

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



# **Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : Génie chimique**

Intitulé du mémoire

**ETUDE EXPERIMENTALE D'UN DISTILLATEUR  
SOLAIRE AVEC STOCKAGE D'ENERGIE ET SYSTEME  
DE CONDENSATION A EAU**

Présenté par :

MELLAK Soumia.

RALEMI Nacera.

Encadré par :

Dr. OUZZANE Slim.

Dr. DIAF Abderrahman.

Année universitaire 2015/2016

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail.

Le travail de recherche qui a fait l'objet de ce mémoire a été effectué dans l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES/CDER).

Nous remercions Dr DIAF Abderrahmane, maitre de recherche à l'UDES, pour nous avoir proposé ce sujet et encadré tout au long de la partie expérimentale.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements à Dr Slim OUZZANE, docteur à l'université de SAAD DAHLEB BLIDA d'avoir assuré la codirection de ce travail et de nous avoir accompagné dans nos débuts de recherche. Nous le remercions également pour ses conseils qui nous ont été d'un grand soutien pour mener à bien ce travail.

Nous présentons nos sincères remerciements à tous nos enseignants de l'université de SAAD DAHLEB BLIDA, ainsi qu'aux personnels de centre de recherche l'UDES.

Nos profonds remerciements pour les membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Enfin, Nous adressons nos remerciements, à nos parents en premier lieu, à nos amis, et à toutes les personnes qui nous ont encouragé et soutenu de près ou de loin durant la réalisation de ce travail.

## ملخص

التقطير هو واحد من ابسط عمليات الفصل, نعرض في هذا العمل نتائج الدراسة التجريبية التي قمنا بها على جهاز التقطير الذي يعمل بالطاقة الشمسية ذو كلفة منخفضة.

هذا الجهاز يعمل على تقطير المياه المالحة للمستهلكين في المناطق الجافة الذي بدوره يخزن الطاقة و يكتف باستعمال الماء. الإنتاج اليومي لهذا الجهاز، في الربيع، هو 4.5 لتر/ يوم لمساحة سطح تبخر 0.5 متر مربع, مع مساحة لاقط شمسي تساوي 4 متر مربع. أداء التقطير هو 14% على مدى 24 ساعة. تخزين الطاقة أسفر عن إنتاج ليلي 50% مقارنة مع اليوم. و أظهرت النتائج، علاوة على ذلك، أن تخزين الطاقة بكتلة من الماء هو أفضل من التخزين من خلال كتلة من الخرسانة.

## Summary

In this study, we were interested in testing a new solar still with energy storage and water condensation at reduced cost. This apparatus for distilling salt and brackish waters. The daily performance of the distiller, in the spring, is 4.5 liters / day for an evaporation surface area of 0.5 m<sup>2</sup> and a collector area of 4 m<sup>2</sup>. Distiller's performance is 14% over 24 hours. The energy storage yielded a nocturnal production of 50% compared to the day. The results showed, moreover, that the energy storage by a mass of water is better than the storage by a concrete layer.

## Résumé

Dans cette étude, nous nous sommes intéressées à l'expérimentation d'un nouveau distillateur solaire avec stockage d'énergie et condensation à eau à coût réduit. Cet appareil destiné à distiller des eaux salées et saumâtres. Le rendement journalier du distillateur, au printemps, est de 4,5 litres/jour pour une surface d'évaporation de 0,5 m<sup>2</sup> et une surface de capteur de 4 m<sup>2</sup>. Le rendement du distillateur est de 14 % sur 24 heures. Le stockage de l'énergie a permis d'obtenir une production nocturne de 50 % par rapport au jour. Les résultats ont montré, par ailleurs, que le stockage d'énergie par une masse d'eau est meilleur que le stockage par une couche de béton.

# Table des matières

RESUME

REMERCIEMENT

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

## CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE DESSALEMENT

1.1 Introduction	3
1.2 Caractéristiques de l'eau à distiller	3
1.2.1 Eaux marines	3
1.2.2 Eaux saumâtres	4
1.2.3 Eaux naturelles	4
1.2.4 Eaux usées	4
1.3 La conductivité électrique de l'eau	4
1.4 Principales technologies de dessalement des eaux	5
1.4.1 Définition de dessalement	5
1.4.2 Procédés membranaires	5
a. Osmose inverse	5
b. Electrodialyse	6
1.4.3 Procédés thermiques	7
a. Congélation	7
b. Distillation flash à étages multiples (MSF)	7
c. Distillation à multiples effets (ME)	8

## CHAPITRE 2 : LE DISTILLATEUR SOLAIRE

2.1 Travaux antérieurs	10
2.2 Différents prototypes de distillateurs solaires	11
2.2.1 Distillateur solaire à effet de serre	11
a. Distillateur à pente unique	12

b.	Distillateur à double pentes	13
c.	Distillateur sphérique à balayage	13
d.	Distillateur solaire incliné à cascades	14
e.	Distillateur à étages multiples	14
2.2.2	Distillateur solaire à mèche	16
a.	Distillateur à mèche inclinée	16
b.	Distillateur solaire à film capillaire	16
2.2.3	Distillateur solaire tubulaire	17
2.3	Paramètres influant sur le système de distillation solaire	19
2.3.1	Paramètres externes	19
a.	Intensité du rayonnement solaire	19
b.	La vitesse du vent	19
c.	Température de l'air ambiant	20
d.	Paramètres météorologiques	20
e.	Paramètres géographiques	20
f.	Nature de l'eau à traiter	20
2.3.2	Paramètres internes	20
a.	Paramètres de position	20
b.	Paramètres de construction	21
c.	Paramètres optiques	22
d.	Paramètres thermo-physiques	22
2.4	Transfert thermique	23
2.4.1	Conduction	23
2.4.2	Convection	23
2.4.3	Rayonnement	24

### **CHAPITRE 3 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL**

3.1 Description et principe de fonctionnement du distillateur	25
3.2 Conception du distillateur	26
a. Capteur solaire plan	26
b. Cuve principale	27
c. Condenseur	28
d. Refroidisseur (source froide)	28
e. Une isolation thermique	29
f. Réservoir du distillat	29
3.3 Moyens de mesure	29
3.3.1 Mesure des températures	29
3.3.2 Mesure du débit	29
3.3.3 Mesure de la qualité de l'eau	29
3.3.4 Données météorologiques	29
3.4 Etude expérimentale	30

## **CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

4.1 Introduction	31
4.2 Site géographique et données météorologiques	31
4.2.1 Site géographique	31
4.2.2 Evolution journalière du rayonnement solaire et de la température ambiante	31
4.3 Résultats de la distillation	33
4.3.1 Fonctionnement en condensation avec l'air ambiant	33
4.3.2 Fonctionnement en condensation avec refroidissement à eau	35
4.3.3 Modélisation des résultats (modèle dit d'Arrhenius)	36
a. Présentation des résultats	36
b. Comparaison des résultats	37

4.4 Effet de l'ensoleillement	38
4.5 Effet de la salinité	41
4.6 Résultats avec source froide isotherme	42
4.7 Effet de la surface du capteur	44
4.8 Effet du stockage de l'énergie	46
4.9 Comparaison avec un distillateur avec stockage d'énergie sur béton	46
4.10 Calcul des pertes d'eau	48
4.11 Rendement du distillateur	48
4.12 Aspect financier	49

CONCLUSION

APPENDICES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## LISTES DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

Symbole	Désignation	Unité
G	Puissance de rayonnement solaire incident par unité de surface	W/m <sup>2</sup>
L <sub>v</sub>	la chaleur latente d'évaporation	J / kg
Q	le débit horaire de distillat	ml/h
S	surface du capteur	m <sup>2</sup>
T <sub>a</sub>	Température ambiante	K
T <sub>C,entré</sub>	Température de l'entrée du capteur	K
T <sub>cond</sub>	Température de condenseur	K
T <sub>C,sortie</sub>	Température de sortie du capteur	K
T <sub>évapo</sub>	Température de l'évaporateur	K
T <sub>p</sub>	Température de la surface solide	K
T <sub>s</sub>	Température de surface du corps	K
T <sub>∞</sub>	Température du fluide de la surface solide	K
X	Epaisseur de la saumure	m
Y	Production de distillat	l
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	W/m <sup>2</sup> . K
md	Débit massique du distillat	

### Lettres grecques

Symbole	Désignation	Unité
β	Inclinaison du plan considéré	°
ε	Coefficient d'émission de la surface	
η	Rendement	%
Θ	Latitude	°
λ	Conductivité thermique du matériau	W.m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>
σ	Constante de <b>Stéphan Boltzmann</b>	5.67 10 <sup>-8</sup> W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup>
φ	Flux de chaleur transmis par convection	W

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure 1.1	Principe de l'osmose inverse	4
Figure 1.2	Le principe de l'électrodialyse	5
Figure 1.3	Distillateur flash à étages multiples.	6
Figure 1.4	Distillation à multiples effets	7
Figure 2.1	Distillateur solaire à effet de serre à pente unique	10
Figure 2.2	Distillateur solaire à effet de serre à double pente.	11
Figure 2.3	Distillateur sphérique à balayage	11
Figure 2.4	Distillateur solaire incliné à cascade	12
Figure 2.5	Distillateur solaire à étages multiples	13
Figure 2.6	Distillateur solaire à mèche inclinée.	14
Figure 2.7	Distillateur solaire à film capillaire	15
Figure 2.8	Distillateur solaire tubulaire	17
Figure 3.1	Schéma du distillateur solaire avec stockage d'énergie par l'eau	24
Figure 3.2	Capteurs solaires	25
Figure 3.3	Cuve principale.	25
Figure 3.4	Condenseur.	26
Figure 3.5	Refroidisseur (source froide)	26
Figure 4.1	Evolution journalière de l'irradiation solaire et de la température ambiante (journée ensoleillée)	32
Figure 4.2	Evolution journalière de l'irradiation solaire et de la	32

	température ambiante (journée nuageuse)	
Figure 4.3	Evolution de la vitesse du vent en fonction du temps de la journée du 26-04-2016 et 10-05-2016	33
Figure 4.4	Evolution du débit instantané et de la production cumulée dans le cas de condensation avec l'air ambiant	34
Figure 4.5	évaluation du débit de distillat en fonction de la température dans l'utilisation de refroidissement a l'air ambiant	34
Figure 4.6	Evolution du débit instantané et de la production cumulée dans le cas d'une condensation avec refroidissement (à eau)	35
Figure 4.7	Evolution du débit de distillat en fonction de la température d'évaporateur dans le cas d'une condensation à eau (avec refroidissement)	36
Figure 4.8	Comparaison des résultats sous différents modes de condensation (air et eau)	37
Figure 4.9	Production d'eau distillée(expérimentale et calculée) dans les deux conditions de condensation avec l'eau et avec l'air ambiant	38
Figure 4.10	Variation de différentes températures et du débit instantané en fonction du temps (10-05-2016)	39
Figure 4.11	Variation de différentes températures et du débit instantané en fonction du temps (17-04-2016)	39
Figure 4.12	Variation de différentes températures et du débit instantané en fonction du temps (26-04-2016)	40
Figure 4.13	Production d'eau distillée dans différentes journées (ensoleillée, peu nuageuse, et nuageuse)	40
Figure 4.14	Evolution du débit de distillat en fonction de la température de l'évaporateur (effet de la salinité)	41
Figure 4.15	Production journalière d'eau distillée (expérimentale et calculée) dans les trois cas (eau de mer, eau de robinet et mélange à 50%ene masse)	42
Figure 4.16	Evolution du débit de distillat en fonction de la température de l'évaporateur - Effet de la température de la source froide.	43
Figure 4.17	Evolutions des températures d'évaporation et de condensation en fonction du temps – Effet de la	43

	température de la source froide	
Figure 4.18	Production d'eau distillée(expérimentale et calculée) dans les cas d'une source froide à température constante et variable	44
Figure 4.19	Variation du débit de distillat en fonction de la température d' évaporation - Effet de la surface du capteur sur le débit de distillat	45
Figure 4.20	Production journalière (expérimentale et calculée) d'eau distillée – Effet de la surface du capteur	45
Figure 4.21	Production d'eau distillée nocturne et diurne (effet du stockage de l'énergie)	46

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau 1.1	La composition moyenne d'eau de mer	2
Tableau 1.2	La conductivité électrique des différentes eaux	3
Tableau 3.1	L'emplacement des thermocouples	27
Tableau 4.1	Coefficients du modèle d'Arrhenius	37
Tableau 4.2	Comparaison entre deux distillateurs avec deux modes de stockage d'énergie	46
Tableau 4.3	Production journalière d'eau distillée pour les quatre saisons	49
Tableau 4.4	Prix du litre d'eau distillée produite pour les trois amortissements	49

# CHAPITRE I

## GENERALITES SUR LE DESSALEMENT

### 1.1. Introduction

Les trois quarts de la surface de notre planète sont recouvertes d'eau mais d'eau salée. Il n'empêche, ces réservoirs inépuisables que sont les océans font rêver, nous poussons à chercher des solutions pour transformer cette eau salée en eau douce. Cela résoudrait en effet toutes les difficultés de pénurie d'eau que connaissent beaucoup de pays, car nombre d'entre eux ont un accès aux océans, quand ils ne disposent pas d'un littoral maritime conséquent.

En fait, dessaler l'eau de mer de manière à la rendre consommable, c'est possible. On dispose même aujourd'hui de nombreux systèmes dont beaucoup ont atteint le stade industriel. Les deux procédés les plus couramment utilisés sont la distillation et l'osmose inverse. Leur principe est simple.

La distillation consiste à évaporer l'eau de mer, en utilisant la chaleur des rayons solaires, ou toute source de chaleur.

L'osmose inverse nécessite quant à elle de traiter au préalable l'eau de mer en la filtrant et en la désinfectant afin de la débarrasser des éléments en suspension et des micro-organismes qu'elle contient. Le procédé consiste ensuite à appliquer à cette eau salée, une pression suffisante pour la faire passer à travers une membrane semi-perméable .

### 1.2. Caractéristiques de l'eau à distiller

#### 1.2.1. Eaux marines

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates).

La salinité moyenne des eaux des mers et océans est de  $35 \text{ g.L}^{-1}$

Cette salinité peut être différente dans le cas de mers fermées :

- Mer Méditerranée :  $36 \text{ à } 39 \text{ g.L}^{-1}$ .
- Mer Rouge : environ  $40 \text{ g.L}^{-1}$ .
- Mer Caspienne :  $13 \text{ g.L}^{-1}$ .
- Mer Morte :  $270 \text{ g.L}^{-1}$ .

- Golfe Arabo-persique : 36 à 39 g.L<sup>-1</sup>.

Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4 : l'eau de mer est un milieu légèrement basique [1].

Sur le tableau (1.1), nous avons reporté la composition moyenne de l'eau de mer en ses principaux composants :

**Tableau 1.1 : La composition moyenne d'eau de mer.**

Composant	Teneur (g.L <sup>-1</sup> )
NaCl	27.2
MgCl <sub>2</sub>	3.8
MgSO <sub>4</sub>	1.7
CaSO <sub>4</sub>	1.26
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.86

### 1.2.2. Eaux saumâtres

On appelle généralement, eau saumâtre, une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer.

En fait, la plupart des eaux saumâtres ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/l. Elles se présentent soit, sous forme d'eaux de surface, soit sous forme souterraines. Les différentes teneurs en ions (Mg, Ca, F,...) peuvent être très variées selon l'origine de l'eau.

### 1.2.3. Eaux naturelles

Ce sont les eaux qui proviennent des lacs, fleuves, rivières et nappes souterraines. Elles ont une composition chimique différente et parfois elles sont polluées et impropres à la consommation. Elles représentent près de 14% de l'eau douce [2].

### 1.2.4. Eaux usées

Ce sont les eaux rejetées par les collectivités domestiques, industrielles ou agricoles.

## 1.3. La conductivité électrique de l'eau

La conductivité est une mesure de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique, donc une mesure indirecte de la teneur de l'eau en ions. Un ion est un atome (constituant de base de la matière) ou un groupe d'atomes qui possède une charge électrique positive ou négative. Ainsi, plus l'eau contient des ions comme le calcium

( $\text{Ca}^{2+}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), le sodium ( $\text{Na}^+$ ), le potassium ( $\text{K}^+$ ), le bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), le sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et le chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), plus elle est capable de conduire un courant électrique et plus la conductivité mesurée est élevée, le tableau suivant montre quelques valeurs des conductivités électriques, sachant que la température influence grandement la conductivité de l'eau:

**Tableau. 1.2 : La conductivité électrique des différentes eaux**

Qualité d'eau	Conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
Eau déminéralisée	0.05
Eau de pluie	10 à 80
Eau peu minéralisée	80 à 100
Eau moyennement minéralisée	300 à 500
Eau saumâtre	1000 à 3000
Eau de mer	< à 3000

Pour comparer les valeurs de conductivité d'une saison à l'autre et d'un plan d'eau à l'autre, il faut qu'elles soient calibrées en fonction d'une température de l'eau de 25 °C. Une fois ajustées, elles deviennent des données de conductivité spécifique.

## 1.4. Principales technologies de dessalement des eaux

### 1.4.1. Définition de dessalement

Le dessalement de l'eau est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce à partir d'une eau saumâtre ou salée. En dépit du nom, il s'agit de retirer les sels de l'eau ou extraire l'eau douce. Les deux procédés les plus répandus sont la distillation et l'osmose inverse.

### 1.4.2. Procédés membranaires

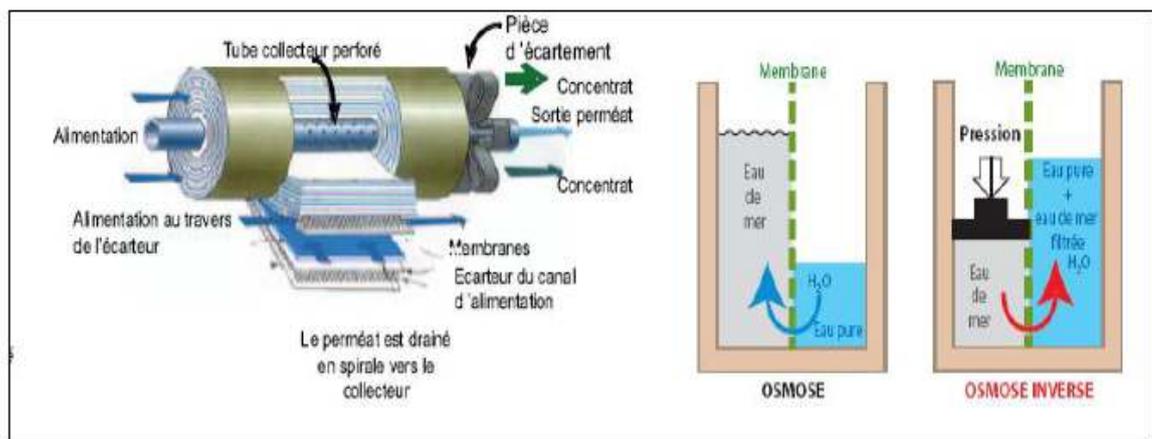
Les principaux procédés à membranes utilisés dans le domaine du dessalement sont : l'osmose inverse et l'électrodialyse.

#### a. Osmose inverse

Ce procédé découvert en 1950 s'est développé dans les années soixante [1]. Cette technique révolutionnaire de purification a été mise au point par les scientifiques de la N.A.S.A pour recycler et purifier l'eau consommée et éliminée par les cosmonautes lors des vols spatiaux.

Les membranes osmotiques sont perméables à l'eau pure, mais elles constituent des barrières infranchissables pour tous les corps dissouts à l'état moléculaire ou colloïdal, c'est pour cela que ses membranes sont dites semi-perméables, chaque compartiment étant ouvert à l'air libre, on remplit d'eau douce le premier compartiment (figure I.1), cette eau traverse la membrane, vers la solution salée, et la pression augmente du coté de cette dernière. Le passage de l'eau à travers la membrane cesse lorsque la différence de pression entre les deux solutions est égale à la pression osmotique. Si on exerce sur la solution salée une pression supérieure à la pression osmotique (250 kPa pour de l'eau de mer), de l'eau douce traverse en sens inverse la membrane osmotique (cela peut être réalisé grâce à la mise au point de membranes semi-perméables en acétate de cellulose). L'osmose inverse est donc une sorte d'hyper filtration. La pureté de l'eau obtenue dépend de la qualité des membranes et de la quantité d'impuretés à éliminer.

La pression osmotique d'une solution croit avec la concentration de celle-ci, pour le dessalement de l'eau de mer, la pression de fonctionnement est l'ordre de 600 à 700 kPa.



**Figure 1.1 : Principe de l'osmose inverse.**

### **b. Electrodialyse (ED)**

Le principe de l'électrolyse est bien connu. Les ions d'un sel dissouts dans l'eau, comme le chlorure ou le sodium par exemple, se déplacent sous l'action d'un champ électrique créé par deux électrodes trempant dans le liquide (Figure 1.2). Les ions positifs ou cations tandis que les ions négatifs sont par l'électrode positive.

Dans l'électrodialyse, on intercale alternativement des membranes filtrantes soit imperméables aux anions et perméables aux cations, soit imperméables aux cations et perméables aux anions. On obtient ainsi une série de compartiments à forte concentration de sels et d'autres à faible concentration [4].

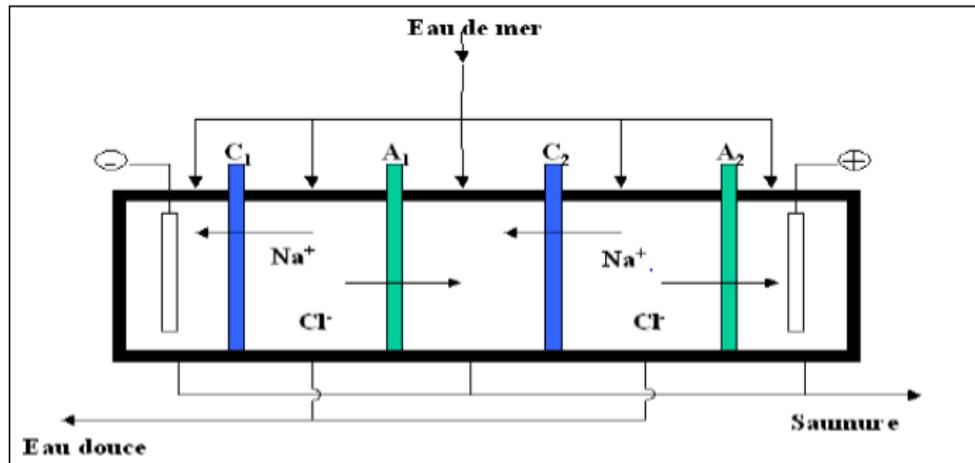


Figure 1.2 : Le principe de l'électrodialyse.

### 1.4.3. Procédés thermiques

#### a. Congélation

La technologie de dessalement par congélation a été proposée comme alternative de la distillation et de l'osmose inverse pour le dessalement de l'eau de mer dans plusieurs travaux.

En effet, lorsqu'on fait geler de l'eau salée, les cristaux qui sont formés pratiquement de la glace pure, le sel étant chassé de l'eau lors de la cristallisation, formant une saumure à la surface du cristal. Les cristaux sont alors lavés puis fondus, ce qui permet d'obtenir de l'eau douce.

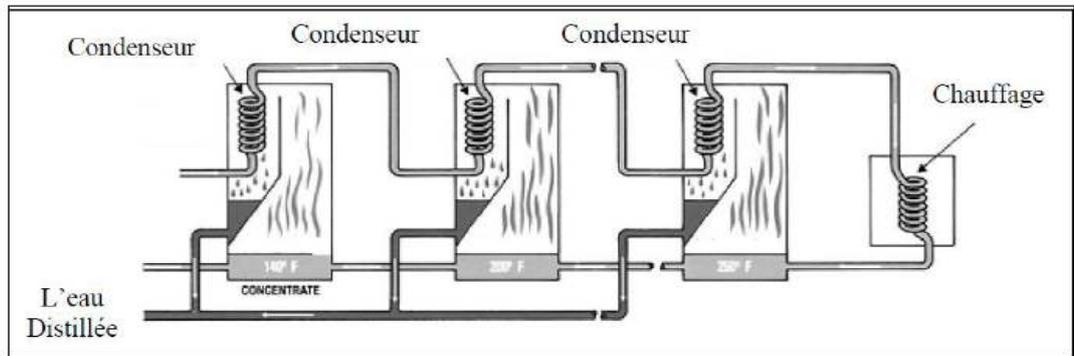
Ce procédé nécessite beaucoup d'énergie dans les régions tempérées et chaudes.

Une autre méthode fondée sur la congélation est celle du réfrigérant secondaire, dans laquelle le transfert de chaleur est obtenu par l'emploi d'un hydrocarbure liquide non miscible dans l'eau. En effet, le mélange de butane et d'eau de mer passe par un échangeur de chaleur ou l'échauffement fait bouillir le butane, ce qui entraîne la congélation de l'eau dans la saumure. Les cristaux de glace sont lavés, séparés et finalement fondus, moyennant l'échange de chaleur avec la vapeur de butane préalablement comprimée [5].

#### b. Distillation flash à étages multiples («Multistages Flash » ou MSF)

La figure (1.3) présente le principe de fonctionnement d'une usine de type MSF. L'eau de mer, initialement chauffée dans une chaudière, alimente le premier étage. La pression, imposée par la température du condenseur, est telle qu'il se produit une

vaporisation flash à l'entrée. Seule une fraction de l'eau se vaporise. La saumure résiduelle s'écoule alors dans l'étage suivant opérant à pression plus faible, de façon à produire à nouveau un flash à l'entrée, et ainsi de suite. Habituellement, une usine MSF comporte ainsi 15 à 25 étages. Ce concept est appliqué depuis plus d'un siècle.



**Figure1.3 : Distillateur flash à étages multiples.**

### c. Distillation à multiples effets («Multi-Effect» ou ME)

Dans des évaporateurs à multiples effets (ME) figure (1.4), la vapeur provenant du premier évaporateur se condense dans le second. La chaleur fournie par la condensation sert alors à faire évaporer l'eau salée alimentant le second étage, qui travaille à pression plus basse. L'opération est ainsi répétée dans une cascade d'étages, où le condenseur de l'étage  $n$  sert d'évaporateur à l'étage  $n+1$ . Chaque évaporateur d'une telle série correspond à un «effet». Certaines des premières usines de distillation d'eau utilisaient le procédé ME, mais les unités MSF, en raison de leur meilleure résistance à l'entartrage, ont remplacé ce procédé. Cependant, à partir des années 1980, le procédé ME a connu un regain de faveur et il a été mis en place des installations de conception nouvelle introduisant une exploitation à des températures plus basses, ce qui a permis de réduire la corrosion et l'entartrage.

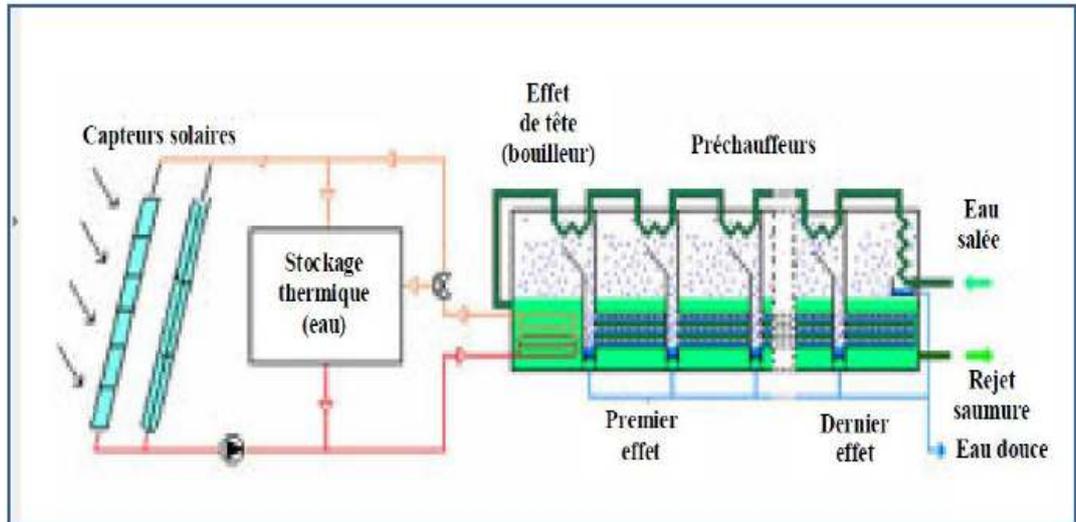


Figure1.4 : Distillation à multiples effets.

## CHAPITRE 2

### LE DISTILLATEUR SOLAIRE

#### 2.1. Travaux antérieurs

Dès le IV<sup>ème</sup> siècle avant JC, Aristote observe le principe de la distillation. Au XII<sup>ème</sup> siècle, Abélard de Bath décrit deux expériences dans les questions naturelles : au soleil, après l'évaporation sur une roche, l'eau de mer se transforme en sel. Lorsque le soleil fait défaut, on chauffe l'eau de mer et sous l'effet de la cuisson on la voit également se transformer en sel. Cette métamorphose explique que la mer soit plus salée l'été que l'hiver, que les mers méridionales le soient davantage que les mers septentrionales.

Depuis les temps les plus anciens, les marins ont dessalé l'eau de mer à partir de simples bouilleurs sur leurs bateaux, mais l'utilisation à des fins industrielles est récente. Dans les années 60, les procédés thermiques sont mis au point et utilisés pour dessaler l'eau de mer.

En 1872 à Las Salinas, au nord du désert chilien on a utilisé pour la première fois, un processus de dessalement de l'eau de mer par l'énergie solaire utilisant un distillateur simple, basée sur le principe de l'effet de serre [7]. Entre septembre 1995 et août 1996, des expériences ont été réalisées par G.N. Tiwari, A. Kupfermann [8], sur une conception d'un distillateur solaire à double chambre de condensation DCS. La performance de DCS donne une production journalière supérieure d'environ 35 à 77% par rapport à un distillateur solaire classique CSS. En 1999, B.A. Jubran, M.I. Ahmed [9] présentent une étude expérimentale sur un distillateur solaire à multi étages (3étages), dont le premier bassin est alimenté en énergie thermique ; cette dernière réchauffe l'eau contenue dans l'étage supérieur qui s'évapore à son tour et se condense à la surface inférieure de l'étage suivant, c'est la chaleur de condensation qui sert à chauffer l'eau de cet étage et ainsi de suite. En 2001 O.O. Badran et al [10] ont développé un distillateur couplé à un système de préchauffage de l'eau d'appoint.

Cette étude consiste en une comparaison expérimentale entre deux distillateurs solaires identiques, de type « hot box », l'un fonctionnant normalement et l'autre avec un système de préchauffage (capteur et échangeur). En 2002, deux modèles mathématiques ont été utilisés par Hilal Al-Hinai, MS. Al-Nassri [11], pour comparer la productivité des alambics

solaires à simple effet et ceux à double effet, les rendements optimaux des distillateurs à simple effet et à double effet sont respectivement  $4,15 \text{ kg/m}^2/\text{j}$  et  $6 \text{ kg/m}^2/\text{j}$ .

En 2006, HIROCHI TANAKA, YASUHITO NAKATAKE [12] réalisèrent une analyse théorique d'un distillateur type bassin avec des réflecteurs internes et externes, proposant une méthode géométrique pour calculer le rayonnement solaire réfléchi par les réflecteurs. Ils ont constaté que les réflecteurs internes et externes peuvent augmenter la productivité du distillat toute l'année de 48 %.

En 2008, Velmurugan et Met Gopalakrishnan [13] ont réalisé un travail ayant pour but d'augmenter l'évaporation. Ils ont intégré des ailettes dans un bassin et introduit des éponges dans l'autre, pour les comparer avec le distillateur à mèche et le distillateur classique. Les résultats expérimentaux montrent une augmentation de la productivité de 29,6% lorsqu'on utilise une mèche, 15,3% dans le cas d'utilisation d'éponges, et de 45.5% dans le cas d'utilisation des ailettes.

Kalidasa Murugavel et al (2010) [14] ont fabriqué et testé un distillateur solaire à double pente en utilisant une couche d'eau minimale de profondeur de 0,5 cm et de différents matériaux sensibles qui ont tendance de stocker la chaleur comme la roche de quartzite, les morceaux de brique rouge, les morceaux de ciment concrets (béton), les cailloux et le fer. Il a été constaté que le distillateur à roche de quartzite donne une meilleure production par jour. Un modèle thermique a été développé pour valider les résultats de ce distillateur avec précision. Le taux de production estimé par le modèle théorique est en bon accord avec les valeurs expérimentales.

En 2015, K.K. Matrawy, A.F. Mahrous [15], présentent un travail visant à améliorer la productivité d'un distillateur solaire classique en introduisant un distillateur solaire à mèche de type ondulée. La performance du distillateur solaire développé est comparée à celle du type simple, il a été constaté une amélioration d'environ 34%.

## **2.2. Différents prototypes de distillateurs solaires**

Dans ce paragraphe, nous présentons quelques prototypes de distillateurs solaires étudiés par divers chercheurs.

### **2.2.1. Distillateur à effet de serre**

Un distillateur solaire conventionnel à effet de serre est un bassin étanche à l'air, habituellement fait de feuille d'Aluminium en forme rectangulaire. Il est recouvert d'un matériel transparent et l'intérieur de sa base est noirci pour maximiser l'absorption de

l'énergie solaire. L'eau salée est versée dans le bassin de métal et exposée aux rayons du soleil. Le couvercle transparent laisse pénétrer les radiations solaires qui sont absorbées en grande partie par le fond noir.

L'augmentation de la température due à l'effet de serre réchauffe l'eau qui s'évapore. La capacité d'évaporation augmente en fonction de la température jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau, l'humidité relative est alors de 100%. La vapeur d'eau se condense sur le vitrage refroidi par l'air ambiant. Il y a formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers la partie inférieure du vitrage dans une gouttière qui conduit au réservoir de stockage. Cet appareil peut produire en moyenne 4,9 litres d'eau distillée par jour par m<sup>2</sup>.

Les distillateurs solaires simples (bassin simple) ont été largement étudiés et leur comportement est bien maîtrisé. Une efficacité de 25% est typique. La productivité journalière en fonction de l'irradiation solaire est plus grande en soirée où l'eau à distiller est encore chaude quand les températures extérieures chutent [16].

#### a. Distillateur à pente unique

Dans le cas d'un distillateur à pente unique, la vitre inclinée d'un angle  $\beta$ , sert à produire l'effet de serre et de condenseur (figure 2.1)

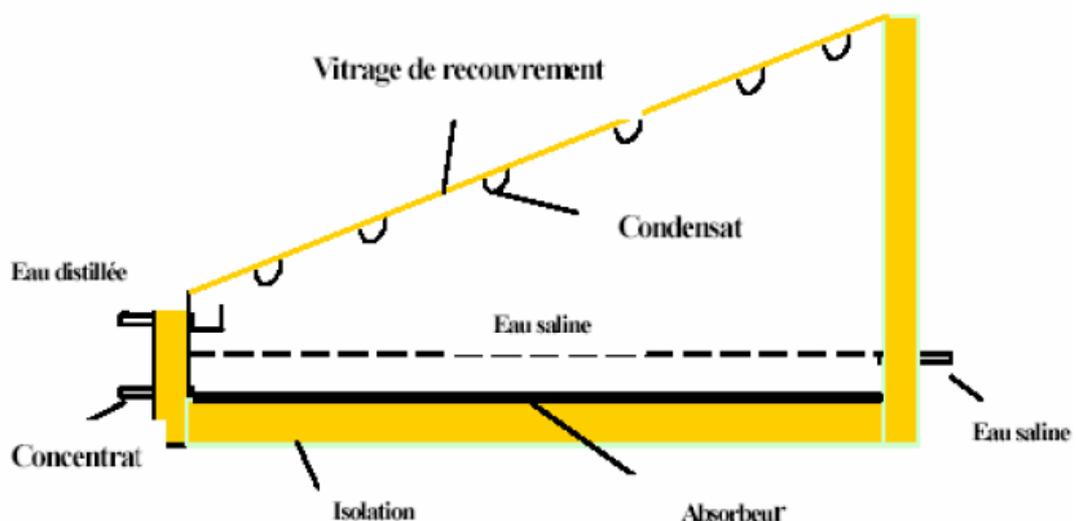


Figure 2.1 : Distillateur solaire à effet de serre à pente unique.

### b. Distillateur à double pentes

La figure (2.2) montre un distillateur solaire à double pente dont la couverture est constituée de deux vitrages inclinés du même angle  $\beta$  par rapport à l'horizontale dont l'un est exposé au soleil et l'autre à l'ombre pour augmenter la condensation [4].



Figure 2.2 : Distillateur solaire à effet de serre à double pente.

### c. Distillateur sphérique à balayage

Ce distillateur est constitué d'une sphère en plexiglas ou autres matériaux plastiques transparents reposants sur des supports et d'un système mécanique de récupération de l'eau distillée par l'intermédiaire d'un essuie-glace entraîné par moteur électrique (figure 2.3) [17].

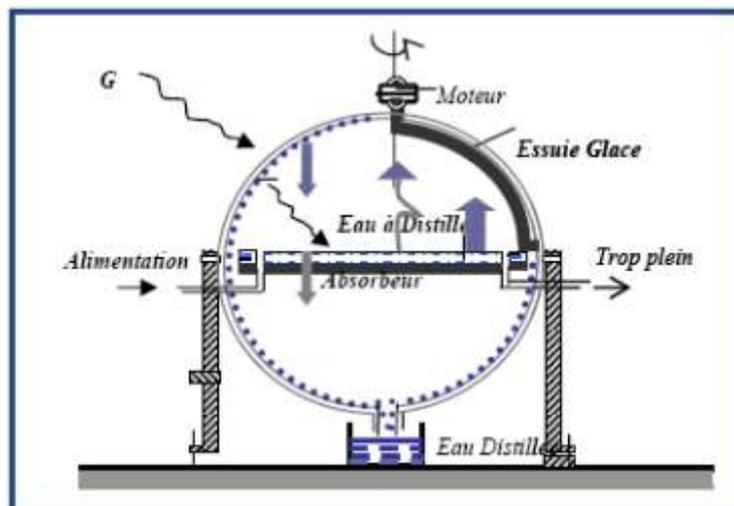
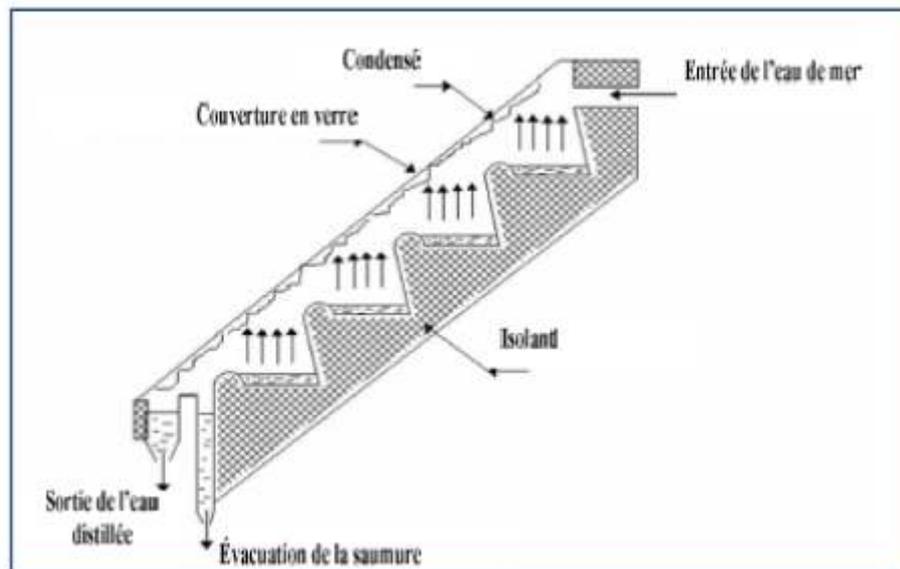


Figure 2.3 : Distillateur sphérique à balayage.

#### d. Distillateur solaire incliné à cascades

Cet appareil présente deux avantages : la lame d'eau est très faible et l'orientation par rapport au rayonnement incident se rapproche davantage de l'optimum. Un modèle de ce type, représenté sur la figure (2.4), n'a été réalisé qu'en petite taille. Il est constitué de plusieurs bassins horizontaux placés et alimentés en cascades, l'eau salée arrivant dans le bassin du haut. Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux [18].



**Figure 2.4 : Distillateur solaire incliné à cascade.**

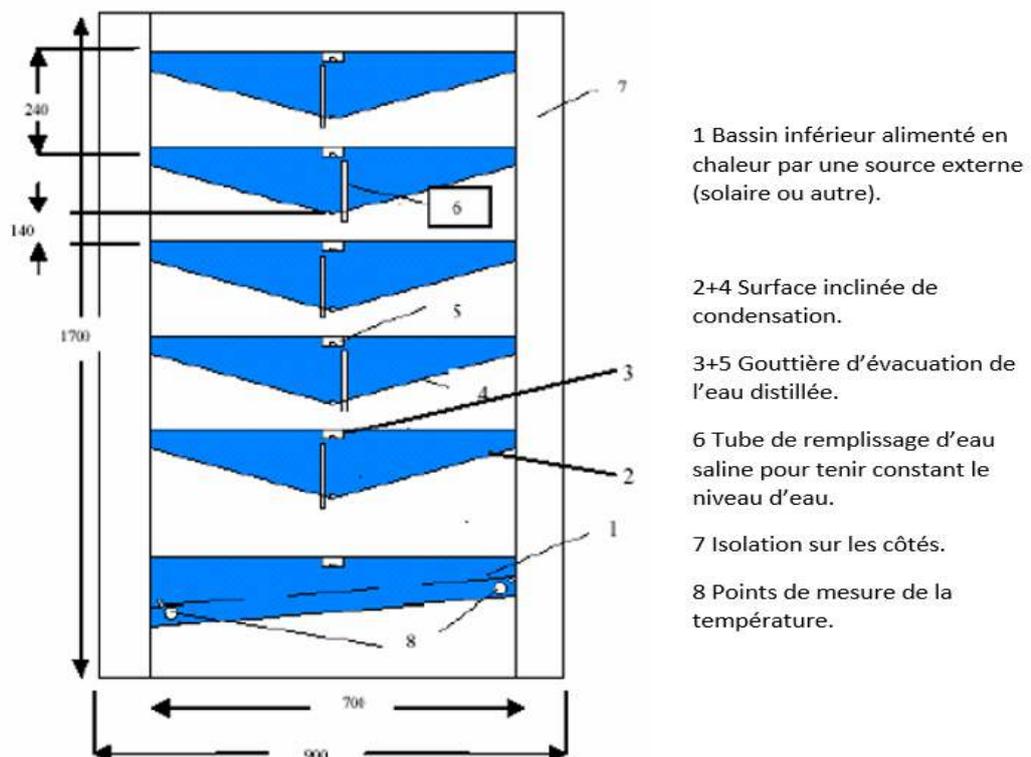
#### e. Distillateur à étages multiples

Dans ce distillateur (figure 2.5), seul, le bassin inférieur (1) est alimenté en énergie thermique. Lorsque l'eau de ce bassin est chauffée, elle s'évapore et se condense sur la surface inférieure du bassin conique situé au-dessus (2). Il y a formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers une gouttière (3) qui les conduit au bac de stockage. Lors de la condensation de la vapeur d'eau, l'énergie de conversion de phase, appelée aussi l'enthalpie d'évaporation, est libérée. Cette énergie chauffe l'eau contenue dans l'étage supérieur qui s'évapore à son tour et se condense sur la surface inférieure de l'étage suivant (4) et ainsi de suite...De cette manière, l'énergie prévue pour chauffer l'eau du bassin inférieur, est récupérée, du moins en grande partie, pour être utilisée plusieurs fois. Ce processus de récupération de chaleur a un effet multiplicateur sur la production d'eau potable. Le remplissage du distillateur s'effectue à partir du dernier étage. Le système est alimenté en eau saline à un débit deux fois plus élevé que celui de l'eau évaporée. Cette

quantité d'eau injectée continuellement à travers les tuyaux de débordement (6) a pour buts :

- \*de compenser la quantité d'eau évaporée,
- \*d'éviter une accumulation des sels dans les bassins
- \* de contribuer à conserver les gradients de température entre les étages.

Le circuit entre le capteur solaire qui est la source d'énergie et l'unité de distillation fonctionne en thermosiphon ; il n'y a donc pas de pompe nécessitant une source d'énergie supplémentaire qui risque de ne pas exister dans les régions retirées. Pour éviter une surpression, une huile végétale est utilisée comme fluide caloporteur car la température peut dépasser les 100°C. L'installation de dessalement peut fonctionner 24 heures sur 24, lorsqu'on combine la chaleur provenant des capteurs solaires à celle récupérée d'un groupe électrogène par exemple. Tout en assurant une alimentation électrique au hameau, la chaleur provenant du groupe peut être récupérée et utilisée pour le dessalement de l'eau, lorsque le soleil est absent, particulièrement la nuit. Durant le jour cette chaleur peut être stockée [16].



**Figure 2.5 : Distillateur solaire à étages multiples.**

## 2.2.2. Distillateur solaire à mèche

### a. Distillateur à mèche inclinée

Dans un distillateur à mèche inclinée (figure 2.6), l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture poreuse (mèche), absorbant les rayonnements. Deux avantages sont revendiqués par rapport aux distillateurs de bassin. D'abord, la mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (réduisant la réflexion et présentant une grande surface efficace). En second lieu, moins d'eau d'alimentation se trouve dans le distillateur à tout moment, donc elle est chauffée plus rapidement et à une température élevée.

Les distillateurs simples à mèche sont plus efficaces que les distillateurs à bassin et quelques conceptions sont prétendues coûter moins qu'un distillateur à bassin de même rendement. L'appareil incliné à mèche permet de maintenir l'épaisseur de la lame d'eau presque constante. Le modèle représenté sur la figure (2.6) a été testé pendant quelques temps d'une façon satisfaisante, mais il a été très difficile de maintenir une humidité sur les mèches sans points secs [18].

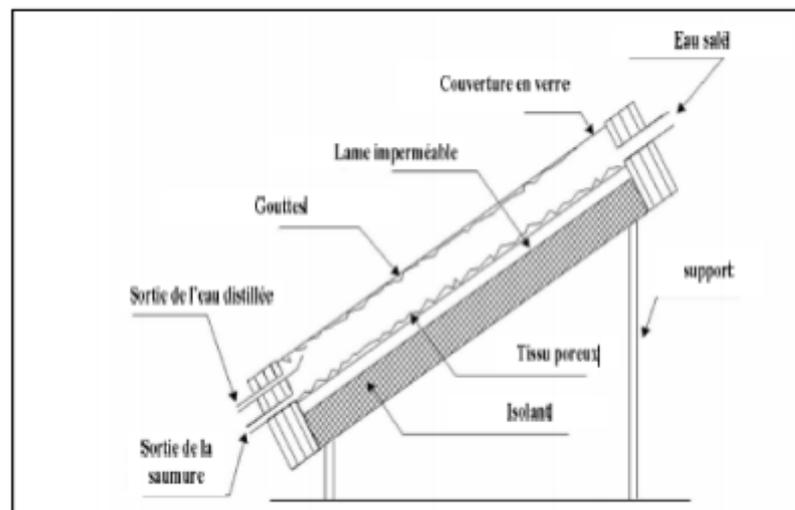
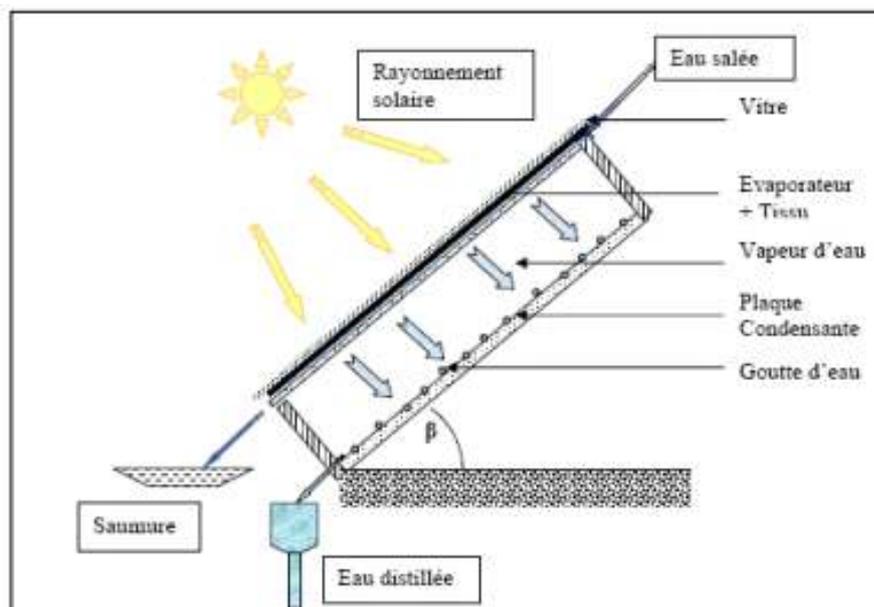


Figure 2.6 : Distillateur solaire à mèche inclinée.

### b. Distillateur solaire à film capillaire

Le distillateur représenté par la figure (2.7) se compose d'une très mince couche de textile à mailles fines, imbibée d'eau qui se maintient d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Cette plaque qui constitue la partie supérieure de la cavité d'évaporation est la plaque absorbant qui absorbe les rayonnements du soleil directement ou à travers un vitrage. Les forces de tension inter-faciale, nettement supérieures à celles

de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air. Ce distillateur est composé des éléments suivants : le capteur – évaporateur, le condenseur et l'alimentation. Dans le cas de plusieurs étages, la chaleur de condensation du premier étage sert à évaporer l'eau salée du deuxième étage et ainsi de suite. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi [19].



**Figure 2.7 : Distillateur solaire à film capillaire.**

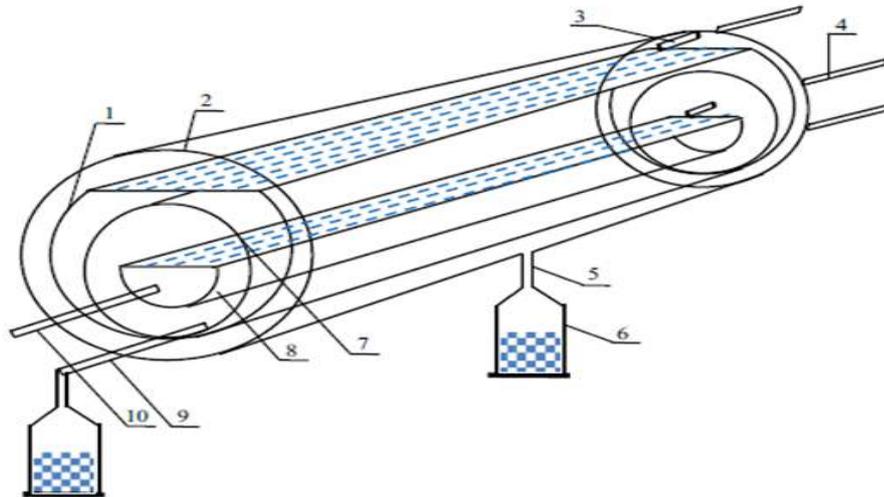
### 2.2.3. Distillateur solaire tubulaire

Le distillateur solaire tubulaire deux effets (figure 2.8) se compose de deux coquilles tubulaires circulaires et deux passages semi-circulaires qui sont fixés à l'intérieur des coquilles de tubes respectifs. L'eau de mer pénètre dans le deuxième effet auge semi-circulaire 8 et le premier effet auge semi-circulaire 1 à travers des tubes d'entrée 3 et 4. L'eau de mer dans le premier effet auge semi-circulaire est chauffée pour produire l'évaporation par le tube de chauffage 10. Par conséquent, la concentration de la vapeur d'eau dans l'air humide augmente dont une partie sera condensée sur la surface intérieure de l'enveloppe tubulaire 7 pour libérer sa chaleur latente de vaporisation. L'eau condensée coule naturellement vers le fond de l'enveloppe tubulaire par gravité et pénètre dans un

collecteur de distillat 6 à travers le tube de sortie d'eau fraîche du premier effet 9 fixé sur le dessous de l'enveloppe tubulaire.

Dans le même temps, la chaleur latente libérée par la vapeur à effet sur la surface intérieure de l'enveloppe tubulaire 7 va chauffer l'eau de mer dans le deuxième effet semi-circulaire, qui s'évaporerà à son tour. La température de l'enveloppe tubulaire 2 étant inférieure à celle de la vapeur d'eau, celle-ci est condensée sur la surface intérieure de l'enveloppe tubulaire. L'eau de condensation ruisselle naturellement vers le bas de l'enveloppe tubulaire, puis est stockée dans le collecteur d'eau douce 6 à travers le tube de sortie d'eau douce du deuxième effet 5. Le distillateur solaire tubulaire à effet unique et à trois effets malgré la différence de certaines structures. Les résultats expérimentaux ont montré que le rapport du rendement des dispositifs à deux et trois effets travaillant sous pression ambiante atteint environ 1.4 et 1.7 respectivement, dans des conditions de puissance de chauffage fixe. Le rendement des appareils sous pression négative a été renforcé. Par exemple, pour une puissance de chauffage fixe de 300 W, le rendement atteint environ 20.08/m<sup>2</sup>/jours.

Ces résultats indiquent que les dispositifs présentent d'excellentes perspectives d'applications. Un design innovant de tubulaire toujours avec un bassin rectangulaire pour le dessalement de l'eau avec de l'eau et de l'air circulant sur le couvercle a été étudiée par Arun Kumar et al [20]. Leurs résultats ont révélé qu'avec un écoulement d'air de refroidissement, la production a augmenté d'environ 32,8%, et avec un écoulement d'eau de refroidissement, elle a encore progressé de près de 59% par rapport au système sans refroidissement. En dépit de l'augmentation du coût du système de refroidissement par l'eau, l'augmentation de la production a entraîné une diminution du coût de l'eau distillée de près de la moitié [21].



**Figure 2.8 : Distillateur solaire tubulaire.**

### **2.3. Paramètres influant sur le système de distillation solaire**

On doit tenir compte de deux types de paramètres influant sur le système de distillation pour un site donné.

- Les paramètres externes par rapport au système de distillation.
- Les paramètres internes par rapport au système de distillation.

#### **2.3.1. Paramètres externes**

Ce sont des paramètres qui influent sur le bon fonctionnement et le rendement du distillateur, ces paramètres sont liés au site.

##### **a. Intensité du rayonnement solaire**

C'est le facteur le plus important. C'est une énergie rayonnante de courte longueur d'onde (0.17 à 4  $\mu\text{m}$ ). Le maximum d'intensité est obtenu pour la longueur d'onde 0.47  $\mu\text{m}$  dans le spectre visible. L'intensité globale du rayonnement solaire arrivant aux confins de l'atmosphère sur une surface perpendiculaire est constante et égale à 1.35KW/m<sup>2</sup>. Cependant, l'énergie arrivant au voisinage de la surface terrestre est affaiblie par l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère.

Le coefficient de transmission est assez constant en cours d'année et se situe entre 0.7 et 0.9. Plusieurs études montrent que l'irradiation globale reste le paramètre le plus influent sur le fonctionnement d'un distillateur solaire.

##### **b. La vitesse du vent :**

L'effet convectif sur la face de la vitre joue un rôle important sur le fonctionnement du système. En effet, si la condensation se fait sur la surface inférieure de la vitre, elle doit

être refroidie mais pas trop. Par contre, si elle sert juste à obtenir l'effet de serre, elle ne doit pas être trop refroidie.

#### **c. Température de l'air ambiant**

Cette température intervient dans les échanges thermiques entre la partie interne et le milieu extérieur.

#### **d. Paramètres météorologiques**

L'humidité de l'air, la pluviométrie et l'intermittence des nuages doivent être pris en considération dans la mesure, où ces facteurs modifient le bilan thermique du distillateur.

#### **e. Paramètres géographiques**

La latitude du lieu et la saison sont des paramètres essentiels puisqu'elle détermine la position et l'orientation par rapport au soleil.

#### **f. Nature de l'eau à traiter**

La nature de l'eau salée influe sur la production et sur son coût puisqu'elle délimite le choix du prétraitement et le rendement.

### **2.3.2. Paramètres internes**

#### **a. Paramètre de position**

- L'emplacement : Le distillateur doit être placé de façon à éviter les obstacles (effet de masque), qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.
- L'orientation : elle dépend essentiellement du fonctionnement du distillateur durant la journée. On distingue ;
  - Fonctionnement pendant la matinée → orientation Est,
  - Fonctionnement pendant l'après -midi → orientation Ouest,
  - Fonctionnement durant toute la journée → orientation Sud.
- L'inclinaison : elle dépend du fonctionnement du distillateur durant l'année :
  - Fonctionnement estival →  $\beta = \theta - 10^\circ$
  - Fonctionnement hivernal →  $\beta = \theta + 20^\circ$
  - Fonctionnement annuel →  $\beta = \theta + 10^\circ$

Où  $\theta$  représente la latitude

## **b. Paramètre de construction**

### **▪ Couverture (vitrage ou autre)**

La couverture intervient essentiellement par :

- Sa nature,
- Sa mouillabilité par l'eau,
- Sa transparence au rayonnement solaire,
- Son opacité au rayonnement infrarouge des grandes longueurs d'ondes,
- Sa résistance aux attaques du vent et des particules solides,
- Le nombre de vitres dans le cas où la couverture est vitrée,
- Son inclinaison par rapport à l'horizontal.

Une étude expérimentale du C.D.E.R. montre que le verre reste le plus adéquat malgré une production plus élevée pour une couverture en plexiglas (plexiglas : 2,63litre/jour, verre : 2.23litre /jour) vu que l'installation de ce dernier demande une maintenance plus fréquente (déformation du plexiglas, décollement des extrémités).

### **▪ Inclinaison :**

L'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale doit faire l'objet d'un choix judicieux. Il doit permettre de maximiser la quantité d'énergie solaire introduite dans le distillateur et minimiser la distance entre saumure et vitre. L'inclinaison influe d'autre part sur les équations des bilans énergétiques des différents constituants du distillateur.

### **▪ L'absorbeur :**

Les tests menés par certains chercheurs ont montré que la surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique ou en verre ordinaire). Le choix de la matière de la surface absorbante ou bac noir dépend de son inertie thermique, de la résistance à l'oxydation par l'eau et les dépôts minéraux.

### **▪ Distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation :**

Ce paramètre détermine l'intensité des pertes thermiques latérales par convection, et l'épaisseur de la couche tampon qui freine l'échange entre la surface d'évaporation et la surface de condensation.

## **Paramètres de la saumure :**

Plus l'épaisseur de la nappe d'eau est importante, moins sa température fluctue au cours de la production. L'inertie thermique augmente avec l'épaisseur, et la durée de fonctionnement nocturne croît également avec l'épaisseur. Cependant, la production

moyenne sur 24 heures diminue lorsque l'épaisseur augmente. Des expériences ont montré que cette production suit la loi suivante :

$$y = \frac{a}{x+b} + c \quad (2.1)$$

- Y: la production,
- X: l'épaisseur de la saumure,
- a, b, c paramètres dépendant de la forme de l'appareil et des conditions locales,

- Température de la saumure : les expériences réalisées dans le Sahara algérien sur les distillateurs solaires à effet de serre ont montré que le débit instantané en fonction de la température suit une loi hyperbolique selon :

$$y = \frac{51.607}{117 - T} - 0.613$$

Avec :

- Y: le débit instantané, exprimé en litre par heure.
- T: la température, en degré centigrade de la saumure dans la couche supérieure.

Lorsque la température de la saumure augmente ; un dépôt sur la surface libre de l'eau due à la formation de carbonates insolubles dans la saumure a été observé. Le dépôt salin agit sur le pouvoir absorbant de la surface noire et fait chuter considérablement la production. La production du distillateur diminue quand la concentration en sels augmente.

### c. Paramètres optiques

Les paramètres sont l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmittivité de la surface absorbante et de la couverture.

### d. Paramètres thermo-physiques

Les paramètres thermo-physiques sont :

- La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique de la couverture et la surface absorbante.
- La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique de la saumure

- La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique et le coefficient de dilatation thermique du mélange air vapeur [22].

## 2.4. Transfert thermique

Dans un distillateur solaire de type Hot-Box, on trouve les trois modes de transfert de chaleur, à savoir la conduction, la convection, et le rayonnement, le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'existe entre eux une différence de température et cela quel que soit le milieu, (même le vide), qui les sépare. L'étude théorique du distillateur consiste à écrire les bilans d'énergie sur chaque élément.

### 2.4.1. Conduction

La conduction est définie comme étant le mode de transfert de chaleur provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux. L'effet macroscopique observable est une égalisation des températures du système. Cependant si certaines zones sont maintenues à température constante par apport de chaleur (réservoir de chaleur) ou évacuation de chaleur (puits de chaleur), il s'établit un transfert continu de la chaleur de la région chaude vers la région froide. La loi de Fourier décrit le flux de chaleur échangé par conduction. Elle s'écrit dans le cas unidirectionnel :

$$\Phi = dQ = -\lambda \times S \times \frac{dT}{dX} \quad (2.2)$$

$dQ$  : Energie élémentaire (J).

$\lambda$ : Conductivité thermique du matériau ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ).

$S$  : Section ( $m^2$ ).

$dt$  : Temps élémentaire (s).

$\frac{dT}{dX}$ : Gradient de température ( $K.m^{-1}$ )

### 2.4.2. Convection

Dans un processus de convection le transfert de chaleur a lieu entre la surface d'un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\Phi = h \times S \times (T_p - T_\infty) \quad (2.3)$$

$\Phi$ : Flux de chaleur transmis par convection (W).

$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m<sup>2</sup>. K).

$T_p$  : Température de la surface solide (K).

$T_\infty$  : Température du fluide loin de la surface solide (K).

(S):La surface de contact solide/fluide (m<sup>2</sup>)

### 2.4.3. Rayonnement

Tout corps chauffé émet par sa surface extérieure un rayonnement électromagnétique dont la puissance est fonction de sa température ; c'est le rayonnement thermique. L'analyse spectrale de ce rayonnement montre une majorité de courtes longueurs d'onde aux très hautes températures et une majorité de grandes longueurs d'onde pour des températures inférieures à 500 K [2].

D'après la loi de Stéphan, le flux de chaleur échangé entre la surface S et le milieu ambiant peut s'écrire :

$$\phi = \sigma \times \varepsilon \times S \times (T_s^4 - T_a^4) \quad (2.4)$$

$\sigma$  : constante de Stéphan Boltzmann (5.67 10<sup>-8</sup>W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>).

S : surface d'échange (m<sup>2</sup>).

$\varepsilon$  : coefficient d'émission de la surface ( $\varepsilon = 1$  pour un corps noir,  $\varepsilon \ll 1$  pour un corps brillant).

$T_s$  : température de surface du corps (K).

$T_a$  : température ambiante (K)

## **CHAPITRE 3**

### **DISPOSITIF EXPERIMENTAL**

#### **3.1. Description et principe de fonctionnement du distillateur**

Une nouvelle technologie de distillation solaire par stockage d'énergie a été développée pour dessaler les eaux de mer, les eaux saumâtres et la déminéralisation des eaux usées épurées afin d'obtenir une eau distillée pure qui répond aux exigences légales locales et qui satisfait les normes de l'organisation mondiale de la santé (OMS).

Notre distillateur solaire avec stockage d'énergie par l'eau (figure 3.1) est composé de deux unités distinctes :

- deux capteurs solaires plans constituant la source de chaleur, qui sont orientés vers le sud avec une inclinaison optimale pour la saison.

- une unité de distillation qui comporte plusieurs éléments :

- un bac de stockage de l'énergie d'une capacité de 150 l, contenant de l'eau distillée chaude. Cette eau qui constitue le fluide caloporteur, circule entre le capteur et le distillateur par thermosiphon. L'intégration de ce stockage d'énergie solaire permet de prolonger la durée de fonctionnement de notre distillateur après le coucher de soleil et durant la nuit.

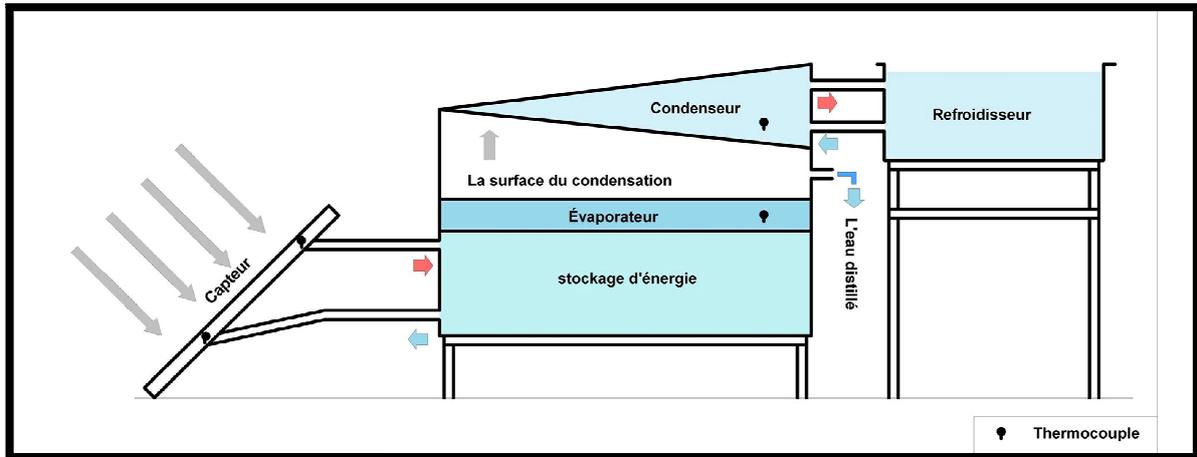
- une enceinte d'évaporation remplis d'eau salée, dont le fond horizontal est commun avec le bac de stockage d'énergie.

- le plafond incliné ( $13^\circ$ ) sert de surface de condensation de la vapeur d'eau et son acheminement vers un collecteur.

- cette surface de condensation peut être refroidie avec l'air ambiant ou avec de l'eau froide issue d'un réservoir.

- un réservoir d'eau froide servant à la condensation.

Le principe de stockage de l'énergie par l'eau est préférable au béton en raison de la conductivité thermique de l'eau, et de la capacité de stockage.



**Figure 3.1 : Schéma du distillateur solaire avec stockage d'énergie par l'eau.**

### 3.2. Conception du distillateur

Le distillateur utilisé lors de nos expériences est d'une conception très simple. Il présente l'avantage d'être facile à construire et surtout à maintenir.

L'installation est essentiellement constituée de :

#### a. Capteur solaire plan

On a utilisé deux capteurs solaires plans (figure 3.2), de la surface 2 m sur 1 m, orientés vers le sud avec une inclinaison de  $13^\circ$ . Ces derniers, sont reliés au bac de stockage d'énergie, permettant le chauffage de l'eau à dessaler.

Il est constitué à l'intérieur de 7 tubes en cuivre, permettant la circulation de l'eau chaude posés sur une surface noire (l'absorbeur), recouverte par une vitre en verre trempée (5mm d'épaisseur).

La chaleur absorbée par l'absorbeur est transmise en partie à l'eau qui par différence de densité circule de bas en haut.



**Figure 3.2 : Capteurs solaires.**

**b. Cuve principale**

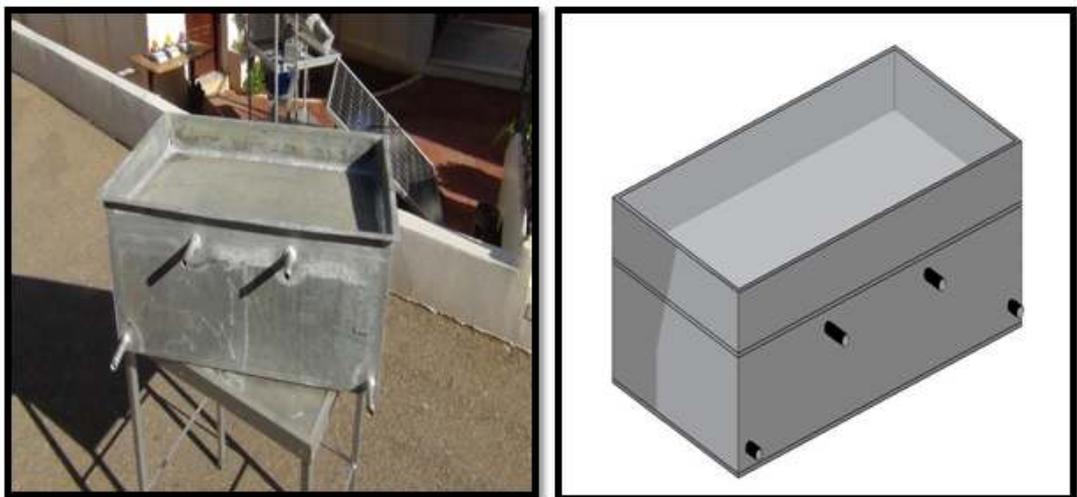
Cette dernière est composée de deux parties construites en acier galvanisé (2 mm d'épaisseur) (figure 3.3) :

- **Bac de stockage d'énergie**

Ce bac est de forme rectangulaire ( $91 \times 55 \times 30 \text{ cm}^3$ ) remplis d'eau distillée chaude provenant du capteur (capacité de 150 l), permettant de chauffer l'eau à dessaler.

- **Enceinte d'évaporation**

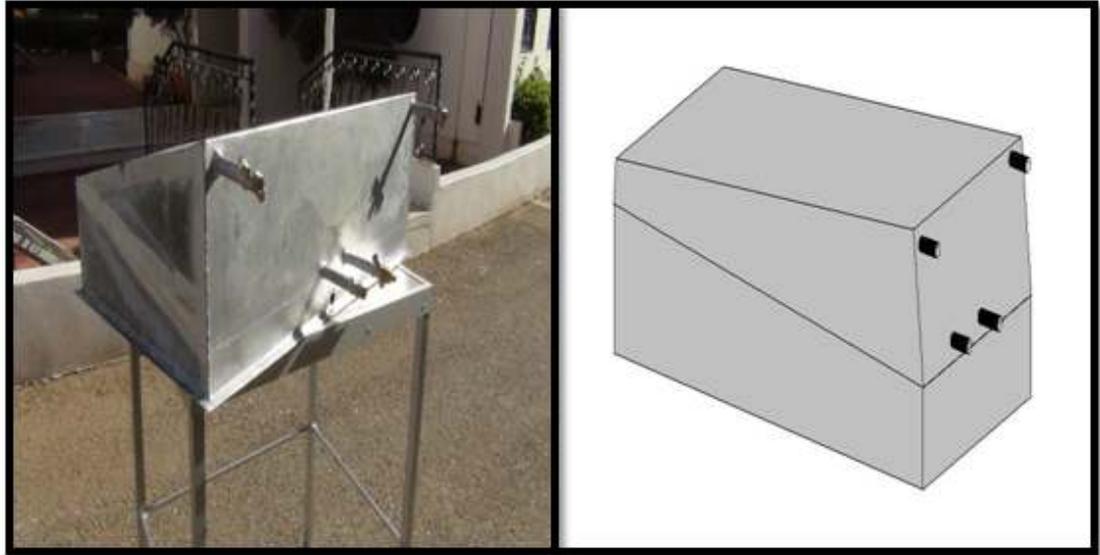
L'enceinte d'évaporation est de forme rectangulaire de dimension  $91 \times 55 \times 7 \text{ cm}^3$ , soit une capacité de 35l, elle est posée sur le bac de stockage, et est remplie d'eau à dessaler. Le fond de la cuve d'évaporation constitue le plafond du bac de stockage de l'énergie à travers lequel la chaleur est transmise entre les deux fluides.



**Figure 3.3 : Cuve principale.**

**c. Condenseur**

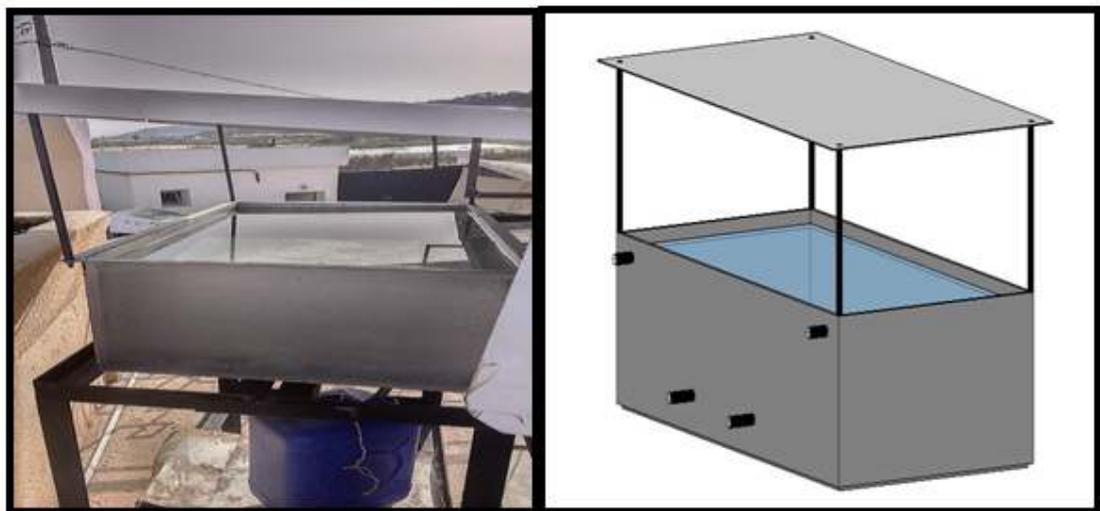
La figure (3.4) présente un bac de forme rectangulaire dont le plafond est incliné. D'une capacité de 64 l, il est rempli d'eau froide provenant du refroidisseur, permettant de condenser la vapeur d'eau sur la surface inclinée. Ce condenseur amovible peut être enlevé pour permettre une condensation à air.



**Figure 3.4. Condenseur.**

**d. Refroidisseur (source froide)**

Il sert de source froide. C'est un réservoir de forme rectangulaire (figure 3.5), d'une capacité de 155 l ( $91 \times 55 \times 31 \text{ cm}^3$ ). Il contient l'eau froide, exposée à l'air ambiant, et est connecté au condenseur.



**Figure 3.5. Refroidisseur (source froide).**

**e. Une isolation thermique**

Sur le dispositif, on a utilisé le polystyrène comme isolant pour le bac de stockage, et le caoutchouc pour les tuyauteries.

**f. Réservoir du distillat**

Il a une capacité de 20 l.

### 3.3. Moyens de mesure

#### 3.3.1. Mesure des températures

Pour mesurer les températures en divers endroits du distillateur, on utilise des thermocouples. Ces derniers sont reliés à un enregistreur de données (data logger) qui reçoit les différences de potentiel générées. Cet appareil transmet ces potentiels à un ordinateur pour les convertir en température. Le tableau ci-dessous montre l'emplacement des thermocouples :

**Tableau 3.1. Emplacement des thermocouples.**

N° de thermocouple	Température des éléments
1	L'eau chaude sortant du capteur vers le bac de stockage
2	L'eau provenant du bac de stockage vers le capteur
3	L'eau à dessaler sur l'évaporateur
4	L'eau du condenseur (source froide)

#### 3.3.2. Mesure du débit

Le débit du distillateur est mesuré à intervalle de temps régulier à l'aide d'une éprouvette graduée et un chronomètre.

#### 3.3.3. Mesure de la qualité de l'eau

La qualité de l'eau distillée est vérifiée par la mesure de la conductivité électrique. Pour cela, nous utilisons un multi paramètres.

#### 3.3.4. Données météorologiques

Les valeurs de l'irradiation solaire et de la température ambiante sont fournies par une station météorologique située près de notre site.

### **3.4. Etude expérimentale**

Dans cette étude nous avons procédé à quatre types d'expérience à travers lesquels, nous avons étudié :

- l'effet de la salinité de l'eau.
- l'effet de la température du refroidissement.
- l'effet des conditions isothermes de condensation.
- l'effet de la surface du capteur.

## **CHAPITRE 4**

### **RESULTATS ET DISCUSSION**

#### **4.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques données météorologiques relatives au site de Bou-Ismaïl et les résultats issus des expériences réalisées sur notre distillateur sous différentes conditions. Ces résultats concernent essentiellement les évolutions journalières des différentes températures, l'ensoleillement, la production de distillat, nous ferons une comparaison avec un distillateur utilisant une couche de béton pour stocker l'énergie.

#### **4.2. Site géographique et données météorologiques**

##### **4.2.1. Site géographique**

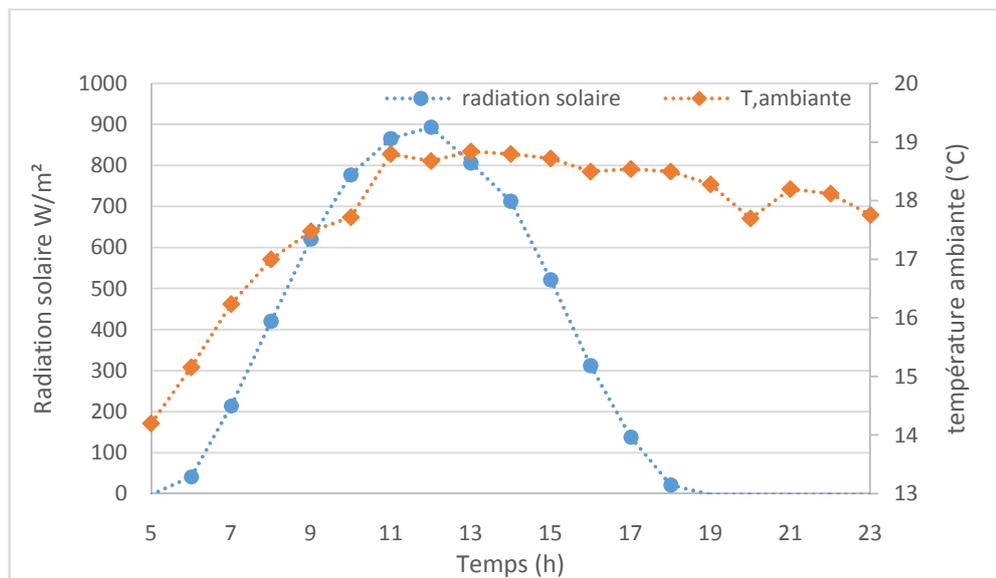
La ville de Bou Ismaïl est à cheval sur deux plaines, une basse, légèrement inclinée vers la mer à 15 mètres d'altitude de moyenne, et une haute à près de 110 mètres de hauteur. Les deux se rejoignent par un ravin abrupt. Elle est bordée à l'ouest par l'Oued Khemisti. Les coordonnées géographiques sont : Latitude 36°38'33" Nord, longitude 2°41'24" Est. L'altitude par rapport au niveau de la mer est de 29 m.

##### **4.2.2. Evolution journalière du rayonnement solaire et de la température ambiante**

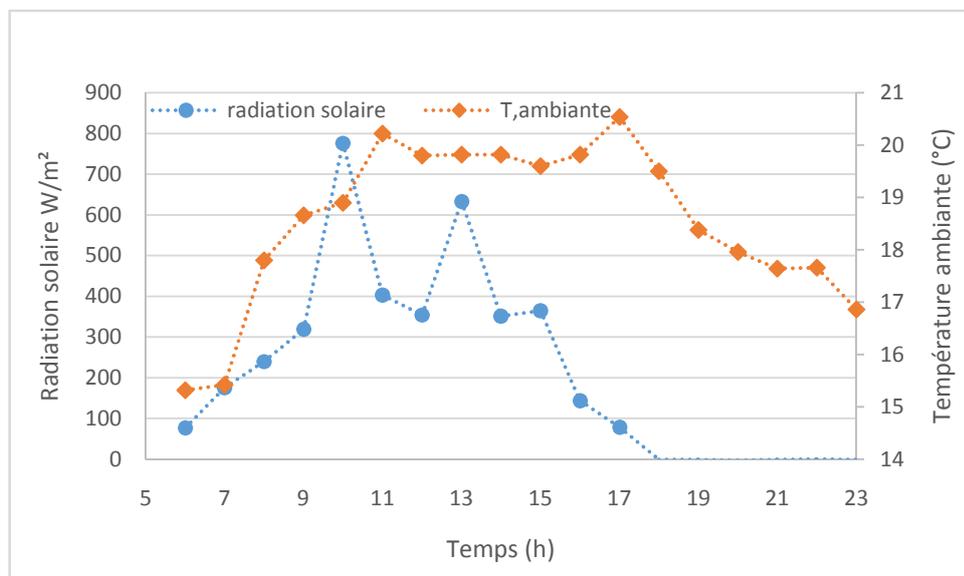
La variation du rayonnement solaire reçu par une surface plane inclinée de 13° par rapport à l'horizontale et de la température ambiante au cours du temps local pendant les tests expérimentaux est représentée sur les figures (4.1) et (4.2) pour deux journées différentes prises par défaut (26/04/2016 et 10/05/2016). Nous remarquons que les deux courbes d'ensoleillement ont une forme gaussienne plus ou moins symétrique et la valeur maximale voisine de 920 W/m<sup>2</sup> est atteinte aux environs de midi pour la journée du 26/04/2016. Il est à noter qu'il y a une perturbation concernant le rayonnement reçu pendant la journée du 10/05/2016 entre 7h20 et 16h40 due aux passages nuageux qui expliquent la diminution de l'éclairement solaire.

Les mesures de l'irradiation solaire obtenues enregistrent un écart important entre la journée du 10/04/2014 et celle du 26/05/2014. Quant à la température ambiante, on remarque qu'elle varie entre 15 et 21°C (saison de printemps) pour les deux journées. Pour

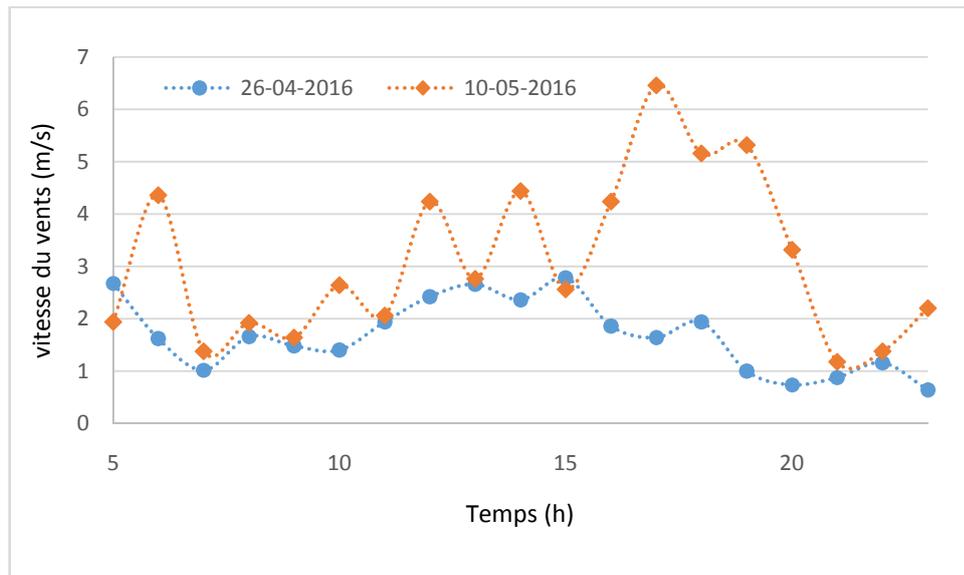
les deux cas, nous observons que la température ambiante augmente rapidement durant la matinée avec le lever du soleil puis diminue graduellement à partir de 11-12 heures. Pour la journée de Mai, elle fluctue en raison des passages nuageux. Sur la figure (4.3), nous avons porté la variation horaire de la vitesse du vent des deux journées. Ce paramètre influe sur la température du vitrage du capteur.



**Figure 4.1 : Evolution journalière de l'irradiation solaire et de la température ambiante (journée ensoleillée).**



**Figure 4.2 : Evolution journalière de l'irradiation solaire et de la température ambiante (journée nuageuse).**

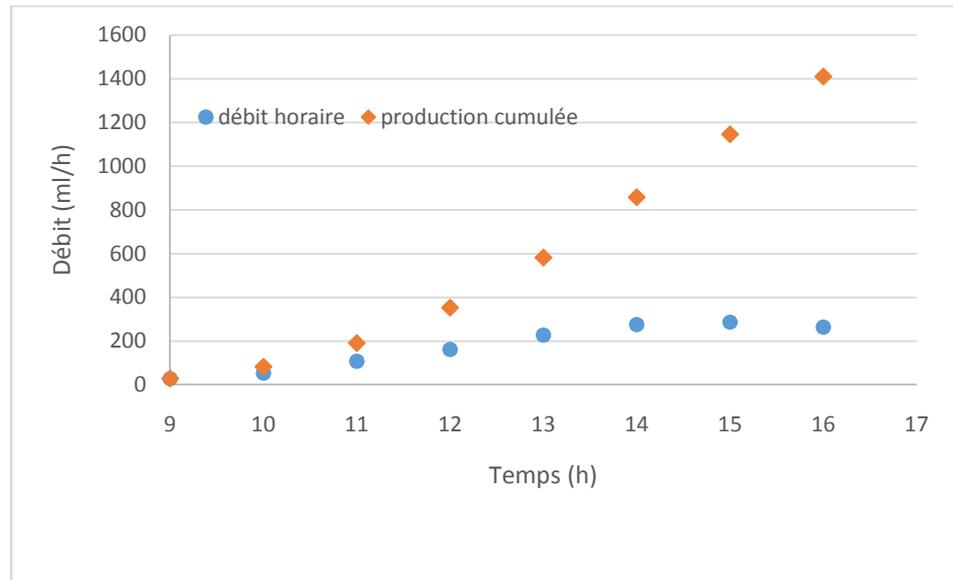


**Figure 4.3 : Evolution de la vitesse du vent en fonction du temps de la journée du 26-04-2016 et 10-05-2016.**

### 4.3. Résultats de la distillation

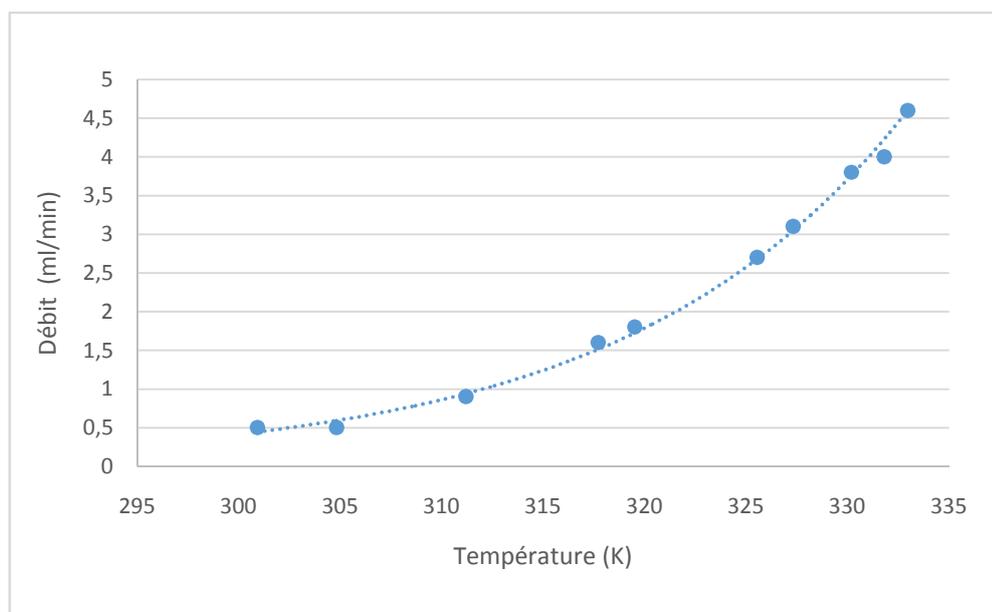
#### 4.3.1. Fonctionnement en condensation avec l'air ambiant

La figure (4.4) présente l'évolution journalière du débit horaire et de la production cumulée dans le cas où la condensation est assurée par l'air ambiant. D'après cette figure, on remarque que le débit instantané augmente durant la matinée jusqu'à atteindre la valeur de 288 ml/h vers 14h, heure à laquelle la température de l'évaporateur est maximale (figure 4.14), puis diminue tout au long de l'après-midi. Sur le même graphe, nous avons également représenté l'évolution du débit cumulé qui montre une production 1410 ml d'eau distillé entre 9h et 16h.



**Figure 4.4 : Evolution du débit instantané et de la production cumulée dans le cas de condensation avec l'air ambiant.**

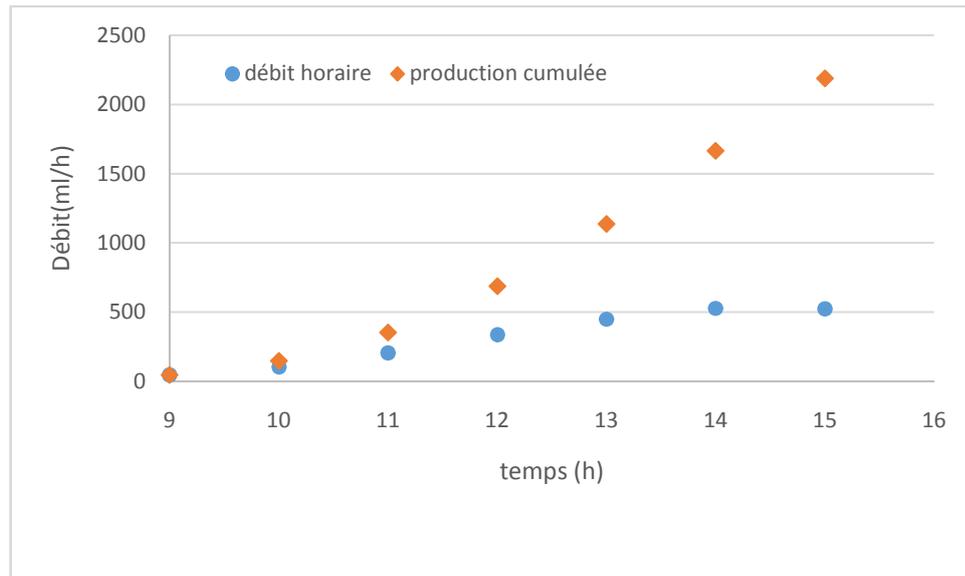
Sur la figure (4.5), nous avons porté la variation du débit de production d'eau distillée en fonction de la température de l'évaporateur chauffé par l'eau provenant du capteur, lui-même influencé par l'ensoleillement et la température ambiante. Elle montre une augmentation du débit du distillat de façon exponentielle en fonction de la température d'évaporateur. A titre d'exemple, le débit atteint 4,8 ml/min à une température d'évaporateur de 50°C.



**Figure 4.5 : Evaluation du débit de distillat en fonction de la température d'évaporateur dans l'utilisation de refroidissement à l'air ambiant.**

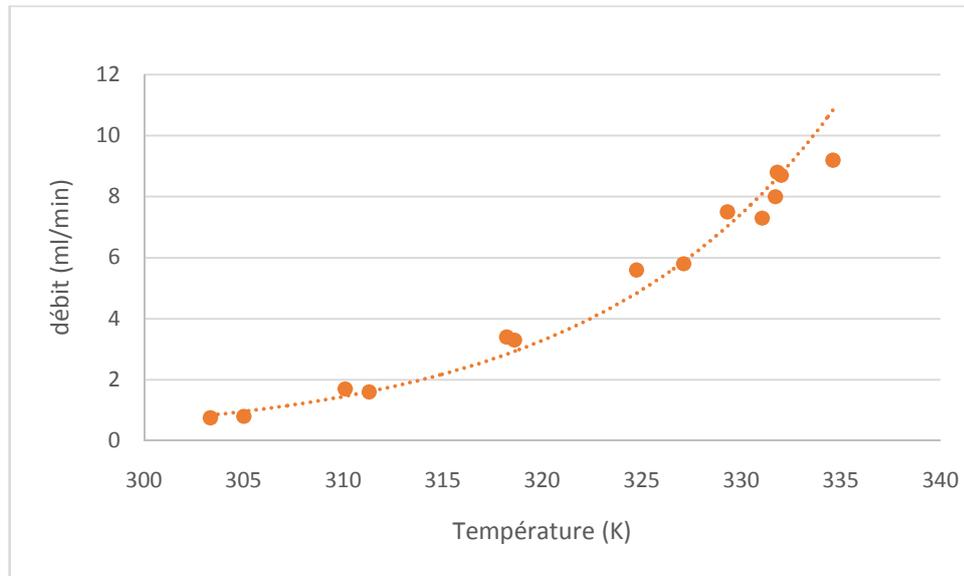
#### 4.3.2. Fonctionnement en condensation avec refroidissement à eau

La figure (4.6) présente l'évolution journalière du débit horaire et de la production d'eau distillée cumulée dans le cas d'une condensation à eau (avec refroidisseur). D'après cette figure, on remarque que le débit horaire augmente au début jusqu'à atteindre 528 ml/h à 14h, puis diminue durant l'après-midi. Par ailleurs, nous avons obtenu une production de 2187 ml d'eau distillée entre 09 h et 16 h.



**Figure 4.6 : Evolution du débit instantané et de la production cumulée dans le cas d'une condensation avec refroidissement (à eau).**

La figure (4.7) montre la variation du débit du distillat en fonction de la température d'évaporateur dans le cas d'une condensation à eau, où le débit atteint 9,2 ml/min à une température d'évaporateur est de 50°C.



**Figure 4.7: Evolution du débit de distillat en fonction de la température d'évaporateur dans le cas d'une condensation à eau (avec refroidissement)**

#### 4.3.3. Modélisation des résultats (modèle dit d'Arrhenius)

Les résultats de l'évolution du débit de distillat en fonction de la température de l'évaporateur, paramètre qui influe directement sur la production, semblent suivre une loi exponentielle. A cet effet, nous les avons modélisés selon le modèle d'Arrhenius.

L'équation choisie s'écrira donc :

$$Q = Q_0 e^{-\frac{C}{T}} \quad (4.1)$$

Avec  $C$  une constante température à déterminer expérimentalement et  $Q_0$  le débit à une température infinie.

La linéarisation de cette équation donne :

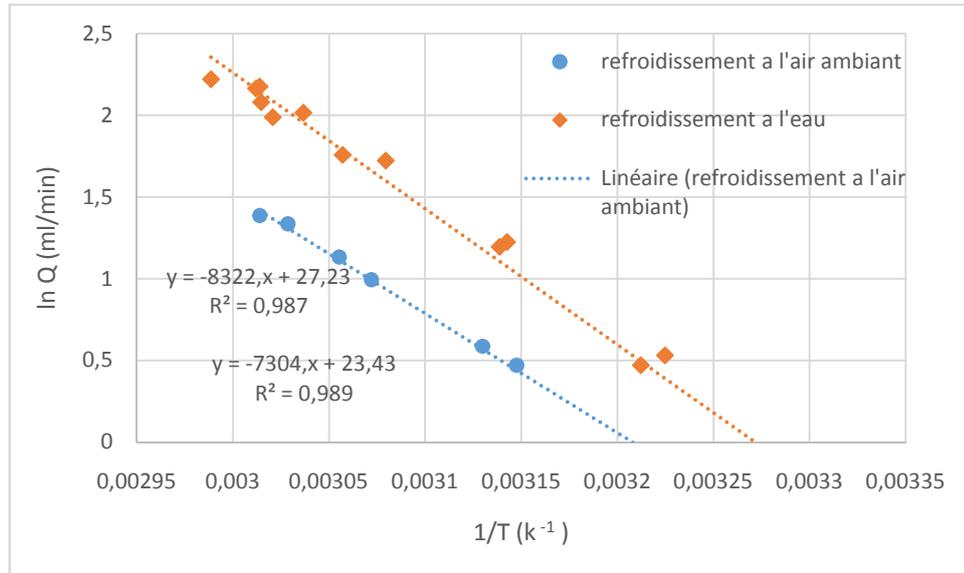
$$\ln(Q) = \ln(Q_0) - \frac{C}{T} \quad (4.2)$$

##### a. Présentation des résultats

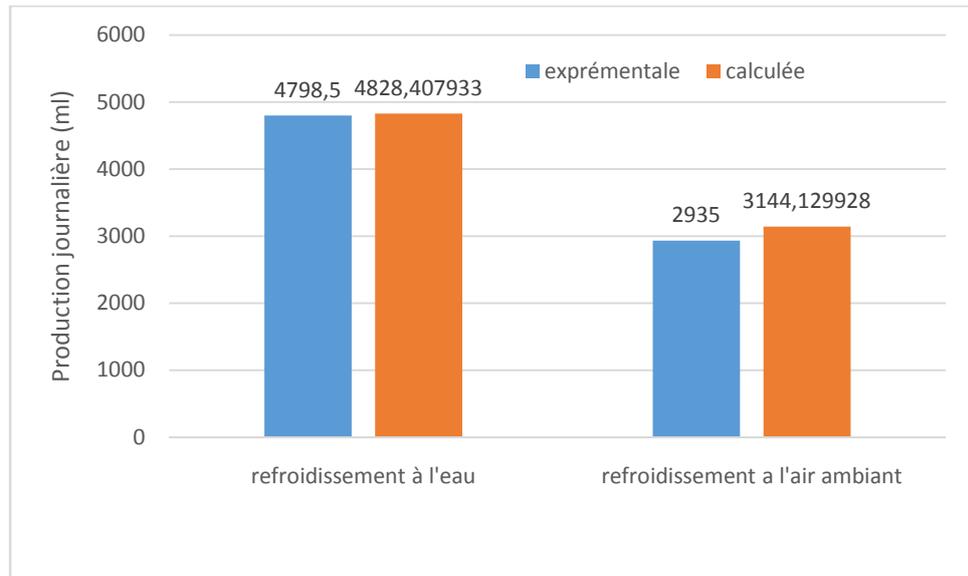
La figure (4.8) présente les résultats linéarisés du débit de distillat en fonction de la température de l'évaporateur obtenus dans les deux cas (sans et avec refroidisseur à eau). Les courbes montrent bien que le modèle de type Arrhenius s'applique ici. Les constantes du modèle sont présentées sur le tableau (4.1) ci-dessous :

**Tableau 4.1 : Coefficients du modèle d'Arrhenius**

Type d'expérience	$\ln Q_0$ (ml/min)	C (K)
Condensation à air	23,54	7340
Condensation à eau	27,23	8322

**Figure 4.8: Comparaison des résultats sous différents modes de condensation (air et eau).****b. Comparaison des résultats**

La figure (4.8) montre bien que la production d'eau distillée est plus importante lorsque le distillateur fonctionne avec un condenseur à eau (refroidisseur). En effet, la température de condensation est plus faible avec l'eau qu'avec l'air ambiant et à température d'évaporation égale, le débit est pratiquement le double. Ceci est confirmé par la figure (4.9) qui montre une production d'eau distillée sur 24 heures plus élevée pour le cas de fonctionnement avec refroidisseur. Par ailleurs, pour vérifier la validité du modèle mathématique, nous l'avons utilisé, connaissant les températures de l'évaporateur sur 24 heures, pour calculer la production sur une journée entière. On constate que les valeurs expérimentale et calculée sont très proches (figure 4.9).

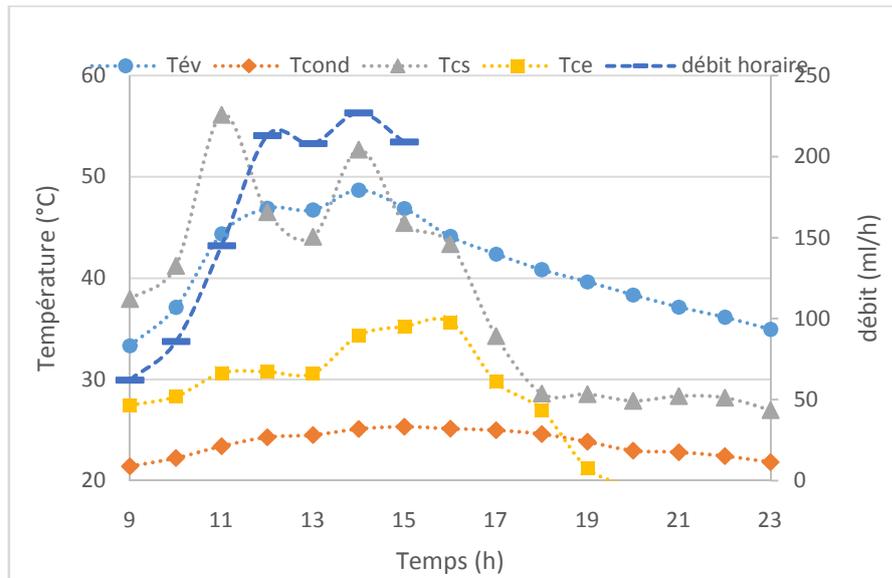


**Figure 4.9: Production d'eau distillée (expérimentale et calculée) dans les deux conditions de condensation avec l'eau et avec l'air ambiant....**

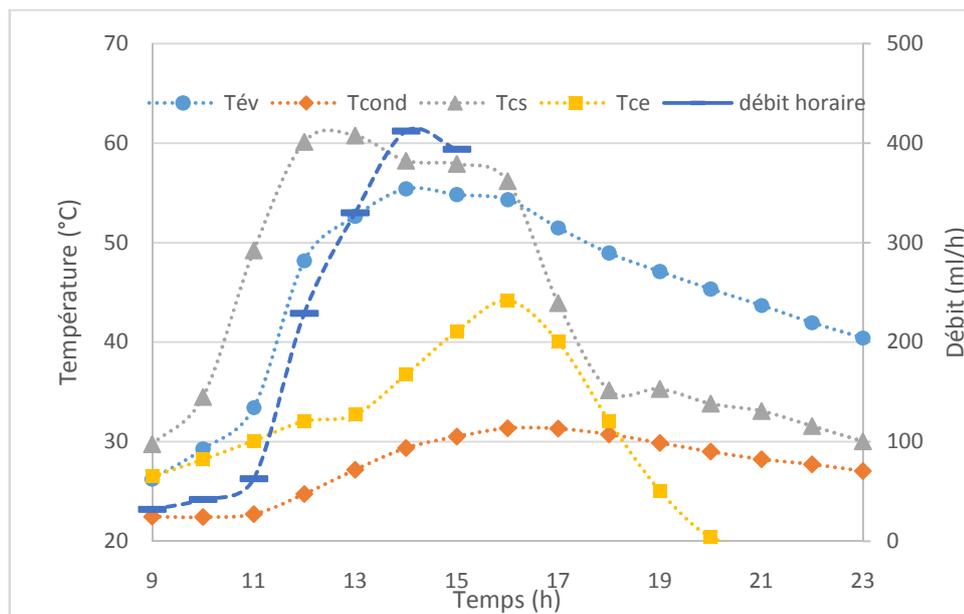
#### 4.4. Effet de l'ensoleillement

Dans cette partie, on a choisi trois jours différents (ensoleillé, peu nuageux, et nuageux) pour voir l'influence de l'ensoleillement sur la production journalière. Nous avons représenté sur les figures (4.10), (4.11) et (4.12) l'évolution des différentes températures en fonction du temps, à savoir la température d'évaporation ( $T_{év}$ ), la température de l'eau de condensation ( $T_{cond}$ ), la température du fluide caloporteur (eau de chauffage) à la sortie du capteur ( $T_{cs}$ ), la température du fluide caloporteur à l'entrée du capteur ( $T_{ce}$ ) obtenues lors de nos expériences.

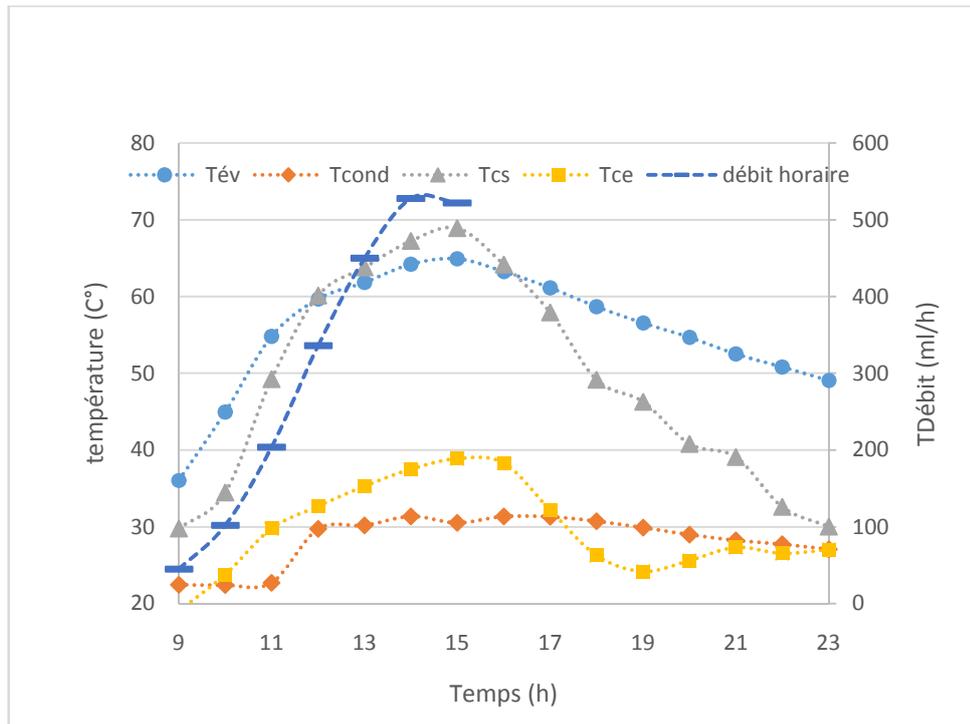
Nous remarquons que les températures augmentent avec le temps, passent par un maximum diminuent. Les maxima sont situés vers 13 h pour  $T_{cs}$  et  $T_{év}$ , vers 15 h pour  $T_{cond}$  et  $T_{ce}$ . En effet, les deux premières influencées directement par l'irradiation solaire, influe sur le débit de distillat dont le maximum est situé vers 13 h. Les deux dernières températures qui ont un maximum décalé, ont une certaine inertie.



**Figure 4.10 : Variation de différentes températures et du débit instantané en fonction du temps (10-05-2016).**

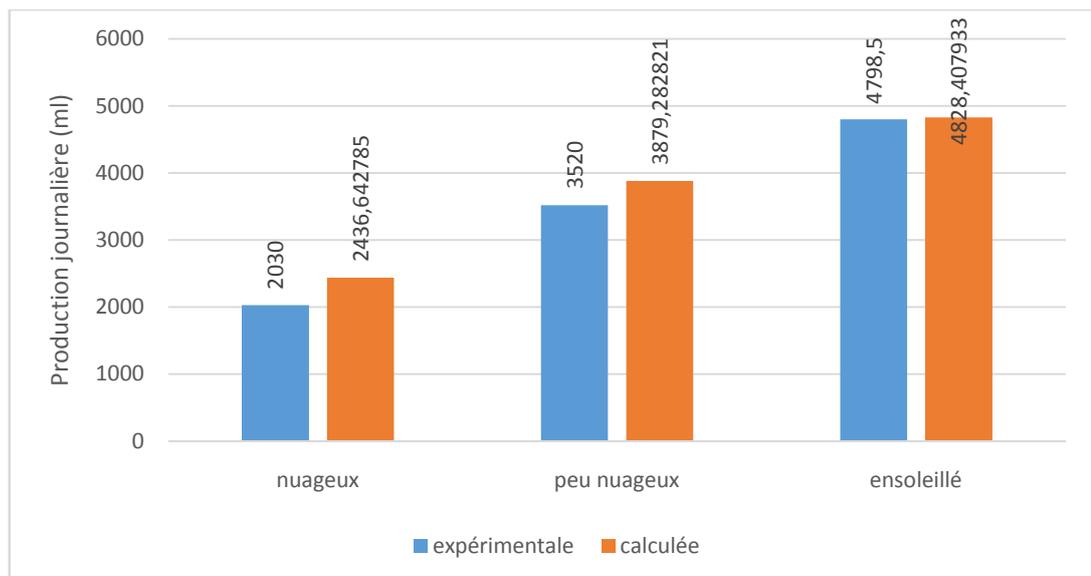


**Figure 4.11 : Variation de différentes températures et du débit instantané en fonction du temps (17-04-2016).**



**Figure 4.12 : Variation de différentes températures et du débit instantané en fonction du temps (26-04-2016).**

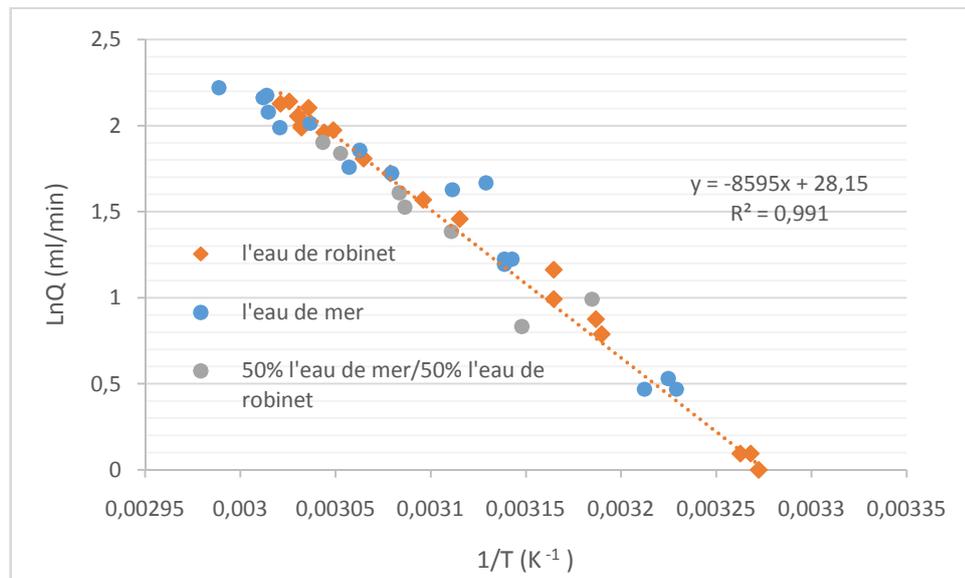
Nous avons porté sur la figure (4.13), les quantités d'eau distillée produites durant les 3 différentes journées. Comme prévu, on remarque que la production la plus élevée est obtenue durant la journée ensoleillée (4800 ml en 24 heures). Durant la journée nuageuse, la production est seulement de 2000 ml.



**Figure 4.13 : Production d'eau distillée dans différentes journées (ensoleillée, peu nuageuse, et nuageuse).**

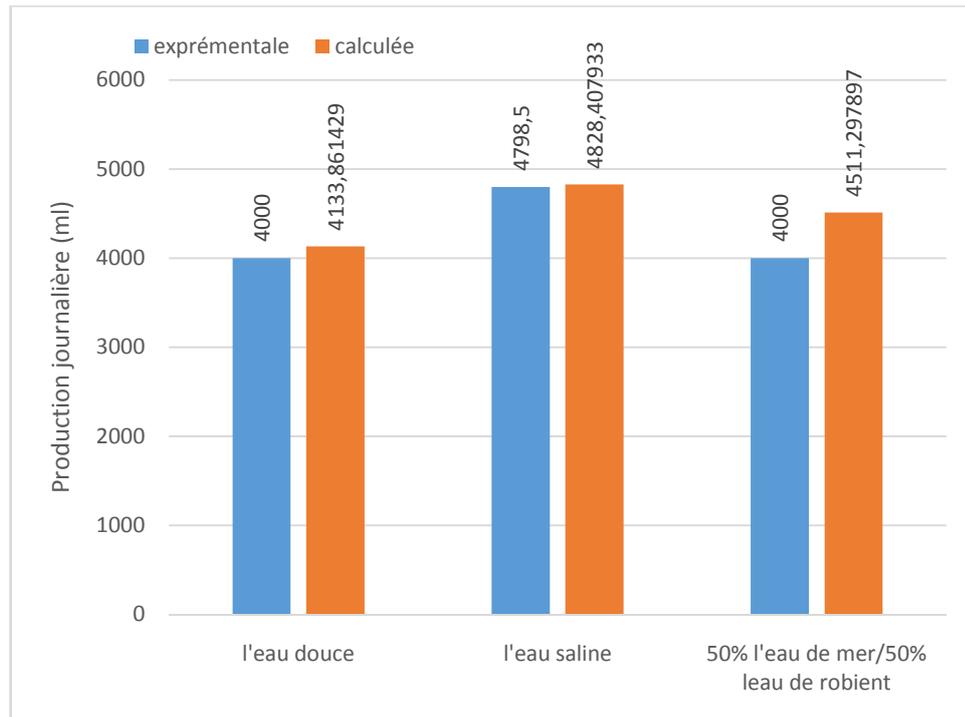
#### 4.5. Effet de la salinité

La figure (4.14) montre l'évolution du débit du distillat en fonction de la température d'évaporateur pour 3 salinités différentes. On a utilisé l'eau de robinet, l'eau de mer et un mélange à 50% en masse eau de robinet/eau de mer. On remarque que les courbes se superposent, ce qui montre que pour salinité inférieure ou égale à 35 g/l, celle-ci n'a pas d'effet remarquable sur la production d'eau distillée.



**Figure 4.14 : Evolution du débit de distillat en fonction de la température de l'évaporateur (effet de la salinité).**

Sur la figure (4.15), nous avons représenté la production, sur 24 heures, d'eau distillée obtenue pour les trois salinités étudiées. La quantité produite avec l'eau de mer semble un peu plus élevée qu'avec les autres salinités. Cette différence s'explique par les journées différentes où les conditions météorologiques ne sont pas identiques.

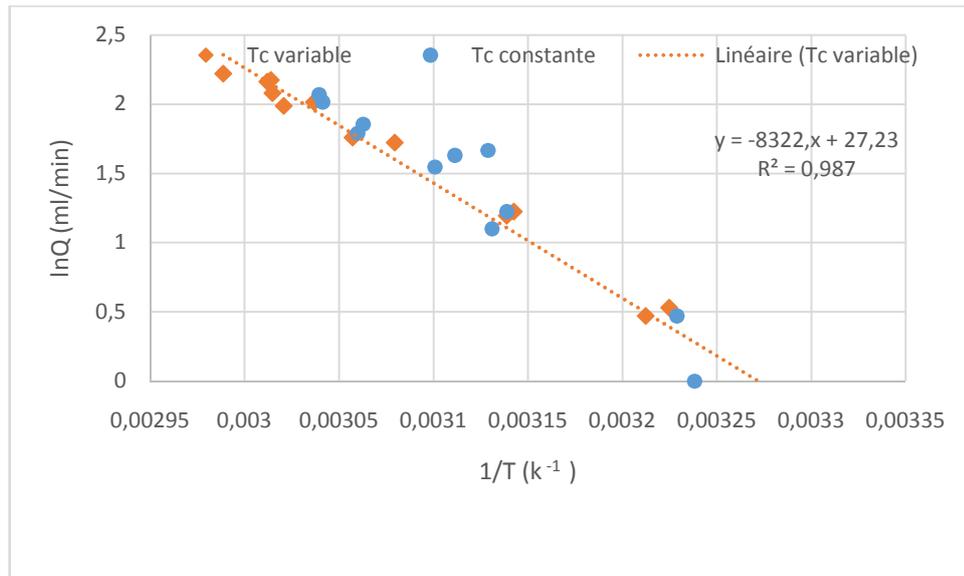


**Figure 4.15: Production journalière d'eau distillée (expérimentale et calculée) dans les trois cas (eau de mer, eau de robinet et mélange à 50% en masse).**

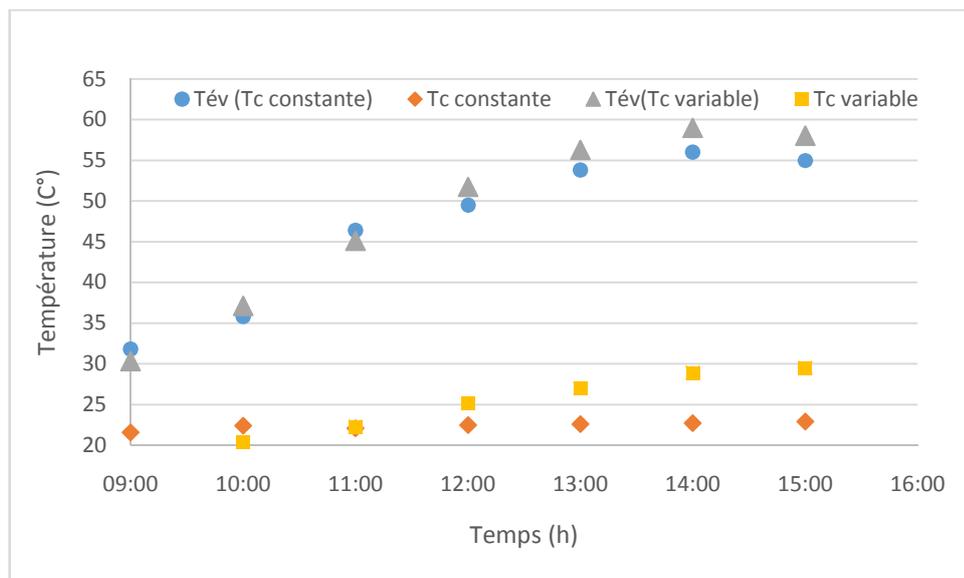
#### 4.6. Résultats avec source froide isotherme

La figure (4.16) représente l'évolution du débit de distillat en fonction de la température d'évaporateur dans les deux cas (source froide isotherme et source froide à température variable). La température de la source froide est maintenue constante par alimentation continue en eau du robinet de la réserve d'eau de condensation. On constate que les deux courbes se superposent. Ceci est dû au fait que les températures de la source froide (condensation) sont proches. Dans le cas d'une source froide non isotherme, la température varie peu en raison de la masse importante de l'eau de refroidissement. La figure (4.17) qui montre l'évolution journalière du débit de distillat et la figure (4.18) qui représente la quantité de distillat produite le confirment.

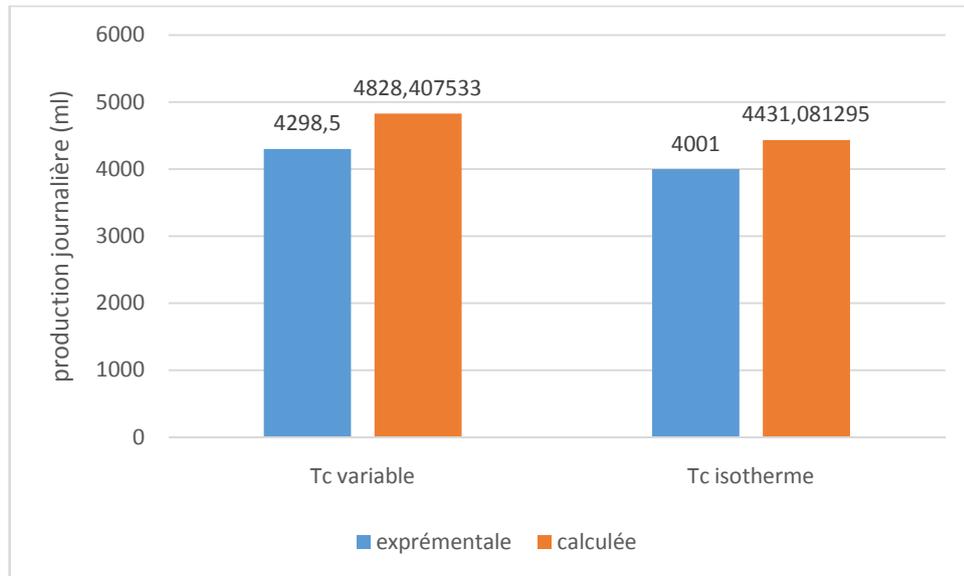
A partir des résultats ci-dessus, on conclut que la masse d'eau de refroidissement (150 kg) est suffisante pour avoir une bonne condensation similaire à celle que donnerait une alimentation continue en eau de robinet.



**Figure 4.16 : Evolution du débit de distillat en fonction de la température de l'évaporateur - Effet de la température de la source froide.**



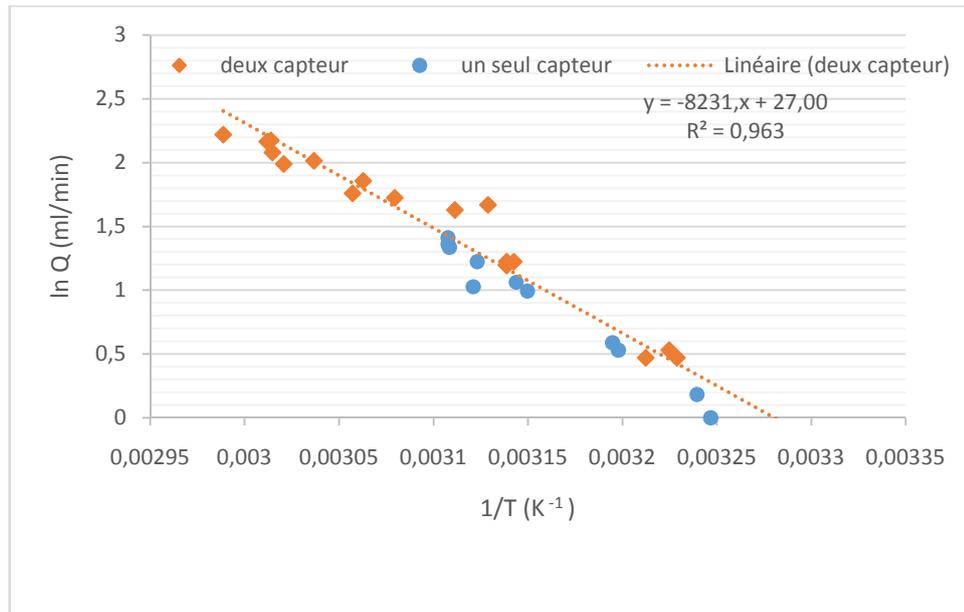
**Figure 4.17: Evolutions des températures d'évaporation et de condensation en fonction du temps - Effet de la température de la source froide.**



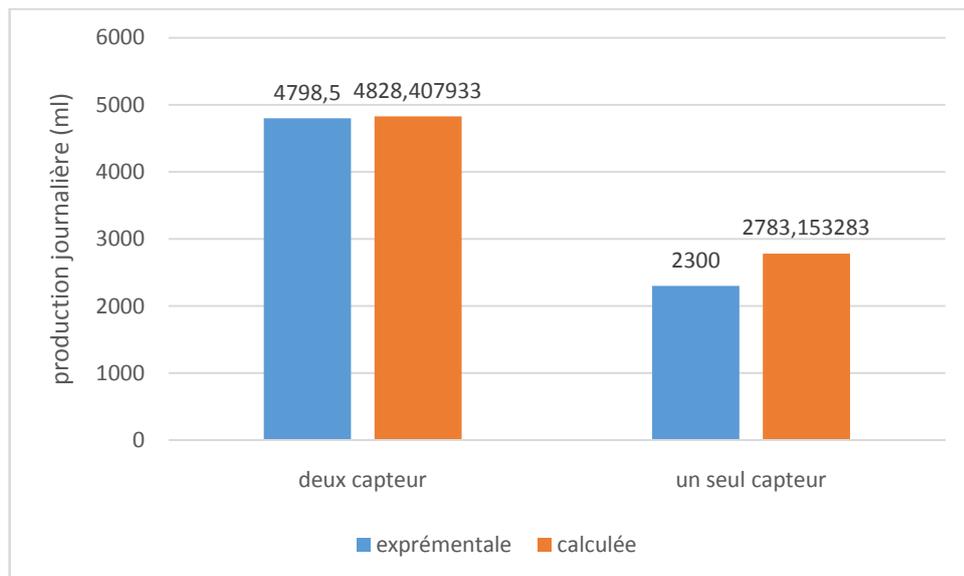
**Figure 4.18 : Production d'eau distillée (expérimentale et calculée) dans les cas d'une source froide à température constante et variable.**

#### 4.7. Effet de la surface du capteur

La figure (4.19) représente le débit de distillat en fonction de la température d'évaporation dans le cas d'utilisation d'un seul capteur et dans le cas de deux capteurs (surface double). On observe que les deux courbes sont superposées pour des températures inférieures ou égales à 49°C valeur maximale atteinte par l'évaporateur dans le cas d'un seul capteur (2 m<sup>2</sup>). Avec l'utilisation de deux capteurs (4 m<sup>2</sup>), on atteint une température de 61°C. Ceci implique que la production sera plus importante dans le cas de deux capteurs ce qui est vérifié sur la figure (4.20) où le débit de distillat produit est plus que doublé.



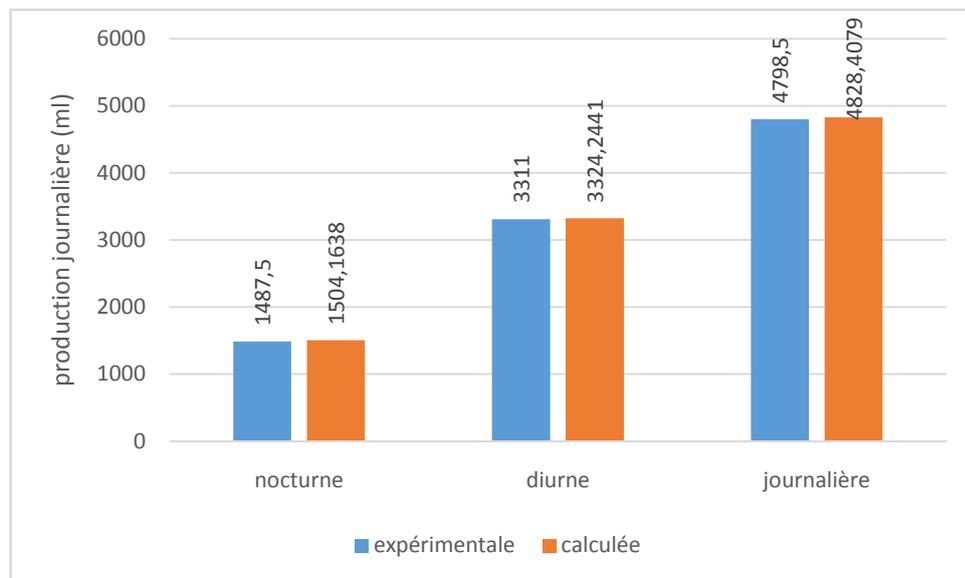
**Figure 4.19 : Variation du débit de distillat en fonction de la température d' 'évaporation - Effet de la surface du capteur sur le débit de distillat.**



**Figure 4.20 : Production journalière (expérimentale et calculée) d'eau distillée – Effet de la surface du capteur.**

#### 4.8. Effet du stockage de l'énergie

Pour vérifier l'effet du stockage de l'énergie par la masse d'eau, nous avons représenté sur la figure (4.21), la production d'eau distillée obtenue durant le jour (du lever au coucher du soleil), durant la nuit et durant la journée entière. On constate que la production nocturne représente, environ la moitié de la production diurne ce qui très important compte tenu de l'absence de rayonnement solaire et cela montre l'effet de stockage de l'énergie.



**Figure 4.21: Production d'eau distillée nocturne et diurne (effet du stockage de l'énergie).**

#### 4.9. Comparaison avec un distillateur avec stockage d'énergie sur béton

Nous avons comparé nos résultats avec ceux obtenus par nos camarades qui ont travaillé sur un distillateur solaire utilisant une couche de béton pour stocker l'énergie. Le bloc de béton est traversé par un serpentin dans lequel circule un fluide caloporteur provenant du capteur solaire. La saumure est également chauffée par les rayons du soleil à travers un vitrage.

Nous avons porté sur le tableau (4.2) les résultats obtenus.

**Tableau (4.2) : Comparaison entre deux distillateurs avec deux modes de stockage d'énergie.**

Type de distillateur	Production diurne (ml) 08h-16h	Production nocturne (ml) 16h-08h	Production journalière (ml) 24h	Production ramenée à une surface de 0,5m <sup>2</sup>
Avec stockage d'énergie à béton	1800	2800	4600	2300
Avec stockage d'énergie à l'eau	2020	2200	4220	4220

On constate qu'à surface d'évaporation égale (0,5 m<sup>2</sup>), le distillateur avec stockage d'énergie à eau produit presque le double d'eau distillée en une journée pour une même surface de capteur. Durant le jour, ce distillateur est beaucoup plus efficace. Durant la phase nocturne, le stockage par béton montre ses performances avec une production élevée. Mais ramenée à une surface d'évaporation identique à la nôtre, la production avec stockage d'énergie à eau est meilleure.

#### 4.10. Calcul des pertes d'eau

Un des paramètres qui caractérise le distillateur, est la perte d'eau (quantité d'eau brute utilisée pour produire une quantité d'eau distillée). Pour évaluer ce paramètre, on fait le bilan massique suivant :

**Volume des pertes** = volume entré initialement dans l'évaporateur – (volume de distillat + volume restant)

Pour cette expérience, on a rempli l'évaporateur de 30 litres d'eau de mer et on a récupéré le distillat de 4 jours, en suite on a mesuré le volume de saumure restant. On a obtenu :

$$\text{Volume des pertes} = 30 \text{ l} - (12,3 \text{ l} + 15,7 \text{ l})$$

$$\text{Volume des pertes} = 2 \text{ l}$$

$$\text{Le pourcentage des pertes} = \frac{2}{30} = 0.0667 = 6.67 \%$$

On constate que le volume des pertes, qui est sans doute perdu par évaporation, présente 6,67 % de volume d'eau brute utilisée.

#### 4.11. Rendement du distillateur

Le rendement du distillateur est défini par :

$$\eta = \frac{\text{énergie nécessaire à l'évaporation}}{\text{énergie solaire incidente}}$$

Soit :

$$\eta = \frac{L_v \cdot m_d}{I_r}$$

Avec :

$L_v$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau de mer (kJ/kg)

$I_r$  : énergie solaire incidente (W)

$$I_r = S \int G dt = \cong S \sum G_i \Delta t_i$$

Avec :

$G_i$  : l'irradiation solaire chaque 5 minutes (W/m<sup>2</sup>).

$S$  : surface des capteurs solaires (4 m<sup>2</sup>)

$\Delta t_i$  : intervalle de temps (5 min).

$m_d$  : masse de distillat produite (kg)

On a choisi le 26 avril comme journée-type pour calculer le rendement du distillateur.

Premier cas (rendement de 24h) :

$$\eta = \frac{2802.61 * 1000 * 4.8}{78544.89 * 5 * 4 * 60} = \mathbf{0.14}$$

Deuxième cas (rendement de 09-16h) :

$$\eta = \frac{2802.61 * 1000 * 2.8}{57575.3 * 5 * 4 * 60} = \mathbf{0.11}$$

#### 4.12. Aspect financier

La réalisation de notre distillateur a coûté la somme de 120.750 Dinars algériens. Les coûts des différents éléments sont détaillés sur le tableau situé dans l'appendice D.

Après avoir estimé le coût du notre distillateur avec l'utilisation de capteurs locaux ou importés, on calcule le prix d'un litre d'eau distillée produite et on le compare avec l'eau commercialisée. Pour cela, on a évalué la production la moins favorable de chaque saison afin de choisir l'amortissement de 5, 10, ou 15 ans.

Le tableau suivant présente cette production défavorable:

**Tableau 4.3 : Production journalière d'eau distillée pour les quatre saisons**

Saison	Hiver	Printemps	Eté	automne
Production moins favorable (l)	1	2.5	5	2.5

Ceci nous donne **990 l** d'eau distillée produite par année.

Le prix d'un litre pour un amortissement de 5 ans

a. Le coût avec des capteurs locaux

$$\text{Prix} = 40.750 / 990 / 5$$

$$\text{Prix} = 8,23 \text{ DA/l}$$

b. Le coût avec des capteurs importés

$$\text{Prix} = 120.750 / 990 / 5$$

$$\text{Prix} = 24,39 \text{ DA/l}$$

Les prix des autres amortissements sont cumulés sur le tableau (4.4) ci-dessous :

**Tableau 4.4 : Prix du litre d'eau distillée produite pour les trois amortissements**

Amortissement	Avec capteurs locaux	Avec capteurs importés
5 ans	8.23 DA /l	24.39 DA /l
10 ans	4.11 DA/l	12.19 DA/l
15 ans	2.74 DA/l	8.13 DA/l

A titre indicatif, un litre d'eau distillée commercialisée coûte 50 DA.

## **Introduction générale**

Sur le plan mondial, la demande de l'eau potable de bonne qualité est de plus en plus forte, en effet, la population augmente rapidement et les besoins en eau de l'industrie et de l'agriculture sont de plus en plus élevés.

En Algérie le problème d'approvisionnement en eau potable est déjà posé, d'abord il faut mettre des mécanismes pour diminuer le gaspillage et les fuites d'eau, car cette substance reste insuffisante. Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place. Parmi les techniques prometteuses il y a : le dessalement de l'eau de mer par distillation ou par l'osmose inverse

L'inconvénient majeur de ces systèmes est qu'ils sont très coûteux. Les installations sont peu rentables.

Un dispositif dit "distillateur solaire avec stockage d'énergie à l'eau" a ainsi été créé qui vise à limiter la dépense énergétique des systèmes précédents en utilisant l'énergie solaire pour évaporer l'eau de mer.

Une amélioration vient cependant de leur être apportée qui permet de réduire encore les pertes énergétiques tout en gagnant en simplicité. Peu coûteux, modulable, très simples à installer et à entretenir, et capables de produire, à un moindre coût énergétique, de 5 à 15 litres d'eau douce par jour, ce nouveau système devra plaire aux pays les plus intéressés par le dessalement.

L'objectif de notre travail est porte sur l'intégration de l'énergie solaire par l'étude d'un distillateur solaire avec stockage d'énergie afin d'obtenir de l'eau distillée qui pourra pallier les besoins en eau distillée au niveau de centre de recherche l'UDES (Unité de Développement des Equipements Solaires) à la région de Bou Ismail d'une part et l'étude de l'effet qualitatif de l'eau utilisée pour alimenter le distillateur d'autre part.

Ce travail est traduit par une étude générale sur le dessalement relayée au premier chapitre.

Nous avons présentés au deuxième chapitre une bibliographie exhaustive accompagnée avec une étude théorique sur les distillateurs solaire et leurs principes de fonctionnement.

Au troisième chapitre nous avons présentés la réalisation du distillateur solaire avec stockage d'énergie et l'étude expérimentale qui consiste à observer les évolutions.

Le quatrième chapitre est consacré à l'exploitation des résultats expérimentaux.

La conclusion générale de ce mémoire reprend les principaux résultats de nos travaux de recherche, ainsi que les remarques générales à l'égard de ceux-ci, des perspectives sont également présentées tant au niveau des développements à venir sur ce travail qu'au niveau des voies ouvertes par l'usage de ce dernier.

Enfin, la partie appendice comprend notamment, les différents tableaux de calculs.

## Références bibliographiques :

- [1] O.CHARROUF, Optimisation d'un Système de dessalement renouvelable, thèse de magister en électrotechnique, (2012).
- [2]. I.SAOUANE, Etude des transferts de chaleur et de masse à l'intérieur d'un système de dessalement par voie solaire, thèse de magister en physique, (2010).
- [4] I.TABET, Etude d'un distillateur solaire à cascade, thèse de magister en physique, Algérie 2010.
- [5] M. MAHMOUDI, Conception et réalisation d'un distillateur solaire à effet de serre, étude expérimentale, thèse de magister (2015 Algérie).
- [6] A.RICH, Dessalement de l'eau de mer par congélation sur parois froides : aspect thermodynamique et influence des conditions opératoires, 2014.
- [7] M.ZEROUALI, Contribution à l'optimisation des performances d'un distillateur solaire, thèse de magister en physique, (2012).
- [8] G.N. TIWARI, A. KUPFERMANN, SHRUTI AGGARWAL, a new design for a double-condensing chamber solar still, Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology Delhi, Hauz Khas, New Delhi 110016, 1997, India 153-164.
- [9] B.A. JUBRAN, M.I. Ahmed, Numerical modelling of a multi-stage solar still, Department of Mechanical Engineering, 29 September 1999 ,1107-1121.
- [10] O.O. BADRAN, H.A. Al-TAHAIEH, The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity, Faculty of Engineering Technology, Mechanical Engineering Department, Al-Balqa Applied University, February 2005, 137–142.
- [11] HILAL Al-HINAI, MS. Al-NASSRI, Parametric investigation of a double-effect solar still in comparison with a single-effect solar still, Sultan Qaboos University, Department of Mechanical and Industrial, Engineering, P.U.B. 33, AE Khoud 123, Muscat, Sultanate of Oman, 17 February 2002,75-83.
- [12] HIROSHI Tanaka, YASUHITO Nakatake, Theoretical analysis of a basin type solar still with internal and external reflectors, Mechanical Engineering Department, Kurume National College of Technology, 9 January 2006, Japan,205-216.
- [13] VELMURUGAN, M. GOPALAKRISHNAN, Single basin solar still with fin for enhancing productivity, Department of Mechanical Engineering, Infant Jesus College of Engineering,2008,India.
- [14] K. Kalidasa Murugavel , S. Sivakumar , J. Riaz Ahamed , K. Srithar; Single basin double slope solar still with minimum basin depth and energy storing materials. Applied Energy 87 (2010) 514–523.
- [15] K.K. Matrawy, A.F. Mahrous, Modeling and experimental study of a corrugated wick type solar still: Comparative study with a simple basin type, 14 September 2015, Egypt.

- [16] A. KHEDIM, Mesure et Caractérisation Thermodynamique d'un Nouveau Système Solaire de Dessalement de l'Eau de Mer avec Récupération de Chaleur, Institut Solaire de l'Université des Sciences Appliquées d'Aachen, 2003.
- [17] R. BERNARD, G. MERGUY, M. SCHWARTZ, Le rayonnement solaire : conversion Thermique et application. Technique et documentation, deuxième édition -1980.
- [18] S. FEDALI, C. BOUGRIOU, Etudes théorique et expérimentale d'un distillateur solaire sous les conditions climatiques de BATNA. Laboratoire d'études des systèmes énergétiques industriels (LESEI), (2010).
- [19] M. ZERROUKI, Y. MARIF, Simulation et expérimentation d'un distillateur solaire à film capillaire dans le sud Algérien, Unité de Recherche en Energies Renouvelables En Milieu Saharien Adrar, ALGERIE.
- [20] A.A. El-Sebaï, E. El-Bialy, Advanced designs of solar desalination systems: review, Department of Physics, Faculty of Science, Tanta University, Tanta, Egypt, b Department of Physics, Faculty of Science, Jazan University, Jazan, Kingdom of Saudi Arabia.
- [21] ARUNKUMAR T, JAYAPRAKASH R, AHSAN A, DENKENBERGER D, OKUNDAMIYA MS. Effect of water and air flow on concentric tubular solar water desalting system. Appl Energy 2013; 103:109-115.
- [22] ZAIDI HALIMA, étude et optimisation des paramètres thermophysique en vue l'amélioration de la performance d'un distillateur solaire, thèse magister, université mentouri2006.

## LES APPENDICES

### Appendice A :

#### LISTE DES SYMBOLE ET DES ABRIVIATION

Symbole	Désignation	Unité
G	Puissance de rayonnement solaire incident par unité de	W/m <sup>2</sup>
h	surface	W/m <sup>2</sup> . K
Lv	Coefficient de transfert de chaleur par convection	J / kg
m <sub>d</sub>	la chaleur latente d'évaporation	kg
Q	La masse du distillat	ml/h
S	le débit horaire de distillat	m <sup>2</sup>
T <sub>a</sub>	surface du capteur	K
T <sub>ce</sub>	Température ambiante	K
T <sub>cond</sub>	Température de l'entrée du capteur	K
T <sub>cs</sub>	Température de condenseur	K
T <sub>év</sub>	Température de sortie du capteur	K
T <sub>p</sub>	Température de l'évaporateur	K
T <sub>s</sub>	Température de la surface solide	K
T <sub>∞</sub>	Température de surface du corps	K
X	Température du fluide de la surface solide	m
Y	Epaisseur de la saumure	l
	Production du distillat	

### Lettres grecques

Lettre	Désignation	Unité
β	Inclinaison du plan considéré	°
ε	Coefficient d'émission de la surface	
η	Rendement	%
Θ	Latitude	°
λ	Conductivité thermique du matériau	W.m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>

$\sigma$	Constante de <b>Stéphan Boltzmann</b>	$5.67 \cdot 10^{-8} \text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
$\varphi$	Flux de chaleur transmis par convection	W

## Appendice B

### Variation de débit en fonction de température au cours de quatre expériences

**Tableaux A.1 évolution de débit en fonction de la température pendant deux jours dans utilisation de refroidissement à l'air ambiant**

Le premier jour				Le deuxième jour			
T(K)	1/T (K <sup>-1</sup> )	Débit ml/min	lnQ ml/min	T(K)	1/T (K <sup>-1</sup> )	Débit ml/min	lnQ ml/min
300,9	0,00332	0,5	-0,693	304,8	0,00328	0,5	-0,693
317,7	0,00314	1,6	0,470	311,18	0,00321	0,9	-0,105
327,31	0,00305	3,1	1,131	319,5	0,00312	1,8	0,587
331,8	0,00301	4	1,386	325,53	0,00307	2,7	0,993
				330,18	0,00302	3,8	1,335
				332,96	0,00300	4,6	1,526

**Tableaux A.2 évolution du débit en fonction de la température pendant deux jours dans utilisation de refroidissement à l'eau**

le premier jour				le deuxième jour			
T(K)	1/T (K <sup>-1</sup> )	Débit ml/min	lnQ ml/min	T(K)	1/T (K <sup>-1</sup> )	Débit ml/min	lnQ ml/min
303,32	0,00329	0,75	-0,287	305	0,00327	0,8	-0,223
310,1	0,00322	1,7	0,530	311,3	0,00321	1,6	0,470
318,21	0,00314	3,4	1,223	318,6	0,00313	3,3	1,193
324,73	0,00307	5,6	1,722	327,1	0,00305	5,8	1,757
329,3	0,00303	7,5	2,014	331,7	0,00301	8	2,079
331,8	0,00301	8,8	2,174	334,6	0,00298	9,2	2,219
332	0,00301	8,7	2,163	331,04	0,00302	7,3	1,987

**Tableaux A.3 évolution du débit en fonction de la température pendant trois jours dans utilisation de l'eau de robinet**

le premier jour		le deuxième jour		le troisième jour	
Débit ml/min	Température (K)	Débit ml/min	Température (K)	Débit ml/min	Température (K)
0,65	302,6	0,7	302	1,1	306,5
1,1	306	1	305,6	2,4	313,8
2,7	316	2,2	313,5	3,2	316
4,8	323	4,3	321	5,6	324,8
7,2	328	6,1	326,3	8,2	329,4
7,8	330	7,4	329,8	8,4	331
7,3	329,8	7,1	328,5	8,5	330,5

**Tableaux A.4 évolution de débit en fonction de température pendant deux jours dans utilisation de 50% de masse ( l'eau de mer et l'eau de robinet)**

le premier jour				le deuxième jour			
T(K)	1/T (K <sup>-1</sup> )	Débit ml/min	lnQ ml/min	T(K)	1/T (K <sup>-1</sup> )	Débit ml/min	lnQ ml/min
306	0,00326	0,7	-0,356	317,67	0,00314	2,3	0,832
314	0,00318	2,7	0,993	321,45	0,00311	4	1,386
324,0 1	0,00308	4,6	1,526	324,3	0,00308	5	1,609
327,6	0,00305	6,3	1,840	324	0,00308	4,9	1,589
328,6	0,00304	6,7	1,902				

**Tableaux A.5 évolution de débit en fonction de température pendant deux jours dans les cas d'une source froide à température constante.**

le premier jour				le deuxième jour			
T(K)	1/T (K <sup>-1</sup> )	Débit ml/min	lnQ ml/min	T(K)	1/T (K <sup>-1</sup> )	Débit ml/min	lnQ ml/min
309,7	0,00322	1,6	0,470	308,8	0,00323	1	0
318,6	0,00313	3,4	1,223	319,4	0,00313	3	1,0986
321,4	0,00311	5,1	1,629	322,5	0,00310	4,7	1,547
319,6	0,00312	5,3	1,667	326,8	0,00305	6	1,791
326,5	0,00306	6,4	1,856	329	0,00303	7,9	2,0668
				328,8	0,00304	7.5	2,0149

**Tableaux A.6 évolution de débit en fonction de température pendant deux jours dans utilisation d'un seul capteur**

le premier jour				le deuxième jour			
Température (K)	1/T (K <sup>-1</sup> )	Débit ml/min	lnQ ml/min	Température (K)	1/T (K <sup>-1</sup> )	Débit ml/min	lnQ ml/min
308,7	0,00323	1,2	0,182	308	0,00324	1	0
313	0,00319	1,8	0,587	312,7	0,00319	1,7	0,530
318,1	0,00314	2,9	1,0647	317,5	0,00314	2,7	0,993
320,4	0,00312	2,8	1,0296	320,2	0,00312	3,4	1,223
321,7	0,00310	3,8	1,335	322	0,00310	4,1	1,410
				321,8	0,00310	3,9	1,360

## Appendice C

### Exemple de calcul du débit pendant 24h

temps	Tév	T, k	1/T, K	LnQ	Q ml/min	Q ml/5min
0	31,3987	304,3987	0,00328517	-0,56583178	0,56788759	2,839437957
5	31,8669	304,8669	0,00328012	-0,52898013	0,58920558	2,946027876

10	32,5234	305,5234	0,00327307	-0,47749776	0,62033368	3,101668387
15	32,9204	305,9204	0,00326882	-0,44647244	0,63988139	3,199406969
20	33,4076	306,4076	0,00326363	-0,40850792	0,66464121	3,323206035
25	34,0169	307,0169	0,00325715	-0,36119846	0,69684069	3,484203431
30	34,838	307,838	0,00324846	-0,29773992	0,74249443	3,712472131
35	35,2436	308,2436	0,00324419	-0,26651795	0,76604225	3,83021127
40	35,7507	308,7507	0,00323886	-0,22759819	0,79644422	3,982221093
45	36,239	309,239	0,00323374	-0,19024195	0,82675908	4,133795382
50	36,9099	309,9099	0,00322674	-0,13910831	0,87013378	4,350668888
55	37,5009	310,5009	0,0032206	-0,09424743	0,91005756	4,550287777
60	38,1807	311,1807	0,00321357	-0,04285677	0,9580486	4,790243018
65	38,8703	311,8703	0,00320646	0,00904584	1,00908688	5,045434389
70	39,5521	312,5521	0,00319947	0,06013622	1,0619812	5,309906018
75	40,3646	313,3646	0,00319117	0,12073022	1,12832048	5,641602381
80	41,52	314,52	0,00317945	0,20635762	1,22919271	6,145963573
85	42,0194	315,0194	0,00317441	0,24317405	1,27529056	6,376452819
90	42,8962	315,8962	0,0031656	0,30753129	1,36006336	6,800316823
95	43,0122	316,0122	0,00316443	0,31601896	1,37165626	6,858281293
100	43,2638	316,2638	0,00316192	0,33440702	1,39711168	6,985558382
105	43,7269	316,7269	0,00315729	0,36817608	1,44509646	7,225482312
110	44,8323	317,8323	0,00314631	0,44838359	1,5657792	7,828896021
115	45,8313	318,8313	0,00313645	0,52039232	1,68268767	8,413438338
120	46,5033	319,5033	0,00312986	0,56857729	1,7657531	8,828765504
125	47,1291	320,1291	0,00312374	0,61326763	1,84645508	9,232275377
130	47,9178	320,9178	0,00311606	0,66934291	1,95295363	9,764768159
135	48,3269	321,3269	0,0031121	0,69832083	2,01037411	10,05187054
140	48,9853	321,9853	0,00310573	0,74480288	2,10602626	10,53013128
145	49,4174	322,4174	0,00310157	0,77520531	2,17103783	10,85518914
150	49,6559	322,6559	0,00309928	0,79195123	2,20769996	11,03849979
155	50,1468	323,1468	0,00309457	0,82634123	2,28494334	11,42471672
160	50,6191	323,6191	0,00309005	0,85932973	2,36157726	11,80788631
165	51,2294	324,2294	0,00308424	0,90181471	2,46407063	12,32035314

170	51,7831	324,7831	0,00307898	0,94022144	2,56054836	12,80274178
175	52,238	325,238	0,00307467	0,97167717	2,64237246	13,21186229
180	52,5344	325,5344	0,00307187	0,99212554	2,69696088	13,4848044
185	53,0177	326,0177	0,00306732	1,02538823	2,78817769	13,94088847
190	53,6977	326,6977	0,00306093	1,07202197	2,92128026	14,60640132
195	54,3059	327,3059	0,00305525	1,11356757	3,04520303	15,22601513
200	54,8036	327,8036	0,00305061	1,14745033	3,15015081	15,75075404
205	55,5701	328,5701	0,00304349	1,19943185	3,31823114	16,59115568
210	55,7388	328,7388	0,00304193	1,21083999	3,35630272	16,78151358
215	56,1229	329,1229	0,00303838	1,23677066	3,44447212	17,22236061
220	56,107	329,107	0,00303853	1,23569845	3,4407809	17,20390449
225	56,1544	329,1544	0,00303809	1,23889455	3,45179556	17,25897782
230	56,4637	329,4637	0,00303524	1,25972752	3,52446102	17,62230512
235	56,9012	329,9012	0,00303121	1,28912873	3,62962281	18,14811404
240	57,1847	330,1847	0,00302861	1,30813911	3,69928336	18,4964168
245	57,3889	330,3889	0,00302674	1,32181174	3,75020963	18,75104817
250	57,5885	330,5885	0,00302491	1,33516004	3,80060415	19,00302074
255	57,7966	330,7966	0,00302301	1,34905963	3,85379982	19,2689991
260	58,0536	331,0536	0,00302066	1,36620127	3,92042971	19,60214855
265	58,9249	331,9249	0,00301273	1,42411855	4,15419451	20,77097255
270	58,7308	331,7308	0,00301449	1,41124262	4,10104829	20,50524146
275	59,0533	332,0533	0,00301156	1,43262789	4,1896948	20,948474
280	59,6394	332,6394	0,00300626	1,47138656	4,35526979	21,77634896
285	59,4938	332,4938	0,00300757	1,46177082	4,31359135	21,56795677
290	60,0939	333,0939	0,00300216	1,50134865	4,48773738	22,43868688
295	59,9167	332,9167	0,00300375	1,48967679	4,43566164	22,17830819
300	59,9666	332,9666	0,0030033	1,49296487	4,45027047	22,25135235
305	60,3434	333,3434	0,00299991	1,51776175	4,56200285	22,81001427
310	60,5557	333,5557	0,002998	1,53170835	4,62607303	23,13036515
315	60,4147	333,4147	0,00299927	1,52244763	4,58343003	22,91715017
320	60,614	333,614	0,00299748	1,53553514	4,64380995	23,21904975
325	60,74	333,74	0,00299634	1,54380116	4,68235488	23,41177439

330	61,0785	334,0785	0,00299331	1,56597702	4,78735	23,93675002
335	61,2177	334,2177	0,00299206	1,57508328	4,83114394	24,15571968
340	61,1954	334,1954	0,00299226	1,57362496	4,82410371	24,12051853
345	61,2057	334,2057	0,00299217	1,57429856	4,82735431	24,13677156
350	61,2077	334,2077	0,00299215	1,57442935	4,82798573	24,13992865
355	61,4434	334,4434	0,00299004	1,58983213	4,90292579	24,51462895
360	61,5235	334,5235	0,00298933	1,59506165	4,9286329	24,6431645
365	61,7662	334,7662	0,00298716	1,61089162	5,00727382	25,0363691
370	61,8653	334,8653	0,00298628	1,61734876	5,03971112	25,19855562
375	61,6291	334,6291	0,00298838	1,60195217	4,96271103	24,81355516
380	61,5342	334,5342	0,00298923	1,59576003	4,93207619	24,66038094
385	61,6143	334,6143	0,00298852	1,60098672	4,95792207	24,78961034
390	61,5089	334,5089	0,00298946	1,59410864	4,9239381	24,61969052
395	61,3295	334,3295	0,00299106	1,58239158	4,86658071	24,33290356
400	61,1805	334,1805	0,00299239	1,57265045	4,81940489	24,09702446
405	61,1167	334,1167	0,00299297	1,56847677	4,79933212	23,99666058
410	60,9398	333,9398	0,00299455	1,55689593	4,74407241	23,72036206
415	60,7779	333,7779	0,002996	1,54628631	4,69400569	23,47002843
420	60,5941	333,5941	0,00299765	1,53422906	4,63774873	23,18874366
425	60,6199	333,6199	0,00299742	1,53592234	4,64560838	23,22804189
430	60,1128	333,1128	0,00300199	1,50259283	4,49332439	22,46662197
435	59,7668	332,7668	0,00300511	1,47979343	4,39203832	21,9601916
440	59,5735	332,5735	0,00300685	1,46703542	4,33636059	21,68180294
445	59,1936	332,1936	0,00301029	1,44191835	4,22880037	21,14400183
450	58,9067	331,9067	0,00301289	1,42291186	4,14918473	20,74592363
455	58,6051	331,6051	0,00301564	1,40289607	4,06696115	20,33480575
460	58,511	331,511	0,00301649	1,39664364	4,04161207	20,20806037
465	58,3461	331,3461	0,00301799	1,38567837	3,99753679	19,98768393
470	58,306	331,306	0,00301836	1,38301021	3,98688494	19,93442468
475	58,0373	331,0373	0,00302081	1,36511486	3,91617286	19,58086428
480	57,8175	330,8175	0,00302281	1,35045463	3,85917964	19,29589818
485	57,7308	330,7308	0,00302361	1,34466655	3,83690691	19,18453456

490	57,4324	330,4324	0,00302634	1,32472219	3,76114032	18,8057016
495	57,1234	330,1234	0,00302917	1,30403135	3,68411873	18,42059366
500	57,0164	330,0164	0,00303015	1,29685753	3,6577841	18,28892048
505	56,8934	329,8934	0,00303128	1,28860523	3,6277232	18,13861601
510	56,6985	329,6985	0,00303307	1,27551643	3,58055005	17,90275025
515	56,4491	329,4491	0,00303537	1,25874502	3,52099992	17,60499959
520	56,2334	329,2334	0,00303736	1,24421933	3,47022466	17,35112329
525	56,1421	329,1421	0,0030382	1,23806527	3,44893425	17,24467125
530	55,8554	328,8554	0,00304085	1,21871808	3,38284842	16,91424208
535	55,5096	328,5096	0,00304405	1,19533776	3,30467375	16,52336877
540	55,5737	328,5737	0,00304346	1,19967542	3,31903945	16,59519724
545	55,292	328,292	0,00304607	1,18060008	3,25632766	16,2816383
550	54,976	327,976	0,003049	1,15916311	3,18726477	15,93632384
555	54,8379	327,8379	0,00305029	1,14978164	3,15750335	15,78751675
560	54,8025	327,8025	0,00305062	1,14737555	3,14991527	15,74957635
565	54,5416	327,5416	0,00305305	1,12962655	3,09450065	15,47250323
570	54,4392	327,4392	0,003054	1,12265256	3,0729947	15,36497352
575	54,2419	327,2419	0,00305584	1,10920306	3,03194116	15,15970579
580	54,1048	327,1048	0,00305712	1,09984771	3,00370854	15,01854272
585	53,9296	326,9296	0,00305876	1,08788109	2,96797851	14,83989256
590	53,884	326,884	0,00305919	1,08476438	2,9587426	14,79371301
595	53,6798	326,6798	0,0030611	1,07079689	2,91770366	14,58851832
600	53,4611	326,4611	0,00306315	1,05581821	2,87432598	14,37162992
605	53,3969	326,3969	0,00306375	1,05141736	2,86170431	14,30852155
610	53,1916	326,1916	0,00306568	1,03733262	2,82168048	14,10840241
615	53,0541	326,0541	0,00306698	1,02788943	2,79516022	13,97580112
620	52,9071	325,9071	0,00306836	1,01778499	2,76705889	13,83529447
625	52,6223	325,6223	0,00307104	0,99818252	2,7133459	13,5667295
630	52,575	325,575	0,00307149	0,9949236	2,7045177	13,5225885
635	52,4784	325,4784	0,0030724	0,988265	2,68656924	13,43284619
640	52,2879	325,2879	0,0030742	0,97512234	2,65149156	13,25745782
645	52,3503	325,3503	0,00307361	0,97942903	2,66293535	13,31467677

650	51,9281	324,9281	0,0030776	0,95025756	2,58637572	12,93187858
655	51,7714	324,7714	0,00307909	0,93941124	2,55847463	12,79237317
660	51,5009	324,5009	0,00308166	0,92066335	2,51095549	12,55477745
665	51,3218	324,3218	0,00308336	0,90823304	2,47993671	12,39968354
670	51,2803	324,2803	0,00308375	0,9053508	2,47279923	12,36399614
675	51,1015	324,1015	0,00308545	0,89292442	2,44226142	12,21130712
680	50,9083	323,9083	0,00308729	0,87948184	2,40965081	12,04825404
685	50,8504	323,8504	0,00308785	0,87545012	2,39995532	11,99977661
690	50,5163	323,5163	0,00309103	0,85215771	2,34470058	11,7235029
695	50,4244	323,4244	0,00309191	0,84574229	2,32970649	11,64853243
700	50,2584	323,2584	0,0030935	0,8341448	2,3028438	11,51421902
705	50,0108	323,0108	0,00309587	0,81682422	2,26330066	11,31650331
710	49,9955	322,9955	0,00309602	0,81575305	2,26087759	11,30438795
715	49,7417	322,7417	0,00309845	0,79796949	2,22102654	11,10513269
720	49,5979	322,5979	0,00309983	0,78788113	2,19873265	10,99366326
725	49,3857	322,3857	0,00310187	0,77297768	2,16620693	10,83103467
730	49,3587	322,3587	0,00310213	0,77107998	2,16210003	10,81050013
735	49,2376	322,2376	0,0031033	0,76256454	2,14376696	10,71883479
740	49,0936	322,0936	0,00310469	0,7524305	2,12215164	10,6107582
745	48,894	321,894	0,00310661	0,73836859	2,09251898	10,4625949
750	48,8468	321,8468	0,00310707	0,73504078	2,08556705	10,42783524
755	48,6704	321,6704	0,00310877	0,72259515	2,0597717	10,29885852
760	48,558	321,558	0,00310986	0,71465782	2,04348733	10,21743663
765	48,4509	321,4509	0,0031109	0,7070896	2,02808013	10,14040064
770	48,2782	321,2782	0,00311257	0,69487511	2,00345886	10,01729428
775	48,1459	321,1459	0,00311385	0,6855091	1,98478203	9,923910158
780	48,0825	321,0825	0,00311446	0,68101804	1,97588824	9,879441215
785	47,9583	320,9583	0,00311567	0,67221495	1,95857066	9,792853323
790	47,8783	320,8783	0,00311645	0,66654108	1,94748945	9,737447246
795	47,8948	320,8948	0,00311629	0,66771155	1,94977026	9,748851289
800	47,6484	320,6484	0,00311868	0,65022003	1,91596235	9,579811751
805	47,5651	320,5651	0,00311949	0,64430062	1,90465449	9,52327244

810	47,5403	320,5403	0,00311973	0,64253771	1,9012997	9,506498509
815	47,3298	320,3298	0,00312178	0,62756326	1,8730409	9,365204514
820	47,2835	320,2835	0,00312223	0,62426695	1,86687695	9,334384746
825	47,1781	320,1781	0,00312326	0,61675949	1,85291392	9,264569622
830	47,0419	320,0419	0,00312459	0,60705088	1,83501174	9,175058705
835	47,0445	320,0445	0,00312457	0,60723629	1,835352	9,176760017
840	46,918	319,918	0,0031258	0,59821185	1,8188635	9,094317489
845	46,7886	319,7886	0,00312707	0,58897315	1,80213693	9,010684673
850	46,5637	319,5637	0,00312927	0,57289827	1,7733994	8,866997006
855	46,3641	319,3641	0,00313122	0,55861277	1,74824559	8,741227951
860	46,2547	319,2547	0,0031323	0,55077536	1,73459743	8,672987134
865	46,1309	319,1309	0,00313351	0,54189985	1,71927012	8,596350588
870	46,1148	319,1148	0,00313367	0,5407451	1,71728593	8,586429665
875	45,8485	318,8485	0,00313629	0,52162816	1,68476848	8,423842416
880	45,7368	318,7368	0,00313738	0,51360001	1,67129707	8,356485329
885	45,6099	318,6099	0,00313863	0,50447258	1,65611182	8,280559085
890	45,7797	318,7797	0,00313696	0,516684	1,67645929	8,38229643
895	45,3161	318,3161	0,00314153	0,48331273	1,6214369	8,107184481
900	45,2511	318,2511	0,00314217	0,47862607	1,61385555	8,069277762
905	45,0608	318,0608	0,00314405	0,46489396	1,59184538	7,959226882
910	45,0073	318,0073	0,00314458	0,46103042	1,58570709	7,928535437
915	44,8982	317,8982	0,00314566	0,45314766	1,57325648	7,866282396
920	44,771	317,771	0,00314692	0,4439503	1,558853	7,794265024
925	44,6664	317,6664	0,00314796	0,43638154	1,54709896	7,735494791
930	44,6111	317,6111	0,0031485	0,43237807	1,54091757	7,704587864
935	44,5115	317,5115	0,00314949	0,42516395	1,52984122	7,649206119
940	44,2937	317,2937	0,00315165	0,40937274	1,50587291	7,529364566
945	44,2461	317,2461	0,00315213	0,4059187	1,50068054	7,503402676
950	44,0424	317,0424	0,00315415	0,3911257	1,47864437	7,393221869
955	43,8913	316,8913	0,00315566	0,38014032	1,46248979	7,312448931
960	43,624	316,624	0,00315832	0,36068119	1,43430611	7,171530559
965	43,5729	316,5729	0,00315883	0,35695742	1,42897503	7,144875145

970	43,4555	316,4555	0,00316	0,34839769	1,41679558	7,083977912
975	43,3582	316,3582	0,00316097	0,34129865	1,40677331	7,033866542
980	43,249	316,249	0,00316207	0,33332618	1,39560244	6,978012185
985	43,1802	316,1802	0,00316275	0,3283004	1,38860605	6,943030232
990	43,1281	316,1281	0,00316327	0,32449309	1,38332924	6,916646202
995	43,0399	316,0399	0,00316416	0,31804483	1,37443788	6,872189395
1000	42,9606	315,9606	0,00316495	0,31224418	1,36648832	6,832441597
1005	42,8279	315,8279	0,00316628	0,30253089	1,35327948	6,766397421
1010	42,5405	315,5405	0,00316917	0,28146598	1,32507091	6,625354561
1015	42,4672	315,4672	0,0031699	0,27608733	1,31796295	6,589814764
1020	42,2707	315,2707	0,00317188	0,2616561	1,29907971	6,495398544
1025	42,1847	315,1847	0,00317274	0,25533448	1,29089332	6,454466624
1030	41,9465	314,9465	0,00317514	0,23780704	1,26846441	6,342322033
1035	41,858	314,858	0,00317603	0,2312882	1,26022238	6,301111915
1040	41,6702	314,6702	0,00317793	0,21744285	1,2428944	6,214471998
1045	41,5365	314,5365	0,00317928	0,20757589	1,23069111	6,153455573
1050	41,3994	314,3994	0,00318067	0,1974493	1,2182913	6,091456491
1055	41,4059	314,4059	0,0031806	0,19792961	1,21887659	6,094382967
1060	41,1419	314,1419	0,00318327	0,17840574	1,1953102	5,976551019
1065	41,229	314,229	0,00318239	0,18485076	1,20303889	6,015194436
1070	41,0054	314,0054	0,00318466	0,16829813	1,18328933	5,916446668
1075	40,8436	313,8436	0,0031863	0,15630571	1,16918358	5,845917922
1080	40,7738	313,7738	0,00318701	0,15112841	1,163146	5,815730013
1085	40,7008	313,7008	0,00318775	0,14571128	1,15686213	5,784310633
1090	40,6644	313,6644	0,00318812	0,14300919	1,15374041	5,768702027
1095	40,6511	313,6511	0,00318826	0,14202173	1,1526017	5,763008493
1100	40,3603	313,3603	0,00319121	0,12041037	1,12795964	5,639798175
1105	40,3329	313,3329	0,00319149	0,11837202	1,1256628	5,628313989
1110	40,2103	313,2103	0,00319274	0,10924714	1,11543798	5,577189919
1115	40,1065	313,1065	0,0031938	0,10151592	1,10684754	5,534237707
1120	40,1407	313,1407	0,00319345	0,10406377	1,10967121	5,548356068
1125	40,0115	313,0115	0,00319477	0,09443565	1,09903844	5,495192198

1130	39,7224	312,7224	0,00319772	0,07286281	1,07558296	5,377914824
1135	39,689	312,689	0,00319807	0,07036791	1,07290284	5,364514177
1140	39,6635	312,6635	0,00319833	0,06846276	1,07086074	5,354303707
1145	39,5113	312,5113	0,00319988	0,05708516	1,05874597	5,293729871
1150	39,343	312,343	0,00320161	0,04449112	1,04549569	5,227478465
1155	39,2876	312,2876	0,00320218	0,04034252	1,04116733	5,205836656
1160	39,0607	312,0607	0,0032045	0,02333585	1,02361026	5,118051295
1165	39,0745	312,0745	0,00320436	0,0243709	1,02467029	5,123351465
1170	38,9846	311,9846	0,00320529	0,01762644	1,0177827	5,088913515
1175	38,8242	311,8242	0,00320694	0,00558329	1,00559891	5,027994545
1180	38,7325	311,7325	0,00320788	-0,00130729	0,99869356	4,993467817
1185	38,6075	311,6075	0,00320917	-0,01070666	0,98935045	4,94675227
1190	38,4444	311,4444	0,00321085	-0,0229823	0,97727978	4,886398917
1195	38,496	311,496	0,00321031	-0,01909726	0,98108394	4,905419688
1200	38,2726	311,2726	0,00321262	-0,03592665	0,96471105	4,823555258
1205	38,0722	311,0722	0,00321469	-0,05104395	0,95023691	4,751184531
1210	37,9842	310,9842	0,0032156	-0,05768844	0,94394399	4,719719974
1215	37,7777	310,7777	0,00321773	-0,07329512	0,92932653	4,646632631
1220	37,6537	310,6537	0,00321902	-0,08267666	0,92064879	4,603243928
1225	37,553	310,553	0,00322006	-0,09030088	0,91365624	4,568281203
1230	37,4755	310,4755	0,00322087	-0,09617195	0,90830782	4,541539085
1235	37,3613	310,3613	0,00322205	-0,1048286	0,90047885	4,502394251
1240	37,1429	310,1429	0,00322432	-0,12140163	0,88567817	4,428390875
1245	37,0534	310,0534	0,00322525	-0,12819997	0,87967745	4,398387242
1250	36,93	309,93	0,00322654	-0,13757978	0,87146483	4,357324126
1255	36,9422	309,9422	0,00322641	-0,1366521	0,87227363	4,361368166
1260	36,7603	309,7603	0,0032283	-0,15049111	0,86028538	4,301426895
1265	36,7463	309,7463	0,00322845	-0,15155691	0,85936898	4,296844886
1270	36,6806	309,6806	0,00322913	-0,15655983	0,85508036	4,275401785
1275	36,489	309,489	0,00323113	-0,17116192	0,84268512	4,213425594
1280	36,4109	309,4109	0,00323195	-0,17711921	0,83767992	4,18839961
1285	36,3728	309,3728	0,00323235	-0,18002648	0,83524809	4,176240471

1290	36,2894	309,2894	0,00323322	-0,18639293	0,82994742	4,149737091
1295	36,0576	309,0576	0,00323564	-0,20410575	0,81537614	4,076880719
1300	35,9723	308,9723	0,00323654	-0,21063057	0,81007328	4,050366394
1305	36,0983	309,0983	0,00323522	-0,20099376	0,81791753	4,089587657
1310	35,7519	308,7519	0,00323885	-0,22750624	0,79651745	3,982587267
1315	35,734	308,734	0,00323903	-0,22887787	0,79542567	3,977128369
1320	35,5884	308,5884	0,00324056	-0,24004074	0,78659581	3,932979071
1325	35,4795	308,4795	0,00324171	-0,24839678	0,78005037	3,900251861
1330	35,4001	308,4001	0,00324254	-0,25449297	0,7753095	3,876547522
1335	35,3405	308,3405	0,00324317	-0,25907101	0,77176822	3,858841086
1340	35,1036	308,1036	0,00324566	-0,27728547	0,75783813	3,789190625
1345	35,095	308,095	0,00324575	-0,27794722	0,75733679	3,786683948
1350	35,1064	308,1064	0,00324563	-0,27707003	0,75800142	3,79000708
1355	34,9242	307,9242	0,00324755	-0,29109759	0,74744273	3,73721364
1360	34,9125	307,9125	0,00324768	-0,29199894	0,74676932	3,733846621
1365	34,705	307,705	0,00324987	-0,30799581	0,7349184	3,674591995
1370	34,501	307,501	0,00325202	-0,32374389	0,7234355	3,617177488
1375	34,6334	307,6334	0,00325062	-0,3135207	0,73086925	3,65434626
1380	34,5682	307,5682	0,00325131	-0,31855398	0,72719982	3,635999116
1385	34,7093	307,7093	0,00324982	-0,30766409	0,73516223	3,675811134
1390	34,6298	307,6298	0,00325066	-0,31379855	0,7306662	3,65333102
1395	34,3628	307,3628	0,00325348	-0,33442432	0,71575001	3,578750047
1400	34,5245	307,5245	0,00325177	-0,32192871	0,72474986	3,623749286
1405	34,7195	307,7195	0,00324971	-0,30687725	0,73574091	3,678704525
1410	34,8137	307,8137	0,00324872	-0,29961307	0,74110492	3,705524588
1415	34,91	307,91	0,0032477	-0,29219155	0,74662551	3,733127533
1420	35,1444	308,1444	0,00324523	-0,2741465	0,7602207	3,801103483
1425	34,9853	307,9853	0,00324691	-0,28639166	0,75096843	3,754842174
1430	35,1977	308,1977	0,00324467	-0,27004708	0,76334356	3,816717776
	35,3645	308,3645	0,00324292	-0,25722729	0,77319245	3,86596227
					<b>somme</b>	<b>3144,129928</b>

## Appendice D

### Le Coût de distillateur

Élément	Dimension	Coût (DA)
Bac principale	1.4 m <sup>2</sup>	2*4400=8800
Bac supérieur	1.43 m <sup>2</sup>	
Bac de refroidissement	1.15 m <sup>2</sup>	
Structure support (bac principale)	50*50*5 (2barres de 6m)	2*1750= 3500
Structure support (bac de refroidissement)	30*30*3 (1 barres et demi) (m)	1.5*900= 1350
2 tôles laquées	/	2*850=1700
3 robinets	/	3*240=720
3 tôles galvanisées	15/21	3*60=180
Structure support (capteur plan)	50*50*5 (2 barres)	2*1750=3500
Isolation des tubes (armaflex)	/	4*120= 480
Tube galvanisé 15/21	/	100
Isolation du bac principale (polystyrène eps =3cm)	1.4 m <sup>2</sup>	420
2 Capteurs plans (importé)	2m*1m	100000
2 Capteurs plans (locaux)	2m*1m	20000
Coût total (capteurs importés)		120750
Coût total (capteurs locaux)		40750

## Conclusion générale

Dans ce présent travail, nous nous sommes intéressées à l'étude expérimentale d'un nouveau distillateur solaire avec stockage d'énergie par l'eau utilisant un système de condensation à eau.

Les essais effectués sur le distillateur ont permis de constater que le distillateur tel qu'il est conçu, est un appareil simple d'utilisation et d'entretien, et ne contient que des matériaux disponibles et faciles à manipuler.

Une série d'expériences a été réalisé par temps ensoleillé et par temps nuageux durant la saison de printemps. Les résultats qui portent sur la production journalière d'eau distillée, l'évolution horaire des différentes températures du dispositif et des fluides ainsi que le débit ont montré de meilleures performances par temps ensoleillé. Les résultats peuvent résumés comme suit :

- L'irradiation solaire reste le paramètre le plus influant sur la production d'eau distillée et sur les températures de tous les composants du distillateur, qui augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente.
- Le débit du distillat augmente d'une façon exponentielle (loi de type Arrhenius) avec la température de l'évaporateur.
- La production d'eau distillée est doublée quand la condensation est assurée par un refroidissement à eau qu'avec l'air ambiant.
- La réserve d'eau de refroidissement qui assure la condensation s'est avérée suffisante puisque sa température n'augmente que de 10°C au maximum sur une journée et que nous obtenu des résultats similaires avec une eau de refroidissement à température constante (eau du robinet).
- Une salinité de l'eau inférieure ou égale à celle de l'eau de mer n'a pas beaucoup d'influence sur la production journalière.
- L'utilisation d'une surface de capteur moitié a donné une production d'eau moitié.
- Le stockage d'énergie avec une masse d'eau s'est avéré préférable au stockage par béton.
- Le distillateur a donné un rendement de 14 % sur une journée de printemps.

L'inconvénient de notre distillateur est le dépôt de sels dans le bac d'alimentation en eau salée qui peut être éliminé par un renouvellement plus fréquent de l'eau d'alimentation.

Comme perspectives de ce travail, nous proposons l'installation de thermocouples supplémentaires pour avoir des données complètes et l'isolation thermique de certains éléments qui permettent la modélisation et la simulation du fonctionnement du distillateur.