

# ETUDE DE SYSTEMES DE DESSALEMENT DE L'EAU UTILISANT LES ENERGIES EOLIENNE ET SOLAIRE

I. Chermiti\* et A. Ben Brahim

ENIG, Rue Omar Ibn El Khattab- B.P. 6029, Gabès – Tunisie  
chermiti@yahoo.fr, ammar.benbrahim@enig.rnu.tn

## RESUME

L'augmentation de la population mondiale associée au développement agricole et industriel, a entraîné un accroissement de la demande d'eau douce et l'approvisionnement en eau potable devient un problème de plus en plus aigu. Pour subvenir à ses besoins, le dessalement occupe une place de choix. Ce travail constitue une contribution à l'étude du dessalement de l'eau saumâtre ou eau de mer par énergies renouvelables éolienne et solaire. On s'est intéressé tout d'abord à l'étude de la faisabilité du pompage éolien dans la région de Gabès. Ensuite, Deux unités de dessalement de faible et moyenne production ont été étudiées : une unité de dessalement solaire et une autre utilisant l'énergie éolienne. Cette étude consiste à modéliser les deux procédés et déterminer les conditions de leur fonctionnement.

## NOMENCLATURE

A	Surface	(m <sup>2</sup> )
a	Albédo du sol	
C	Paramètre d'échelle	(m/s)
C'p	Conductance apparente	(W /m <sup>2</sup> )
C	Facteur de concentration	
Cp	Capacité calorifique	(kJ/kg °C)
D <sub>i</sub>	Rayonnement diffus incliné	(W /m <sup>2</sup> )
f(V)	Densité de probabilité	
g	Accélération gravitationnelle	(m/s <sup>2</sup> )
H <sub>t</sub>	Hauteur manométrique totale	(m)
H	Enthalpies	(kJ/kg)
h	Hauteur du soleil	(m)
I <sub>n</sub>	Densité du rayonnement normale	(W /m <sup>2</sup> )
i	Angle d'inclinaison	
k	Paramètre de forme	
M	Débit massique	(kg/s)
P	Puissance	(W)
Q	Débit	(m <sup>3</sup> /s)
s	Surface d'absorption	(m <sup>2</sup> )
T <sub>a</sub>	Température d'absorption	(°C)
T <sub>moy</sub>	Température moyenne	(°C)
U	Coefficient de transfert thermique	(kW/m <sup>2</sup> °C)
V	Vitesse	(m/s)
W <sub>c</sub>	Consommation énergétique	(kWh/m <sup>3</sup> )
Z	Hauteur	(m)
α	Coefficient de correction	(%)
β	Facteur de trouble de Link	
α <sub>o</sub>	Absorptivité des surfaces	(%)
ρ <sub>o</sub>	Réflexion des surfaces	
τ <sub>o</sub>	Transmittance	(%)
ΔT <sub>LM</sub>	Moyenne logarithmique	(°C)
λ	Chaleur latente	(kJ/kg)
Γ	Fonction GAMMA	

## Indices

a	Absorbé
b	Saumure
bh	Alimentation / saumure
c	Coupure
dh	Alimentation / distillat
disp	Disponible
e	Utilisable, évaporateur
f	Alimentation
g	Global
h	Horizontal
i	Incliné, interne
is	Surchauffe isentropique
s	Vapeur surchauffée
u	Utile
v	Saturée avant l'antibuée
vp	Saturée après l'antibuée
0	Sortie préchauffeurs
is	Surchauffe isentropique
p	Perdue
th	Théorique

$\eta$	Rendement ou efficacité	(%)
$\rho$	Masse volumique	(kg/m <sup>3</sup> )

## 1. INTRODUCTION

Au vu des potentiels énergétiques solaires et éoliens existants dans les régions du sud tunisien, il est prévu que ces dernières sont favorables à l'implantation des systèmes énergétiques basés sur les énergies renouvelables tel que celles de pompage éolien.

Ce dernier peut répondre de manière efficace à la demande en eau soit utilisée directement pour l'irrigation soit alimentant les procédés de dessalement classique. Le potentiel énergétique solaire et éolien est utilisé aussi pour assurer l'énergie nécessaire au fonctionnement des stations de dessalement. Dans cette perspective, on a pensé à concevoir et étudier deux unités de dessalement à faible et moyenne production. La première unité est une unité de dessalement classique utilisant les capteurs solaires et la deuxième est une unité de dessalement par compression mécanique de vapeur utilisant l'énergie éolienne.

## 2. PERSPECTIVES DU POMPAGE EOLIEN DANS LA REGION DE GABES

### 2.1 Modélisation : Détermination du potentiel éolien

L'étude des potentiels énergétiques du site passe tout d'abord par le traitement des données du vent qui permet le calcul du potentiel énergétique éolien disponible. L'énergie cinétique moyenne, disponible sur le site, par unité de temps et de surface s'écrit en fonction de la vitesse cubique moyenne (déterminée par la loi de Weibull <sup>[1]</sup>) :

$$\langle P \rangle_{disp} = \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} f(V) \cdot V^3 \cdot dV = \frac{1}{2} \rho C^3 \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{3}{k} \right) \quad (1)$$

La densité de puissance utile est donnée sous la forme suivante:

$$\begin{aligned} \langle P_u \rangle &= \frac{1}{2} \rho \langle V^3_u \rangle = \frac{1}{2} \rho \int_{V_d}^{V_n} V^3 \left( \frac{k}{C} \right) \left( \frac{V}{C} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{V}{C} \right)^k \right) dV \\ &+ \frac{1}{2} \rho V_n^3 \int_{V_n}^{V_c} \frac{k}{C} \left( \frac{V}{C} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{V}{C} \right)^k \right) dV \end{aligned} \quad (2)$$

La vitesse cubique utile moyenne est déterminée par intégration utilisant la méthode de Simpson en considérant comme bornes d'intégration les limites imposées par la machine ( $V_d$ ,  $V_c$  et  $V_n$ ). La puissance éolienne moyennement utilisable est donnée par <sup>[1]</sup>:

$$\langle P_e \rangle = \eta \langle P_u \rangle = \left( \frac{\langle P_n \rangle}{\langle P_{th} \rangle} \right) \langle P_u \rangle = \left( \frac{\langle P_n \rangle}{1/2 \rho A \langle V^3_n \rangle} \right) \langle P_u \rangle \quad (3)$$

### 2.2 Représentations des mesures éoliennes

#### 2.2.1 Représentation classique : Analyse directe des données du vent.

Sur la base des données fournies par le service météorologique de Tunis, on peut calculer la vitesse moyenne annuelle du vent dans la région de Gabès pour l'année 2007 et on obtient  $\langle V \rangle = 2,93$  m/s à 10 m au dessus du sol.

#### 2.2.2 Représentation statique <sup>[2]</sup>

L'estimation du potentiel énergétique éolien ne peut se suffire seulement des données classiques, elle nécessite la connaissance de la courbe de distribution des vitesses du vent utilisant le modèle mathématique de Weibull <sup>[3]</sup>. Toute fois, le rotor est placé à des hauteurs

supérieures à 25 m du sol, on utilise la méthode de puissance modifiée pour l'extrapolation des paramètres de Weibull (k et C).

Table 1 . Caractéristiques du site à 10 et 25 mètres.

Site de Gabès	k [--]	C [m/s]	<V> [m/s]	<V <sup>3</sup> > [m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> ]
Z=10 m	2,929	3,718	3,3	45,85
Z=25 m	3,18	4,6	4,12	87,61

### 2.3 Pompage éolien

Deux systèmes de pompage ont été abordés à savoir: l'éolienne de pompage mécanique et les aérogénérateurs. Les caractéristiques des systèmes sont représentées dans le tableau :

Table 2. Caractéristiques des systèmes éoliens choisis pour le pompage.

Caractéristiques	Pompage électrique		Pompage mécanique	
Hauteur du pylône(m)	25		10	
Diamètre (m)	4	7	4	7
Puissance nominale (kW)	1	3	-	
V <sub>d</sub> (m/s)	2,5		2,5	
V <sub>n</sub> (m/s)	5,5		-	
V <sub>c</sub> (m/s)	8		-	
Rendement global	25		60	

### 2.4 Résultats et interprétations

Les résultats de la modélisation, pour les machines mécaniques et les aérogénérateurs de petites puissances utilisées en mode électrique sont présentés sur les figures 1 et 2.

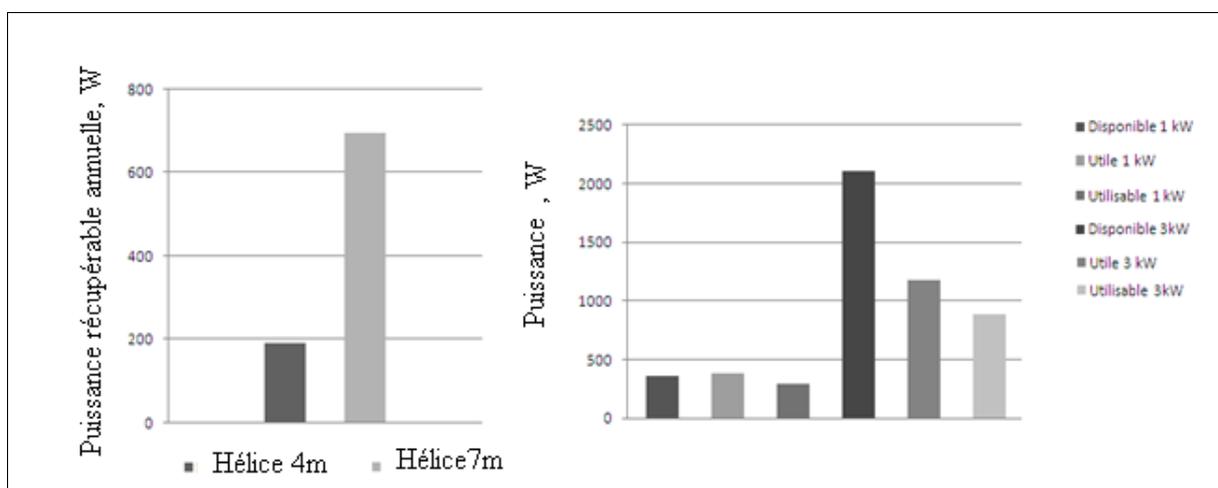


Figure 1. Puissance disponible, récupérable, utile et utilisable pour le site de Gabès.

On remarque que l'énergie disponible sur le site subit une suite de pertes en cascades jusqu'à la sortie de l'aérogénérateur. Elle peut atteindre 2100 W pour le premier système et elle ne dépasse pas 500 W pour le deuxième (figure 1). Pour ces deux aérogénérateurs de petites puissances, les efficacités moyennes sont proches de l'ordre de 75%. Ainsi que le potentiel énergétique éolien récupérable sur le site de Gabès par une éolienne mécanique de grande hélice ne dépasse pas 700 W et pouvant atteindre au maximum 200 W pour la petite hélice. En Considérant un système de pompage éolien de rendement global  $\eta$  et de hauteur manométrique totale  $H_t$ , le débit d'eau pompé est donné par <sup>[4]</sup>:

$$Q = \frac{\eta \langle P_e \rangle}{\rho g H_t} \quad (4)$$

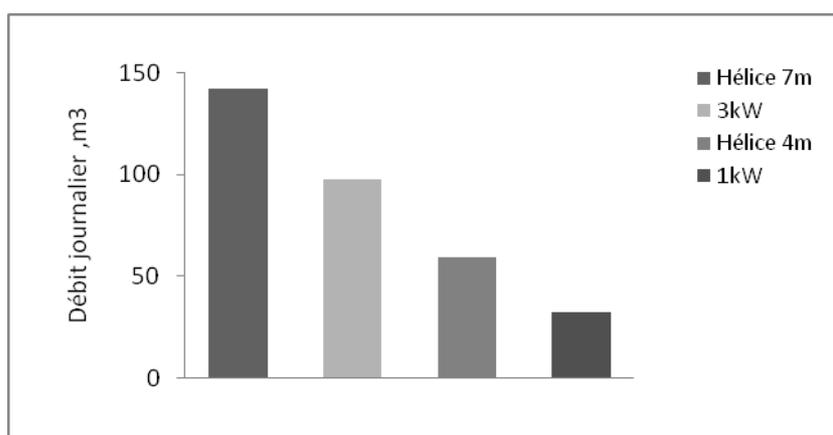


Figure 2 . Moyenne journalière pompée pour les quatre systèmes proposés pour  $H_t=20m$ .

L'examen des familles de courbes présentées montre que les débits pompés par les éoliennes mécaniques sont plus importants comparés à ceux estimés par les aérogénérateurs de petite puissance pour une même hauteur manométrique totale. Avantage qui milite en faveur du montage mécanique, plus performant généralement pour les faibles profondeurs.

### 3. DESSALEMENT SOLAIRE

La distillation solaire est l'un des procédés de séparation les plus simples. Si les besoins en eau douce sont faibles, elle apparaît comme une solution intéressante surtout pour les régions éloignées ou isolées. L'objectif principal sera la conception et le dimensionnement d'une unité de dessalement couplée à un concentrateur solaire cylindro-parabolique ainsi que l'étude de l'influence du rayonnement solaire captés sur les différents paramètres de son fonctionnement.

#### 3.1 Présentation de l'unité

Cette unité a été conçue et réalisée lors de travaux de recherche de l'Unité de Recherche Thermodynamique Appliquée (99/UR/11-21) à l'ENIG <sup>[5]</sup>. Elle est constituée d'un concentrateur cylindro-parabolique destiné à capter et concentrer l'énergie solaire, deux échangeurs, un séparateur et un réservoir d'alimentation.

#### 3.2 Modélisation

La conception de cette unité dépend de la puissance thermique demandée par l'utilisateur ainsi que de la densité du flux solaire reçu. Etant donné que la variation de la densité du flux solaire est aléatoire, sa modélisation est alors jugée nécessaire. En effet, les travaux réalisés dans notre Unité de Recherche ont optés pour le modèle Eufrat comme le modèle le plus adéquat pour traduire la densité du flux solaire global sur la ville de Gabès <sup>[6]</sup>. Ce modèle permet de déterminer la densité du rayonnement solaire reçu par le concentrateur solaire,

ainsi que les caractéristiques du fonctionnement de ce concentrateur tel que la puissance thermique disponible, absorbée et les pertes thermiques.

La densité du rayonnement global horizontal  $G_h$  est donnée par :

$$G_h = \alpha \times (1270 - 56 \times \beta) \times (\sin h)^{\frac{\beta + 36}{33}} \quad (5)$$

La densité du rayonnement global sur un plan incliné du capteur  $G_i$  est donnée par :

$$G_i = I_n \times \cos \theta_i + D_i + a \times G_h \left( \frac{1 - \cos(i)}{2} \right) \quad (6)$$

L'équation caractéristique du fonctionnement d'un capteur solaire en régime permanent est donnée par :

$$P_u = P_a - P_p = (I_n C \rho_o \tau_o \alpha_o s) - (C'_p \times (T_{moy} - T_a) s) \quad (7)$$

Les expressions du rendement interne instantané ( $\eta_i$ ) et global instantané ( $\eta_g$ ) d'un concentrateur sont donnée par l'expression suivante :

$$\eta_i = \frac{P_u}{P_a} = 1 - \frac{C'_p \times (T_{moy} - T_a)}{C \cdot I_n \cdot \rho_o \cdot \tau_o \cdot \alpha_o} \quad (8)$$

$$\eta_g = \frac{P_u}{C I_n} = \rho_o \cdot \tau_o \cdot \alpha_o - \frac{C'_p \times (T_{moy} - T_a) s}{C I_n} \quad (9)$$

### 3.3 Résultats et interprétations

Les principaux résultats du modèle sont présentés sur les figures 3 et 4.

On a constaté que malgré la moyenne efficacité interne, cette unité montre une grande possibilité d'application dans notre pays fortement ensoleillé vu les valeurs de débit de distillat produit encourageantes de l'ordre de 8 à 10 l/j.m<sup>2</sup> et la simplicité de son fonctionnement.

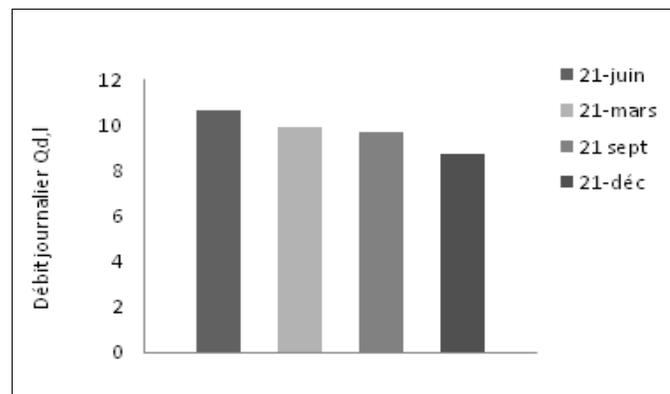


Figure 3. Production journalière de distillat.

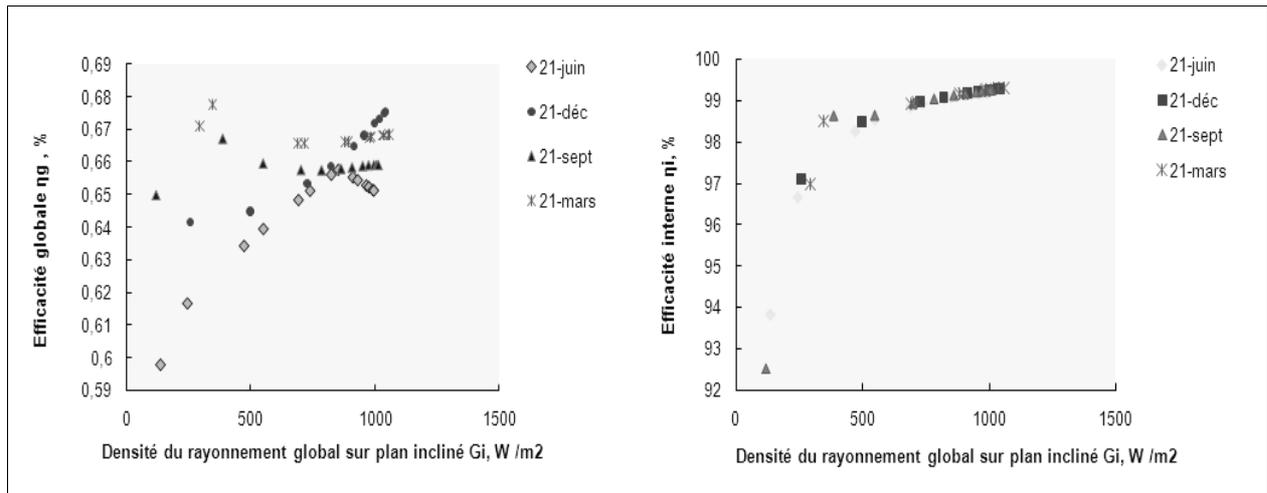


Figure 4. Variation de l'efficacité globale et interne en fonction de  $G_i$ .

#### 4. DESSALEMENT EOLIEN

##### 4.1 Présentation de l'unité

Le fonctionnement de l'unité de dessalement par compression mécanique de vapeur, faisant intervenir un changement de phase (évaporation/condensation), nécessitent pour la grande part de l'énergie thermique pour assurer le chauffage et l'évaporation de l'eau salée. Notre unité comporte essentiellement un évaporateur, deux préchauffeurs d'alimentation, un compresseur de vapeur, un circuit de mise à l'air libre, une antibuée et des lignes d'aération. Elle utilise la chaleur de la vapeur comprimée par le compresseur pour évaporer l'eau de mer [7]. Les deux préchauffeurs sont conçus pour que la majeure quantité de chaleur sensible dans la saumure et dans le distillat soit récupérée par l'alimentation d'eau de mer.

Pour cela, le modèle détaillé de conception de l'unité de dessalement par compression mécanique de vapeur produisant  $5\text{m}^3$  par jour a été développé.

##### 4.2 Modélisation

Le modèle est consacré essentiellement à la détermination des surfaces d'échange thermique dans l'évaporateur et les deux préchauffeurs et la consommation énergétique du compresseur ainsi qu'au dimensionnement des différents constituants de cette unité.

La consommation énergétique spécifique du compresseur  $\hat{W}_c$  est exprimée en termes de la différence d'enthalpie de la vapeur surchauffée et comprimée  $H_s$  et de l'enthalpie de vapeur saturée à l'entrée du compresseur  $H_v$  :

$$\hat{W}_c = (H_s - H_v) = [(H_d - H_v) + Cp_v(T_{is} - T_d)] \left[ \frac{(P_d/P_v)^{(\gamma-1/\gamma \eta_p)} - 1}{(P_d/P_v)^{(\gamma-1/\gamma)} - 1} \right] \quad (10)$$

Le flux de transfert thermique dans le préchauffeur alimentation / distillat est obtenu en termes de la chaleur sensible du distillat et on a :

$$A_{dh} = \frac{M_d Cp (T_d - T_0)}{U_{dh} (\Delta T_{LM})_d} \quad (11)$$

La surface de transfert thermique dans le préchauffeur alimentation/saumure est exprimée en termes de la chaleur sensible de la saumure :

$$A_{bh} = \frac{M_b Cp (T_b - T_0)}{U_{bh} (\Delta T_{LM})_b} \quad (12)$$

Le transfert thermique dans l'évaporateur peut être obtenu en termes de chaleur sensible et latente de la vapeur condensée ou de la chaleur sensible de l'alimentation et la chaleur latente d'évaporation :

$$A_e = \frac{M_f C_{p_f} (T_b - T_f) + M_d \lambda_{vp}}{U_e (T_d - T_b)} = \frac{M_d \lambda_d + M_d C_{p_v} (T_s - T_d)}{U_e (T_d - T_b)} \quad (13)$$

### 4.3 Résultats et interprétations

La résolution du système d'équation non linéaire obtenu est réalisée par la méthode de Newton. L'étude du modèle montre une forte dépendance de la consommation énergétique et des surfaces de transfert thermique avec la différence de température  $\Delta T$  entre la température d'ébullition de la saumure et la température du distillat. L'optimisation de ce paramètre est nécessaire pour obtenir une consommation minimale d'énergie et une surface d'échange thermique minimale. En effet, cette consommation varie des faibles valeurs de 4 kWh/m<sup>3</sup> aux valeurs élevées de 13 kWh/m<sup>3</sup>. La consommation énergétique spécifique maximale est de l'ordre de 13 kWh/m<sup>3</sup> pour une température d'ébullition de 50°C et pour  $\Delta T=4^\circ\text{C}$ .

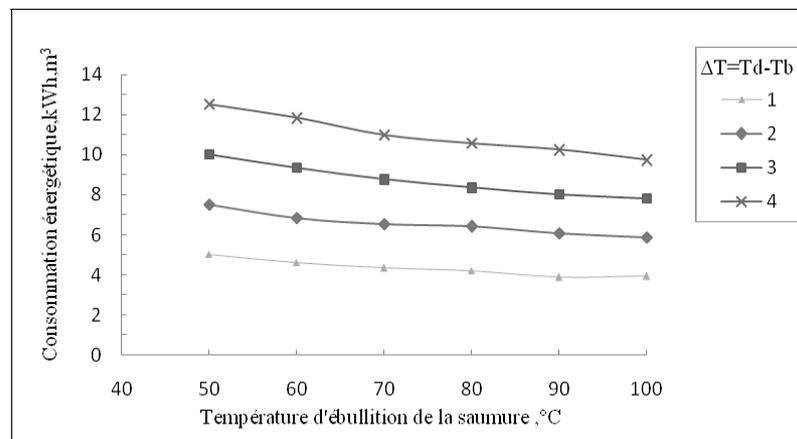


Figure 5. Variation de Consommation énergétique spécifique en fonction de  $T_b$  et  $\Delta T$ .

La surface spécifique de transfert thermique dans l'évaporateur  $A_e$  diminue pour les températures d'ébullition importantes et augmente avec la diminution de  $\Delta T$ . On peut dire que La différence de température  $\Delta T$  est la force motrice du transfert thermique à l'intérieur des tubes de l'évaporateur.

Ainsi qu'on remarque que la surface de transfert des deux préchauffeurs augmente pour les températures  $T_b$  élevées et les faibles valeurs de  $\Delta T$ . Ce comportement similaire pour les deux préchauffeurs, montre que le choix d'une différence de température  $\Delta T$  doit être optimum pour minimiser les deux surfaces  $A_{bh}$  et  $A_{dh}$ .

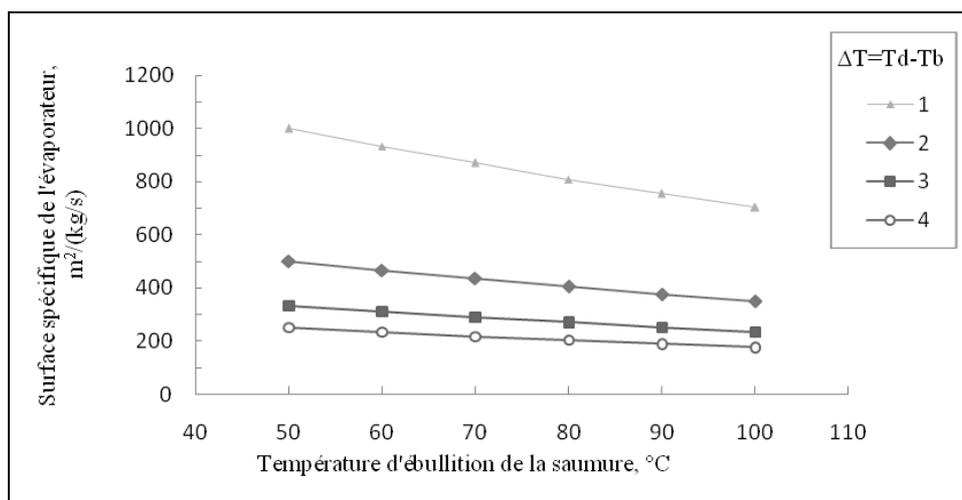


Figure 6. Variation de la surface spécifique de l'évaporateur en fonction de  $T_b$  et  $\Delta T$ .

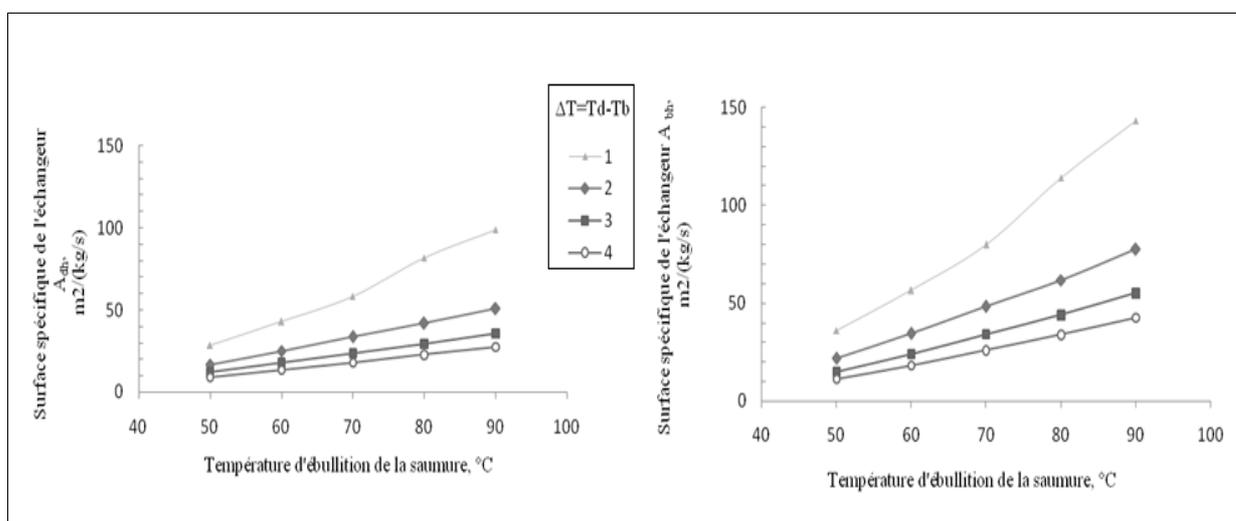


Figure 7. Variation de la surface spécifique des deux préchauffeurs en fonction de  $T_b$  et  $\Delta T$ .

## 5. CONCLUSION

D'après les résultats obtenus, l'approvisionnement en eau par des systèmes de pompage éolien est une solution adéquate et encourageante. Ainsi que les productions des deux unités étudiées sont comparables aux productions des autres unités de dessalement et sont aussi encourageantes. Toutefois ce travail peut être considéré comme une première contribution à une étude plus avancée dans le but est de valider expérimentalement les résultats obtenus pour les deux unités de dessalement solaire et dessalement éolien par compression mécanique de vapeur et d'étudier l'implantation et l'amélioration de ces procédés. On doit aussi accorder de l'importance à l'étude des ressources naturelles d'eau dans la région de Gabès pour conditionner le choix du système éolien à installer (forage ou puits) et il faut également signaler que l'existence de nappes souterraines peut être un avantage supplémentaire.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. N. Kasbadji Merzouk, M. Merzouk Et B. Benyoucef, Perspectives du pompage éolien dans le sud Algérien, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Université Abou Bakr et Faculté des Sciences, Algérie.
2. A. Geoffroy, Y. Bouzidi, Collecte, organisation, traitement, analyse de mesures éoliques et modélisation énergétique, Rapport de stage à l'Université Técnica Federico Santa Maria, UTFSM, Chili.
3. N. Kasbadji Merzouk, M. Merzouk, H.D. Nedjari, S.Haddouche, Influence des paramètres intrinsèques sur la quantité d'énergie éolienne utilisable, 2006, 8ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Algérie.
4. N.K.Marzouk, N. Messen, Contribution à l'Etude du Vent en Rapport avec l'Erosion Eolienne dans les Zones Arides, 2002, Laboratoire d'Evaluation du Potentiel Energétique, CDER, BP.62, Alger.
5. A. El Jerry, Etude de la faisabilité du dessalement des eaux saumâtres au moyen de concentrateur solaires, 2002, Mémoire DEA, Ecole Nationale d'ingénieur de Gabès.
6. R.F.Mechlouch, *Productions scientifiques de l'Unité de Recherche Thermodynamique Appliquée (99/UR/11-21)*, 2007, Ecole Nationale d'ingénieur de Gabès.
7. H. Ettouney, H.T. El Dessouky, Fundamentals of Salt Water Desalination, 2002, Première Edition.