

# Estimation du flux de masse et de chaleur d'une installation de distillation à détente étagées (MSF) couplée à un capteur cylindro parabolique pour le dessalement d'eau de mer

N. Nouah<sup>\*</sup>, K. Dahmani, N. Djennaoui et M. Brahim

Laboratoire du Département Thermo-Energétique  
Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés,  
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene  
B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie

(reçu le 30 Janvier 2013 – accepté le 30 Septembre 2013)

**Résumé** - *L'eau et l'énergie sont des sujets les plus importants pour l'environnement international et le développement. La santé économique et sociale moderne dépend de l'approvisionnement durable en énergie et en eau. Beaucoup de zones à travers le monde qui souffrent de la pénurie d'eau douce sont de plus en plus dépendante du dessalement qui est une source très fiable et non conventionnelle de production d'eau douce. Ainsi, le marché du dessalement d'eau de mer a considérablement augmenté ces dernières décennies et devrait se poursuivre dans les années à venir. L'approvisionnement en eau aujourd'hui en Algérie repose en grande partie sur le dessalement. En Algérie, l'irradiation directe, utilisée pour les concentrateurs solaires thermiques dépasse les 2900 kWh/m<sup>2</sup> dans certaines régions. L'objectif de ce papier consiste à déterminer la quantité d'eau douce produite par une installation de dessalement utilisant les procédés Multi-Stage Flash 'MSF' et équipée d'un champ solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques 'CCP'. Les résultats montrent que le taux de production par unité de surface est de l'ordre de 11,36 l/m<sup>2</sup> pour le site d'Oran et 15,65 l/m<sup>2</sup> pour le site de Touggourt.*

**Abstract** – *Water and energy are two of the most important issues on the international environment and development. The modern social and economic health depends on the sustainable supply of energy and on water. Many areas around the world which suffer from shortages of potable water are increasingly dependent on desalination which is a very reliable source and unconventional production system of potable water. Thus, the market for desalination of seawater increased dramatically in recent decades and is expected to continue in the years to come. The water supply in Algeria today is based for a large part on desalination. In Algeria, the direct irradiation, used for concentrated solar thermal systems exceeds 2900 kWh/m<sup>2</sup> in some areas. The objective of this paper is to determine the amount of potable water produced in a desalination plant using the process Multi-Stage Flash 'MSF' equipped with a parabolic through collectors field 'PTC'. The results show that the rate of production per unit area is about 11.36 l/m<sup>2</sup> for Oran and 15.65 l/m<sup>2</sup> for Touggourt.*

**Keywords:** Sustainable water desalination – PTC - Solar flux.

## 1. INTRODUCTION

L'eau est l'une des ressources les plus abondantes sur terre, couvrant les trois quarts de la surface de la planète. Environ 97 % d'eau terrestre et d'eau salée dans les océans et 3 % d'eau douce contenue dans les pôles (sous forme de glace), les eaux souterraines, les lacs et les rivières, qui fournissent la plupart des besoins de l'humanité. Près de 70 %

---

\* nouah.noureddine@yahoo.fr

de ces 3 % d'eau douce de la planète sont concentrés dans les glaciers, les neiges éternelles, etc. Les autres 30 % de cette eau douce est souterraine, et sont difficiles à les extraire. Le dessalement consiste en général à retirer le sel de l'eau salée. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, la limite admissible de la salinité dans l'eau est de 500 ppm et pour des cas particulier jusqu'à 1000 ppm.

Or, la plupart de l'eau disponible sur terre présente une salinité jusqu'à 10000 ppm, et l'eau de mer a normalement une salinité de l'ordre de 35000 et 45000 ppm sous forme de sels dissous totaux.

Le but d'un système de dessalement est de purifier l'eau saumâtre des matières dissoutes totales dans la limite autorisée de 500 ppm ou moins. Ceci est accompli par plusieurs méthodes de dessalement, dont la méthode MSF qui sera utilisée dans notre étude et sera détaillée plus loin.

L'énergie est aussi importante que l'eau pour le développement de bonnes conditions de vie, car elle est la force qui met toutes les activités humaines en fonctionnement. Les procédés de dessalement nécessitent des quantités importantes d'énergie pour réaliser la séparation du sel de l'eau de mer.

L'augmentation dramatique de l'approvisionnement en eau dessalée permettra de créer une série de problèmes, dont les plus importants sont ceux liés à la consommation d'énergie et la pollution de l'environnement causée par l'utilisation de combustibles fossiles.

Les systèmes à énergie renouvelable produisent de l'énergie à partir de sources disponibles gratuitement dans la nature et respectueuses de l'environnement. La production d'eau douce par des technologies de dessalement utilisant des systèmes énergétiques renouvelables est une solution viable en particulier pour les régions éloignées caractérisé par un manque d'eau potable et de sources d'énergie conventionnelles, telles que la chaleur et l'électricité [1-3].

Avec l'évolution de la technologie des capteurs solaires, le dessalement solaire apparaît de plus en plus dans les pays du golfe, en Egypte, à Madagascar, dans les îles désertes, etc. Dans le monde, plusieurs usines de dessalement renouvelables pilotes ont été installées et la majorité a été exploitée avec succès durant un certain nombre d'années. La quasi-totalité d'entre elles sont conçues pour des endroits spécifiques et utilise l'énergie solaire, éolienne ou géothermique pour produire de l'eau douce.

Les données opérationnelles et l'expérience acquise avec ces usines peuvent être utilisées pour atteindre une plus grande fiabilité et minimiser les coûts. Bien que les systèmes de dessalement alimentés en énergie renouvelable ne puissent pas rivaliser avec les systèmes classiques en termes de coût de l'eau produite, elles sont applicables dans certaines zones et sont susceptibles de devenir plus largement une solution dans un à venir proche [1-3].

Cet article est structuré en quatre parties. Le paragraphe 2 fournit de brèves informations sur le procédé MSF, ainsi que, la technologie CCP. Dans la partie 3, la modélisation des deux installations est présentée. La partie 4 présente la simulation et enfin les résultats sont présentés dans la partie 5. La section 6 conclut cette étude.

L'objectif de ce travail consiste à déterminer la quantité d'eau douce produite par une installation de dessalement utilisant le procédé Multi-Stage Flash 'MSF' équipée d'un champ solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques 'CCP' pour deux sites en Algérie (Oran et Touggourt).

## 2. GENERALITES

### 2.1 Le processus de dessalement MSF

Le dessalement peut être réalisé en utilisant un certain nombre de techniques. Les technologies de dessalement industriel utilisent, soit le changement de phase, soit des membranes semi-perméables pour séparer le solvant ou certains solutés (osmose inverse).

La technique de dessalement MSF est une technique de dessalement thermique: sous des conditions de saturation, un liquide peut bouillir, s'il y a un apport de chaleur ou une réduction de pression. Ce dernier cas est connu sous le nom du 'procédé par évaporation flash', donc dans le système multi flash, l'eau est portée sous pression à une température de saturation  $T_0$ . Elle est introduite dans une enceinte à pression réduite où se produit une vaporisation immédiate. L'eau de mer et le saumâtre sont envoyés dans l'installation à la température  $T_{sw}$ , puis préchauffées jusqu'à une température  $T_0$  par une source de chaleur extérieure.

Après cette étape, la saumure chaude se refroidit par une séquence de détente produisant de la vapeur, elle quitte le dernier étage avec une température  $T_N$ . La fraction de saumure in-flashée peut être recyclée dans le cas d'installations à recyclage de la saumure. Enfin, on condense la vapeur dans des condenseurs pour produire du distillat (eau douce). Un schéma de l'installation est présenté sur la figure 1 [1].

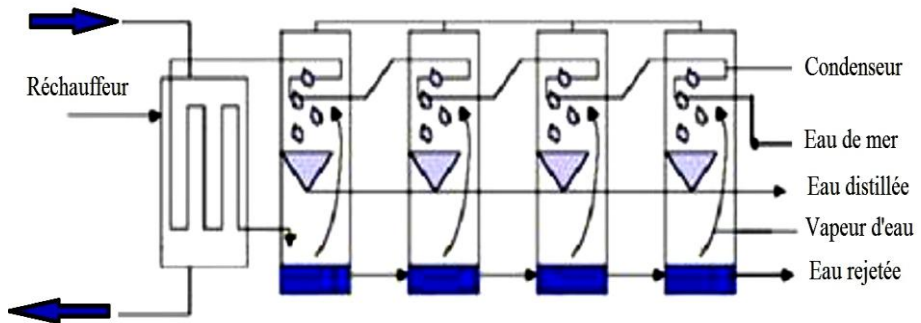


Fig. 1: Installation Multi-Stage Flash 'MSF'

### 2.2 Les concentrateurs cylindro-paraboliques

Les concentrateurs solaires thermiques sont basés sur le concept de concentration du rayonnement solaire direct pour fournir de la chaleur à haute température pour la production d'électricité dans les centrales électriques conventionnelles utilisant des turbines à vapeur, turbines à gaz ou des moteurs Stirling.

Pour la concentration solaire, la plupart des systèmes utilisent des miroirs de verre qui suivent le soleil. Dans le cas des concentrateurs cylindro-paraboliques CCP, les rayons du soleil sont focalisés sur un récepteur qui est spécialement conçu pour réduire les pertes de chaleur.

Un fluide s'écoulant à travers le récepteur transmet la chaleur vers un cycle de puissance thermique. L'eau, l'huile ou d'autres liquides peuvent être utilisés comme fluides caloporteurs. Les CCP sont généralement dotés d'un système de suivi du soleil à un seul axe (Est-Ouest) [4].

### 3. MODELISATION DES FLUX DE MASSE ET DE CHALEUR DE L'INSTALLATION MSF ET DU CCP

#### 3.1 Le champ solaire

Le flux de chaleur transmis au fluide est donné par la puissance gagnée au collecteur [5]:

$$Q_u = Q_{\text{abs}} - Q_p \quad (1)$$

$$Q_u = \eta_{\text{op}} \times I_b \times A_a - U_L (T_f - T_{\text{amb}}) \quad (2)$$

Le flux utile en fonction de la température de fluide à l'entrée est donné par:

$$Q_u = F_r \times [\eta_{\text{op}} \times I_b \times A_a - U_L \times A_r (T_{\text{fe}} - T_{\text{amb}})] \quad (3)$$

$$\text{Avec, } F_r = \frac{\dot{m} \times C_p}{A_a \times U_L} \times \left( 1 - e^{-\left( \frac{A_a \times U_L \times F'}{\dot{m} \times C_p} \right)} \right)$$

$$\text{Tel que, } F' = \frac{1 / U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_e}{h_{fi} \times D_i} + \left( \frac{D_e}{2K} \times \ln \left( \frac{D_e}{D_i} \right) \right)}$$

et

$$\eta_{\text{op}} = \rho \times (\tau \alpha) \times \gamma \quad (4)$$

#### 3.2 Installation MSF

En appliquant le bilan de masse et d'énergie sur un étage  $i$  de l'installation, on obtient [1]:

Le débit de l'eau distillée qui est la somme des débits de distillat de chaque étage,

$$\dot{M}_D = \sum_{i=1}^n D(i) \quad (5)$$

Tel que:

$D(i)$  est le débit distillé dans un étage  $i$  et est donné par:

$$D(i) \times h_{fg}(i+1) = B(i) \times C_{p_{\text{eau}}} \Delta T \quad (6)$$

Où,  $h_{fg}(i+1)$  représente la chaleur latente de changement de phase de l'eau à l'étage  $i+1$ ,

et  $B(i)$  le débit de saumure chaude dans l'étage  $i$ .

#### 4. SIMULATION DES DEUX INSTALLATIONS

La modélisation du transfert de masse et de chaleur des capteurs cylindro-paraboliques et ceux de l'installation MSF, ainsi que la combinaison des deux installations (Capteur + MSF) est faite par une procédure de calcul et de programmation écrite en langage FORTRAN pour les deux sites algériens.

1. Oran, située au fond d'une baie ouverte au Nord de l'Algérie,
2. Touggourt, située dans le Sud algérien, mais cette région contient des eaux saumâtres.

Pour le concentrateur cylindro-parabolique utilisé dans cette étude, il est de type LS-2 qui fait partie du champ solaire de la centrale thermique SEGS en Californie dans les caractéristiques sont données par [6]. Les données utilisées pour les deux installations sont présentées dans le **Tableau 1**.

#### 5. RESULTATS ET DISCUSSION

Afin de vérifier la validité de la modélisation du capteur cylindro-parabolique, on a comparé nos résultats avec les données publiées par le Laboratoire National des Energies Renouvelables (Nevada USA) [6] sous les mêmes conditions exigées.

L'étude a été réalisée sur 144 collecteurs placés en série. Tandis que l'installation MSF est validée en faisant une comparaison avec un modèle existant soumis à l'expérimentation: le modèle d'El-Dessouky.

##### 5.1 Le champ solaire

Les résultats de simulation du champ solaire sont présentés sur les figures 2 et 3.

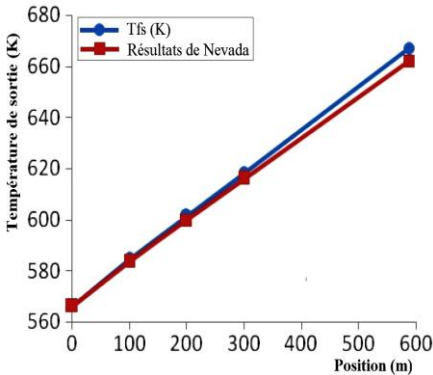


Fig. 2: Température de sortie de fluide caloporteur en fonction de la position

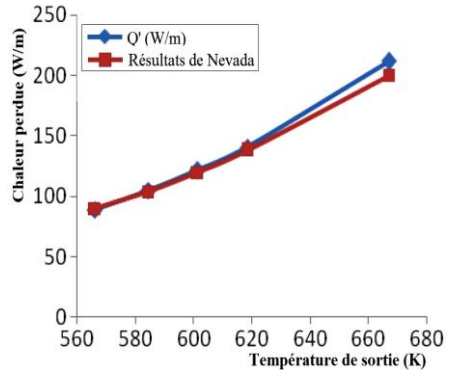


Fig. 3: Chaleur perdue en fonction de la température de sortie du fluide

On remarque sur les figures 2 et 3, que la température augmente suivant la position le long de la conduite, ce qui fait augmenter la chaleur perdue dans la conduite.

En comparant nos résultats avec ceux de Nevada, on constate que cette étude de modélisation est en bon accord avec celle réalisée par Nevada, donc peut être considérer que les résultats de notre modélisation est satisfaisante.

## 5.2 Installation MSF

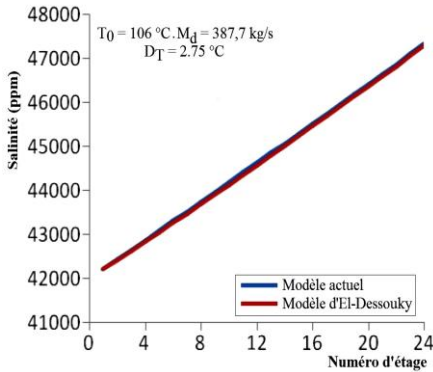


Fig. 4: Evolution de la salinité dans chaque étage

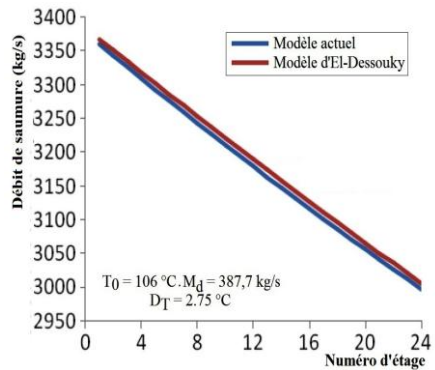


Fig. 5: Débit de la saumure dans chaque étage

Les figures 4 et 5 présentent l'évolution de la concentration en sel et le débit de la saumure. On note que les courbes obtenues avec le modèle actuel se confondent avec celles du modèle d'El-Dessouky pour l'alimentation en eau de mer.

## 5.3 Installation concentrateur - MSF

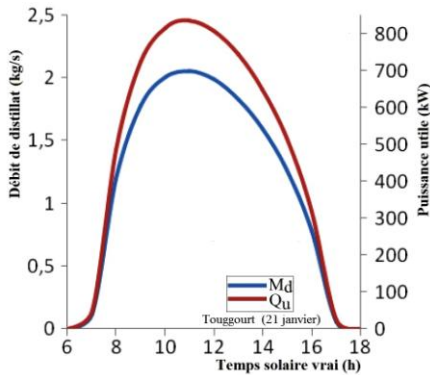


Fig. 6: Débit de distillat en fonction du temps pour une rangée de concentrateurs cylindro-paraboliques pour Touggourt

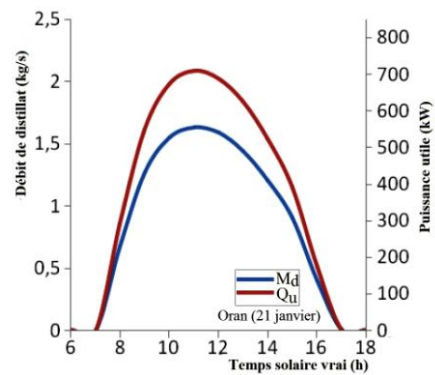


Fig. 7: Débit de distillat en fonction du temps pour une rangée de concentrateurs cylindro-paraboliques pour le site d'Oran

**Tableau 1:** Données de l'étude

Installation MSF choisie	Oran	Touggourt
$T_0$	91 °C	100 °C
$T_{sw}$	20 °C	20 °C
$T_N$	30 °C	30 °C
$DT$	2,75 °C	2,75 °C
$N$	22	25
$X_f$	42000 ppm	21000 ppm

Consommation d'eau douce	400 l/habitat	400 l/habitat
Nombre d'habitants	6 747 273	70 645
Consommation d'eau potable	283 195 m <sup>3</sup> /j	29 671 m <sup>3</sup> /j
Concentrateur utilisé	Ls-2	
Fluide caloporteur	Biphényl-Dyphényl Oxide (Therminol VP-1)	
L	588 °	
W	5,75 m	
$\dot{m}$	9 kg/s	
T <sub>amb</sub>	15 °C	30 °C
T <sub>fe</sub>	120 °C	
Quantité d'eau distillée pour un capteur (Ls-2)	38.42 m <sup>3</sup> /j	52.90 m <sup>3</sup> /j
Taux ce production par surface	0.01136 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0.01565 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
Consommation de chaleur	120.48 kWh/m <sup>3</sup>	112.90 kWh/m <sup>3</sup>
Nombre de rangées	7371	561

Les résultats montrent que les consommations et les taux spécifiques du dessalement solaire sont presque constants. Les écarts entre les valeurs sont dus au calcul de la salinité qui est différente. En général, le Sud du pays présente un gisement solaire très important.

## 6. CONCLUSION

L'utilisation des concentrateurs pour le procédé MSF de dessalement est particulièrement intéressante, puisque ces capteurs sont très développés ces dernières années, notamment pour la production de la vapeur surchauffée pour alimenter des turbines à vapeur, peuvent assurer la production d'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation.

Ce travail nous a permis de développer un code de calcul pour simuler le fonctionnement d'une installation complète. Ce code a été validé à partir de résultats expérimentaux disponibles au Laboratoire de Recherches du Nevada pour le modèle de concentrateur Ls-2 et comparés au modèle de El-Dessouky pour l'installation MSF. Cette validation a mis en exergue la qualité de nos résultats.

Dans le Sud algérien, où l'ensoleillement est très important. Le solaire peut fournir une énergie abondante utilisable par l'industrie. On a montré, grâce à l'analyse des résultats que l'installation de dessalement solaire peut assurer les besoins en eau.

Tout procédé a des inconvénients, pour la MSF simple passage, le rejet est énorme mais on peut l'améliorer par la recirculation de saumure et ce dernier point pourra faire l'objet d'une étude ultérieure.

## NOMENCLATURE

Q <sub>u</sub> : Puissance transmise au fluide caloporteur (énergie utile), W	U <sub>L</sub> : Coefficient global des pertes thermiques, W/m <sup>2</sup> .K
I <sub>b</sub> : Rayonnement solaire direct, W/m <sup>2</sup>	γ : Facteur d'interception
Q <sub>abs</sub> : Puissance reçue par l'absorbeur, W	Q <sub>p</sub> : Puissance perdue, W
η <sub>op</sub> : Rendement optique	A <sub>a</sub> : Section de l'absorbeur, m <sup>2</sup>
T <sub>f</sub> : Température de fluide, K	T <sub>amb</sub> : Température ambiante, K

$F_f$ : Facteur de dissipation de la chaleur	$\rho$ : Facteur de réflective du miroir
$T_{fe}$ : Température d'entrée du fluide, K	$\tau$ : Coefficient de transmission du verre
$\dot{m}$ : Débit massique du fluide caloporteur, kg/s	$C_p$ : Chaleur spécifique du fluide VP-1, J/kgK
$\gamma$ : Facteur d'interception	$h_f$ : Enthalpie spécifique liquide saturé kJ/kg
$D_e$ : Diamètre extérieur du tube absorbeur, m	$D_i$ : Diamètre intérieur du tube absorbeur, m
$D(i)$ : Débit distillé à l'étage $i$ , kg/s	$B(i)$ : Débit de saumure chaude, étage $i$ , kg/s
$C_{peau}$ : Capacité calorifique d'eau à pression constante kJ/kg°C	$h_{fg}(i+1)$ : Chaleur latente de changement de phase, kJ/kg
DT : Différence de température entre deux étages, °C	$T_0$ : Température de la saumure chaude à l'entrée de l'unité, °C
$T_{fs}$ : Température de sortie de fluide, K	$\dot{M}_d$ : Débit d'eau distillée, kg/s
$T_{sw}$ : Température de l'eau de mer, °C	$T_N$ : Température sortie de saumure, °C
$X_f$ : Salinité, ppm	$L$ : Longueur de collecteur, m
$Q'$ : Puissance perdue, W/m	$W$ : Largeur de collecteur, m
$A_R$ : Surface d'échange thermique du réchauffeur, m <sup>2</sup>	$\alpha$ : Coefficient d'absorption de l'absorbeur

## REFERENCES

- [1] K. Touafek, W. Bendaikha-Touafek, A. Malek, M. Haddadi et L. Serir, '*Etude d'un Système de Cogénération par les Capteurs Hybrides Photovoltaïques Thermiques Destinés à l'Habitat*', Revue des Energies Renouvelables, CER'07 Oujda, pp. 177 – 180, 2007.
- [2] B. Bouzidi, A. Malek et M. Haddadi, '*Rentabilité Economique des Systèmes de Pompage Photovoltaïques*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3, pp. 187 – 197, 2006.
- [3] S. Diaf, M. Haddadi et M. Belhamel, '*Analyse Technico Economique d'un Système Hybride (Photovoltaïque/Eolien) Autonome pour le Site d'Adrar*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3, pp. 127 – 134, 2006.
- [4] L. Stoyanov, G. Notton et V. Lazarov, '*Optimisation des Systèmes Multi-Sources de Production d'Electricité à Energies Renouvelables*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°1, pp. 1 – 18, 2007.
- [5] A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, S. Moussa et M.R. Benhaddadi, '*Optimisation d'un Système Hybride (Eolien – Photovoltaïque) Totalemment Autonome*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3, pp. 199 – 209, 2006.
- [6] W.T. Chong, M.S. Naghavi, S.C. Poh, T.M.I. Mahlia and K.C. Pan, '*Technico-Economic Analysis of a Wind-Solar Hybrid Renewable Energy System with Rainwater Collection Feature for Urban High-Rise Application*', Applied Energy, Vol. 88, N°11, pp. 4067 – 4077, 2011.