

## Dessalement de l'eau de mer par voie thermique solaire à Djibouti

H. Osman Ali<sup>a</sup>, A. Khamlichi<sup>b</sup>, H. Ali Barkad<sup>c</sup>

- a. Département de Physique, Faculté des Sciences de Tetouan, Tetouan 93030, Morocco, IUT-I, Université de Djibouti, Djibouti, Djibouti, [arhiba@hotmail.com](mailto:arhiba@hotmail.com)
- b. Département de Physique, Faculté des Sciences de Tetouan, Tetouan 93030, Morocco, [khamlichi7@yahoo.es](mailto:khamlichi7@yahoo.es)
- c. IUT-I, Université de Djibouti, Djibouti, Djibouti, [hassan\\_ali\\_barkad@univ.edu.dj](mailto:hassan_ali_barkad@univ.edu.dj)

Correspondance, courriel: [arhiba@hotmail.com](mailto:arhiba@hotmail.com)

### Résumé :

Le manque d'eau douce représente un grand défi pour la République Djibouti. Face à ce problème, le dessalement de l'eau de mer apparaît comme une solution très opportune. La technique de dessalement par voie thermique solaire en provoquant l'évaporation de l'eau saumâtre avant de la condenser pour récupérer l'eau douce est une solution qui semble être très prometteuse. Dans le cadre de ce travail, l'attention est focalisée sur le distillateur actif qui utilise un apport additionnel d'énergie thermique au moyen d'un capteur solaire indépendant. Notre objectif est d'aboutir à la conception optimale de ce système pour produire 100 m<sup>3</sup> d'eau douce par jour à base de la simulation numérique. Nous avons pour cela écrit les équations différentielles qui gouvernent les différents échanges thermiques se produisant dans l'installation. Nous avons ensuite intégré ce système numériquement à l'aide d'un schéma approprié. Une étude paramétrique a été menée en vue de déterminer la conception optimale.

**Mots clés:** Dessalement, Distillateur, Thermique solaire, Evaporation, Optimisation

### 1 Introduction

Dans de nombreuses régions arides du monde à l'instar de Djibouti et du Maroc, les sources d'eau douce sont inexistantes ou deviennent insuffisantes au regard de la croissance démographique ou de la production industrielle. La République de Djibouti dispose d'un important potentiel en énergies renouvelables. Vu sa position géographique, le climat est tropical aride, enregistrant une faible pluviométrie et connaissant une forte évaporation en raison de la chaleur : Djibouti manque d'eau douce. Avec l'important gisement solaire dont Djibouti profite, il apparaît opportun de s'intéresser à la technique thermique par évaporation qui représente une solution prometteuse afin de subvenir à une partie des besoins en eau. D'où l'intérêt du dessalement comme procédé durable de production de l'eau potable. Les enjeux modernes relatifs à l'activité de dessalement de l'eau de mer tournent essentiellement autour de la réduction du coût énergétique qui reste encore élevé, et particulièrement en cas de faible besoin: consommation ne dépassant pas 100m<sup>3</sup>/jour [1]. Pour satisfaire la demande en eau

potable à faible échelle, les distillateurs solaires passifs ont fait leur preuve depuis la première réalisation pratique dans ce domaine qui remonte à la fin du dix-neuvième siècle : las Salinas au Chili [2]. Plusieurs pays de tiers-monde utilisent les distillateurs solaires pour la production d'eau potable à partir d'eau salée. Malik et al. [3] ont montré que la distillation solaire est la méthode la plus économique pour la production d'eau douce en petites quantités. Dans ce travail, nous étudions un distillateur solaire de type actif. Nous considérons que l'eau de mer reçoit une quantité de chaleur supplémentaire de la part du fluide caloporteur qui circule en bas d'une plaque en cuivre disposée au fond de la cuve. C'est dans le contexte du dessalement à faible échelle que s'inscrit ce travail où le dessalement de l'eau saumâtre par voie thermique est considéré via l'utilisation de l'énergie solaire comme unique source de chaleur. Les équations du système ont été obtenues en effectuant le bilan énergétique pour les différents éléments composant le distillateur [4]. Le modèle obtenu est résolu numériquement à l'aide du logiciel Matlab. Le modèle complet ainsi construit permet de rendre compte de manière explicite des nombreux paramètres en jeu. Ceux-ci comprennent les paramètres de conception (longueur du distillateur, inclinaison de la vitre, rapport d'aspect, longueur du capteur solaire), les paramètres de fonctionnement (débit de l'eau de mer, débit du fluide caloporteur, épaisseur de l'eau de mer dans le bassin), les paramètres environnementaux (humidité relative, vitesse du vent, température de l'eau de mer, état du ciel) et les paramètres qui conditionnent la puissance du rayonnement solaire capté. L'intégration de ces équations a permis de conduire des études paramétriques extensives dans le but de déterminer l'influence des différents facteurs qui interviennent dans le problème.

## **2 Description et modélisation du système**

Le système de dessalement comprend deux circuits: le circuit primaire qui apporte la chaleur et le circuit secondaire dans lequel circule l'eau saumâtre à évaporer. Le fluide caloporteur chauffe à travers une paroi métallique en cuivre l'eau saumâtre à distiller. L'enveloppe en verre sert à la fois d'apport en rayonnement solaire qui peut se rajouter à la quantité de chaleur fournie par le circuit primaire. Cette enveloppe qui est au contact de l'air froide permet de condenser la vapeur d'eau qui peut ruisseler sur la face intérieure et peut ainsi être récupérée. La figure 1 présente le schéma de principe de cette installation.

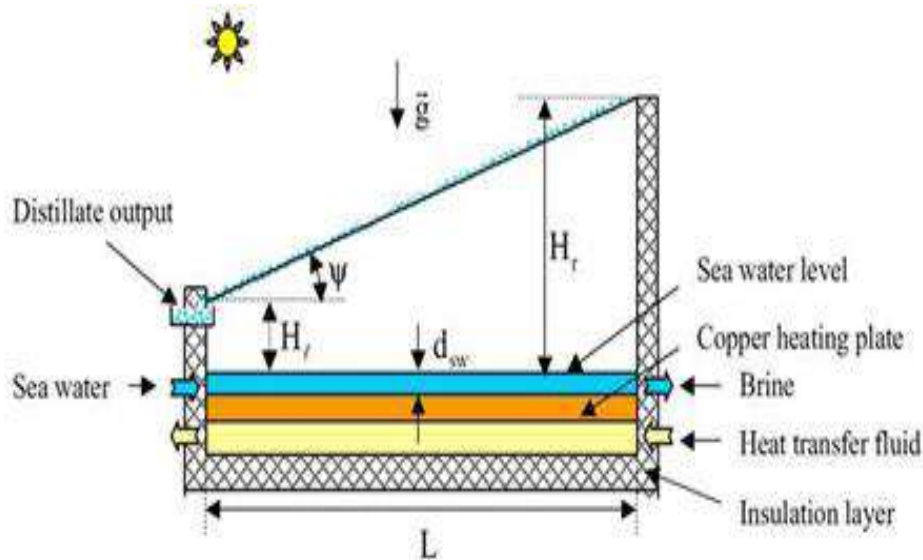


Figure 1: Configuration d'un distillateur solaire actif [4]

Le modèle mathématique du système intégré peut être développé à base de bilan énergétique [4].

- Vitre extérieure

$$\frac{\rho_v V_v c_{p,v} dT_{ve}}{2A_v dt} = \frac{\lambda_v}{e_v} (T_{vi} - T_{ve}) - hc_{ve\_amb} (T_{ve} - T_{amb}) - hr_{ve\_ciel} (T_{ve} - T_{ciel}) \quad (1)$$

- Vitre intérieure

$$\frac{\rho_v V_v c_{p,v} dT_{vi}}{2A_v dt} = \alpha'_v I(t) + (hc_{em\_vi} + hr_{em\_vi})(T_{em} - T_{vi}) + \frac{\dot{m}_{ev} h_v}{A_v} - \frac{\lambda_v}{e_v} (T_{vi} - T_{ve}) \quad (2)$$

- Eau de mer

$$\rho_{em} V_{em} c_{p,em} \frac{dT_{em}}{dt} = \alpha'_{em} A_{em} I(t) + hc_{c\_em} A_{em} (T_c - T_{em}) + \dot{m}_{em} c_{p,em} T_{em,en} - \dot{m}_s c_{p,s} T_{s,sor} - \dot{m}_{ev} h_L - hc_{em\_vi} A_{em} (T_{em} - T_{vi}) - hr_{em\_vi} A_{em} (T_{em} - T_{vi}) \quad (3)$$

- Plaque de cuivre

$$\frac{\rho_c V_c c_{p,c} dT_c}{A_c dt} = \alpha'_c I(t) + hc_{fc\_c} (T_{fc} - T_c) - hc_{c\_em} (T_c - T_{em}) \quad (4)$$

- Fluide caloporteur

$$\frac{\rho_{fc} V_{fc} c_{p,fc} dT_{fc}}{A_{fc} dt} = \frac{2\rho_{fc} D_{fc} c_{p,fc}}{A_{fc}} (T_{fc,en} - T_{fc}) - hc_{fc\_c} (T_{fc} - T_c) - U_{perte} (T_{fc} - T_{amb}) \quad (5)$$

où  $hc_{ve\_amb}$  est le coefficient d'échange par convection avec l'air ambiant,  $hr_{ve\_ciel}$  le coefficient d'échange par rayonnement avec le ciel,  $hc_{c\_em}$  le coefficient de convection entre la plaque de cuivre et l'eau de mer,  $hc_{em\_vi}$  le coefficient de convection entre l'eau de mer et la vitre interne,  $hr_{em\_vi}$  le coefficient d'échange par rayonnement entre l'eau de mer et la vitre interne,  $hc_{fc\rightarrow c}$  est le coefficient d'échange par convection entre le fluide caloporteur et le cuivre et  $U_{perte}$  le coefficient de convection de perte. Les coefficients de transferts de chaleur peuvent être évalués par des corrélations précises. Ils sont donnés dans [4].

La masse d'eau distillée est donnée par :

$$\Gamma = \int_0^{t_c} \dot{m}_{ev}(t) dt \tag{6}$$

où  $t_c$  est la durée pour calculer la masse d'eau distillée.

### 3 Résultats et Discussion

La figure 2 montre le modèle numérique du système et précise les paramètres d'entrée et de sortie. Tous les paramètres de conceptions ainsi que ceux du fluide caloporteur sont inclus dans le modèle.

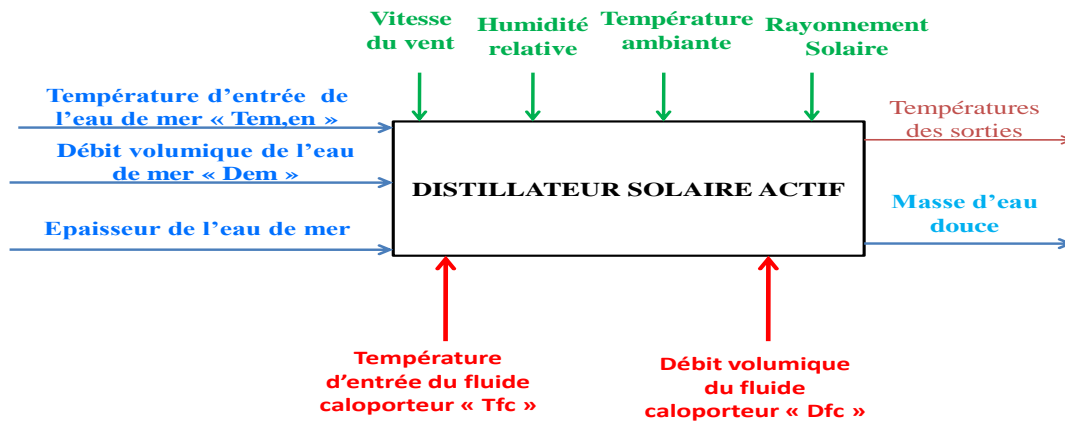


Figure 2: Schéma du modèle numérique

- Nous simulons les évolutions des températures de chaque élément du système et nous calculons la production de l'eau douce du distillateur.

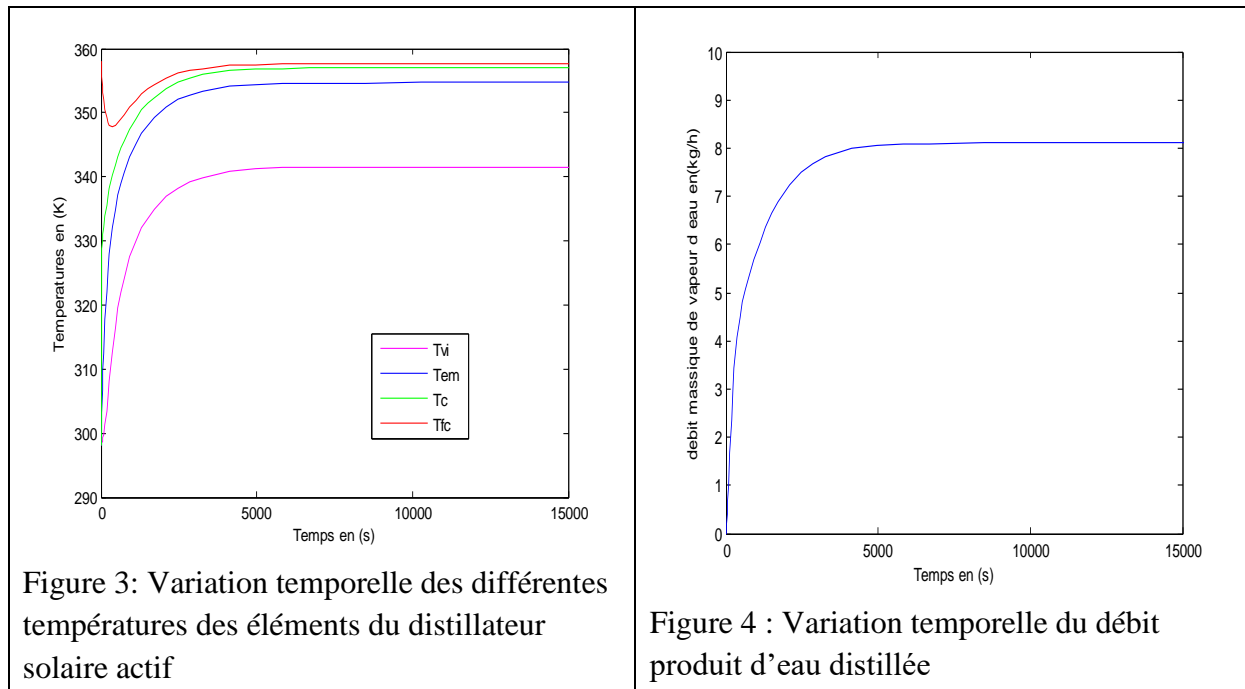


Figure 4 : Variation temporelle du débit produit d'eau distillée

La figure 3 montre l'évolution des différentes températures des éléments du distillateur solaire actif de type four solaire. La température de fluide caloporteur est la température motrice de notre système de dessalement. Dans le régime transitoire, la température du fluide caloporteur atteint sa valeur minimale à l'instant 363s après le démarrage. Durant ce temps, la température de la plaque de cuivre croît brusquement du fait de ses caractéristiques, notamment l'épaisseur très faible, la couleur noire de la peinture et la conductivité thermique très élevée. Par contre les températures de l'eau de mer et de la partie interne de la vitre augmentent progressivement. Après 363s toutes les températures des différents composants du système tendent à se stabiliser. La remontée de température du fluide caloporteur s'explique par la circulation permanente du fluide caloporteur. Le système finit par atteindre un état d'équilibre thermique au bout une durée de temps environ 5000s (1h23min).

La figure 4 décrit l'évolution du débit de l'eau distillée en fonction du temps. On voit bien que la variation temporelle du débit d'eau distillée prend la même allure que celles des températures de l'eau de mer et de la vitre interne: le débit de l'eau distillée augmente progressivement et atteint le régime stationnaire après une durée de temps d'environ 5000s.

- Plusieurs simulations numériques ont été effectuées afin d'évaluer l'influence des différents facteurs sur masse d'eau distillée  $\Gamma$ .

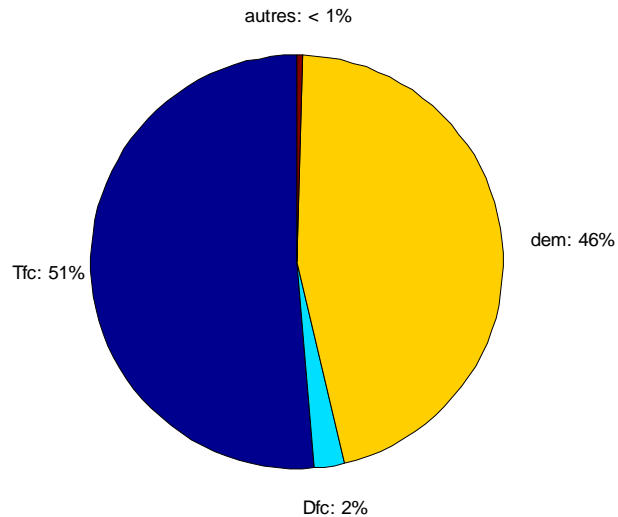


Figure 5 : Effets de facteurs sur la masse d'eau distillée

$D_{fc} \in [1.4; 2.8] \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{fc} \in [353.15, 363.15] \text{ }^\circ\text{K}$  et  $d_{em} \in [0.02; 0.06] \text{ (m)}$ .

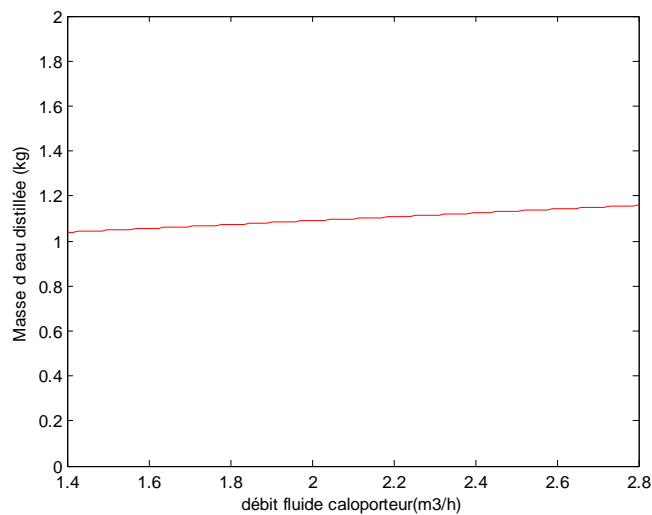


Figure 6 : Variation de la production d'eau distillée en fonction du débit de fluide caloporteur

La figure 5 montre bien évidemment que la température du fluide caloporteur est le facteur qui influence le plus le processus actif de production de l'eau douce par le distillateur solaire. Cette température est suivie par le facteur d'épaisseur d'eau de mer dans la cuve d'évaporation qui est aussi un facteur pesant dans un système du distillateur solaire.

La figure 6 montre que la masse d'eau distillée augmente légèrement avec l'augmentation du débit de fluide caloporteur dans l'intervalle d'étude considéré.

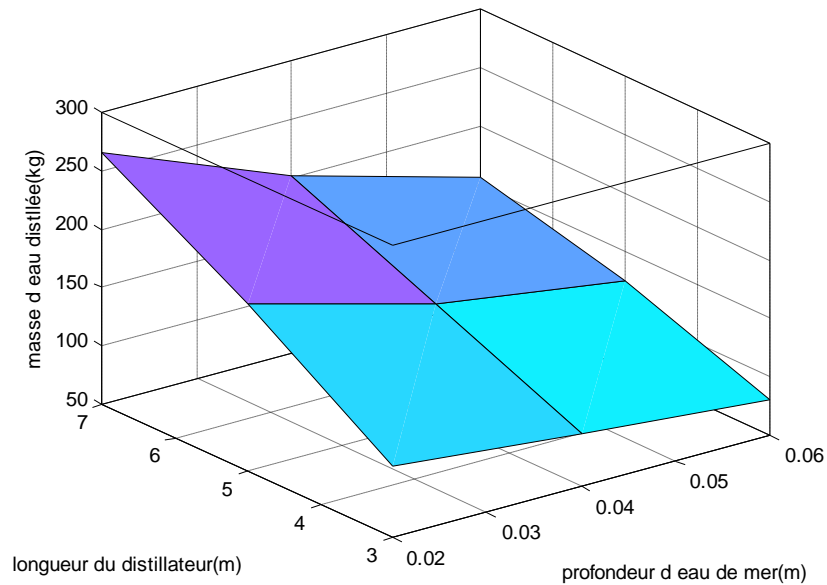


Figure 7: Evolution de la production de masse d'eau distillée en fonction de la profondeur de l'eau de mer dans la cuve d'évaporation et la longueur du distillateur

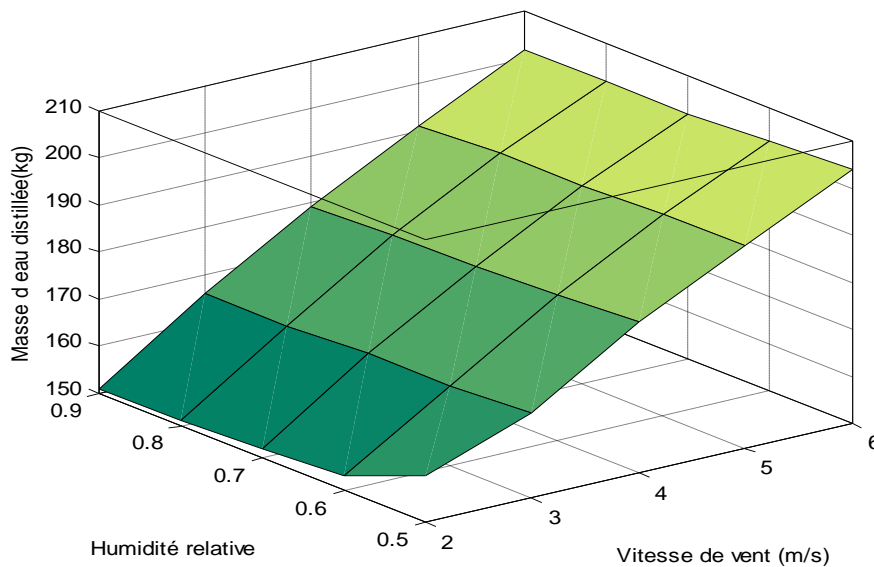


Figure 8: Evolution de la masse d'eau distillée en fonction de la vitesse du vent et de l'humidité relative

La figure 7 montre l'évolution de production de masse d'eau distillée en fonction de profondeur de l'eau de mer dans la cuve d'évaporation et la longueur du distillateur. On remarque que dans l'intervalle d'étude, la productivité du distillateur augmente considérablement avec la l'augmentation de la longueur de cuve et décroît lorsque l'épaisseur de l'eau de mer augmente.

La figure 8 montre l'évolution de la production du système en fonction de vitesse de vent et l'humidité relative. On remarque que la vitesse du vent influence considérablement la production d'eau distillée. Par contre, on constate que l'humidité relative influence très peu la production du distillateur solaire.

Le résultat obtenu permet de retrouver ce qui est déjà ressenti à partir de la physique du problème, à savoir que l'augmentation de la vitesse du vent fait que la surface de condensation devient plus frais par augmentation de la convection forcée, ce qui améliore la condensation.

### 3 Conclusion

Nous avons étudié dans ce travail, un distillateur solaire actif en vue de conduire son optimisation de manière paramétrique. Les équations physiques ayant servi à développer la modélisation expriment les bilans thermiques pour les différents éléments composant l'installation. Une étude paramétrique a été effectuée en fonction des paramètres de conceptions. Nous pouvons synthétiser l'ensemble des résultats des études paramétriques effectuées en concluant que lors de la conception d'un distillateur solaire actif, il est préférable de prévoir son implantation dans une zone ventée, de prendre un bassin le plus long possible et de veiller à limiter la profondeur de l'eau de mer dans ce bassin. Par ailleurs, il convient mieux de travailler avec une température suffisamment élevée du fluide caloporteur même si ceci exige de limiter au moyen d'un contrôle adéquat le débit du fluide caloporteur.

#### Nomenclature:

$A_c$	Aire de la surface de la plaque de cuivre ( $m^2$ )
$A_{fc}$	Aire de la surface de la cuve de fluide caloporteur ( $m^2$ )
$A_v$	Aire de la surface de l'enveloppe en verre ( $m^2$ )
$A_{em}$	Aire de la surface de la cuve de l'eau de mer ( $m^2$ )
$c_{p,c}$	Capacité thermique massique de cuivre ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$c_{p,em}$	Capacité thermique massique de l'eau de mer ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$c_{p,fc}$	Capacité thermique massique du fluide caloporteur ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$c_{p,s}$	Capacité thermique massique de la saumure ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$c_{p,v}$	Capacité thermique massique du verre ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
$D_{fc}$	Débit volumique du fluide caloporteur ( $m^3.s^{-1}$ )

$d_{em}$	Profondeur de l'eau de mer ( m )
$e_v$	Epaisseur du verre ( m )
$e_{is}$	Epaisseur de l'isolant ( m )
$I(t)$	Intensité solaire ( $W.m^{-2}$ )
$h_L$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau ( $kJ.kg^{-1}$ )
$L$	Longueur du bassin ( m )
$\dot{m}_{em}$	Débit massique de l'eau de mer entrant ( $kg.s^{-1}$ )
$\dot{m}_{ev}$	Débit massique de l'eau évaporée ( $kg.s^{-1}$ )
$\dot{m}_s$	Débit massique de saumure sortant ( $kg.s^{-1}$ )
$T_{amb}$	Température ambiante ( K )
$T_{s,sor}$	Température de saumure à la sortie ( K )
$T_c$	Température de cuivre ( K )
$T_{fc}$	Température du fluide caloporteur ( K )
$T_{fc,en}$	Température d'entrée de fluide caloporteur ( K )
$T_{ve}$	Température du verre externe ( K )
$T_{vi}$	Température du verre interne ( K )
$T_{em}$	Température de l'eau de mer ( K )
$T_{em,en}$	Température d'entrée de l'eau de mer ( K )
$T_{ciel}$	Température de ciel ( K )
$t$	Temps ( s )
$V_c$	Volume du cuivre ( $m^3$ )
$V_{fc}$	Volume du fluide caloporteur ( $m^3$ )
$V_v$	Volume du verre ( $m^3$ )
$V_{em}$	Volume de l'eau de mer ( $m^3$ )
$\alpha'_c$	Fraction de l'énergie solaire absorbée par une plaque de cuivre, sans dimension
$\alpha'_v$	Fraction de l'énergie solaire absorbée par le verre, sans dimension
$\alpha'_{em}$	Fraction de l'énergie solaire absorbée par l'eau de mer, sans dimension
$\Gamma$	Masse d'eau distillée ( kg )
$\lambda_v$	Conductivité thermique du verre ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$\rho_c$	Masse volumique du cuivre ( $kg.m^{-3}$ )
$\rho_{em}$	Masse volumique de l'eau de mer ( $kg.m^{-3}$ )
$\rho_{fc}$	Masse volumique du fluide caloporteur ( $kg.m^{-3}$ )
$\rho_v$	Masse volumique du verre ( $kg.m^{-3}$ )

**Références**

- [1] L.G. Rodriguez, (2002), Seawater desalination driven by renewable energies: a review, *Desalination* 143,103-113.
- [2] E. Delyannis, (2003), Historic background of desalination and renewable energies, *Solar Energy*, 75(5), 357-366.
- [3] M.A.S. Malik, GN. Tiwari, A. Kumar, M.S. Sodha, (1982), *Solar Distillation*, Pergamon Press Ltd, UK.
- [4] H. Osman Ali, A. Khamlichi, (2014), Modelling an active solar still for sea water desalination process optimization, *Desalination* 354, pp.1-8.