

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

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



# **Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : Génie chimique**

Intitulé

**Modélisation et simulation d'un distillateur solaire  
avec stockage d'énergie et condenseur à eau**

Présenté par :

BOUNATIRO LEILA

GENIFI IMEN

Encadré par :

Dr. OUZZANE SLIM

Année universitaire 2018/2019

## **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.

Nous tenons nos remerciements à notre encadreur 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. Merci pour vos bons conseils et votre appui indéfectible qui nous ont été d'un grand soutien pour mener à bien ce travail.

Nous présentons nos remerciements à tous nos enseignants de département génie des procédés.

Nos remerciements vont également aux examinateur pour l'honneur qu'ils nous font de juger ce travail et à l'ensemble des enseignants qui en contribué à ma formation.

Nous remercions enfin tous les membres de nos familles, en particulier nos parents pour leurs sacrifices, leurs soutiens et leurs encouragements ainsi que mes amis, et à toutes les personnes qui nous ont encouragé et soutenu durant la réalisation de ce travail.

## **Dédicaces**

Nous avons, le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

Nos chers parents, qui ont toujours soutenu dans notre étude

Notre promoteur : Dr SLIM OUZZANE

Tous nos frères et sœurs

Toute nos familles

Tous nos enseignants

Tous nos camarades.

# Table des matières

REMERCIEMENT

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

## **CHAPITRE 1 : DESSALEMENT PAR DISTILLATION SOLAIRE**

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 1.1.     | Introduction  | 3  |
| 1.2.     | Procédés de dessalement   | 3  |
| 1.2.1.   | Distillation thermique  | 4  |
| 1.2.1.1. | Distillation à simples effets   | 5  |
| 1.2.1.2. | Distillation à multiples effets   | 6  |
| 1.2.1.3. | Distillation avec vaporisation instantanée à étages multiples ou par détente successive | 7  |
| 1.2.1.4. | Procédés à compression de vapeur  | 7  |
| 1.2.1.5. | Distillation par compression de vapeur  | 8  |
| 1.2.2.   | Procédés membranaires   | 9  |
| a.       | Osiose inverse  | 9  |
| b.       | Electrodialyse  | 9  |
| 1.3.     | Distillation solaire  | 11 |
| 1.3.1.   | Définition de la distillation solaire   | 11 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 1.3.2.   | Principe de fonctionnement du distillateur solaire           | 11 |
| 1.3.3.   | Types de distillateurs solaires                              | 11 |
| 1.3.3.1. | Distillateurs à simple effet (SED)                           | 11 |
| 1.3.3.2. | Distillateur sphérique à balayage                            | 13 |
| 1.3.3.3. | Distillateur solaire terre-eau                               | 13 |
| 1.3.4.   | Caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire | 13 |
| 1.3.5.   | Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur    | 15 |
| 1.3.5.1. | Paramètres externes  | 15 |
| 1.3.5.2. | Paramètres internes  | 15 |
| a)       | Nature de la couverture et son inclinaison                   | 15 |
| b)       | Profondeur de l'eau saumâtre dans le bassin                  | 16 |
| c)       | Autres paramètres  | 16 |

## **CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DU DISTILLATEUR ET DONNEES METEOROLOGIQUES**

|        |                             |    |
|--------|-----------------------------|----|
| 2.1.   | Description du distillateur | 17 |
| 2.2.   | Site géographique           | 18 |
| 2.3.   | Données météorologiques     | 18 |
| 2.4.   | Instruments de mesure       | 18 |
| 2.4.1. | Thermocouples               | 18 |
| 2.4.2. | Débitmètre                  | 19 |
| 2.4.3. | Conductimètre               | 19 |
| 2.5.   | Propriétés physiques        | 19 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.5.1. | Propriétés des pièces métalliques                    | 19 |
| 2.5.2. | Propriétés physiques et thermodynamiques des fluides | 20 |

### **CHAPITRE 3 : MODELISATION DU DISTILLATEUR**

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 3.1.   | Introduction  | 22 |
| 3.2.   | Différents éléments du distillateur solaire                   | 22 |
| 3.3.   | Hypothèses de travail   | 24 |
| 3.4.   | Bilans de chaleur et de masse                                 | 25 |
| 3.4.1. | Bilan sur la plaque évaporateur                               | 25 |
| 3.4.2. | Bilan sur l'eau salée   | 25 |
| 3.4.3. | Bilan sur la plaque condenseur                                | 25 |
| 3.4.4. | Bilan de masse  | 26 |
| 3.5.   | Coefficients de transfert de chaleur et de masse              | 26 |
| 3.5.1. | Echange de chaleur entre l'eau chaude et l'évaporateur        | 26 |
| 3.5.2. | Echange de chaleur entre l'évaporateur et l'eau salée         | 27 |
| 3.5.3. | Echange de chaleur entre l'eau salée et le condense           | 27 |
| 3.5.4. | Echange de chaleur entre la plaque-condenseur et l'eau froide | 28 |
| 3.5.5. | Transfert de masse dans l'enceinte d'évaporation              | 28 |
| 3.6.   | Programme de résolution                                       | 29 |
| 3.6.1. | Système d'équations   | 29 |
| 3.6.2. | Méthode de résolution   | 29 |
| 3.6.3. | Algorithme de calcul  | 30 |

|        |                            |    |
|--------|----------------------------|----|
| 3.6.4. | Organigramme de résolution | 31 |
|--------|----------------------------|----|

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

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.1.   | Introduction   | 33 |
| 4.2.   | Irradiation solaire et température ambiante                            | 33 |
| 4.3.   | Evolution de la température de la source chaude                        | 36 |
| 4.4.   | Résultats de la simulation   | 38 |
| 4.4.1. | Evolution du débit instantané de distillat                             | 38 |
| 4.4.2. | Evolution de la quantité cumulée de distillat                          | 40 |
| 4.4.3. | Effet de la température de la source chaude                            | 41 |
| 4.4.4. | Effet de la température de la source froide                            | 42 |
| 4.4.5. | Evolutions des températures des éléments de la chambre de distillation | 43 |

|            |    |
|------------|----|
| CONCLUSION | 46 |
|------------|----|

APPENDICES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## LISTE DES FIGURES

| <b>Figure</b> | <b>Titre</b>  | <b>Page</b> |
|---------------|---|-------------|
| Figure 1.1    | Principe de la distillation thermique   | 5           |
| Figure 1.2    | Schéma simple-effet   | 5           |
| Figure 1.3    | Schéma du procédé distillation à multiples effets (3 effets)  | 6           |
| Figure 1.4    | Schéma du procédé de détente successives (MSF) à 4 étages   | 7           |
| Figure 1.5    | Schéma du procédé dessalement par compression mécanique de vapeur   | 8           |
| Figure 1.6    | Distillation par compression de vapeur  | 8           |
| Figure 1.7    | Principe du dessalement par osmose inverse  | 9           |
| Figure 1.8    | Procédé de dessalement par électrodialyse   | 10          |
| Figure 1.9    | Distillateur solaire a pente unique   | 12          |
| Figure 1.10   | Distillateur à double pentes  | 12          |
| Figure 1.11   | Distillateur sphérique à balayage   | 13          |
| Figure 1.12   | Puits solaire   | 14          |
| Figure 2.1    | Schéma du distillateur solaire avec stockage d'énergie par l'eau.   | 18          |
| Figure 3.1    | Cuve principale   | 23          |
| Figure 3.2    | Condenseur.   | 24          |
| Figure 3.3    | Organigramme de calcul  | 32          |
| Figure 4.1    | Evolutions de la température ambiante et de l'irradiation solaire en fonction du temps pour la journée du 24/04 | 34          |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figure 4.2  | Evolutions de la température ambiante et de l'irradiation solaire en fonction du temps pour la journée du 10/05 | 35 |
| Figure 4.3  | Evolutions de la température ambiante et de l'irradiation solaire – Comparaison entre les deux journées         | 36 |
| Figure 4.4  | Evolutions des température d'entrée et de sortie et moyenne de la source chaude pour la journée du 24/04        | 37 |
| Figure 4.5  | Evolutions des température d'entrée et de sortie et moyenne de la source chaude pour la journée du 10/05        | 37 |
| Figure 4.6  | Evolution de l'irradiation solaire et de la température de la source chaude                                     | 38 |
| Figure 4.7  | Evolution du débit de distillat produit pour les deux journées  | 39 |
| Figure 4.8  | Evolution du débit de distillat et de l'irradiation solaire   | 40 |
| Figure 4.9  | Evolution de la quantité cumulée d'eau distillée produite durant les deux journées                              | 41 |
| Figure 4.10 | Effet de la température de la source chaude sur la production d'eau distillée                                   | 42 |
| Figure 4.11 | Effet de la température de la source froide sur la production d'eau distillée                                   | 43 |
| Figure 4.12 | Evolution des températures de la source chaude, de l'évaporateur et de la saumure durant la journée du 24/04    | 44 |
| Figure 4.13 | Evolution des températures de la source chaude, de l'évaporateur et de la saumure durant la journée du 10/05    | 45 |

## **LISTE DES TABLEAUX**

| <b>Tableau</b> | <b>Titre</b>                  | <b>Page</b> |
|----------------|-------------------------------|-------------|
| Tableau 2.1    | Emplacement des thermocouples | 19          |

## LISTE DES SYMBOLES

| Symbole        | Désignation   | Unités  |
|----------------|---|---|
| C              | Concentration massique  | Kg.m <sup>3</sup>                                   |
| Cp             | Chaleur massique  | J.Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>                  |
| D              | Débit de distillat  | Kg.s <sup>-1</sup>                                  |
| Dij            | Coefficient de diffusion massique de la vapeur d'eau dans l'air | m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>                      |
| g              | Accélération de la pesanteur                                    | m/s <sup>2</sup>                                    |
| Gr             | Nombre de Grashoff  |   |
| h              | Coefficient de transfert de chaleur par convection              | w/m <sup>2</sup> .K                                 |
| k              | Pas d'itération   |   |
| km             | Coefficient de transfert de masse                               | m.s <sup>-1</sup>                                   |
| L              | Longueur  | m   |
| Lv             | Chaleur latente de vaporisation                                 | J.Kg <sup>-1</sup>                                  |
| M              | La masse  | Kg  |
| Nu             | Le nombre de Nusselt  |   |
| P <sub>v</sub> | Pression de vapeur saturante de l'eau                           | Pa  |
| P <sub>0</sub> | Pression totale   | Pa  |
| Pe             | Le périmètre  | m   |
| Pr             | Nombre de Prandtl   |   |
| R              | Constante des gaz   | Pa.m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| Ra             | Nombre de Rayleigh  |   |
| S              | Surface   |   |
| Sc             | Nombre de Schmidt   | m <sup>2</sup>                                      |
| t              | Temps   | s   |
| T              | Température   | °C  |
| $\bar{T}$      | Température moyenne   | °C  |

### Lettres grecques

| Symbole       | Désignation                       | Unités |
|---------------|-----------------------------------|--------|
| $\beta$       | Angle d'inclinaison du condenseur | °      |
| $\varepsilon$ | Précision recherchée              |        |

|           |                        |                   |
|-----------|------------------------|-------------------|
| $\phi$    | Flux                   | $w/m^2$           |
| $\lambda$ | Conductivité thermique | $w.m^{-1}.K^{-1}$ |
| $\mu$     | Viscosité dynamique    | Pa.s              |
| $\nu$     | Viscosité cinématique  | $m^2.s^{-1}$      |
| $\rho$    | la masse volumique     | $Kg.m^{-3}$       |

### Les indices

| Symbole | Désignation |
|---------|-------------|
| a       | Air         |
| c       | Condenseur  |
| ch      | Chaude      |
| e       | L'eau       |
| ev      | Evaporateur |
| f       | Froide      |
| h       | Humide      |
| m       | Moyenne     |
| s       | salée       |
| v       | Vapeur      |

Commenté [W11]:

## INTRODUCTION

Notre planète est recouverte à 70% d'eau, soit environ 1,4 milliards de km<sup>3</sup>. C'est pour cela que l'on donne souvent à la Terre le nom de « Planète bleue ». Mais la grande majorité de l'eau est salée. L'eau douce ne représente que 2,8% du volume d'eau global. Les deux tiers de l'eau douce sont immobilisés sous forme de glaciers ou des glaces polaires. Finalement, il ne reste que 1% d'eau douce disponible pour l'ensemble de la population mondiale dont la consommation ne cesse d'augmenter en raison du mode de vie et des activités industrielles qui sont responsables d'environ 20 % de la consommation mondiale d'eau douce. Cette consommation industrielle augmente beaucoup depuis les années 1950 car l'eau est en effet essentielle pour beaucoup de processus industriels (refroidissement, lavage, lubrification...).

L'eau devient de plus en plus rare, de plus en plus convoitée et elle constitue un enjeu politique et économique important dans les années à venir. Le manque d'eau pourrait devenir une préoccupation importante pour les 2/3 de la population mondiale, si bien que de nombreux experts considèrent que l'or bleu sera un des enjeux géopolitiques de ce siècle.

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, on est obligé de se diriger vers le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres qui voit se développer de nouvelles techniques de production d'eau potable. Pourtant, si le dessalement apparaît comme une solution d'avenir pour la planète, il reste toutefois de nombreux effets négatifs à corriger : le coût énergétique élevé, l'emploi de produits chimiques pour nettoyer les installations ou le rejet de cuivre et autres molécules toxiques dans la mer. Les principales techniques utilisées sont les procédés membranaires et les procédés thermiques.

La distillation solaire s'est développée depuis un certain nombre d'années et notamment dans notre pays. Ce procédé reste marginal en raison de la faible production. Cependant les techniques ne cessent de se développer.

A cet effet, un distillateur solaire avec stockage de l'énergie et condenseur à eau a été mis au point par l'UDES (Unité de Développement des Equipements Solaires) au niveau de la région de Bou Ismaïl. Ce dernier vise à augmenter la production des distillateurs classiques à l'aide du stockage de l'énergie qui lui permet de fonctionner durant la nuit [1]. Peu coûteux,

modulable, très simple à installer et à entretenir, il est capable de produire, à un moindre coût énergétique, de 5 à 15 litres d'eau douce par jour.

Ce distillateur ayant fait l'objet d'expériences et de test, l'objet de notre travail est la modélisation et la simulation de ce dernier. Ce mémoire est composé de quatre parties :

- Un premier chapitre bibliographique consacré aux distillateurs solaires.
- La description de notre distillateur fera l'objet du deuxième chapitre.
- Le troisième chapitre est dédié à la modélisation mathématique.
- Les résultats de la simulation et leurs discussions feront l'objet du dernier chapitre

## **CHAPITRE 1**

### **DESSALEMENT PAR DISTILLATION SOLAIRE**

#### **1.1. Introduction**

Le manque d'eau potable et la rareté de ses ressources naturelles causés, à la fois, par la sécheresse due au changement climatique et par la surexploitation des nappes phréatiques, deviennent un grand problème qui menace la vie humaine dans plusieurs régions de la planète.

Ces facteurs sont régulièrement cités parmi les crises les plus graves que l'humanité aura à affronter pendant les prochaines années et qui constituent un risque majeur de conflit entre nations et populations.

Face à cette menace de la vie des habitants dans plusieurs régions, la recherche et la production de l'eau potable, à partir d'autres ressources naturelles, est d'une extrême importance.

A cet effet le recours au dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer est primordial à nos jours pour combler le déficit de l'eau potable et la forte consommation d'eau destinée à l'agriculture et au fonctionnement des usines. Plusieurs chercheurs de nombreux pays ont développé des techniques de dessalement de plus en plus performantes, afin de produire une plus grande quantité d'eau potable pour subvenir aux besoins futurs à un coût plus faible.

Parmi ces techniques, trois sont les plus utilisées. Ce sont l'osmose inverse, l'électrodialyse et la distillation.

Le dessalement par distillation solaire qui représente une solution dans les régions arides, fait l'objet de nombreuses recherches.

#### **1.2. Procédés de dessalement**

La sécheresse, le changement climatique et la croissance démographique font que de nombreuses régions du monde souffrent énormément du manque d'eau potable. Pour face cette problématique qui menace la vie humaine, le recours à la recherche de technique et de procédés de dessalement de l'eau de mer est une nécessité absolue.

Le dessalement de l'eau appelé également dessalage ou désalinisation est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce (potable) à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer).

En dépit du nom, il ne s'agit pas de retirer les sels de l'eau, mais plutôt, l'inverse, c'est-à-dire l'extraction de l'eau douce. Les procédés les plus répandus sont la distillation et l'osmose inverse qui se caractérisent par leur rendement et le taux de sel résiduel.

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon leurs principes :

- Les processus de distillation thermiques comme :
  - La distillation à simple effet (simple effet distillation [SED]).
  - La distillation à multiples effets (multiple effet distillation [MED]).
  - La distillation à multiples étages (multiple stage flash [MSF]).
  - La distillation par compression de la vapeur (vapeur compression [VC]).
  - Procédés à compression de vapeur (Thermique TVC et Mécanique MVC)
  
- Les procédés membranaires sont les procédés dont la source principale d'énergie est l'électricité comme :
  - L'osmose inverse (reverse osmosis (RO))
  - L'électrodialyse (ED) [2].

### **1.2.1. Distillation thermique**

La distillation thermique (figure 1.1) consiste à évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur émise par les rayons du soleil, soit en la chauffant dans une chaudière. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en dépôt les sels dissous et toutes les autres substances contenues dans l'eau de mer. Il suffit alors de condenser la vapeur d'eau ainsi obtenue pour obtenir une eau douce consommable. C'est une technique qui a été connue auparavant et utilisée seulement, à petite échelle pour une consommation personnelle.

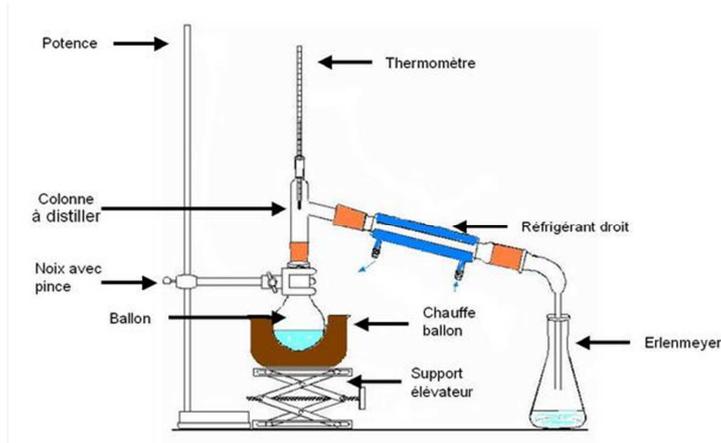


Figure 1.1 : Principe de la distillation thermique [3]

#### 1.2.1.1. Distillation à simples effets [SED]

Une circulation de vapeur permet de chauffer, dans un évaporateur, l'eau salée qui s'évapore sous une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique ; on peut alors condenser directement la vapeur sortant de l'évaporateur sans récupération de la chaleur de condensation, ou bien au contraire, on peut envoyer la vapeur dans un condenseur en vue du préchauffage de l'eau salée qui arrive dans l'installation (figure 1.2) [2].

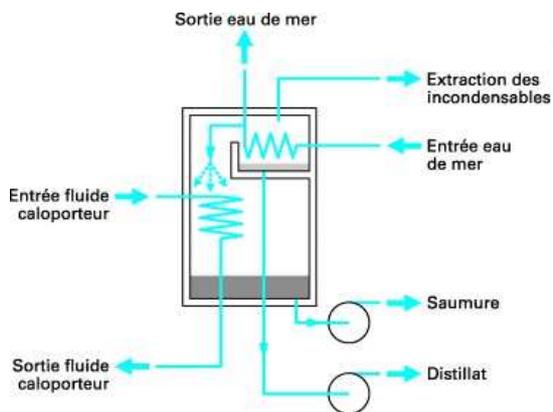


Figure 1.2 : Schéma simple-effet [3]

### 1.2.1.2. Distillation à multiples effets (MED)

On distingue deux procédés distincts : l'un utilise des tubes verticaux, l'autre des tubes horizontaux. L'avantage revient aux tubes horizontaux pour une puissance de pompage moindre et un coefficient global d'échange thermique plus important.

Ce procédé (figure 1.3) est basé sur le principe de l'évaporation partielle, sous pression réduite, de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2<sup>ème</sup> effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2<sup>ème</sup> effet et ainsi de suite. Seule, l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m<sup>3</sup> d'eau douce produite) [4].

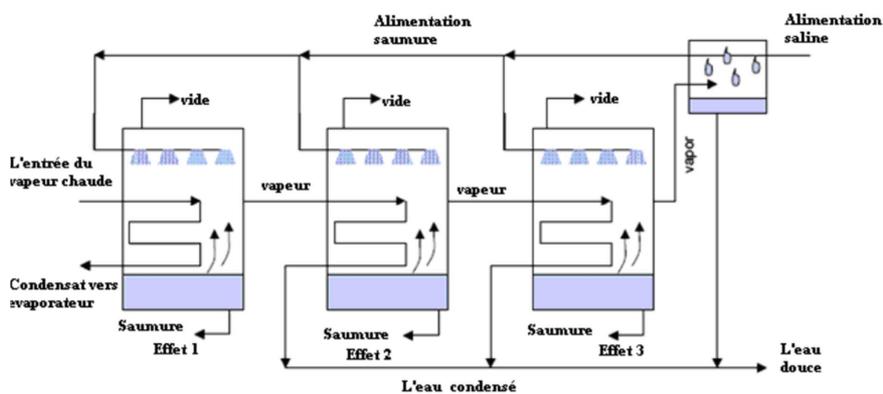


Figure 1.3. : Schéma du procédé distillation à multiples effets (3 effets) [4]

### 1.2.1.3. Distillation avec vaporisation instantanée à étages multiples ou par détentes successives [MSF]

L'installation comprend un certain nombre d'enceintes ou cellules, thermiquement isolées et disposées en série dans lesquelles se produit la vaporisation instantanée par détente (figure 1.4).

L'eau saline à traiter est chauffée sous pression, sans évaporation, puis introduite dans les cellules sous vide partiel où elle circule successivement. A chaque étage, la vapeur est produite par détente et va se condenser dans la partie supérieure au contact d'un faisceau tubulaire dans lequel l'eau d'alimentation circule [4].

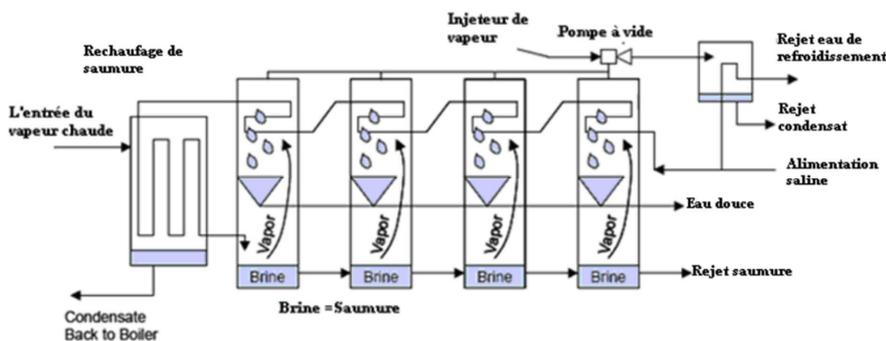


Figure 1.4 : Schéma du procédé de détentes successives (MSF) à 4 étages [4]

### 1.2.1.4. Procédés à compression de vapeur (Thermique TVC et Mécanique MVC)

On distingue entre procédés à compression mécanique (MVC) et procédés à compression thermique (TVC). La vapeur produite dans le dernier effet ou dans l'effet unique est aspirée par un compresseur ; après compression, la température de saturation de la vapeur, à haute pression, est augmentée. Cette vapeur peut donc être envoyée dans le faisceau tubulaire pour porter à ébullition l'eau de mer dans l'évaporateur où règne une pression plus faible en utilisant un éjecteur de vapeur pour TVC. La vapeur, haute pression, est ainsi condensée pour se transformer en eau distillée liquide et le cycle se reproduit avec la vapeur produite par l'évaporation partielle de l'eau de mer.

Les unités MVC (figure 1.5) sont destinées pour de petites unités (jusqu'à environ 3.000 m<sup>3</sup>/jour) tandis que les unités de TVC peuvent aller à 20.000 m<sup>3</sup>/jour. L'efficacité thermique des systèmes de TVC est augmentée en ajoutant des étapes additionnelles. Ainsi, l'avantage

principal est la possibilité d'adjoindre des effets au système MVC afin d'augmenter sa capacité de production [4].

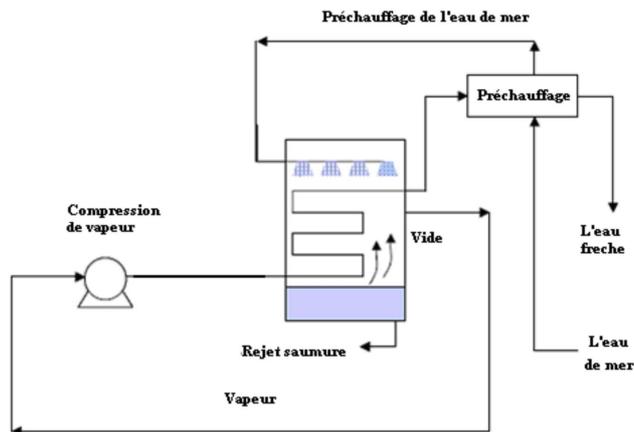


Figure 1.5 : Schéma du procédé de dessalement par compression mécanique de vapeur [4]

#### 1.2.1.5. Distillation par compression de vapeur

Le mélange eau de mer et de saumure est introduit par la pompe autour des tubes du condenseur (figure 1.6). Le compresseur injecte dans la chambre de la vapeur d'eau qui provient de l'eau salée ce qui entretient la masse de vapeur brassée par le compresseur. Cette technique sous pression, permet de générer en permanence de la vapeur qui vient se condenser dans les tubes [4].

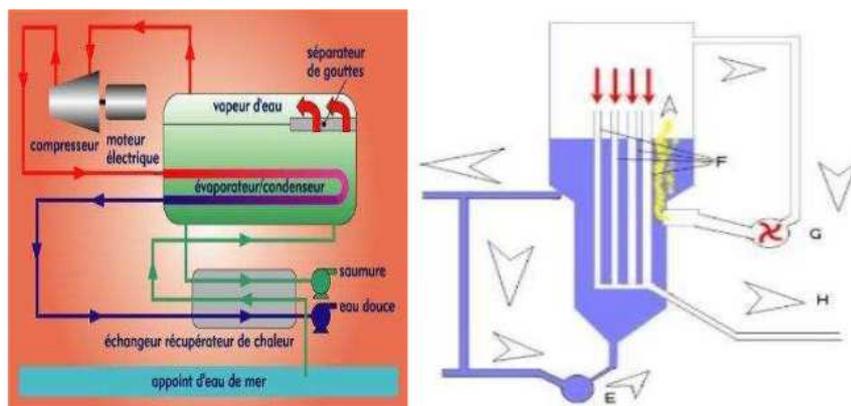


Figure 1.6- Distillation par compression de vapeur [5]

### 1.2.2. Procédés à membranes

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

#### a. Osmose inverse

L'osmose inverse (en anglais, reverse osmosis) est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen des membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phases. Les membranes polymères utilisées laissent passer sélectivement les molécules d'eau.

La figure (1.7) ci-après, montre le procédé de dessalement par osmose inverse qui nécessite d'abord, un prétraitement très poussé de l'eau de mer pour éviter le dépôt de matières en suspension sur les membranes qui conduirait très rapidement à une diminution des débits produits [4].

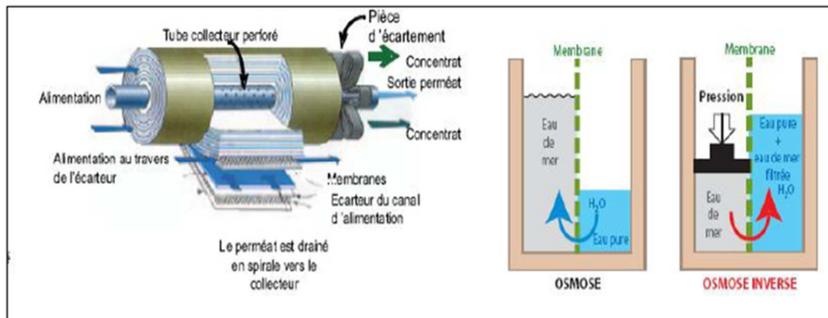


Figure .1.7 : Principe du dessalement par osmose inverse [4]

#### b. Electrodialyse

La technique de l'électrodialyse est basée sur la perméabilité des membranes à certains cations ou à certains anions, sous l'action d'un courant électrique continu, qui fait migrer les ions vers les électrodes (figure 1.8).

Les sels sont présents dans l'eau salée, sous la forme d'ions. Etant minéralisée, l'eau passe à travers une cellule d'électrodialyse, les cations seront attirés vers l'électrode négative et les anions vers l'électrode positive. Les membranes perméables aux cations permettent le passage des cations exclusivement, tels que le sodium et le calcium. Tandis que les membranes perméables aux anions permettent le passage d'anions tels que le chlorure et sulfate.

L'électrodialyse est un système très rentable pour les faibles concentrations. Par conséquent, l'énergie à mettre en jeu dépend de la concentration en sel [4].

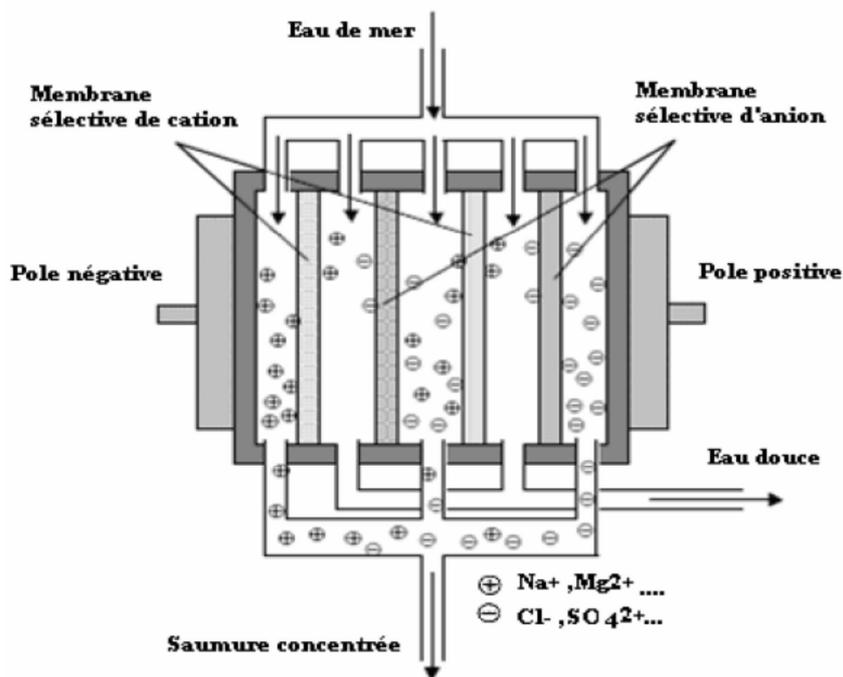


Figure 1.8 : Procédé de dessalement par électrodialyse [4]

La consommation énergétique pour le dessalement à membrane est faible vis à vis de la distillation, mais les inconvénients majeurs sont la réduction progressive de la perméabilité et la modification de la sélectivité en cas de colmatage des membranes ce qui réduit la durée de vie des membranes. Par électrodialyse, il est difficile du point de vue technique et

économique d'obtenir une eau déminéralisée ayant une salinité inférieure à 300-400 mg/l. Ce procédé convient donc principalement pour les usages domestiques [4].

### **1.3. Distillation solaire**

#### **1.3.1. Définition de la distillation solaire**

La distillation solaire est un phénomène naturel; son principe se déroule comme dans la nature, où le rayon solaire incident sur la surface de l'eau des mers, océans, lacs, et rivières chauffe l'eau qui s'évapore et s'élève, transportée par le vent jusqu'à ce qu'elle arrive à un endroit plus froid où elle se condense et donne de la pluie.

Cependant, l'homme a reproduit en un modèle miniaturisé, le cycle naturel, ce modèle est appelé distillateur solaire [6].

#### **1.3.2. Principe de fonctionnement du distillateur solaire**

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée. L'eau dans le bac s'évapore et la vapeur d'eau se condense sur la surface de la vitre. La condensation forme des gouttes d'eau pures qui coulent sur la vitre inclinée pour être récupérées dans un récipient propre [6].

#### **1.3.3. Types de distillateurs solaires**

Tous les types de distillateurs solaires possèdent le même principe de fonctionnement, mais ils peuvent être différents en termes de performance, de conception et de matériaux utilisés. On distingue trois types de distillateurs solaires [7].

##### **1.3.3.1. Distillateurs solaire à simple effet (SED)**

Ce sont les distillateurs les plus utilisés dans le monde. Le distillateur est constitué d'un bassin peint en noir pour capter le maximum de radiation solaire, rempli d'eau et couvert d'une vitre transparente aux rayons; cette dernière est inclinée pour que la vapeur condensée dans sa face intérieure coule vers une gouttière qui est placée en bas. Généralement, ce type est simple à construire et à maintenir mais son efficacité reste inférieure à celle d'un distillateur à multiple effets. Dans ce type, on peut citer :

##### **✓ Distillateur à pente unique**

C'est un distillateur à capteur unique incliné d'un angle  $\beta$  (figure 1.9); il est appelé aussi distillateur simple. Généralement, sa production est faible comparée avec les autres types de

distillateurs à multiple effets, mais il est très souple en raison du simple entretien et la facilité de son démontage et de son assemblage [6].

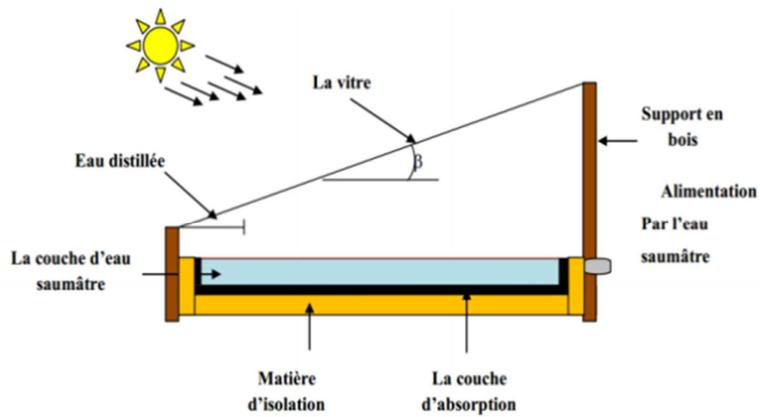


Figure 1.9 : distillateur solaire a pente unique [8]

#### ✓ Distillateur à double pentes

C'est un distillateur simple mais à double couvertures verrières où chacune d'elles est inclinée d'un angle ( $\beta$ ), son avantage est d'exposer l'un de ses côtés au soleil et l'autre à l'ombre pour accélérer et augmenter le taux de condensation (fig. 1.10).

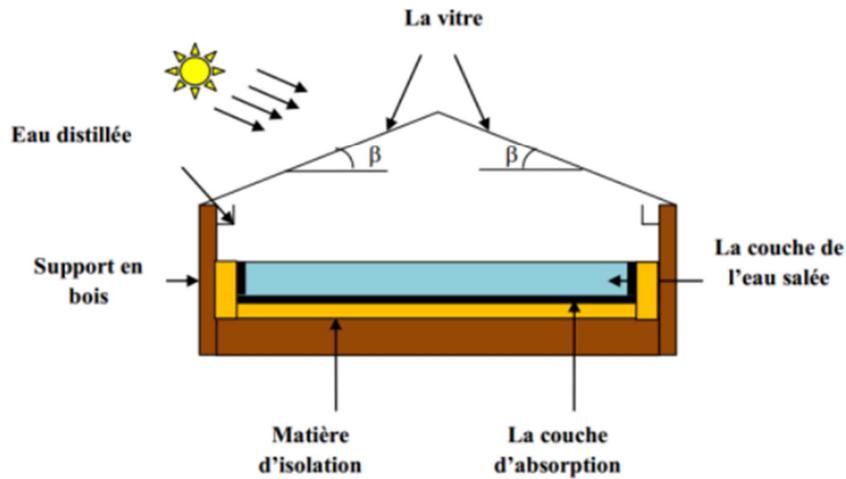


Figure 1.10 : Distillateur à double pentes [8]

### 1.3.3.2. Distillateur sphérique à balayage

Ce type de distillateur mis au point par le Pr. MENGUY de l'Université de LYON (Fig. I.11) est constitué d'une sphère en plexiglas à l'intérieur de laquelle est placé un bac contenant l'eau saline. La condensation s'effectue sur la demi-sphère supérieure et le distillat est recueilli à la base de la demi-sphère inférieure. L'un des inconvénients de ce type de distillateur est que la surface horizontale de la solution intercepte moins de radiations solaires que les surfaces inclinées [9].

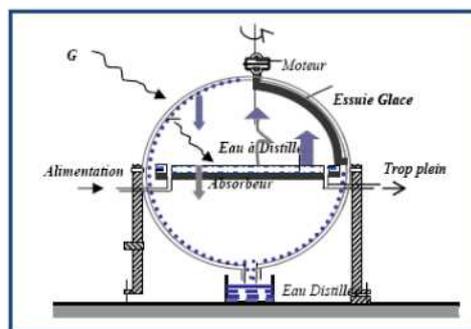


Figure 1.11 : Distillateur sphérique à balayage [8]

### 1.3.3.3. Distillateur solaire terre-eau

De grandes quantités d'humidité sont accumulées dans la terre durant la saison froide, même dans les zones arides. Pour exploiter cette hydrologie naturelle, on utilise le distillateur solaire terre-eau. Il est similaire à celui à effet de serre, sauf que le sol remplace le bassin noir (Figure. 1.12) [7].

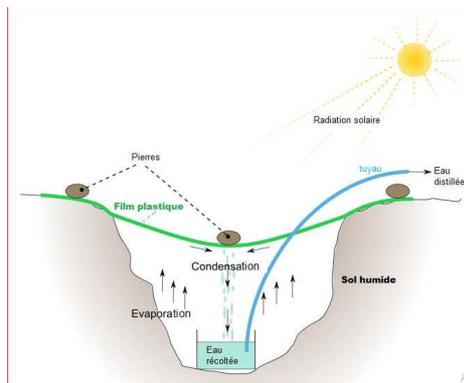


Figure 1.12 : Puits solaire

### 1.3.4. Caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire

Les distillateurs solaires sont caractérisés par le rendement, l'efficacité interne, l'efficacité globale et la performance.

A- Le rendement : il exprime la production journalière du distillateur par m<sup>2</sup> de la surface de l'eau saline (L/j.m<sup>2</sup>).

B - L'efficacité globale : elle rapporte la quantité d'eau produite à l'énergie solaire incidente sur la surface horizontale ; cette grandeur ne tient pas compte de l'inclinaison de la couverture

verrière et sa relation est :  $\eta_g = \frac{q_{ev}}{G\alpha_\omega}$  [9]

$\eta_g$  Efficacité du vitrage.

$\alpha_\omega$  Facteur d'absorption des rayons solaires.

$q_{ev}$  Chaleur d'évaporation de l'eau saumâtre (W/m<sup>2</sup>).

G Irradiation solaire au temps (W/m<sup>2</sup>).

C - L'efficacité interne : Un changement de pente par un angle  $\beta$  fait varier la valeur de l'intensité incidente, ce terme d'efficacité tient compte de l'énergie réelle qui entre dans le

distillateur, on la définit alors par :  $\eta_i = \frac{q_{ev}}{G\alpha_{\omega}}$  [9]

Commenté [W11]:

$\eta_i$  Efficacité interne du distillateur(%).

D -La performance : Le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus absolue a amené Satcunanathan et Hansen à définir le facteur de performance horaire (F.P.H) et le facteur de performance brut (F.P.B) par :

$$F.P.H = \frac{\text{La quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{la quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}}$$

$$F.P.B = \frac{\text{La quantité d'eau produite au bout d'une journée}}{\text{la quantité d'énergie entrée au bout d'une journée}}$$

A un instant donné de la journée, on peut calculer l'efficacité instantanée par l'équation suivante :

$$P = \frac{\text{la quantité d'eau produite au bout du temps}(t)}{G\alpha_{\omega}S} [9]$$

S Surface de contact avec le fluide en(m<sup>2</sup>).

### 1.3.5. Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur

Le rendement et l'efficacité thermique du distillateur dépend directement, de la différence entre la température de l'eau saline et la température du vitrage où a lieu la condensation. Ces dernières sont affectées par plusieurs paramètres internes ou externes.

On peut diviser ces paramètres en deux grands groupes :

- ✓ Les paramètres externes (climatiques et locaux) ;
- ✓ Les paramètres internes de l'appareil (condenseur, absorbeur, profondeur de l'eau saline, différence de température entre l'eau saline et le condenseur...) [9]

#### 1.3.5.1. Paramètres externes

Ces paramètres sont, généralement, liés au site (géographie) et aux conditions météorologiques. Il s'agit de :

- L'intensité du rayonnement solaire,
- L'intermittence des nuages,
- Le pourcentage du rayonnement diffus,
- La vitesse du vent,
- La température ambiante,
- L'altitude,
- La longitude et la latitude

#### **1.3.5.2. Paramètres internes**

Il s'agit, principalement, des paramètres de construction.

##### **a) Nature de la couverture et son inclinaison**

Quatre éléments sont très importants pour caractériser la couverture verrière à savoir :

- ✓ Le coefficient de transmission des rayons solaires ;
- ✓ La mouillabilité par rapport à l'eau ;
- ✓ La résistance envers les conditions climatiques et mécaniques ;
- ✓ L'inclinaison par rapport à l'horizon (angle  $\beta$ ) [9].

##### **b) Profondeur de l'eau saumâtre dans le bassin**

Pour les distillateurs dont la base est thermiquement bien isolée, la différence entre ceux à faible et ceux à grande profondeur de l'eau saumâtre est notable. La faible profondeur de l'eau saumâtre (faible masse d'eau) entraîne l'évaporation rapide à cause de l'énergie importante qui sera absorbée par l'eau saumâtre. La production est d'autant plus importante que la profondeur est faible ; d'autre part, plus la profondeur de l'eau saumâtre est grande, plus longtemps dure la distillation après le coucher du soleil [9]

##### **c) Autres paramètres**

D'autres paramètres ont un effet non négligeable et peuvent affecter l'efficacité. Nous citons :

- La température de l'eau saumâtre à l'entrée du distillateur (plus elle est élevée meilleure est la production) ;
- La concentration de sels (moins l'eau à distiller est salée, plus elle est facile à évaporer [9].

## CHAPITRE 2

### DESCRIPTION DU DISTILLATEUR ET DONNEES METEOROLOGIQUES

#### 2.1. Description 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 2.1) 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 (26° pour le printemps).
- ❖ une unité de distillation qui comporte plusieurs éléments :
  - un bac de stockage de l'énergie d'une capacité de 150 litres, contenant de l'eau distillée chauffée par les capteurs solaires. Cette eau qui constitue le fluide caloporteur et stocke l'énergie, 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 dont le fond horizontal commun avec le bac de stockage d'énergie est remplie d'eau salée jusqu'à un certain niveau. Le plafond incliné (13°) de cette enceinte 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 condenseur de forme triangulaire pour assurer la circulation de l'eau naturellement
  - un réservoir d'eau froide relié au condenseur servant à la condensation.

Le principe du 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 [1]

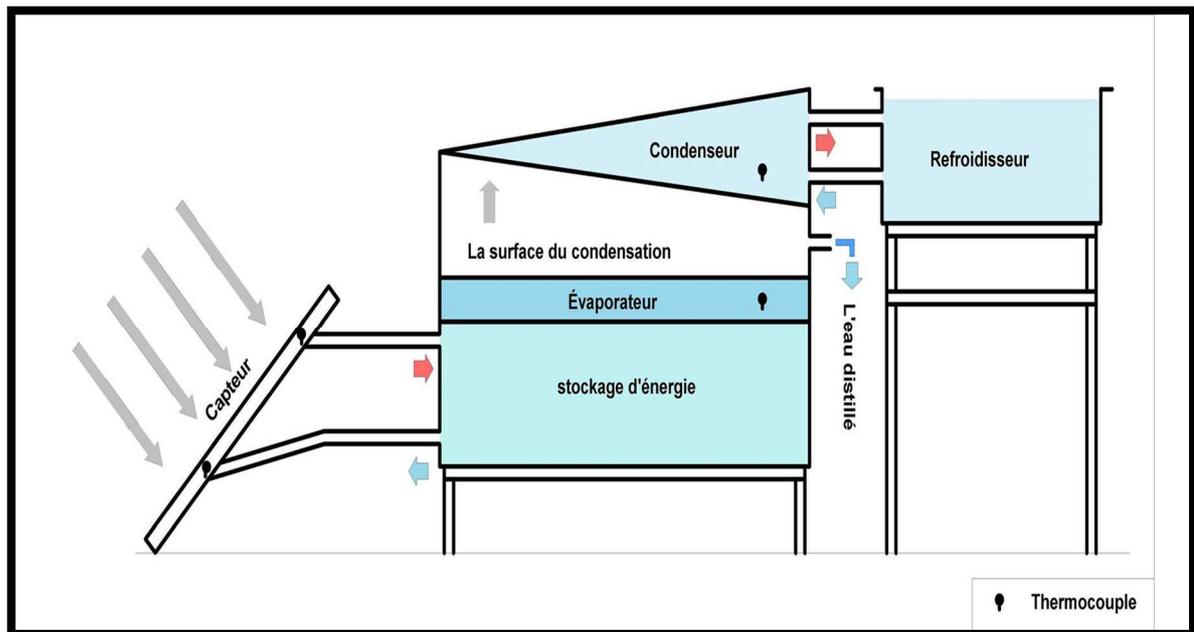


Figure 2.1 : Schéma du distillateur solaire avec stockage d'énergie par l'eau. [9]

## 2.2. Site géographique

La ville de Bou Ismaïl est composée d'une zone basse, légèrement inclinée vers la mer à 15 mètres d'altitude de moyenne, et d'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,
- Altitude par rapport au niveau de la mer : 29 m. [9]

## 2.3. Données météorologiques

Les valeurs de l'irradiation solaire et de la température ambiante sont fournies par une station météorologique située près de notre site. Ces valeurs, prises toutes les heures pour deux journées différentes, sont situées en annexe (appendice A) et illustrées par des figures au dernier chapitre.

## 2.4. Instruments de mesure

### 2.4.1. Thermocouples

Pour mesurer les températures, des thermocouples sont placés en divers endroits du distillateur. 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. [9]

**Tableau 2.1. Emplacement des thermocouples [9]**

| N° de thermocouple | Emplacement   |
|--------------------|---|
| 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)                     |

#### 2.4.2. Débitmètre

Le distillateur n'est pas doté d'un débitmètre. Le débit de distillat est mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée et d'un chronomètre. [9]

#### 2.4.3. Conductimètre

La qualité de l'eau distillée est vérifiée par la mesure de la conductivité électrique [9].

### 2.5. Propriétés physiques

Le modèle du calcul nécessite la connaissance des propriétés physiques et thermodynamiques des matériaux et des fluides impliqués. Les caractéristiques de certains d'entre eux varient de façon non négligeable en fonction de la température, et des corrélations décrivant ces variations sont donc nécessaires.

#### 2.5.1. Propriétés des pièces métalliques

Les parties métalliques (plaque-évaporateur et plaque condenseur) sont constituées d'acier et ont une épaisseur de 2 mm. Les propriétés physiques qui sont nécessaires sont la masse volumique ( $\rho$ ) et la capacité calorifique ( $C_p$ ).

$$\rho = 7850 \text{ Kg.m}^{-3}$$

$$C_p = 500 \text{ J.Kg}^{-1}\text{C}^{-1}$$

### 2.5.2. Propriétés physiques et thermodynamiques des fluides

Les fluides présents sont l'eau, l'air et la vapeur d'eau. Ces deux derniers forment l'air humide présent dans l'enceinte d'évaporation.

- Les propriétés physiques de l'eau sont prises constantes :
  - **Viscosité dynamique** :  $\mu_e = 10^{-3} \text{ Pa.s}$
  - **Viscosité cinématique** :  $\nu_e = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
  - **Densité du l'eau** :  $\rho_e = 1 \text{ Kg.m}^{-3}$
  - **Capacité calorifique** :  $C_{pe} = 4018 \text{ J.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
  - **Conductivité thermique** :  $\lambda_e = 0,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Les propriétés physiques de l'air ont été prises variables avec la température [10] :

- **Conductivité thermique**

$$\lambda_a (\text{W} / \text{m}^\circ\text{K}) = 0,00389 + 0,0000742 T \quad (2.1)$$

- **Masse volumique**

$$\rho_a (\text{kg.m}^{-3}) = 3,1377 - 0,009088T + 8,5779 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (2.2)$$

- **Viscosité cinématique**

$$\nu_a (\text{m}^2.\text{s}^{-1}) = -0,0000357088 + 2,2644 \cdot 10^{-7} T - 1,834285 \cdot 10^{-10} T^2 \quad (2.3)$$

- **Nombre de Prandtl**

$$\text{Pr}_a = 0,8314857142 - 0,000574 T + 5,42857142 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (2.4)$$

Ces Corrélations sont valables dans le domaine de température (250 K-450 K).

- **Capacité calorifique**

$$C_{pa} (\text{J.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}) = 0,2511.T + 1004,4 \quad (2.5)$$

- **Viscosité cinématique**

$$\nu_a (\text{m}^2.\text{s}^{-1}) = -0.0000357 + 2,2644 \cdot 10^{-7} T - 1,8334 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (2.6)$$

- Les propriétés physiques de la vapeur d'eau sont données par [11] :

- **Masse volumique**

$$\rho_v (\text{Kg.m}^{-3}) = \frac{212,768}{(T + 273,15)} \quad (2.7)$$

➤ **Capacité calorifique**

$$C_{pv} (\text{J.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}) = 3,11 \cdot 10^{-4} T^2 + 3,49 \cdot 10^{-2} T + 1910,7 \quad (2.8)$$

➤ **Viscosité dynamique**

$$\mu_v (\text{Pa.s}) = \frac{8,23 \cdot 10^{-2}}{T + 673} \times \left( \frac{T}{273,15} \right)^{1,5} \quad (2.9)$$

- Les propriétés physiques de l'air humide sont données par les expressions suivantes [12] :

➤ **Masse volumique**

$$\rho_h (\text{Kg.m}^{-3}) = \frac{P_o}{RT} (M_a x_a + M_v x_v) \quad (2.10)$$

$P_o$  : pression atmosphérique (en Pa)

$M_a, M_v$  : masses molaires de l'air et de l'eau respectivement (en  $\text{Kg.mol}^{-1}$ )

$x_a, x_v$  : fractions molaires de l'air et de la vapeur d'eau respectivement

➤ **Viscosité dynamique**

$$\mu_h (\text{Pa.s}) = \frac{\mu_a x_a \sqrt{M_a} + \mu_v x_v \sqrt{M_v}}{x_a \sqrt{M_a} + x_v \sqrt{M_v}} \quad (2.11)$$

$\mu_a, \mu_v$  : viscosités dynamiques de l'air et de la vapeur d'eau respectivement

➤ **Capacité calorifique**

$$C_{ph} (\text{J.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}) = \frac{C_{pa} x_a M_a + C_{pv} x_v M_v}{x_a M_a + x_v M_v} \quad (2.12)$$

$C_{pa}, C_{pv}$  : capacités calorifiques de l'air et de l'eau respectivement (en  $\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

➤ **Conductivité thermique**

$$\lambda_h (\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}) = \lambda_a x_a + \lambda_v x_v \quad (2.13)$$

$\lambda_a, \lambda_v$  : conductivités thermiques de l'air et de la vapeur d'eau respectivement

## CHAPITRE 3

### MODELISATION DU DISTILLATEUR

#### 3.1. Introduction

Il est reconnu que la complexité de la simulation d'un distillateur solaire réside principalement, dans les bilans des différentes parties du distillateur, que ce soit pour la géométrie choisie ou pour les données des calculs. Cette difficulté a motivé de nombreuses approches différentes, allant de la géométrie la plus simple qui présente une simple conception, à la modélisation du distillateur solaire simple. [13]

~~Il est reconnu que la complexité de la simulation d'un distillateur solaire réside principalement, dans les bilans des différentes parties du distillateur, que ce soit pour la géométrie choisie ou pour les données des calculs. Cette difficulté a motivé de nombreuses approches différentes, allant de la géométrie la plus simple [MUH 2005] qui présente une simple conception, à la modélisation du distillateur solaire simple [MOU 2001], [YOU 2003] et [MOU 2004].~~

La simulation du distillateur passe par sa modélisation. Cette dernière consiste à établir les équations mathématiques des bilans thermiques et massiques qui régissent les phénomènes intervenants lors du fonctionnement.

Dans ce qui suit, on s'intéressera à :

- Établir les bilans de chaleur et de masse au niveau ~~des différentes éléments~~ des différents éléments ;
- Formuler des hypothèses simplificatrices ;
- Donner les différents coefficients de transfert de chaleur par convection ;
- Établir un programme à l'aide du logiciel MATLAB qui simulera le comportement du distillateur.

Mis en forme : Espace Après : 4 pt

#### 3.2. Eléments constituant le distillateur solaire

Nous subdivisons le distillateur en ses divers éléments qui sont :

- \* **Le capteur solaire.**

Mis en forme : Espace Après : 6 pt

Mis en forme : Retrait : Avant : 0.12 cm, Suspendu : 0.63 cm, Espace Après : 6 pt, Ajouter un espace entre les paragraphes de même style

Ce dernier d'une surface de 1,98 m<sup>2</sup>, est orienté vers le sud avec une inclinaison de 26° qui est optimale pour la saison. Le capteur qui chauffe l'eau est relié au bac de stockage d'eau chaude (source chaude), permettant le chauffage de l'eau salée par sa plaque supérieure.

Mis en forme : Retrait : Avant : 0.75 cm

#### \* La cuve principale

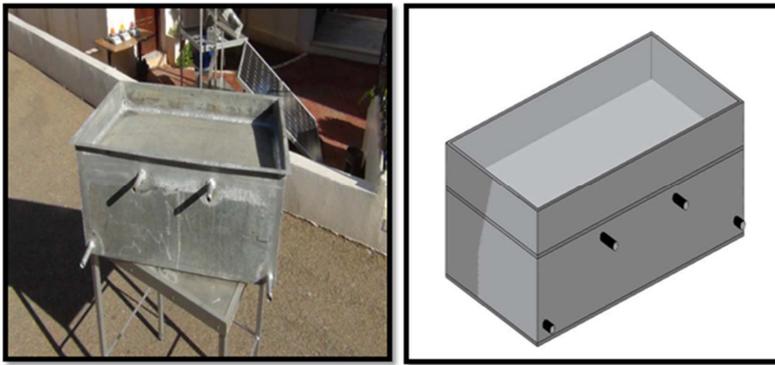
Cette dernière est composée de deux parties construites en acier (2 mm d'épaisseur) (figure 3.2-1) :

##### – Le bac de stockage

Ce bac de forme rectangulaire (91 × 55 × 30 cm<sup>3</sup>) est rempli d'eau distillée chaude provenant du capteur (capacité de 150 litres). Il constitue la source chaude permettant de chauffer l'eau salée.

##### – L'enceinte d'évaporation

L'enceinte d'évaporation est de forme rectangulaire, de dimension 91 × 55 × 7 cm<sup>3</sup>, soit une capacité de 35 litres. 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 [9]



Mis en forme : Centré

Figure 3.2-1: Cuve principale [9]

#### \* Le condenseur

C'est un bac de forme rectangulaire dont le plafond est incliné pour aux vapeurs condensées de couler vers un vase de récupération. D'une capacité de 64 litres, il est rempli d'eau froide provenant du refroidisseur, permettant de condenser la vapeur d'eau sur la surface inclinée.

Ce condenseur amovible (figure 3.32) peut être enlevé pour permettre une condensation à air\_ [9].

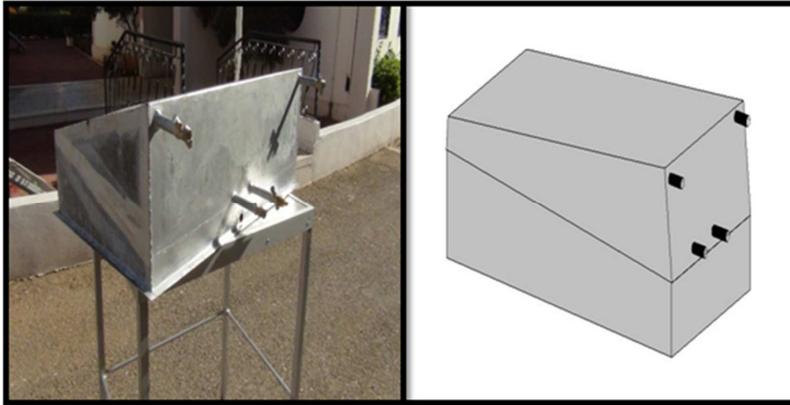


Figure 3.32. Condenseur [9]

### 3.3. Hypothèses de travail

Afin de développer un modèle mathématique, des hypothèses ont été faites, sans pour autant réduire la pertinence du modèle.

Les équations des bilans de chaleur et de masse sont écrites en tenant compte de ces hypothèses et qui sont énumérées ci-dessous :

- Compte tenu que les températures d'entrée et de sortie de l'eau chaude circulant entre le réservoir d'eau chaude et le capteur sont connues à chaque instant, la modélisation du capteur n'a pas ~~semblé~~ nécessaire.
- Le dispositif étant isolé de l'extérieur, les pertes thermiques ont été négligées.
- On néglige le gradient transversal de température (les extrémités étant isolées).
- Les propriétés physiques et thermodynamiques de l'eau et des parties métalliques ont été prises constantes sauf la pression de vapeur saturante de l'eau.
- La variation en fonction de la température des propriétés physiques et thermodynamiques de l'air et de la vapeur d'eau ont été prises en considération.
- Les coefficients d'échanges de chaleur par convection dépendent de la température.

- Le régime est instationnaire.
- La température de l'eau froide est constante (grand réservoir d'eau froide).
- Compte tenu des faibles épaisseurs des plaques métalliques séparant les fluides, les gradients de température sont négligeables selon l'épaisseur.

### 3.4. Bilans de chaleur et de masse

Compte tenu de ce qui précède, les éléments pour lesquels les bilans seront établis sont :

- La plaque-évaporateur
- La saumure
- La plaque-condenseur

#### 3.4.1. Bilan sur la plaque évaporateur

Cette plaque échange de la chaleur avec la source chaude et la saumure.

$$(MC_p)_{ev} \frac{dT_{ev}}{dt} = h_{ch-ev} S_{ev} (T_{ch} - T_{ev}) - h_{ev-s} S_{ev} (T_{ev} - T_s) \quad (3.1)$$

avec

$T_{ev}$  : température de la plaque évaporateur

$T_{ch}$  : température de l'eau chaude

$(MC_p)_{ev}$  : capacité calorifique de l'évaporateur (en  $J \cdot ^\circ C^{-1}$ )

$T_s$  : température de l'eau salée

$h_{ev-s}$  : coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'évaporateur et l'eau salée

$h_{ch-ev}$  : coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'eau chaude et l'évaporateur

$S_{ev}$  : surface de l'évaporateur

#### 3.4.2. Bilan sur l'eau salée

L'épaisseur de la couche d'eau salée n'étant pas grande, on a supposé une température homogène pour toute la couche.

$$-(MC_p)_s \frac{dT_s}{dt} = h_{ch-ev} S_{ev} (T_{ch} - T_{ev}) - h_{ev-s} S_{ev} (T_{ev} - T_s) - D \cdot L_v (T_s) \quad (3.2)$$

$T_c$  : température de la plaque condenseur

$h_{s-c}$  : coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'eau salé et le condenseur

$D_d$  : débit de distillat en  $Kg \cdot s^{-1}$

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation de l'eau salée en  $J \cdot Kg^{-1}$

Mis en forme : Retrait : Avant : 1.25 cm

Code de champ modifié

### 3.4.3. Bilan sur la plaque condenseur

Le bilan s'écrit :

$$(MC_p)_c \frac{dT_c}{dt} = h_{s-c} S_c (T_x - T_c) + D_d L_v (T_c) - h_{c-f} S_c (T_c - T_f)$$
~~$$(MC_p)_c \frac{dT_c}{dt} = h_{s-c} S_c (T_x - T_c) + D L_v (T_c) - h_{c-f} S_c (T_c - T_f) \quad (3.3)$$~~

Mis en forme : Retrait : Avant : 1.25 cm, Espace Après : 0 pt

Code de champ modifié

$h_{c-f}$  : coefficient de transfert de chaleur par convection entre le condenseur et l'eau froide.

$S_c$  : surface du condenseur

$T_f$  : température de l'eau froide

$L_v$  : la chaleur latente de condensation

### 3.4.4. Bilan de masse

Le débit de distillat (ou d'évaporation) est donné par :

$$D = k_m S_{ev} (C_{vs} - C_{vc}) = \frac{k_m M_v S_{ev}}{R} \left( \frac{P_v(T_s)}{T_s + 273} - \frac{P_v(T_c)}{T_c + 273} \right) \quad (3.4)$$

avec :

$k_m$  : coefficient de transfert de masse (en  $m \cdot s^{-1}$ )

$C_{vs}$  : concentration massique de la vapeur d'eau à la surface de la saumure ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$C_{vc}$  : concentration massique de la vapeur d'eau à la surface du condenseur ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$P_{v^*}$  : pression de vapeur saturante de l'eau (en Pa)

$R$  : constante des gaz (en  $Pa \cdot m^3 \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ )

Mis en forme : Indice

## 3.5. Coefficients de transfert de chaleur et de masse

### 3.5.1. Echange de chaleur entre l'eau chaude et l'évaporateur

L'échange de chaleur entre les deux éléments se fait par convection naturelle entre un fluide et une plaque horizontale (fluide sous la plaque froide).

Pour déterminer le coefficient de convection  $h_{ch-ev}$ , on utilise la corrélation de Mc-Adams [1] citée par Incropera et col [2] exprimée par :

$$Nu_L = 0,15 \cdot Ra_L^{1/3} \quad (3.5)$$

Cette corrélation est valable dans le cas d'une surface basse chaude ou surface haute froide et dans la plage de  $Ra$  suivante :

$$10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}$$

Avec :

$Nu_L = \frac{h.L}{\lambda}$  : est le nombre adimensionnel de Nusselt basé sur une longueur caractéristique du système.

Dans le cas d'une plaque, on prend :

$$L = \frac{S}{Pe} \quad (S \text{ et } Pe \text{ désignent la surface et le périmètre de la plaque})$$

$Ra_L = Gr_L.Pr$  : nombre adimensionnel de Rayleigh

$$Gr_L = \frac{g|T_{ch} - T_{ev}|L^3}{(T_m + 273).v^2} : \text{nombre adimensionnel de Grashoff [14]}$$

$T_m$  : température moyenne entre le fluide et la plaque (en °C)

$v$  : viscosité cinématique du fluide (en  $m^2s^{-1}$ )

$g$  : accélération de la pesanteur

$$Pr = \frac{\mu.C_p}{\lambda} : \text{nombre adimensionnel de Prandtl du fluide [14]}$$

avec :

$\mu, C_p, \lambda$  : viscosité dynamique, chaleur spécifique et conductivité thermique du fluide

On aura donc :

$$h = \frac{Nu.\lambda}{L} \quad [15] \quad (3.6)$$

qui, dans notre cas devient :

$$h_{ch-ev} = \frac{Nu.\lambda_e}{L_{cl}} \quad (3.7)$$

L'indice e représente ici, l'eau chaude et  $L_{cl}$  la longueur caractéristique de la plaque-évaporateur et remplace L.

### 3.5.2. Echange de chaleur entre l'évaporateur et l'eau salée

On utilise la même corrélation que précédemment et qui est valable dans le cas d'une plaque basse chaude avec :

$$Gr = \frac{g|T_{ev} - T_s|L_{cl}^3}{(T_m + 273).v_e^2} \quad (3.8)$$

$T_m$  : température moyenne entre la saumure et la plaque (en °C)

$T_s$  : température de la saumure (en °C)

### 3.5.3 Echange de chaleur entre l'eau salée et le condenseur

Nous utilisons la corrélation de Holland et col [1477] valable dans une cavité. Dans cette cavité, le fluide est constitué par l'air humide (air et vapeur d'eau). La corrélation est exprimée par :

$$Nu_L = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708(\sin 1.8\beta)^{1.6}}{Ra_L \cdot \cos\beta} \right] \left[ 1 - \frac{1708}{Ra_L \cdot \cos\beta} \right]^{\oplus} + \left[ \left( \frac{Ra_L \cdot \cos\beta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^{\oplus} \quad (3.9)$$

$\beta$  : angle d'inclinaison du condenseur (13°)

avec :

$$h_{s-c} = \frac{Nu_L \lambda_h}{L_{c3}} \quad (3.10)$$

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr_h$$

$$Gr_L = \frac{g \cdot \cos\beta |T_s - T_c| L_{c3}^3}{(T_m + 273) \cdot \nu_h^2}$$

L'indice h est relatif à l'air humide

es nombres adimensionnels sont calculés à partir des propriétés physiques de l'air humide fonction de la température.

$\bar{P}_{sat,s}$  : pression saturante à température l'eau salé en atm

$\bar{P}_{sat,c}$  : pression saturante à température de condenseur en atm

$\bar{P}_{sat,m}$  : pression saturante à température moyenne en atm

#### Formule de Rankine

La formule de Rankine, une simplification de la formule de Dupré, donne des valeurs pour la pression de vapeur saturante de 5 à 140°C

$$\ln \bar{P}_{sat} = \left( 13.7 - \frac{5120}{T(K)} \right)$$

#### Le nombre de Rayleigh

Il fournit un critère de passage entre la convection libre laminaire et la convection libre turbulente, et il est défini par la relation :

Mis en forme : Couleur de police : Automatique

Mis en forme : Couleur de police : Rouge

Mis en forme : Espace Après : 6 pt

Mis en forme : Espace Après : 6 pt, Sans numérotation ni puces

Mis en forme : Espace Après : 6 pt

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

D'où on tire le coefficient de convection :

$$h_{s-c} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{L_{c3}}$$

### 3.5.4.2 Echange de chaleur entre la plaque-condenseur et l'eau froide

Nous utilisons ici, la corrélation (3.3) en remplaçant l'accélération de la pesanteur  $g$  par  $g \cdot \cos\beta$  où  $\beta$  est l'angle d'inclinaison de la plaque condenseur et la longueur caractéristique par  $L_{c4}$ . On aura :

$$h_{c-fr} = \frac{Nu \cdot \lambda_c}{L_{c4}} \quad \text{--- (3.11)}$$

### 3.5.5.2 Transfert de masse dans l'enceinte d'évaporation

Le débit d'évaporation est donné par l'équation (3.4) reprise ci-dessous :

$$D = k_m S_{ev} (C_{vs} - C_{vc}) = \frac{k_m M_v S_{ev}}{R} \left( \frac{P_v(T_s)}{T_s + 273} - \frac{P_v(T_c)}{T_c + 273} \right)$$

$$D = k_m S_{ev} (C_{vs} - C_{vc}) = \frac{k_m M_v S_{ev}}{R} \left( \frac{P_v(T_s)}{T_s + 273} - \frac{P_v(T_c)}{T_c + 273} \right)$$

Code de champ modifié

Le coefficient de transfert de matière par convection est obtenu en utilisant l'analogie de Chilton-Colburn avec le transfert de chaleur [-14-]. Cette analogie est représentée par l'expression suivante :

$$\frac{h}{\rho C_p} Pr^{2/3} = k_m Sc^{2/3} \quad \text{--- (3.12)}$$

qui donne :

$$k_m = \frac{h}{\rho C_p} \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} \quad \text{--- (3.13)}$$

Les propriétés physiques considérées sont celles de l'air humide.

$Sc = \frac{\nu_h}{D_{ij}}$  : nombre adimensionnel de Schmidt pour le mélange air-vapeur d'eau

$D_{ij}$  : coefficient de diffusion massique de la vapeur d'eau dans l'air (en  $m^2s^{-1}$ )

Ce dernier est donné par l'expression [-15-] :

$$D_{ij} = \frac{1.87 \cdot 10^{-10} (T_m + 273)^{2.072}}{P_o} \quad (3.14)$$

$P_o$  : pression totale (en Pa)

Mis en forme : Après : 0.32 cm, Espace Après : 10 pt

### 3.6. Programme de résolution

A partir des équations des bilans d'énergie, nous mettons en œuvre un programme informatique permettant de simuler le comportement thermique de notre distillateur solaire.

Ce programme écrit sous MATLAB, se compose d'un programme principal et de plusieurs sous-programmes.

Le programme principal comporte les données fixes et les boucles de calcul. Ces données concernent les dimensions, les propriétés physiques et les conditions initiales. Il permet aussi la sortie des résultats sous forme de courbes ou de les stocker. [9]

Les sous-programmes permettent :

- Le calcul des propriétés physiques et thermodynamiques des fluides
- Le calcul des coefficients de transfert de chaleur et de masse par convection
- Le calcul du débit du distillat
- La résolution du système d'équations.

Mis en forme : Espace Après : 10 pt, Taquets de tabulation : Pas à 1.27 cm

➤

Mis en forme : Retrait : Avant : -0.02 cm, Suspendu : 1.02 cm, Espace Après : 10 pt, Avec puces + Niveau : 1 + Alignement : 0.63 cm + Tabulation après : 1.27 cm + Retrait : 1.27 cm, Taquets de tabulation : 0.75 cm, Tabulation de liste + 2.51 cm, Tabulation de liste + Pas à 1.27 cm

#### 3.6.1. Système d'équations

Nous avons donc, un système de 3 équations différentielles couplées et une équation algébrique (bilan massique). Ces équations sont non linéaires du fait de la présence des paramètres non constants ( $h_{ch-ev}$ ,  $h_{ev-s}$ ,  $h_{s-c}$ ,  $h_{c-fr}$ ,  $L_v$ ,  $D_d$ )

#### 3.6.2. Méthode de résolution

Pour résoudre le système, nous avons assimilé les dérivées par rapport au temps à des différences finies afin d'obtenir un système d'équations algébriques et d'utiliser la méthode de Newton-Raphson.

Le système d'équations différentielles peut s'écrire :

$$\frac{d\mathbf{T}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{T}, t)$$

avec  $\mathbf{T}$  et  $F$  des vecteurs constitués des températures variables et des bilans de chaleur.

Code de champ modifié

Le système devient :

$$\frac{\Delta \mathbf{T}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{T}^{i+1} - \mathbf{T}^i}{\Delta t} = \mathbf{f}(\bar{\mathbf{T}}, t)$$

Avec :  $\bar{\mathbf{T}} = \frac{\mathbf{T}^{i+1} + \mathbf{T}^i}{2}$  (on prend les valeurs moyennes des variables entre l'initiale et la finale pour plus de précision).

Les  $\mathbf{T}^{i+1}$  sont les inconnues.

Le système d'équations devient :

$$F_1 = (MC_p)_{ev} \frac{T_{ev}^{i+1} - T_{ev}^i}{\Delta t} - h_{ch-ev} S_{ev} (\bar{T}_{ch} - \bar{T}_{ev}) + h_{ev-s} S_{ev} (\bar{T}_{ev} - \bar{T}_s) = 0$$

$$(MC_p)_{ev} \frac{T_{ev}^{i+1} - T_{ev}^i}{\Delta t} - h_{ch-ev} S_{ev} (\bar{T}_{ch} - \bar{T}_{ev}) - h_{ev-s} S_{ev} (\bar{T}_{ev} - \bar{T}_s)$$

$$F_2 = (MC_p)_s \frac{T_s^{i+1} - T_s^i}{\Delta t} - h_{ev-s} S_{ev} (\bar{T}_{ev} - \bar{T}_s) + h_{s-c} S_{ev} (\bar{T}_s - \bar{T}_c) + D.L_v(\bar{T}_s) = 0$$

$$F_3 = (MC_p)_c \frac{T_c^{i+1} - T_c^i}{\Delta t} - h_{s-c} S_{ev} (\bar{T}_s - \bar{T}_c) - D.L_v(T_c) + h_{c-fr} S_c (\bar{T}_c - \bar{T}_{fr}) = 0$$

$$D = \frac{\bar{k}_m M_v S_{ev}}{R} \left( \frac{P_v(\bar{T}_s)}{\bar{T}_s + 273} - \frac{P_v(\bar{T}_c)}{\bar{T}_c + 273} \right)$$

### 3.6.2.13. - Algorithme de calcul [87]

La méthode de résolution est la méthode de Newton qui consiste à résoudre un système d'équations algébriques de la forme :

$$F(\mathbf{T}) = \mathbf{0}$$

$\mathbf{T}$  et  $F$  sont des vecteurs.

L'algorithme de la méthode est donnée par :

$$\mathbf{T}^{k+1} = \mathbf{T}^k - J^{-1}(\mathbf{T}^k) \cdot F(\mathbf{T}^k) \quad [10]$$

k : pas d'itération-

J : matrice jacobéenne de F donnée par :

Code de champ modifié

Code de champ modifié

Mis en forme : Police :+Titres CS (Times New Roman)

Mis en forme : Retrait : Première ligne : 0 cm

Code de champ modifié

Commenté [W11]:

Mis en forme : Retrait : Avant : 0 cm

Code de champ modifié

Commenté [W12]:

Mis en forme : Police :Non Gras, Police de script complexe :Non Gras

Code de champ modifié

Mis en forme : Police :Non Gras, Police de script complexe :Non Gras

Mis en forme : Police :Non Gras, Police de script complexe :Non Gras

Commenté [W13]:

Mis en forme : Police :Non Gras, Police de script complexe :Non Gras

Mis en forme : Police :Non Gras, Police de script complexe :Non Gras

Code de champ modifié

Mis en forme : Police :Non Gras, Police de script complexe :Non Gras

Mis en forme : Police :Gras, Non souligné, Police de script complexe :Gras

Mis en forme : Espace Après : 6 pt

Mis en forme : Police :Gras, Non souligné, Police de script complexe :Gras

Mis en forme : Retrait : Première ligne : 0 cm, Espace Après : 3 pt

Mis en forme : Espace Avant : 0 pt, Après : 0 pt

Mis en forme : Police :Gras, Police de script complexe :Gras

Mis en forme : Espace Avant : 0 pt, Après : 6 pt

Code de champ modifié

Mis en forme : Espace Avant : 0 pt, Après : 0 pt

$$J(\mathbf{T}) = \begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial T_1 & \partial F_1 / \partial T_2 & \partial F_1 / \partial T_n \\ \partial F_2 / \partial T_1 & \partial F_2 / \partial T_2 & \partial F_2 / \partial T_n \\ \partial F_3 / \partial T_1 & \partial F_3 / \partial T_2 & \partial F_3 / \partial T_n \end{bmatrix} \quad [10]$$

La méthode consiste à se donner une série de valeurs ~~des~~  $\mathbf{T}^k$  pour initier l'itération et calculer les  $\mathbf{T}^{k+1}$ . L'itération est arrêtée lorsqu'on aura :

$$\|F\| \leq \epsilon$$

Avec :

$\epsilon$  : Précision recherchée.

Cette méthode converge assez rapidement ~~et si dans notre problème, on en prenant prend un bon pas de temps faible, la précision des résultats sera appréciable.~~

Code de champ modifié

Mis en forme : Retrait : Première ligne : 0 cm, Espace Avant : 0 pt, Après : 6 pt

Mis en forme : Police :Gras, Police de script complexe :Gras

Mis en forme : Police :Gras, Police de script complexe :Gras

Code de champ modifié

Mis en forme : Espace Avant : 0 pt, Après : 0 pt

Code de champ modifié

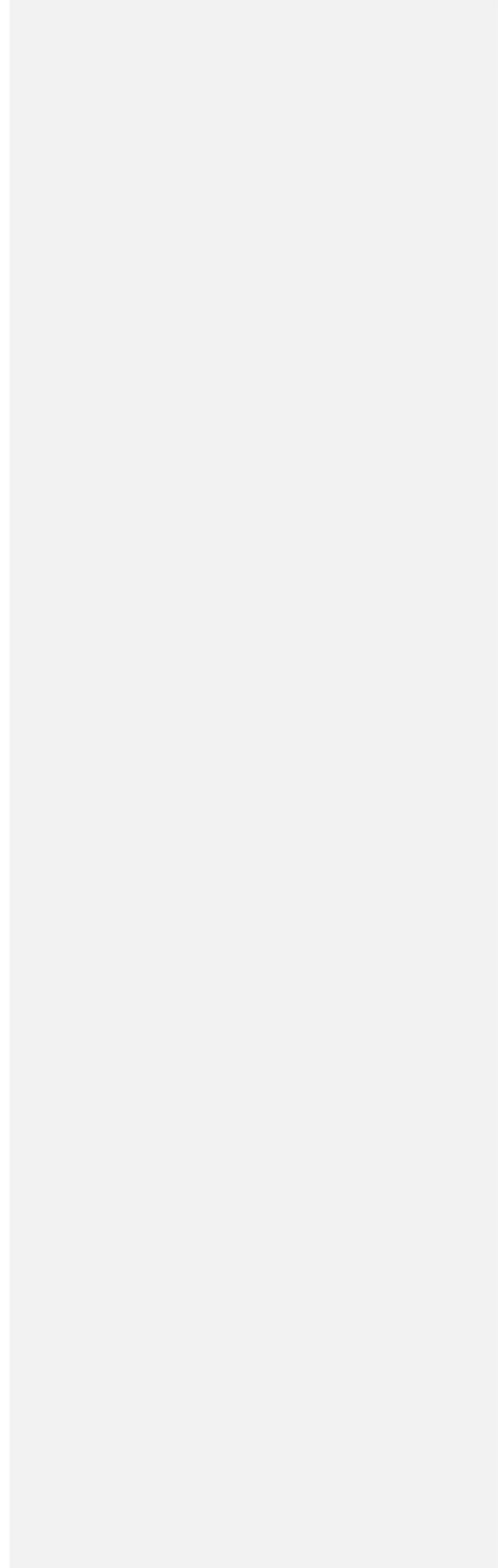
Mis en forme : Retrait : Première ligne : 0 cm, Espace Après : 10 pt

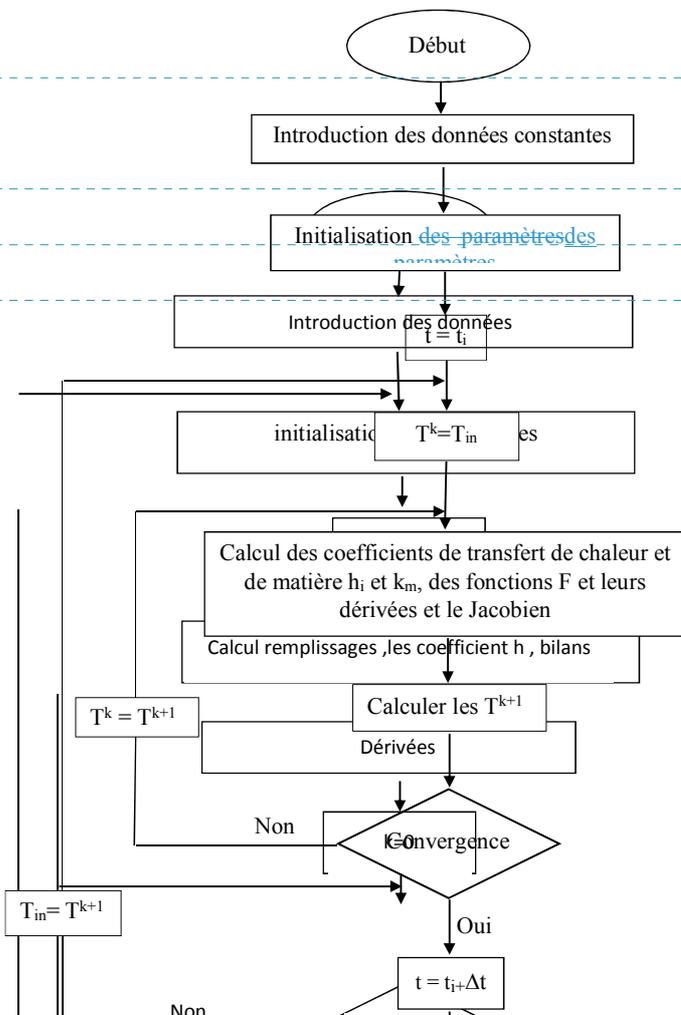
Mis en forme : Espace Après : 6 pt

Mis en forme : Police :12 pt, Police de script complexe :12 pt

### **3.6.34. Organigramme de résolution**

L'organigramme de résolution est illustré par la figure (3.3) ci-dessous :





**Mis en forme :** Police : (Par défaut) + Titres CS (Times New Roman), 12 pt, Police de script complexe : + Titres CS (Times New Roman), 12 pt

**Mis en forme :** Police : (Par défaut) Times New Roman, 14 pt, Couleur de police : Rouge, Police de script complexe : Times New Roman, 14 pt

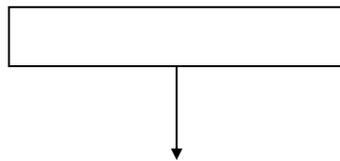
**Mis en forme :** Police : (Par défaut) + Titres CS (Times New Roman), 12 pt, Police de script complexe : + Titres CS (Times New Roman), 12 pt

**Mis en forme :** Police : (Par défaut) + Titres CS (Times New Roman), 12 pt, Police de script complexe : + Titres CS (Times New Roman), 12 pt

**Figure 3.3 : Organigramme de calcul**

[\[YY\] Fundamentals of Heat .....](#)

[\[ZZ\] elle se trouve dans \[YY\]](#)



- Mis en forme : Police :Gras, Police de script complexe :Gras
- Mis en forme : Centré
- Mis en forme : Police :Gras, Police de script complexe :Gras
- Mis en forme : Centré

## **Chapitre 4**

### **Résultats et discussion**

#### **4.1. Introduction**

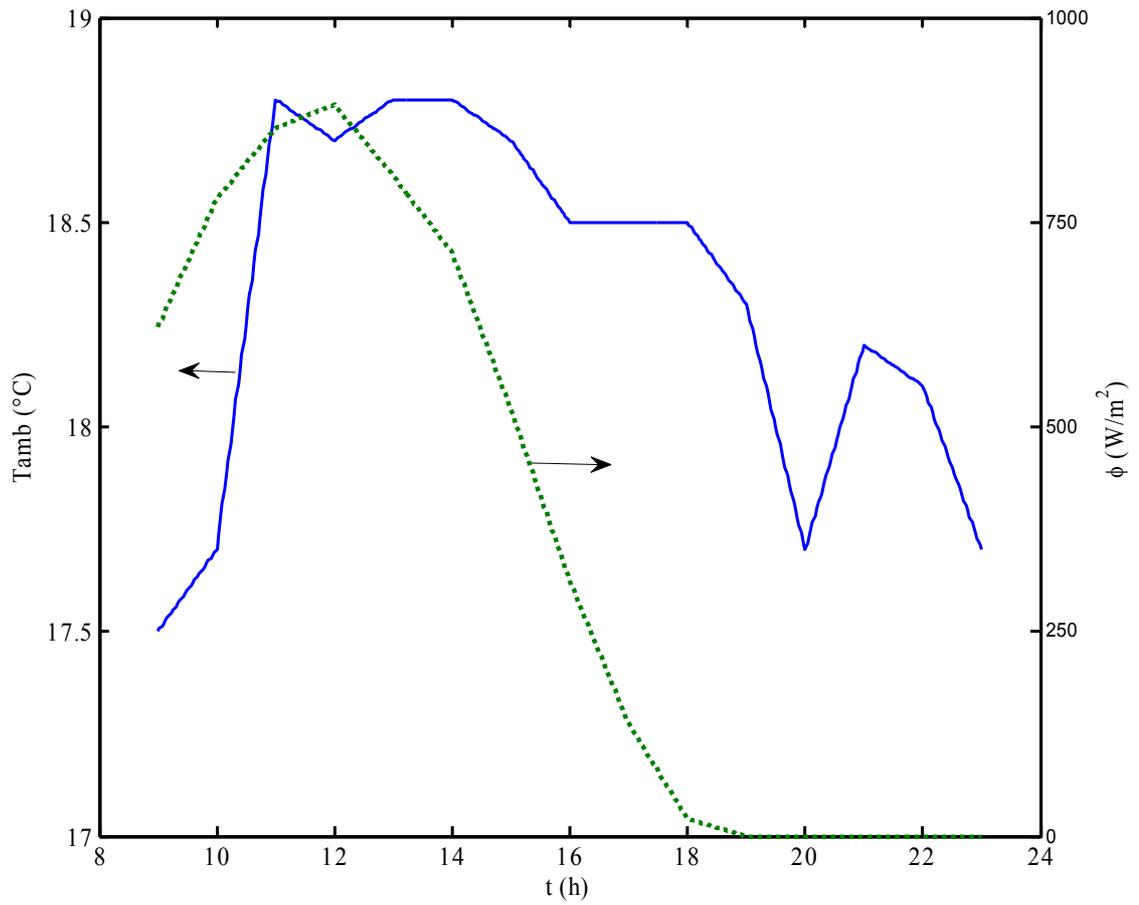
Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de la simulation du distillateur solaire avec condenseur à eau obtenus sous différentes conditions. Pour cela, on s'est basé sur des données concernant la source chaude mesurées sur deux journées sur le site de Bou Ismail. Ces résultats concernent essentiellement, les évolutions journalières des différentes températures, du débit de distillat ainsi que de la quantité cumulée d'eau distillée produite. Nous ferons des comparaisons entre les deux journées et étudierons les effets de certains paramètres.

#### **4.2. Irradiation solaire et température ambiante**

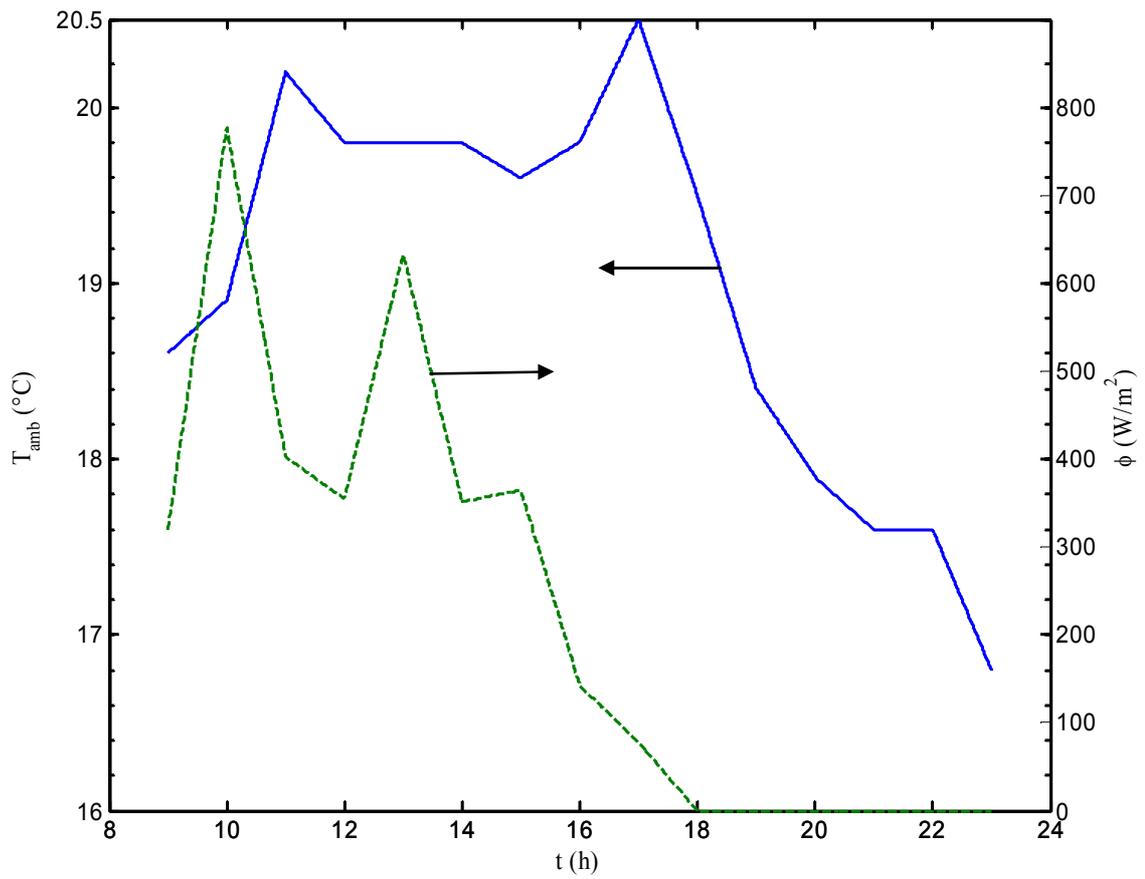
Les figures (4.1) et (4.2) montrent les variations journalières des flux solaires reçus sur la surface du capteur qui permettent de chauffer l'eau qui représente la source chaude assurant l'évaporation de l'eau salée et des températures ambiantes pour deux journées différentes prises par défaut, à savoir, le 26/04/2016 et le 10/05/2016 [12]. Il faut préciser que n'ayant pas de mesures de la température de la source chaude avant 9 heures, nos résultats seront basés sur cet instant pris comme temps initial.

On remarque que la courbe de l'ensoleillement est de forme gaussienne symétrique avec un maximum d'environ  $900 \text{ W/m}^2$  vers 12 heures pour la journée du 24 avril ce qui est une évolution normale. La température ambiante augmente rapidement durant la matinée, atteint son maximum dans l'intervalle (13 – 14) heures puis diminue graduellement jusqu'à 23 heures.

Pour la journée du 10 Mai, nous avons une évolution en dents de scie du flux solaire due à des passages nuageux. Les valeurs sont inférieures à  $600 \text{ W/m}^2$  sauf vers 10 heures où le flux atteint  $800 \text{ W/m}^2$ . Les perturbations nuageuses influent également sur la température ambiante. Cette dernière reste inférieure à  $21^\circ\text{C}$  pour les deux journées.

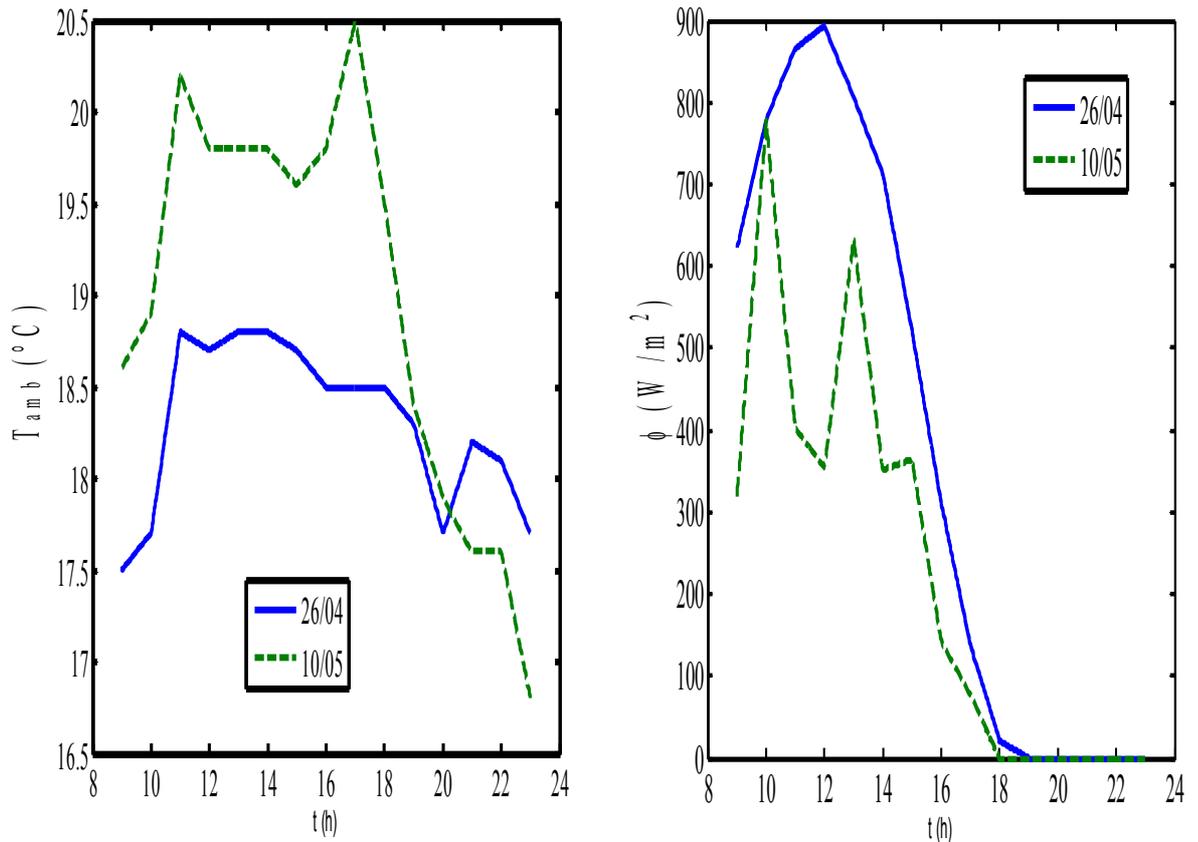


**Figure 4.1: Evolutions de la température ambiante et de l'irradiation solaire en fonction du temps pour la journée du 26/04/2016**



**Figure 4.2 : Evolutions de la température ambiante et de l'irradiation solaire en fonction du temps pour la journée du 10/05/2016**

La figure (4.3) permet de comparer entre les données météorologiques relatives aux deux journées. Nous remarquons un écart important sur le flux solaire en faveur de la journée du 24 Avril et l'inverse en ce qui concerne la température ambiante. Comme c'est le facteur irradiation qui joue le premier rôle pour le chauffage de l'eau (source chaude), on s'attend à une production d'eau distillée plus élevée au mois d'Avril. La température ambiante intervient dans les pertes thermiques qui restent faibles en raison de l'isolation thermique.

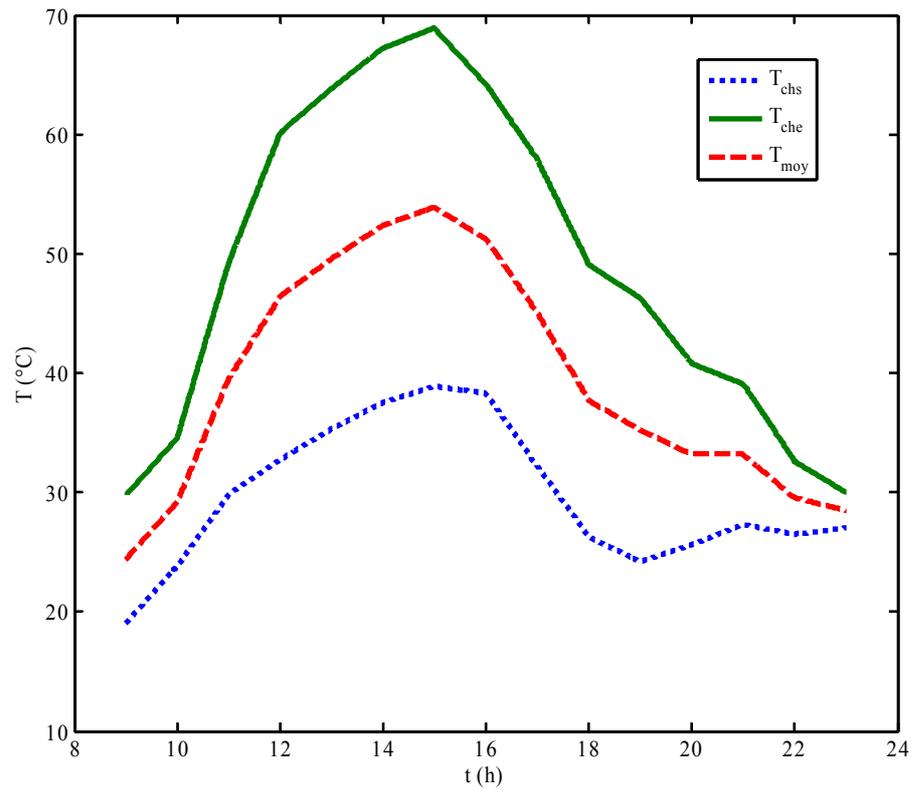


**Figure 4.3 : Evolutions de la température ambiante et de l'irradiation solaire pour les deux journées**

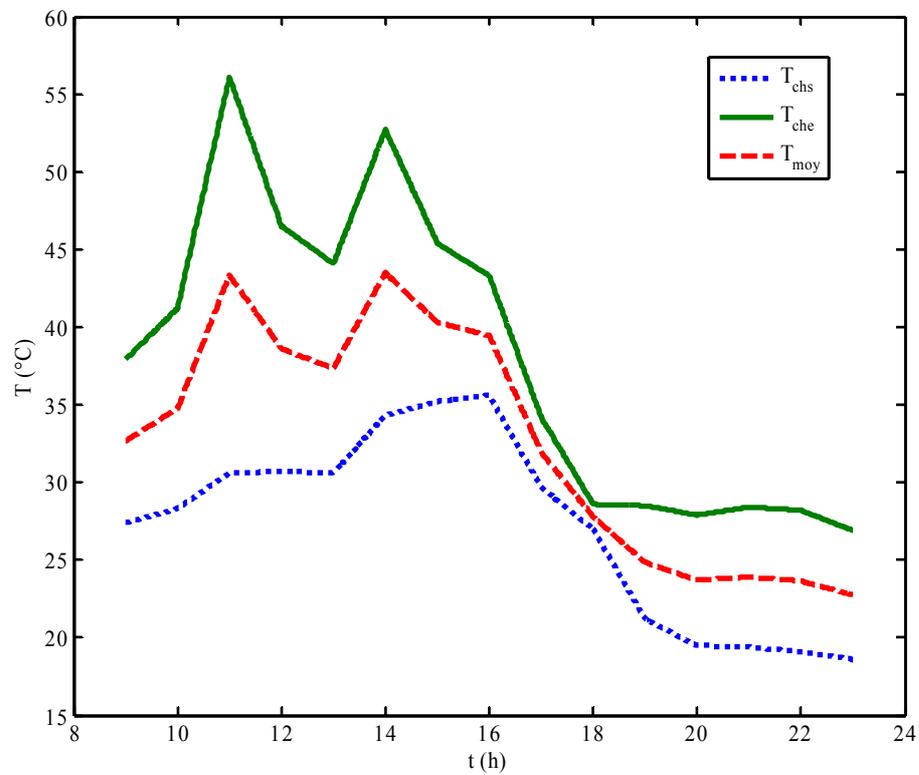
### 4.3. Evolution de la température de la source chaude

Les figures (4.4) et (4.5) représentent la variation des températures d'entrée et de sortie de l'eau chaude dans le capteur solaire. On précise que la sortie du capteur correspond à la sortie du réservoir d'eau chaude et vice-versa. La chaleur perdue par l'eau chaude permet de chauffer l'eau du réservoir (dont la température sera considérée comme la moyenne entre les températures d'entrée et de sortie), la plaque-évaporateur, la saumure et de produire l'eau distillée.

On remarque que l'évolution est plus régulière le 26 Avril. Les valeurs de la température y sont également plus importantes. En effet, elle atteint des valeurs situées dans la plage (60 – 70 °C) alors qu'elle dépasse rarement les 50°C le 10 Mai.

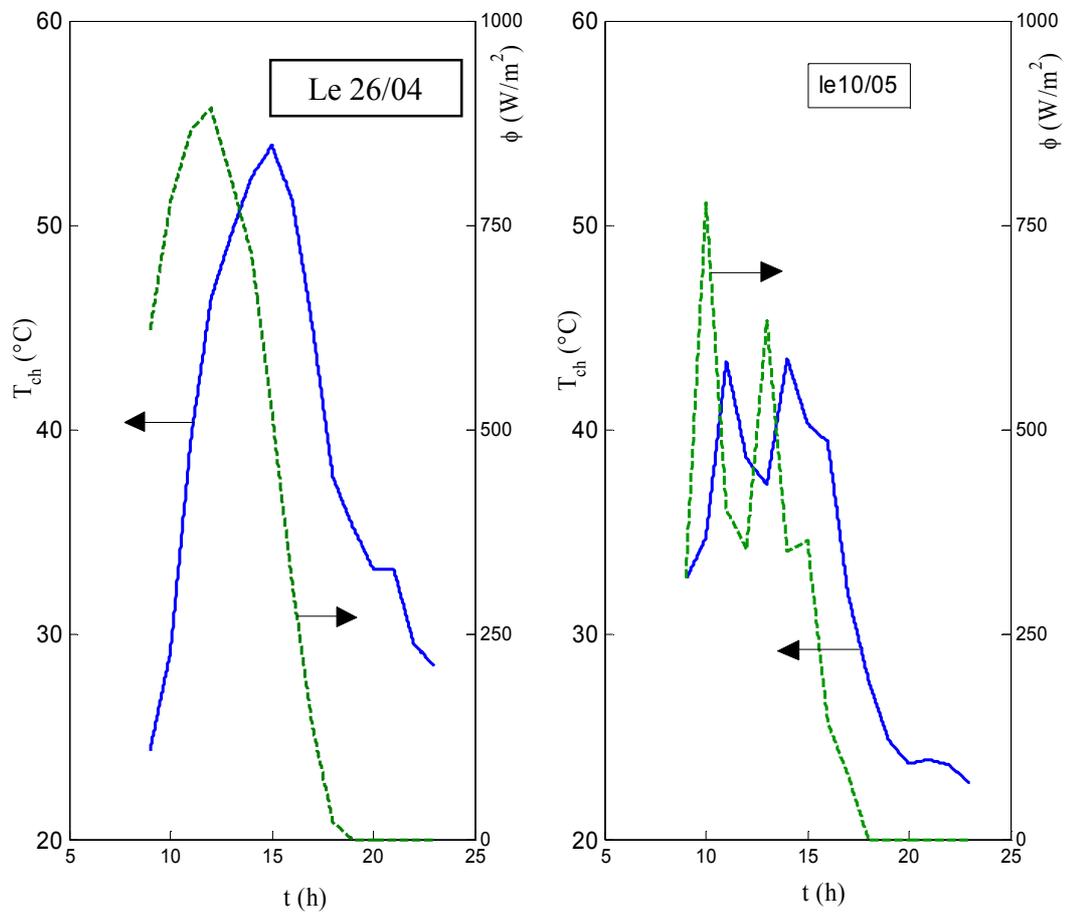


**Figure 4.4 : Evolutions des température d'entrée et de sortie et moyenne de la source chaude pour la journée du 26/04/2016**



**Figure 4.5 : Evolutions des température d'entrée et de sortie et moyenne de la source chaude pour la journée du 10/05/2016**

Pour montrer l'influence directe et dominante de l'irradiation solaire sur la température de l'eau chaude, nous avons représenté sur la figure (4.6) les évolutions de ces deux paramètres.



**Figure 4.6 : Evolution de l'irradiation solaire et de la température de la source chaude**

La figure montre des formes quasi similaires entre l'irradiation et la température de la source chaude qui l'influence directe de la première sur la seconde. Cependant, on note un déphasage d'environ 3 heures entre les courbes. Ce déphasage important est dû à :

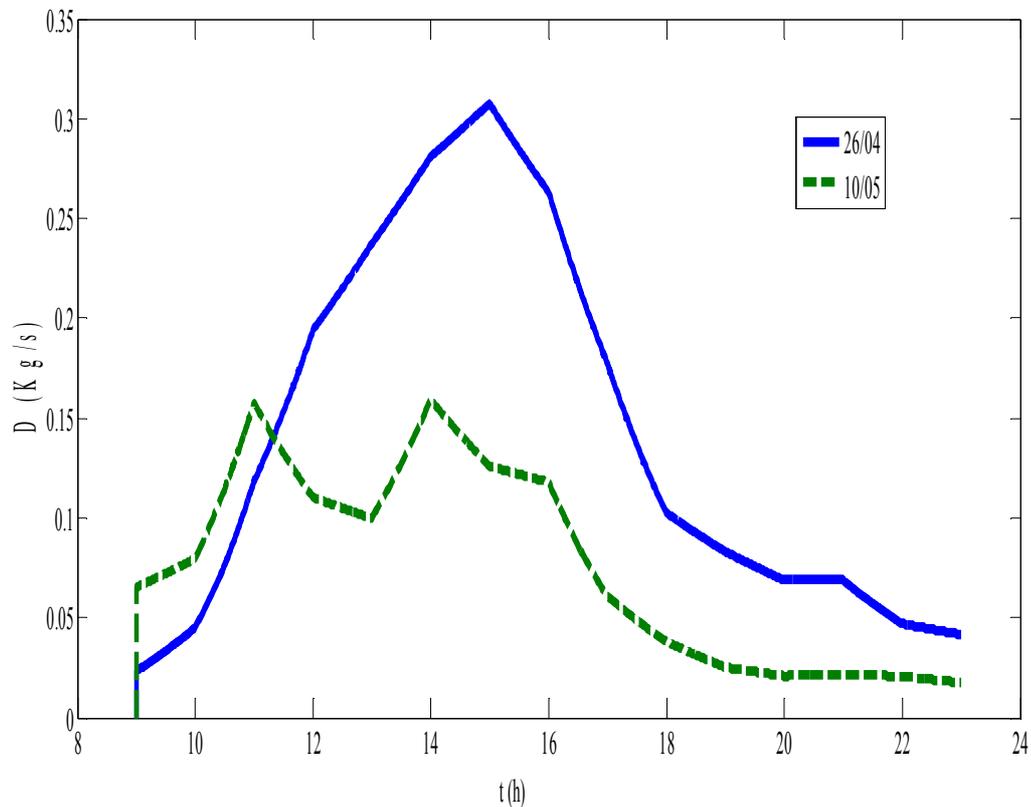
- L'inertie thermique des matériaux et celle de la masse importante d'eau à chauffer.
- Le très faible débit d'eau qui circule, par effet thermosiphon, entre le capteur et le réservoir d'eau chaude.

## 4.4. Résultats de la simulation

### 4.4.1. Evolution du débit de distillat

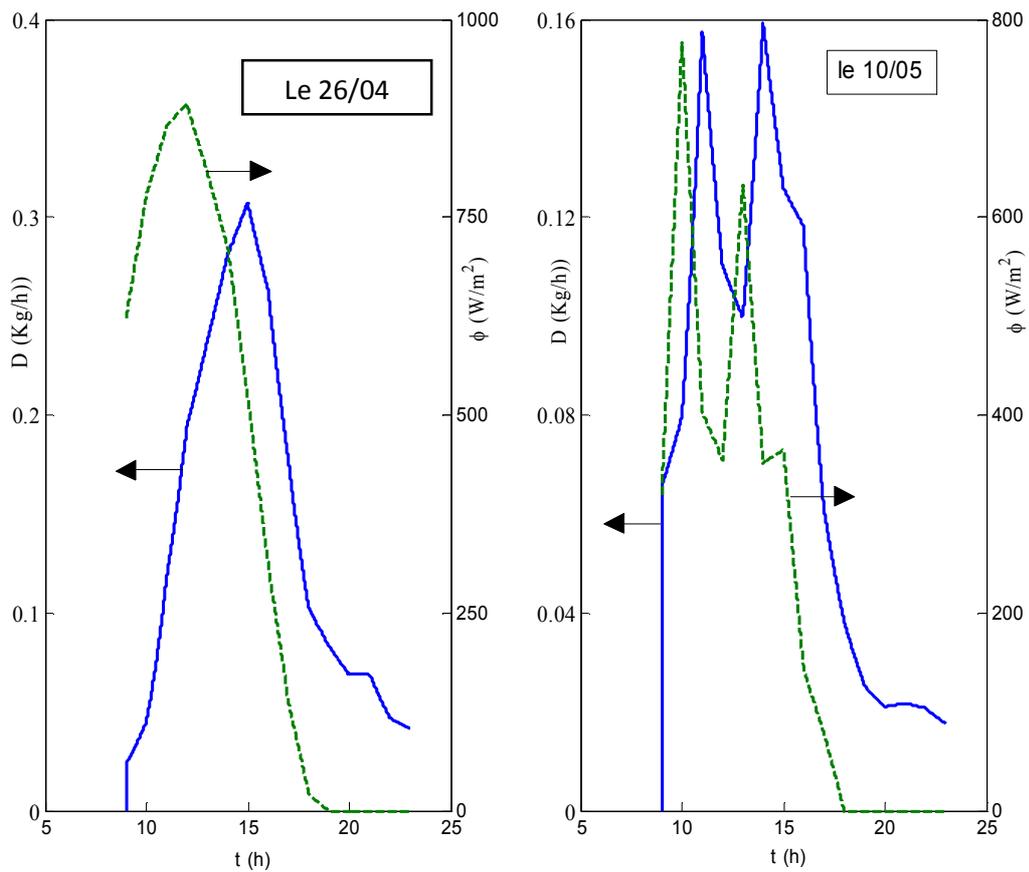
La figure (4.7) montre une augmentation du débit de distillat durant la matinée puis une diminution régulière jusqu'au milieu de la nuit. On atteint un maximum de  $0,31 \text{ Kg.h}^{-1}$  situé

vers 15 heures pour la journée du 26 Avril et des maxima d'environ  $0,15 \text{ Kg.h}^{-1}$  situés dans la plage comprise entre 11 heures et 14 heures pour le 10 Mai. Ces évolutions être liés à la température de la source chaude et donc du flux solaire reçu par le capteur et la qualité d'eau.



**Figure 4.7 : Evolution du débit de distillat produit pour les deux journées**

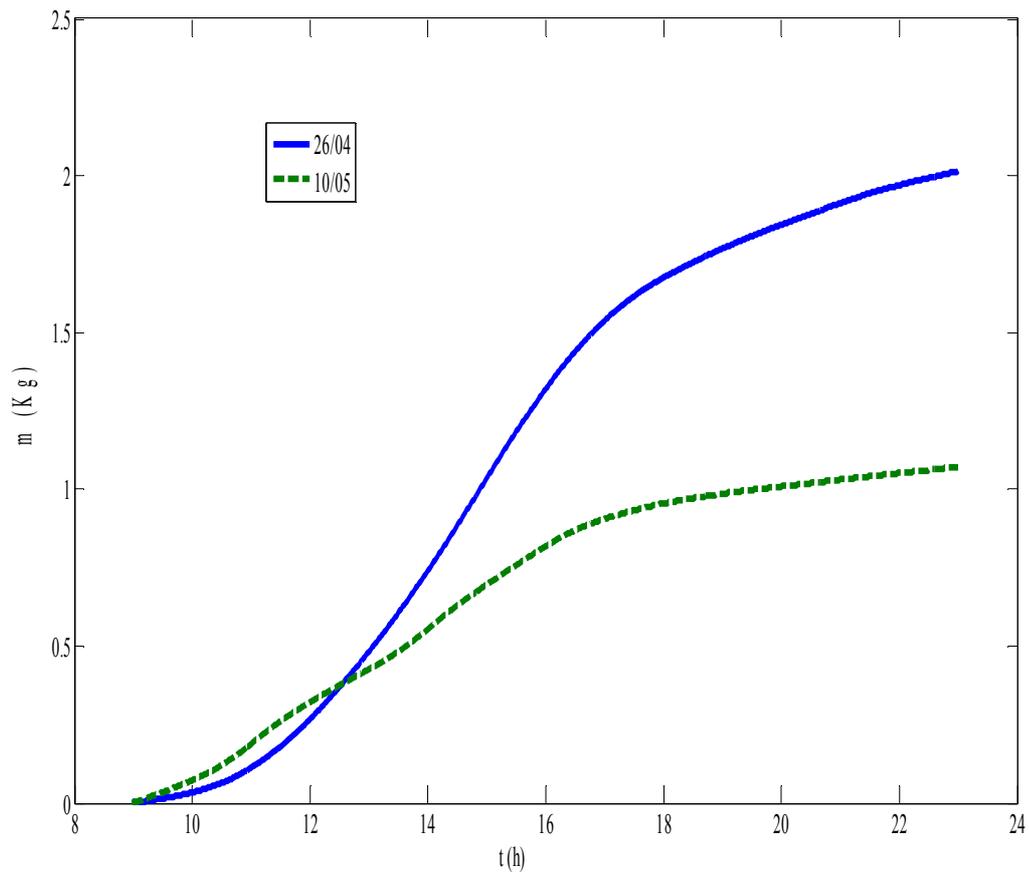
Pour vérifier cela, nous avons représenté, sur la figure (4.8), la variation du débit instantané de distillat et de l'irradiation solaire. On voit bien qu'il y a une certaine similitude entre les deux courbes pour les deux journées, comme constaté sur la figure (4.6) entre le flux et la température de la source. La figure (4.8) permet également de constater qu'il y a production d'eau distillée même durant la nuit lorsque l'irradiation solaire s'annule. Ce qui montre l'intérêt d'un tel système pour vérifier effet de qualité de l'eau si faut varier la concentration du sel dans la solution utilisée.



**Figure 4.8 : Evolution du débit de distillat et de l'irradiation solaire**

#### 4.4.2. Evolution de la quantité cumulée de distillat

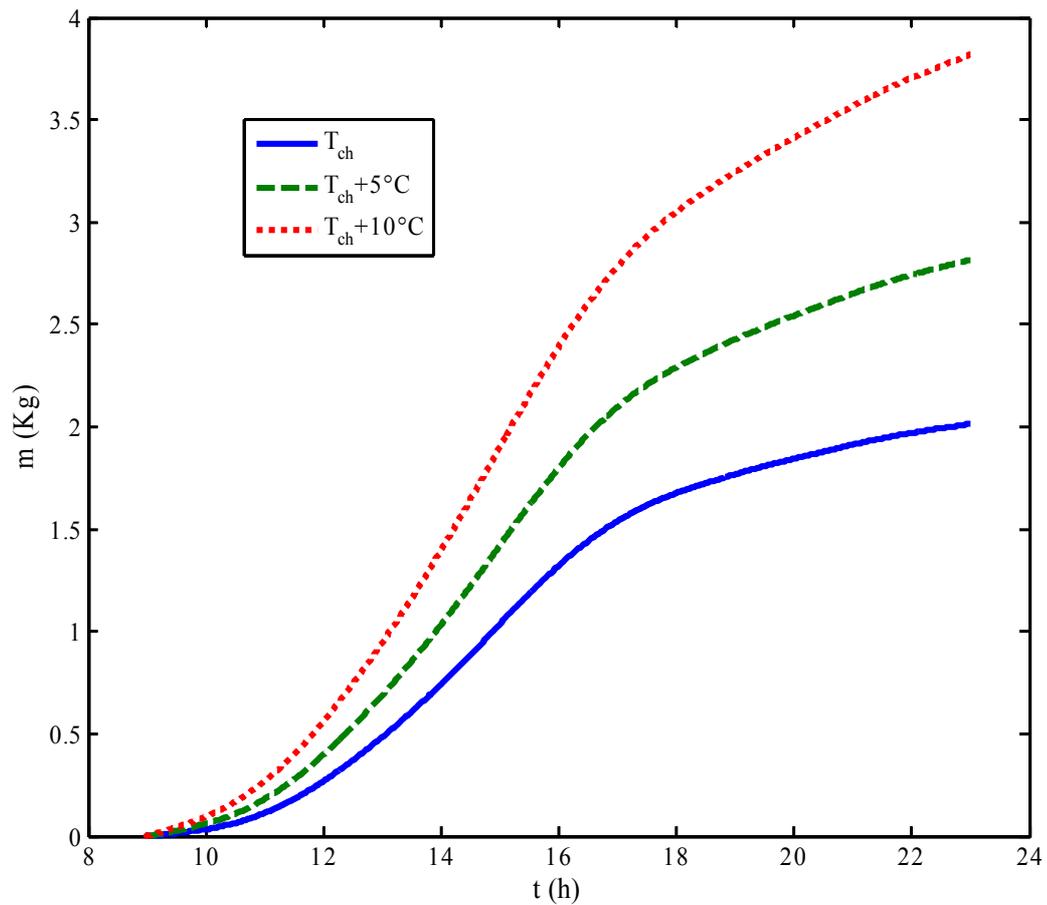
La figure (4.9) représente l'évolution de la masse de distillat cumulée pour les deux journées. On constate une production d'eau distillée plus importante pour le 26/04/2016 en raison d'un rayonnement solaire plus important et plus régulier. On voit, également que la production continue durant la nuit mais avec une vitesse plus faible.



**Figure 4.9 : Evolution de la quantité cumulée d'eau distillée produite durant les deux journées**

#### 4.4.3. Effet de la température de la source chaude

Nous avons porté sur la figure (4.10), l'évolution de la quantité de distillat produite avec différentes températures de la source chaude pour la journée du 26 Avril. On a les températures mesurées auxquelles on a ajouté 5 puis 10°C. On voit l'effet positif apporté par une légère augmentation de la température de la source chaude. On sait qu'en été, on atteint des valeurs plus importantes.

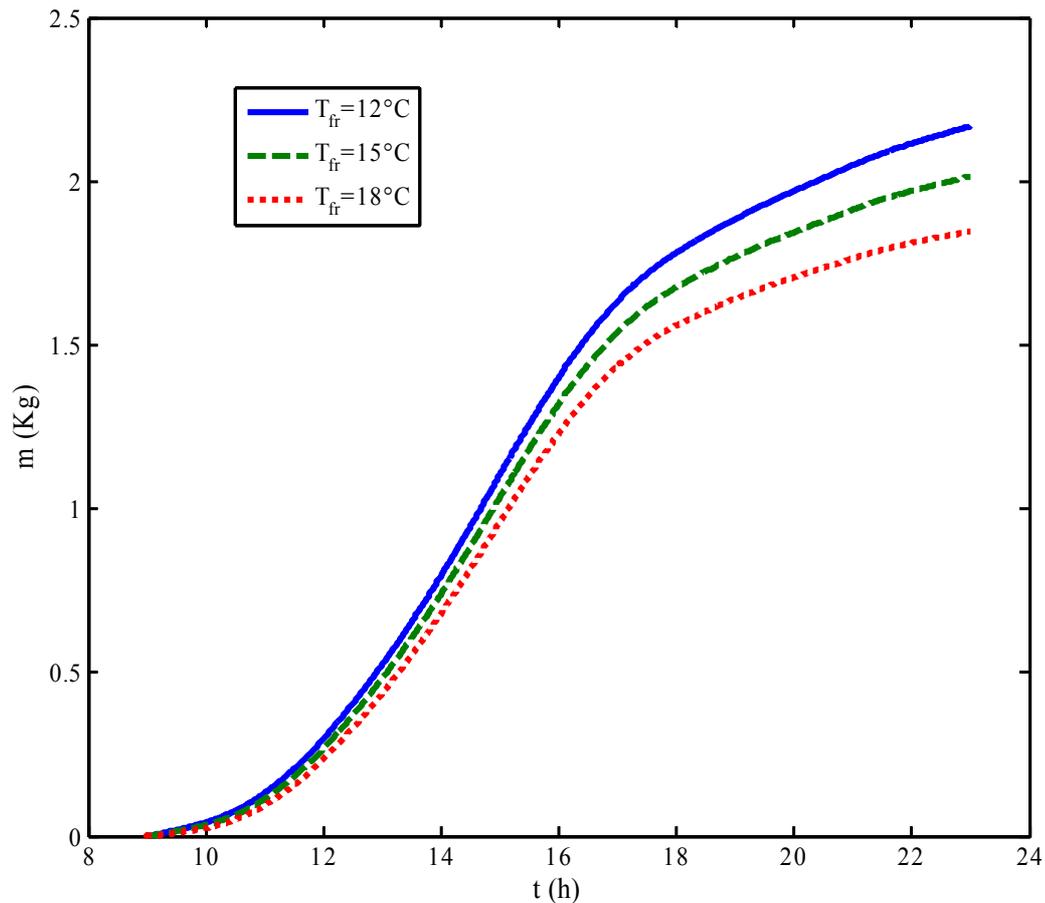


**Figure 4.10 : Effet de la température de la source chaude  
Sur la production d'eau distillée**

#### 4.4.4. Effet de la température de la source froide de condenseur

Sur la figure (4.11), nous avons représenté l'évolution de la quantité d'eau distillée produite à différentes températures de la source froide pour la journée du 26 Avril. On a pris comme valeur 12, 15 et 18°C.

Comme prévu, on constate que plus la température de la source froide est basse, plus la quantité de distillat produite est élevée. Une baisse de 3°C de la température de la source froide entraîne une augmentation de 10 % de la quantité de distillat.

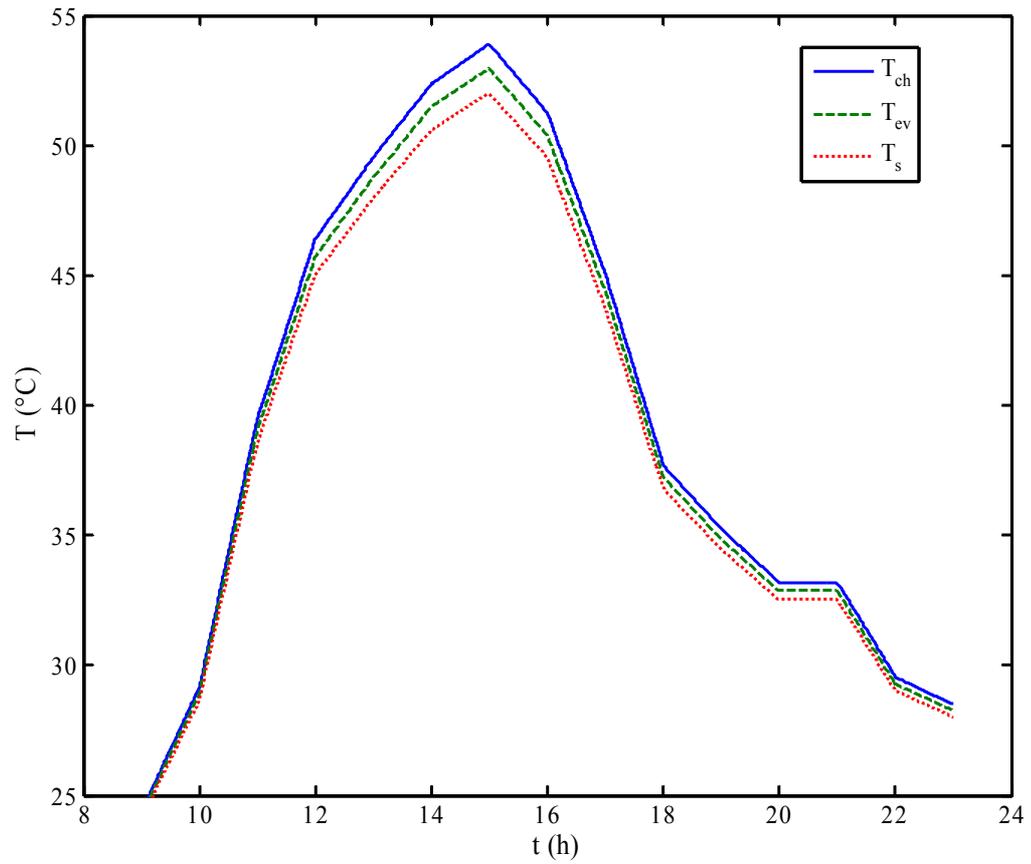


**Figure 4.11 : Effet de la température de la source froide sur la production d'eau distillée**

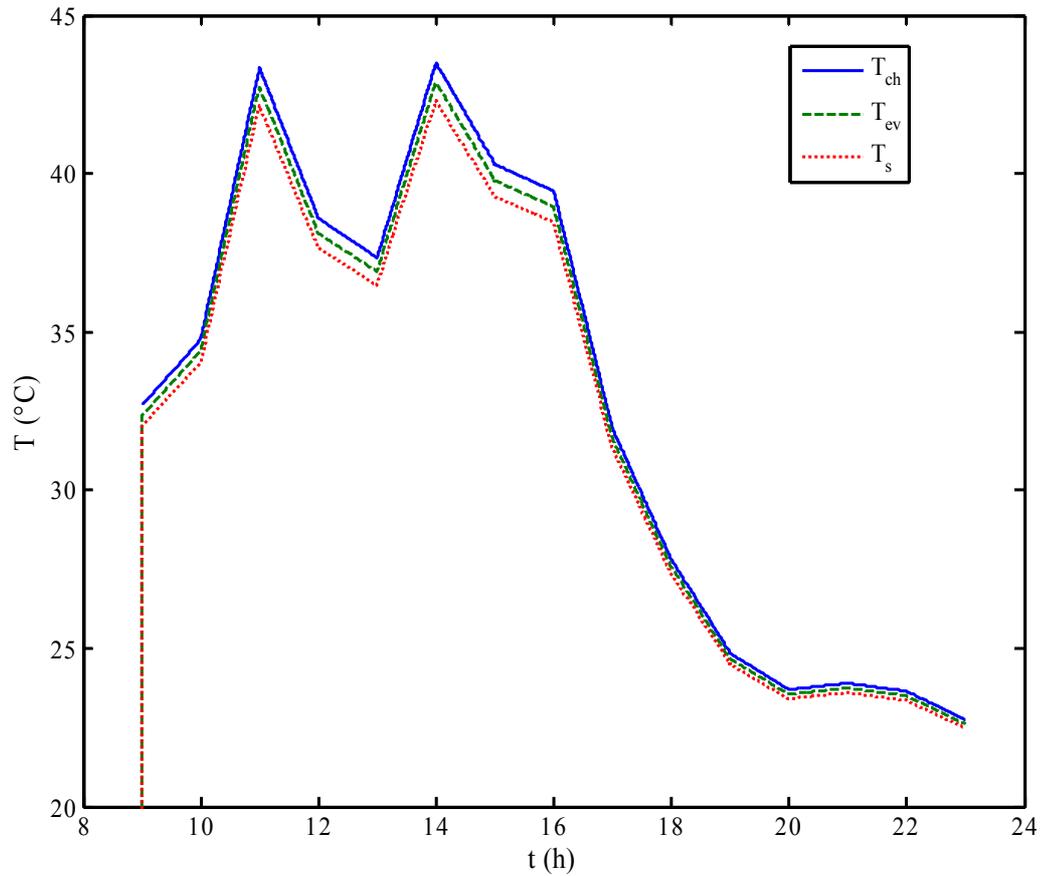
#### 4.4.5. Evolutions des températures des éléments de la chambre de distillation

Les figures (4.12) et (4.13) montrent les évolutions calculées des températures des éléments de la chambre de distillation, à savoir la plaque-évaporateur, l'eau salée et la source chaude (mesurée) pour les deux journées. Nous n'avons pas jugé utile de représenter l'évolution de la température de la plaque-condenseur car elle varie très peu. Ceci s'explique par un faible coefficient de transfert de chaleur par convection dans l'espace contenant de l'air humide et une faible chaleur de condensation au faible débit de condensat ou de distillat. De plus, la plaque est refroidie par de l'eau froide (coefficient d'échange par convection plus élevée).

Les deux figures montrent des écarts de température assez faibles dus à de bons coefficients de transfert de chaleur en phase liquide et une faible épaisseur de la plaque-évaporateur qui sépare le fluide chaud et la saumure.



**Figure 4.12 : Evolution des températures de la source chaude, de l'évaporateur et de la saumure durant la journée du 26/04**



**Figure 4.13 : Evolution des températures de la source chaude, de l'évaporateur et de la saumure durant la journée du 10/05**

### Conclusion

L'élément moteur de la distillation est l'écart de température entre l'évaporateur et le condenseur, autrement dit entre la source chaude et la source froide. En effet, un bon ensoleillement et une source froide avec une eau à basse température permettrait d'obtenir un bon débit de distillat.

## CONCLUSION

L'objectif de notre travail était une contribution à l'étude et la simulation d'un distillateur solaire à condensation à eau et avec stockage de l'énergie issue du chauffage de l'eau par capteur solaire.

Par manque d'informations et de mesures suffisantes en vue d'une confrontation des résultats, notre modélisation s'est limitée à quelques éléments du distillateur. Par ailleurs, l'évolution de la température de la source chaude représentée par l'eau chauffée par le capteur de façon continue et qui circule entre ce dernier et le réservoir étant connue, la modélisation du capteur n'était pas nécessaire.

L'étude a porté sur deux journées types (le 26 Avril et le 10 Mai 2016) pour lesquelles l'ensoleillement était moyen et, surtout irrégulier lors de la deuxième journée en raison de passages nuageux.

Les résultats portent sur la production journalière d'eau distillée illustrée par les évolutions horaires du débit instantané de distillat et de sa quantité cumulée, ainsi que celles des différentes températures calculées.

Les résultats peuvent être résumés comme suit :

- Une meilleure production a été obtenue le 26 Avril en raison d'un meilleur ensoleillement et donc d'une source de chaleur plus chaude.
- La température ambiante n'avait pas d'effet notable sur la production en raison du système de condensation à eau. Cependant, elle pourrait avoir un effet sur l'efficacité du capteur si celui n'est pas parfaitement isolé thermiquement.
- Nos résultats ne sont pas trop éloignés de ceux mesurés par Mellak et Ralemi [1] si on peut faire une comparaison compte tenu des conditions initiales différentes.
- Des températures plus élevées de la source chaude, ce qui est très possible en été, ont montré une nette augmentation de la production. En effet, une élévation de 5°C entraîne une augmentation de 40 % de la production et 10°C provoque une amélioration d'environ 90 %.

- De même, une diminution de la température de la source froide (l'eau du condenseur) entraîne une augmentation de la production de distillat (3 degré de moins augmente la production de plus de 10 %).

Pour améliorer la productivité du distillateur, il faut, dans la mesure du possible, conserver un écart le plus élevé possible entre les températures de la source chaude et de la source froide.

L'augmentation du débit de la source chaude circulant entre le capteur et l'évaporateur, à défaut de l'augmentation de sa température, permet d'augmenter, proportionnellement, le flux de chaleur apporté. Ceci est possible en multipliant le nombre de capteurs.

Nous proposons comme suite à ce travail, la modélisation de l'ensemble du dispositif avec son capteur, dont la principale difficulté réside dans le calcul du débit d'eau qui circule par le phénomène du thermosiphon.

## LES APPENDICES

### Appendice A :

#### Variation de flux et la température ambiante en fonction de temps

Tableaux A.1 évolution de la température et flux ambiante en fonction de temps pour les deux journées

| La journée 26/04/2016 |           |                            | La journée 10/05/2016 |                            |
|-----------------------|-----------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| t (h)                 | Tamb (°C) | $\phi$ (w/m <sup>2</sup> ) | Tamb (°C)             | $\phi$ (w/m <sup>2</sup> ) |
| 9                     | 17,5      | 621,6                      | 18,6                  | 319                        |
| 10                    | 17,7      | 778                        | 18,9                  | 776,7                      |
| 11                    | 18,8      | 865                        | 20,2                  | 403                        |
| 12                    | 18,7      | 893                        | 19,8                  | 354,8                      |
| 13                    | 18,8      | 806,8                      | 19,8                  | 633                        |
| 14                    | 18,8      | 713                        | 19,8                  | 351,3                      |
| 15                    | 18,7      | 521,5                      | 19,6                  | 364,5                      |
| 16                    | 18,5      | 312                        | 19,8                  | 143                        |
| 17                    | 18,5      | 137,8                      | 20,5                  | 78,3                       |
| 18                    | 18,5      | 21,5                       | 19,5                  | 0                          |
| 19                    | 18,3      | 0                          | 18,4                  | 0                          |
| 20                    | 17,7      | 0                          | 17,9                  | 0                          |
| 21                    | 18,2      | 0                          | 17,6                  | 0                          |
| 22                    | 18,1      | 0                          | 17,6                  | 0                          |
| 23                    | 17,7      | 0                          | 16,8                  | 0                          |

## Variation de de la température chaude entrant et sortant en fonction de temps

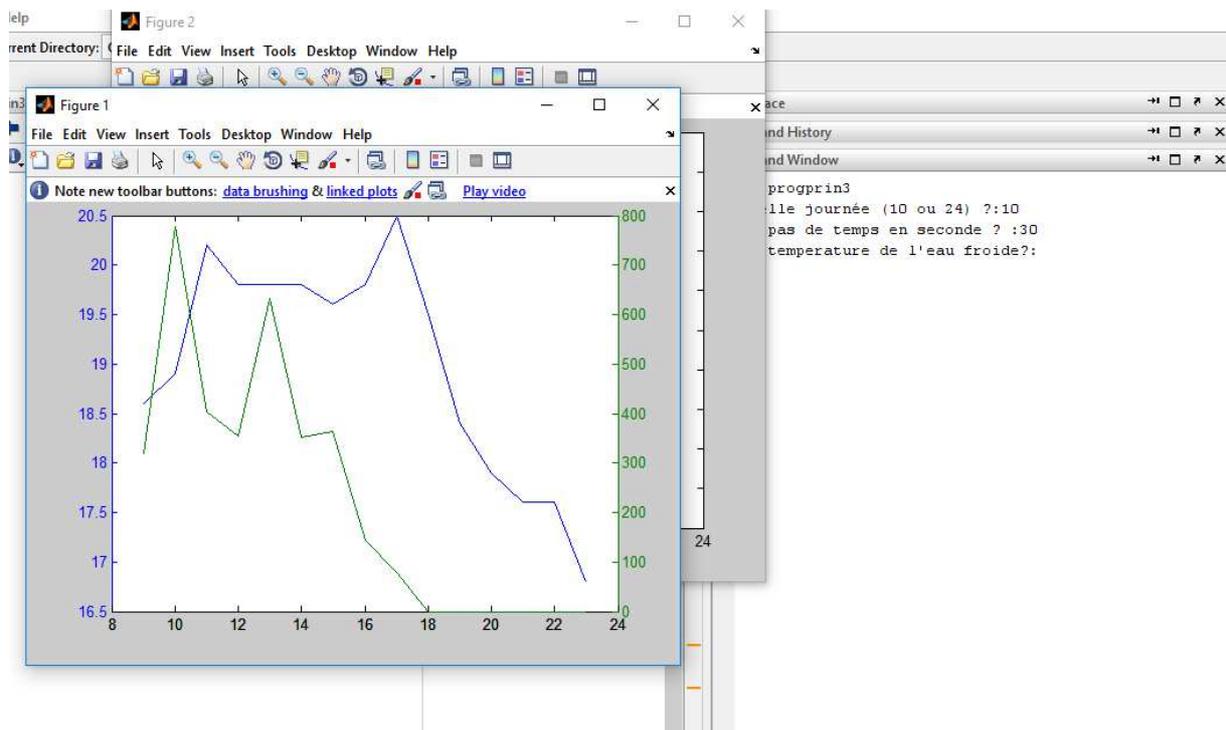
**Tableaux A.2 évolution de la température chaude entrant et sortant en fonction de temps pour Les deux journées**

| La journée 26/04/2016 |           |           | La journée 10/05/2016 |           |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------------------|-----------|
| t (h)                 | Tche (°C) | Tchs (°C) | Tche (°C)             | Tchs (°C) |
| 9                     | 29,7      | 19        | 37,9                  | 27,4      |
| 10                    | 34,5      | 23,8      | 41,2                  | 28,3      |
| 11                    | 49,2      | 29,8      | 56,1                  | 30,6      |
| 12                    | 60,1      | 32,7      | 46,5                  | 30,7      |
| 13                    | 63,8      | 35,3      | 44,1                  | 30,6      |
| 14                    | 67,2      | 37,5      | 52,7                  | 34,3      |
| 15                    | 68,9      | 38,9      | 45,4                  | 35,2      |
| 16                    | 64,2      | 38,3      | 43,3                  | 35,6      |
| 17                    | 57,9      | 32,2      | 34,2                  | 29,7      |
| 18                    | 49,1      | 26,3      | 28,6                  | 27        |
| 19                    | 46,3      | 24,2      | 28,5                  | 21,2      |
| 20                    | 40,8      | 25,6      | 27,9                  | 19,5      |
| 21                    | 39,1      | 27,3      | 28,4                  | 19,4      |
| 22                    | 32,6      | 26,5      | 28,2                  | 19,1      |
| 23                    | 30        | 27        | 26,9                  | 18,6      |

```

1  %remplissage des tableaux
2
3  TP=[17.5;17.7;18.8;18.7;18.8;18.8;18.7;18.5;18.5;18.3;17.7;18.2;18.1;17.7]
4  Flup=[621.6;778;865;893;806.8;713;521.5;312;137.8;21.5;0;0;0;0]
5  Tccs=[29.7;34.5;49.2;60.1;63.8;67.2;68.9;64.2;57.9;49.1;46.3;40.8;39.1;32.6;30.0]
6  Tcce=[19;23.8;29.8;32.7;35.3;37.5;38.9;38.3;32.2;26.3;24.2;25.6;27.3;26.5;27.0]
7  pt=input('le pas de temps en seconde ? :');
8  j=(23-9)*3600/pt+1;k=1;n=3600/pt;
9  for i=1:n:j
10     Tamb(i)=TP(k);Flu(i)=Flup(k);Tche(i)=Tcce(k);Tchs(i)=Tccs(k);
11     k=k+1;
12 end
13 dt=pt/3600; ti=9;
14 for m=1:j
15     ts(m)=ti+(m-1)*dt;
16 end
17 % plot(ts,Tamb)
18 ni=1;Tbi=Tamb(ni);nf=ni+n;Tbf=Tamb(nf);Fli=Flu(ni);Flf=Flu(nf);Tei=Tche(ni);Tef=Tche(nf);Tsi=Tchs(ni)
19 for ko=9:22
20     mi=ni+1;mf=nf-1;Tbf=Tamb(nf);Flf=Flu(nf);Tef=Tche(nf);Tsf=Tchs(nf);
21     a=(Tbf-Tbi)/n;b=Tbi-a*ni;c=(Flf-Fli)/n;d=Fli-c*ni;e=(Tef-Tei)/n;f=Tei-e*ni;g=(Tsf-Tsi)/n;h=Tsi-g*
22     for i=mi:mf
23         Tamb(i)=a*i+b;Flu(i)=c*i+d;Tche(i)=e*i+f;Tchs(i)=g*i+h;
24     end
25     ni=mi+n;nf=mi+n;Tbi=Tbf;Fli=Flf;Tei=Tef;Tsi=Tsf;
26 end
27 figure(1)

```



```

%programme principale
clear all
constante2;
%pt=input('le pas de temps en seconde ? :');
jour=input('quelle journée (10 ou 24) ?:');
if jour==10
    remplissage105;
else
    remplissage24;
end
%initialisation
Tin=Tamb(1);Tev(1)=Tin;Ts(1)=Tin;tss(1)=9;
Tchi=(Tcce(1)+Tccs(1))./2;Tch1=(Tcce(2)+Tccs(2))./2;
Tchm=(Tchi+Tch1)./2;
Tevi=Tin;Tsi=Tin;
Tev1=Tin;Tsl=Tin;

Tfr=input('la temperature de l'eau froide?:');
Tci=Tfr;Tc1=Tfr;Tc(1)=Tfr;%rev=1;rs=2;rc=3;rx=3;
%boucle de calcul
th=ti;jj=j-1;
eps=1e-4;ec=1;Db(1)=0;
]for i=2:jj
    th=th+pt./3600;tss(i)=th;
    %propair;
    %prove;
    coefh2;
    bilan;

```

```

while ec>1e-5
    %propair;
    %prove;
    coefh2;
    deriv2;
    %pause;
    Temperature;
    bilan;
    Tevi=TeV1;Tsi=Ts1;Tci=Tc1;
end
TeV(i)=TeV1;Tc(i)=Tc1;Ts(i)=Ts1;Tci=Tc1;Tevi=TeV1;Tsi=Ts1;
Tchi=(Tche(i)+Tchs(i))./2;Tch1=(Tche(i+1)+Tchs(i+1))./2;Tchm=(Tchi+Tch1)./2;
Db(i)=D;
end

Dc(1)=0;
for jn=2:jj
    Dn=(Db(jn-1)+Db(jn))*pt/2;
    Dc(jn)=Dc(jn-1)+Dn;
end
figure(3)
plot(tss,TeV,tss,Ts)
xlabel('t (h)')
ylabel('T (°C)')
hleg1=legend('TeV','Ts')
Db=Db*3600;
figure(4)

plot(tss,Db)
xlabel('t (h)')
ylabel('D (kg/h)')
figure(5)
plotyy(tss,TeV,tss,Db)
xlabel('t (h)')
ylabel('T (°C)')
hleg2=legend('TeV','D')
figure(6)
plot(tss,Dc)
xlabel('t (h)')
ylabel('m (kg)')
for ji=1:jj
    Flux(ji)=Flu(ji);
end
figure(7)
plotyy(tss,Flux,tss,Dc)

```

# Références

1. MELLAK Soumia RALEMI Nacera. « Etude expérimentale d'un distillateur solaire avec stockage d'énergie et système de condensation a eau » mémoire de mastère, université de BLIDA 1, 2016.
2. Djamel BECHKI « Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes », thèse du doctorat, université HADJ LAKHDAR BATNA 15/05/2011.
3. <http://tpebdmw.e-monsite.com/pages/ii-les-atouts-et-les-limites/la-distillation.html>,date
4. RAHMANI Mehrez « Dessalement des eaux saumâtres et de mer par énergie solaire avec stockage d'énergie » mémoire du mastère, université de BLIDA 1, 2015.
5. MANDI BENAÏSSA « analyse thermo énergétique d'un procédé de dessalement d'eau de mer par voie solaire », mémoire de magistère, université de TLEMCEM ABOUBEKR BELKAÏD, 2013.
6. LAÏFA Islam « Etude expérimentale d'un distillateur solaire à mèche », mémoire de mastère université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, Soutenu le 25 /06 /2018.
7. <http://outilssolaires.com/glossaire/capteurs-solaires/distillation-solaire+a184.html>
8. ZENTAR SOULEF « Étude théorique d'un distillateur solaire plan dans la région d'Adrar », mémoire de mastère, université AHMED DRAÏA ADRAR, soutenu le 21 / 05 / 2017.
9. SELLAMI Mohamed Hassen « Etude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région sud-est ALGERIEN (OUARGLA) », thèse du doctorat, université KASDI MERBAH OUARGLA, Soutenu le 03/02/2014.
10. [http://www.envirofluides.com/contents/fr/d1232\\_chaleur\\_massique\\_solides.html](http://www.envirofluides.com/contents/fr/d1232_chaleur_massique_solides.html)
11. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau>

12. SAMIA OUKIL « Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales » mémoire de magistère, université de BLIDA 1, 2005.
13. MOUSSA ZERROUKI, YACINE MARIF, MOUSTAPHA BELHADJ ET NOUR EDDINNE SETTOU, « Simulation Et Expérimentation D'un Distillateur Solaire A Film Capillaire Dans Le Sud Algérien », Annales des Sciences et Technologie, Vol. 4, N° 1, Juin 2012.
14. IZZEDDINE SAOUANE, « Etude Des Transferts De Chaleur Et De Masse A L'intérieur D'un Système De Dessalement Par Voie Solaire », Mémoire de Magistère, Université Mentouri Constantine Soutenu le : 19/10 / 2010.
15. FEDALI SAIDA « Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales », mémoire de magistère, université DE BATNA, 2008.
16. AGHILAS BRAHIMI « Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau », mémoire de master, Université de LORRAINE, Soutenue Février 2016.
17. FRANK P. INCROPERA DAVID P. DEWITT THEODORE L. BERGMAN ADRIENNE S. LAVINE, « Fundamentals of Heat and Mass Transfer », John Wiley & Sons, 6th Edition.
18. B.A. Jubran, M.I. Ahmed, A.F. Ismail, Y.A. Abakar, « Numerical Modelling Of A Multi-Stage Solar Still », international artical Energy Conversion & Management Received 29 April 1999 ; accepted 29 September 1999.