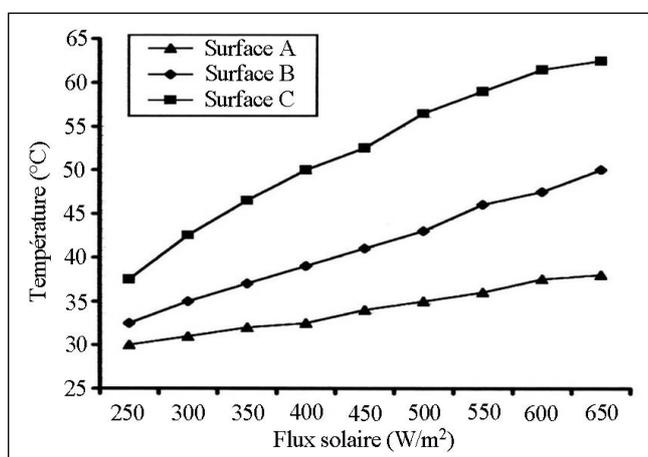


Figure 3: Evolution des températures des surfaces A, B, C en fonction du flux solaire incident.

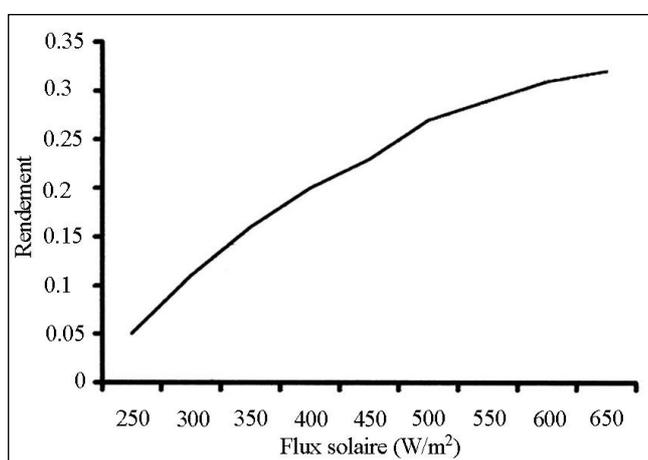


Figure 4: Variation du rendement en fonction du flux solaire incident.

La figure 5 montre les variations du rendement du distillateur en fonction du coefficient d'échange de chaleur par convection entre la surface externe du vitrage et l'air ambiant.

Il existe une relation directe entre ce coefficient et la vitesse du vent $h = 5.7 + 3.8V$ [1].

Une augmentation de la vitesse du vent entraîne une augmentation de l'écart de température entre la surface d'évaporation et la surface de condensation. Ceci contribue à l'augmentation de la production d'eau douce et du rendement du distillateur. Au-delà d'une certaine valeur de ce coefficient, le rendement reste constant.

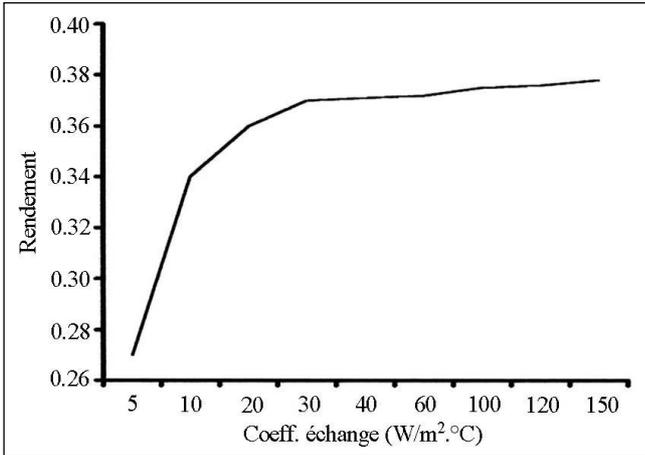


Figure 5: Variation du rendement en fonction du coefficient d'échange par convection.

La figure 6 représente la variation de la production d'eau distillée en fonction de la distance saumure vitrage. Plus cette distance est importante, plus le flux de chaleur entre la surface A et B diminue, entraînant une diminution de la production d'eau distillée.

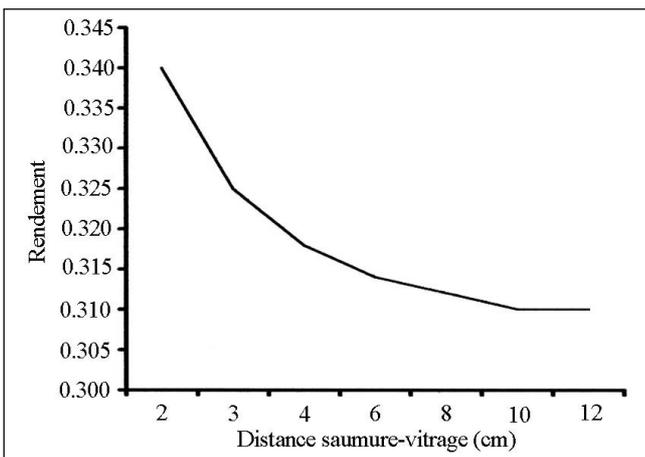


Figure 6: Variation du rendement en fonction de la distance saumure-vitrage.

L'influence de l'épaisseur de l'isolant sur les températures des trois surfaces et sur le rendement du distillateur est donnée aux figures 7, 8 et 9. On note qu'à partir d'une épaisseur critique, cette influence disparaît.

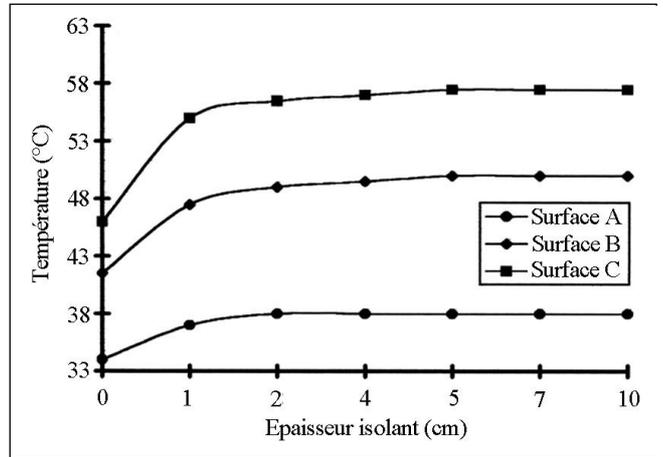


Figure 7: Evolution des températures en fonction de l'épaisseur de l'isolant.

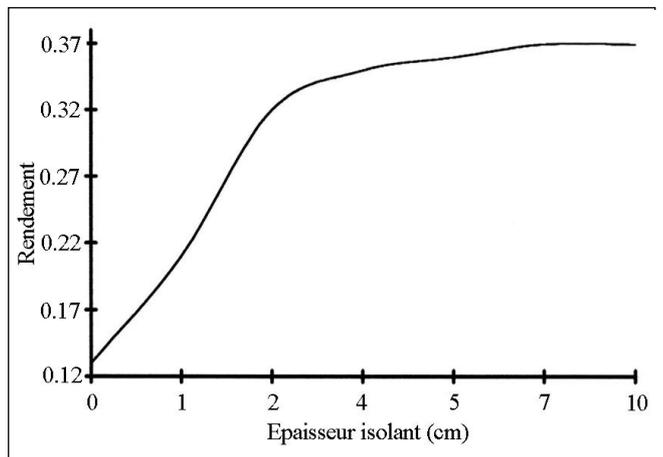


Figure 8: Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de l'isolant.

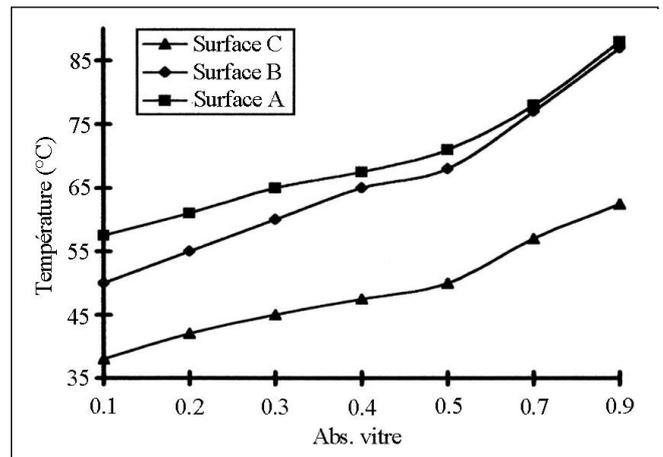


Figure 9: Evolution des températures en fonction de l'absorptivité de la vitre.

L'influence de l'absorptivité de la vitre sur les températures des surfaces A, B et C est représenté sur la figure 9. Plus ce coefficient est grand, plus l'énergie absorbée par les vitres est grande; ceci entraîne

l'augmentation de la température du vitrage mais l'écart de température entre la surface d'évaporation et la surface de condensation diminue. Cette diminution fait chuter le rendement, phénomène qui est représenté sur la figure 10.

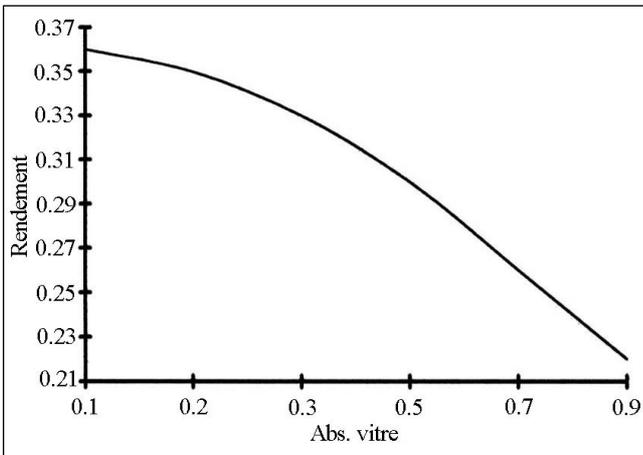


Figure 10: Variation du rendement en fonction de l'absorptivité de la vitre.

Les résultats obtenus sont en concordance avec les résultats expérimentaux publiés en [12,13] pour des distillateurs à effet de serre.

CONCLUSION

La modélisation et la simulation numérique ont permis l'étude de l'influence des paramètres météorologiques et géométriques sur les performances d'un distillateur solaire à effet de serre et à saumure dynamique. Cette étude a montré que certains paramètres peuvent posséder des valeurs optimales, comme la distance saumure – couvercle, et d'autres dont l'augmentation engendre simplement une variation monotone du rendement: c'est le cas de la puissance solaire incidente.

L'utilisation de la mèche noire comme surface d'évaporation permet le ruissellement continu de la saumure et augmente le coefficient d'absorption de cette surface.

Un bon isolement du bas du distillateur est nécessaire pour assurer un bon rendement. Ceci est réalisé grâce au choix de l'épaisseur optimale et de la nature de l'isolation.

Finalement, on peut dire que le modèle présenté dans cet article constitue un outil appréciable pour aborder un projet de construction d'un distillateur solaire peu coûteux, simple à réaliser et adapté au région isolée.

NOMENCLATURE

C_p : chaleur spécifique (J/kg K).
 D : coefficient de diffusion massique (m^2/s).
 g : accélération de la pesanteur (m/s^2).
 h : coefficient d'échange par convection ($W/m^2 K$).
 H_v : enthalpie de vapeur (J/kg).
 K : conductivité thermique ($w/m K$).

l_1 : distance entre les deux vitres (m).
 l_2 : distance saumure/vitrage (m).
 l_3 : épaisseur de l'isolation (m).
 m : débit massique (kg/h).
 M : masse molaire de l'eau (kg/mole).
 p : pression (atm).
 q : rayonnement solaire incident (W/m^2).
 R : constante des gaz parfaits ($m^3 \cdot \text{Atm}/\text{mole K}$).
 T : température (K).
 T_a : température ambiante (K).
 W : densité partielle de la vapeur d'eau (kg/m^3).

LETTRES GRECQUES

α_A : absorptivité de la mèche noire.
 α_B : absorptivité du vitrage.
 α_{in} : absorptivité du vitrage dans l'infrarouge.
 β : coefficient de dilatabilité (K^{-1}).
 μ : viscosité dynamique ($kg/m \cdot s$).
 γ : viscosité cinématique (m^2/s).
 δ : coefficient d'échange massique.
 τ : coefficient de transmission du vitrage.
 ε : émissivité.
 σ : constante de Stephan Boltzman ($W/m^2 K^4$).
 ρ : masse volumique (kg/m^3).
 η : rendement.

NOMBRES SANS DIMENSION

Gr : nombre de Grashof.
 Nu : nombre de Nusselt.
 Pr : nombre de Prandtl.
 Sc : nombre de Schmidt.

INDICES

A: surface d'évaporation.
a: air
B: surface de condensation.
C: surface externe du vitrage.
d: distillat.
i: isolant.
m: mélange air – vapeur d'eau.

REFERENCES

- [1]- Maurel A., "Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, comparaison des procédés, le coût de l'eau dessable", Conf. N°8, C.E.N Cadarache, Février, (1986).
- [2]- Maurel A., "Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres", Séminaires sur les stratégies de gestion des eaux dans les pays méditerranéens, Alger, (1990).
- [3]- Hamid A. et Ouvzzane D., "Développement d'un modèle de simulation pour l'étude d'un distillateur solaire à cascade de production nationale", J.I.T.H., (1993).

- [4]- Kalogirou S., "Survey of solar desalination systems and system selection", *Energy*, Vol. 22, N° 1, (1997), pp. 69-81.
- [5]- Rajavanshi A., "Etude des performances d'un distillateur solaire à effet de serre", *Solar Energy*, vol 2, 58, (1981).
- [6]- Hmami L., Flamant Y., "Simulation sur ordinateur d'un distillateur solaire statique et dynamique, comparaison avec les modèles expérimentaux réalisés", *J. of. Tech.*, E.N.P.A, (1982), pp. 49-70.
- [7]- Sacadura J.F., "Initiation aux transferts thermiques", Technique et documentation, Paris, (1980).
- [8]- Bouvenot A., "Transferts de chaleur", Masson, Paris, (1981).
- [9]- Coudron L., "Les Réfrigérants atmosphériques industriels", Eyrolles, Paris, (1991).
- [10]- Sfeir A.A., "Ingénierie des systèmes solaires", Tech-Doc, Paris, (1981).
- [11]- Wieder S., "An introduction to solar Energy for scientists and engineers", John Willy & Sons, N.Y, (1982).
- [12]- Bernard R., "Le rayonnement solaire: conversion thermique et applications", Tech-Doc, Paris, (1981).
- [13]- Khelif C., "Caractérisation d'un distillateur à effet de serre", *Revue des énergies renouvelables*, Vol.1, (1998), pp.99-108.

□