



# Amélioration de la productivité de la technologie intégrée de dessalement thermique (MSF-OT/TVC)

Ahlem SELLAMI<sup>1\*</sup>, Mongi BEN ALI<sup>1</sup>, Mouna ELAKDHAR<sup>1</sup>, Lakdar KAIROUANI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UR Energétique & Environnement \_ENIT

BP 37 Le Belvédère 1002, Tunis, TUNISIE \_ Fax : 216 71 872 729

\*ahlem.sellami@yahoo.fr

**Résumé** - Dans ce travail, nous présentons une technologie intégrée de dessalement thermique (MSF-OT/TVC), ce système combine l'unité de compression thermique de vapeur (TVC) avec le procédé de dessalement par détentes successives (Multi-stage flash) à passage unique (MSF-OT), une étude a été réalisée afin d'évaluer l'amélioration des performances de ce système en se basant sur la consommation énergétique et sur la capacité de production d'eau douce. Le système d'équations a été résolu grâce à une procédure itérative, en utilisant la fonction *fsolve* du logiciel MATLAB. L'étude a montré que la compression thermique de vapeur améliore les performances de procédé (MSF-OT) en raison de l'augmentation du rapport de performance PR et la réduction de débit spécifique d'eau d'alimentation  $sM_{ea}$ . De même, on a montré que le rapport de performance thermique augmente lors de l'augmentation de  $Tb_0$ .

## Nomenclature

$M$	Débit massique, $kg/s$	$PR$	Rapport de performance thermique
$P$	Pression, $kPa$	<i>Symboles grecs</i>	
$T, t$	Température, $^{\circ}C$	$\lambda$	Chaleur latente $kJ/kg$
$Tb_0$	Température maximale de chauffage de la saumure, $^{\circ}C$	<i>Indice</i>	
$C_p$	Chaleur spécifique, $J/K$	$b$	saumure
$A$	Surface de transfert de chaleur, $m^2$	$c$	section de récupération
$U$	Coefficient global d'échange de chaleur, $kW/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$	$d$	distillat
$B$	Débit de la saumure quittant l'étage $i$ , $kg/s$	$f$	eau d'alimentation
$D$	Débit de la vapeur produite dans l'étage, $kg/s$	$h$	section de chauffage
$X$	Salinité de l'eau, $ppm$	$i$	indice de stage
$d_e$	Diamètre extérieur des tubes, $m$	$n$	nombre des étages
$d_i$	Diamètre intérieur des tubes, $m$	$N$	nombre des tubes
$L, w$	Largueur, $m$	$v$	vapeur
$sM_{ea}$	Le débit spécifique de d'eau d'alimentation	$m$	motrice
		$ev$	entraîné

## 1. Introduction

Parmi les problèmes les plus répandus dans le monde est l'accès insuffisant de l'eau potable. Bien que le dessalement peut contribuer à satisfaire la demande croissante de l'eau douce, il nécessite plus d'énergie [1], il est estimé que près de 8,78 millions tonnes de pétrole par an sont nécessaires pour produire 1 million d'eaux douces [2]. D'autre part, la consommation d'énergie continue à croître en raison de l'augmentation de la population [3], ce qui a poussé les chercheurs à trouver des sources alternatives. Par conséquent des nouvelles méthodes de purification de l'eau à moindre coût et avec moins d'énergie ont été proposées. Il existe plusieurs techniques de dessalement thermique [4] qui sont disponibles soit à l'échelle industrielle ou à l'échelle d'étude, mais, le procédé de dessalement par détentes successives MSF (Multistage flash) est le plus dominant dans le cas du dessalement de l'eau de mer, puisqu'il présente environ 57 % du marché de dessalement de l'eau de mer, et cela, grâce surtout à la capacité de la production importante qui varie entre 50 000 et 75 000 m<sup>3</sup>/j [5]. A.S.Nafey [6] a présenté une étude comparative entre le procédé de dessalement MSF à recyclage de la saumure (MSF-BR) standard et le système combiné avec l'unité de compression thermique de vapeur (MSF-BR/TVC), cette comparaison a montré que le taux du gain du système combiné est 96 % supérieur à celui de l'installation standard de (MSF-BR) et que le coût est 19% inférieur à celui du (MSF-BR). Puisque le procédé MSF à passage unique (Once-through multistage flash desalination MSF-OT) est le moins utilisé à l'échelle industrielle d'après El Dessouky et Ettouney [4], notre intérêt est l'amélioration de cette installation en la combinant avec l'installation de dessalement par compression thermique de vapeur. L'objectif principal de notre étude est de présenter et étudier une nouvelle configuration de dessalement thermique (MSF-OT/TVC) qui combine l'unité de compression thermique de vapeur (TVC) avec le procédé de dessalement par détentes successives (Multistage flash) à passage unique (MSF-OT). L'évaluation du système met l'accent sur les principaux facteurs contrôlant le coût de production d'eau douce.

## 2. Description du processus

La figure 1 montre un schéma du procédé MSF-OT/TVC, le système comprend essentiellement, une section de chauffage, un éjecteur et une section de récupération de la chaleur composée par des chambres flash.

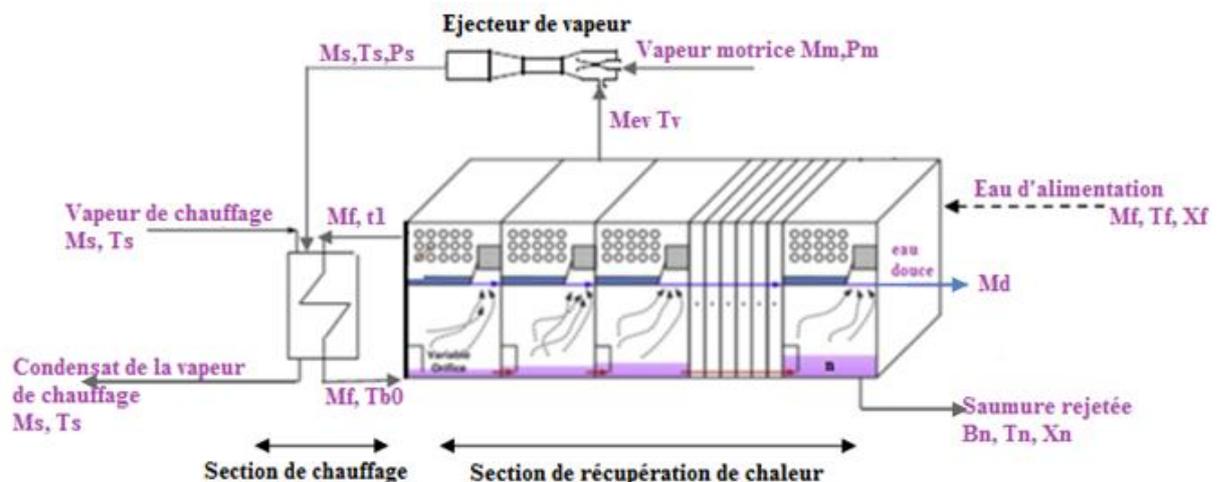


Figure 1: Les paramètres de l'installation MSF-OT/TVC

L'eau de mer d'alimentation  $M_f$  est filtrée, désaérée puis traitée chimiquement avant d'être introduite dans les tubes du condenseur / préchauffeur du dernier étage de l'installation .

L'écoulement de l'eau salée dans les tubes des condenseurs de l'étage (n) à l'étage (1) entraîne l'augmentation de sa température grâce à l'absorption de la chaleur latente due à la condensation de la vapeur produite dans la chambre flash. L'eau de mer d'alimentation entre ensuite dans les tubes de l'échangeur de chaleur de la section de chauffage, où la vapeur de chauffage est condensée sur la surface extérieure des tubes. L'eau de mer d'alimentation absorbe donc la chaleur latente de condensation de la vapeur de chauffage, ce qui permet d'augmenter sa température jusqu'à sa valeur maximale connue comme "the top brine temperature  $T_{b0}$ ". L'eau de mer d'alimentation chauffée à sa température maximale entre ensuite dans le premier étage où règne une pression inférieure à sa pression de vapeur. Instantanément donc, on obtient la production de la vapeur. C'est le phénomène de flashing. Il en résulte une diminution de la température de la saumure, et une augmentation de sa salinité. Ce processus est répété dans chaque étage du fait de la réduction de la pression de la saumure chaque fois qu'il entre à l'étage suivant. La vapeur produite dans chaque étage, passe en premier lieu à travers un dispositif antibuée permettant de retenir les gouttelettes d'eau salée entraînée par la vapeur.

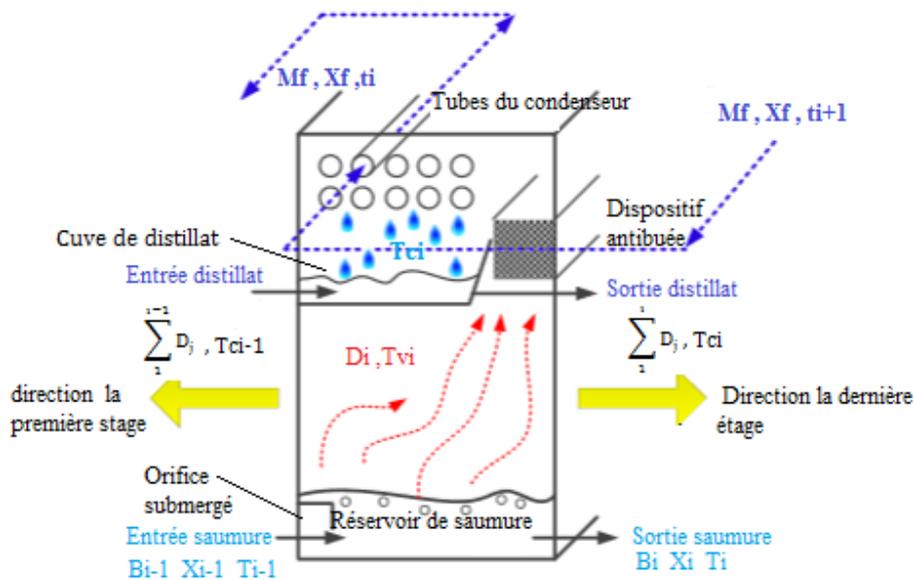


Figure 2 : Les paramètres de l'étage  $i$  l'installation MSF-OT/TVC

L'éjecteur entraîne une partie bien déterminée de la vapeur formée dans la deuxième chambre flash de la section de récupération de chaleur. La vapeur motrice comprime la vapeur entraînée à la température et à la pression souhaitée, la vapeur comprimée est ensuite utilisée pour chauffer la saumure recyclée dans la section de chauffage. Et le reste entre en contact avec le faisceau tubulaire du condenseur où elle se condense. La chaleur latente de condensation est transférée à l'eau de mer d'alimentation circulant dans les tubes du condenseur de l'étage  $n$  à l'étage  $1$ . Cette récupération de chaleur permet d'améliorer l'efficacité énergétique du procédé en raison de l'augmentation de la température de l'eau de mer d'alimentation. Le condensat obtenu est recueilli dans une cuve, puis circule à l'étage suivant. L'eau douce produite dans toute l'installation est recueillie au dernier étage.

### 3. Analyse mathématique du modèle

Pour étudier ce système nous considérons les hypothèses suivantes :  
 Les propriétés physiques des fluides rencontrés dans l'installation ( $\lambda_v, \lambda_c, C_{pb}, C_{pf}, C_{pd}, C_{ph}$ ), les pertes thermodynamiques et le coefficient global de transfert de chaleur des condenseurs ( $U_c$ ), et de l'échangeur de la section de chauffage ( $U_h$ ) sont considérés constants,

les valeurs usuellement utilisées sont données par El-Dessouky [4] :

- Chaleur massique de tous les liquides :  $C_{pb} = C_{pf} = C_{pd} = C_{ph} = 4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ .
- Chaleur latente d'évaporation /condensation de l'eau :  $\lambda_v = \lambda_c = \lambda = 2412 \text{ kJ/kg}$ .
- Pertes thermodynamiques dans tous les étages :  $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ .
- Coefficient global de transfert de la chaleur :  $U_c = U_h = 2 \text{ kW/m}^2\text{C}$ .

Un modèle mathématique détaillé est développé pour simuler et analyser le système MSF-OT/TVC, ce modèle est développé à partir du bilan massique, bilan énergétique et les équations de transfert de chaleur.

### 3.1. Equations de bilan relatives à tout le système:

L'équation du bilan de la masse d'eau et de sel, qui concerne toute l'installation est donnée par:

$$M_f = M_d + M_b \quad (1)$$

Et

$$M_f X_f = M_b X_b \quad (2)$$

Où M est le débit, X est la salinité, et les indices b, d et f désigne la saumure rejetée, produit distillé, et l'eau d'alimentation.

La quantité de vapeur de chauffage est définie par :

$$M_s = M_m + M_{ev} \quad (3)$$

Où  $M_m$  est la quantité de vapeur motrice utilisée pour comprimer la vapeur entraînée, qui est égale à  $M_{ev}$ .

L'équation du bilan d'énergie de l'échangeur de chaleur de la section de chauffage est donnée par:

$$\lambda_s M_s = M_f c_p (T_{b0} - t_1) \quad (4)$$

Avec  $T_{b0}$  est la température maximale de chauffage de la saumure et  $t_1$  la température de saumure quittant la section de récupération de chaleur vers la section de chauffage de chaleur.

### 3.2. Equations relatives aux étages de l'installation:

L'équation de bilan de la masse d'eau pour chaque étage  $i$ ,  $1 \leq i \leq n$ .

$$B_{i-1} = B_i + D_i \quad (5)$$

L'équation de bilan de masse de sel est donnée par l'équation suivante:

$$B_{i-1} X_{i-1} = X_i B_i \quad (6)$$

L'équation du bilan d'énergie de la saumure qui subit le phénomène de flashing est donnée par l'équation:

$$D_i \lambda_{vi} = B_{i-1} C_{pi-1} (T_{i-1} - T_i) \quad (7)$$

Pour le premier étage de l'installation, le débit de la saumure  $B_{i-1}$  est égal à  $M_f$  et la Température  $T_{i-1}$  est égale à  $T_{b0}$ , l'équation (7) devient donc :

$$D_1 \lambda_v = M_f C_p (T_{b0} - T_1) \quad (8)$$

Dans l'équation ci-dessus, le terme  $\lambda_{vi}$  est la chaleur latente calculée à la température de la vapeur  $T_{vi}$ , cette température est inférieure à la température du stage  $T_i$  par les pertes thermodynamiques où ,

$$T_i = T_{vi} + \Delta T \quad (9)$$

L'équation du bilan d'énergie de chaque condenseur de l'installation est donnée par:

$$\lambda_c D_i + \left( \sum_1^{i-1} D_j \right) C_p (T_{i-1} - T_i) = M_f C_p (t_i - t_{i+1}) . \quad (10)$$

Pour le premier étage de l'installation, le terme  $\sum_1^{i-1} D_j = 0$ , l'équation devient donc :

$$D_1 \lambda_c = M_f C_p (t_1 - t_2) . \quad (11)$$

Pour le deuxième étage de l'installation (i=2), l'équation (9) s'écrit:

$$(D_2 - M_{ev}) \lambda_c + D_1 C_p (T_1 - T_2) = M_f C_p (t_2 - t_3) . \quad (12)$$

Et pour le dernier étage de l'installation, la Température  $t_{i+1}$  est égale à  $T_f$ , l'équation devient donc :

$$\lambda_c D_n + \left( \left( \sum_1^{n-1} D_j \right) - M_{ev} \right) C_p (T_{n-1} - T_n) = M_f C_p (t_{ni} - T_f) . \quad (13)$$

### 3.3. Le modèle de l'éjecteur de vapeur

Le modèle évalue le taux d'entraînement de l'éjecteur, qui est défini comme la masse de vapeur motrice nécessaire par unité de masse de la vapeur entraînée [7].

$$R_a = 0.296 \frac{(P_s)^{1.19}}{(P_v)^{1.04}} \left( \frac{P_m}{P_v} \right)^{0.015} \left( \frac{PCF}{TCF} \right) = \frac{M_m}{M_{ev}} \quad (14)$$

$PCF = 3 \times 10^{-7} (P_m)^2 - 0.0009 (P_m) + 1.6101$ , facteur de correction de  $P_m$ .

$TCF = 2 \times 10^{-8} (T_{ev})^2 - 0.0006 (T_{ev}) + 1.0047$ , facteur de correction de  $T_{ev}$ .

Le taux de compression de l'éjecteur est défini par :

$$C_r = \frac{P_s}{P_{ev}} \quad (15)$$

Ces équations sont valables uniquement pour un éjecteur fonctionnant avec de la vapeur comme fluide primaire (motrice), le fluide entraîné est de la vapeur d'eau et avec un taux de compression  $5 > C_r \geq 1.81$ .

## 4. Performances du système

L'analyse des performances de système dans les différentes conditions de fonctionnement est déterminée en fonction des paramètres suivants :

- Le rapport de performance thermique  $PR = \frac{M_d}{M_m}$  (16)

- Le débit spécifique d'eau de l'alimentation  $sM_{ea} = \frac{M_f}{M_d}$  (17)

## 5. Résultats et discussions

### 5.1. Résolution du système d'équations

Dans ce travail, le système d'équations non- linéaires obtenu est résolu grâce à une procédure itérative à l'aide de la fonction « fsolve » du logiciel MATLAB. Tous les calculs sont effectués pour :  $M_f = 4\,027$  kg/s,  $T_f = 30^\circ$  C,  $X_f = 40\,000$  ppm,  $P_m = 1500$  kPa,  $T_{b0} = 100^\circ$

C,  $T_n = 40^\circ \text{C}$  et  $T_s = 110^\circ \text{C}$ , et les Paramètres de conception et de fonctionnement utilisés pour la simulation du procédé (MSF-OT /TVC) sont illustrés dans le tableau (1).

Les paramètres	valeur
Nombre d'étages (n)	21
Nombre de tubes de chaque condenseur (Nt)	1410
Diamètre extérieur des tubes de section de récupération de chaleur (dec)	0.0445 m
Diamètre intérieur des tubes de section de récupération de chaleur (dic)	0.04197m
Le matériau des tubes de section de récupération de chaleur	(Cu/Ni 90/10)
Surface d'échange de chaque condenseur ( $A_c$ )	3479 m <sup>2</sup>
Largeur des étages de la section de récupération de chaleur ( $w_c$ )	12.2 m
Nombre des tubes de la section de chauffage (Nht)	3800
Diamètre extérieur des tubes de la section de chauffage de saumure (deh)	0.244 m
Diamètre intérieur des tubes de la section de chauffage de saumure (dih)	0.022 m
Le matériau des tubes de section de chauffage	(Cu/Ni 70/30)
Surface de transfert de la chaleur de l'échangeur de chaleur ( $A_h$ )	3551 m <sup>2</sup>
Largeur de la section de chauffage ( $L_h$ )	12.2 m

Tableau 1 : Paramètre de conception et de fonctionnement utilisés pour la simulation du procédé MSF-OT /TVC

## 5.2. Les résultats

Les figures (3 et 4) illustrent une comparaison entre les résultats de simulation de l'installation standard de Procédé MSF à passage unique (MSF-OT) donnée par [8] avec la nouvelle configuration (MSF-OT/TVC). Les résultats ont montré que le système combiné est plus performant, on a obtenu une salinité plus faible et un débit de saumure plus grand.

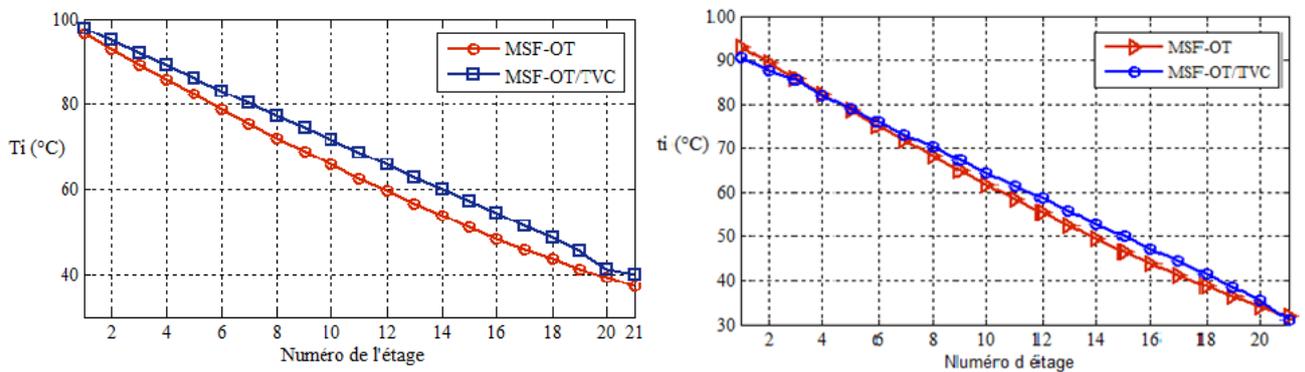


Figure 3 : Variation de la température de la saumure à la sortie de chaque chambre flash ( $T_i$ ) et de la température de l'eau à la sortie de chaque condenseur ( $t_i$ ) pour les deux configurations.

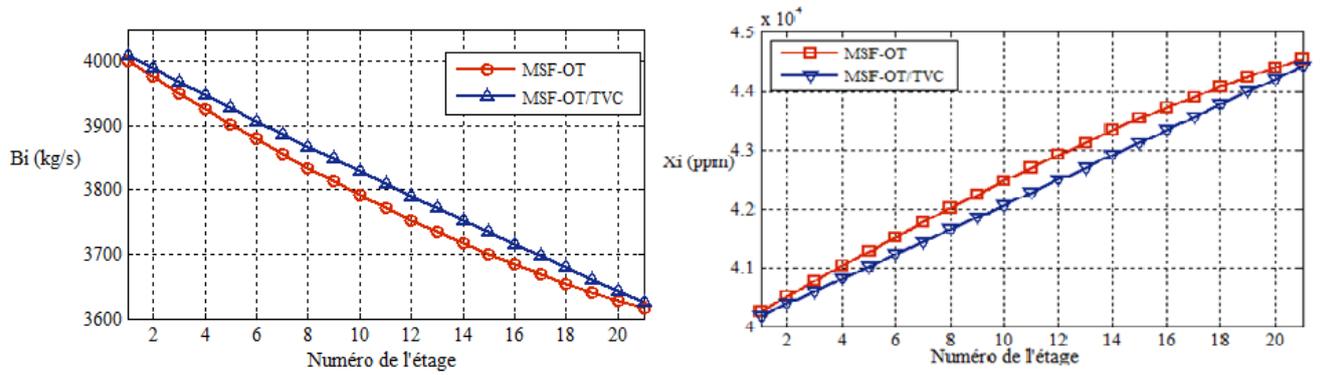


Figure 4 : Variation de débit( $B_i$ ) et de concentration en sel ( $X_i$ ) de la saumure à la sortie de chaque chambre flash pour les deux configurations.

A partir des données illustrés dans le tableau (1) et en utilisant les équations établies précédemment, nous examinons l'influence de la température maximale de chauffage de la saumure sur les indicateurs des performances pour les deux configurations (MSF-OT) et (MSF-OT/TVC) comme indiqué dans la Figure 5 et 6.

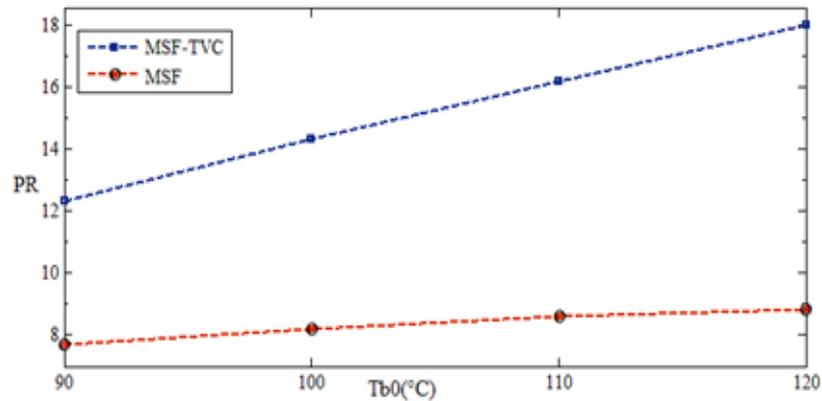


Figure 5: Variation du rapport de performance en fonction de  $T_{b0}$  pour les deux configurations.

La figure 5 montre la variation de rapport de performance thermique pour les deux systèmes, on remarque que le rapport de performance thermique augmente lors de l'augmentation de la température maximale de chauffage de la saumure, c'est à cause de l'augmentation de chute de température par étage et en conséquence, l'augmentation de quantité de vapeur produite dans chaque étage, donc on peut dire que l'augmentation de la température maximale de chauffage de la saumure peut être une alternative économique pour augmenter la production d'eau douce. Aussi Nous remarquons que le rapport de performance du système combiné est supérieur à celui de l'installation standard de (MSF-OT). Comme l'indique la figure 6 ci-dessous, le débit spécifique d'eau d'alimentation diminue avec l'augmentation de la température  $T_{b0}$ . Ceci est causé par la réduction de la quantité de vapeur motrice par unité de masse d'eau produite.

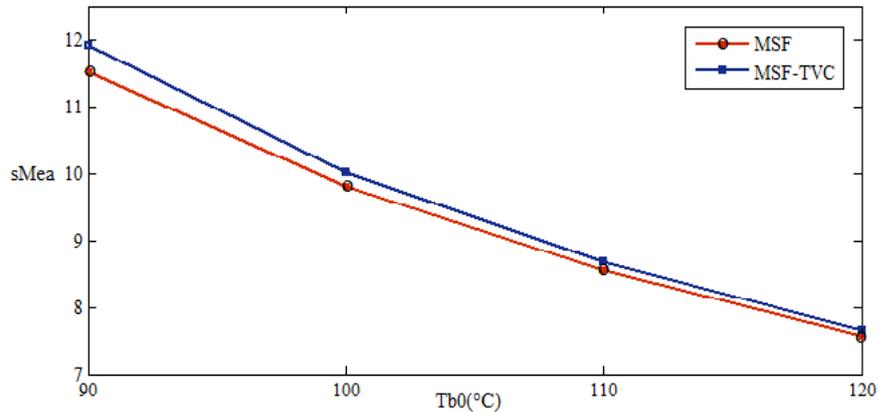


Figure 6: Variation de débit spécifique d'eau d'alimentation en fonction de  $Tb_0$  pour les deux configurations.

La figure 7, présente la variation du débit du distillat à la sortie de chaque étage ( $M_{di}$ ) en fonction de la température  $Tb_0$ . Nous remarquons qu'une augmentation de la température conduit à une augmentation du débit du distillat à la sortie de chaque étage, en effet, l'augmentation de cette température conduit à une augmentation des performances du système.

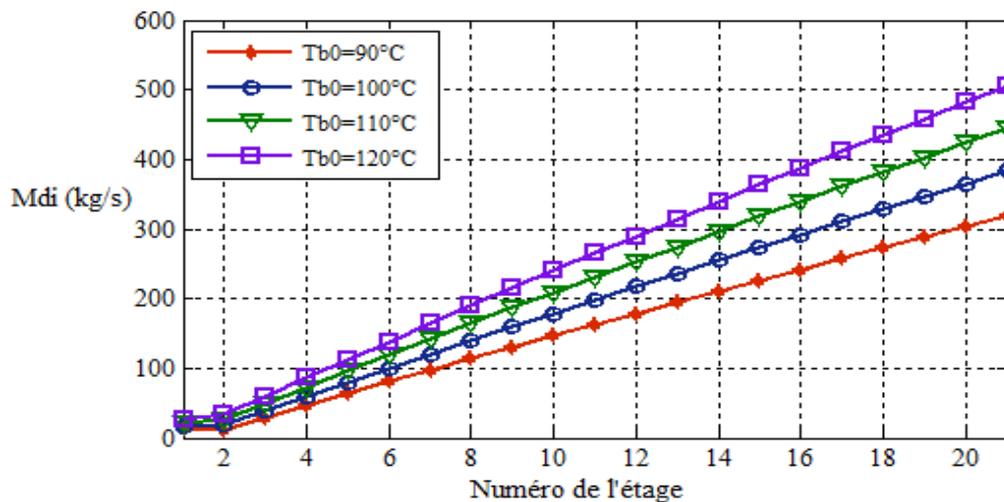


Figure 7: L'influence de  $Tb_0$  sur le débit du distillat à la sortie de chaque étage  $M_{di}$  de l'installation MSF-OT/TVC.

Le tableau (2) suivant, présente la variation des indicateurs des performances de l'installation (MSF-OT/TVC) en fonction de la place de la prise de vapeur. Cette analyse tient compte des 3 modes de compression de vapeur qui diffère par l'étage à partir de laquelle la vapeur est extraite.

	Etage 2	Etage 10	Etage 21
PR	14.21	11.10	10.15
sMea	10.01	10.10	10.19

Tableau 2: Variation des indicateurs des performances en fonction de l'étage à partir de laquelle la vapeur est extraite.

Nous remarquons que la compression de vapeur à partir des étages fonctionnant à des températures plus élevées donne un rapport de performance plus élevé, cette augmentation est causée par la réduction des exigences de vapeur motrice pour la compression de la vapeur à des températures élevées.

## 7. Conclusion

Une nouvelle technologie intégrée de dessalement thermique (MSF/OT-TVC) est proposée et évaluée dans ce travail, le système proposé combine l'unité de compression thermique de vapeur (TVC) avec le procédé de dessalement par détentes successives (Multi-stage flash) à passage unique (MSF-OT), le système d'équations a été résolu grâce à une procédure itérative, en utilisant la fonction `fsolve` du logiciel MATLAB. L'analyse des résultats montre que la compression de vapeur thermique améliore les performances du système du Procédé (MSF-OT) en raison de l'augmentation du rapport de performance PR et de la réduction de débit spécifique d'eau d'alimentation  $sM_{ea}$ . Aussi, Nous remarquons que la compression de vapeur à partir des étages fonctionnant à des températures plus élevées a donné un rapport de performance le plus élevé. L'influence de la température maximale de chauffage de la saumure sur le rapport de performance thermique a été observée, le PR augmente avec l'augmentation de  $T_{b0}$  et ceci peut être une alternative économique pour augmenter la production d'eau douce.

## Références

- [1] Shannon MA, Bohn PW, Elimelech M, Georgiadis JG, Marinas BJ, Mayes AM. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature* 2008;452:301e10.
- [2] Kalogirou SA. Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science* 2005;31:242e81.
- [3] Chennan Li, Innovative Desalination Systems Using Low-grade Heat, University of South Florida, cli3@mail.usf.edu January 2012.
- [4] El-Dessouky, H. T., et Ettouney, H. M. (2002). Fundamentals of salt water desalination. USA.
- [5] Cipollina, Micale, et Rizzuti, Seawater Desalination, Conventional and Renewable Energy Processes. 2002, Springer.
- [6] A. S. Nafey, H. E. S. Fath, and A. A. Mabrouk, Thermoeconomic Analysis Of Multi Stage Flash thermal Vapor Compression (MSF-TVC) Desalination Process, Alexandria, Egypt.
- [7] B.R. Power, Steamjet Ejectors for Process Industries, McGrawHill, New York, 1994.
- [8] M. Ben Ali et Lakdar .K, Solving equations describing the steady-state model of MSF desalination process using Solver Optimization Tool of MATLAB software, (2013), Tunisia.