

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 PROCÉDES

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 m² and a collector area of 4 m². 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 m² et une surface de capteur de 4 m². 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 ² |
| L _v | la chaleur latente d'évaporation | J / kg |
| Q | le débit horaire de distillat | ml/h |
| S | surface du capteur | m ² |
| T _a | Température ambiante | K |
| T _{C,entré} | Température de l'entrée du capteur | K |
| T _{cond} | Température de condenseur | K |
| T _{C,sortie} | Température de sortie du capteur | K |
| T _{évapo} | Température de l'évaporateur | K |
| T _p | Température de la surface solide | K |
| T _s | Température de surface du corps | K |
| T _∞ | 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 ² . 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 ⁻¹ . K ⁻¹ |
| σ | Constante de Stéphan Boltzmann | 5.67 10 ⁻⁸ W.m ⁻² .K ⁻⁴ |
| φ | Flux de chaleur transmis par convection | W |

LISTE DES FIGURES

| Figure | Titre | Page |
|---------------|--|-------------|
| 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

| Tableau | Titre | Page |
|----------------|--|-------------|
| 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 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 g.L^{-1} .
- Mer Caspienne : 13 g.L^{-1} .
- Mer Morte : 270 g.L^{-1} .

- Golfe Arabo-persique : 36 à 39 g.L⁻¹.

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 ⁻¹) |
|--------------------------------|-----------------------------|
| NaCl | 27.2 |
| MgCl ₂ | 3.8 |
| MgSO ₄ | 1.7 |
| CaSO ₄ | 1.26 |
| K ₂ SO ₄ | 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

(Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), le bicarbonate (HCO_3^-), le sulfate (SO_4^{2-}) et le chlorure (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.

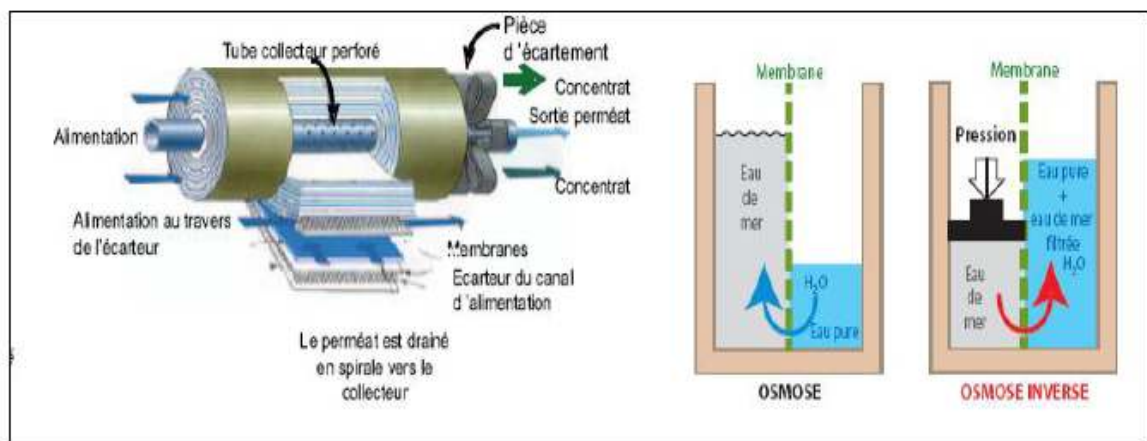


Figure 1.1 : Principe de l'osmose inverse.

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].

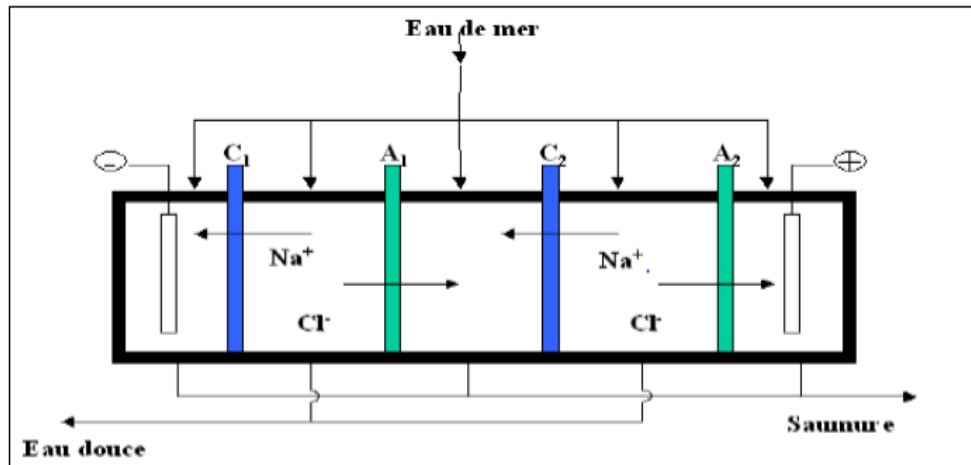


Figure 1.2 : Le principe de l'électrodialyse.

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.

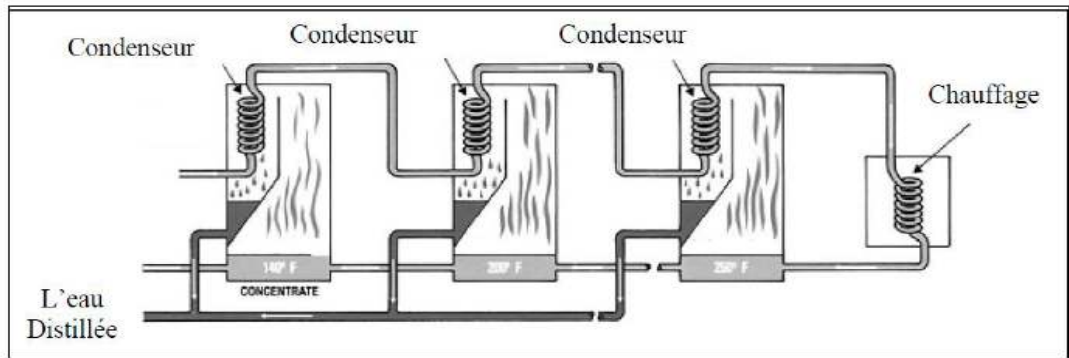


Figure1.3 : Distillateur flash à étages multiples.

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.

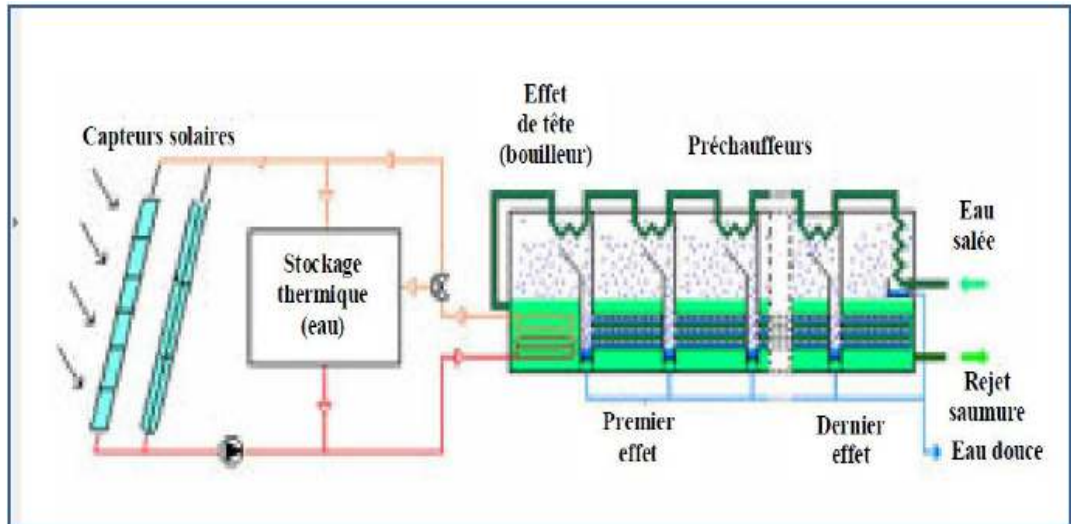


Figure1.4 : Distillation à multiples effets.

CHAPITRE 2

LE DISTILLATEUR SOLAIRE

2.1. Travaux antérieurs

Dès le IV^{ème} siècle avant JC, Aristote observe le principe de la distillation. Au XII^{ème} 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 m².

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 β , sert à produire l'effet de serre et de condenseur (figure 2.1)

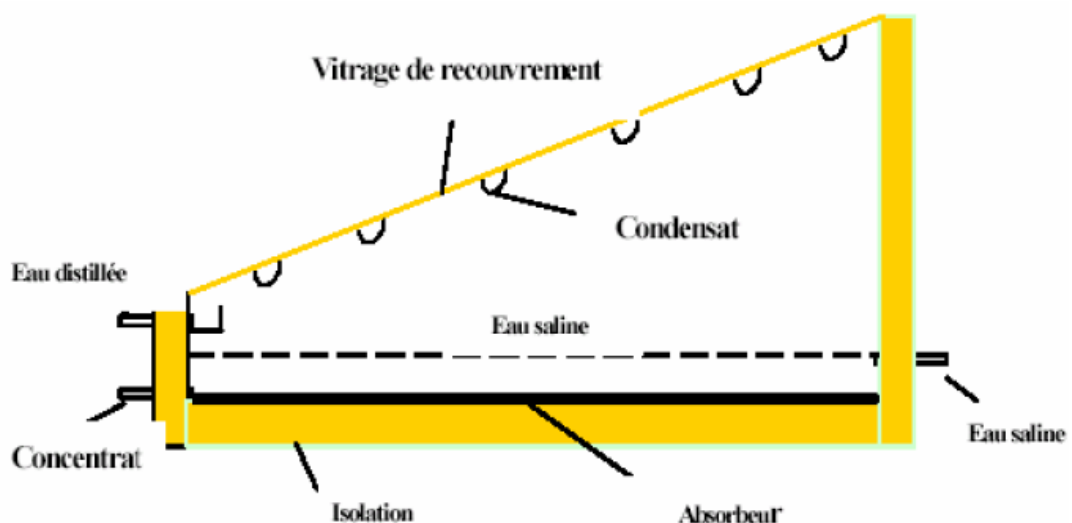


Figure 2.1 : Distillateur solaire à effet de serre à pente unique.

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 β 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].

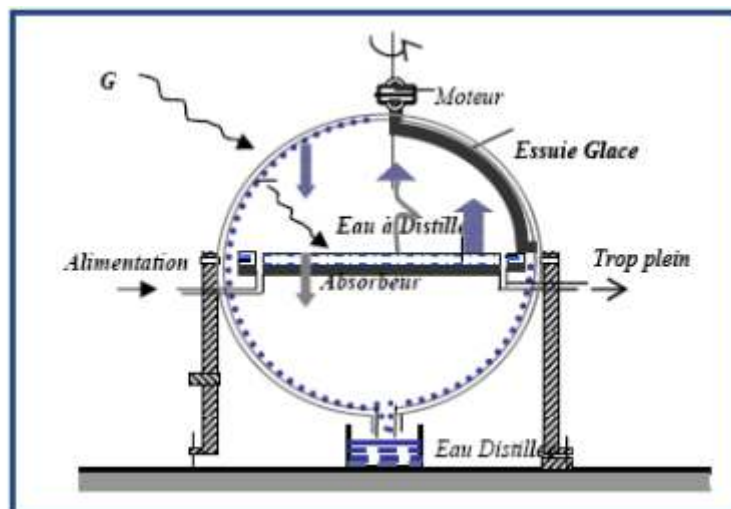


Figure 2.3 : Distillateur sphérique à balayage.

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].

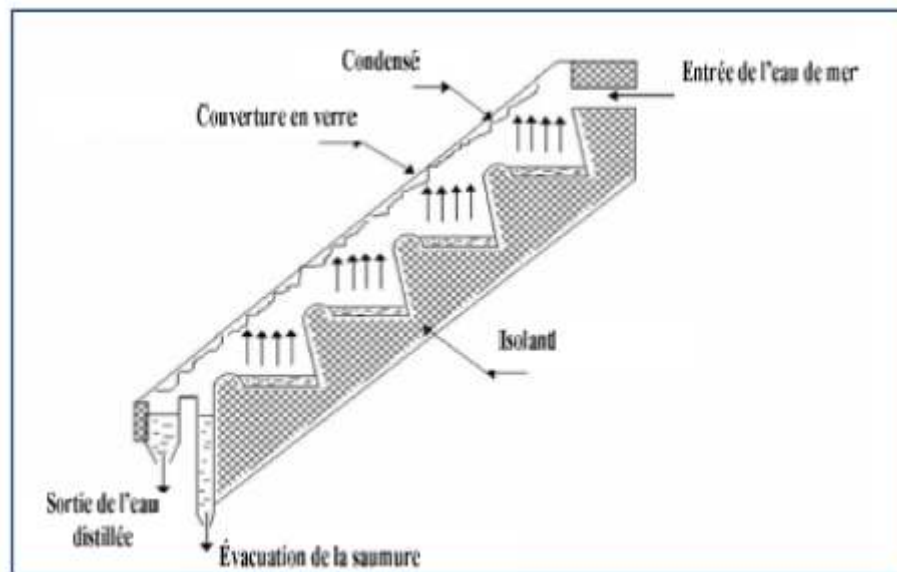


Figure 2.4 : Distillateur solaire incliné à cascade.

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].

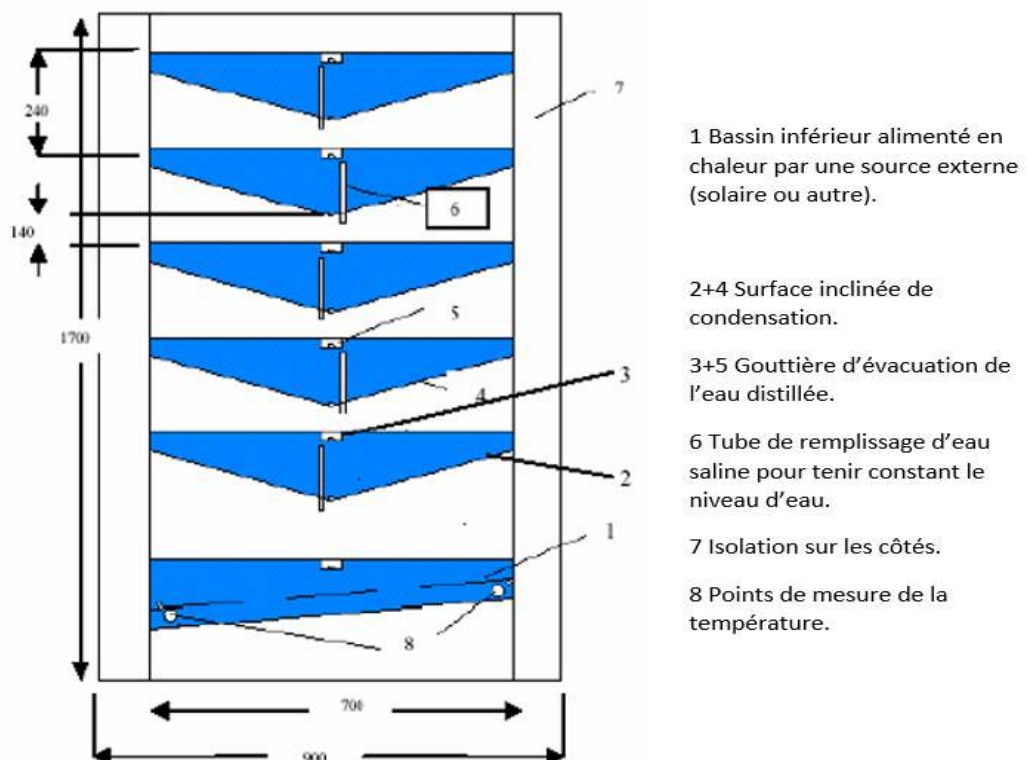


Figure 2.5 : Distillateur solaire à étages multiples.

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].

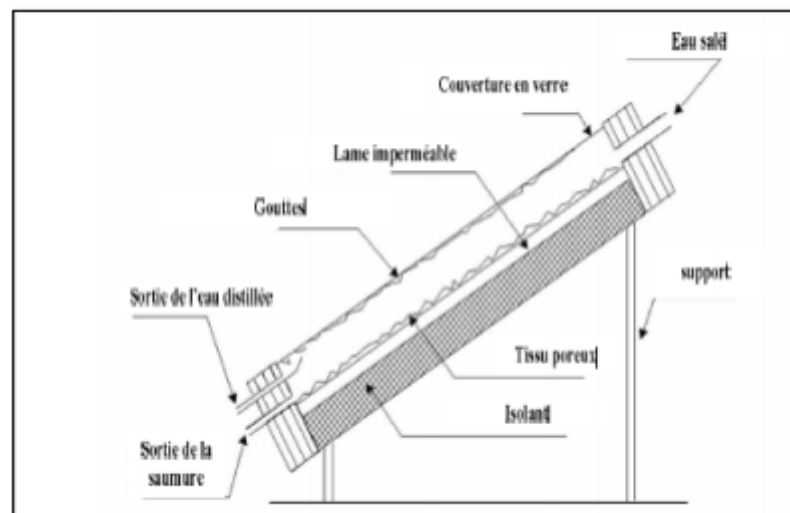


Figure 2.6 : Distillateur solaire à mèche inclinée.

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].

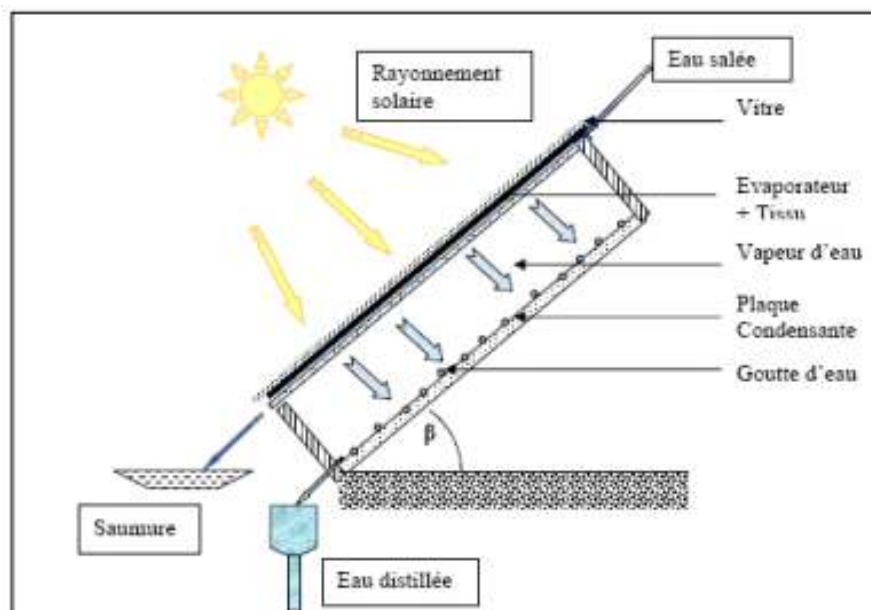


Figure 2.7 : Distillateur solaire à film capillaire.

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/m²/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].

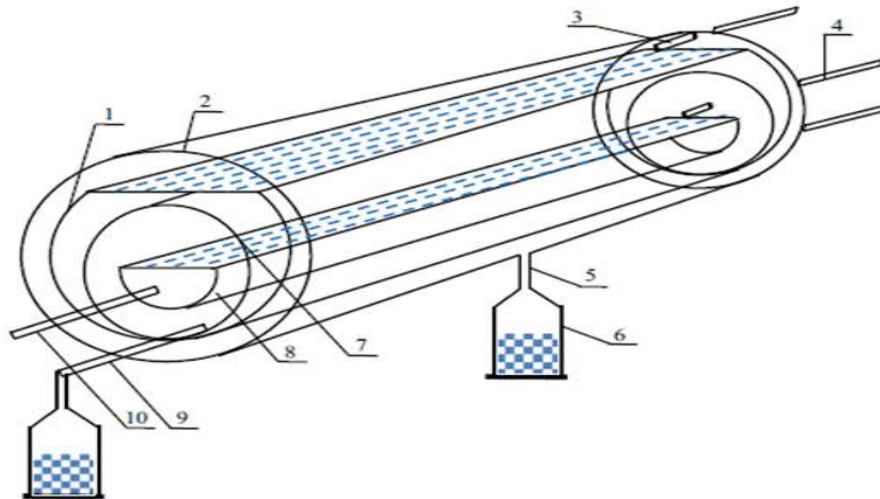


Figure 2.8 : Distillateur solaire tubulaire.

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 μm). Le maximum d'intensité est obtenu pour la longueur d'onde 0.47 μm 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/m². 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 0.7et 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 θ 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).

λ : 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 :

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

Φ : Flux de chaleur transmis par convection (W).

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m². K).

T_p : Température de la surface solide (K).

T_∞ : Température du fluide loin de la surface solide (K).

(S):La surface de contact solide/fluide (m²)

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 :

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

σ : constante de Stéphan Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

S : surface d'échange (m²).

ε : 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°) 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.

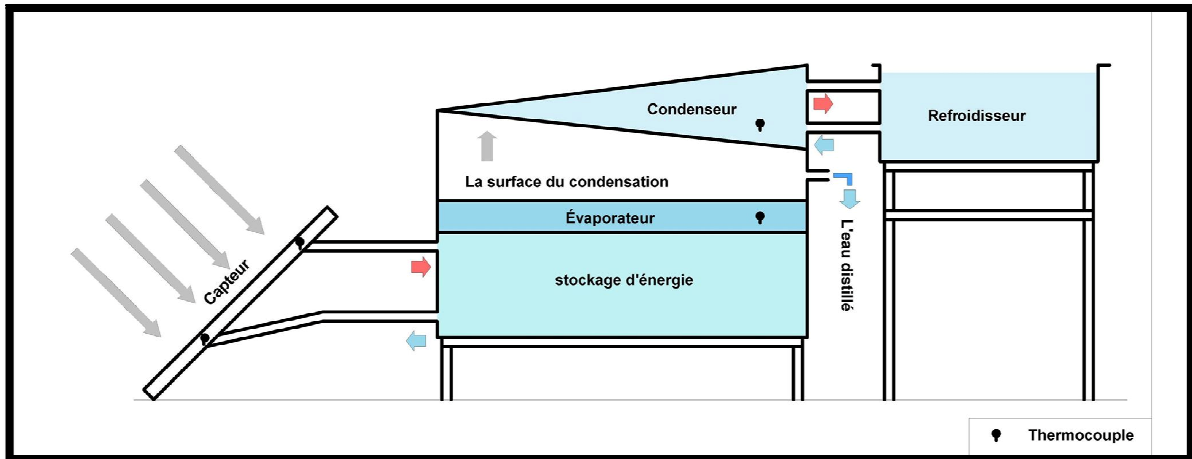


Figure 3.1 : Schéma du distillateur solaire avec stockage d'énergie par l'eau.

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° . 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.

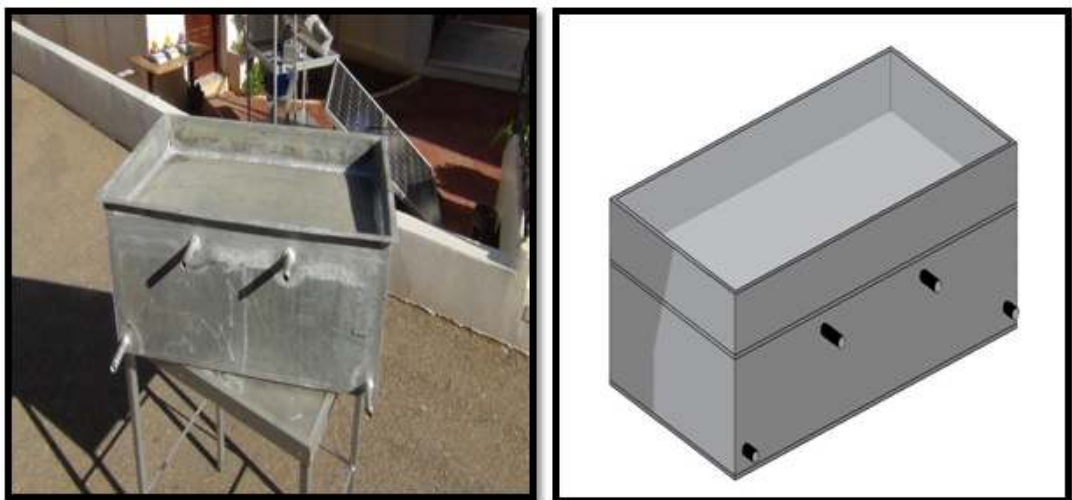


Figure 3.3 : Cuve principale.

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.

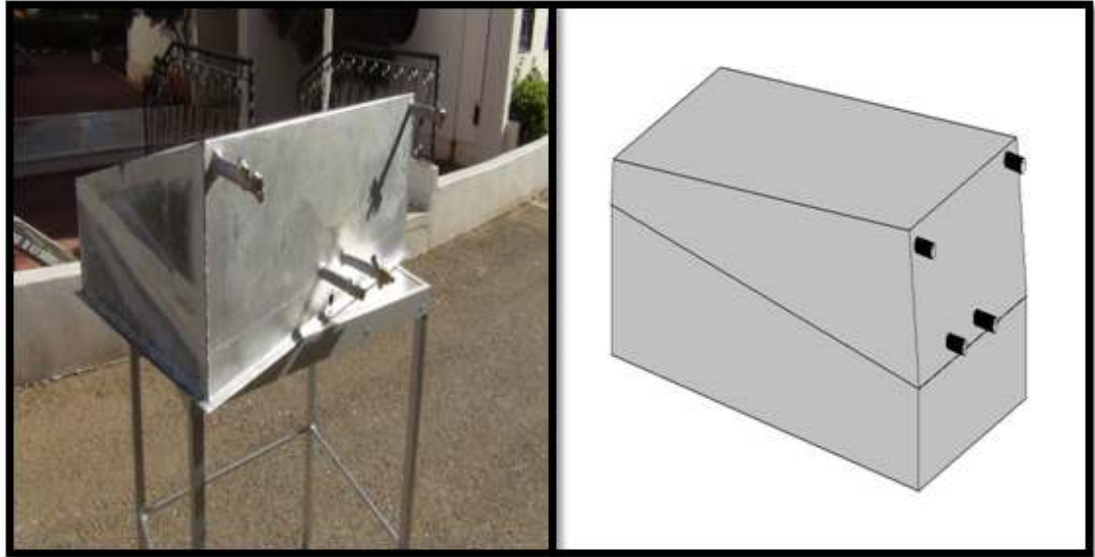


Figure 3.4. Condenseur.

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.

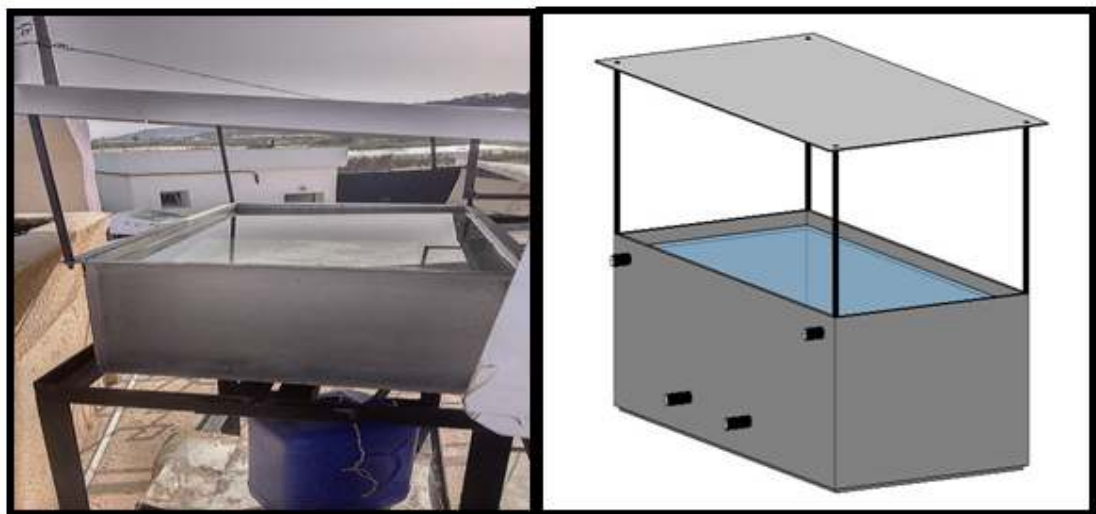


Figure 3.5. Refroidisseur (source froide).

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/m² 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.

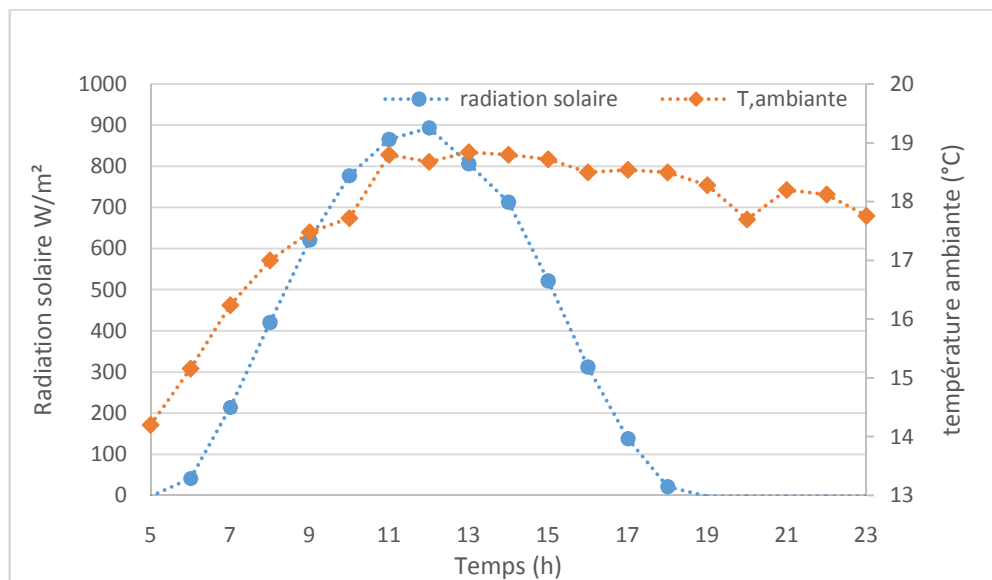


Figure 4.1 : Evolution journalière de l'irradiation solaire et de la température ambiante (journée ensoleillée).

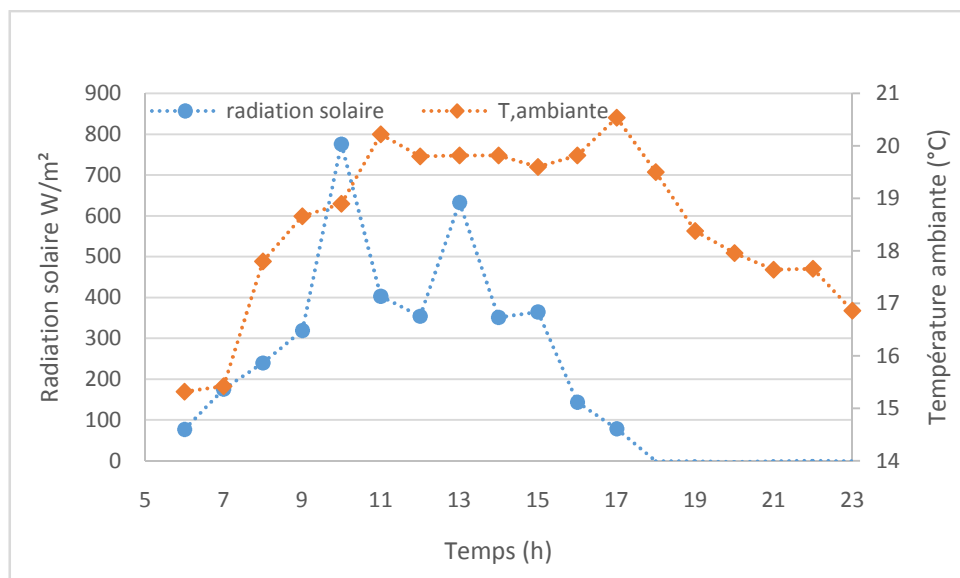


Figure 4.2 : Evolution journalière de l'irradiation solaire et de la température ambiante (journée nuageuse).

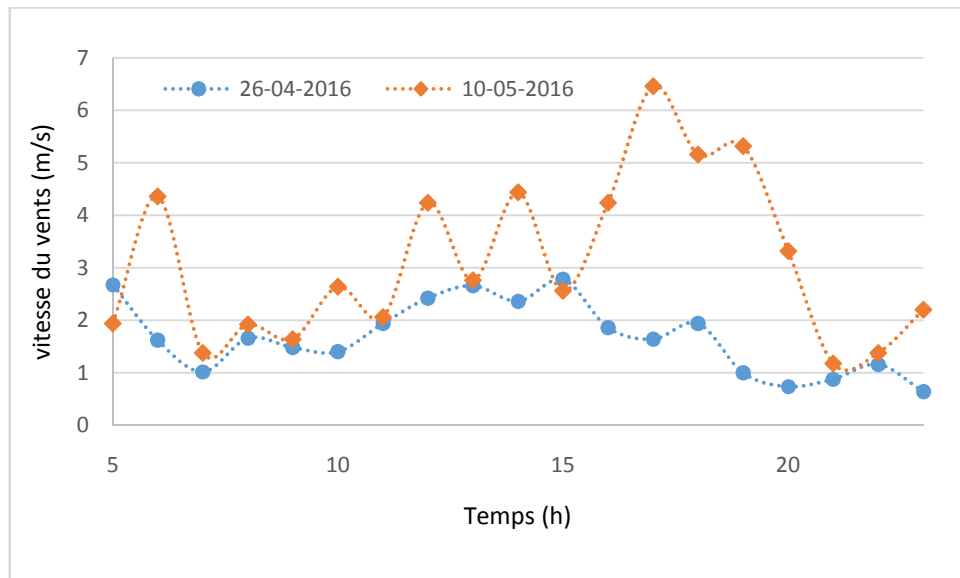


Figure 4.3 : Evolution de la vitesse du vent en fonction du temps de la journée du 26-04-2016 et 10-05-2016.

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.

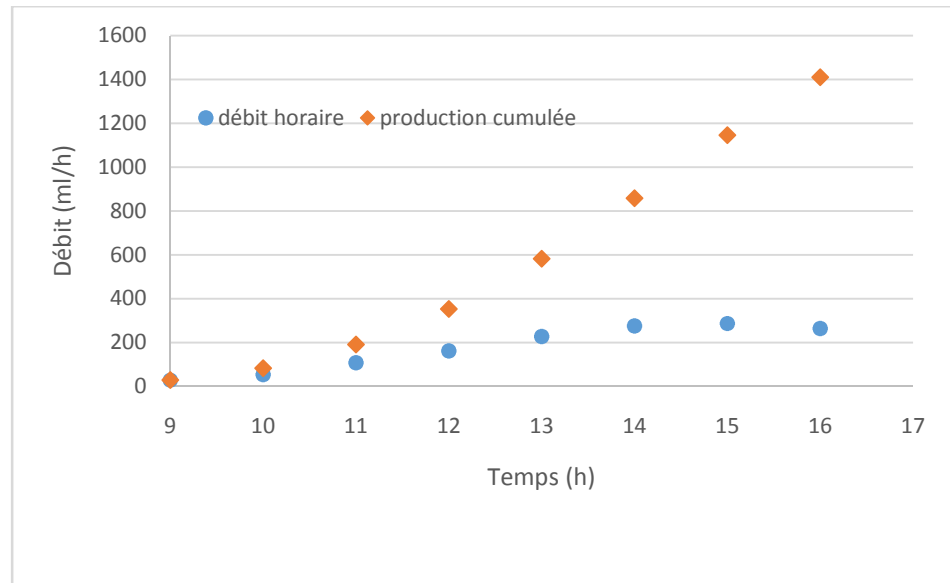


Figure 4.4 : Evolution du débit instantané et de la production cumulée dans le cas de condensation avec l'air ambiant.

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.

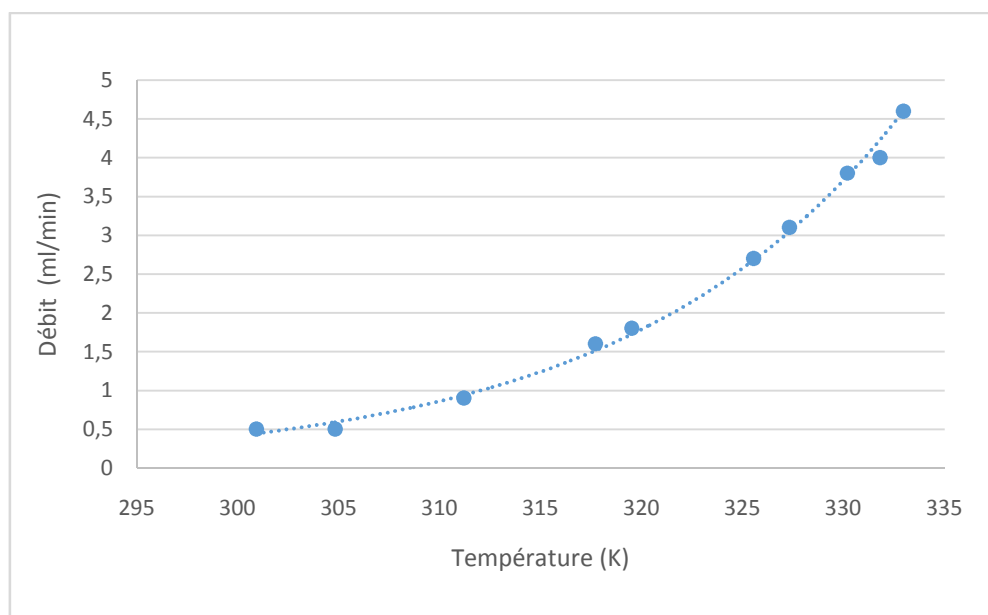


Figure 4.5 : Evaluation du débit de distillat en fonction de la température d'évaporateur dans l'utilisation de refroidissement à l'air ambiant.

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.

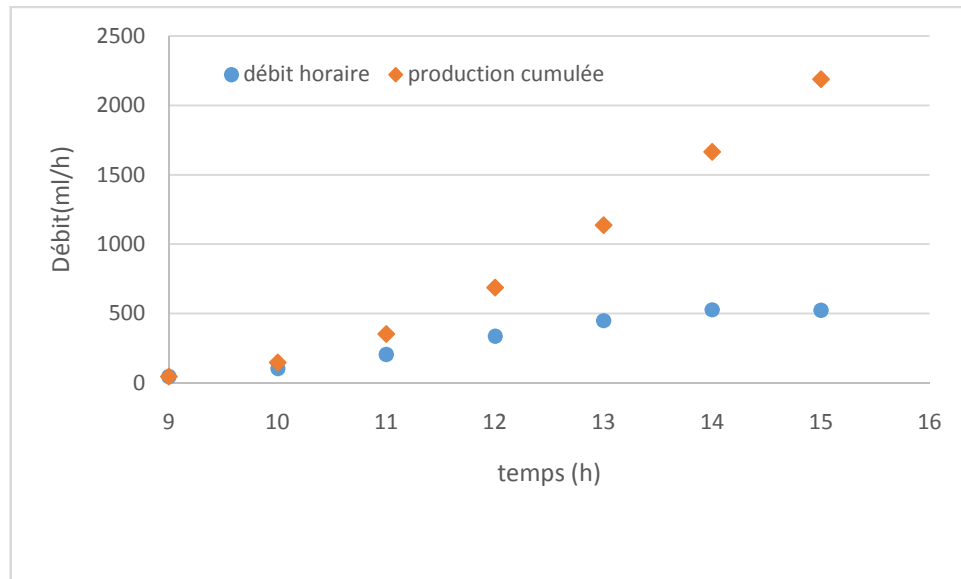


Figure 4.6 : Evolution du débit instantané et de la production cumulée dans le cas d'une condensation avec refroidissement (à eau).

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.

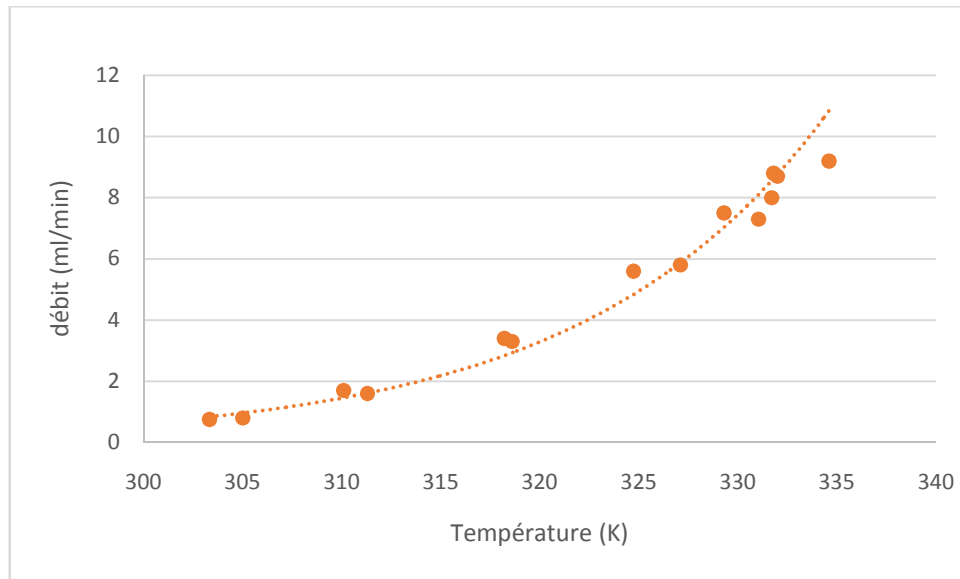


Figure 4.7: Evolution du débit de distillat en fonction de la température d'évaporateur dans le cas d'une condensation à eau (avec refroidissement)

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'écrit 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 :

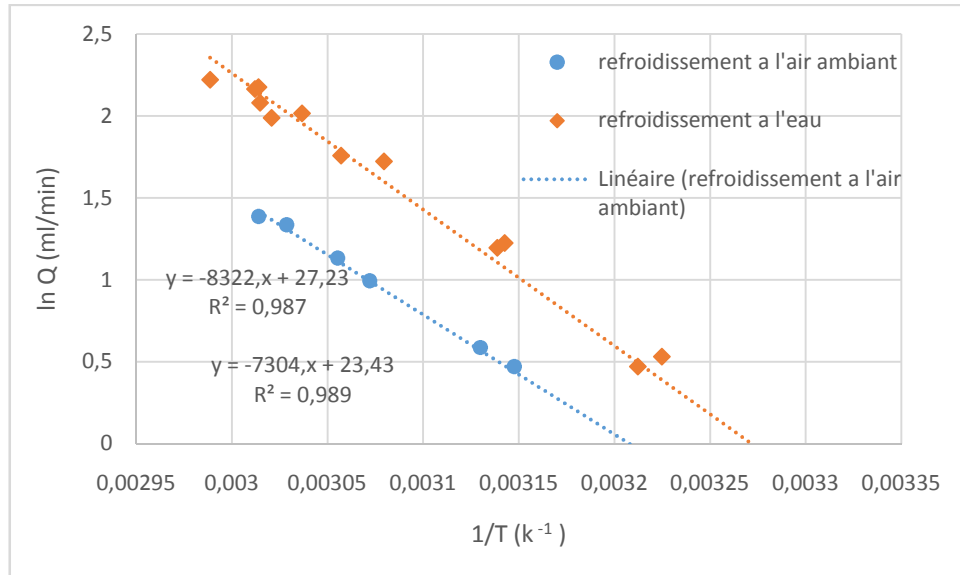
$$\ln(Q) = \ln(Q_0) - \frac{C}{T} \quad (4.2)$$

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).

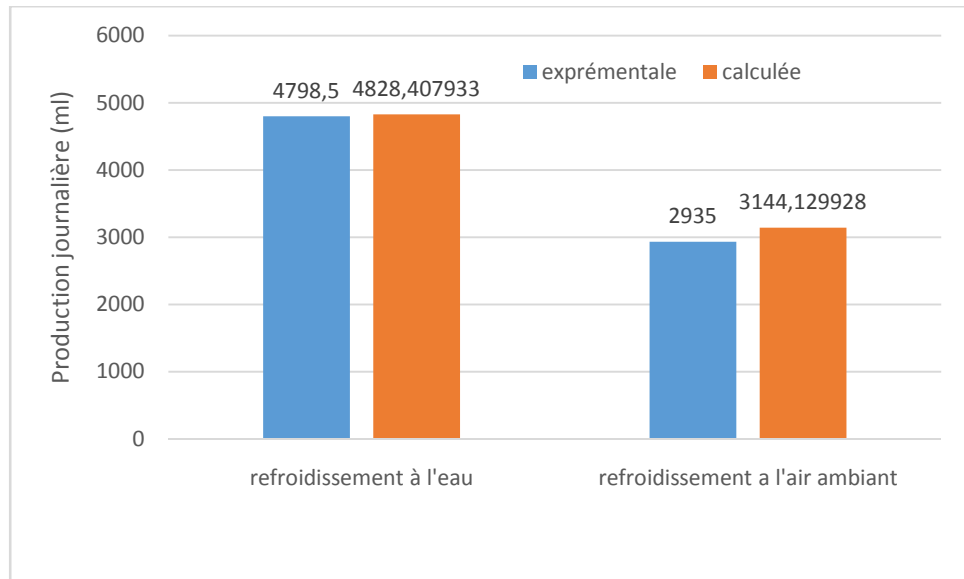


Figure 4.9: Production d'eau distillée (expérimentale et calculée) dans les deux conditions de condensation avec l'eau et avec l'air ambiant....

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.

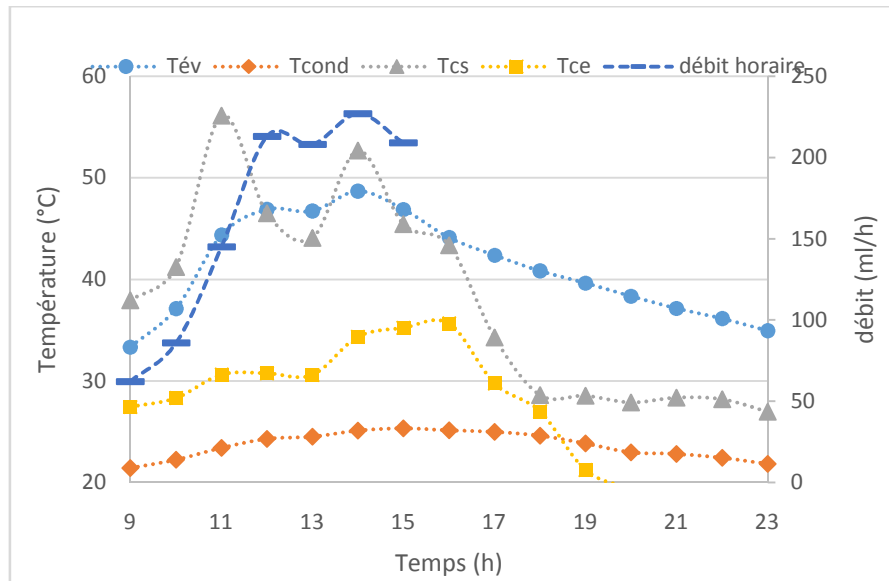


Figure 4.10 : Variation de différentes températures et du débit instantané en fonction du temps (10-05-2016).

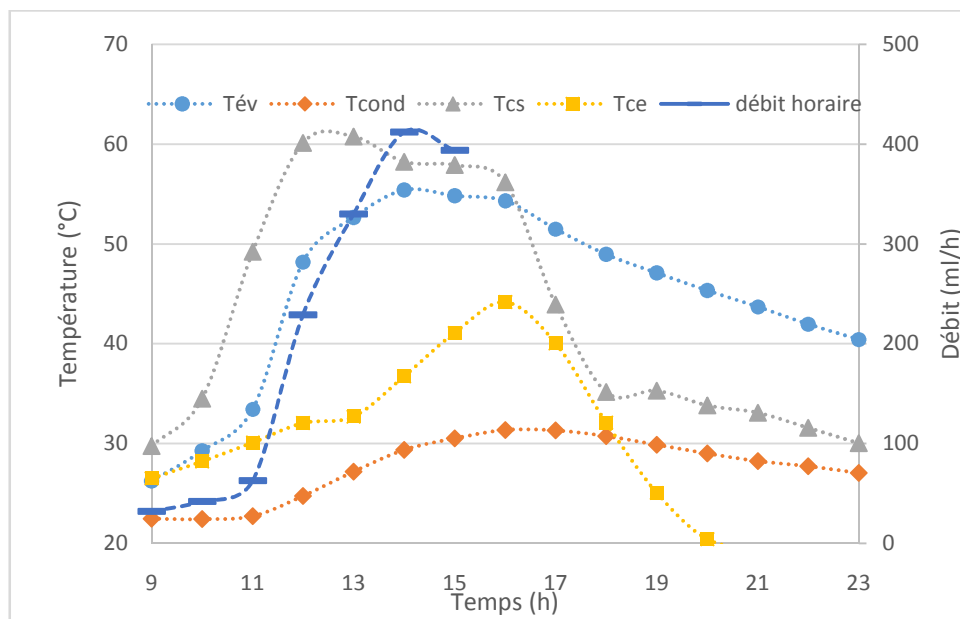


Figure 4.11 : Variation de différentes températures et du débit instantané en fonction du temps (17-04-2016).

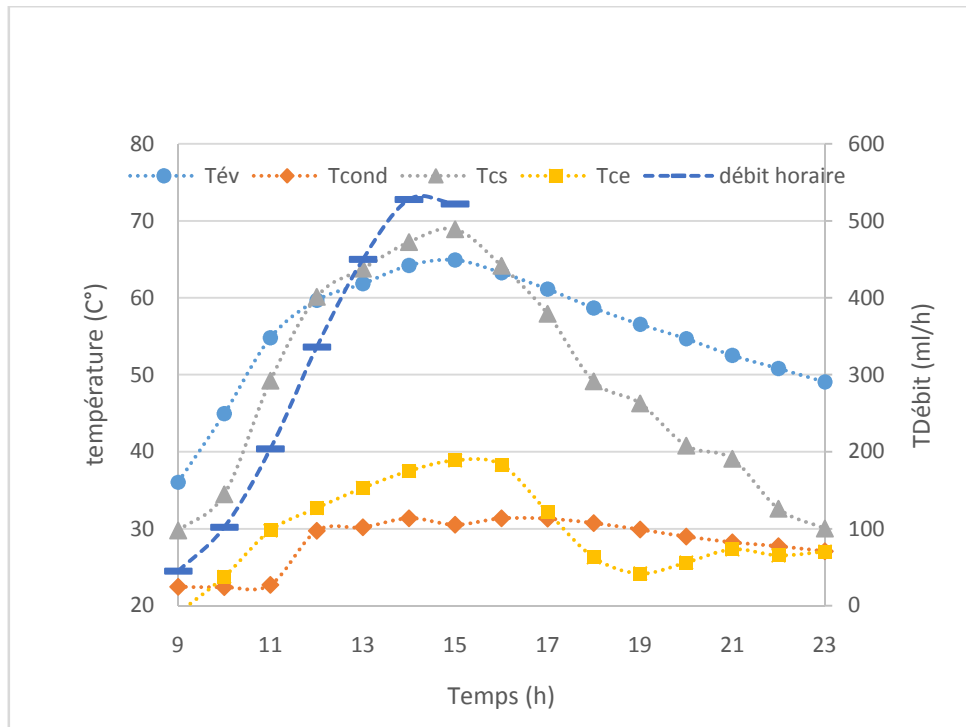


Figure 4.12 : Variation de différentes températures et du débit instantané en fonction du temps (26-04-2016).

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.

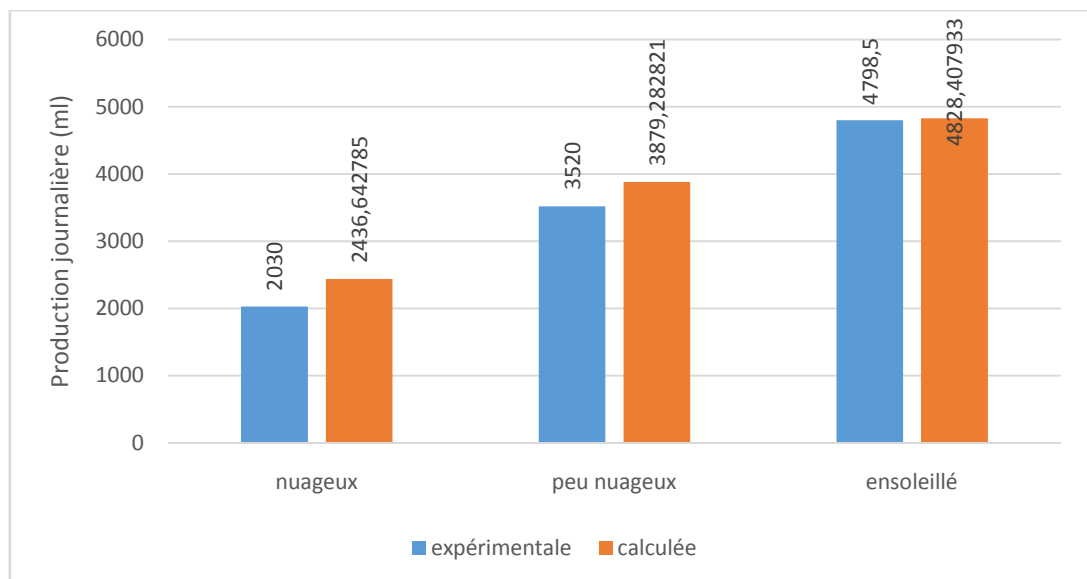


Figure 4.13 : Production d'eau distillée dans différentes journées (ensoleillée, peu nuageuse, et nuageuse).

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.

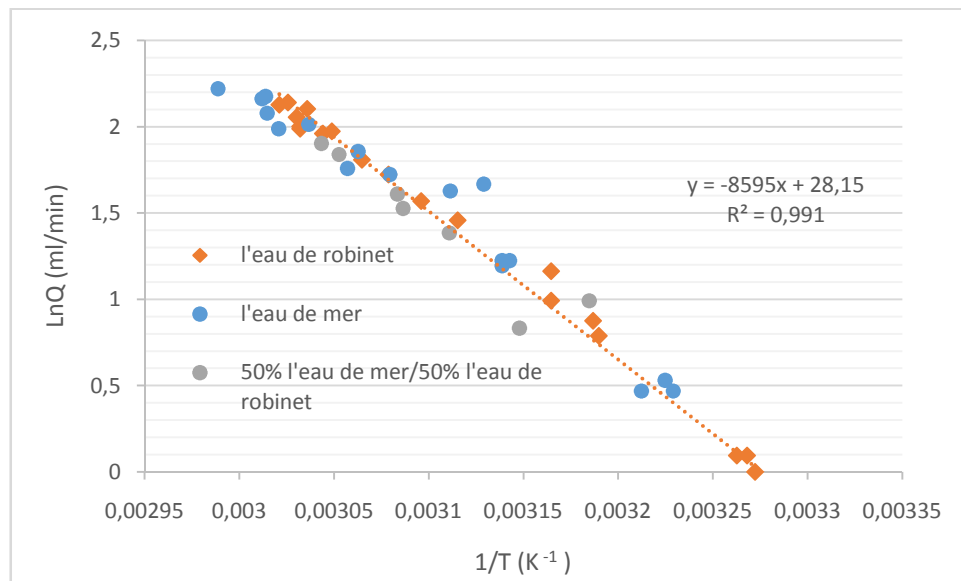


Figure 4.14 : Evolution du débit de distillat en fonction de la température de l'évaporateur (effet de la salinité).

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.

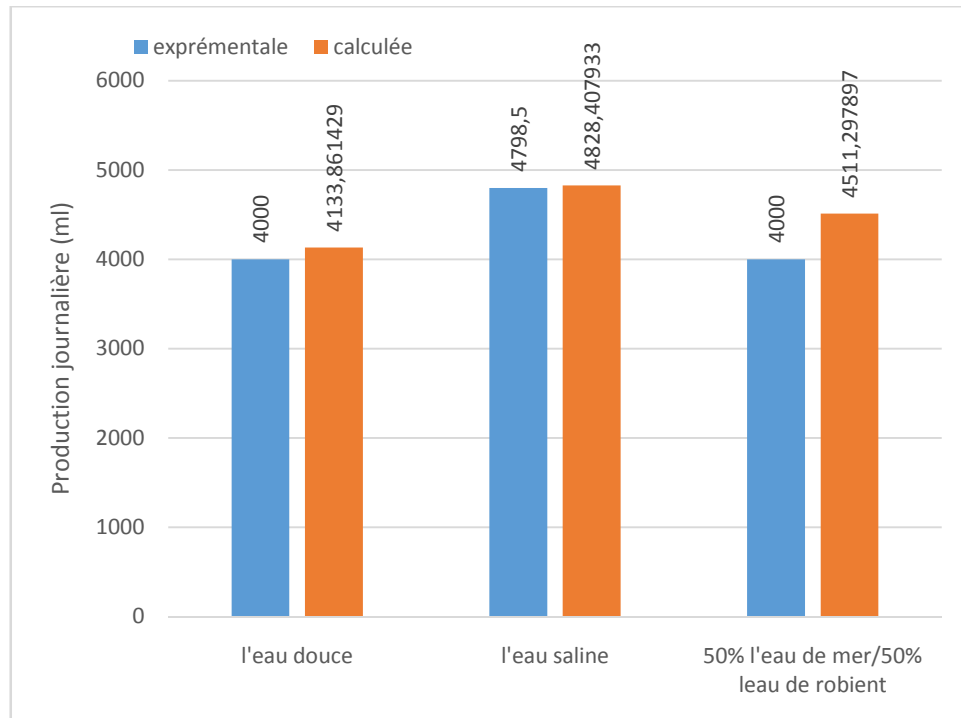


Figure 4.15: Production journalière d'eau distillée (expérimentale et calculée) dans les trois cas (eau de mer, eau de robinet et mélange à 50% en masse).

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.

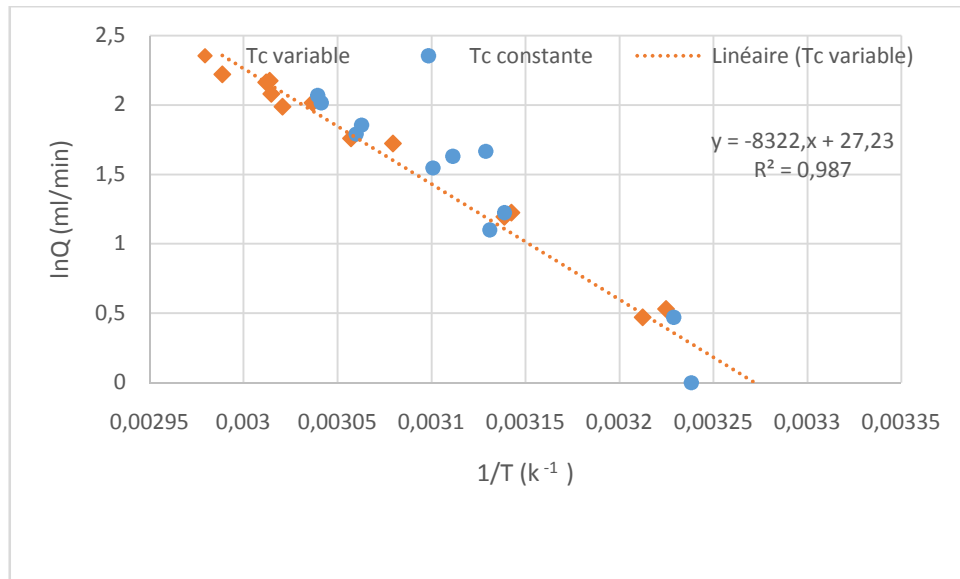


Figure 4.16 : Evolution du débit de distillat en fonction de la température de l'évaporateur - Effet de la température de la source froide.

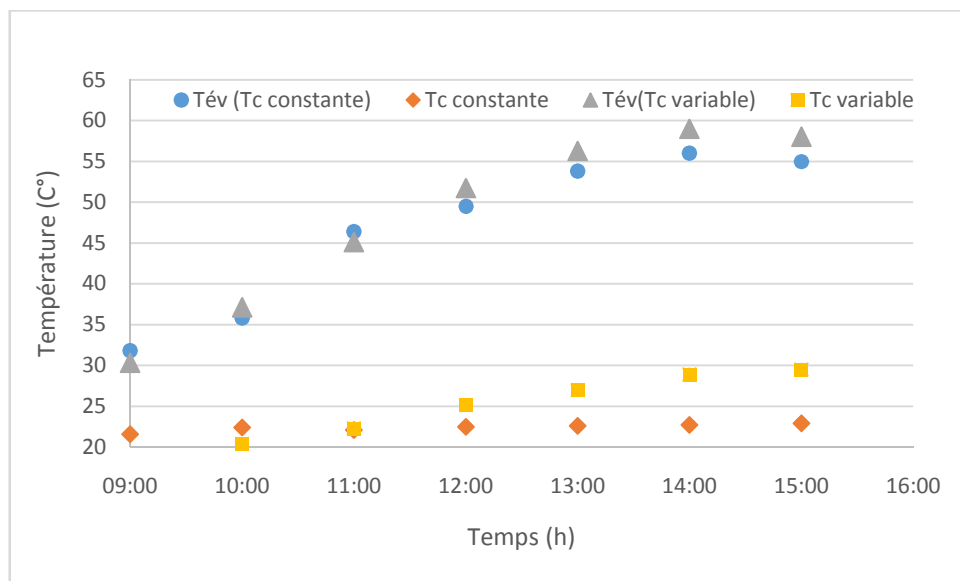


Figure 4.17: Evolutions des températures d'évaporation et de condensation en fonction du temps - Effet de la température de la source froide.

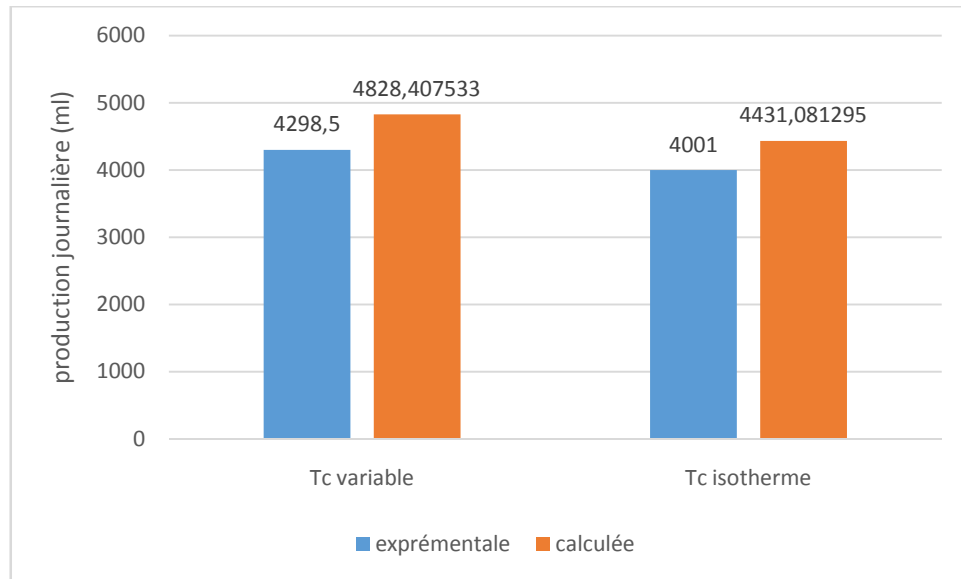


Figure 4.18 : Production d'eau distillée (expérimentale et calculée) dans les cas d'une source froide à température constante et variable.

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 m²). Avec l'utilisation de deux capteurs (4 m²), 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.

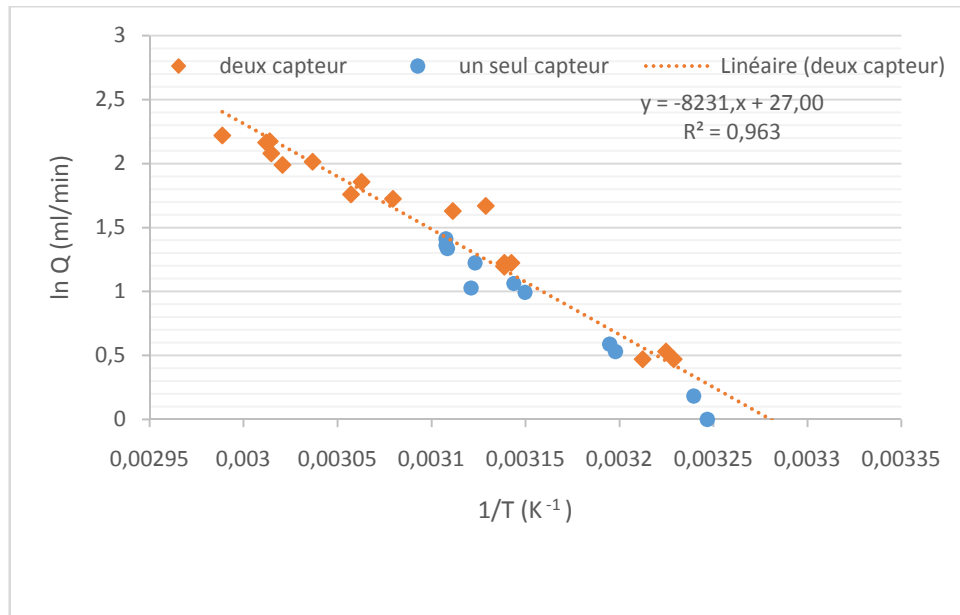


Figure 4.19 : Variation du débit de distillat en fonction de la température d' 'évaporation - Effet de la surface du capteur sur le débit de distillat.

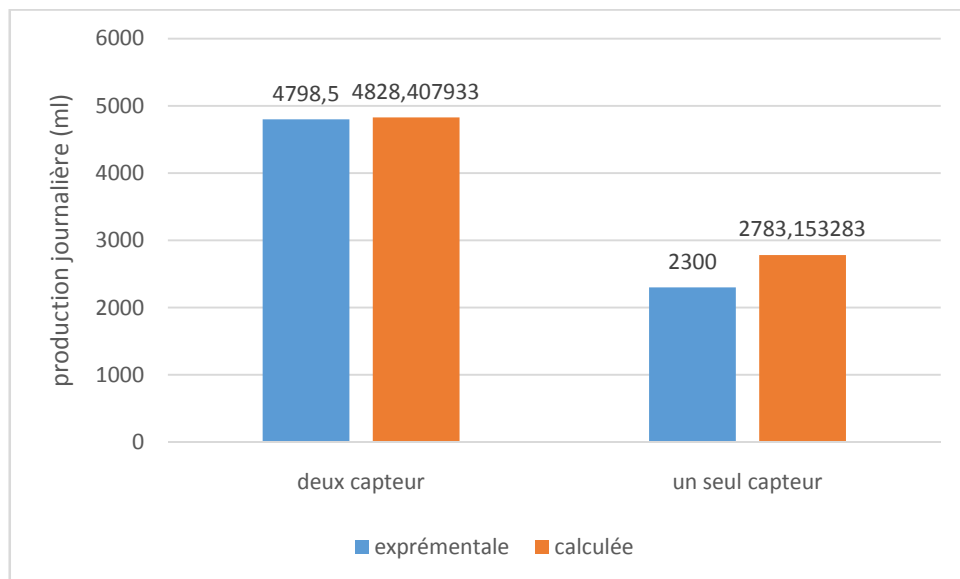


Figure 4.20 : Production journalière (expérimentale et calculée) d'eau distillée – Effet de la surface du capteur.

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.

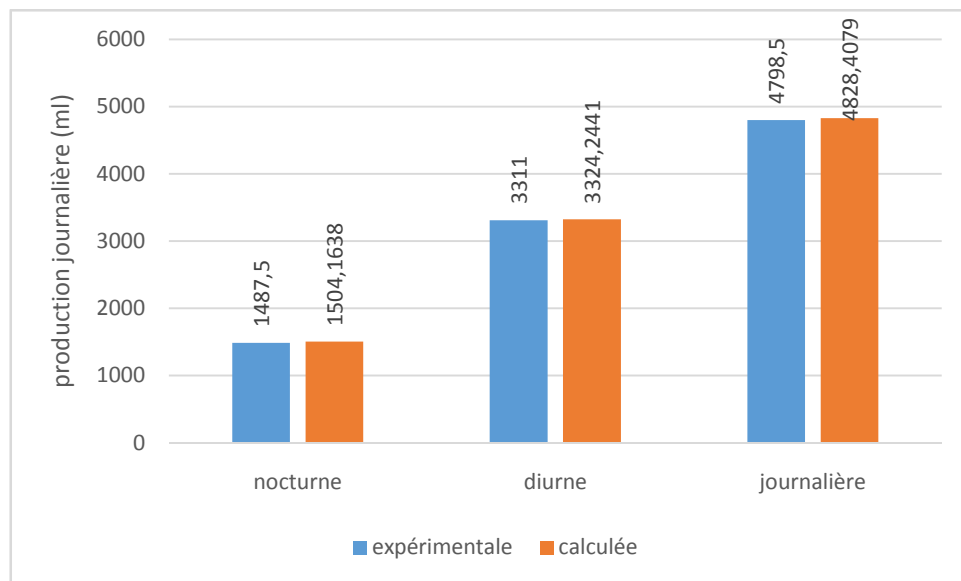


Figure 4.21: Production d'eau distillée nocturne et diurne (effet du stockage de l'énergie).

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 ² |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---|
| 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 m²), 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/m²).

S : surface des capteurs solaires (4 m²)

Δt_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; 103:109-15.

[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 ² |
| h | surface | W/m ² . K |
| Lv | Coefficient de transfert de chaleur par convection | J / kg |
| m _d | la chaleur latente d'évaporation | kg |
| Q | La masse du distillat | ml/h |
| S | le débit horaire de distillat | m ² |
| T _a | surface du capteur | K |
| T _{ce} | Température ambiante | K |
| T _{cond} | Température de l'entrée du capteur | K |
| T _{cs} | Température de condenseur | K |
| T _{év} | Température de sortie du capteur | K |
| T _p | Température de l'évaporateur | K |
| T _s | Température de la surface solide | K |
| T _∞ | 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 ⁻¹ . K ⁻¹ |

| | | |
|-----------|---|--|
| σ | Constante de Stéphan Boltzmann | $5.67 \cdot 10^{-8} \text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ |
| φ | 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 ⁻¹) | Débit ml/min | lnQ ml/min | T(K) | 1/T (K ⁻¹) | 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 ⁻¹) | Débit ml/min | lnQ ml/min | T(K) | 1/T (K ⁻¹) | 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 ⁻¹) | Débit ml/min | lnQ ml/min | T(K) | 1/T (K ⁻¹) | 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 ⁻¹) | Débit ml/min | lnQ ml/min | T(K) | 1/T (K ⁻¹) | 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 ⁻¹) | Débit ml/min | lnQ ml/min | Température (K) | 1/T (K ⁻¹) | 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 |
| | | | | | somme | 3144,129928 |

Appendice D

Le Coût de distillateur

| Élément | Dimension | Coût (DA) |
|--|--------------------------------|---------------|
| Bac principale | 1.4 m ² | 2*4400=8800 |
| Bac supérieur | 1.43 m ² | |
| Bac de refroidissement | 1.15 m ² | |
| 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 ² | 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 réalisée 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 obtenons 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.