

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université AboubekrBelkaïd – Tlemcen

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTERE

Option : MACHINES THERMIQUES

## THÈME

MODÉLISATION ET EXPÉRIMENTALE D'UN  
DISTILLATEUR SOLAIRE COUPLÉ À UN  
CONDENSEUR

Présenté Par

Mr :Houcine MOUNGAR

Membres de jury :

Président :	<b>Mr. Y. Khadraoui</b>	Professeur	U.TLEMCEN
Rapporteur :	<b>Mr.A.Azzi</b>	Maitre de conférences	U.TLEMCEN
	<b>Mr.M.Benhammou</b>	Attaché de recherche	URERMS
Examineurs:	<b>Mr. R. Saim</b>	Maitre de conférences	U.TLEMCEN
	<b>Mr. K. Aliane</b>	Maitre de conférence	U.TLEMCEN

2011-2012

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ وَالصَّلَاةَ عَلَى خَيْرِ الْأَنْبَاءِ سَيِّدِنَا مُحَمَّدٍ عَلَيْهِ  
الصَّلَاةُ وَالسَّلَامُ تَعْدَادَ قَطْرَاتِ النَّدَى وَمَنِ اتَّبَعَ سَبِيلَ رَيْبِهِ فَاهْتَدَى وَتَعْدَادَ مَا  
ذَكَرَهُ الذَّاكِرُونَ وَغُفَلَ عَنِ ذِكْرِهِ الْغَافِلُونَ.

سُبْحَانَكَ اللَّهُمَّ رَبَّنَا وَنِعْمَ دَعْوَاكَ تَعْدَادَ خَلْقِكَ وَمَدَادَ كَلِمَاتِكَ وَمَلَأَ  
مَلَكُوتَكَ، وَمِثْلَهُ لِكُلِّ حَرْفٍ مِنْ كُلِّ تَسْبِيحِهِ سَبِّحْ لَكَ يَا كُلُّ مَلِكٍ مِنْ  
مَلَائِكَتِكَ، وَمِثْلَهُ لِكُلِّ حَرْفٍ مِنْ كُلِّ حَسَنَةٍ أَكْتَبْتَ فِي صُحُوفِكَ كُلَّ خَلْقٍ مِنْ  
خَلْقِكَ، وَمِثْلَهُ لِكُلِّ حَرْفٍ مِنْ كُلِّ تَسْبِيحِهِ أَثْبَتَ فِيهَا أَنْتَ عَلَى نَفْسِكَ، وَمِثْلَهُ  
لِكُلِّ حَرْفٍ مِنْ كُلِّ نِعْمَةٍ أَنْعَمْتَ بِهَا عَلَى كُلِّ خَلْقٍ مِنْ خَلْقِكَ، وَمِثْلَهُ لِكُلِّ  
حَرْفٍ مِنْ كُلِّ تَسْبِيحِهِ سَبِّحْ لَكَ يَا كُلُّ خَلْقٍ مِنْ خَلْقِكَ، وَمِثْلَهُ لِكُلِّ ذَرَّةٍ مِنْ  
مَدَادِ كَلِمَاتِكَ سُبْحَانَكَ اللَّهُمَّ رَبَّنَا وَنِعْمَ دَعْوَاكَ.

## إهداء

أهدى هذا العمل المتواضع إلى روح والداي الكريمين وإلى روح الأخت  
الغالية أم عبد الغنى. وإلى روح الإسناد عمر مركبي رحمه الله وأسكنهم  
فسيح جناته. كما أهديه إلى كل أساتذتي وأخوتي وأصدقائي وزملائي في  
الدراسة والعمل وإلى كل من نسيه قلبي ولم ينسأ قلبي.

# Nomenclature

## Lettres latin

$e$	épaisseur	$m$
$T$	Température	$^{\circ}C$
$\Delta T$	Différence de température	$^{\circ}C$
$Q$	Flux de chaleur	$W$
$Q_{ev}$	Flux d'évaporation	$W/m^2$
$Q_{eau}$	Flux absorbé par l'eau distillée	$W/m^2$
$L_V$	Chaleur latente de vaporisation	$J/kg$
$P$	Pression de saturation	$mmHg$
$\dot{m}_{ev}$	Debit d'évaporation	$kg/s \cdot m^2$
$m_d$	Débit du distillat	$Kg/s$
$w$	vitesse du vent	$m/s$
$L$	Longueur	$M$
$h$	Coefficient de transfert de chaleur	$W/(m^2 \cdot K^{\circ})$
$G_n$	Puissance solaire reçue par le condenseur	$W/m^2$
$G$	Puissance solaire reçue par le distillateur	$W/m^2$
$C_p$	Chaleur spécifique	$J/(kg \cdot K^{\circ})$
$g$	Champ de gravitation = 9.81	$H$
$t$	Temps	$S$
$TC$	Heure du lever du soleil	$H$
$TL$	Heure du coucher du soleil	$H$
$TL$	Temps local du site	$H$
$TSM$	Temps solaire moyen	$H$

TSV	Temps solaire vrai	H
E	Equation de correction du temps	Mn
n	Numéro du jour par rapport à l'année	

**Lettres grecques :**

$\lambda$	coefficient de conduction	$W/m.k$
$\alpha$	coefficient d'absorption	
$\alpha_s$	Hauteur solaire	Degré
$\alpha$	coefficient d'absorption	
$\tau$	coefficient de transmission	
$\epsilon$	émissivité	
$\phi$	La latitude du lieu	Degré
$\theta$	Angle d'incidence du rayonnement sur un plan	Degré
$\sigma$	Constante de Boltzmann ( $=5.6697 \times 10^{-8}$ )	$W/m^2.K^4$
$\psi$	Orientation du plan	Degré
$\phi$	Longitude du lieu	Degré
$\pi$	Nombre radian (= 3,14)	
$\omega$	Angle horaire degré	Degré
$\gamma$	Angle de l'azimut de la surface	Degré
$\gamma_s$	Angle de l'azimut solaire	Degré
$\Gamma$	Angle du jour	Degré
$\delta$	Angle de déclinaison	Degré
$\beta$	Coefficient d'expansion thermique de l'eau	$1/K^\circ$
$\mu$	Viscosité dynamique	$Kg/m.s$
$\nu$	Viscosité cinématique	$m^2/s$
$\rho$	Masse volumique	$Kg/m^3$
$\rho$	Coefficient de réflexion	
$\rho_g$	Albédo du sol	

$\eta_{ef}$  Efficacité effective

$\eta_g$  Efficacité globale

## Indices

a Ambient

sk Ciel

c Convection

Cond 1&2 Condensation au distillateur et au condenseur

evp Evaporation

v Vitre

vi Face interne de la vitre du distillateur

ve Face externe de la vitre du distillateur

ci Face interne de la couverture transparente du condenseur

ce Face externe de la couverture transparente du condenseur

e Eau

ci Face interne de la vitre du condenseur

ce Face externe de la vitre du condenseur

r Rayonnement

eff Effectif

s-vi Saumur – vitre interne

ve-sk Vitre (face externe) - ciel

p-s Bac -saumure

a-vi Air- vitre (face interne)

dif Diffusion

## Nombres adimensionnels

*Pr* Nombre de PRANDLT

*Gr* Nombre de GRASHOF

*Ra* Nombre de RAYLEIGH

*Nu* Nombre de NUSSELT

## Listes des figures

<i>Figure N°1 : Un distillateur solaire conventionnel.</i>	19
<i>Figure N°2 : Photo du distillateur solaire couplé à un condenseur</i>	19
<i>Figure N°3 : Distillateur solaire couplé à un collecteur qui fonctionne en convection forcée [2]</i>	20
<i>Figure N°4 : L'orbite terrestre (1AU=1,496 x 10<sup>8</sup> KM)</i>	23
<i>Figure N°5 : Variation annuelle de l'équation de la correction du temps</i>	24
<i>Figure N°6 : Variation annuelle de la déclinaison solaire</i>	24
<i>Figure N°7 : Les angles zénith azimut et altitude</i>	25
<i>Figure N° 8 : Rayonnement direct sur une surface inclinée</i>	26
<i>Figure N°9 : Bilans du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre</i>	28
<i>Figure N°10 : Schéma représentatif du distillateur solaire couplé à un condenseur.</i>	35
<i>Figure N°11 : bilan de masse</i>	36
<i>Figure N°12: bilans thermiques</i>	38
<i>Figure N°13 : évaporateur &amp; condenseur.</i>	44
<i>Figure N°14 : montage de mesure.</i>	43
<i>Figure N°15 : G, G<sub>n</sub> ; Energies reçues par le distillateur et le condenseur. P<sub>sv</sub>, P<sub>p</sub> ; puissances solaires absorbées par la Saumure et le bassin et P<sub>v</sub>, P<sub>c</sub> ; puissances absorbées par la couverture du distillateur et du condenseur pour la journée du 11juin.</i>	47
<i>Figure N°16 : Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 17 Janvier.</i>	48
<i>Figure N°17 : Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 16 Mars.</i>	48

<i>Figure N°18: Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 11juin.</i>	49
<i>Figure N°19: Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 15 Septembre.</i>	49
<i>Figure N°20: Variation temporelle de la chaleur latente de vaporisation pour la journée du 11Juin.</i>	50
<i>Figure N°21: Variation temporelle des coefficients d'échanges thermiques pour la journée du 11Juin.</i>	50
<i>Figure N°22: Variation temporelle des coefficients d'échanges thermiques pour la journée du 11Juin.</i>	51
<i>Figure N°23: Energie solaire reçue et la masse d'évaporation pour la journée du 11Juin.</i>	51
<i>Figure N°24: Variation de la masse d'évaporation en fonction rayonnement solaire pour la journée du 11Juin.</i>	52
<i>Figure N°25: Variation temporelle du débit de distillat pour la journée du 11Juin.</i>	52
<i>Figure N°26: Variation temporelle de la masse de distillat pour la journée du 11Juin.</i>	53
<i>Figure N°27: Production cumulée durant la journée.</i>	53
<i>Figure N°28: efg : efficacité globale, efi : efficacité interne.</i>	54
<i>Figure N°29: Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur l'écart de température es=1, 2, 4, 8cm</i>	55
<i>Figure N°30: Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur le volume de distillat es=1, 2, 4, 8, 10 cm</i>	56
<i>Figure N°31: Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur le débit de distillat es=2, 4, 8 cm</i>	56
<i>Figure N°32 : Influence de la vitesse du vent sur la température de la vitre</i>	57
<i>Figure N°33 : Influence de la vitesse du vent sur le débit de distillat.</i>	57
<i>Figure N°34 : Influence de la vitesse du vent sur la production d'eau distillée.</i>	58



<i>Figure N°35 : Energie reçue et Température ambiante pour la journée du 22 Juin.</i>	59
<i>Figure N°36: Energie reçue et Température ambiante pour la journée du 23 Juin.</i>	59
<i>Figure N°37: Energie reçue et Température ambiante pour les journées du 24&amp;25 Juin.</i>	60
<i>Figure N°38 : Energie reçue et Température ambiante pour la journée du 26 Juin.</i>	60
<i>Figure N°39 : Températures des différentes composantes du distillateur pour la journée du 23Juin.</i>	61
<i>Figure N° 40 : Températures des différentes composantes du distillateur pour les journées du 24 &amp; 25 Juin.</i>	61
<i>Figure N° 41 : Températures des différentes composantes du distillateur pour la journée du 26 Juin.</i>	62
<i>Figure N° 42 : Températures des différentes composantes du distillateur pour les journées du 27 &amp; 28 Juin.</i>	62
<i>Figure N° 43 : L'évolution de l'humidité et la température à l'intérieur du distillateur pour les journées du 28 Juin au 3 Juillet.</i>	63
<i>Figure N° 44 : L'évolution de l'humidité et la température à l'intérieur du distillateur pour la journée du 26 Juin.</i>	63
<i>Figure N° 45 : Volume de distillat et la vitesse du vent durant la journée du 22 Juin.</i>	64
<i>Figure N° 46 : Volume du distillât et la vitesse du vent durant la journée du 23 Juin.</i>	64
<i>Figure N° 47 : Volume du distillât et la vitesse du vent durant la journée du 24 Juin.</i>	65
<i>Figure N° 48 : Débit de distillat durant la journée du 23 Juin.</i>	65

## Liste des tableaux

<i>Tableau N°1 : Les constantes caractérisant l'état de l'atmosphère.</i>	31
<b>Tableau N° 2: Récapitulatif de différents éléments du distillateur</b>	<b>41</b>
<b>Tableau N° 3: Coût des différents éléments du distillateur.</b>	<b>44</b>
<b>Tableau N° 4: La production moyenne du prototype.</b>	<b>47</b>
<i>Tableau N° 5: Paramètres de la qualité d'eau avant distillation.</i>	66
<i>Tableau N° 6: Paramètres de la qualité d'eau après distillation (ANRH).</i>	67
<i>Tableau N° 7: Paramètres de la qualité d'eau après distillation (URERMS).</i>	73
<i>Tableau N° 8: Comparaison des différents types de distillateurs.</i>	78

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENRALE</b>	<b>15</b>
<hr/> <b>CHAPITRE I      CONNAISSANCE GENERALE</b> <hr/>	
<b>I.1. Introduction</b>	<b>18</b>
<b>I.2. Description du distillateur solaire</b>	<b>18</b>
<b>I.3. Classification et mode opératoire des distillateurs solaires</b>	<b>20</b>
<b>I.4. Objectifs du travail</b>	<b>21</b>
<hr/> <b>CHAPITRE II    CARACTERISTIQUE GENERALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE</b> <hr/>	
<b>II.1. Introduction</b>	<b>23</b>
<b>II.2. Constitution physique du soleil</b>	<b>23</b>
<b>II.3. Les grandeurs astronomiques</b>	<b>23</b>
II.3.1. Le temps solaire vrai TSV	23
II.3.2. Les coordonnées terrestres	25
<b>II.4. Composantes du rayonnement solaire</b>	<b>27</b>
II.4.1. Le rayonnement direct	28
II.4.2. Le rayonnement diffus	29
II.4.3. Le rayonnement solaire global	29
II.4.4. Le rayonnement réfléchi	30
<b>II.5. Les modèle de Calcul du rayonnement solaire global incident sur une surface inclinée</b>	<b>30</b>
II.5.1. Le modèle de LIU et JORDAN 1963	31
II.5.2. Modèle de PERRIN BRICHAMBEUT	32
<hr/> <b>CHAPITRE III    ETUDE THEORIQUE &amp; DEVELOPPEMENT MATHEMATIQUE</b> <hr/>	
<b>III.1. Description et principe de fonctionnement du prototype</b>	<b>34</b>
<b>III.2. Hypothèses simplificatrices</b>	<b>34</b>

<b>III.3. Bilans de masses</b>	36
III.3.1. Bilan de masse au niveau du distillateur	36
III.3.2. Bilan de masse au niveau du condenseur	37
<b>III.4. Bilans thermique du distillateur</b>	37
III.4.1. Bilan au niveau de la vitre externe	38
III.4.2. Bilan au niveau de la vitre interne	38
III.4.3. Bilan au niveau de la saumure	38
III.4.4. Bilan au niveau de la plaque d'absorption	39
<b>III.5. Bilans thermique du condenseur</b>	39
III.5.1. Bilan au niveau de la vitre externe	39
III.5.2. Bilan au niveau de la vitre interne	39
<b>III.6. Calcule des coefficients d'échanges thermiques</b>	39
<hr/> <hr/>	
CHAPITRE IV	DESCRIPTION DU PROTOTYPE EXPERIMENTAL
<hr/> <hr/>	
<b>IV .1. Introduction</b>	43
<b>IV .2. Expérimentation</b>	44
<b>IV .3. Montage de mesure</b>	44
<b>IV .4. Calcul de la rentabilité du projet</b>	46
<hr/> <hr/>	
CHAPITRE V	RESULTATS & DESCUTIOS
<hr/> <hr/>	
<b>V .1. Résultats théoriques</b>	48
V .1.1.Introduction	49
V .1.2.Variation de la puissance solaire	49
V .1.3. Températures des différentes composantes de distillateur	49
V .1.4. Variation temporelle des coefficients d'échanges	52
V .1.5.Variation temporelle de la masse d'évaporation	53
V .1.6.Variation temporelle du débit de distillation	54
V .1.7.L'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau	56
V .1.7.1. L'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur l'écart de température	56

V .1.7.2. L'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur la production du distillat	57
V .1.7.3. L'influence de la vitesse du vent	58
<b>V .2. Résultats expérimentaux</b>	60
V .2. 1. Illustration	60
<b>V .3. Analyses physicochimiques</b>	68
<b>V .4. Conclusion</b>	70
<b>Bibliographie</b>	70
<b>Annexe A</b>	75
<b>Annexe B</b>	77
<b>Annexe C</b>	78

# Introduction générale

L'eau douce ne représente que 2,5 % du volume total d'eau sur la planète. Elle est très inégalement distribuée. Les précipitations sont très variables. La sécheresse peut durer des mois, c'est le cas des pays du Maghreb, du Golf et de l'Asie Centrale. Les besoins en eau potable dans ces pays augmentent d'une manière continue et inversement proportionnelle aux ressources d'eau douce, les réserves souterraines se trouvent constamment diminuées. Une grande partie des réserves d'eau est constituée d'eau saumâtre. Le dessalement de ces eaux par des unités classiques de traitement nécessite beaucoup d'énergie électrique et/ou calorifique.

Les pays arides bénéficient généralement d'un grand potentiel d'énergie solaire (gratuit, propre et disponible en permanence et renouvelable par excellence) dont l'exploitation peut fournir une solution durable à l'approvisionnement en eau douce. La distillation solaire à effet de serre est l'une des applications utilisant la conversion thermique solaire à basse température pour le dessalement des eaux saumâtres qui peut répondre à l'approvisionnement en eau potable, à l'échelle de famille ou même d'une petite localité. Cette application nécessite :

- ✓ L'effet de serre lié essentiellement aux propriétés optiques des vitres et/ou des matières plastiques qui sont parfaitement transparentes au rayonnement solaire visible, et opaques au rayonnement infrarouge.

- ✓ Source d'énergie (le soleil), en transformant l'énergie solaire reçue sous forme de rayonnements en énergie thermique par l'intermédiaire des installations solaires.

En effet, les projets de distillation solaire ont fait leur preuve dans plusieurs endroits du monde. La distillation solaire est une technologie historique. L'utilisation moderne de la distillation solaire de l'eau salée ou saumâtre a commencé en 1872, dans le nord du Chili par l'installation d'un distillateur solaire de type bassin, qui a permis de satisfaire les besoins de la communauté pendant plusieurs années. Depuis 1954, les expériences se sont multipliées, des procédés thermiques sont mis au point et utilisés pour dessaler l'eau de mer et l'eau saumâtre. Par ailleurs, plusieurs projets de recherche sur les procédés de dessalement sont développés.

Dans ce contexte vient s'inscrire ce projet, qui consiste à réaliser un distillateur solaire à effet de serre couplé à un condenseur. L'objectif de notre travail s'étale sur deux axes :

- le premier un développement mathématique et modélisation numérique du comportement du distillateur proposé.

- Le deuxième axe est la réalisation et la mise en marche du prototype étudié afin d'arriver à une étude comparative des résultats de simulation et d'expérimentation. Ce qui représente une étape très importante dans notre étude afin de bien caler le modèle mathématique développé en utilisant Matlab, qui peut être une plate forme pour d'autres

développements ainsi pour bien comprendre expérimentalement le comportement du distillateur solaire.

Le présent travail se compose de cinq chapitres :

**Le premier chapitre**, est consacré à l'étude bibliographique et l'historique des travaux antérieurs réalisés durant la dernière décennie sur les distillateurs solaires.

**Le deuxième chapitre**, est consacré aux caractéristiques générales du rayonnement solaire.

**Le troisième chapitre**, est consacré à l'étude théorique et au développement mathématique en appliquant le bilan thermique sur chaque composante du distillateur solaire afin d'obtenir un système d'équation différentiel.

**Le quatrième chapitre**, est consacré à la description du dispositif expérimental et instruments de mesure, par la suite une étude économique de la rentabilité du prototype.

**Le cinquième chapitre**, est consacré à l'illustration des résultats théoriques et expérimentaux du prototype et leurs interprétations.

Ce mémoire est doté de plusieurs annexes, où sont représentés :

- la résolution numérique des équations différentielles par la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG ;
- la comparaison des différents types de distillateur ;
- les résultats d'analyse physico-chimiques d'eau distillée réalisés à l'A.N.R.H /ADRAR.

**Chapitre**

**I**

**CONNAISSANCE  
GENERALE**

---

**Ce chapitre est consacré à une présentation des travaux de recherche réalisés et publiés au cours de cette dernière décennie.**



## I.1. Introduction

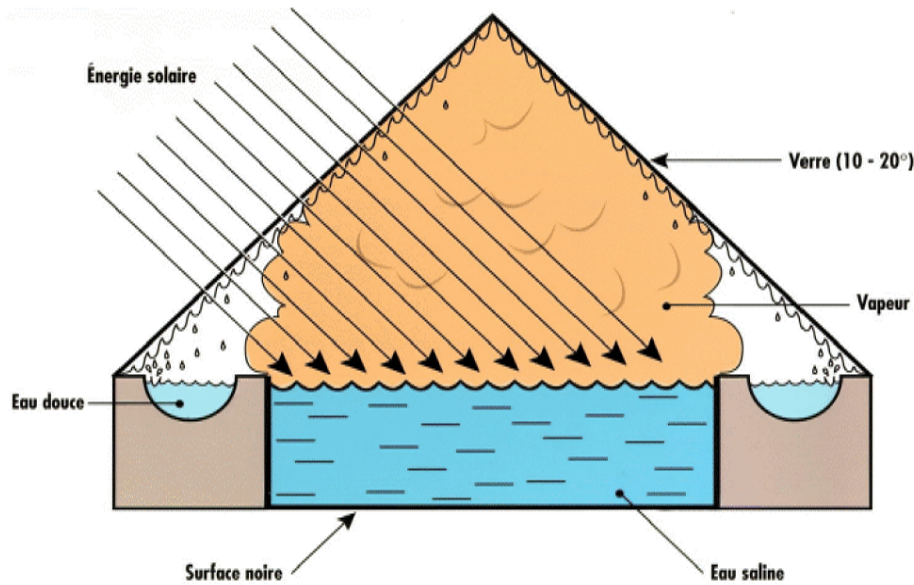
L'approvisionnement en eau douce est l'une des préoccupations de l'homme depuis l'aube des temps. Des civilisations naissent et d'autres sont anéanties à cause de l'eau. C'est un élément géostratégique qui affecte la stabilité des pays. Cette menace constante qui nous guette, a poussé les pays à investir dans la recherche dans le but de trouver des procédés pour s'acquérir de l'eau potable si précieuse. Depuis le temps, les efforts des chercheurs se sont multipliés dans la création des dispositifs pour produire de l'eau. Les résultats sont tangibles dès le 19<sup>ème</sup> siècle, où les premières unités de désalement de l'eau ont fait leur apparition, (Chili).

De nos jours, les projets de recherche sont divers et multiples et selon des différentes formes, ainsi l'investigation a touché plus le côté fonctionnement que ergonomique à la fois. Plusieurs sources sont utilisées pour faire fonctionner ces distillateurs passant par les énergies fossiles jusqu'aux énergies renouvelables. Ces dernières se présentent comme une alternative très prometteuse par leurs qualités renouvelables et inépuisables par excellence. L'énergie renouvelable est devenue la source alternative aux autres sources d'énergies depuis la crise de pétrole de 1973, où le monde industriel a trouvé des difficultés pour s'acquérir du pétrole comme source principale pour son industrie. Cette crise de 1973, ainsi la crise de l'eau potable annoncée pour les années, 2000-2020 relance fortement l'intérêt de développer rapidement des techniques de désalement moins chères, plus simples, plus fiables, est aussi moins consommatrices d'énergie et respectant l'environnement. Tout cela a bien changé notre regard envers les énergies conventionnelles et par la suite envers les énergies à caractère renouvelable.

Par ailleurs, l'utilisation et la maîtrise de ces énergies renouvelables comme source d'énergie dans l'industrie est devenue une exigence. Pour cela, la distillation comme application utilisant l'énergie solaire est devenue un sujet de recherche très important. Les résultats de recherche montrent que ces systèmes sont très prometteurs en matière de production d'eau distillée. Pour cela, les pays les plus touchés par la pénurie en eau potable augmentent leurs efforts pour trouver des systèmes beaucoup plus fiables donnant plus de productivité en matière d'eau. Et l'Algérie ne fait pas exception, car nous nous trouvons dans la zone caractérisée par la difficulté de trouver des sources naturelles d'eau. De ce fait, le recours à l'énergie solaire comme alternative pour faire fonctionner les distillateurs ou n'importe quelle autre application qui utilise de l'énergie solaire est une nécessité, bien que notre pays possède une énergie fossile très variée et une réserve très grande, mais cela ne met pas notre pays à l'abri et l'investigation dans les énergies renouvelables devient une indéniable.

## I.2. Description du distillateur solaire

Le distillateur solaire conventionnel, est un système généralement conçu d'un bac qui sert d'un récipient recevant de l'eau à distiller, et muni d'une couverture transparente généralement inclinée pour faciliter la récupération de l'eau distillée produite et calorifuge (Figure N°1).



**Figure N°1:** Un distillateur solaire conventionnel.

Par ailleurs, le distillateur solaire proposé est un distillateur solaire couplé à un condenseur. L'idée est de séparer l'évaporateur et le condenseur, pour cela nous couplons l'évaporateur, qui est un bac peint en noir par le fond servant d'absorbeur du rayonnement solaire, avec un condenseur placé en arrière de l'évaporateur et communiquant par une fente qui facilite la circulation par convection naturelle de la vapeur d'eau de l'évaporateur vers le condenseur. L'évaporateur orienté en plein sud muni d'une couverture transparente inclinée pour faciliter le ruissellement de l'eau distillée produite, car la couverture transparente dans l'évaporateur joue le rôle d'un deuxième condenseur.



**Figure N°2 :** Un distillateur solaire couplé à un condenseur

### I.3. Classification et mode opératoire des distillateurs solaires :

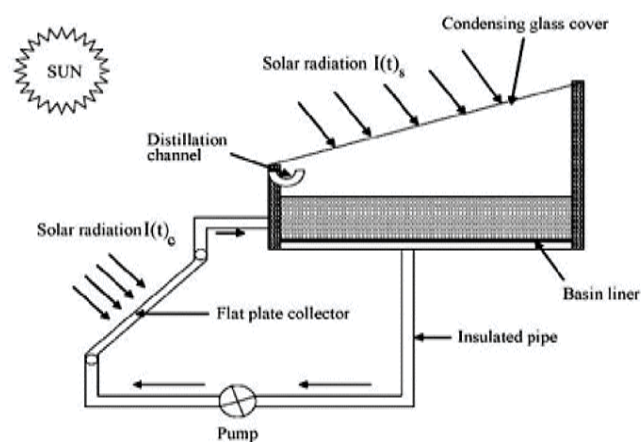
Les distillateurs solaires à effet de serre, se divisent en deux grandes classes. Selon le mode opératoire, nous distinguons les distillateurs actifs et les distillateurs passifs, fonctionnant en mode direct et/ou indirect (annexe B).

Cependant, à titre d'orientation, un bref historique sur les travaux effectués dans le domaine de la distillation et le dessalement solaire de l'eau se révèle utile.

*Tchinda et al.*, ont proposé une évaluation des performances thermiques d'un distillateur solaire fonctionnant en mode indirect. L'eau saumâtre est chauffée dans un capteur solaire plan séparé de la chambre de distillation, laquelle est partitionnée par un échangeur plan à tube refroidi d'une manière continue [1].

*Adel et al.*, ont étudié expérimentalement et numériquement les performances d'une unité de distillation solaire active avec multiples cycles de condensation-évaporation couplée à un capteur solaire plan pour chauffer l'eau saumâtre. La chambre de distillation se compose de l'unité évaporation et de l'unité condensation, la circulation de l'air entre ces deux unités se fait par convection naturelle [2].

*Rai et al.*, ont proposé l'ajout d'un collecteur qui donne toujours une énergie thermique supplémentaire au bassin. Une pompe est utilisée pour diffuser l'eau du bassin au collecteur. Ils ont trouvé que la production quotidienne d'un distillateur couplé avec un collecteur est toujours 24% plus élevée que celui sans couplage dans le cas de la convection forcée.



**Figure N°3** : Distillateur solaire couplé à un collecteur qui fonctionne en convection forcée [2]

*Fedali et al.*, ont examiné théoriquement et expérimentalement un distillateur simple [4]. Le modèle théorique, basé sur la résolution de l'équation énergétique dépendant du temps pour l'eau, la vitre, l'isolant et le bassin. Les essais expérimentaux ont été réalisés pour vérifier le modèle théorique et examiner l'influence des paramètres de conception qui ne sont pas mentionnés dans la théorie, c'est-à-dire l'angle d'inclinaison de la couverture verrière et l'orientation du distillateur. Les expériences ont été menées à Batna, en Algérie au cours d'une série de tests effectués durant 6 jours du mois de juillet 2007 sur une eau ordinaire et sur l'eau de mer. Le rendement journalier du distillateur solaire est de 2.5 litres/jour pour une surface de l'absorbeur de  $0.54 \text{ m}^2$ .

*Boukar et al.*, ont présenté la construction et l'expérimentation d'un distillateur solaire vertical fonctionnant en mode indirect [7]. L'évaporation et la condensation sont effectuées séparément dans deux compartiments et ces deux compartiments sont séparés par une cloison isolée par la laine de verre d'épaisseur 0.35 m. La surface de captation est de 0.942 m<sup>2</sup> et d'évaporation est de 0.869 m<sup>2</sup>. L'eau ruisselle derrière la plaque absorbante du capteur solaire. La vapeur circule naturellement du compartiment d'évaporation vers le compartiment de condensation à travers deux ouvertures.

*El-Bahi et al.*, ont étudié expérimentalement l'effet d'ajouter un condenseur externe à un distillateur simple, avec une inclinaison minimale (4°). Une fraction de la vapeur d'eau est condensée sur la face interne du vitrage du distillateur tandis que le reste a été diffusé vers le condenseur. Ils ont trouvé que le rendement du prototype atteint 71%. Ils ont mesuré la température ambiante et les températures des différents points de l'évaporateur et du condenseur [13]. L'efficacité en Juin, Juillet et Août a été améliorée jusqu'à 75%.

#### **I.4. Objectifs du travail**

La maîtrise numérique et expérimentale des distillateurs solaires est indispensable. Ce présent travail est une plate forme numérique et expérimentale permettant d'étudier le comportement du distillateur solaire couplé à un condenseur, réalisé au sein de l'Unité de Recherche des Energies Renouvelables en Milieu saharien d'Adrar.

Le développement du prototype est précédé par un travail approfondi. Par la suite, les objectifs tracés dans ce travail se résument à :

- Développer un code de calcul pour simuler le comportement du distillateur qui peut servir de plate forme pour d'autres développements.
- Etudier l'influence de séparation de l'évaporateur et du condenseur.
- L'étude expérimentale et calage de code calcul.

# Chapitre

## II

# CARACTERISTIQUES GENERALES DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Dans cette partie nous nous proposons de présenter les modèles de calcul du rayonnement solaire instantanés (direct, diffus et global) en un lieu quelconque et à un instant quelconque de la journée ou de l'année.

Ce calcul nécessite tout d'abord la connaissance des mouvements relatifs de la terre et du soleil, c'est la raison pour laquelle nous ferons quelques rappels élémentaires d'astronomie.

## II.1. Introduction

Vu le gisement solaire énorme qui caractérise l'Algérie où la durée d'insolation peut atteindre les 14 heures par jour durant la période estivale et particulièrement au sud, il est primordial, du point de vue économique et écologique, d'utiliser les énergies renouvelables gratuites et non polluantes.

L'énergie solaire peut être convertie en énergie thermique ou en énergie photovoltaïque. L'étude de la distillation solaire nécessite une bonne connaissance du gisement solaire. Pour cela, nous proposons des modèles semi empiriques les plus fréquemment employés.

## II.2. Constitution physique du soleil

Le soleil est une sphère gazeuse de 1 391 000 km de diamètre, dont la distance moyenne à la terre est de 149 450 000 km. Le minimum de cette distance se situe vers le solstice hivernal et le maximum durant le solstice estival [11].

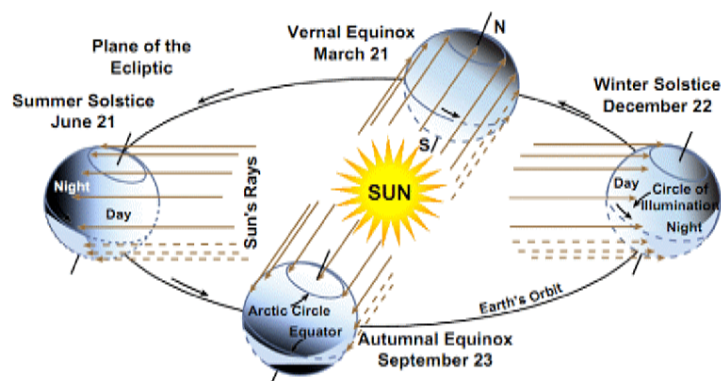
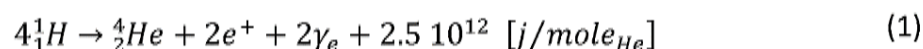


Figure by MIT OCW.

Figure N°4 : L'orbite terrestre (1AU=1,496 x 10<sup>8</sup> KM)

L'énergie émise par le soleil provient d'une suite de réactions thermonucléaires qui s'écrivent globalement :



La masse du soleil est égale à  $2.10^{30}$  KG et il contient 30% d'hydrogène .L'âge du soleil est estimé à  $5.10^9$  ans. Pendant toute sa vie il n'a dépensé que 14% de ses réserves d'énergie.

## II.3. Les grandeurs astronomiques

### II.3.1. Le temps solaire vrai TSV

Utilisé dans tous les angles solaires apparaissant dans les corrélations. C'est le temps basé sur le mouvement angulaire apparent du soleil à travers le ciel, à midi solaire, le moment de passage du soleil par le méridien de l'observateur.

Pour passer du temps légal au TSV, il y a lieu d'apporter la correction suivante [11] :

$$TSV = TSM + \frac{E}{60} - 4 \frac{\phi}{60} = TL - 1 + \frac{E}{60} - 4 \frac{\phi}{15} \quad (2)$$

Avec :

$\phi$  : Longitude du site,

TL: Temps local du site,

TSM: Temps solaire moyen,

E : Equation du temps, elle est donnée par [11] :

$$E = (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032070 \sin \Gamma - 0.014651 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma)(229.18) \quad (3)$$

Le premier terme entre parenthèse donne E en radian. Il faut multiplier par 229.18 pour le convertir en minutes.

$$\Gamma = 2\pi \frac{(n-1)}{365} \quad (4)$$

$\Gamma$  : L'angle de jour:

n : le numéro du jour de l'année ( n = 1 au 1<sup>er</sup> janvier )

Sur la figure n°2, nous pouvons suivre la variation annuelle de la valeur de la correction du temps apporté par l'équation (3).

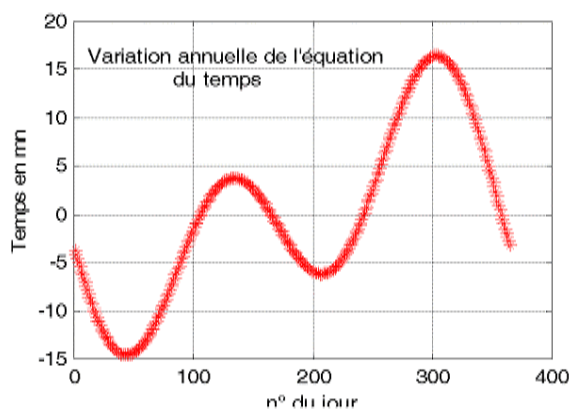


Figure N°5 : Variation annuelle de l'équation de la correction du temps

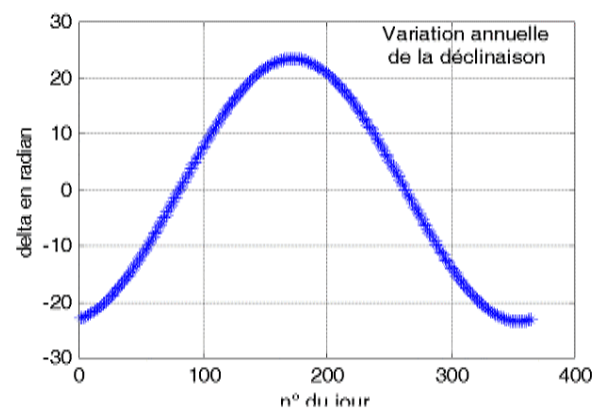


Figure N°6 : Variation annuelle de la déclinaison solaire

### II.3.2. Les coordonnées terrestres

Voici la définition de certains angles astronomiques :

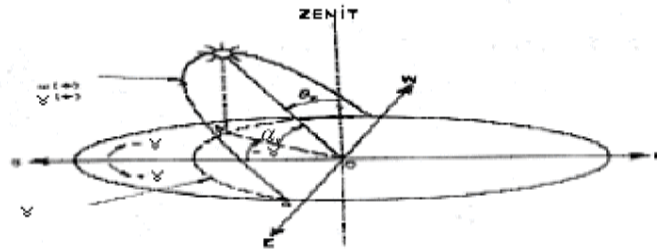


Figure N°7: Les angles zénith, azimut et altitude

➤ **La latitude  $\phi$**

C'est la localisation angulaire d'un point au nord ou au sud de l'équateur. Sa valeur est comprise entre  $(-90^\circ)$  au sud et  $(+90^\circ)$  au nord de l'équateur  $(-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ)$ .

➤ **La déclinaison  $\delta$**

C'est la position angulaire du soleil à midi solaire lorsque le soleil passe par le méridien local par rapport au plan de l'équateur. Il est positif au nord et négatif au sud. La valeur de  $\delta$  est comprise entre  $(-23.45^\circ)$  et  $(+23.5^\circ)$ ,  $\delta$  est positif au printemps et en été, négatif en automne et en hiver (figure 3).

La déclinaison étant une fonction continue du temps, sa variation au cours de l'année peut être calculée par l'équation (5)

$$\delta = (0.006918 - 0.3399912 \cos \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.00907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma)(180/\pi) \quad (5)$$

$n$  : le numéro du jour de l'année.

Cette équation donne l'angle solaire avec une précision de 0.0006 rad.

➤ **L'inclinaison  $\beta$  de la surface**

C'est l'angle que fait le plan de la surface en question avec l'horizontale.  $(0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ)$

➤ **L'azimut de la surface  $\gamma$**

C'est l'angle décrit par la déviation de la projection de la normale à la surface sur un plan horizontal par rapport au méridien local.  $\gamma = 0$  au sud, négatif à l'Est et positif à l'Ouest.  $(-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ)$



➤ **L'angle horaire  $\omega$**

C'est le déplacement angulaire du soleil à l'Est ou à l'Ouest du méridien local, dû à la rotation de la terre autour de son propre axe, à raison de  $15^\circ$  par heure. Négatif avant midi et positif après midi.

$$\omega = 15(T_{sv} - 12) \quad (6)$$

D'autres angles supplémentaires sont définis pour déterminer la position du soleil dans le ciel :

➤ **L'angle du zénith  $\theta_z$**

L'angle entre la verticale et la ligne du soleil est donc l'angle d'incidence d'un rayonnement direct sur une surface horizontale.

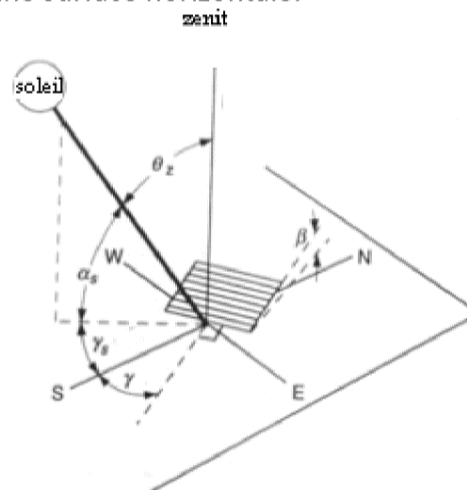


Figure N° 8. : Rayonnement direct sur une surface inclinée

➤ **La hauteur du soleil  $\alpha_s$**

La hauteur du soleil est décrite par l'angle entre l'horizontale et la ligne du soleil, c'est à dire l'angle complémentaire de l'angle du zénith.

$$\sin \alpha_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \omega \cos \phi \cos \delta \quad (7)$$

➤ **L'azimut solaire  $\gamma_s$**

C'est le déplacement angulaire, à partir du sud, de la projection du rayonnement direct sur le plan horizontal. Négatif vers l'Est et positif vers l'Ouest.

La figure (5) illustre ces différents angles.

➤ **Angle d'incidence  $\theta$  du rayonnement direct sur une surface**

C'est l'angle que fait la direction du rayonnement solaire direct sur une surface avec la normale à cette surface. Il existe une relation qui lie les différents angles à l'angle d'incidence du rayonnement direct  $\theta$  sur une surface [10].

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (8)$$

et

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (9)$$

Minimiser la valeur de cet angle revient à maximiser le flux du rayonnement direct sur une surface.

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (10)$$

Les surfaces avec une inclinaison  $\beta$  par rapport à l'horizontale peuvent être assimilées à une surface horizontale à une latitude artificielle de  $(\phi - \beta)$ . L'équation (7) conduit dans ce cas à :

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (11)$$

Il existe un facteur géométrique  $R_b$  qui intervient pour évaluer le rapport entre un rayonnement direct sur un plan incliné et un rayonnement direct sur un plan horizontal (Figure N°3) :

$$R_b = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (12)$$

#### II.4. Composantes du rayonnement solaire

Les radiations solaires arrivent au sommet de l'atmosphère sous forme d'ondes électromagnétiques. Elles se subdivisent, premièrement, en deux parties (Figure N°6) :

- La première est directement réfléchiée vers l'espace avant de pénétrer dans l'atmosphère.
- La deuxième partie s'enfonce dans l'atmosphère, subit des réfractons et des diffractons pour être à son tour soit, renvoyée vers l'espace soit, vers la terre.

En outre, dans l'atmosphère, la vapeur d'eau et de multiples gaz absorbent certaines radiations selon leurs longueurs d'ondes. Par exemple, la vapeur d'eau est le premier responsable de l'absorption des rayons infrarouge. Les radiations absorbées par les composantes de l'atmosphère sont ensuite émises dans toutes les directions. Il en résulte que parmi les radiations solaires arrivant finalement à la terre, quelques unes sont fournies par les nuages et les autres composantes de l'atmosphère. En arrivant au sol, une fraction est réfléchiée directement vers le ciel, l'autre est reçue par la terre.

Nous pouvons regrouper les rayonnements solaires parvenant au sol en trois composantes principales qui sont:

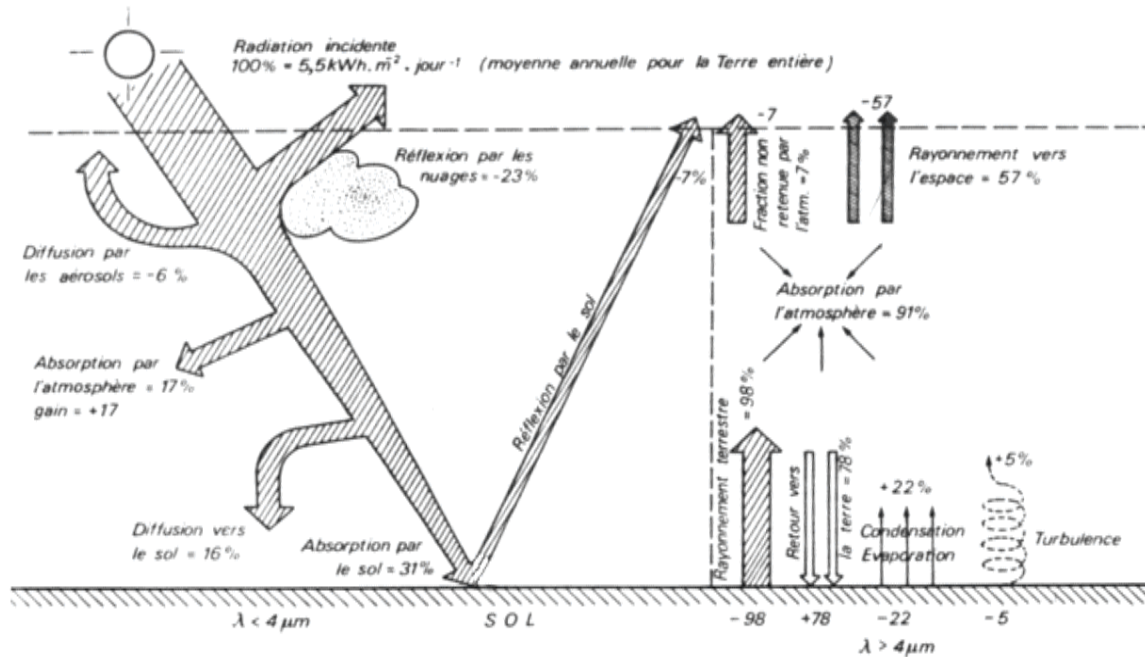


Figure N°9 : Bilan du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre

#### II.4.1. Le rayonnement direct

C'est le rayonnement parvenant directement du disque solaire et reçu sur un plan normal. Il est mesuré au moyen d'un pyréliomètre que l'on installe de façon que sa surface réceptrice soit orientée perpendiculairement aux rayons solaires, sur un support à la hauteur d'un mètre et demi du sol. Son axe de rotation doit être parallèle à celui de la terre.

Nous pouvons également estimer la valeur du rayonnement solaire direct par calcul en utilisant la formule suivante:

$$I = I_0 \sin(\alpha_s) \quad (13)$$

Où I est calculé par la formule suivante :

$$I = I_s \cdot a_*^m \quad (14)$$

Avec :

$$m = 1/\sin(\alpha_s).$$

$a_*$  : coefficient de transmission.

$\alpha_s$  : Hauteur du soleil.

$I_s$  : l'éclairement énergétique au niveau du sol sous un ciel clair à incidence normale, qui se déduit de la constante solaire  $I_0$ .

La constante solaire dépend surtout de la distance terre soleil et de l'angle d'incidence. C'est pour cela que la quantité d'énergie reçue du soleil à la limite supérieure de l'atmosphère est égale à  $I_0 \sin(\alpha_s)$ . Elle est estimée à  $1350 \text{ W/m}^2$ .

#### **II.4.2. Le rayonnement diffus**

C'est le rayonnement parvenant de toute la voûte céleste à l'exception du disque solaire. Il s'agit du rayonnement de l'atmosphère dont la longueur d'ondes varie de 0.3 à 5 microns, diffusé par les aérosols, les gouttelettes et la vapeur d'eau vers le sol, reçu sur une surface horizontale. Le mécanisme de la diffusion est dû au changement d'indice optique du milieu traversé par les rayons solaires.

#### **II.4.3. Le rayonnement solaire global**

C'est le rayonnement solaire parvenant de la voûte céleste et du disque solaire sous un angle solide  $\epsilon$  reçu sur un plan horizontal. Il est mesuré à l'aide d'un radiomètre (pyranomètre).

Le rayonnement solaire global, parvenant au sol sur une surface horizontale, est la somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire diffus. Il est désigné par la lettre G, nous obtenons la formule suivante :

$$G = I \sin(\alpha_s) + D \quad (15)$$

Le rayonnement solaire global est mesuré avec le même instrument utilisé pour mesurer le rayonnement solaire diffus en mettant la thermopile du pyranomètre en position ouverte vers le ciel et le soleil.

Le rayonnement solaire global peut être estimé à partir des formules semi empiriques.

Par exemples, celle d'ANGSTRÖM :

$$G = G_0 \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (16)$$

où

$G_0$  : La somme quotidienne du rayonnement solaire extra-terrestre reçu sur une surface horizontale.

$n$  : durée d'insolation effective, mesurée à l'aide d'un héliographe.

$N$  : durée d'insolation théorique, c'est-à-dire la durée du jour astronomique.

a et b doivent être déterminés expérimentalement ; ils varient d'un lieu à un autre et d'un intervalle de temps à un autre, d'après ANGSTRÖM avec  $a = 0.235$  et  $b = 0.78$ .

#### II.4.4. Le rayonnement réfléchi

Le rayonnement réfléchi est la composante de l'éclairement qui est réfléchi par le sol. Cette composante dépend essentiellement de la couleur de la surface réfléchissante intervenant dans la quantité du rayonnement réfléchi.

Nous mesurons le rayonnement réfléchi à l'aide d'un Pyranomètre de façon que son organe sensible soit orienté vers le sol ou vers la surface émettrice. A défaut de cet instrument, nous employons la formule, basée sur le principe que tout corps à une température supérieure à 0° Kelvin émet de l'énergie rayonnante :

$$E = \varepsilon \delta T^4 \quad (17)$$

Dans laquelle E représente l'énergie émise,  $\varepsilon$  le coefficient d'émissivité,  $\delta$  la constante de STEFAN BOLTZMANN  $\delta = 5.6697 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  et T la température absolue.

Le rapport entre le rayonnement global incident et celui réfléchi par le sol est appelé Albédo du sol que l'on mesure à l'aide d'un albedomètre ou d'un pyranomètre.

#### II.5. Modèles de Calcul du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire global reçu sur une surface inclinée peut être écrit comme suit [10];

$$I_i = I_b R_b + I_{d-iso} F_{c-s} + I_{d-cs} R_b + I_{d-hz} F_{c-hz} + I_g \rho_g F_{c-g} \quad (18)$$

Avec :

$I_i$ : le rayonnement global incident sur une surface inclinée,

$I_b$ : rayonnement direct incident sur une surface horizontale

$I_{d-iso}$ : rayonnement solaire diffus reçu uniformément de la voûte céleste, incident sur une surface inclinée,

$I_{d-cs}$ : rayonnement solaire diffus reçu de la circonférence du soleil, incident sur une surface inclinée,

$I_{d-hz}$ : rayonnement solaire diffus reçu de la bande d'horizon, incident sur une surface inclinée,

$I_g$ : le rayonnement global incident sur une surface horizontale.

**II.5.1. Le modèle de Liu et Jordan (1963)**

Dans ce modèle, le rayonnement solaire global incident sur une surface inclinée est supposé être composé de trois éléments : le rayonnement solaire direct, le rayonnement solaire diffus isotropique (celui qui arrive uniformément de la voûte céleste indépendamment de sa direction) et enfin le rayonnement solaire diffus réfléchi par le sol. Le troisième et le quatrième terme de l'équation (18) sont considérés nuls. Ainsi, le rayonnement global incident direct sur une surface inclinée d'un angle  $\beta$  par rapport à l'horizontale est calculé par l'équation suivante [14]:

$$I_{\beta} = I_{b\beta} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (19)$$

Avec :

$I_{b\beta}$  : Éclairement solaire direct incident sur une surface inclinée ;

$$I_{d\beta} = I_{bh} R_b,$$

$I_{bh}$  : Éclairement solaire direct incident sur une surface horizontale ;

$$I_{bh} = 1367 \cdot f \cdot \tau_b \cos(\theta),$$

$f$  : La correction de la distance terre-soleil ;

$$f = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(n - 2)\right), \quad \tau_b = a_0 + a_1 e^{\frac{-k}{\sin(h)}}$$

$$a_0 = a_0^* r_0, \quad a_1 = a_1^* r_1, \quad k = k^* r_k$$

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2, \quad a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2,$$

$$k^* = 0.2711 + 0.00858(2.5 - A)^2$$

$$A = 0.264[km], r_0 = 1.03, r_1 = 1.01, r_k = 1$$

$I_{d\beta}$  : Éclairement diffus incident sur un plan incliné,

$$I_{d\beta} = I_{dh} F_{C-S},$$

$I_{dh}$  : Éclairement diffus incident sur un plan horizontal ;

$$I_{dh} = 1367 f \tau_d \cos(\theta)$$

$$\text{Avec } \tau_d = 0.271 - 0.294 \tau_b$$

$F_{c-s}$  : Facteur de vue de la surface du collecteur vers le ciel ;

$$F_{c-s} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

$I_{r\beta}$  : Éclairement solaire réfléchi par le sol incident sur un plan incliné ;

$$I_{r\beta} = I_{gh} \rho F_{c-g}$$

$I_{rh}$  : Éclairement solaire réfléchi par le sol incident sur un plan horizontal ;

$$I_{gh} = I_{bh} + I_{dh}$$

$F_{c-g}$  : Facteur de vue de la surface du collecteur vers le sol ;

$$F_{c-g} = \frac{1 - \cos\beta}{2}$$

### II.5.2. Modèle de PERRIN BRICHAMBEUT

Dans ce modèle, le rayonnement solaire global reçu sur une surface inclinée d'un angle  $\beta$  par rapport au plan horizontal est donné par la formule [14] :

$$I_g = I_{b\beta} + I_{d\beta} \quad (20)$$

Avec:

$I_{b\beta}$  : Éclairement direct incident sur un plan incliné ;

$$I_{b\beta} = A \cos(\theta) e^{\frac{-1}{\beta \sin((h)+2)}} \quad (21)$$

$I_{d\beta}$  : Éclairement diffus incident sur un plan incliné ;

$$I_{d\beta} = \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) D_h + \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \rho_g G_h \quad (22)$$

$D_h$ : Éclairement diffus reçu par une surface horizontale :

$$D_h = A1.(\sin(h))0.4, \quad (23)$$

$G_h$ : Éclairement global reçu par une surface horizontale :

$$G_h = A_2 \cdot (\sin(h)) B_1, \quad (24)$$

$\rho_s$  : étant l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol) ;  $\rho_s = \begin{cases} 0.9 \text{ à } 0.8 & \text{Neige} \\ 0.8 \text{ à } 0.4 & \text{Sol clair} \\ 0.4 \text{ à } 0.2 & \text{Verdure} \end{cases}$

A, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B, B<sub>1</sub> sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère.  
[12]

**Tableau 1** : Les constantes caractérisant l'état de l'atmosphère.

Etat de l'atmosphère	A	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>
Ciel bleu foncé	1300	87	1150	6	1.25
Ciel bleu clair	1230	125	1080	4	1.22
Ciel bleu laiteux	1200	187	990	2.5	1.25



**Chapitre**

**III**

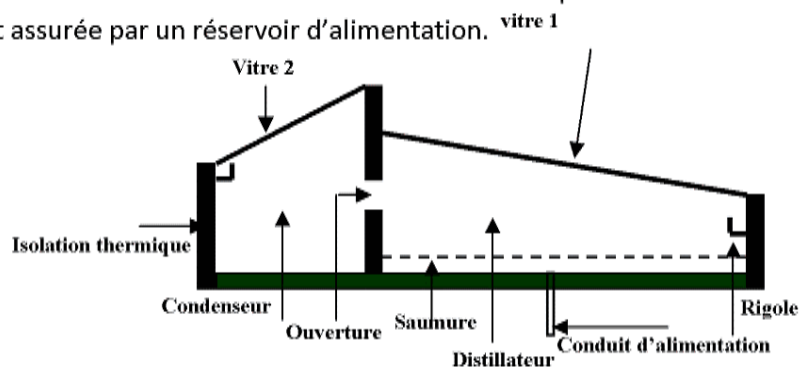
**ETUDE THEORIQUE ET  
DÉVELOPPEMENT  
MATHEMATIQUE**

---

**Cette partie est consacrée à la  
modélisation des bilans thermiques et le  
bilan de masse à l'intérieur du distillateur  
et dans chambre de condensation.**

### III.1. Description et principe de fonctionnement du prototype

Le prototype proposé est constitué d'un distillateur solaire incliné couplé à un condenseur. Il peut être considéré comme un bassin à double paroi. La paroi intérieure est en tôle galvanisée tandis que la paroi extérieure est en tôle noire. Le fond du bassin est noirci et joue le rôle de la plaque d'absorption et sur lequel s'étale une couche d'eau saumâtre. Le dessus, est fermé par une vitre transparente et inclinée d'un angle de  $10^\circ$  environ. Cette légère inclinaison a pour but de permettre le ruissellement des gouttelettes d'eau sur le vitrage. Le condenseur est un deuxième compartiment construit de la même manière que le distillateur sauf que sa toiture vitrée est inclinée approximativement de  $30^\circ$ . Le condenseur et le distillateur communiquent à travers une ouverture. L'isolation thermique du système est assurée par des lames de laine de verre de 5 cm d'épaisseur, prises en sandwich entre les parois intérieures et extérieures. Le condenseur est dirigé vers la direction du nord tandis que le distillateur est orienté dans la direction du plein sud. L'alimentation en eau saumâtre est assurée par un réservoir d'alimentation.



**Figure N°10:** Croquis représentatif du distillateur solaire couplé à un condenseur.

#### III.1.1. Principe de fonctionnement du prototype :

Le rayonnement solaire traverse le vitrage et arrive sur la plaque d'absorption dans le distillateur où il sera absorbé et transformé en chaleur, ce qui entraîne une élévation de la température de la plaque d'absorption. Cette dernière transfère une partie de sa chaleur à la couche d'eau par convection. Alors, la couche d'eau s'échauffe ce qui entraîne son évaporation. Une partie de la vapeur d'eau se condense directement sur le vitrage du distillateur et une autre partie se diffuse dans le condenseur par différence de pression entre les deux cavités et elle finit par se condenser sur la toiture du condenseur [15, 16, 17, 18].

#### III.1.2. Hypothèses simplificatrices :

Dans notre étude les hypothèses simplificatrices suivantes sont prises en considération :

1. Chaque élément du distillateur est supposé avoir une température uniforme et est représenté uniquement par un seul nœud.
2. La couche d'eau saumâtre est mince et le gradient de température suivant la verticale est négligeable.

3. Le rayonnement solaire absorbé par la couverture transparente est considéré négligeable.

4. Le rayonnement solaire absorbé par les gouttelettes d'eau est considéré négligeable.

5. La quantité de vapeur qui diffuse dans le condenseur est égale à la quantité d'eau condensée sur sa toiture.

6. Les échanges radiatifs entre les parois latérales internes sont négligeables.

7. L'effet de l'ombre reste aussi faible et peut être négligé.

8. L'air interne est considéré saturé.

9. La quantité d'eau évaporée est égale à la quantité d'eau condensée.

10. L'eau est transparente.

11. L'air à l'intérieur des deux compartiments est considéré comme gaz parfait.

### III.3. Bilan de masse

La figure ci-dessous illustre le bilan de masse dans les deux chambres.

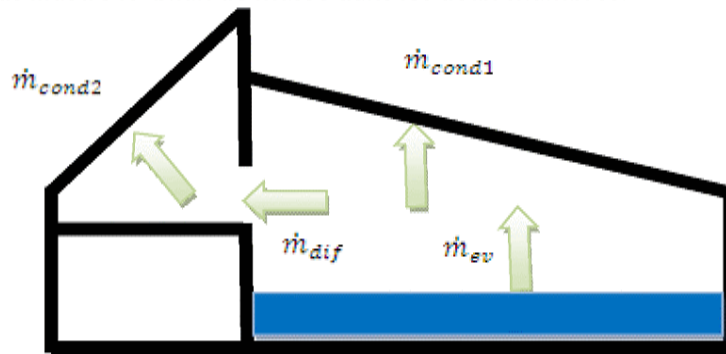


Figure N°11 : bilan de masse

$$m_{ah} = m_{as} + m_v = m_{as}(1 + w) \quad (1)$$

$m_{ah}$ ,  $m_{as}$  et  $m_v$  sont respectivement les masses de l'air humide, air sec et vapeur.

Avec:  $w = \frac{m_v}{m_{as}}$

$w$  : C'est l'humidité relative.

$$\frac{dm_{ah}}{dt} = \frac{d}{dt}(m_{as}(1 + w)) = m_{as} \frac{dw}{dt} \quad (2)$$

#### III.3.1. Bilan de masse au niveau du distillateur

$$m_{as} \frac{dw_1}{dt} = \dot{m}_{ev} - \dot{m}_{con1} - \dot{m}_{dif} \quad (3)$$

Le débit d'évaporation est donné par la formule suivante :

$$\dot{m}_{ev} = 9.15 \times 10^{-7} \times h_c (P_s - P_{vi}) \quad [\text{Kg/s.m}^2] \quad (4)$$

$P_s$  et  $P_{vi}$  sont respectivement la pression de vapeur saturée au voisinage de la saumure et au voisinage de la vitre (face interne) [mm Hg].

Ou  $\dot{m}_{cond1}$  : est le débit condensation et  $L_v$  : c'est la chaleur latente de vaporisation

$$\text{Avec: } \dot{m}_{cond1} = \dot{m}_{ev} - \dot{m}_{dif}$$

### III.3.2. Bilan de masse au niveau du condenseur

$$m_{as} \frac{dw_2}{dt} = \dot{m}_{dif} - \dot{m}_{con2} \quad (5)$$

Considérons notre mélange comme un gaz parfait en appliquant la première loi de la thermodynamique ;

$$\therefore Pv = nRT \Rightarrow Pv = \frac{m}{M} RT \Rightarrow P = \frac{c}{M} RT$$

$$\text{Avec: } c_1 = \frac{P_1 M}{RT_1}, c_2 = \frac{P_2 M}{RT_2}$$

Donc

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{M}{R} \left( \frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right) \quad (6)$$

La diffusion est modélisée par la de FICK comme suit :

$$\dot{m}_{dif} = -D \times S \times \frac{\partial c_v}{\partial x} \quad (7)$$

S étant l'air de l'ouverture par laquelle communiquent le distillateur et le condenseur.  $C_v$  est la concentration massique de la vapeur d'eau.

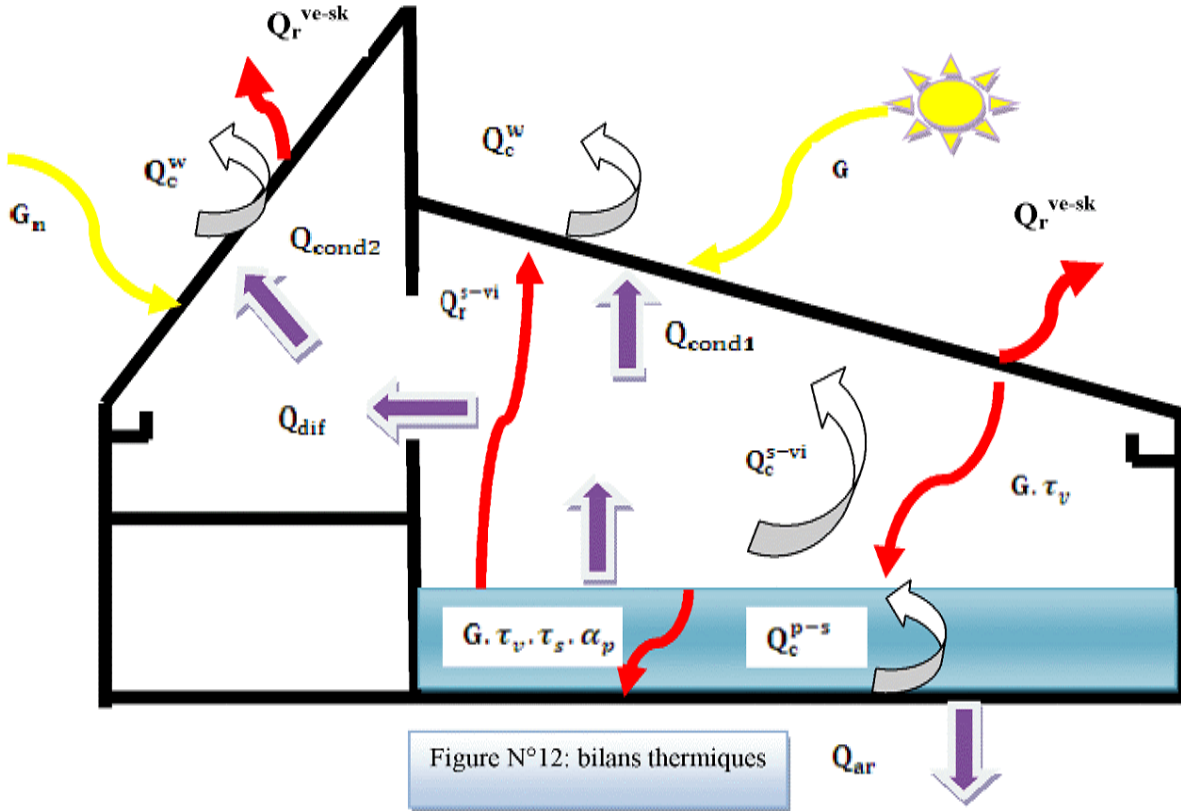
La diffusivité massique D est évaluée à partir de la relation semi empirique suivante [19]

$$D = 435.7 \frac{T^{3/2}}{P \left( V_a^{1/3} + V_v^{1/3} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_a} + \frac{1}{M_v}} \quad (8)$$

$M_a$ ,  $M_v$ ,  $V_a$  et  $V_v$  sont respectivement la masse molaire de l'air, de la vapeur d'eau, le volume moléculaire de l'air et de la vapeur.

### III.4. Bilan thermique du distillateur

Les échanges thermiques entre les différentes composantes du distillateur sont représentés comme suit :



#### III.4.1. Bilan au niveau de la vitre externe

$$\frac{1}{2} m_v c_{p_v} \frac{dT_{ve}}{dt} = \left[ \frac{1}{2} G \alpha_v + \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) + h_r^{ve-sk} (T_{ve} - T_{sk}) - h_w (T_{ve} - T_{ab}) \right] A_v \quad (9)$$

#### III.4.2. Bilan au niveau de la vitre interne

$$\frac{1}{2} m_v c_{p_v} \frac{dT_{vi}}{dt} = h_{r\ s-vi} (T_s - T_{vi}) A_s + \frac{1}{2} G \alpha_v A_v + h_{c\ s-vi} (T_s - T_{vi}) A_v + Q_{cond1} - \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) A_v \quad (10)$$

Le flux de condensation est donné par

$$Q_{cond1} = \dot{m}_{cond1} \times L_v \times A_v \quad (11)$$

#### III.4.3. Bilan au niveau de la saumure

$$m_s c_{p_s} \frac{dT_s}{dt} = G \tau_v \alpha_s A_s + h_{c\ p-s} (T_p - T_s) A_p - h_{c\ s-vi} (T_s - T_{vi}) A_s - h_{r\ s-vi} (T_s - T_{vi}) A_s - Q_{ev} \quad (12)$$

$$Q_{ev} = \dot{m}_{ev} \times L_v \times A_s \quad (13)$$

**III.4.4. Bilan au niveau de la plaque d'absorption**

$$m_p c p_p \frac{dT_p}{dt} = G \tau_v \tau_s \alpha_p A_s - h_{c p-s} (T_p - T_s) A_p - h_{ar} (T_p - T_{ab}) A_p \quad (14)$$

**III.5. Bilan thermique du condenseur****III.5.1. Bilan au niveau de la vitre externe**

$$\frac{1}{2} m_v c p_v \frac{dT_{ce}}{dt} = \left[ \frac{1}{2} G n. \alpha_v + \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{ci} - T_{ce}) - h_{r ve-sk} (T_{ce} - T_{sk}) - h_w (T_{ce} - T_{ab}) \right] A_c \quad (15)$$

**III.5.2. Bilan au niveau de la vitre interne**

$$\frac{1}{2} m_v c p_v \frac{dT_{ci}}{dt} = \left[ \frac{1}{2} G n. \alpha_v + Q_{cond2} - \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{ci} - T_{ce}) \right] A_c \quad (16)$$

$$Q_{cond2} = \dot{m}_{dif} \times L_v \quad (17)$$

**III.6. Calcul des coefficients d'échanges thermiques**

Le coefficient d'échange convectif entre la saumure et la face interne de la vitre est donné par :

$$h_{c s-vi} = 0.884 \times \left[ (T_s - T_{vi}) + \frac{(P_s - P_{vi})}{2016 - P_s} T_s \right]^{1/3} \quad (18)$$

Le coefficient d'échange par convection entre la face externe de la vitre et l'air ambiant est donné par la relation de Hottel et Woertz [2]:

$$h_w = 5.7 + 3.86 \times w \quad (19)$$

Le coefficient d'échange par rayonnement entre deux corps i et j, peut s'écrire ainsi :

$$h_r = \varepsilon_{eff} \sigma \left[ \frac{T_i^4 - T_j^4}{T_i - T_j} \right] \quad (20)$$

Avec :

$$\frac{1}{\varepsilon_{eff}} = \frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1$$

La pression de saturation de la vapeur d'eau et la chaleur latente d'évaporation sont estimées par les relations suivantes [21,22] :

$$P_{sat} = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T}\right) \quad (21)$$

$$L_v = 3.1615 \times 10^6 - 2.40714 \times 10^6 T \quad (22)$$

Le coefficient d'échange convectif entre la plaque d'absorption et la saumure est évalué par la corrélation suivante [23] :

$$h_c = \frac{\lambda}{l} \times Nu \quad (23)$$

Où :

$$Nu = C Ra^n \quad (24)$$

Les facteurs C et n sont définis selon le régime laminaire ou turbulent ainsi :

$$C = 0.54 \text{ et } n = \frac{1}{4} \text{ si } 10^5 < Ra < 10^7$$

$$C = 0.14 \text{ et } n = \frac{1}{3} \text{ si } 2.10^7 < Ra < 3.10^{10}$$

Ra est le nombre adimensionnel de Rayleigh,  $\lambda$  et  $l$  sont respectivement le coefficient de conduction thermique et la longueur caractéristique.

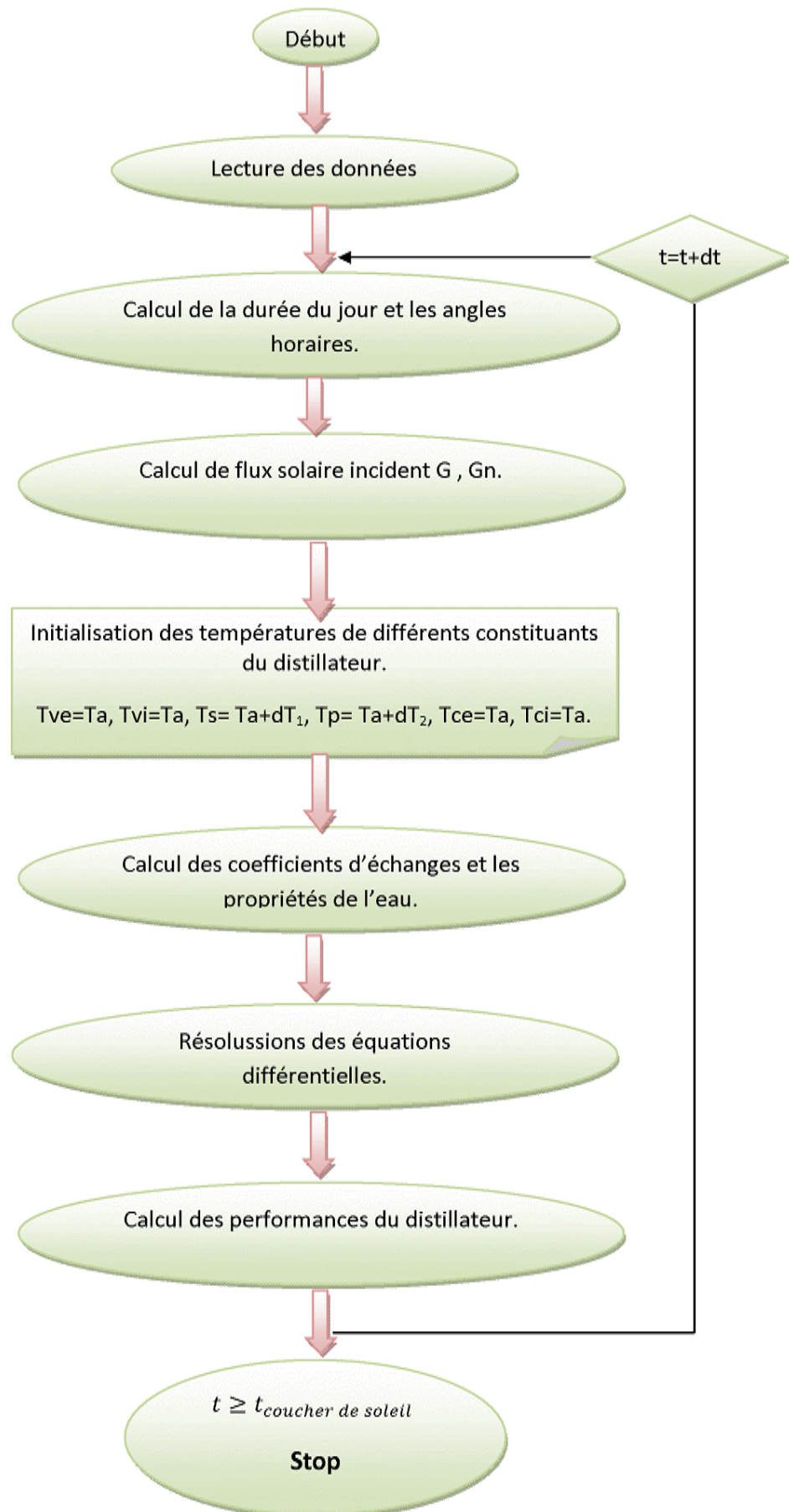
La température du ciel peut être estimée par la relation suivante [24] :

$$T_s = T_a - 12 \quad (25)$$

Le coefficient de perte thermique arrière de la plaque d'absorption, est évalué à l'aide de la relation suivante :

$$har = \frac{1}{hw + \frac{\delta_{is}}{\lambda_{is}} + 2 \frac{\delta_p}{\lambda_p}} \quad (26)$$

## III.7. Organigramme de calcul





## **Chapitre**

### **IV**

## **DESCRIPTION DU PROTOTYPE EXPERIMENTAL**

---

Dans cette partie nous présentons une brève description du prototype expérimental et des instruments de mesure.

### IV .1. Introduction

Ce prototype a été proposé et réalisé par Benhammou *et al* (2006)., de l'équipe de recherche de distillation de l'URERMS. La réalisation de prototype se déroule comme suit :

- Traçage et sciage : après avoir fait le traçage sur deux tôles d'acier l'une galvanisée et l'autre noire, nous avons procédé au sciage à l'atelier de l'URER/MS en collaboration avec le personnel de soutien.
- Pliage et soudure : comme nous ne disposons pas d'une plieuse au niveau de l'atelier, nous avons réalisé cette opération à la société IBACH d'Adrar.
- Perçage : nous avons pratiqué un trou au fond de l'évaporateur pour introduire un conduit d'alimentation en eau. Cette opération est réalisée dans l'atelier de l'URER/MS.
- Peinture : nous avons peint le fond de l'évaporateur avec une peinture noire mâte et les côtés extérieurs avec une peinture argentée pour donner la forme finale du prototype.
- Montage : après avoir conçu les différents éléments du prototype, nous avons introduit le bac interne constitué de l'évaporateur et du condenseur à l'intérieur du bac externe, avec une isolation en laine de verre entre les deux compartiments.

**Tableau N° 2: récapitulatif des différents éléments du distillateur**

Élément	Matière	Dimension
Evaporateur	Tôle galvanisée d'acier 1.5 mm	100cm x 70cm x 15cm
Condenseur	Tôle galvanisée d'acier 1.5mm	70cm x 50cm x 15cm
Couverture transparente	Verre de 4mm	105cm x76cm
Boîtier extérieur	Tôle noire d'acier 1.5	160cm x 80cm x 20cm
Isolation	Laine de verre	2m <sup>2</sup>

Le distillateur est connecté à la canalisation du réseau en prenant soin d'orienter le condenseur dans la direction du nord pour profiter de l'ombre, en étalant un film d'aluminium sur la face extérieure de la vitre du condenseur pour la rendre réfléchissante vis-à-vis du rayonnement solaire qui tombe sur la vitre. L'eau distillée produite sera acheminée vers l'extérieur grâce à une rigole placée juste au dessous du bord inférieur de la vitre, pour être recueillie dans une bouteille [15, 16, 17, 18].

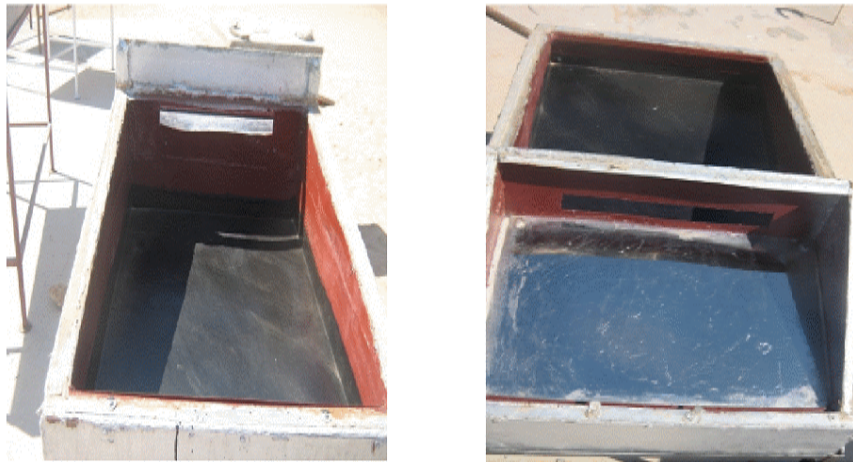


Figure N°13 : évaporateur et condenseur.

### IV .2. Expérimentation

Les essais ont été réalisés au sein de l'URERMS ADRAR. Le distillateur est orienté en plein sud pour collecter le maximum du rayonnement solaire.

Les paramètres mesurés sont :

- La température des différentes composantes du distillateur ainsi que la température ambiante ;
- L'humidité relative à l'intérieur du distillateur ;
- Le flux global ;
- La vitesse du vent ;
- La production instantanée d'eau distillée;

### IV .3. Montage de mesure

La collection des données est assurée par ( Figures N°14):

- Une acquisition des données, type **FLUKE HYDRA SERIES II 2625A**, qui assure la conversion et la lecture de valeurs mesurées, les températures de différents éléments constituant notre prototype et le flux radiatif global incident sur un plan horizontal.
- Deux sondes, type **OPUS 208**, reliées par ordinateur pour mesurer l'humidité relative et la température à l'intérieur du distillateur.
- Deux sondes, type **testo**, dont l'une assure la mesure de la vitesse du vent et l'autre l'humidité et la température à l'intérieur du prototype.
- Un pyranomètre, type **kipp & zonen**, pour mesurer le flux radiatif global.
- Des thermocouples, types **K**, sont étalonnés avant d'être fixés au distillateur. L'étalonnage se fait en deux points 0°C (la glace fondante) et 100°C (l'eau bouillante).



A1



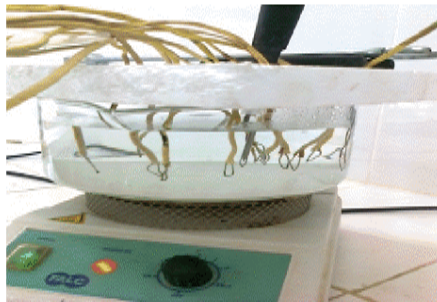
A2



A3



A4



A5



A6



A7



A8

Figure N°14 : montage de mesure.

**IV .4. Calcul de la rentabilité du projet**

La durée de vie du distillateur est d'environ 10 ans [41]. Le projet est rentable si la valeur comptable est supérieure à 0.

**Tableau N° 3: Coût des différents éléments du distillateur.**

Matière	Quantité	Prix en DA
Tôle galvanisée d'acier 1.5 mm	1	3000.00
Colle silicone	10	2500.00
Verre de 3mm	2m <sup>2</sup>	1000.00
Tôle noire d'acier 1.5	1	1500.00
Laine de verre	2m <sup>2</sup>	4000.00
Main d'œuvres		9000.00
Total		21000.00

$$VAC = -INV + \sum VA(Gains) - \sum VA(Deponses)$$

Avec  $\sum VA(Gains) = \sum_{t_a=1 \sim n} \left[ Gains \frac{(1+j)^{t_a}}{(1+i)^{t_a}} \right]$

L'indice J=0, nous supposons qu'il n'ya pas d'inflation et les prix des matériaux ne varient pas.

Les dépenses sont supposées négligeables le prototype proposé fonctionne uniquement par l'énergie solaire.

Le calcul est fait pour un taux de rentabilité de i=8%.

Au début  $VA(Gain)_0 = 0 DA$

La première année  $VA(Gain)_1 = \frac{1761.125 \times 20}{(1+0.08)^1} = 32613,42593 DA$

La deuxième année  $VA(Gain)_2 = \frac{1761.125 \times 20}{(1+0.08)^2} = 30197,6166 DA$

La troisième année  $VA(Gain)_3 = \frac{1761.125 \times 20}{(1+0.08)^3} = 27960,75611 DA$

La quatrième année  $VA(Gain)_4 = \frac{1761.125 \times 20}{(1+0.08)^4} = 25889,58899 DA$

La cinquième année  $VA(Gain)_5 = \frac{1761.125 \times 20}{(1+0.08)^5} = 23971,84166 DA$

La sixième année  $VA(Gain)_6 = \frac{1761.125 \times 20}{(1+0.08)^6} = 22196,14968 \text{ DA}$

La septième année  $VA(Gain)_7 = \frac{1761.125 \times 20}{(1+0.08)^7} = 20551,99045 \text{ DA}$

La huitième année  $VA(Gain)_8 = \frac{1761.125 \times 20}{(1+0.08)^8} = 19029,62078 \text{ DA}$

La neuvième année  $VA(Gain)_9 = \frac{1761.125 \times 20}{(1+0.08)^9} = 17620,01924 \text{ DA}$

La dixième année  $VA(Gain)_{10} = \frac{1761.125 \times 20}{(1+0.08)^{10}} = 16314,83263 \text{ DA}$

$$\begin{aligned} VAC = & -21000.00 + 32613,42593 \text{ DA} + 30197,6166 \text{ DA} + 27960,75611 \text{ DA} \\ & + 25889,58899 \text{ DA} + 23971,84166 \text{ DA} + 22196,14968 \text{ DA} \\ & + 20551,99045 \text{ DA} + 19029,62078 \text{ DA} + 17620,01924 \text{ DA} \\ & + 16314,83263 \text{ DA} = 215345,842 \text{ DA} \end{aligned}$$

$VAC > 0$  Donc le projet est rentable.

**Tableau N° 4:** La production moyenne du prototype [16].

	1 <sup>er</sup> janvier	1 <sup>er</sup> avril	1 <sup>er</sup> juillet	1 <sup>er</sup> octobre	La production annuelle Moyenne (l / jour m <sup>2</sup> )
La production journalière du prototype (l / jour m <sup>2</sup> )	<b>1.05</b>	<b>4.91</b>	<b>9.49</b>	<b>3.85</b>	<b>4.825</b>

Le calcul de rentabilité a été fait pour une production journalière moyenne annuelle de 4.825 [l/jour m<sup>2</sup>].

D'après les calculs de rentabilités, le prix du distillateur s'amortie de sa première année.

**Chapitre**

**V**

**RESULTATS  
ET  
DISCUSSION**

**Dans cette partie nous présentons les résultats théoriques et expérimentaux sous forme de graphes avec leurs interprétations.**

## V.1. Résultats théoriques

### V.1.1.Introduction

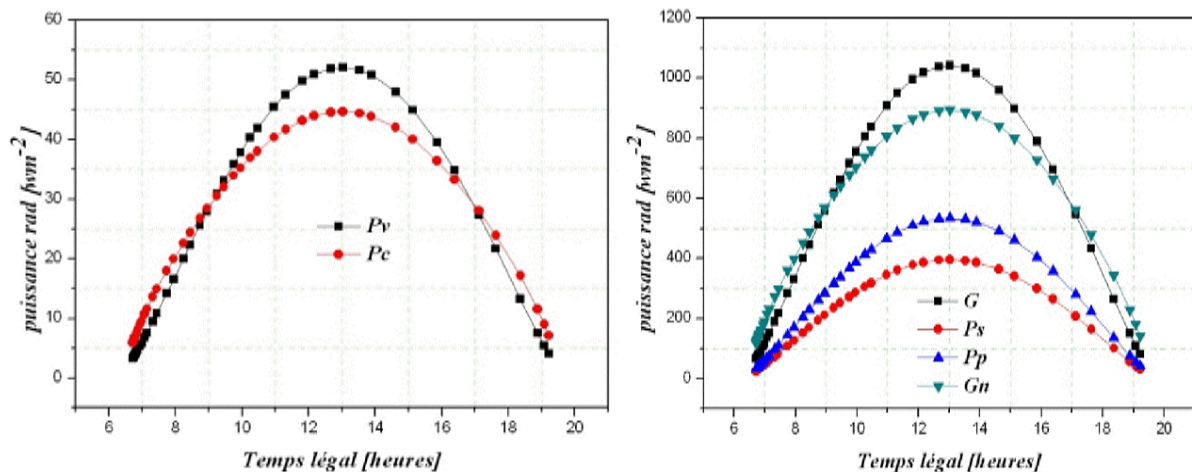
Afin de résoudre les systèmes d'équations différentielles précédentes, nous avons utilisé la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG. Nous avons élaboré un programme sous MATLAB pour simuler l'évolution au fil du temps du comportement du système. L'étude a été effectuée sur le site d'ADRAR caractérisé par une longitude - 0.28°, latitude 27.88° et une altitude de 264 m.

Le programme de simulation que nous avons réalisé sur MATLAB nous a permis de suivre la variation temporelle de la température des différents composants du distillateur pour le site d'Adrar.

En vue de simuler le fonctionnement de notre prototype, nous avons pris un jour représentatif de chaque saison, de façon qu'il soit à mi-saison, le 17 Janvier, 16 Mars, le 11 Juin et le 15 Septembre.

### V.1.2.Variation de la puissance solaire

La figure N°15 illustre l'évolution journalière de l'énergie solaire reçue sur un plan horizontal (G), l'énergie solaire reçue sur un plan incliné de 30° orienté en plein nord (Gn). Nous observons une symétrie par rapport à midi solaire, où l'intensité est maximale. Pv, Ps, Pp et Pc sont respectivement la puissance absorbée par le vitrage du distillateur, la saumure, la plaque d'absorption et le vitrage du condenseur.



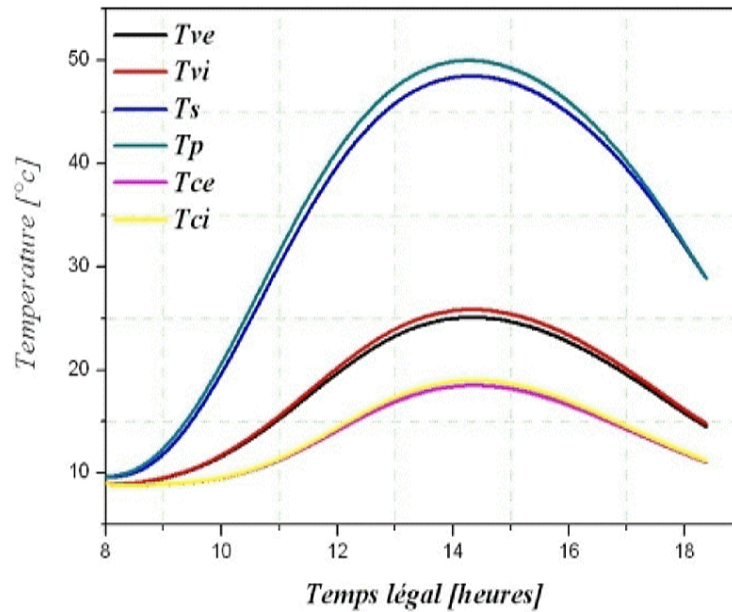
**Figure N°15:** Energies reçues par le distillateur et le condenseur pour la journée du 11 juin.

### V.1.3. Températures des différentes composantes de distillateur

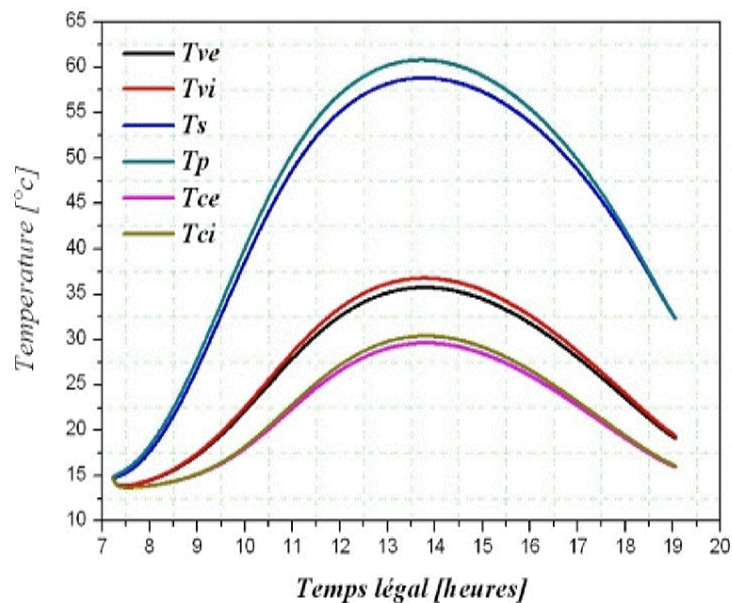
Les figures N° 16, 17, 18 et 19 représentent l'évolution des températures de chaque composante du distillateur ;  $T_{ve}$ ,  $T_{vi}$  : température du vitrage du distillateur du côté externe et interne respectivement.



$T_s$  et  $T_p$  : La température de la saumure et la température de la plaque d'absorption.

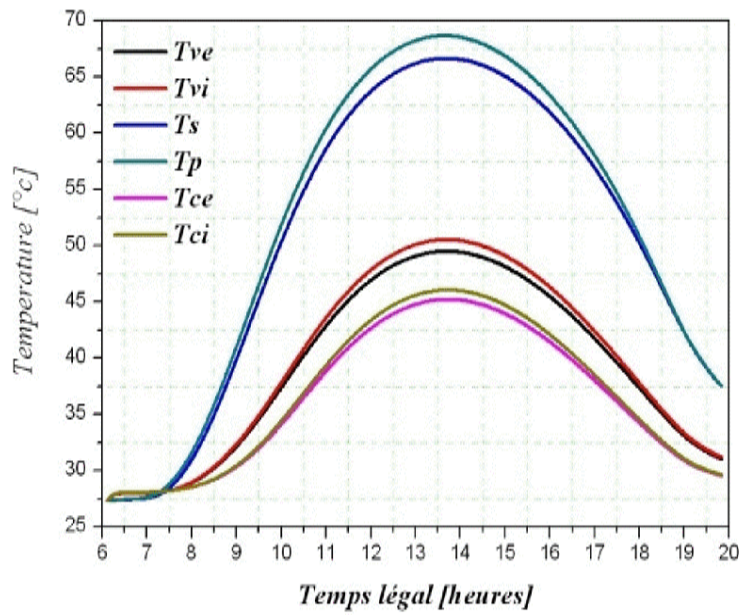


**Figure N°16:**Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 17 Janvier.

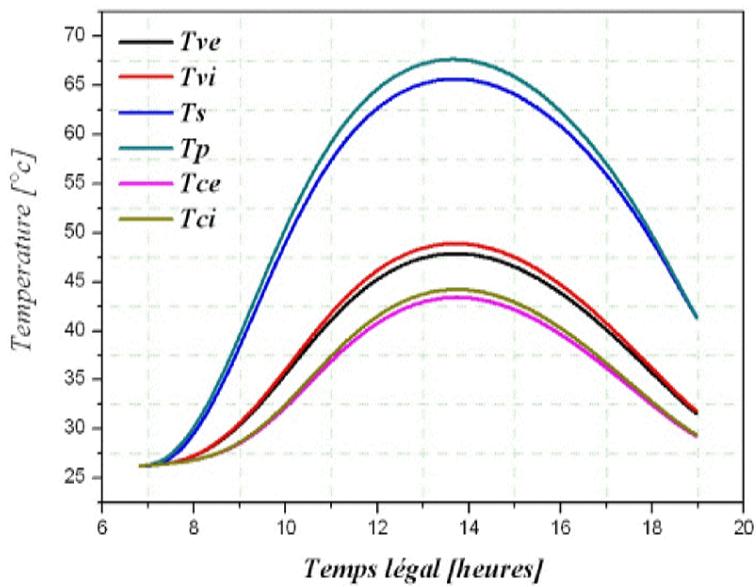


**Figure N°17:**Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 16 Mars.

$T_{ce}$ ,  $T_{ci}$  : Température du vitrage du condenseur du coté externe et interne respectivement. Ces valeurs varient d'une saison à une autre, elles atteignent le maximum durant la période estivale et le minimum durant la période hivernale. On remarque que l'écart de température entre la plaque d'absorption et la saumure est compris entre 0 et 3°C.



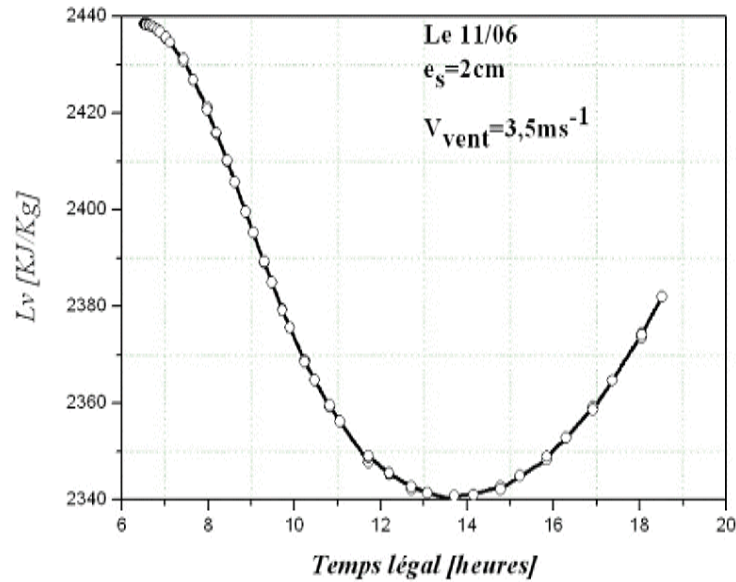
**Figure N°18:**Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 11juin.



**Figure N°19:**Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 15 Septembre.

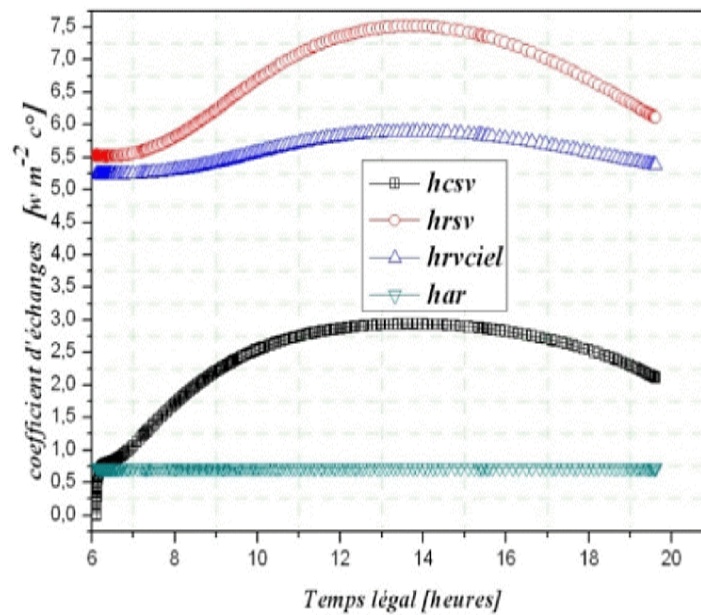
#### V.1.4. Variation temporelle des coefficients d'échange

La chaleur latente de vaporisation de la saumure diminue au fur à mesure que sa température augmente. Elle atteint la valeur minimale à midi solaire, ensuite elle poursuit sa croissance jusqu'au coucher du soleil.

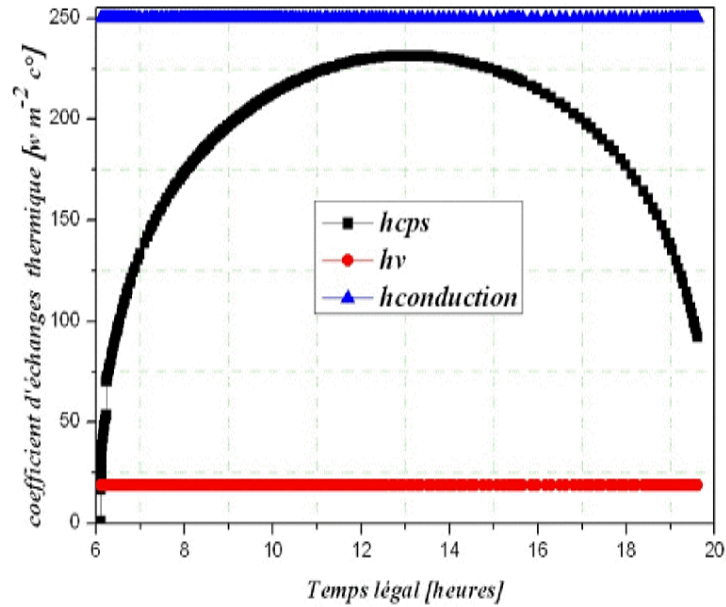


**Figure N°20:** Variation temporelle de la chaleur latente de vaporisation pour la journée du 11 Juin.

Les coefficients d'échange thermique suivent l'allure du rayonnement solaire, sauf les coefficients d'échange par conduction et par convection (celle due au vent) qui sont considérés constants.



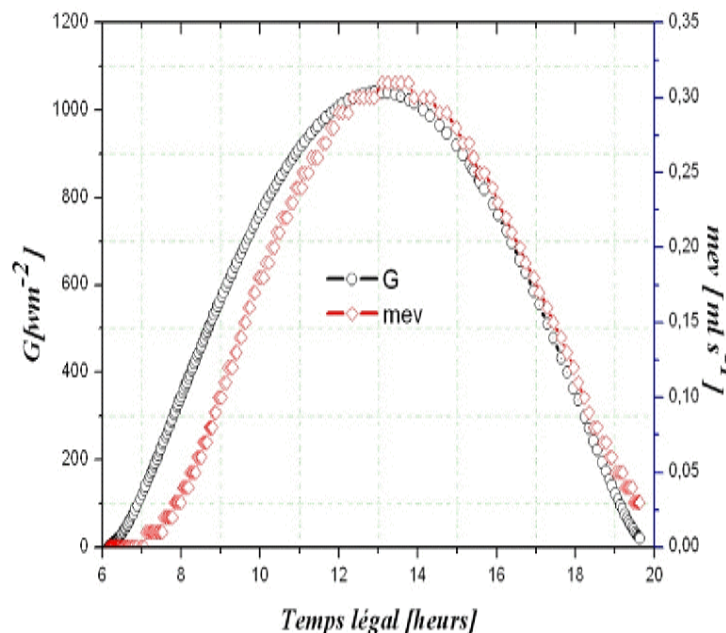
**Figure N°21:** Variation temporelle des coefficients d'échanges thermiques pour la journée du 11 Juin.



**Figure N°22:** Variation temporelle des coefficients d'échanges thermiques pour la journée du 11Jun.

**V.1.5.Variation temporelle de la masse d'évaporation**

La masse d'évaporation suit l'évolution du rayonnement solaire, il atteint le maximum  $0.275[\text{ml s}^{-1}]$  à midi solaire et le minimum au lever et au coucher du soleil  $0.025[\text{ml s}^{-1}]$  (Figure N°23).



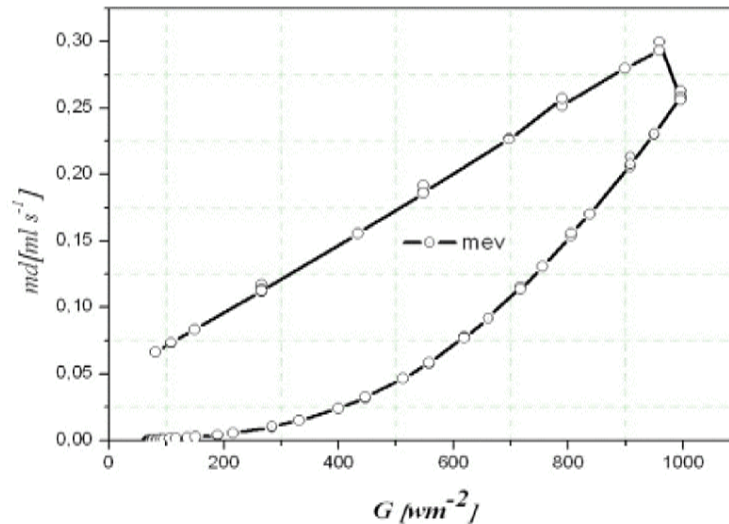
**Figure N°23:** Energie solaire reçue et la masse d'évaporation pour la journée du 11Jun.

La variation du débit d'évaporation en fonction de l'énergie reçue est caractérisée en deux évolutions différentes :

➤ du lever jusqu'à midi solaire la variation du débit a une croissance ascendante.

➤ De midi au coucher du soleil, elle a une décroissance linéaire.

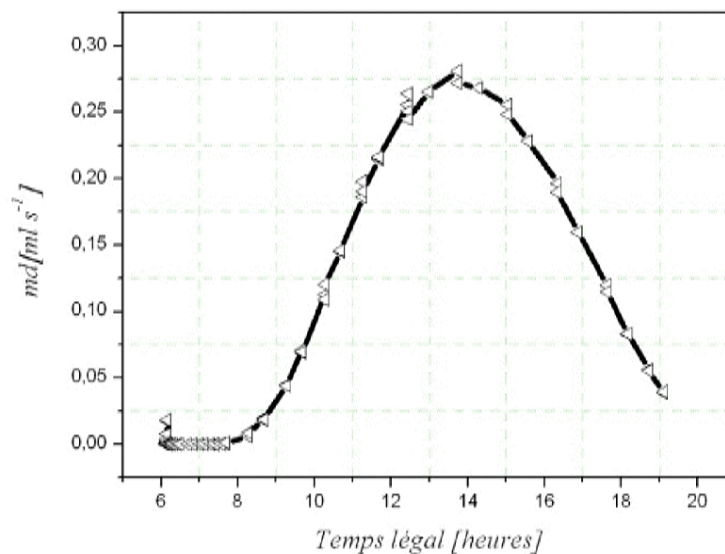
Le retard de la production durant les premières heures de la journée est du au fait qu'une partie de l'énergie reçue de 0 à 200 [ $\text{Wm}^{-2}$ ] est consommée pour chauffer le système. Ce qui peut être expliqué par l'inertie du système (Figure N°24).



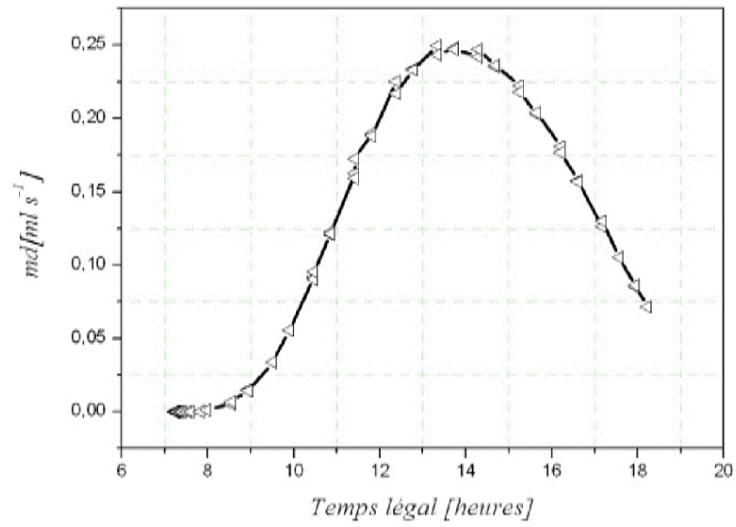
**Figure N°24:** Variation de la masse d'évaporation en fonction du rayonnement solaire pour la journée du 11 Juin.

**V.1.6. Variation temporelle du débit de distillation**

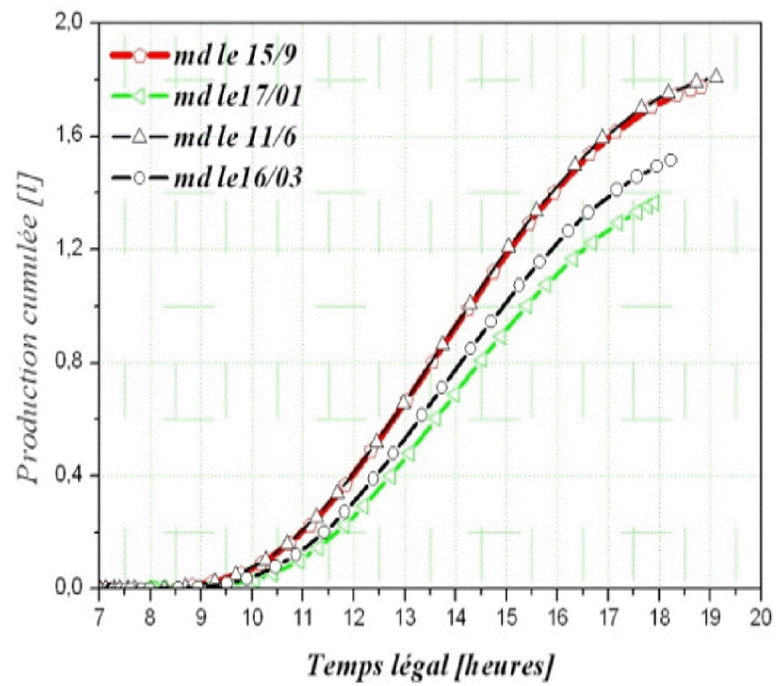
La courbe de débit de condensat a la même allure que le rayonnement solaire. La valeur maximale 0.275 ml/s est atteinte à 14 heures ensuite nous observons une décroissance jusqu'au coucher du soleil où elle atteint sa valeur minimale 0.05 [ml/s] (Figure N°25).



**Figure N°25:** Variation temporelle du débit de distillat pour la journée du 11 Juin.



**Figure N°26:** Variation temporelle du débit de distillat pour la journée du 16 Mars.



**Figure N°27:** Production cumulée.

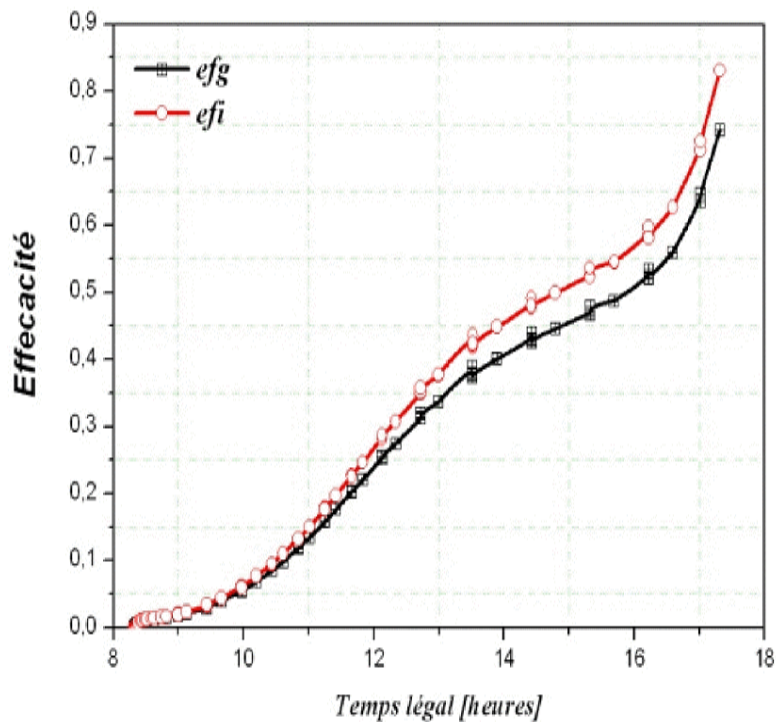


Figure N°28: efg : efficacité globale, efi : efficacité interne.

### V.1.7. L'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau.

#### V.1.7.1. Influence sur l'écart de température

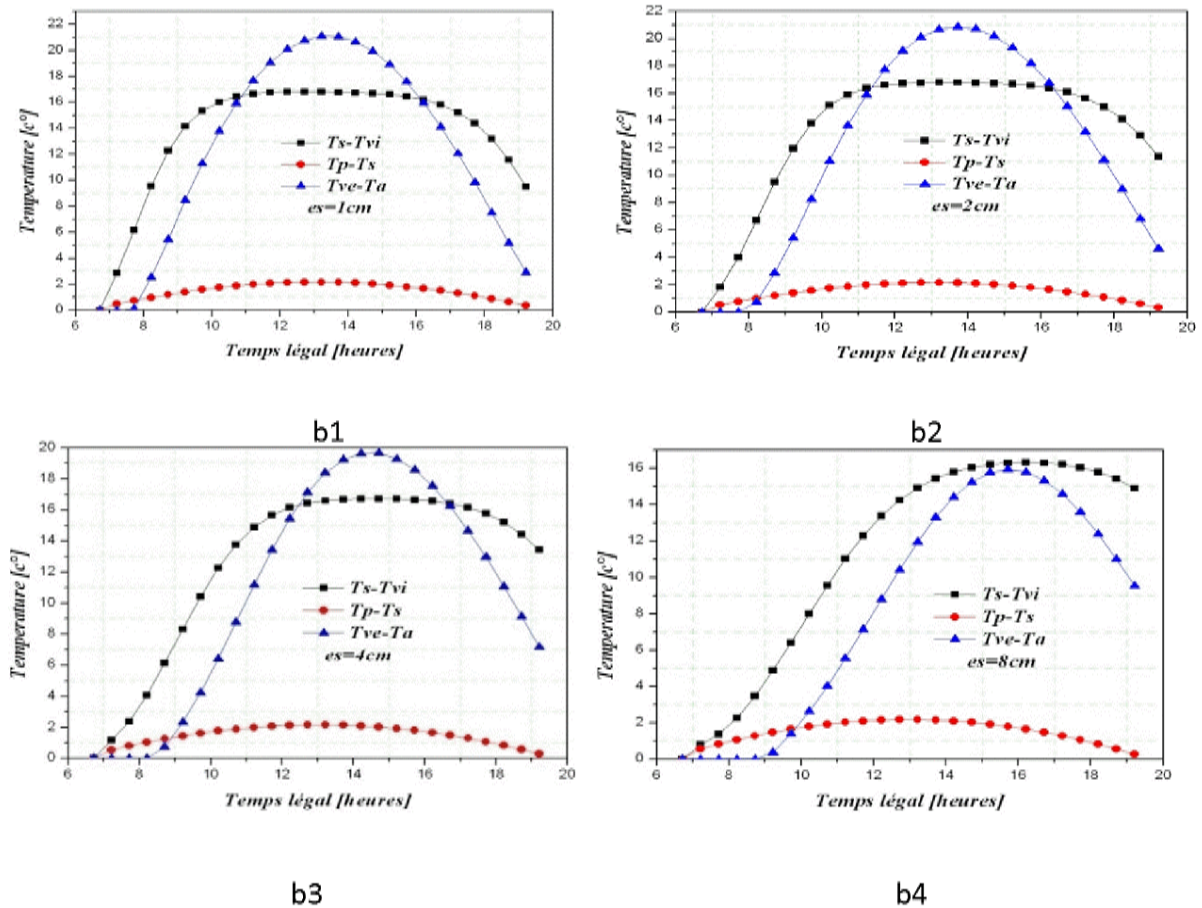
L'augmentation de l'épaisseur de la nappe diminue la température de la saumure ce qui s'explique par l'inertie de l'eau.

Les figures ci-dessous, nous montrent que l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'eau implique une diminution de l'écart de température entre la saumure et la face interne du vitrage.

Dans le cas d'un centimètre d'épaisseur, la température de la saumure atteint le maximum à 10h, dans le cas de 4cm, le maximum n'est atteint qu'à midi solaire.

Entre la plaque d'absorption et la saumure, l'écart de température reste presque constant. Car l'épaisseur de la saumure a une influence sur les deux à la fois.

Une diminution et un déphasage pour atteindre le max, sur l'écart de température entre la vitre et l'ambient sont illustrés.



**Figure N°29:** Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur l'écart de température  $es=1, 2, 4, 8\text{cm}$

#### V.1.7.2. L'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur la production du distillat

Les figures N°30 et 31, nous montrent que l'augmentation de l'épaisseur de la nappe d'eau provoque la décroissance de la production d'eau distillée. Pour une épaisseur de 1 ou 2cm, nous avons eu presque 2.4l durant la journée du 11 Juin. Alors que pour une épaisseur de 10 cm, nous n'avons eu qu'un litre d'eau distillée durant toute la journée.

La figure N°29, illustre la variation de la masse d'évaporation pour différentes épaisseurs de la saumure : 2cm, 4cm et 8 cm avec les valeurs maximales respectives : 0.30 ,0.275 et 0.225 [ $\text{mls}^{-1}$ ].

Ainsi il est à conclure que l'épaisseur de la nappe d'eau a un effet considérable sur la production.



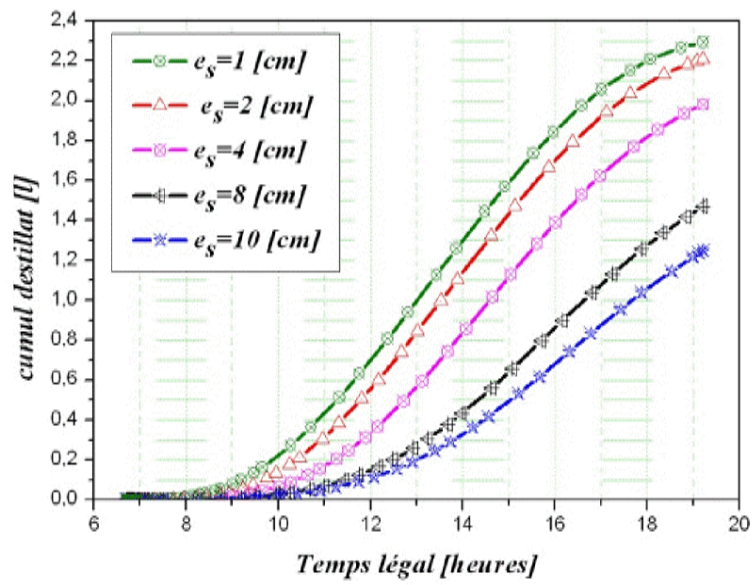


Figure N°30: Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur le volume de distillat,  $e_s=1, 2, 4, 8, 10$  cm

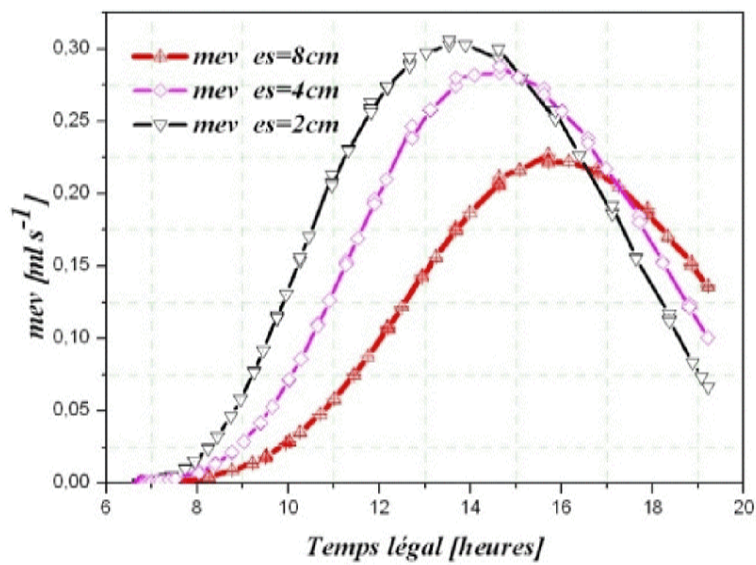
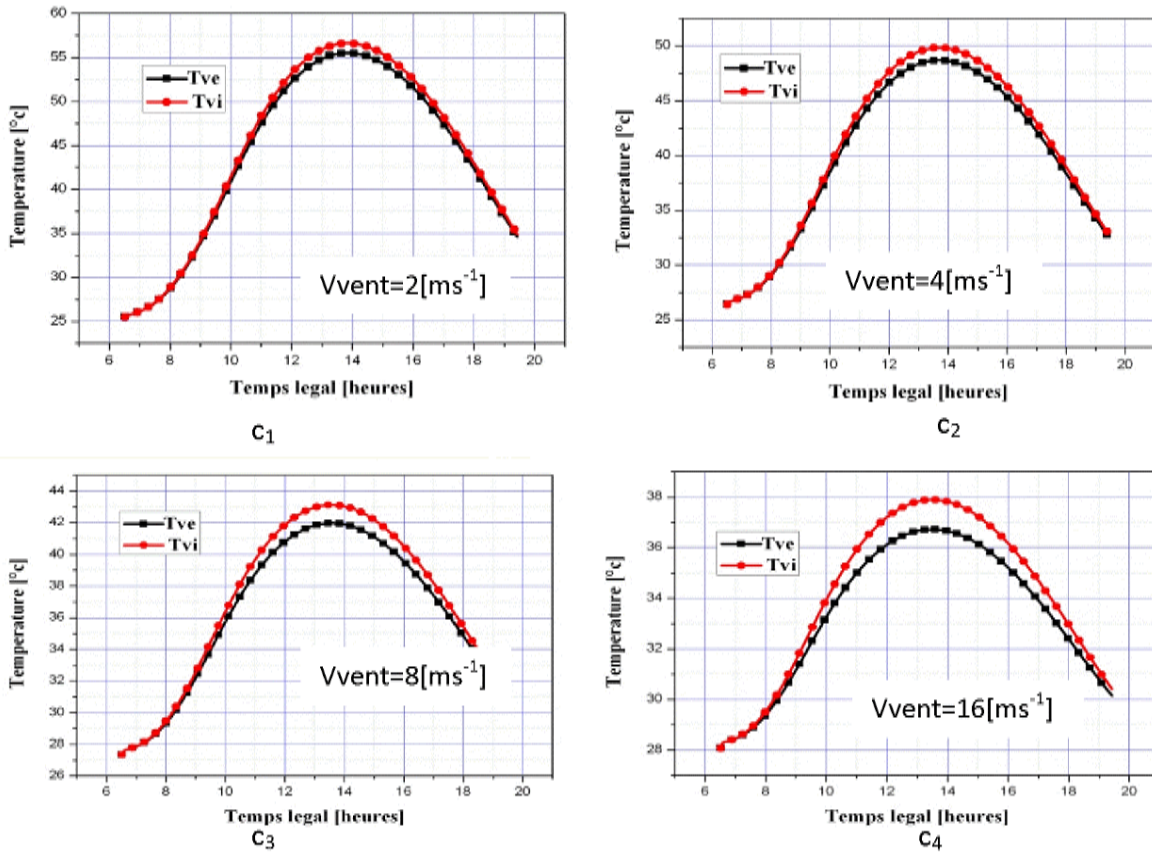


Figure N°31: Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur le débit de distillat  $e_s=2, 4, 8$  cm

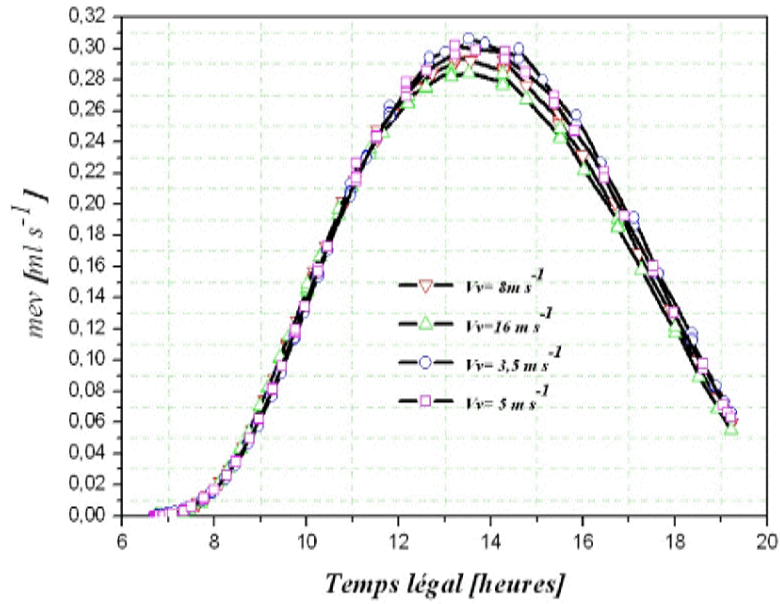
**V.1.7.3. L'influence de la vitesse du vent**

La vitesse du vent a une influence directe sur l'écart de température, entre les deux surfaces du vitrage (Figure N°30). Par contre, elle n'a pas une très grande influence sur le débit d'évaporation (Figure N°32).

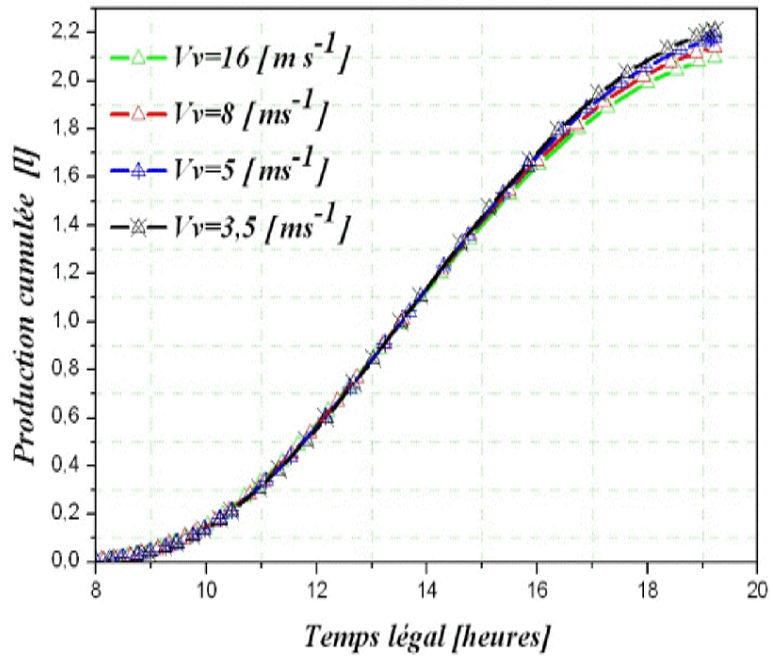


**Figure N°32 : Influence de la vitesse du vent sur la température de la vitre**

La figure N°34, nous montre que la vitesse du vent n'a pas une très grande influence sur la production d'eau.



**Figure N°33 :** Influence de la vitesse du vent sur le débit de distillat.



**Figure N°34 :** Influence de la vitesse du vent sur la production d'eau distillée.

V.2. Résultats expérimentaux

V.2.1. Illustration

Les figures N° 35, 36, 37 et 38, illustrent la variation du rayonnement solaire incident sur un plan horizontal et la température ambiante mesurée, pour les journées du 22 au 26 Juin. Nous remarquons que la température ambiante suit l'évolution du

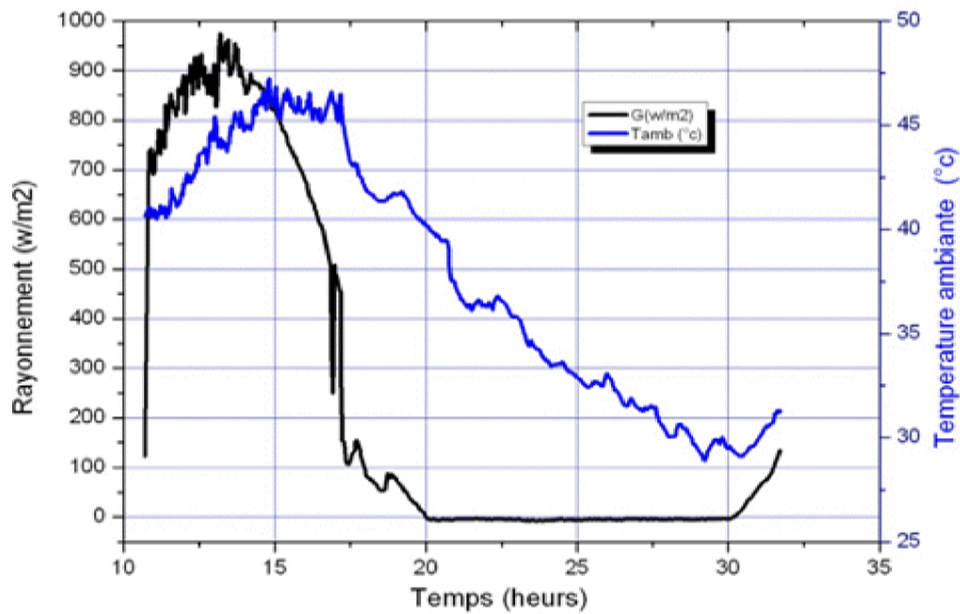


Figure N°35 : Energie reçue et température ambiante pour la journée du 22 Juin.

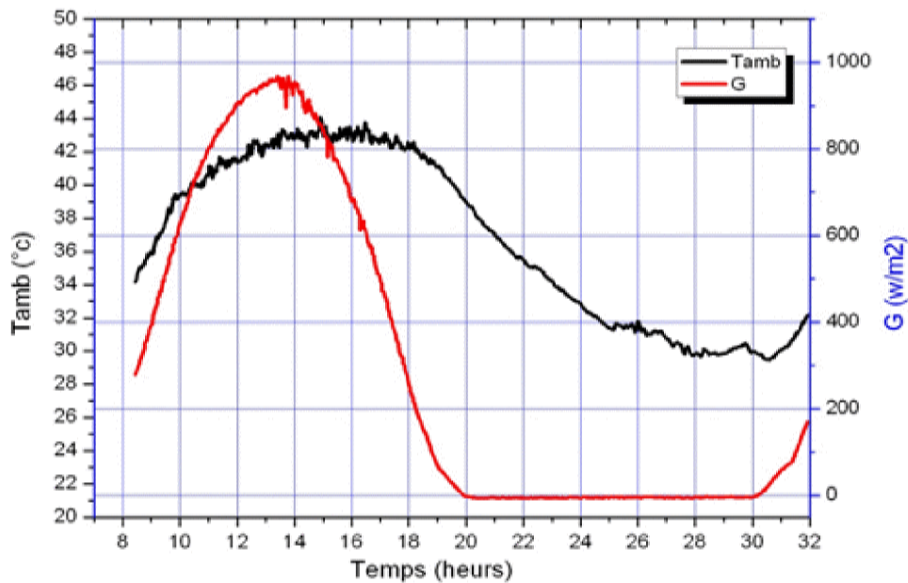
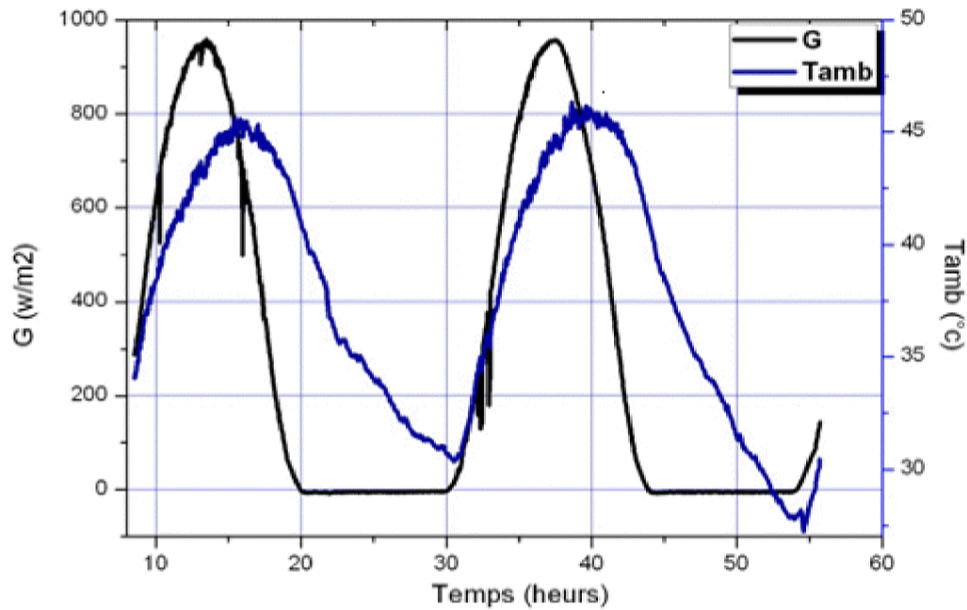
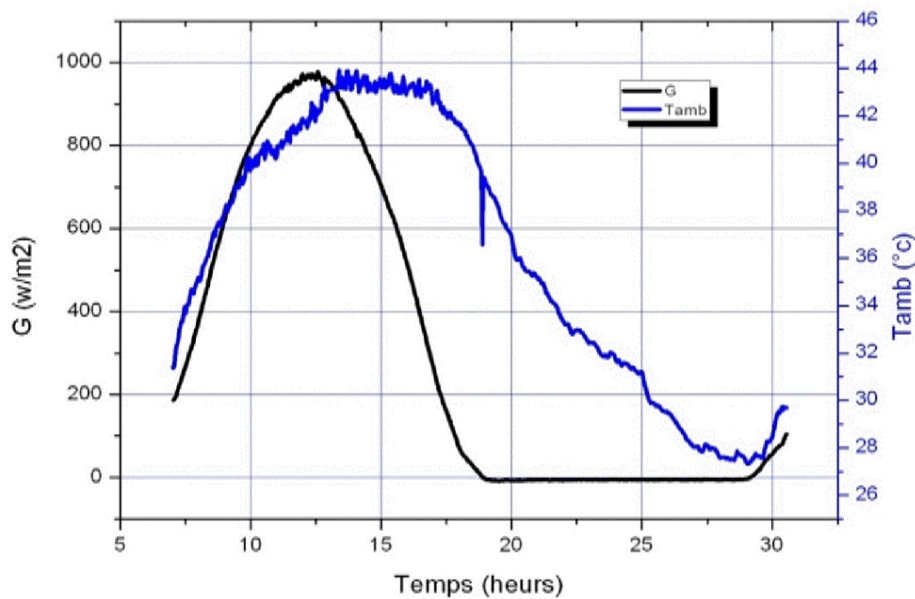


Figure N°36: Energie reçue et température ambiante pour la journée du 23 Juin.

rayonnement solaire, elle atteint la valeur maximale 42 à 44°C de 13 à 17 heures.



**Figure N°37:** Energie reçue et température ambiante pour les journées du 24 et 25 Juin.



**Figure N°38 :** Energie reçue et température ambiante pour la journée du 26 Juin.

Les figures N°39, 40, 41 et 42, représentent l'évolution des températures (plaque, Saumure, vitre faces intérieure et extérieure, air) du distillateur et du condenseur. Il est clair que la température de l'air du condenseur et du distillateur est plus élevée

que celles de la plaque d'absorption. Elles atteignent la valeur maximale de 80°C, 87°C entre 13 -14 heures. Les courbes des températures de la saumure et de la plaque d'absorption sont presque superposées. La valeur maximale atteinte est de 75°C. La température de la face externe du vitrage atteint 70-66°C et de la face interne 60-65°C à midi solaire.

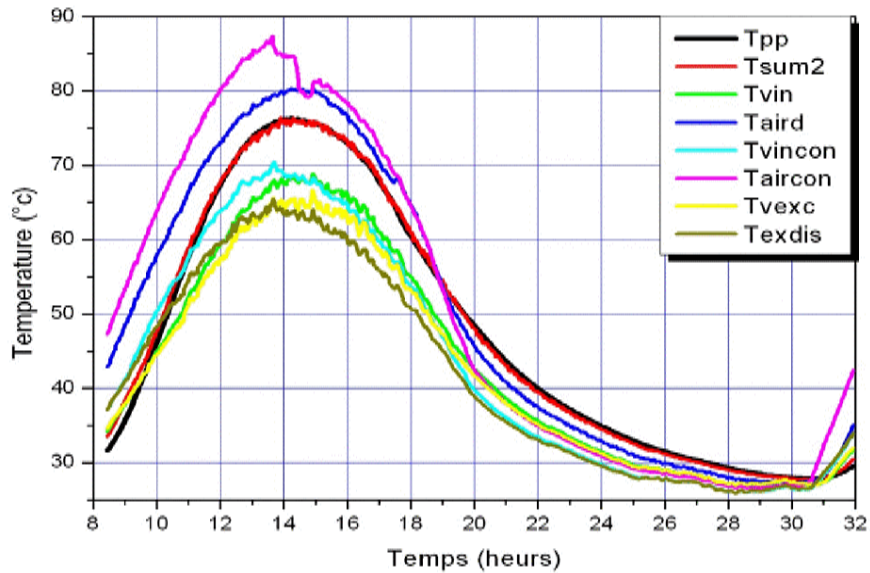


Figure N°39 : Températures des différentes composantes du distillateur pour la journée du 23 Juin.

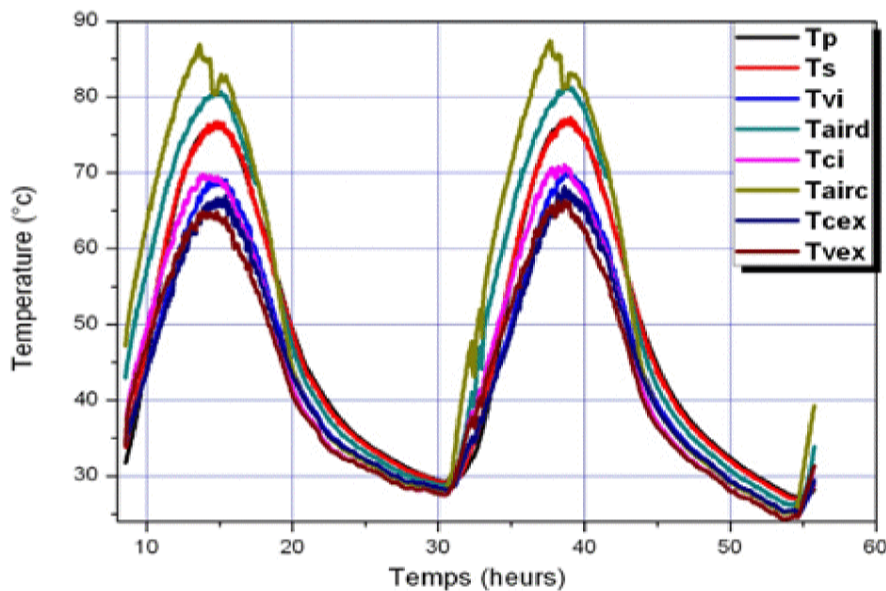


Figure N° 40 : Températures des différentes composantes du distillateur pour les journées du 24 et 25 Juin.

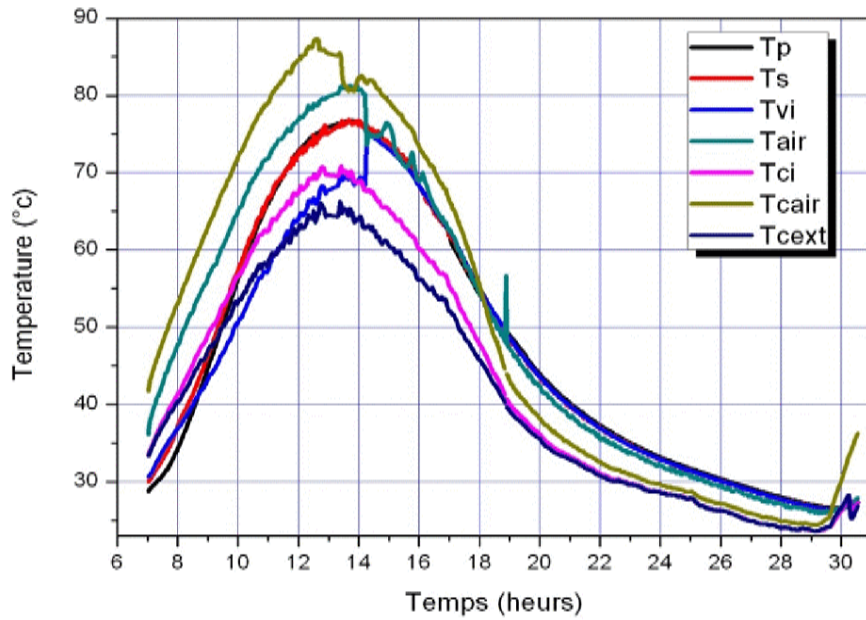


Figure N° 41 : Températures des différentes composantes du distillateur pour la journée du 26 Juin.

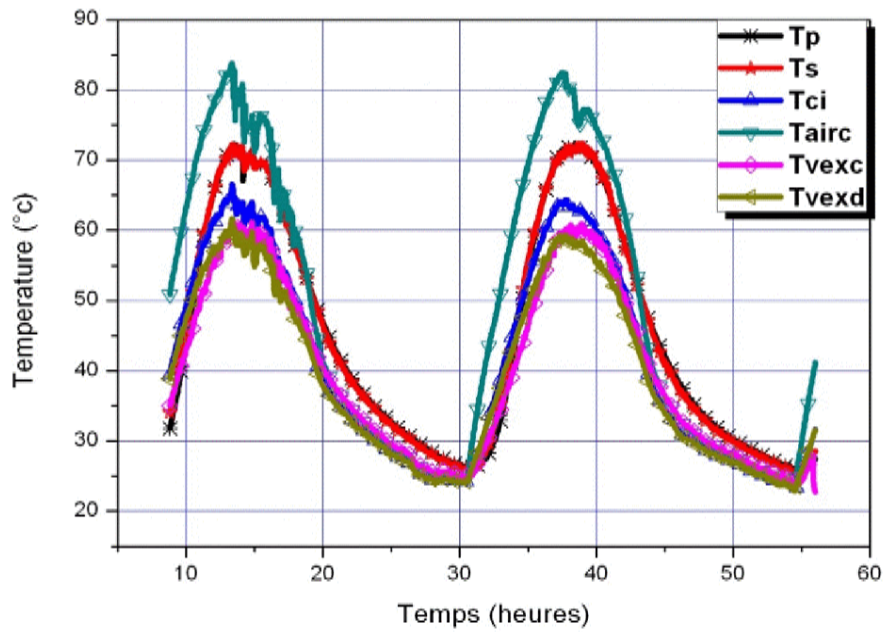
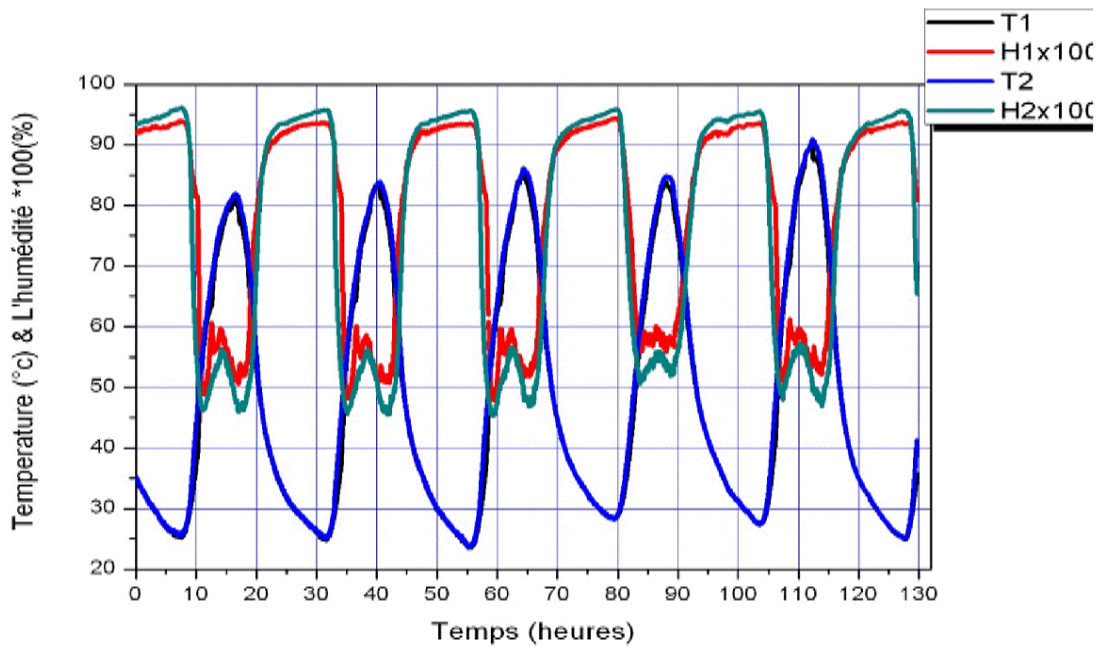
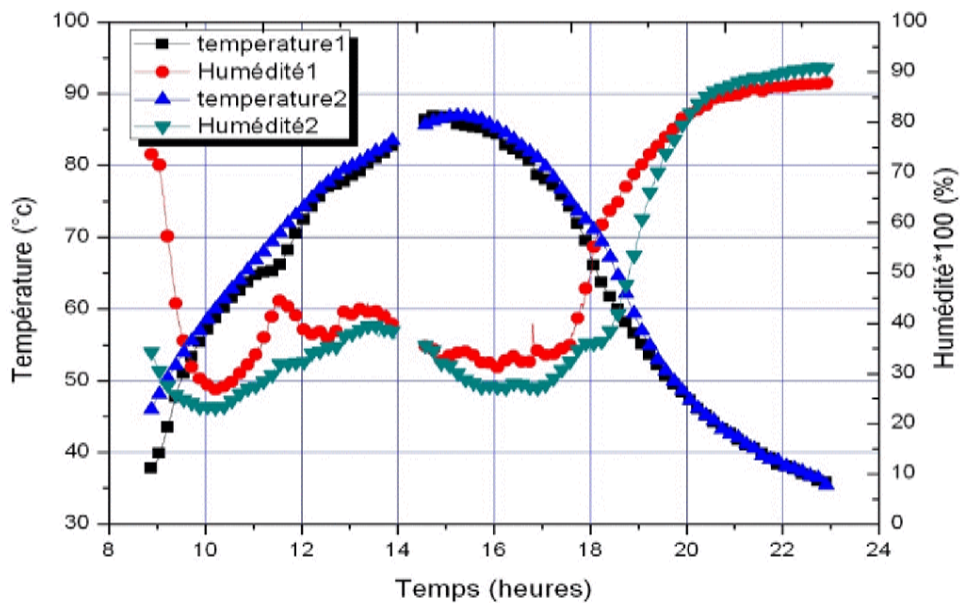


Figure N° 42 : Températures des différentes composantes du distillateur pour les journées du 27 et 28 Juin.



**Figure N° 43 :** L'évolution de l'humidité et la température a l'intérieur du distillat pour les journées du 28 Juin au 3 Juillet.



**Figure N° 44 :** L'évolution de l'humidité et de la température à l'intérieur du distillat pour la journée du 26 Juin.



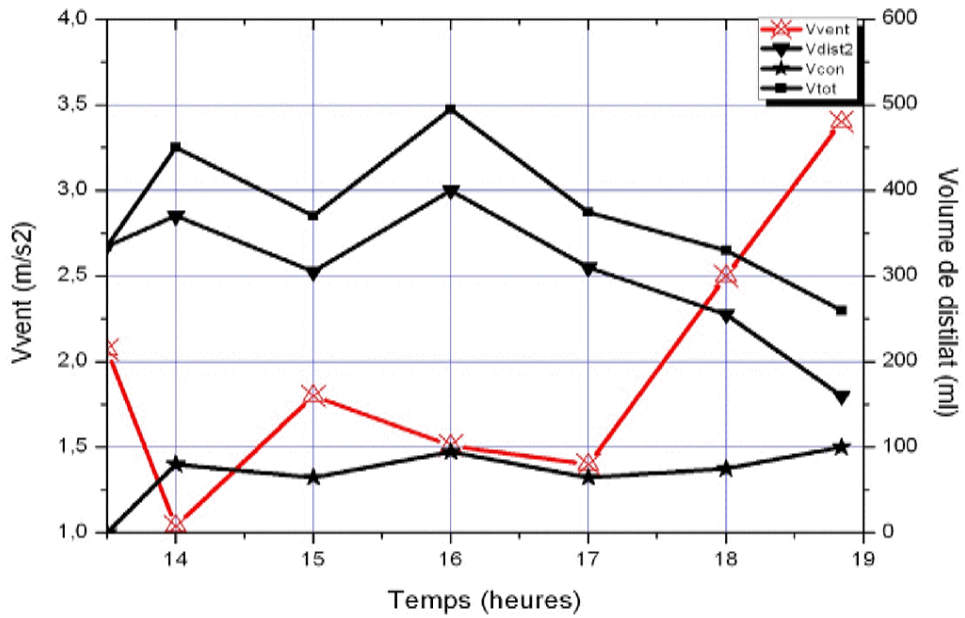


Figure N° 45 : Volume de distillat et la vitesse du vent pour la journée du 22 Juin.

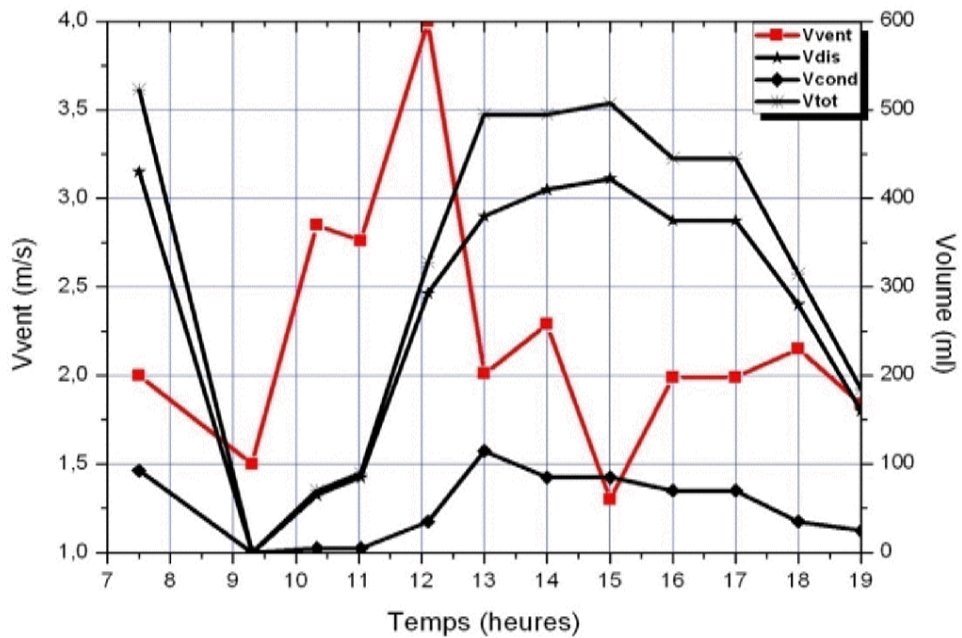


Figure N° 46 : Volume de distillat et la vitesse du vent pour la journée du 23 Juin.

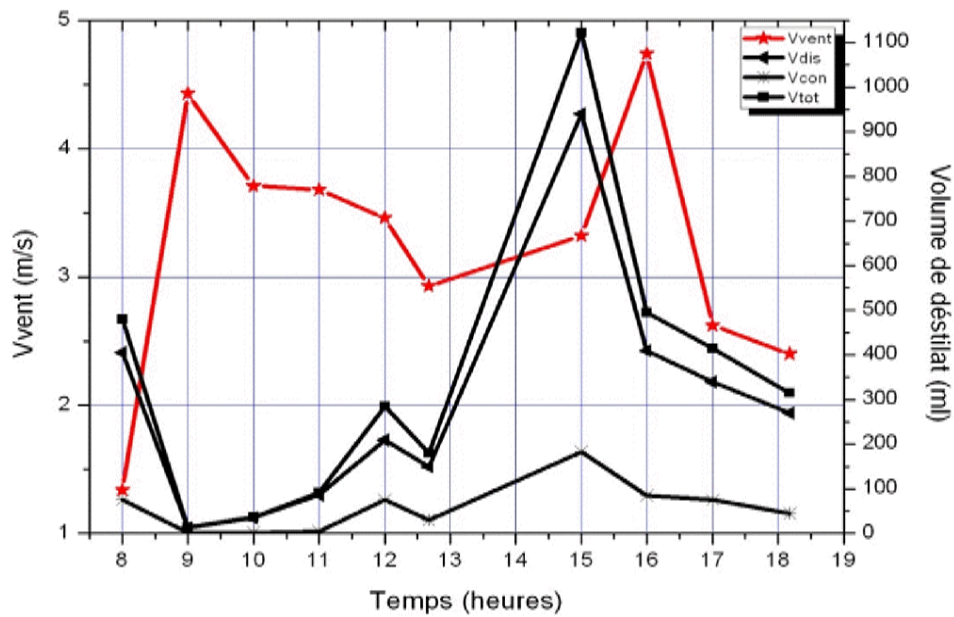


Figure N° 47 : Volume de distillat et la vitesse du vent pour la journée du 24 Juin.

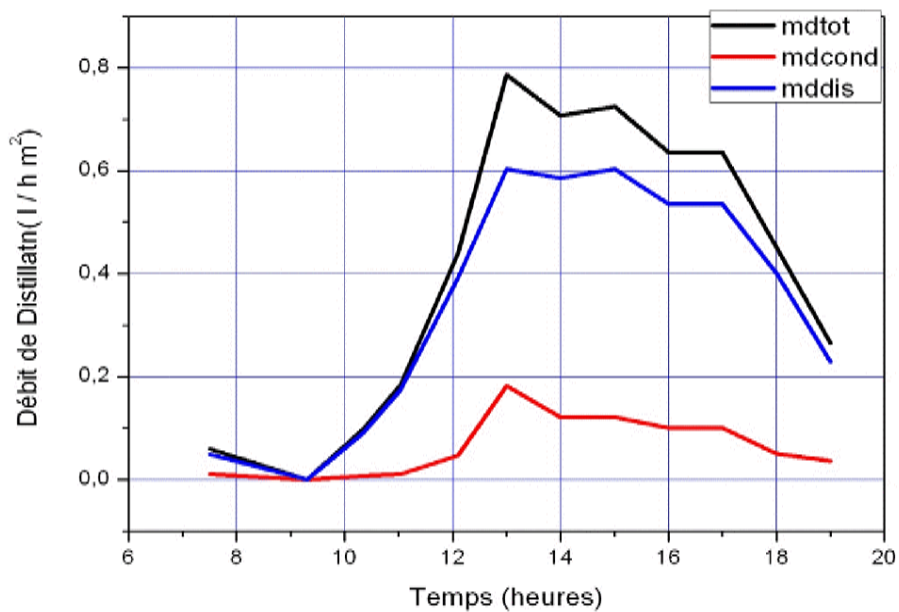


Figure N° 48 : Débit de distillat pour la journée du 23 Juin.

Les figures 43 et 44 illustrent la variation de l'humidité relative et la température à l'intérieur du distillateur. Cette mesure est assurée par deux sondes, l'une près de la saumure et l'autre près de la vitre. Nous remarquons que l'humidité relative est inversement proportionnelle à la température. Durant la période nocturne la

température atteint sa valeur minimale tandis que l'humidité atteint sa valeur maximale 93-97% et durant la période diurne l'humidité atteint 80%.

Les figures N° 45,46 et 47 illustrent la variation de production journalière pour les journées du 22, 23 et 24 Juin respectives. Les premières valeurs de la journée indiquent la production cumulée durant la période nocturne. Puis une augmentation progressive jusqu'à où elle atteint une valeur maximale de 500ml de 13 à 15 heures, ensuite elle subit une décroissance de 15 heures au coucher de soleil.

Durant la journée du 23 Juin (Figure N°48), le débit de distillation atteint approximativement la valeur maximale de 0.8 [l/hm<sup>2</sup>] de 12h à 16h et s'annule au coucher et au lever du soleil, pour une profondeur d'eau égale à 2 cm.

La production journalière du 22 Juin est de 4.162 [l/m<sup>2</sup> jour] et celle du 23 Juin est de 4.981 [l/m<sup>2</sup> jour].

### V.3. Analyses physicochimiques

L'analyse physicochimique a été faite au laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H /ADRAR, voir Annexe C).

**Tableau N°5:** paramètres de la qualité d'eau avant distillation (ANRH/ ADRAR).

PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	RESULTATS	MINERALISATION GLOBALE	RESULTATS
PH	<b>7,67</b>	Calcium Ca++ mg/l	<b>116</b>
Conductivité ms/cm	<b>1,20</b>	Magnes. Mg++ mg/l	<b>39</b>
Turbidité eau brute NTU	<b>0,00</b>	Sodium Na + mg/l	<b>90</b>
Turbidité eau déc. NTU	<b>0,00</b>	Potass. k+ mg/l	<b>13</b>
Résidu sec à 110° C mg/l	<b>790,00</b>	Chlorure Cl- mg/l	<b>135</b>
Température °C	-	Sulfate SO4-- mg/l	<b>300</b>
PARAMETRES DE POLLUTION	RESULTATS	Bicarbon. HCO3- mg/l	<b>137</b>
Oxygène Dissous mg/l	-	Carbonate CO3-- mg/l	<b>0</b>
Ammonium NH4+ mg/l	-	Silice SiO2 mg/l	-
Nitrite NO2- mg/l	-	TH ° F	<b>44</b>
Nitrate NO3- mg/l	<b>18,00</b>	TAC ° F	<b>11</b>
O.phosphate PO4- mg/l	-	TA ° F	<b>0</b>
Mat. Ox.(mil. Ac.) mg/l O2	-	Minéralisation mg/l	<b>742</b>
Fer en mg/l	-	Total des ions mg/l	<b>848</b>
		Manganèse en mg/l	-

Les deux tableaux N° 4 et 5, présentant les tests avant et après distillation nous montrent qu'il y a une très grande diminution de la masse des minéralisations globales, ainsi que des paramètres physicochimiques.

**Tableau N° 6: paramètres de la qualité d'eau après distillation (ANRH/ADRAR).**

PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	RESULTATS	MINERALISATION GLOBALE	RESULTATS
PH	<b>3,31</b>	Calcium Ca++ mg/l	<b>116</b>
Conductivité ms/cm	<b>0,12</b>	Magnés. Mg++ mg/l	<b>39</b>
Turbidité eau brute NTU	<b>0,00</b>	Sodium Na + mg/l	<b>90</b>
Turbidité eau déc. NTU	<b>0,00</b>	Potass. k+ mg/l	<b>13</b>
Residu sec à 110° C mg/l	<b>40,00</b>	Chlorure Cl- mg/l	<b>135</b>
Température °C	-	Sulfate SO4-- mg/l	<b>300</b>
PARAMETRES DE POLLUTION	RESULTATS	Bicarbon. HCO3- mg/l	<b>137</b>
Oxygène Dissous mg/l		Carbonate CO3-- mg/l	<b>0</b>
Ammonium NH4+ mg/l	-	Silice SiO2 mg/l	-
Nitrite NO2- mg/l	-	TH ° F	<b>44</b>
Nitrate NO3- mg/l	-	TAC ° F	<b>11</b>
O.phosphate PO4- mg/l	<b>11,00</b>	TA ° F	<b>0</b>
Mat. Ox.(mil. Ac.) mg/l O2	-	Minéralisation mg/l	<b>742</b>
Fer en mg/l	-	Total des ions mg/l	<b>848</b>
		Manganèse en mg/l	-

Par ailleurs, nous avons réalisé une série d'analyses au niveau du laboratoire de l'URERMS dont les résultats sont résumés dans le tableau N°7. Les résultats obtenus montrent qu'il y a une légère différence entre l'eau distillée commerciale et l'eau produite par le prototype. L'eau distillée produite peut être utilisée dans l'industrie. Cependant, une amélioration dans la conception du prototype est primordiale si l'objectif est de produire de l'eau distillée à usage médical.

**Tableau N° 7: paramètres de la qualité d'eau après distillation (URERMS/ADRAR).**

	Conductivité [ $\mu$ s/cm]	TDS [mg/l]	Salinité [psu]	PH
Eau distillée produite	69.6	34.8	0.04	6.86
Eau distillée commerciale	11.26	5.63	0.02	6.00

Les résultats de calcul sont proches des résultats expérimentaux. Enfin, nous pouvons conclure que notre distillateur fonctionne bien et donne de bons résultats.

### VI. Conclusion générale et Perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude théorique et expérimentale du couplage d'un distillateur solaire avec un condenseur. Ce dernier est utilisé pour augmenter la production de distillat. Après avoir établie les propriétés : physiques, thermiques, chimiques et optiques de l'eau, nous avons présenté les différents procédés de désalement et un exposé détaillé pour la distillation solaire et les différents types des distillateurs solaires. Ensuite nous avons établi les échanges thermiques au niveau de chaque partie du distillateur. Le système d'équations résultant a été résolu par la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG d'ordre cinq.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement. Il apparaît en particulier qu'une augmentation de l'irradiation globale, qui reste le paramètre le plus influant, conduit à un accroissement de ces caractéristiques. Néanmoins, une trop grande puissance incidente peut produire l'effet inverse. Concernant la vitesse du vent, nous avons montré que dans un premier temps, l'effet du vent favorise l'échange. Il en résulte une augmentation de la production et des efficacités globale et interne. Cependant, au-delà d'une valeur approximativement égale à 3,5 m/s, l'effet devient défavorable. Nous remarquons que la production du distillateur couplé est supérieure à celle du distillateur sans couplage. De même que pour les efficacités globale et interne.

Notre intérêt s'est porté particulièrement sur l'effet de la chambre de condensation sur la masse d'eau distillée ainsi que sur les caractéristiques de fonctionnement. Il en résulte une augmentation de la production et des efficacités globale et interne (une augmentation approximative).

Nous avons également observé, qu'il y a une température du préchauffage pour chaque valeur de l'irradiation globale ce qui influe directement sur la production.

Il est évident, qu'un tel procédé de production d'eau n'est adapté que pour des régions isolées et ou éloignées où l'énergie solaire est généralement disponible. La distillation solaire représente un sujet tout à fait d'actualité et peut constituer une solution adéquate pour répondre aux besoins en eau.

Dans le but d'augmenter la productivité et minimiser le prix du distillateur, il nous a paru nécessaire de prendre en considération les perspectives suivantes :

- L'utilisation des polymères ou des matériaux composites pour la conception du prototype.
- L'introduction d'un système de refroidissement autonome pouvant refroidir le vitrage périodiquement.
- L'utilisation d'un système de ventilation entre les deux compartiments.

## VII. Bibliographie

- [1] R.Tchinda et E.Kaptouom, *Simulation numérique des performances d'un distillateur solaire fonctionnant en mode indirect, African Journal of Science and Technology (AJST), Science and Engineering Series Vol. 5, No. 1, pp . 79 – 91*
- [2] A. Abdel Dayem. *Experimental and numerical performance of a multi-effect condensation-evaporation solar water distillation system. Energy 2006;31:2710–27.*
- [3] SN.Rai et GN.Tiwari. *Single basin solar still coupled with flat plate collector. Energy Conversion and Management 1983;23(3):145–9*
- [4] S. Fedali et C. Bougriou. *Etudes Théorique et Expérimentale d'un Distillateur Solaire sous les Conditions Climatiques de BATNA, SIGCLE 2010.*
- [5] K.Sampathkumar, T.V. Arjunan, P. Pitchandi et P. Senthilkumar. *Active solar distillation A detailed review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14(2010)1503–1526*
- [6] P.T.Tsilingiris. *Modeling heat and mass transport phenomena at higher temperatures in solar distillation systems, The Chilton–Colburn analogy, Solar Energy 84(2010)308–317*
- [7] M. Boukar, A. Harmim et M. Amar. *Construction et expérimentation d'un distillateur solaire vertical indirect à simple effet, Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 75 – 81*
- [8] M. Boukar et A. Harmim. *Production Nocturne d'un Distillateur Solaire Couplé à un Capteur Plan en Milieu Saharien, Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 91-96*
- [9] M. Boukar et A. Harmim. *Parametric study of a vertical solar still under desert climatic conditions, Desalination 168 (2004) 21–28*
- [10] J.Duffie, W.A.Bebekman. *Solar Engineering of Thermal process »pp11-101,ed.Jonn wiley&Sons USA 1991.*
- [11] M.Iqbal. *An Introduction to Solar Radiation,Tome 1 1983,by Acadimic Press Canada.*
- [12] P.Brichambeaut. *Le gisement solaire de l'ALGÉRIE, Tec et Doc1982.*
- [13] A. El-Bahi, D. Inan., *A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condense. Desalination 123 (1999) 79-83*
- [14] H.haloui , C.khalif. *Modélisation de l'irradiation solaire sur un plan incliné sur site d'ADRAR par ciel clair, Rapport d'activité scientifique URERMS.*
- [15] M.Benhammou, A. BOUBEGHAL, H. MOUNGAR. *Réalisation et expérimentation d'un distillateur solaire couplé à un Condenseur, SIPE ,7.*

- [16] M.Benhammou et all. *Réalisation et expérimentation d'un distillateur solaire couplé à un condenseur, rapport d'activité scientifique, 2006. URERMS ADRAR.*
- [17] M.Benhammou et all. *Réalisation et expérimentation d'un distillateur solaire couplé à un condenseur, rapport d'activité scientifique, 2007. URERMS ADRAR.*
- [18] M.Benhammou et all. *Réalisation et expérimentation d'un distillateur solaire couplé à un condenseur, rapport d'activité scientifique, 2009.URERMS ADRAR.*
- [19] *Heat Transfer, T.P. HOLMAN, KIN KEONG PRINTING CO. PTE. LTD., Singapore (1986)*
- [20] *AID-MEMOIRE DU THERMIQUE, Edition ELSEVIER 1997.*
- [21] H. S. Aybar, H. Assefi, *A review and comparison of solar distillation: Direct and indirect systems, Desalination and Water treatment, (2009) Vol. 10, pp 321-331.*
- [22] R. Hamouche, *ATLAS VENT DE L'ALGERIE, Office National de la Météorologie, Dar-El-Beida, Alger (1990).*
- [23] J. P. Holman, *HEAT TRANSFER, 8th EDITION, INTERNATIONAL EDITION,1997.*
- [24] M.Daguenet, *Les séchoirs solaires: théorie et pratique, Unesco, 1985.*
- [25] J.M. Chasseriaux, *Conversion thermique du rayonnement solaire, Dunod, Paris, 1984.*
- [26] M.Capderou, *ATLAS SOLAIRE DE L'ALGERIE, Office des Publications Universitaire, Alger, 1985.*
- [27] J. L. Fernandez, N. Chargoy, *Multi stage indirectly heated solar still, Solar Energy, (1990), Vol. 44, N° 4,pp 215-223.*
- [28] J.A. Duffie et W. A. Beckman, *SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES, 2nd edition, WILEY INTERSCIENCE (1991).*
- [29] B.Eyglunet, *Manuel de thermique théorie et pratique, 2<sup>ème</sup> édition, HERMES, 1997.*
- [30] J. P. Holman, *HEAT TRANSFER, 8<sup>th</sup> EDITION, INTERNATIONAL EDITION,1997.*
- [31] B. Bouchekima, B. gros, R.Ouahes et M.Diboun, *Brackish water desalination wuth heat recovery, Desalination 138 (2001) 147-155.*
- [32] B. Bouchekima, B. Gros, R. Ouahes et M. Didoun, *Brackish water desalination with heat recovery, Desalination 138 (2001), pp 147-155.*
- [33] K. Ameer et O. Guerri, *Optimisation d'un système de pompage par aérogénérateur, ENERSOLE (2001), Adrar- Algérie.*
- [34] A. Khedim, *Mesure et caractérisation thermodynamique d'un nouveau système solaire de désalement de l'eau de mer avec récupération de chaleur, Revue des Energies Renouvelables, (2003), pp 1-12.*

- [35] R. Tchinda et E. Kaptoum, *Simulation numérique des performances d'un distillateur solaire fonctionnant en mode indirect*, *African Journal of Science and Technology (AJDT)*, Vol 5, N° 1 (2004), pp 79-91
- [36] K. Fahem, S. Ben Jabrallah, A. Belghith et J.P. Corriou, *Numerical simulation of the behaviour of a distillation cell with influence of the characteristics of heating wall*, *Desalination*, N° 210 (2006), pp 155-197.
- [37] N. Boukerzaza, A.Chaker et Z Hadad, *Influence de l'irradiation globale sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire*, *Revue des Energies Renouvelables* (2007), pp 229-234.
- [38] R. Chouikh, L. Ben Snoussi, A. Guizani, *Numerical study of the heat and mass transfer in inclined glazing cavity: Application to a solar distillation cell*, *Renewable Energy*, (2007), N° 32, pp 1511-1524.
- [39] N. Retiel, F.Abdessemed et M. Bettahar, *Etude expérimentale d'un distillateur solaire plan amélioré*, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11 N° 4 (2008), pp 635-642.
- [40] S. M. Radwan, A. A. Hassanain et M A. Abu-Zeid, *Single slope solar still for sea water distillation*, *Word Applied Science Journal*, 7 (2009), pp 485-497.
- [41] S.FEDALI, *Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales*, *MÉMOIRE DE MAGISTERE 2008*.
- [42] A.Kaushal et Varun, *Solar stills A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 446–453
- [43] GN. Tiwari. *Solar energy: fundamentals, design, modeling and application*. New York NewDelhi: CRC Press Narosa Publishing House;2003.
- [44] K. Murase , S. Kobayashi, M. Nakamura et S. Toyama. *Development and application of a roof type solar still*. *Desalination* 1989;73:111–8.
- [45] H.Tanaka , T .Nosoko et T. Nagata. *Experimental study of basin type, multi effect, And diffusion coupled solarstill*. *Desalination*2002;150(2):131–44.
- [46] H.Tanaka , H. Tanaka, T .Nosoko et T. Nagata. *A highly productive basin type multiple effect Coupled solar still*. *Desalination*2000;130(3):279–93.
- [47] H.Tanaka, Y. Nakatake et K .Watanabe. *A vertical multiple effect diffusion type Solar still coupled with a heat pipe solar collector*. *Desalination* 2004;160:195–205.
- [48] H.Tanaka , T .Nosoko et T. Nagata. *Parametric investigation of a basin type multiple effect coupled solar still*. *Desalination* 2000;130(3):295–304.
- [49] H.Tanaka et Y. Nakatake. *Improvement of the tilted wick solar still by using a flat plate reflector*.*Desalination*2007;216:139–46.



- [50] M.Malik , GN.Tiwari, A.Kumar et MS.Sodha . *Solar distillation. UK: Pergam on press;1982.*
- [51] MS.Sodha, A. Kumar, GN. Tiwari et RC. Tyagi. *Simple multiple wick solar still: analysis and performance. Solarenergy1981;26:127–31.*
- [52] A.Minasian et AA.Al-Karaghoul. *An improved solar still: the wick basin type. Energy Conversion and Management 1995;36(3):213–7.*
- [53] R.Tripathi et GN. Tiwari. *Performance evaluation of a solar still by using the Concept of solar fractionation. Desalination 2004;169(1):69–80.*
- [54] GN.Tiwari. *Fundamental, design, modeling and application. New York New Delhi: CRC Press Narosa Publishing House;2003.*
- [55] HN.Singh et GN.Tiwari. *Evaluation of coludiness/haziness factor for composite climat. Energy 2005; 30(2):1589–601.*
- [56] A.Mousa et AK. Bassam. *Water film cooling over the glass cover of a solar stillIncluding evaporation effects. Energy1997;22:43–8.*
- [57] KS.Spiegler. *Salt water purification. NewYork: PlenumPress;1977.*
- [58] HT.El-Dessouky et MH. Ettouney. *Fundamentals of salt water desalination. Oxford Elsevier;2002.*
- [59] ED.Howe. *Distillation of sea water. Solar energy handbook, Part B. New York: MarcelDekker;1980.*
- [60] H.Kunze. *A new approach to solar desalination for small and medium size use In remote areas. Desalination2001;139: 35–41.*

# Annexe A

## RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS

Le système d'équation différentielle régissant le fonctionnement du distillateur solaire se compose de 6 équations non linéaires d'ordre un. Nous avons 6 inconnues à déterminer:  $T_{ve}$ ,  $T_{vi}$ ,  $T_s$ ,  $T_p$ ,  $T_{ce}$ ,  $T_{ci}$ .

En fin de compte, ces équations se résolvent sous MATLAB par le sous-programme ODE113 qui est basé sur la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG, du 5<sup>ème</sup> ordre, rappelons brièvement son principe.

### Méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG

Le processus itératif de la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG du cinquième ordre sont donnés par :

$$y_{j+1} = y_j + \frac{16}{135} K_1 + \frac{6656}{12825} K_3 + \frac{28561}{56430} K_4 - \frac{9}{50} K_5 + \frac{2}{55} K_6$$

Chaque étape de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG nécessite l'utilisation de six valeurs suivantes :

$$K_1 = h f(t_j, y_j)$$

$$K_2 = h f\left(t_j + \frac{1}{4}h, y_j + \frac{1}{4}K_1\right)$$

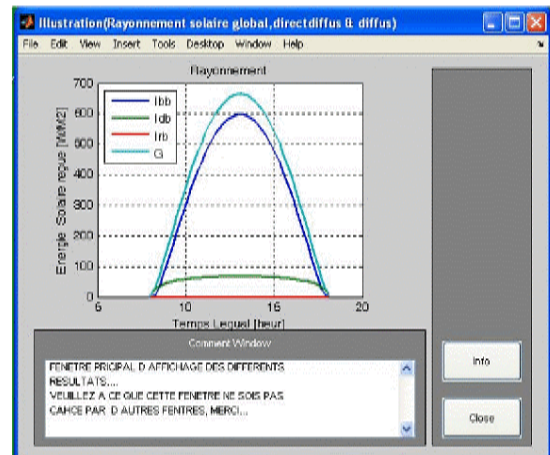
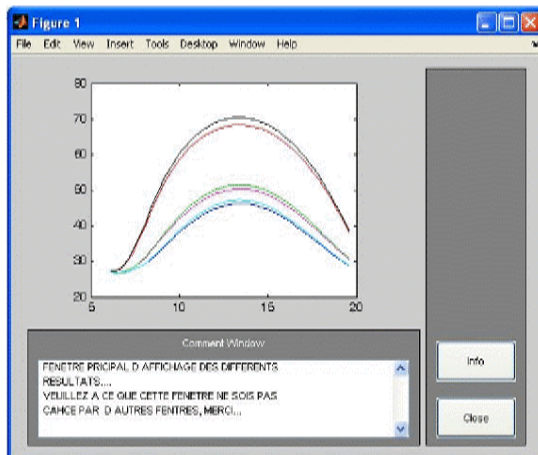
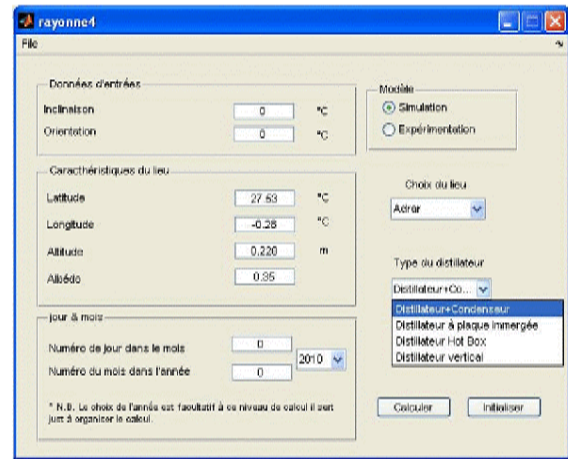
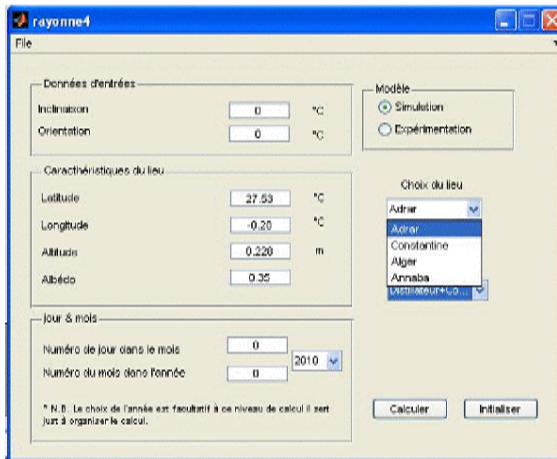
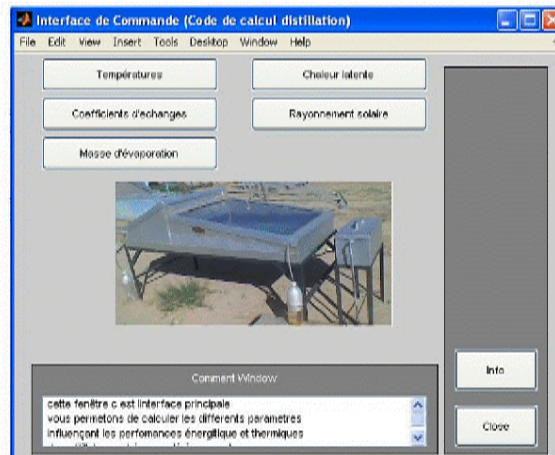
$$K_3 = h f\left(t_j + \frac{3}{8}h, y_j + \frac{3}{32}K_1 + \frac{9}{32}K_2\right)$$

$$K_4 = h f\left(t_j + \frac{12}{13}h, y_j + \frac{1932}{2197}K_1 - \frac{7200}{2197}K_2 + \frac{7296}{2197}K_3\right)$$

$$K_5 = h f\left(t_j + h, y_j + \frac{439}{216}K_1 - 8K_2 + \frac{3680}{513}K_3 - \frac{845}{4104}K_4\right)$$

$$K_6 = h f\left(t_j + \frac{1}{2}h, y_j - \frac{8}{27}K_1 + 2K_2 - \frac{3544}{2565}K_3 + \frac{1855}{4104}K_4 + \frac{11}{40}K_5\right)$$

Les figures ci-dessous illustrent l'interface de commande réalisée sous MATLAB pour calculer les différents paramètres du prototype.



	Géomètre	Propretés	Résulta	Avantages	Désav
	Surface = 500 mm 500 mm isolation = 1.5 mm, épaisseur de vitre = 5 mm	Utilité d'isolation. . Productivité, Efficacité stable	Les résultats obtenus sans isolation sont plus faible puisque la présence du vent augmente les déperditions d'énergie du système.	Facile à installation facile à utiliser. Moins coûteux. Construction simple.	Moins efficace productivité dans des pe surfaces.
	Base = 500 mm . 500 mm, réservoir= 500 mm <sup>2</sup> , tube = 15 mm, lin de verre = 1.3 mm, angle latéral = 14.6°, angle d'inclinaison = 9.7°	Augmentation de la température et l'intensité du rayonnement solaire par un système hybride.	Pour atteindre l'optimum et augmenté la production en utilise un système hybride.	Portable. Utilisé dans les caravanes et le front militaire. Dans le laboratoire.	À performan Utilisé pour simple.
	Surface = 500 mm . 500 mm, isolation = 1.5 mm, épaisseur de vitre = 5 mm	Rendement équilibré. La température ambiante. Vitesse du vent. Rapport humide.	Pour un distillateur conventionnel, le rendement augmente pour une légère augmentation du Va et puis diminue. Des valeurs élevées de h <sub>cr</sub> augmente les pertes E.	Plus efficace qu'un distillateur simple. La productivité de l'eau est plus élevée.	Très sensibl inconveni température
	Area = 500 mm . 500 mm, isolation = 1.5 mm, épaisseur de vitre = 5 mm, pump. Ire =1m	Puissance annuelle. Profondeur d'eau. Inclinaison de la plaque d'absorption	Le rendement du distillateur solaire passif en termes de puissance horaire pour des différentes profondeurs d'eau.	Les distillateurs passifs sont plus économiques pour fournir l'eau potable.	Coût d'invest élevé. Si la p d'eau augme rendement c
	Hauteur de distillateur = 1m. Longueur de la plaque de réflexion = 1 m, largeur de distil & la plaque de réflexion = 1m ,Ecart entre les partition de la diffusion = 5 mm. Nombres des partitions = 10. Emissivité du vitrage = 0.9. surface entre la vitre et le 1 <sup>er</sup> partition = 10 mm. Réflectivité de la plaque de réflexion. = 0.95. Émissivité de la surface avant de la 1 <sup>er</sup> partition = 0.3	Rayonnement solaire. Absorption solaire. Temps. Quantité quotidienne de distillat. Cloisons. Productivité globale. Épaisseur entre les partitions de diffusion. Taux d'entrée de l'eau saline. Réflectivité de la plaque de réflexion. Angle de la plaque réflexion.	La productivité quotidienne de combinaison est 1/5 de l'écaille. La quantité quotidienne de distillat est plus grande dans la deuxième partition et diminue de la deuxième à la dernière partition. La productivité quotidienne est plus grande le jour du solstice d'hiver 39,7 kg=m <sup>2</sup> qu'a celle du jour d'équinoxe du 34,2 kg=m <sup>2</sup> , puisque les rayons du soleil sont plus inclinés le solstice d'hiver que l'équinoxe.	Approprié à de petits buts. Plus efficace quand la lame d'aire est très petite. Principalement utilisé dans les fronts militaires. Facile à utiliser. souvent utiliser.	La diffusion partitions es principal pro La lame d'air vitre devra optimale.
	Largeur de distillateur=1 m. longueur = 1m. hauteur de réflecteur = 0.5m. Angle d'inclinaison de distillateur = 30°. Angle d'azimut = 0°. Écartement entre la mèche et le vitrage = 10 mm. L'absorption de la mèche = 0.9. Absorptivité du vitrage = 0.08. Réflectivité de réflecteur = 0.85	(1) production de distillat (2) rayonnement solaire absorbé sur la mèche. (3) quantité quotidienne de distillat. (4) inclinaison de distillateur. (5) temps	La production de distillat ainsi que le rayonnement solaire absorbé sur la mèche sont plus grande pour le distillateur avec le réflecteur davantage que le distillateur sans réflecteur de 8h du matin à 16h parce que la mèche ne pourrait pas recevoir le rayonnement du réflecteur à cette période.	La productivité quotidienne du distillateur avec le réflecteur augmente toujours de 9% par rapport à solaire simple. La productivité augmente. Utilisé pour des buts économiques.	sans réflect productivité mèche caus problèmes. L'alimentati de l'eau est la mèche. La dégradation mèche.
	Surface = 1 m <sup>2</sup> . Largeur = 0.5 m. Longueur = 2.0 m tubes transparents horizontaux = 0.10-0.25 m, i.e. diamètre interne. Tube horizontal = 0.01 m. Aile en plastique transparente mince = 0.01m.	Efficacité énergétique quotidienne. La chaleur latente de vaporisation. La température de vaporisation. Température	Une améliorée de productivité d'eau douce est obtenue. En ce qui concerne le distillateur solaire conventionnel dans lequel l'évaporation et la condensation se produisent dans un espace confine.	Facile à fabriquer. Le rendement est toujours plus élevé qu'un distillateur simple. Matière fibre employée. Longue durée de vie.	Le coût est Appareil très En raison de augmentation de matériau

## Annexe C



وزارة الموارد المائية  
**MINISTÈRE DES RESSOURCES EN EAU**  
 الوكالة الوطنية للموارد المائية  
**AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES**  
 Créé par décret N°81 / 167 du 25 juillet 1981 – Compte Trésorerie d'Alger N° 402.003.221  
 للدرع الجهوي للجنوب الغربي

Antenne Régionale Sud Ouest

Demandeur : MOUNGAR HOUCINE  
 Analyse demandée : A.F  
 Date de réception : 04/07/2011  
 N° de laboratoire : 2463  
 Designation : URER-MS EAU DE ROBINET

### RESULTATS D'ANALYSES

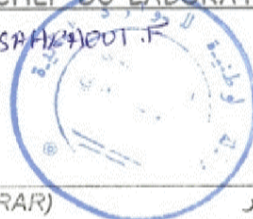
PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	RESULTATS	MINERALISATION GLOBALE	RESULTATS
PH	7,67	Calcium Ca++ mg/l	116
Conductivité ms/cm	1,20	Magnes. Mg++ mg/l	39
Turbidité eau brute NTU	0,00	Sodium Na+ mg/l	90
Turbidité eau déc. NTU	0,00	Potass. k+ mg/l	13
Residu sec à 110° C mg/l	790,00	Chlorure Cl- mg/l	135
Temperature °C	-	Sulfate SO4-- mg/l	300
PARAMETRES DE POLLUTION	RESULTATS	Bicarbon. HCO3- mg/l	137
		Carbonate CO3-- mg/l	0
Oxygène Dissous mg/l	-	Silice SiO2 mg/l	-
Ammonium NH4+ mg/l	-	TH °F	44
Nitrite NO2- mg/l	-	TAC °F	11
Nitrate NO3- mg/l	18,00	TA °F	0
O.phosphate PO4- mg/l	-	Minéralisation mg/l	742
Mat. Ox.(mil. Ac.) mg/l O2	-	Somme des ions mg/l	848
Fer en mg/l	-	Manganèse en mg/l	-

#### INTERPRETATION :

Eau de bonne qualité physico-chimique  
 le prélèvement a été fait par le demandeur

CHEF DU LABORATOIRE

P/SAHMEUT.F



ANRH / D.R.S.O : B.P 364 Adrar (W.ADRAR)

وومم : ص ب 364 ولاية أدرار

Tél.: (049) 96.66.92 – Fax : (049) 96.66.95



وزارة الموارد المائية  
**MINISTRE DES RESSOURCES EN EAU**  
 الوكالة الوطنية للموارد المائية

**AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES**

Créé par décret N°81 / 167 du 25 juillet 1981 – Compte Trésorerie d'Alger N° 402.003.221

Antenne Régionale Sud Ouest

الفرع الجهوي للجنوب الغربي

Demandeur : MOUNGAR HOUCINE  
 Analyse demandée : A.F  
 Date de réception : 04/07/2011  
 N° de laboratoire : 2464

Designation : URER-MS EAU DISTILLEE

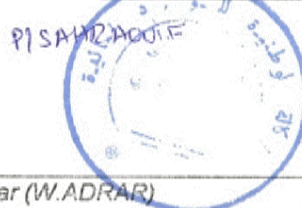
**RESULTATS D'ANALYSES**

PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	RESULTATS	MINERALISATION GLOBALE	RESULTATS
PH	3,31	Calcium Ca++ mg/l	9
Conductivité ms/cm	0,12	Magnes. Mg++ mg/l	6
Turbidité eau brute NTU	0,00	Sodium Na+ mg/l	3
Turbidité eau déc. NTU	0,00	Parass. K+ mg/l	1
Residu sec à 110° C mg/l	40,00	Chlorure Cl- mg/l	4
Temperature °C	-	Sulfate SO4-- mg/l	7
PARAMETRES DE POLLUTION	RESULTATS	Bicarbon. HCO3- mg/l	0
		Carbonate CO3-- mg/l	0
Oxygène Dissous mg/l	-	Silice SiO2 mg/l	-
Ammonium NH4+ mg/l	-	TH °F	4
Nitrite NO2- mg/l	-	TAC °F	0
Nitrate NO3- mg/l	11,00	TA °F	0
O.phosphate PO4- mg/l	-	Minéralisation mg/l	74
Mat. Ox.(mil. Ac.) mg/l O2	-	Somme des ions mg/l	40
Fer en mg/l	-	Manganèse en mg/l	-

**INTERPRETATION :**

Eau de bonne qualité physico-chimique  
 le prélèvement a été fait par le demandeur

CHEF DU LABORATOIRE



ANRH / D.R.S.O : B.P 364 Adrar (W.ADRAR)

وومم : ص ب 364 ولاية أدرار

Tél.: (049) 96.66.92 – Fax : (049) 96.66.95

## ملخص

التقطير الشمسي يعد من الطرق التي سنسمح لنا بتزويد القرى أو المدن الصغيرة ذات الاستهلاك المحدود والتي تعاني من ندرة في المياه. غير أن مردود هذه الطريقة يبقى محدود. وعليه في إطار عملنا هذا نعمل على تحسين المرادود من خلال ربط منظر بخجرة تكثيف. وحيث أنه يوجد عدد من المقطرات وقع اختيارنا على المقطر الشمسي الذي له مردود أكبر من مردود المقطر العادي وضيع حراري أقل. لقد قمنا بحساب الميزان الحراري للتكثيف المكونة من منظر، لاقط، مسخنة مائية، وحساب درجات الحرارة على مستوى كل جزء. مجموعة المعادلات التي يخضع لها عمل هذه التكنيكة ثم حلها باستخدام طريقة عددية مرونج كيناغيلبرق وتمت مقارنة هذه النتائج مع النتائج التجريبية التي قمنا بإجرائها بوحدة البحث في الطاقات المتجددة بأدرار. UREMS

النتائج المحصل عليها بينت بوضوح تأثير عدد من المقادير منها: الإشعاع الكلي، درجة حرارة المحيط، سرعة الرياح، درجة حرارة الماء، وحجمه على مواصفات الاشغال ( المرادود، الفعالية الإجمالية و الداخلية ).

كلمات الدالة: تقطير شمسي، لاقط، المرادود، الفعالية.

### Abstract

Solar distillation constitutes one of the processes, which will supply the potable water to villages and the small cities, with limited consumption. Nevertheless the efficiency of this process remains extremely limited.

The purpose of the present work consists to plan the coupling a solar still with a separated condenser. A solar still which allows to have a production higher than that of a plane distiller and whose thermal losses are less low is used.

In this study the heat balance of the system are established. Then the temperatures on the level of each part of the system are calculated. The system of equations governing the operation of this system is solved in MATLAB with the RUNGE-KUTTA-FEHLBERG, iterative method's. Theoretical results as compared to an experimental realized in UREMS ADRAR. The results obtained show clearly that the performances of the new device are better than those of the solar still when it is used alone. The influence of many parameters in particular the irradiation, the ambient temperature, the speed of the wind, the temperature of water, and the water depth, on the operating characteristic will be also presented.

**Key word:** solar still, collector, production, efficiency

## **Résumé**

La distillation solaire est un processus qui va nous permettre de fournir de l'eau potable dans les villages et les petites villes, avec une faible consommation. Néanmoins l'efficacité de ce processus reste extrêmement limitée.

Ce travail consiste à coupler un distillateur solaire avec un condenseur séparé, dans le but d'avoir une production plus élevée que celle d'un distillateur plan et dont les pertes thermiques sont plus faibles.

Dans cette étude, le bilan thermique du système est établi et les températures au niveau de chaque partie sont calculées. Le système d'équations qui régissent le fonctionnement de ce prototype est résolu par un code de calcul sous MATLAB avec la méthode itérative de RUNGE-KUTTA-Fehlberg. Les résultats théoriques sont comparés aux résultats expérimentaux après avoir réalisé le prototype au niveau de l'URERMS ADRAR. Les résultats obtenus montrent clairement que les performances de ce nouveau dispositif sont meilleures qu'un distillateur simple.

L'influence de plusieurs paramètres, en particulier l'irradiation, la température ambiante, la vitesse du vent, la température de l'eau, et la profondeur de l'eau, sur les paramètres de fonctionnement est également montrée.

Mot-clé: solaire encore, collecteur, la production, l'efficacité