

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE d'ADRAR  
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



Mémoire de Fin D'étude en Vue de L'obtention du Diplôme de  
Master en Physique Energetique

## Thème

# MODELISATION ET EXPERIMENTATION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE SIMPLE

Soutenu le : Mardi 08 /10/2013

Présenté par :

BERRAMDANE RAMDANE

Membres de jury :

Président :

Mr. B. OMARI (M.A) Univ.d'ADRAR

Encadré par :

Mr. H .MOUNGAR (A.R) URER ADRAR

Examineurs

Mr. M.BENHAMMOU (A.R) URER ADRAR

# *Dedicaces*

*Je dédie ce modeste travail à  
Mon cher papa et ma chère  
Maman, ainsi qu'à  
Mes frères et sœur, oncles  
Et tantes et ma famille  
Je dédie ce mémoire à toutes  
Les personnes que je n'ai pu citer  
Et qui se reconnaitront,  
A tous mes amis et collègues  
de travail*

*Berramdane Ramdane*

# Remerciement

*Avant tout je remercie mon dieu le tout puissant  
J'exprimer mes remerciement les plus chaleureux  
à monsieur H.MOUNGARE, Attaché de  
recherche, à l'unité de recherche en Energies  
Renouvelables en Milieu saharien /Adrar, pour  
ses encouragements, et les conseils précieux tout  
le long du travail.*

*Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à  
Mr B.OMARI, maître de conférences à  
l'université d'Adrar, qui a bien voulu accepter de  
présider le jury de soutenance.*

*Mr M.BENHAMMOU, Attaché de recherche, à  
l'unité de recherche en Energies Renouvelables  
en Milieu saharien /Adrar. D'avoir accepte de  
me faire l'honneur de juger ce travail et de  
participer à mon jury de mémoire.*

*Je remercie également tout les étudiants de  
physique énergétique.*

*Tout mes remerciements et mon estime a tous les  
enseignants du département de d' sciences de la  
matière.*

## **Table des Matières**

Table des Matières	
Liste des Figures	1
Liste des Tableaux	4
Nomenclature	5
Introduction	8
<b>CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
I.1. Problématique de l'eau potable	10
I.1.1. Le rôle de l'eau dans la vie	10
I.1.2. Critères de qualité de l'eau	11
I.1.3. Ressources et consommation de l'eau à l'échelle mondiale	15
I.1.4. Evaluation des ressources hydrique en Algérie	17
I.1.5. Consommation de l'eau potable en Algérie	19
I.1.6. Ressources en eaux dans la wilaya d'Adrar	20
I.2. Dessalement de l'eau saumâtre et de l'eau de mer	20
I.3. Distillation solaire	21
I.3.1 Principes de base des distillateurs solaires	21
I.4. présentation des travaux de recherches réalisés et publiés au cours de cette dernière décennie	22
<b>CHAPITRE II : CARACTERISTIQUE GENERALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE</b>	
II.1.Introduction	25
II.2. Constitution physique du soleil	25
II. 3. Les grandeurs astronomiques	26
II .3.1.Le temps solaire vrai TSV	26
II.3.2. Les coordonnées terrestres	27
II.4. Composantes du rayonnement solaire	31
II.4.1. Le rayonnement direct	32
II.4.2. Le rayonnement diffus	33
II.4.3. Le rayonnement solaire global	33
II.4.4. Le rayonnement réfléchi	34

II.5. Les modèles de Calcul du rayonnement solaire global incident sur une surface inclinée	34
II.5.1. Le modèle de Liu et Jordan (1963)	37
II.5.2. Modèle de PERRIN BRICHAMBEUT	38
II.5.3. Le potentiel solaire en Algérie	39
II.6. La température ambiante	
<b>CHAPITRE III : ETUDE THEORIQUE &amp; DEVELOPPEMENT MATHEMATIQUE</b>	
III.1- Description et principe de fonctionnement	40
III.2- Hypothèses simplificatrices	40
III.3 Paramètres et caractéristiques des distillateurs	41
III.3.1 Paramètres externes	41
III.3.2 Paramètres internes	41
III.3.3 Caractéristique de fonctionnement	41
III.3.3.1 Efficacité	41
III.4. bilans énergétiques dans un distillateur simple	43
III.4.1. L'énergie solaire incidente sur la vitre	44
III.4.2. L'énergie solaire transmise à travers la vitre	44
III.4.3. Transfert de chaleur interne par rayonnement (eau-vitre)	44
III.4.4. Transfert de chaleur interne par convection naturelle (eau-vitre)	45
III.4.5. L'énergie transférée par évaporation et condensation (eau-vitre)	45
III.4.6. Transfert de chaleur par convection à l'extérieur du distillateur (vitre-ambiant)	45
III.4.7. Transfert de chaleur par rayonnement à l'extérieur de distillateur (vitre-ambiant)..	46
III.4.7.1 L'échange par conduction entre l'intérieur et l'extérieur de la vitre	47
III.4.8. Pertes par réflexion et par absorption au niveau de la vitre	47
III.4.8.1. Le coefficient d'absorption	47
III.4.8.2. L'énergie solaire réfléchie	47
III.4.9. L'énergie absorbée et l'énergie réfléchie par l'eau au-dessus de la plaque de l'absorbeur	48
III.4.9.1. L'énergie absorbée par l'eau	48
III.4.9.2. L'énergie réfléchie par l'eau	48
III.4.9.3. Transfert d'énergie par convection entre l'eau et l'absorbeur	48
III.4.9.4. L'énergie absorbée par l'absorbeur	49

III.4.9.5.L'énergie de perte thermique arrière de la plaque d'absorption	49
III.4.10.Le coefficient de perte thermique arrière de la plaque d'absorption	49
III.5. Modélisation mathématique	49
III.5.1.Bilan au niveau de la vitre externe	49
III.5.2.Bilan au niveau de la vitre interne	49
III.5.3.Bilan au niveau de la saumure	50
III.5.4.Bilan au niveau de la plaque d'absorption	50
III.6. Analogie électrique	50
III.7. Organigramme	52
<b>CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU PROTOTYPE EXPERIMENTAL</b>	
IV.1. conception du distillateur solaire	53
IV.1.1 bac absorbant	53
IV.1.2 couverture transparente	54
IV.1.3 l'isolation thermique	54
IV.1.4 couverture extérieure	54
IV.1.5 cuve de récupération du distillat	54
IV.1.6 composants standards achetés	55
IV.1.7 réalisation des composants du distillateur solaire	55
IV.1.7.1 réalisation du bac absorbant et du coffre	55
IV.1.8 montage	55
IV.2 expériences	56
IV.3. montage de mesure	56
IV.4. calcul de la rentabilité du projet	57
<b>CHAPITRE V : RESULTATS &amp; DISCUSSION</b>	
V.1.résultats théoriques	60
V.1.1.introduction	60
V.1.2.variation de la puissance solaire	60
V.1.3. la variation de la température ambiante et la température du ciel	61
V.1.4. températures des différentes composantes de distillateur	61
V.1.5. variation temporelle des coefficients d'échanges	64

V.1.6. Variation temporelle de la masse d'évaporation	66
V.1.7.l'effet de l'écart de température « saumure-vitre » sur la production	69
V.1.8.l'efficacité globale et interne	69
V.1.9. L'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau.	70
V.1.9.1. L'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur l'écart de température	70
V.1.9.2.l'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur la production du distillat	72
V.1.9.3.l'influence de la vitesse du vent	73
V.2.résultats expérimentaux	76
V.2.1.illustration	76
V.2.2.comparaisons entre les résultats expérimentaux et théoriques	77
Conclusion générale	83
Annexe A	85
Annexe B	88

## Liste des Figures

<i>Liste des figures</i>	
<b><i>Chapitre I</i></b>	
Figure 1.1 : distillateur simple à effet de serre.....	22
<b><i>Chapitre II</i></b>	
Figure 2.1 : L'orbite terrestre.....	25
Figure. 2.2 : Variation annuelle de l'équation de la correction du temps.....	27
Figure 2.3 : Variation annuelle de la déclinaison solaire .....	27
Figure 2.4: Les coordonnées géographiques .....	27
Figure 2.5 : Les différents angles astronomiques inclinée.....	29
Figure 2.6 : Bilan énergétique terrestre.....	32
Figure 2.7: Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu .....	39
<b><i>Chapitre III</i></b>	
Figure 3. 1 : Schéma du distillateur solaire proposé.....	41
Figure 3-2 : Bilans énergétiques d'un distillateur solaire simple.....	43
Figure 3-3. Représentation de l'analogie électrique.....	51
<b><i>Chapitre IV</i></b>	
Figure 4. 1 : montage de mesure.....	56
<b><i>Chapitre V</i></b>	
La figures.5.1 Energies solaires reçues par le distillateur pour la journée du 3 juillet.....	60
La figures.5.2 Variations temporelles de la température ambiante..... et la température de ciel pour la journée du 3 juillet	61
Figure 5.3:Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 17 Janvier.....	62



Figure 5.4:Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 16 Mars.....	62
Figure 5.5:Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 3 juillet.....	63
Figure 5.6:Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 15 septembre.....	63
Figure.5. 7: Variation temporelle de la chaleur latente de vaporisation. Pour la journée du 3 juillet.....	64
Figure.5.8: Variation temporelle des coefficients d'échanges thermiques Pour la journée du 03 juillet.....	65
Figure.5.9: Variation temporelle des coefficients d'échanges thermiques Pour la journée du 03 juillet.....	65
Figure 5.10: Variation temporelle des coefficients d'échanges thermiques Pour la journée du 03 juillet.....	66
Figure .5.11: Energie solaire reçu et la masse d'évaporation Pour la journée du 3juillet.....	66
Figure 5.12: Variation de la masse d'évaporation en fonction de rayonnement solaire Pour la journée du 3juillet.....	67
Figure 5.13:Variation temporelle du débit de distillat Pour les journées du 17/1,16 /3,3/7,15/9.....	58
Figure 5.14: production cumulée Pour les journées du 17/1,16 /3,3/7,15/9 .....	58
Figure 5.15:Variation de la production en fonction de l'écart de Température entre la saumure et la vitre.....	69
Figure 5.16: efg : efficacité global efi : efficacité interne.....	70
Figure 5.17: Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur l'écart de température es=1, 2, 4, 8 cm.....	71
Figure 5.18: Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur le volume du distillat, es=1, 2, 4, 8,10 cm.....	72
Figure 5.19: Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur le débit de distillat es= 2, 4, 8 cm .....	73
Figure 5.20: Influence de la vitesse du vent sur la température de la vitre.....	74
Figure 5.21: Influence de la vitesse du vent sur le débit de distillat .....	75

Figure 5.22: Influence de la vitesse du vent sur la production d'eau distillée.....	75
Figure 5.23 Energie reçue et température ambiante pour la journée du 03 juillet.....	76
Figure 5.24 Energie reçue et température ambiante pour la journée du 06 juillet.....	77
Figure 5.25 Températures des différentes composantes du distillateur et température ambiante pour la journée du 03 juillet.....	78
Figure 5.26 Températures des différentes composantes du distillateur et température ambiante pour la journée du 06 juillet.....	78
Figure 5.27 Variations de la quantité d'eau distillée en fonction du temps Pour les journées du 2,3 et 4 juillet.....	79
Figure 5.28. production nocturne Pour les journées du 2,3 et 4 juillet.....	79
Figure 5.29. Comparaison entre des Températures théorique et expérimentale de la saumure pour les journées du 03 et 07 juillet.....	80
Figure 5.30 Comparaison entre des Températures théorique et expérimentale de la face interne du vitrage pour les journées du 03 et 07 juillet .....	81
Figure 5.31 Comparaisons entre des températures théoriques et expérimentales de la face extérieure du vitrage pour les journées du 03 et 07 juillet.....	82
Figure 5.32. : comparaissent des résultats théoriques et expérimentaux de la production du distillat pour les journées du 02et03 et 07 juillet.....	82
Figure A.1: Erreur relative de la vitre intérieure pour la journée du 3 juillet.....	86
Figure A.2: Erreur relative de la saumure pour la journée du 3 juillet.....	86
Figure A.3: Erreur relative de la vitre extérieure pour la journée du 3 juillet.....	87

## Liste des Tableaux

<b>Liste des Tableaux</b>	
<i><b>Chapitre I</b></i>	
Tableau.1.1. Recommandations de l’OMS sur la qualité de l’eau potable.....	12
Tableau.1.2. Caractéristiques des eaux de surfaces et souterraines.....	13
Tableau .1.3. Salinité des principales eaux de mer .....	15
Tableau.1.4. Répartition de l'eau dans le monde.....	16
Tableau .1.5. Consommation mondiale d'eau.....	17
Tableau.1.6. Précipitation.....	18
Tableau.1.7. Les potentialités en eau dans l'Algérie.....	19
<i><b>Chapitre II</b></i>	
Tableau 2.1 : Les constantes caractérisant l'état.....	38
Tableau .2.2 : Potentiel solaire en Algérie pour différentes régions.....	38
<i><b>Chapitre III</b></i>	
Tableau 3-1 : Réflexion, absorption, transmission vis-à-vis du rayonnement.....	43
Tableau.2.2. Représentation des analogies électriques.....	50
<i><b>Chapitre IV</b></i>	
Tableau .4.1 : Les dimensions de la surface de l’absorbeur.....	53
Tableau .4.2 : Les dimensions de la vitre .....	54
Tableau .4.3 : Les dimensions de l’isolant thermique. ....	54
Tableau .4.4 : Les dimensions d’ coffre externe. ....	54
Tableau .4.5 : Récapitulatif de différents éléments du distillateur.....	55
Tableau .4.6 : Coût des différents éléments du distillateur.....	57
Tableau .4.7. La production moyenne du prototype..... ;.....	59

# Nomenclature

## Lettres latin

$E$	Epaisseur	m
$A$	Surface d'échange	$m^2$
$T$	Température	$^{\circ}C, ^{\circ}k$
$\Delta T$	Différence de température	$^{\circ}C, ^{\circ}k$
$Q$	Flux de chaleur	W
$Q_{ev}$	Puissance d'évaporation	$W/m^2$
$Q_{eau}$	Puissance absorbée par l'eau distillée	$W/m^2$
$L_v$	Chaleur latente de vaporisation	J/kg
$P$	Pression de saturation	mm Hg
$m$	Masse	kg
$\dot{m}_{ev}$	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	$W/(m^2 \cdot K^{\circ})$
$G$	Puissance solaire reçue par le distillateur	$W/m^2$
$C_p$	Chaleur spécifique	$J/(kg \cdot K^{\circ})$
$g$	Champ de gravitation = 9.81	$m/s^2$
$t$	Temps	s
$T_L$	Heure du lever du soleil	h
$T_c$	Heure du coucher du soleil	h
$T_L$	Temps local du site	h

TSM	Temps solaire moyen	<i>h</i>
TSV	Temps solaire vrai	<i>h</i>
E	Equation de correction du temps	minute
n	Numéro du jour du moi par rapport à l'année	

**Lettres grecques :**

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

$\rho$  Coefficients de réflexion

$\rho_g$  Albédo

$\eta_i$  Efficacité interne

$\eta_g$  Efficacité global

### **Indices**

a	Ambiant
sk	Ciel
c	Convection
evp	Evaporation
v	Vitre
vi	Face interne de la vitre du distillateur
ve	Face externe de la vitre du distillateur
e	Eau
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)

### **Nombres adimensionnels**

$Pr$	Nombre de PRANDLT
$Gr$	Nombre de GRASHOF
$Ra$	Nombre de RAYLEIGH=(GrPr)
$Nu$	Nombre de NUSSELT



### Introduction générale

L'eau représente l'élément essentiel à toute vie sur terre depuis la création de l'univers à tel point qu'elle est très abondante sur notre planète et elle est estimée à 1380 millions de km<sup>3</sup>, malheureusement 97,2 % est constitué d'eau de mer inutilisable directement. L'eau douce disponible (lacs, fleuves, eaux souterraines), ne représente que 0,07 % de la ressource totale, soit environ un million de km<sup>3</sup>. [1]. 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.

Par ailleurs, plusieurs projets de recherches 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 simple. L'objectif de notre travail s'étale sur des axes, le premier un développement mathématique et modélisation numérique du comportement du distillateur proposé et le deuxième axe est la réalisation et la mise en marche du prototype de distillateur réalisé, pour terminer par une étude comparative des résultats de simulation et d'expérimentation, qu'est 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 présente la problématique d'eau potable, et dessalement de l'eau saumâtre et page d'histoire sur les travaux antérieurs réalisés durant la dernière décennie sur les distillateurs solaires.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons un bref rappelle sur les caractéristiques générales du rayonnement solaire.

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

Le quatrième chapitre présente une brève description du prototype expérimental et des instruments de mesure.

Le Cinquième chapitre, est consacré à l'interprétation des résultats obtenus, par le code de calcul simulant le fonctionnement et l'étude expérimentale de notre prototype.

Ce mémoire est doté d'annexe, où on présente la résolution numérique des équations différentielles par la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG.

# Chapitre

## I

### Etude Bibliographique

---

*Ce chapitre est consacré à une présentation de la problématique de l'eau potable ; dessalement de l'eau saumâtre ; distillation solaire ; des travaux de recherches réalisés et publiés au cours de cette dernière décennie.*

## I.1. Problématique de l'eau potable.

### I.1.1. Le rôle de l'eau dans la vie.

L'eau est une substance indispensable et irremplaçable à la survie de tous les êtres vivants : êtres humains, animaux et plantes, qui ont tous besoin de leur ration quotidienne d'eau. Ses usages se sont d'ailleurs intensifiés et les volumes d'eau utilisés par l'homme ont décuplé depuis le début du XXe siècle. L'eau sera, au cours du prochain siècle, une denrée qui se raréfiera.

Les disponibilités hydriques naturelles doivent exister en quantités suffisantes, même dans les régions arides et déshéritées, pour que leur répartition et leur utilisation ne présentent pas de difficultés particulières. Mais en notre époque moderne, caractérisé par un essor démographique, industriel et agricole sans précédent, des utilisations nouvelles sont venues s'ajouter aux usages anciens et traditionnels de l'eau. L'exploitation de plus en plus poussée des potentiels de production jointe à la nécessité d'alimenter des collectivités plus nombreuses, et où les besoins de chaque individu sont en augmentation constante, exigera dans les années qui viennent des ressources hydriques toujours plus importantes.

La marge excédentaire qui a pu longtemps exister entre ressources disponibles et besoins à satisfaire va ainsi en s'amenuisant de jour en jour. Tous les pays ont donc, ou auront à brève échéance, à faire face à un problème d'optimum, c'est-à-dire la recherche des solutions les plus rationnelles et les plus efficaces pour exploiter et répartir au mieux la totalité des ressources hydriques dont ils peuvent disposer. Il apparaît ainsi que l'eau ne doit plus être considérée comme un capital inépuisable dont chacun, individu ou collectivité, peut user à sa guise, mais qu'elle constitue au contraire une richesse soumise à des lois économiques bien précises. Certains pays, comme le Canada, ont beaucoup de ressources d'eau, d'autres pays en ont un manque comme ceux du Golfe et les pays arides du Moyen Orient et du nord de l'Afrique et de la région au sud du Sahara.

Le problème majeur, qui se pose aujourd'hui à l'homme avec une acuité de plus en plus accrue n'est certainement par d'ordre quantitatif, mais plutôt de nature qualitative. En effet, les eaux de qualité requise sont de plus en plus rares même dans les pays relativement bien dotés par la nature, suite à un processus de développement hautement polluant surtout dans le monde industrialisé.

Population Action International (PAI) a mis ces estimations à jour en 1997, en prenant pour base les projections de population pour 2025 et 2050. Les résultats sont étonnants: en

1995, 31 pays où vivent près d'un demi-milliard d'habitants se sont trouvés régulièrement en présence de contraintes ou de pénuries d'eau. En 2025, 48 pays, avec une population d'environ 3 milliards d'habitants, devraient être confrontés à des pénuries d'eau. Les 20 pays du Proche-Orient et de l'Afrique du Nord sont les plus mal lotis. En fait, le Proche-Orient "n'a plus d'eau" depuis 1972.

L'Afrique a elle aussi de grave problème d'eau. Déjà, plus de 200 millions d'Africains vivent dans des pays à déficit hydrique et à contraintes d'eau. D'ici 2025, le nombre d'habitants pourra atteindre 700 millions, dont la moitié vivront dans des pays qui ont à faire face à de graves contraintes pendant la plus grande partie de l'année [2]

### **I.1.2. Critères de qualité de l'eau.**

#### **I.1.2.1. Eau potable.**

Une eau potable doit présenter un certain nombre de caractères physiques, chimiques, biologiques et en outre répondre à des critères organoleptiques essentiels (elle doit être incolore, insipide, inodore, fraîche) appréciés par le consommateur (voir Tableau.1.1). Toutefois, ses qualités ne peuvent pas se définir dans l'absolu, ni d'une manière inconditionnelle. L'Organisation Mondiale de la Santé a édicté des normes internationales pour l'eau de boisson, qui comprennent un exposé général des normes bactériologiques, physiques, chimiques, biologiques et radiologiques.

Selon les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), une eau destinée aux usages domestiques doit avoir une salinité inférieure ou égale à 0,5 g/L, avec une dureté (T.H) entre 1,5 et 3 degré français (°F) et elle ne doit pas contenir plus de 200 mg/L de chlore, ni plus de 75 mg/L de calcium, ni plus de 50 mg/L de magnésium, ni plus de 150 mg/L de sulfates [2]

**Tableau.1.1.** Recommandations de l’OMS sur la qualité de l’eau potable [3]

<i>Paramètres</i>	<i>Limites supérieures recommandées</i>	<i>Unités</i>
<i>Constituants inorganique</i>		
Arsenic	0,05	mg/L
Cadmium	0,005	mg/L
Chrome	0,05	mg/L
Cyanide	0,1	mg/L
Fluor	1,5	mg/L
Plomb	0,05	mg/L
Mercure	0,001	mg/L
Nitrate	10	mg/L(N)
Sélénium	0,01	mg/L
<i>Qualité Esthétique</i>		
Aluminium	0,2	mg/L
Chlorure	250	mg/L
Couleur	15	TCU
Cuivre	1,0	mg/L
Dureté	500	mg/L
Fer	0,3	mg/L
Manganèse	0,3	mg/L
pH	6,5-8,5	-
Sodium	200	mg/L
Solides dissous	1000	mg/L
Sulfate	400	mg/L
Goût et odeur	-	-
Turbidité	5	NTU
Zinc	5,0	mg/L

**I.1.2.2. Eaux de surface et eaux souterraines.**

Les eaux de surface sont rarement potables sans traitement. Elles sont habituellement bactériologiquement polluées (i.e. pollution urbaine, industrielle, ou agricole) [4]. La composition des eaux de surface dépend de celle des sols qu'elles traversent et des polluants qui y sont déversés. On peut cependant noter d'une façon générale la présence de gaz dissous ( $O_2$ ), de matière en suspension, de matière organique, et de plancton. De plus, les caractéristiques des eaux de surface subissent de fortes variations dû es à l'ensoleillement, la pluie et selon la profondeur du cours d'eau.

Les eaux souterraines sont habituellement de bonne qualité. La composition des eaux souterraines est fonction de la composition des sols qui les contiennent. On peut cependant noter d'une façon générale l'absence d'oxygène, une faible turbidité, et une forte minéralisation. De plus, les eaux souterraines sont de composition relativement constante. La présence de fer et de manganèse et l'agressivité de l'eau due à la haute teneur en dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) sont les principales sources de problèmes avec ces eaux. Nous retrouvons au tableau.1.2 [3].

**Tableau.1.2.** Caractéristiques des eaux de surfaces et souterraines [3].

<i>Caractéristiques</i>	<i>Eaux de surfaces</i>	<i>Eaux souterraines</i>
Température	Variable suivant les saisons	Relativement constante
Turbidité	Variable, parfois élevée	Faible ou nulle
Couleur	Liée aux matières en suspension	Liée aux matières dissoutes
$CO_2$ agressif	Généralement absent	Souvent présent
$O_2$ dissous	Près de la saturation	Absent la plupart du temps
$H_2S$	Généralement absent	Souvent présent
$NH_4$	Présent dans les eaux polluées	Fréquemment présent
Nitrates	Peu abondants généralement	Teneur parfois élevée

**I.1.2.3. Eau de pluie.**

L'eau de pluie comme telle est plutôt pure à moins que le niveau de pollution atmosphérique soit élevé. L'eau peut être cependant contaminée par la surface de collection. En effet, des excréments d'animaux, des matières organiques, ainsi que la poussière peuvent s'y trouver et ainsi contaminer l'eau. Egalement, les matériaux servant à la construction des systèmes de collecte de l'eau peuvent aussi la contaminer (i.e. la chaume, la peinture, etc....).

**I.1.2.4. Eaux saumâtres et eaux de mer.**

Une eau saumâtre est une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. Les eaux de certaines nappes superficielles ou souterraines peuvent être salées, avec des salinités très diverses. Les eaux des lagunes, plus ou moins en communication avec la mer, peuvent présenter une salinité très élevée. On trouve aussi à l'intérieur des continents des lacs d'eau salée.

Si, d'autre part, on examine le cas des eaux souterraines chargées de sels qu'on trouve dans différentes régions du monde, on constate que leurs salinités sont très diverses et comprises entre 2 grammes environ et quelques centaines de grammes par litre. Mais ce sont les eaux saumâtres les moins chargées en sels qui sont les plus abondantes, et la question du dessalement de ces eaux se pose essentiellement pour celles dont la salinité est comprise entre 2 et 10 g/L, et le plus souvent entre 2 et 5 g/L. Ces eaux saumâtres, en générale, contiennent proportionnellement davantage de sels de magnésie ou de sulfates que l'eau de mer. D'autre part, les eaux de drainage peuvent contenir 4 g/L de sels ou davantage.

L'eau de mer est un liquide dont la composition est extraordinairement variée, puisqu'on y trouve une cinquantaine de corps simples, dont certains, il est vrai, ne sont présents qu'à l'état des traces. L'énumération de ces corps simples va de l'hydrogène, de l'oxygène, du chlore et du sodium - dont les pourcentages en poids sont prédominants- au magnésium, au calcium, au potassium, au soufre, au brome, au fer, au phosphore, à l'iode, au cuivre, à l'or, au nickel, au cobalt, au radium, à l'uranium, et à beaucoup d'autres corps qui n'existent dans l'eau de mer qu'en infimes quantités.

Mais c'est la teneur de l'eau de mer en sels qui nous intéresse ici. Le sel prédominant est le chlorure de sodium (environ 27 g/L). Il y a aussi du chlorure de magnésium (environ 3,8 g/L), du sulfate de magnésium (environ 1,7 g/L), du sulfate de calcium (environ 1,3 g/L), du sulfate de potassium (environ 0,8 g/L) et du carbonate de calcium (environ 0,1 g/L) ; ce dernier étant

d'ailleurs sous forme de bicarbonate soumis à l'équilibre carbonique. Il y a aussi du bromure de magnésium (environ 0,08 g/L).

En additionnant les teneurs ci-dessus, on trouve environ 35 grammes de sel par litre, mais en réalité il faut considérer que, d'une façon générale, l'eau de mer contient de 35 à 42 g/L de sels minéraux dissous, la salinité étant différente selon les mers [5].

**Tableau .1.3.** Salinité des principales eaux de mer [6]

Mers	Mer Baltique	Mer Caspienne	Mer Noir	Mer Adriatique	Océan pacifique	Océan Indien	Océan Atlantique	Mer Méditerranée	Golf Arabique	Mer Rouge	Mer Morte
Salinité en(g/L)	7	13,5	20	25	33,5	33,8	36	39	43	43	270

### I.1.3. Ressources et consommation de l'eau à l'échelle mondiale.

La quantité d'eau totale sur Terre est restée stable depuis plus de 3,5 milliards d'années qu'elle est apparue. L'eau s'évapore, forme la vapeur d'eau qui, en se transformant en pluie, va alimenter les mers, les cours d'eau et les nappes souterraines. Dans l'atmosphère, l'eau est surtout présente à l'état de vapeur. Puis sous l'effet du refroidissement, l'eau passe de l'état de vapeur à l'état liquide (pluie) ou à l'état solide (neiges, glaces polaires). Il y a toujours autant d'eau qui s'évapore que d'eau qui tombe en précipitations, mais pas au même endroit, ni au même moment. Le moteur de ce cycle est le soleil, ou plus exactement l'énergie solaire qu'il dégage. En effet, c'est cette dernière qui entraîne les changements d'état de l'eau: la formation et la fonte des glaces, ou encore l'évaporation de l'eau et son élévation dans l'atmosphère.

Le volume d'eau contenu par la terre est de  $14.10^8 \text{ km}^3$ . Cela présente un cube de plus de 1000 kilomètres de côté, ou 400 fois le volume de la Méditerranée. Mais les océans et mers intérieures ou lacs salés constituent à eux seuls plus de 97 % de l'ensemble ; quant aux eaux douces, évaluées à 38,3 millions de kilomètres cubes, si l'on met à part les 29,5 millions de kilomètres cubes faits de glaciers et calottes polaires et que l'on doit considérer comme non



directement utilisables, il ne reste plus qu'environ 8,8 millions de kilomètres cubes effectivement disponibles, dont plus de 8,6 millions en réserves souterraines [5,6].

**Tableau.1.4.** Répartition de l'eau dans le monde [5,6].

Réservoirs	Volume ( $\times 10^{15} \text{ m}^3$ )	% Total
Océans	1350	97
Glaciers (calotte glacière)	33	2,4
Eaux souterraines	8	0,6
Lacs	0,1	<0,01
Eau dans le sol	0,070	<0,01
Eau dans l'atmosphère	0,013	<0,001
Rivières	0,0017	0,0001
Eau dans la matière vivante	0,0011	0,0001
<b>Total</b>	1391	100 %

A l'échelle mondiale, les ressources en eau potable sont réparties entre les trois types de besoin, les besoins agricoles représentent 70 % des ressources en eau utilisées suivis des besoins industriels avec 22 % et enfin les besoins domestiques estimés à 8 %. Ces chiffres représentent une moyenne mondiale ponctuelle évoluant dans le temps et dans l'espace. Ils évoluent différemment d'un continent à l'autre et entre les pays (Tableau.1.5) mais ils nous renseignent sur la consommation dominante du secteur agricole. Un secteur qui consomme près de trois quart des ressources en eau de la majorité des pays. Cela ne peut se faire qu'au détriment des autres utilisateurs et notamment les populations.

Le niveau de consommation d'eau potable d'un pays, comme celui de l'énergie, est devenu un indicateur de son niveau de développement économique, comme le montre le Tableau [7].

**Tableau .1.5.** Consommation mondiale d'eau [7]

<b>Zone</b>	<b>Consommation en m<sup>3</sup>/habitant. an</b>	<b>Consommation en L/habitant. j</b>
Afrique	17	47
Asie	31	87
Europe	122	334
USA, Japon	210	578
Moyen mondial	50	137

Les ressources en eaux renouvelables offertes par la nature peuvent être estimées à partir des flux du cycle de l'eau et plus particulièrement des flux de circulation des eaux continentales aux environs de 40 m<sup>3</sup>/an. Compte tenu de la population actuelle de la planète qui dépasse 6 milliards d'habitant, la quantité moyenne d'eau renouvelable disponible est de l'ordre de 7000 m<sup>3</sup>/an/habitant, soit 20 m<sup>3</sup>/jour/habitant, ce qui est très largement supérieur aux besoins [6].

En fait, les problèmes actuels et futurs sont multiples:

- La population de la planète ne cesse d'augmenter alors que la ressource reste constante. Dans certains cas même, cette ressource diminue par suite des problèmes de pollution.
- Les ressources et besoins en eau sont très variables selon les régions. Il y a les déserts et les zone subarides (30 % des terres émergées) qui n'ont que peu ou pas d'eau. Il y a aussi certaines zones équatoriales ou tropicales sur lesquelles tombent chaque année plusieurs millimètres de pluie.

#### **I.1.4. Evaluation des ressources hydriques en Algérie.**

L'Algérie dispose de ressources en eau très limitées. Tout au moins au nord où vivent les trois quarts de la population.

Sur les 100 milliards de m<sup>3</sup> que constituent les précipitations, nous concédons 85% à l'évaporation alors que sur les 12,5 milliards de m<sup>3</sup> qui ruissellent 50% partent à la mer ou dans les chotts. Au nord, seuls 3,5 milliards de m<sup>3</sup> sont « régularisables » [8].

La pluviométrie est le paramètre le plus important dans l'évaluation des ressources en eau. Elle varie de plus de 2000 mm/an sur les hauts reliefs en bordure de la mer méditerranéenne, à moins de 100 mm/an au nord de Sahara [8].

Les moyennes annuelles des précipitations suivent une zonalité générale Nord-Sud, qui définit les zones climatiques. Cependant, on note également des écarts notables entre l'Est et l'Ouest du pays. La région Oranaise (Ouest) est en général moins arrosée que le constantinois (Est), comme on peut le constater au (Tableau.1.6). Les précipitations sont croissantes d'Ouest vers l'Est.

**Tableau.1.6.** Précipitation (mm) [8].

Région	Précipitations en (mm)		
	Ouest	Centre	Est
Littoral	400	700	900
Atlas Tellien (plaines)	500	450	700
Atlas Tellien (reliefs)	600	700-1000/800-1600	
Haut plateaux Tellien	-	-	400
Haut plateaux Steppiques	50	250	-
Atlas Saharien	200	200	400-700
Sahara Septentrional	50	50-150	150

La pluviométrie a imprimé les grands traits de la répartition générale des ressources en eau, superficielles et souterraines, et explique, en grande partie, les différences régionales.

Le bilan des écoulements superficiels est de l'ordre de 12,5 milliards de m<sup>3</sup> repartis comme suit :

- Bassins méditerranéens 11,2 Milliards m<sup>3</sup>
- Bassins fermés des hautes plaines 0,7 Milliards m<sup>3</sup>

- Bassins Sahariens 0,6 Milliards m<sup>3</sup>

Ainsi, la région tellienne qui ne représente que 7% de la surface du pays représente à elle seule plus de 90% de l'écoulement total. Avec un déficit aussi conséquent, il s'agit de mettre en œuvre une stratégie homogène et rationnelle en tenant compte des potentialités et des compromissions de la nature. Ce déficit fait que l'Algérie est classée 14<sup>ème</sup> pays manquant le plus d'eau et qu'en 2025, elle sera, démographie oblige, classée à la 6<sup>ème</sup> place; déjà que l'Algérien consomme uniquement 55 m<sup>3</sup> par an [8].

Dans le monde Arabe, le volume total des eaux de surface est estimé à 204 milliards de m<sup>3</sup>. Au Maghreb, l'Algérie avec sa centaine de barrages ne mobilise que 4.5 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> alors que le Maroc avec 33 barrages mobilise 10 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>, tandis que la Tunisie avec ses 28 barrages totalise 2,4 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>. Pour l'ensemble des barrages Algériens les sédiments déposés sont évalués à 100 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> en 5 ans soit 20 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> /an de volume perdu.

Les eaux souterraines sont évaluées à 1,8 milliards de m<sup>3</sup> dans le Nord de l'Algérie. Les potentialités du sud sont estimées à 60000 milliards de m<sup>3</sup>. Ces dernières sont difficilement exploitables et renouvelables ; et 4 à 5 milliards de m<sup>3</sup> sont exploitables annuellement [9].

### 1.1.5. Consommation de l'eau potable en Algérie.

La demande en eau douce, croit chaque année de 4 à 5% (Tableau.1.7), tandis que les ressources naturelles restent invariables pour ne pas dire qu'elles diminuent (problème de pollution de plus en plus grand). Cette équation montre que bientôt la demande sera supérieure aux ressources

**Tableau.1.7.** Les potentialités en eau dans l'Algérie [9].

Année	1962	1990	1995	1998	2000	2020
m <sup>3</sup> /habitant	1500	720	680	630	500	430

La consommation d'eau distribuée est de 161 L/hab/j ; si l'on tient compte des fuites (50%) dues à l'industrie et du tourisme, cette quantité devient 60 L/hab/j. Pour les 20 années à venir, pour résoudre le problème de la pénurie d'eau, l'investissement est estimé à 17 milliards de

dollars, sans parler de la réhabilitation et du renouvellement des différentes infrastructures (300 millions de \$), soit au total 1,2 milliard de \$/an.

En Algérie, la population était estimée à 23 millions en 87 ; 28 en 95 ; 32 en 2000 ; 36 en 2010 ; et 46 en 2020, soit une consommation potable et industrielle de l'ordre de 5 milliards de m<sup>3</sup> alors que la mobilisation actuelle est à peine de 2 milliards de m<sup>3</sup>. Il faudrait mobiliser dans les 20 ans à venir 3 milliards de m<sup>3</sup>, en excluant les eaux d'irrigations et les fuites dans les conduites. Les superficies irriguées sont estimées à 450000 Ha, l'objectif à atteindre à court terme étant de 770000 Ha, et si l'on suppose qu'en moyenne, il faut 8000m<sup>3</sup>/ha, il nous faudrait mobiliser 6,2 milliards de m<sup>3</sup>.

En conclusion, il faudrait mobiliser en 2020, plus de 11 milliards de m<sup>3</sup> d'eau, alors que nos capacités théoriques sont de 6 milliards, un réel défi à relever, mais surtout une stratégie et une politique à définir.

Le problème de la ressource en eau est lié principalement à l'érosion des sols; au stockage; dépôt de sédiments et à la qualité des eaux ; les moyens de lutte: sont le reboisement de bassins versants; la surélévation des digues ; la construction de barrages de décantation ; et les dragages des barrages qui sont actuellement insuffisants [9]

### **I.1.6. Ressources en eaux dans la wilaya d'Adrar.**

La wilaya d'Adrar est une région très riche en eau souterraine. D'après certaines études la capacité des eaux souterraines est de l'ordre de 60.000 milliards de mètres cubes jusqu'à la prochaine dizaine d'années, avec une éventuelle utilisation de 155 m<sup>3</sup>/s et puisée par différents moyens : [10]

- Les fouggaras au nombre de 900 avec un débit de 3.68 l/s,
- Les puits au nombre de 600 avec un débit moyen de 02 l/s,
- Les forages au nombre de 414 avec un débit moyen de 16.4 l/s.

### **I.2. Dessalement de l'eau saumâtre et de l'eau de mer.**

Le dessalement est le processus de traitement d'eau qui consiste à enlever les sels de l'eau saline.

Pour produire de l'eau potable à partir d'eau de mer, il existe cinq procédés majeurs. la distillation par Multi Flash ,par effets multiples, par compression de vapeur , par osmose inverse et par électrodialyse. **BUROS** [11] indique que la plupart de ces procédés se font à grande échelle produisant jusqu'à 20000m<sup>3</sup>/jour et par conséquent, ils nécessitent une grande consommation d'énergie, soit d'environ 12 kwh/m<sup>3</sup>. Ces technique sont intéressantes pour les

grandes centres, mais nécessitent de grands réseaux d'aqueduc pour atteindre les régions plus éloignées. Il devient donc intéressant de regarder la production d'eau à partir d'eau salée à plus petite échelle, se servant d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire. L'énergie solaire a l'avantage d'être propre, contrairement aux combustibles fossiles qui en plus, s'épuisent à vue d'œil.

### I.3. Distillation solaire

Les distillateurs solaires simples sont utilisés aujourd'hui pour la production d'eau potable à partir d'eau salée dans plusieurs pays du tiers-monde. **Malik et al** maintiennent que la distillation solaire est la méthode la plus économique pour la production d'eau douce en petites quantités [12]. Selon **Malik et al**, les alchimistes arabes auraient été les premiers à utiliser la distillation solaire. Les premiers travaux détaillés publiés sur le sujet remontent à **Harding** (1883) où il présente le distillateur en bois recouvert de verre que l'ingénieur suédois Carlos Wilson utilisait au Chili. Cet appareil pouvait produire en moyenne 4,9 litres d'eau distillée par jour pour une journée d'été [13].

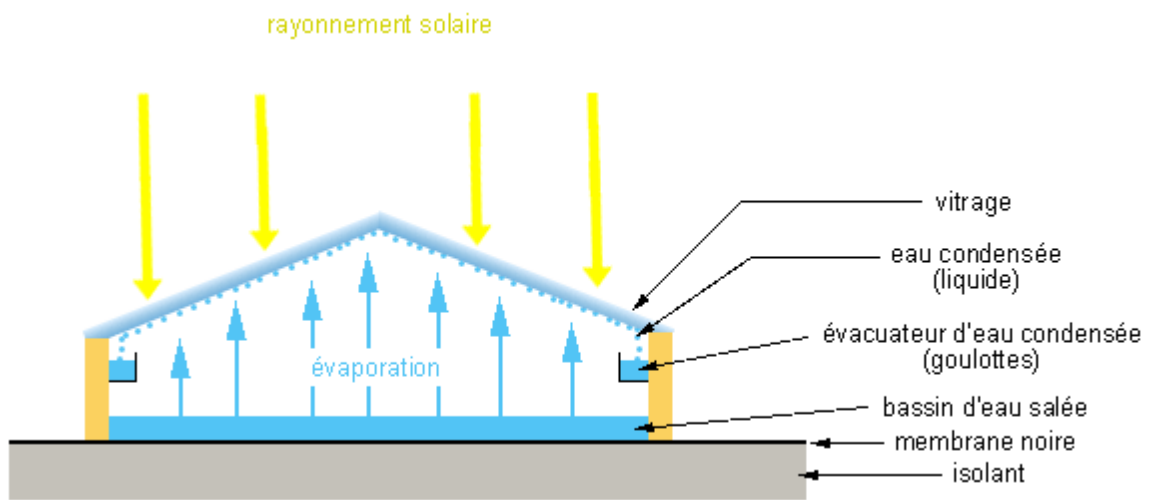
#### I.3.1 Principes de base des distillateurs solaires.

Un distillateur solaire conventionnel à effet de serre est un bassin étanche à l'air, habituellement fait de feuille d'Aluminium en forme rectangulaire. Il est recouvert d'un matériel transparent et l'intérieur de sa base est noirci pour maximiser l'absorption de l'énergie solaire. L'eau salée est versée dans le bassin de métal et exposée aux rayons du soleil. Le couvercle transparent laisse pénétrer les radiations solaires qui sont absorbées en grande partie par le fond noir. L'eau se réchauffe et l'humidité comprise entre l'eau et le couvercle augmente. La base émet aussi des rayons infra-rouges qui sont reflétés dans l'eau par le couvercle transparent; le verre (ou plastique) n'est pas transparent pour les radiations de grandes longueur d'ondes [14]. Le couvercle transparent garde donc l'énergie solaire à l'intérieur, il réduit aussi les pertes de chaleur par convection. Le couvercle est habituellement à un certain angle de l'horizontal pour faciliter l'écoulement de l'eau condensée le long de la paroi jusqu'à un collecteur d'eau distillée.

**Lôf et al**, ont été les premiers à définir les principaux mécanismes d'échange d'énergie dans un distillateur solaire simple [15]

Une grande partie des radiations solaires, directes et diffuses, est absorbée par le fond noir. De petites quantités d'énergie sont perdues par réflexion à la surface du verre et à la surface de l'eau. L'énergie absorbée par la base est presque totalement transférée à l'eau et seulement

une petite fraction est perdue au sol par conduction via la structure de soutien. L'énergie qui est transférée de l'eau au couvercle de verre l'est essentiellement par la vapeur d'eau qui s'évapore de la surface de l'eau et qui perd sa chaleur de vaporisation en se condensant. De la chaleur est aussi transférée de l'eau au couvercle par convection libre de l'air pris sous le couvercle. Le verre du couvercle absorbe une partie de la chaleur émise par la surface de l'eau. Le couvercle absorbe aussi une petite partie des rayons solaires incidents. Cette chaleur absorbée par le couvercle est perdue à l'atmosphère par convection et radiation.



**Figure 1.1** : distillateur simple à effet de serre [16].

#### I.4. présentation des travaux de recherches réalisés et publiés au cours de cette dernière décennie.

Ce type de distillateur a fait l'objet de nombreuses études en vue d'optimiser son rendement et de baisser le coût du mètre cube d'eau distillée.

La façon la plus simple d'augmenter ce rendement est de garder l'épaisseur d'eau la plus basse possible **COOPER** [17] a démontré ce phénomène. La raison en est fort simple .plus l'épaisseur d'eau est basse, moins grande est l'inertie thermique et plus grande est la transmissivité vers le fond du bassin.

Il est également possible de jouer sur l'absorptivité générale du capteur .**TIRIS** et **al.** [18] ont utilisé trois types de recouvrement : couleur charbon de bois, la peinture noir et la peinture blackened rock-bed. Ils ont ensuite trouvé des corrélations linéaires qui dépendent du niveau d'eau dans le fond du bassin et du rayonnement solaire pour chaque type de recouvrement :

La couleur charbon de bois se veut être la plus absorbante des trois peintures utilisées et peut fournir jusqu'à  $5 \text{ l/m}^2\text{j}$  avec une énergie solaire de  $32\text{Mj/m}^2\text{j}$ . **RAJVANSHI** [19] est allé jusqu'à mettre de la teinture noire dans l'eau salée pour augmenter l'absorptivité et a obtenu une augmentation de 30% sur un distillateur à effet de serre conventionnel.

L'étude de l'épaisseur de la paroi transparente n'est pas non plus à négliger. Selon le lieu et le vent sur la paroi, il existe une épaisseur et un matériau pour permettre d'obtenir la plus grande quantité de distillat possible. En effet, une plus grande épaisseur fournira une meilleure isolation mais nuira sur la transmissivité. **GHONEYEM et ILERI** [20] ont trouvé à l'aide d'un logiciel de leur conception qu'avec le climat de la ville d'Ankara en Turquie, le meilleur matériau est une vitre d'épaisseur de 3 mm. Cette épaisseur permet d'obtenir  $3.3 \text{ l/m}^2\text{j}$ .

**AL-HUSSAINI et SMITH** [21] de leur côté, ont retiré l'air de l'intérieur du distillateur. De cette façon, aucune énergie n'est perdue à réchauffer l'air et le transfert de chaleur par convection est évité. Pour un climat tempéré, ils ont obtenu une augmentation de plus de 100% passant d'une production de  $3.79 \text{ l/m}^2\text{j}$ .

Le bassin peut également être éliminé pour être remplacé par une plaque inclinée sur laquelle un film d'eau coule en permanence. Cette procédure a pour but d'obtenir le meilleur angle d'incidence possible du rayonnement solaire. C'est l'expérience qu'ont réalisée **TLEIMAT et HOWE** [22] et ils ont obtenu un rendement de 50 % supérieur.

Les parois verticales du capteur nuisent à la production car elle créent de l'ombrage, il devient donc intéressant de regarder la surface du capteur qui permettra le meilleur rendement possible. **KWATRA** [23] s'est penché sur la question. Ses études ont démontré qu'une asymptote se crée pour donner un rendement d'environ 30% et que ce rendement est atteint aux alentours de  $16\text{m}^2$ .

Il peut être intéressant aussi d'optimiser l'espace dans certains lieux en utilisant un capteur vertical. **KIATSIRIOAT et al.** [24] proposent une plaque absorbante verticale sur laquelle ils font couler un film d'eau et l'enferment dans une cloche de verre. Ce dispositif permet donc d'obtenir un très bon rendement au mètre carré horizontal mais a le désavantage de ne pas pouvoir être utilisé en grand nombre car la série face au soleil fera toujours de l'ombrage aux séries de capteurs placées derrière.

**Mousa Abu-Arabie et al.** [25] ont présenté une étude d'un distillateur solaire conventionnel à double vitrage refroidi par une saumure froide. La fonction de cette saumure est d'abaisser



la température de verre et d'augmenter ainsi la différence de la température eau-verre. Ceci a comme conséquence l'amélioration de la performance, qui est représentée par une vitesse plus rapide d'évaporation du bassin. La performance du distillateur est comparée à celle d'un distillateur solaire conventionnel à simple verre dans des conditions atmosphériques identiques. Les résultats prouvent que la performance relative des distillateurs dépend du type de l'isolation thermique utilisée. La performance du distillateur solaire conventionnel à double vitrage est proche de celle du distillateur simple.

**C. Khelif et B. Touati** [26] L'analyse en régime permanent des différentes modélisations effectuées sur les capteurs solaires plans fonctionnant en basse et moyenne température a permis de développer un modèle linéaire simple susceptible d'approximer par voie expérimentale vélocité les performances thermiques et optiques d'un distillateur solaire à effet de serre. Ce modèle a servi également pour l'identification du régime permanent et la vérification du temps de réponse du système dans les mêmes conditions de fonctionnement et d'environnement.

**BOUKAR et al.** [27] ont présentée la construction et l'expérimentation d'un distillateur solaire vertical fonctionnant en mode indirect. L'évaporation et la condensation sont effectuées séparément dans deux compartiments, et ces deux compartiments sont séparés par une cloison isolée par de 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. Les tests sont effectués de décembre 2005 à février 2006.

**Fedali et al.** [28] ont examiné théoriquement et expérimentalement. 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 résultats 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 derrière 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 de mois de juillet 2007 sur une eau normale 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 m<sup>2</sup>. Les résultats numériques trouvés sont en accord avec les résultats expérimentaux.

# Chapitre

## //

## CARACTERISTIQUES GENERALES DU RAYONNEMENT SOLAIRE

---

*Dans cette partie nous nous proposons de présenter un modèle de calcul du rayonnement solaire instantané (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 pour quoi 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 surtout 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 énergie photovoltaïque. L'étude de la distillation solaire nécessite une bonne connaissance du gisement solaire. Pour cela, on a proposé 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 [29].

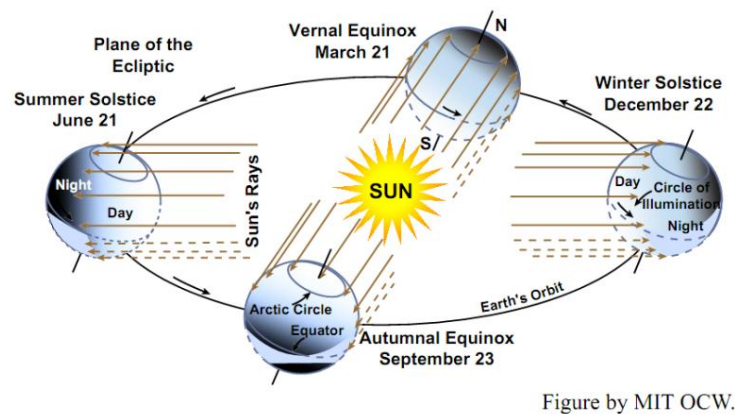
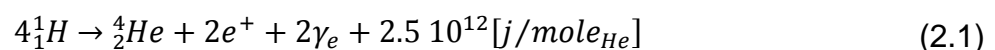


Figure by MIT OCW.

**Figure 2.1 : 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  $2 \cdot 10^{30}$  Kg et il contient 30% d'hydrogène. L'âge du soleil est estimé à  $5 \cdot 10^9$  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 [29] :

$$TSV = TSM + \frac{E}{60} - 4 \frac{\phi}{60} = TL - 1 + \frac{E}{60} - 4 \frac{\phi}{60} \quad (2.2)$$

Avec :

$\phi$  : Longitude du site,

TL: Temps local du site,

TSM: Temps solaire moyen,

E : Equation du temps, elle est donnée par [29] :

$$E = (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032070 \sin \Gamma - 0.014651 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma)(229.18) \quad (2.3)$$

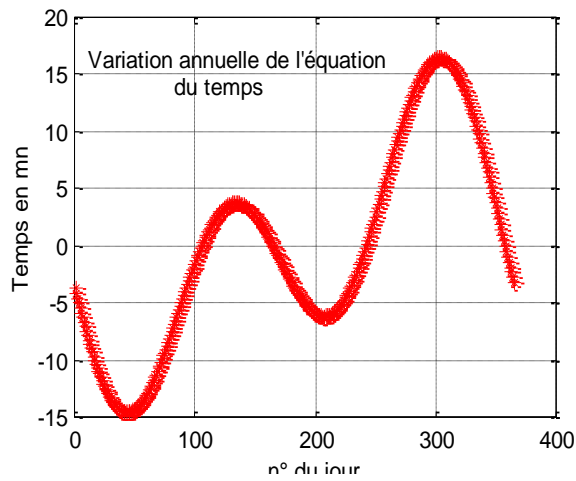
Le premier terme entre parenthèse donne E en radian. Il faut multiplier par 229.18 pour le convertir en minutes.

$$\Gamma = 2\pi \frac{(n - 1)}{365} \quad (2.4)$$

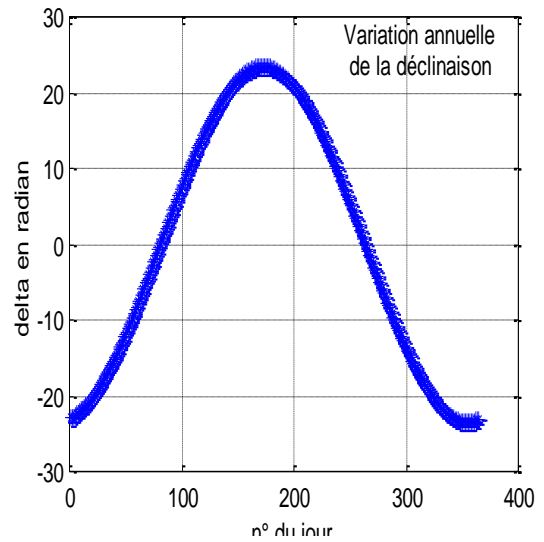
$\Gamma$  : L'angle de jour:

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

Sur la figure (2.2), on peut suivre la variation annuelle de la valeur de la correction du temps apporté par l'équation (2.3).



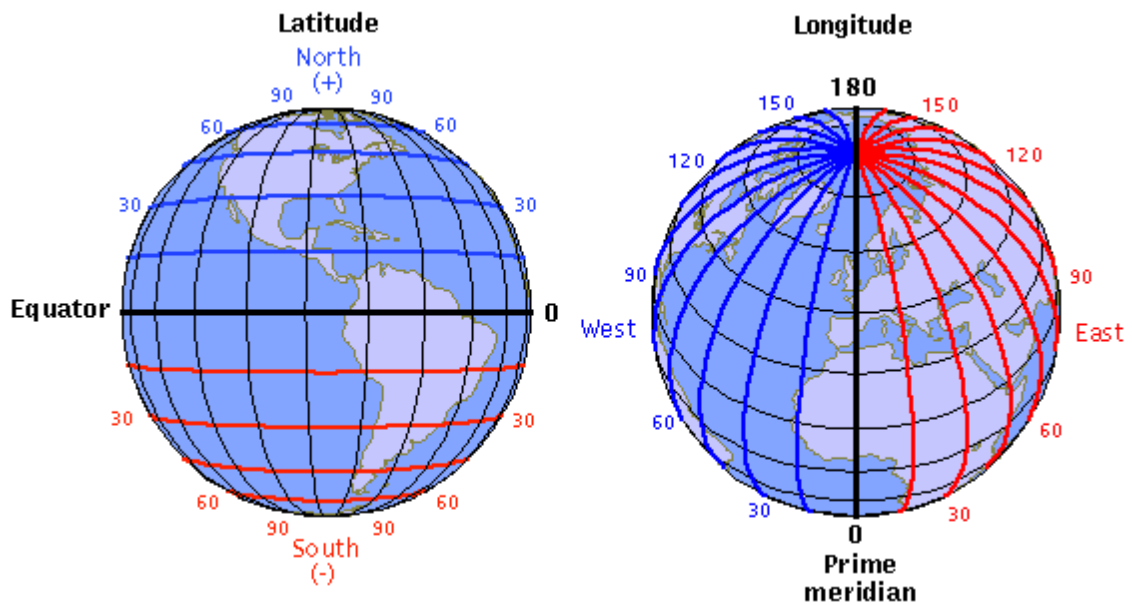
**Figure. 2.2 :** Variation annuelle de l'équation de la correction du temps



**Figure 2.3 :** Variation annuelle de la déclinaison solaire

**II.3.2. Les coordonnées terrestres**

Voici la définition de certains angles astronomiques :



**Figure 2.4:** Les coordonnées géographiques [30]

**La longitude  $\lambda$**

C'est comptée positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest, à partir du méridien Greenwich.

**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  $\delta$** 

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675.106 km.

L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de  $23,27^\circ$  par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison  $\delta$  l'angle formé par l'axe Terre soleil avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison vaut donc  $+23,27^\circ$  au solstice d'été,  $-23,27^\circ$  au solstice d'hiver, et nulle aux équinoxes. (Figure 2.3).

La déclinaison étant une fonction continue du temps, sa variation au cours de l'année peut être calculée par l'équation (2.5)

$$\delta = (0.006918 - 0.3399912 \cos \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.00907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma)(180/\pi) \quad (2.5)$$

$n$  : 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.

$$(0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ)$$

$\beta=0$  : pour un plan horizontal tourne vers le haut.

$\beta=90^\circ$  : pour un plan vertical

$\beta=180^\circ$  : pour un plan horizontal tourne vers le bas.

**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, négative à l'Est et positive 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.

$$\omega = 15 \text{ (TSV-12)} \quad (2.6)$$

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 et donc l'angle d'incidence d'un rayonnement direct sur une surface horizontale.

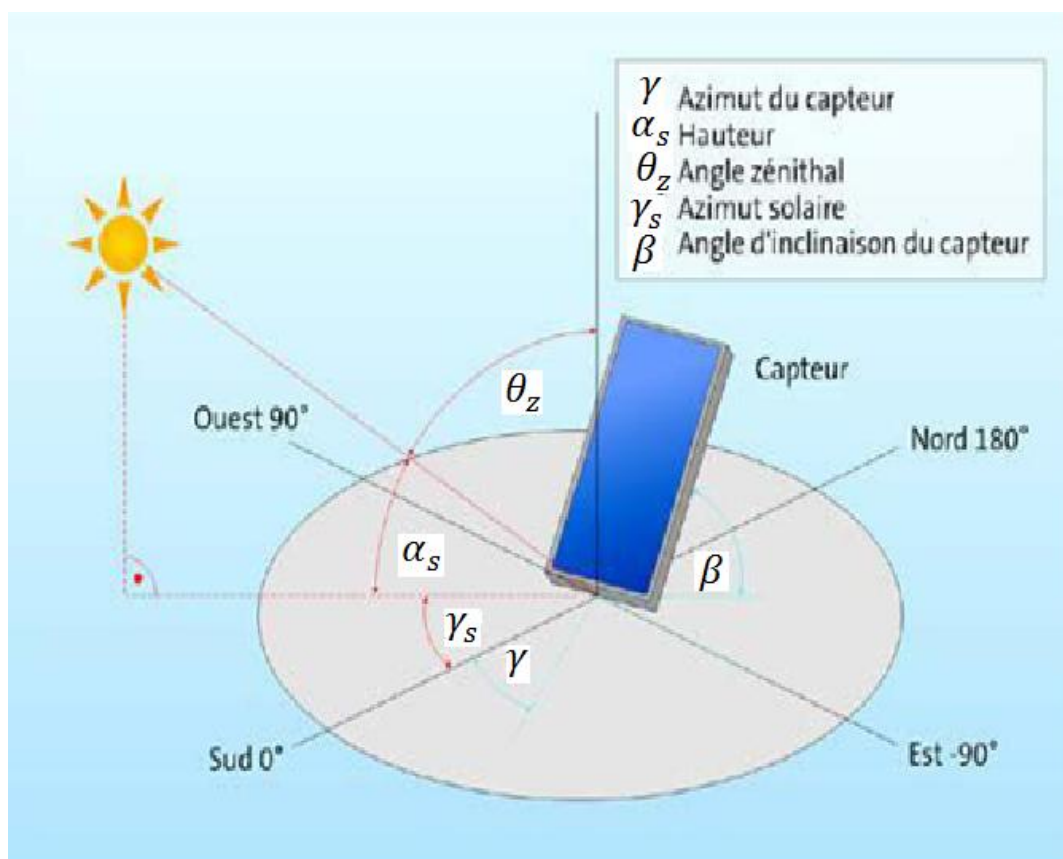


Figure 2.5 : Les différents angles astronomiques inclinée

**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.

$$\sin \alpha_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \omega \cos \phi \cos \delta \quad (2.7)$$

**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 (2.5) illustre ces différents angles.

**Angle d'incidence  $\theta$  du rayon 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 [31]

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.8)$$

Et

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.9)$$

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

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2.10)$$

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 (2.7) conduit dans ce cas à :

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (2.11)$$



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 (voir figure 2.5) :

$$R_b = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (2.12)$$

#### 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 (voir figure 2.6) :

- La première est directement réfléchie vers l'espace avant de pénétrer dans l'atmosphère.
- La deuxième partie s'enfonce dans l'atmosphère, subit des réfractions et des diffractions 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 réfléchie directement vers le ciel, l'autre est reçue par la terre.

On peut regrouper les rayonnements solaires parvenant au sol en trois composantes principales qui sont:

.

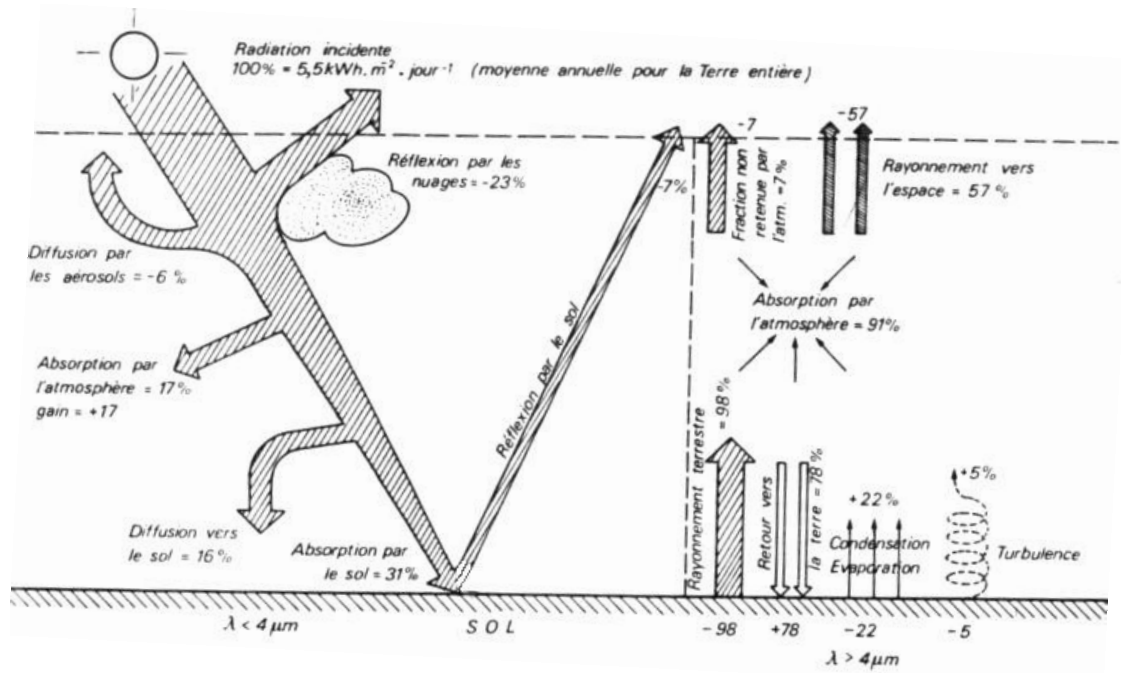


Figure 2.6 : Bilan énergétique terrestre

**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 pyrhéliomètre 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:

$$I = I_0 \sin(\alpha_s) \tag{2.13}$$

Où I est calculé par l'expression suivante :

$$I = I_s a_*^m \tag{2.14}$$

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  $I_s$ .

La constants 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  $I_s \sin(\alpha_s)$ . 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  $\theta$  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, on aura la formule suivante :

$$G = I \sin(\alpha_s) + D \quad (2.15)$$

Le rayonnement solaire global est mesuré avec le même instrument utilisé pour mesurer le rayonnement solaire diffus. La différence n'est autre que de mettre 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 empirique.

Par exemples, c'elle d'ANGSTRÖM :

$$G = G_0 \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (2.16)$$

où

$G_0$  : La somme quotidienne du rayonnement solaire extraterrestre 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.

On mesure 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, on emploie la formule qui est la suivante, basée sur le principe que tout corps à une température supérieure à  $0^\circ$  Kelvin émet de l'énergie rayonnante.

$$E = \varepsilon \delta T^4 \quad (2.17)$$

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 de l'albedomètre ou du Pyranomètre.

#### II.5. Les modèles de Calcul du rayonnement solaire global incident sur une surface inclinée

Le rayonnement solaire global reçu sur une surface inclinée peut être écrit comme suite [31];

$$I_i = I_b R_b + I_{d-iso} F_{c-s} + I_{d-cs} R_b + I_{d-hz} F_{c-hz} + I_{g\rho_g} F_{c-g} \quad (2.18)$$

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.

Partant de cela, le rayonnement global incident direct sur une surface inclinée d'un angle  $\beta$  par rapport à l'horizontale est calculé par l'équation suivante [32]

$$I_{\beta} = I_{b\beta} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (2.19)$$

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 ;

$$f = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(n - 2)\right),$$

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{\frac{-k}{\sin(h)}}$$

$$a_0 = a_0^* r_0, \quad a_1 = a_1^* r_1, \quad k = k^* r_k, \quad a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2$$

$$a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2$$

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

$$A = 0.264 \text{ [km]}, \quad r_0 = 1.03, \quad r_1 = 1.01, \quad r_k = 1,$$

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

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

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

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

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

$F_{C-S}$  : 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 ;

$$I_{r\beta} = I_{gh} \cdot \rho \cdot F_{C-g},$$

$I_{rh}$  : 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 et donnée par [32];

$$I_g = I_{b-i} + I_{d-i} \quad (2.20)$$

Avec:

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

$$I_{b\beta} = A \cos(\theta) e^{\frac{-1}{B \sin(h)+2}} \quad (2.21)$$

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

$$I_{d\beta} = \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) D_h + \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \rho_g G_h \quad (2.22)$$

$D_h$ : l'éclairement diffus reçu par une surface horizontale :

$$D_h = A1.(\sin(h))0.4, \quad (2.23)$$

$G_h$ : l'éclairement global reçue par une surface horizontale :

$$G_h = A2.(\sin(h))B1, \quad (2.24)$$

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

A, A1, A, 2, B, B1 sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère. [33]

**Tableau 2.1** : Les constantes caractérisant l'état de l'atmosphère . [33]

Etat de l'atmosphère	A	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B	B1
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

## II.5 Le potentiel solaire en Algérie [35]

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur le quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (Hauts-Plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/ m<sup>2</sup>/ an au Nord, et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays.

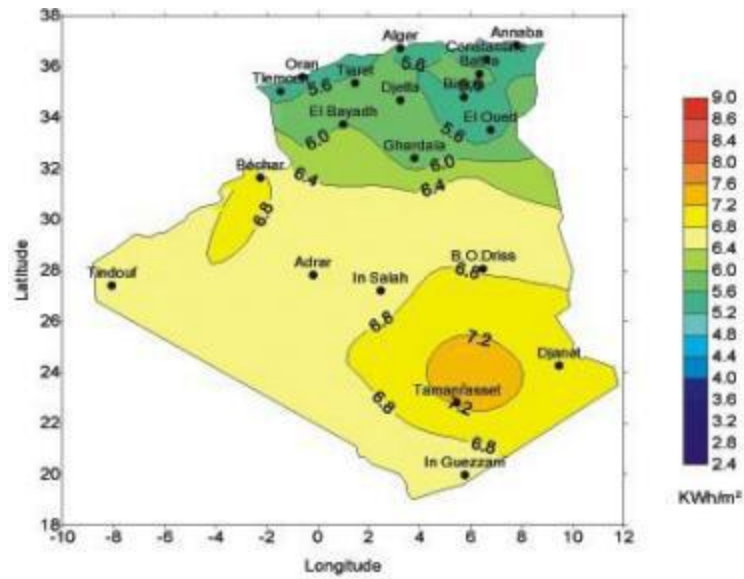
**Tableau .2.2** : Potentiel solaire en Algérie pour différentes régions [35]

paramètres	régions		
	Régions côtiers	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée d'ensoleillement (heure/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/ m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.[36]

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figure 2.7.).





**Figure 2.7:** Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [35]

**II.6. La température ambiante**

L'évolution théorique de la température à l'entrée de l'isolateur, qui est la température ambiante de l'air, est donnée par : [34]

$$T(J, t) = \frac{T_{max(j)}+T_{min(j)}}{2} + \frac{T_{max(j)}-T_{min(j)}}{2} \times \sin \left( \pi \cdot \frac{t-1}{12} \right) \tag{2.25}$$

# Chapitre

## III

### ***ETUDE THEORIQUE & DEVELOPPEMENT MATHEMATIQUE***

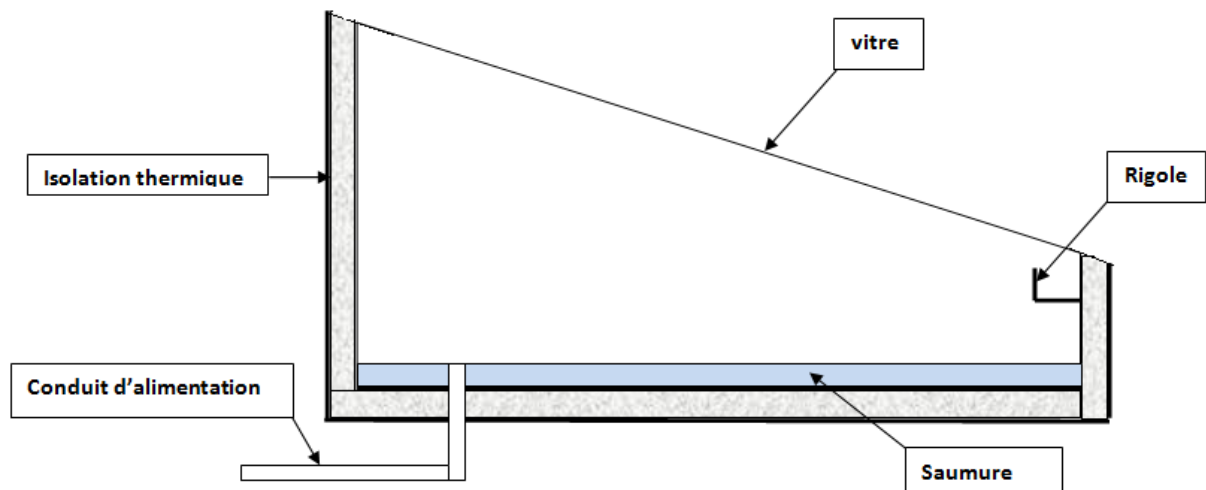
---

*Cette partie est consacrée au développement des modes de transfert thermique existant dans le distillateur, insistant particulièrement sur les phénomènes de transfert à l'intérieur du distillateur solaire et les équations relatives à l'algorithmique de la simulation numérique.*

### III.1- Description et principe de fonctionnement

Un distillateur solaire plan (figure.3.1) est constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau douce ou eau de mer à distiller). Sous l'action du flux solaire frappant la surface transparente, l'eau s'échauffe, s'évapore, la vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre, et le condensat est récupérée dans un récepteur, un appoint d'eau compense le débit de distillat. Afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur, les parois latérales et inférieures sont isolées [37, 38,39]

La mise en circulation interne de la vapeur d'eau se fait par thermosiphon qui prend naissance du fait de la différence de température entre la masse d'eau à distiller et la vitre.



**Figure 3. 1** : Schéma du distillateur solaire proposé.

### III .2- Hypothèses simplificatrices

Dans notre étude les hypothèses simplificatrices suivantes sont présent en considération.

- Chaque élément du distillateur est supposé avoir une température uniforme et est représenté uniquement par un seul nœud.
- La couche d'eau saumâtre est mince et le gradient de température suivant la verticale est négligeable.
- Le rayonnement solaire absorbé par la couverture transparente est considéré négligeable.
- Le rayonnement solaire absorbé par les gouttelettes d'eau formées sur elle est considéré négligeable.

- Les échanges radiatifs entre les parois latérales internes sont négligeables.
- L'effet de l'ombre reste aussi faible et peut être négligé.
- L'air interne est considéré saturé.
- La quantité d'eau évaporée est égale à la quantité d'eau condensée.
- L'eau est transparente.
- Vitesse du vent constante.
- Propriétés thermo physiques sont considérées constantes (indépendantes de la température.)

### III.3 Paramètres et caractéristiques des distillateurs

On peut classer les paramètres relatifs aux distillateurs de la façon suivante :

#### III.3.1 Paramètres externes

- Paramètres d'ensoleillement.
- Paramètres météorologiques

#### III.3.2 Paramètres internes

- Paramètre géométrique

Deux nouvelles grandeurs sont introduites pour les distillateurs :

- ✓ Inclinaison de la vitre sur le plan horizontal.
- ✓ Hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller.
- Paramètres de fonctionnement

Ces paramètres sont les différentes températures du système et du fluide, en particulier la température de l'eau à distiller.

#### III.3.3 Caractéristique de fonctionnement

##### III.3.3.1 Efficacité

Par définition il existe deux types d'efficacités :

**L'efficacité globale** : représentant le rapport de la quantité d'énergie d'évaporation par unité de surface, à la quantité d'énergie globale incidente sur la même surface horizontale. Elle est définie par le rapport [40]:

$$efg = \frac{Q_{ev}}{G \times A_v} = \frac{\dot{m}_{ev} \times L_v}{G \times A_v} \quad (3.1)$$

$\dot{m}_{ev}$  : Débit du distillat.

G: Puissance solaire incidente.

$L_v$ : Chaleur latente d'évaporation de l'eau.

$A_v$  : Superficie du capteur (aire de la vitre).

$Q_{ev}$  : Puissance d'évaporation

**Efficacité interne** : représente le rapport de la quantité d'énergie évaporée par unité de surface, à la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure.

$$e_{fi} = \frac{Q_{ev}}{Q_{eau}} \quad (3.2)$$

La quantité de chaleur absorbée par l'eau dépend de l'angle d'incidence du rayonnement d'incident par rapport à la vitre. On trouvera dans (tableau 3.1) les coefficients moyens globaux de réflexion, d'absorption, de transmission d'une vitre de 6mm d'épaisseur, d'une nappe d'eau ( $e \approx 15\text{mm}$ ) et du fond du distillateur.

Pour une intensité globale  $G$ , l'expression de  $Q_{eau}$  est :

$$Q_{eau} = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_p) \cdot G \cdot S \quad (3.3)$$

$Q_{eau}$  : Puissance absorbée par l'eau.

On admet évidemment que la chaleur absorbée par le fond du distillateur est cédée complètement à la masse d'eau par conductibilité-convection.

On peut définir un coefficient d'absorption fictif  $\alpha_t$  pour la masse d'eau en posant, [41]

$$Q_{eau} = \alpha_t \cdot G \cdot S \quad (3.4)$$

Le coefficient  $\alpha_t$  est obtenu en utilisant les caractéristiques optiques et thermiques du distillateur par la relation :

$$\alpha_t = \tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_p \quad (3.5)$$

Avec :

$\tau_v$  : Coefficient de transmission de la vitre ;

$\tau_e$  : Coefficient de transmission de l'eau ;

$\alpha_e$  : Coefficient d'absorption de l'eau ;

$\alpha_p$  : Coefficient d'absorption du fond de distillateur ;

$\alpha_t$  : Coefficient d'absorption fictif du distillateur ;

$G$  : Puissance solaire incidente.

#### ➤ Performance

Le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus absolue a amené ainsi à définir le facteur de performance brut (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H).

$$F. P. B = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24 h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24h}} \quad (3.6)$$

$$F. P. H = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (3.7)$$

A un instant donné de la journée le facteur de performance FP est donné par la relation :

$$F. P = \frac{\dot{m}_{ev}}{\alpha_t \times G \times A_v} \quad (3.8)$$

$\dot{m}_{ev}$  : Débit du distillat.

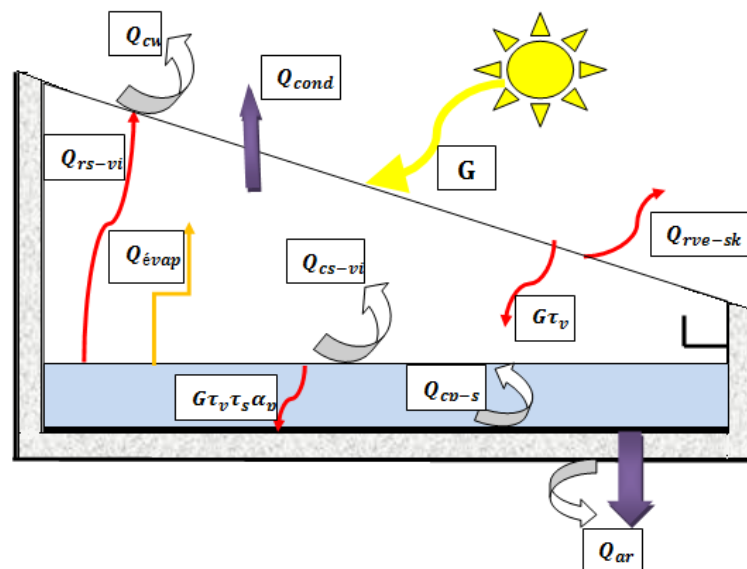
F.P : Facteur de performance.

pour les différentes parties d'un distillateur [41]

**Tableau 3.1** : Réflexion, absorption, transmission vis-à-vis du rayonnement [41]

Angle d'incidence du rayonnement en degrés		0-30	45	60
<b>Vitre</b>	Réflexion	5 %	6%	10%
	Absorption	5	5	5
	Transmission	90	89	85
<b>Nappe D'eau</b>	Réflexion	2	3	6
	Absorption	30	30	30
	Transmission	68	67	64
<b>Fond distillateur</b>	Réflexion	5	5	5
	Absorption	95	95	95
	Transmission	0	0	0

**III.4 BILANS ENERGETIQUES DANS UN DISTILLATEUR SIMPLE**



**Figure 3.2** : Bilans énergétiques d'un distillateur solaire simple

**III.4 .1. L'énergie solaire incidente sur la vitre :**

L'énergie solaire incidente est distribuée sur un intervalle de longueur d'onde 0.17 à 4 $\mu$ m .

L'énergie solaire totale incidente par jour est la quantité du rayonnement rassemblée par une surface horizontale pendant les heures de la lumière du soleil [42].

$$G = \int q_s(t) dt \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.9)$$

**III.4 .2. L'énergie solaire transmise à travers la vitre :**

L'énergie transmise à travers la vitre dépend de la transmisivité du verre utilisé. L'intervalle de transmisivité est de 70 à 95 % pour les différents types de verre [42]. Par conséquent, la quantité d'énergie solaire qui traverse le verre et la surface de l'eau est :

$$Q_\tau = G \cdot \tau_v \quad (3.10)$$

$\tau_v$  : Coefficient de transmission de la vitre.

**III.4 .3. Transfert de chaleur interne par rayonnement (eau-vitre) :**

Le flux d'échange thermique par rayonnement entre l'eau saumâtre et la vitre se calcule par la formule suivante [42, 46]:

$$Q_{rs-vi} = F\sigma(T_s^4 - T_{vi}^4) \quad (3.11)$$

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzmann,  $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{k}^4$

Et :

$$Q_{rs-vi} = h_{rs-vi}(T_s - T_{vi}) \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.12)$$

Donc :

$$Q_{rs-vi} = \sigma \cdot (T_s^2 + T_{vi}^2) (T_s + T_{vi})(T_s - T_{vi}) \quad (3.13)$$

D'où

$$h_{rs-vi} = \sigma(T_s^2 + T_{vi}^2)(T_s + T_{vi}) \quad (3.14)$$

$h_{rs-vi}$ : Coefficient de transfert thermique par rayonnement.

**III.4 .4. Transfert de chaleur interne par convection naturelle (eau-vitre) :**

L'expression de l'équation de chaleur par convection en régime turbulent est :

$$Q_{cs-vi} = h_{cs-vi}(T_s - T_{vi}) \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.15)$$

Le flux de chaleur d'échange thermique par convection entre l'eau saumâtre et la vitre est défini par **Dunkle** [14, 43] est:

$$Q_{cs-vi} = 0.884 \times \left[ (T_s - T_{vi}) + \frac{(P_s - P_{vi})}{2016 - P_s} (T_s) \right]^{1/3} (T_s - T_{vi}) \quad (3.16)$$

D'où:

$$h_{cs-vi} = 0.884 \times \left[ (T_s - T_{vi}) + \frac{(P_s - P_{vi})}{2016 - P_s} (T_s) \right]^{1/3} \quad (3.17)$$

$h_{cs-vi}$  : Coefficient d'échange thermique par convection interne

**III.4 .5. L'énergie transférée par évaporation et condensation (eau-vitre) :**

Le transfert d'énergie, dans ce cas, dépend de la quantité d'eau transférée du bassin du distillateur vers la vitre.

L'expression du flux de chaleur transporté par évaporation est [45,46]

$$Q_{ev} = \dot{m}_{ev} \times L_v \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.18)$$

Dunkle propose la quantité de chaleur transportée par évaporation comme suit [14,43].

$$Q_{ev} = 16,276 * 10^{-3} Q_{cs-vi} \frac{(P_s - P_{vi})}{(T_s - T_{vi})} \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.19)$$

L'expression du coefficient d'échange par évaporation est donnée alors par la relation:

$$h_{ev} = 16,276 * 10^{-3} h_{cs-vi} \frac{(P_s - P_{vi})}{(T_s - T_{vi})} \quad (3.20)$$

$h_{ev}$ : Coefficient d'échange thermique par évaporation

La pression de saturation de la vapeur d'eau et la chaleur latente d'évaporation sont estimées par les relations suivantes [47,48] :

$$P_{sat} = \exp \left( 25.317 - \frac{5144}{T} \right) \quad (3.21)$$

$$L_v = 3.1615 \times 10^6 - 2.40714 \times 10^6 T \quad (3.22)$$



### III.4.6. Transfert de chaleur par convection à l'extérieur du distillateur (vitre-ambiance) :

L'intensité de cet échange dépend de la vitesse du vent et dépend très faiblement de l'inclinaison de la vitre. On a coutume d'utiliser pour le coefficient d'échange

$$h_w = 5.7 + 3.86 \times w \quad (w/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (3.23)$$

w: Vitesse du vent (m /s)

Donc la perte de chaleur par convection entre le verre et l'extérieur est donnée par :

$$Q_{cv-a} = h_w(T_{ve} - T_{ab}) \quad (w/m^2) \quad (3.24)$$

### III.4.7. Transfert de chaleur par rayonnement à l'extérieur de distillateur (vitre-ambiance) :

Le transfert de chaleur par rayonnement dans ce cas dépend de la température du ciel clair.

Le coefficient d'échange  $h_{rve-sk}$  est donné par la loi de Stefan; dans ce cas, on fixe l'émissivité du ciel comme égale à 1 et sa température  $T_{sk}$  égale à une fonction de la température de l'air ambiant et le facteur de forme  $F_{1-2}$  est égale à 1,

avec:

$$h_{rve-sk} = \varepsilon_v \sigma (T_{sk}^2 + T_{ve}^2) (T_{sk} + T_{ve}) \quad (3.25)$$

$$T_{sk} = 0.0552 * Ta^{1.5} \quad [49, 50, 51] \quad (3.26)$$

Où  $T_s$  et  $T_a$  en Kelvin.

Une autre relation utilisée [52, 53]:

$$T_{sk} = Ta - 12 \quad (3.27)$$

La perte d'énergie par rayonnement à l'extérieur du distillateur solaire est donnée par la relation

suivante :

$$Q_{rve-sk} = \varepsilon_v \sigma (T_{ve}^4 - T_{sk}^4) \quad (w/m^2) \quad (3.28)$$

$$Q_{rve-sk} = \varepsilon_v \sigma (T_{ve}^4 - (Ta - 12)^4) \quad (3.29)$$

$$\varepsilon_v=0.9 \text{ [50,54 ]}$$

#### III.4 .7. L'échange par conduction entre l'intérieur et l'extérieur de la vitre :

Dans la vitre, il y a un mécanisme de transfert de chaleur par conduction entre la face extérieure et la face intérieure de la vitre,  $Q_{\text{cond}}$  tel que :

$$Q_{\text{cond}} = \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.30)$$

$\delta_v$ : Épaisseur de la vitre.

$\lambda_v$  : Conductivité thermique de la vitre.

#### III.4 .8. Pertes par réflexion et par absorption au niveau de la vitre :

L'énergie solaire incidente n'est pas totalement transmise à l'intérieur du distillateur, une faible quantité est réfléchi vers l'atmosphère et une partie est absorbée par la vitre, tel que [55]:

$$G = Q_r + Q_t + Q_a \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.31)$$

**III.4.8.1. Le coefficient d'absorption :** Le coefficient d'absorption pour les différents types de matières transparentes est de 5-20% de l'énergie totale incidente, donc l'énergie solaire absorbée est donnée par :

$$Q_a = \alpha_v G \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.32)$$

$\alpha_v$ : Coefficient d'absorption de la vitre.

**III.4.8.2. L'énergie solaire réfléchi :** Elle s'exprime par :

$$Q_r = \rho_v G \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.33)$$

$\rho_v$ : Coefficient de réflexion de la vitre.

#### III.4.9. la puissance absorbée et l'énergie réfléchi par l'eau au-dessus de la plaque de l'absorbeur :

L'énergie solaire transmise à l'intérieur du distillateur est l'énergie incidente sur la surface de l'eau. Une faible partie de cette énergie est absorbée par l'eau et l'autre est réfléchi.

La puissance incidente sur la surface de l'eau est [56]

$$Q_{ie} = Q_t = \tau_v G \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.34)$$

**III.4.9.1. L'énergie absorbée par l'eau :** Elle s'exprime par :

$$Q_{ae} = \alpha_e \tau_v G \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.35)$$

$\alpha_e$  : Coefficient d'absorption de l'eau.

**III.4.9.2. L'énergie réfléchie par l'eau :** est donnée par la relation suivante :

$$Q_{re} = \rho_e \tau_v G \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.36)$$

$\rho_e$  : Coefficient de réflexion de l'eau.

**III.4.9.3. Transfert d'énergie par convection entre l'eau et l'absorbeur :**

Ce transfert de chaleur est dû à la différence de températures entre l'eau et l'absorbeur.

Cette quantité est donnée par l'expression suivante :

$$Q_{cp-s} = h_{cp-s} (T_p - T_s) \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.37)$$

Le coefficient d'échange convectif entre la plaque d'absorption et la saumure est évalué par la corrélation suivante [44]

$$h_c = \frac{\lambda}{l} \times Nu \quad (3.38)$$

Où :

$$Nu = C Ra^n \quad (3.39)$$

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

$$C = 0.54 \text{ et } n = \frac{1}{4} \text{ si } 10^5 < Ra < 10^7 \quad (3.40)$$

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

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

longueur caractéristique.

**III.4.9.4.L'énergie absorbée par l'absorbeur :**

L'absorbeur absorbe presque la totalité d'énergie qui lui est transmise par l'eau. Cette quantité est donnée par la relation suivante :

$$Q_{ap} = \alpha_p \tau_e \tau_v G \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.41)$$

**III.4.9.5.L'énergie de perte thermique arrière de la plaque d'absorption,** est évalué à l'aide de la relation suivante :

$$Q_{ar} = h_{ar}(T_p - T_a) \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.42)$$

**III.4.10.Le coefficient de perte thermique arrière de la plaque d'absorption,** est évalué à l'aide de la relation suivante :

$$h_{ar} = \frac{1}{hw + \frac{\delta_{is}}{\lambda_{is}} + 2\frac{\delta_p}{\lambda_p}} \quad (3.43)$$

**III.5. Modélisation mathématique:**

Les équations ont été établies selon la loi suivante :

$$C_p \frac{m_i}{A_i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (\text{w/m}^2) \quad (3.44)$$

On considère quatre niveaux dans le distillateur solaire à effet de serre :

**III.5.1.Bilan au niveau de la vitre externe**

$$\frac{1}{2} m_v c_{p_v} \frac{dT_{ve}}{dt} = \left[ \frac{1}{2} G \alpha_v + \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) - h_{r_{ve-sk}} (T_{ve} - T_{sk}) - h_w (T_{ve} - T_{ab}) \right] A_v \quad (3.45)$$

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

$$\frac{1}{2} m_v c_{p_v} \frac{dT_{vi}}{dt} = h_{r_{s-vi}} (T_s - T_{vi}) A_s + \frac{1}{2} G \alpha_v A_v + h_{c_{s-vi}} (T_s - T_{vi}) A_v + Q_{cond} - \left( \frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) A_v \quad (3.46)$$

Le flux de condensation est donne par

$$Q_{cond} = \dot{m}_{cond} \times L_v \times A_v \quad (\text{w}) \quad (3.47)$$

**III.5.3. Bilan au niveau de la saumure**

$$m_s c_{p_s} \frac{dT_s}{dt} = G \tau_v \alpha_s A_s + h_{cp-s} (T_p - T_s) A_p - h_{cs-vi} (T_s - T_{vi}) A_s - h_{rs-vi} (T_s - T_{vi}) A_s - Q_{ev} \quad (3.48)$$

$$Q_{ev} = \dot{m}_{ev} \times L_v \times A_s \quad (w) \quad (3.49)$$

**III.5.4. Bilan au niveau de la plaque d'absorption**

$$m_p c_{p_p} \frac{dT_p}{dt} = G \tau_v \tau_s \alpha_p A_s - h_{cp-s} (T_p - T_s) A_p - h_{ar} (T_p - T_{ab}) A_p \quad (3.50)$$

**III.6. Analogie électrique :**

Le tableau.2.2 comparatif ci-dessous résume les analogies entre la loi de Fourier de diffusion thermique et la loi d'Ohm électrocinétique.

Ce tableau met en évidence les correspondances entre les grandeurs :

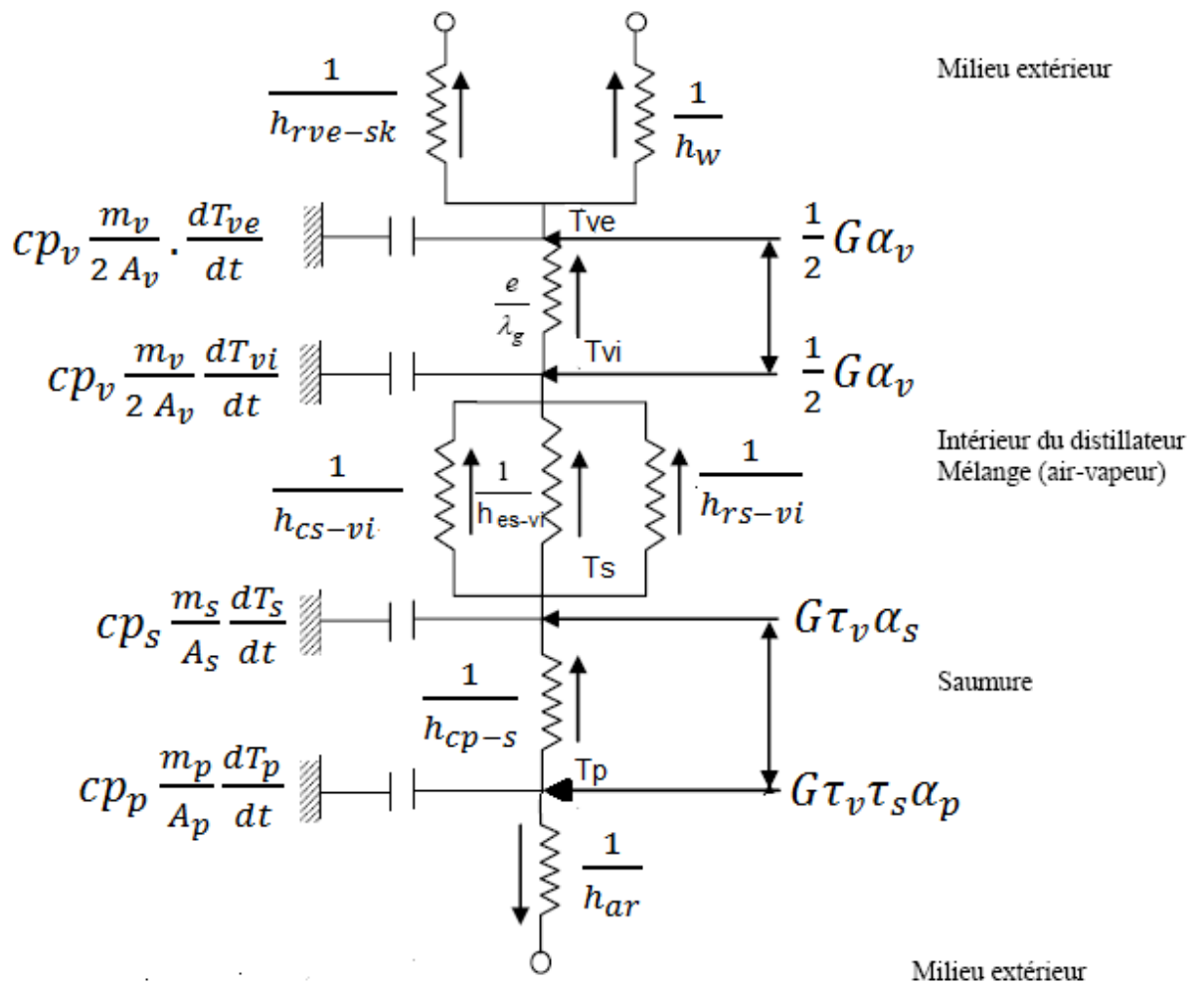
**Tableau.2.2.** Représentation des analogies électriques

Grandeur thermique	Grandeur électrique
Température T	Potentiel électrique V
Flux thermique Q	Courant électrique I
Densité de flux thermique $\phi$	Densité de courant électrique j
Résistance thermique R	Résistance électrique R
Conductivité thermique $\lambda$	Conductivité électrique $\gamma$
Capacité thermique C	Capacité électrique C

La densité du flux de chaleur échangé entre un point de température  $T_1$  et un autre point à la température  $T_2$  qui est semblable à la loi d'Ohm qui autorise les analogies entre les grandeurs thermiques et électriques, peut s'écrire sous la forme suivante :

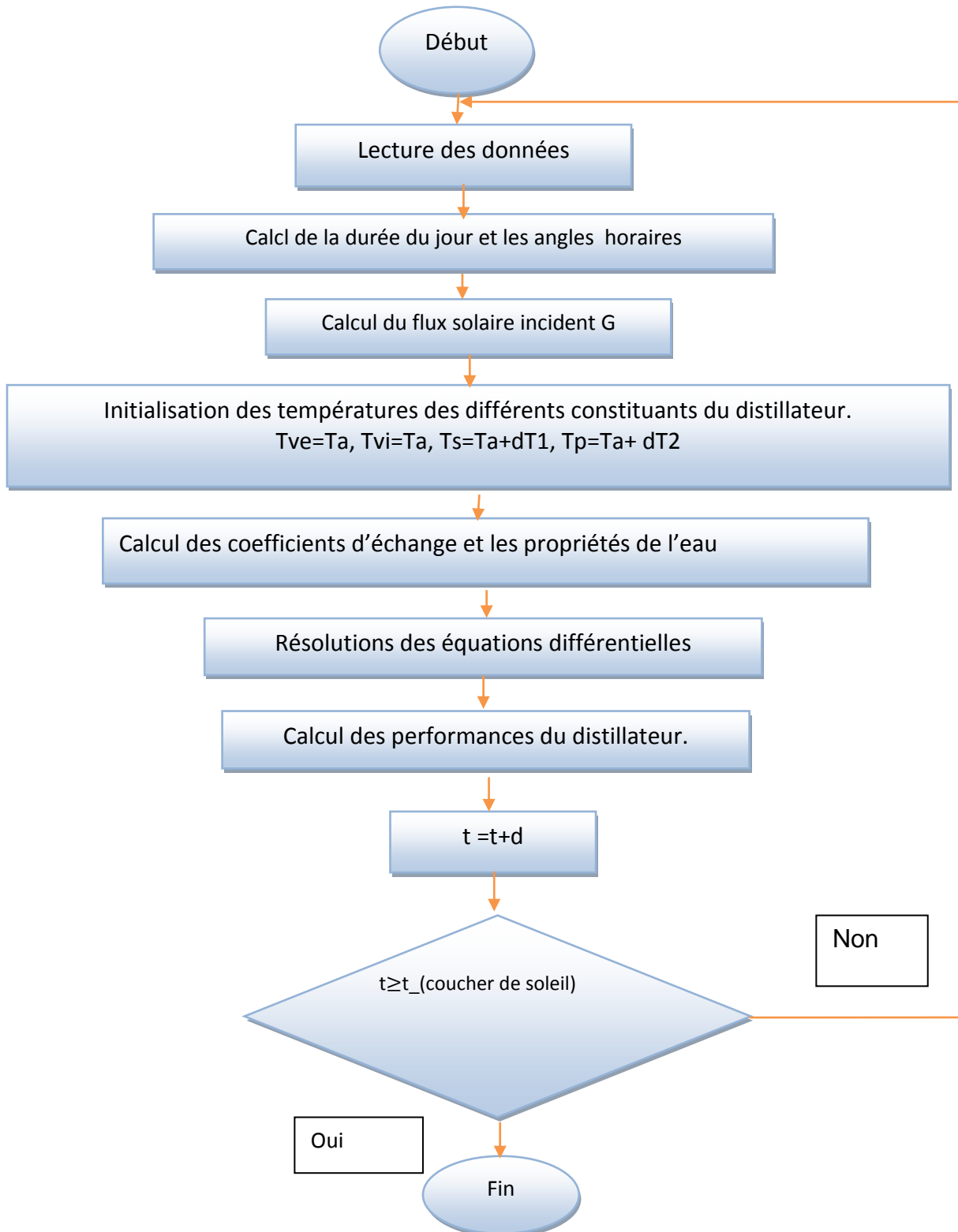
$$Q_{1-2} = \frac{(T_2 - T_1)}{R} \quad w/m^2 \quad (3.51)$$

$$\text{Tell que : } R = \frac{1}{h_{1-2}} \quad (3.52)$$



**Figure 3-3.** Représentation de l'analogie électrique.

## III.7. Organigramme



# Chapitre

## IV

### **DESCRIPTION DU PROTOTYPE EXPERIMENTAL**

---

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



Ce prototype a été proposé et réalisé par **MOUNGAR et al** (2010), de l'équipe de recherche en distillation solaire au sien de l'**URER/MS**. La réalisation de prototype se déroule comme suit :

- ✓ Traçage et sciage :après avoir fait le traçage sur deux tôles d'acier galvanisé, nous avons procédé au sciage à l'atelier de l'**URER/MS** en collaboration avec le personnel de soutien.
- ✓ Perçage :nous avons pratique un trou au font du bac interne et bac externe pour introduire un conduit d'alimentation en eau .Cette opération est réalisée dans l'atelier de l'**URER/MS**.
- ✓ 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**.
- ✓ Peinture :nous avons peint le fond de distillateur avec une peinture noire mâte et les côtés extérieurs avec une peinture argentée pour donner la forme finale du prototype.

#### IV.1. CONCEPTION DU DISTILLATEUR SOLAIRE

Le distillateur solaire utilisé dans notre expérience est d'une conception très simple. Il s'agit de distillateur à simple effet de serre ; il présente l'avantage d'être facile à construire et surtout à maintenir.

Les éléments principaux du distillateur solaire à simple effet sont les suivants:

1. Une plaque d'absorption.
2. Une vitre.
3. Une isolation thermique.
4. Une couverture extérieure.

##### IV.1.1 Bac absorbant

La plaque d'absorption est conçue d'une tôle d'acier galvanisé tintée en noire mate, pour absorber le maximum du rayonnement solaire.

**Tableau .4.1** : Les dimensions de la plaque d'absorption.

Longueur	Largeur	Hauteur	Epaisseur	Superficie de la base
1m.	1m	0,22m et 0,05m	1,5mm.	1m <sup>2</sup> .

### IV.1.2 Couverture transparente

Pour sa simplicité et son bas coût, on a utilisé du verre ordinaire. Car ce type de distillateur ne nécessite pas des techniques avancées.

**Tableau .4.2 : Les dimensions de la vitre.**

Longueur	Largeur	Epaisseur	Superficie de la base
1,05m	1,05m	0,004m	1,1m <sup>2</sup>

Pour assurer une bonne étanchéité entre la vitre et les autres constituants du distillateur on a utilisé de silicone.

### IV.1.3 L'isolation thermique

Généralement, l'isolation thermique du distillateur est en laine de verre ou en polystyrène expansé. L'épaisseur varie de 3 à 6cm. Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement.

**Tableau .4.3 : Les dimensions de l'isolant thermique.**

Longueur	Largeur	Hauteur	Epaisseur	Superficie de la base
1,08m	1,08m	0,26m et 0,09m	0,04m	1,17m <sup>2</sup>

### IV.1.4 Couverture extérieure

Le coffre externe est conçu en tôle galvanisée:

**Tableau .4.4 : Les dimensions du coffre externe.**

Longueur	Largeur	Hauteur	Epaisseur	Superficie de la base
1,11m.	1,11m.	0,09 m et 0,26m.	0,015m.	1,23m <sup>2</sup>

Il a pour rôle d'assembler les différents éléments actifs du distillateur.

### IV.1.5 Cuve de récupération du distillat

Pour la récupération du distillat on a utilisé une cuve graduée.

#### IV.1.6 Composants standards achetés

Ces composants ont été choisis de façon constructive (dimensions proportionnelles à la taille du système) et selon la disponibilité sur le marché. Ces composants sont décrits dans le (tableau.4.5).

**Tableau .4.5 : Récapitulatif de différents éléments du distillateur**

<i>Matière</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Quantité</i>
Tôle galvanisée	1m × 2m × 1,5mm	2
La laine de verre	2m <sup>2</sup>	1
Verre	1,05m × 1,05m × 4mm	1
Manchons en fer galvanisé	15/21	2
Silicone mécanique	-	2
Silicone	-	1
Peinture noire	1 kg	1
Vannes	15/21	1
Téflon	-	1
rivets	-	20

#### IV.1.7 Réalisation des composants du distillateur solaire

##### IV.1.7.1 Réalisation du bac absorbant et du coffre

Pour la réalisation du bac absorbant et du coffre, il a suffi deux tôles en acier galvanisée de dimension suivante: 1m × 2 m× 15mm, chaque tôles est pliée et soudée au coin latérale. Voir (les tableaux 4.1 et 4.4).

##### IV.1.8 Montage

Le bac est équipé d'un système de remplissage et de vidange. Les soudures du bac sont isolées par une couche épaisse de silicone mécanique et le tout est tinte en noire mate.

Après avoir conçu les différents éléments du prototype, nous avons introduit le bac interne à l'intérieur du coffre, avec une isolation en La laine de verre entre les deux compartiments. Pour la fermeture le système en pose la vitre en utilisant une coche de silicone pour assurer l'étanchéité du prototype.

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.

## VI.2 EXPERIENCES

Les essais ont été réalisés au sein de l'URERMS ADRAR. Le distillateur est orienté vers le sud pour absorber l'optimum du rayonnement solaire.

Les paramètres mesurés sont :

- ❖ Les températures des différentes parties du distillateur et la température ambiante ;
- ❖ Le flux global ;
- ❖ La production du distillat ;

## VI.3. Montage de mesure

La collection des données est assurée par (Figures N°4.1) :

- Une acquisition des données type **FLUKE HYDRA SERIES II 2625A**, qui assure la conversion et la lecture de valeur mesurées, les températures de différents éléments constituant notre prototype et le flux radiatif global incident sur un plan horizontal.
- Un pyranomètre, type **KIPP&ZONEN**, pour mesurer le flux radiatif global.
- Des thermocouples, types **K**, sont étalonnés avant d'être fixés au distillateur.

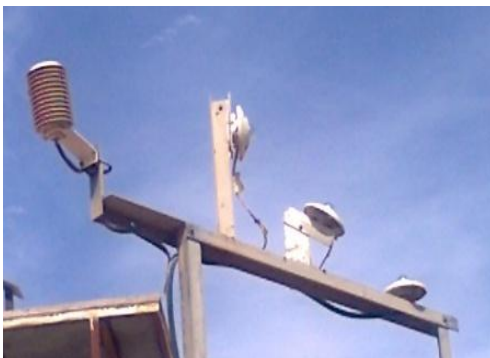
L'étalonnage se fait en deux points 0°C (la glace fondante) et 100°C (l'eau bouillante).



A1



A2



A3



A4

Figure 4. 1 : montage de mesure

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

La durée de vie du distillateur est d'environ 10 ans. Le projet rentable si la valeur comptable VAC est supérieure à 0. [28]

**Tableau .4.6 : Coût des différents éléments du distillateur**

Matière	Quantité	Prix en DA
Tôle galvanisée d'acier 1m × 2m × 1,5mm	2	7000,00
Laine de verre 1m × 2m × 4cm	1	650,00
Silicone mécanique	2	360,00
Silicone	1	200,00
Peinture noire(1 kg)	1	280,00
Verre 1,05m × 1,05m × 4mm	1	1900,00
<b>Accessoires divers et Main d'œuvre</b>		<b>11400,00</b>
<b>TOTAL</b>		<b>21790 ,00</b>

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

Avec  $\sum VA(Gains) = \sum_{t=1}^{10} (Gains \times \frac{(1+j)^t}{(1+i)^t})$

$j = 0$ , On suppose qu'il n'y a pas d'inflation, et les prix des matériaux ne varient pas.

Dépense = 0, notre distillateur fonctionne uniquement à l'énergie solaire, et n'a pas besoin d'autre forme d'énergie.

Le calcul est fait pour un taux d'intérêt,  $i = 8\%$ .

Le prix d'un litre d'eau distillait est estimé à 25 DA et la production annuel du distillateur est en voisinage du 1952 litre/année.

**Début**

$$VA(Gain)_0 = 0DA$$

**Première année**

$$VA(Gain)_1 = \left( \frac{1952 \times 25}{(1 + 0.08)^1} \right)$$

$$VA(Gain)_1 = 45185,19 DA$$

**Deuxième année**

$$VA(Gain)_2 = \left( \frac{1952 \times 25}{(1 + 0.08)^2} \right)$$

$$VA(Gain)_2 = 41838,13 DA$$

**Troisième année**

$$VA(Gain)_3 = \left( \frac{1952 \times 25}{(1 + 0.08)^3} \right)$$

$$VA(Gain)_3 = 38739,01 DA$$

**Quatrième année**

$$VA(Gain)_4 = \left( \frac{1952 \times 25}{(1 + 0.08)^4} \right)$$

$$VA(Gain)_4 = 35869,46 DA$$

**Cinquième année**

$$VA(Gain)_5 = \left( \frac{1952 \times 25}{(1 + 0.08)^5} \right)$$

$$VA(Gain)_5 = 33212,46 DA$$

**Sixième année**

$$VA(Gain)_6 = \left( \frac{1952 \times 25}{(1 + 0.08)^6} \right)$$

$$VA(Gain)_6 = 30752,28 DA$$

**Septième année**

$$VA(Gain)_7 = \left( \frac{1952 \times 25}{(1 + 0.08)^7} \right)$$

$$VA(Gain)_7 = 28474,33 \text{ DA}$$

**Huitième année**

$$VA(Gain)_8 = \left( \frac{1952 \times 25}{(1 + 0.08)^8} \right)$$

$$VA(Gain)_8 = 26365,12 \text{ DA}$$

**Neuvième année**

$$VA(Gain)_9 = \left( \frac{1952 \times 25}{(1 + 0.08)^9} \right)$$

$$VA(Gain)_9 = 24412,15 \text{ DA}$$

**Dixième année**

$$VA(Gain)_{10} = \left( \frac{1952 \times 25}{(1 + 0.08)^{10}} \right)$$

$$VA(Gain)_{10} = 22603,84 \text{ DA}$$

$$VAC = -21790,00 + 45185,185 + 41838,134 + 38739,013 + 35869,457 + 33212,460 + 30752,278 + 28474,331 + 26365,122 + 24412,150 + 22603,842 = 305661,97 \text{ DA}$$

VAC > 0 Donc le projet est rentable.

**Tableau .4.7:** La production moyenne du prototype

	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> )	2.1	6	8.6	4.7	5,3

Le calcul de rentabilité a été fait pour une production journalière moyenne annuelle de 5,3(L/j m<sup>2</sup>).

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

# Chapitre

## V

### **RESULTATS & 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

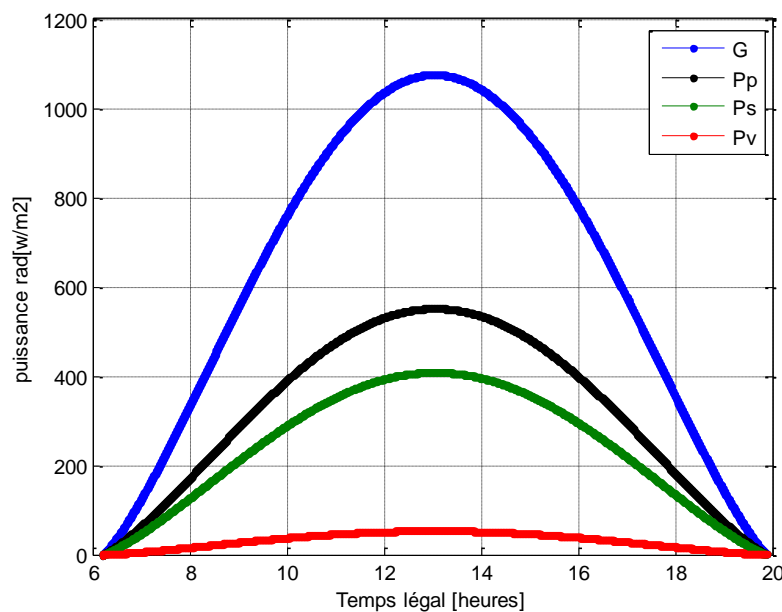
Afin de résoudre les systèmes d'équations différentielles précédentes, on a utilisé la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG. On a élaboré un programme sous MATLAB pour simuler l'évolution au fil du temps du comportement du système. L'étude a été effectuée sur le site d'ADRAR caractérisé par une longitude  $0^{\circ}18'W$ , latitude  $27^{\circ}53'N$  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, on a pris un jour représentatif de chaque saison, de façon qu'il soit à mi saison, le 17 Janvier,16 Mars, le 3 Juillet et le 15 Septembre.

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

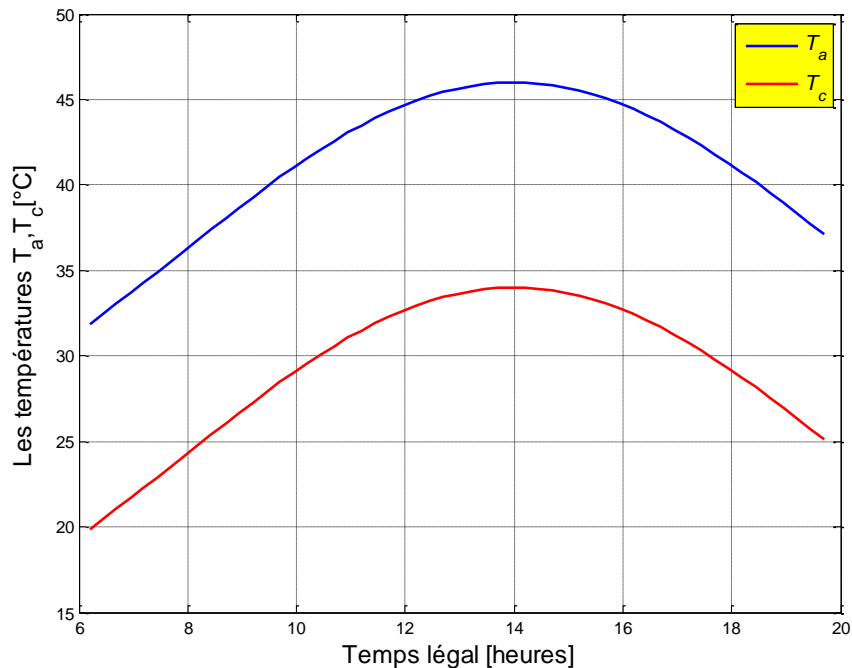
La figure.5.1, illustre l'évolution journalière de l'énergie solaire reçue sur un plan horizontal (G). Nous observons une symétrie par rapport au midi solaire, où l'intensité est maximale. Pv, Ps, Pp sont respectivement la puissance absorbée par le vitrage de distillateur, la saumure, la plaque d'absorption.



**figure.5.1.**Energies solaires reçues par le distillateur pour la journée du 3 juillet

### V.1.3. La variation de la température ambiante et la température du ciel :

La figure.5.2, présente la variation de la température ambiante et de la température du ciel en fonction du temps, ils ont la même allure avec un écart de 12°C (voir figure.5.2). elles atteignent leurs valeurs maximales entre 13h00 et 15h00.

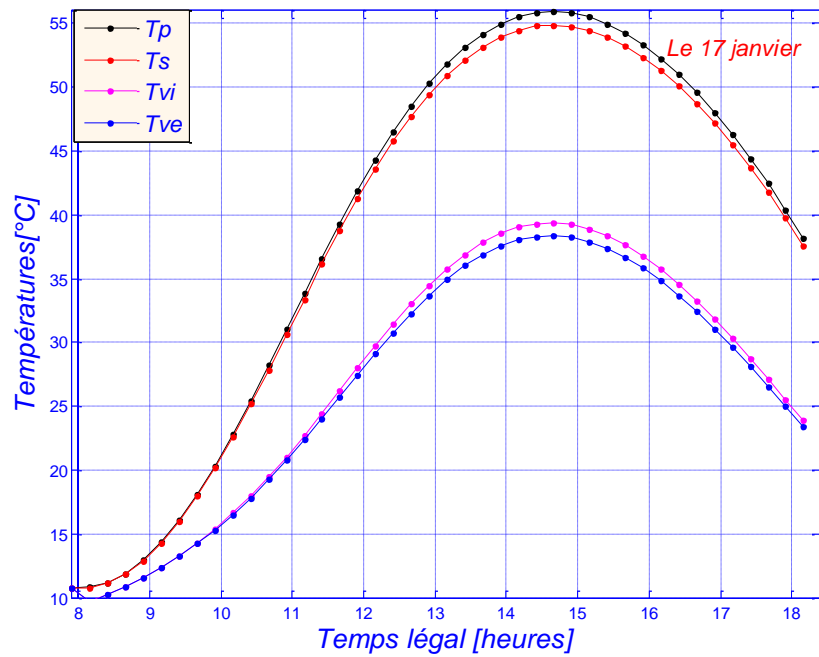


**Figure.5.2** Variations temporelles de la température ambiante et la température de ciel pour la journée du 3 juillet

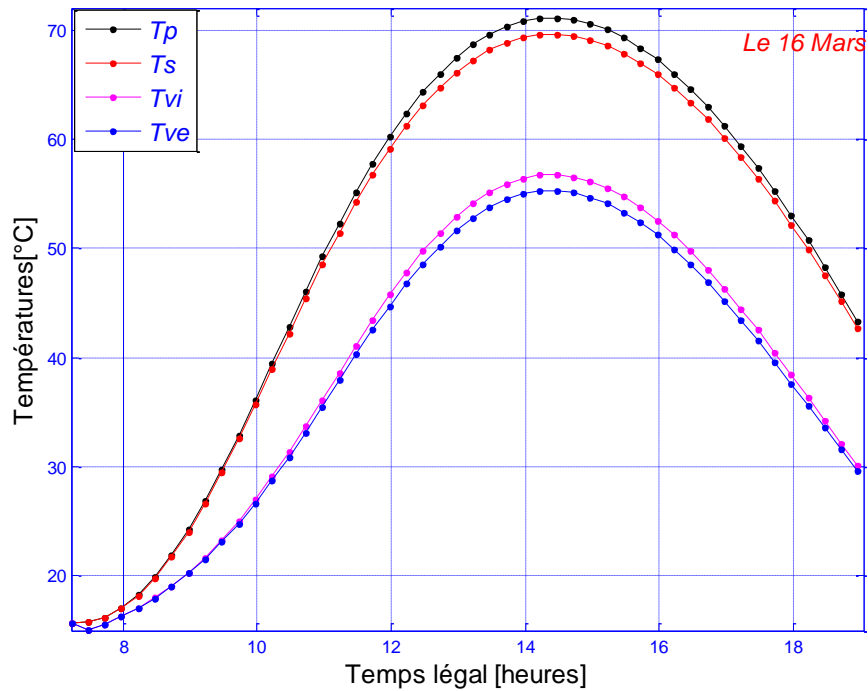
### V.1.4. Températures des différentes composantes de distillateur

Les figures 5.3, 5.4, 5.5 et 5.6, représentent l'évolution des températures de chaque composante du distillateur ; Tve, Tvi : température du vitrage de distillateur du côté externe et interne respectivement.

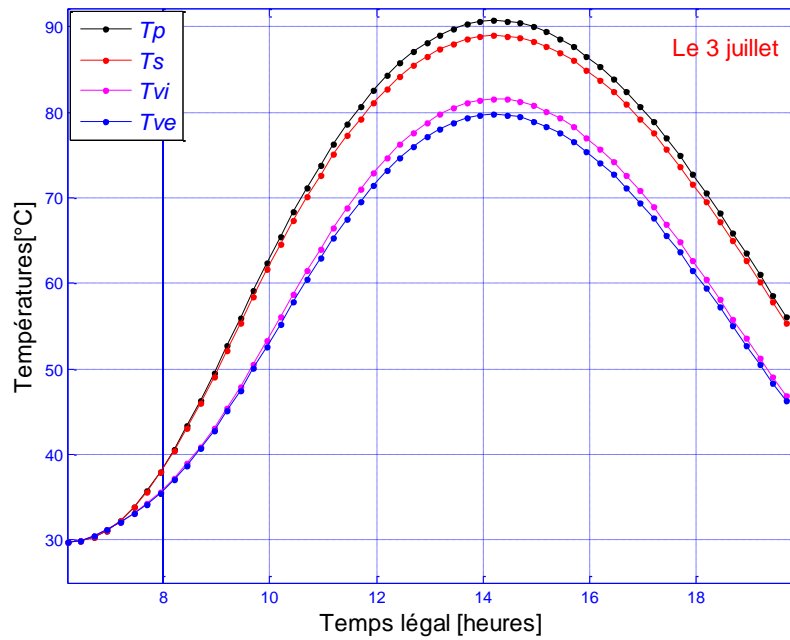
Ts et Tp : La température du saumure et la température de la plaque d'absorption. Ces valeurs varient d'une saison à une autre, elles atteignent le maximum durant la période estivale et le minimum durant la période hivernale. On remarque que l'écart de température entre la plaque d'absorption et la saumure est compris entre 0°C et 3°C.



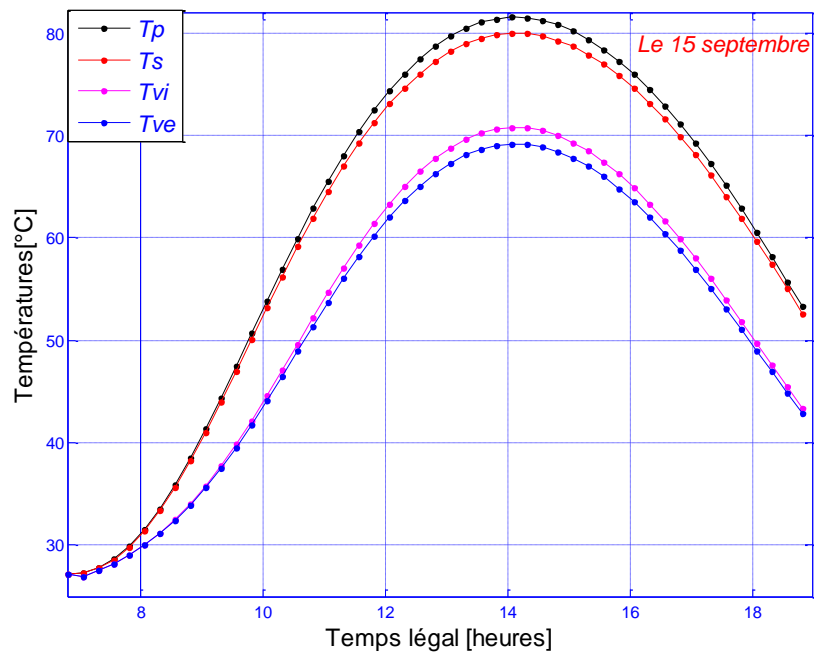
**Figure 5.3:**Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 17 Janvier.



**Figure 5.4:**Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 16 Mars.



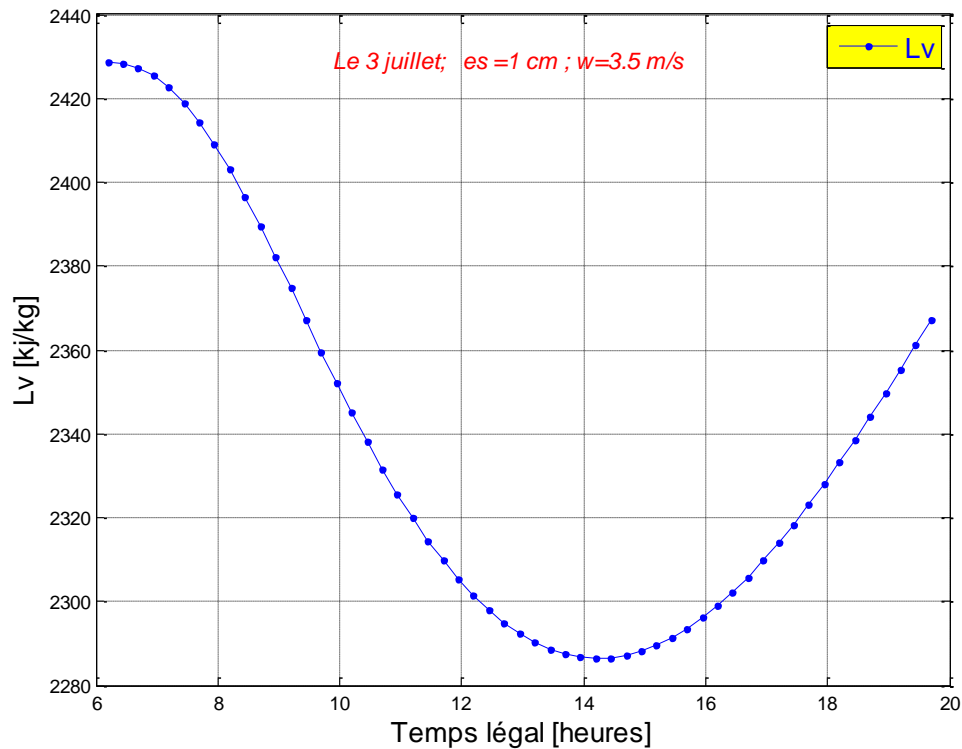
**Figure 5.5:**Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 3 juillet.



**Figure 5.6:**Températures de différents composants du distillateur pour la journée du 15 septembre.

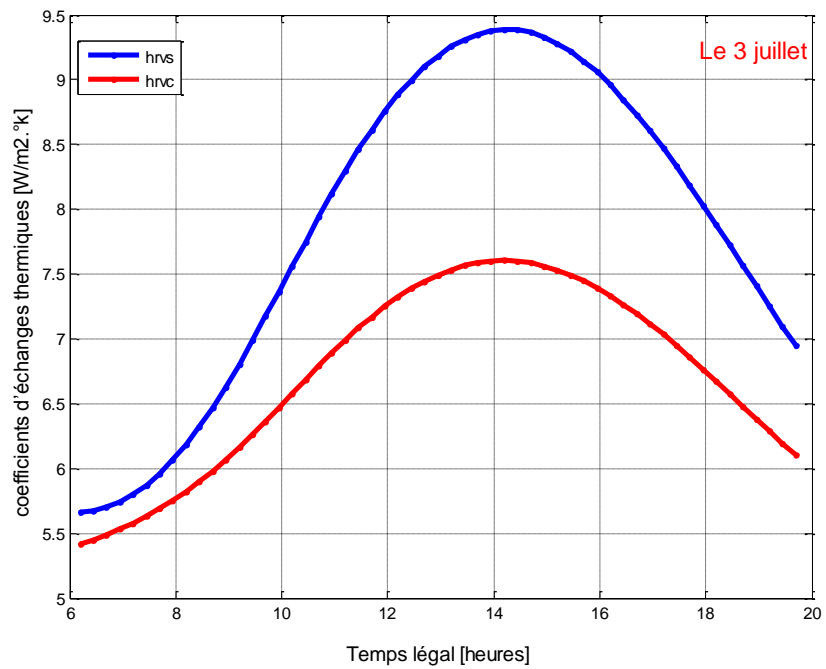
### V.1.5. Variation temporelle des coefficients d'échanges

La chaleur latente de vaporisation de la saumure diminue au fur à mesure que sa température augmente. Elle atteint leurs valeurs minimale entre 13h00 et 15h00heures, en suite elle poursuit sa croissance jusqu'au coché du soleil.

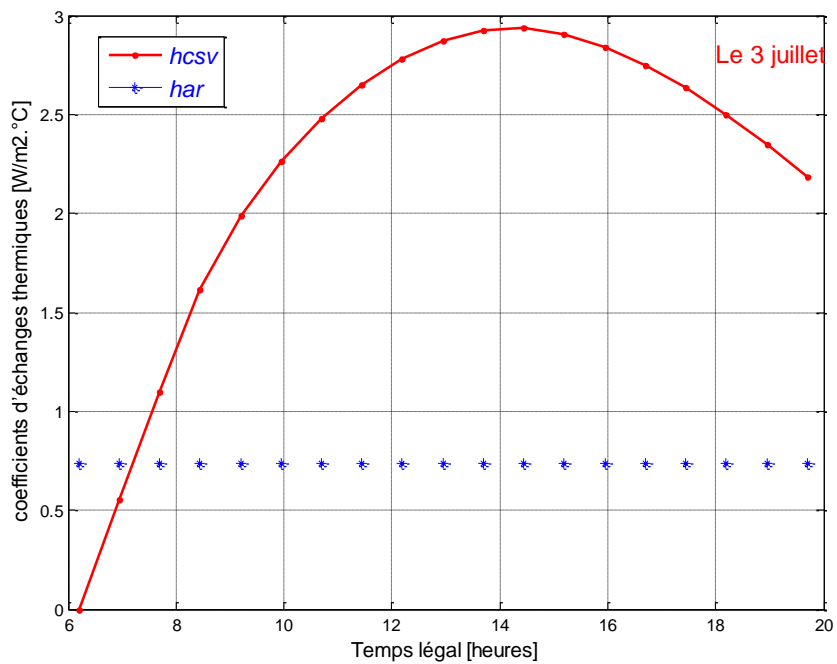


**Figure.5. 7:** Variation temporelle de la chaleur latente de vaporisation pour la journée du 3 Juillet.

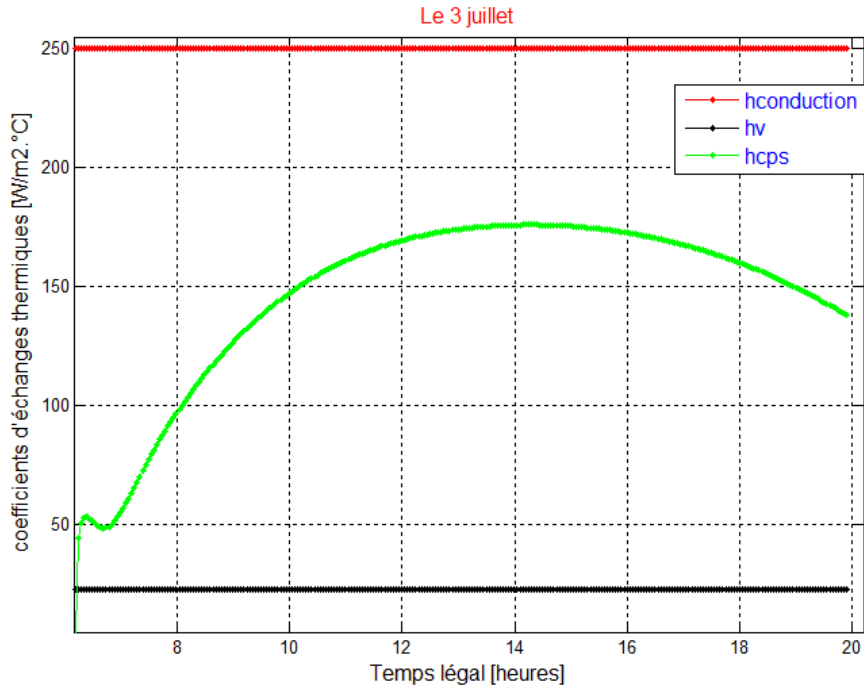
Les coefficients d'échange thermique suivent l'allure du rayonnement solaire, sauf les coefficients d'échange par conduction et par convection (c'elle du au vent) qui sont considérer constants



**Figure.5.8:** Variation temporelle des coefficients d'échanges thermiques pour la journée du 3 juillet.



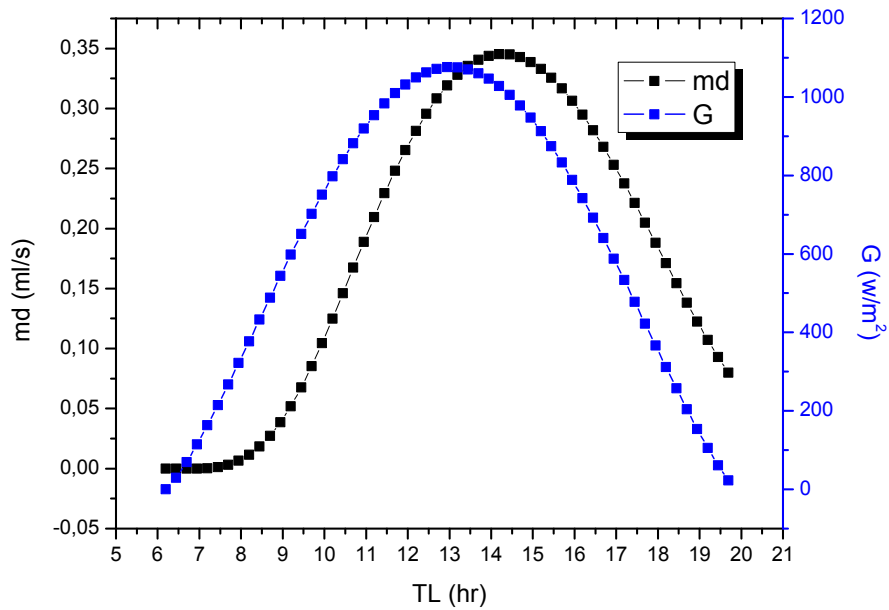
**Figure.5.9:** Variation temporelle des coefficients d'échanges thermiques pour la journée du 3 juillet.



**Figure 5.10:** Variation temporelle des coefficients d'échanges thermiques pour la journée du 3 juillet.

**V.1.6. Variation temporelle de la masse d'évaporation**

La masse d'évaporation suit l'évolution du rayonnement solaire, il atteint le maximum 0.35 [ml /s] à 14,45 heures et le minimum, au lever et au coucher du soleil (**Figure .5.11**)

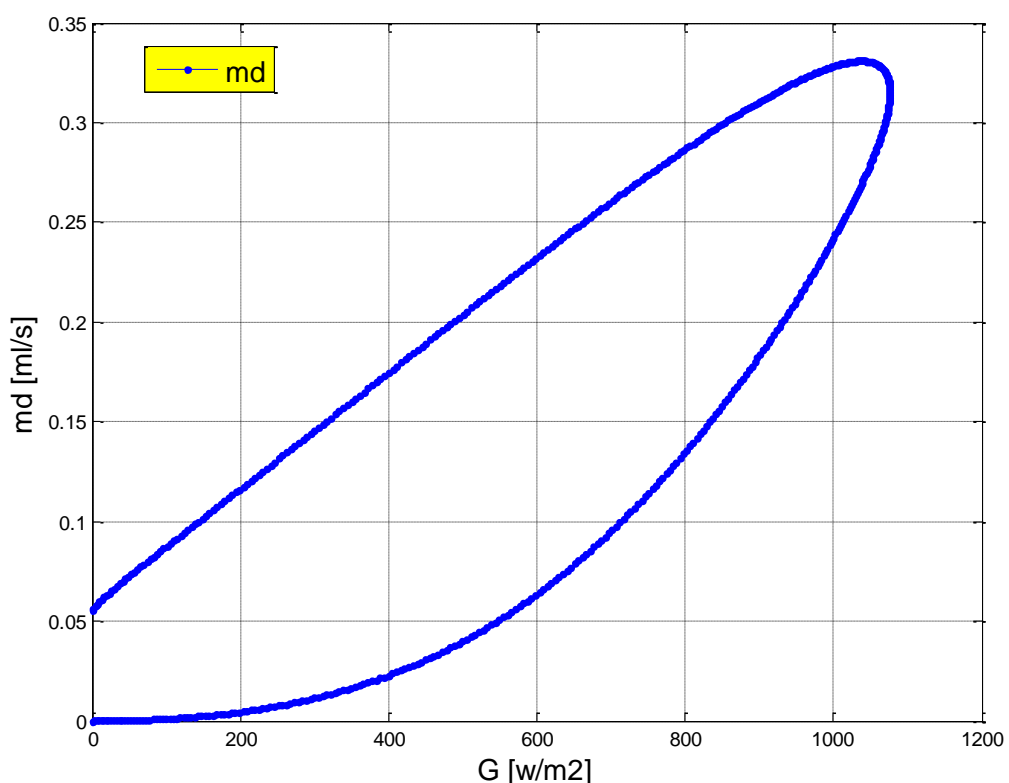


**Figure .5.11:** Energie solaire reçue et la masse d'évaporation pour la journée du 3 juillet.

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

De lever jusqu'à 14,45 [hr] La variation du débit a une croissance ascendante, de 14,45 [hr] au coucher du soleil à une décroissance linéaire.

Le retard de la production durant les premières heures de la journée est dû au fait qu'une partie de l'énergie reçue de 0 à 300 [ $\text{w/m}^2$ ] est consommée pour chauffer le système. Ce qui peut être expliqué par l'inertie du système (Figure 5.12)



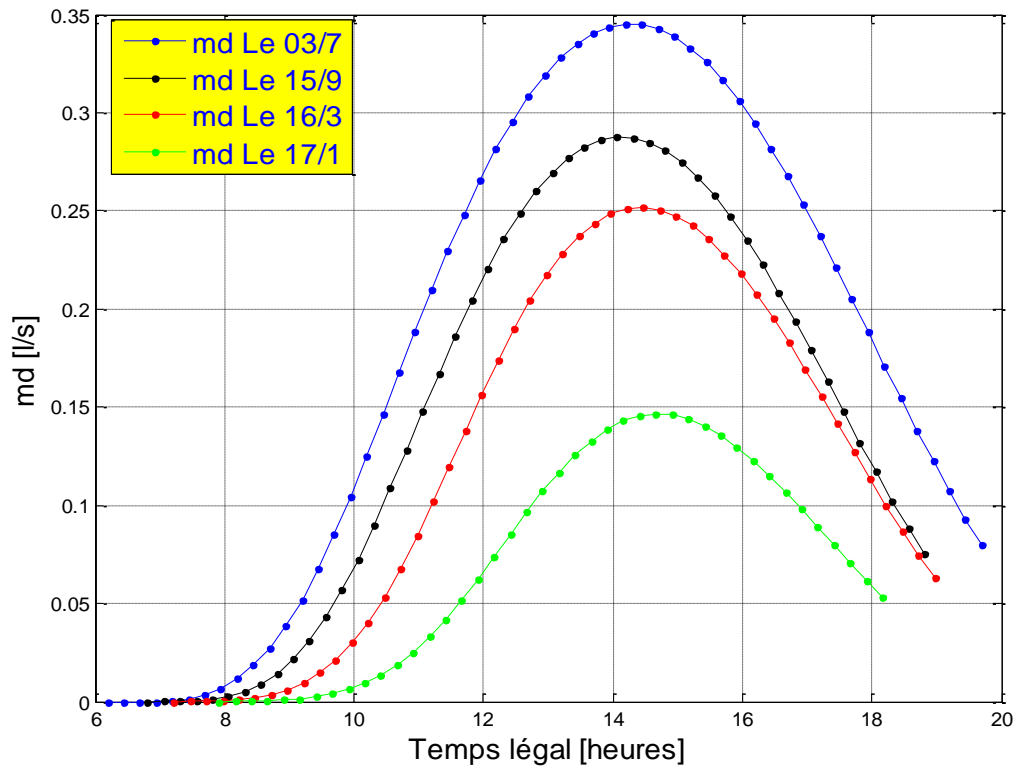
**Figure 5.12:** Variation de la masse d'évaporation en fonction de rayonnement solaire pour la journée du 3 juillet.

Pour bien étudier l'effet de l'irradiation globale sur la production, on va choisir quatre jours de quatre mois différents : le 17 Janvier et le 16 Mars et le 03 juillet et 15 septembre (les quatre jours sont des jours représentatifs du mois).

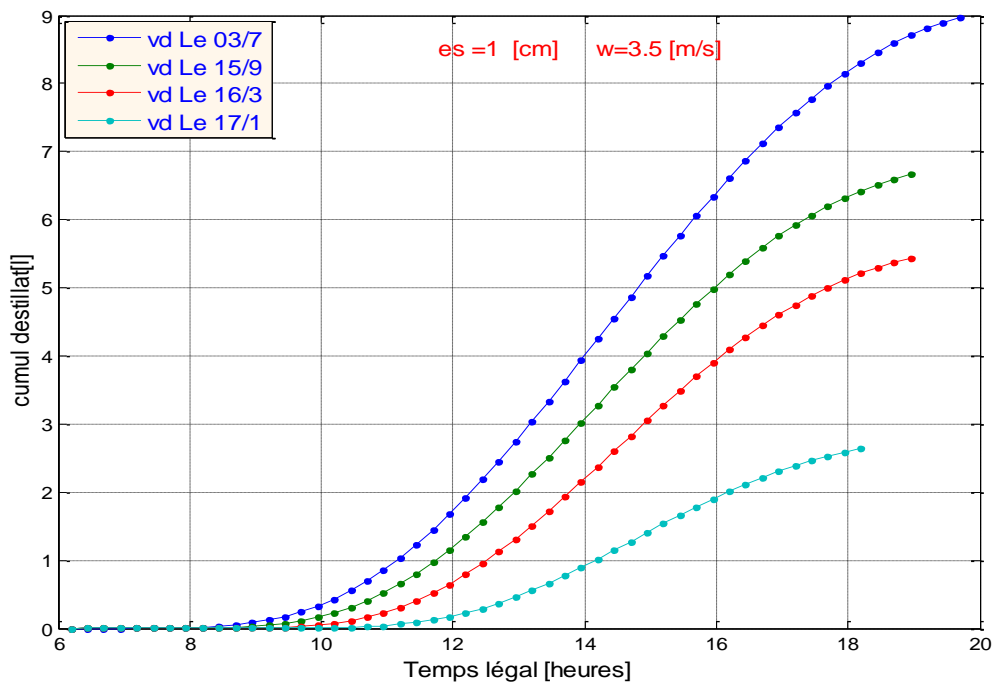
La figure 5.13, montre que la production augmente avec l'irradiation globale. Cependant Pour de grandes puissances.

La figure 5.14, illustre la variation de la production cumulée en fonction du temps





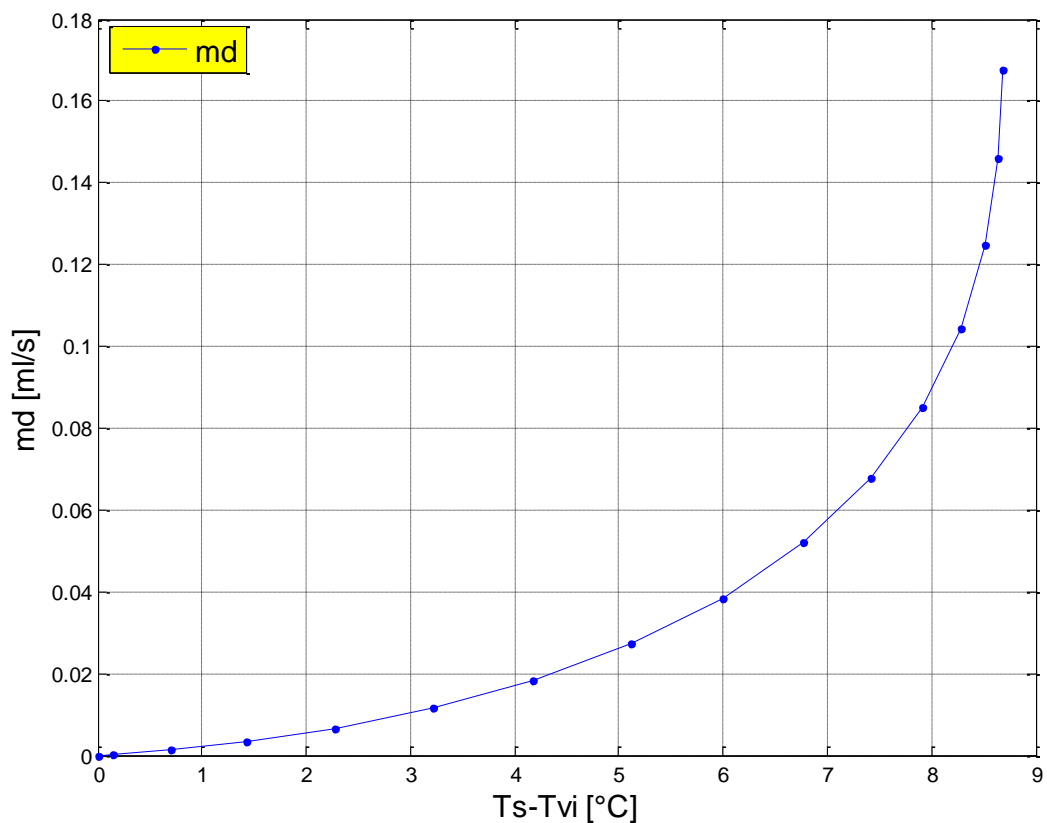
**Figure 5.13:** Variation temporelle du débit de distillat pour les journées du 17/1,16 /3,3/7,15/9



**Figure 5.14:** production cumulée pour les journées du 17/1,16 /3,3/7,15/9

**V.1.7.L'effet de l'écart de température (saumure-vitre) sur la production :**

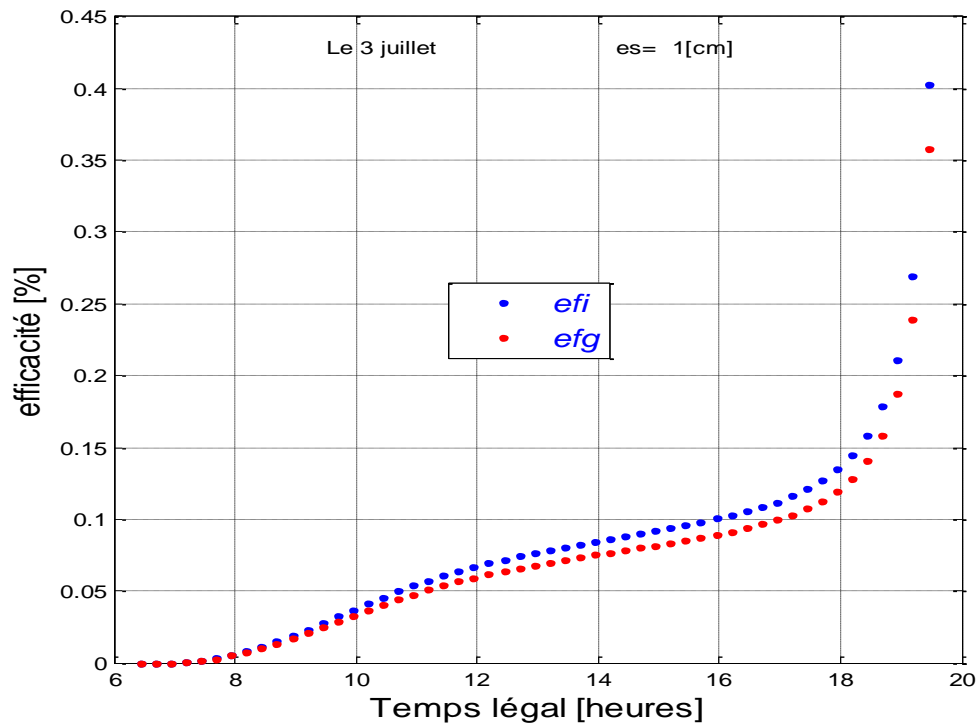
Nous pouvons constater à travers ( la figure 5.15), que la production augmente lorsque l'écart de température entre la nappe d'eau et la surface intérieure de la vitre augmente.



**Figure 5.15: Variation de la production en fonction de l'écart de Température entre la saumure et la vitre.**

**V.1.8.l'efficacité globale et interne**

Les courbes de (la figure 5.16) présentent la variation de l'efficacité globale et interne en fonctions du temps. Ils ont la même allure croissante en fonction du temps .



**Figure 5.16:** efg : efficacité global efi : efficacité interne.

### V.1.9.L'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau.

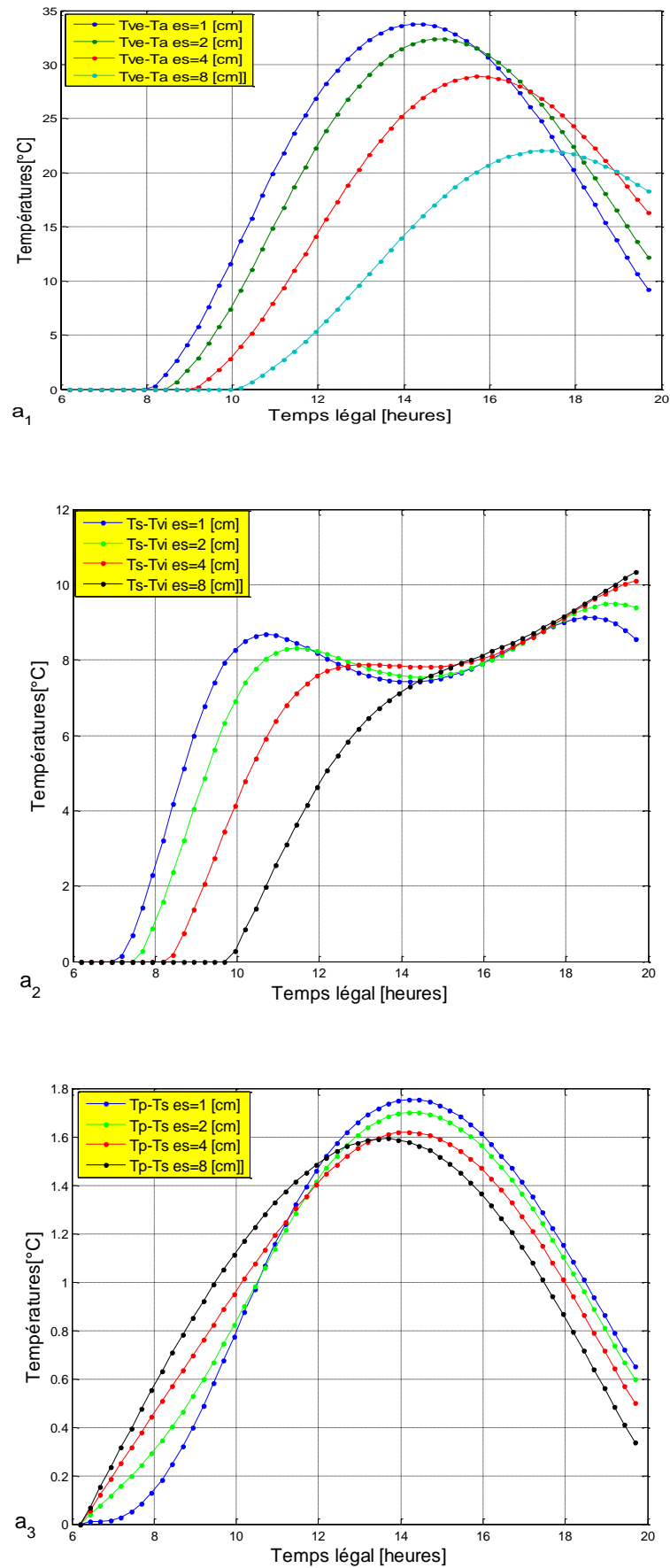
#### V.1.9.1. L'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur l'écart de température

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 l'écart de température entre la saumure et la face interne du vitrage atteint son maximum à 10,30 h, 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.



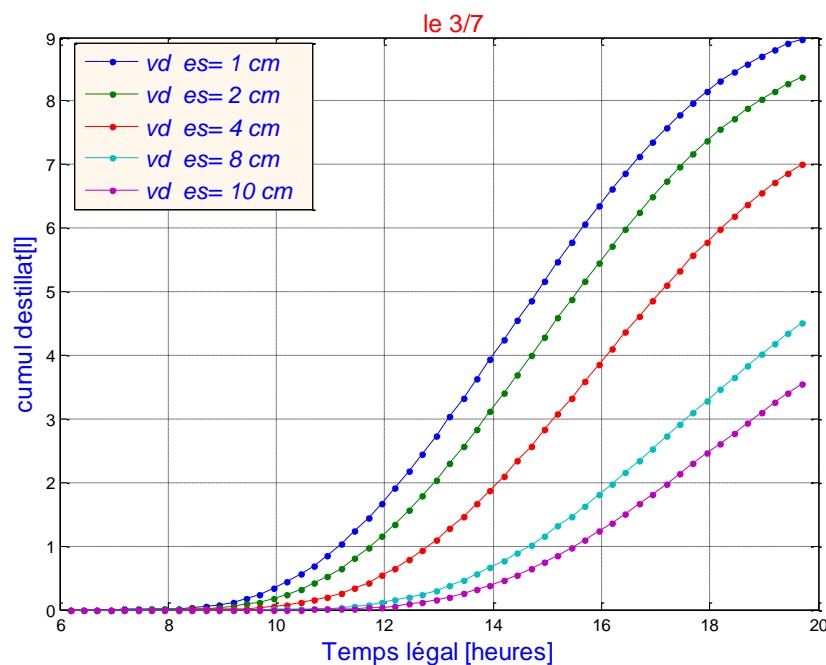
**Figure 5.17:** Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur l'écart de température es=1, 2, 4, 8 cm

**V.1.9.2.L'influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur la production du distillat**

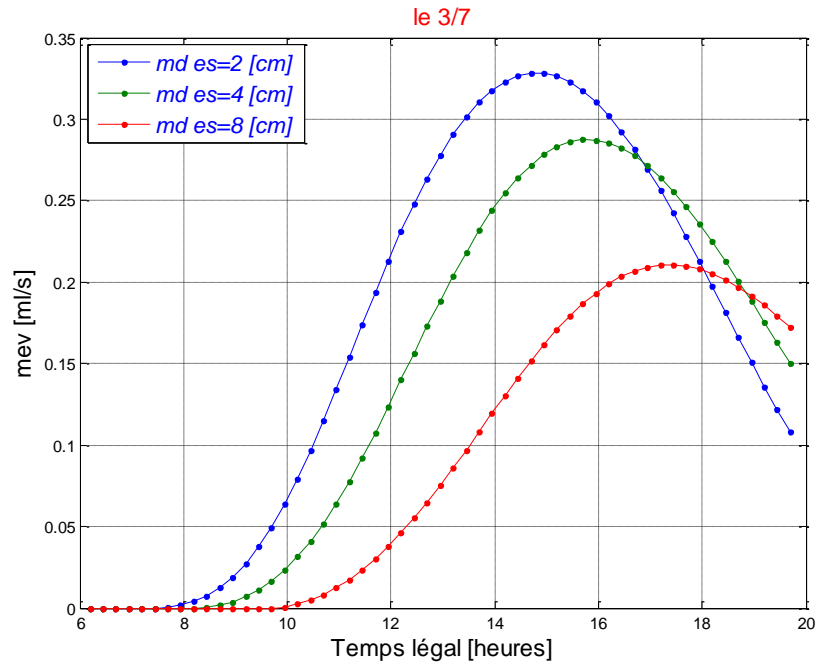
La figure 5.18, nous montrent que l'augmentation de l'épaisseur de la nappe d'eau provoque la décroissance de la production d'eau distillée. Pour une épaisseur de 1 ou 2cm, nous avons eu presque 9 litre durant la journée du 3 juillet. Alors que pour une épaisseur de 10 Cm, nous n'avons eu que 3,6 litre d'eau distillée durant toute la journée.

La figure 5.19, illustre la variation de masse d'évaporation pour différentes épaisseurs de la saumure :2cm ,4cm et 8 cm avec les valeurs maximales respectives : 0.33, 0.29 et 0.21 [ $\text{ml s}^{-1}$ ].

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



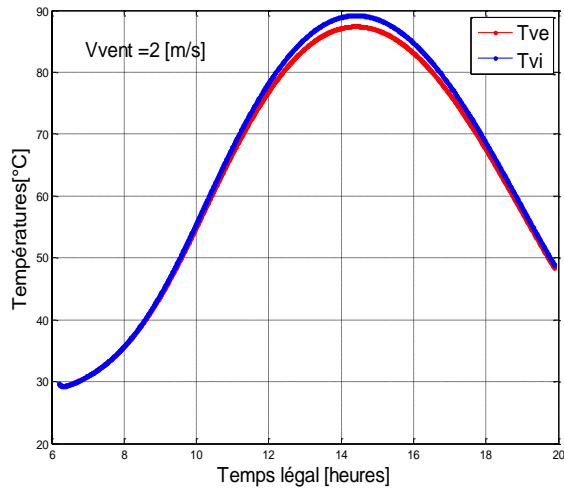
**Figure 5.18:** Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur le volume du distillat, es=1, 2, 4, 8,10 cm



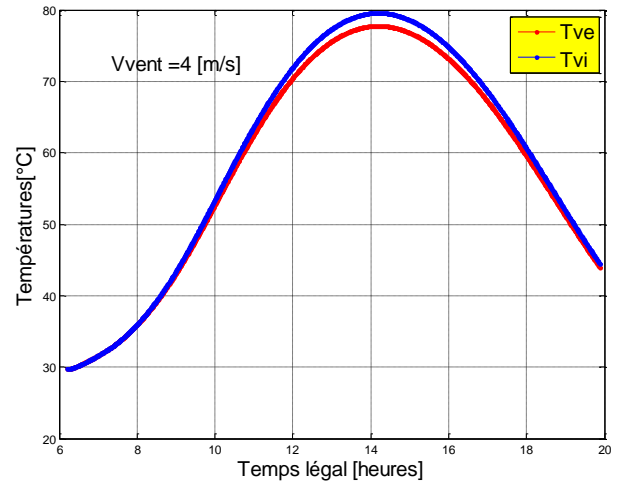
**Figure 5.19:** Influence de l'épaisseur de la nappe d'eau sur le débit de distillat es= 2, 4, 8 cm

### V.1.9.3.L'influence de la vitesse du vent

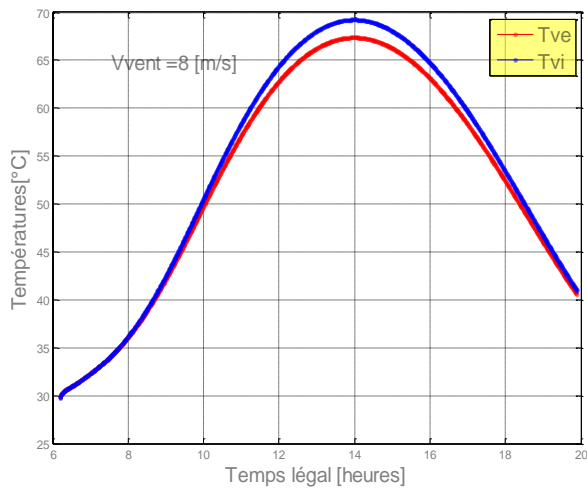
La vitesse du vent a une influence directe sur l'écart de température, entre les deux surfaces du vitrage (figure 5.20) **B1, B2, B3 et B4** par des valeurs de la vitesse vent 2, 4, 8 et 16 m/s respectivement. Par contre il n'a pas une très grande influence sur le débit d'évaporation (figure 5.21).



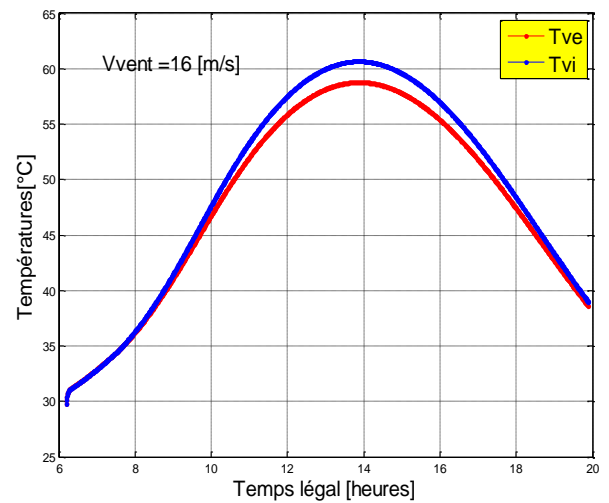
B1



B2

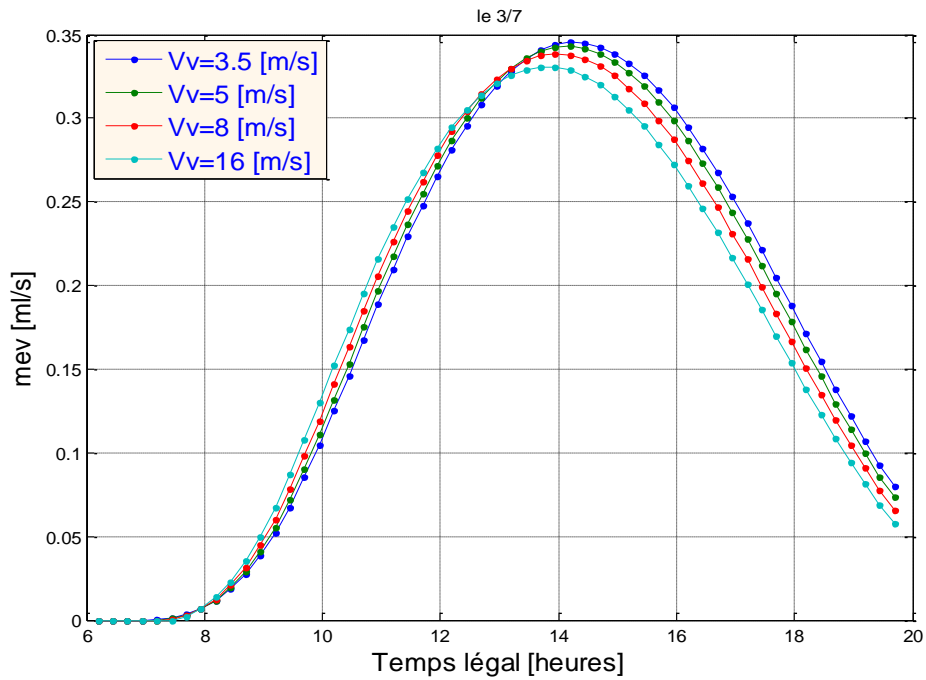


B3



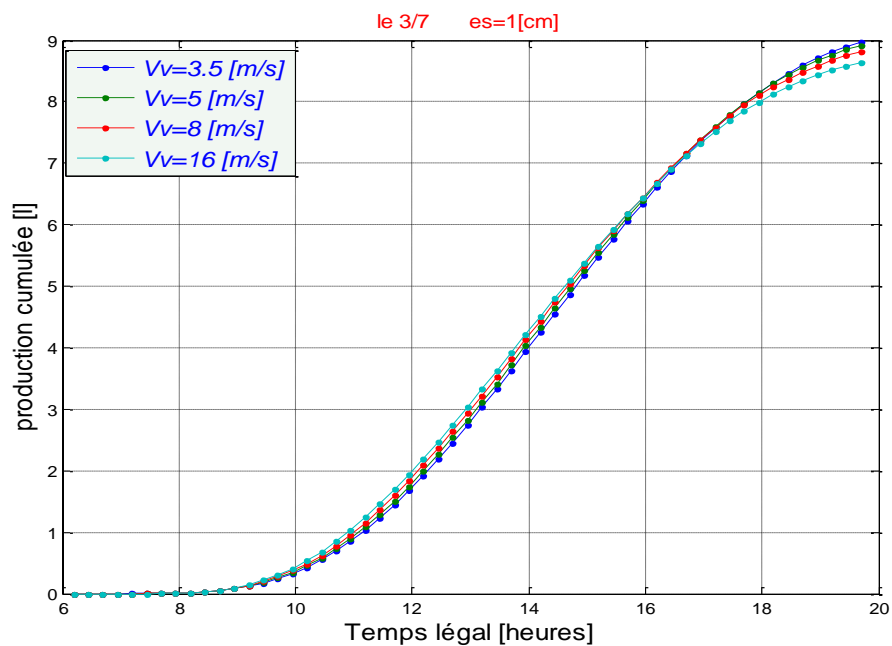
B4

**Figure 5.20:** Influence de la vitesse du vent sur la température de la vitre



**Figure 5.21:** Influence de la vitesse du vent sur le débit de distillat

La figure 5.22, nous montre que la vitesse du vent au-delà de 3.5 m/s n'a pas une très grande influence sur la production d'eau distillée.



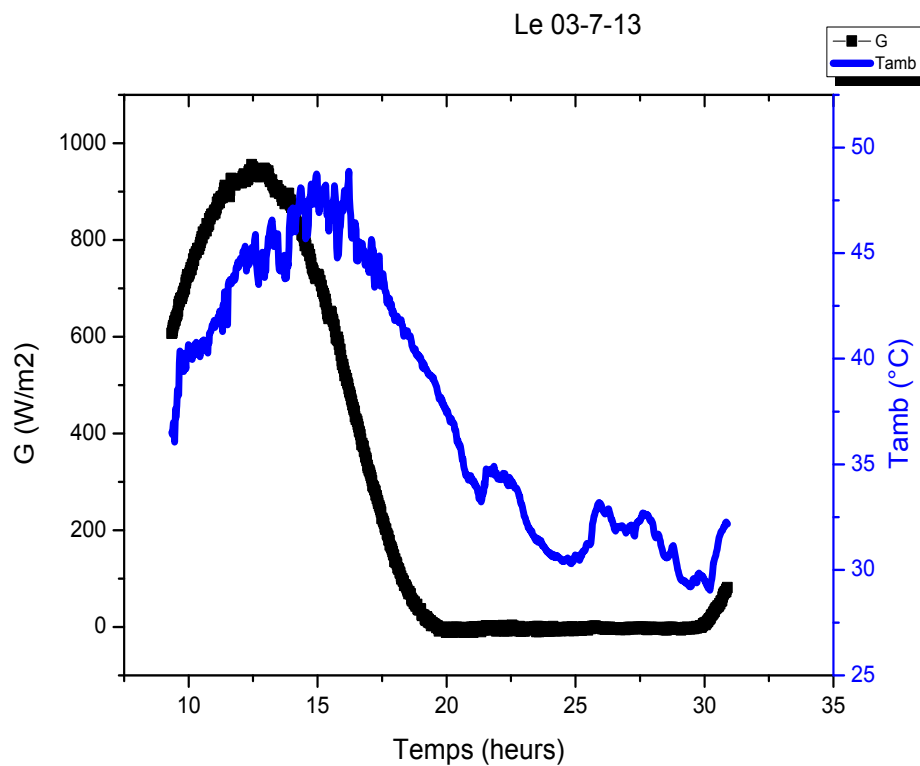
**Figure 5.22:** Influence de la vitesse du vent sur la production d'eau distillée.



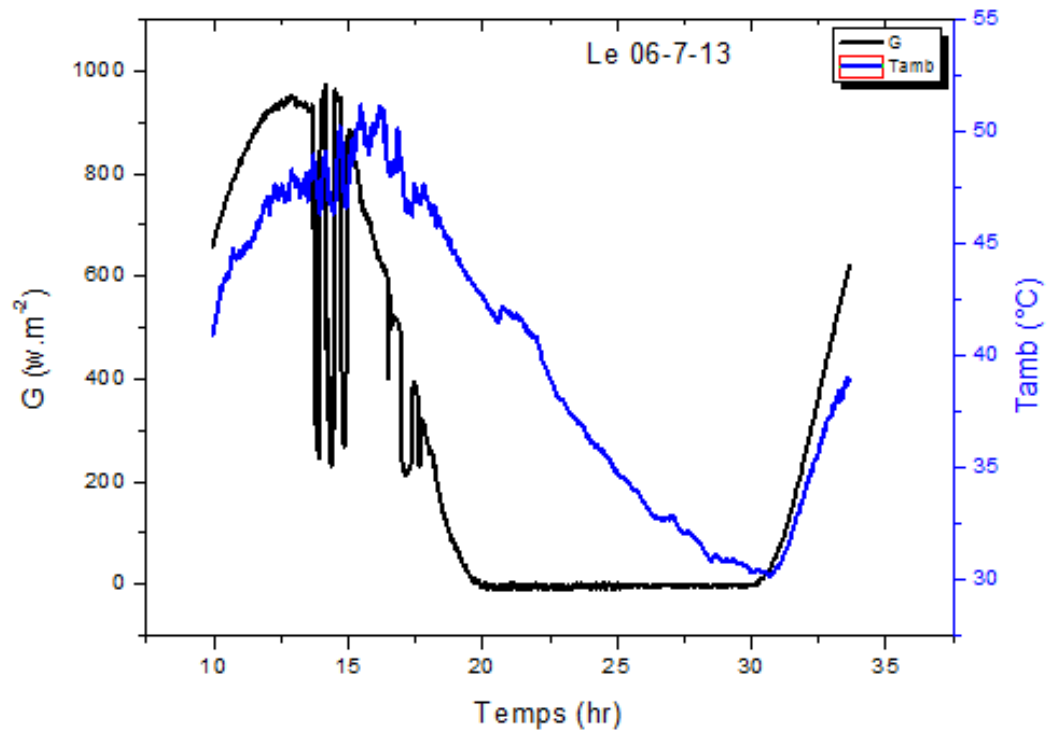
## V.2.Résultats expérimentaux

### V.2.1.Illustration

Les figures 5.23 et 5.24, illustrent la variation du rayonnement solaire incident sur un plan horizontale et la température ambiante mesurée, pour les journées du 03 et 06 juillet. Nous remarquons que la température ambiante suit l'évolution du rayonnement solaire, elle atteint la valeur maximale 47°C à 15 heures. (Les figures 5.23 et 5.24) montre que les mesures de la journée du 03-07-2013 ont été plus claires que celle du 06-07-2013 où il y avait un passage des nuages discontinus ce qui a influé sur l'intensité solaire.



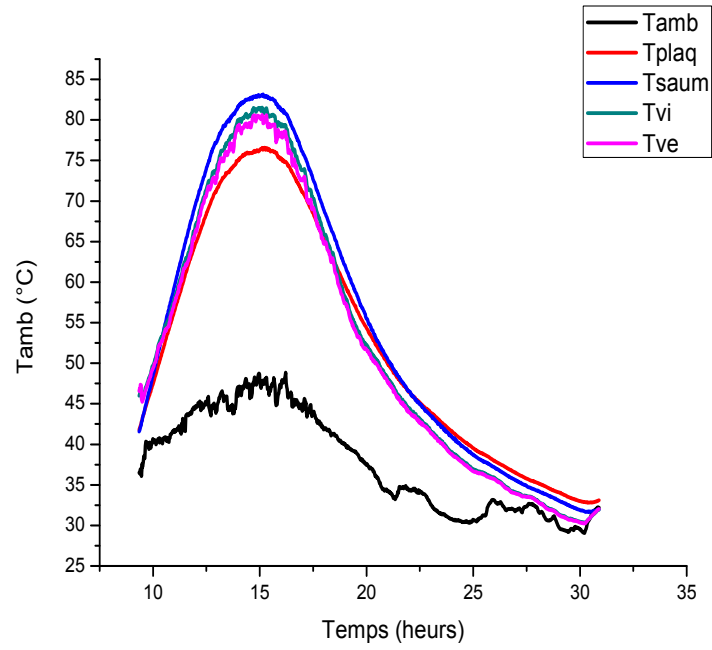
**Figure 5.23** Energie reçue et température ambiante pour la journée du 03 juillet.



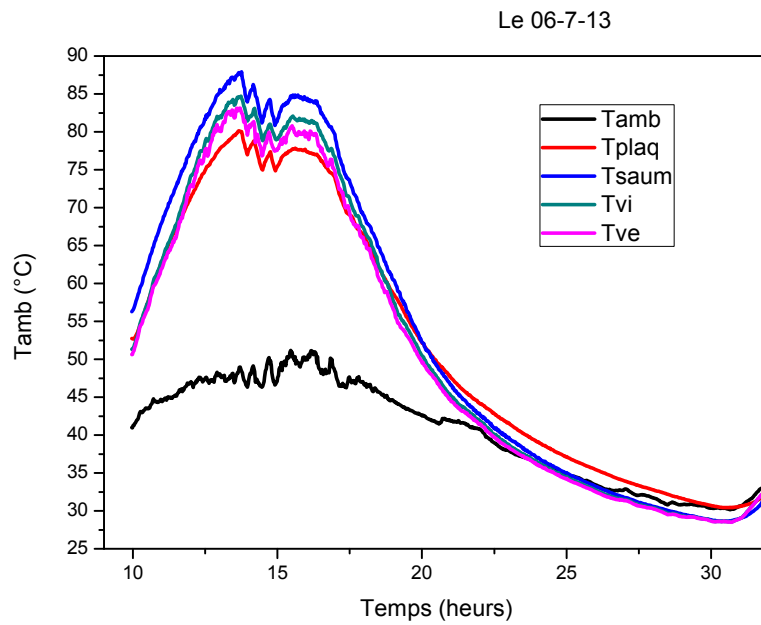
**Figure 5.24** Energie reçue et température ambiante pour la journée du 06 juillet.

Les figure 5.25 et 5.26, représentent l'évolution des températures (plaque, saumure, vitre face intérieure et extérieure) du distillateur. Les courbes des températures de la face intérieure et extérieure sont presque superposées. la valeur maximal atteinte est 80°C. La température maximale de la saumure atteint 82°C à 15 heures.

Suite à une erreur d'emplacement de thermocouple sur la plaque d'absorption la température présentée dans (Les figure 5.25 et 5.26) représente la température de la colle.

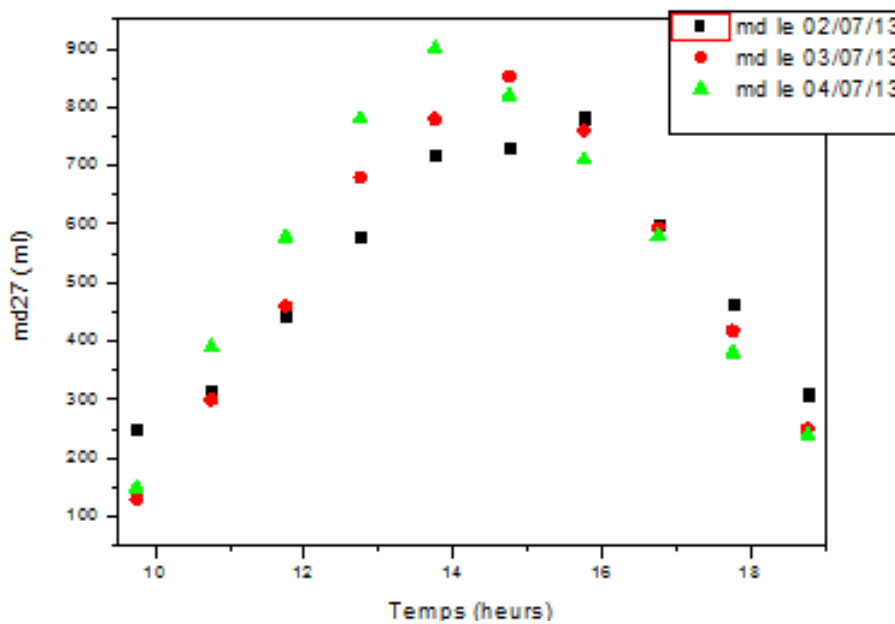


**Figure 5.25** Températures des différentes composantes du distillateur et température ambiante pour la journée du 03 juillet.

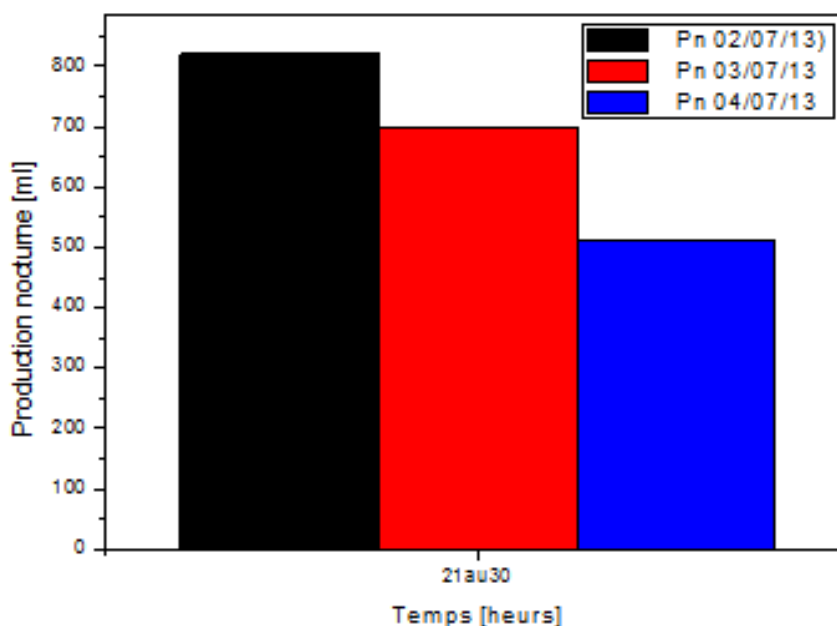


**Figure 5.26** Températures des différentes composantes du distillateur et température ambiante pour la journée du 06 juillet.

La figure. 5.27, montre que la production du distillateur augmente de lever de soleil jusqu'à midi où elle atteint des valeurs maximales (entre 13-15 heures), ensuite elle diminue en fonction de temps .La production d'eau est presque d'un litre par heure durant les heures de pointe (13h00, 14h00 et 15h00), lorsque la température de l'eau atteint son maximum. La production diminue ensuite jusqu'au coucher de soleil où elle atteint sa valeur minimal. La production journalière atteint 5195 ml, 5224ml et 5528 ml pour les journées du 02, 03 et 04 juillet respectivement.



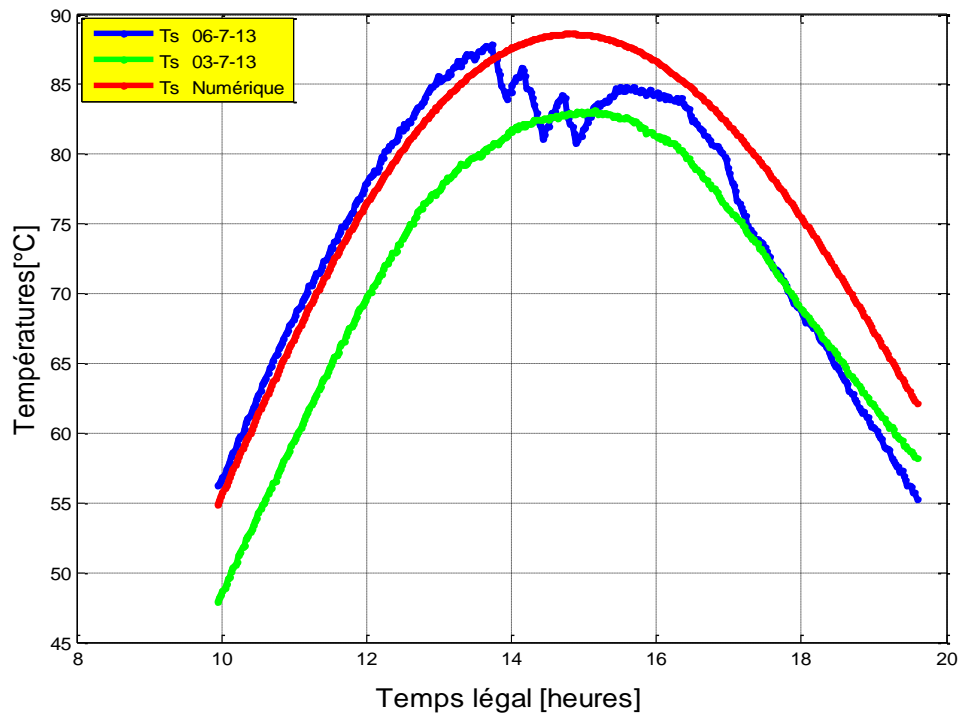
**Figure 5.27** Variations de la quantité d'eau distillée en fonction du temps Pour les journées du 2,3,4 juillet



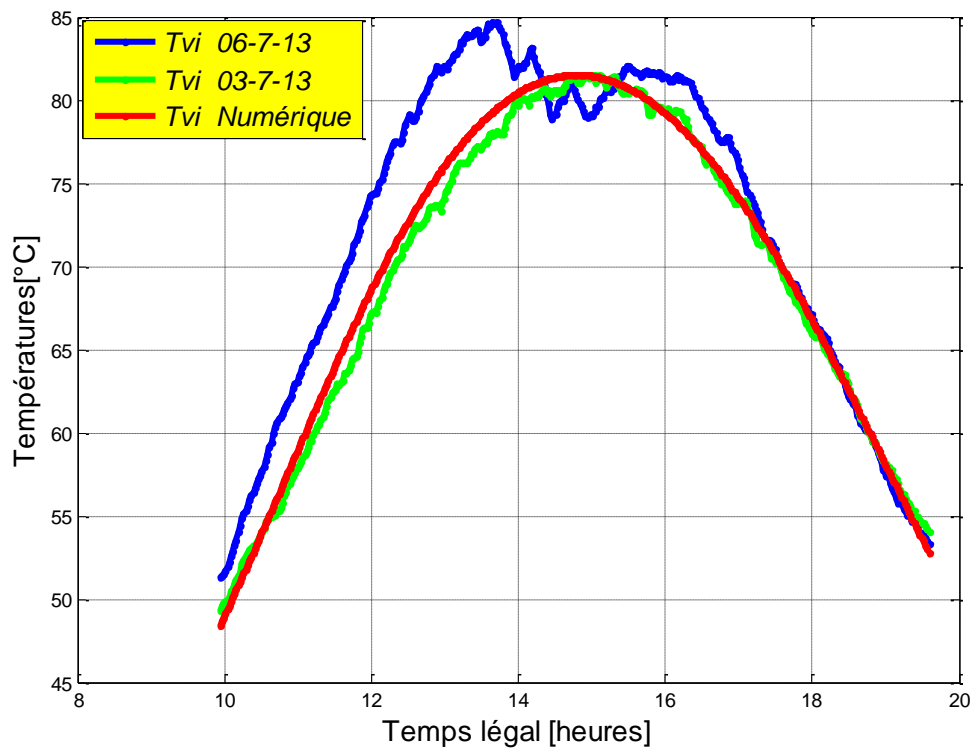
**Figure 5.28.** production nocturne pour les journées du 2,3 et 4 juillet

### V.2.2. Comparaisons entre les résultats expérimentaux et théoriques

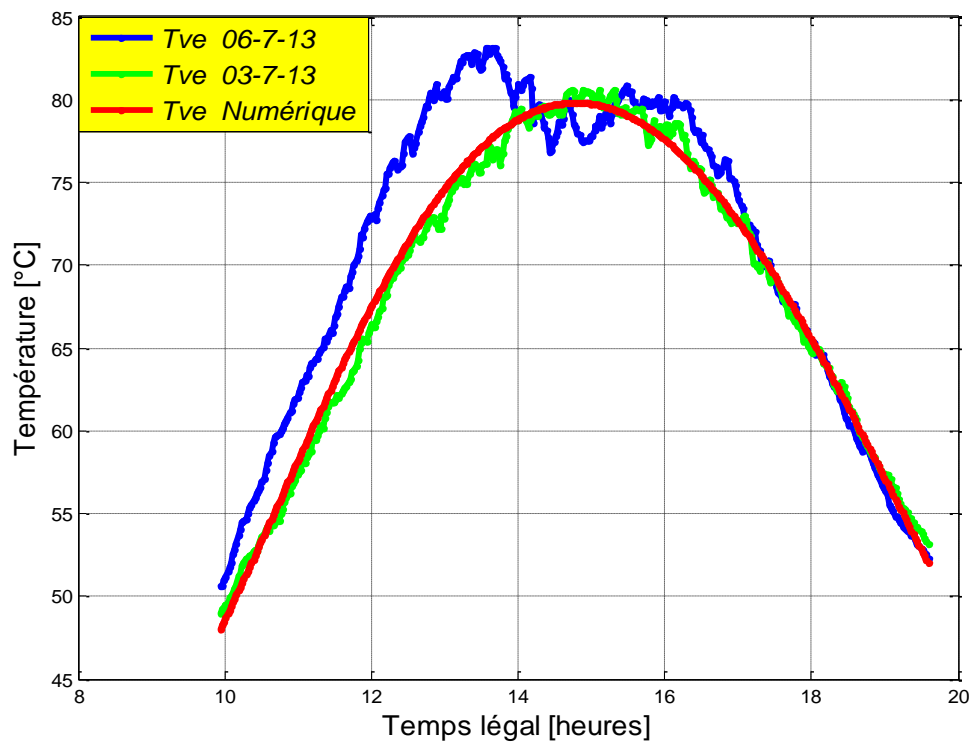
La comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux a été faite pendant la période allant de 10h :00 à 19h :48 dans laquelle on a pu constater l'allure des courbes des températures en fonction du temps et la quantité d'eau distille. A travers les résultats obtenus on a constaté une concordance entre les résultats de la simulation numérique et ceux de l'expérience. On a calculé l'erreur relative et on a trouvé que sa valeur est comprise entre [0%-9%] (voir Annexe B).



**Figure 5.29.** Comparaison entre des Températures théorique et expérimentale de la saumure pour les journées du 03 et 07 juillet.

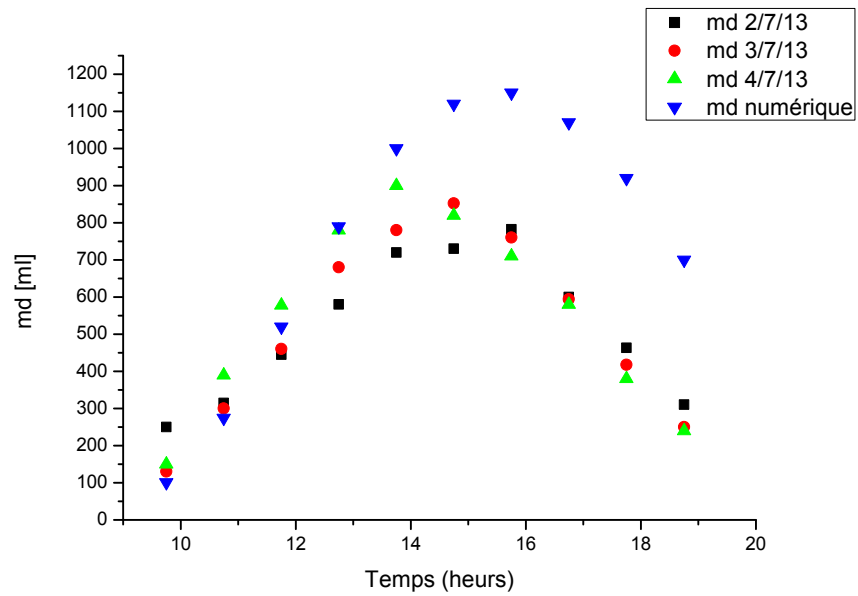


**Figure 5.30** Comparaison entre des Températures théorique et expérimentale de la face interne du vitrage pour les journées du 03 et 07 juillet.



**Figure 5.31** Comparaisons entre des températures théoriques et expérimentales de la face extérieure du vitrage pour les journées du 03 et 07 juillet.

En ce qui concerne la comparaison des résultats théoriques et expérimentaux de la production du distillat présenté ci-dessous, on observe qu'il y a un écart entre les valeurs numériques et expérimentales d'environ 0 % à 50%. Cet écart est probablement dû aux hypothèses faites au chapitre III.



**Figure 5.32:** comparaison des résultats théoriques et expérimentaux de la production du distillat pour les journées du 02 et 03 et 07 juillet.

### Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude théorique et expérimental d'un distillateur solaire plan, ce dernier est basé sur le principe de l'effet de serre. Le distillateur se compose d'un bassin recouvert d'une couche noire absorbante et d'une couverture transparente en verre ordinaire ou parfois en plastique mis en pente. L'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'eau qui s'évapore. Cette capacité d'évaporation grandit au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau. La vapeur d'eau ainsi obtenue se condense sous le vitrage. Les gouttelettes d'eau s'écoulent vers la partie inférieure du vitrage dans une gouttière conduisant à un réservoir de stockage de récupération du distillat. Après avoir introduit des notions sur l'irradiation solaire et le gisement solaire. Ensuite nous avons établi les échanges thermiques au niveau de chaque partie du distillateur et le système d'équations résultant a été résolu par la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG d'ordre 4.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement du distillateur :

- ✓ La masse d'évaporation suit l'évolution du rayonnement solaire
- ✓ La production augmente lorsque l'écart de température entre la nappe d'eau et la surface intérieure de la vitre augmente.
- ✓ 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.
- ✓ Une diminution et un déphasage pour atteindre le max, sur l'écart de température entre la vitre et l'ambient sont illustrés.
- ✓ L'augmentation de l'épaisseur de la nappe d'eau provoque la décroissance de la production d'eau distillée.
- ✓ La vitesse du vent au-delà de 3.5 m/s n'a pas une très grande influence sur la production d'eau distillée
- ✓ D'après les calculs de rentabilités, le prix du distillateur s'amortie dès sa première année.
- ✓ A travers les résultats obtenus, on a constaté une concordance entre les résultats de la simulation numérique et ceux de l'expérience. Les faibles écarts des températures sont dus probablement d'une part à la précision de la mesure et d'autre part aux hypothèses utilisées dans la simulation numérique.



## CONCLUSION GENERALE

---

- ✓ Entre autre un volume de 18 litres de distillat de très bonne qualité a pu être récupéré en fin des trois journées (du 02,03et 04 juillet).

La distillation solaire représente un sujet tout à fait d'actualité est peut constituer une solution adéquate pour répondre aux besoins en eau potable pour les régions isolées et ou éloignées, où l'énergie solaire est généralement largement disponible.

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 le conception du prototype.
- L'introduction d'un système de refroidissement autonome pouvant refroidir le vitrage périodiquement.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] [www.mre.gov.dz/eau/ress\\_non\\_convent.htm](http://www.mre.gov.dz/eau/ress_non_convent.htm).
- [2] **BECHKI. D.** Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes . Thèse de doctorat université hadj Lakhdar Batna 2011
- [3] **JEAN-FRANÇOIS .T.** Etude du potentiel des systèmes hybrides de pompage solaire. Thèse de M.Sc.A. en Génie Civil, présentée à l'Université d'Ottawa, Canada, 1995.
- [4] Degremont. Mémento Technique de l'eau, Tome 1, 9<sup>eme</sup> édition, Rueil-Malmaison, 1989.
- [5] **BOUCHEKIMA. B.** Recherche des conditions optimales pour le dessalement des eaux saumâtres à l'aide du distillateur à film capillaire. Thèse de doctorat d'état USTHB, Alger 2001.
- [6] **ALAIN. M.** Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnelles d'approvisionnement en eau douce". Edition : Technique et Documentation, Paris.2001.
- [7] **LAKHDAR. Z.** L'eau pénurie ou incurie. Edition : Office des Publications Universitaires, Alger 2007.
- [8] **SALIM .K.** Rétrospective et perspective du dessalement en Algérie. Desalination, 204 (2007), pp. 403-415.
- [9] **KETTAB. A.** Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision. Desalination, 136 (2001), pp. 25-33.
- [10] **BOUZIDI. B.** L'Energie Solaire et les Régions Sahariennes Exemple de la Région d'Adrar , Revue des Energies Renouvelable CDER Adrar (1999).
- [11] **BUROS. O.K.** The ABCs of Desalting". Saline Water Conversion Corporation 2003-Second edition. <http://www.idadesal.org/pdf/ABCs1.pdf>.
- [12] **MALIK. M.A.S., TIWARI. G. N., KUMAR. A., et SODHA M. S.** Solar Distillation Oxford. UK. Pergamon Press. 1982..

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [13] **BEAUSEJOUR. J.** Conception d'un distillateur solaire pour le traitement des effluents d'une tannerie Mexicaine. Thèse de M. Sc. A de Génie Civil. Université de Montréal, Canada, 2003
- [14] **DUNKLE. R.V.** Solar water distillation, the roof type still and multiple effect diffusion still, Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization, Victoria, Australia, (1961), pp. 895-902.
- [15] **LOF. G. O. G., EIBLING. J. A., ET BLOEMER. J.W.** Energy balance distillers .Vol. 7, N° 4, A. I. Ch. E. Journal (1961), pp. 641-649
- [16].[http://www.inrp.fr/lamap/?Page\\_Id=16&Action=2&Element\\_Id=380&DomainScienceType\\_Id=7](http://www.inrp.fr/lamap/?Page_Id=16&Action=2&Element_Id=380&DomainScienceType_Id=7))
- [17] **COOPER. P.I.**, The absorption of radiation in solar stills, Solar energy. Vol.12 (1969) pp.333-346.
- [18] **TIRIS.Ç.,TIRIS. M. et TURE. I.E.**(1996) :Improvement of basin type solar still performance :Use of various Absorber Materials and Solar collector Integration,proceeding WREC,p.758-761 .
- [19] **RAJVANSHI.A.K.**(1981) :Effect of Various Dyes on Solar Distillation,Solar Energy,vol.27,n°1,p.299-306.
- [20] **GHONEYEM.A. et ILERIA.**(1997)Software to analyse solar stills and an experimental study an the effects of the cover,Desalination,vol.114,n°1,p.37-44.
- [21] **AL-HUSSAINI.H. et SMITH.I.K.**(1995)Enhancing of solar still productivity using vacuum technology,energy conversion and Management,vol. 36,n°11,p.1047-1052.
- [22] **TLEIMAT.B.W. et HOWE.E.D.** (1965) Nocturnal Production of solar Distillers, Solar Energy,vol.10,n°2p.61-66.et ils ont obtenu un rendement de 50% supérieur.
- [23] **KWATRA. H.S.** Performance of a solar still: Predict effect of enhanced evaporation area on yield and evaporation temperature, Solar Energy (1996), Vol. 56, No 3, pp.261-266.
- [24] **KIATSIRIOAT.T.,BHATTACHARYA.S.C.et WIBULSWAS.P.**(1987) :Transient simulation of vertical solar still,Energy conversion and Management,vol.27,n°2,p.247,6p.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [25] **Abu-Arabie.M., Zurigat.Y, Al-Hinai.H et Al-Hiddabi . S.**Modelling and Performance Analysis of a Solar Unit With Double-Glass Cover Cooling, Desalination, 143,173-182, 2002.
- [26] **KHELIF. C. ET TOUATI.B.** Station d'expérimentation des équipements solaires en milieu saharien, Adrar, Algérie, 1998.
- [27] **BOUKAR.C.,HARMIM.A ET AMAR.M .** construction et expérimentation d'un distillateur solaire vertical indirect à simple effet , Revue des Energies Renouvelable ICRESD-07 Tlemcen 2007
- [28] **FEDALI. S.ET BOUGRIOU. C.**Etudes Théorique et Expérimentale d'un Distillateur solaire sous les conditions climatiques de BATNA ,SIGCLE 2010
- [29] **IQBAL.M.**An Introduction to Solar Radiation,Tome 1 1983,by Academic press Canada.
- [30] **PERRIN DE BRICHAMBAUT.CH. ,VAUGE. CH.**le gisement solaire évaluation de la ressource énergétique. Edit Technique et Documentation, Paris, France 1981.
- [31] **j.Duffie,W.A.Bebekman.**Solar Engineering of Thermal Process PP11-101,ed.jonn Wiley&Sons USA 1991..
- [32] ]: **Moungar.H.** modélisation et experimentation d'un distillateur solaire couplé a un condenseur . Thèse de magistère université Abou\_bekr BelkaId-Tlemcen 2012.
- [33] **Bellel. N.** Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur; thèse de magistère, Université de Constantine. (1989).
- [34] **SAADAOUI. W.** Modèle dynamique de prédiction des paramètres climatiques, mastère Spécialisé en Instrumentation et Communication 2006, Faculté des sciences de Sfax.
- [35] **Jannot. Y.** Thermique solaire. 2007.
- [36] Atlas d'Algérie énergie solaire
- [37] **BERNARD R., MENGUY G., et SCHWARTZ M.** Le rayonnement solaire, Conversion thermique et applications . Technique et documentation; 2ième Edition (1980).
- [38] **SFEIR A.A., GUARRACINO G.** Ingénierie des systèmes solaires. Application à l'habitat . Technique et documentation. Paris-(1981).

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [39] **KHEDIM A.**, Mesure et Caractérisation Thermodynamique d'un Nouveau Système Solaire de Dessalement de l'Eau de Mer avec Récupération de Chaleur. Rev. Energ. Ren. 11èmes Journées Internationales de Thermique, (2003)
- [40] **Zayouti.E; Bouirden.L;Aharoune.A et Banouni.M.** Distillation Solaire: Amélioration de la Condensation de la Vapeur d'Eau dans les Distillateurs Solaires, International Forum on Renewable Energies, FIER, Tétouan-Maroc, Université Ibn Zohr, BP 28/S, Agadir, Maroc, 2002.
- [41] **Bernard.R., Menguy.G., Schwartz.M.,** Le Rayonnement Solaire Conversion Thermique et Applications, Technique et Documentation, Paris, 256 p, 1979.
- [42] **Golestench.F.** Thermal performance of a low thermal inertia solar still. Thesis Master of Sciences. University of Texas El Paso. 1980
- [43] **Cooper. P.I.** The maximum efficiency of single-effect solar stills. Solar energy. Vol. 15. (1973). pp.205-217. Pergamon Press.
- [44] **Holman. J.P.** HEAT TRANSFER, 8<sup>th</sup> EDITION, INTERNATIONAL EDITION, 1997. solaire. Thèse de M.Sc.A de Génie Mécanique. Université de Sherbrooke, Canada, 2003.
- [45] **Chaker. A et Menguy. G.** Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique. Rev. Energy. (2001) 53-58, p: 53, 85
- [46] **G.N. Tiwari A. Minocha, P.B. Sharma and M. Emran Khan.** Simulation of convective mass transfer in a solar distillation process. Energy convers. Mgnt. Vol 38.No. 8. (1997). pp 761-770.
- [47] **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.
- [48] **Hamouche. R.**, ATLAS VENT DE L'ALGERIE, Office National de la Météorologie, Dar-El-Beida, Alger(1990).]
- [49] **N'DOYE. B.** Modélisation informatique des distillateurs solaires à effet de serre. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Perpignan.1979.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [50] **Yadav. Y.P et Rasad. A.S.P.** Performance analysis of a high temperature solar distillation system. Energy convers. Mgnt. Vol. 36. No. 5. (1995). pp 365-374.
- [51] **Chaibi. M.T.** Analysis by simulation of a solar still integrated in a greenhouse roof. Desalination 128. (2000). pp. 123-138.
- [52] **Toure.S et Meukam.p.** A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan. Renewable Energy. Vol. 11. No. 3. (1997). pp.319-330.
- [53] **Takeo S. Saitoh et Hamdy H. El. Chetay.** A pilot solar water disinfecting system performance analysis and testing. Solar energy. Vol. 72. No.3. (2002). pp. 261-269.
- [54] **Morse. R.N.** W.R.W. Read. Rational basis for engineering development of a solar still. Solar energy. Vol. 12. Pergamon (1968).pp. 5-17.
- [55] **Hafi. H.** Distillation solaire par serre agricole. Mémoire de Magister. Université de Constantine Institut de Génie Civil, 1994.
- [56] **Armando C. Oliveira, Clito F. Afonso, Saffa B. Riffat, Prince S. Doherty.** Thermal performance of a novel air conditioning system using a liquid desiccant Article Applied Thermal Engineering (2000), Volume 20, Issue 13, 1 pp 1213-1223

## RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS

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

En fin de compte, ces équations se résolvent sous MATLAB par le sous-programme ODE23s qui est basé sur la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG, du 4<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 données 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 :

$$K_1 = hf(t_j, y_j)$$

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

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

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

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

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

## ERREURS RELATIVES

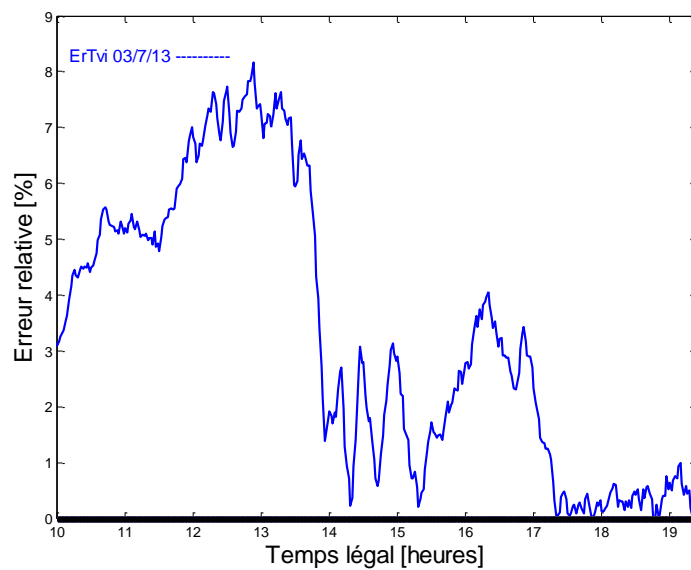


Figure A.1: Erreur relative de la vitre intérieure pour la journée du 3 juillet.

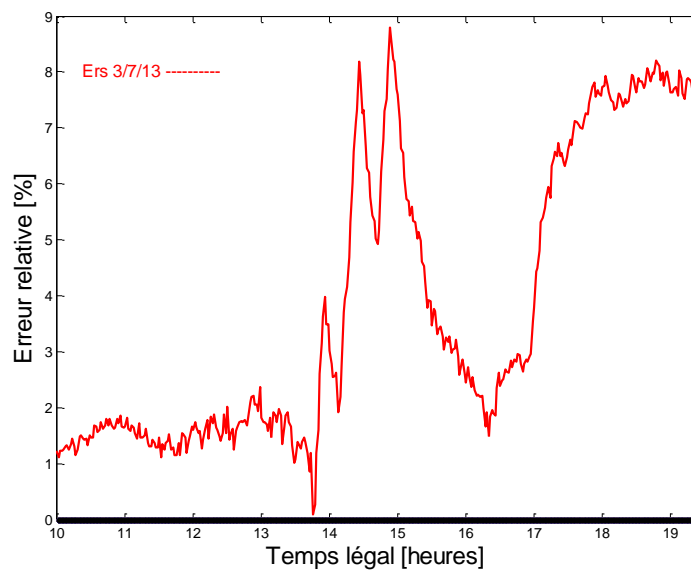


Figure A.2: Erreur relative de la saumure pour la journée du 3 juillet.



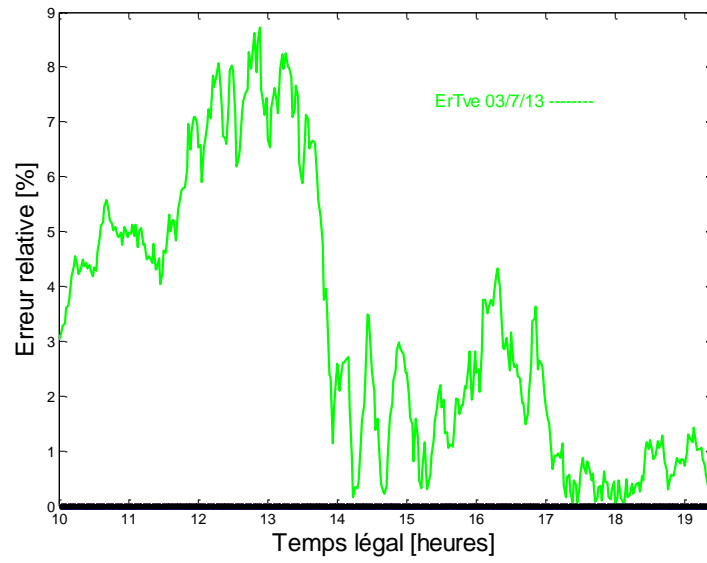


Figure A. 3: Erreur relative de la vitre extérieure pour la journée du 3 juillet.

## Paramètres de la qualité d'eau avant distillation (ANRH/ ADRAR).

PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	RESULTATS	MINERALISATION GLOBALE	RESULTATS
PH	<b>7,26</b>	Calcium Ca <sup>++</sup> mg/l	<b>217</b>
Conductivité ms/cm	<b>6,26</b>	Magnes. Mg <sup>++</sup> mg/l	<b>630</b>
Turbidité eau brute NTU	<b>0,00</b>	Sodium Na <sup>+</sup> mg/l	<b>11</b>
Turbidité eau déc. NTU	<b>0,00</b>	Potass. k <sup>+</sup> mg/l	<b>960</b>
Résidu sec à 110° C mg/l	<b>3900,00</b>	Chlorure Cl <sup>-</sup> mg/l	<b>1500</b>
Température °C	-	Sulfate SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> mg/l	<b>102</b>
PARAMETRES DE POLLUTION	<b>RESULTATS</b>	Bicarbon. HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	<b>137</b>
Oxygène Dissous mg/l	-	Carbonate CO <sub>3</sub> <sup>--</sup> mg/l	<b>0</b>
Ammonium NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	-	Silice SiO <sub>2</sub> mg/l	<b>11</b>
Nitrite NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> mg/l	-	TH ° F	<b>174</b>
Nitrate NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	<b>21,00</b>	TAC ° F	<b>13</b>
O.phosphate PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> mg/l	-	TA ° F	<b>0</b>
Mat. Ox.(mil. Ac.) mg/l O <sub>2</sub>	<b>1,1</b>	Minéralisation mg/l	<b>3581</b>
Fer en mg/l	-	Total des ions mg/l	<b>3668</b>
		Manganèse en mg/l	-

Paramètres de la qualité d'eau après distillation (ANRH/ADRAR).

PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES		RESULTATS	MINERALISATION GLOBALE		RESULTATS
PH		<b>5,95</b>	Calcium Ca <sup>++</sup>	mg/l	4
Conductivité	ms/cm	<b>0,05</b>	Magnés. Mg <sup>++</sup>	mg/l	3
Turbidité eau brute	NTU	<b>0,00</b>	Sodium Na <sup>+</sup>	mg/l	7
Turbidité eau déc.	NTU	<b>0,17</b>	Potass. k <sup>+</sup>	mg/l	0
Residu sec à 110° C	mg/l	-	Chlorure Cl <sup>-</sup>	mg/l	0
Température	°C	-	Sulfate SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	mg/l	0
<b>PARAMETRES DE POLLUTION</b>		<b>RESULTATS</b>	Bicarbon. HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	6
Oxygène Dissous	mg/l		Carbonate CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	mg/l	0
Ammonium NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	-	Silice SiO <sub>2</sub>	mg/l	-
Nitrite NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/l	-	TH	° F	2
Nitrate NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	<b>1,00</b>	TAC	° F	1
O.phosphate PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	mg/l	-	TA	° F	0
Mat. Ox.(mil. Ac.)	mg/l O <sub>2</sub>	-	Minéralisation	mg/l	29
Fer	en mg/l	-	Total des ions	mg/l	21
			Manganèse	en mg/l	-

## ملخص :

التقطير الشمسي يعد من الطرق التي ستسمح لنا بتمويل القرى أو المدن الصغيرة ذات الاستهلاك المحدود والتي تعاني من ندرة في المياه. غير أن مردود هذه العملية يبقى محدود. و عليه في إطار عملنا هذا نعمل على تحسين المردود من خلال دراسة مقطر عادي. وحيث أنه يوجد عدد من المقطرات وقع اختيارنا على المقطر الشمسي الذي له مردود متواضع مقارنة بمردود المقطرات الأخرى و ضياع حراري أقل. لقد قمنا بحساب الميزان الحراري للتركيبية المكونة من مقطر، لاقط، مسخنة مائية، و حساب درجات الحرارة على مستوى كل جزء. مجموعة المعادلات التي يخضع لها عمل هذه التركيبية تم حلها باستعمال طريقة عددية رونج كيتا-فيلبرق وتمت مقارنة هذه النتائج مع النتائج التجريبية التي قمنا بانجازها بوحدة البحث في الطاقات المتجددة بادرار. **URERMS**

النتائج المحصل عليها بينت بوضوح تأثير عدد من المقادير منها: الإشعاع الكلي، درجة حرارة المحيط، سرعة الرياح، درجة حرارة الماء، و حجمه على مواصفات الاشتغال ( المردود، الفعالية الإجمالية و الداخلية ). النتائج المحصل عليها تبين بوضوح تقارب بين النظري والتطبيقي

**الكلمات الدالة:** تقطير شمسي، لاقط، المردود، 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 present work is to study the parameters affecting the performance of a simple solar still, in order to have a higher output and lower heat losses.

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 URERMS ADRAR. 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. The results obtained show clearly that the theoretical performances of the solar still have a good agreement with the experimental results.

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

## Résumé :

La distillation solaire est une perspective qui s'avère prometteuse du fait qu'elle permet de fournir de l'eau potable dans les villages et les petites villes, avec une faible consommation. Néanmoins l'efficacité de ce système reste extrêmement limitée.

Ce présent travail consiste à étudier les paramètres influant sur le rendement d'un distillateur solaire simple, dans le but d'avoir une production plus élevée et avec des pertes thermiques 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'URER/MS/ADRAR.

L'influence de plusieurs paramètres, en particulier l'irradiation, la température du vitrage, la vitesse du vent, la température et la profondeur de l'eau, sur les paramètres de fonctionnement est également analysée. Les résultats obtenus montrent clairement que les résultats théoriques sont proche de celle de l'expérimentale.

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