

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE  
FACULTE DES SCIENCES EXACTES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° d'ordre .....

N° de Série .....

**MEMOIRE**

**PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MAGISTER EN PHYSIQUE**

**SPECIALITE : PHYSIQUE ENERGETIQUE**

**OPTION : PHOTOTHERMIQUE**

**THEME**

**ETUDE THEORIQUE ET NUMERIQUE DES SYSTEMES  
COUPLES : DISTILLATEUR PLAN-CAPTEUR ET  
DISTILLATEUR HOT BOX-CAPTEUR**

**Par**

**Salima KARROUTE**

Soutenu le .../.../2009

**Devant le jury:**

<b>Président :</b>	<b>N. BELLEL</b>	<b>M.C</b>	<b>Univ. Mentouri</b>	<b>Constantine</b>
<b>Rapporteur :</b>	<b>A. CHAKER</b>	<b>Prof</b>	<b>Univ. Mentouri</b>	<b>Constantine</b>
<b>Examineurs :</b>	<b>M.S. AIDA</b>	<b>Prof</b>	<b>Univ. Mentouri</b>	<b>Constantine</b>
	<b>A. ZAATRI</b>	<b>Prof</b>	<b>Univ. Mentouri</b>	<b>Constantine</b>
	<b>M. DJEZZAR</b>	<b>M.C</b>	<b>Univ. Mentouri</b>	<b>Constantine</b>

## **Remerciements**

*Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant pour m'avoir accordé la puissance et la volonté de terminer ce travail.*

*Le travail qui fait l'objet de ce mémoire a été réalisé au laboratoire de Physique Energétique de l'université de Constantine, sous la direction de  
Madame*

*A.Chaker professeur au département de physique.*

*Je tiens à la remercier pour le sujet de recherche qu'elle m'a proposée, et lui exprimer ma profonde reconnaissance pour toute son aide scientifique, sa disponibilité, ses conseils, sa gentillesse et surtout l'intérêt qu'elle a porté à mon travail et l'attention toute particulière accordée à la lecture et à la correction de ce mémoire.*

*Je remercie également Monsieur N. Bellel, Maître de conférence à l'université de Constantine, pour avoir accepté de présider le jury.*

*Je tiens également à exprimer mes remerciements à Monsieur M.S Aïda, Professeur, Monsieur A. Zaatri, Professeur et Monsieur M. Djeddar, Maître de conférence, de m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.*

*Mes remerciements les plus vifs vont aux membres du Laboratoire de Physique Energétique en particulier à Z. Haddad, N. Boukerzaza, N. Sotehi, O. Sotehi pour tout leur aide scientifique et sans oublier ma sœur et ma meilleure amie S. Karout.*

---

---

# *Sommaire*

---

---

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>Chapitre I- L'IRRADIATION SOLAIRE</b>	
I.1- CARACTERISTIQUES DU SOLEIL.....	3
I.2- CARACTERISTIQUES DE LA TEERE.....	4
I.2.1- L'atmosphère terrestre.....	4
I.3- MOUVEMENT DE LA TEERE .....	4
I.4- PARAMETRES DE POSITION.....	5
I.4.1- Coordonnées géographiques terrestres.....	5
I.4.2- Coordonnées horaires.....	6
I.4.3- Coordonnées horizontales.....	7
I.5- LE TEMPS SOLAIRE.....	7
I.5.1- Temps solaire vrai.....	8
I.5.2- Durée de jour.....	8
I.5.3- Équation de temps.....	8
I.5.4- Temps solaire moyen.....	8
I.5.5- Temps universel.....	8
I.5.6- Temps légal.....	9
I.6- LE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	9
I.7- LE SPECTRE DE LA RADIATION SOLAIRE.....	9
I.8- RAYONNEMENT SOLAIRE HORS ATMOSPHERE.....	10
I.8.1- La constante solaire.....	11
I.9- DIRECTION DES RAYONS SOLAIRES PAR RAPPORT À UN PLAN.....	11
I.10- ATTÉNUATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE.....	12
I.11- L'IRRADIATION OU RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL.....	12
I.11.1- Le rayonnement direct.....	12
I.11.2- Le rayonnement diffus.....	13
I.11.3- Le rayonnement global.....	13
I.12- L'ALBÉDO.....	13
I.13- MESURE ET CALCUL DES RAYONNEMENTS SOLAIRES.....	13
I.13.1- La mesure directe.....	14

I.13.2- Le calcul analytique.....	14
I.14- TAUX D'ENSOLEILLEMENT.....	15
<b>Chapitre II- LES DISTILLATEURS</b>	
II.1- LE PROBLEME DE L'EAU.....	16
II.2- LE DESSALAMENT DE L'EAU DE MER.....	16
II.3- LES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT DES EAUX.....	16
II.3.1- Les procédés utilisant des membranes.....	16
II.3.2- Les procédés thermiques.....	18
II.4- LES DISTILLATEURS SOLAIRES.....	24
II.4.1- Composants d'un distillateur solaire.....	24
II.4.2- Distillation solaire direct à effet de serre.....	25
II.4.3- Les types de distillateurs solaires.....	25
II.4.4- Distillateur solaire associé à d'autres dispositifs.....	31
II.4.5- Caractéristiques de fonctionnement du distillateur.....	34
II.4.6- Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur solaire.....	36
<b>Chapitre III- LES CAPTEURS</b>	
III.1- LES CAPTEUR SOLAIRES.....	37
III.2- FABRICATION D'UN CAPTEUR SOLAIRE.....	37
III.2.1- Une couverture transparente.....	38
III.2.2- L'absorbeur.....	39
III.2.3- Le fluide caloporteur.....	39
III.2.4- Un isolant thermique.....	40
III.3- PRINCIPAUX TYPES DE CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES.....	41
III.3.1- Le capteur plan.....	41
III.3.2- Le capteur à air.....	42
III.3.3- L'étang solaire.....	42
III.3.4- Le capteur à tube sous vide.....	42
III.3.5- Le capteur cylindro-parabolique.....	43
III.3.6- Le capteur paraboloïde.....	44
III.3.7- Le capteur CPC.....	44
III.3.8- Le capteurs non vitrés.....	45
III.3.9- Le capteur moquette.....	45
III.4- PRINCIPAUX SYSTEMES DE CHAUFFE-EAU SOLAIRES.....	46
III.4.1- Le thermosiphon.....	46

III.4.2- Installation d'un circuit forcé.....	46
III.5- PRINCIPAUX PARAMETRES CARACTERISANT UN CAPTEUR.....	47
III.5.1- Le rendement.....	47
III.5.2- Superficie.....	47
III.5.3- Stagnation.....	47
III.5.4- Orientation et inclinaison des capteurs solaires.....	47
<b>Chapitre IV- LE SYSTEME COUPLE DISTILLATEUR-CAPTEUR</b>	
IV.1- LE SYSTEME COUPLE DISTILLATEUR PLAN-CAPTEUR.....	48
IV.1.1- Description du système couplé distillateur plan-capteur.....	48
IV.1.2- Bilan thermique du système distillateur plan-capteur.....	49
IV.2- LE SYSTEME COUPLE DISTILLATEUR HOT BOX-CAPTEUR.....	64
IV.2.1- Description du système couplé distillateur hot box-capteur.....	64
IV.2.2- Bilan thermique du système distillateur hot box-capteur.....	65
IV.3- RESOLUTION NUMERIQUE.....	69
IV.3.1- Pour le distillateur plan.....	69
IV.3.2- Pour le capteur.....	70
IV.3.3- Pour le hot box.....	70
IV.4- TRAITEMENT INFORMATIQUE.....	71
IV.4.1- Le distillateur.....	71
IV.4.2- Le capteur.....	73
IV.5- ORGANIGRAMME.....	75
IV.5.1- Le distillateur plan.....	75
IV.5.2- Le distillateur hot box.....	77
IV.5.2- Le capteur.....	79
<b>Chapitre V- RESULTATS ET DISCUSSIONS</b>	
V.1- VARIATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE.....	81
V.1.1- Variation du rayonnement solaire global, direct et diffus.....	81
V.1.2- Variation du flux solaire moyen suivant le trouble atmosphérique.....	82
V.2- CARACTERISATION THERMIQUE DES DISTILLATEURS.....	83
V.2.1- Le distillateur plan sans et avec préchauffage.....	83
V.2.2- Le distillateur hot box sans et avec préchauffage.....	95
V.2.3- Comparaison entre les quatre installations.....	100
<b>CONCLUSION</b> .....	103
<b>ANNEXE A</b>	

---



---

# *Nomenclature*

---



---

<u>Notations</u>	<u>Unités</u>
A : Surface du bac	$m^2$
$A_v$ : Surface de la vitre du distillateur	$m^2$
$A_{vc}$ : Surface de la vitre du capteur	$m^2$
$C_{p_i}$ : Chaleur massique à pression constante du Corps d'indice i	$J/kg.k$
$e_i$ : Epaisseur du corps d'indice i	$m$
$h_{ca}$ : Coefficient de convection externe	$w/m^2.k$
G : Le rayonnement solaire	$w/m^2$
$L_v$ : Chaleur latente de vaporisation	$Joule/kg$
$m_d$ : Débit du distillat	$kg/s$
$m_{cir}$ : Débit du fluide caloporteur	$kg/s$
$P_i$ : Pression à la température $T_i$	$Pa$
$Q_e$ : Flux de chaleur échangé par évaporation	$w$
$T_i$ : Température de la face d'indice i	$k$
V : La vitesse du vent	$m/s$

## Lettres grecques

$\lambda_i$ : Coefficient de conduction à travers la surface i	$w/m.k$
$\alpha$ : Coefficient d'absorption	$w/m.k$
$\tau$ : Coefficient de transmission	$w/m.k$
$\varepsilon$ : Emissivité	$w/m.k$

$\omega$	:	Angle horaire	degré
$\delta$	:	Angle de déclinaison	degré
$\eta$	:	Efficacité	%
$\mu$	:	Viscosité dynamique	kg/m.s
$\nu$	:	Viscosité cinématique	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	:	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>

### **Indice**

a	:	Air ambient
ab	:	Absorbeur
b	:	Bac
bis	:	Absorbeur- isolant
c	:	Ciel
ca	:	Convection à l'extérieur
cap	:	Capteur
cbf	:	Convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur
cd	:	Conduction
ev	:	Evaporation
f	:	Fluide caloporteur
g	:	Global
ie	:	Isolant extérieur
ii	:	Isolant intérieur
is	:	Isolant
r	:	Rayonnement
r12	:	Rayonnement entre la vitre1 et la vitre 2

v : Vitre  
v1 : Vitre orientée vers l'est  
v2 : Vitre orientée vers l'ouest  
w : Eau

---

---

# *Introduction*

---

---

L'eau est source de vie, c'est un élément indispensable à la survie des êtres vivants, malheureusement certaines régions de notre planète sont menacées par de graves pénuries d'eau. Le manque d'eau ne concerne pas seulement les régions confrontées à la sécheresse ou à une démographie galopante. Il touche également une grande partie du monde industrialisé, où les exigences de confort plus élevées et les importantes quantités d'eau consommées par les industries à grande échelle appauvrissent les réserves aquatiques naturelles. Cette pénurie est aggravée par la pollution due aux déchets toxiques et à l'utilisation abusive de fumier et de fertilisants.

Face à ce problème crucial, le dessalement des eaux salées et/ou des eaux saumâtres apparaît comme l'une des solutions possibles à la survie de l'humanité. Parmi les techniques utilisées dans ce domaine, et pour des besoins relativement faibles d'eau potable, la distillation solaire peut être une solution très intéressante surtout pour les zones arides et désertiques.

La rareté de l'eau potable n'est pas le seul défi de notre siècle, le changement climatique, l'épuisement des ressources en énergies fossiles et plus généralement la pollution du milieu naturel, privilégient l'utilisation de l'énergie solaire, cette dernière offrant l'avantage d'être inépuisable, gratuite et respectueuse de la santé et de l'environnement.

L'objectif de ce travail est l'étude théorique et numérique de l'effet de couplage d'un distillateur solaire avec un capteur plan sur la production d'eau potable, pour deux types de distillateur solaires ont été choisis, le distillateur plan et le distillateur hot box. Après avoir établi les bilans thermiques des différents systèmes (distillateur plan, distillateur plan-capteur, distillateur hot box et distillateur hot box-capteur) en régime transitoire, une approche numérique basée sur la méthode de Gauss Seidel d'itération est utilisée pour la résolution des équations qui régissent le fonctionnement de ces systèmes. Un intérêt

particulièrement est porté à l'effet de ce couplage sur les caractéristiques de fonctionnement des systèmes étudiés.

Le mémoire est organisé en cinq chapitres :

- Le premier chapitre à caractère bibliographique donne des notions de base sur l'irradiation solaire.
- Le second chapitre présente un aperçu sur les différents procédés de dessalement, avec intérêt particulier à la distillation solaire. Une recherche bibliographique concernant les différents types de distillateurs sera également exposée.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation des différents composants d'un capteur solaire, ainsi que quelques types de capteurs solaires.
- Dans le quatrième chapitre, nous exposerons l'étude théorique et numérique de deux dispositifs, les systèmes couplés, distillateur plan-capteur, et distillateur hot box-capteur. Les bilans thermiques au niveau de chaque partie de ces systèmes, l'expression explicite des différents flux intervenant dans les échanges de chaleur et la méthode numérique utilisée pour la résolution des systèmes d'équations régissant le fonctionnement des dispositifs sont largement présentés.
- L'ensemble des résultats obtenus, ainsi que leurs interprétations font l'objet du dernier chapitre.

# Chapitre I

## L'irradiation solaire

## Introduction

La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure pourrait suffire à couvrir tous les besoins énergétiques mondiaux pendant une année. En outre, grâce aux divers procédés, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine. Il est certain que l'énergie solaire doit être comme l'une des principales énergies du futur. La maîtrise de l'énergie solaire est étroitement liée à l'étude du rayonnement solaire, aussi le premier chapitre de ce mémoire portera sur la source elle-même (le soleil) puis sur le rayonnement émis par celle-ci.

### I.1- Caractéristiques du Soleil

Le soleil est une étoile qui se compose de 73,46 % d'hydrogène, de 24,85 % d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds. Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul plus de 99 % de la masse du système solaire. Sa forme est presque parfaitement sphérique, avec un aplatissement aux pôles estimé à neuf millièmes. Les principales caractéristiques du soleil sont regroupées dans le tableau I-1.

Caractéristiques		Valeur
Masse		$1,9891 \times 10^{30}$ kg
Diamètre		1 392 000 km
Masse volumique moyenne		$1\,408 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Surface		$6,09 \times 10^{12} \text{ km}^2$
Volume		$1,41 \times 10^{18} \text{ km}^3$
Magnitude absolue		4,83
Magnitude apparente		-26,8
Puissance rayonnée		$3,83 \times 10^{26}$ w
Période galactique		$2,26 \times 10^8$ années
Demi grand axe de la Terre		149 597 870 km
Vitesse		$217 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$
Gravité à la surface		$273,95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
température	au centre	15,1 MK
	à la surface	5770K

Tableau.I.1- Caractéristiques principales du soleil

## I.2- Caractéristiques de la terre

Les principales caractéristiques sont données dans le tableau I.2

Caractéristiques	Valeur
Masse	$6.10^{21}$ t
Volume	$1083320.10^6$ km <sup>3</sup>
Surface	$510101.10^3$ km <sup>2</sup>
Diamètre équatorial	12756,32 km
Diamètre polaire	12713,55 km

Tableau.I.2- Caractéristiques principales de la terre

### I.2.1- L'atmosphère terrestre

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches on distingue notamment [1] :

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère, entre 15 et 80 km d'altitude.
- L'ionosphère, entre 80 et 200 km d'altitude.

## I.3- Mouvement de la terre

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, il en résulte que la distance terre-soleil ne varie que de  $\pm 1.7\%$  par rapport à la distance moyenne qui est de  $149,597.10^6$  km (figure I.1). La position de la terre à l'équinoxe de printemps est appelée point vernal  $\gamma$ . La révolution complète de la terre autour du soleil s'effectue en une année [2], on distingue :

- **L'année tropique** est l'intervalle de temps qui sépare deux équinoxes de printemps successifs. Elle est de 365j, 5h, 48min, 46s [3].
- **L'année sidérale** est le temps mis par le soleil pour que sa longitude céleste augmente de  $360^\circ$  à partir d'un équinoxe fixe. Elle est de 365j, 6h, 9min, 10s.

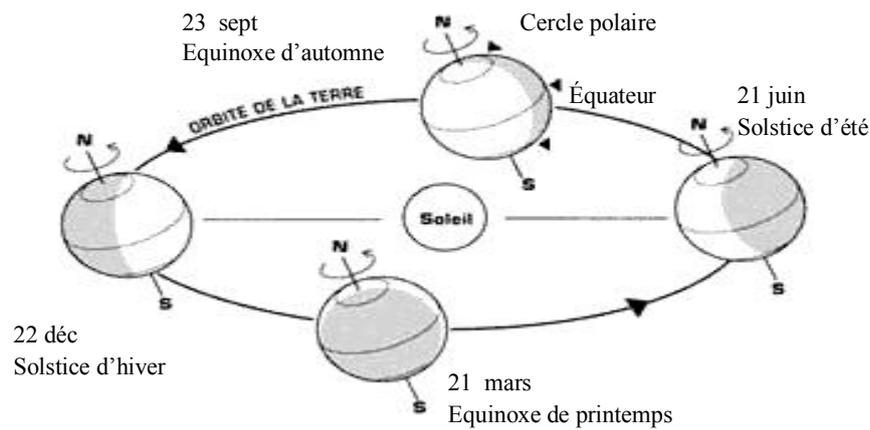


Figure I.1- Mouvement de la terre autour du soleil

#### I.4- Paramètres de position

Pour définir la position terre-soleil à un instant donné, on utilise les coordonnées suivantes [1], [3], [4] :

**I.4.1- Les coordonnées géographiques terrestres ( $\varphi$ ,  $L$ )** qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure I.2), à savoir :

- **La latitude  $\varphi$** , comptée positive dans l'hémisphère nord, et négative dans l'hémisphère sud.
- **La longitude  $L$** , positive à l'ouest, négative à l'est par rapport au méridien de Greenwich.

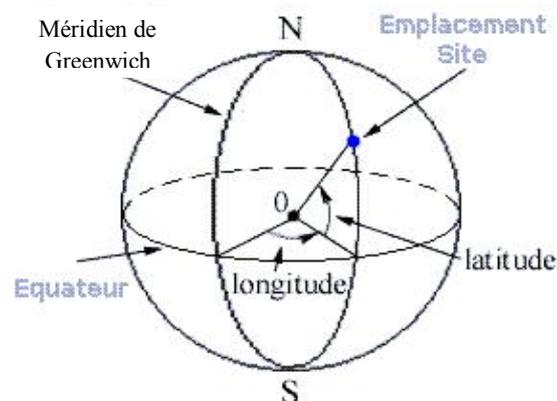


Figure I.2- Les coordonnées géographiques terrestres

### I.4.2- Les coordonnées horaires ( $\delta$ , $\omega$ , $\alpha$ )

Les coordonnées horaires sont :

- **L'angle horaire ( $\omega$ )** qui est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire du soleil avec le plan contenant le méridien céleste, il est compté positivement l'après midi.
- **La déclinaison ( $\delta$ )** est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre  $-23.45^\circ$  et  $+23.45^\circ$ . Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation:

$$\delta = 23,45 \sin [0,980 (j+284)] \quad (I.1)$$

Où j est le numéro du jour de l'année.

- **L'ascension droite ( $\alpha$ )** est l'angle qui fait le plan contenant le cercle horaire passant par le soleil et celui passant par le point vernal  $\gamma$  et contenant l'axe du monde.

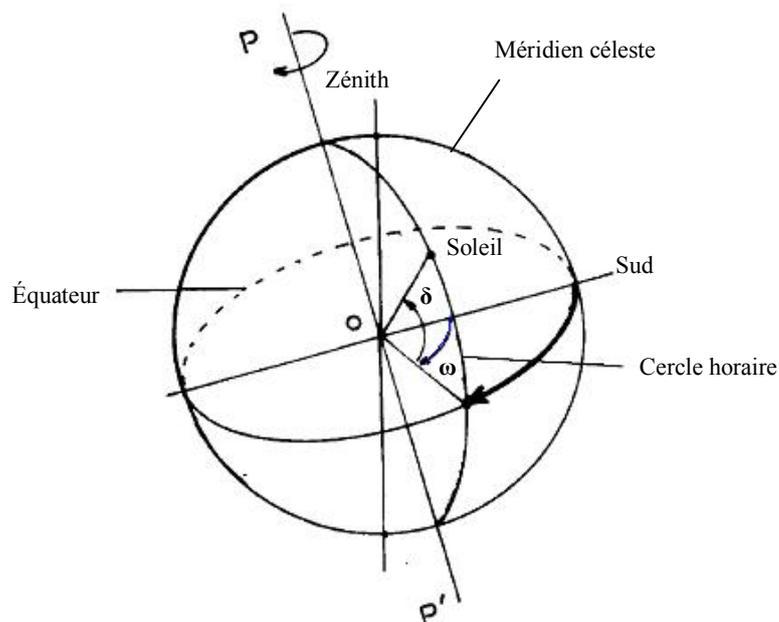


Figure I.3- Les coordonnées horaires

**I.4.3- Les coordonnées horizontales ( $h$ ,  $a$ )** déterminent la projection du soleil sur l'horizon du lieu (figure I.4), et sont définies comme suit :

- **Hauteur angulaire ( $h$ )** c'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal c'est-à-dire tangent au sol.

- **Azimut ( $a$ )** correspondant à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par le soleil;  $a$  est compté négativement vers l'est et positivement vers l'ouest.

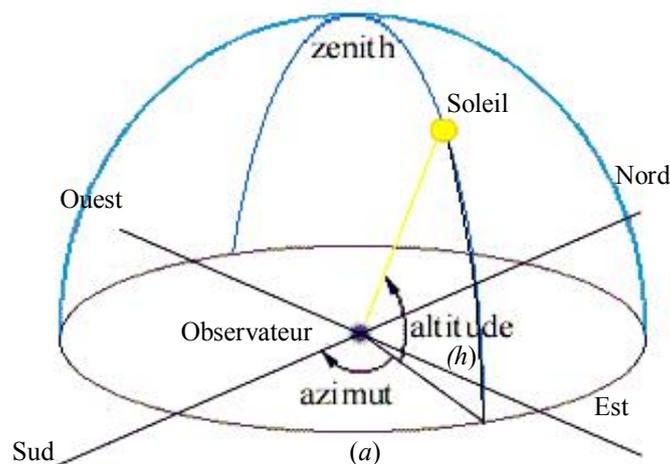


Figure I.4- Les coordonnées horizontales

On peut écrire trois expressions scalaires appelées formules de Gauss reliant entre elles les coordonnées  $a$ ,  $h$ ,  $\omega$ ,  $\delta$  pour une latitude donnée [3], [4]:

$$\cos(h) \cdot \sin(a) = \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \quad (\text{I.2})$$

$$\cos(h) \cdot \cos(a) = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{I.3})$$

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{I.4})$$

## I.5- Le temps solaire

L'énergie solaire reçue sur la terre varie selon le temps solaire vrai qui nous indique la position instantanée du soleil dans le ciel qui est reliée au temps local :

### I.5.1- Temps solaire vrai

Le soleil tourne dans le plan de l'équateur de 360° en 24 heures, soit 15° par heure, il existe ainsi une relation simple entre l'heure solaire TSV et l'angle horaire  $\omega$  [2]:

$$\omega = 15 (TSV - 12) \quad (I.5)$$

### I.5.2- Durée de jour

Le module  $\omega_l$  de l'angle horaire au lever du soleil s'obtient en écrivant  $\sin(h)=0$ . On en déduit que la durée du jour [4] est:

$$d = 24 \cdot \frac{\omega_l}{\pi} \quad (I.6)$$

La durée du jour est en heures et  $\omega_l$  en radians

### I.5.3- Equation de temps

La variation de la vitesse de la terre sur sa trajectoire autour du soleil qui introduit un terme correctif appelé équation de temps noté ET (en min) [2], est donné par la relation suivante:

$$ET = [-0,0002 + 0,4797 \cos(0,984j) - 3,2265 \cos(2 \cdot 0,984j) - 0,0903 \cos(3 \cdot 0,984j) - 7,3509 \sin(0,984j) - 9,3912 \sin(2 \cdot 0,984j) - 0,3361 \sin(3 \cdot 0,984j)] \quad (I.7)$$

**I.5.4- Temps solaire moyen** TSM varie de  $\pm 16$  min par rapport au TSV [4]:

$$TSM = TSV - ET \quad (I.8)$$

**I.5.5- Temps universel** TU est égal au TSM du méridien origine (méridien de Greenwich), on a donc [4] :

$$TU = TSM + (L/15) \quad (I.9)$$

$L$  : la longitude exprimée en degrés et les temps en heures.

**I.5.6- Temps légal TL** c'est l'heure que nous lisons aux horloges publiques :

$$TL = TU + C \quad (I.10)$$

C étant le décalage entre le méridien de Greenwich et l'état considéré (C=1 heure pour l'Algérie).

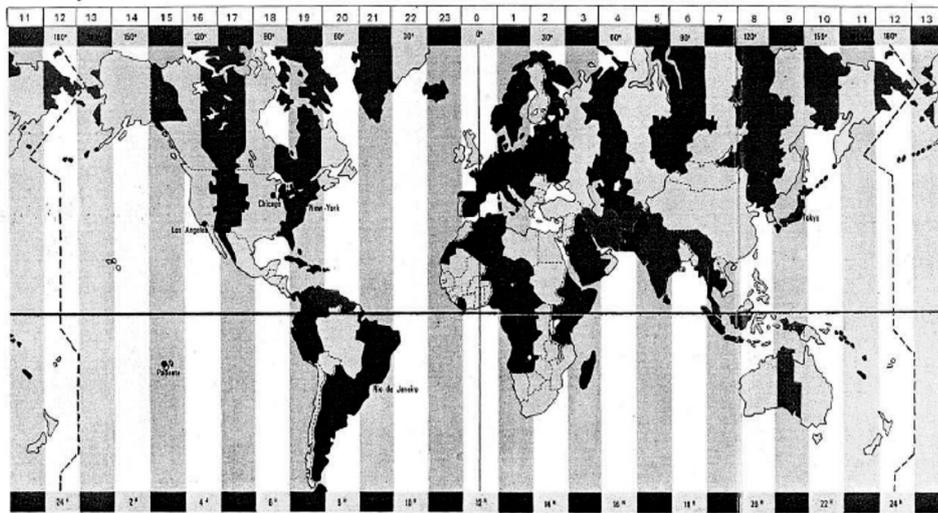


Figure.I.5- Fuseaux horaires avec le décalage horaire

## I.6- Le rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est la manifestation externe des interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et de l'ensemble des interactions secondaires qu'elles génèrent dans son enveloppe. Ce rayonnement constitue la quasi-totalité de l'énergie expulsée par le soleil [5].

## I.7- Le spectre de la radiation solaire

Le spectre de la radiation solaire peut approximativement se diviser en ultraviolet (UV), lumière visible, infrarouge (IR) et grandes longueurs d'ondes (chaleur) (tableau I.3).

Les rayons		Gamme de longueur d'onde
Rayons X		0.01 à 1Å
Ultraviolet	UV extrême	1 à 100Å
	UV éloigné	10 à 100 nm
	UV moyen	100 à 200nm
	UV proche	200 à 300nm
Rayons Gamma		300 à 400nm
Lumière visible		400 à 770nm
Infrarouge	IR proche	770 à 2500nm
	IR moyen	2,5 à 30µm
	IR éloigné	30 à 300µm
Ondes hertziennes	Micro-ondes	0,3 à 100mm
	Radio et télévision	0,1 à 1000 m

Tableau.I.3- Spectre électromagnétique

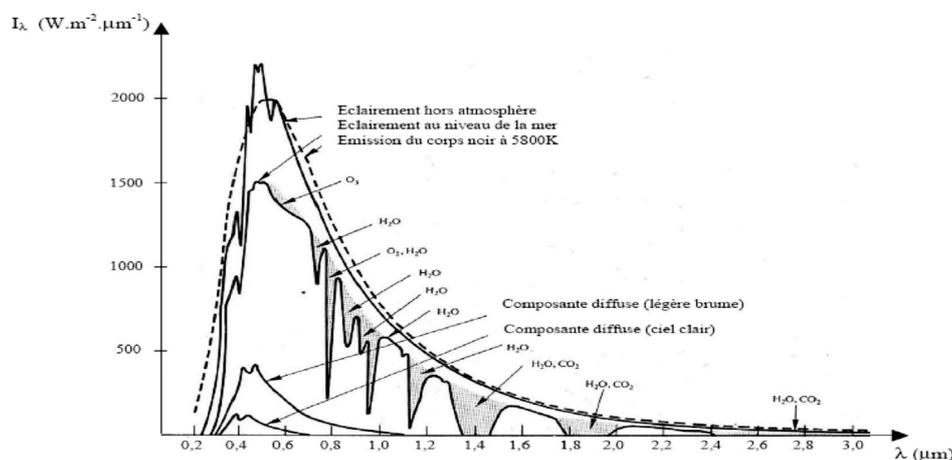


Figure.I.6- Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre.

### I.8- Rayonnement solaire hors atmosphère

Le soleil est le siège de réactions de fusion de l'hydrogène en hélium, qui libèrent une grande quantité d'énergie dispersée dans l'espace par rayonnement. La perte de masse du soleil est de l'ordre de  $4 \text{ à } 5 \cdot 10^6 \text{ t.s}^{-1}$  [3].

### I.8.1- La constante solaire $I_0$

C'est la densité de l'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est approximativement égale à 1360 (cependant elle varie de  $\pm 3\%$  dans l'année à cause des légères variations de la distance terre-soleil) [6].

On peut calculer la valeur du flux du rayonnement solaire  $I$  reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires par la relation [3] :

$$I = I_0 \cdot \exp \left[ 1 + 0,033 \cos \frac{360j}{365} \right] \quad (\text{I.11})$$

Où  $j$  est le numéro du jour de l'année.

### I.9- Direction des rayons solaires par rapport à un plan

Soit un plan quelconque sur la terre, sa position est généralement repérée par les paramètres suivants [3]:

- $\beta$ , angle entre le plan horizontal et le plan considéré

$\beta = 0$  pour le plan horizontal

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

$\beta > 0$  si le plan regarde l'équateur

- $\alpha$ , angle entre le méridien local et la normale au plan

$\alpha = 0$  vers le sud

$\alpha < 0$  vers l'est

$\alpha > 0$  vers l'ouest

Soit  $i$  l'angle entre le rayon incident et la normale au plan, le cosinus de l'angle  $i$  est donné par l'expression:

$$\cos(i) = \cos(h) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(a - \alpha) + \cos(\beta) \cdot \sin(h) \quad (\text{I.12})$$

- Pour une surface horizontale ( $\beta=0$ ) :

$$\cos(i) = \sin(h) \quad (\text{I.13})$$

- Pour une surface verticale ( $\beta=90^\circ$ ) :

$$\cos(i) = \cos(h) \cdot \cos(a) \quad (\text{I.14})$$

- Pour une surface orientée vers l'équateur et inclinée d'un angle  $\beta$  sur l'horizontale:

$$\cos(i) = \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta) \quad (\text{I.15})$$

### I.10- Atténuation du rayonnement solaire (rôle de l'atmosphère)

L'énergie solaire ne parvient pas en intégralité sur la terre. En effet elle subit des transformations en traversant l'atmosphère par absorption et par diffusion [7].

- L'absorption est sélective et dépend principalement de 4 éléments, qui sont :

- L'ozone qui forme un écran et arrête les UV ( $\lambda < 0,28\mu\text{m}$ ) nocifs pour la vie.
- L'oxygène qui absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers  $0,69$  et  $0,76\mu\text{m}$ ).
- Le gaz carbonique qui absorbe une partie de l'IR lointain ( $\lambda > 2\mu\text{m}$ ).
- La vapeur d'eau qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'IR, on ne la rencontre pratiquement qu'au niveau du sol ( $Z < 5\text{km}$ ).

- Les poussières et les nuages ont aussi leur importance dans la diffusion du rayonnement solaire.

### I.11- L'irradiation ou rayonnement solaire au sol

C'est l'énergie reçue pendant une certaine durée. On distingue plusieurs composantes qui sont principalement :

**I.11.1- Le rayonnement direct (S)** est le rayonnement qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux.

**I.11.2- Le rayonnement diffus (D)** est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols, ...). Il n'a pas de direction privilégiée.

**I.11.3- Le rayonnement global (G)** est la somme des rayonnements direct et diffus.

## I.12- L'albédo

En réalité la terre n'est pas un corps noir, une partie du rayonnement solaire incident est réfléchi par l'atmosphère (principalement par les nuages) et par le sol terrestre. Cette quantité est appelée le flux d'albédo. On définit généralement l'albédo comme étant le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, correspondant respectivement au noir, pour un corps avec aucune réflexion, et au miroir parfait, pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption de tout le rayonnement visible qu'il reçoit. Le tableau I.4 regroupe les valeurs d'albédos pour différentes surfaces :

Type de surface	Albédo
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Forêt tropicale	0,12
Herbe verte	0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Sol sombre	0,05 à 0,15
Glace	0,30 à 0,40
Mer chaude	0,05
Mer froide	0,15
Neige tassée	0,60
Neige fraîche	0,85
Nuage	0,86
Verre à vitres	0.10

Tableau.I.4- Albédo pour différentes surfaces

## I.13- Mesure et calcul des rayonnements solaires

Le rayonnement solaire peut être déterminé de plusieurs manières en fonction de données disponibles, on distingue notamment :

**I.13.1- La mesure directe**, avec un instrument (le rayonnement direct est mesuré par un pyréliomètre et le rayonnement global par un pyranomètre) [8].

**I.13.2- Le calcul analytique**, quand on ne dispose d'aucune mesure. L'estimation des différentes composantes du rayonnement solaire s'effectue par des relations analytiques [3] :

#### I.13.2.1- Le rayonnement direct (S)

Il est donné par la relation :

$$S = I.A.\exp\left[\frac{B}{\sin(h)} \cdot \frac{P}{1000}\right] \cdot \cos(i) \quad (\text{I.16})$$

$I$  est la valeur du rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires.

$i$  : l'angle entre le rayon incident et la normale au plan récepteur.

$P$  : pression atmosphérique au niveau du sol.

$A$  et  $B$  étant les coefficients de trouble du ciel. Quelques valeurs des coefficients  $A$  et  $B$  sont données par le tableau I.5.

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
A	0,87	0,88	0,91
B	0,17	0,26	0,43

Tableau I.5- Valeurs des coefficients de trouble du ciel

#### I.13.2.2- Le rayonnement diffus (D)

Le flux diffus reçu par la surface d'un capteur se caractérise par deux composantes du flux à savoir :

- Le flux émis par la voûte céleste  $D_v$  :

On suppose qu'une surface faisant un angle  $\beta$  avec l'horizontale regarde une portion du ciel sous l'angle solide :  $I + \cos(\beta)/2$

$$Dv = Dh \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (\text{I.17})$$

$Dh$  étant le rayonnement diffus sur une surface horizontale donné par la relation :

$$Dh = I \cdot \sin(h) \cdot \left( 0.271 - 0.2939 \cdot A \cdot \exp \left[ \frac{B}{\sin(h)} \cdot \frac{P}{1000} \right] \right) \quad (\text{I.18})$$

- Le flux émis par le sol  $Ds$

$$Ds = \rho \cdot \left( I \cdot A \cdot \exp \left[ \frac{B}{\sin(h)} \cdot \frac{P}{1000} \right] \cdot \sin(h) + Dh \right) \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (\text{I.19})$$

$\rho$  l'albédo du sol.

A et B sont données par le tableau I.5.

Le flux diffus est la somme de  $Dv$  et  $Ds$  :

$$D = Dv + Ds \quad (\text{I.20})$$

### I.13.2.3- Le rayonnement global (G)

C'est la somme des rayonnements direct et diffus [8]:

$$G = S + D \quad (\text{I.21})$$

On peut écrire pour un plan horizontal [3] :

$$G = I \sin(h) + D \quad (\text{I.22})$$

### I.14- Taux d'ensoleillement

Par ciel clair, sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement  $SS_0$ . On appelle taux d'ensoleillement  $\sigma$ , le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement [2]:

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \quad (\text{I.23})$$

# Chapitre II

## Les distillateurs

## **Introduction**

Dans cette partie, nous commencerons par donner un bref aperçu sur les différentes techniques de dessalement puis notre intérêt portera particulièrement sur les distillateurs solaires.

### **II.1- Le problème de l'eau**

La terre est la planète de l'eau, 71 % de la surface en est recouverte; cependant 97 % de cette eau est salée, 3 % d'eau douce dont les 2/3 sont gelés aux pôles. Or, la demande en eau potable (1000 m<sup>3</sup> par an et par habitant considéré comme étant le minimum vital) va de paire avec la croissance démographique et finira par rendre à plus ou moins court terme les réserves nettement insuffisantes.

### **II.2- Le dessalement de l'eau de mer**

L'eau de mer contient environ 35 g de sel par litre. Ce qui la rend imbuvable. Une des manières de la rendre potable est de séparer l'eau pure du sel ou des impuretés. Les types de sources naturelles d'eau pouvant être traitées sont, l'eau de mer ou les eaux saumâtres.

### **II.3- Les principales technologies de dessalement des eaux**

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories. Selon le principe appliqué, on distingue :

#### **II.3.1- Les procédés utilisant des membranes**

Deux catégories :

##### **II.3.1.1- L'osmose inverse**

L'osmose inverse (figure II.1) est un procédé de séparation de l'eau des sels dissouts au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et s'opposent au passage des sels dissouts et des molécules organiques de 10<sup>-7</sup> mm de taille. Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de

la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique. Une augmentation de la pression au delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique, c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée, c'est le phénomène d'osmose inverse [9]. L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement électrique consommée principalement par les pompes haute pression. La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de 0,5 g/l.

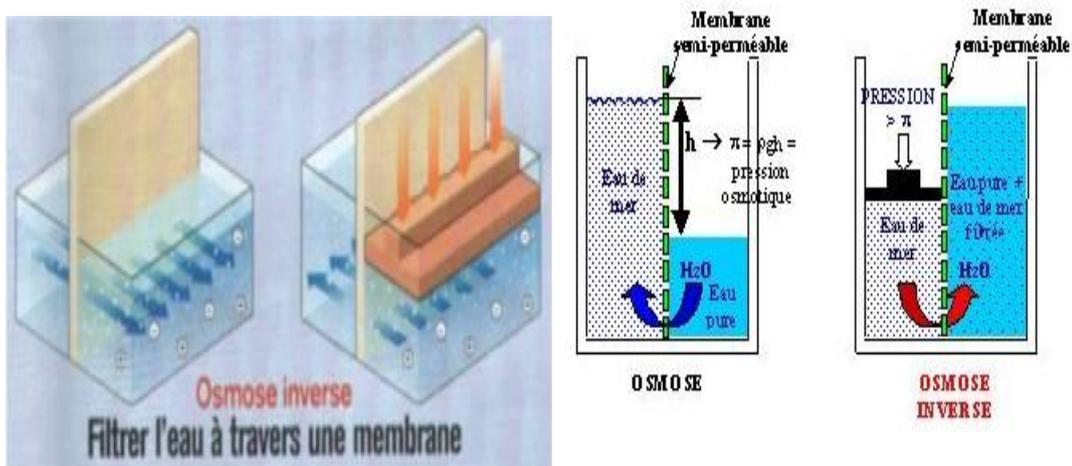


Figure II.1- L'osmose inverse

Le gros intérêt de l'osmose inverse est la possibilité de pouvoir construire des stations pouvant produire de l'eau potable de 0,5 m<sup>3</sup>/jour à 120 m<sup>3</sup>/jour, la qualité de l'eau est très supérieure car la membrane permet de rejeter entre 90 et 99 % des éléments contenus dans l'eau, selon leur nature. Le chlore, les composés azotés, les parasites et les bactéries sont éliminés, ainsi que les virus (soit la plus petite entité vivante) et même la radioactivité. L'eau peut ainsi être utilisée pour la consommation, l'irrigation, l'utilisation domestique, industrielle, l'élevage ou la production de glace pour la pêche.

### II.3.1.2- L'électrodialyse

Ce procédé consiste à éliminer les sels dans les eaux saumâtres par migration à travers des membranes sélectives sous l'action d'un champ électrique. Les membranes anodiques et cathodiques placées intercalées laissent passer respectivement les anions  $\text{Cl}^-$  et les cations  $\text{Na}^+$ . Dans l'électrodialyse, des membranes filtrantes imperméables pour les cations ou pour les anions, sont interposées alternativement entre les électrodes (figure II.2). La membrane qui laisse passer les cations a la propriété d'arrêter les anions ; celle qui est imperméable aux anions oppose évidemment une barrière aux cations. Ainsi, des cellules où l'eau contient une concentration de sel alternent avec d'autres où l'eau a été déminéralisée. L'énergie consommée par ce procédé est directement proportionnelle à la salinité de l'eau. Ce procédé étant un grand consommateur d'énergie, il ne peut s'appliquer que pour les eaux saumâtres de très faible salinité (concentration en sel inférieure à 10 g/l). L'eau de mer n'est donc pas susceptible d'être traitée à grande échelle de cette façon.

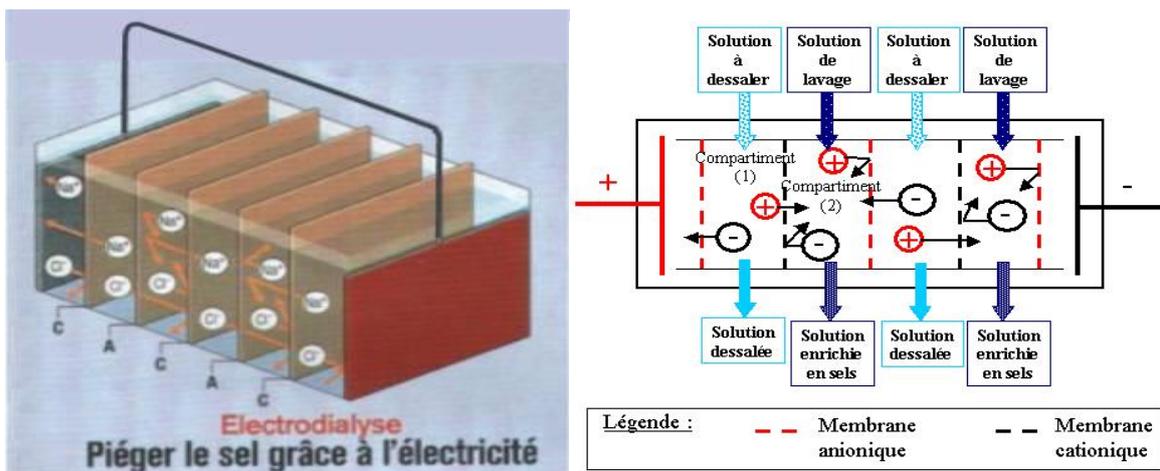


Figure II.2- L'électrodialyse

L'inconvénient majeur de ces systèmes est leur coût. Ces installations sont peu rentables.

### II.3.2- Les procédés thermiques

Ces procédés font intervenir un changement de phases [9]. Plusieurs techniques sont utilisées, parmi lesquelles nous avons :

### II.3.2.1- Le dessalement sous vide

L'eau de mer récupérée est refroidie par les échangeurs de chaleur, puis elle pénètre dans le compartiment inférieur du convertisseur, où la pompe entretient un vide (figure II.3). Il se produit ainsi à la fois une ébullition et une formation de cristaux de glace. La vapeur s'échappe et les cristaux sont entraînés jusqu'au laveur, où de l'eau douce les rince. La saumure est en partie recyclée, le reste étant rejetée. Le groupe frigorifique entretient la basse température du laveur, d'où les cristaux de glace passent au convertisseur pour y être fondus par la chaleur de condensation de la vapeur de l'eau douce à 0°C.

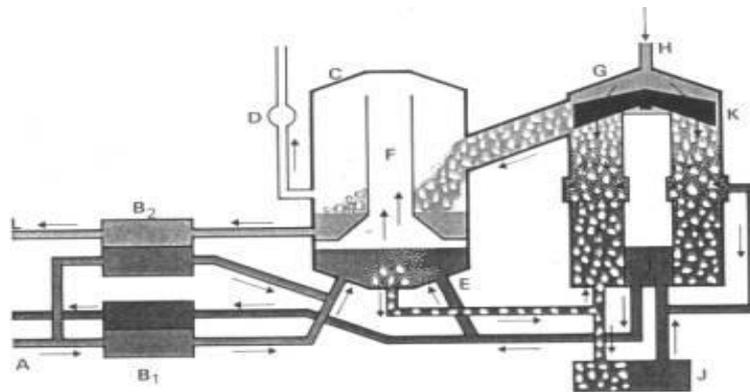


Figure II.3- Dessalement sous vide

### II.3.2.2- Le dessalement par congélation

Le principe du procédé de congélation sous vide est assez simple. Lorsqu'on fait geler de l'eau salée, les cristaux qui se forment consistent en de la glace pratiquement pure, le sel étant chassé de l'eau lors de la cristallisation et forme une saumure à la surface du cristal. Ce procédé de congélation sous vide pour le dessalement de l'eau entraîne un phénomène trop onéreux du point de vue commercial, d'abord, la congélation de l'eau salée, puis le lavage des cristaux et enfin la fusion pour obtenir de l'eau douce. Dans la pratique, les choses sont un peu plus compliquées [10].

Une autre méthode fondée sur la congélation est celle du réfrigérant secondaire, dans laquelle le transfert de chaleur est obtenu par l'emploi de butane ou d'un autre hydrocarbure liquide non miscible dans l'eau. Le mélange de butane et de l'eau de mer passe par un échangeur de chaleur où l'échauffement fait bouillir le butane, ce qui entraîne la congélation de l'eau dans la saumure. Les cristaux de glace sont lavés, séparés et

finaleme<sup>n</sup>t fondus, moyennant l'échange de chaleur avec la vapeur de butane préalablement comprimée.

L'inconvénie<sup>n</sup>t de ces procédés est leur impact sur l'environnement. En effet pour produire 1 litre d'eau douce, ce sont deux litres d'eau fortement concentrés en sel qui sont rejetés dans la mer ou injectés dans les sols, pour ces derniers, le risque d'augmenter la salinité des nappes.

### II.3.2.3- Les procédés de distillation

Dans ces procédés, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de la condenser pour obtenir de l'eau douce liquide. Plusieurs procédés de distillation sont utilisés, parmi lesquels :

#### II.3.2.3.1- Distillation par longs tubes verticaux

Le flux d'eau de mer entre dans les tubes verticaux et bout (figure II.4). La vapeur sert de source de chaleur pour le niveau inférieur. Seul le premier niveau est alimenté en vapeur spécialement produite. A la fin du procédé, la vapeur se condense sur les tubes et l'eau douce peut ainsi être collectée.

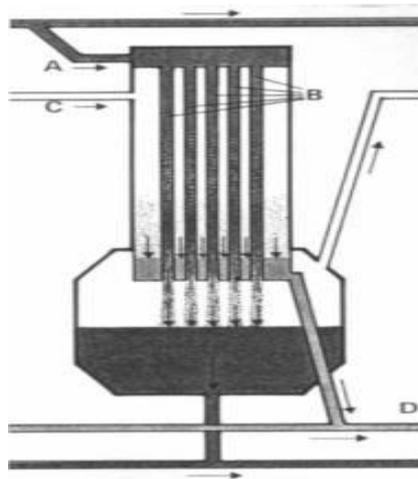


Figure II.4- Distillation par longs tubes verticaux.

#### II.3.2.3.2- Distillation par compression de vapeur

Le mélange d'eau de mer et de saumure est introduit par la pompe autour des tubes du condenseur (figure II.5). Le compresseur injecte dans la chambre de la vapeur d'eau qui



### II.3.2.3.4- Distillation à détonées étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)

Ce procédé dit "Flash" (figure II.7) consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore, puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détonées successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle [9].

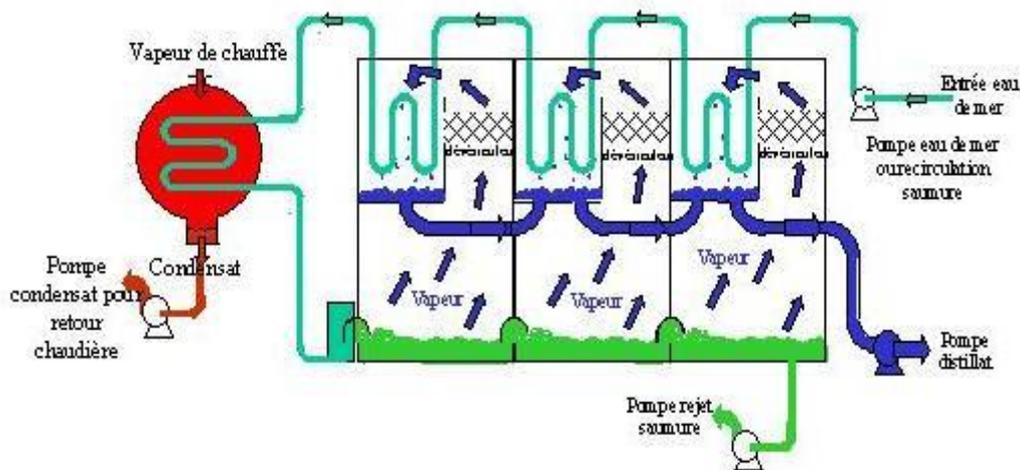


Figure II.7- Principe de fonctionnement d'un système par détonées successives (MSF) à 3 étages.

L'avantage principal du procédé MSF est que l'évaporation de l'eau de mer ne se produit pas autour des tubes de chauffe puisque le liquide « flashe » ceci limite les risques d'entartrage.

### II.3.2.3.5- Distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED)

Le plus ancien évaporateur multiples effets a été breveté il y a plus de 80 ans, ce procédé (figure II.8) est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80 °C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1<sup>er</sup> effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2<sup>ème</sup> effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2<sup>ème</sup> effet et ainsi de suite. Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m<sup>3</sup> d'eau douce produite) [9].

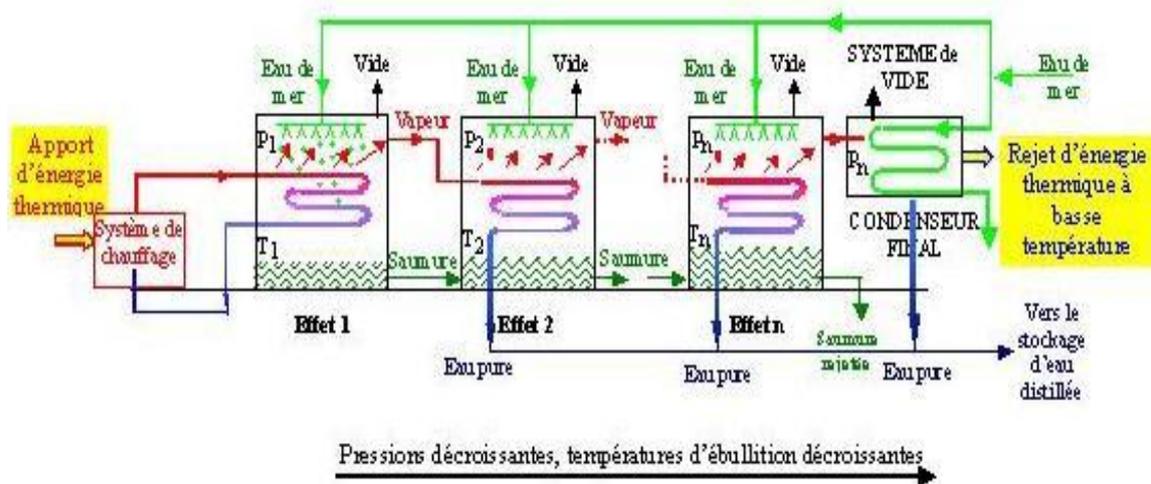


Figure II.8- Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED).

L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet pour transformer 1 kg d'eau liquide en 1 kg d'eau vapeur à la même température il faut environ 2250 kilojoules (si le changement d'état se fait à 100 °C). Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

## II.4- Les distillateurs solaires

La distillation est le plus vieux procédé de dessalement, les marins grecs l'utilisaient déjà au III<sup>ème</sup> siècle avant J.C. sur leurs bateaux. Le premier distillateur solaire industriel a été construit en 1872 par un ingénieur suédois Charles Wilson. L'installation était conçue pour la ville minière de Las Salinas dans le nord de Chili. Le distillateur utilisait des bacs en bois sur une surface de 4,7 m<sup>2</sup> pour produire 23 litres d'eau pure par jour, soit 4,9 litres par mètre carré de distillateur solaire.

### II.4.1- Composants d'un distillateur solaire

La technique de dessalement de l'eau de mer à l'énergie solaire utilisant un distillateur simple, basée sur le principe de l'effet de serre généralement, fait intervenir une installation qui se compose de [8] :

- Un recouvrement transparent en verre ou parfois en plastique mis en pente. Le verre est recommandé pour les applications à long terme mais il est généralement coûteux, fragile et lourd. Le plastique (tel que polyéthylène) peut être choisi pour usage de courte durée, à cause de sa faible résistance à la chaleur.
- Un bassin recouvert d'une couche noire absorbante. La plaque de l'absorbeur est généralement en métal, le plus couramment le cuivre, l'acier inoxydable ou bien l'aluminium.
- Pour l'isolation, on place une ou plusieurs couches d'isolant du type laine de verre, polystyrène, mousse de polyuréthane... etc.

Ils existent cependant deux types de fabrications de distillateurs, ces derniers peuvent être construits soit [11]:

- Sous forme de produit modulable, il s'agit généralement d'un bac (plastique, tôle, bois...) isolé inférieurement et recouvert d'un vitrage. Ce modèle est utilisé seulement pour de très petites capacités, plusieurs dizaines de litres par jour.
- Quand les besoins sont plus importants, plusieurs centaines de litres par jour, les distillateurs sont construits en maçonnerie (béton) sous de grands bassins vitrés.

## II.4.2- Distillation solaire direct à effet de serre

Le principe de la distillation solaire repose sur l'effet de serre (figure II.9):

Un rayonnement solaire chauffe la membrane noire du fond du bac. Celle-ci émet des infrarouges. 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 que contient l'air chaud est refroidie par l'ambiance et se condense sur le vitrage. Il y a formation de gouttes d'eau qui s'écoulent à la partie inférieure du vitrage dans une gouttière. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel.

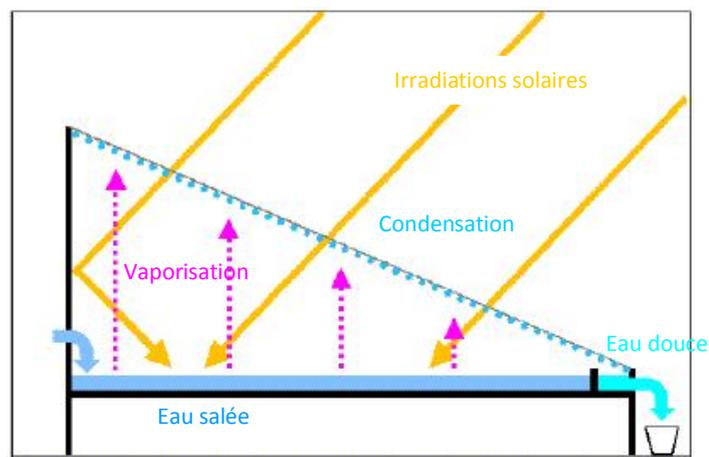


Figure II.9- Principe de la distillation solaire à effet de serre.

## II.4.3- Les types de distillateurs solaires

Depuis un siècle, des milliers de distillateurs solaires fonctionnent à travers le monde, la plupart servent pour un usage domestique. Ils sont construits artisanalement suivant le climat et la saison. Pour améliorer la production de l'eau potable, des amendements, sont introduits sur les structures des distillateurs. On peut classer les types de distillateurs selon de nombreux paramètres :

### II.4.3.1- La géométrie du vitrage

Le vitrage a le principal rôle dans les procédés d'évaporation et de condensation. Selon la géométrie du vitrage plusieurs modèles de distillateurs ont été proposés, dont les plus répandus sont :

### II.4.3.1.1- Le distillateur plan

Il s'agit généralement d'une enceinte fermée (figure II.10), composée d'un bac de surface noire contenant une lame d'eau et d'une couverture vitrée inclinée qui sert à obtenir l'effet de serre nécessaire au processus de l'évaporation ou de condensation. L'eau s'évapore et se condense sur la vitre. Le sel reste donc sur la membrane noire. Les gouttes d'eau pure ruissellent, à cause des forces de gravité, jusque dans les goulottes. On récupère ainsi l'eau filtrée dans ces goulottes [8], la production est de l'ordre de 2 à 5 litres d'eau pure par mètre carré et par jour [1].

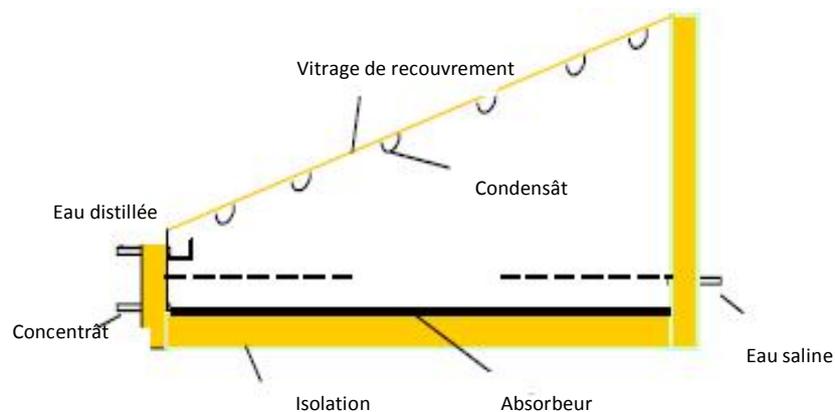


Figure II.10- Distillateur solaire plan

### II.4.3.1.2- Distillateur à double inclinaisons (hot box)

L'avantage du distillateur à double inclinaisons (figure II.11) est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation. Un module de 2 mètres de large sur 50 mètres de long produit 330 litres d'eau pure par jour dans un climat désertique. Aujourd'hui, on utilise toujours des systèmes de distillation comme celui-ci pour résoudre les difficultés d'approvisionnement en eau douce dans les Caraïbes, dans certains pays désertiques du Moyen-Orient et dans le pourtour méditerranéen.

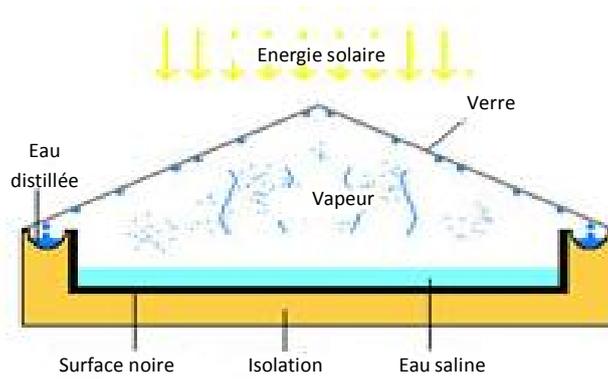


Figure II.11- Distillateur à double inclinaisons

#### II.4.3.1.3- Le distillateur sphérique

C'est un distillateur en plexiglas (figure II.12) composé de trois parties principales ; une demi sphère supérieure qui sert à transmettre le rayonnement solaire d'une part et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi sphère inférieure qui récupère le distillat et un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distiller et se trouvant dans le plan médian. Un essuie-glace entraîné par un moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation constamment transparente au rayonnement, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes. Le principe de fonctionnement est similaire à celui du distillateur plan [12].

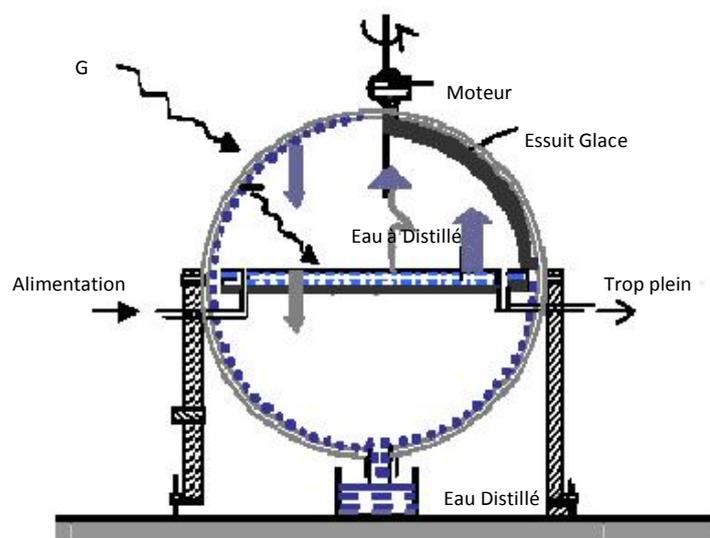


Figure II.12- Distillateur solaire sphérique.

### II.4.3.2- L'inclinaison de l'absorbeur

Selon la disposition de la plaque absorbante au sein du distillateur solaire, on distingue deux catégories : des distillateurs statiques où la plaque absorbante se trouve dans une position complètement horizontale, donc la nappe d'eau est immobile, l'exemple le plus courant est le distillateur plan, la deuxième catégorie est les distillateurs à ruissellement, où l'eau à distiller est en mouvement à cause de l'inclinaison de la plaque absorbante, pour ce dernier type, différentes géométries existent, nous citons quelques unes :

#### II.4.3.2.1- Distillateur solaire incliné à cascades

Un modèle de ce type de distillateur, représenté par la figure II.13, n'a été exécuté qu'en petite taille. Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux, [13]. Le distillateur solaire à cascades présente deux avantages, la lame d'eau est très faible et l'orientation par rapport au rayonnement incident se rapproche davantage de l'optimum.

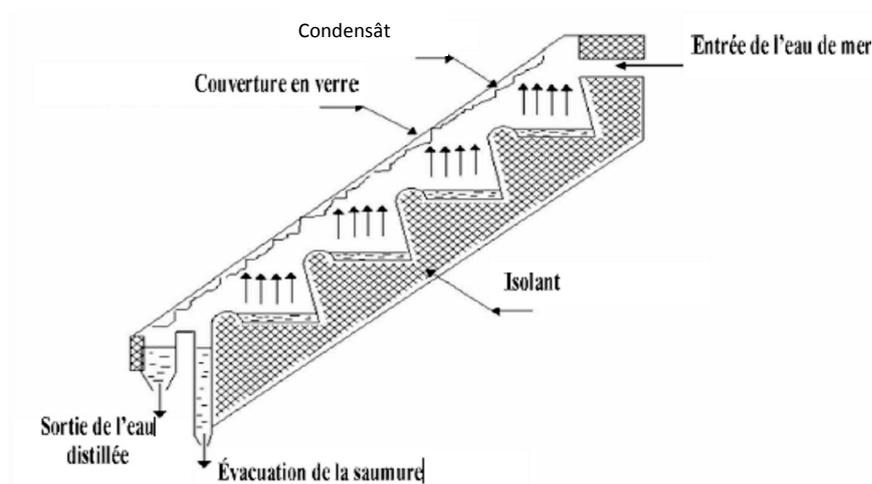


Figure II.13- Distillateur solaire incliné à cascade.

#### II.4.3.2.2- Distillateur à barrages

C'est un distillateur incliné (figure II.14) qui est composé d'une couverture de verre jouant aussi le rôle d'un condenseur, un récipient pour collecter l'eau distillée, un système de circulation, un support de structure et un absorbeur qui se compose de 20 jauges d'acier galvanisé, la graduation ascensionnelle de la plaque absorbante sert pour diminuer la profondeur de l'eau dans le bassin et d'augmenter la surface exposée à l'irradiation solaire.

Il faut noter que l'utilisation de ce type de distillateur améliore la production d'eau douce de 20% par rapport à un distillateur conventionnel, c'est pour cela que le distillateur à barrage est proposé dans les projets d'hydrogène solaire [14].

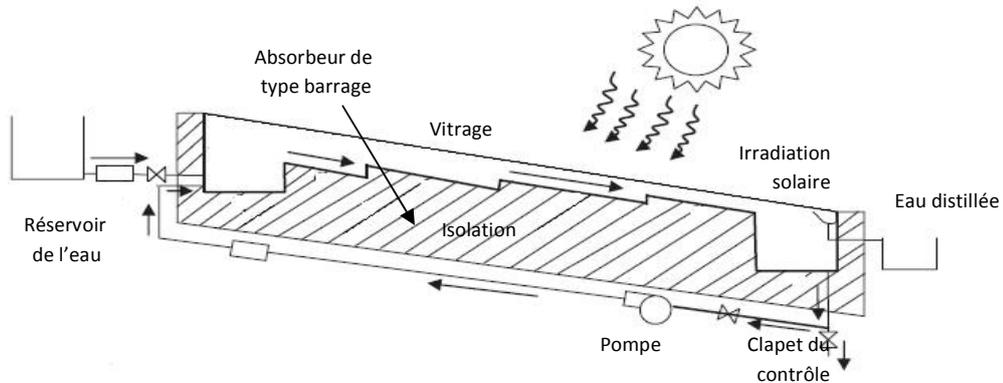


Figure II.14- Distillateur de type barrage

#### II.4.3.2.3- Distillateur solaire à simple pente

Dans le distillateur à simple pente, l'absorbeur et la nappe d'eau se composent de morceaux de tissu mouillés, noircis placés l'un sur l'autre, séparés par des draps de polythène et étendus sur l'isolant, le bord supérieur de ces morceaux de tissu est submergé dans un réservoir d'eau à distiller, attaché directement au distillateur (figure II.15). Le distillateur est recouvert par une vitre inclinée de  $10^\circ$  par rapport à l'horizontale et scellé avec un joint d'étanchéité de caoutchouc. Pour une durée de 8 heures, ce distillateur fournit une production de 2 litres par mètre carré d'eau douce [15].

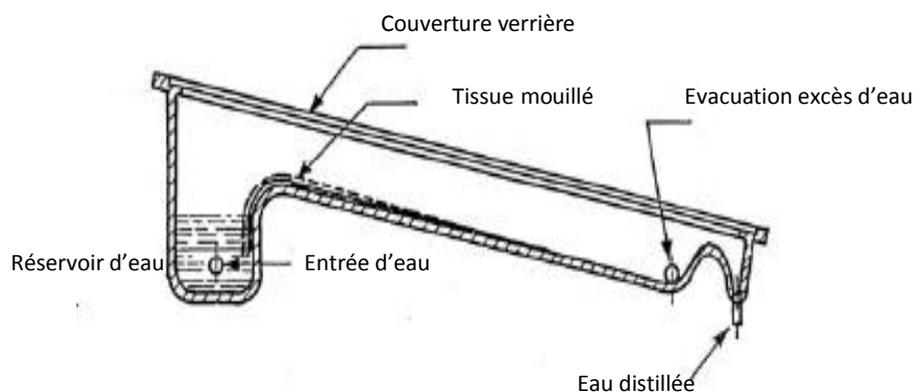


Figure II.15- Distillateur solaire à simple pente.

#### II.4.3.2.4- Distillateur à plusieurs étages

Pour augmenter le rendement des distillateurs solaires, le Pr Le Goff [2] a imaginé un distillateur à plusieurs étages (figure II.16) où la chaleur libérée par la condensation est récupérée dans un 2ème étage pour servir à évaporer une masse d'eau supplémentaire suivant le schéma de la figure II.16. La production distillée peut théoriquement atteindre 10 à 15 litres par m<sup>2</sup> et par jour [2].

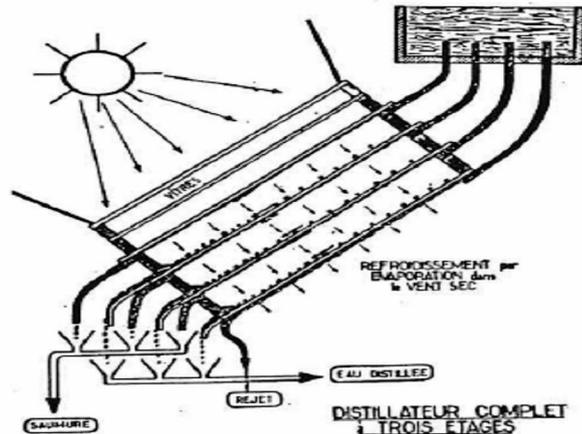


Figure II.16- Distillateur solaire à plusieurs étages.

#### II.4.3.3- Distillateurs de secours

Les distillateurs décrits précédemment sont lourds et encombrants et par conséquent difficiles à transporter, aussi des distillateurs construits avec des matières plus légères et donc plus pratiques ont été inventés. Ils furent utilisés notamment pour fournir l'eau potable de secours lors des voyages. Les plus connus étant :

##### II.4.3.3.1- Distillateur de type Watercone

C'est un distillateur solaire composé d'un récipient noir et d'une cloche transparente de forme conique (figure II.17). Cette dernière est munie d'une gouttière à l'intérieur pour récolter l'eau qui condense sur la surface, et d'une ouverture au sommet pour récupérer l'eau distillée. Le diamètre extérieur du "Watercone" est d'environ 80 cm, exposé au soleil, il peut produire un maximum de 1,6 litres d'eau distillée par jour.



Figure II.17- Distillateur de type watercone

#### II.4.3.3.2- Distillateur AKA (Vapor Still)

Pour fournir l'eau potable de secours immédiatement de l'eau de mer, un petit distillateur solaire gonflable (figure II.18) a été conçu.



Figure II.18- Distillateur solaire gonflable

#### II.4.4- Distillateur solaire associé à d'autres dispositifs

La production d'un distillateur dépend du gradient de température qui existe entre la température de l'eau dans le bassin et celle du côté intérieur de la couverture transparente. Aussi plusieurs techniques ont été testées et adoptées pour l'augmentation de la température de l'eau dans le bassin et l'abaissement de la température de la couverture transparente. Ainsi l'ajout d'un chauffage externe permettant d'augmenter la température de l'eau a été envisagé en utilisant l'un des dispositifs suivants :

- Un capteur solaire.

- Un concentrateur solaire.
- Un réflecteur solaire.
- Un système de récupération de la chaleur.

#### II.4.4.1- Distillateur solaire-capteur

Des études expérimentales [16], ont montré que la production d'un distillateur couplé avec un capteur solaire a augmenté approximativement de 36% par rapport à celle d'un distillateur seul. La circulation à travers le capteur solaire peut être naturelle (Thermosiphon) ou forcée en utilisant une pompe (figure II.19).

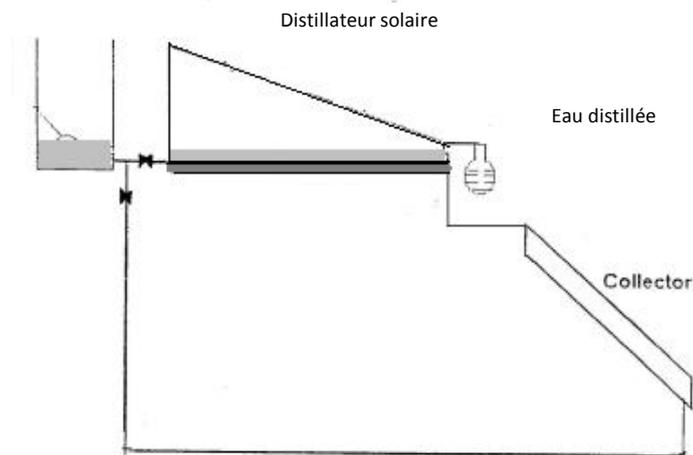


Figure II.19- Distillateur solaire plan-capteur.

#### II.4.4.2- Distillateur solaire-réflecteur

L'ajout de réflecteurs interne et externe à un distillateur plan permet d'augmenter remarquablement la quantité d'irradiation solaire absorbée par l'absorbeur et améliorer par conséquent la production d'eau distillée de près de 48 % quand l'inclinaison de la vitre est de 20°. L'utilisation d'un réflecteur est plus efficace en hiver qu'en été [17].

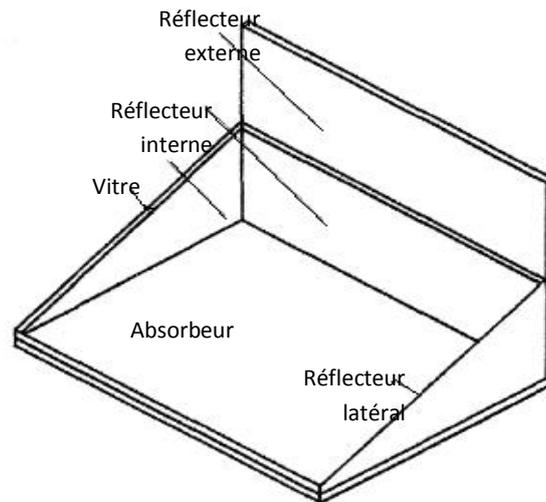


Figure II.20- Distillateur solaire plan-réflecteur.

#### II.4.4.3- Distillateur solaire à cheminée

Ce distillateur (figure II.21) se différencie des autres distillateurs conventionnels par l'adjonction d'une cheminée dans laquelle se trouve un échangeur de chaleur, le conduit plan couvert d'une vitre sert à capter l'énergie solaire.

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau saumâtre qui coule dans le conduit s'évapore et monte dans la cheminée où elle se condense, la chaleur de condensation peut être utilisée pour le préchauffage de l'eau entrant dans le système.

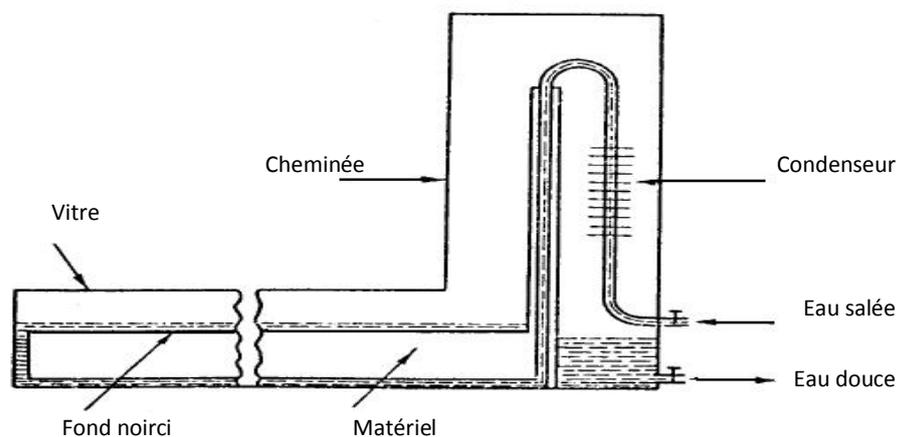


Figure II.21- Distillateur à cheminée.

### II.4.5- Caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur

Le choix d'un distillateur solaire dépend essentiellement de grandeurs, appelées caractéristiques de fonctionnement. On distingue notamment la production, le rendement, les efficacités interne et globale et la performance.

#### II.4.5.1- Le débit de distillat ou production du distillateur

La production du distillateur est la quantité d'eau distillée journalière produite par unité de surface d'évaporation [18].

$$m_d = \frac{Q_{ev}}{L_v} \quad (\text{II.1})$$

$Q_{ev}$  : flux de chaleur utilisé pour l'évaporation de l'eau.

$L_v$  : Chaleur latente d'évaporation.

#### II.4.5.2- Le rendement

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan noir et par jour. L'inconvénient majeur de ce critère est qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qui arrive sur le distillateur [18].

#### II.4.5.3- L'efficacité globale

L'efficacité globale est définie par le rapport suivant [18]:

$$\eta_g = \frac{Q_{ev}}{G.A_v} = \frac{m_d.L_v}{G.A_v} \quad (\text{II.2})$$

$G$  : Irradiation globale.

$m_d$  : Débit de distillat.

#### II.4.5.4- L'efficacité interne

Si l'efficacité globale rapporte la quantité d'eau produite à l'énergie solaire tombant sur une surface horizontale, elle ne fait pas mention de la quantité d'énergie entrant réellement dans le distillateur, d'autant plus qu'un distillateur est construit en général pour un lieu donné et avec une pente de couverture fixe. Un changement de pente et de localité fait varier la quantité d'énergie qui entre dans le distillateur. On définit alors une efficacité dite interne qui tient compte de tous ces paramètres et qui est donnée par l'expression [18]:

$$\eta_i = \frac{Q_{ev}}{Q_{eau}} \quad (\text{II.3})$$

$Q_{eau}$  étant le flux de chaleur effectivement reçu par la masse d'eau.

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

$$Q_{eau} = \alpha_i \cdot G \cdot A \quad (\text{II.4})$$

$$\alpha_i = \tau_v \cdot \alpha_e + \tau_e \cdot \tau_v \cdot \alpha_f \quad (\text{II.5})$$

$\alpha_i$  étant le coefficient d'absorption fictif de la masse d'eau.

$\alpha_e$ ,  $\alpha_f$  respectivement les facteurs d'absorption de l'eau et du fond du distillateur.

$\tau_e$ ,  $\tau_v$  respectivement les facteurs de transmission de l'eau et de la vitre.

$A$ , la surface du bac.

#### II.4.5.5- La performance

Le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus absolue a amené ainsi Satcunathan et Hansen à définir le facteur de performance brut (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H) définis par [18] :

$$\text{FPB} = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24h}} \quad (\text{II.6})$$

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (\text{II.7})$$

#### II.4.6- Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur solaire

On peut classer les paramètres qui influent sur le fonctionnement du distillateur comme suit [1]:

##### II.4.6.1- Les paramètres internes

Parmi lesquels on distingue notamment :

- La couverture.
- L'inclinaison.
- L'absorbeur.
- L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller.
- La concentration de saumure.

##### II.4.6.2- Les paramètres externes

Qui sont principalement :

- L'intermittence des nuages.
- La variation du rayonnement global incident et le rayonnement diffus.
- La vitesse du vent et la température ambiante.

# Chapitre III

## Les capteurs

## Introduction

Les capteurs solaires sont des dispositifs dont le principe de fonctionnement est basé sur la transformation de l'énergie solaire en chaleur. Dans cette partie du mémoire les différents composants d'un capteur seront brièvement décrits. Le lecteur trouvera également différents types de capteur solaires.

### III.1- Les capteurs solaires

Un capteur solaire (figure III.1) est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur qui sera transmise à un fluide "fluide caloporteur".



Figure III.1- Capteur solaire thermique.

### III.2- Fabrication d'un capteur solaire

Les techniques et les matériaux utilisés dans la fabrication des capteurs solaires sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières. Généralement, un capteur solaire est composé des éléments suivants (figure III.2) :

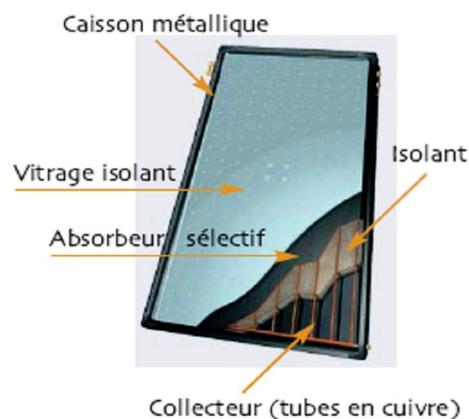


Figure III.2- Composants d'un capteur solaire.

### III.2.1- Une couverture transparente

La couverture est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est admis dans le capteur. On ne peut utiliser que des matériaux transparents. L'intérêt d'une couverture transparente habituelle pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. C'est donc pour des températures dépassant 70°C que on peut envisager d'installer un double vitrage afin d'accroître le rendement. Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre en simple ou double vitrage, trempé ou non, armé ou non, mais on peut trouver aussi des produits plastiques de synthèse ayant la propriété de réaliser l'effet de serre tel que le polycarbonate, le polyméthacrylate ou bien le polyester armé. Le tableau III.1 fournit quelques indications sur ces matériaux [4] :

Matériau	Facteur de transmission solaire (%)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique (j/kg.K)	Conductivité thermique (w/m.K)	Dilatation thermique (K <sup>-1</sup> )
Verre	85-92	2700	840	0.93	0.9·10 <sup>-5</sup>
Polycarbonate	82-89	1200	1260	0.2	6.6·10 <sup>-5</sup>
Polyméthacrylate	89-92	1200	1460	0.2	7·10 <sup>-5</sup>
Polyester armé	77-90	1400	1050	0.21	3.5·10 <sup>-5</sup>
Polytéréphthalate éthylène	84	1.38	1170	0.25	7·10 <sup>-5</sup>
Polyfluoroéthylène opoylène	97	2.15	1170	0.25	10 <sup>-4</sup>
Polyflurure vinyle	93	1.50	1380	0.12	4·10 <sup>-5</sup>

Tableau III.1- Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge.

Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage. L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres.

### III.2.2- L'absorbeur

Il a pour fonction d'absorber le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur, tout en minimisant les pertes. En général, l'absorbeur n'est qu'une plaque plane en métal dont la couche superficielle donnant sur le soleil, doit être douée d'un coefficient d'absorption le plus élevé possible. Les meilleurs coefficients sont de l'ordre de 0,95. Seules les couleurs foncées permettent d'obtenir des valeurs aussi élevées, l'idéal étant le noir évidemment. Par ailleurs, il vaut mieux que cet aspect ait été obtenu par un traitement (chimique ou autre) plutôt que par une couche de peinture. Pour limiter les pertes par réémission de rayonnement infrarouge, il importe que l'absorbeur possède aussi la propriété d'émissivité superficielle la plus faible possible (valeur inférieure à 0,15). Dans ce cas, l'absorbeur sera qualifié de sélectif. La surface sélective a pour rôle justement, une fois le rayonnement solaire absorbé de transformer la bande du visible en infrarouge [19]. Il importe que la plaque soit métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (tableau III.2).

Métal	Conductivité thermique (w/m.K)	Chaleur massique (j/kg.K)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Diffusivité (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)
Cuivre	384	398	8900	108
Acier inoxydable	14	460	7800	4
Aluminium	204	879	2700	86

Tableau III.2- Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques.

### III.2.3- Le fluide caloporteur

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise habituellement soit l'air, soit l'eau, des mélanges eau glycol sont aussi employés à cause des conditions climatiques, ces mélanges ont une chaleur spécifique inférieure à celle de

l'eau pure. Par rapport à l'eau, l'air n'a pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été et il n'y a pas de problème de corrosion. Néanmoins l'air ne peut servir qu'au chauffage de locaux et les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau. D'autre part, quelque soit le système, le contact entre les tuyaux véhiculant le fluide et la plaque absorbante doit être très intime, soit par emboutissage, soit par soudure. De même, l'espacement entre les tuyaux devra être rigoureusement calculé en fonction du diamètre du tuyau de l'épaisseur de la plaque et des matériaux employés. Les tuyaux de circulation du fluide en contact avec l'absorbeur seront de préférence placés en parallèle plutôt qu'en serpentif [19].

### III.2.4- Un isolant thermique

Limiter les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur est primordial si on cherche à optimiser les performances de ce dernier. Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation arrière et latérale. On place une ou plusieurs couches d'isolant du type, laine de verre, polystyrène...etc. (Tableau III.3) [4], subsidiairement un coffrage étanche à l'eau et un système de support mécanique de l'ensemble, mais il faut veiller à leur tenue à la température car une coupure de circulation peut faire monter la température intérieure du capteur à plus de 150 °C en été.

Matériau	Conductivité thermique (w/m.K)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique (j/kg.K)	Diffusivité (10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s)
Air (à 20°C)	0.025	1.2	1003	208
Mousse de polyuréthane	0.029	30	1600	6.0
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène expansé	0.040	20	1500	13.3
Papier journal comprimé	0.105	130	1340	6.0
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
Plâtre	0.35	800	800	5.5

Tableau III.3- Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants.

### III.3- Principaux types de capteurs solaires thermiques

Un certain nombre de détails différencient les capteurs les uns des autres, principalement, la structure, la surface des absorbeurs, les circuits hydrauliques et la perte de charge, la conception des raccords, l'épaisseur, l'isolation, le caisson, le vitrage, les joints et l'assemblage, le cadre de montage en toiture, les dispositifs pour le transport, la conception optique et la durée de vie [20]. Sans être exhaustif on peut citer:

#### III.3.1- Le capteur plan

C'est un dispositif sans concentration dans lequel la surface de l'absorbeur est une plaque métallique sensiblement plane et noircie pour absorber le maximum de rayonnement. Elle est recouverte d'une vitre sur la face avant et isolée sur les faces latérales et arrière (figure III.3). Les rayons solaires qui traversent la vitre sont absorbés par l'absorbeur qui s'échauffe et émet des rayons infrarouges. Ces derniers restent piégés dans le capteur à cause de la vitre (effet de serre) et de l'isolant sur les autres parois. Un liquide dans des tubes récupère la chaleur et la véhicule jusqu'au point d'utilisation. Les avantages des capteurs plans sont [20] :

- Structure simple et robuste.
- Rapport performance prix favorable.
- Faciles à intégrer grâce à leur surface plane.

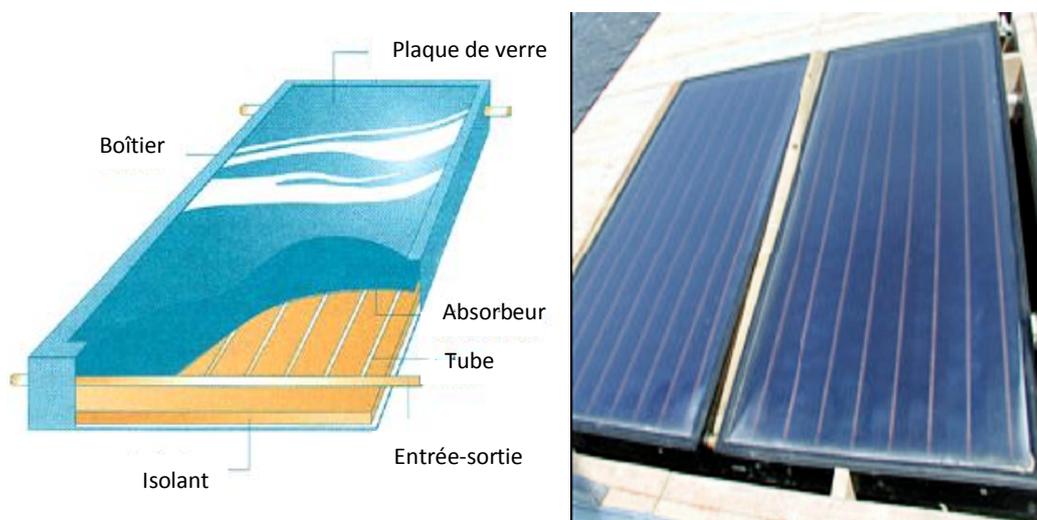


Figure III.3- Capteur solaire plan.

### III.3.2- Le capteur a air

Il est constitué d'une surface de couleur foncée absorbant la chaleur et d'une surface isolante. Le fluide caloporteur est de l'air. Le capteur solaire à air est utilisé surtout pour le chauffage des locaux. Le principe est d'augmenter la température de l'air de 5 à 10°C. Une élévation de 4°C double déjà la capacité de séchage de l'air et divise le temps de séchage par deux. L'air ventilé est réchauffé dans le capteur à air entre la couverture du toit et un isolant hydrofuge cloué sous les pannes de la charpente du bâtiment.

### III.3.3- L'étang solaire

Un étang solaire est un capteur de grande dimension avec stockage de chaleur intégré. C'est un bassin d'eau salée, naturel ou artificiel, composé de trois zones :

- La partie haute est peu salée, l'eau réagit comme dans un étang normal et la température reste proche de l'air ambiant.
- La partie basse est très salée, exposée au rayonnement solaire, elle peut devenir très chaude (60 à 100 °C).
- La partie intermédiaire, où la salinité augmente avec la profondeur crée un gradient de densité qui empêche la thermocirculation. Cette zone réagit comme une isolation thermique transparente, elle est traversée par le rayonnement solaire qui est absorbé et piégé par l'eau très salée en partie basse.

### III.3.4- Le capteur à tube sous vide

Un capteur solaire "sous vide" (figure III.4) est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur, celui-ci reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique ou un coffre de protection. La fabrication des tubes et l'assemblage des capteurs sont simplifiés, car il n'y a pas de soudures verre-métal. Par contre, les tubes thermos sont particulièrement fragiles au point de liaison avec le collecteur, où la partie extérieure et la

partie intérieure de chaque tube se rejoignent. En général, la pression dans l'espace vide est inférieure à 1 Pa. Ainsi, les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur sont quasiment éliminées. Ces capteurs peuvent atteindre des températures élevées et les tubes sont inclinables, ce qui permet une utilisation en façade ou sur une toiture insuffisamment inclinée pour utiliser des capteurs plans [20]. On note d'autres avantages par rapport aux capteurs plans notamment :

- Des températures de fonctionnement plus élevées qu'avec les capteurs plans, peuvent être atteintes
- Des déperditions réduites grâce à une excellente isolation thermique.



Figure III.4- Capteur à tube sous vide.

### III.3.5- Le capteur cylindro-parabolique

Les concentrateurs solaires utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques (figure III.5) pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée. Naturellement, ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Dans un concentrateur cylindro-parabolique, le fluide caloporteur (eau, huile thermique ou gaz) peut être porté à environ 400 °C. Dans les concentrateurs paraboliques, on peut obtenir des températures plus élevées (jusqu'à 1500 °C). Ces types de collecteurs solaires sont plus adaptés pour la production de chaleur industrielle et d'électricité [19].



Figure III.5- Système à réflecteur cylindro-parabolique.

### III.3.6- Le capteur parabololoïde

Il utilise un réflecteur en forme de parabololoïde de révolution.

### III.3.7- Le capteur CPC (Compound Parabolic Concentrator)

C'est un capteur plan ou à tubes sous vide avec un réflecteur "concentrateur à segments paraboliques" (figure III.6). Les réflecteurs CPC ont une géométrie qui permet au rayonnement solaire direct et diffus d'atteindre l'absorbeur, car la surface de l'absorbeur est cylindrique couvrant la totalité de la surface du tube intérieur. Ainsi, la partie face au soleil peut capter le rayonnement direct et la partie cachée peut capter le rayonnement par réflexion.

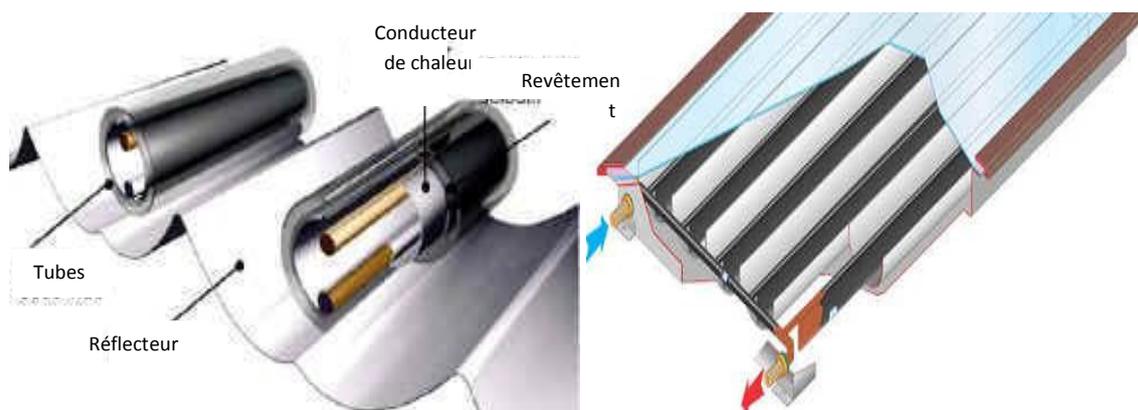


Figure III.6- Coupe schématique du capteur CPC.

### III.3.8- Capteurs non vitrés

Ces capteurs métalliques (sélectifs) (figure III.7) sont indiqués pour de l'eau dépassant de 10 à 40 °C la température extérieure. L'utilisation des capteurs non vitrés se limite aux applications nécessitant des températures basses. En l'absence de vitrage et d'isolation thermique, les pertes de chaleur deviennent trop importantes à hautes températures et le taux d'utilisation trop faible. Une protection contre le vent permettra d'augmenter l'efficacité de l'installation, dont la durée de vie avoisine les 30 ans. Ils sont appropriés pour le chauffage de piscine et le préchauffage de l'eau chaude sanitaire.



Figure III.7- Capteurs solaires sans vitrage.

### III.3.9- Le capteur moquette

C'est un capteur non vitré. Il consiste en un réseau de tubes noirs en matière plastique, accolés les uns aux autres (figure III.8). Pour chauffer l'eau d'une piscine, les capteurs peuvent être insérés dans le circuit de filtration. Ils sont ainsi directement parcourus par l'eau retournant au bassin. Le rendement du capteur moquette est très bon pour produire des températures proches de la température de l'air ambiant. Les quelques degrés supplémentaires apportés à l'eau de la piscine permettent d'en allonger le confort et la durée d'utilisation de plusieurs semaines. Le dimensionnement recommandé est de 1m<sup>2</sup> de capteur pour 2m<sup>2</sup> à 3 m<sup>2</sup> de plan d'eau. Une couverture nocturne du bassin permet par ailleurs de réduire les besoins en chaleur de la piscine. Le capteur moquette ne permet pas la production d'eau chaude sanitaire (ECS), sauf en pays chauds. Pour chauffer des piscines d'été, individuelles ou collectives, ces capteurs représentent des investissements idéals car à moindre coût, ils répondent parfaitement à des besoins spécifiques saisonniers.

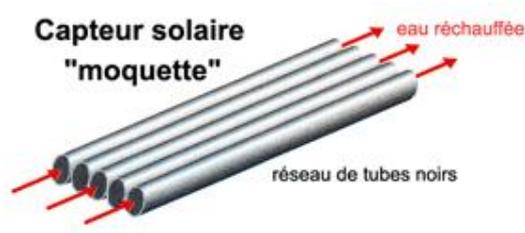


Figure III.8- Capteur solaire moquette.

### III.4- Principaux systèmes de chauffe-eau solaires

L'énergie captée par le capteur solaire et transformée en chaleur est cédée au fluide caloporteur et transférée vers un réservoir de stockage d'énergie. Ce transfert se fait soit par circulation naturelle (thermosiphon), soit par circulation forcée.

#### III.4.1- Le thermosiphon

Dans le système à thermosiphon, aucune pompe n'est nécessaire pour faire circuler le fluide caloporteur qui s'élève tout naturellement lorsqu'il est chauffé. Le principe est simple, lorsque deux fluides ont le même volume, celui qui a la plus grande densité va vers le bas tandis que le plus léger se dirige vers le haut. C'est à peu près ce qui se passe dans une thermocirculation. Quand le fluide est chauffé dans le capteur, il augmente de volume, par conséquent sa densité diminue et il devient plus léger. La différence de densité créée entre le fluide froid et le fluide chauffé confère à celle-ci un mouvement ascendant, soit d'aller se verser dans le réservoir de stockage (thermosiphon direct), soit par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur où il cède la chaleur indirectement à l'eau du réservoir de stockage. Un tel procédé porte le nom de thermocirculation indirecte. Si le thermosiphon ne nécessite pas une source d'énergie supplémentaire, il ne fonctionne que si le capteur solaire est plus bas que le consommateur, ce qui limite déjà son utilisation [8].

#### III.4.2- Installation d'un circuit forcé

Il va sans dire que la possibilité est toujours offerte d'installer le consommateur plus bas que le capteur solaire, pour cela une pompe est nécessaire pour faire circuler le fluide caloporteur. Le rôle de la pompe de circulation est de permettre un transfert plus rapide des calories captées par l'absorbeur vers le réservoir de stockage. L'utilisation de cette pompe permet aussi d'interrompre le transfert de chaleur lorsque l'eau des capteurs est moins chaude que celle contenue dans le réservoir.

### III.5- Principaux paramètres caractérisant un capteur

Le fonctionnement d'un capteur solaire est caractérisé par de nombreux paramètres dont les plus importants sont :

#### III.5.1- Le rendement

Le rendement d'un capteur est le rapport entre l'énergie extraite par le fluide caloporteur pendant un intervalle de temps donné et le produit de l'irradiation solaire pendant le même intervalle de temps, sur le capteur par sa superficie, dans les conditions de l'état stationnaire.

#### III.5.2- La superficie

La superficie d'entrée est l'aire maximale de la section droite du rayonnement pouvant atteindre le volume contenant l'absorbeur, directement ou par réflexion.

#### III.5.3- La stagnation

La stagnation est l'état d'un capteur ou d'un système sans circulation du fluide caloporteur.

La température de stagnation se réfère généralement à la température du fluide caloporteur sans circulation où les déperditions thermiques sont égales au flux du rayonnement solaire incident.

#### III.5.4- Orientation et inclinaison des capteurs solaires

Les capteurs solaires sont orientés et inclinés suivant l'utilité que l'on désire donner au système. En général, l'orientation des capteurs dans l'hémisphère nord doit être plein sud, car le soleil suit chaque jour une trajectoire apparente Est-sud-ouest, à l'encontre dans l'hémisphère sud où l'orientation doit être vers le nord [8].

Beaucoup d'études ont été menées pour déterminer ou du moins estimer, le meilleur angle de l'inclinaison des capteurs solaires. En pratique, la règle générale pour un utilisation annuelle est :  $\varphi + 10^\circ$ , tel que  $\varphi$  est la latitude du lieu, alors que certains chercheurs suggèrent deux valeurs pour l'angle optimal de l'inclinaison, un pour l'été ( $\varphi-20$ ) et l'autre pour l'hiver ( $\varphi+ 20$ ), Dans les dernières années, les programmes informatiques ont été utilisés et les résultats ont montré que l'angle optimum de l'inclinaison est presque égal à la latitude  $\varphi$  du lieu [21].

# Chapitre IV

## Le système couplé distillateur-capteur

## Introduction

L'étude théorique de deux systèmes, distillateur plan-capteur et distillateur hot box-capteur est entreprise successivement dans le régime permanent puis dans le régime transitoire. Pour cela nous établirons les bilans thermiques au niveau de chaque partie des deux systèmes.

### IV.1- Le système couplé distillateur plan-capteur

#### IV.1.1- Description du système couplé distillateur plan -capteur

Dans cette installation (figureIV.1), le distillateur plan est essentiellement constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau saumâtre ou eau de mer). Sous l'action du flux solaire  $G$ , transmis par la couverture transparente, l'eau s'échauffe et une partie de celle-ci s'évapore. La vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre et le condensât est récupéré par un récepteur. Un appoint d'eau compense le débit de distillat. Afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur, les parois latérales et inférieure sont isolées. Le distillateur est raccordé par des tubes au capteur solaire plan à circulation de liquide caloporteur (eau) constitué d'un absorbeur avec un tube en cuivre en forme de serpentin, une couverture transparente en verre trempé et un coffre isolé par de la laine de verre ; le système fonctionne en thermosiphon.

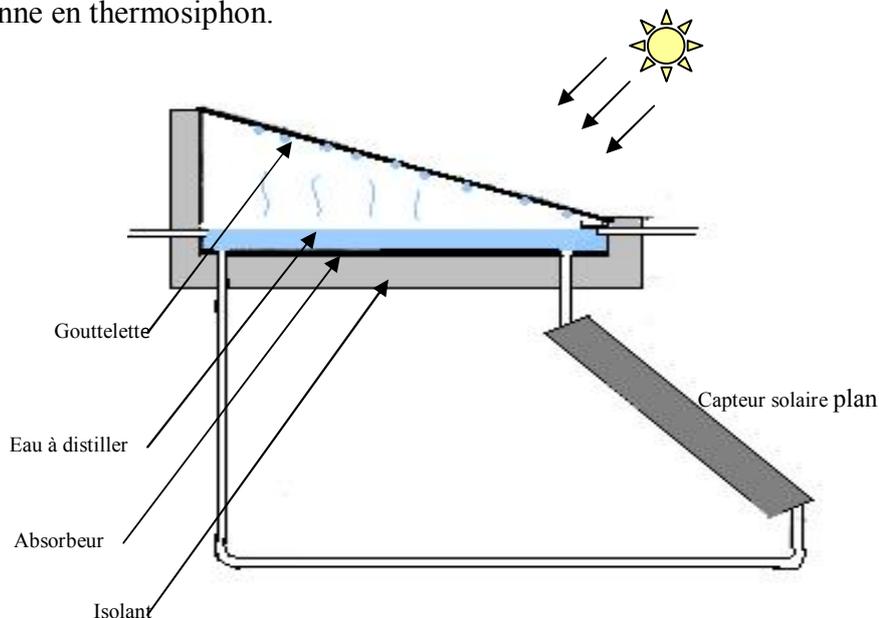


Figure IV.1- Le système distillateur plan-capteur

### IV.1.2- Bilan thermique du système distillateur plan-capteur

Nous établirons successivement le bilan thermique du distillateur puis du capteur. Pour cela des hypothèses simplificatrices ont été adoptées :

- Le ciel est assimilé à un corps noir.
- La chaleur emportée par le distillat est supposée négligeable.
- La température de chaque composant du système est uniforme.
- La concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse.
- La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité et la condensation se fait uniquement sur la couverture).
- Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes.
- La couverture est propre.
- L'eau est statique dans le bac du distillateur.
- Les pertes par conduction dans les tubes qui emportent le fluide caloporteur sont négligeables.

#### IV.1.2.1- Le distillateur plan

Le bilan thermique du distillateur est établi pour la vitre (côtés intérieur et extérieur), l'eau salée, la surface noire (l'absorbeur) et l'isolant (côtés intérieur et extérieur) [22].

##### IV.1.2.1.1- Régime permanent

- **Bilan thermique de la vitre**

- **Côté extérieur**

$$Q_{rvc} + Q_{cva} = Q_{cdv} + \frac{I}{2} \alpha_v \cdot G \cdot A_v \quad (\text{IV.1})$$

- **Côté intérieur**

$$Q_{rvw} + Q_{cvw} + Q_e = Q_{cdv} + \frac{I}{2} \alpha_v \cdot G \cdot A \quad (\text{IV.2})$$

- **Bilan thermique de la masse d'eau**

$$Q_{rvw} + Q_{cww} + Q_e + m_d \cdot C_w \cdot (T_w - T_a) = Q_{cap} + Q_{cwb} + \alpha_t \cdot G \cdot A_w \quad (IV.3)$$

- **Bilan thermique de l'absorbeur**

$$Q_{cwb} + Q_{bis} = \tau \cdot G \cdot A_{ab} \quad (IV.4)$$

- **Bilan thermique de l'isolant**

- **Côté intérieur**

$$Q_{cdi} = Q_{bis} \quad (IV.5)$$

- **Côté extérieur**

$$Q_{ris} + Q_{cis} = Q_{cdi} \quad (IV.6)$$

Avec :

$Q_{rvc}$  : Le flux échangé par rayonnement entre le côté extérieur de la vitre et le ciel.

$Q_{cva}$  : Le flux échangé par convection entre le côté extérieur de la vitre et le milieu ambiant.

$Q_{cdv}$  : Le flux échangé par conduction dans la vitre.

$Q_{rvw}$  : Le flux échangé par rayonnement entre le côté intérieur de la vitre et la masse d'eau.

$Q_{cww}$  : Le flux échangé par convection entre le côté intérieur de la vitre et la masse d'eau.

$Q_e$  : Le flux de chaleur échangé par évaporation.

$Q_{cap}$  : Le flux de chaleur apporté par le capteur.

$Q_{cwb}$  : Le flux de chaleur apporté par l'absorbeur.

$Q_{bis}$  : Le flux de chaleur cédé à l'isolant.

$Q_{cdi}$  : Le flux échangé par conduction dans l'isolant.

$Q_{ris}$ ,  $Q_{cis}$  respectivement les flux cédés par rayonnement et par convection du côté extérieur de l'isolant.

$\alpha_v G A_v$  : Le flux de chaleur absorbé par la vitre, avec  $\alpha_v$  l'absorptivité de la vitre.

$\alpha_t G A$  : Flux de chaleur effectivement absorbé par la masse d'eau.

Le coefficient  $\alpha_t$  est obtenu en utilisant les caractéristiques optiques et thermiques du distillateur par la relation [23] :

$$\alpha_t = \alpha_w \cdot \tau_v + \alpha_f \cdot \tau_w \cdot \tau_v \quad (\text{IV.7})$$

Avec :

$\alpha_w$ ,  $\alpha_f$  respectivement le facteur total d'absorption de l'eau et du fond du distillateur.

$\tau_w$ ,  $\tau_v$  respectivement les facteurs de transmission de l'eau et de la vitre.

$\tau \cdot G \cdot A_{ab}$  : Le flux de chaleur absorbé par l'absorbeur.

$\tau$  : Coefficient de transmission global de l'eau et de la vitre.

$\dot{m}_d$  étant le débit (journalier ou instantané, rapporté généralement à l'unité de surface) ou production du distillateur.

#### IV.1.2.1.2- Régime transitoire

Dans ce cas, il apparaît une quantité de chaleur  $Q_S$  représentant la puissance thermique provenant du réchauffement du distillateur. En notant  $m_i$  la masse d'un élément constitutif du distillateur et  $C_i$  sa chaleur massique on peut écrire [4]:

$$Q_S = \sum_i m_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} \quad (\text{IV.8})$$

Le bilan thermique en régime transitoire pour le distillateur plan est alors écrit pour chaque partie du distillateur comme suit :

- **Bilan thermique de la vitre**

- **Côté extérieur de la vitre**

$$Q_{rvc} + Q_{cva} + \frac{m_v C_v}{2} \cdot \frac{dT_{ve}}{dt} = Q_{cdv} + \frac{l}{2} \alpha_v \cdot G \cdot A_v \quad (\text{IV.9})$$

- **Côté intérieur de la vitre**

$$Q_{rvw} + Q_{cvw} + Q_e + \frac{m_v C_v}{2} \cdot \frac{dT_{vi}}{dt} = Q_{cdv} + \frac{l}{2} \alpha_v \cdot G \cdot A_v \quad (\text{IV.10})$$

- **Bilan thermique de la masse d'eau**

$$Q_{rvw} + Q_{cvw} + Q_e + m_w \cdot C_w \cdot \frac{dT_w}{dt} + m_d \cdot C_w \cdot (T_w - T_a) = Q_{cap} + Q_{cwb} + \alpha_t \cdot G \cdot A_w \quad (\text{IV.11})$$

- **Bilan thermique de l'absorbeur**

$$Q_{cwb} + Q_{bis} + m_{ab} \cdot C_{ab} \cdot \frac{dT_{ab}}{dt} = \tau \cdot G \cdot A_{ab} \quad (\text{IV.12})$$

- **Bilan thermique de l'isolant**

- **Côté intérieur de l'isolant**

$$Q_{cdi} + \frac{m_{is} \cdot C_{is}}{2} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} = Q_{bis} \quad (\text{IV.13})$$

- **Côté extérieur de l'isolant**

$$Q_{ris} + Q_{cis} + \frac{m_{is} \cdot C_{is}}{2} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} = Q_{cdi} \quad (\text{IV.14})$$

#### IV.1.2.1.3- Les différents flux thermiques échangés pour le distillateur plan

L'échange thermique, à l'intérieur et à l'extérieur du distillateur, se réalise par l'intermédiaire de quatre modes de transferts thermiques, par convection, par rayonnement, par évaporation et par conduction.

##### IV.1.2.1.3.1- Flux thermiques échangés par convection

Suivant Kumar et Tiwari, le taux de transfert de la chaleur par convection est décrit par l'équation générale [24], [25]:

$$Q_c = h_c \cdot \Delta T \cdot A \quad (\text{IV.15})$$

Où  $h_c$  est le coefficient de transfert convectif.

On peut alors déduire que :

- Les flux de chaleur échangés par convection entre la vitre et l'isolant avec l'ambiance sont donnés respectivement par les expressions:

$$Q_{cva} = h_{cva} \cdot (T_{ve} - T_a) \cdot A_v \quad (\text{IV.16})$$

$$Q_{cis} = h_{cisa} \cdot (T_{ise} - T_a) \cdot A_v \quad (\text{IV.17})$$

Les coefficients  $h_{cva}$ ,  $h_{cis}$  sont donnés par la relation [25], [26]:

$$h_{cis} = h_{cva} = 5.7 + 3.8 \cdot V \quad (\text{IV.18})$$

Où  $V$  est la vitesse du vent.

- Le flux échangé par convection entre la vitre et la masse d'eau a pour expression:

$$Q_{cvw} = h_{cvw} \cdot (T_w - T_{vi}) \cdot A_w \quad (\text{IV.19})$$

D'après R.V.Dunkle, le coefficient d'échange convectif  $h_{cvw}$  est exprimé par la relation [24], [25]:

$$h_{c_{vw}} = 0.884 \cdot \left[ (T_w - T_{vi}) + \frac{(P_w - P_v) \cdot (T_w + 273)}{268.9 \cdot 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{IV.20})$$

$T_w$  et  $T_{vi}$  étant respectivement les températures de l'eau et de la face intérieure de la vitre.

$P_w$ ,  $P_v$  les pressions partielles de la vapeur d'eau respectivement aux températures  $T_w$  et  $T_{vi}$

Les pressions partielles de l'eau et de la vitre sont données par Fernandez et Chargoy [27]:

$$P = \exp \left[ 25.317 - \left( \frac{5144}{273 + T} \right) \right] \quad (\text{IV.21})$$

Pour un intervalle de température entre 15°C et 90°C, Touré et Meukam [28], donnent une autre relation:

$$P = 7235 - 431.43 \cdot T + 10.76 \cdot T^2 \quad (\text{IV.22})$$

- Le flux échangé par convection entre la masse d'eau et l'absorbeur:

$$Q_{c_{wb}} = h_{c_{wb}} \cdot (T_{ab} - T_w) \cdot A_{ab} \quad (\text{IV.23})$$

$T_{ab}$ ,  $T_w$ , respectivement les température de l'absorbeur et de l'eau.

Généralement le coefficient d'échange convectif figure dans le nombre de Nusselt :

$$h_{c_{wb}} = \frac{Nu \cdot e_w}{\lambda} \quad (\text{IV.24})$$

D'après A.K. Tiwari et G.N. Tiwari [29], le nombre de Nusselt a pour expression :

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (\text{IV.25})$$

$G_r$  et  $P_r$  respectivement les nombres de Grashoff et de Prandlt.

$$Gr = \frac{e_w^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_{ab} - T_w)}{\mu_w^2} \quad (\text{IV.26})$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu_w \cdot C_p}{\lambda} \quad (\text{IV.27})$$

$e_w$ ,  $\mu_w$ ,  $\lambda$  étant respectivement la profondeur, la viscosité dynamique et la conductivité thermique de l'eau.

$\beta$  : Coefficient de dilatation thermique de l'eau.

Les valeurs C et n sont en fonction du nombre de Grashoff [8] :

Un conduit thermique     $\text{Gr} < 10^5$              $C=1$              $n=0$

Pour un débit laminaire     $10^5 < \text{Gr} < 2 \cdot 10^7$      $C=(0.54 \cdot \lambda)/L$      $n=1/4$

Pour un débit turbulent     $2 \cdot 10^7 < \text{Gr}$              $C=0.14$              $n=1/3$

#### IV.1.2.1.3.2- Flux thermiques échangés par rayonnement

- Le côté extérieur de la vitre échange la chaleur par rayonnement avec le ciel selon la relation suivante :

$$Q_{rvc} = h_{rvc} \cdot (T_{ve} - T_c) \cdot A_v \quad (\text{IV.28})$$

Avec :

$$h_{rvc} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot \left[ (T_v + 273)^2 + (T_c + 273)^2 \right] \cdot \left[ (T_v + 273) + (T_c + 273) \right] \quad (\text{IV.29})$$

$\sigma$ , constante de Stephan Boltzman égale à  $5,669 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{K}^4$

$T_c$ , la température du ciel est donnée par la relation empirique [4]:

$$T_c = 0.0552 T_a^{1,5} \quad (\text{IV.30})$$

$T_v$ , la température moyenne de la vitre :

$$T_v = \frac{T_{vi} + T_{ve}}{2} \quad (\text{IV.31})$$

- À l'extérieur de l'isolant, l'échange de chaleur par rayonnement s'effectue avec le sol :

$$Q_{ris} = h_{ris} \cdot (T_{ise} - T_{sol}) \cdot A_{is} \quad (IV.32)$$

$$h_{ris} = \varepsilon_{is} \sigma \left[ (T_{ise} + 273)^2 + (T_{sol} + 273)^2 \right] \cdot [(T_{ise} + 273) + (T_{sol} + 273)] \quad (IV.33)$$

$\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_{is}$  étant les émissivités de la vitre et de l'isolant.

- Entre la masse d'eau et la vitre, l'échange radiatif est exprimé par :

$$Q_{rvw} = h_{rvw} \cdot (T_w - T_{vi}) \cdot A_w \quad (IV.34)$$

Où  $h_{rvw}$  est donné par [30]:

$$h_{rvw} = F_{12} \cdot \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot \left[ (T_w + 273)^2 + (T_{vi} + 273)^2 \right] \cdot [T_w + T_{vi} + 546] \quad (IV.35)$$

$$\varepsilon_{eff} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right] \quad (IV.36)$$

$\varepsilon_w$ ,  $\varepsilon_v$  étant respectivement les émissivités de la masse d'eau et de la vitre.

#### IV.1.2.1.3.3- Flux thermiques échangés par évaporation

Le transfert de masse s'accompagne d'un transfert de chaleur appelé transfert de chaleur latente. Nous pouvons l'exprimer par la relation [31] :

$$dQ_e = L_v(T_w) \cdot d\dot{m} = L_v(T_w) \cdot \frac{h_{cc}}{R_v \cdot T} \cdot [P_w - P_{vi}] \cdot dA \quad (IV.37)$$

$d\dot{m}$ , étant le débit d'eau évaporée sur la surface  $dA$  du liquide.

L'échange de chaleur par évaporation entre la masse d'eau et la vitre est donné par la relation [32] :

$$Q_e = h_{ev} \cdot (T_w - T_{vi}) \cdot A_w \quad (IV.38)$$

$$h_{ev} = 16.273 \cdot 10^{-3} \cdot h_{cvw} \cdot \frac{(P_w - P_{vi})}{(T_w - T_{vi})} \quad (\text{VI.39})$$

La production horaire de l'eau est donnée par [33]:

$$\dot{m}_{ev} = \frac{h_{ev} \cdot (T_w - T_{vi}) \cdot 3600}{L_v} \quad (\text{IV.40})$$

$L_v$  est la chaleur latente de vaporisation, elle dépend de la température [34] :

$$L_v(T) = 3408 - 5.21 \cdot T + 0.01 \cdot T^2 - 1.194 \cdot T^3 \quad (\text{IV.41})$$

#### IV.1.2.1.3.4- Flux thermiques échangés par conduction

- Conduction de chaleur au sein de la vitre :

$$Q_{cdv} = h_{cdv} \cdot (T_{vi} - T_{ve}) \cdot A_v \quad (\text{IV.42})$$

$$h_{cdv} = \frac{\lambda_v}{e_v} \quad (\text{IV.43})$$

$\lambda_v$ ,  $e_v$ ,  $A_v$  étant respectivement la conductivité thermique, l'épaisseur et la surface de la vitre.

- Le flux de chaleur échangé par conduction entre l'isolant et l'absorbeur :

$$Q_{bis} = h_{bis} \cdot (T_{ab} - T_{isi}) \cdot A_{ab} \quad (\text{IV.44})$$

$$h_{bis} = \frac{\lambda_{ab}}{e_{ab}} \quad (\text{IV.45})$$

$\lambda_{ab}$ ,  $e_{ab}$ ,  $A_{ab}$  étant respectivement la conductivité thermique, l'épaisseur et la surface de l'absorbeur.

- La conduction de chaleur au sein de l'isolant est donnée par:

$$Q_{cdi} = h_{cdi} \cdot (T_{isi} - T_{ise}) \cdot A_{is} \quad (\text{IV.46})$$

$$h_{cdi} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \quad (\text{IV.47})$$

$\lambda_{is}$ ,  $e_{is}$ ,  $A_{is}$  étant respectivement la conductivité thermique, l'épaisseur et la surface de l'isolant.

#### IV.1.2.2- Le capteur

L'écriture du bilan thermique pour chaque composant du capteur se fait de la même manière que pour le distillateur, nous avons ainsi :

##### IV.1.2.2.1- Régime permanent

- **Bilan thermique de la vitre**

- **Côté extérieur**

$$Q_{rvc}^c + Q_{cva}^c = Q_{cdv}^c + \frac{I}{2} \alpha_{vc} \cdot G \cdot A_{vc} \quad (\text{IV.48})$$

- **Côté intérieur**

$$Q_{rbv}^c + Q_{cbv}^c = Q_{cdv}^c + \frac{I}{2} \alpha_{vc} \cdot G \cdot A_{vc} \quad (\text{IV.49})$$

- **Bilan thermique de l'absorbeur**

$$Q_{cbv}^c + Q_{rbv}^c + Q_{cbf}^c = \tau_v \cdot \alpha_{ab} \cdot G \cdot A_{abc} \quad (\text{IV.50})$$

- **Bilan thermique du fluide caloporteur**

$$Q_{cbf}^c + Q_{fis}^c - 2 \cdot m_{cir} \cdot C_p \cdot (T_f - T_a) = 0 \quad (\text{IV.51})$$

- **Bilan thermique de l'isolant**

- **Côté intérieur**

$$Q_{fis}^c - Q_{cdi}^c = 0 \quad (\text{IV.52})$$

**- Côté extérieur**

$$Q_{ris}^c + Q_{cis}^c = Q_{cdi}^c \quad (IV.53)$$

Avec :

$Q_{rvc}^c$  : Le flux échangé par rayonnement entre la face extérieure de la vitre du capteur et le ciel.

$Q_{cva}^c$  : Le flux échangé par convection entre la face extérieure de la vitre du capteur et le milieu ambiant.

$Q_{cdv}^c$  : Le flux échangé par conduction au sein de la vitre du capteur.

$Q_{cbv}^c, Q_{rbv}^c$  : Les flux de chaleur échangés par convection et par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur.

$Q_{cbf}^c$  : Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

$Q_{fis}^c$  : Le flux de chaleur échangé par convection entre le fluide caloporteur et le côté intérieur de l'isolant.

$2.m_{cir}.C_p.(T_f - T_a)$  : Chaleur emportée par le fluide caloporteur.

$Q_{cdi}^c$  : Le flux de chaleur échangé par conduction au sein de l'isolant.

$Q_{ris}^c$  : Le flux cédé par rayonnement du côté extérieur de l'isolant.

$Q_{cis}^c$  : Le flux échangé par convection entre côté extérieur de l'isolant du capteur et le milieu ambiant.

$\tau_v$  et  $\alpha_{ab}$ , les coefficients de transmission de la vitre et d'absorption de l'absorbeur.

**IV.1.2.2.2- Régime transitoire**

- **Bilan thermique de la vitre**

**- Côté extérieur de la vitre**

$$Q_{rv}^c + Q_{cva}^c + \frac{m_{vc} \cdot C_{vc}}{2} \cdot \frac{dT_{vec}}{dt} = Q_{cdv}^c + \frac{1}{2} \alpha_{vc} \cdot G \cdot A_{vc} \quad (IV.54)$$

**- Côté intérieur de la vitre**

$$Q_{rbv}^c + Q_{cbv}^c + \frac{m_{vc} \cdot C_{vc}}{2} \cdot \frac{dT_{vic}}{dt} = Q_{cdv}^c + \frac{1}{2} \alpha_{vc} \cdot G \cdot A_{vc} \quad (IV.55)$$

**• Bilan thermique de l'absorbeur**

$$Q_{cbv}^c + Q_{rbv}^c + Q_{cbf}^c + m_{ab} \cdot C_{ab} \cdot \frac{dT_{abc}}{dt} = \tau_v \cdot \alpha_{ab} \cdot G \cdot A_{abc} \quad (IV.56)$$

**• Bilan thermique du fluide caloporteur**

$$Q_{cbf}^c + Q_{fis}^c - 2 \cdot m_{cir} \cdot C_p \cdot (T_f - T_a) = 0 \quad (IV.57)$$

**• Bilan thermique de l'isolant****- Côté intérieur de l'isolant**

$$Q_{fis}^c - Q_{cdi}^c + \frac{m_{is} \cdot C_{is}}{2} \cdot \frac{dT_{iic}}{dt} = 0 \quad (IV.58)$$

**- Côté extérieur de l'isolant**

$$Q_{ris}^c + Q_{cis}^c + \frac{m_{is} \cdot C_{is}}{2} \cdot \frac{dT_{iec}}{dt} = Q_{cdi}^c \quad (IV.59)$$

**IV.1.2.2.3- Les différents flux thermiques échangés dans le capteur**

L'échange thermique s'effectue par convection, par rayonnement et par conduction.

**IV.1.2.2.3.1- Flux thermiques échangés par convection**

- Les flux de chaleur échangés par convection entre la vitre et l'ambiance d'une part et l'isolant et le milieu extérieur d'autre part sont donnés respectivement par les expressions :

$$Q_{cva}^c = h_{cvc} \cdot (T_{vec} - T_a) \cdot A_{vc} \quad (IV.60)$$

$$Q_{cis}^c = h_{cic} \cdot (T_{iec} - T_{sol}) \cdot A_{ic} \quad (IV.61)$$

Les coefficients  $h_{cvc}$ ,  $h_{cic}$  sont donnés selon la relation [26]:

$$h_{cvc} = h_{cic} = 5 \cdot 7 + 3 \cdot 8 \cdot V \quad (IV.62)$$

- Le flux de chaleur échangé par convection entre la vitre et l'absorbeur :

$$Q_{cbv}^c = h_{cbv} \cdot (T_{abc} - T_{vic}) \cdot A_{abc} \quad (IV.63)$$

D'après [35] le coefficient  $h_{cbv}$  est déterminé par la corrélation :

$$h_{cbv} = 1.14 \cdot \frac{(T_{abc} - T_{vic})^{0.31}}{e_{vb}^{0.07}} \cdot \left[ 1 - 0.0018 \cdot \left( \left( \frac{T_{abc} - T_{vic}}{2} \right) - 10 \right) \right] \quad (IV.64)$$

$e_{vb}$  : l'épaisseur entre la vitre et l'absorbeur.

- Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur est :

$$Q_{cbf}^c = h_{cbf} \cdot (T_{abc} - T_f) \cdot A_{bf} \quad (IV.65)$$

$$h_{cbf} = \frac{Nu_l \cdot \lambda}{D_{int}} \quad (IV.66)$$

$\lambda$ ,  $D_{int}$ ,  $A_{bf}$  étant respectivement la conductivité thermique de l'eau, le diamètre interne des tubes et de la surface de contact entre le fluide caloporteur et l'absorbeur.

Le nombre de Nusselt est donné par la relation de Seider et Tate [31]:

$$\text{- Pour le régime laminaire : } \quad Nu_l = 1.86 \left( \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{D_{int}}{L_{serp}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{\mu_w'}{\mu_{wb}} \right)^{0.14} \quad (IV.67)$$

$\mu_w$  étant la viscosité dynamique de l'eau.

$$\mu_{wb}' = \mu_w(T_{abc})$$

$$\text{- Pour le régime turbulent : } \quad Nu_l = 0.023 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.33} \quad (IV.68)$$

- Le flux de chaleur échangé par convection entre le fluide caloporteur et l'isolant :

$$Q_{fis}^c = h_{fis} \cdot (T_{iic} - T_f) \cdot A_{fis} \quad (IV.69)$$

$$h_{fis} = \frac{Nu_2 \cdot \lambda}{D_{int}} \quad (IV.70)$$

Le nombre de Nusselt est donné par la relation de Seider et Tate [31]:

- Pour le régime laminaire :

$$Nu_2 = 1.86 \left( \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{D_{int}}{L_{serp}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{\mu_w}{\mu_{wi}} \right)^{0.14} \quad (IV.71)$$

Avec  $\mu_w' = \mu_{wi}(T_{iic})$

- Pour le régime turbulent :

$$Nu_2 = 0.023 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.33} \quad (IV.72)$$

#### IV.1.2.2.3.2- Flux thermiques échangés par rayonnement

- Les flux de chaleur échangés par rayonnement entre la vitre et le ciel, et entre l'isolant et le sol sont donnés respectivement par les expressions :

$$Q_{rvc}^c = h_{rvc} \cdot (T_{vec} - T_c) \cdot A_{vc} \quad (IV.73)$$

$$Q_{ris}^c = h_{ric} \cdot (T_{ieic} - T_{sol}) \cdot A_{ic} \quad (IV.74)$$

$$h_{rvc} = \varepsilon_{vc} \cdot \sigma \cdot \left[ (T_{vc} + 273)^2 + (T_c + 273)^2 \right] \cdot \left[ (T_{vc} + 273) + (T_c + 273) \right] \quad (IV.75)$$

$$h_{ric} = \varepsilon_{ic} \cdot \sigma \cdot \left[ (T_{ieic} + 273)^2 + (T_{sol} + 273)^2 \right] \cdot \left[ (T_{ieic} + 273) + (T_{sol} + 273) \right] \quad (IV.76)$$

$T_c$  : La température du ciel est donnée par la relation empirique (IV.30) [4], [36].

$T_{vc}$  : La température moyenne de la vitre du capteur :

$$T_{vc} = \frac{T_{vic} + T_{vec}}{2}$$

- Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre :

$$Q_{rbv}^c = h_{rbv} \cdot (T_{abc} - T_{vic}) \cdot A_{abc} \quad (IV.77)$$

Le coefficient  $h_{rbv}$  est donné selon la relation [3]:

$$h_{rbv} = \frac{\sigma \cdot ((T_{abc} + 273) + (T_{vic} + 273)) \cdot ((T_{abc} + 273)^2 + (T_{vic} + 273)^2)}{\frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} + 1 + \frac{1 - \varepsilon_{bc}}{\varepsilon_{bc}}} \quad (IV.78)$$

#### IV.1.2.2.3.3- Flux thermiques échangés par conduction

- Au sein de la vitre du capteur :

$$Q_{cdv}^c = \frac{\lambda_{vc}}{e_{vc}} \cdot (T_{vic} - T_{vec}) \cdot A_{vc} \quad (IV.79)$$

- Au sein de l'isolant du capteur :

$$Q_{cdi}^c = \frac{\lambda_{ic}}{e_{ic}} \cdot (T_{iic} - T_{iec}) \cdot A_{ic} \quad (IV.80)$$

#### IV.1.2.3- Le thermosiphon

Les frottements du fluide caloporteur dans les conduits entraînent des pertes de charge qui sont principalement fonction de la vitesse d'écoulement du fluide. La connaissance des pertes de charge permet d'assurer un écoulement suffisant du fluide en convection naturelle (thermosiphon) [2]:

$$\Delta H_g = \Delta H_{lin} + \Delta H_{sing} \quad (IV.81)$$

$\Delta H_{lin}$ ,  $\Delta H_{sing}$ , étant les pertes de charge linéaires et singulières.

- **Pertes de charge linéaires**

$$\Delta H_{lin} = A \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (IV.82)$$

A : coefficient de perte de charge.

d : diamètre de tube de raccordement.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu} = \frac{10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1.32 \cdot 10^{-2}}{0.5 \cdot 10^{-3}}$$

Re=1320<2100, le régime d'écoulement est laminaire, donc le coefficient de perte de

charge  $A = \frac{64}{Re}$ , on a  $V = \frac{mf}{\rho \cdot S}$  et  $S = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$

$$\Delta H_{lin} = \frac{64 \cdot \mu}{\rho \cdot V \cdot d} \cdot \frac{L}{2 \cdot g \cdot d} \cdot \left(\frac{mf}{\rho \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2}\right)}\right)^2$$

$$\Delta H_{lin} = \frac{128 \cdot \nu \cdot L \cdot mf}{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot d^4} \quad (IV.83)$$

- **Pertes de charges singulières**

$$\Delta H_{sing} = B \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (IV.84)$$

B : coefficient de perte de charge

## IV.2- Le système couplé distillateur hot box-capteur

### IV.2.1- Description du système couplé distillateur hot box -capteur

Dans cette deuxième installation (figure IV.2) le distillateur plan est remplacé par un distillateur hot box. Ce type de distillateur est constitué d'un bac en fibre de verre, la partie supérieure du bac est surmontée par deux vitres ordinaires formant un toit en V inversé, inclinées par rapport à l'horizontale et fixées aux rebords du bac par du mastic silicone, qui assure l'étanchéité extérieure et intérieure du distillateur. Le capteur a été étudié précédemment notre intérêt portera dans cette partie uniquement sur le distillateur hot box.

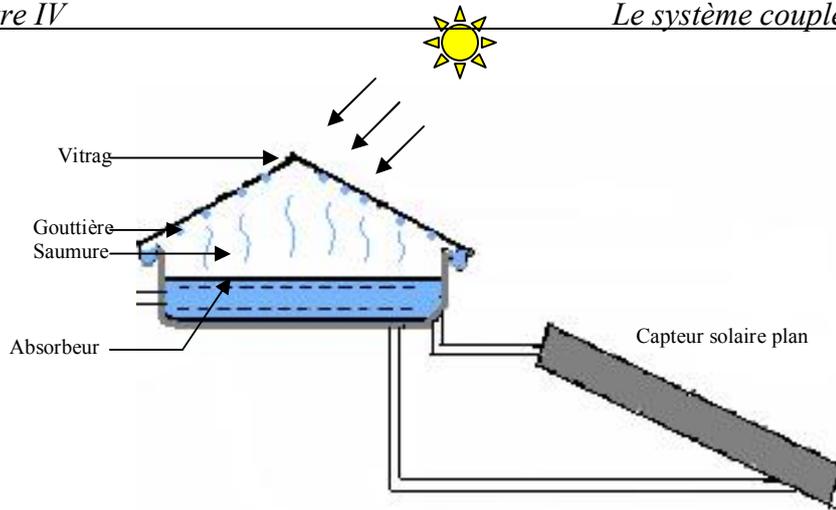


Figure IV.2- Le système distillateur hot box-capteur

#### IV.2.2- Bilan thermique du système distillateur hot box-capteur

L'écriture du bilan thermique pour chaque composant du distillateur hot box orienté est-ouest, se fait de manière similaire que pour le distillateur plan, sauf en ce qui concerne la partie supérieure (vitrage), on notera le côté de la vitre incliné vers l'est par 1 et le côté incliné vers l'ouest par 2.

- **Bilan thermique de la vitre inclinée vers l'est**

- **Côté extérieur**

$$Q_{rvc1} + Q_{cva1} + \frac{m_{v1} C_{v1}}{2} \cdot \frac{dT_{ve1}}{dt} = Q_{cdv1} + \frac{1}{2} \alpha_v \cdot G \cdot A_{v1} \quad (\text{IV.86})$$

- **Côté intérieur**

$$Q_{rvw1} + Q_{cww1} + Q_{el} + Q_{r12} + \frac{m_{v1} C_{v1}}{2} \cdot \frac{dT_{vi1}}{dt} = Q_{cdv1} + \frac{1}{2} \alpha_v \cdot G \cdot A_{v1} \quad (\text{IV.87})$$

- **Bilan thermique de la vitre inclinée vers l'ouest**

- **Côté extérieur**

$$Q_{rvc2} + Q_{cva2} + \frac{m_{v2} C_{v2}}{2} \cdot \frac{dT_{ve2}}{dt} = Q_{cdv2} + \frac{1}{2} \alpha_v \cdot G \cdot A_{v2} \quad (\text{IV.88})$$

**- Côté intérieur**

$$Q_{rvw2} + Q_{cww2} + Q_{e2} + Q_{r12} + \frac{m_{v2} C_{v2}}{2} \cdot \frac{dT_{vi2}}{dt} = Q_{cdv2} + \frac{1}{2} \alpha_v \cdot G \cdot A_{v2} \quad (\text{IV.89})$$

**• Bilan thermique de la masse d'eau**

$$\begin{aligned} Q_{rvw1} + Q_{cww1} + Q_{e1} + Q_{rvw2} + Q_{cww2} + Q_{e2} + m_w C_w \cdot \frac{dT_w}{dt} + m_d \cdot C_w \cdot (T_w - T_a) \\ = Q_{cap} + Q_{cwb} + \alpha_t \cdot G \cdot A_w \end{aligned} \quad (\text{IV.90})$$

**• Bilan thermique de l'absorbeur**

$$Q_{cwb} + Q_{bis} + m_{ab} C_{ab} \cdot \frac{dT_{ab}}{dt} = \tau \cdot G \cdot A_{ab} \quad (\text{IV.91})$$

**• Bilan thermique de l'isolant****- Côté intérieur de l'isolant**

$$Q_{cdi} + \frac{m_{is} C_{is}}{2} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} = Q_{bis} \quad (\text{IV.92})$$

**- Côté extérieur de l'isolant**

$$Q_{ris} + Q_{cis} + \frac{m_{is} C_{is}}{2} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} = Q_{cdi} \quad (\text{IV.93})$$

Avec :

$Q_{rvc1}$ : Le flux échangé par rayonnement entre le côté extérieur de la vitre orientée vers l'est (de surface  $A_{v1}$ ) et le ciel.

$Q_{rvc2}$ : Le flux échangé par rayonnement entre le côté extérieur de la vitre orientée vers l'ouest (de surface  $A_{v2}$ ) et le ciel.

$Q_{cva1}$  : Le flux échangé par convection entre le côté extérieur de la vitre orientée vers l'est et le milieu ambiant.

$Q_{cva2}$  : Le flux échangé par convection entre le côté extérieur de la vitre orientée vers l'ouest et le milieu ambiant.

$Q_{cdv1}, Q_{cdv2}$  : Les flux échangés par conduction dans les deux parties de la vitre.

$Q_{r12}$  : Le flux échangé par rayonnement entre le côté intérieur de la vitre orientée vers l'est et le côté intérieur de la vitre orientée vers l'ouest.

$Q_{rvw1}$  : Le flux échangé par rayonnement entre le côté intérieur de la vitre orientée vers l'est et la masse d'eau.

$Q_{rvw2}$  : Le flux échangé par rayonnement entre le côté intérieur de la vitre orientée vers l'ouest et la masse d'eau.

$Q_{cvw1}$  : Le flux échangé par convection entre le côté intérieur de la vitre orientée vers l'est et la masse d'eau.

$Q_{cvw2}$  : Le flux échangé par convection entre le côté intérieur de la vitre orientée vers l'ouest et la masse d'eau.

$Q_{e1}$  : Le flux de chaleur échangé par évaporation pour le côté est.

$Q_{e2}$  : Le flux de chaleur échangé par évaporation pour le côté ouest.

- Les flux de chaleur échangés par convection entre la vitre1 et la vitre2 avec l'ambiance sont donnés respectivement par les expressions:

$$Q_{cva1} = h_{cva1} \cdot (T_{ve1} - T_a) \cdot A_{v1} \quad (\text{IV.94})$$

$$Q_{cva2} = h_{cva2} \cdot (T_{ve2} - T_a) \cdot A_{v2} \quad (\text{IV.95})$$

Les coefficients  $h_{cva1}$ ,  $h_{cva2}$  sont donnés par la corrélation (VI.18)

- Les flux échangés par convection entre la vitre1 et la vitre2 d'un part, et la masse d'eau d'autre part ont pour expressions:

$$Q_{cvw1} = h_{cvw1} \cdot (T_w - T_{vi1}) \cdot A_w \quad (\text{IV.96})$$

$$Q_{cvw2} = h_{cvw2} \cdot (T_w - T_{vi2}) \cdot A_w \quad (\text{IV.97})$$

Les coefficients d'échange convectif  $h_{cvw1}$ ,  $h_{cvw2}$  sont donnée par la relation (VI.20).

- L'échange de chaleur par rayonnement entre les côtés extérieurs de la vitre 1 et de la vitre 2 avec le ciel est exprimé par:

$$Q_{rvc1} = h_{rvc1} \cdot (T_{ve1} - T_c) \cdot A_{v1} \quad (\text{IV.98})$$

$$Q_{rvc2} = h_{rvc2} \cdot (T_{ve2} - T_c) \cdot A_{v2} \quad (\text{IV.99})$$

Les coefficients d'échange convectif  $h_{rvc1}$ ,  $h_{rvc2}$  sont donnés par la relation (IV.29).

- L'échange de chaleur par évaporation entre la masse d'eau et la vitre1 d'une part et la vitre2 d'autre part est donné par les relations :

$$Q_{e1} = h_{ev1} \cdot (T_w - T_{vi1}) \cdot A_w \quad (\text{IV.100})$$

$$Q_{e2} = h_{ev2} \cdot (T_w - T_{vi2}) \cdot A_w \quad (\text{IV.101})$$

Les coefficients  $h_{ev1}$ ,  $h_{ev2}$  sont donnés par la relation (IV.39)

- Entre la masse d'eau et les vitres 1 et 2, l'échange radiatif est exprimé par les relations :

$$Q_{rvw1} = h_{rvw1} \cdot (T_w - T_{vi1}) \cdot A_w \quad (\text{IV.102})$$

$$Q_{rvw2} = h_{rvw2} \cdot (T_w - T_{vi2}) \cdot A_w \quad (\text{IV.103})$$

Les coefficients  $h_{rvw1}$  et  $h_{rvw2}$  sont donnés par la relation (IV.35)

- La conduction de chaleur au sein de la vitre :

$$Q_{cdv1} = h_{cdv1} \cdot (T_{vi1} - T_{ve1}) \cdot A_{v1} \quad (\text{IV.104})$$

$$Q_{cdv2} = h_{cdv2} \cdot (T_{vi2} - T_{ve2}) \cdot A_{v2} \quad (\text{IV.105})$$

Les coefficients  $h_{cdv1}$  et  $h_{cdv2}$  sont donnés par la relation (IV.43)

- Le flux échangé par rayonnement entre le côté intérieur de la vitre1 et le côté intérieur de la vitre 2,  $Q_{r12}$  est donné par la relation :

$$Q_{r12} = h_{r12} \cdot (T_{vi1} - T_{vi2}) \cdot A_{v1} \quad (\text{IV.106})$$

Où  $h_{r12}$  est donné par la relation (IV.35)

$$h_{r12} = F_{12} \cdot \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot \left[ (T_{vi1} + 273)^2 + (T_{vi2} + 273)^2 \right] \cdot [T_{vi1} + T_{vi2} + 546] \quad (\text{IV.107})$$

$\varepsilon_v$  étant l'émissivité de la vitre.

### IV.3- Résolution numérique

Nous remplaçons les différents flux thermiques par leurs expressions, puis nous écrivons les équations des bilan thermiques au niveau de chaque partie composant le système, en fonction des températures comme suit :

#### IV.3.1- Pour le distillateur plan

$$(h_{rvc} + h_{cva} + \frac{\lambda_v}{e_v}) \cdot T_{ve} - \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot T_{vi} + \frac{m_v \cdot C_v}{2 \cdot A_v} \cdot \frac{dT_{ve}}{dt} = h_{rvc} \cdot T_c + h_{cva} \cdot T_a + \frac{1}{2} \alpha_v \cdot G \quad (\text{IV.108})$$

$$-\frac{\lambda_v}{e_v} \cdot T_{ve} + (h_{rvw} + h_{cww} + h_e + \frac{\lambda_v}{e_v}) \cdot T_{vi} - (h_{rvw} + h_{cww} + h_e) \cdot T_w + \frac{m_v \cdot C_v}{2 \cdot A_v} \cdot \frac{dT_{vi}}{dt} = \frac{1}{2} \alpha_v \cdot G \quad (\text{IV.109})$$

$$-(h_{rvw} + h_{cww} + h_e) \cdot T_{vi} + (h_{rvw} + h_{cww} + h_e + h_{cwb} + \frac{m_d \cdot C_w}{A_w} + \frac{m_{cir} \cdot C_w(T_{fs})}{A_w}) \cdot T_w - h_{cwb} \cdot T_{ab} + \frac{m_w \cdot C_w}{A_w} \cdot \frac{dT_w}{dt} = \frac{m_{cir} \cdot C_w(T_{fs})}{A_w} \cdot T_{fs} + \frac{m_d \cdot C_w}{A_w} \cdot T_a + \tau \cdot \alpha_v \cdot G \quad (\text{IV.110})$$

$$-h_{cwb} \cdot T_w + (h_{cwb} + \frac{\lambda_{ab}}{e_{ab}}) \cdot T_{ab} - \frac{\lambda_{ab}}{e_{ab}} \cdot T_{isi} + \frac{m_{ab} \cdot C_{ab}}{A_{ab}} \cdot \frac{dT_{ab}}{dt} = \tau_t \cdot \alpha_t \cdot G \quad (\text{IV.111})$$

$$-\frac{\lambda_{ab}}{e_{ab}} \cdot T_{ab} + (\frac{\lambda_{is}}{e_{is}} + \frac{\lambda_{ab}}{e_{ab}}) \cdot T_{isi} - \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot T_{ise} + \frac{m_{is} \cdot C_{is}}{2 \cdot A_{is}} \cdot \frac{dT_{isi}}{dt} = 0 \quad (\text{IV.112})$$

$$-\frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot T_{isi} + (h_{ris} + h_{cisa} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}}) \cdot T_{ise} + \frac{m_{is} \cdot C_{is}}{2 \cdot A_{is}} \cdot \frac{dT_{ise}}{dt} = h_{ris} \cdot T_{sol} + h_{cis} \cdot T_a \quad (\text{IV.113})$$

## IV.3.2- Pour le capteur

$$\left( h_{cvc} + h_{rvc} + \frac{\lambda_{vc}}{e_{vc}} \right) \cdot T_{vec} - \frac{\lambda_{vc}}{e_{vc}} \cdot T_{vic} + \frac{m_{vc} \cdot C_{vc}}{2 \cdot A_{vc}} \cdot \frac{dT_{vec}}{dt} = h_{cvc} \cdot T_a + h_{rvc} \cdot T_c + \frac{I}{2} \alpha_v \cdot G \quad (IV.114)$$

$$- \frac{\lambda_{vc}}{e_{vc}} \cdot T_{vec} + \left( h_{cbv} + h_{rbv} + \frac{\lambda_{vc}}{e_{vc}} \right) \cdot T_{vic} - (h_{cbv} + h_{rbv}) \cdot T_{abc} + \frac{m_{vc} \cdot C_{vc}}{2 \cdot A_{vc}} \cdot \frac{dT_{vic}}{dt} = \frac{I}{2} \alpha_v \cdot G \quad (IV.115)$$

$$- (h_{cbv} + h_{rbv}) \cdot T_{vic} + \left( h_{cbv} + h_{rbv} + h_{cbf} \cdot \frac{A_{fab}}{A_{abc}} \right) \cdot T_{abc} - \frac{A_{fab}}{A_{abc}} \cdot T_f + \frac{m_{ab} \cdot C_{ab}}{A_{abc}} \cdot \frac{dT_{abc}}{dt} = \tau_v \cdot \alpha_{ab} \cdot G \quad (IV.116)$$

$$- h_{cbf} \cdot T_{abc} + \left( h_{cbf} + h_{fis} \cdot \frac{A_{fis}}{A_{fab}} + \frac{2 \cdot m_{cir} \cdot C_p}{A_{fab}} \right) \cdot T_f - \frac{A_{fis}}{A_{fab}} \cdot T_{iic} = \frac{2 \cdot m_{cir} \cdot C_p}{A_{fab}} \cdot T_a \quad (IV.117)$$

$$- \frac{A_{fis}}{A_{is}} \cdot h_{fis} \cdot T_f + \left( \frac{A_{fis}}{A_{is}} \cdot h_{fis} + \frac{\lambda_{ic}}{e_{ic}} \right) \cdot T_{iic} - \frac{\lambda_{ic}}{e_{ic}} \cdot T_{iec} + \frac{m_{isc} \cdot C_{isc}}{2 \cdot A_{isc}} \cdot \frac{dT_{iic}}{dt} = 0 \quad (IV.118)$$

$$- \frac{\lambda_{ic}}{e_{ic}} \cdot T_{iic} + \left( h_{cic} + h_{ric} + \frac{\lambda_{ic}}{e_{ic}} \right) \cdot T_{iec} + \frac{m_{isc} \cdot C_{isc}}{2 \cdot A_{isc}} \cdot \frac{dT_{iec}}{dt} = h_{cic} \cdot T_a + h_{ric} \cdot T_{sol} \quad (IV.119)$$

## IV.3.3- Pour le hot box

$$(h_{rvc1} + h_{cva1} + \frac{\lambda_v}{e_v}) \cdot T_{ve1} - \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot T_{vi1} + \frac{m_v \cdot C_v}{2 \cdot A_{v1}} \cdot \frac{dT_{ve1}}{dt} = h_{rvc1} \cdot T_c + h_{cva1} \cdot T_a + \frac{I}{2} \alpha_v \cdot G \quad (IV.120)$$

$$- h_{r12} \cdot T_{vi2} - \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot T_{ve1} + (h_{r12} + h_{rwl} + h_{cwl} + h_{el} + \frac{\lambda_v}{e_v}) \cdot T_{vi1} - (h_{rwl} + h_{cwl} + h_{el}) \cdot T_w + \frac{m_v \cdot C_v}{2 \cdot A_{v1}} \cdot \frac{dT_{vi1}}{dt} = \frac{I}{2} \alpha_v \cdot G \quad (IV.121)$$

$$(h_{rvc2} + h_{cva2} + \frac{\lambda_v}{e_v}) \cdot T_{ve2} - \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot T_{vi2} + \frac{m_v \cdot C_v}{2 \cdot A_{v2}} \cdot \frac{dT_{ve2}}{dt} = h_{rvc2} \cdot T_c + h_{cva2} \cdot T_a + \frac{I}{2} \alpha_v \cdot G \quad (IV.122)$$

$$\begin{aligned}
& -h_{r12} \cdot T_{vi1} - \frac{\lambda_v}{e_v} \cdot T_{ve2} + (h_{r12} + h_{rvw2} + h_{cww2} + h_{e2} + \frac{\lambda_v}{e_v}) \cdot T_{vi2} - (h_{rvw2} + h_{cww2} + h_{e2}) \cdot T_w \\
& + \frac{m_v \cdot C_v}{2 \cdot A_{v2}} \cdot \frac{dT_{vi2}}{dt} = \frac{1}{2} \alpha_v \cdot G
\end{aligned} \tag{IV.123}$$

$$\begin{aligned}
& - (h_{rvw1} + h_{cww1} + h_{e1}) \cdot T_{vi1} - (h_{rvw2} + h_{cww2} + h_{e2}) \cdot T_{vi2} + (h_{rvw1} + h_{cww1} + h_{e1} + h_{rvw2} \\
& + h_{cww2} + h_{e2} + h_{cwb} + \frac{m_d \cdot C_w}{A_w} + \frac{m_{cir} \cdot C_w(T_{fs})}{A_w}) \cdot T_w - h_{cwb} \cdot T_{ab} + \frac{m_w \cdot C_w}{A_w} \cdot \frac{dT_w}{dt} \\
& = \frac{m_{cir} \cdot C_w(T_{fs})}{A_w} \cdot T_{fs} + \frac{m_d \cdot C_w}{A_w} \cdot T_a + \tau \cdot \alpha_v \cdot G
\end{aligned} \tag{IV.124}$$

$$-h_{cwb} \cdot T_w + (h_{cwb} + \frac{\lambda_{ab}}{e_{ab}}) \cdot T_{ab} - \frac{\lambda_{ab}}{e_{ab}} \cdot T_{isi} + \frac{m_{ab} \cdot C_{ab}}{A_{ab}} \cdot \frac{dT_{ab}}{dt} = \tau_t \cdot \alpha_t \cdot G \tag{IV.125}$$

$$-\frac{\lambda_{ab}}{e_{ab}} \cdot T_{ab} + (\frac{\lambda_{is}}{e_{is}} + \frac{\lambda_{ab}}{e_{ab}}) \cdot T_{isi} - \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot T_{ise} + \frac{m_{is} \cdot C_{is}}{2 \cdot A_{is}} \cdot \frac{dT_{isi}}{dt} = 0 \tag{IV.126}$$

$$-\frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \cdot T_{isi} + (h_{ris} + h_{cisa} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}}) \cdot T_{ise} + \frac{m_{is} \cdot C_{is}}{2 \cdot A_{is}} \cdot \frac{dT_{ise}}{dt} = h_{ris} \cdot T_{sol} + h_{cis} \cdot T_a \tag{IV.127}$$

#### IV.4- Traitement informatique

Les équations précédentes forment deux systèmes d'équations linéaires (capteur et distillateur) dont les inconnues sont les températures. Après la discrétisation, on peut écrire ces équations sous une forme matricielle et la résolution est obtenue par l'application de la méthode de GAUSS SEIDEL d'itération.

##### IV.4.1- Le distillateur

Les diverses étapes de résolution sont les suivantes :

- 1- Calcul des différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température et du temps à savoir :

- Les coefficients d'échanges thermiques par conduction à travers la couverture, le bac absorbant, et l'isolant.
  - Les coefficients d'échange thermique dû au vent.
- 2- Nous supposons au départ que chaque composant du distillateur est à la température ambiante  $T_a$ , sauf la température du bac qui est à une température légèrement supérieure et la température de la saumure qui est portée à la température de préchauffage.
- 3- Entrer la température de préchauffage pour chaque heure de la journée.
- 4- On calcule, à chaque heure de la journée :
- Le rayonnement solaire frappant un plan horizontal et un plan incliné.
  - La puissance absorbée par la vitre, le bac absorbant, et la saumure.
  - La température ambiante et la température du ciel.
- 5- Initialisation des températures des différents composants du distillateur, et on calcule pour les températures initiales :
- Les pressions partielles de la vapeur d'eau à la température de la saumure et la pression partielle de la vapeur à la température du côté intérieur de la couverture.
  - A la température  $T_w$  on calcule les propriétés de la saumure :
    - La masse volumique.
    - La conductivité thermique.
    - Les viscosités cinématique et dynamique.
    - La capacité thermique
    - La chaleur latente de vaporisation.
    - Le débit de circuit.
  - Calcul des coefficients d'échange thermique par rayonnement entre
    - La vitre (côté extérieur) et la voûte céleste.
    - La vitre (côté intérieur) et la saumure.

- L'isolant (côté extérieur) et le sol.
  - Calcul des coefficients d'échange thermique par convection entre :
    - La vitre (côté intérieur) et la saumure.
    - Le bac absorbant et la saumure.
  - Calcul du coefficient d'échange thermique par évaporation entre la vitre (côté intérieur) et la saumure.
  - Calcul des éléments de la matrice.
  - L'exécution de l'algorithme de GAUSS SEIDEL d'itération.
- 6- Si la convergence n'est pas atteinte la cinquième étape est reprise avec les températures obtenues.
- 7- Calcul de :
- La production.
  - L'efficacité globale.
  - L'efficacité interne.

#### IV.4.2- Le capteur

Les diverses étapes de résolution sont les suivantes :

- 1- Entrer les données et calcul des constantes.
- 2- Nous supposons au départ que chaque composant du capteur est à la température ambiante  $T_a$ , sauf les températures du fluide caloporteur, et du bac absorbant qui sont à des températures légèrement supérieures.
- 3- Calcul des différents échanges thermiques qui sont indépendant de la température et du temps à savoir :
  - Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers la couverture, le bac absorbant, et l'isolant.
  - Les coefficients d'échange thermique du au vent.
- 4- On calcule, à chaque heure de la journée :
  - Le rayonnement solaire frappant un plan horizontal et un plan incliné.

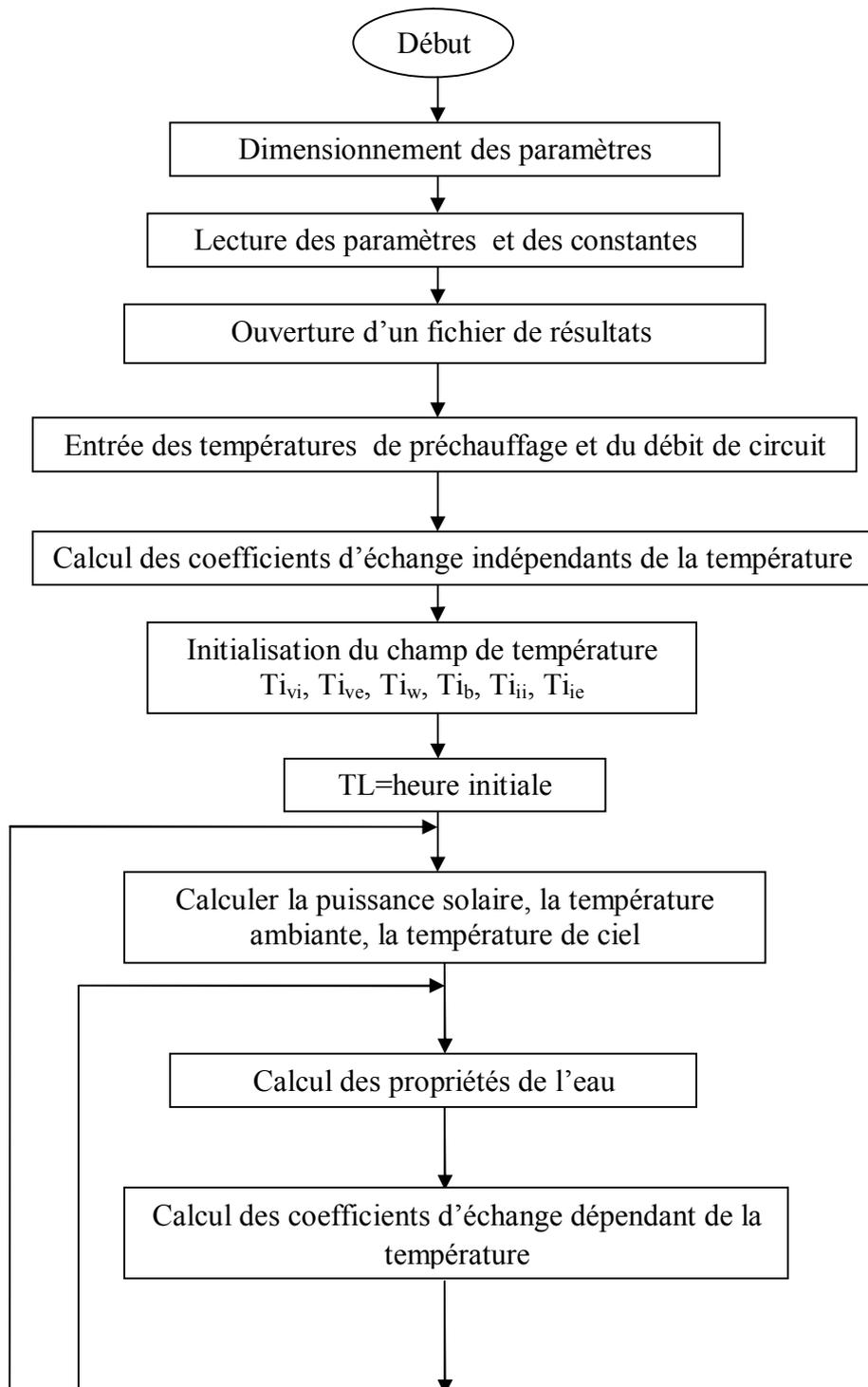
- La puissance absorbée par la vitre et le bac absorbant.
- La température ambiante et la température du ciel.

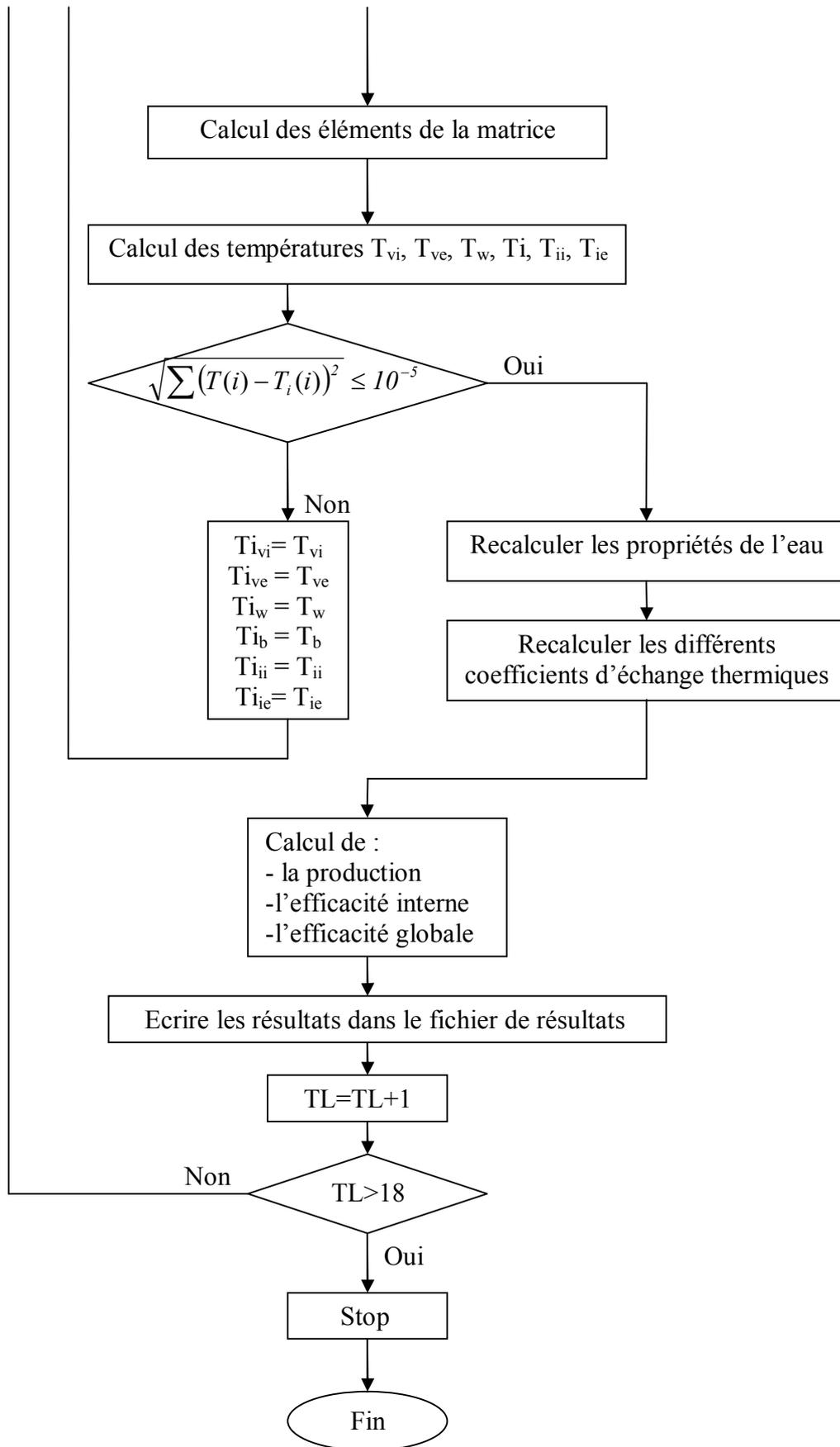
5- Initialisation des températures des différents composants du capteur, et on calcule pour les températures initiales :

- Les propriétés de fluide caloporteur :
  - La masse volumique.
  - La conductivité thermique.
  - La capacité thermique.
- Les coefficients d'échange thermique par rayonnement entre
  - La vitre (côté extérieur) et la voûte céleste.
  - La vitre (côté intérieur) et l'absorbeur.
  - L'isolant (côté extérieur) et le sol.
- Les coefficients d'échange thermique par convection entre :
  - La vitre (côté intérieur) et l'absorbeur.
  - Le bac absorbant et le fluide caloporteur.
  - Le fluide caloporteur et l'isolant.
- Calcul des éléments de la matrice
- Exécution de l'algorithme de GAUSS SEIDEL d'itération
- Calcul la température de sortie du fluide caloporteur.

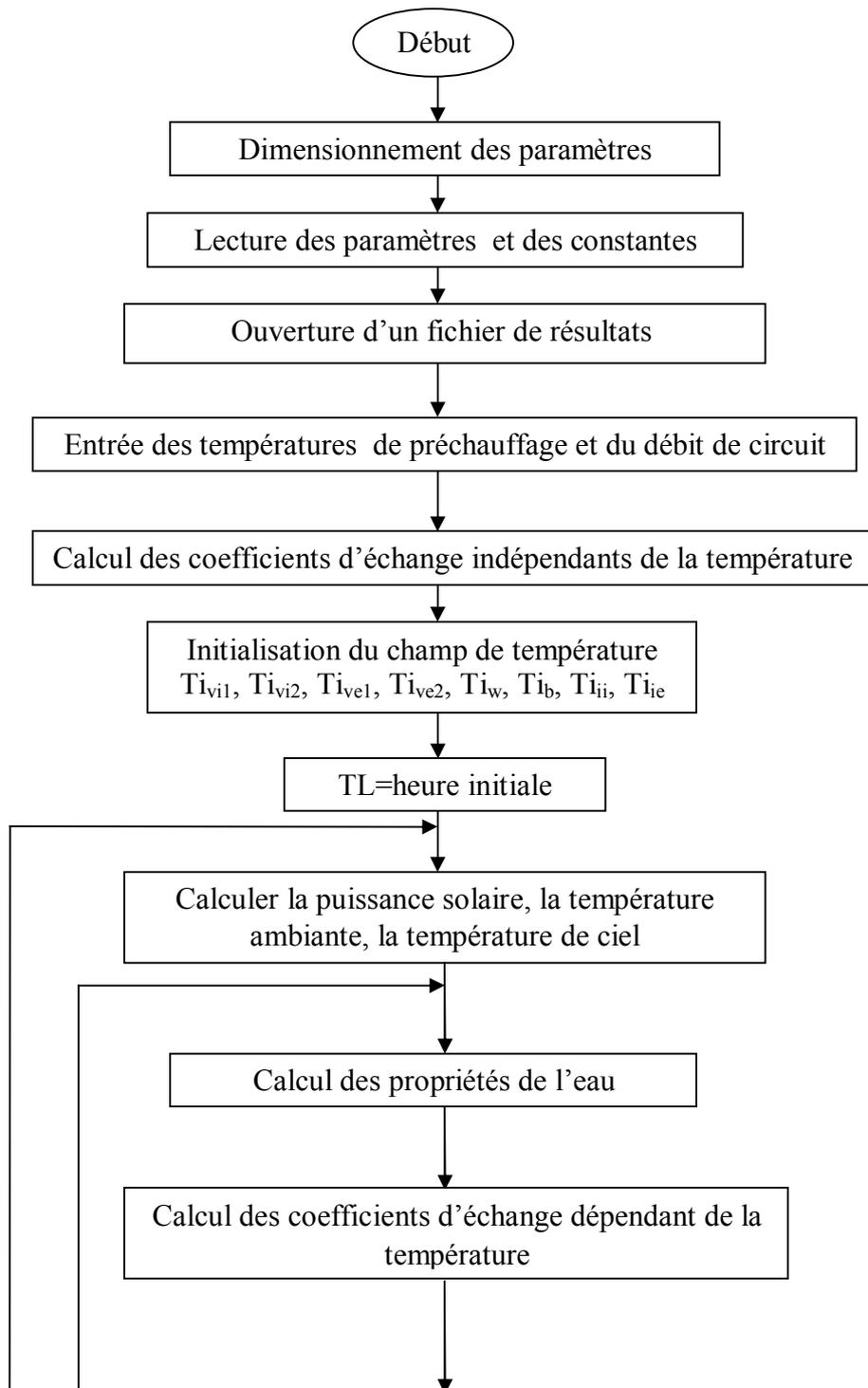
## IV.5- Organigramme

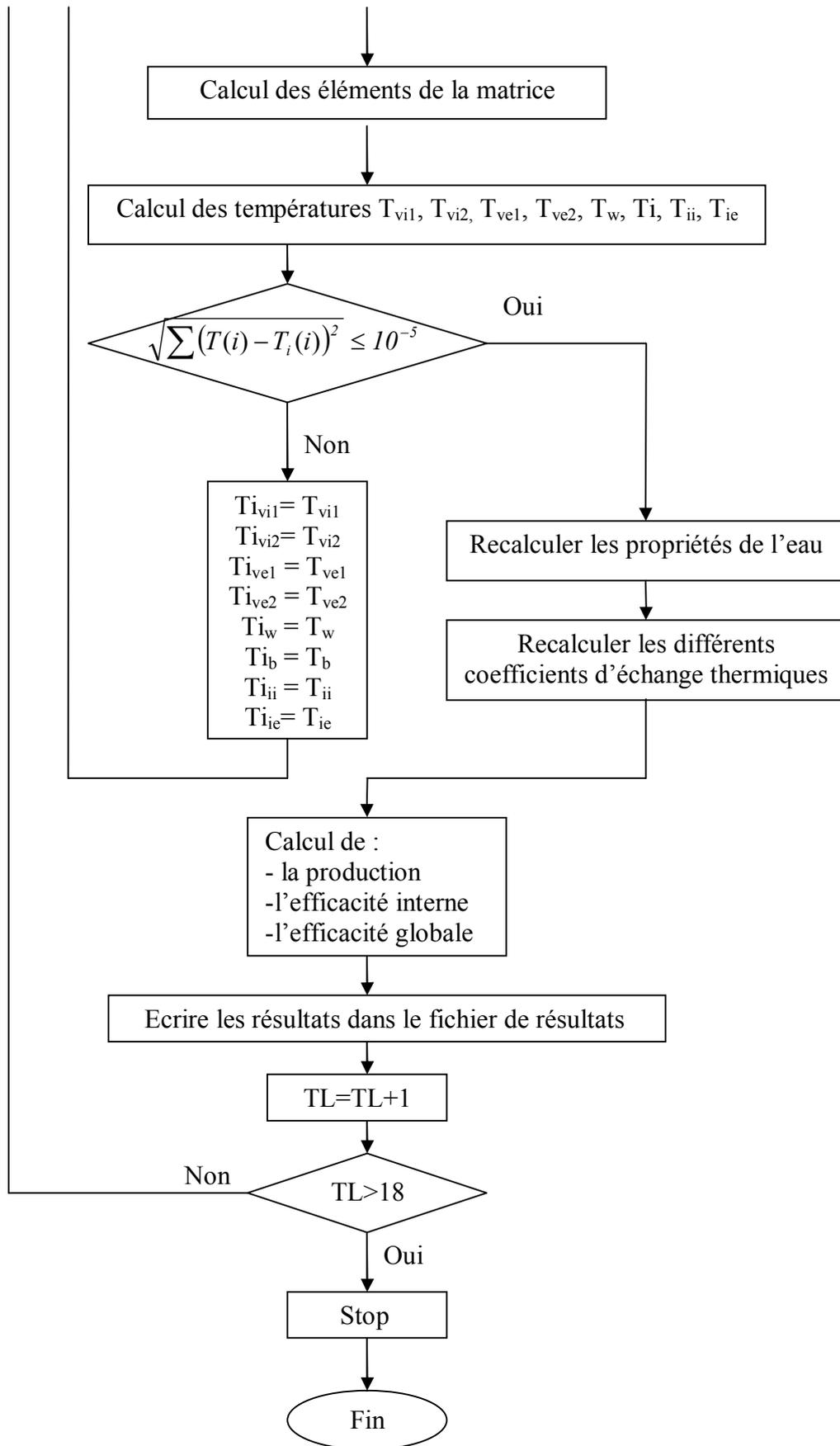
### IV.5.1- Le distillateur plan



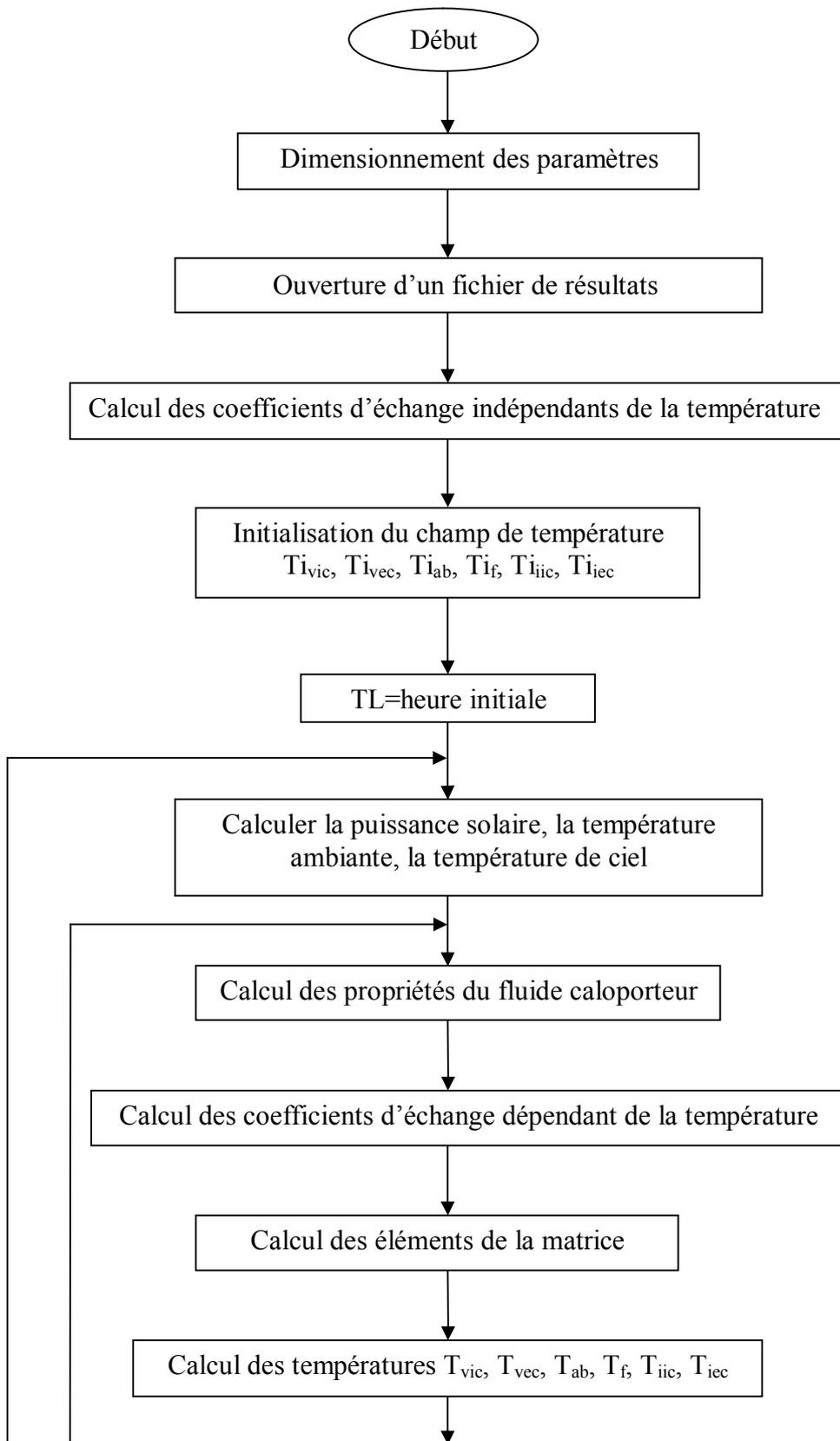


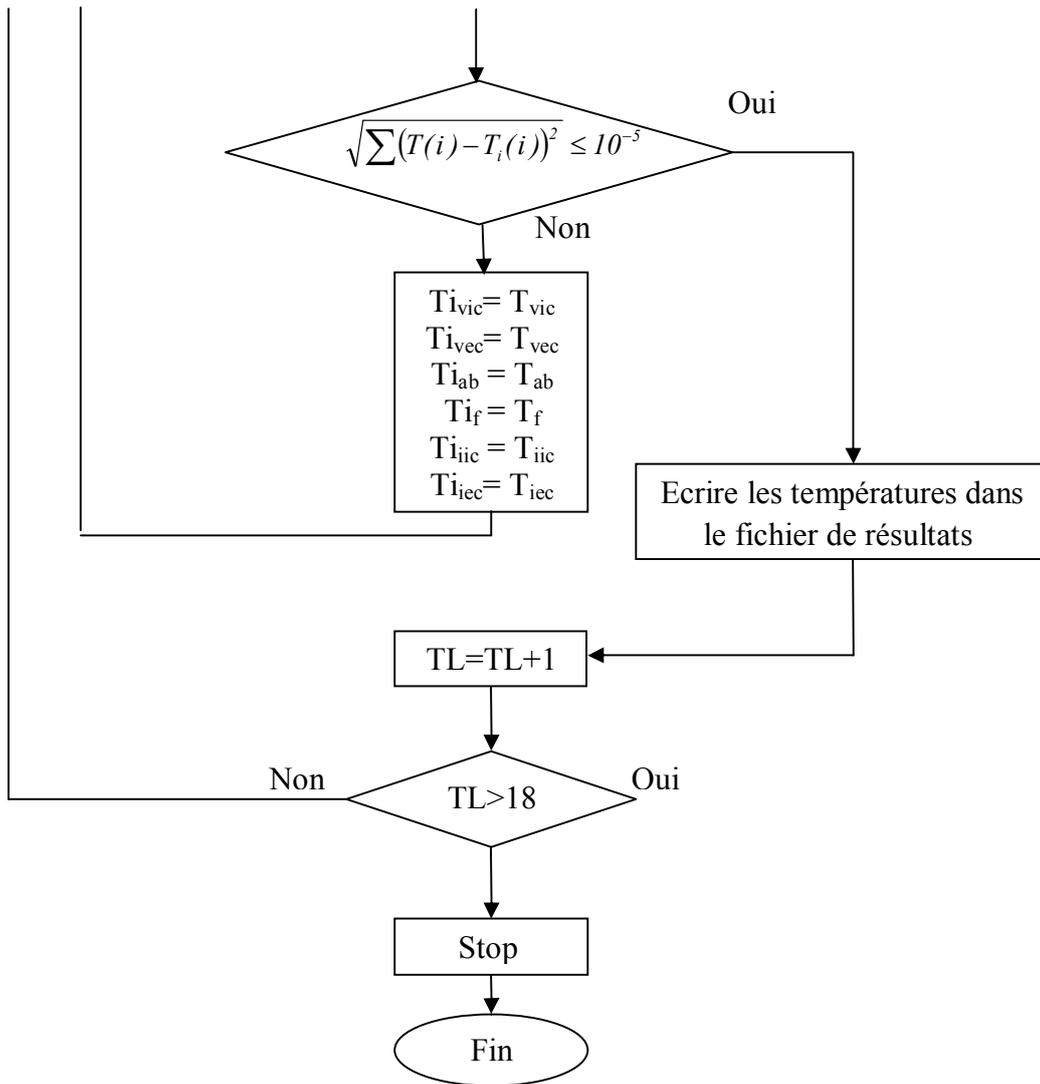
## IV.5.2- Le distillateur hot box





## IV.5.3- Le capteur





# Chapitre V

## Résultats et discussions

## Introduction

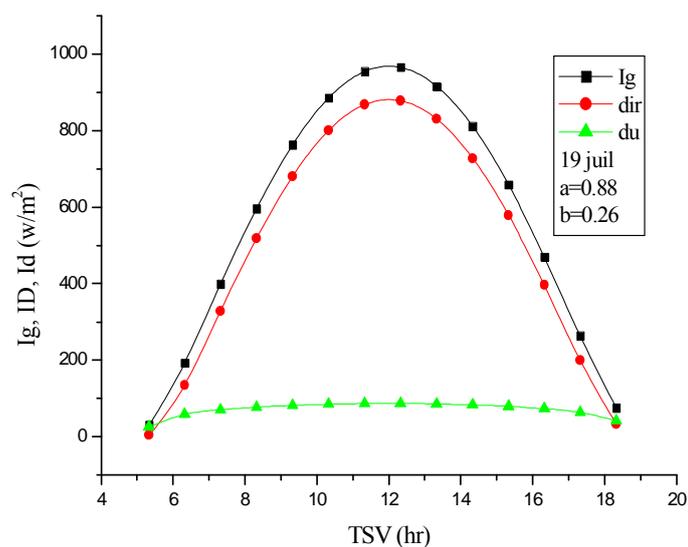
Avant de présenter l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de cette étude et leurs interprétations, notre intérêt a porté sur l'irradiation solaire qui reste le paramètre le plus influant sur le fonctionnement de tout système solaire.

### V.1- Variation du rayonnement solaire

Les calculs ont été effectués pour la journée du 19 juillet, et dans la région de Constantine, de coordonnées géographiques, latitude ( $37^{\circ}$  et  $17'$ ) Nord, longitude ( $6^{\circ}$  et  $62'$ ) Est à l'horizontale.

#### V.1.1- Variation du rayonnement solaire global, direct et diffus

Le rayonnement solaire reçu par le sol varie typiquement au cours d'une journée non perturbée tel que le représente la figure V.1. Il augmente dès le lever du jour pour atteindre un maximum au midi solaire vrai avant de décroître de nouveau jusqu'à s'annuler à la tombée de la nuit [2]. Ces observations concordent avec les travaux de Liu et Jordan dans lesquels, il a été constaté que le rayonnement journalier est symétrique par rapport au midi solaire [3].



FigureV.1- Variation horaire du rayonnement global, direct et diffus

Pour le 19 juillet, la valeur maximale du rayonnement global atteint  $964,77 \text{ w/m}^2$ , dont la majeure partie soit  $877,90 \text{ w/m}^2$  est du rayonnement direct, alors que la valeur du rayonnement diffus n'est que de  $86,87 \text{ w/m}^2$

### V.1.2- Variation du flux solaire moyen suivant le trouble atmosphérique

La variation du flux solaire pendant une journée pour trois types de l'état du ciel est illustrée par la figure V.2. Nos résultats sont en bon accord avec les valeurs trouvées dans la littérature [37] et montrent que si le ciel est pur, une grande partie du rayonnement solaire atteint le sol ; pour des conditions atmosphériques normales cette part devient moins importante, jusqu'à n'être qu'une très faible valeur dans le cas où l'atmosphère est polluée (zone industrielle).

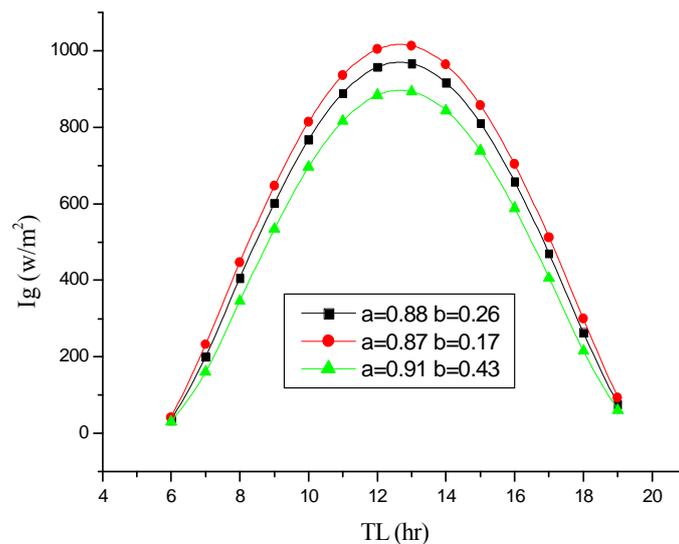


Figure V.2- Variation du flux solaire horaire suivant le trouble atmosphérique.

## V.2- Caractérisation thermique des distillateurs

Nous présentons les principaux résultats obtenus dans notre étude numérique qui a porté sur deux types de distillateurs :

- Un distillateur plan conventionnel d'une surface de bac de  $1\text{ m}^2$  et d'une épaisseur  $e_{ab}=4\text{ mm}$ , d'un vitrage d'aire égale à  $1,03\text{ m}^2$  et d'épaisseur  $e_v=3\text{ mm}$ , légèrement inclinée par rapport au plan horizontal. Le distillateur est orienté vers le sud.
- Un distillateur de type hot box de surface du bac égale à  $1\text{ m}^2$  et d'une épaisseur  $e_{ab}=4\text{ mm}$ , avec une vitre de surface  $A_v=1,04\text{ m}^2$  et d'épaisseur  $e_v=3\text{ mm}$ , dont chacun des côtés est incliné de  $15^\circ$  par rapport au plan horizontal. L'orientation de ce distillateur est Est-ouest.

Pour le chauffage nous utilisons un capteur solaire plan ayant les caractéristiques suivantes :

- Dimensions :  $1,212 \times 0,718 \times 0,08\text{ m}$
- Une vitre en verre trempé, d'épaisseur  $4\text{ mm}$ .
- Un absorbeur d'air  $0,6\text{ m}^2$  avec un tube ( $8 \times 10\text{ mm}$ ) en cuivre, en forme de serpentin, de longueur  $6,75\text{ m}$  lié par brassage noir.
- Une couche sélective :  $\alpha=0,96$ .
- Pression max de fonctionnement :  $7\text{ bars}$ .
- Le tube de raccordement entre le capteur et le bac du distillateur a un diamètre égal à  $1,3 \cdot 10^{-2}\text{ m}$ . La vitesse moyenne d'écoulement du fluide est de  $5 \cdot 10^{-2}\text{ m/s}$ .

Pour les deux types de distillateurs la profondeur de l'eau est fixée à  $4\text{ mm}$ . L'étude est menée pour une vitesse de vent constante et égale à  $2\text{ m/s}$ .

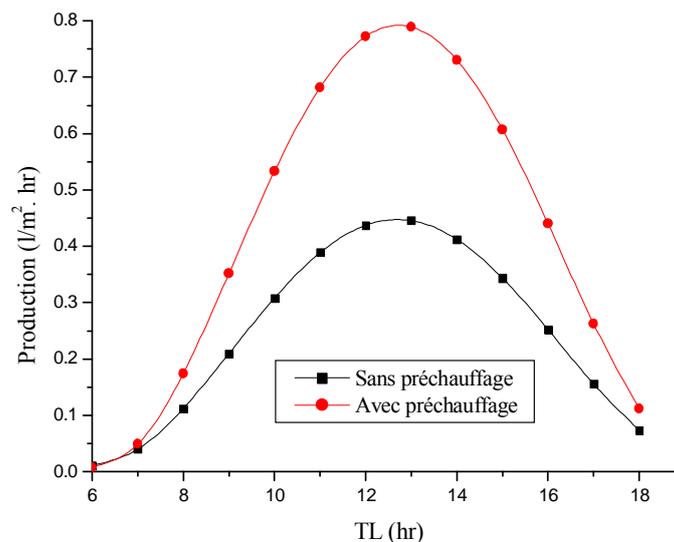
### V.2.1- Le distillateur plan sans et avec préchauffage

Dans cette partie, une étude comparative des caractéristiques de fonctionnement (production, efficacités interne, globale...) d'un distillateur plan et un système couplé distillateur plan-capteur est présentée.

### V.2.1.1- La production

#### V.2.1.1.1- En fonction du temps local

La production horaire dans les deux systèmes (distillateur plan, sans et avec préchauffage) est quasi nulle pendant les premières heures de la journée (entre 6<sup>h</sup> et 8<sup>h</sup> du matin) pendant lesquelles le système doit, partant de la température ambiante atteindre sa température de fonctionnement [2]. A partir de ce moment il apparaît une différence de la production entre le distillateur et le système couplé qui augmente avec la croissance du rayonnement solaire pour atteindre une valeur maximale à 13 heure où la production horaire du distillateur plan est de 0,45 l/m<sup>2</sup>·hr, alors que celle du système couplé atteint 0,78 l/m<sup>2</sup>·hr. Par la suite cette différence décroît avec le temps solaire (figureV.3). R.Tripathi, G.N.Tiwari explique que le préchauffage de l'eau dans le capteur augmente la différence entre la température de l'eau et la température de la vitre intérieure dans le distillateur, qui a un effet direct sur l'augmentation du taux d'évaporation. Il en résulte une amélioration de la production totale de distillat. C'est pour quoi la production du distillateur actif est meilleure que celle du distillateur passif [38]. On trouve également cette explication dans les travaux de O.O.Badran, H.A.Al-Tahaine [16].



FigureV.3- Variation de la production horaire en fonction du temps local pour un distillateur plan (avec et sans préchauffage).

Par temps clair, pour des latitudes variant entre 40 et 50° on obtient 3 à 5 litres par m<sup>2</sup> et par jour pour un distillateur plan [1]. Ce qui est un bon accord avec les résultats numériques obtenus dans le cadre de notre étude pour la région de Constantine à des conditions climatiques normales le 19 juillet. Nos résultats montrent que la production journalière d'un distillateur plan est de 3,19 litres par m<sup>2</sup> et par jour, alors que celle du système couplé distillateur-capteur est de 5,26 litres par m<sup>2</sup> et par jour. Les courbes représentées dans la figure V.4 permettent de constater aisément que le préchauffage améliore la production journalière du distillateur plan de près 39 %. Des résultats similaires ont été trouvés par Zaki et al [38] qui ont constaté une augmentation approximative de plus de 33 % de la production du distillateur avec préchauffage de même que O.O.Badran, H.A.Al-Tahaineh [16] qui ont trouvé une augmentation de 36 %.

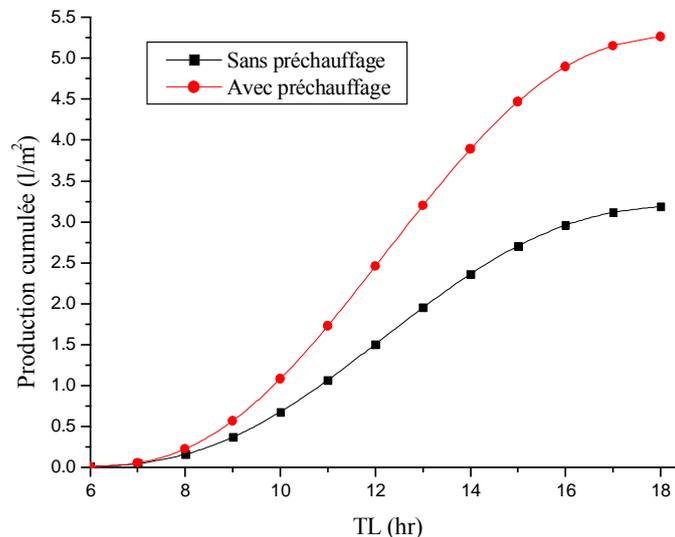
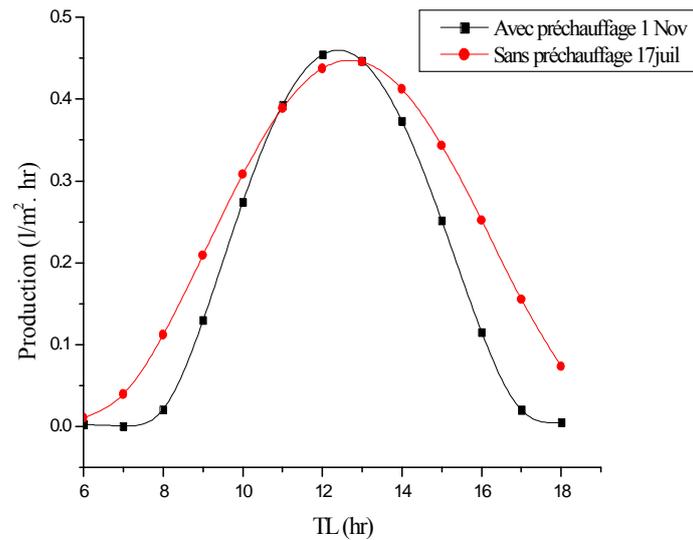


Figure V.4- Variation de la production cumulée en fonction du temps local pour un distillateur plan (avec et sans préchauffage).

L'évolution temporelle de la production horaire d'un distillateur fonctionnant seul pendant une journée d'été (17 juillet) et celle d'un distillateur couplé à un capteur pendant une journée hivernale (1 novembre) est illustrée par la figure V.5. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux expérimentaux de R.Tripathi, G.N.Tiwari [38] pour la journée estivale et ceux de O.O.Badran, H.A.Al-Tahaineh [16] par la journée hivernale. Nous pouvons constater que la production est quantitativement la même entre 10<sup>h</sup> et 14<sup>h</sup> dans les deux cas.

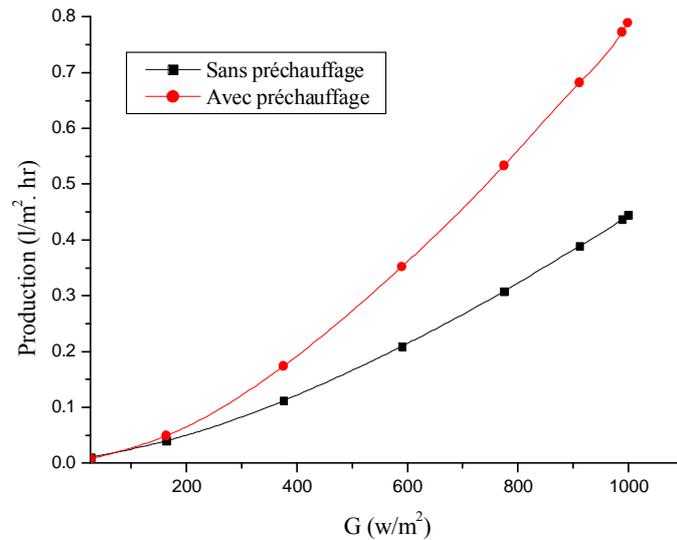


FigureV.5- Comparaison de la production horaire pour un distillateur plan avec préchauffage (pour le 1 novembre) et sans préchauffage (pour le 17 juillet).

#### V.2.1.1.2- En fonction de l'irradiation globale

Le réchauffement de l'eau à distiller est d'autant plus élevé que l'irradiation solaire reçue est plus importante, il en résulte des températures élevées conduisant à une amélioration du processus d'évaporation et par conséquent à une meilleure production (figureV.6). Les travaux expérimentaux de O.O.Badran, H.A.Al-Tahaine [16] ainsi que ceux de M.Malik, Tiwari [32] ont abouti également à des conclusions similaires.

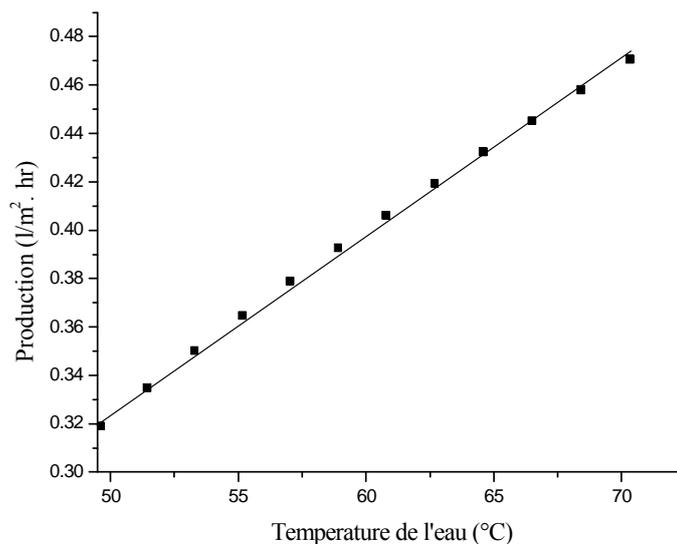
Il faut noter néanmoins que coupler un distillateur plan avec un capteur implique une surface supplémentaire pour capter l'irradiation solaire mais à condition que la valeur de l'irradiation solaire soit suffisante pour réaliser le préchauffage de l'eau saline. C'est pour cela que les résultats obtenus pour le 19 juillet pour des conditions climatiques normales (figureV.6), montrent que l'amélioration de la production horaire d'eau douce dû au couplage d'un distillateur plan avec un capteur est meilleure pour les valeurs les plus élevés de  $G$  (au delà de  $400 \text{ w/m}^2$ ).



FigureV.6- Variation de la production horaire en fonction de l'irradiation globale pour le distillateur plan (avec et sans préchauffage).

#### V.2.1.1.3- En fonction de la température de l'eau

Dés que le régime de fonctionnement du distillateur solaire est atteint, la production augmente linéairement avec la température de l'eau (figureV.7), cette dernière croît évidemment avec l'irradiation solaire.



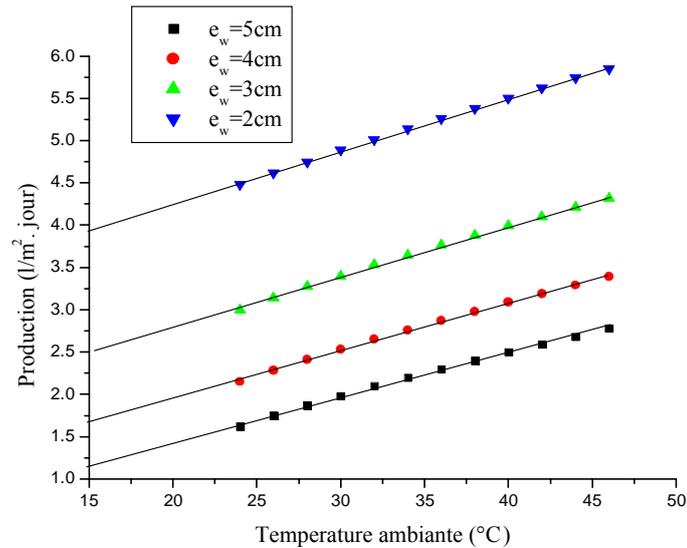
FigureV.7- Variation de la production horaire en fonction de la température de l'eau.

#### V.2.1.1.4- En fonction de la température ambiante

Si d'après Mors et Read [32], l'augmentation de la température ambiante de 26,7 °C à 37,8 °C conduit à une croissance de près de 11 %, de la production horaire, d'autres résultats expérimentaux [39] ont noté une augmentation de 16% pour un accroissement de la température ambiante de 24,5 °C à 29 °C. Les résultats numériques obtenus dans le cadre de notre étude et représentés par la figure V.8 vont dans le même sens. Par ailleurs ils mettent en évidence l'effet de la profondeur de la couche d'eau à dessaler sur la production. On pourra ainsi noter d'après le tableau V.1, d'une part que pour la même température ambiante la production augmente quand la profondeur diminue ce qui peut être attribué à la capacité calorifique dont la diminution conduit à une température plus élevée de la couche d'eau et par conséquent un taux d'évaporation plus important, et d'autre part que pour l'intervalle de température étudié [27 °C–38 °C], cette augmentation est plus atténuée quand la profondeur de la saumure diminue. Ces résultats concordent avec les travaux expérimentaux d'autres auteurs [16], [38] et [39].

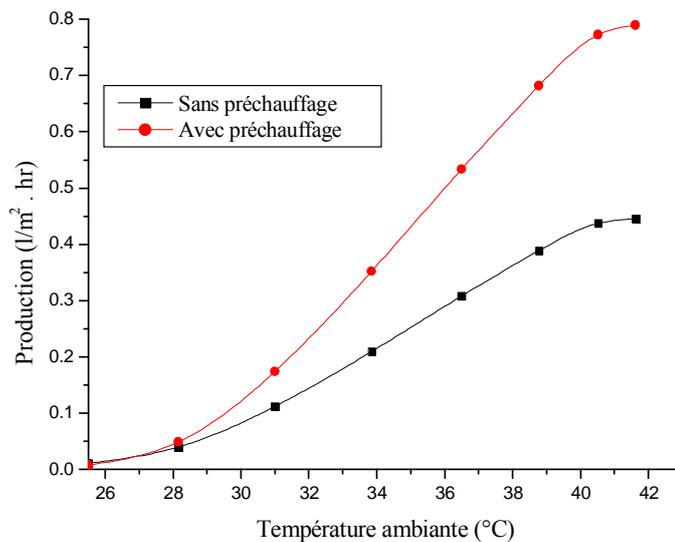
Profondeur de l'eau (cm)	Température ambiante (°C)	Augmentation de la production (l/m <sup>2</sup> .jour)	Pourcentage de l'augmentation
5	27 à 38	1,81 – 2,40	24,58%
4	27 à 38	2,35 – 2,98	21,14%
3	27 à 38	3.21 – 3.88	17,28%
2	27 à 38	4,69 – 5,38	12,83%

Tableau V.1- Effet de l'augmentation de la température ambiante sur la production du distillateur.



FigureV.8- Variation de la production journalière en fonction de la température ambiante pour différentes profondeurs d'eau.

La figure V.9 qui illustre la variation de la production horaire du distillateur avec la température ambiante permet de remarquer l'augmentation de la production avec la température ambiante jusqu'à la valeur de 40 °C, au delà il se produit l'effet inverse qui peut être expliqué par le fait qu'une température ambiante trop élevée conduit à une augmentation de la température de la vitre ce qui aura un effet défavorable sur la condensation et par conséquent sur la production.

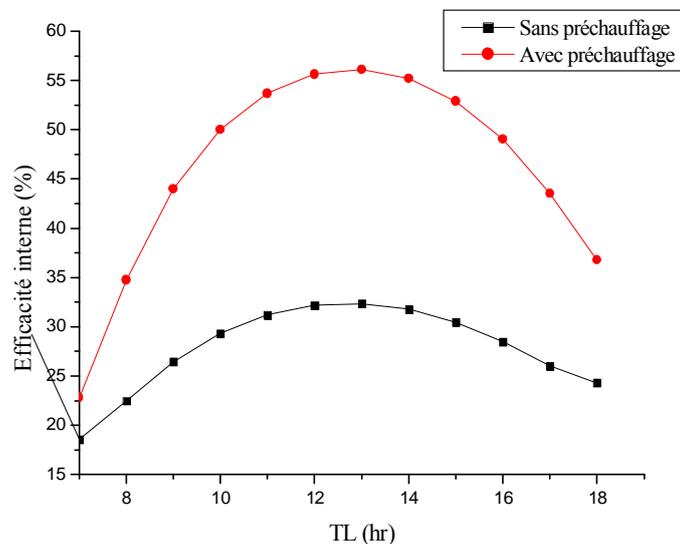


FigureV.9- Variation de la production horaire en fonction de la température ambiante.

### V.2.1.2- L'efficacité interne

#### V.2.1.2.1- En fonction du temps local

Comme il était prévu, les résultats obtenus (figure V.10) montrent que l'efficacité interne du distillateur plan avec préchauffage est plus élevée que celle du distillateur plan sans préchauffage. L'augmentation atteint jusqu'à 43,69 %. Les valeurs maximales sont relatives à l'intervalle 11<sup>h</sup>-15<sup>h</sup>. D'après M. Malik et Tiwari, l'efficacité typique du distillateur est de 30 % [32], les résultats théoriques obtenus dans le cadre de ce travail ont donné les valeurs de 32,35 % et 57,45 % respectivement pour le distillateur plan sans et avec préchauffage. Cette augmentation peut être aisément expliquée par la définition de l'efficacité interne qui représente le rapport entre la quantité d'eau produite à la quantité d'énergie entrant réellement dans le distillateur, et si le distillateur avec préchauffage nous donne une production horaire meilleure que celle du distillateur sans préchauffage pour les mêmes conditions de l'irradiation solaire. Il en résulte nécessairement une efficacité interne mieux que celle du distillateur plan sans préchauffage.



FigureV.10- Variation temporelle de l'efficacité interne du distillateur (avec et sans préchauffage).

### V.2.1.3- L'efficacité globale

#### V.2.1.3.1- En fonction du temps local

De même que pour l'efficacité interne (figure V.10), la variation temporelle de l'efficacité globale (figure V.11) est similaire à celle de l'irradiation globale. Nous pouvons ainsi observer sur cette figure une augmentation de l'efficacité globale jusqu'à une valeur maximale aux environs de 13<sup>h</sup> temps solaire vrai, puis une décroissance jusqu'à la fin de la journée. Il apparaît en outre une nette amélioration de l'efficacité globale avec le préchauffage. Ainsi pour le distillateur plan l'efficacité globale est de l'ordre de 27,5 %, alors que le préchauffage permet d'atteindre une valeur de près de 48,83 %.

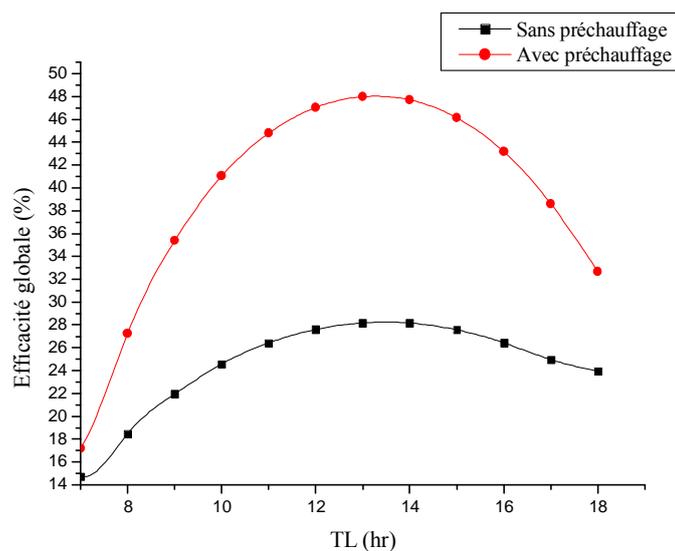


Figure V.11- Variation temporelle de l'efficacité globale du distillateur (avec et sans préchauffage).

#### V.2.1.4- Variation des efficacités interne et globale avec l'irradiation globale

Si l'efficacité globale rapporte la quantité d'eau produite à l'énergie solaire incidente on observe que l'augmentation de l'irradiation globale apporte aussi une augmentation de la capacité du distillateur à traduire cette énergie en production d'eau douce. La figure

V.12 ou la courbure montre une relation ascensionnelle entre l'efficacité interne et globale d'un distillateur plan avec préchauffage et l'irradiation globale.

$$\eta_g = \frac{m_d \cdot L_v(T_w)}{G \cdot A_v}$$

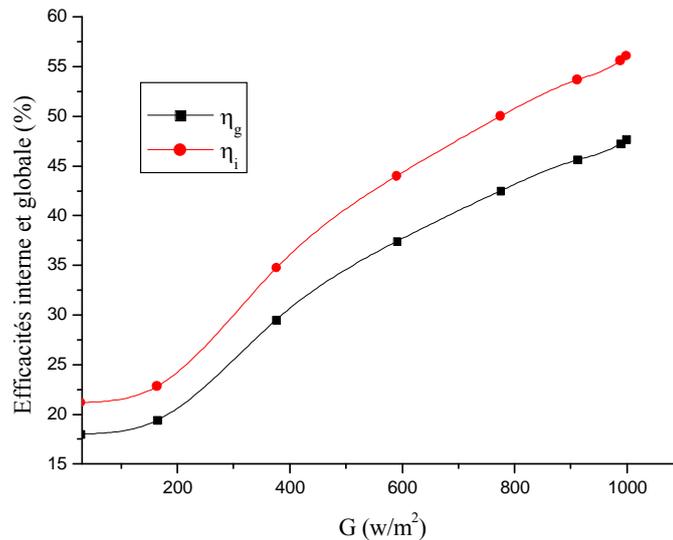


Figure V.12- Variation des efficacités interne et globale avec l'irradiation globale

## V.2.1.5- Les températures

### V.2.1.5.1- En fonction du temps local

L'observation des courbes de la figure V.13 représentant la variation temporelle des températures des différents composants du distillateur plan avec préchauffage permet d'avancer les remarques suivantes :

- Les températures de tous les composants du distillateur commencent pratiquement toutes à la même valeur, puis augmentent jusqu'à atteindre leurs maximum à 13<sup>h</sup>, au delà elles diminuent graduellement avec le temps. Cette allure est similaire à celle de la variation temporelle de l'irradiation globale.
- Selon les propriétés thermiques de la matière (conductivité, capacité calorifique,...), la dispositions et l'épaisseur, l'augmentation des températures des différents composants de

distillateur avec le temps ne s'effectués pas de la même manière. Les valeurs maximales des températures sont dans l'ordre suivant :

- la température de l'absorbeur est la plus élevée du fait de sa conductivité thermique,
  - la température de l'isolant intérieur qui est au contact direct avec l'absorbeur,
  - la température de la saumure,
  - la température de la vitre intérieure,
  - la température de la vitre extérieure,
  - la température de l'isolant extérieur.
- La différence entre la température de la saumure et la température de la vitre intérieure augmente aussi avec le temps jusqu'à 13<sup>h</sup> puis diminue, ce qui explique l'allure de la variation temporelle de la production horaire (figure V.3).
  - Le préchauffage conduit à une température maximale de la saumure de 78,88 °C alors qu'elle n'atteint que 66,48 °C dans le cas du distillateur sans préchauffage (figure V.14). Le préchauffage a permis d'obtenir une augmentation de 12,4 °C, ce qui semble en accord avec les résultats de R. Tripathi et G.N. Tiwari qui ont trouvé une augmentation de 13,3 °C [38].

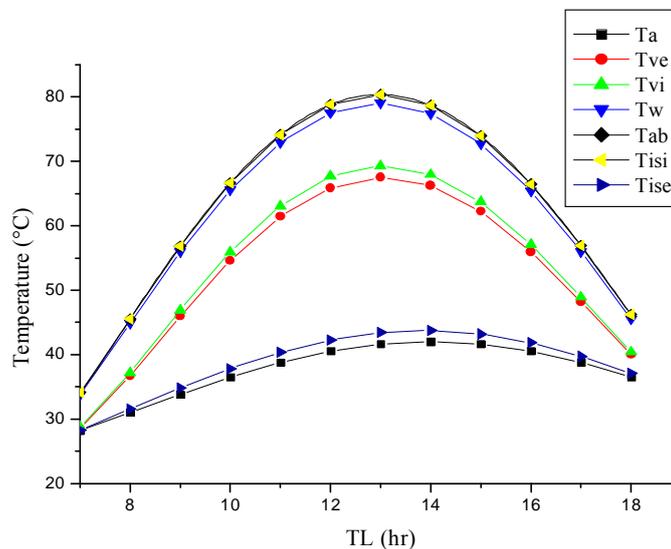
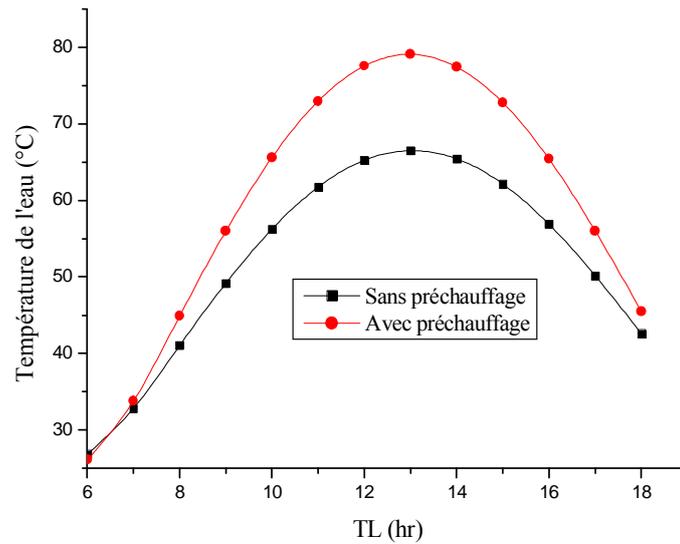


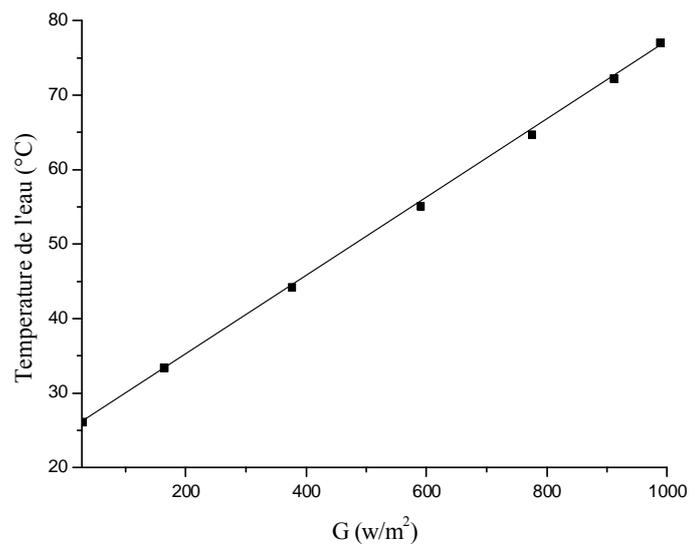
Figure V.13- Variation des températures des différents composants du distillateur en fonction du temps local.



FigureV.14- Variation des températures de l'eau (sans et avec préchauffage) avec le temps local.

#### V.2.1.5.2- En fonction de l'irradiation globale

La figure V.15 montre une croissance linéaire de la température de l'eau avec l'irradiation globale ce qui permet de déduire que l'augmentation de l'irradiation globale a un effet direct sur l'augmentation de la température de la saumure.



FigureV.15- Variation de la température de l'eau en fonction de l'irradiation globale.

## V.2.2- Le distillateur hot box sans et avec préchauffage

Les résultats numériques obtenus lors de l'étude comparative d'un distillateur hot box et du système couplé hot box-captur ont conduit aux observations suivantes :

### V.2.2.1- La production

L'allure de la courbe de variation de la production horaire du distillateur hot box (figure V.16), peut être aisément expliquée par l'orientation (Est-ouest) de ce dernier. En effet pendant la matinée le côté Est est fortement ensoleillé alors que le côté ouest reste à l'ombre, la différence de température ( $T_w - T_{v2}$ ) est alors importante, il s'ensuit une augmentation de la production jusqu'à 11<sup>h</sup>. Entre 11<sup>h</sup> et 14<sup>h</sup> le soleil étant au sud il en résulte une légère réduction de l'irradiation solaire ce qui conduit inévitablement à une légère diminution de la production horaire. A partir du 14<sup>h</sup>, le côté ouest est à son tour fortement ensoleillé, mais comme l'irradiation solaire décroît à partir de cette heure, il en résulte alors une diminution de la production horaire. En outre, la figure V.16 montre clairement que la production horaire du distillateur hot box avec préchauffage est supérieure à celle d'un distillateur hot box sans préchauffage, confirmant ainsi les résultats expérimentaux de nombreux auteurs [40], [41].

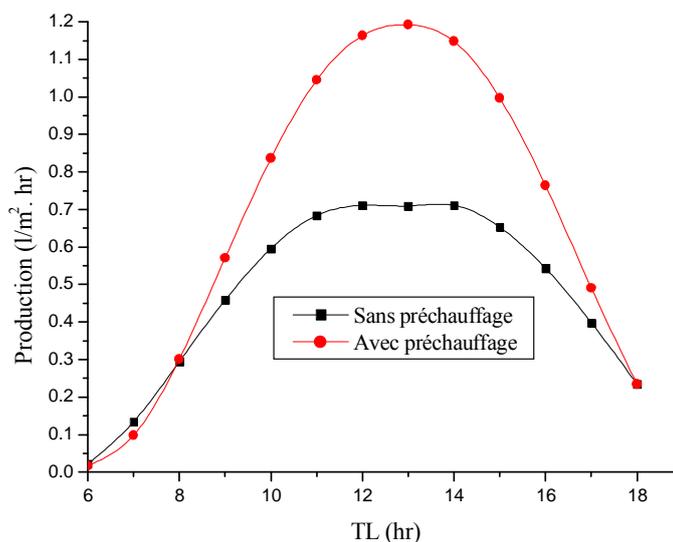
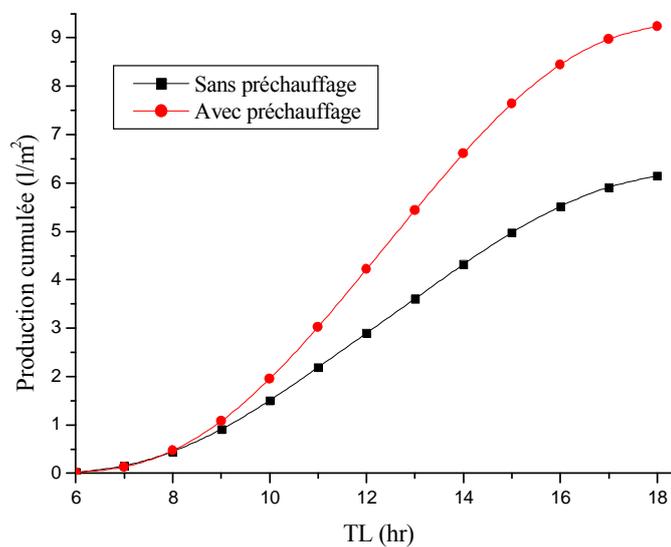


Figure V.16- Variation de la production horaire en fonction du temps local pour un distillateur hot box avec et sans préchauffage.

D'après les résultats numériques obtenus (figure V.17), le distillateur hot box sans préchauffage donne une production journalière de 6.10 litres par jour et par m<sup>2</sup>, et de 9.24 litres par jour et par m<sup>2</sup> quand le préchauffage est utilisé, soit une amélioration de 33.98%. L'allure de la variation temporelle de la production journalière est similaire à celle trouvée dans les résultats expérimentaux de M. Boukar, A. Harmim [40], dans lesquels la production journalière d'un distillateur hot box sans préchauffage varie entre 4.01 et 4.34 litres par jour et par m<sup>2</sup> sans préchauffage et entre 8.02 et 8.07 litres par jour et par m<sup>2</sup> pour le distillateur avec préchauffage.

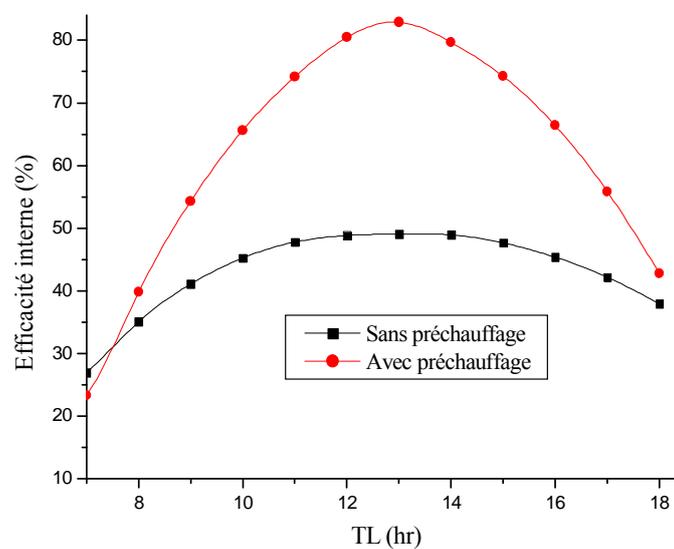


FigureV.17- Variation temporelle de la production cumulée pour un distillateur hot box (avec et sans préchauffage).

### V.2.2.2- L'efficacité interne

#### V.2.2.2.1- En fonction du temps local

Il apparaît clairement sur la figure V.18 que l'efficacité interne du distillateur hot box avec préchauffage est nettement supérieure à celle du distillateur hot box sans préchauffage. Nous pouvons constater que le couplage permet d'atteindre une valeur maximale d'efficacité interne de plus de 80 % alors qu'elle n'est que de 48.79 % dans le cas contraire.

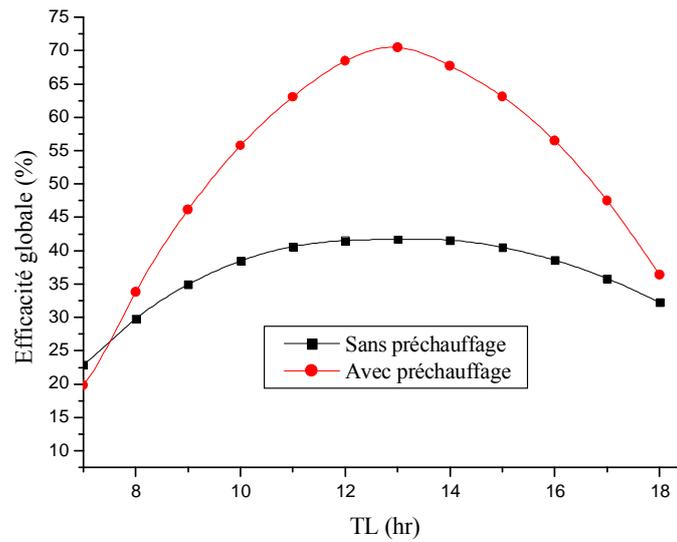


FigureV.18- Variation temporelle de l'efficacité interne du distillateur hot box (avec et sans préchauffage).

### V.2.2.3- L'efficacité globale

#### V.2.2.3.1- En fonction du temps local

La figure V.19 illustrant la variation temporelle de l'efficacité globale permet de noter une valeur maximale de cette dernière de 70.47 % dans le cas du préchauffage alors qu'elle n'est que de 41,70 % quand le distillateur hot box fonctionne seul.

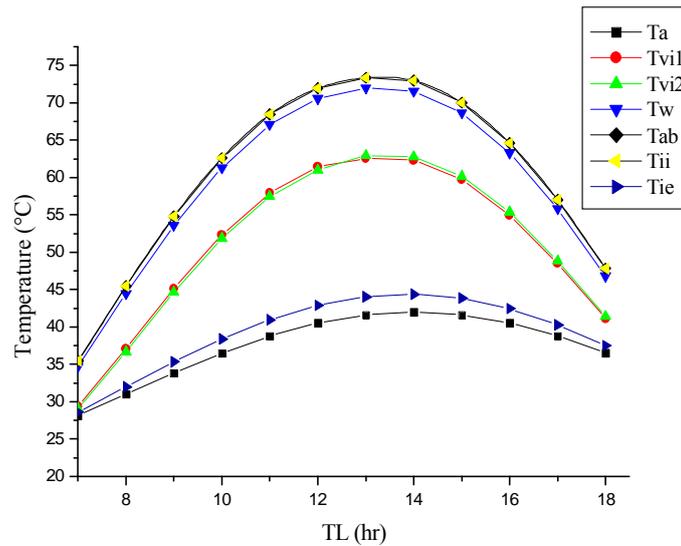


FigureV.19- Variation temporelle de l'efficacité globale du distillateur hot box (avec et sans préchauffage).

#### V.2.2.4- Les températures

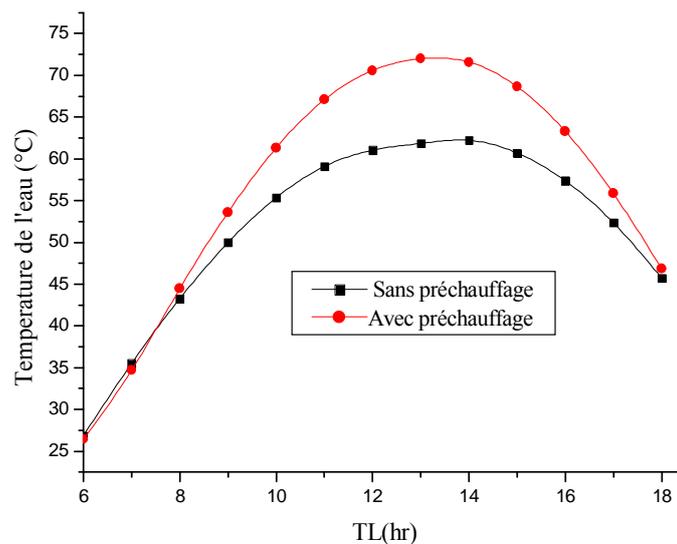
##### V.2.2.4.1- En fonction du temps local

La variation temporelle des températures des différents composants du distillateur hot box avec préchauffage (figure V.20) a la même allure que celle des températures des différents composants du distillateur plan avec préchauffage. Pendant la matinée, la température de la vitre intérieure, côté Est, est supérieure à celle du côté ouest. Contrairement à l'après-midi.



FigureV.20- Variation des températures des différents composants du distillateur hot box en fonction du temps local.

La figure V.21 montre la variation de la température de la saumure avec et sans préchauffage. Les valeurs maximale sont de 61.85 °C pour le distillateur sans préchauffage et de 71.97 °C pour le distillateur avec préchauffage et concordent avec des résultats expérimentaux [40] dans lesquelles les auteurs ont trouvé pour le préchauffage des températures maximales compris entre 69.18 °C et 73.35 °C [40].



FigureV.21- Variation temporelle des températures de l'eau (sans et avec préchauffage).

### V.2.3- Comparaison entre les quatre installations

Une étude comparative de l'effet du préchauffage sur les caractéristiques de fonctionnement (production, efficacités globale et interne) de deux types de distillateurs plan et hot box a été menée. Les résultats obtenus sont exposés dans ce qui suit.

#### V.2.3.1- La production

L'effet de l'orientation du système sur la production horaire est illustré par la figure V.22 qui montre que pour l'intervalle de temps 12<sup>h</sup> et 14<sup>h</sup>, le système couplé distillateur plan-capteur (orienté sud) a une meilleure production que le distillateur hot box (orienté Est-ouest), il n'en est pas de même pour les autres heures de la journée où le distillateur hot box a une production plus importante comparativement à celle du système couplé distillateur plan-capteur. Nous pouvons par ailleurs noter que le couplage du distillateur hot box avec un capteur permettra non seulement de résoudre l'inconvénient de la baisse de production entre 11h et 14h du distillateur hot box, mais d'améliorer sensiblement la production par rapport à tous les autres systèmes (distillateur plan, hot box, distillateur plan-capteur).

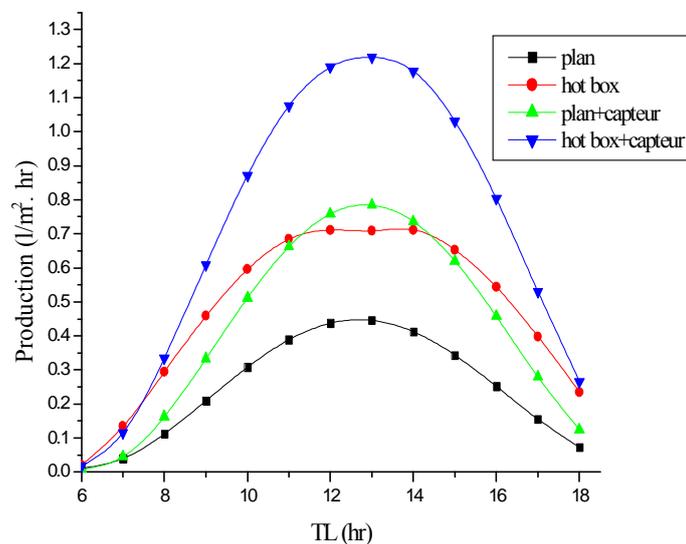
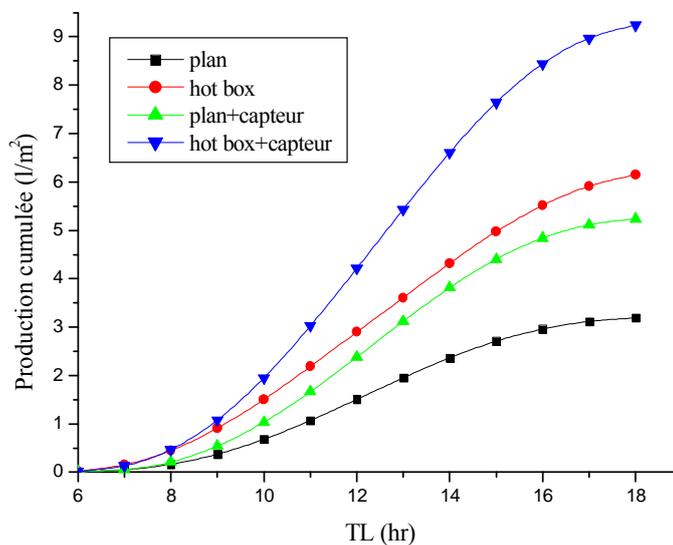


Figure V.22- Variation de la production horaire en fonction du temps local.

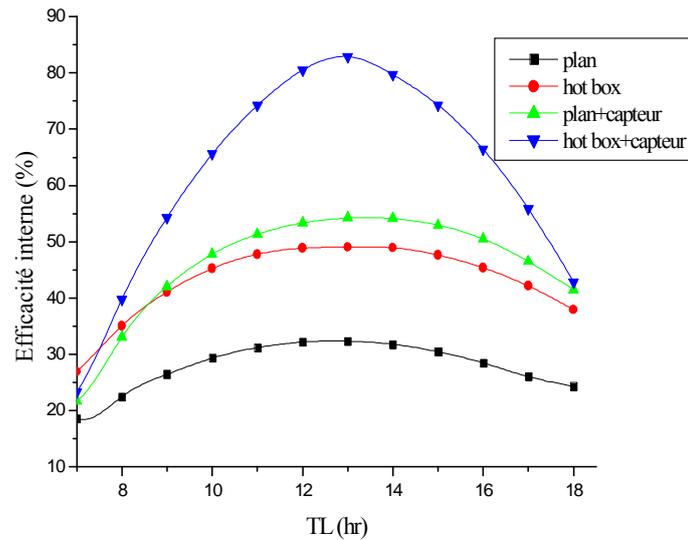
Les courbes de la figure V.23 donnent un ordre de grandeur de l'amélioration de la production journalière des distillateurs plan et hot box par le préchauffage. On obtient des productions journalières de 3.19 et 5.26 litres par m<sup>2</sup> respectivement pour un distillateur plan sans et avec préchauffage, soit une amélioration de près de 39.35 %. Il en est de même pour les distillateur hot box sans et avec préchauffage dont les productions journalières sont respectivement égales à 6.10 et 9.24 litre par m<sup>2</sup> soit une amélioration de l'ordre de 33.98 %. On pourra également noter que le distillateur hot box avec préchauffage donne une production beaucoup plus importante (43.07 %) que celle du distillateur plan avec préchauffage.



FigureV.23- Variation de la production cumulée en fonction du temps local.

### V.2.3.2- L'efficacité interne

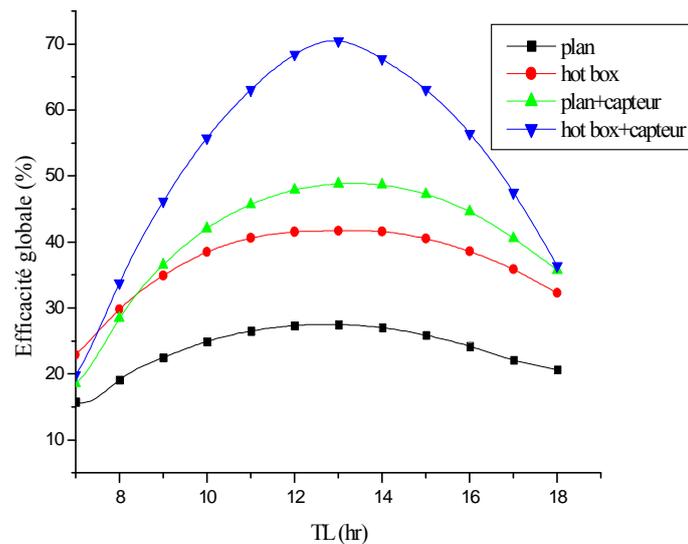
L'observation de la figure V.24 permet de constater que l'efficacité interne du distillateur hot box-capteur est meilleur que celle de tous les autres systèmes. On note une amélioration approximative de 30.71 % par rapport au système couplé distillateur plan-capteur.



FigureV.24- Variation de l'efficacité interne en fonction du temps local.

### V.2.3.3- L'efficacité globale

De même que pour l'efficacité interne il est aisé de constater sur la figure V.25 que le préchauffage améliore également l'efficacité globale des systèmes distillateur plan et distillateur hot box. Ainsi et comme nous pouvons le remarquer sur cette figure le système couplé distillateur hot box-capteur a la meilleur efficacité globale (valeur maximale égale à 70.47 %, soit plus de 30.71 % par rapport à celle du distillateur plan-capteur).



FigureV.25- Variation de l'efficacité globale en fonction du temps local.

---

---

## *Conclusion*

---

---

L'étude théorique et numérique du couplage d'un distillateur solaire avec un capteur plan a fait l'objet de ce mémoire. Deux types de distillateurs solaires, le distillateur plan et le distillateur à double inclinaison (hot box) ont été choisis. Après un bref aperçu sur la source elle-même (le soleil) puis sur le rayonnement émis par celle-ci, notre intérêt a porté sur les différentes techniques de dessalement, sur les distillateurs solaires ainsi que sur les capteurs.

Après avoir établi les bilans thermiques des différents systèmes (distillateur plan, distillateur plan-capteur, distillateur hot box et distillateur hot box-capteur) en régime transitoire une approche numérique basée sur la méthode de Gauss Seidel d'itération est utilisée pour la résolution des équations qui régissent le fonctionnement de ces systèmes.

Les résultats obtenus, permettent de constater, que les courbes qui illustrent la variation temporelle des caractéristiques de fonctionnement des distillateurs (production horaire, efficacités interne et globale) ont la forme d'une cloche, c'est la même allure que celle de la variation temporelle de l'irradiation solaire ; ce qui permet de déduire que cette dernière est le paramètre le plus influant sur le fonctionnement d'un distillateur solaire. Par ailleurs, l'augmentation de la température ambiante conduit à un accroissement de la production et des efficacités globale et interne. Par contre l'accroissement de la profondeur de l'eau a l'effet inverse et conduit par conséquent à une baisse de la production d'eau.

En outre, cette étude a permis de montrer sans ambiguïté que la production journalière du distillateur hot box (plus de 6 litres par m<sup>2</sup>) est nettement supérieure à celle du distillateur plan (approximativement égale à 3 litres par m<sup>2</sup>). De même que pour les efficacités globale et interne.

Par ailleurs, le préchauffage permet d'améliorer la production du distillateur plan de près de 39%, ainsi que celle du distillateur hot box d'environ 33%. Les efficacités interne et globale sont améliorées de plus de 43% pour le distillateur plan et de près de 41% pour le hot box. Il apparaît également à travers cette étude que la production du système couplé

distillateur-capteur pendant l'hiver est approximativement égale à celle obtenue pour un distillateur fonctionnant seul en période estivale.

Il ressort de cette étude de nombreuses observations sur lesquelles peuvent s'axer des travaux qui permettraient d'améliorer la production et par conséquent le rendement, notamment:

- L'introduction d'un système de refroidissement de la vitre, soit par un ventilateur, ou par un passage primaire de la saumure à travers cette vitre avant son introduction dans le distillateur.
- Association d'autres dispositifs au distillateur solaire tel que des réflecteurs externe et/ou interne.
- Utilisation d'un système de poursuite solaire.
- Utilisation d'autres formes géométriques de la vitre (sphérique, hémisphérique, ou pyramide) afin de capter le maximum d'énergie solaire incidente indépendamment de l'orientation du système.
- Stockage de l'énergie solaire.

La résolution du système d'équations établi dans le cadre de cette étude, se fait par l'application de la méthode de Gauss-Seidel d'itération dont les principales étapes sont mentionnées dans cette annexe.

## A.1- METHODE DE GAUSS-SEIDEL

### A.1.1- Principe

Soit le système linéaire suivant :  $\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j = b_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$  (A. 1)

On peut écrire ce système sous une forme matriciel :  $[A].[X]=[b]$ , avec :

A : une matrice carrée d'ordre  $n \times n$

b : une matrice colonne d'ordre n

X : le vecteur des inconnus,  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ .

La matrice A étant décomposée en :  $A = M - N = (D - L) - U$  avec :

D : matrice diagonale

L : matrice inférieure

U : matrice supérieure

Dans la méthode itérative de Gauss-Seidel on réécrit de la manière suivante :

$$X^{(k+1)} = (D + L)^{-1} (b - U \cdot X^{(k)}) \quad (\text{A. 2})$$

En développant cette récurrence vectorielle, avec la condition que tous les  $a_{ii} \neq 0$ , on obtient:

$$\begin{cases} X_1^{(k+1)} = (b_1 - a_{12}X_2^{(k)} - a_{13}X_3^{(k)} - \dots - a_{1n}X_n^{(k)})/a_{11} \\ X_2^{(k+1)} = (b_2 - a_{21}X_1^{(k+1)} - a_{23}X_3^{(k)} - \dots - a_{2n}X_n^{(k)})/a_{22} \\ \cdot \\ \cdot \\ X_n^{(k+1)} = (b_n - a_{n1}X_1^{(k+1)} - a_{n2}X_2^{(k+1)} - \dots - a_{nn}X_n^{(k+1)})/a_{nn} \end{cases} \quad (\text{A. 3})$$

k étant l'indice d'itération.

Il faut bien remarquer que tous les  $X_j^{(k+1)}$  qui apparaissent à droite du signe égal ont été calculés dans les étapes précédentes. Cette méthode consiste à utiliser un vecteur estimé initial  $X^{(0)}(X_1, X_2, \dots, X_n)$  et de générer une suite vectorielle  $(X^{(0)}, X^{(1)}, \dots, X^{(n)})$  :

$$X_i^{(l)} = \frac{1}{a_{ii}} \left( b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} X_j^{(l)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} X_j^{(l-1)} \right) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{A. 4})$$

$$X_i^{(k+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \left( b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} X_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} X_j^{(k)} \right) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{A. 5})$$

### A.1.2- Conditions de convergence

La méthode de Gauss-Seidel convergera si :

1- Pour un critère d'erreur absolu :

$$|(\Delta x_i)_{\max}| \leq \varepsilon \quad (\text{A. 6})$$

$$\sum_{i=1}^n |\Delta x_i| \leq \varepsilon \quad (\text{A. 7})$$

$$\left[ \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \leq \varepsilon \quad (\text{A. 8})$$

2- Pour un critère d'erreur relative :

$$\left| \frac{(\Delta x_i)_{\max}}{x_i} \right| \leq \varepsilon \quad (\text{A. 9})$$

$$\sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta x_i}{x_i} \right| \leq \varepsilon \quad (\text{A. 10})$$

$$\left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \leq \varepsilon \quad (\text{A. 11})$$

Où  $\varepsilon$  est une précision choisie petite.

### A.1.3- Application

Les équations du chapitre IV (de 108 à 127) forment trois systèmes d'équations linéaires sous forme  $[A] \times [T] = [b]$ . Prenant l'exemple du distillateur plan ou les paramètres inconnus sont  $T_{ve}$ ,  $T_{vi}$ ,  $T_w$ ,  $T_{ab}$ ,  $T_{isi}$ ,  $T_{ise}$ :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{vi} \\ T_{ve} \\ T_w \\ T_{ab} \\ T_{isi} \\ T_{ise} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix}$$

- On choisi un vecteur initial de solution :  $T^{(0)}$  ( $T_a$ ,  $T_a+dT$ ,  $T_a+dT'$ ,  $T_a$ ,  $T_a$ ,  $T_a$ ), avec  $T_a$  la température ambiante.

- On choisi  $\varepsilon=10^{-5}$

- L'itération (k+1) pour chaque température, est donnée à partir de l'étape précédente (k) comme suite:

$$\begin{cases} T_{ve}^{(k+1)} = (b_1 - a_{12}T_{vi}^{(k)} - a_{13}T_w^{(k)} - a_{14}T_{ab}^{(k)} - a_{15}T_{isi}^{(k)} - a_{16}T_{ise}^{(k)})/a_{11} \\ T_{vi}^{(k+1)} = (b_2 - a_{21}T_{ve}^{(k+1)} - a_{23}T_w^{(k)} - a_{24}T_{ab}^{(k)} - a_{25}T_{isi}^{(k)} - a_{26}T_{ise}^{(k)})/a_{22} \\ T_w^{(k+1)} = (b_3 - a_{31}T_{ve}^{(k+1)} - a_{32}T_{vi}^{(k+1)} - a_{34}T_{ab}^{(k)} - a_{35}T_{isi}^{(k)} - a_{36}T_{ise}^{(k)})/a_{33} \\ T_{ab}^{(k+1)} = (b_4 - a_{41}T_{ve}^{(k+1)} - a_{42}T_{vi}^{(k+1)} - a_{43}T_w^{(k+1)} - a_{45}T_{isi}^{(k)} - a_{46}T_{ise}^{(k)})/a_{44} \\ T_{isi}^{(k+1)} = (b_5 - a_{51}T_{ve}^{(k+1)} - a_{52}T_{vi}^{(k+1)} - a_{53}T_w^{(k+1)} - a_{54}T_{ab}^{(k+1)} - a_{56}T_{ise}^{(k)})/a_{55} \\ T_{ise}^{(k+1)} = (b_6 - a_{61}T_{ve}^{(k+1)} - a_{62}T_{vi}^{(k+1)} - a_{63}T_w^{(k+1)} - a_{64}T_{ab}^{(k+1)} - a_{65}T_{isi}^{(k+1)})/a_{66} \end{cases}$$

- Arrêter si :

$$\left[ \sum_{i=1}^n (T_i^{(k+1)} - T_i^{(k)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \leq 10^{-5} \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

---

---

## *Références Bibliographiques*

---

---

- [1] **BERNARD, R. MENGUY, G. SCHWATZ, M.** *Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications*. Technique et documentation ; 2<sup>ème</sup> Edition (1980).
- [2] **JANNOT, Y.** *Thermique solaire*, (Janvier 2007).
- [3] **DAGUENET, M.** *Les séchoirs solaires, théorie et pratique*. Unisco, Paris, (1985).
- [4] **BERNARD, J.** *L'énergie solaire, calcul et optimisation*. Ellipses, (2004).
- [5] **RIVET, P.** *Énergie solaire photovoltaïque*, volume1, Unisco, (1993)
- [6] **LABOURET, A. CUMMUNEL, P. BAUM, J. FARAGGI, B.** *Cellules solaires les bases de l'énergie, photovoltaïque*, 4<sup>e</sup> édition. Edition techniques et scientifique française (2005).
- [7] **LABOURET, A. VILLOZ, M.** *Énergie solaire photovoltaïque*, 3<sup>e</sup> édition. Dunod, Paris (2006).
- [8] **KHEDIM, A.** *L'énergie solaire et son utilisation sous sa forme thermique et photovoltaïque, Une étude sur les énergies renouvelables*. Centre de publication universitaire, Tunis (2003).
- [9] **RENAUDINE, V.** *Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres*. Laboratoire des sciences du génie chimique, Nancy, (novembre 2003).
- [10] **KHAWAJI, A. KUTUBKHANAH, I.K. WIE, J.** *Advances in seawater desalination technologies*, Desalination 221 (2008) 47–69
- [11] **SADI, A.** *Le Dessalement Solaire - Considérations Techniques*, Rev. Energ. Ren. Chemss (2000) 91-97.
- [12] **CHKER, A. BOUKERZAZA, N.** *Caractéristique de fonctionnement d'un distillateur solaire*, 12<sup>èmes</sup> Journées Internationales de Thermique Tanger, Maroc du 15 au 17 (Novembre 2005).
- [13] **MOYA, E.Z.** *Dessalement de l'eau au moyen d'énergie*, CIEMAT- Plateforme Solaire D'Almeria, (2006).
- [14] **SADINENI, S.B. HURT, R. HALFORD, C.K. BOEHM, R.F.** *Theory and experimental investigation of a weir-type inclined solar still*, Las Vegas, NV 89154-4027, USA, Energy 33 (2008) 71–80.

- [15] SHUKLA, S.K. V.P.S, *Thermal modeling of solar stills an experimental validation*, Renewable Energy 30 (2005) 683–699.
- [16] BADRAN, O. AL-TAHAINEH, H. *The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity*, Desalination 183 (2005) 137–142.
- [17] TANAKA, H. NAKATAKE, Y. *Theoretical analysis of a basin type solar still with internal and external reflectors*, Desalination 197 (2006) 205-216.
- [18] ZAYOUTI, E. BOUIRDEN, L. AHROUNE, A. BANOUNI, M. *Distillation solaire amélioration de la condensation de la vapeur d'eau dans les distillateurs solaires*, Tétouan, Maroc, (2002).
- [19] DE NEYER, P. *Énergie solaire thermique. Extrait du guide des énergies renouvelables*, M R Wallonne (mars 2005).
- [20] PEUSER, F.A. REMMERS, K.H. SCHNAUSS, M. *Installation solaire thermiques*, Moniteur (2005).
- [21] ELMINIR, K. GHITAS, E. EL-HUSSAINY, F. HAMID, R. BEHEARY, M. ABDEL-MONEIM, K. *Optimum solar flat-plate collector slope, case study for Helwan*, Egypt Energy Conversion and Management 47 (2006) 624–637
- [22] KAABI A., SMAKDJI, N. *Impact of temperature difference (water-solar collector) on solar-still global efficiency*, Desalination 209 (2007) 298–305.
- [23] CHAKER, A. MENGUY, G. *Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique*, Rev. Energ. Ren. Journées de Thermique (2001) 53-5853.
- [24] KUMAR, S.TIWARI, G.N. *Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems*, Solar Energy, 57 (1996) 459.
- [25] SFEIR, A.A. GUARRACINO, G. *Ingénierie des systèmes solaires, application à l'habitat*. Technique et documentation, Paris (1981).
- [26] PHADATARE, M.K. VERMA, S.K. *Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a plastic solar still*, Desalination 217 (2007) 267–275.
- [27] TIWARI, A.K. TIWARI, G.N. *Thermal modeling based on solar fraction and experimental study of the annual and seasonal performance of a single slope passive solar still, the effect of water depths*, Desalination 207 (2007) 184–204.
- [28] MEUKAMA, P. NJOMOB, D. GBANEC, A. TOURE, S. *Experimental optimization of a solar still application to alcohol distillation*, Chemical Engineering and Processing 43 (2004) 1569–1577
- [29] TIWARI, A.K. TIWARI, G.N. *Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer*, Desalination, 195 (2006) 78–94.

- [30] TIWARI, G.N. K.SHUKLA, S. SINGH, I.P. *Computer modeling of passive/active solar stills by using inner glass temperature*, Desalination 154 (2003) 171-185.
- [31] SACADURA, J.F. *Initiation aux transfert thermiques*, Technique et documentation, Paris, (1982).
- [32] MALIK, M.A.S. TIWARI, G.N. KUMAR, A. SODHA, M.S. *Solar Distillation*, Pergamon Press, UK, (1982).
- [33] SINGH, H.N. TIWARI, G.N. *Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions*, Desalination 168 (2004) 145–150.
- [34] ZEJLIA, D. BENCHRIFAA, R. BENNOUNAA, A. K.BOUHELALB, O. *A solar adsorption desalination device, first simulation results*, Desalination 168 (2004) 127–135.
- [35] DUFFIE, J.A. BECKMAN, W.A. *Solar energy thermal processes*, John Wiley and sons, New York (1974).
- [36] RUBIO, E. FERNANDEZ, J.L. PORTA-GANDARA, M.A. *A Modeling thermal asymmetries in double slope solar stills*, Renewable Energy 29 (2004) 895–906.
- [37] CAPEDEROU, M. *Atlas solaire de l'Algérie*. O.P.U. (1986)
- [38] TRIPATHI, R. TIWARI, G.N. *Thermal modeling of passive and active solar stills for different depths of water by using the concept of solar fraction*, Solar Energy 80 (2006) 956–96
- [39] MAMLOOK, R. BADRAN, O. *Fuzzy sets implementation for the evaluation of factors affecting solar still production*, Desalination 203 (2007) 394–402
- [40] BOUKAR, M. HARMIM, A. *Effect of climatic conditions on the performance of a simple basin solar still, a comparative study*, Desalination 137 (2001) 15–22.
- [41] BADRAN, A. AL-HALLAQ, A. EYAL SALMAN, I. ODAT, M.Z. *A solar still augmented with a flat-plate collector*, Desalination 172 (2005) 227-234.

---

---

*Theoretical and numerical study of system: plan solar still-collector and hot box solar still-collector*

---

---

**Abstract**

The latest statistics show alarming reports of the water situation in the world. Over than 1.1 billion people living without potable water. This number will increase and nearly 70% of the world's population will be deprived of water in 2017.

The drinking water needs are increasingly perceptible, especially in arid and/or isolated area. In those sites where the brackish water and solar energy are widely available, desalination using renewable energy will not only help to alleviate this deficit, but also provide a solution to the energy economy and the environment. However the problem is the low yield of this type of process.

Thus, in order to improve the production of the solar still, our work focuses on the coupling of a still with a collector. This study was conducted on two types of solar stills, a plan still and a double slope still (hot box).

After establishing the heat balance of the different systems (plan still, plan still-collector, hot box still and hot box still-collector) transient regime, a numerical approach based on the method of Gauss Seidel of iteration is used for resolution of equations governing the functioning of these systems.

The numerical results obtained show clearly the influence of many parameters on the operation of these systems. The improvement of production and efficiencies (internal and global) resulting by preheating the water for both types of solar stills studied (plan and hot box) was estimated.

**Keywords:** plan still, hot box still, collector, preheat, production, efficiency

---

---

# دراسة نظرية و رقمية لأنظمة مرتبطة: مقطر مسطح-لاقط و مقطر ذو انحنائين-لاقط

---

---

## ملخص

الإحصاءات الأخيرة تبين أرقاما مخيفة عن وضعية الماء في العالم. أزيد من 1.1 مليار شخص يعيشون حاليا بدون ماء صالح للشرب. هذا الرقم مرشح للارتفاع حيث أن أكثر من 70% من سكان الكوكب سيحرمون من الماء في 2017.

الاحتياجات للمياه الصالحة للشرب في تزايد مستمر، خاصة في المناطق الجافة و/أو المعزولة. في هذه المناطق أين الماء المالح والطاقة الشمسية متوفران على نطاق واسع، التقطير باستعمال الطاقات المتجددة لا يستطيع فقط التخفيف من هذا النقص ، ولكن يقدم أيضا حلا لمشاكل الاقتصاد في الطاقة و البيئة. في حين المشكل يكمن في ضعف المردود لهذا النوع من الإجراء.

أيضا و بهدف تحسين إنتاجية المقطرات الشمسية، عملنا هذا يعتمد على ربط مقطر بلاقط. هذه الدراسة تمت من اجل نوعين من المقطرات الشمسية، المقطر المسطح و المقطر ذو الانحنائين (هوت بوكس).

بعد كتابة الموازنات الحرارية لمختلف الأنظمة (المقطر المسطح، المقطر المسطح-لاقط، المقطر ذو الانحنائين و المقطر ذو الانحنائين-لاقط) في النظام غير المستقر، مقارنة رقمية مبنية على طريقة قوص صيدال التكرارية استعملت لحل المعادلات التي تحكم اشتغال هذه الأنظمة.

النتائج الرقمية المحصلة توضح جيدا تأثير بعض المعطيات على هذه الأنظمة. التحسن في الإنتاجية و الفعاليتهن الداخلية و الكلية الناتج عن التسخين المسبق للماء، تم تقديره من اجل النوعين المدروسين من المقطرات الشمسية (المسطح و ذو الانحنائين).

**المفاتيح:** مقطر مسطح، مقطر ذو انحنائين، لاقط، تسخين مسبق، إنتاجية، فعالية.

---

---

## *Résumé*

---

---

**L**es dernières statistiques montrent des chiffres alarmants de la situation de l'eau dans le monde. Plus de 1.1 milliard de personnes vivent actuellement sans eau potable. Ce chiffre augmentera et près de 70% de la population de la planète sera privée d'eau en 2017.

Les besoins en eau potable se font de plus en plus ressentir, surtout dans les régions arides et/ou isolées. Dans ces sites où l'eau saumâtre et l'énergie solaire sont largement disponible, le dessalement utilisant les énergies renouvelables pourra non seulement contribuer à alléger ce déficit, mais apportera également une solution aux problèmes de l'économie de l'énergie et de l'environnement. Néanmoins le problème réside dans le faible rendement de ce type de procédé.

Ainsi et dans le but d'améliorer la production des distillateurs solaires, notre travail porte sur le couplage d'un distillateur avec un capteur. Cette étude a été menée sur deux types de distillateurs solaires, un distillateur plan et un distillateur à double inclinaisons (hot box).

Après avoir établi les bilans thermiques des différents système (distillateur plan, distillateur plan-capteur, distillateur hot box et distillateur hot box-capteur), en régime instationnaire, une approche numérique basé sur la méthode de Gauss Seidel d'itération est utilisée pour la résolution des équations régissent le fonctionnement de ces systèmes.

Les résultats numériques obtenus montrent clairement l'influence de nombreux paramètres sur le fonctionnement de ces systèmes. L'amélioration de la production et des efficacités interne et globale résultant du préchauffage de l'eau, pour les deux types de distillateur solaires (plan et hot box) étudiés a été estimée.

**Mots clés :** distillateur plan, distillateur hot box, capteur, préchauffage, production, efficacité