

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université de KHEMIS MILIANA**



**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département des Sciences et la Technologie**

Mémoire Présenté

Pour l'obtention de diplôme

**Master**

En

« Génie Mécanique »

Option :

« Energétiques »

Titre :

**Influence du débit de refroidissement sur les performances d'un distillateur solaire actif avec chambre de condensation séparée, approche expérimentale**

Réalisé par :

Hamrat Oussama

Encadré par :

Dr Rabah Kerfah

Année Universitaire 2016/2017

# *Dédicace*

*Je tiens en tout premier lieu à remercier Allah le tout puissant qui me donné ce puissance et patience pour présenter ce travail.*

*A CELUI QUI M'A INDIQUE  
LA BONNE VOIE EN ME  
RAPPELANT QUE LA  
VOLONTE FAIT TOUJOURS  
LES GRANDS HOMMES...  
RABI YARHMO.*

*À mon Père.*

*A CELLE QUI A ATTENDU  
AVEC PATIENCE LES FRUITS  
DE SA BONNE EDUCATION,...*

*À ma Mère.*



# Remerciement

*En premier lieu, nous remercions notre **DIEU**, notre Créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.*

*Nous tenons à notifier un remerciement spécial à tous nos enseignants du Département des Sciences et la Technologie qui ont contribué à notre formation de master, en particulier, notre encadreur pédagogique :*

***Mr : Dr. Rabah Kerfah***

*Qu'ils trouvent ici toute notre gratitude et reconnaissance pour leur aide, leur encadrement dont nous avons bénéficié durant toute notre scolarité.*

*Enfin nos remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement à la réalisation de ce travail.*

## **Table des Matières**

Introduction Générale .....	1
CHAPITRE 1: Etude bibliographique.....	3
1-1: Historique.....	4
1-2: Les méthodes de dessalement .....	4
1-2-1:Procédés à membranes .....	5
a. L'osmose inverse(OI) .....	5
b .L'électrodialyse(ED) .....	6
1-2-2:Les procédés thermiques.....	7
a. Procédé par congélation.....	7
a-1. Dessalement par congélation directe .....	7
a-2.Dessalement par congélation indirecte.....	7
b. Procédé de distillation .....	8
b-1.Technique de flash à une seule cellule.....	8
b-2. Technique de flash à multi effets .....	8
c .Distillation par compression de la vapeur.....	9
d. Distillation solaire .....	10
d-1. Distillation à effets multiples (MED).....	10
d-2.Distillation solaire à effet de serre.....	11
1.3.Application aux différents types de distillateurs solaire.....	12
1.3.1:Distillateur solaire à simple bassin .....	12
1.3.2:Distillateur solaire actif avec capteur plan .....	12
a). Description du système couple distillateur plan-capteur .....	12
b). Distillateur à diffusion.....	13
c). Description du système couple distillateur hot box-capteur.....	14

## ***Table Des Matières***

---

d).Distillateur solaire à multiple bassin associé à un capteur solaire plan .....	14
e). Distillateur solaire à double pente avec un collecteur solaire .....	16
f). Destinateur d'un double bassin solaire encore avec des tube à vide .....	17
1.3.3 Distillateur solaire avec condensation séparé .....	18
a). Distillateur solaire à deux effets .....	18
b). Distillateur solaire avec condenseur séparé .....	19
c). Distillateur solaire à cascade avec réflecteurs et condenseur externe .....	19
d).Distillateur solaire couplé à un condenseur.....	20
e).Distillateur solaire couplé avec capteur plan et condenseur.....	21
1.4 Les avantages et les inconvénients des distillateurs solaires .....	22
1.4.1 Les avantages.....	22
1.4.2 Les inconvénients .....	22
CHAPITRE 2: modélisation mathématique .....	23
2. modélisation mathématique de distillateur solaire simple couplée avec chambre de condensation à l'arrière et capteur plan à l'avent .....	24
2.1 Modélisation mathématique d'un distillateur simple avec chambre de condensation.....	25
2.1 1.Bilan thermique en régime transitoire .....	25
2.1.2. Bilan thermique de la vitre .....	27
2.1.3 Bilan thermique de mélange air-vapeur .....	28
2.1.4 Bilan thermique de la saumure .....	30
2.1.5 Bilan thermique de l'absorbeur .....	31
2.1.6 Bilan thermique de l'isolant .....	31
2.1.7 Bilan thermique du condenseur (l'échangeur de chaleur).....	32
2.2. Modélisation mathématique pour le capteur solaire .....	33
CHAPITRE 3: étude expérimentale .....	36
3.1 Description du banc d'essais .....	37
3.1.1 Description du distillateur simple.....	37

## ***Table Des Matières***

---

3.1.2 Description du distillateur actif .....	38
3.1.3 Description du distillateur actif avec chambre de condensation .....	38
a) Description de la chambre de condensation .....	39
b) Description du bassin distillateur .....	41
c) Le capteur plan thermique .....	45
d) Le circuit de refroidissement et le réglage du débit .....	46
e) La tuyauterie .....	47
f) Le stockage d'eau .....	47
g) Les structures porteuses .....	47
3.1.4 Le montage final .....	48
3.2 Protocole d'expérimentation .....	49
3.2.1 Lieu de l'expérimentation .....	49
3.2.2 Durée de l'expérimentation .....	49
3.2.3 Paramètres à mesurés .....	49
3.2.4 Instruments de mesures .....	49
3.2.5 Positions des différents thermocouples sur les trois distillateurs .....	50
CHAPITRE 4: résultats et interprétations .....	54
4. 1 introduction .....	55
4 .2 performances des distillateurs simple et actif avec refroidissement de la chambre de condensation et actif avec capteur plan .....	56
4.2.1. Evolution de la température ambiante et du rayonnement solaire en fonction du temps .....	56
4.2.2. Evolution de la vitesse du vent en fonction du temps .....	56
4.2.3. Evolution des températures des différents éléments des distillateurs .....	57
a) Evolution des températures des vitres extérieures et intérieures .....	57
b) Evolution de la température de l'eau saumâtre .....	58
c) Evolution de la température de l'air .....	59

## *Table Des Matières*

---

d) Evolution des températures dans la chambre de condensation .....	60
e) Evolution de la température de l'air dans le distillateur actif.....	60
f) Evolution de la température de la plaque absorbeur dans les trois distillateurs .....	61
g) Evolution de la Production du distillat.....	62
4. Evolution de la production cumulée en fonction du débit de refroidissement .....	63
Conclusion générale .....	64
Références bibliographiques.....	65
Annexes .....	68

## Nomenclature

### 1. Notations :

Symbole	Désignation	Unité
<b>l</b>	<b>Largeur</b>	<b>mm</b>
<b>a</b>	<b>L'azimut</b>	<b>Degré (°)</b>
<b><math>\alpha</math></b>	<b>Diffusivité thermique du corps d'indice i</b>	<b>m<sup>2</sup>/s</b>
<b>A<sub>i</sub></b>	<b>Surface d'un corps d'indice i</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
<b>C</b>	<b>Concentration massique</b>	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>
<b>C<sub>p</sub><sub>i</sub></b>	<b>Chaleur massique à pression constante</b>	<b>J/kg °C</b>
<b>d</b>	<b>Diamètre du tube</b>	<b>m</b>
<b>D</b>	<b>Le coefficient de diffusion de vapeur d'eau</b>	<b>m<sup>2</sup>/s</b>
<b>DA</b>	<b>Distillateur actif</b>	
<b>DCH</b>	<b>Distillateur avec Chambre de Condensation</b>	
<b>DS</b>	<b>Distillateur Simple</b>	
<b>E</b>	<b>Epaisseur</b>	<b>mm</b>
<b>e<sub>i</sub></b>	<b>Epaisseur du corps</b>	<b>m</b>
<b>F'</b>	<b>facteur de rendement de plaque collectrice</b>	<b>-</b>
<b>g</b>	<b>Accélération de la pesanteur</b>	<b>m/s<sup>2</sup></b>
<b>H</b>	<b>Hauteur</b>	<b>mm</b>
<b>H</b>	<b>Temps local</b>	<b>heure</b>
<b><math>H^{cd}_{ij}</math></b>	<b>Coefficient d'échange thermique par conduction entre les surfaces matérielles indicées i et j</b>	<b>W/m<sup>2</sup>°C</b>
<b><math>h^c_{ij}</math></b>	<b>Coefficient d'échange thermique par convection entre les surfaces matérielles indicées i et j</b>	<b>W/m<sup>2</sup>°C</b>

## Nomenclature

<b>H<sub>i</sub></b>	<b>La hauteur</b>	<b>m</b>
<b><i>h<sub>Mc</sub></i></b>	<b>coefficient de transfert de masse à la face de condensation del'échangeur de chaleur.</b>	<b>N.S/kg</b>
<b><i>h<sub>Mev</sub></i></b>	<b>coefficient de transfert de masse à la face d'évaporation</b>	<b>N.S/kg</b>
<b>H<sub>r</sub></b>	<b>L'humidité relative</b>	<b>%</b>
<b><i>h<sup>r</sup><sub>ij</sub></i></b>	<b>Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre les surfaces matérielles indicées i et j</b>	<b>W/m<sup>2</sup>°C</b>
<b>I<sub>G</sub></b>	<b>Rayonnement globale</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>I<sub>G</sub></b>	<b>Rayonnement global incident</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>I<sub>Gmax</sub></b>	<b>Rayonnement globale maximale</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>K</b>	<b>Type du thermocouple</b>	
<b>L</b>	<b>Longueur</b>	<b>mm</b>
<b>L</b>	<b>Longitude</b>	<b>Degré (°)</b>
<b>L'<sub>i</sub></b>	<b>La largeur</b>	<b>m</b>
<b>L<sub>i</sub></b>	<b>La longueur</b>	<b>m</b>
<b>L<sub>v</sub></b>	<b>Chaleur latente de vaporisation</b>	<b>kJ/kg</b>
<b>m</b>	<b>La masse molaire</b>	<b>Kg/mol</b>
<b><i>m<sup>co</sup><sub>ij</sub></i></b>	<b>Débit massique échangée par condensation entre les surfacesmatérielles indicées i et j</b>	<b>Kg/s</b>
<b><i>m<sup>ev</sup><sub>ij</sub></i></b>	<b>Débit massique échangée par évaporation entre les surfaces matérielles indicées i et j</b>	<b>Kg/s</b>
<b>M<sub>i</sub></b>	<b>Masse du corps d'indice i</b>	<b>kg/s</b>
<b><i>P<sup>m</sup><sub>va</sub></i></b>	<b>Pression de la vapeur d'eau à la température du mélange</b>	<b>Pa</b>
<b><i>P<sup>vl</sup><sub>va</sub></i></b>	<b>Pression de la vapeur d'eau à la température du vitrage intérieur</b>	<b>Pa</b>
<b>P<sub>i</sub></b>	<b>Puissance solaire absorbée par le corps d'indice i</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>Q</b>	<b>Débit de refroidissement</b>	<b>Kg/s</b>
<b><i>q<sup>cd</sup><sub>ij</sub></i></b>	<b>Densité de flux de chaleur échangée par conduction entre lessurfaces matérielles indicées i et j</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>

## Nomenclature

$q_{i,j}^c$	Densité de flux de chaleur échangée par convection entre les surfaces matérielles indicées i et j	W/m <sup>2</sup>
$Q_{i,j}^{co}$	Flux de chaleur échangée par condensation entre les surfaces matérielles indicées i et j	W
$Q_{i,j}^{ev}$	Flux de chaleur échangée par évaporation entre les surfaces matérielles indicées i et j	W
$q_{i,j}^r$	Densité de flux de chaleur échangée par rayonnement entre les surfaces matérielles indicées i et j	W/m <sup>2</sup>
$R$	Coefficient de réflexion	-
$S$	Surface	m <sup>2</sup>
$t$	Le temps	s
$T$	Température	°C
$T_{abs}$	Température de l'absorbeur	°C
$T_{air}$	Température de l'air	°C
$T_{air\ ch4}$	Température de l'air dans la chambre position 4	°C
$T_{air\ ch6}$	Température de l'air dans la chambre position 6	°C
$T_{amb}$	Température ambiante	°C
$T_{eau}$	Température de l'eau	°C
$T_i$	Température du corps d'indice i	°C
$T_{max}$	Température maximale	°C
$T_{min}$	Température minimale	°C
$T_{pch1}$	Température de la plaque de la chambre position 1	°C
$T_{pch3}$	Température de la plaque de la chambre position 3	°C
$T_{vex}$	Température du vitrage extérieur	°C
$T_{vin}$	Température du vitrage intérieur	°C
$V$	Vitesse du vent	m/s
$V$	Volume	m <sup>3</sup>
$V_{moy}$	Vitesse moyenne du vent	m/s

## Nomenclature

$V_c$	la vitesse caractéristique du fluide	m/s
$V_{max}$	Vitesse maximale du vent	m/s
$V_{min}$	Vitesse minimale du vent	m/s
$w$	distance de pas entre deux tubes de refroidissement	m
$x, y$	coordonnées spatiales	-
$Z$	L'altitude	m

## 2. Lettres grecques :

Symbole	Désignation	Unité
$\beta$	Angle d'inclinaison du vitrage	degré(°)
$\emptyset$	Diamètre des tubes	mm
$\Phi$	La latitude	Degré (°)
$\delta$	Déclinaison	Degré (°)
$\omega$	L'angle horaire	Degré (°)
$\beta_d$	Coefficient de dilatation volumique	1/K
$\beta_m'$	Coefficient de dilatation massique	1/K
$\beta_m$	Coefficient de dilatation thermique	1/K
$\beta$	Inclinaison de la vitre	Degré (°)
$\varepsilon$	Emissivité	-
$\eta_g$	Efficacité globale	%
$\eta_i$	Efficacité interne	%
$\lambda$	Conduction thermique	W/m °C

## *Nomenclature*

---

$\mu$	<b>Viscosité dynamique</b>	<b>kg/m.s</b>
$\nu$	<b>Viscosité cinématique</b>	<b>m<sup>2</sup>/s</b>
$\rho$	<b>Masse volumique</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
$\alpha$	<b>Coefficient d'absorption</b>	<b>-</b>
$\tau$	<b>Coefficient de transmission</b>	<b>-</b>
$\theta$	<b>angle de réfraction</b>	<b>Degré (°)</b>

## Liste des figures

Figure 1.1: le principe de l'osmose et l'osmose inverse.....	5
Figure 1.2: le principe de l'électrodialyse .....	6
Figure 1.3: le principe de technique de flash à multi effets.....	8
Figure 1.4: le principe de distillation par compression de la vapeur.....	9
Figure 1.5: le principe de distillation à effets multiples (MED).....	10
Figure 1.6 : Principe de construction d'un distillateur solaire simple .....	11
Figure 1.7: Distillateur solaire conventionnel simple.....	12
Figure 1.8: Distillateur plan capteur .....	13
Figure 1.9: Distillateur a diffusion .....	13
Figure 1.10: Distillateur hot box-capteur .....	14
Figure 1.11 : Distillateur solaire type actif, couplé à un capteur par mode de circulation.....	15
Figure 1.12 :Distillateur solaire à double pente avec un collecteur solaire.....	16
Figure 1.13 :Distillateur solaire d'un double bassin avec des tubes vide.....	17
Figure 1.14 : diagramme schématique d'un distillateur solaire avec deux effets.....	18
Figure 1.15: Distillateur solaire avec condenseur séparé .....	19
Figure 1.16 :Distillateur solaire à cascade avec réflecteurs et condenseurexterne.....	20
Figure 1.17 :Distillateur solaire couplé à un condenseur .....	21
Figure 1.18 :Photographie du dispositif expérimental .....	21
Figure 2.1 : Représentation des flux de chaleur dans notre distillateur.....	25
Figure 2.2 : Diagramme du flux d'énergie d'un distillateur solaire simple avec chambre de condensation .....	26
Figure 2.3 : représentation des dimensions de notre type distillateur .....	29
Figure 3.1 : Schéma globale du distillateur simple .....	37
Figure 3.2 : Schéma globale du distillateur actif.....	38
Figure 3.3 : Schéma globale du distillateur actif avec chambre de condensation.....	38
Figure 3.4: Schéma de la chambre de condensation.....	39

## *Listes Des Figures*

---

Figure 3.5 : Etape de réalisation (découpage) .....	39
Figure 3.6 : Etape de réalisation (isolation).....	40
Figure 3.7: Etape de réalisation (carénage) .....	40
Figure 3-8 : L'absorbeur en place dans la chambre de combustion .....	41
Figure 3.9 : vue en perspective du bassin du distillateur actif.....	41
Figure 3.10 : Vue de droite du distillateur actif.....	42
Figure 3.11 : Vue de derrière du distillateur actif.....	42
Figure 3.12 : Etape de réalisation du bassin (isolation).....	43
Figure 3.13 : Distillateur terminé avec peinture .....	43
Figure 3.14 : vue en perspective du bassin du DCH .....	44
Figure 3.15 : vue l'échangeur de chaleur installé dans le bassin.....	44
Figure 3.16 : vitrage installé sur le distillateur .....	44
Figure 3.17: vue du capteur solaire thermique .....	45
Figure 3.18 : Vue en coupe d'un capteur plan .....	46
Figure 3.19 : pompe à eau électrique.....	46
Figure 3.20 : rhéostat .....	46
Figure 3.21 : cuve de stockage de 1000 litres isolé .....	47
Figure 3.22: vue de face de l'installation .....	48
Figure 3.23 : thermocouple de type K avec connecteur .....	49
Figure 3.24 : positions des thermocouples sur le Distillateur simple.....	51
Figure3.25 : positions des thermocouples sur le distillateur avec chambre de condensation ..	51
Figure 3.26 : position des thermocouples sur le distillateur actif avec capteur plan.....	52
Figure 3.27: positions des thermocouples sur l'absorbeur de la chambre.....	52
Figure 3.28: centrale d'acquisitions de données.....	52
Figure 3.29: bécher en verre gradué en ml .....	53
Figure 3.30: conductimètre.....	53

## Listes Des Figures

---

Figure 4.1: Evolution de la température ambiante et du rayonnement solaire en fonction du temps de la journée du 27 juillet 2016.....	56
Figure 4.2: Evolution de la vitesse du vent en fonction du temps de la journée du 27 juillet 2016 .....	57
Figure 4.3 : Evolution des températures des vitres extérieures et intérieures des trois distillateurs au cours de la journée du 27/07/2016 .....	58
Figure 4.4 : Evolution de la température de l'eau saumâtre dans des trois distillateurs au cours de la journée du 07/07/2016.....	59
Figure 4.5 : Evolution de la température de l'air dans les bassins des trois distillateurs au cours de la journée du 27/07/2016.....	59
Figure 4.6 : Evolution de la température de l'air dans la chambre de condensation (point 4 et 6) et sur l'échangeur (point 1 et 3) du distillateur avec chambre au cours de la journée du 27/07/2016.....	60
Figure 4.7 : Evolution de la température de l'air dans le distillateur avec chambre et dans la chambre de condensation (point 6) au cours de la journée du 27/07/2016 .....	61
Figure 4.8 : Evolution de la température de la plaque absorbeur dans les trois distillateurs au cour de la journée du 27 /07/ 2016 .....	61
Figure 4.9 : Evolution horaire de la production de la journée du 27 /07/2016.....	62
Figure 4.10 : Evolution horaire de la production cumulée du distillat dans les trois distillateurs au cours de la journée du 27/07/2016 .....	63
Figure 4.11 : Evolution de la production journalière du distillateur actif en fonction du débit de refroidissement.....	63
Figure 4.12: Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps de la 25 et 26 juillet 2016 .....	69
Figure 4.13: Evolution de la vitesse du vent en fonction du temps de la journée du 25 et 26 juillet 2016.....	69
Figure 4.14: Evolution de la température ambiante en fonction du temps de la 25 et 26 juillet 2016.....	70
Figure 4.15: Evolution des températures du distillateur simple de la journée du 25 juillet 2016.....	70
Figure 4.16: Evolution des températures du distillateur simple de la journée du 26 juillet 2016.....	71

## *Listes Des Figures*

---

Figure 4.17: Evolution des températures du distillateur actif avec chambre de condensation de la journée 25 juillet 2016 .....	71
Figure 4.18: Evolution des températures du distillateur actif avec chambre de condensation de la journée 26 juillet 2016 .....	72
Figure 4.19: Evolution des températures du distillateur actif avec capteur plan de la journée du 25 juillet 2016 .....	72
Figure 4.20: Evolution des températures du distillateur actif avec capteur plan de la journée du 26 juillet 2016.....	73
Figure 4.21: Evolution de la température de l'air dans la chambre de condensation (point 4 et 6) et sur l'échangeur (point 1 et 3) du distillateur avec chambre au cours de la journée du 25 juillet 2016.....	73
Figure 4.22: Evolution de la température de l'air dans la chambre de condensation (point 4 et 6) et sur l'échangeur (point 1 et 3) du distillateur avec chambre au cours de la journée du 26 juillet 2016.....	74
Figure 4.23 : Evolution horaire de la production de la journée du 25 juillet 2016.....	74
Figure 4.24 : Evolution horaire de la production de la journée du 26 juillet 2016.....	75
Figure 4.25 : Evolution horaire de la production cumulée du distillat dans les trois distillateurs au cours de 25 juillet 2016.....	75
Figure 4.26 : Evolution horaire de la production cumulée du distillat dans les trois distillateurs au cours de 26 juillet 2016.....	76

## *Résumé*

---

### ***Résumé :***

Le dessalement des eaux souterraines et de mer est considéré comme l'une des solutions proposées pour résoudre le problème du manque en eau potable dans les zones arides et désertiques, mais l'alternative la plus simple économiquement est la distillation solaire, elle reste le seul choix possible surtout quand les besoins en eau douce sont faibles.

Notre travail consiste à développer un distillateur solaire amélioré afin d'augmenter sensiblement le rendement journalier. À cet effet nous avons opté pour un distillateur solaire à effet serre de type pente unique, à qui on ajoute d'une part :

- ✓ Une chambre de condensation, celle-ci est refroidie par un échangeur de chaleur monté à l'intérieur de la chambre
- ✓ Un capteur solaire thermique pour augmenter et accélérer le chauffage de la saumure par l'intermédiaire d'un échangeur en forme de serpentin

Pour pouvoir comparer et apprécier les performances de ce distillateur simple de même dimension et un distillateur solaire simple couplé avec un capteur plan qui ont été testés sous les mêmes conditions climatiques.

L'expérimentation à durée 3 jours en mois de juillet, les résultats obtenus ont mis en évidence l'influence de la chambre de condensation et du capteur solaire thermique sur la production de l'eau distillée, nous nous sommes particulièrement attachés à l'étude de la variation du débit de refroidissement de la chambre de condensation d'où la recherche d'un débit optimal qui donne le meilleur rendement.

**Les Mots Clés :** distillation solaire, chambre de condensation, capteur solaire thermique, échangeur de chaleur.

### ***Abstract:***

The desalination of water and sea water is considered as one of the solutions proposed to solve the problem of the lack of drinking water in the arid and desert zones, but the simplest alternative economically is the solar distillation, it remains the only solar Choice, especially when the need for fresh water is low.

Our work consists of developed an improved solar still to increase its daily. For this purpose, we have opted for a solar distiller with a greenhouse effect of the single slope type, to which we add on the one hand:

- ✓ A condensation chamber, which is cooled by a heat exchanger mounted inside the chamber.
- ✓ A solar thermal collector to increase and accelerate the heating of the brine by means of a coil-shaped exchanger.

To be able to compare and appreciate the performances of this single distiller of the same dimension and a simple solar still coupled with a plane sensor that has been tested under the same climatic conditions.

The experimentation lasting 3 days in July, the results obtained have highlighted the influence of the condensation chamber and the solar thermal collector on the production of distilled water, we particularly focused on the study of the variation of the cooling rate of the condensation chamber or of the optimum flow rate which gives the best performance.

**Key Words:** solar distillation, condensation chamber, solar thermal collector, heat exchanger.

### الملخص:

تعتبر تحلية المياه وتقطير مياه البحر واحدة من الحلول المقترحة لمشكلة نقص مياه الشرب في المناطق الجافة والصحراوية، ولكن البديل هو أبسط اقتصاديا التقطير الشمسي، إلا أنها تبقى فقط خيار ممكن خصوصا عندما تحتاج للمياه العذبة.

تم تطوير مهمتنا الطاقة الشمسية لا يزال تحسنت لزيادة سرا يوميا. ولهذه الغاية اخترنا لتأثير الدفيئة التقطير الشمسي من نوع المنحدر واحد، الذي يضاف على يد واحدة:

✓ غرفة التكتيف، ويتم تبريد هذا الأخير من قبل مبادل حراري انشأ داخل الغرفة.

✓ تجميع الطاقة الشمسية الحرارية لزيادة وتسريع تسخين الماء المالح من خلال مبادل أفعواني.

لمقارنة وتقييم أداء هذه المقطر البسيط من نفس الحجم و المقطر المرتبط بمجمع الطاقة الشمسية تم اختبار جهاز استشعار تحت نفس الحالة المناخية.

فترة التجريب 3 أيام في يوليو، أظهرت النتائج تأثير الغرفة التكتيف وتجميع الطاقة الشمسية الحرارية لإنتاج الماء المقطر، أولينا اهتماما خاصا لدراسة التغير في معدل تبريد غرفة التكتيف أو البحث عن معدل التدفق الأمثل الذي يعطي أفضل أداء.

**كلمات البحث:** التقطير الشمسي، غرفة التكتيف تجميع الطاقة الشمسية الحرارية، المبادلات الحرارية.

### **Introduction Générale**

L'eau est un don de Dieu et elle joue un rôle clé dans le développement d'une économie et, à son tour, pour le bien-être d'une nation. L'eau douce disponible dans la terre est fixe. La demande d'eau douce augmente rapidement en raison de la croissance démographique et de l'industrialisation rapide. L'absence d'eau potable est l'un des problèmes majeurs auxquels sont confrontés les pays développés et les pays en développement[1].

Cette situation continue à mobiliser les chercheurs de par le monde en essayant de proposer des solutions qui s'adaptent à des problèmes posés localement, sans pour autant tenir compte des difficultés propres à chaque pays. Naturellement, la gestion financière et la rentabilité des procédés proposés constituent une tare que le pouvoir public arrive difficilement à endiguer.

En exploitant le phénomène de la faible transpiration des serres de dessalement, la production de l'eau à usage domestique a conduit à des résultats assez probants, en utilisant le procédé de distillation solaire.

L'Algérie dispose de ressources en eau très limitées. Tout au moins au nord où vivent les trois quarts de la population. Sur les 100 milliards de m<sup>3</sup> que constituent les précipitations, nous concédons 85% à l'évaporation alors que sur les 12,5 milliards de m<sup>3</sup> qui ruissellent, 50% partent à la mer ou dans les chotts. Au nord, seuls 3,5 milliards de m<sup>3</sup> sont « régularisables ». La pluviométrie est le paramètre le plus important dans l'évaluation des ressources en eau. Elle varie de plus de 2000 mm/an sur les hauts reliefs en bordure de la mer méditerranéenne, à moins de 100 mm/an au nord de Sahara. Les moyennes annuelles des précipitations suivent une zonalité générale Nord-Sud, qui définit les zones climatiques[2].

Cependant, on note également des écarts notables entre l'Est et l'Ouest du pays. La région Oranaise (Ouest) est en général moins arrosée que le constantinois (Est). Les précipitations sont croissantes d'Ouest vers l'Est. Les eaux souterraines sont évaluées à 1,8 milliards de m<sup>3</sup> dans le Nord de l'Algérie. Les potentialités du sud sont estimées à 60000 milliards de m<sup>3</sup>. Ces dernières sont difficilement exploitables et renouvelables et 4 à 5 milliards de m<sup>3</sup> sont exploitables annuellement[2].

L'inconvénient majeur de ces systèmes est qu'ils sont très coûteux. L'utilisation de ces systèmes de production d'eau potable reste donc encore très marginale et il est recommandé que l'utilisation de cette eau dessalée doive être destinée principalement aux centres touristiques et les grosses industries, situés sur la bande côtière. Pour cette raison, il faut essayer d'améliorer l'efficacité des distillateurs solaires.

## ***Introduction Générale***

---

### **Le mémoire contient quatre chapitres :**

**Le premier chapitre** : est consacré à la présentation de la connaissance générale sur les Techniques de dessalement et quelque application au déférent types de distillateur solaire et les avantages, les inconvenants du dessalement.

**Le deuxième chapitre:** étude et modalisation de système proposé à l'étude cette partie présente la modélisation de distillateur solaire couplée avec chambre de condensation à l'arrière et capteur plan à l'avant.

**Le troisième chapitre** : est consacré à l'étude expérimentale du banc d'essais, on retrouve une description détaillée des différents éléments avec un exposé des différentes étapes de réalisation. Nous avons inclus aussi en fin de chapitre la partie protocole expérimentale.

**Le quatrième chapitre** : comprend les résultats des tests effectués, ceux-ci regroupent tous les courbes qui représentent l'évolution des paramètres de fonctionnement des trois distillateurs, ainsi que leurs interprétations.

**Une conclusion générale** : avec un rappel succinct des résultats des tests ainsi que les perspectives.

**CHAPITRE 1**  
**ETUDE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**

### 1.1: Historique :

L'utilisation de l'énergie solaire pour le dessalement de l'eau a été envisagée des 1872 dans le nord du Chili, par l'ingénieur suédois Carlos Wilson [3]. Il permettait de fournir de l'eau potable aux animaux de trait à partir de l'eau salée de la mer [3]. Ce système ne fonctionna que jusqu'en 1910 à cause de l'accumulation rapide des sels dans le bassin, nécessitant un nettoyage régulier du distillateur. La distillation solaire connut une période creuse entre 1880 et la première guerre mondiale. En 1920, Kaush utilisa des réflecteurs en métal pour concentrer les rayons solaires ; il en résulte l'apparition de nouveaux appareils (types toit, couverture en V, plateau incliné...etc.) [3].

Une installation due à Gini tous groupant 30 appareils de 1 m<sup>2</sup> fut réalisée et exploitée à Bengardane en Tunisie en 1929. Au début des années 30, Trifinov proposa un distillateur incliné ; en 1938 Abbot utilisa des réflecteurs cylindriques paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire, le tout est acheminé dans des tubes contenant de l'eau [3].

Maria Telks inventa en 1945 un nouveau type de distillateur solaire de forme sphérique, qui fut utilisé par la marine américaine ; un grand nombre de ce modèle, environ 2000 a été utilisé pendant la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale. En 1969, Cooper proposa une simulation pour analyser les performances d'un distillateur solaire type serre. Depuis les années 70, plusieurs autres types de distillateurs ont été élaborés et étudiés, parmi lesquels, nous pouvons, sans être exhaustif citer :

- ✓ Le distillateur à effet multiple (Oltra, 1972 ; Bartali, 1976) [4].
- ✓ Le plateau incliné ou le distillateur solaire incliné (Howa, 1961 Akhtamov et al, 1978) [5].
- ✓ Le distillateur solaire type mèche inclinée ou type multiple mèches (Frick et Somerfeld 1973 ; Soda et al ; 1980 ; Moustafa 1979).
- ✓ Combinaison du distillateur solaire à effet de serre (Salcuk, 1970, 1971 ; Sodha et al, 1980).
- ✓ Distillateur solaire chauffé indirectement (Soliman 1976 ; Malik et al 1973, 1978, Sodha et al 1981).

### 1.2 Les méthodes de dessalement :

Les différents procédés de dessalement sont classés en deux catégories selon le principe appliqué :

- Les procédés membranaires.
- Les procédés thermiques.

### 1.2.1: Procédés à membranes :

Dans la nature les membranes jouent un rôle important pour séparer les sels, les processus de dialyse et d'osmose se produisent dans les organismes vivants. Les membranes sont utilisées sur le marché dans deux procédés importants : l'électrodialyse (ED) et l'osmose inverse (OI)[6].

#### a. L'osmose inverse(OI) :

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes, le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée, si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer, il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera si pour simplifier nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique, la pression osmotique peut se calculer à partir de la formule des gaz parfaits ( $P.V = n.R.T$ ) appliquée aux ions, elle est proportionnelle à la concentration.

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bar pour le traitement de l'eau de mer), ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase.

Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules par exemple les sels dissous et les molécules organiques de  $10^{-7}$  mm de taille, l'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression, la teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de  $0.5 \text{ g. L}^{-1}$ [7].

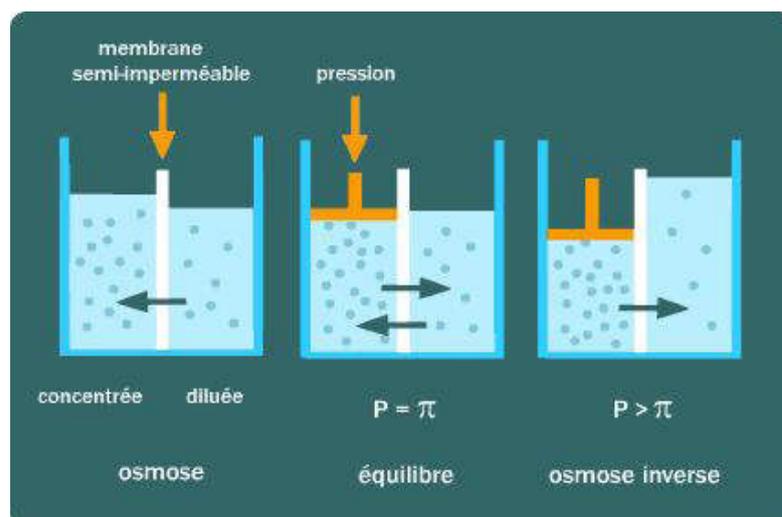


Figure 1.1: le principe de l'osmose et l'osmose inverse[7].

### b. L'électrodialyse(ED)

L'électrodialyse est définie l'effet combiné de deux autres procédés qui sont la dialyse et l'électrolyse, l'électrolyse consiste à séparer les ions chimiquement quant à la dialyse elle consiste à les séparer à l'aide de membranes sélectives.

L'électrodialyse est un procédé qui utilise la mobilité des ions d'un électrolyte soumis à un champ électrique, le dessalement étant assuré par des membranes qui éliminent sélectivement les sels, dans une cellule d'électrodialyse dans laquelle circule une solution saline la cathode attire les cations ( $\text{Na}^+$ ) et l'anode attire les anions ( $\text{Cl}^-$ ) ce qui permet d'obtenir de l'eau douce.

Les membranes sélectives sont placées entre la cathode et l'anode, il y aurait donc une concentration et une combinaison dans certains compartiments ou la solution s'enrichit en sels (compartiments de concentration), alors que dans d'autres la concentration saline diminuera.

Pour une eau saumâtre de 2-3 g/l l'énergie nécessaire est de l'ordre de 2 kWh/m<sup>3</sup> et la durée de vie de la membrane est en moyenne de 5 années.

L'ED a été introduit sur le marché au début des années 1960, l'unité ED de base se compose de plusieurs centaines de cellules reliées entre elles par des électrodes à un bloc extérieur qui constitue la pile, l'eau d'alimentation est distribuée à travers toutes les cellules.

Certains flux vont alors s'appauvrir en sel tandis que d'autres vont au contraire s'enrichir, compte tenu du caractère sélectif des membranes, des additifs peuvent être mélangés à l'alimentation pour réduire l'entartrage [7] [8].

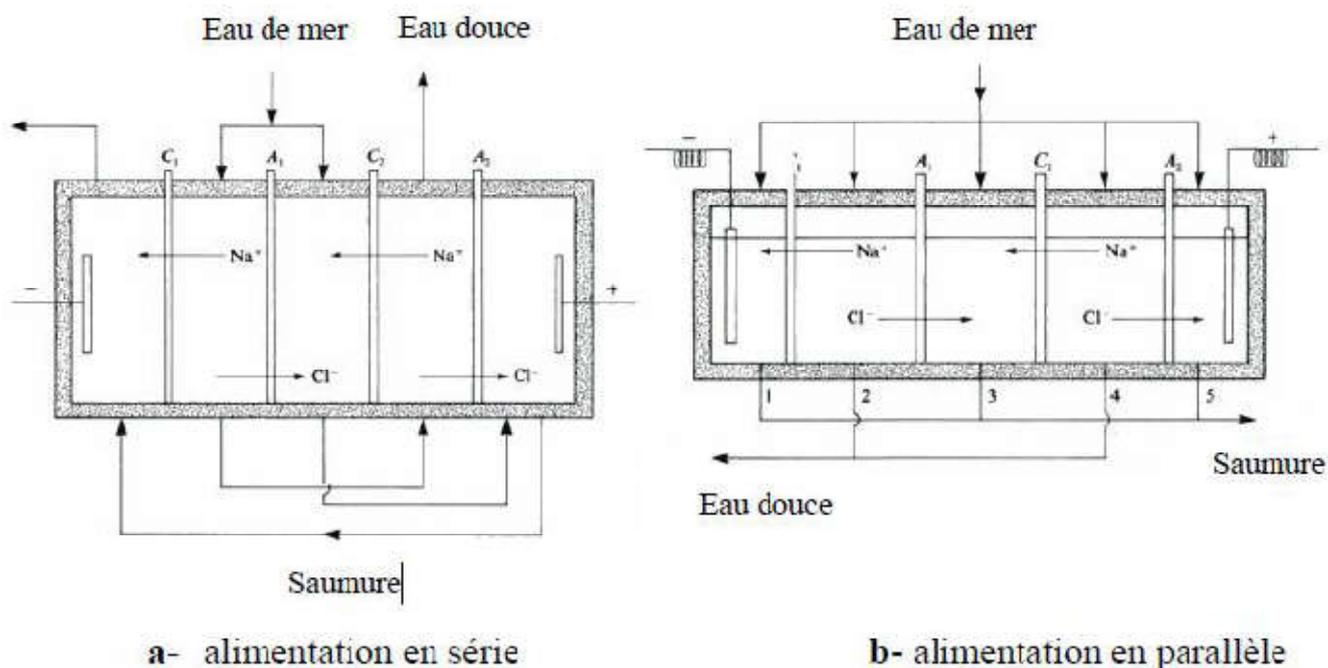


Figure 1.2 : le principe de l'électrodialyse [8].

### 1.2.2: Les procédés thermiques :

Environ la moitié de l'eau dessalée dans le monde est produite au moyen de chaleur servant à distiller ou congelé de l'eau douce (liquide ou se forme solide) à partir de l'eau de mer, le procédé par distillation reproduit le cycle naturel de l'eau puisqu'il consiste à chauffer de l'eau salée pour produire de la vapeur d'eau qui est à son tour condensée pour donner de l'eau douce, mais l'autre processus basé sur la diminution de température pour produit l'eau douce [9].

#### a. Procédé par congélation

Lors du processus de congélation, les sels dissous sont naturellement éliminés lors de la formation initiale de cristaux de glace, le refroidissement de l'eau salée pour former des cristaux de glace sous des conditions bien définies est un moyen de dessaler l'eau.

L'eau liquide à l'état pur se solidifie à 0 °C mais si elle contient un soluté les sels par exemple, la température du point de congélation diminue de  $\Delta T$  d'après Raoult :

$$\Delta T = K \cdot m/M$$

M : masse molaire du soluté (Kg/mol)

m : molalité du soluté (mol/Kg)

K : constante de congélation de l'eau (°K. (Kg/mol)<sup>2</sup>)

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.

Cette technologie peut également être appliquée au traitement des eaux usées. On distingue deux types de procédés par congélation, cette dernière pouvant être « directe » ou « indirecte ».

#### a.1. Dessalement par congélation directe

Le principe de la congélation directe repose sur la formation de cristaux de glace par contact direct entre un réfrigérant et l'eau de mer, ce réfrigérant peut être l'eau de mer elle-même, la chaleur est soustraite à la saumure par une évaporation flash sous pression réduite.

Ce procédé est appelé VFVC (Vacuum Freezing Vapeur Compression) dans la littérature anglo-saxonne, la congélation directe peut également être assurée par un réfrigérant secondaire ; le refroidissement est obtenu par la vaporisation de butane liquide et froid injecté sous pression directement dans la saumure, le procédé est alors appelé SRF (Secondary Réfrigérant Freeze) [10].

#### a.2. Dessalement par congélation indirecte

Dans le cas de la congélation indirecte le refroidissement est assuré par un échangeur de chaleur et une couche de glace est déposée sur les parois froides de l'échangeur. Dans le procédé par congélation directe, l'eau produite peut toutefois être polluée par des traces de réfrigérant, ce problème ne se pose plus si l'on travaille par congélation indirecte mais dans ce cas l'eau peut encore être polluée par de la saumure piégée entre les cristaux de glace et les conditions opératoires doivent être parfaitement maîtrisées.

les techniques de congélation directe ou indirecte, qui conduisent à la formation de cristaux de glace en suspension posent des difficultés pour séparer la glace de la saumure résiduelle, les stratégies pour le succès commercial du procédé par congélation dans l'industrie de dessalement, cette technologie peut de plus permettre un stockage de frigorifiques, si l'étape de décongélation est couplée à un système de climatisation par exemple le procédé par congélation pourrait enfin être couplé avec le procédé de l'osmose inverse pour le prétraitement de l'eau de mer ou l'eau salée en générale[10].

### b. Procédé de distillation

La distillation est un procédé de séparation selon lequel un composé volatil d'une solution est évaporé et ensuite condensé, cette technologie est la plus ancienne utilisée pour dessaler l'eau commercialement[6]. Il y a plusieurs des techniques de distillation :

#### b.1. Technique de flash à une seule cellule

La saumure qui est l'eau salée entre dans la cellule à une température (T) ou à une pression légèrement inférieure à la pression atmosphérique, ce qui entraîne une détente suivie d'une évaporation. Se condensent sur un serpentin contenant de l'eau salée froide ces vapeurs libèrent leur chaleur latente qui sert à chauffer la saumure[11].

#### b.2. Technique de flash à multi effets

Le principe est le même que celui de la distillation à une cellule simple mais au lieu d'une cellule le procédé contient « n » cellules liées entre-elles en série.

L'eau saumâtre se chauffe d'une cellule à l'autre jusqu'à une température allant de 80°C à 100°C et où le chauffage se fait par vapeur, l'écoulement de la saumure et l'eau douce fait à contre-courant[11].

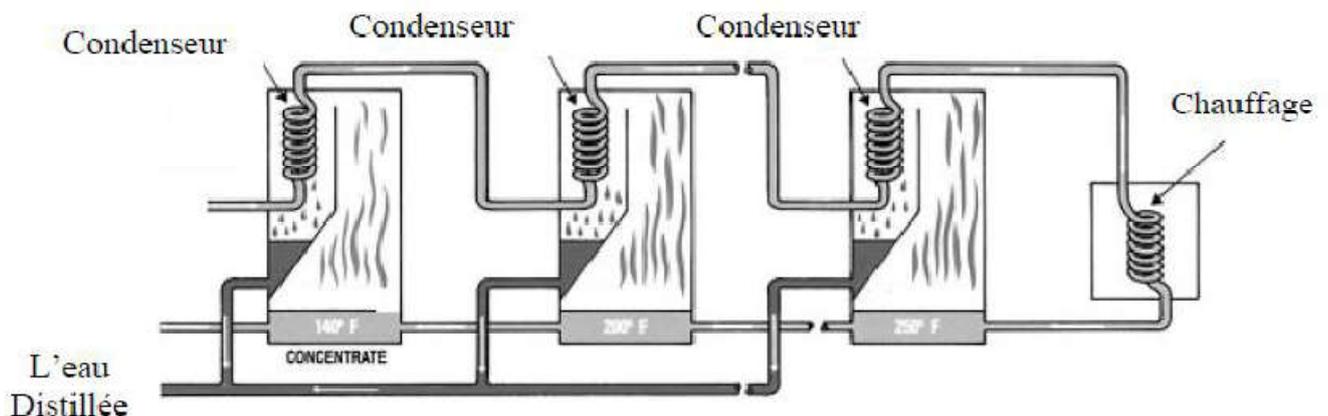


Figure 1.3: le principe de technique de flash à multi effets[11].

### c. Distillation par compression de la vapeur :

Le principe de dessalement d'eau salée par compression de vapeur est celui d'une pompe à chaleur ; ou l'eau salée est évaporée après avoir été préchauffée des gouttelettes entraînées par un séparateur, sa pression ayant été élevée grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée, le cycle d'évaporation et de condensation peut ainsi fonctionner, la vapeur condensée de l'eau douce est extraite ainsi que la saumure concentrée contenant du sel.

A cause de problème de corrosion et d'entartrage des composants un tel dispositif fonctionne généralement à une température limitée à environ 60°C (l'eau salée bout sous vide partiel) avec un facteur de concentration égal à deux ; 1 m<sup>3</sup> d'eau salée (35g/l de sel) donnera 500 litres d'eau douce et 500 litres de saumure à 70 g/l de sel seront rejetés à la mer, ce dispositif permet de ne consommer qu'une dizaine de kilowattheures électriques [12].

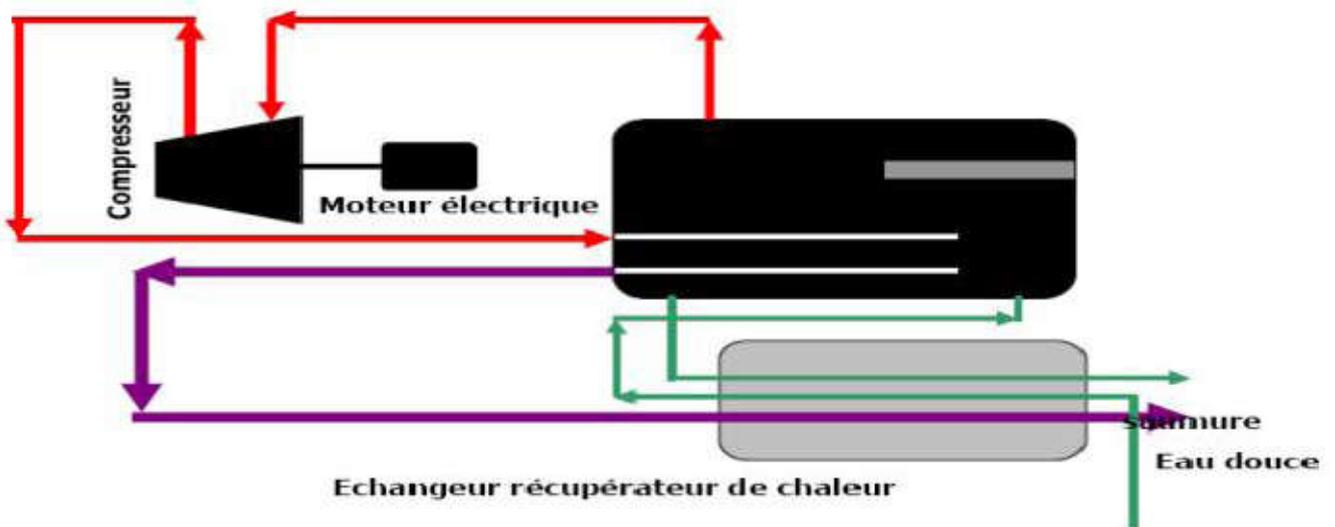


Figure 1.4: le principe de distillation par compression de la vapeur[12].

#### ❖ Première apparition d'un distillateur solaire :

La distillation solaire est une technologie d'une très grande histoire, l'utilisation moderne de l'énergie solaire pour la distillation de l'eau salée ou saumâtre a commencé en 1872, dans le nord de Chili par l'installation d'un distillateur solaire de type bassin, qui a permis de satisfaire les besoins de la communauté pendant plusieurs années.

L'ingénieur anglais **WILSON** dirigeant une exploitation minière à **Las Salinas au Chili**, eut à résoudre un problème d'abreuvement de 4000 mules qui transportaient en convois les minerais de nitrate, ne disposant que d'eau ayant une salinité égale à 140 g/l soit environ 4 fois supérieure à celle de l'eau de mer, il décida de construire un distillateur solaire en bois de 4460 m<sup>2</sup> qui devait fournir environ 20 m<sup>3</sup>/jour d'eau douce, il faut reconnaître que les conditions étaient particulièrement favorables si l'on tient compte de la latitude du lieu, de son altitude (1400 mètres) et de la pureté de l'atmosphère.

Cette installation resta en exploitation jusqu'en 1908 soit plus de 40 ans, un record de Dimension et de durée a été ainsi établi le départ [13].

### d. Distillation solaire :

Le dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer par distillation solaire est une opération très utilisée dans les régions arides.

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer l'eau saumâtre.

Les procédés de dessalement par distillation utilisant l'énergie solaire sous forme thermique sont :

- Distillation solaire à multiples effets.
- Distillation solaire à effet de serre[14].

#### d.1. Distillation à effets multiples (MED) :

L'eau salée est chauffée dans le premier effet, vaporisant une fraction de celle-ci. Une partie de cette vapeur est condensée par le faisceau tubulaire ou cercle de l'eau de mer relativement froide, l'autre partie de la vapeur est renvoyée dans l'effet suivant, de même une partie de la saumure chauffée dans le premier effet est également utilisée pour chauffer l'eau salée de mer dans le second. La vapeur en provenance du premier effet se condense dans le deuxième sur le faisceau tubulaire et produit une quantité presque égale de vapeur à partir de l'eau salée et ainsi de suite à chaque effet l'eau distillée est envoyée vers un collecteur. Le procédé MED (produit presque l'eau pure de TDS 5 à 25 ppm ; TDS : concentration totale des solides) à partir de l'eau de mer avec un TDS de 3500 à 4500 ppm.

Ce procédé est mieux disposé à s'adapter à l'énergie solaire et cette adaptation peut se faire soit avec des :

- Des capteurs solaires plans pour les petites unités allant jusqu'à plusieurs m<sup>3</sup>/jour.
- Des capteurs à concentration pour les capacités plus importantes.

Un stockage thermique est souvent utilisé sous forme de réserve d'eau chaude pour permettre d'avoir une certaine autonomie de fonctionnement en régime permanent[14].

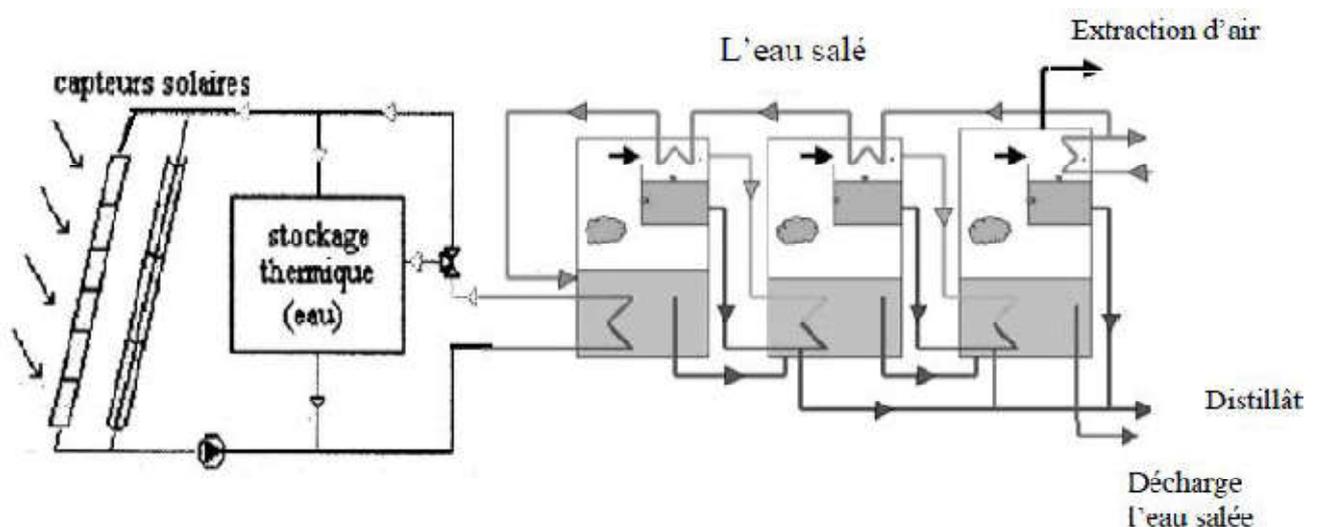


Figure 1.5: le principe de distillation à effets multiples (MED)[14].

### d.2. Distillation solaire à effet de serre :

Ce procédé consiste à chauffer l'eau directement par le rayonnement solaire dans un enceinte fermée recouverte de vitrage la vapeur produite qui se condense sur le vitrage plus froid et légèrement incliné, est recueillie sous forme de condensât dans des gouttières.

Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien mais son rendement est relativement faible 5 litres/jour.M<sup>2</sup>, il existe cependant deux types de fabrications de distillateur, ces derniers peuvent être construits soit :

- Sous forme de produit modulable il s'agit généralement d'un bac (plastique, tôle, bois...) isolé inférieurement et recouvert d'un vitrage supérieurement.

Plusieurs distillateurs peuvent être alimentés simultanément pour former une unité de distillation, le nombre de distillateurs dépend de la capacité d'eau produite et désirée. Ce modèle est utilisé seulement de très petites capacités plusieurs dizaines de litres par jours il est pratique quand les besoins en eau distillée ne sont pas très importants (laboratoire d'analyse...).

Il existe cependant plusieurs variantes dont on peut citer le distillateur plan, en cascade, à mèche, à multiples effets, sphérique, ...etc.

- ❖ Quand les besoins sont plus importants (plusieurs centaines de litres/jour) les distillateurs sont construits en maçonnerie/béton sous de grands bassins vitrés. La surface dépend de la quantité d'eau distillée, un certain nombre d'applications est effectuées généralement dans les zones rurales où les surfaces au sol sont disponibles [14].

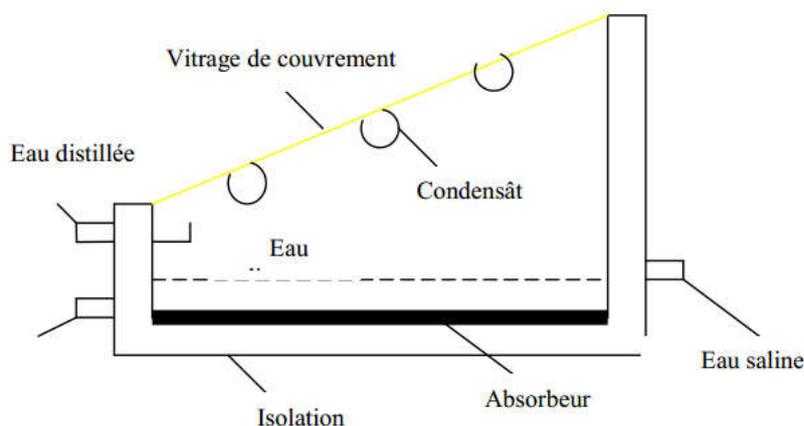


Figure 1.6 : Principe de construction d'un distillateur solaire simple [14].

### 1.3. Application aux différents types de distillateurs solaire :

#### 1.3.1: Distillateur solaire à simple bassin

Dans un distillateur solaire conventionnel simple de type inclinée, le bassin reçoit le rayonnement solaire à travers une couverture transparente, qui est par la suite absorbé par la plaque absorbante au fond du bassin et converti en chaleur qui sera transférée à l'eau qui s'échauffe puis avec le temps elle s'évapore, cette vapeur chaude monte saturée, puis subit un mouvement circulatoire, en raison de la différence de température entre la surface de l'eau et celle de la couverture inférieure, avant d'atteindre la vitre refroidie d'où sa condensation, puis elle glisse vers le bas de la vitre d'où elle est recueillie à l'aide d'un drain [15]. Dans ce type de distillateur à simple effet, la chaleur latente de condensation est épuisée avec l'expiration de l'eau distillée (l'évacuation).

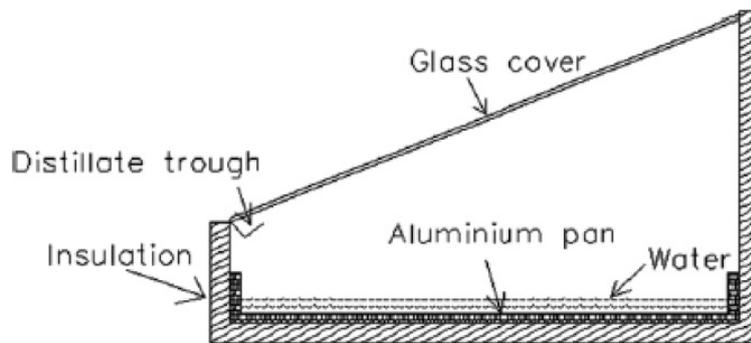


Figure 1.7: Distillateur solaire conventionnel simple[15].

#### 1.3.2: Distillateur solaire actif avec capteur plan :

##### a). Description du système couple distillateur plan -capteur :

Dans cette installation (figure 1.8), le distillateur plan est essentiellement constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau saumâtre ou eau de mer). Sous l'action du flux solaire  $G$ , transmis par la couverture transparente, l'eau s'échauffe et une partie de celle-ci s'évapore.

La vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre et le condensat est récupéré par un récepteur. Un appoint d'eau compense le débit de distillat. Afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur, les parois latérales et inférieures sont isolées.

Le distillateur est raccordé par des tubes au capteur solaire plan à circulation de liquide caloporteur (eau) constitué d'un absorbeur avec un tube en cuivre en forme de serpentin, une couverture transparente en verre trempe et un coffre isolé par de la laine de verre ; le système fonctionne en thermosiphon[16].

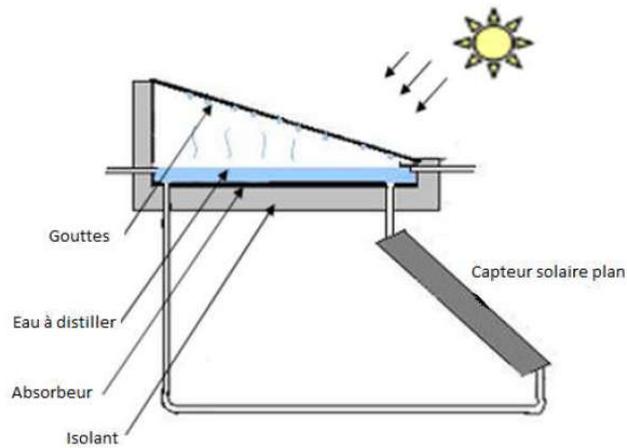


Figure 1.8: Distillateur plan capteur [16].

### b).Distillateur à diffusion :

Cet appareil se compose principalement de deux parties, un réservoir de stockage relie à un capteur et une série de plaques métalliques parallèles et verticales. L'eau chaude provenant du réservoir de stockage chauffe la première plaque et provoque l'évaporation de l'eau qui coule sur le côté droit de celle-ci, la vapeur d'eau produite se condense sur le côté gauche de la deuxième plaque, la chaleur de condensation libérée servira à évaporer l'eau qui coule sur le côté droit de la deuxième plaque et ainsi de suite jusqu'à la dernière plaque où la chaleur de condensation va contribuer au préchauffage de l'eau salée d'alimentation [3].

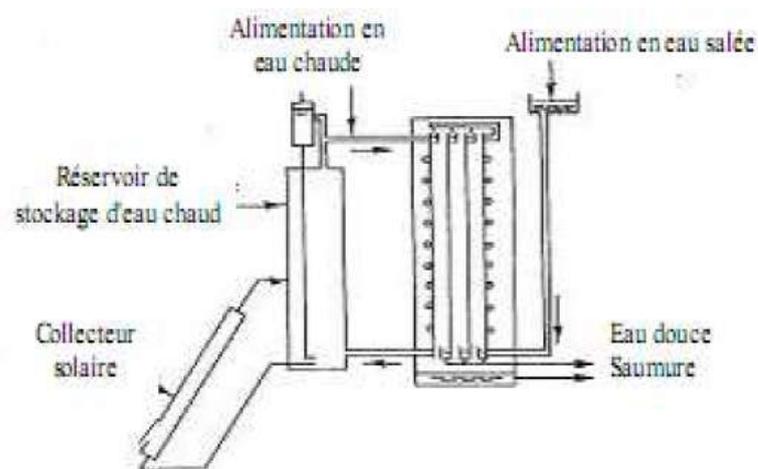


Figure 1.9: Distillateur a diffusion[3].

### c).Description du système couple distillateur hot box -capteur :

Dans cette installation le distillateur plan est remplacé par un distillateur hot box. Ce type de distillateur est constitué d'un bac en fibre de verre, la partie supérieure du bac est surmontée par deux vitres ordinaires formant un toit en V inverse, inclinées par rapport à l'horizontale et fixées aux rebords du bac par de la mastic silicone, qui assure l'étanchéité extérieure et intérieure du distillateur.

Le capteur a été étudié précédemment notre intérêt portera dans cette partie uniquement sur le distillateur hot box [17].

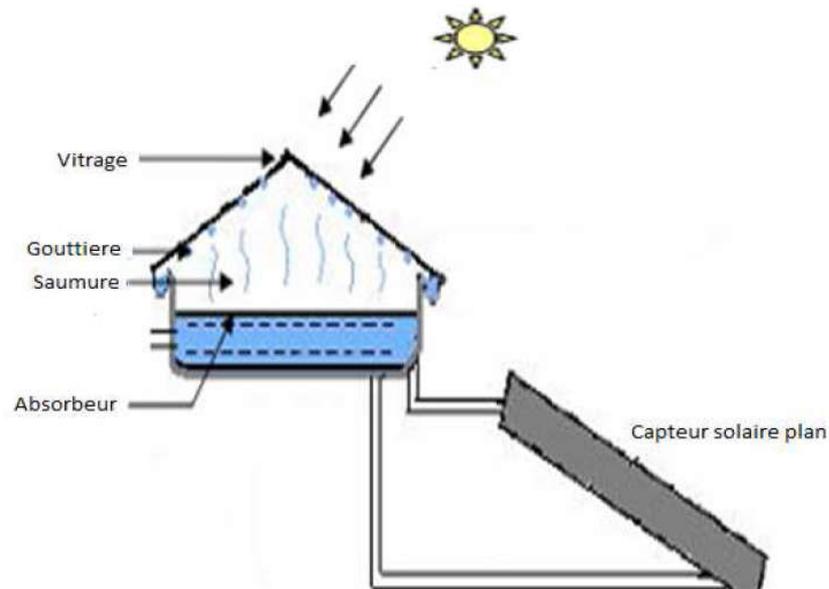


Figure 1.10: Distillateur hot box -capteur [17].

### d).Distillateur solaire à multiple bassin associé à un capteur solaire plan :

Tiwari [18] a étudié l'effet du distillateur solaire à double bassins avec de l'eau qui s'écoule sur la couverture en verre et utilisant un capteur plan pour fournir de l'eau chaude au bassin inférieur. Il a constaté que l'utilisation d'un capteur plan donne un rendement plus élevé de 50% qu'un distillateur solaire normal et à double effets. Il a également observé que le rendement du distillateur reste élevé malgré la déconnexion du capteur pendant les heures non ensoleillées ce qui permet d'éviter les pertes de chaleur à travers le capteur.

Yadav [19] a réalisé un concept d'un distillateur solaire à double effets avec et sans capteur plan (thermosiphon et mode à circulation forcée). Il a conclu que la performance du système en mode à circulation forcée est légèrement meilleure que celle à thermosiphon. Il a également suggéré d'utiliser le mode à thermosiphon dans les endroits où l'électricité n'est pas disponible.

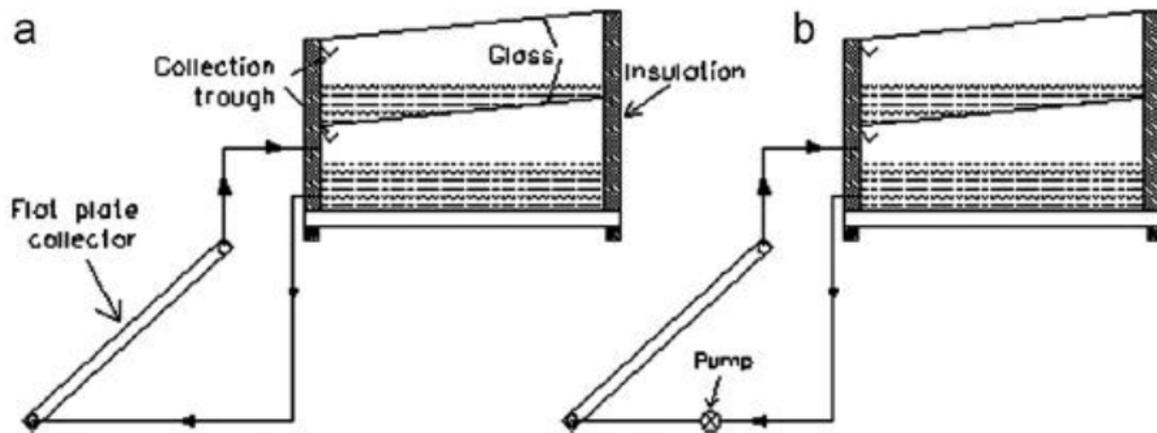


Figure 1.11 : Distillateur solaire type actif, couplé à un capteur par mode de circulation :  
a) à thermosiphon  
b) à circulation forcée [19].

Tiwari et Lawrence[20] ont effectué une étude thermique sur un distillateur solaire à double effets, muni d'un capteur plan extérieur. Dans cette étude, l'eau du bassin supérieur est en écoulement au lieu d'être stagnée en masse énorme d'eau. Il en résulte une augmentation des taux d'évaporation qui fait augmenter le rayonnement entrant dans le bassin inférieur. Le rendement journalier augmente avec la diminution du débit d'eau dans le bassin supérieur.

Kumar et Tiwari [21] ont étudié la performance du rendement journalier d'un système de distillation active à double effets avec de l'eau en écoulement. Ils ont obtenu un rendement élevé de  $3,34 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  dans le bassin inférieur à midi, en raison de la température de l'eau remarquablement élevée à cette heure ( $95^\circ \text{C}$ ). Avec la diminution des masses d'eau dans le bassin inférieur, la température de l'eau d'exploitation est améliorée, ce qui fait augmenter le rendement et l'efficacité. Le rendement journalier augmente avec l'augmentation de la surface des capteurs, ce qui engendre une augmentation de l'énergie thermique dans le bassin. D'autres travaux ont conclu que l'intégration d'un capteur plan au distillateur solaire à double effets avec un débit d'eau circulant sur la couverture en verre de bassin supérieur produit un maximum de distillat [22].

Le distillateur solaire fonctionnant en mode à double effet sans capteur plan n'améliore pas de manière significative la production journalière à cause des difficultés, raisonnables, dues au maintien d'un débit d'eau faible et uniforme sur la couverture en verre ( $10 \text{ ml / min}$ ). Al Baharna et al [23]. Ont présenté une étude sur la performance d'un le distillateur solaire à triple bassins avec l'intégration d'un capteur solaire. Ils ont constaté alors que la productivité journalière a augmenté de  $10,64 \text{ kg / jour}$  à  $24,48 \text{ kg / jour}$ , lorsque le rapport de surface de l'élément chauffant était encore à l'unité malgré que la productivité journalière du distillateur solaire augmente avec l'augmentation de la surface de l'eau chauffée.

### e). Distillateur solaire à double pente avec un collecteur solaire :

L'analyse thermique, pour solaire à double pente, a été effectuée sur la base du transfert de chaleur interne et externe et l'équilibrage énergétique équations pour prédire sa performance. Selon l'analyse thermique, passive et active Des cloches solaires ont été installées (solaire encore et solaire encore intégré au collecteur solaire plat) pour utiliser le dessalement solaire Technologie pour la production d'eau douce.

La température de l'eau ainsi que les températures internes et externes du verre La couverture, ajoutée à la température ambiante a été mesurée avec des intervalles d'heure, dans toutes les conditions expérimentales, pour les deux Alambics solaires.

La performance des deux alambics solaires a été étudiée en fonction de la variation de la profondeur de saumure du bassin et de la couverture en verre Épaisseur dans les conditions d'application du refroidissement du couvercle en verre (tactique de flash) ou sans refroidissement du couvercle. Performance de Les alambics solaires ont été évalués en termes de températures enregistrées, d'efficacité thermique instantanée et interne et La productivité du système.

Les résultats expérimentaux révèlent que l'énergie solaire active maximise à la fois l'eau douce Productivité ( $10,06 \text{ l} / \text{m}^2 \cdot \text{jour}$ ) ainsi que l'efficacité thermique interne (80,6%) par rapport à l'énergie solaire passive ( $7.8 \text{ l} / \text{m}^2$ . Productivité journalière et 57.1% d'efficacité interne) dans des conditions de 1 cm de profondeur de saumure et Épaisseur du couvercle de verre de 3 mm et application du flash tactique de refroidissement avec 5 minutes et 5 minutes de marche [24].



Figure 1.12: Distillateur solaire à double pente avec un collecteur solaire [24].

### f). Distillateur solaire d'un double bassin avec des tubes vide :

Dans cette recherche, des tentatives sont faites pour faire encore un double bassin solaire. La taille du bassin inférieur utilisé est de 1006 mm • 325 mm • 380 mm et le bassin extérieur est 1006 mm • 536 mm • 100 mm. Le gravier de granit noir est utilisé pour augmenter la production de distillat par en réduisant la quantité d'eau saumâtre ou salée dans les deux bassins. Plusieurs expériences ont été menées pour déterminer la performance d'un solaire encore dans les conditions climatiques de Mehsana (latitude de 23°59' et longitude de 72°38'), Gujarat. Ici, trois conditions utilisées pour déterminer la performance de double vasque solaire encore comme double vasque solaire tout seul, double vasque solaire encore avec noir.

Gravier en granit, double vasque solaire encore avec tubes à vide et double vasque solaire encore avec aspirateur Tubes et gravier en granit noir. Les résultats expérimentaux et la comparaison avec d'autres chercheurs montrent.

Que la production quotidienne de distillat augmente en couplant les tubes à vide et en couplant des tubes à vide et gravier de granit noir à 56% et 65% respectivement [25].



Figure 1.13: Distillateur solaire d'un double bassin avec des tubes vide [25].

### 1.3.3 Distillateur solaire avec condensation séparé :

#### a). Distillateur solaire à deux effets :

Dans un distillateur solaire conventionnel à simple effet, la surface intérieure de la couverture en verre n'est disposée que pour la condensation et la différence de température à travers l'épaisseur de la vitre est très faible. Par conséquent, le taux de condensation est faible. Ceci rend le distillateur inefficace et c'est ainsi que le taux de condensation peut être augmenté en fournissant un condenseur supplémentaire. Du fait que la fourniture d'une surface supplémentaire de condensation permet l'augmentation de la capacité thermique de la zone d'évaporation, qui est due à l'augmentation de la chaleur latente de condensation utilisée par l'eau dans le bassin supérieur au niveau de la zone considérée.

Fath[26] a étudié la performance d'une unité de distillation solaire à double effets, dans laquelle la vapeur venant à partir du premier effet (1<sup>er</sup> bassin) est purgée dans le second effet (second bassin) puisque le second effet de la couverture à ailettes à une surface extérieure pour la maintenir au niveau de la température ambiante, et une surface intérieure réfléchissante pour minimiser les pertes par rayonnement. La productivité 39 Journalière observée est de  $10.7\text{kg/m}^2/\text{j}$ , et ce pour les conditions climatiques de la ville de Dhahran, en Arabie Saoudite.

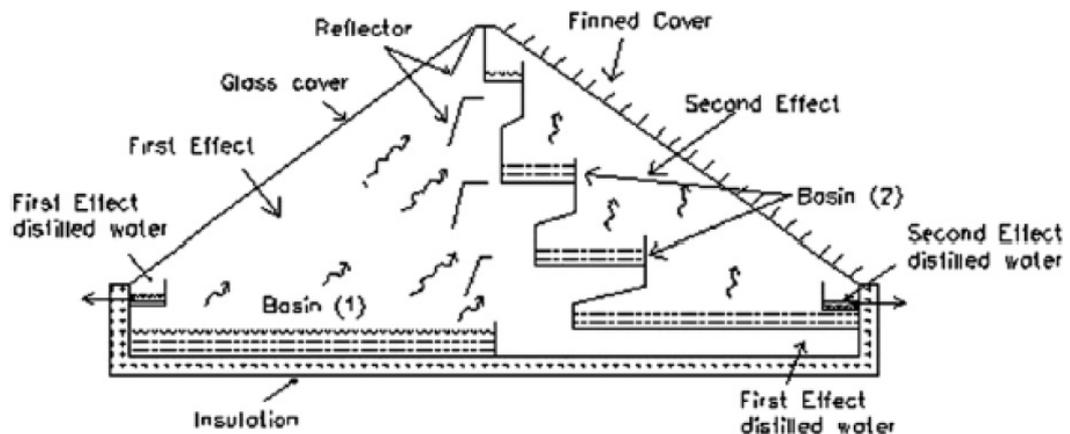


Figure 1.14 : diagramme schématique d'un distillateur solaire avec deux effets [26].

### b). Distillateur solaire avec condenseur séparé :

Une étude de modélisation a été réalisée sur la performance d'un autre type de distillateur solaire passif, muni d'un condenseur séparé[27]. Le système dispose d'un bassin (1) dans la chambre d'évaporation et deux autres bassins (2 et 3) dans la chambre de condensation, en plus d'une couverture en verre placée au-dessus du bassin d'évaporation et une couverture de condensation opaque sur le bassin (3).

La partie supérieure de la couverture de condensation a été protégée du rayonnement solaire pour garder la couverture relativement humide.

La vapeur d'eau du premier effet se condense sous la couverture en verre tandis que le reste s'écoule dans le condenseur, par purge et diffusion, et ensuite se condense en doubleur dans le bassin (2) par récupération. Les résultats obtenus montrent que la productivité du distillat de ce type de distillateur solaire est de 62% plus élevée que celle issue d'un distillateur solaire conventionnel classique.

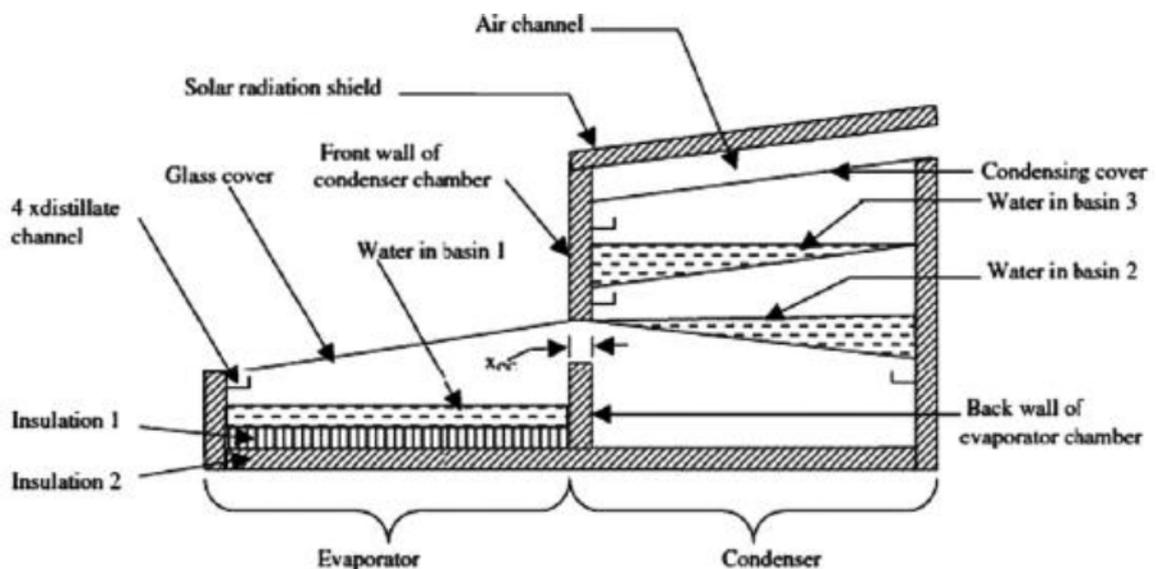


Figure 1.15: Distillateur solaire avec condenseur séparé[27].

### c). Distillateur solaire à cascade avec réflecteurs et condenseur externe :

Une étude expérimentale d'un solaire à gradins avec des réflecteurs (internes et externes) et un condenseur externe a été conduite par **El-Samadony et al.** Dans leur étude, la largeur du plateau est égale à la largeur du pas (100 mm). Une comparaison entre le solaire photovoltaïque modifié et le sol solaire a été réalisée pour évaluer la performance du système de dessalement développé dans les mêmes conditions climatiques.

Un ventilateur d'aspiration a été relié à l'arrière étagé du dessus du dos pour retirer la vapeur d'eau et la transmettre dans un condenseur. Le diagramme schématisé du capteur solaire à gradins avec réflecteurs et condenseur externe est montré à la Fig. 1.16. Ils ont indiqué que l'intégration d'un condenseur externe à un gradin améliorerait encore sa productivité. Au cours des expérimentations, la productivité de l'étape avec condenseur

était d'environ 66% supérieure à celle de l'appareil classique. De plus, les résultats ont montré que l'installation de réflecteurs intérieurs et extérieurs (haut et bas) conduit à une augmentation de la température du verre (environ  $9^{\circ}\text{C}$  par rapport à la température conventionnelle) et augmente ainsi la résistance à la condensation. En outre, la température de l'eau salée de l'étape encore était plus élevée que celle de la conventionnelle encore d'environ  $16^{\circ}\text{C}$ . Donc, lorsque les deux réflecteurs et le condenseur externe ont été utilisés, la productivité de l'eau de l'étagement est augmentée d'environ 165% par rapport à la température conventionnelle[28].

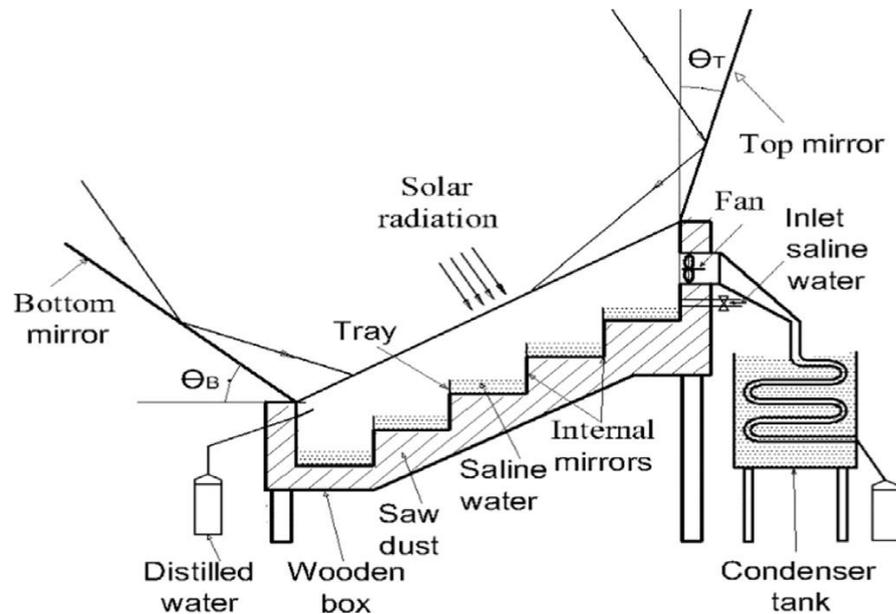


Figure 1.16 : Distillateur solaire à cascade avec réflecteur et condenseur externe[28].

### d). Distillateur solaire couplé à un condenseur :

La performance thermique d'un solaire à pente unique (SS) intégrée avec un condenseur alimenté en eau refroidie à partir d'un système de refroidissement porteur d'évaporation dans des conditions climatiques chaudes et humides a été étudiée et analysée par Emad, Fig. 1.17.

Il a constaté que la productivité quotidienne moyenne de l'eau distillée pour le solaire à pente unique encore raccordée à un condenseur était passée de  $5,94$  à  $9,23 \text{ l} / \text{m}^2$ , ce qui donnait un taux croissant de 55,41%. En outre, l'utilisation d'un condenseur avec le solaire a encore entraîné une augmentation de l'efficacité volumétrique de 30,1% par rapport à l'énergie solaire encore sans condenseur[29].



Figure 1.17 : Distillateur solaire couplé à un condenseur[29].

### e). Distillateur solaire couplé avec capteur plan et condenseur :

Dans cette étude, **Kabeel et al.** a conduit des modifications expérimentales dans le solaire classique pour améliorer encore la productivité de l'eau distillée. Une photographie de l'installation expérimentale est représentée sur la Fig.1.18. Ils ont étudié les effets de l'utilisation de différents types de nanoparticules sur les performances de l'énergie solaire encore. Ils ont examiné les nanoparticules de cuivre et d'oxydes d'aluminium.

Les expériences ont été réalisées avec différentes concentrations de fraction pondérale de nanoparticules dans l'eau du bassin avec et sans apport de vide. La recherche a été conduite pour une gamme de concentrations allant de 0,02% à 0,2% avec une étape de 0,02%. Les résultats ont montré que l'utilisation de nanoparticules d'oxyde cuivreux augmentait la productivité distillée d'environ 133,64% et 93,87% respectivement avec et sans fonctionnement du ventilateur. D'autre part, l'utilisation de nanoparticules d'oxyde d'aluminium a amélioré le distillat par 125,0% et 88,97% avec et sans actionnement respectivement du ventilateur par rapport à l'allumage classique[30].



Figure 1.18: Photographie du dispositif expérimental [30].

### **1.4 Les avantages et les inconvénients des distillateurs solaires :**

#### **1.4.1 Les avantages :**

- ✓ Une technique facile, à petite échelle, et rentable pour fournir l'eau potable dans les maisons ou dans les petites communautés.
- ✓ La production d'eau distillée.
- ✓ La simplicité dans la conception.
- ✓ Aucune pièce mobile (pompes, moteurs, etc.) sont tenus de faire fonctionner l'unité en mode passif de l'opération.
- ✓ Pas de sources conventionnelles d'énergie sont nécessaires, qui contribue à réduire la pollution de l'environnement car elle nécessite uniquement l'énergie solaire, qui est renouvelable et non polluante.
- ✓ Aucun opérateur qualifié n'est nécessaire pour le fonctionnement et l'entretien.
- ✓ Fabrication locale / réparation est possible.
- ✓ Purification de l'eau très salée (même l'eau de mer).
- ✓ L'élimination efficace des agents pathogènes et de produits chimiques réduit les risques de problèmes de santé associés aux maladies d'origine hydrique.

#### **1.4.2 Les inconvénients :**

Toutefois, un distillateur solaire a quelques inconvénients, qui limitent parfois l'utilisation de cette technique à grande échelle de production ; à savoir :

- ✓ La vulnérabilité aux dommages dus aux conditions météorologiques.
- ✓ Faible rendement.
- ✓ Une technologie moins demandée aux marchés.
- ✓ Le faible taux d'intérêt des fabricants.
- ✓ La surface d'absorption est en permanence horizontale au lieu de continuellement face aux rayons du soleil pour la récolte optimale.
- ✓ La surface de condensation est également celle à travers laquelle les rayons du soleil incidents passent. Cette surface est plus ou moins chaude, car il absorbe le rayonnement solaire.
- ✓ Une faible efficacité [31]

Un moyen efficace de surmonter ces deux dernières inconvénients consiste à séparer la chambre de condensation à la chambre d'évaporation, la zone d'évaporation peut être agrandie pour augmenter le rendement de distillation. La productivité de ce type de distillateur solaire est augmentée par rapport à l'autre distillateur.

**CHAPITRE 2**  
**MODELISATION**  
**MATHEMATIQUE**

### 2. Modélisation mathématique de distillateur solaire simple couplée avec chambre de condensation à l'arrière et capteur plan à l'avant:

Avant d'écrire le bilan thermique, on doit tenir les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ La couverture est propre.
- ✓ La température de chaque composant est uniforme.
- ✓ Le soleil est assimilé à un corps noir.
- ✓ La chaleur perdue par addition d'eau d'appoint est supposée négligeable.
- ✓ Les parois latérales sont supposées adiabatiques.
- ✓ Les propriétés physiques (ex :  $L$ ,  $L'$ ,  $H$  ...) et thermo-physiques (ex :  $C_p$ ,  $\lambda$  ...) des matériaux sont considérées constantes.
  - La condensation se fait sur la couverture et sur les faces du condensateur (il n'y a pas de condensation sur les parois latérales).
  - La concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse à partir de et vers la saumure.
  - La condensation de l'eau sur la couverture et sur la face du condensateur est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité).
  - Le bassin est étanche.
  - Le mélange air-vapeur présente une température uniforme moyenne  $T_m$ .
  - Volume de la plaque est très supérieur du volume de l'eau de refroidissement  $V_p \gg V_E$ .

2.1. Modélisation mathématique d'un distillateur simple avec chambre de condensation :

2.1.1. Bilan thermique en régime transitoire

Les différents échanges de chaleur produisent dans un distillateur solaire simple avec chambre de condensation est illustré par la figure (2.1).

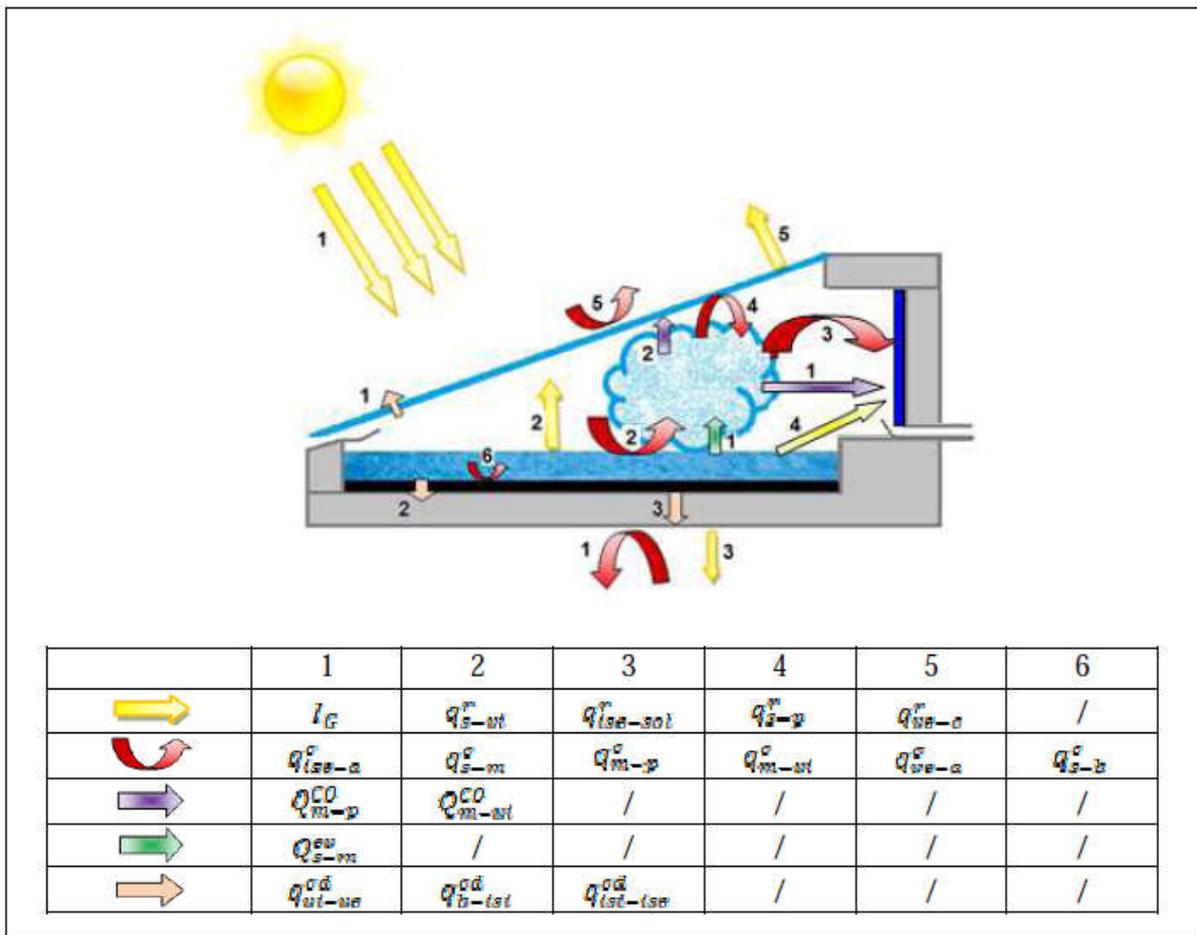


Figure 2.1 : Représentation des flux de chaleur dans notre distillateur.

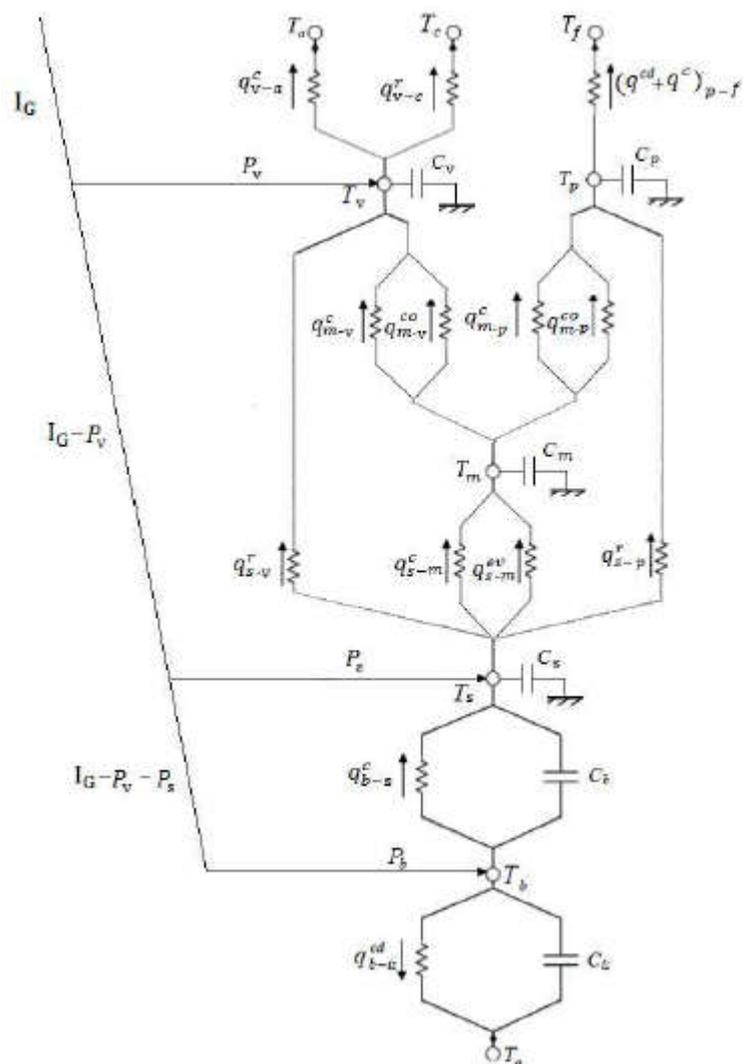


Figure 2.2 : Diagramme du flux d'énergie d'un distillateur solaire simple avec chambre De condensation.

En utilisant une analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques (tableau 2.1, figure 2.2) pour la simplification de la compréhension.

Tableau 2.1 Analogie entre les grandeurs thermiques et grandeurs électriques

Grandeur thermique	Grandeur électrique
Température	Potentiel électrique
Flux thermique	Courant électrique
Résistance thermique	Résistance électrique
Capacité thermique	Capacité électrique

Considérons une section quelconque du système à l'instant  $t$ , soit  $i$  l'un des milieux représentés dans cette section,  $M_i$  sa masse,  $C_p$  sa chaleur spécifique et  $T_i$  sa température.

Le bilan au nœud  $i$  donne :

$$M_i * C_p * \frac{dT_i}{dt} = \sum_{i=1}^n q_i + p_i \quad (2.1)$$

Avec :

➤  $P_i$ : terme de source.

$$M_i * C_p * \frac{dT_i}{dt} = 0 \quad \text{dans les cas suivants :}$$

- Un distillateur à inertie thermique négligeable (faible masse de ses éléments, ou faible chaleur spécifique) ;
- Pour un régime permanent.

Notre modèle est fondé sur cinq bilans thermiques.

### 2.1.2. Bilan thermique de la vitre :

#### ❖ Face extérieure :

La face extérieure de la vitre reçoit un flux de chaleur par conduction de la face intérieure ( $q_{cd-v\theta}^{vi} * A_v$ ) et cède au milieu extérieur un flux de chaleur par rayonnement ( $q_{v\theta-a}^r * A_v$ ) et par convection naturelle ( $q_{v\theta-a}^c * A_v$ ) (Figure 2.3).

$$\frac{M_v * c_p v}{2} * \frac{dt_{v\sigma}}{dt} + q_{v\sigma-a}^c * A_v + q_{v\sigma-c}^r * A_v = q_{vi-v\sigma}^{cd} * A_v \quad (2.2)$$

$$\rightarrow \frac{p_v * c_p v}{2} * \frac{dt_{v\sigma}}{dt} + \frac{h_{vg-a}^c}{\epsilon v} (T_{v\sigma} - T_a) + \frac{h_{vg-c}^r}{\epsilon v} (T_{v\sigma} - T_c) = \frac{\lambda_v}{\epsilon v} * (T_{vl} - T_{v\sigma}) \quad (2.3)$$

#### ❖ Face intérieure :

La face intérieure de la vitre reçoit du mélange les flux de chaleur par convection naturelle ( $q_{m-vi}^c * A_v$ ), et par conduction de la vapeur d'eau ( $Q_{m-vi}^{co}$ ) ainsi qu'un flux de chaleur par rayonnement de la saumure ( $q_{\delta-vi}^r * A_v$ ) et cède un flux de chaleur par conduction ( $q_{vi-v\theta}^{cd} * A_v$ ) à la vitre extérieure.

$$\frac{M_v * c_p v}{2} * \frac{dt_{vt}}{dt} + q_{vi-v\theta}^{cd} * A_v = q_{ui-vl}^c * A_v + q_{s-vl}^r * A_v + Q_{\pi i-vi}^{co} + p_v * A_v \quad (2.4)$$

$$\rightarrow \frac{p_v * c_p v}{2} * \frac{dt_{v\sigma}}{dt} + \frac{h_{vg-a}^c}{\epsilon v} (T_{v\sigma} - T_a) + \frac{h_{vg-c}^r}{\epsilon v} (T_{v\sigma} - T_c) = \frac{\lambda_v}{\epsilon v} * (T_{vl} - T_{v\sigma}) \quad (2.5)$$

Avec :

$$V_v = L_v * L'_v * e_v(2.6)$$

**Remarque :**

Dans le terme d'accumulation dans l'équation (2.2 et 2.4), on a divisé sur 2 pour raison que la somme des 2 termes engendre l'accumulation total de la vitre.

**2.1.3. Bilan thermique de mélange air-vapeur :**

Le mélange (air-vapeur) reçoit de la saumure un flux de chaleur par convection ( $q_{s-m}^c * A_s$ ) et par évaporation ( $Q_{s-m}^{ev}$ ), et cède un flux par convection ( $q_{p-m}^c * A_p$ ) et par condensation ( $Q_{m-p}^{co}$ ) vers l'échangeur de chaleur et un autre flux aussi par convection ( $q_{m-vi}^c * A_v$ ) et condensation ( $Q_{m-vi}^{co}$ ) à la face intérieure de la vitre.

$$M_m * cp_m * \frac{\partial T_m}{\partial t} = q_{s-m}^c * A_s + Q_{s-m}^{ev} - q_{m-p}^c * A_p - Q_{m-p}^{co} - q_{m-vi}^c * A_v - Q_{m-vi}^{co} \quad (2.7)$$

$$\rightarrow M_m * cp_m * \frac{\partial T_m}{\partial t} = h_{s-m}^c * A_s * (T_s - T_m) + m_{s-m}^{ev} * LV - h_{m-p}^c * A_p * (T_m - T_p) - m_{m-p}^{co} \quad (2.8)$$

$$\rightarrow p_m * cp_m * \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{h_{s-m}^c * A_s}{V_m(T_s - T_m)} + \frac{m_{s-m}^{ev} * LV}{V_m} - \frac{h_{m-p}^c * A_p}{V_m} * (T_m - T_p) - \frac{m_{m-p}^{co} * LV}{V_m} \quad (2.9)$$

On note que :

$$V_m = V_t = V_{sv} + (V_{co} - V_p)(2.10)$$

Avec :

$$V_{ev} = H_{ev} * L_{ev} * L'_{ev} \text{ et } H_{ev} = \frac{H_{ev1} + H_{ev2}}{2} \quad (2.11)$$

$$V_{co} = (L_{co} * L'_{co} * H_{co}) \quad (2.12)$$

$$V_p = H_p * L_p * e_p \quad (2.13)$$

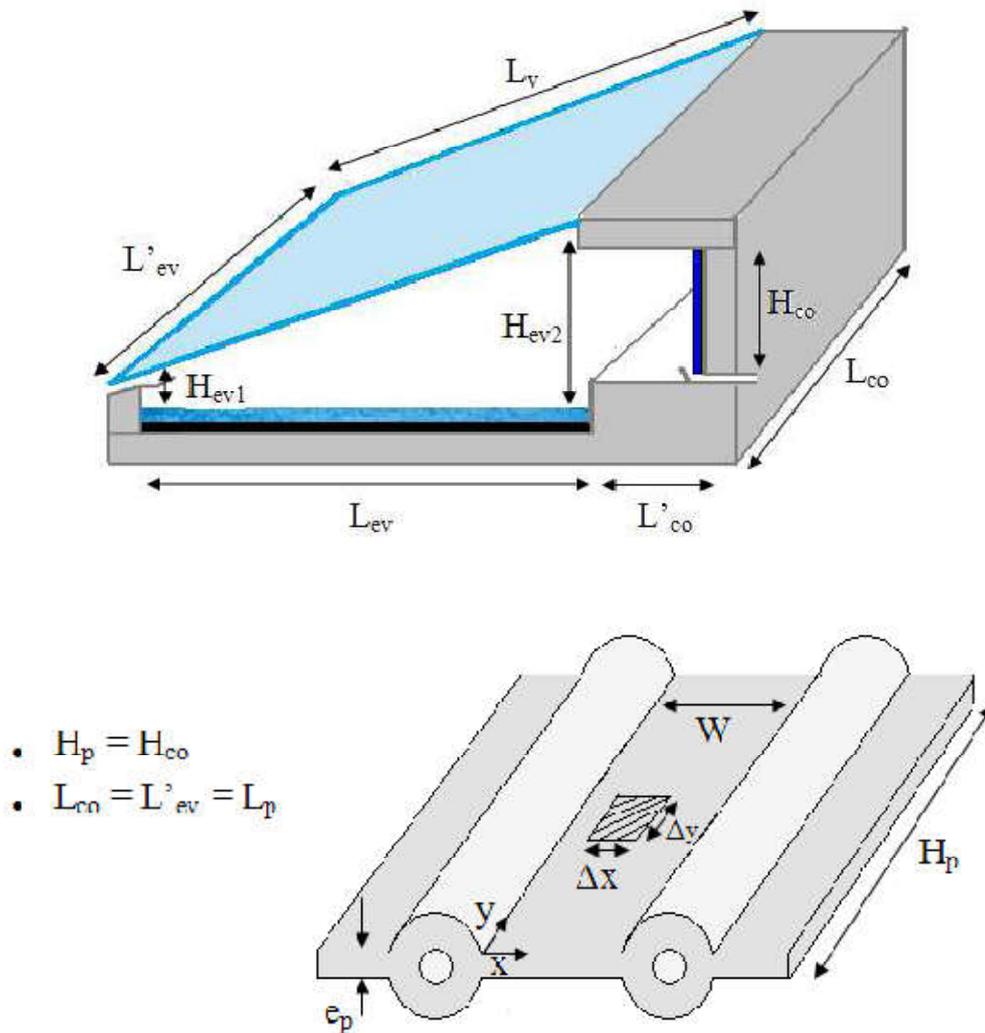


Figure 2.3 : représentation des dimensions de notre type distillateur [32].

❖ **Calcul des débits massiques d'évaporation et de condensation :**

Le gradient de température entre la saumure et les surfaces de condensation (la face intérieure de la vitre et les deux faces de la plaque du radiateur) est responsable de l'existence des gradients de pression de vapeur d'eau partielle dans les couches limites près de l'évaporation et de surfaces de condensation. Ces gradients de pression sont les potentiels de conduite pour le taux de transfert de masse de l'évaporation à la surface de condensation.

L'humidité relative du mélange air-vapeur à la température  $T_m$  est prise constante et égale à l'unité. Le taux de masse de condensation est toujours égale à l'évaporation celui-ci donne :

$$m_{s-m}^{ev} = m_{m-p}^{co} + m_{m-vi}^{co} \quad (2.14)$$

Avec :

$$m_{s-m}^{ev} = h_{Mev}(P_{vs}P_{vm})(2.15)$$

$$m_{m-p}^{co} = h_{Mc}(P_{vm}P_{vp})(2.16)$$

$$m_{m-vi}^{co} = m_{s-m}^{ev} - m_{m-p}^{co}(2.17)$$

Où  $h_{Mev}$  et  $h_{Mc}$  sont, respectivement, le coefficient de transfert de masse à la face d'évaporation et coefficient de transfert de masse à la face de condensation de l'échangeur de chaleur. Les expressions de ces coefficients, à la suite de Njomo et al., Tchinda [29].

Les quantités  $P_{vm}$ ,  $P_{vp}$ ,  $P_{vs}$  sont les pressions partielles de vapeur d'eau de mélange, de l'échangeur de chaleur à plaques et de la saumure, respectivement, et peut être calculée à partir de:

$$\text{Log } 10(p_v) = 17.443 - \frac{1795}{T} - 3.868 \log_{10} T(2.18)$$

#### 2.1.4. Bilan thermique de la saumure :

La saumure reçoit de l'absorber un flux de chaleur par convection naturelle ( $q_{b-s}^c * A_s$ ) et de l'extérieure un flux par rayonnement ( $p_s * A_s$ ), et cède un flux de chaleur par évaporation ( $Q_{s-m}^{ev}$ ) et par convection naturelle ( $q_{s-m}^c * A_s$ ) aux mélange air-vapeur ainsi qu'un flux par rayonnement aux surfaces de condensation (la face intérieure de la vitre ( $q_{s-vi}^r * A_s$ ) et l'échangeur de chaleur ( $q(s-p)^r * A_s$ )).

$$M_s * CP_s * \frac{dt_s}{dt} + q_{s-m}^c * A_s + Q_{s-m}^{ev} + q_{s-vi}^r * A_s + q_{s-p}^r * A_s$$

$$= P_s * A_s + q_{b-s}^c * A_s(2.19)$$

$$\rightarrow p_s * CP_s * \frac{dt_s}{dt} + \frac{h_{s-m}^c}{e_s} (T_s - T_m) + \frac{m_{s-m}^{ev} * L_s}{v_s} + \frac{h_{s-vi}^r}{e_s} (T_s - T_{vi}) + \frac{h_{s-p}^r}{e_s} (T_s - T_p)$$

$$= \frac{P_s}{e_s} + \frac{h_{b-s}^c}{e_s}(2.20)$$

**2.1.5. Bilan thermique de l'absorbeur :**

L'absorbeur reçoit de l'extérieure un flux de chaleur par rayonnement ( $P_b * A_b$ ), et cède un flux par conduction vers l'isolant ( $q_{b-bci}^{cd} * A_b$ ) et par convection naturelle vers la saumure ( $q_{b-s}^c * A_b$ ).

$$M_b * CP_b * \frac{dt_b}{dt} + q_{b-s}^c * A_b + q_{b-ici}^{cd} * A_b = P_b * A_b \quad (2.21)$$

$$\rightarrow p_b * CP_b * \frac{dt_b}{dt} + \frac{h_{b-s}^c}{e_b} (T_b - T_s) + \frac{\lambda_b}{e_b^2} (T_s - T_{ici}) = \frac{P_b}{e_b} \quad (2.22)$$

**2.1.6. Bilan thermique de l'isolant :**

❖ **Face intérieure :**

la face intérieure de l'isolant reçoit un flux de chaleur par conduction de l'absorber ( $q_{b-isi}^{cd} * A_{is}$ ), et cède un flux par conduction de la face extérieure ( $q_{isi-ise}^{cd} * A_{is}$ ).

$$\frac{M_{is} * cp_{is}}{2} * \frac{dT_{isi}}{dt} + q_{isi-ise}^{cd} * A_s = q_{b-isi}^{cd} * A_s \quad (2.23)$$

$$\rightarrow \frac{P_{is} * cp_{is}}{2} * \frac{dT_{isi}}{dt} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}^2} * (T_{isi} - T_{ise}) = \frac{\lambda_b}{e_{is}^2} (T_b - T_{isi}) \quad (2.24)$$

❖ **Face extérieure :**

La face extérieure de l'isolant reçoit un flux de chaleur par conduction de la face intérieure ( $q_{isi-ise}^{cd} * A_{is}$ ), et cède un flux par convection naturelle vers le milieu ambiant ( $q_{is-a}^c * A_{is}$ ) et par rayonnement vers le sol ( $q_{is-sol}^r * A_{is}$ ).

$$\frac{M_{is} * cp_{is}}{2} * \frac{dT_{ise}}{dt} + q_{is-a}^c * A_{is} + q_{is-sol}^r A_{is} = q_{isi-ise}^{cd} * A_s \quad (2.25)$$

$$\frac{P_{is} * cp_{is}}{2} * \frac{dT_{ise}}{dt} + \frac{h_{is-a}^c}{e_{is}^2} * (T_{ise} - T_a) + \frac{h_{is-sol}^r}{e_{is}} (T_{ise} - T_{sol}) = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}^2} (T_{isi} - T_{ise}) \quad (2.26)$$

**2.1.7. Bilan thermique du condenseur (l'échangeur de chaleur) :**

**❖ La plaque :**

Elle reçoit un flux de chaleur à partir du mélange (par convection ( $q_{m-p}^c * A_p$ ) et par condensation ( $Q_{m-p}^{co}$ ) ) et de la saumure un flux par rayonnement( $2q_{s-p}^r * A_p$ ),et cède un flux par conduction vers l'eau de refroidissement( $\lambda_p \left[ \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right]$ ).

$$M_p * CP_b * \frac{\partial t_p}{\partial t} + q_{p-f}^{cd} * A_p = q_{m-p}^c * A_p + Q_{m-p}^{co} + q_{s-p}^r * A_p \quad (2.27)$$

$$p_p * CP_b * \frac{\partial t_p}{\partial t} = \lambda_p \left[ \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right] + \frac{q_{m-p}^c}{e_p} + \frac{Q_{m-p}^{co}}{V_p} + \frac{q_{s-p}^r}{e_p} \quad (2.28)$$

$$p_p * CP_b * \frac{\partial t_p}{\partial t} = \lambda_p \left[ \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right] + \frac{rh_{m-p}^c * L_v}{V_p} + \frac{rh_{m-p}^{co}}{e_p} (T_m - T_p) + \frac{rh_{s-p}^r}{e_p} (T_s - T_p) \quad (2.29)$$

Avec :

$$0 < \gamma < H_p$$

**❖ L'eau de refroidissement :**

Normalement, on fait un autre bilan sur la face intérieur de la plaque de l'échangeur (la face intérieure du tube où elle circule l'eau de refroidissement), cette dernière reçoit un flux par conduction de la plaque et cède un flux par convection vers l'eau de refroidissement.

D'après **RENE TCHINDA [33]**, pour la simplification des équations, ce bilan est Intégré avec celui de l'eau de refroidissement, et s'écrit comme suit :

$$p_f * CP_f * \frac{\partial t_f}{\partial t} = \frac{8F'B}{\pi d_1^2} [m_{m-p}^{co} * L_v + h_{s-f}^r (T_s - T_f) - h_{f-m}^c (T_f - T_m)] \quad (2.30)$$

Avec :

$$B = \pi d_2 + W$$

Le facteur F' est donné par :

$$F' = \frac{1/(w+\pi d_2)(2h_{s-f}^r+2h_{f-m}^c)}{\left[1/(2h_{s-f}^r+2h_{f-m}^c)^{(wF+\pi d_2)}\right]^{+R_f}} \quad (2.31)$$

Où l'efficacité F est calculée en utilisant la relation :

$$F = \frac{th[(w/2) \sqrt{(2h_{s-f}^r+2h_{f-m}^c)/\lambda_p e_p}]}{(w/2) \sqrt{(2h_{s-f}^r+2h_{f-m}^c)/\lambda_p e_p}} \quad (2.32)$$

Avec :

$$R_f = \frac{1}{\pi d_1 h_f} \quad (2.33)$$

## 2.2. Modélisation mathématique pour le capteur solaire :

### ❖ La face extérieure de la vitre :

$$\frac{M_v * c p_v}{2 * A_v} * = \left( \frac{p_v}{2} + h_{cd:v.i.v.e} * (T_{v.i} - T_{v.e}) - h_{r:v.e.c} * (T_e - T_c) - h_{c:ve_a} * (T_{ve} - T_a) \right) \quad (2.34)$$

### ❖ La face intérieure de la vitre :

$$\frac{M_v * c p_v}{2 * A_v} * = \left( \frac{p_v}{2} + h_{cd:v.i.v.e} * (T_{v.i} - T_{v.e}) - h_{r:P.v.i} * (T_p - T_{vi}) - h_{c:p.vi} * (T_p - T_{vi}) \right) \quad (2.35)$$

❖ Au niveau à l'absorbeur :

$$\frac{M_p * cp_p}{A_p} * = (p_p - h_{r:p_v.i} * (T_p - T_{vi}) + h_{c:p_{vi}} * (T_p - T_{vi}) + h_{cd:p_t} * (T_p - T_t) * \left(\frac{A_{j:t_p}}{A_p}\right) \quad (2.36)$$

❖ Au niveau de tube :

$$\frac{M_t * cp_t}{A_t} * = (-h_{c:ft} * (T_t - T_f) * \left(\frac{A_f}{S_t}\right) - h_{cd:t_{iso.i}} * (T_t - T_{iso.i}) * \left(\frac{A_i}{A_t}\right) + h_{cd:p_t} * (T_p - T_t) * \left(\frac{A_{j:t_p}}{A_p}\right) \quad (2.37)$$

❖ Au niveau de fluide caloporteur :

$$\frac{G * cp_f}{A_f} * = (h_{c:ft} * (T_t - T_f) * \left(\frac{S_f}{S_t}\right) - h_{cd:t_{iso.i}} * (T_t - T_{iso.i}) + h_{cd:p_t} * (T_p - T_t)) \quad (2.38)$$

❖ La face intérieure de l'isolant :

$$\frac{M_{iso} * cp_{iso}}{2 * A_{iso}} * \left(\frac{dT_{iso.l}}{dt}\right) = (h_{cd:t_{iso.i}} * (T_t - T_{iso}) * \left(\frac{A_i}{A_t}\right) - h_{cd:iso} * (T_{iso.i} - T_{iso.e}) - h_{c:f_{iso}} * (T_f - T_{iso}) * \left(\frac{A_{if}}{A_t}\right)) \quad (2.39)$$

❖ La face extérieure de l'isolant :

$$\frac{M_{iso} * cp_{iso}}{2 * A_{iso}} * \left(\frac{dT_{iso.l}}{dt}\right) = (h_{cd:t_{iso.i}} * (T_{iso.i} - T_{iso.e}) - h_{r:iso.e_{sol}} * (T_{iso.e} - T_{sol}) + h_{c:iso.e_a} * (T_{iso.e} - T_a)) \quad (2.40)$$

- $A_{j:t_p}$  : la surface de la jonction tube - plaque .
- $A_p$  : la sur face de contacte tube fluide.
- $A_t$  : la face tube.

- $A_{if}$ : surface fictive d'écoulement d'eau sur l'isolant.

Avec :

$$A_{j:t_p} = N * \frac{\pi}{4} * d_e * l(2.41)$$

$$A_p = \pi * l * d_i(2.42)$$

$$A_t = N * \pi * d_e * l(2.43)$$

$$A_{if} = l * d_i * N \quad (2.44)$$

**CHAPITRE 3**  
**ETUDE**  
**EXPERIMENTALE**

### 3.1. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAIS :

Notre banc d'essais est composé par trois distillateurs l'un simple et l'un actif et autre actif avec une chambre de condensation réalisations c'est effectué dans l'atelier mécanique de l'unité de développement des équipements solaires.

#### 3.1.1. Description du distillateur simple :

Le distillateur simple est de type à pente unique, il est constitué à l'intérieur par une tôle galvanisée de 2 mm d'épaisseur, isolé par du polystyrène de 25 mm d'épaisseur et recouvert par un carénage en tôle laqué de 8/10 mm Le vitrage est un verre simple de 4 mm d'épaisseur, incliné à 36 °, nous disposons sur la structure de trois (03) orifices formés par des tubes galvanisés de diamètre 15/21 mm Ces orifices servent respectivement :

- La première se trouve sur le côté latéral sert au remplissage du bac en eau saumâtre.
- Le deuxième se trouve au fond et au milieu du bac, il sert à la vidange du bac.
- Le troisième se trouve à l'avant et sert à la récupération de l'eau distillée.

Des robinets d'arrêt sont installés pour permettre l'ouverture et la fermeture en cas de besoin, le vitrage est fixé sur le distillateur par de la silicone. Le fond du bassin est recouvert d'une peinture noire mat.

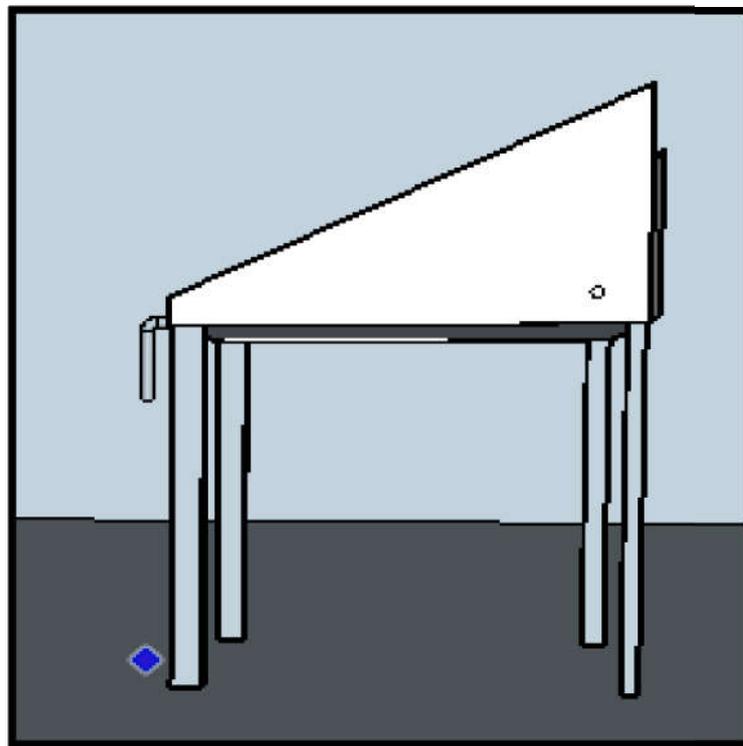


Figure 3.1 : Schéma globale du distillateur simple

**3.1.2. Description du distillateur actif :**

Il est formé d'un distillateur simple à pente unique couplé à l'avant à un capteur plan thermique.

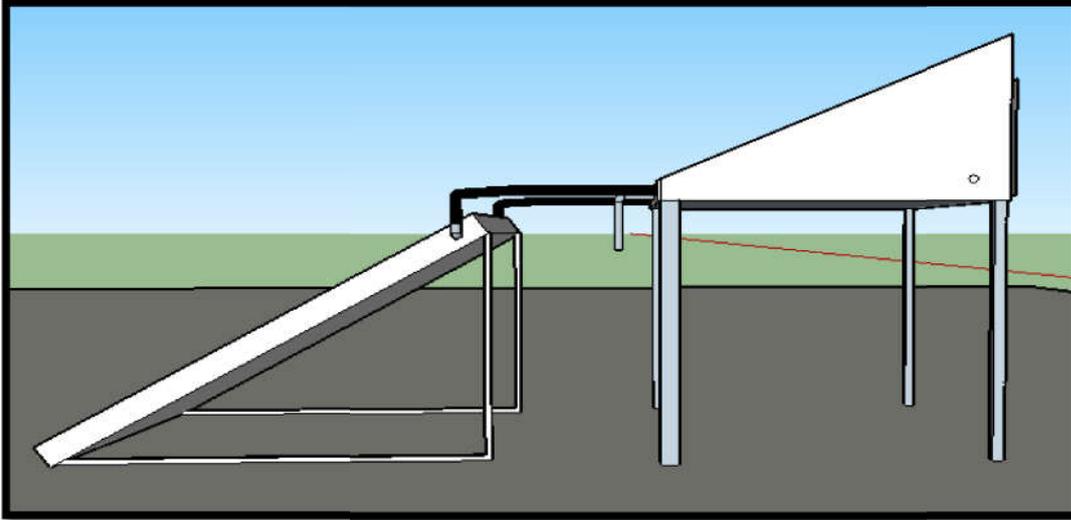


Figure 3.2 : Schéma globale du distillateur actif

**3.1.3. Description du distillateur actif avec chambre de condensation :**

Il est formé d'un distillateur simple à pente unique couplé à l'avant à un capteur plan thermique et à l'arrière d'une chambre de condensation.

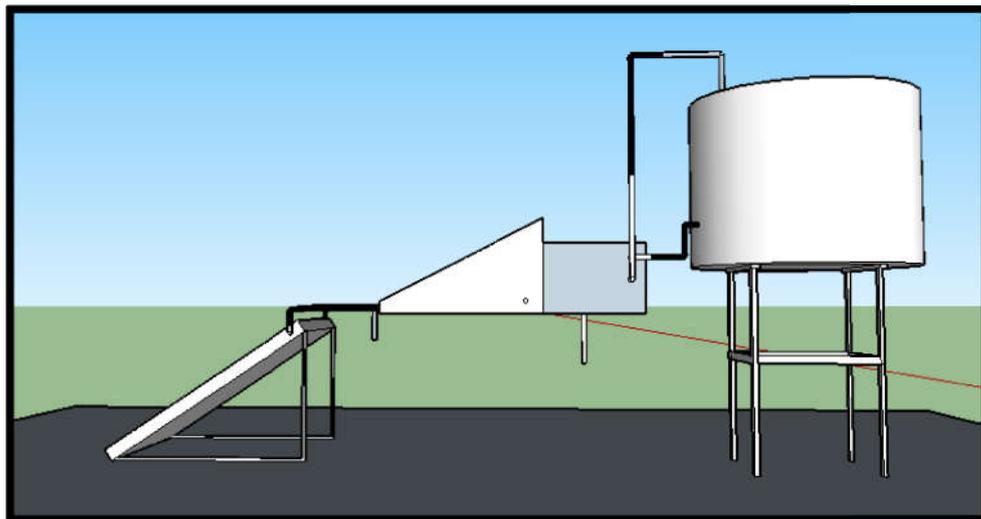


Figure 3.3 : Schéma globale du distillateur actif avec chambre de condensation

### a). Description de la chambre de condensation :

Une chambre intérieure formée en tôle galvanisée, cette chambre dispose de trois orifices en tube galvanisée de 15/21 mm, deux orifices latéraux vont servir pour l'entrée et la sortie vers l'échangeur pour l'eau de refroidissement, le troisième orifice va servir pour recueillir le distillat par le bas de la chambre.

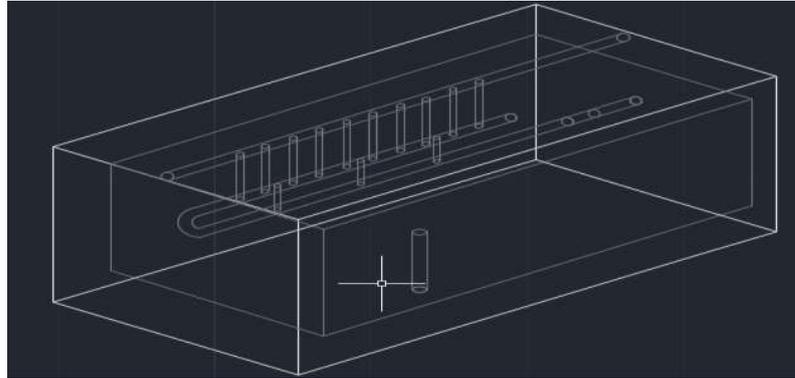


Figure 3.4: Schéma de la chambre de condensation

- **Dimensions de la chambre de condensation (voir Figure 3.4) :**  
Etant donné que la chambre est constituée par une double enveloppe séparée par une isolation en polystyrène sur les cinq faces, les dimensions de l'enveloppe externe sont respectivement :  $L=950$  mm,  $l = 425$  mm et  $H = 450$  mm, par contre celles de l'enveloppe interne sont  $L= 900$  mm,  $l = 400$  mm et  $H = 400$  mm .
- **Etapes de réalisation de la chambre de condensation :**

La découpe de la tôle noire de 2 mm, perçage des trous de 15 mm de diamètre, pliage de la tôle pour obtenir la forme de la figure 2-2, l'assemblage se fait par soudage à l'électrode enrobée. Nous avons prévu sur le fond de la chambre un orifice pour recueillir le distillat. Enfin une opération de galvanisation au niveau de l'entreprise Batimetal (fig. 3-5 – fig. 3-7) .



Figure 3.5 : Etape de réalisation (découpage)[34].



Figure 3.6 : Etape de réalisation (isolation)[34].



Figure 3.7: Etape de réalisation (carénage)[34].

- **L'échangeur de chaleur :**

Ce dispositif est installé à l'intérieur et au fond de la chambre, son rôle est d'augmenter la condensation de la vapeur d'eau grâce à sa température fraîche créée par la circulation d'eau. L'absorbeur est réalisé par des tubes en cuivre avec une entrée et sortie, ce dispositif en tube de cuivre est recouvert d'une plaque en tôle d'aluminium de 8/10 mm

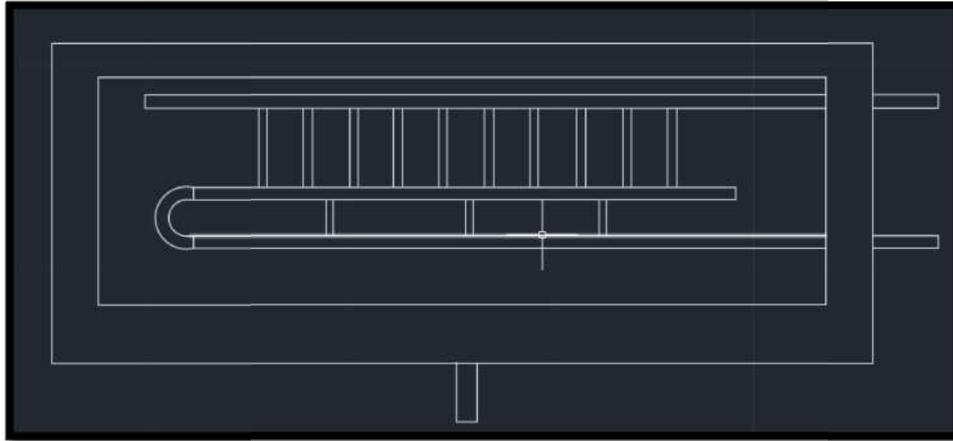


Figure 3-8 : L'absorbeur en place dans la chambre de combustion

- **Dimensions de l'échangeur de chaleur :**

Les principaux tubes composant l'entrée et la sortie sont en cuivre de  $\varnothing = 22$  mm, de longueur 750 mm, ils sont reliés par 9 tubes en cuivre de  $\varnothing = 14$  mm. La plaque absorbante en aluminium de dimensions  $L = 800$  mm et  $H = 350$  mm dispose d'ondulations pour permettre l'encastrement des tubes et d'augmenter ainsi la surface d'échange pour un meilleur échange thermique.

**b). Description du bassin distillateur :**

- **Le bassin :**

le bac du distillateur actif est réalisé en tôle noire, après la découpe aux dimensions voulus sans oublier de prévoir la fenêtre qui va s'emboîter avec la chambre de condensation fig.3-9, l'assemblage c'est fait par soudage à l'arc à l'électrode enrobé  $\varnothing 2.5$ mm (pour éviter levrillage de la tôle) et enfin la dernière étape de galvanisation.(Fig. 3.9 – Fig. 3.13).

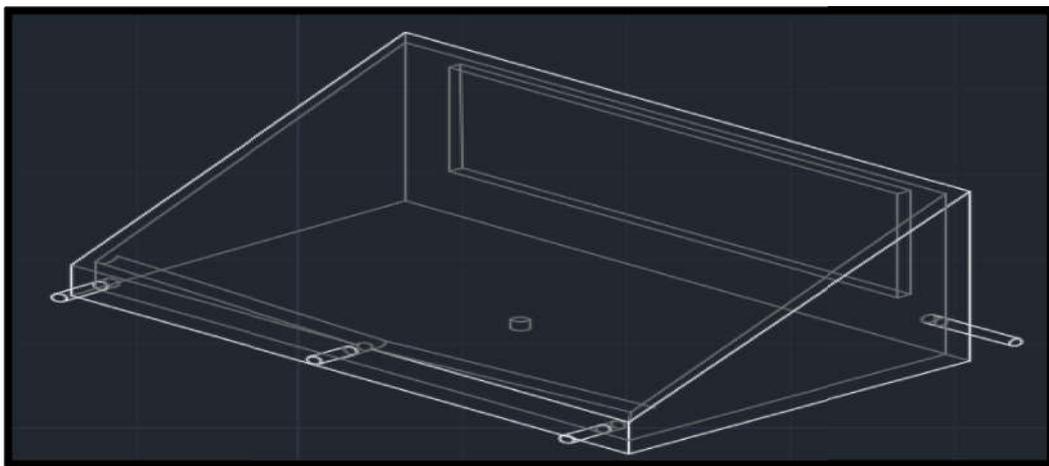


Figure 3.9 : vue en perspective du bassin du distillateur actif

- **Dimensions de bassin du distillateur actif :**

Nous avons optés au démarrage du projet a une surface du distillateur de  $0,6 \text{ m}^2$  avec une longueur  $L=1\text{m}$  et une largeur de  $l = 0,6 \text{ m}$ , l'isolation thermique est du polystyrène expansé de  $25 \text{ mm}$  d'épaisseur, nous distinguons sur le bassin 05 sorties réalisés par des tubes galvanisée de longueur  $100 \text{ mm}$ , 02 tubes sont filetés des deux côtés (installés sur la vue deface de part et d'autres), ces deux tubes sont destinés au raccordement du capteur plan. Les 03 tubes qui reste sont filetés d'un seul côté seulement, le côté fileté va recevoir un robinet d'arrêt et le côté non fileté va être soudé sur le bassin du distillateur. La fenêtre de forme rectangulaire a les dimensions de  $L= 900 \text{ mm}$  et  $l = 350 \text{ mm}$  ( fig. 3-11), une dernière opération consiste à peindre le fond du bassin par une peinture noire mate (fig.3-13).

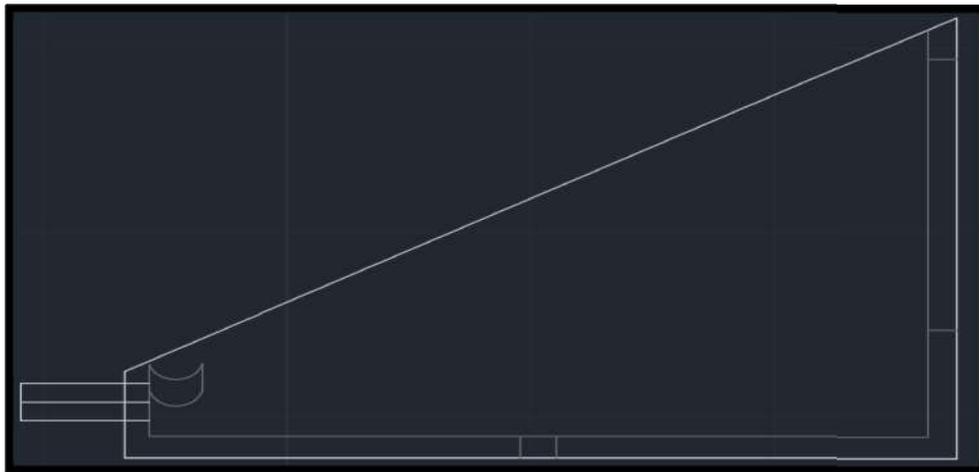


Figure 3.10 : Vue de droite du distillateur actif

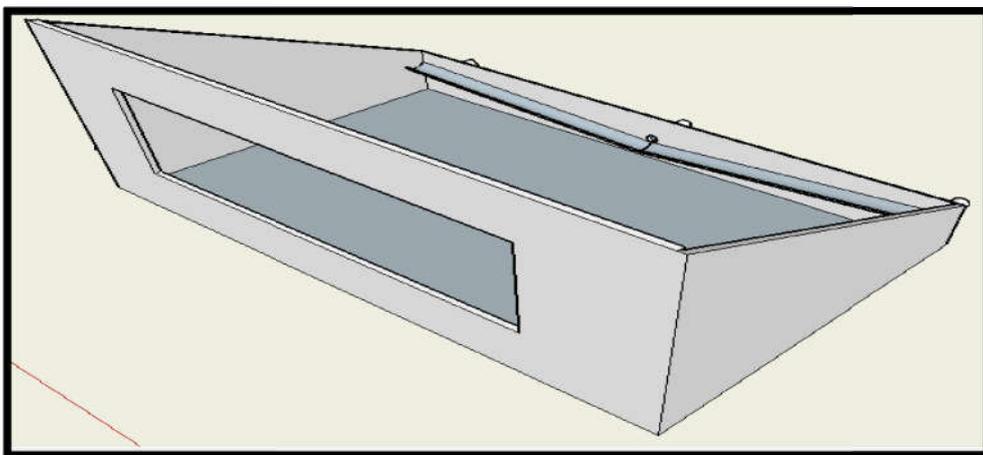


Figure 3.11 : Vue de derrière du distillateur actif



Figure 3.12 : Etape de réalisation du bassin (isolation)[34].



Figure 3.13 : Distillateur terminé avec peinture[34].

- **Description de l'échangeur installé dans le bassin :**

Dans l'installation du distillateur actif nous avons incorporés un capteur plan thermique pour faire chauffer la saumure, ce dispositif nécessite d'installer dans le bassin un échangeur qui va être raccordé au capteur plan par le biais des deux tubes galvanisés cités au départ.

L'échangeur de chaleur installé dans le bassin( fig. 3-14) (a) et (b) est réalisé par des tubes en cuivre, les deux principaux axes constituant l'entrée et sortie sont en tubes de  $\text{Ø} = 14\text{mm}$ , de longueur 120 mm pour l'entrée et 80 mm pour la sortie. Les deux tubes sont reliés par 17 tubes de cuivre de  $\text{Ø} = 10\text{ mm}$  de longueur 385 mm.

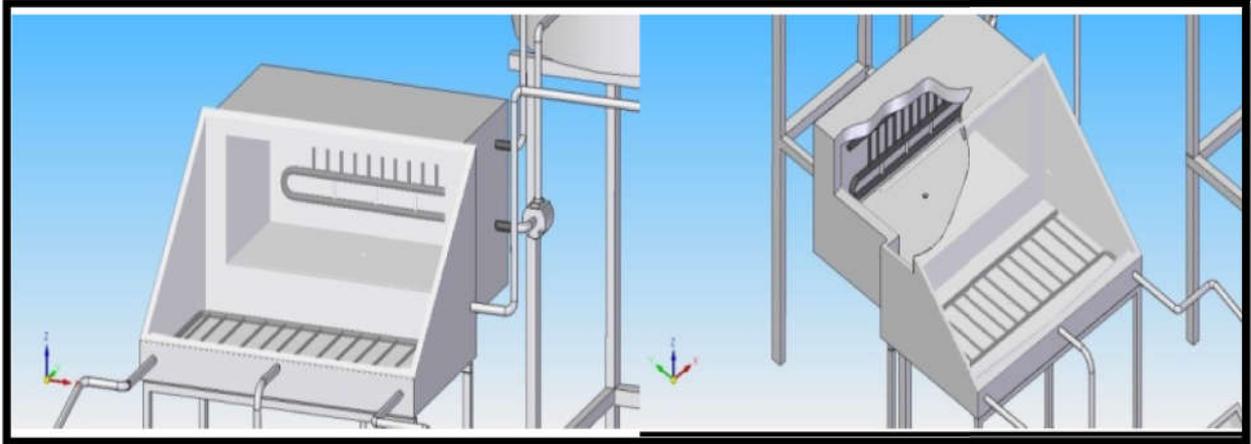


Figure 3.14 : vue en perspective du bassin du DCH



Figure 3.15 : vue l'échangeur de chaleur installé dans le bassin

- **Le vitrage du distillateur:**

Concernant la couverture en verrerie, nous avons optés pour un verre ordinaire de 4mm d'épaisseur avec les dimensions suivantes :  $L = 1050$  mm,  $l = 1040$  mm,  $e = 4$  mm. Lemontage du vitrage a été assuré par de la silicone.



Figure 3.16 : vitrage installé sur le distillateur

### c). Le capteur plan thermique :

Le capteur plan thermique qu'on incorporés dans l'installation est un capteur defabrication tunisienne sous licence grec, ces dimensions extérieurs sont suite :  $L = 1900$  mm,  $l = 920$  mm,  $e = 120$  mm L'entrée d'eau froide se fait par une entrée en bas du capteur et lasortie d'eau chaude se fait par le haut.



Figure 3.17: vue du capteur solaire thermique

#### • **Fonctionnement du capteur plan thermique :**

Le capteur solaire plan est un système thermique qui permet la conversion de l'énergiesolaire en énergie calorifique, la chaleur reçue de cette conversion est soit utilisée directement (cas de chauffage), soit elle-même convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire descycles thermodynamiques. Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet de serre quiconsiste à piéger le rayonnement solaire, ce dernier arrive au niveau de la couverture et letraverse pour atteindre une surface revêtue d'une peinture noire, appelée absorbeur.

L'absorbeur absorbe ainsi une grande partie du rayonnement solaire entraînant une augmentation de sa température .Le rayonnement réfléchi par l'absorbeur arrive sur la vitre etcomme celle-ci est opaque aux rayonnements infrarouges, le rayonnement est ainsi piégé.

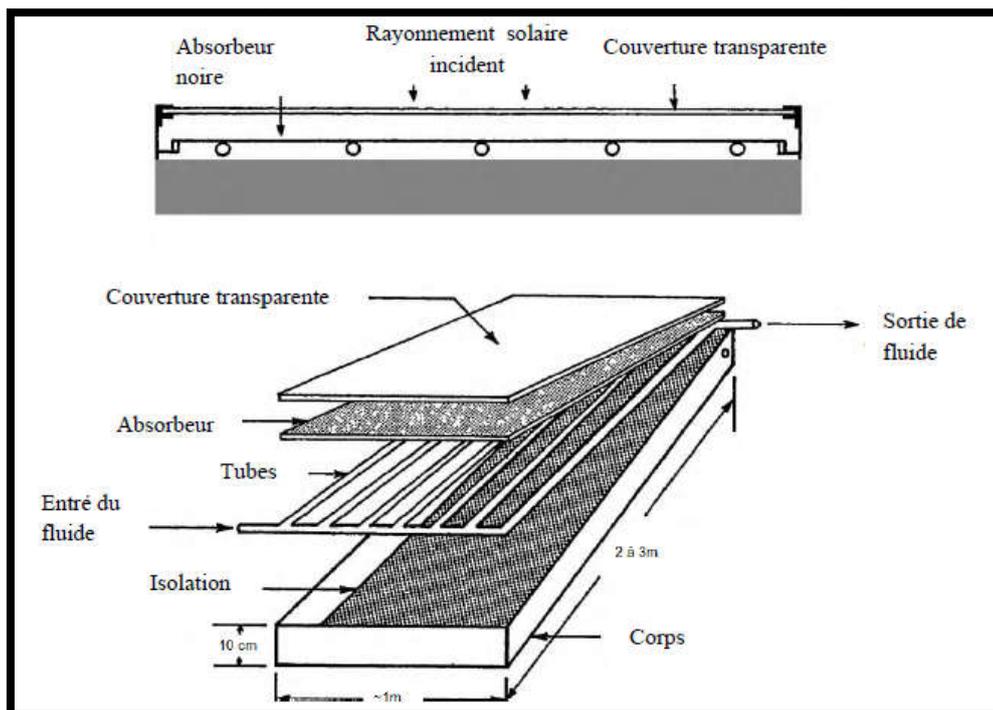


Figure 3.18 : Vue en coupe d'un capteur plan

### d). Le circuit de refroidissement et le réglage du débit :

Pour assurer le refroidissement de la chambre de condensation, nous avons optés pour un calculateur d'eau à trois vitesses alimenté par un courant alternatif. Ce dernier est tombé en panne juste après l'avoir installé.

Pour remédier à ce problème, nous avons trouvé une solution de substitution, une pompe ordinaire (fig. 3-19) alimenté par un rhéostat (fig. 3-20) pour faire varier le courant et contrôler la vitesse de rotation.



Figure 3.19 : pompe à eau électrique Figure 3.20 : rhéostat

Pour permettre à l'eau de tourner, la pompe a été installée entre la sortie de la cuve destockage et l'entrée du circuit de refroidissement. Le contrôle du débit sur le circuit derefroidissement, se fait par l'intermédiaire du rhéostat ainsi qu'un robinet d'arrêt placé entre la pompe et l'entrée de la chambre de condensation. Pour éviter d'étrangler la pompe, nous avons installé une conduite de refoulement qui évacue le surplus d'eau vers la cuve destockage.

### e). La tuyauterie :

La circulation d'eau est assurée par une tuyauterie en ppr de  $\varnothing = 20\text{mm}$ , recouverte par une gaine en Arma Flex pour l'isolation. La tuyauterie qui relie le capteur plan solaire et le distillateur est en cuivre de  $\varnothing = 14\text{ mm}$ , celle-ci aussi est recouverte d'une gaine en Arma Flex.

### f). Le stockage d'eau :

Notre installation dispose de deux cuves de stockage, l'une d'une capacité de 1000 Litres ( fig. 3-21) pour l'alimentation du circuit de refroidissement de la chambre de condensation en eau douce.



Figure 3.21 : cuve de stockage de 1000 litres isolé

### g). Les structures porteuses :

Afin d'installer correctement nos deux distillateurs pour l'expérimentation, nous avons réalisés deux structures métalliques qui vont nous permettre de les aligner sur un même niveau (1,6 mètres du niveau du sol) Les deux structures sont réalisées en cornière (30x30x3) métalliques avec une couche d'antirouille et une couche de peinture argentée.

### 3.1.4 Le montage final :

Le montage du dispositif expérimental a demandé une grande attention, car chaque erreur nous fait perdre du temps car une mauvaise manipulation du distillateur peut casser le vitrage. Enfin l'assemblage de tous ces constituants se fait par étapes :

- ✓ La pose des structures l'une à côté de l'autre,
- ✓ La pose du distillateur actif avec vitrage et sans la chambre de condensation,
- ✓ La pose du distillateur simple sans vitrage,
- ✓ La pose du distillateur actif avec capteur plan.
- ✓ La pose des thermocouples à l'intérieur des trois distillateurs,
- ✓ La pose du capteur plan solaire,
- ✓ La pose de la chambre de condensation avec serrage des boulons,
- ✓ Pose de la silicone sur les joints,
- ✓ Pose du vitrage avec silicone au distillateur simple,
- ✓ Pose la cuve de stockages vides,
- ✓ Raccordements du distillateur actif avec le capteur plan solaire (tuyauterie encuvre),
- ✓ Installation et raccordement du circuit de refroidissement (tuyauterie PPR).

Finalement nous obtenons le dispositif suivant : (fig3-22)



Figure 3-22: vue de face de l'installation

### 3.2 PROTOCOLE D'EXPERIMENTATION :

#### 3.2.1 Lieu de l'expérimentation :

L'expérimentation c'est déroulé au site de l'UDES à Bou Ismail, les coordonnées géographiques du site sont : Latitude : 36,38' Nord, Longitude : 2°41 Est, Altitude : 1 mètre au-dessus de la mer.

#### 3.2.2 Durée de l'expérimentation :

Nous avons programmés une phase de tests, 03 jours avec refroidissement de la chambre de condensation avec des débits variables.

#### 3.2.3 Paramètres à mesurés :

Les paramètres qu'on se doit de mesurer pour pouvoir mener à bien cette étude sont :

- ✓ Les températures des trois distillateurs,
- ✓ Le rayonnement solaire incliné à 36°,
- ✓ La vitesse du vent,
- ✓ La température ambiante,
- ✓ La production d'eau distillée.

#### ✓ 3.2.4 Instruments de mesures :

a) concernant les mesures des paramètres suivant : le rayonnement solaire incliné, la vitesse du vent, la température ambiante, elles sont données par une station météoprofessionnelle qui se trouve au niveau de l'UDES, ces mesures sont données à un intervalle de 5 minutes.

b) les mesures des températures sur les trois distillateurs, nous avons installés des thermocouples de type K sur les différents endroits qui nous intéressent, la sonde du thermocouple (coté soudé) est fixé par colle ou scotch sur le point qu'on veut mesurer, le deuxième coté est muni d'un connecteur adéquat (fig. 3-23).



Figure 3.23 : thermocouple de type K avec connecteur

### 3.2.5 Positions des différents thermocouples sur les trois distillateurs :

Tout d'abord on attribue des numéros aux différents points à mesurer deux l'acquisition des données se fait par une centrale de marque Fluck à 24 entrées : Conductimètre pour la mesure de la conductivité électrique de l'eau ce qui vas permettre deconnaître la salinité de l'eau distillée.

**Tableau 1: position des thermocouples dans les distillateurs**

N°	Désignation
T1	Température de vitre extérieure (distillateur avec chambre)
T2	Température de la vitre intérieure (distillateur avec chambre)
T3	Température de l'air (distillateur avec chambre)
T4	Température de l'eau dans le bac (distillateur avec chambre)
T5	Température de la plaque abs (distillateur avec chambre)
T6	Température d'entré de l'eau de chauffage (distillateur avec chambre)
T7	Température de sortie de l'eau de chauffage (distillateur avec chambre)
T8	Température de l'échangeur droite chambre cond "position 1" (distillateur avec chambre)
T9	Température de l'échangeur gauche chambre cond "position 3" (distillateur avec chambre)
T10	Température de l'air droit chambre cond "position 4" (distillateur avec chambre)
T11	Température de l'air gauche chambre cond "position 6" (distillateur avec chambre)
T12	Température d'entré eau de refroidissement (distillateur avec chambre)
T13	Température de sortie de l'eau refroidissement (distillateur avec chambre)
T14	Température de la vitre extérieure (distillateur simple)
T15	Température de la vitre intérieure (distillateur simple)
T16	Température de l'air dans distillateur (distillateur simple)
T17	Température de l'eau (distillateur simple)
T18	Température de la plaque abs (distillateur simple)
T19	Température de la plaque abs (distillateur actif avec capteur plan)
T20	Température de l'eau (distillateur actif avec capteur plan)
T21	Température de l'air (distillateur actif avec capteur plan)

### Chapitre 3 Etude Expérimentale

T22	Température de la vitre extérieure (distillateur actif avec capteur plan)
T23	Température de la vitre intérieure (distillateur actif avec capteur plan)
T24	Température de l'eau dans la cuve de refroidissement (distillateur avec chambre)

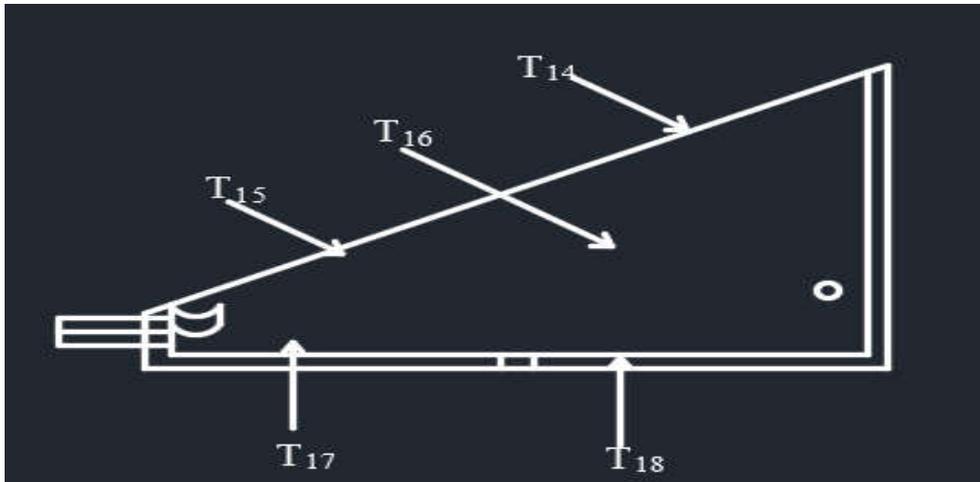


Figure 3.24 : positions des thermocouples sur le Distillateur simple

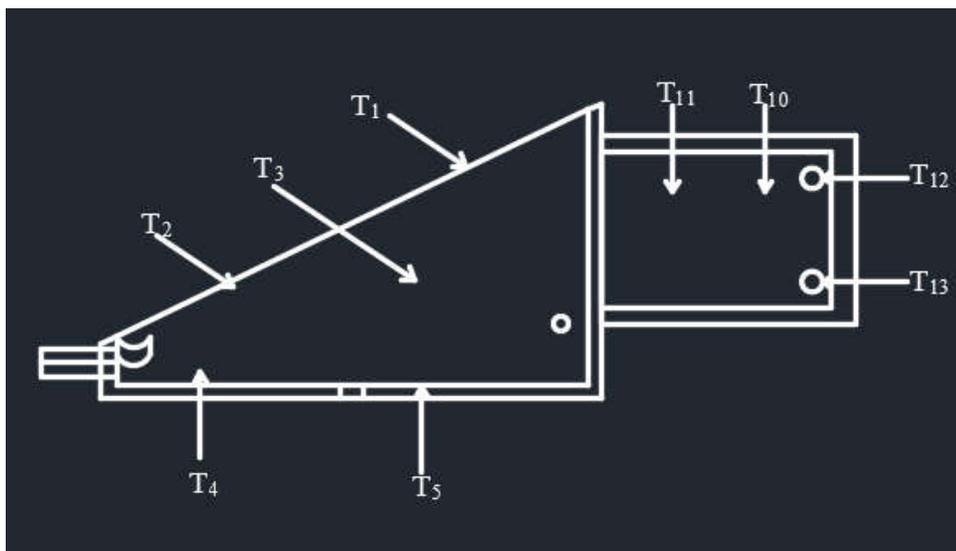


Figure 3.25 : positions des thermocouples sur le distillateur avec chambre de condensation

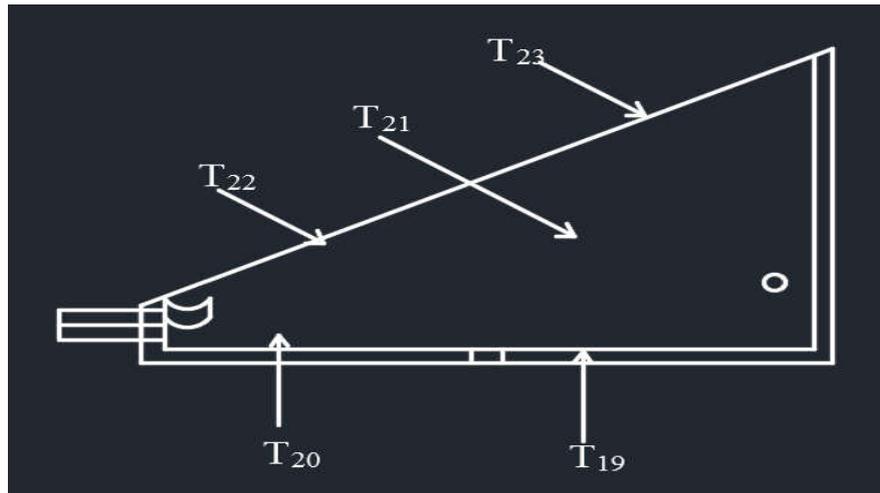


Figure 3.26 : position des thermocouples sur le distillateur actif avec capteur plan

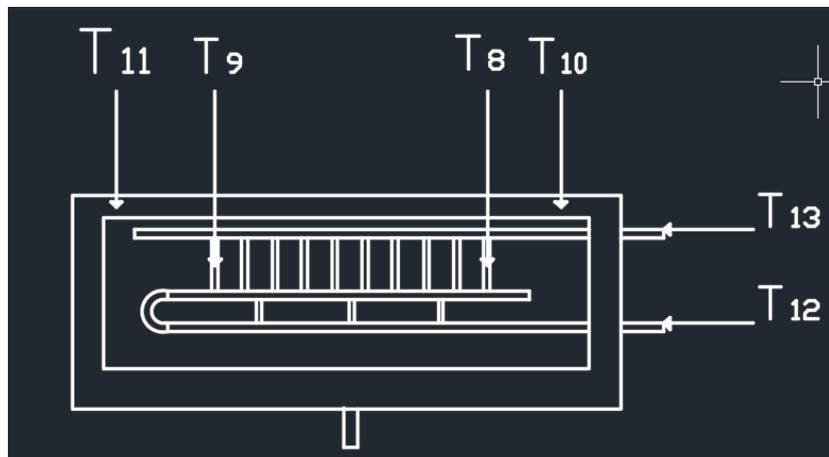


Figure 3.27: positions des thermocouples sur l'absorbeur de la chambre

- ✓ L'acquisition des données se fait par une centrale de marque Fluck à 24 entrées(fig.3-28):



Figure 3.28: centrale d'acquisitions de données

- ✓ Instrument de mesure de l'eau distillée (fig. 3-29) :



Figure 3.29: b cher en verre gradué en ml

- ✓ Conductimètre pour la mesure de la conductivité électrique de l'eau ce qui vas permettre deconnaitre la salinité de l'eau distillée (fig. 3-30) :



Figure 3.30: conductimètre

**CHAPITRE 4**  
**RESULTATS**  
**ET**  
**INTERPRETATIONS**

### 4. 1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats expérimentaux effectués sur notre banc d'essais installé sur le site de l'UDES à Bou Ismail, les tests se sont déroulés au mois de juillet c'est le mois idéal.

Chaque jour 3cm d'eau de mer, la période du test dure 24 heures, vidange chaque jour du reste de l'eau de mer, rinçage du distillateur pour évacuer les sels résiduels, des tests de salinité (conductivité électrique) de l'eau de mer et de l'eau distillée, en ce opération :

Nous avons ouvert le calculateur d'eau pour le refroidissement de la chambre de condensation, nous avons fait varier le débit grâce a une vanne sur plusieurs jours.

Nous avons effectués des tests le **25/07/2016** avec un débit de 18.5 ml/s,

- ✓ Le **26/07/2016** avec un débit de 30 ml/s.
- ✓ Le **27/07/2016** avec un débit de 60ml/s.

Nous avons constaté et enregistré des variations de la production de l'eau distillée et les températures internes.

La deuxième opération consiste à caractérisé les données météorologique du site de Bou Ismail (température ambiante, flux solaire incliné et la vitesse du vent) pour toutes les journées tests.

Enfin une comparaison des performances du distillateur fonctionnant avec et sans Condensation.

### 4.2 performances des distillateurs simple et actif avec refroidissement de la chambre de condensation et actif avec capteur plan :

#### 4.2.1 Evolution de la température ambiante et du rayonnement solaire en fonction du temps :

La journée d'essai est celle du 27/07/2016, Cette journée est caractérisée par une température ambiante allant de 23.2 °C à 31.3 °C, une vitesse de vent variant de 0 m/s à 4.68 m/s et un éclairement solaire max de 878,440 W/m<sup>2</sup>.

Nous constatons dans la figure 4.1 que la caractéristique du rayonnement solaire incliné se comporte normalement, la courbe à la forme d'une cloche ce qui montre qu'il n'y a aucune perturbation dans l'irradiation reçue, le maximum du rayonnement 878,440 W/m<sup>2</sup> est enregistré à (12h00), la période d'irradiation journalière est de 10 heures (06h-18h).

Concernant la température ambiante nous constatons une fluctuation durant les premières heures de la journée (00h00-05h00), ensuite la température remonte à (07h45) 29 °C, puis remonte et rechute à (08h45-14h00) entre 28,66°C et 26,12°C. ensuite la température remonte à (15h45) 31,28 °C, puis rechute jusqu'à 23,46 °C à (00h00).

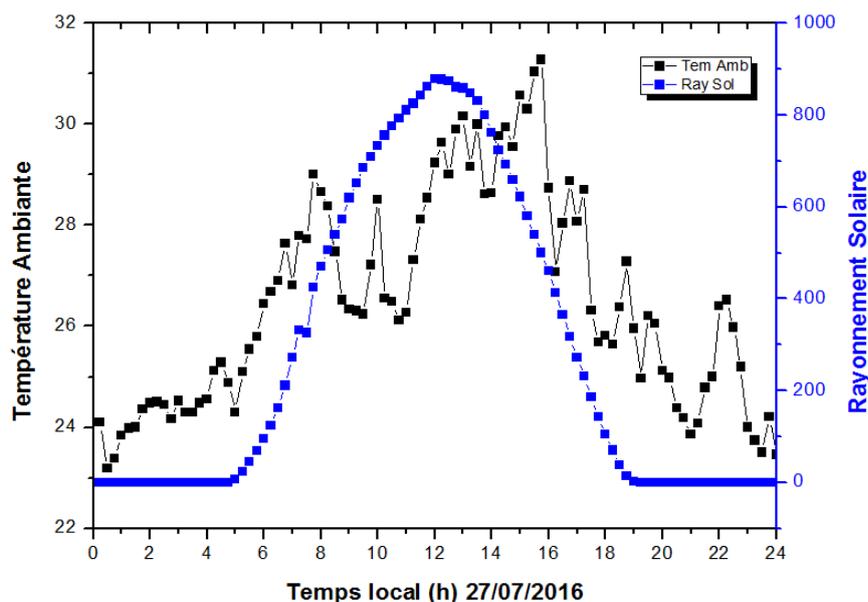


Figure 4.1: Evolution de la température ambiante et du rayonnement solaire en fonction du temps de la journée du 27 juillet 2016.

#### 4.2.2 Evolution de la vitesse du vent en fonction du temps :

La figure 4.2 illustre l'évolution horaire de la vitesse du vent durant la journée du 27/07/2016. Nous constatons que durant cette journée le vent est faible sur le site, la vitesse varie de 0,86 m/s à 2,08 m/s entre (00h00 -10h00) et, le seul moment (13h00 à 13h15) où le vent atteint 3,88 et 4,68 m/s. le vent est diminué à la vitesse 0 m/s durant le 15h00 et 16h00.

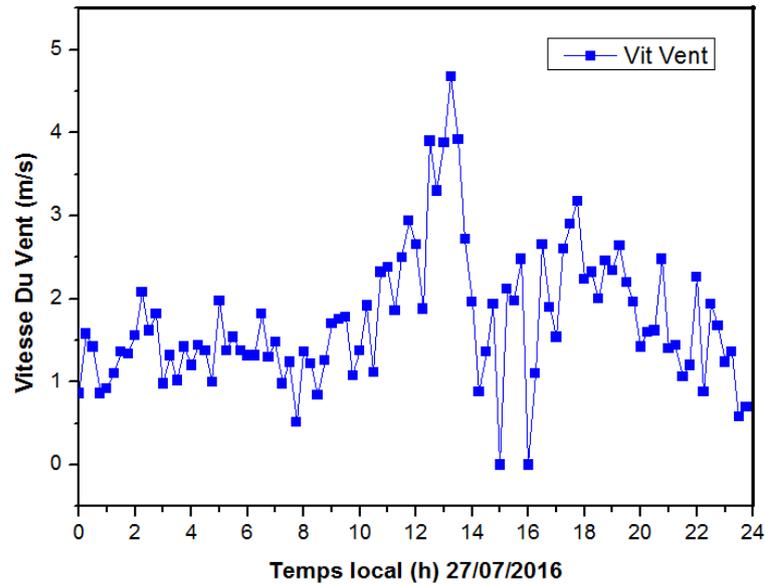


Figure 4.2: Evolution de la vitesse du vent en fonction du temps de la journée Du 27 juillet 2016.

### 4.2.3 Evolution des températures des différents éléments des distillateurs:

#### a). Evolution des températures des vitres extérieures et intérieures :

L'évolution des températures de la vitre extérieures et extérieures des vitres des distillateurs durant la journée du 27/07/2016 est représentée dans la figure 4.3. Dans cette figure nous constatons un comportement des températures du vitrage identique et normal pour les trois distillateurs, les températures sont quasi-stationnaires pendant sept (07) heures (00h à 07h) puis elles décollent avec l'augmentation du rayonnement solaire, entre (07h et 18h00) les températures du vitrage du distillateur actif sont supérieures aux températures du distillateur simple et distillateur avec chambre, ceci est dû à l'apport énergétique du capteur plan thermique qui fait augmenté la température de la saumure ainsi que toutes les températures internes du distillateur. Concernant la variation de la température entre le vitrage externe et interne, nous constatons une légère augmentation de la température du vitrage interne, ceci s'explique par l'emprisonnement du rayonnement solaire infrarouge à l'intérieur du distillateur ce qui augmente la température interne du vitrage par rapport à l'extérieur qui est soumise à l'action du vent qui la refroidie.

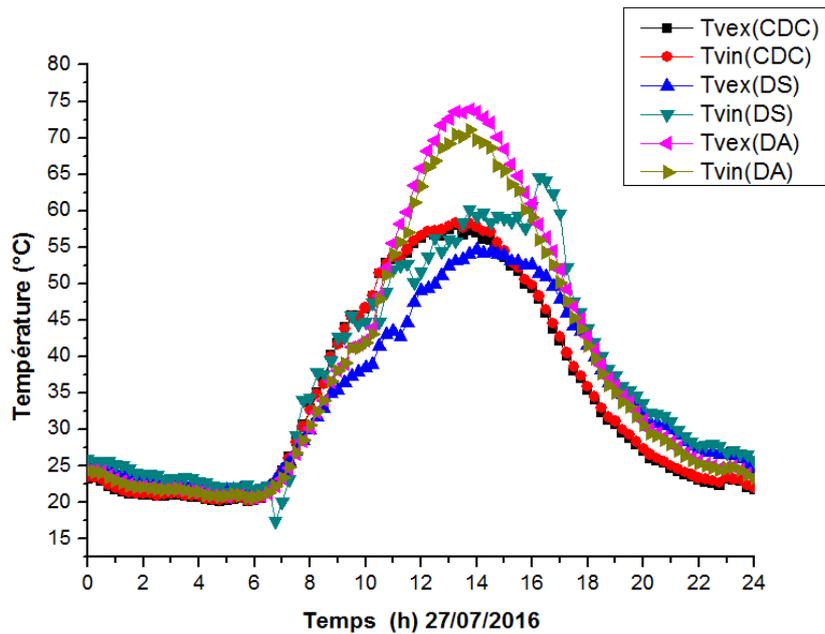


Figure 4.3 : Evolution des températures des vitres extérieures et intérieures des trois distillateurs au cours de la journée du 27/07/2016.

### b). Evolution de la température de l'eau saumâtre :

La figure 4.4 illustre l'évolution des températures de l'eau dans le bassin des deux distillateurs durant la journée du 27/07/2016. Nous constatons dans cette figure qu'elle représente le même allure que l'éclaircissement. Nous pouvons diviser cette évolution en deux parties. Dans la première partie, nous remarquons une évolution simultanée des courbes pendant les intervalles de temps (00h00 à 08h00) et (18h à 24h). Dans la deuxième partie, nous remarquons un écart progressif de la courbe du distillateur actif. Dans le distillateur avec chambre l'eau atteint 69,64 °C à 13h33 alors que dans le distillateur actif la température est au maximal 82,45 °C, cette écart de 13 °C s'explique par l'apport du capteur plan qui contribue a l'augmentation de la température dans la saumure, la température de l'eau dans l'entrée du chauffage (sortie du capteur plan) atteint 67.5 °C au même moment 13h33.

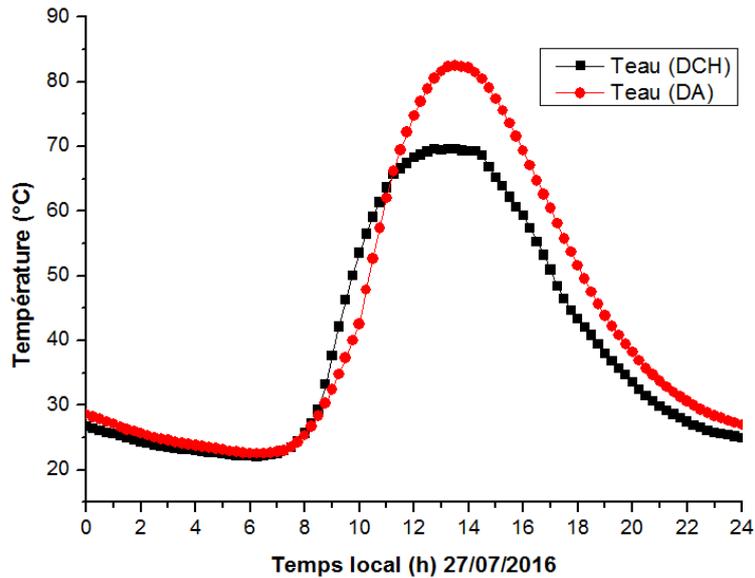


Figure 4.4 : Evolution de la température de l'eau saumâtre dans des trois distillateurs au cours de la journée du 07/07/2016.

**c). Evolution de la température de l'air :**

La figure 4.5 montre Evolution de la température de l'air dans les bassins des trois distillateurs au cours de la journée du 27/07/2016. Nous constatons que l'évolution se divise en trois phases, deux phases où les températures sont semblables (00h00 à 07h00) et (18h à 24h00), la phase intermédiaire (07h00 à 18h00) les températures s'écartent progressivement jusqu'à atteindre 18 °C au environ 13h00 (le maximum des températures) 64 °C pour le distillateur simple (DS) et 65 °C pour le distillateur actif avec chambre de condensation (DCH) le et le distillateur actif (DA) 82 °C.

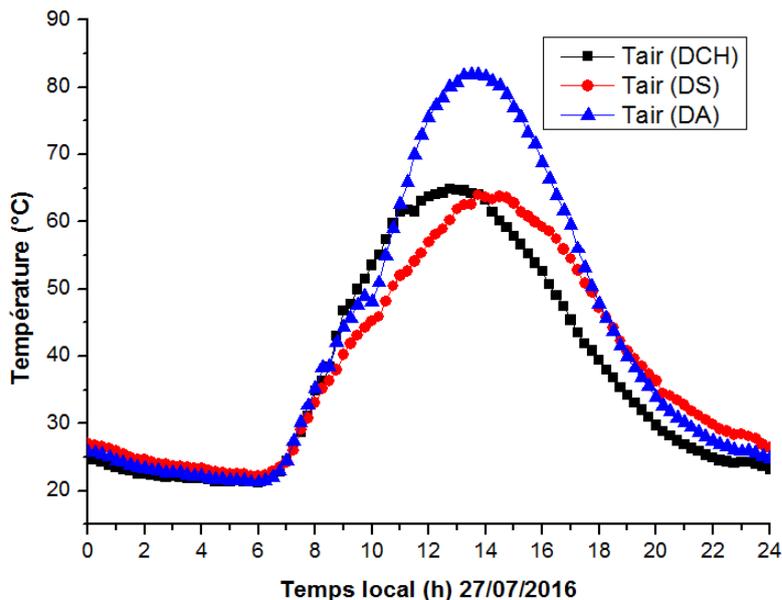


Figure 4.5 : Evolution de la température de l'air dans les bassins des trois distillateurs au cours de la journée du 27/07/2016.

### d). Evolution des températures dans la chambre de condensation:

L'évolution des températures dans la chambre de condensation est représenté dans la figure 4.6. Cette figure englobe trois courbes qui caractérisent l'évolution de la température de deux positions de l'air dans la chambre de condensation et le points de l'échangeur de chaleur se trouve dans la chambre de condensation, on constate que ces températures évoluent de la même manière sur position 1 et 6 toute la journée. Ceci s'explique par l'arrêt du calculateur de refroidissement et les positions très proches dans la chambre de condensation. Les températures maximales sont enregistrées à 13h18 mn , qui sont égalent à 60.60 °C, et 48 °C pour position 3 .

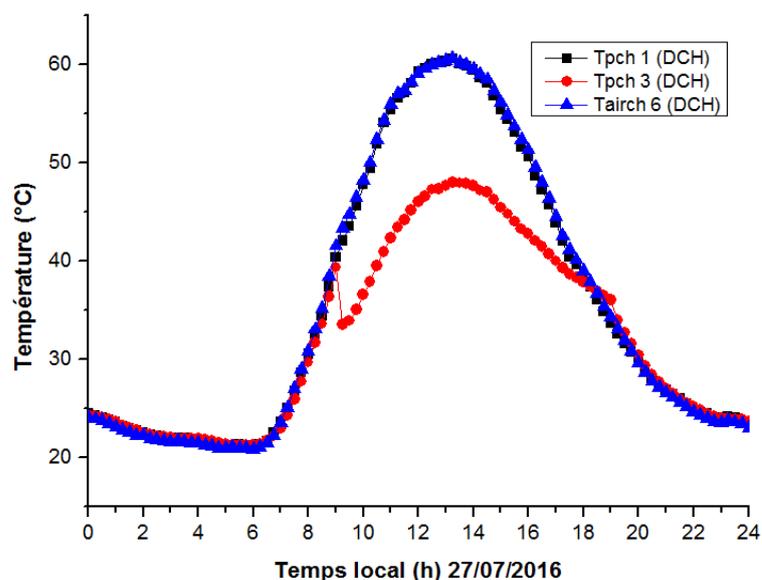


Figure 4.6 : Evolution de la température de l'air dans la chambre de condensation (point 4 et 6) et sur l'échangeur (point 1 et 3) du distillateur avec chambre au cours de la journée du 27/07/2016

### e). Evolution de la température de l'air dans le distillateur actif :

La figure 4.7 illustre l'évolution de la température de l'air dans les différents compartiments du distillateur avec chambre, nous constatons que la température de l'air dans le distillateur (sous le vitrage) est légèrement supérieure aux températures de la chambre de condensation au milieu de la journée (09h00 à 16h00). La différence de température entre le bassin du distillateur et la chambre de condensation est due à un échange convectif entre l'air à l'intérieur de la chambre et l'eau se trouvant dans l'échangeur.

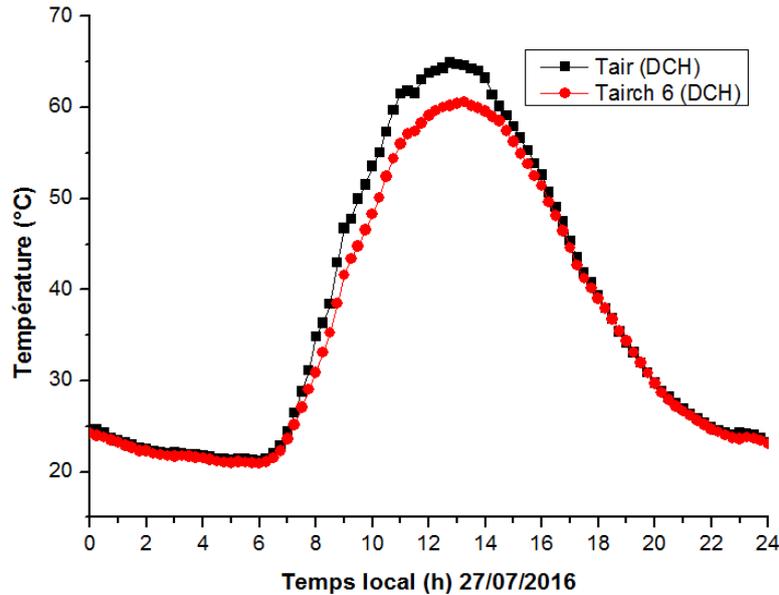


Figure 4.7 : Evolution de la température de l'air dans le distillateur avec chambre et dans la chambre de condensation (point 6) au cours de la journée du 27/07/2016.

**f). Evolution de la température de la plaque absorbeur dans les trois distillateurs :** La figure 4.8 montre Evolution de la température de la plaque absorbeur dans les trois distillateurs au cours de la journée du 27/07/2016. Nous constatons que l'évolution se divise en trois phases, deux phases où les températures sont semblables (00h00 à 08h00) et (18h à 24h00), la phase intermédiaire (08h00 à 18h00) la température de la plaque absorbeur du distillateur actif élève par rapport la température de la plaque absorbeur du distillateur simple et avec cambre de condensation au environ 13h30 mn (le maximum des températures) 66.54 °C pour le distillateur simple (DS) et 71.67 °C pour le distillateur actif avec chambre de condensation (DCH) le et le distillateur actif (DA) 82.50 °C.

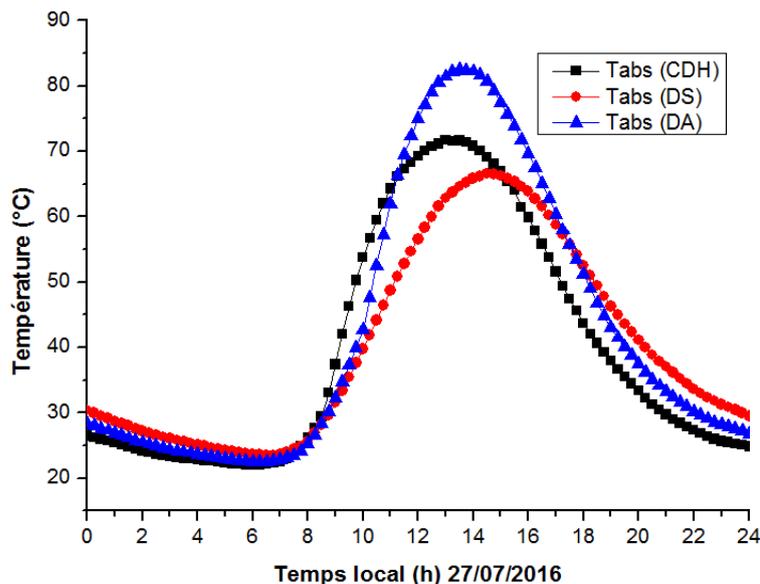


Figure 4.8 : Evolution de la température de la plaque absorbeur dans les trois distillateurs au cours de la journée du 27 /07/ 2016.

### g). Evolution de la Production du distillat :

#### ▪ Production horaire :

La production horaire de l'eau distillée est représentée par la figure 4.9, nous constatons que les trois distillateurs commencent à produire à 10h30 du matin, le distillateur actif avec chambre (DCH) produit plus que le distillateur simple (DS) et le distillateur actif. Ceci s'explique par l'apport du capteur plan thermique et l'eau qui entrée de l'échangeur de la chambre de condensation qui fait monter la température de la saumure, le gradient de température grandit ce qui améliore la production. Le fait le plus significatif dans ces résultats est la production plus au moins légère du distillateur simple, ceci peut s'expliquer par la présence de l'eau dans l'échangeur et le capteur plan.

La production est importante dans l'intervalle (13h – 14h30), les écarts de production Grandissent et se converge en fin de journée.

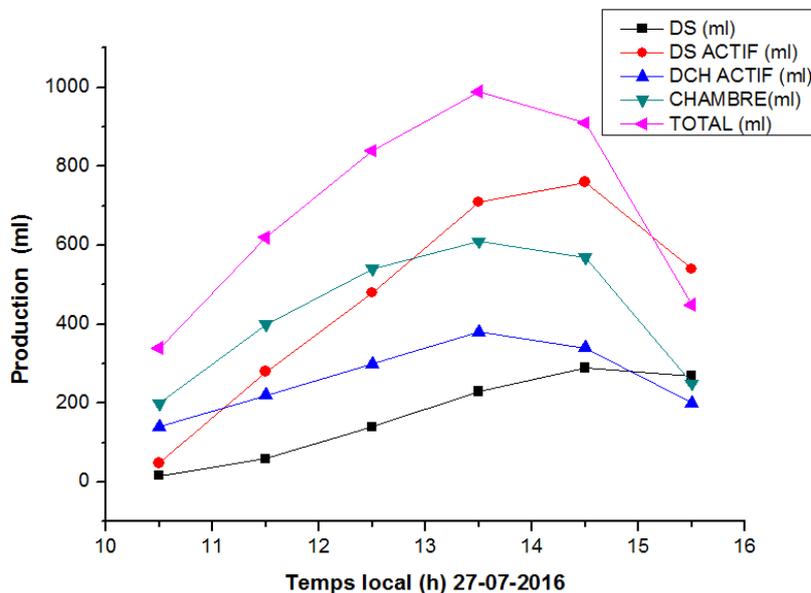


Figure 4.9 : Evolution horaire de la production de la journée du 27 /07/2016

#### ▪ Production cumulée :

La figure 4.10 illustre l'évolution de la production cumulée de la journée des trois distillateurs, nous constatons que le distillateur actif avec chambre de condensation (DCH) à produit du coté bassin 1960 ml, le distillateur simple (DS) à produit 1706 ml et la chambre de condensation à produite 2750 ml et le distillateur actif 3579 ml sous les mêmes conditions climatiques.

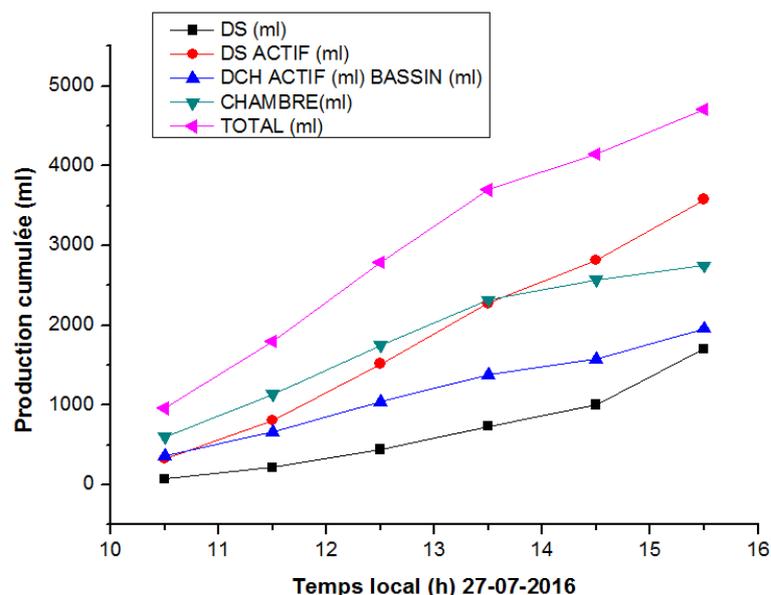


Figure 4.10 : Evolution horaire de la production cumulée du distillat dans les trois distillateurs au cours de la journée du 27/07/2016.

### 4. Evolution de la production cumulée en fonction du débit de refroidissement:

Dans ce tracé de figure 4.11 qui caractérise l'évolution de la production journalière du distillat en fonction du débit de refroidissement, nous constatons une augmentation avec le débit, mais étant donné que les conditions climatiques ne sont pas tous les mêmes pour les journées testés, on ne peut pas conclure que le débit de 60 ml/s est l'optimal.

Les débits testés sont 18,5, 30, et 60 ml/s, nous avons recueillie la meilleure production pour le débit de 60 ml/s mais avec un rayonnement solaire normal et régulier.

L'idéal aurait été de testé un débit plus grand que 60 ml/s pour voir le comportement de la production.

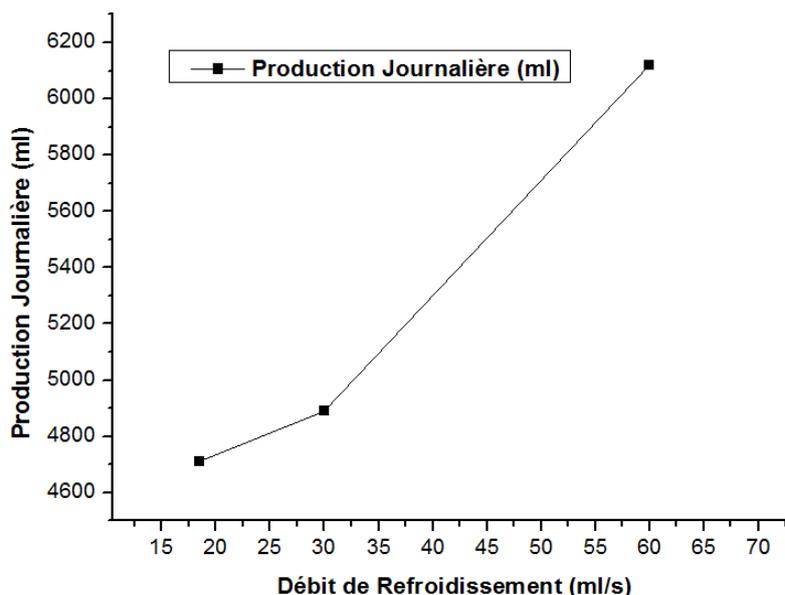


Figure 4.11 : Evolution de la production journalière du distillateur actif en fonction Du débit de refroidissement.

## **Conclusion Générale**

Le travail présenté dans ce mémoire à concerner l'étude expérimentale l'influence du débit de refroidissement sur les performances d'un distillateur solaire actif avec chambre de condensation et couplé à un capteur solaire thermique. Parallèlement nous avons incorporé dans le dispositif expérimental un distillateur simple de même dimensions ce qui va nous permettre de comparer les résultats et d'évaluer ainsi l'apport de chaque élément sur la production journalière. La chambre de condensation qui se trouve en arrière du distillateur est munie d'un absorbeur qui est refroidie par une circulation forcée d'un fluide (eau), le capteur solaire thermique alimente en énergie calorifique la saumure par le biais d'un échangeur installé dans le bassin.

Ayant commencé l'expérimentation le mois de juillet, les tests ont durés huit (03) jours avec variation du débit de refroidissement. Sous un rayonnement solaire de  $878 \text{ w/m}^2$ , une température ambiante de  $31 \text{ }^\circ\text{C}$ , Les résultats ont montrés que les températures enregistrés dans le distillateur actif avec capteur plan sont plus élevés de  $10^\circ\text{C}$  par rapport au distillateur simple, et  $4^\circ\text{C}$  par rapport au distillateur solaire avec chambre de condensation ceci prouve que l'apport du capteur plan thermique est un atout majeur dans l'amélioration de la production, avec 570 ml de distillat en plus.

Notre intérêt c'est porté particulièrement sur l'effet de la chambre de condensation sur la production du distillat, les trois jours de tests avec refroidissement de la chambre, cette dernière a produit une quantité assez appréciable entre (560 et 580 ml) par jour. Le 27 juillet la production de celle-ci a explosé pour atteindre 4600 ml/jour. Ce résultat est important car il fait de la chambre de condensation la principale source d'eau distillée par rapport au bassin du distillateur actif.

Les résultats ont prouvés que l'apport d'une chambre de condensation dans le dispositif est très bénéfique vu qu'elle double la production du distillat, les résultats auraient pu être meilleurs si les conditions climatiques étaient meilleures.

Je pense que cette modeste contribution doit être début pour d'autres tests, surtout au niveau de la chambre de condensation ou des améliorations peuvent être entreprises.

## Références Bibliographiques

- [1] A.E.Kabeel et al./Renewable and Sustainable Energy Reviews 59 (2016) 839 857
- [2] **Ahmed Kettab**. Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision. Desalination, 136 (2001), pp. 25-33.
- [3] **Malik, M.A.S ; TIWIRI, G ; KUMAR, S et SLDHA, MS**. Solar distillation. Oxford,pergamon press (1982).
- [4] **Al-Shammiri, M, et Safar,M** Multi-effect distillation plants: state of the art; Desalination126. p 45–59.(1999) .
- [5] **Hikmet S.Aybar**. Mathematical modeling of an inclined solar water distillation system.Desalination 190, p 63–70.(2006) .
- [6] **A. Maurel**, livre "Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce " 2006, vol.273, pp:24,25.
- [7] **J.Dunglas**," "le dessalement de l'eau de mer une nouvelle méthode pour accroître laressource en eau ", membre de l'académie d'agriculture de France, manuscrit publié en février 2014, vol.10, pp:2,3.
- [8] **H.Boyé**, "Eau, énergie, dessalement et changement climatique en méditerranée", conseil général de l'environnement et du développement durable ministère de l'écologie, de l'énergie, France," août 2008, vol.35, pp:6, 7, 8, 9.
- [9] **A.Boutreaà, M.Mekhermeche**,"L'influence d'une surface réfléchissante sur le rendement d'un distillateur solaire simple ", ingénieur d'état en génie des procédés, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2006, vol.84, pp20, 22.
- [10] **Y. Mandri**," Etude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide", diplôme de doctorat en génie des procédés, Université Claude Bernard, Lyon 2011, vol.151, pp:6, 7, 8.
- [11] **O.Sotehi**," Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire», magister en physique, Université de Batna .2009, vol.145, pp:25, 26.
- [12] **K.Rabah** "Contribution a l'étude d'un distillateur solaire modulaire constitue d'un capteur solaire a ruissellement et d'une chambre a condensation», docteur en génie mécanique, Université des sciences et de la technologie houari boumediene.2012, vol.158, pp:45, 46.
- [13] **S.Fedali**," Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres a bas coût pour les communautés rurales", magister en mécanique, Université de Batna 2008, vol.112, pp44, 45, 46.

## Références Bibliographiques

---

- [14] **O.Halloufi** " étude de la performance d'un distillateur solaire par un system de préchauffage solaire de l'eau saumâtre ";magister en génie climatique Université Mantouri Constantine(2010) pp: 4, 5, 6, 8, 22, 23,24.
- [15] **M.A.S. Malik, N .Tiwari, A. Kumar, M.S. Sodha**, Active and passive solar distillation: a review, Solar distillation, UK: Pergamon Press; 1982.
- [16] **Kaabi .A et Smakdji. N.** Impact of temperature difference (water-solar collector) on solar-still global efficiency; Desalination 209. p309–316 (2007) .
- [17] **MANDI BENAÏSSA**, "analyse thermo énergétique d'un procédé de dessalement d'eau de mer par voie solaire" magister en physique universite tlemcen Aboubekr Belkaid departement de physique, Annee universitaire 2012-2013 pp 46.
- [18] **G.N.Tiwari** , Enhancement of dally yield in a double basin solar still, Energy Conversion and Management 25(1)( 1985) 49–50.
- [19] **Y.P. Yadav**, Transient analysis of double-basin solar still integrated with collector. Desalination 71(1989) 151– 64.
- [20] **G.N. Tiwari, S.A.Lawrence**, Thermal evaluation of high temperature distillation under an active mode of operation, Desalination 85 (1992)135–45.
- [21] **S. Kumar, G.N. Tiwari**, Optimization of daily yield for an active double effect distillation with water flow, Energy Conversion and Management 40(1999) 703–15.
- [22] **S.Kumar, G.N.Tiwari**, Performance evaluation of an active solar distillation system. Energy 21(9) (1996) 805–808.
- [23] **N.S.Al Baharna, N .Al Mahdi, F.Zaky** , Performance integrated analysis of a triple-basin still with a natural circulation solar heater, Energy Conversion and Management 34(7) (1993) 545–556.
- [24] **K. Sampathkumar, T.V. Truman, P. Pitchandi, P. Senthilkumar**, Active solar distillation—a detailed review, Renew. Sust. Energ. Rev. 14 (6) (2010) 1503–1526. Desalination 373 (2015) 1–9 ELSEVIER.
- [25] **Journal of King Saud University – Engineering Sciences** www.ksu.edu.sa. www.sciencedirect.com .
- [26] **H.E.S.Fath** , High performance of a simple design, two effect solar distillation unit, Desalination 107(223–33)1996.
- [27] **A.Madhlopa, C.Johnstone**, Numerical study of a passive solar still with separate condenser, Renewable Energy 34(1668–77) 2009.
- [28] **El-SamadonyYAF,AbdullahAS,OmaraZM**.Experimentalstudyofstepped solar stillintegratedwithreflectors andexternalcondenser.Exp.Heat Transfer2015;28:392–404.
- [29] **Emad AA**.Evaluationofsingleslopsolarstillintegratedwiththevaporative cooling systemforbrackishwaterdesalination.J.Agric.Sci.2014; 6:48–58.
- [30] **Kabeel AE,OmaraZM,EssaFA**.Improvingtheperformanceofsolarstillby using nano fluids and providing vacuum. Energy Convers.Manag. 2014; 86:268–74.
- [31] **Pr. KAABI ABDENACER, SMAKDJ I NAFILA**. Impact of temperature difference (watersolar collector) on solar-still global efficiency. Desalination. PP 299-300, 2007.

## ***Références Bibliographiques***

---

[32]. **ALLICHE SID AHMED**, "Etude d'un distillateur Hot Box simple pente avec chambre de condensation" Mémoire de Master :Fluides, Energétique et applications, Université de KHEMIS MILIANA 2013, Année universitaire 2011-2012 pp 69.

[33]**RENE TCHINDA et al.** Heat and mass transfer processes in a solar still with an indirectevaporator-condenser, Energy Conversion & Management, PP 98-106, 1999.

[34]**K. Benabdelaziz Ferhat.** Etude Expérimentale des performances d'un distillateur solaire avec chambre de condensation couplé à un capteur solaire plan. Mémoire de Master, Université de KHEMIS MILIANA 2013.

# ANNEXES

- Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps de la 25 et 26 juillet 2016

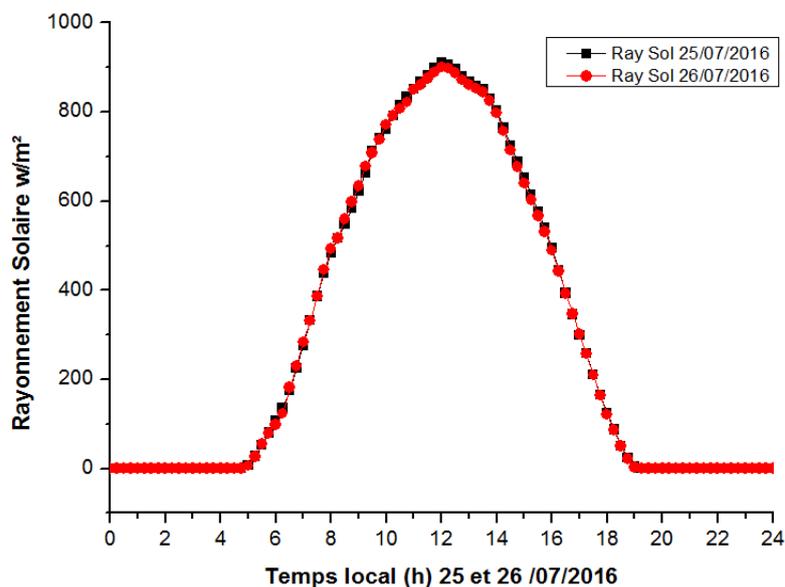


Figure 4.12: Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps de la 25 et 26 juillet 2016.

- Evolution de la vitesse du vent en fonction du temps de la journée du 25 et 26 juillet 2016

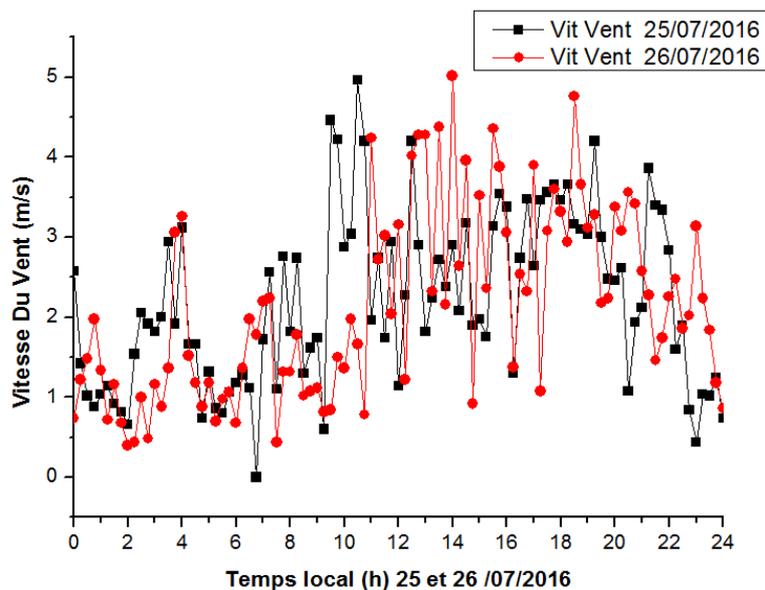


Figure 4.13: Evolution de la vitesse du vent en fonction du temps de la journée du 25 et 26 juillet 2016

- Evolution de la température ambiante en fonction du temps de la 25 et 26 juillet 2016

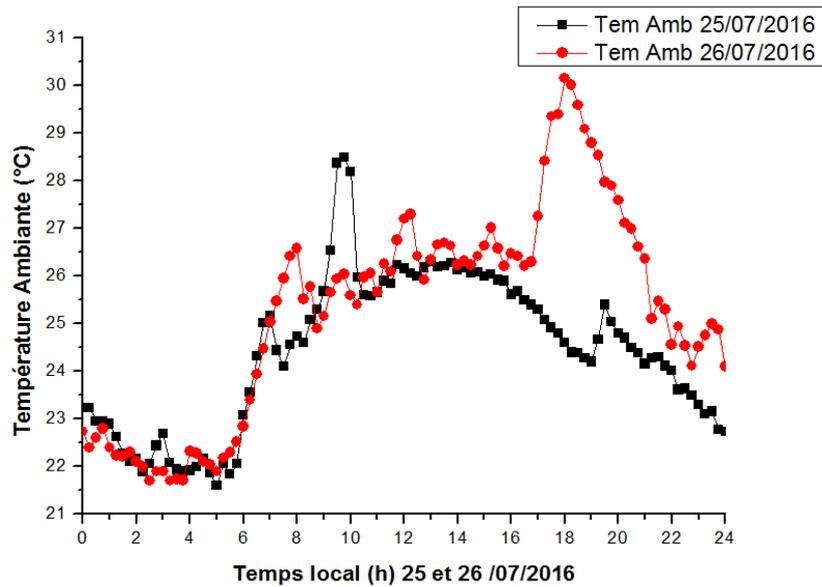


Figure 4.14: Evolution de la température ambiante en fonction du temps de la 25 et 26 juillet 2016.

- Evolution des températures du distillateur simple de la journée du 25 juillet 2016

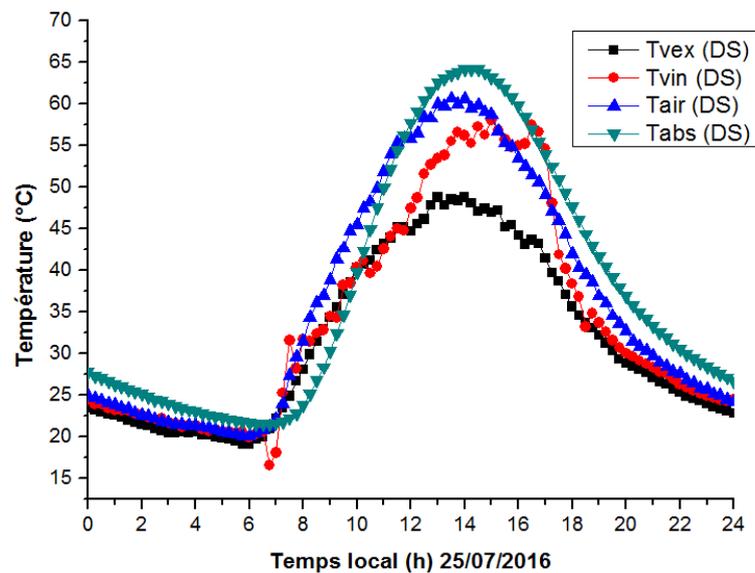


Figure 4.15: Evolution des températures du distillateur simple de la journée du 25 juillet 2016

- Evolution des températures du distillateur simple de la journée du 26 juillet 2016

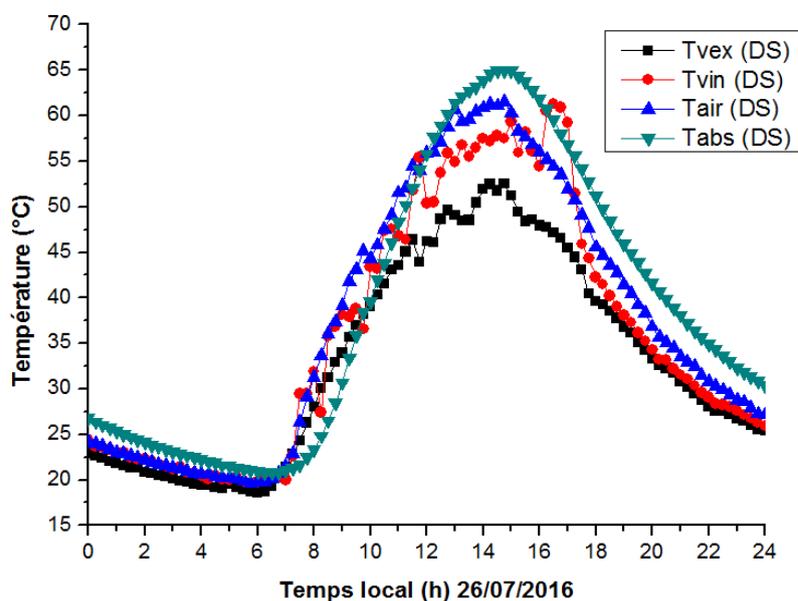


Figure 4.16: Evolution des températures du distillateur simple de la journée du 26 juillet 2016

- Evolution des températures du distillateur actif avec chambre de condensation de la journée 25 juillet 2016

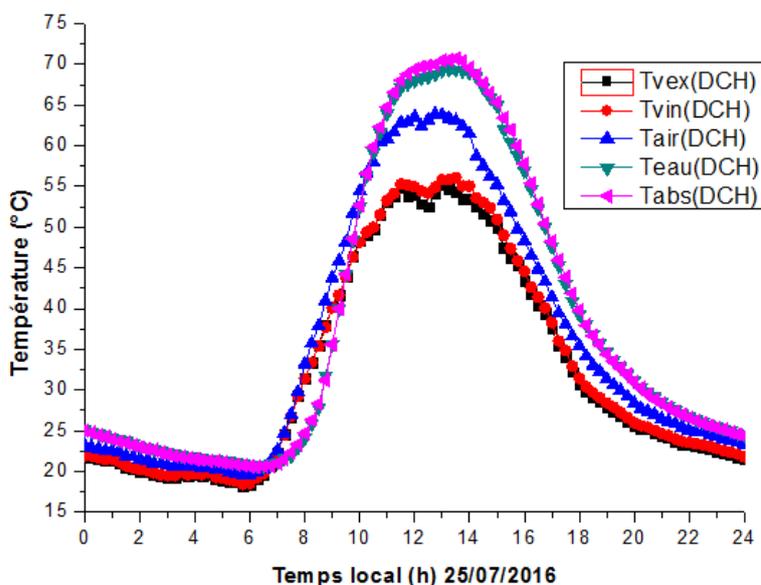


Figure 4.17: Evolution des températures du distillateur actif avec chambre de condensation de la journée 25 juillet 2016

- Evolution des températures du distillateur actif avec chambre de condensation de la journée 26 juillet 2016

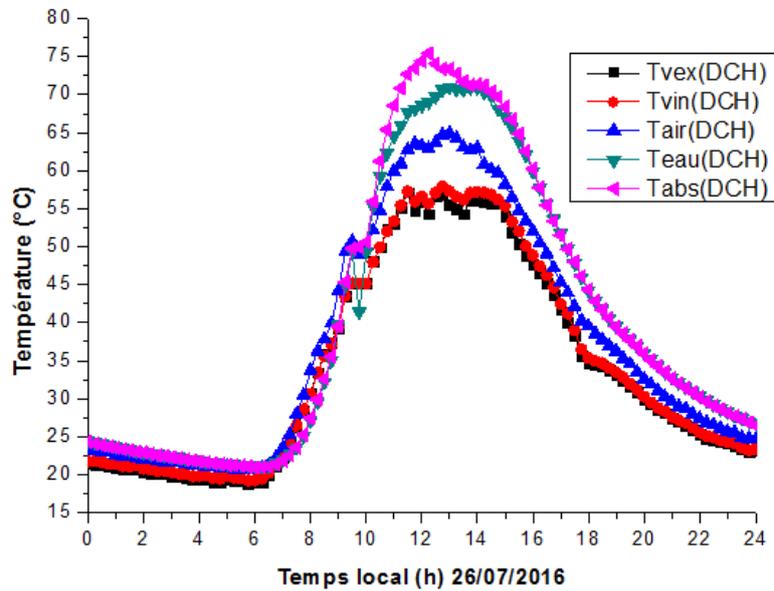


Figure 4.18: Evolution des températures du distillateur actif avec chambre de condensation de la journée 26 juillet 2016.

- Evolution des températures du distillateur actif avec capteur plan de la journée du 25 juillet 2016

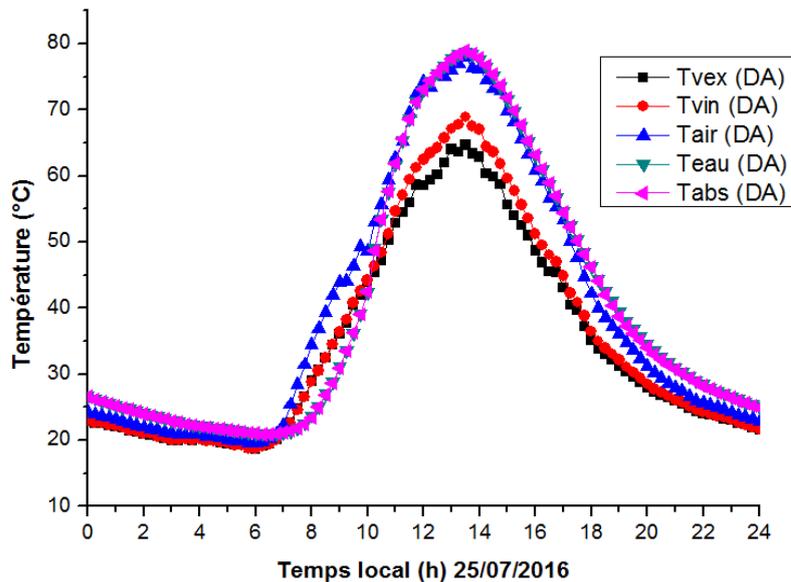


Figure 4.19: Evolution des températures du distillateur actif avec capteur plan de la journée du 25 juillet 2016.

- Evolution des températures du distillateur actif avec capteur plan de la journée du 26 juillet 2016

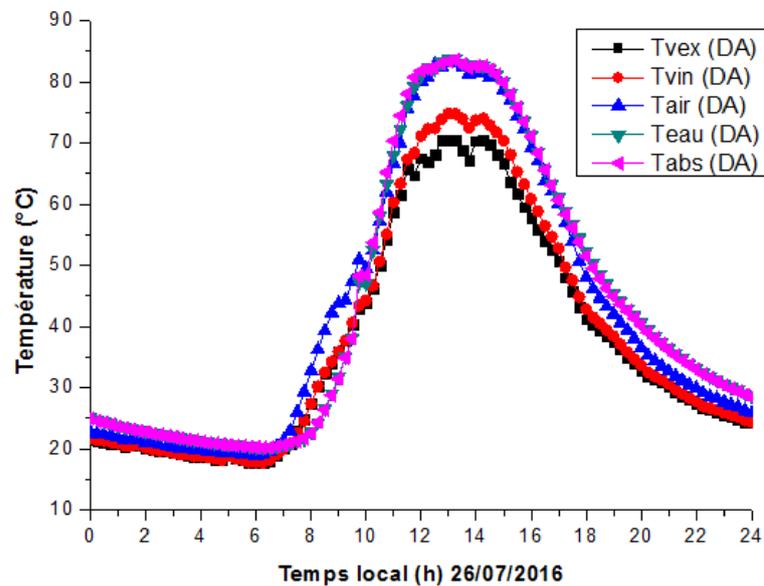


Figure 4.20: Evolution des températures du distillateur actif avec capteur plan de la journée du 26 juillet 2016.

- Evolution de la température de l'air dans la chambre de condensation (point 4 et 6) et sur l'échangeur (point 1 et 3) du distillateur avec chambre au cours de la journée du 25 juillet 2016

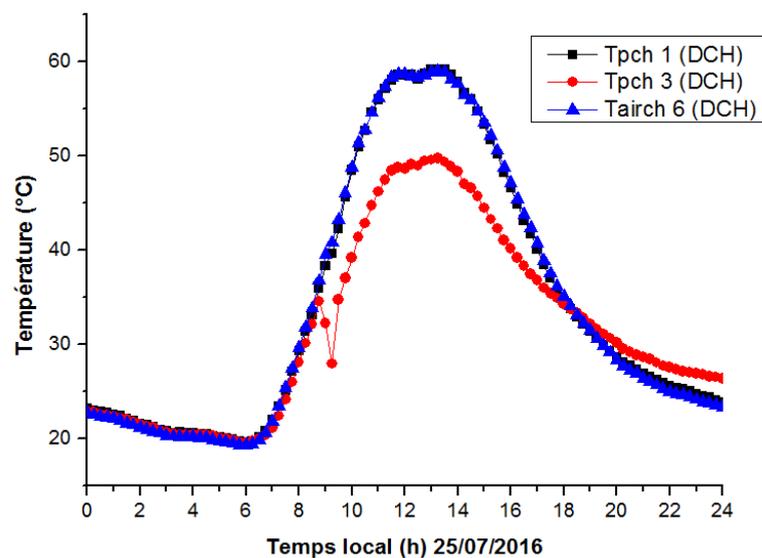


Figure 4.21: Evolution de la température de l'air dans la chambre de condensation (point 4 et 6) et sur l'échangeur (point 1 et 3) du distillateur avec chambre au cours de la journée du 25 juillet 2016.

- Evolution de la température de l'air dans la chambre de condensation (point 4 et 6) et sur l'échangeur (point 1 et 3) du distillateur avec chambre au cours de la journée du 26 juillet 2016

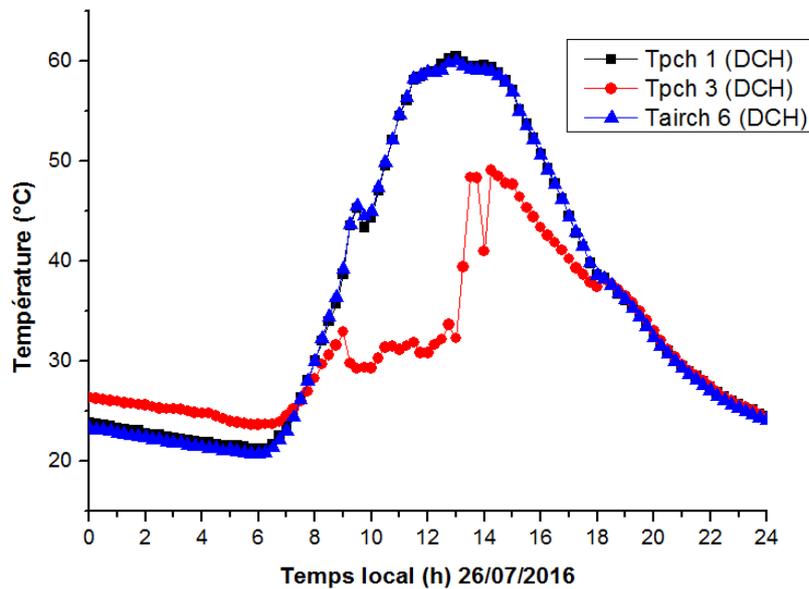


Figure 4.22: Evolution de la température de l'air dans la chambre de condensation (point 4 et 6) et sur l'échangeur (point 1 et 3) du distillateur avec chambre au cours de la journée du 26 juillet 2016.

- Evolution horaire de la production de la journée du 25 juillet 2016

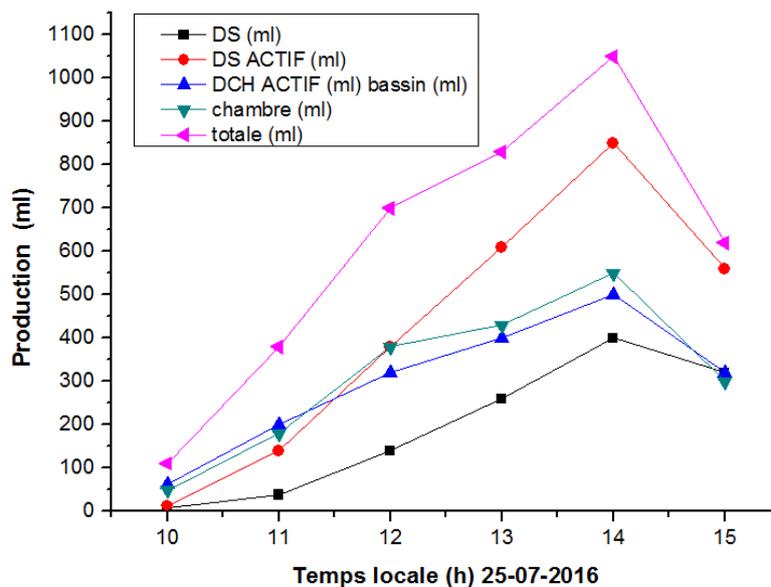


Figure 4.23 : Evolution horaire de la production de la journée du 25 juillet 2016

▪ Evolution horaire de la production de la journée du 26 juillet 2016

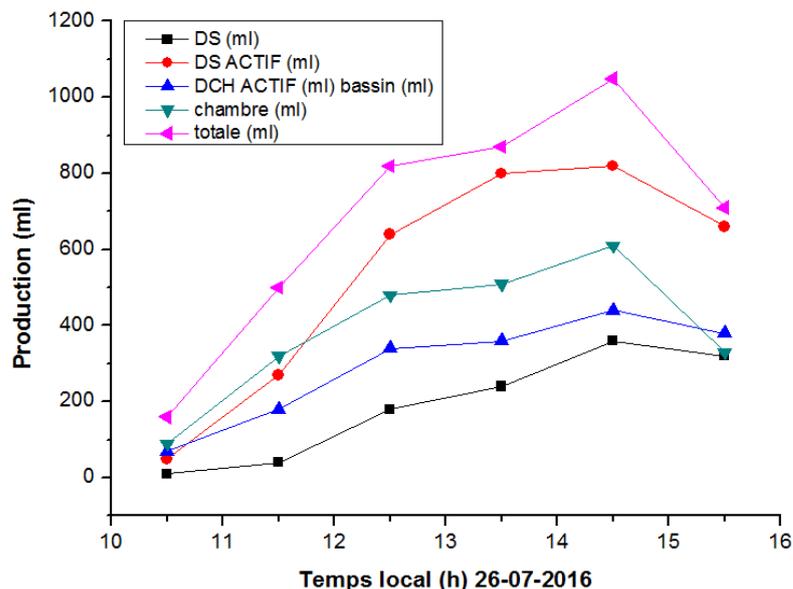


Figure 4.24 : Evolution horaire de la production de la journée du 26 juillet 2016

▪ Evolution horaire de la production cumulée du distillat dans les trois distillateurs au cours de 25 juillet 2016

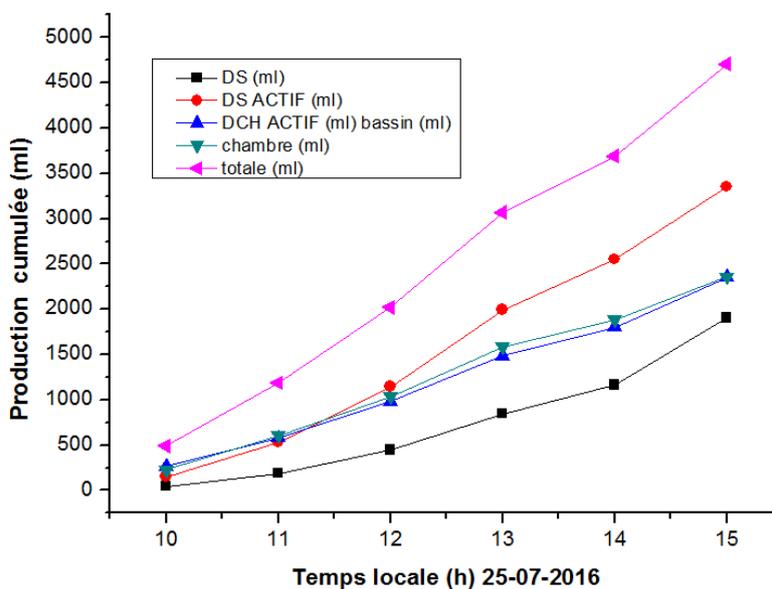


Figure 4.25 : Evolution horaire de la production cumulée du distillat dans les trois distillateurs au cours de 25 juillet 2016.

- Evolution horaire de la production cumulée du distillat dans les trois distillateurs au cours de 26 juillet 2016

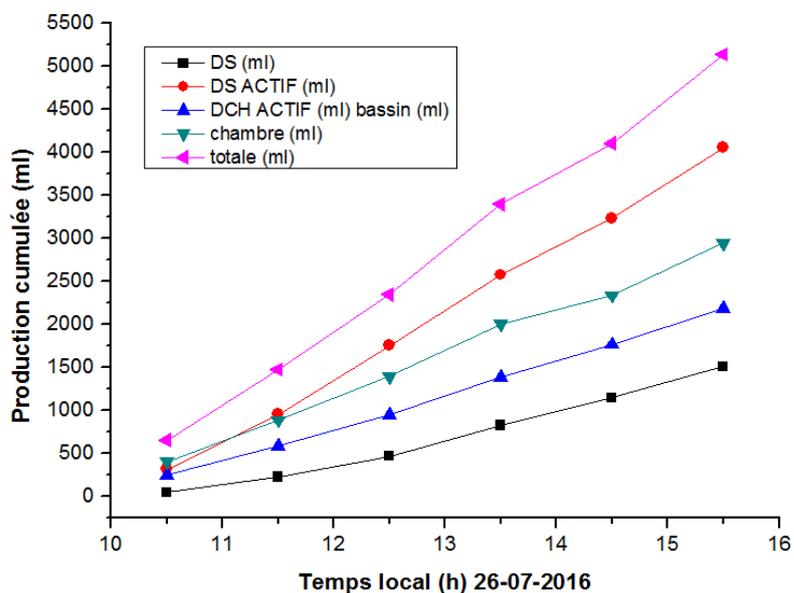


Figure 4.26 : Evolution horaire de la production cumulée du distillat dans les trois distillateurs au cours de 26 juillet 2016.