

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

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE
MAGISTERE EN PHYSIQUE ENERGETIQUE

OPTION :
PHOTOTHERMIQUE

Par :

BOUKERZAZA NASSIMA

THEME :

ETUDE DE L'EFFET DES PERTES THERMIQUES SUR LES
CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT D'UN
DISTILLATEUR SOLAIRE

Devant le jury :

Président	R. BENSAHA	Pr.	Univ. Mentouri	Constantine
Rapporteur	A. CHAKER	M.C	Univ. Mentouri	Constantine
Examineur	L. BAHI	Pr.	Univ. Mentouri	Constantine
Examineur	N. ATTAF	M.C	Univ. Mentouri	Constantine

Remerciements

Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant pour avoir m'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**, Maître de conférence à l'institut de physique.*

Je tiens à la remercier pour le sujet de recherche qu'elle m'a proposée, et lui exprimer ma profonde reconnaissance pour tout 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 R. bensaha professeur à l'université de Constantine, pour avoir accepté de présider le jury.

Je tiens également à exprimer Mes remerciement à Monsieur L. Bahi, professeur, et Monsieur N. Attaf, 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 et tous les chercheurs de l'équipe en particulier à Monsieur **N. Bellel** pour l'aide qu'il m' a apporté au sein de laboratoire, et **N. Sotehi** pour ses conseils et encouragements permanents qui m'ont été très utiles.*

Sommaire

Nomenclature	
INTRODUCTION	1
Chapitre I- GENERALITE SUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE	
I.1- LA CONSTANTE SOLAIRE	4
I.2- LA RADIATION SOLAIRE AU NIVEAU DU SOL	5
I.2.1- Composantes du rayonnement solaire	5
I.2.2- Direction des rayons solaire par rapport a un plan	7
I.3- QUELQUE SDONNEES ASTRONOMIQUES	9
I.3.1- Latitude et longitude (f, L)	9
I.3.2- La déclinaison et l'angle horaire (d, w)	9
I.3.3- L'azimut et la hauteur solaire (a, h)	11
I.4- LES TEMPS SOLAIRES	12
I.4.1- Le temps solaire vrai (TSV)	12
I.4.2- Le temps solaire moyen (TSM)	12
I.4.3- Le temps universel (TU)	12
I.4.4- Le temps légal (TL)	13
Chapitre II- DISTILLATION SOLAIRE	
II.1- HISTORIQUE DE LA DISTILLATION SOLAIRE	15
II.2- PRINCIPE DE LA DISTILLATION SOLAIRE	17
II.3- LE DISTILLATEUR SOLAIRE	18
II.3.1- L'effet de serre	18
II.3.2- principe de fonctionnement	18
II.4- LES DIFFERENTS TYPES DE DISTILLATEURS SOLAIRES	19
II.4.1- Distillateur à simple effet	19
II.4.2- Distillateurs à multiples effets	19
II.5- PARAMETRES ET CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT	20
II.5.1- Paramètre influant sur le système de distillation	20

II.5.2- Les caractéristiques de fonctionnement	25
Chapitre III- ETUDE THEORIQUE DE DSTILLATEURS SOLAIRES	
III.1- DISTILLATEUR PLAN	29
III.1.1- Description et principe de fonctionnement	29
III.1.2- Répartition du flux solaire incident dans le distillateur	30
III.2- BILAN ENERGETIQUE GLOBAL D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE	30
III.3- MISE EN EQUATION DES ECHANGES THERMIQUES	32
III.3.1- Bilan thermique de la vitre	32
III.3.2- Bilan thermique de la masse d'eau	33
III.4- EXPRESSIONS DES DIFFERENTS FLUX THERMIQUES ECHANGES	34
III.4.1- Transfers interne	34
III.4.2- Transfert externe	38
III.5- DISTILLATEUR SPHERIQUE A BALAYAGE	42
III.5.1- Description et principe de fonctionnement	42
III.5.2- Bilan Thermique	43
III.6- EXPRESSION DES DIFFERENTS FLUX THERMIQUES ECHANGES	45
III.6.1- Par convection:	45
III.6.2- Par le rayonnement	45
III.6.3- Par l'évaporation	46
III.7- CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT	47
III.8- EXPRESSION DES DIFFERENTES PERTES D' UN DISTILLATEUR SOLAIRE STATIQUE	49
III.8.1- Perte par reflexion et absorption au niveau de la vitre	49
III.8.2- Perte par rayonnement et par convection	49
III.8.3- Pertes par condensation de la vapeur d'eau sur la vitre	50
III.8.4- Pertes par extraction du distillat	50
III.8.5- Perte par apport d'eau d'appoint	50
III.8.6- Perte par rayonnement et par convection au niveau de l'isolant	51
III.10- RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS DE FONCTIONNEMENT D'UN DISTILLATEUR	51
III.10.1- Le problème physique	51
III.10.2- Resolution numérique	51
III.10.3- Traitement informatique	52
III.11- Organigramme	54

Chapitre IV- RESULTATS ET DISCUSSION	
IV.1- VARIATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE	57
IV.2- CARACTERISATION THERMIQUE DES DISTILLATEURS	60
IV.2.1- Effet de l'irradiation globale sur la température des différentes parties d'un distillateur solaire	61
IV.2.2- Caractéristiques de fonctionnements	62
IV.3- EFFET DES PERTES THERMIQUES SUR LES CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT	72
IV.3.1- Estimation des pertes	72
IV.3.2- Bilan des pertes thermiques	74
IV.3.3- Comparaison des différentes pertes thermiques dans un DP et DS	75
IV.3.4- Influence des pertes sur les caractéristiques de fonctionnements	77
IV.4- COMPARAISON DES RESULTATS NUMERIQUES ET EXPERIMENTALES	78
CONCLUSION	80
RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	82
Annexe A: CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE L'EAU	85
Annexe B: METHODE NUMERIQUE UTILISEE	89
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	92

Nomenclature

<u>Notations</u>		<u>Unités</u>
A	: Surface du bac (Plan, Sphérique)	m^2
A_v	: Surface de la vitre (Plan, Sphérique)	m^2
C_{pi}	: 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	$w/m^2.k$
I	: Le rayonnement solaire	w/m^2
L_v	: Chaleur latente de vaporisation	Joule/kg
m_d	: Débit du distillat	kg/s
P_i	: Pression à la température T_i	Pa
q_{ev}	: Flux de chaleur échangée par évaporation	
T_i	: Température de la face d'indice i	k
V	: La vitesse du vent	m/s
 <u>Lettres grecques</u>		
l_i	: Coefficient de conduction à travers la surface i	w/m.k
a	: Coefficient d'absorption	-
t	: Coefficient de transmission	-
r	: Coefficients de réflexion	-
e	: Emissivité	
w	: Angle horaire	degré (°)
d	: Angle de déclinaison	
b	: Inclinaison de la vitre	degré (°)
h	: Efficacité	%
m	: Viscosité dynamique	Kg/m.s

n	:	Viscosité cinématique	m^2/s
r	:	Masse volumique	Kg/m^3

Indice

a	:	Air ambiant
b	:	Bac
bis	:	Absorbeur -isolant
c	:	Ciel
ca	:	Convection à l'extérieur
ci	:	Convection à l'intérieur
cs	:	Convection extérieur de l'isolant
D	:	Direct
d	:	Diffus
e	:	Eau
eb	:	Absorbeur - masse d'eau
ev	:	Evaporation
g	:	Global
ise	:	Isolant extérieur
is	:	Isolant - sol
isi	:	Isolant intérieur
pn	:	Pan noir
ra	:	Rayonnement à l'extérieur
ri	:	Rayonnement à l'intérieur
rais	:	Convection à l'extérieur
rs	:	Rayonnement extérieur de l'isolant
ve	:	Vitrage extérieur
vi	:	Vitrage intérieur

Indexe des tableaux

Tableaux

Tableau I.1- Le quantième du jour de l'année	5
Tableau I.2- Valeurs des coefficients de trouble atmosphérique	6
Tableau I.3- Variation de la pression atmosphérique avec l'attitude	6
Tableau I.4- Albédo de différents sols	7
Tableau III.1- Répartition du flux incident sur les différentes parties du distillateur	30
Tableau III.2- Proportions du flux incident au niveau des différentes parties du distillateur	33
Tableau III.3- Valeurs des constante " n et c " intervenant dans le nombre de Nusselt.	35
Tableau IV.1- Bilan estimatif des différentes pertes thermiques	75
Tableau IV.2- Comparaison des différentes pertes thermiques dans un DP et DS	75

Indexe des figures

Figures

Figure I.1- les coordonnées géographiques terrestres (f , L)	9
Figure I.2- Les coordonnées horaires (d , w)	10
Figure I.3- Les coordonnées horizontales (a , h)	11
Figure II.1- Principe de la distillation solaire	17
Figure II.2- Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire simple	18
Figure II.3- Distillateur solaire a cheminée	20
Figure II.4- Distillateur à mèche évaporante	20
Figure II.5- Distillateur à diffusion	21
Figure III.1- Echange thermique dans un distillateur	29
Figure III.3- Les différents transferts thermiques dans un distillateur solaire	31
Figure III.3- Distillateur sphérique à balayage	43
Figure III.4- Echange thermiques dans le distillateur solaire sphérique	44
Figure IV.1- variation horaire du rayonnement global, direct et diffus	57
Figure IV.2- Variation horaire du flux solaire suivant le trouble atmosphérique	58
Figure IV.3- Variation du rayonnement global en fonction de l'inclinaison	59
Figure IV.4- Equation du temps (E_t) et la déclinaison (d) en fonction du jour de l'année	59
Figure IV.5- Variation de la hauteur solaire en fonction de l'angle horaire	60
Figure IV.6- Variation des différentes températures dans un distillateur plan	61
Figure VI.7- Variation de la production en fonction de l'irradiation globale ($v=1.5$ m/s, $T_a=20^\circ\text{c}$)	62
Figure VI.8- Variation de la production en fonction de l'irradiation globale pour les deux types de distillateurs	63
Figure IV.9- Variation de la production en fonction de la température de l'eau ($v=\text{cte}$)	63
Figure IV.10- Variation de la production en fonction de la température ambiante.	64

Figure IV.11- Variation de la production en fonction de l'irradiation globale pour différentes températures ambiantes. ($v=cte$)	64
Figure IV.12- Variation de la production en fonction de l'écart de température ($V = 1.5m/s$)	65
Figure IV.13- Variation de la production en fonction de la vitesse du vent	66
Figure IV.14- Variation de la production en fonction de la température ambiante pour différentes vitesses de vent	66
Figure IV.15- Variation de l'efficacité global en fonction de l'irradiation ($V=cte$)	67
Figure IV.16- Variation de l'efficacité global en fonction de l'irradiation ($V=cte$) pour les deux type de distillateurs	67
Figure IV.17- Variation de l'efficacité globale en fonction de l'écart (T_e-T_a) à $v=cte$	68
Figure IV.18- Variation de l'efficacité interne en fonction de l'irradiation globale ($V=1.5m/s, T_a=20^{\circ}C$)	68
Figure IV.19- Variation de l'efficacité interne en fonction de T_e	69
Figure IV.20- Variation de l'efficacité interne en fonction de l'irradiation (à $V=cte$) pour les deux type de distillateurs	69
Figure IV.21- Variation de l'efficacité interne en fonction de la vitesse	70
Figure IV.22- Comparaison des efficacités interne et globale	71
Figure IV.23- Pourcentages des différentes pertes thermiques estimés par rapport à G	75
Figure IV.24- Comparaison des différentes pertes thermiques dans un DP et DS	76
Figure IV.25- Effet de l'isolation sur la production	77
Figure IV.26- Effet de l'isolation sur l'efficacité globale	77
Figure IV.27- Effet de l'isolation sur l'efficacité interne	78
Figure IV.28- Variation de la production (théorique et expérimentale) en fonction de l'irradiation globale	79
Figure IV.29- Variation de l'efficacité globale (théorique et expérimentale) en fonction de l'irradiation globale	79
Figure IV.30- Variation de l'efficacité interne (théorique et expérimentale) en fonction de l'irradiation globale	80

Introduction

Les besoins en eau potable dans le monde augmentent d'une manière continue, alors que les réserves souterraines se trouvent constamment diminuées. Les réserves d'eau saumâtres ont des teneurs en sel qui varient de 1500 à 2000(p p m), dépassant les normes exigées pour une eau potable. Le dessalement de ces eaux ou des eaux de mer par des unités classiques de traitement nécessite beaucoup d'énergie électrique et/ou calorifique. Il s'avère que les régions où l'eau potable est un bien rare et l'énergie électrique nécessaire à la production de l'eau douce à partir d'eau saumâtre et/ou d'eau salée souvent inexistante, soient les zones les plus ensoleillées du globe. Aussi l'homme de ces régions déshéritées pourra pallier aux contraintes de ravitaillement et fourniture énergétiques en s'intéressant à l'utilisation de l'énergie solaire pour le dessalement. Plusieurs types de distillateurs solaires ont été construits et essayés à travers le monde.

L'objectif de ce travail est l'étude théorique et numérique de deux types de distillateurs solaires, le distillateur plan et le distillateur sphérique. Nous avons établi les équations régissant le fonctionnement d'un distillateur solaire dans la résolution a été abordé par une approche numérique basé sur la méthode de Gauss Seidel d'itération. Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres météorologiques sur les caractéristiques de fonctionnement.

Confronté au problème du faible rendement, notre intérêt a porté sur les différentes pertes de chaleur qui se produisent pendant le processus de distillation, ces pertes thermiques pouvant affecter considérablement les caractéristiques de fonctionnement de tout distillateur solaire. Notamment le débit de distillat, l'efficacité globale et l'efficacité interne. A partir des résultats obtenus, nous pouvons choisir le distillateur qui répond le mieux aux besoins en eau dessalée, donc une production importante et des pertes minimales.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres;

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans toute relative au domaine solaire.
- Un bref historique sur la distillation solaire, et une recherche bibliographique concernant les différents types de distillateurs, font l'objet du second chapitre.
- Dans le troisième chapitre, nous exposons l'étude théorique des deux types de distillateurs choisis. Nous présenterons successivement le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur, l'expression explicite des différents flux intervenant dans les échanges de chaleur, ainsi que les diverses pertes thermiques qui se produisent au cours du processus de distillation. Nous terminerons par la méthode numérique utilisée pour la résolution du système d'équations de fonctionnement du distillateur.
- Le quatrième chapitre présente l'ensemble des résultats obtenus, ainsi que leurs interprétations.

Ces quatre chapitres sont complétés par deux annexes, contenant respectivement les propriétés thermophysiques de l'eau, et la méthode de résolution numérique utilisée.

Chapitre I

Généralités sur le rayonnement solaire

Ce chapitre est consacré à l'étude du rayonnement solaire et de ses composantes. Les définitions de quelques données astronomiques nécessaires pour cette étude seront également présentées.

Le rayonnement solaire est caractérisé par différentes grandeurs, essentiellement l'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre, appelée "constante solaire" et les diverses altérations et atténuations (aléatoires) que subit le rayonnement solaire, durant la traversée de l'atmosphère terrestre.

I.1- LA CONSTANTE SOLAIRE

La constante solaire est définie comme étant l'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface de 1m^2 placée perpendiculairement à la direction du rayonnement [1]. Elle est indépendante des conditions météorologiques, mais dépend de la distance terre-soleil [2]:

$$C^{\text{te}} \text{ solaire} = I_0 = s \times T_s^4 \times \left(\frac{R_s}{D_{st}} \right)^2$$

Avec:

R_s : le rayon du soleil (m)

D_{st} : distance terre- soleil

s : constante de Stephane-Boltzman: $2p^5 .k^4 / 14.h^3 .c^2 = 5,67.10^{-8} \text{ w/m}^2\text{k}^4$

La distance terre-soleil variant au cours de l'année, la valeur moyenne de la constante solaire (I_0) est de l'ordre 1353w/m^2 . Cette donnée est généralement corrigée par la relation suivante [3], [4]:

$$I_c = I_0 \times \left(1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} \times d \right) \approx I_0 \times (1 + 0.034 \times \cos(m-1) + n) \quad (\text{I.1})$$

Ou encore en fonction de la déclinaison:

$$I_c(d) = I_0 \times \left(1 - \frac{\text{Sin}(d)}{11.7} \right) \quad (\text{I.2})$$

Où:

d : la déclinaison (°)

n : numéro du jour dans le mois

m : numéro du mois dans l'année

d : Numéro du jour dans l'année (tableau I.1) .

Mois	jan	fév.	Mars	Avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct.	nov.	des
Numéro du 1 ^{er} jour de chaque mois dans l'année	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335

Tableau I.1- Le quantième du jour de l'année

I.2- LA RADIATION SOLAIRE AU NIVEAU DU SOL

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altérations et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère; réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols (la poussière, les gouttelettes....)

Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse (c'est à dire isotrope). L'autre partie dite directe est anisotrope [3].

Le rayonnement global est par conséquent la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

I.2.1- Composantes du rayonnement solaire

L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit. Les composantes du rayonnement solaire incident instantané sont:

I.2.1.1- Le rayonnement direct, provenant du disque solaire et qui subit l'atténuation due à la traversée de l'atmosphère. L'expression du rayonnement direct pour un plan orienté vers le sud est donnée par l'expression [3]:

$$I_D = I_C \times a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right) \times \cos(i) \quad (I.3)$$

Avec: $I_C = I_0 \times (1 + 0.034 \times \cos(m-1) + n)$

a et b : Coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

Le (tableau I.2) rassemble quelques valeurs de a et b .

$$\sin h = \cos(d) \times \cos(w) \times \cos(f) + \sin(d) \times \sin(f) \quad (I.4)$$

h: Etant la hauteur du soleil

w, d, f Sont respectivement l'angle horaire, la déclinaison, et la latitude (°).

La pression atmosphérique "p" en fonction de l'altitude est illustrée par le tableau I.3

$$\cos(i) = \cos(w) \times \cos(d) \times \cos(f - B) + \sin(d) \times \sin(f - B) \quad (I.5)$$

Où b est l'inclinaison du plan considéré (°).

	Ciel pur	Condition normale	Zones industrielles
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

Tableau I.2- Valeurs des coefficients de trouble atmosphérique

Attitude	0	500	1000	1500	2000	5000
p (mbar)	1000	950	900	850	800	500

Tableau I.3- Variation de la pression atmosphérique avec l'attitude

I.2.1.2- Le rayonnement diffus, provient de tous les éléments irradiés par le soleil. Le flux diffus reçu par la surface du capteur se caractérise par deux composantes du flux à savoir:

- Le flux diffus émit par la voûte céleste (j_1), donné par la relation [3]:

$$j_1 = j_0 \times \frac{1 + \cos(B)}{2} \quad (I.6)$$

- Le flux émis par le sol (j_2)

$$j_2 = r \times \frac{1 - \cos(B)}{2} \times (I_c \times t_{dir} \times \sin(h) + j_0) \quad (I.7)$$

avec:

$$j_0 = I_c \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times t_{dir}) \quad (I.8)$$

t_{dir} : La transmissivité totale de la couche atmosphérique dont l'expression est :

$$t_{dir} = a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right) \quad (I.9)$$

r L'albédo du sol donnée par le tableau I.4

Nature du sol	L'albédo
Herbe fraîche	0,20
Herbe sèche	0,30
Terre cultivée, nue	0,16
gravier	0,22
Neige fraîche	0,85
Etendu d'eau	0,05

Tableau I.4- Albédo de différents sols.

Le flux diffus total s'écrit par conséquent de la manière suivante:

$$I_d = j_1 + j_2 \quad (I.10)$$

I.2.1.3- le rayonnement global: Le rayonnement global sur une surface quelconque au voisinage du sol est la somme de ces deux composantes:

$$I_g = I_D + I_d \quad (I.11)$$

I.2-2 Direction des rayons solaire par rapport a un plan

Soit un plan quelconque sur la terre à un instant quelconque, repérons sa position par les deux angles a et b tels que:

b : Angle entre le plan horizontal et le plan considéré (inclinaison):

$b > 0$ si le plan en face de l'équateur

$b = 0$ pour le plan horizontal

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

a : Angle entre le méridien local et la normale au plan

$a = 0$ vers le sud

$a < 0$ vers l'est

$a > 0$ vers l'ouest

$a = p$ vers le nord

Soit "i" l'angle entre le rayon incident et la normale au plan considéré.

Pour une surface orientée vers le sud et inclinée d'un angle b sur l'horizontale, La valeur de "i" est donnée par la relation suivante [3], [4]:

$$\cos(i) = \cos(w) \times \cos(d) \times \cos(f - B) + \sin(d) \times \sin(f - B) \quad (\text{I.12})$$

Cas particulier:

- ◆ Le plan est horizontal ($B = 0$)

$$\cos(i) = \cos(w) \times \cos(d) \times \cos(f) + \sin(d) \times \sin(f)$$

- ◆ Le plan est vertical

-Orienté vers le sud ($B = 90^\circ$)

$$\cos(i) = \cos(w) \times \cos(d) \times \sin(f) - \cos(f) \times \sin(d)$$

-Orienté vers le nord

$$\cos(i) = \sin(d) \times \cos(f) - \sin(f) \times \cos(d) \times \sin(f)$$

-Orienté vers l'est

$$\cos(i) = -\sin(w) \times \cos(d)$$

§ Orienté vers l'ouest:

$$\cos(i) = \sin(w) \times \cos(d)$$

I.3- QUELQUES DONNEES ASTRONOMIQUES

I.3.1- Latitude et longitude (f, L)

Ce sont les coordonnées géographiques terrestres qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure I.1).

- ✚ La latitude f , permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle est comptée positivement de 0 à 90° vers le nord et négativement de 0 à -90° vers le sud.
- ✚ la longitude L , est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

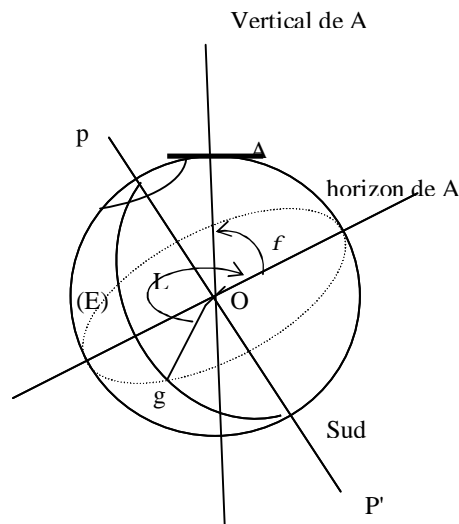


Figure I.1- les coordonnées géographiques terrestres (f, L)

I.3.2- La déclinaison et l'angle horaire (d, w)

Ce sont les coordonnées horaires (figure I.2).

- ✚ La déclinaison d , est l'angle que fait le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique (la trajectoire de la terre autour du soleil), elle varie au cours de l'année entre (-23° et 45') et (+23° et 45'). d est nulle aux équinoxes (21 mars et 23 septembre), maximale au solstice d'été (22 juin) et minimale au solstice d'hiver (22 décembre).

La déclinaison d varie sinusoïdale sur une année.

Les formules généralement utilisées sont [3], [4]:

$$d = 23.45 \sin \frac{360(284 + d)}{365} \approx 23.45 \sin \frac{360}{365}(d - 81) \approx 23.45 \cos(30m + n - 202) \quad (\text{I.13})$$

✚ L'angle horaire w , est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe, il est directement lié au temps solaire vrai (TSV) par la relation suivante:

$$w = 15 \times (\text{TSV} - 12) \quad (\text{I.14})$$

Notons que: $w = 0$ au midi solaire vrai

$w < 0$ la matinée

$w > 0$ L'après midi

w : En degrés, et TSV en heures, et chaque heure égale à 15° de longitude.

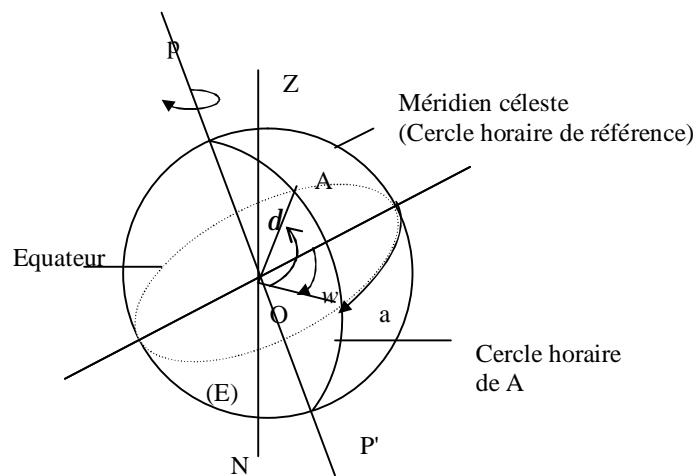


Figure I.2- Les coordonnées horaires (d , w)

I.3.3- L'azimut et la hauteur solaire (a, h)

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles (figure I.3):

✚ L'azimut a , l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud, il est compté de 0° à 360° d'ouest en est.

✚ La hauteur h , L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir.

On appelle parfois distance zénithale le complément de l'angle h : $Z+h=90^\circ$

Au lever et au coucher du soleil " $h=0^\circ$ "

Les équations de passage de coordonnées horizontales (a, h) en coordonnées horaires (d, w) sont :

$$\sin(a) \times \cos(h) = \cos(d) \times \sin(w)$$

$$\cos(a) \times \cos(h) = \cos(d) \times \cos(w) \times \sin(f) - \cos(f) \times \sin(d)$$

Avec: $\sin(h) = \cos(f) \times \cos(d) \times \cos(w) + \sin(f) \times \sin(d)$ (I.15)

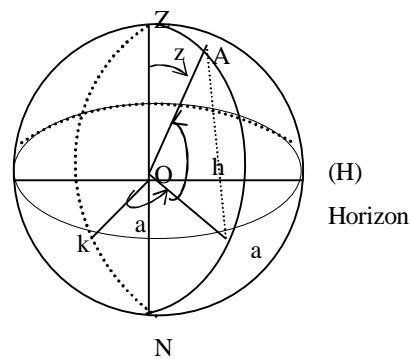


Figure I.3- Les coordonnées horizontales (a, h)

I.4- LES TEMPS SOLAIRES

Pour les applications de l'énergie solaire, il faut faire intervenir le temps solaire vrai, qui se calcule en tenant compte de l'écart entre le temps solaire moyen et le temps local.

I.4.1- Le temps solaire vrai (TSV)

Il est donné par relation :

$$TSV=12+ w /15 \quad (I.15)$$

$$TSV=12^h \text{ si } w=0^\circ$$

w est compté positivement l'après midi.

I.4.2- Le temps solaire moyen (TSM)

Le temps solaire moyen diffère peu du temps solaire vrai, cette différence définit l'équation du temps Et :

$$Et =TSV- TSM \quad (I.16)$$

"Et" étant la correction du TSV par rapport au TSM; cette correction varie de 14 minutes (11février) à -16 minutes (3 novembre)

$$Et=9.87\text{Sin}(2N)-7.53\text{Cos}(N) \quad (\text{min}) \quad (I.17)$$

$$N= (d-81) \times 360/365 \quad (I.18)$$

Où d est le quantième du jour de l'année (tableau I.1).

I.4.3- Le temps universel (TU)

En un lieu de longitude donnée, le temps universel est lié au temps solaire moyen (local) par la relation:

$$TU =TSM \pm \frac{L}{15} \quad (I.19)$$

(+) Pour longitudes Est; (-) pour longitudes Ouest

Le temps universel se calcule finalement par la formule:

$$TU = TSV + ET \pm \frac{L}{15} \quad (I.20)$$

I.4.4- Le temps légal (TL)

C'est le temps officiel de l'état, lié au TU par une différence fixe, exprimé en un nombre entier d'heures qui dépend de la longitude et des coutumes de chaque pays.

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.21)$$

ΔH étant le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré, ($\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie).

Chapitre II

Distillation solaire

Nous commencerons ce chapitre par un bref historique de la distillation solaire puis nous présenterons les différents types de distillateurs solaires, leur principe de fonctionnement et les caractéristiques de fonctionnement qui conditionnent le choix d'un distillateur solaire.

Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres est désormais envisageable pour répondre à la demande en eau potable. Parmi les différents procédés, la distillation solaire est une solution intéressante pour les régions isolées et/ ou éloignées.

II.1- HISTORIQUE DE LA DISTILLATION SOLAIRE

La distillation solaire a été utilisée depuis plusieurs siècles; mais la plus grande réalisation est apparue en 1872 près de Las- Salinas dans le nord du Chili. Le modèle a été fabriqué par Carlos Wilson, un ingénieur suédois avec une surface vitrée de 5000m², produisant jusqu'à 20m³ d'eau douce par jour à partir d'une eau saline contenant 140gr/l [5].

Ce système fonctionna jusqu'en 1910 à cause d'un problème d'accumulation rapide des sels dans le bassin, nécessitant un nettoyage régulier du distillateur. La distillation solaire connut une période creuse entre 1880 et la première guerre mondiale. En 1920, Kaush utilisa des réflecteurs en métal pour concentrer les rayons solaires; il en résulte l'apparition de nouveaux appareils (types toit, couverture en V, plateau incliné...etc.) [6].

Une installation due à Ginistous groupant 30 appareils de 1m² fut réalisée et exploitée à Bengardane en Tunisie en 1929. Au début des années 30, Trifinov proposa un distillateur inclinée; en 1938 Abbot utilisa des réflecteurs cylindriques paraboliques pour concentrer les rayons solaires, le tout est acheminé dans des tubes contenant de l'eau.

Maria Telks inventa en 1945 un nouveau type de distillateur solaire appelé distillateur sphérique, qui fut utilisé par la marine américaine; un grand nombre de ce modèle, environ 2000 a été utilisé pendant la 2^{ème} guerre mondiale. En 1969, Cooper proposa une simulation pour analyser les performances d'un distillateur solaire type serre [7]. Depuis les années 70, plusieurs autres types de distillateurs ont été élaborés et étudiés, Parmi lesquels :

- le distillateur à effet multiple;
- le plateau incliné ou le distillateur solaire incliné;
- le distillateur solaire type mèche inclinée ou type multiple mèches;
- combinaison du distillateur solaire serre.

Plusieurs pays se sont intéressés à la distillation solaire parmi lesquels [8]:

L'Algérie

En 1953 Cyril Gomela a développé différents types de distillateurs solaires; plus de 20 distillateurs solaires d'une dizaine de types ont été testés et certains d'entre eux ont été

commercialisés à travers l'Afrique du Nord, le Sénégal et l'Australie .Des essais ont été effectués au Sahara de Biskra, à Tamanrasset et Adrar.

L'Australie

Le CSIRO (Common Wealth Scientific and Industriel Research Organization) a entrepris des recherches sur ce type de distillation, une unité similaire à celle de Gomela a été développée. Entre 1963 et 1967 le CSIRO a construit et testé plus de 8 distillateurs. Le but de ces tests était d'améliorer l'efficacité du distillateur. Une variété de matériaux a été utilisée pour la construction du distillateur [8].

Le Chili

En plus de l'installation du premier distillateur construit en 1872, d'autres sites de distillateurs inclinés ont été installés entre 1969 et 1970 [8]. Le but de ce travail était de prédire les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur sous différentes conditions atmosphériques.

L'Inde

En 1957, deux petits distillateurs solaires à effet de serre ont été construits pour étudier les effets de l'inclinaison de la vitre. Il a été constaté qu'un distillateur en verre avec une faible épaisseur de la solution donnait de bon rendement.

Les USA

Des centres de recherche, dont l'université de Californie ont entrepris, juste après la deuxième guerre mondiale, des recherches sur la distillation solaire. Plusieurs configurations d'un distillateur solaire simple ont été construites et testées pour essayer de réduire d'une part le coût et d'augmenter le rendement d'autre part ; les effets de nombreux paramètres, différents matériaux d'isolation ont été étudiés [9].

Plusieurs autres pays (Grèce, Tunisie, Maroc) se sont également consacrés à l'étude de la distillation solaire et ont ainsi réussi à améliorer la production.

II.2- PRINCIPE DE LA DISTILLATION SOLAIRE

La distillation solaire est l'une des techniques utilisées pour la production de l'eau douce à partir d'eau saumâtre et d'eau de mer grâce à l'énergie solaire. Il s'agit de réaliser artificiellement et à petite échelle ce que la nature fait journalièrement et à grande échelle et qui consiste en, l'absorption de la radiation solaire, par les océans, les lacs, les rivières, provoquant l'évaporation de l'eau. La vapeur produite est transportée, vers des régions plus froides par l'intermédiaire du vent. Quand la vapeur est refroidie, la condensation commence à provoquer des précipitations de pluies et éventuellement de la neige. L'homme a reproduit, en un modèle miniaturisé, ce cycle naturel (Figure II.1).

Il faut distinguer deux catégories de procédés : la distillation solaire par « effet de serre » et la distillation par application d'un des procédés industriels de distillation thermique, la vapeur étant produite non par une chaudière classique, mais par une chaudière solaire. Dans le cadre de ce travail, notre intérêt portera, sur la première catégorie [10].

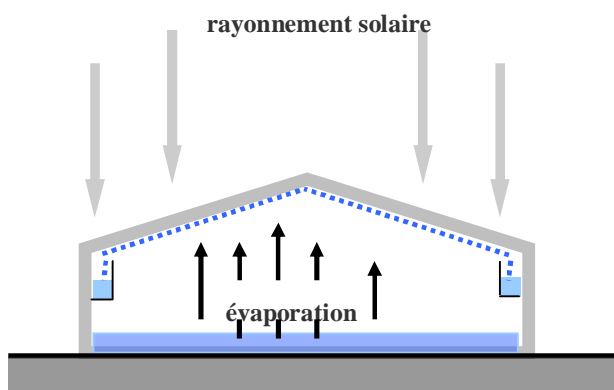


Figure II.1- Principe de la distillation solaire

II.3- LE DISTILLATEUR SOLAIRE

II.3.1- L'effet de serre

Le rayonnement solaire apporte de l'énergie sous forme de flux lumineux dans un domaine de longueur d'onde allant de 0.2 à 3.5 m m (le visible et le proche de l'infrarouge). L'énergie incidente traverse une couverture (le plus souvent en verre) transparente aux rayons de faible longueur d'onde, puis elle est absorbée par une surface (noire mate) qui s'échauffe et remet dans le domaine de grandes longueurs d'onde comprises entre 4 à 30 m m (infrarouge éloigné) et qui ne peut traverser la vitre réalisant ainsi un piège à calories " l'effet de serre" [11], [12].

II.3.2- principe de fonctionnement

Les distillateurs solaires utilisent tous le même principe de fonctionnement; néanmoins, ils peuvent différer les uns des autres en conception et en matériau. Le fonctionnement d'un distillateur solaire repose sur l'effet de serre.

L'énergie solaire entrant par la couverture est absorbée par l'eau et le fond noirci ; puis elle est transmise à l'air par conduction, convection et rayonnement. Comme les parois sont isolées et le verre opaque aux radiations infrarouges de grandes longueurs d'ondes l'énergie solaire se trouve ainsi emprisonnée (effet serre) et l'air chauffé. (Figure II.2)

La température de la couverture en contact avec l'air atmosphérique étant inférieure à celle du mélange air vapeur d'eau, il se produit une condensation de la vapeur d'eau sur la surface intérieure de la vitre [1], [12], [13].

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

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

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

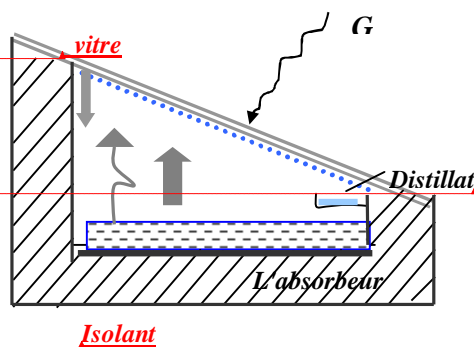


Figure II.2- Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire simple

II.4- LES DIFFERENTS TYPES DE DISTILLATEURS SOLAIRES [5]

II.4.1- Distillateur à simple effet

C'est un distillateur qui a un seul évaporateur. Néanmoins il existe plusieurs modèles de ce type, le plus connu est le distillateur type bassin. Cependant, il présente un certain nombre d'inconvénients et principalement la position horizontale de la vitre qui intercepte moins de rayonnement solaire qu'une surface convenablement inclinée. Nous pouvons également citer les distillateurs à cuvette inclinée construits par Tlemat et Howe en 1966 à l'université de Californie et les distillateurs en cascades construits par Achilov et al en 1973 ces derniers présentent deux avantages, une couche d'eau très mince et une orientation par rapport au rayonnement incident qui se rapproche de l'optimum.

II.4.2- Distillateurs à multiples effets

Le distillateur solaire à multiples effets est constitué de plusieurs évaporateurs placés en série et opérant à des pressions décroissantes; l'effet de tête et l'effet de queue. Dans ce qui suit, nous allons décrire brièvement la conception et le fonctionnement de quelque uns.

II.4.2.1- Distillateur à diffusion (OLTRA.1972)

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

II.4.2.2- Distillateur solaire a cheminée (BERTOLI et al 1976)

Ce distillateur 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 il se condense, la chaleur de condensation peut être utilisée pour le préchauffage de l'eau entrant dans le système (figure II.4).

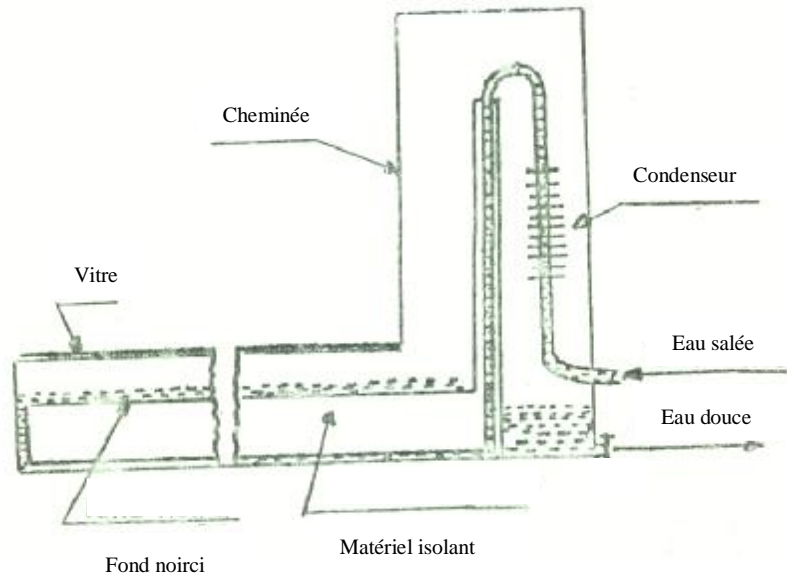


Figure II 3 - Distillateur à cheminée

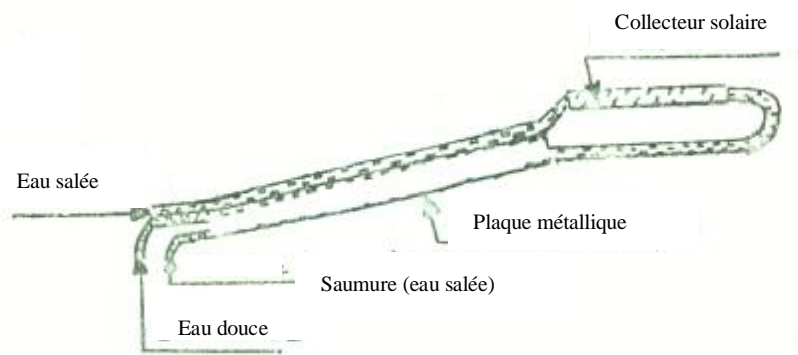


Figure II 4 - Distillateur à mèche évaporante

II.4.2.3- Distillateur à mèche évaporante (BARTOLI et al 1976)

Ce distillateur a été construit pour économiser la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation (figure II.5). L'évaporateur est constitué par la juxtaposition de trois plaques parallèles légèrement distinctes.

L'eau à distiller passe dans la première enceinte et arrive au capteur où elle s'échauffe puis s'évapore dans deuxième enceinte, et la condensation s'effectue sur la face inférieure du milieu. Les deux dernières plaques sont munies d'un grillage qui augmente l'échauffement et uniformise l'écoulement de l'eau.

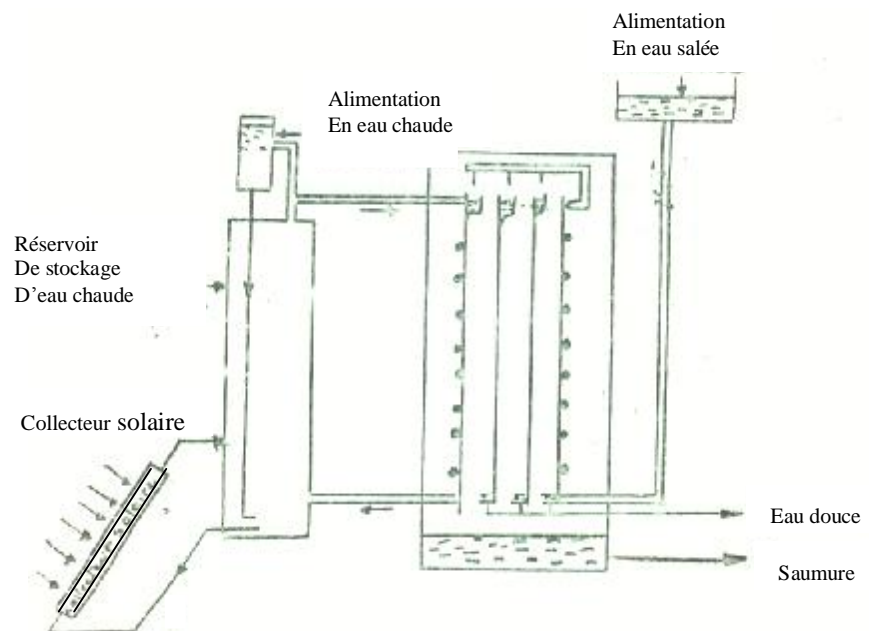


Figure II.5- Distillateur à diffusion

Il existe d'autres plusieurs types de distillateurs qui sont développés à partir des distillateurs cités précédemment parmi lesquels:

- Le Distillateur thermo solaire à cascades [14].
- Le Distillateur solaire rustique, a film capillaire et à multiples effets [15]
- Le Distillateur thermo solaire muni d'une cuve de stockage [16]
- Distillateur solaire fonctionnant en mode indirect [17]
- Le distillateur solaire plan et le distillateur sphérique qui feront l'objet de notre travail et que nous étudierons en détail dans le troisième chapitre.

II.5- PARAMETRES ET CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT

Le choix d'un distillateur solaire dépend de grandeurs appelées "Caractéristiques de fonctionnement" (le débit de distillat, l'efficacité globale et l'efficacité interne) qui sont généralement influencées par les paramètres de fonctionnement [18].

II.5.1- Paramètre influant sur le système de distillation

Deux types de paramètres influençant le système de distillation pour un site donné doivent être pris en compte:

II.5.1.1- Paramètres externes

Ces paramètres sont liés au site :

- ◆ Paramètres géographiques, tels que la longitude, la latitude et la hauteur du soleil.
- ◆ Paramètres météorologiques, dont les plus fréquemment retenus est :
 - la vitesse du vent, qui intervient surtout dans l'échange par convection entre la face externe et l'ambiance.
 - La température ambiante dont l'augmentation conduit à une décroissance de la production.
 - D'autres paramètres atmosphériques tels que la pluie, la rosée, la poussière peuvent également influencer.
 - Paramètres d'ensoleillement :(rayonnement global, position du soleil)

Il est évident que la production dépend de la quantité de chaleur que reçoit le distillateur, (l'irradiation globale incidente).

II.5.1.2- paramètre internes

a) Paramètres de position

- L'emplacement du distillateur, où les distillateurs doivent être placés de façon à éviter les obstacles " l'effet de masque " qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation:

- L'orientation: elle dépend essentiellement du fonctionnement du distillateur pendant la journée, on distingue notamment:

-Fonctionnement pendant la matinée.....orientation Est;

-Fonctionnement pendant l'après- midiorientation Ouest;

-Fonctionnement durant toute la journée.....orientation Sud

- L'inclinaison, elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année:

-fonctionnement estival $b = f - 10$

-fonctionnement hivernal..... $b = f + 20$

-fonctionnement annuel..... $b = f + 10$

b) Paramètre de construction (géométriques)

Les matériaux utilisés dans la construction du distillateur ont une grande influence sur le fonctionnement de ce dernier, notamment:

◆ La couverture:

La couverture intervient essentiellement par:

-sa nature

-sa mouillabilité par l'eau

-sa transparence au rayonnement solaire

- son opacité au rayonnement infrarouge de grandes longueurs d'ondes

-sa résistance aux attaques du vent et des particules solides

-le nombre de vitres dans le cas où la couverture est vitrée.

- son inclinaison par rapport à l'horizontal

◆ La surface absorbante:

Le rôle de l'absorbeur est de transformer le rayonnement solaire incident en flux thermique, les caractéristiques idéales sont: un facteur d'absorption proche de l'unité, une bonne conductivité thermique, une bonne résistance chimique vis à vis du fluide qui le baigne et une faible inertie thermique. En outre il doit pouvoir supporter les grandes températures sans qu'il y ait une détérioration de sa surface.

On choisit généralement l'aluminium et le cuivre recouverts d'une mince couche de peinture noire mate, pour augmenter son pouvoir d'absorption et réduire les pertes thermiques par réflexion et diffusion.

♦ **La distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation**

Ce paramètre détermine l'intensité des pertes thermiques latérales par convection, et la grandeur de la couche tampon qui freine l'échange entre la surface d'évaporation et la surface de condensation. Une recherche a montré qu'une réduction de ce paramètre augmente le facteur de performance brut [19].

♦ **Paramètres de la saumure:**

L'épaisseur de la nappe d'eau; Plus cette dernière est importante, moins sa température fluctue au cours de la production. L'inertie thermique augmente avec l'épaisseur, et la durée de fonctionnement nocturne croît également avec l'épaisseur, cependant la production moyenne pendant 24 heures diminue lorsque l'épaisseur augmente. Des expériences ont montré que cette production suit la loi [20]:

$$Y = \frac{a}{X + b} + c$$

Avec:

Y : La production

X : L'épaisseur de la saumure

a, b, c: Paramètres dépendant de la forme de l'appareil et des conditions locales.

- Température de la saumure: les expériences faites dans le Sahara algérien [20] sur les distillateurs solaires à effet de serre ont montré que le débit instantané en fonction de la température suit une loi hyperbolique selon:

$$y = \frac{51.607}{117 - T} - 0.613$$

Avec :

Y: Le débit instantané, exprimé en litre par heure.

T: La température, en degré centigrade, de la saumure dans la couche supérieure.

Lorsque la température de la saumure augmente, un dépôt blanc sur la surface libre de l'eau due à la formation de carbonates insolubles dans la saumure a été observé; le dépôt salin agit sur le pouvoir absorbant de la surface noire et fait chuter considérablement la production [21].

-Concentration du sel: La production du distillateur diminue quand la concentration augmente.

◆ **Paramètres optiques :**

Les paramètres sont l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmittivité de la surface absorbante et de la couverture.

◆ **Paramètres Thermo physiques:**

Les paramètres thermo physiques sont:

- La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique de la couverture et la surface absorbante.

- la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique de la saumure.

- la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique et le coefficient de dilatation thermique du mélange air - vapeur.

II.5.2- Les caractéristiques de fonctionnement:

Un distillateur solaire est caractérisé essentiellement par les grandeurs suivants [5], [1], [22]

II.5.2.1- La production (le débit de distillat) qui est la quantité d'eau distillée journalière produite par unité de surface d'évaporation.

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

II.5.2.2- L'efficacité globale représentant le rapport de la quantité d'énergie évaporée par (m^2), à la quantité d'énergie globale incidente par (m^2) sur une surface horizontale. Elle est définie par le rapport:

$$h_g = \frac{q_{ev}}{G \cdot A} = \frac{m_d \cdot L_v}{G \cdot A} \quad (II.2)$$

Avec:

q_{ev} : Quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps

A: Superficie du capteur (aire de la vitre).

G: Energie solaire globale incidente par m^2 sur une surface horizontale, pendant un jour.

L_v : Chaleur latente de vaporisation

m_d : Le débit de distillat

II.5.2.3- L'efficacité interne, qui représente le rapport de la quantité d'énergie évaporée par (m^2) de surface, à la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure par (m^2) de surface.

$$h_i = \frac{q_{ev}}{q_{eau}} = \frac{m_d \cdot L_v}{a_t \cdot G \cdot A} \quad (II.3)$$

Pour une intensité globale G , l'expression de q_{eau} est [5], [1], [22]:

$$f_{eau} = (t_v a_e + t_v t_e a_f) \times G \cdot A \quad (II.4)$$

En posant:

$$a_t = t_v a_e + t_v t_e a_f \quad (II.5)$$

$$f_{eau} = a_t \cdot G \cdot A \quad (II.6)$$

Il en résulte:

$$h_i = \frac{h_g}{a_t} \quad (II.7)$$

a_i : Le coefficient d'absorption global du distillateur.

On notera que Satcunanathan and Hansen [13], [18] a défini un facteur de performance brut (F.P.B) et un facteur de performance horaire (F.P.H) qui permet de caractériser d'une manière plus absolue le distillateur, leurs expressions respectives sont:

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24h}}$$

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}}$$

A un instant donné de la journée le facteur de performance F.P est donné par la relation:

$$FP = \frac{m_d}{a_i \cdot G \cdot A}$$

Chapitre III

Etude théorique de distillateurs solaires

Ce chapitre est consacré à l'étude théorique de deux types de distillateurs solaires "le distillateur solaire plan et le distillateur solaire sphérique" nous présenterons le principe de fonctionnement, nous établirons le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur, et le système d'équations résultant est résolu par une approche numérique basée sur la méthode de Gauss Seidel d'iteration.

Le choix d'un distillateur solaire parmi différents types de distillateurs dépend de grandeurs appelées caractéristiques de fonctionnement (le débit de distillat, l'efficacité globale et l'efficacité interne); tenant compte de ces critères, notre choix s'est porté sur deux types de distillateurs.

III.1-DISTILLATEUR PLAN

III.1.1- Description et principe de fonctionnement

Un distillateur solaire plan (figure III.1) est constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau douce ou eau de mer à distiller). Sous l'action du flux solaire frappant la surface transparente, l'eau s'échauffe, s'évapore, la vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre, et le condensat est récupérée dans un receveur; un appoint d'eau compense le débit de distillat. Afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur, les parois latérales et inférieures sont isolées [1], [5].

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

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

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

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

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

Mis en forme : Indice

Mis en forme : Indice

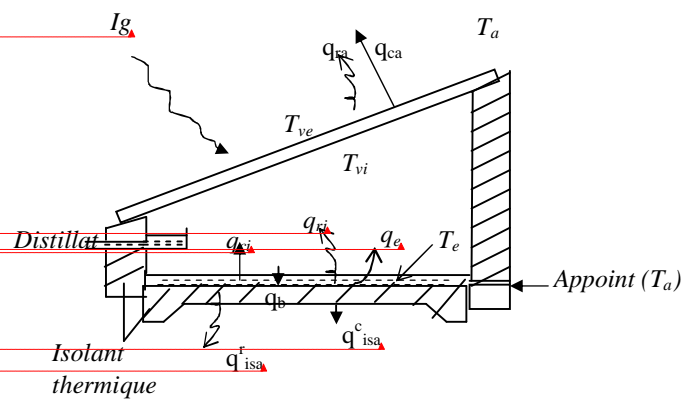


Figure III.1- Echange thermique dans un distillateur

III.1.2- Répartition du flux solaire incident dans le distillateur

Le flux solaire incident transmis à travers la couverture transparente se répartit entre les différentes parties du distillateur selon les proportions présentées dans le tableau III.1.

Flux incident	Vitre	Plan d'eau	Fond du distillateur "bac"
Réflexion	$r_v G$	$r_e t_v G$	$r_f t_e t_v G$
Transmission	$t_v G$	$t_e t_v G$	
Absorption	$a_v G$	$a_e t_v G$	$a_f t_e t_v G$

Tableau III.1- Répartition du flux incident sur les différentes parties du distillateur

Avec: r , t et a respectivement les coefficients de réflexion, de transmission et d'absorption.

Les indices v, e, f désignent respectivement la vitre, l'eau et le bac du distillateur.

III.2- BILAN ENERGETIQUE GLOBAL D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE

Avant d'établir le bilan énergétique global d'un distillateur solaire, il faut déterminer, en premier lieu, les principaux transferts de chaleur qui se produisent à l'intérieur de ce distillateur (figure III.2), à savoir:

III.2.1- Au niveau de la vitre:

- Du côté intérieur la vitre reçoit les flux par convection q_{ci} , par rayonnement q_{ri} et par évaporation q_{ev} .
- du côté extérieur la vitre cède à l'air ambiant la somme de deux flux q_{ca} et q_{ra} .

III.2.2- Au niveau de la saumure

La saumure cède par rayonnement le flux q_{ri} , par convection naturelle le flux q_{ci} , et par évaporation (au cours de changement de phase) un flux q_e , à la surface de condensation (vitre intérieure du distillateur).

III.2.3- Au niveau de l'absorbeur:

La nappe d'eau reçoit d'une part par conduction et convection un flux de chaleur q_b , de l'absorbeur (bac), et cède d'autre part par conduction un flux q_{bis} à l'isolant.

III.2.4- Au niveau de l'isolant

L'isolant reçoit par conduction un flux q_{bis} de l'absorbeur et pourrait éventuellement céder à l'extérieur q_{ris} et q_{cis} respectivement par rayonnement et par convection. La figure III.3, illustre qualitativement les échanges thermiques au sein d'une section d'un distillateur solaire [23].

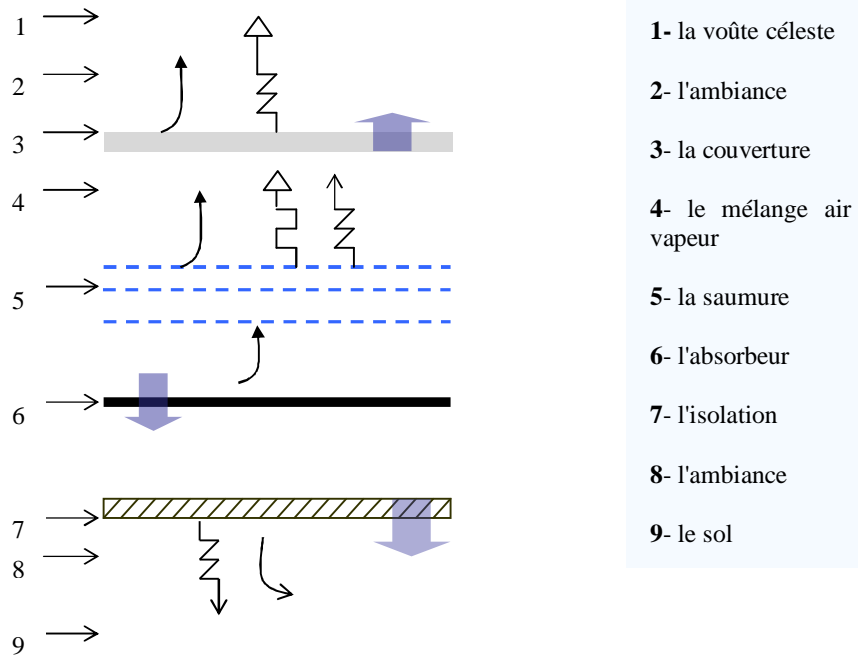
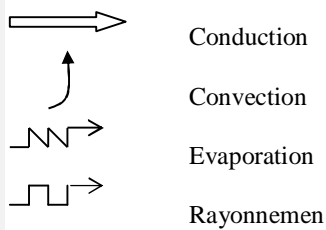


Figure III.3- Les différents transferts thermiques dans un distillateur solaire

LEGENDE



III.3- MISE EN EQUATION DES ECHANGES THERMIQUES

Dans le cadre de cette étude nous avons adopté les hypothèses suivantes :

- **v** La chaleur perdue par addition d'eau d'appoint et celle emportée par le distillat sont supposées négligeables.
- **v** Le régime est permanent.
- **v** Les propriétés des matériaux sont considérées constantes.
- **v** La condensation se fait uniquement sur la couverture.
- **v** la concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse.
- **v** La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité).
- **v** Le bassin est étanche (la saumure dans le bac est statique).

En prenant en compte les hypothèses citées nous avons établi les échanges thermiques au niveau de chaque partie du distillateur.

III.3.1- Bilan thermique de la vitre

- Du côté intérieur, la vitre reçoit la somme de trois flux : $q_{ri} + q_{ci} + q_e$
- Du côté extérieur, le flux cédé par la vitre est égal à $q_{ra} + q_{ca}$
- L'échange intérieur - extérieur s'effectue à travers la vitre par conduction :

$$q = \frac{I_v}{e} (T_{vi} - T_{ve}) \quad (\text{III.1})$$

D'où les équations [5], [24] :

$$q_{ri} + q_{ci} + q_e = \frac{I_v}{e} (T_{vi} - T_{ve}) A_v \quad (\text{III.2})$$

et

$$q_{ra} + q_{ca} = \frac{I_v}{e} (T_{vi} - T_{ve}) A_v \quad (\text{III.3})$$

e : épaisseur de la vitre, I_v sa conductivité thermique.

T_{vi}, T_{ve} : respectivement les températures intérieure et extérieure de la vitre.

III.2- Bilan thermique de la masse d'eau

En admettant que le rayonnement incident transmis et absorbé par le bac est complètement cédé à la masse d'eau qui par ailleurs échange pendant le même temps avec la vapeur ou dessus du plan d'eau des quantités de chaleur par convection q_{ci} , par rayonnement q_{ri} et par évaporation q_e à travers le bac et avec l'eau d'appoint ce qui permet d'écrire [5], [24]:

$$q_{ri} + q_{ci} + q_e + m_d \cdot C_e (T_e - T_a) + q_b = q_{eau} \quad (III.4)$$

La quantité de chaleur effectivement absorbée par la masse d'eau q_{eau} dépend des proportions du flux incident au niveau des différentes parties du distillateur (tableau III.2)

Angle d'inclinaison	0-30°		
	Réflexion	Absorption	Transmission
Vitre E ≈ 4 à 6mm	5% $r_v G = 0.05$	5% $a_v G = 0.05$	90% $t_v G = 0.9$
Nappe d'eau e ≈ 10mm	2% $r_e t_v G = 0.02G$	30% $a_e t_v G = 0.26G$	68% $t_e t_v G = 0.62G$
Fond du distillateur	5% $r_f t_e t_v G$	95% $a_f t_e t_v G = 0.59G$	0%

Tableau III.2- Proportions du flux incident au niveau des différentes parties du distillateur

Nous pouvons ainsi écrire que:

$$q_{eau} = [G \cdot t_v \cdot a_e + G \cdot t_v \cdot t_e \cdot a_f] \times A_e \quad (III.5)$$

$$q_{eau} = [t_v \cdot a_e + t_v \cdot t_e \cdot a_f] G A_e \quad (III.6)$$

Posons

$$a_i = t_v \cdot a_e + t_v \cdot t_e \cdot a_f$$

a_f est appelé coefficient d'absorption fictif de la masse d'eau.

III.3.3- Bilan thermique de l'absorbeur

D'une part, l'absorbeur cède le flux de chaleur q_{eb} à la masse d'eau et le flux q_{bis} à l'isolant; d'autre part l'absorbeur reçoit le flux $t_v t_e . A.G$.

D'ou l'équation:

$$q_{eb} + q_{bis} = t . A.G$$

t : coefficient de transmission global de l'eau et la vitre.

III.3.4- Bilan thermique de l'isolant

Pour réduire les pertes de chaleur à travers la base, nous utilisons un isolant qui du côté intérieur reçoit le flux q_{bis} , et du côté extérieur, cède les flux $q_{ris} + q_{cis}$.

q_{ris}, q_{cis} sont respectivement les flux de chaleur échangés par rayonnement et par convection avec l'extérieur.

- L'échange intérieur- extérieur s'effectue à travers l'isolant par conduction:

$$q = \frac{I_{is}}{e_{is}} (T_{isi} - T_{ise}) \quad (III.7)$$

D'ou les équations:

$$q_{bis} = \frac{I_{is}}{e_{is}} (T_{isi} - T_{ise}) \quad (III.8)$$

et

$$q_{ris} + q_{cis} = \frac{I_{is}}{e_{is}} (T_{isi} - T_{ise}) \quad (III.9)$$

III.4- EXPRESSIONS DES DIFFERENTS FLUX THERMIQUES ECHANGES

Nous allons dans ce qui suit expliciter les différents flux intervenant dans les échanges de chaleur qui se produisent au sein du distillateur.

III.4.1- Transfert interne

Les différents modes de transfert de chaleur à l'intérieur d'un distillateur, entre la saumure et la vitre se font par convection, par rayonnement et par évaporation, ces différents modes ont été proposés par Malik [5] comme suit :

III.4.1.1- Transfert thermique par convection

La quantité de chaleur échangée par convection naturelle entre le plan d'eau et la vitre a pour expression:

$$q_{ci} = h_{ci}(T_e - T_{vi})A \quad (\text{III.10})$$

Où

T_e : température de la surface de l'eau

T_{vi} : température de la surface interne de la vitre

h_{ci} : coefficient de convection donné empiriquement par la relation suivante :

$$h_c = \frac{Nu \times I}{D} \quad (\text{III.11})$$

Dans le cas de convection naturelle, la relation entre les nombres de Grashoff (Gr) et Prandlt (Pr) est définie comme suit [5], [11]:

$$Nu = c[Gr \times Pr]^n \quad (\text{III.12})$$

Avec

$$Gr = \frac{b \times r^2 \times D^3 \times \Delta T}{m^2} \quad (\text{III.13})$$

ΔT : Différence de température entre la saumure et la surface interne de la vitre

et

$$Pr = \frac{m \times Cp}{I} \quad (\text{III.14})$$

Les valeurs des constantes (c et n) figurant dans la relation III.12 dépendent du nombre de Grashoff (tableau III.3).

C	n	Intervalle de validité	Observation
1	0	$Gr < 10^3$	Convection négligeable
0.21	1/4	$10^4 < Gr < 3,2 \cdot 10^5$	Convection en régime laminaire
0.075	1/3	$3,2 \cdot 10^5 < Gr < 10^7$	Convection en régime turbulent

Tableau III.3- Valeurs des constante "n et c" intervenant dans le nombre de Nusselt.

La distribution de température, l'humidité et la géométrie rencontrée dans les distillateurs donne un nombre de Grashoff correspondant généralement à l'intervalle $3.2 \times 10^5 \leq Gr \leq 10^7$.

En fait, le transfert de chaleur par convection à l'intérieur du distillateur étant accompagné d'un transfert de masse sous forme de vapeur d'eau, nous utilisons un nombre de Grashoff spécial (Gr'), qui pour une évaporation non isotherme, s'écrit sous la forme [5], [25] :

$$Gr' = \frac{x^3 \times r \times g}{m_f^2} \left[\frac{m_\infty \times T_o}{m_o \times T_\infty} - 1 \right] \quad (\text{III.15})$$

Avec :

r_f, m_f respectivement densité et viscosité de l'air saturé.

m_o, m_∞ : Les masses moléculaires du mélange (air, vapeur d'eau) en un point de la surface et loin de cette dernière.

Avec :

$$\frac{m_\infty T_o}{m_o T_\infty} - 1 = \frac{T_o - T_\infty}{T_\infty} + \frac{(m_e - m_a)(P_{e\infty} - P_{e0})}{T_\infty (m_a P_T + (m_e - m_a) P_{e0})}$$

Pour le mélange air-vapeur, à pression atmosphérique:

$$m_e = 18.02 \text{ g/mole}$$

$$m_a = 28.96 \text{ g/mole}$$

$$P_T = 98,07.10^3 \text{ Pa}$$

Donc:

$$\frac{m_\infty T_o}{m_o T_\infty} - 1 = \frac{T_o - T_\infty}{T_\infty} + \frac{(P_{e0} - P_{e\infty}) T_o}{T_\infty (268,9.10^3 - P_{e0})}$$

$$\frac{m_\infty \times T_o}{m_o \times T_\infty} - 1 = b' \times \left[\Delta T + \frac{(P_{e0} - P_{e\infty}) T_o}{(268,9.10^3 - P_{e0})} \right]$$

$$\frac{m_\infty T_o}{m_o T_\infty} - 1 = b' \Delta T'$$

Avec:
$$b' = \frac{1}{T_\infty}$$

$$\Delta T' = \Delta T + \frac{(P_{e0} - P_{e\infty})T_0}{(268,9 \cdot 10^3 - P_{e0})}$$

$\Delta T'$: Est la différence de température équivalente entre l'eau et la vitre du distillateur en tenant compte du gradient de la pression de la vapeur dans l'enceinte.

L'expression (III.13) prend la forme [5]:

$$Gr' = \frac{x^3 r_f^2 g b'}{m_f^2} \Delta T'$$

Il en résulte que le transfert de chaleur par convection prend la forme suivante [5]:

$$q_{ci} = 0.884 \left[(T_e - T_{vi}) + \frac{(P_e - P_{vi})(T_e + 273)}{(268,9 \times 10^3 - P_e)} \right]^{1/3} \times (T_e - T_{vi}) \times A \quad \text{(III.16)}$$

P_e, P_{vi} respectivement les pressions partielles de la vapeur d'eau à la température T_e et T_{vi} .

D'après Siaka Toure et Pierre Mankan [26] des meilleures valeurs de pressions en $[N/m^2]$ sont obtenus en appliquant l'expression suivante:

$$P = 7236,2 - 431,43 T + 10,76 T^2 \quad \text{(III.17)}$$

Il en résulte que l'expression du coefficient d'échange convectif entre la saumure et la vitre est donnée par la relation [5]:

$$h_{ci} = 0.884 \left[(T_e - T_{vi}) + \frac{(P_e - P_{vi})(T_e + 273)}{268,9 \times 10^3 - P_e} \right]^{1/3} \quad \text{(III.18)}$$

III.4.1.1- Transfert thermique par évaporation

Le flux de chaleur échangé par évaporation est exprimé par:

$$q_e = \Delta m_e \cdot L \cdot A = h_c (P_e - P_{vi}) \cdot A \quad \text{(III.19)}$$

Avec:

Δm_e : La masse nette de vapeur d'eau transportée par unité de temps et de surface; donnée par la relation:

$$\Delta m_e = \left(\frac{m_e}{m_a} \right) \left(\frac{h_{ca}}{c_{pa}} \right) \left[\frac{P_e}{(P_T - P_e)} - \frac{P_{vi}}{(P_T - P_{vi})} \right] \quad (\text{III.20a})$$

Où $\left(\frac{m_e}{m_a} \right)$ est le degré d'humidité donné par:

$$\frac{m_e}{m_a} = \frac{m_e P_e}{m_a (P_T - P_e)} \quad (\text{III.20b})$$

En adoptant une valeur du rapport $\frac{h_e}{h_c}$ égale à $16,273 \cdot 10^{-3}$ pour une meilleure représentation du phénomène de transfert de chaleur et de masse, ainsi le flux de chaleur transféré par unité de surface par unité de temps par évaporation [5]:

$$q_e = 16,273 \times 10^{-3} q_c \frac{P_e - P_{vi}}{T_e - T_{vi}} \quad (\text{III.21})$$

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

$$h_{ev} = 16,273 \times 10^{-3} h_c \frac{P_e - P_{vi}}{T_e - T_{vi}} \quad (\text{III.22})$$

III.4.1.2- Transfert thermique par rayonnement

L'échange de chaleur par rayonnement entre la saumure et la surface interne de la vitre peut s'écrire:

$$q_{ri} = h_{ri} (T_e - T_{vi}) \cdot A \quad (\text{III.23})$$

Avec:

$$h_{ri} = F_{12} \cdot e_{eff} \cdot s \cdot [(T_e + 273)^2 + (T_{vi} + 273)^2] \times [(T_e + 273) + (T_{vi} + 273)] \quad (\text{III.24})$$

e_{eff} : Emissivité globale de la vitre ($e_{eff} = 0.9$)

s : Constante de Stephane Boltzman ($s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \text{ k}^4$)

III.4.1.3- Transfert thermique par convection au niveau de l'absorbeur

L'absorbeur échange de la chaleur avec l'eau et l'isolant:

$$q_{eb} + q_{bis} = t \cdot G \cdot A_v \quad (\text{III.25})$$

q_{eb} : la quantité de chaleur transférée de l'absorbeur vers la masse d'eau.

q_{bis} : La quantité de chaleur transférée de l'absorbeur vers l'isolant

$$q_{eb} = h_{eb}(T_b - T_e) \quad (\text{III.26a})$$

$$q_{bis} = h_{bis}(T_b - T_{isi}) \quad (\text{III.26b})$$

T_b, T_e, T_{isi} respectivement les températures de l'eau, du bac, et de l'isolant côté intérieur.

h_{eb} est donné en régime laminaire par:

$$h_{eb} = \frac{C_p \cdot k}{l} \left[\frac{L^3 \cdot r \cdot g \cdot B_0 \cdot C_p \cdot \Delta T}{m \cdot k} \right]^{1/4} \quad (\text{III.27})$$

h_{eb} dépend de la profondeur de l'eau l dans le bassin et de la différence de température ΔT entre la surface de l'eau et l'absorbeur.

La profondeur de l'eau limite l'inertie thermique, pour cela des profondeurs inférieures ou égales à 3cm sont généralement utilisées, il en résulte une augmentation de q_e et par conséquent de l'efficacité du distillateur.

h_{bis} : est le coefficient de transfert conductif entre le bac et l'isolant

$$h_{bis} = \frac{l_b}{e_b} \quad (\text{III.28})$$

Généralement le coefficient d'échange h_{eb} figure dans le nombre de Nusselt:

$$h_{eb} = \frac{Nu \times l_e}{L} \quad (\text{III.29})$$

Par ailleurs, la valeur du nombre de Nu, dépend du nombre de Grashoff (Gr), qui est calculé en utilisant l'expression suivante:

$$Gr = \frac{B_e \times L^3 \times g \times (T_b - T_e)}{n_3^2} \quad (\text{III.30})$$

Avec:

B_e : coefficient de dilatation thermique de l'eau.

L: Longueur du bac

Un calcul expérimental du nombre de Nu a permis d'obtenir les résultats suivants:

1) Pour $Gr < 10^5$, $Nu = 1$ L'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant se fait uniquement par conduction.

2) Pour $10^5 < Gr < 2.10^7$ $Nu = \frac{l_e}{L} \times 0.54 (G_r \times P_r)^{0.25}$

3) Pour $Gr > 2.10^7$ $Nu = 0.14 (G_r \times P_r)^{0.33}$

III.4.1.4- Transfert thermique par conduction à travers l'isolant

- Du côté intérieur isolant reçoit:

$$q_{bis} = h_{bis} (T_b - T_{isi}) \quad (\text{III.31})$$

$h_{bis} = \frac{l_b}{e_b}$: le coefficient de transfert par conduction à travers le bac absorbant.

- Du côté extérieur, l'isolant cède:

$$q_{ris} + q_{cis} = h_{is}^{ra} (T_{ise} - T_{sol}) . A_{is} + h_{is}^{ca} (T_{ise} - T_a) . A_{is} \quad (\text{III.32})$$

h_{is}^{ra} : coefficient d'échange par rayonnement entre la face extérieur de l'isolant et le sol:

$$h_{is}^{ra} = e_{is} . S . [(T_{ise} + 273)^2 + (T_{sol} + 273)^2] \times [(T_{ise} + 273) + (T_{sol} + 273)] \quad (\text{III.33})$$

h_{is}^{ca} : coefficient d'échange par convection entre la face extérieur de l'isolant et le milieu ambiant; dont l'expression est similaire à h_{ca} .

D'où l'échange intérieur-extérieur s'effectue par conduction à travers l'isolant:

$$q_s = \frac{l_{is}}{e_{is}} (T_{isi} - T_{ise}) \quad (\text{III.34})$$

e_{is} : épaisseur de l'isolant, l_{is} sa conductivité thermique.

T_{isi}, T_{ise} : respectivement les températures intérieure et extérieure de l'isolant.

T_{sol} : La température du sol.

D'une façon générale, Pour ne pas compliqué l'étude, on suppose:

- dans le cas où le bac est isolé, (III.4) devient:

$$q_{ri} + q_{ci} + q_e + m_d \cdot C_e (T_e - T_a) = q_{eau} \quad (\text{III.35})$$

- dans le cas contraire:

$$q_b = k' \cdot A (T_e - T_a) \quad (\text{III.36})$$

k' : coefficient d'échange global entre le bac à la température T_e et l'extérieur T_a , par conduction à travers le bac et par convection entre le bac et l'extérieur sa valeur est de l'ordre de $1.6 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$ [5].

III.4.2- Transfert externe

Le distillateur est un système qui échange de la chaleur avec l'extérieur à travers la vitre et les parois isolantes. Dans une première approximation, on néglige les pertes à travers les parois et les pertes par extraction de distillat.

III.4.2.1- Transfert thermique par convection

Le flux de chaleur échangé par convection entre la vitre et l'ambiance est donné par l'expression [5]:

$$q_{ca} = h_{ca} \times (T_{ve} - T_a) \cdot A_v \quad (\text{III.37})$$

h_{ca} : Coefficient de convection externe dependant de la vitesse du vent selon [5].

$$h_{ca} = 5.7 + 3.8v \quad (\text{III. 38})$$

III.4.2.2- Transfert thermique par rayonnement

la quantité de chaleur échangée par rayonnement entre la vitre et l'air ambiant par unité de temps est donné par la loi de stéphan boltzman :

$$q_{ra} = e_v \cdot \mathcal{S} \cdot [(T_v + 273)^4 - (T_c + 273)^4] \cdot A_v \quad (\text{III.39})$$

T_c : température équivalente du ciel, définie par la relation [3], [5]:

$$T_c = T_a - 12 \quad (\text{III.40})$$

T_a : La température ambiante.

En remplaçant dans l'équation III.39, T_c par son expression, nous obtenons:

$$h_{ra} = e_v \cdot S \cdot [(T_v + 273)^2 + (T_c + 261)^2] \times [(T_v + 273) + (T_c + 261)] \quad (\text{III.41})$$

T_v : étant la température moyenne de la vitre : $T_v = \frac{T_{vi} + T_{ve}}{2}$

On outre, l'échange convectif et radiatif entre l'isolant et l'extérieur (équation III.32).

Le second type de distillateur étudié dans le cadre de notre travail est le distillateur sphérique à balayage.

III.5-DISTILLATEUR SPHERIQUE A BALAYAGE

III.5.1- Description et principe de fonctionnement

III.5.1.1- Description

—C'est un distillateur en plexiglas ou autre matériau plastique transparente forme sphérique (figure III.3) reposant sur des supports, il est essentiellement constitué par trois parties, 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 sert à récupérer le distillat, un bac horizontal en métal noir contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian de la sphère [27].

III.5.1.2- Principe

Le rayonnement solaire incident transmis par la demi sphère supérieure pénètre dans le bac et sert à chauffer la masse d'eau contenue dans celui-ci. Une partie de l'eau s'évapore, et la vapeur dégagée vient se condenser sur la face intérieure de la vitre. Le distillat passe dans la demi-sphère inférieure à travers l'espace annulaire entre le bac et la sphère.

Un essuie-glace entraîné par moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation, constamment transparente au rayonnement, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes [1], [25], [27].

Mise en forme : Puces et numéros

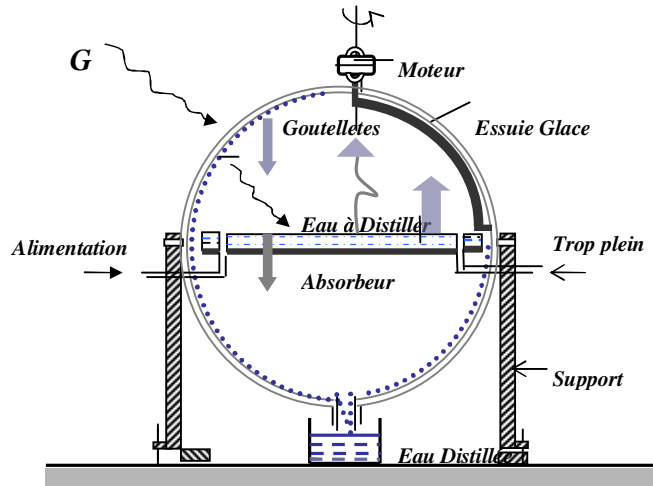


Figure III.3- Distillateur sphérique à balayage

III.5.2- Bilan Thermique

Le flux solaire G transmis à travers le demi-sphère supérieure se répartit entre les différentes parties du distillateur (figure III.4).

r : Facteur global de réflexion

t : Facteur global de transmission

a : Facteur global d'absorption

Les indices v , e , f désignent respectivement la vitre, l'eau et le fond du distillateur. Comme tous les appareils de distillation à effet de serre, le distillateur sphérique est un système qui échange de la chaleur avec le milieu ambiant.

Mise en forme : Puces et numéros

- § Le transfert de chaleur entre le distillateur et l'extérieur se fait au niveau de la vitre par rayonnement et par convection.
- § Au niveau du plan d'eau, le rayonnement incident sert à chauffer l'eau celle-ci s'évapore et échange de la chaleur avec le plan d'eau par convection, rayonnement et évaporation.
- § L'échange intérieur-extérieur se fait par conduction à travers la vitre.

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

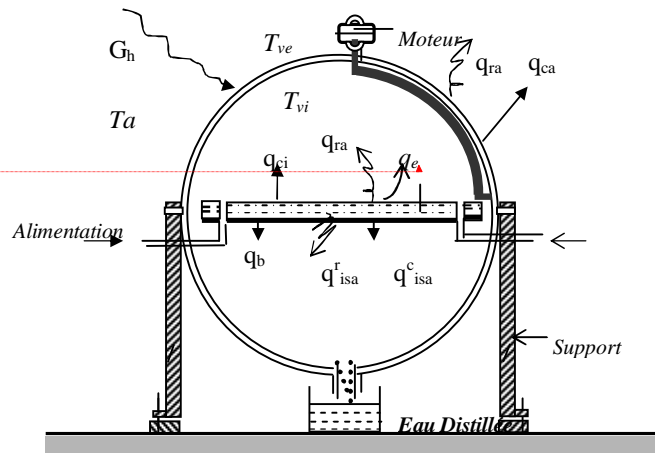


Figure III.4- Echanges thermiques dans le distillateur solaire sphérique

En tenant compte des hypothèses citées précédemment (§ III.3) ainsi que de la forme sphérique de ce distillateur, et si dans une première approximation on néglige les pertes à travers les parois opaques et les pertes par extraction de distillat, on peut alors écrire successivement :

III.5.2.1- Bilan thermique de la masse d'eau:

On admet que la quantité de chaleur reçue par la masse d'eau est égale à la quantité de chaleur cédée par l'eau au même temps [1], [25].

$$q_{ci} + q_{ri} + q_e + q_b + m_d C_e (T_e - T_a) = a_t G A \quad (\text{III.42})$$

q_{ci} , q_{ri} et q_e Sont respectivement les flux de chaleur échangés par convection, par rayonnement et par rayonnement à l'intérieur du distillateur.

q_b : Flux de conduction à travers le bac.

$m_d C_e (T_e - T_a)$: flux de chaleur perdu par l'apport d'eau d'appoint.

$a_t G A$: quantité de chaleur effectivement reçue par la masse d'eau par unité de temps.

$a_t = t_v a_e + t_v t_e a_i$ coefficient d'absorption fictif de la masse d'eau.

III.5.2.1- Bilan thermique de la vitre:

- du côté intérieur, la vitre reçoit la somme de trois flux $q_{ci} + q_{ri} + q_e$

- du côté extérieur, le flux cédé par la vitre est égal à : $q_{ca} + q_{ra}$.

L'échange intérieur-extérieur s'effectue à travers la vitre par conduction.

$$q = \frac{I_v}{e_v} (T_{vi} - T_{ve}) \times A_v \quad (\text{III.43})$$

D'où les équations:

et
$$q_{ci} + q_{ri} + q_e = \frac{I_v}{e_v} (T_{vi} - T_{ve}) \times A_v \quad (\text{III.44})$$

$$q_{ca} + q_{ra} = \frac{I_v}{e_v} (T_{vi} - T_{ve}) A'_v \quad (\text{III.45})$$

e_v : Epaisseur de la vitre et I_v sa conductivité thermique .

T_{vi}, T_{ve} : Sont respectivement les températures intérieure et extérieure de la vitre.

A'_v : Aire de la vitre

III.6- EXPRESSION DES DIFFERENTS FLUX THERMIQUES ECHANGES

Pour un distillateur de forme quelconque; les expressions du flux s'écrivent:

III.6.1- Par convection:

- Du côté intérieur:

$$q_{ci} = h_{ci} \times (T_e - T_{vi}) A'_v \quad (\text{III.46})$$

- Du côté extérieur:

$$q_{ca} = h_{ca} \times (T_{ve} - T_a) A'_v \quad (\text{III.47})$$

III.6.2- Par rayonnement:

- Du côté intérieur:

$$q_{ri} = h_{ri} \times (T_e - T_{vi}) A'_v \quad (\text{III.48})$$

- Du côté extérieur:

$$q_{ra} = h_{ra} (T_{ve} - T_a) A'_v \quad (\text{III.49})$$

III.6.3- Par évaporation:

$$\frac{q_e}{L} = k \times q_c \times \frac{p_e - p_{vi}}{T_e - T_{vi}} \quad (\text{III.50})$$

$$q_e = m_d \times L_v(T_e) \quad (\text{III.51})$$

q_e : Peut également égale:

$$q_e = h_e \times (T_e - T_{vi}) \times A' \quad (\text{III.52})$$

D'où:

$$m_d = k \times h_{ci} \times (p_e - p_{vi}) A' \quad (\text{III.53})$$

$$h_e = L_v \times k \times h_{ci} \times \frac{(p_e - p_{vi})}{(T_e - T_{vi})} \quad (\text{III.54})$$

L: chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température T_e

m_d : débit d'eau évaporé par unité de temps.

P_e : pression partielle de la vapeur d'eau à la température de l'eau T_e

P_{vi} : pression partielle de la vapeur d'eau à la température de la vitre intérieure.

k : coefficient de proportionnalité dépendant du système d'unité choisi, dans le système SI k est égale à 0.55×10^{-8}

A'_v : l'aire de la vitre, $A'_v = 2p.R^2$

A' : aire de la surface horizontale de la cuve, $A' = p.R^2$

R : rayon de la cuve

$$A'_v/A' = 2$$

A'_v/A' reste constante quelque soient les dimensions du système, ce qui laisse supposer que l'effet d'échelle n'influe pas sur le rendement du distillateur [1],[24].

Ces échanges peuvent être mis sous forme d'équations.

En remplaçant les flux échangés par leurs expressions explicites, les équations régissant le fonctionnement du distillateur sphérique deviennent alors:

Mise en forme : Puces et numéros

III.6.3.1- Au niveau du plan d'eau

$$(h_{ci} + h_{ri})(T_e - T_{vi}) \times pR^2 + k \times L_v \times h_{ci} (P_e - P_{vi}) pR^2 + m_d \times Ce(T_e - T_a) = a_i G_h pR^2 \quad (\text{III.55})$$

III.6.3.2- Au niveau de la vitre du côté intérieur:

$$(h_{ci} + h_{ri})(T_e - T_{vi}) + k.L.h_{ci} (P_e - P_{vi}) = 2 \frac{I_v}{e_v} (T_{vi} - T_{ve}) \quad (\text{III.56})$$

Mise en forme : Puces et numéros

III.6.3.3- Au niveau de la vitre du côté extérieur:

$$(h_{ca} + h_{ra})(T_{ve} - T_a) = \frac{I_v}{e_v} (T_{vi} - T_{ve}) \quad (\text{III.57})$$

-La relation entre la convection et l'évaporation se traduit par l'expression

$$m_d = kh_{ci} (P_e - P_{vi}) pR^2 \quad (\text{III.58})$$

III.6.3.4- Au niveau du bac

Nous tenons Compte de manière similaire que pour un distillateur plan, d'une part de flux de chaleur échangé par convection entre l'eau et l'absorbeur et d'autre part de la quantité de chaleur par unité de temps, par conduction à travers l'isolant.

$$q_{eb} = h_{eb} (T_b - T_e) A' \quad (\text{III.59})$$

h_{cb} est donné par la relation (III.21)

$$\text{et} \quad q_{bis} = h_{bis} (T_b - T_{isi}) \quad (\text{III.60})$$

h_{bis} est le coefficient de transfert conductif entre le bac et l'isolant

III.6.3.5- Au niveau de l'isolant

$$\text{- Du côté interieur} \quad q_{bis} = h_{bis} (T_b - T_{isi})$$

$$\text{- Du côté interieur} \quad q_{ris} + q_{cis} = h_{is}^{ra} (T_{ise} - T_{sol}) . A_{is} + h_{is}^{ca} (T_{ise} - T_a) . A_{is}$$

III.7- CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT

Les caractéristiques de fonctionnement (production, efficacité globale et interne) ont été présentées au chapitre II (§ II.5.2), du fait de leur importance puisque le choix de tout distillateur dépend essentiellement de ces grandeurs, nous allons dans ce qui suit en nous basant sur des travaux antérieurs [24] proposer une nouvelle expression de l'efficacité interne d'un distillateur solaire qui permettra de mettre en évidence l'effet de la température de l'eau à distiller sur cette grandeur.

L'efficacité interne d'un distillateur est usuellement donnée par la relation:

$$h_i = \frac{q_e}{q_{eau}} = \frac{q_e}{a_t \cdot A \cdot G_h} \quad (\text{III.61})$$

en remplaçant dans l'équation [III.44], les différents flux par leurs expressions explicites nous obtenons:

$$\left[h_{ci} + h_{ri} + k \cdot L \cdot h_{ci} \frac{p_e - p_{vi}}{T_e - T_{vi}} \right] (T_e - T_{vi}) A = (h_{ca} + h_{ra}) (T_{ve} - T_a) S \cdot A \quad (\text{III.62})$$

S: étant le rapport entre les surfaces de la vitre et du bac.

Il s'ensuit que la somme des flux échangés par convection, par rayonnement et par évaporation peut se mettre sous la forme suivante:

$$q_{ci} + q_{ri} + q_e = h(T_e - T_a) A \quad (\text{III.63})$$

avec:

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_{ci} + h_{ri} + h_e} + \frac{1}{S(h_{ca} - h_{ra})} + \frac{e}{S \cdot I_v} \quad (\text{III.64})$$

h étant le coefficient d'échange global entre le plan d'eau et le milieu extérieur par convection, rayonnement et évaporation à l'intérieur, et par convection, rayonnement à l'extérieur.

En posant $R = \frac{q_e}{(q_{ci} + q_{ri})}$ et en négligeant les pertes par l'apport de l'eau d'appoint nous

pouvons écrire:

L'expression finale de l'efficacité interne d'un distillateur solaire prend la forme:

$$h_i = \frac{q_e}{a_t \cdot A \cdot G_h} = 1 - \left(h' + \frac{h}{1+R} \right) \cdot \frac{(T_e - T_a)}{a_t \cdot G_h} \quad (\text{III.65})$$

h' étant le coefficient d'échange par conduction.

III.8- EXPRESSION DES DIFFERENTES PERTES D' UN DISTILLATEUR SOLAIRE STATIQUE:

Les différents pertes qui interviennent dans le bilan énergétique du système correspondent:[5], [25]

- ✓ A la réflexion et à l'absorption de l'énergie incidente au niveau de la vitre .
- ✓ des pertes de chaleur du bac par convection ,par rayonnement et par évaporation.
- ✓ A la condensation de la vapeur d'eau sur la vitre
- ✓ A l'extraction du distillat
- ✓ A l'apport d'eau d'appoint
- ✓ A la convection et au rayonnement de l'isolant à l'extérieur.

Commentaire [L1]:

III.8.1- Pertes par réflexion et absorption au niveau de la vitre

L'énergie solaire incidente n'est pas totalement transmise à l'intérieur du distillateur, une partie est réfléchiée et une autre est absorbée par la vitre.

$$q_r = r_v \cdot G_h \cdot A_v \quad (\text{III.66})$$

le flux absorbé par la vitre sera :

$$q_a = a_v \cdot G_h \cdot A_v \quad (\text{III.67})$$

a_v : Facteur global d'absorption de la vitre

r_v : Facteur global de réflexion

A_v : Surface réelle de la vitre.

III.8.2- Perte par rayonnement et par convection:

La vitre échange de la chaleur avec l'air ambiante par rayonnement et par convection.

Le flux de chaleur échangé par rayonnement a pour expression :

$$q_{ra} = e_v \cdot S \cdot (T_v^4 - T_c^4) \cdot A_v \quad (\text{III.68})$$

Les pertes par convection sont données par la relation:

$$q_{ca} = h_{ca} \times (T_v - T_a) \cdot A_v \quad (\text{III.69})$$

III.8.3- Pertes par condensation de la vapeur d'eau sur la vitre

La quantité d'eau qui s'évapore se condense sur la vitre ,la chaleur de condensation est approximativement égale à la chaleur de vaporation ,donc les pertes de chaleur dûes à la condensation de l'eau au niveau de la vitre peuvent être assimilées au flux de chaleur échangé par évaporation entre le plan d'eau et de la vitre de distillateur.

Le flux de chaleur transféré par évaporation du plan d'eau vers la vitre est donné par:

$$q_e = 16.273 \times 10^{-3} \left[\frac{(P_e - P_{vi})}{(T_e - T_{vi})} \right] \times q_{ci} \quad (\text{III.70})$$

q_{ci} est donné par la relation:

$$q_{ci} = 0.884 \times \left[(T_e - T_{vi}) + \frac{P_e - P_{vi}}{268.9 \times 10^3 - P_e} \times (T_e + 273) \right]^{1/3} \times (T_e - T_{vi}) \times A \quad (\text{III.71})$$

III.8.4- Pertes par extraction du distillat

Le distillat est extrait à une température voisine de celle de la vitre du distillateur, les pertes sont donc égales à:

$$q_d = m_d Ce(T_{vi} - T_a) \quad (\text{III.72})$$

m_d : le débit massique où la production du distillateur.

III.8.5- Perte par apport d'eau d'appoint

L'eau étant introduite généralement à la température ambiante, sans préchauffage, il en résulte que la quantité de chaleur perdue par apport d'eau d'appoint ,par unité de temps est:

$$q_{ap} = m_d \times Ce \times (T_e - T_a) \quad (\text{III.73})$$

III.8.6- Perte par rayonnement et par convection au niveau de l'isolant

L'isolant échange une quantité de chaleur par convection avec l'ambiance d'une part et une quantité de chaleur par rayonnement avec le sol d'autre part que l'on peut exprimer avec les relations suivantes:

$$q_{cs} = h_{isc} \times (T_{is} - T_a) \quad (\text{III.74a})$$

$$q_{rs} = h_{isr} \times (T_{is} - T_{sol}) \quad (\text{III.74b})$$

T_{sol} : Température du sol.

L'estimation des pertes thermiques sera présentée dans le chapitre suivant.

III.10- RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS DE FONCTIONNEMENT D'UN DISTILLATEUR

III.10.1- le problème physique

Le problème consiste à déterminer, en fonction des paramètres externes (conditions météorologiques) et des paramètres internes (inclinaison de la vitre, épaisseur de la saumure):

- Les températures au niveau de chaque partie composant le distillateur
- La quantité d'eau distillée
- L'efficacité globale du système
- Les pertes de chaleur dans le distillateur

III.10.2- Résolution numérique

Les équations régissant le fonctionnement d'un distillateur solaire sont résolues par une approche numérique basée sur la méthode de Gauss-Seidel d'iteration [28],[29]. Pour cela nous commençons par ordonner les équations finales des divers bilans par rapport aux température comme suit:

- Au niveau extérieur de la vitre

$$(h_{ca} + h_{ra} + \frac{I_v}{e_v}).T_{ve} - \frac{I_v}{e_v}.T_{vi} = h_{ca}.T_a + h_{ra}.T_c + a_v.G_h.A \quad (III.75)$$

- Au niveau intérieur de la vitre

$$-\frac{I_v}{e_v}.T_{ve} + (h_{ci} + h_{ri} + h_{ev} + \frac{I_v}{e_v}).T_{vi} - (h_{ci} + h_{ri} + h_{ev}).T_e = 0 \quad (III.76)$$

- Au niveau de la masse d'eau

$$-(h_{ci} + h_{ri} + h_{ev}).T_{vi} + (h_{ci} + h_{ri} + h_{ev} + h_{be}).T_e - h_{be}.T_b = a_t.G_h.A \quad (III.77)$$

- Au niveau de l'absorbeur

$$-h_{be}.T_e + (h_{be} + \frac{I_b}{e_b}).T_b - \frac{I_b}{e_b}.T_{isi} = t.G.A_v \quad (III.78)$$

- Au niveau de l'isolant intérieur

$$\frac{I_b}{e_b} T_b + \left(\frac{I_b}{e_b} + \frac{I_{is}}{e_{is}} \right) T_{isi} - \frac{I_{is}}{e_{is}} T_{isi} = 0 \quad (\text{III.79})$$

- Au niveau de l'isolant extérieur

$$\left(h_{ise}^e + h_{ise}^c + \frac{I_{is}}{e_{is}} \right) T_{ise} - \frac{I_{is}}{e_{is}} T_{isi} = h_{ise}^r T_{sol} + h_{ise}^c T_a \quad (\text{III.80})$$

Dans ce système d'équations les paramètres inconnus sont:

$T_{vi}, T_{ve}, T_e, T_b, T_{isi}, T_{ise}, m_d$

Mise en forme : Puces et numéros

— Certaines suppositions sont nécessaires pour la résolution de ces équations:

✓ Le soleil est assimilé à un corps noir.

— ✓ Les propriétés des matériaux sont considérées constantes.

— ✓ La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité).

✓ On suppose que les surfaces de la masse d'eau, et du bac sont égales.

✓ La chaleur absorbée par la paroi est négligeable par rapport à la chaleur absorbée par la masse d'eau.

✓ Le régime de fonctionnement est permanent.

Mise en forme : Puces et numéros

III.10.3- Traitement informatique

Les diverses étapes de résolution sont les suivantes:

1) Calcule des différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température à savoir:

§ Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers la couverture, le bac absorbant, et l'isolant.

§ Les coefficients d'échange thermique dû au vent.

2) Calcul, à chaque heure de la journée du rayonnement solaire global frappant la surface extérieure de la vitre.

3) nous supposons au départ que chaque composant du distillateur est à la température ambiante T_a sauf la température du bac et de l'absorbeur qui elles sont à des températures légèrement supérieures

§ Calcul des pressions partielles de la vapeur d'eau à la température de la saumure P_e et à la température intérieure de la vitre P_{vi} .

§ En supposant des propriétés de la saumure à la température T_e

- La masse volumique
- La conductivité thermique
- La viscosité cinématique et dynamique
- La capacité thermique
- La chaleur latente de vaporisation.

§ 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 le coefficient d'échange thermique par évaporation entre la vitre (côté intérieur) et la saumure.

§ Calcul des éléments de la matrice(annexe B)

§ L'exécution de l'algorithme de GAUSS-SEIDEL d'itération.

4) Si la convergence n'est pas atteinte la troisième étape est reprise avec les températures obtenues

5) Calcul de:

§ L'efficacité globale

§ L'efficacité interne

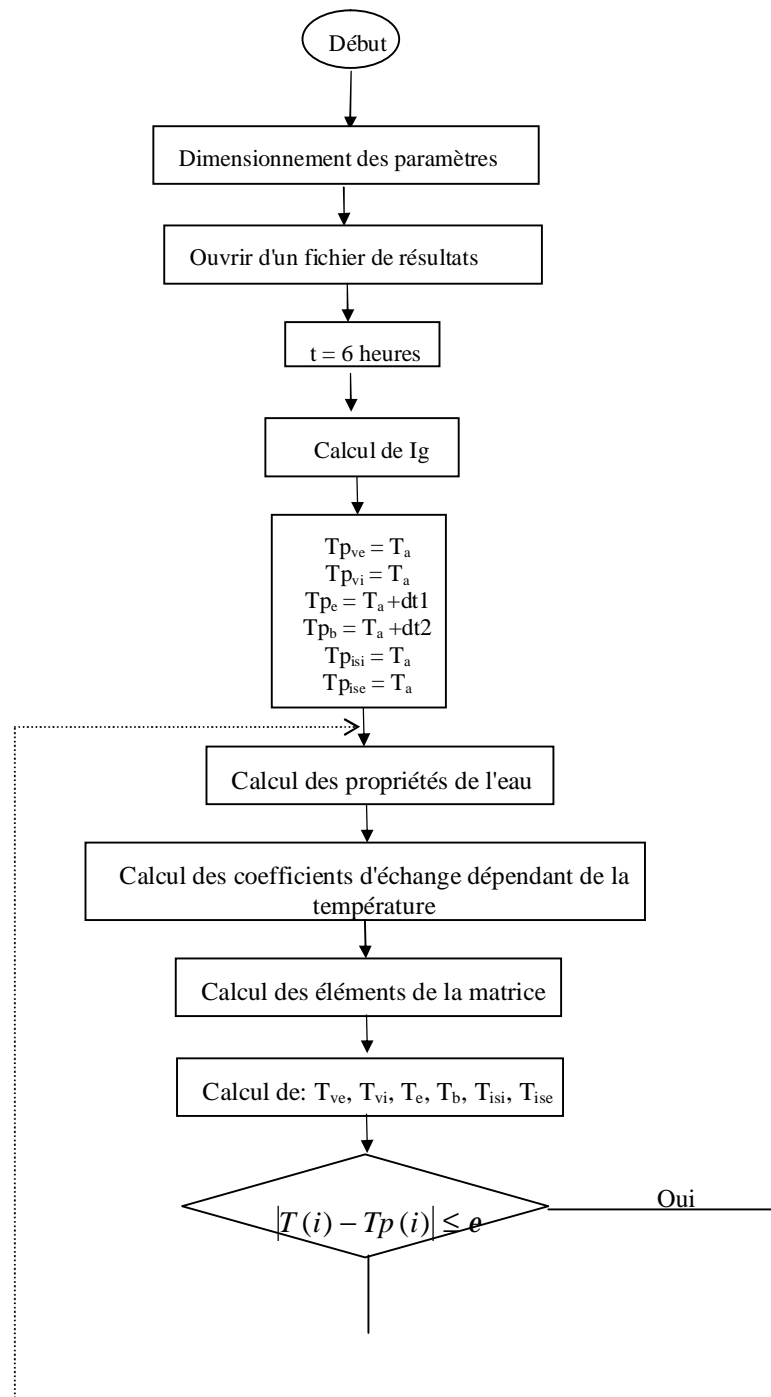
§ Estimation des pertes thermiques au niveau du système

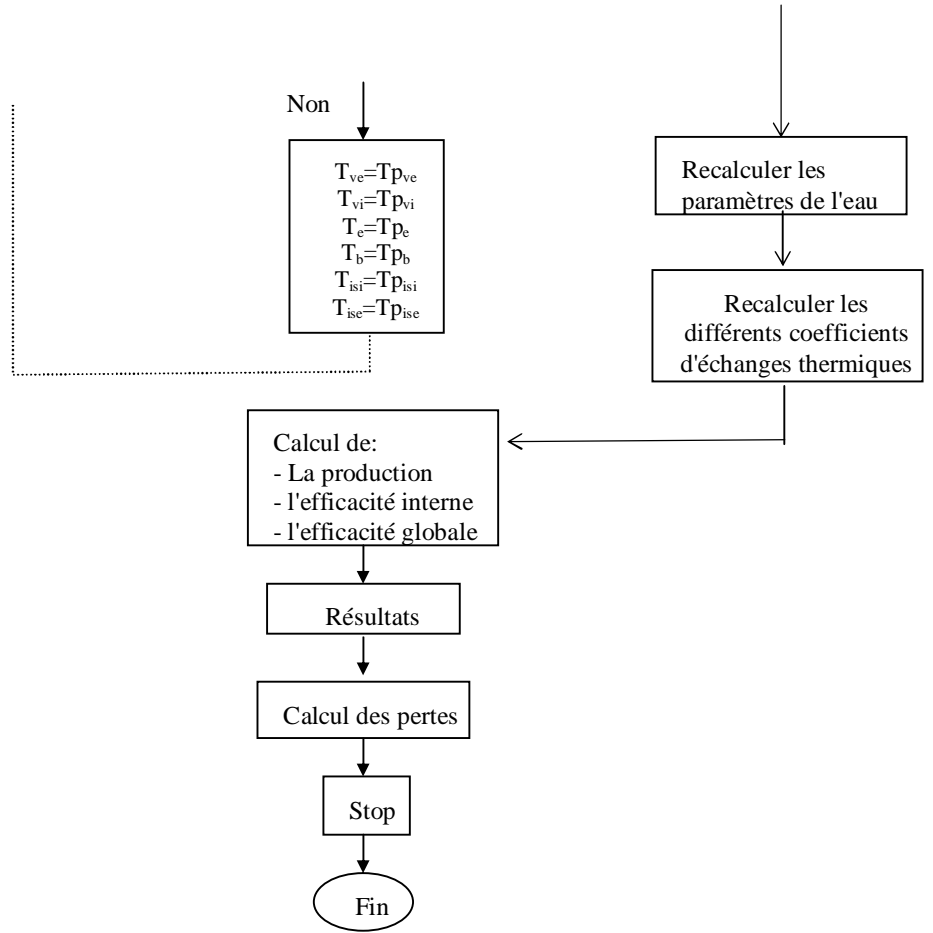
On refait les mêmes étapes de calcul pour le distillateur solaire sphérique

Toutes ces étapes sont représentées dans l'organigramme qui suit. Le programme principal a été développé en langage Fortran [30].

Les résultats obtenus, seront discutés et interprétés dans le chapitre suivant.

III.11- Organigramme





Chapitre IV

Résultats et discussion

L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de notre travail, de même que leurs interprétations constituent ce dernier chapitre. L'effet de nombreux paramètres sur le rayonnement global et sur les caractéristiques de fonctionnement des deux types de distillateurs étudiés sera exposé. Nous terminerons par une estimation des pertes thermiques qui se produisent au cours du processus de distillation et leur influence sur les caractéristiques de fonctionnement

Les résultats numériques obtenus permettent comme nous allons l'exposer dans ce qui suit de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres (G , T_a , T_e , v ,...) sur les caractéristiques de fonctionnement des deux types de distillateurs étudiés.

Mais avant cela nous présentons l'étude numérique du rayonnement solaire global puisque l'énergie solaire est la seule source utilisée pour la production d'eau douce à partir d'eau salée et/ou saumâtre.

IV.1- Variation du rayonnement solaire

Notre étude a porté sur la région de Constantine, située au nord est algérien et de coordonnées géographiques: latitude (37° et $17'$) Nord, longitude (6° et $62'$) Est à l'horizontal, et décalage horaire d'une heure. Pour nos calculs, nous avons choisi le mois de juin.

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

La figure IV.1 montre que le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et diffus. De plus, nous observons une symétrie par rapport au midi solaire, ce qui nous permet de déduire que le soleil atteint son maximum à midi, au moment où le soleil est à son zénith; on retrouve ces observations dans les travaux de Liu et Jordan [3].

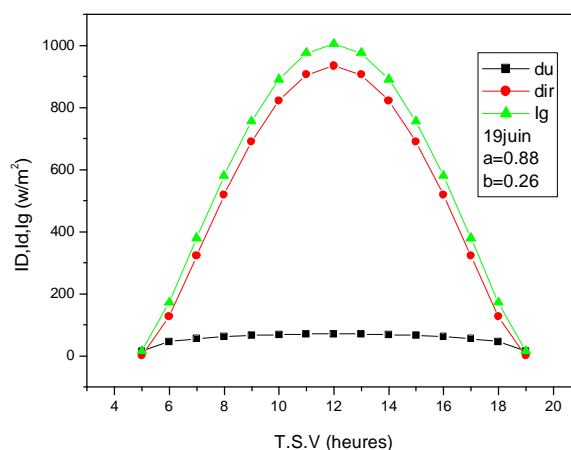


Figure IV.1- variation horaire du rayonnement global, direct et diffus

Durant l'année, les valeurs maximales du rayonnement atteignent jusqu'à 1000 à 1005 w/m^2 dans les mois de mai, juin et juillet. Par contre la variation du rayonnement diffus reste faible et fluctue entre 63 et 71 w/m^2 .

IV.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 (tableau I.2) est respectivement illustrée par la figure IV.2. Nos résultats sont en bon accord avec les valeurs trouvées dans la littérature [31] et montrent que si le ciel est pur, une grande partie du rayonnement solaire atteint le sol; pour des conditions atmosphérique normales; cette part devient moins importante, jusqu'à une faible partie dans le cas où l'atmosphère est polluée (zone industrielle).

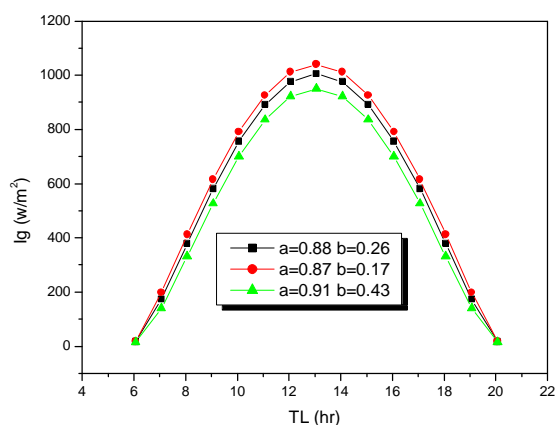


Figure IV.2- Variation du flux solaire horaire suivant le trouble atmosphérique

IV.1.3- Influence de l'inclinaison sur le rayonnement global

L'augmentation de l'angle d'inclinaison entraîne la diminution de la surface de captation du rayonnement solaire donc, Ce dernier est inversement proportionnel avec l'accroissement de l'inclinaison de la surface par rapport à l'horizontale, (figure IV.3).

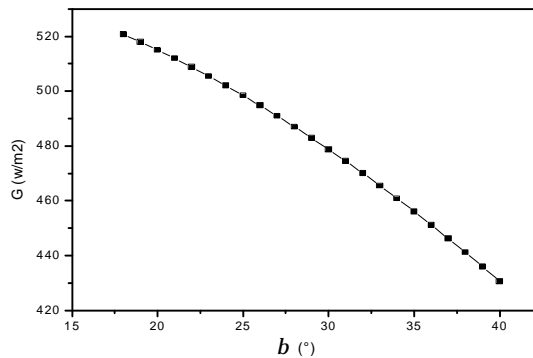


Figure IV.3- Variation du rayonnement global en fonction de l'inclinaison

IV.1.4- variation de la déclinaison, l'équation du temps et la hauteur solaire

En parallèle avec l'étude numérique du rayonnement solaire globale qui a permis de mettre en évidence l'effet du temps (variation, horaire et annuelle), du trouble atmosphérique et de l'inclinaison, notre intérêt à porté également sur l'étude de quelques données astronomiques qui ont été présentées au paragraphe I.3 notamment la déclinaison solaire et la hauteur solaire. Nous pouvons constater sur la figure IV.4 que la déclinaison solaire varie au cours de l'année entre (-23° et 44') et (+23° et 44'); elle est nulle aux équinoxes, maximale au solstice d'été, et minimale au solstice d'hiver. Nous remarquons par ailleurs que l'allure est sinusoïdale. La courbe de variation de la déclinaison au cours de l'année obtenue dans notre étude est très proche de celle trouvé dans la littérature [3].

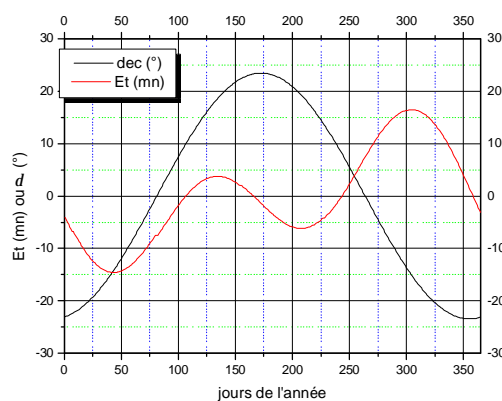


Figure IV.4- Equation du temps (Et) et la déclinaison (d) en fonction du jour de l'année

La variation journalière de la hauteur solaire h est illustrée par la figure IV.5 qui permet d'observer que h est nulle au coucher et au lever du soleil, et maximale quand le soleil est à son zénith (pour un angle horaire égal à 0°).

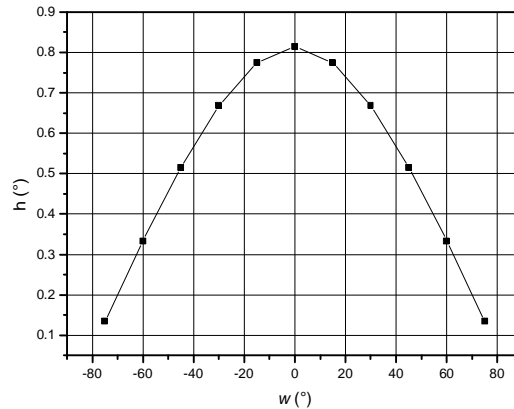


Figure IV.5- Variation de la hauteur solaire en fonction de l'angle horaire

IV.2- CARACTERISATION 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 de surface de bac de 1m^2 . la vitre de surface A_v , légèrement inclinée par rapport au plan horizontal est assimilée à une surface plane parallèle au bac et $A \approx A_v$
- Un distillateur sphérique caractérisé par un rapport de l'aire de condensation A_v (vitre) à la surface de bac, A de l'ordre de 2.
- Etant donné la multiplicité des paramètres climatiques qui agissent sur le fonctionnement du système nous retiendrons la température ambiante, la vitesse du vent et l'énergie incidente, il est évident que cette dernière est le paramètre le plus important.

IV.2.1- Effet de l'irradiation globale sur la température des différentes parties d'un distillateur solaire

Les courbes de la figure IV.6 présentent l'évolution de la température de chaque composant du distillateur. Nous pouvons observer que les températures du bac et de la face interne de l'isolant (celle en contact direct avec l'absorbeur) sont les plus élevées. Ce qui paraît logique, puisque le bac est constitué par un matériau de conductivité thermique, λ élevée ($\lambda = 200 \text{ w/m.k}$) et de faible transmittivité.

La température de la saumure augmente progressivement mais reste inférieure à celle du bac absorbant en raison de ces caractéristiques.

La température la plus basse est celle de l'isolant de la face arrière, de conductivité très faible ($\lambda = 0.04 \text{ w/m.k}$).

L'élévation thermique des températures des faces intérieure et extérieure de la vitre est due à l'absorption par la vitre du rayonnement solaire incident par l'extérieur et l'intérieur (cédé par la saumure); la température intérieure T_{vi} est légèrement supérieure (effet de serre) à la température de la face extérieure qui elle est soumise à l'action du vent.

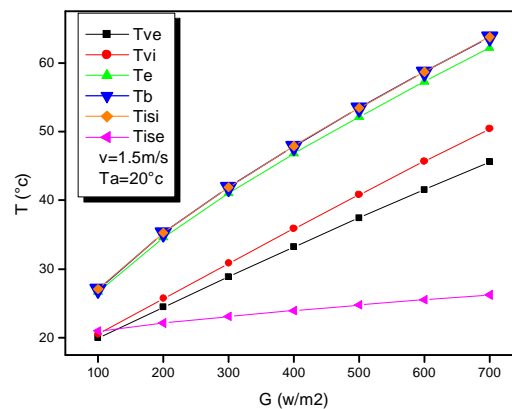


Figure IV.6- Variation des différentes températures dans un distillateur plan

IV.2.2- Caractéristiques de fonctionnements

IV.2.2.1- La Production

a) En fonction de l'irradiation globale

Il est évident que la production d'un distillateur dépend étroitement de la quantité de chaleur qu'il reçoit . Ainsi et comme le montre la figure IV.7, la variation de la production m_d en fonction de l'irradiation globale G , pour une vitesse du vent à peu près constante, d'un distillateur solaire de forme quelconque plan ou sphérique a une allure linéaire croissante. Nous remarquons néanmoins que la production du distillateur DS est plus importante que celle du distillateur plan DP (figure IV.8), nous donnerons une explication au (§ IV.3).

Par temps clair, pour des latitudes variant entre 40 et 50° on obtient de 3 à 5 litres par m^2 et par jour pour un distillateur plan; et de 5 à 7 litres pour un distillateur sphérique [1].

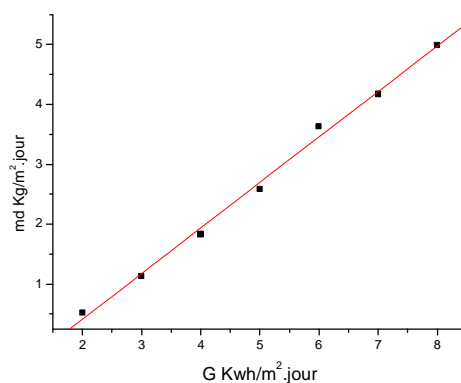


Figure VI.7- Variation de la production en fonction de l'irradiation globale (v=1.5 m/s, Ta=20°C)

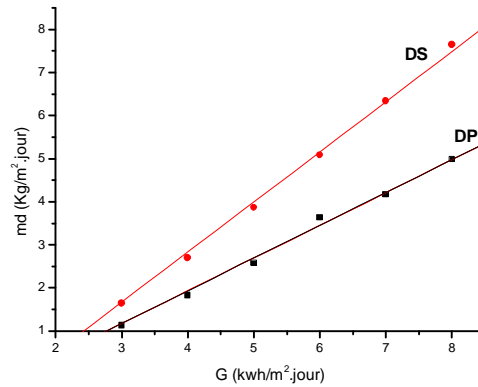


Figure VI.8- Variation de la production en fonction de l'irradiation pour les deux types de distillateurs

b) En fonction de la température de l'eau

La température de l'eau T_e , croît avec l'ensoleillement, ce qui amène en même temps une augmentation de la production m_d . Notons que la température de l'eau dans le distillateur sphérique DS est légèrement plus élevée que dans le distillateur plan DP, ceci est dû aux pertes thermiques qui sont plus importantes dans le second type de distillateur (DP) et que nous justifierons dans la partie relative à l'estimation des pertes.

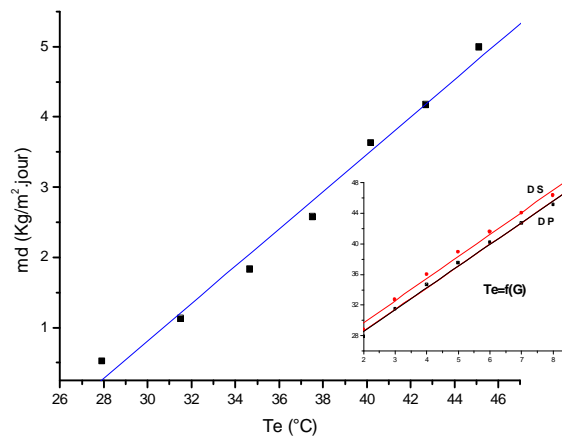


Figure IV.9- Variation de la production en fonction de la température de l'eau (v=cte)

c) En fonction de la température ambiante

L'augmentation moyenne de la production avec la température ambiante a été évaluée empiriquement à un pourcentage allant, jusqu'à 6% de la production journalière moyenne par degré Celsius. Ce qui est en bon accord avec nos résultats qui montrent que la production augmente en effet avec l'élévation de la température ambiante (figure IV.9 et IV.10).

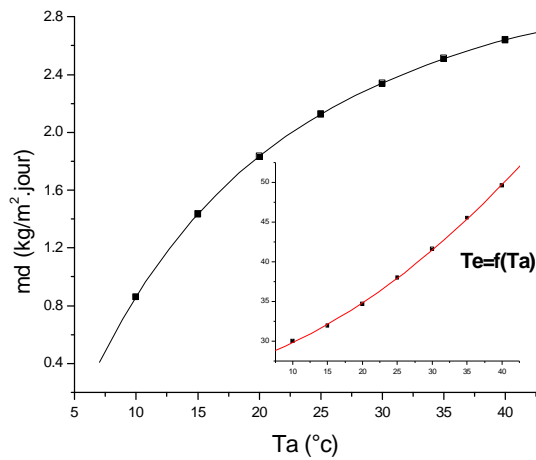


Figure IV.10- Variation de la production en fonction de la température ambiante. (v=cte)

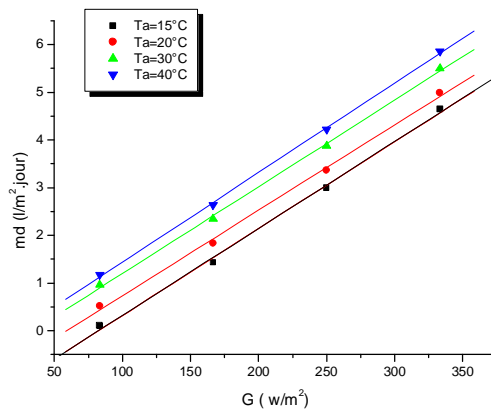


Figure IV.11- Variation de la production en fonction de l'irradiation globale pour différentes températures ambiantes. (v=cte)

d) En fonction de l'écart ($T_e - T_a$)

L'accroissement de l'écart de température ($T_e - T_a$), augmente la différence de température entre les surfaces intérieure et extérieure du distillateur, cette dernière étant en contact avec l'air ambiant; il en résulte un accroissement de différence de pressions partielles, ce qui provoque l'augmentation de la quantité d'eau condensée (figure IV.12). Ceci rejoint les résultats de travaux antérieurs [32].

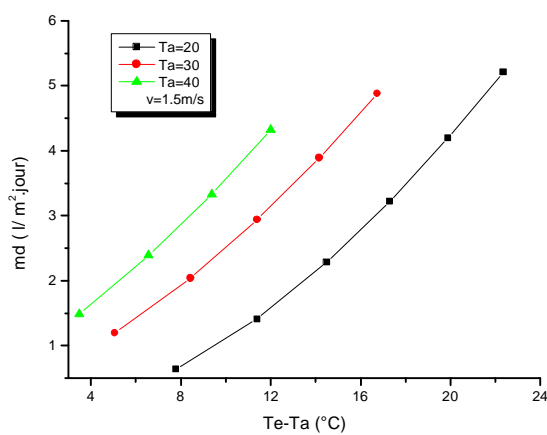


Figure IV.12- Variation de la production en fonction de l'écart de température.
($V=1.5m/s$)

e) En fonction de la vitesse du vent

La variation de la quantité d'eau distillée produite en fonction de la vitesse du vent, en maintenant la température de l'air constante et égale à 20°C est représentée par la figure IV.13. Il apparaît que dans un premier temps, la production augmente progressivement avec la vitesse du vent, au delà d'une valeur approximativement égale à 2 m/s, la production chute; dans ce cas l'effet du vent est nettement défavorable. En effet, cette augmentation de la vitesse provoque le refroidissement de la face extérieure (surface de condensation) ce qui entraîne une diminution de la température de la saumure, d'une part et l'accroissement des pertes par convection de l'air au niveau de la vitre (face extérieure) qui sont liées à la vitesse du vent par le coefficient d'échange par convection ($h_{ca}=5.7+3.8v$). Des travaux expérimentaux [5] ont prouvé que pour une vitesse de vent allant de 0 à 2.15 m/s, la production augmente de 11.5%, et l'effet inverse est observé pour des valeurs plus importantes.

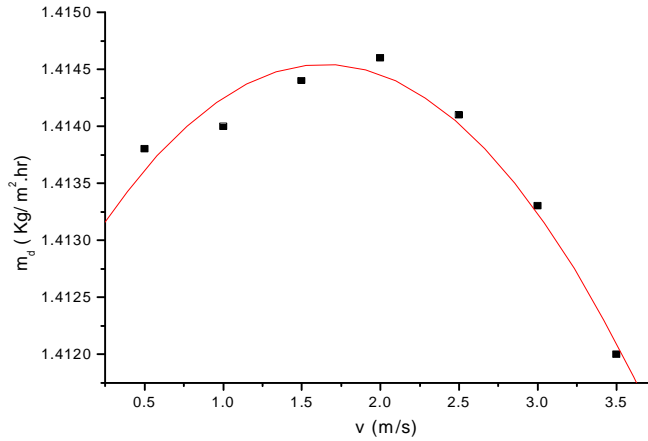


Figure IV.13- variation de la production en fonction de la vitesse du vent

Pour une irradiation globale faible, l'effet du vent est nettement défavorable pour n'importe quelle vitesse du vent. (Figure IV.14)

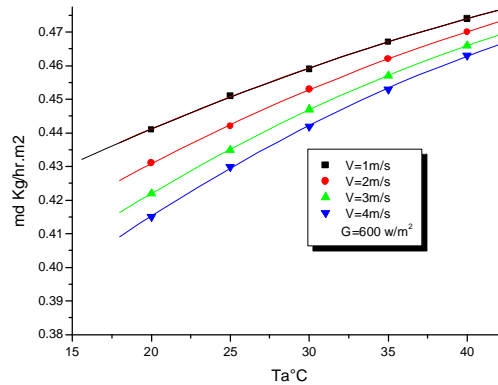


Figure IV.14- Variation de la production en fonction de la température ambiante pour différentes vitesses de vent

IV.2.2.2- L'efficacité globale

a) En fonction de l'irradiation globale

Il apparaît nettement sur la figure IV.15 que l'efficacité globale d'un distillateur solaire est une fonction croissante de l'irradiation globale. Cependant cette croissance s'atténue pour des valeurs élevées de l'irradiation. En outre, et comme nous pouvons l'observer sur la figure IV.16 l'efficacité du distillateur sphérique, DS est nettement supérieure à celle du distillateur

plan, DP du fait de la plus faible inertie thermique de DS qui suit par conséquent plus rapidement les variations de l'énergie solaire incidente.

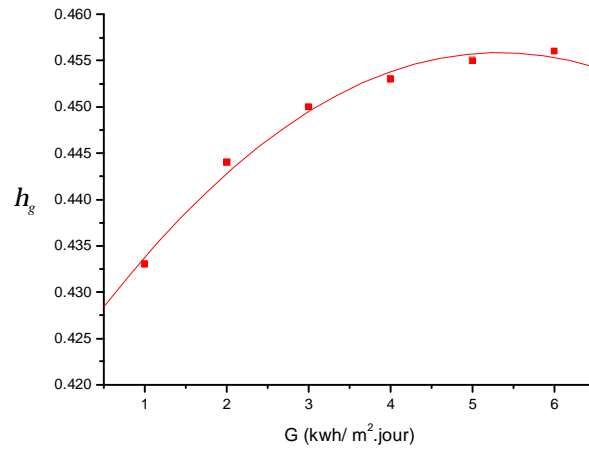


Figure IV.15- Variation de l'efficacité globale en fonction de l'irradiation (V=cte)

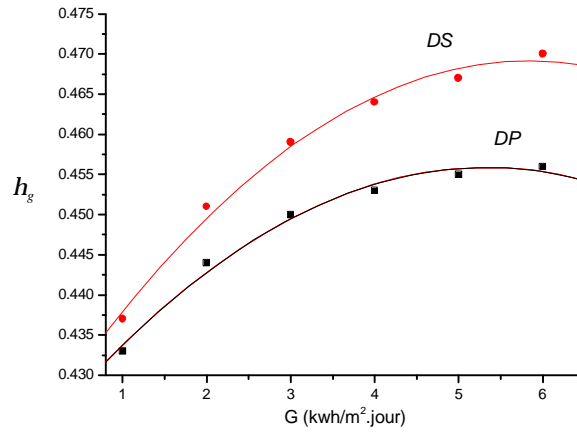


Figure IV.16- Variation de l'efficacité globale en fonction de l'irradiation pour les deux types de distillateurs. (V=cte)

IV.3.2.2- L'efficacité globale en fonction de la température (Te-Ta)

La figure IV.17 vérifie un résultat déjà trouvé expérimentalement [24] d'après lequel l'irradiation globale varie en sens inverse de l'écart de température (Te-Ta), ce qui se traduit par le fait qu'un distillateur solaire est d'autant plus efficace que la température de l'eau Te est

plus basse (à condition que le régime de fonctionnement permanent soit atteint; $T_e \approx 40^\circ\text{C}$). Il faut bien préciser que ce résultat ne signifie pas une diminution de la production du distillateur solaire avec T_e , en effet cette dernière augmente avec T_e (figure IV.9) mais en même temps son efficacité diminue.

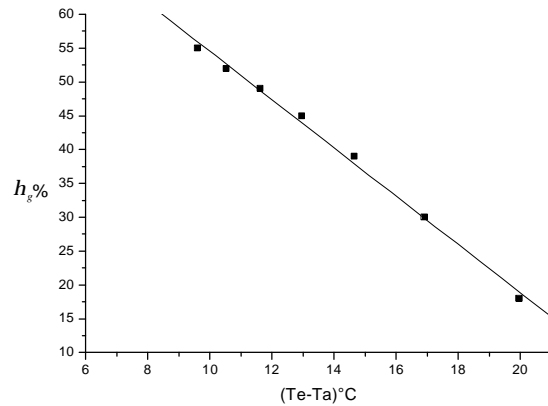


Figure IV.17- Variation de l'efficacité globale en fonction de l'écart ($T_e - T_a$) à $v = \text{cte}$

IV.2.2.3- L'efficacité interne

a) En fonction de l'irradiation globale

La courbe IV.18 montre que l'efficacité interne augmente avec l'irradiation globale; cependant pour de grandes puissances, l'effet inverse se produit.

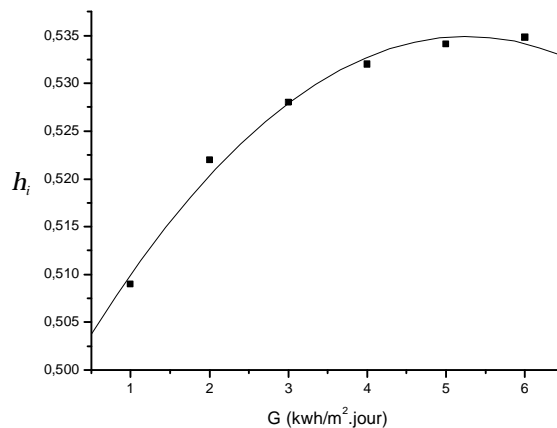


Figure IV.18- Variation de l'efficacité interne en fonction de l'irradiation globale ($V = 1.5\text{m/s}, T_a = 20^\circ\text{C}$)

b) En fonction de la température de l'eau

L'effet de la température de l'eau sur l'efficacité interne est similaire à celui de l'irradiation globale. En effet la figure IV.19 permet d'observer un accroissement très important pour de faibles valeurs de la puissance incidente puis une variation décroissante aux valeurs élevées de l'irradiation.

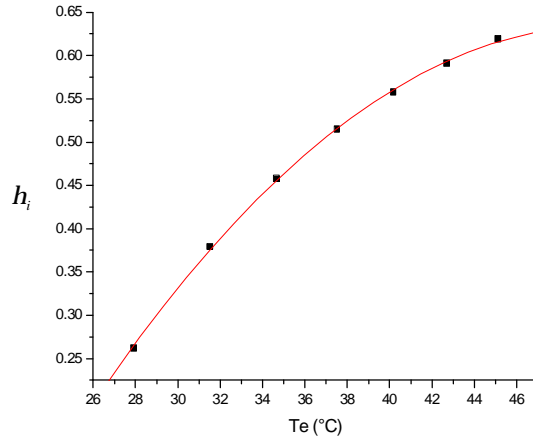


Figure IV.19- Variation de l'efficacité interne en fonction de Te

Nous remarquons comme précédemment, que l'efficacité interne d'un distillateur sphérique DS est supérieure à celle du distillateur plan DP (figure IV.20) ceci est dû que les pertes thermiques dans un DP sont plus importantes.

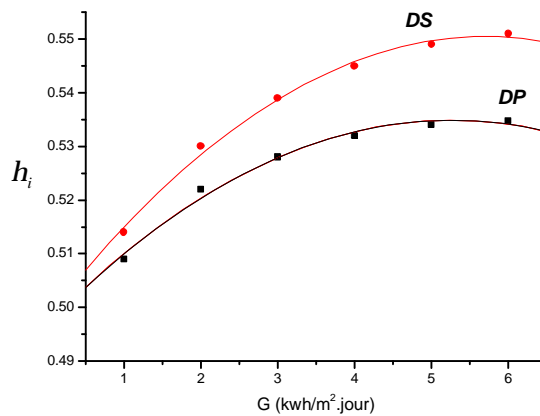


Figure IV.20- Variation de l'efficacité interne en fonction de l'irradiation (à V=cte) pour les deux type de distillateurs

c) En fonction de la vitesse

L'augmentation de la vitesse du vent entraîne dans un premier temps l'accroissement de l'efficacité interne h_i du distillateur, mais au d'une certaine vitesse, l'effet inverse se produit. En effet, quand la vitesse augmente l'échange de chaleur par convection ($h_{ca}=5.7+3.8V$) entre le distillateur et l'extérieur augmente et ainsi le vent accélère le processus d'évaporation conduisant à une augmentation de l'efficacité interne. Au delà d'une vitesse approximativement égale à 2m/s; la température de mélange air-vapeur à l'intérieur du distillateur chute ce qui provoque une augmentation de la proportion d'air s'opposant au passage de la vapeur du plan d'eau vers la surface de condensation, il en résulte alors une diminution du taux d'évaporation et par conséquent un abaissement de h_i . Ce résultat a été prouvé expérimentalement par [24].

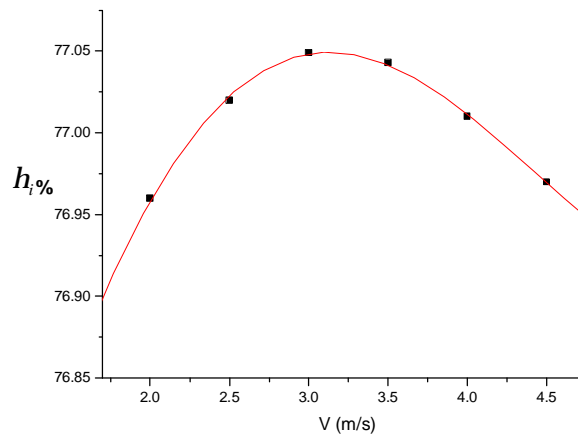


Figure IV.21- variation de l'efficacité interne en fonction de la vitesse

d) Comparaison de l'efficacité globale et interne

Les courbes de la figure IV.22 présentant la variation des efficacités globale h_g et interne h_i , en fonction de l'irradiation globale ont la même allure. Cependant nous remarquons que les valeurs de l'efficacité internes sont plus élevées. Ce qui peut être aisément expliqué par les expressions de ces deux grandeurs (§ II.5.2). Nous rappelons que:

-L'efficacité globale est le rapport de la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation et du rayonnement global incident sur la vitre du distillateur.

- L'efficacité interne représente le rapport de la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation et de la quantité de chaleur effectivement reçue par la masse d'eau.

Et comme le rayonnement solaire incident sur la vitre est plus élevé que le rayonnement absorbé par la saumure, l'efficacité interne sera par conséquent plus élevée.

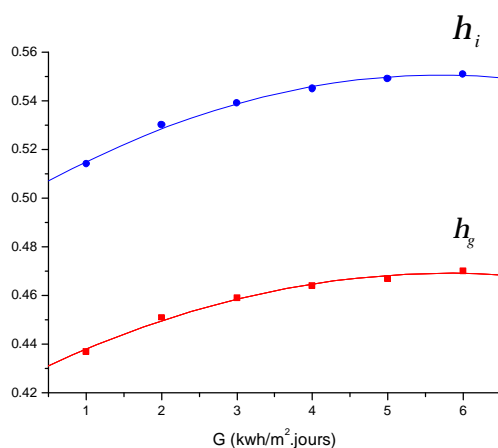


Figure IV.22- comparaison des efficacités interne et globale

IV.3- EFFET DES PERTES THERMIQUES SUR LES CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT

Pour évaluer les différentes pertes thermiques qui se produisent pendant le processus de distillation, nous supposons un régime de fonctionnement optimum (régime correspondant à une journée suffisamment ensoleillée et autour de midi T.S.V.); pour une irradiation globale, G de l'ordre de 700 à 750 w/m² et une température ambiante variant entre 20 et 29°C.

IV.3.1- Estimation des pertes

L'énergie solaire incidente n'est pas totalement transmise à l'intérieur du distillateur. En effet différentes pertes thermiques se produisent au cours du processus de distillation, affectant ainsi les caractéristiques de fonctionnement du distillateur.

IV.3.1.1- Pertes par réflexion et par absorption

Le flux solaire incident, réfléchi par la vitre q_r:

$$q_r = r_v \cdot G \cdot A_v$$

Le flux solaire absorbé q_a:

$$q_a = a_v \cdot G \cdot A_v$$

En se basant sur les valeurs des réflectivités de la vitre (r_v=0.05), de la nappe d'eau (r_e≈0.02), du fond du distillateur (r_f≈ 0.02 à 0.03) et de l'absorptivité de la vitre (a_v = 0.05); tableau III.2 (§ III.3.2), un calcul approximatif des pertes par réflexion dans les différentes parties du distillateur (vitre, plan d'eau, fond du bac) et par absorption dans la vitre donne une valeur de l'ordre de 15 à 16%.

IV.3.1.2- Pertes par apport d'eau d'appoint

Le flux de chaleur perdu par l'apport de l'eau d'appoint est calculé par la relation:

$$q_{ap} = m_d \times C_e \times (T_e - T_a) = 17.08 \text{ w/m}^2$$

Soit: q_{ap} ≈ **2.44 %** de G et **2.87 %** de q_{eau}. (q_{eau}= 0.85G) (§ II.5.2)

IV.3.1.3- Pertes par extraction du distillat

Le distillat est extrait à une température voisine de celle de la vitre.

$$q_d = m_d C_e(T_{vi} - T_a) = 8.95 \text{ w/m}^2$$

Soit: $q_d \approx 1.28 \%$ de G et 1.50% de q_{eau} .

IV.3.1.4- Pertes à travers les parois

a) A travers le bac

On a:

$$q_b = k.A.(T_e - T_a)$$

Pour un bac de 1 m^2 de surface, une valeur moyenne du coefficient d'échange k est estimée à $1.6 \text{ w/m}^2.k$. [5], les pertes à travers le bac sont alors estimées à une valeur de 66.18 w/m^2

Soit: 9.45% de G et 11.12% de q_{eau} .

b) A travers les parois verticales

Pour un bac de 1 m^2 de surface horizontale, la surface des parois verticales est voisine de 1.2 m^2 . Nous supposons que le coefficient global d'échange à travers les parois est le même que pour le bac; ($k=1.6 \text{ w/m}^2.k$).

$$q_{pa} = k.A_p.(T_v - T_a) = 34.56 \text{ w/m}^2$$

Soit: 4.93% de G et 5.80% de q_{eau} .

Les pertes thermiques à travers le bac et les parois verticales sont donc égales approximativement à 14.38% de G et 16.92% de q_{eau} .

Au total, les différentes pertes de chaleur dans un distillateur solaire sont estimées à une valeur de l'ordre de 18.09% de G, soit 20.99% de q_{eau} .

IV.3.2- Bilan des pertes thermiques

Nous pouvons schématiser les différentes pertes thermiques au cours d'un processus de distillation solaire comme suit:

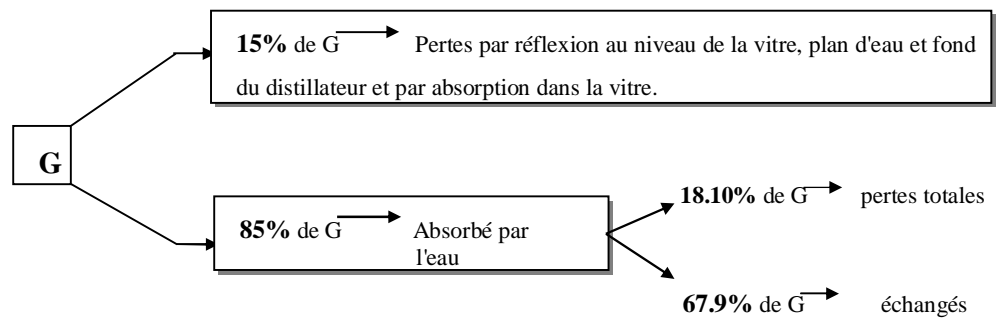


Tableau IV.1- Bilan estimatif des différentes pertes thermiques

Les résultats précédents montrent que les pertes par l'apport de l'eau d'appoint et par extraction du distillat sont très faibles (de l'ordre de 1 à 2.5 %), et peuvent être par conséquent négligées; par contre les pertes à travers le bac et les parois verticales estimées à 14.18%, produite par le gradient de température entre l'intérieur (jusqu'à 60 à 63°C, vitrage opaque au infrarouge) et l'extérieur du distillateur $T_a = 20$ à 28°C, constituent une part importante. Néanmoins elles peuvent être considérablement réduites par une isolation adéquate (un matériau très faiblement conducteur de la chaleur). Une autre part de l'ordre de 15 à 16% représentant les pertes par réflexion sur les différentes parties du distillateur (la vitre, plan d'eau et le fond du bac) et par absorption dans la vitre, ne peut être évitée ou réduite. Le pourcentage des différentes pertes est illustré par la figure IV.23.

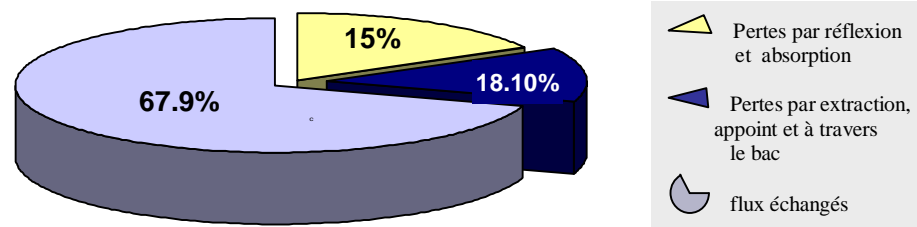


Figure IV.23- Pourcentages des différentes pertes thermiques estimés par rapport à G

IV.3.3- Comparaison des différentes pertes thermiques dans un DP et DS

Une comparaison des résultats numériques des différentes pertes thermiques qui se produisent dans un distillateur plan DP, ou dans un distillateur sphérique DS, permet de choisir le distillateur qui répond le mieux aux besoins en eau dessalée, (production importante avec le minimum des pertes). Le tableau IV.1 rassemble les pourcentages des différentes pertes thermiques dans les deux types de distillateurs (DP et DS). Il apparaît que les pertes thermiques sont moins élevées dans le distillateur sphérique, ce qui peut être expliqué par:

- La géométrie du système: Dans un distillateur sphérique les pertes à travers les parois verticales sont éliminées.

- L'eau condensée sur la vitre du DP réfléchit une partie relativement importante du rayonnement, surtout dans l'hypothèse d'une condensation en gouttes, par contre le distillateur sphérique est constitué d'une demi sphère supérieure en plexiglas munie d'un essui-glace qui permet de maintenir la surface de condensation, constamment transparente au rayonnement.

	Distillateur Plan (DP)	Distillateur Sphérique (DS)
G (w/m ²)	700 à 750 w/m ²	
q _{eau}	0.85 % de G	
Pertes		
Par appoint	2.44 %	1.95 %
Par extraction de distillat	1.27 %	0.61 %
A travers le bac	9.45 %	7.19 %
A travers les parois verticales	4.93%	-
Total	18.09	9.75

Tableau IV.2- Comparaison des différentes pertes thermiques dans un DP et un DS

Les résultats du tableau IV.2 sont représentés par la figure IV.24:

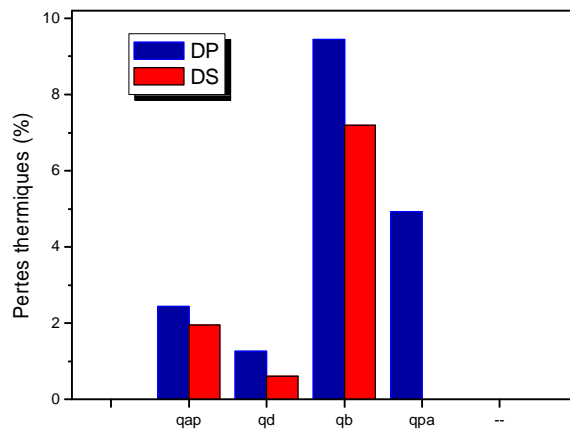


Figure IV.24- Comparaison des différentes pertes thermiques dans un DP et DS

IV.3.4- Influence des pertes sur les caractéristiques de fonctionnements

- La production

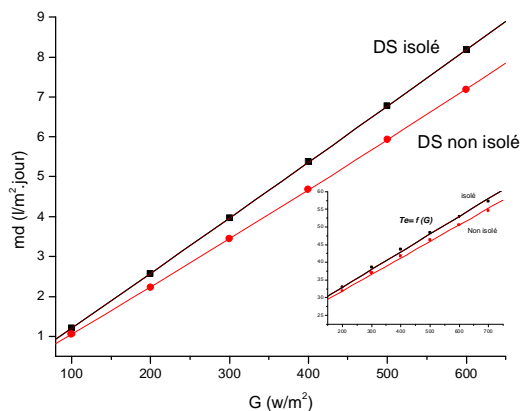


Figure IV.25- Effet de l'isolation sur la production

La figure IV.25 montre que la production d'un distillateur isolé est plus importante que celle d'un distillateur sans isolation.

- L'efficacité globale

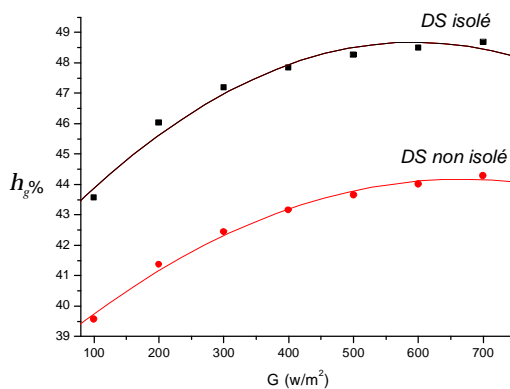


Figure IV.26- Effet de l'isolation sur l'efficacité globale

L'effet de l'isolation sur l'efficacité globale est clairement mis en évidence par la figure IV.26 qui montre que l'utilisation d'une isolation thermique améliore nettement l'efficacité globale.

- L'efficacité interne

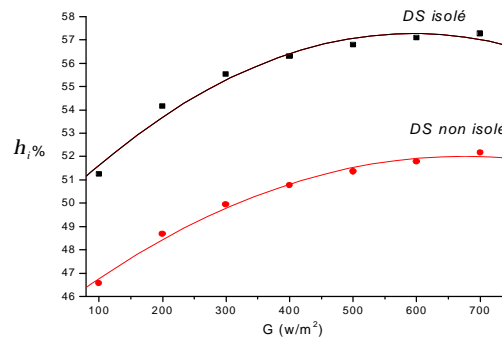


Figure IV.27- Effet de l'isolation sur l'efficacité interne

Comme pour la production et l'efficacité globale, le même effet de l'isolation sur l'efficacité interne d'un distillateur, est observé. La figure IV.27 montre que l'isolation entraîne une augmentation de l'efficacité interne.

Ainsi et comme nous avons pu le constater sur les trois figures précédentes, l'isolation améliore les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire. Du point de vue économique, la laine de verre (disponible et bon marché) constitue un des meilleurs isolants.

IV.4- COMPARAISON DES RESULTATS NUMERIQUES ET EXPERIMENTALES

Pour valider les résultats numériques obtenus dans le cadre de ce travail, nous avons entrepris des essais sur un distillateur sphérique à balayage ayant les caractéristiques suivantes :

- Un bac de surface A égale à $0.212 m^2$, d'épaisseur 3 mm et de conductivité thermique égale à $0.16 w.m^{-1}.k^{-1}$.
- Une vitre en polyméthacrylate de méthyle d'aire A_v égale à $0.492 m^2$, d'épaisseur 3mm environ et de conductivité thermique $I_v=0.209w.m^{-1}.k^{-1}$.
- Un isolant (vermiculite) d'épaisseur 3mm et de conductivité $0.0925w.m^{-1}.k^{-1}$ est utilisé afin d'éviter les pertes par la partie inférieure du bac.

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus. Concernant la variation de la production, de l'efficacité globale et de l'efficacité interne en fonction de l'irradiation globale est illustré respectivement par les figure IV.28, IV.29, IV.30 qui permettent de remarquer un accord satisfaisant entre ces résultats et ceux obtenus dans l'étude numérique entreprise dans le cadre de ce travail.

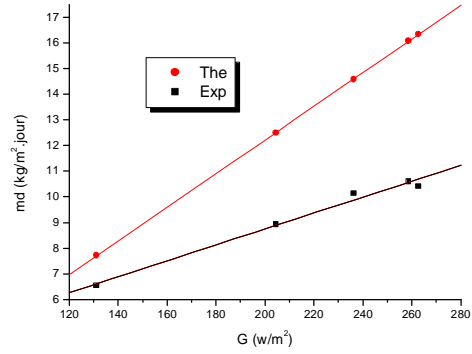


Figure IV.28- Variation de la production (théorique et expérimentale) en fonction de l'irradiation globale

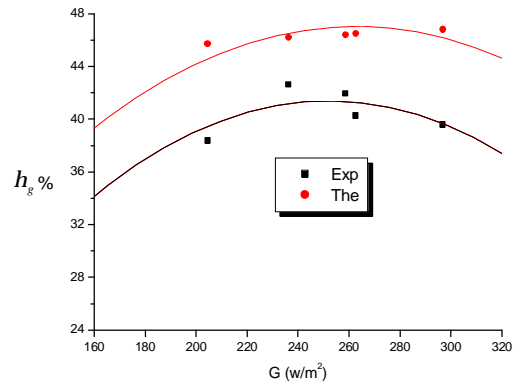


Figure IV.29- Variation de l'efficacité globale (théorique et expérimentale) en fonction de l'irradiation globale

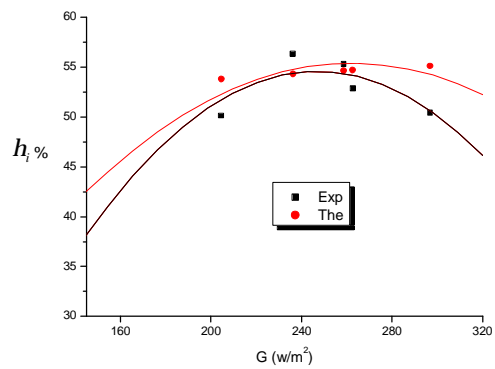


Figure IV.30- Variation de l'efficacité interne (théorique et expérimentale) en fonction de l'irradiation globale

Conclusion

LE travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude théorique et numérique de deux types de distillateurs solaires, le distillateur plan et le distillateur sphérique afin de choisir celui dont les caractéristiques de fonctionnement seraient les plus performantes et dont les pertes thermiques seraient les moins élevés. Après un bref historique sur la distillation solaire et la présentation de différents types de distillateur existant dans le monde nous avons rappelé le principe de fonctionnement, les principaux paramètres influençant le système de distillation ainsi que les caractéristiques de fonctionnement. Nous avons établi les échanges thermiques au niveau de chaque partie du distillateur et le système d'équations résultant a été résolu par la méthode de Gauss Seidel d'itération.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement. Il apparaît en particulier qu'une augmentation de l'irradiation globale qui reste le paramètre le plus influant, conduit à un accroissement de ces caractéristiques. Néanmoins une trop grande puissance incidente peut produire l'effet inverse. Concernant la vitesse du vent, nous avons montré que dans un premier temps, l'effet du vent favorise l'échange. Il en résulte une augmentation de la production et des efficacités globale et interne. Cependant, au-delà d'une valeur approximativement égale à 2 m/s, l'effet devient défavorable. Nous remarquons que la production du distillateur sphérique (5 à 7 litres/m² et par jour) est supérieure à celle du distillateur plan. De même que pour les efficacités globale et interne.

Du fait de sa faible inertie thermique les grandeurs caractérisant le distillateur sphérique suivent plus rapidement les variations du flux solaire incident.

Notre intérêt a porté particulièrement sur les pertes thermiques qui peuvent influencer considérablement les caractéristiques de fonctionnement. Il ressort de cette étude les principales observations suivantes :

- Les pertes thermiques sont plus importantes pour le distillateur plan que pour le distillateur sphérique.
- Si l'ordre de grandeur des pertes thermiques par réflexion, absorption, apport de l'eau d'appoint, extraction de distillat, et à travers le bac est le même pour les deux types de

distillateurs, il n'en est pas de même pour les pertes à travers les parois verticales qui sont inexistantes pour le distillateur sphérique.

- Il s'avère que les pertes par réflexion et absorption ne peuvent être évitées ou réduites, par contre nous pouvons négliger certaines pertes, notamment, celles par l'apport de l'eau d'appoint et par extraction du distillat.

Il est évident qu'un tel procédé de production d'eau douce n'est adapté que pour des régions isolées et où éloignées où l'énergie solaire et généralement disponible.

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

Recommandations et Perspectives

Cette étude nous permet d'aboutir à certaines recommandations qui s'avèrent nécessaires pour développer l'utilisation des distillateurs solaires.

- Dans la littérature, de nombreux auteurs ont montré l'importance du vitrage qui joue un double rôle. En effet, il laisse passer le rayonnement lumineux d'une part et réfléchit la radiation infrarouge I.R. qui se trouve piégée d'autre part. ce qui nous amène à proposer:
 - ✚ L'ajout d'un double vitrage pour le distillateur plan et pour le distillateur sphérique qui permettrait de piéger encore la moitié de l'énergie traversant le premier vitrage. Il serait alors intéressant d'entreprendre une étude comparative théorique et expérimentale avec les résultats concernant les distillateurs plan et sphérique à simple vitrage obtenus dans le cadre de notre étude.
- Pour améliorer la production du distillat, il faut minimiser les pertes thermiques vers l'ambiance en utilisant:
 - ✚ Un renforcement adéquat de l'isolation thermique.
 - ✚ Des surfaces anti-réfléchissantes pour les milieux semi transparents, et une faible épaisseur de vitrage, (afin de minimiser les pertes par réflexion, et par absorption qui sont significatives).
- L'augmentation de la production est d'autant assurée par la croissance de la température de l'eau et de l'absorbeur et la diminution de la température extérieure du vitrage, pour cela nous proposons:
 - ✚ Le couplage du distillateur avec un chauffe-eau solaire pour un préchauffage de la saumure avant son introduction dans le distillateur.
 - ✚ L'énergie absorbée peut être améliorée par la mise en place dans l'eau du bassin d'une mèche noire flottante.
 - ✚ Le Refroidissement de la vitre en utilisant soit; un ventilateur qui fonctionne avec de l'énergie électrique produite par un système photovoltaïque, soit en faisant un passage primaire de la saumure à travers cette vitre, avant son introduction dans le distillateur, ou encore on utilisant une vitre avec ailettes pour augmenter l'échange de chaleur par convection, ce qui entraînerait un refroidissement de la face extérieure de la vitre.

- L'alimentation de l'appareil en eau à dessaler nécessite une main-d'œuvre. L'utilisation d'une pompe solaire permet de contourner cette contrainte et rendrait le système autonome.
- L'emplacement de l'appareil joue également un rôle, aussi nous recommandons :
 - ✚ D'éviter les distances trop importantes entre l'implantation de l'appareil et lieu d'utilisation
 - ✚ De préférer des lieux modérément ventés.
 - ✚ De limiter les effets de masque.

Annexe A

Caractéristiques physiques de l'eau

Cette annexe complète le second chapitre qui contient le principe de la distillation solaire. Nous rappelons la définition des différents types d'eaux à distiller (l'eau de mer et l'eau saumâtre), le distillat, ainsi que les principales propriétés thermophysiques de l'eau.

La terre est la planète de l'eau (71% de la surface en est recouverts); mais 97% de cette eau est salée (3% d'eau douce dont les 2/3 sont gelés aux pôles), et rendue imbuvable par les sels quelle contient.

A.1- DIFFERENTS TYPES D'EAU

A.1.1- L'eau potable

Selon les normes internationales de L'OMS (office mondial de la santé) une eau destinée aux usages domestiques doit avoir une salinité inférieure ou égale à 500mg/l. De plus elle ne doit pas contenir plus de 250 mg/l de chlorures ni plus de 250 mg/l de sulfates. Pour les usages industriels et agricoles, les normes sont très variables, mais dans la plupart des cas il est souhaitable que la salinité ne dépasse pas 1000 à 1500 mg/l [27].

A.1.2- L'eau de mer

L'eau de mer est un liquide dont la composition, est extraordinairement élevée, puisqu'on y trouve une cinquantaine de corps simples, L'énumération de ces corps simple va de l'hydrogène, de l'oxygène, du chlore et du sodium. D'une façon générale, l'eau de mer contient de 35 à 42g/l de sels minéraux dissous, la salinité étant différente selon les mers.

A.1.3- L'eau saumâtre

Généralement, on appelle eau saumâtre une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. En effet la plus part des eaux saumâtre ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/l. Elle se présente soit sous forme d'eaux de surface soit sous forme d'eaux souterraines.

A.2- L'EAU DISTILLEE

L'eau distillée est un corps pur. Généralement, il est utilisée dans:

- Les laboratoires et Les hôpitaux pour toutes les analyses, les vaccins, les sérums, etc...
- Certaines industries pour l'utilisation dans les fabriques d'accumulateurs; traitement nécessitant l'utilisation de l'eau pure (industrie photographique).

A.2.1- Critère de pureté de l'eau distillée

Ce sont de constantes physiques de valeur bien déterminées qui caractérisent l'eau distillée. La masse volumique de l'eau distillée est toujours égale à 1g/cm^3 ou 1kg/m^3 à la température de 4°C . L'eau distillée redonne absolument une eau pure identique.

L'eau pure est un liquide incolore, inodore, elle n'est pas potable car elle est sans saveur; pour avoir un goût agréable, l'eau doit contenir 0.1 à 0.5g par litre de corps minéraux dissous et une oxygénation de 6.4mg/l.

A.3- LES PROPRIETES THERMOPHYSIQUE DE L'EAU

A.3.1- Conductivité thermique

Son expression est la suivante:

$$I(T) = 0.569 + 0.185 \times 10^2 \times T - 0.749 \times T^2 \quad (\text{A.1})$$

A.3.2- Chaleur latente de vaporisation

Elle est définie par l'expression:

$$L(T) = 4185 \times [597 - 0.56 \times (T - 273)] \quad (\text{A.2})$$

A.3.3- Chaleur massique

Elle est donnée par la relation:

$$Cp(T) = 4216.66 - 3.165 \times T + 0.886 \times 10^{-2} \times T^2 - 0.101 \times 10^{-2} \times T^3 + 0.445 \times 10^{-5} \times T^4 \quad (\text{A.3})$$

A.3.4- Coefficient de viscosité dynamique

$$m(T) = 5.449 - 0.167 \times T + 7.325 \times 10^{-4} \times T^2 \quad (\text{A.4})$$

A.3.5- Masse volumique

$$r(T) = 999.879 + 0.0469 \times T - 0.667 \times T^2 + 0.208 \times 10^{-4} \times T^3 \quad (\text{A.5})$$

A.3.6- coefficient de viscosité dynamique

$$n(T) = \frac{m(T)}{r(T)} \quad (\text{A.6})$$

$$n(T) = 1.7414 \times 10^{-6} - 4.453 \times 10^{-8} \times T + 5.51413 \times 10^{-10} \times T^2 - 3.3955 \times 10^{-12} \times T^3 \quad (\text{A.7})$$

Annexe B

Méthode Numérique utilisée

Dans cette annexe nous décrivons la méthode la méthode de Gauss Seidel d'itération utilisée pour la résolution des différents systèmes d'équations figurant dans ce manuscrit.

Pour résoudre un problème, la solution analytique n'est pas toujours facile à obtenir, et l'utilisation d'une méthode numérique est plus aisée. Dans le cadre de cette étude, la méthode de Gauss Seidel d'itération est choisie pour la résolution du système d'équations établi.

B.1- METHODE DE GAUSS SEIDEL

B.1.1- Principe

On veut résoudre le système linéaire suivant [28], [29]:

$$A \times T = B \quad (B.1)$$

Où:

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

B: est la matrice colonne du deuxième membre d'ordre n .

T: est le vecteur des inconnus, $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$.

Ecrivons A sous la forme:

$$A = M - N \quad (B.2)$$

Où

$$M = D - L \quad (B.3)$$

$$N = U \quad (B.4)$$

Avec:

D: matrice diagonale

L: matrice inférieure

U: matrice supérieure

Alors le système (B.1) peut s'écrire :

$$(M-N) \times T = B \quad (B.5)$$

Dans la méthode de Gauss-Seidel, on réécrit (B.5) à partir d'un vecteur initial $T^{(0)}$, de la manière suivante:

$$T^{(1)} = (D-L)^{-1} \times U \times T^{(0)} + (D-L)^{-1} \times B \quad (B.6)$$

Comme l'inverse de (D - L) peut être compliquée à calculer, on préfère écrire le système comme suit:

$$(D-L) \times T^{(1)} = U \times T^{(0)} + B \quad (B.7)$$

Soit encore:

$$D \times T^{(1)} = L \times T^{(1)} + U \times T^{(0)} + B \quad (B.8)$$

Où

$$T^{(1)} = D^{-1} \times L \times T^{(1)} + D^{-1} \times U \times T^{(0)} + D^{-1} \times B \quad (B.9)$$

Ce qui est équivalent à:

$$T = D^{-1} \times L \times T + D^{-1} \times U \times T_0 + D^{-1} \times B \quad (B.10)$$

En développant cette récurrence vectorielle on obtient:

$$T_1 = (b_1 - a_{12} \times T_2 - a_{13} \times T_3 - \dots - a_{1n} \times T_n) / a_{11}$$

$$T_2 = (b_2 - a_{21} \times T_1 - a_{23} \times T_3 - \dots - a_{2n} \times T_n) / a_{22}$$

.....

$$T_n = (b_n - a_{n1} \times T_1 - a_{n2} \times T_2 - \dots - a_{nn-1} \times T_{n-1}) / a_{nn}$$

B.1.2- Conditions de convergence

Le système d'équations converge si:

$$1- |T_i - T_{pi}| \mathbf{p} \text{ eps} \quad (B.11)$$

$$2- \frac{|T_i - T_{pi}|}{|T_i|} \mathbf{p} \text{ eps} \quad (B.12)$$

Ou bien

$$3- \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{pi})^2} \mathbf{p} \text{ eps} \quad (B.13)$$

B.2- RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS CONSIDERE

Les équations régissant le fonctionnement d'un distillateur solaire sont résolues par la méthode de Gauss-Seidel d'itération [26],[27]. Pour cela nous présentons les équations finales des divers bilans par rapport aux températures comme suit:

- Au niveau extérieur de la vitre

$$(h_{ca} + h_{ra} + \frac{I_v}{e_v}).T_{ve} - \frac{I_v}{e_v}.T_{vi} = h_{ca}.T_a + h_{ra}.T_c + a_v.G_h.A \quad (B.14)$$

- Au niveau intérieur de la vitre

$$-(h_{ci} + h_{ri} + h_{ev}).T_e + (h_{ci} + h_{ri} + h_{ev} + \frac{I_v}{e_v}).T_{vi} - \frac{I_v}{e_v}.T_{ve} = 0 \quad (B.15)$$

Au niveau de la masse d'eau

$$(h_{ci} + h_{ri} + h_{ev} + h_{be}).T_e - (h_{ci} + h_{ri} + h_{ev}).T_{vi} - h_{be} = a_r.G_h.A \quad (B.16)$$

- Au niveau de l'absorbeur

$$(h_{be} + \frac{I_b}{e_b}).T_b - h_{be}.T_e - \frac{I_b}{e_b}.T_{isi} = t.G.A_v \quad (B.17)$$

- Au niveau de l'isolant intérieur

$$\frac{I_b}{e_b}.T_b + (\frac{I_b}{e_b} + \frac{I_{is}}{e_{is}}).T_{isi} - \frac{I_{is}}{e_{is}}.T_{ise} = 0 \quad (B.18)$$

- Au niveau de l'isolant extérieur

$$(h_{ise}^e + h_{ise}^c + \frac{I_{is}}{e_{is}}).T_{ise} - \frac{I_{is}}{e_{is}}.T_{isi} = h_{ise}^r.T_{sol} + h_{ise}^c.T_a \quad (B.19)$$

Ces équations forment un système d'équations linéaire sous forme $A \times T = B$.

Dans ce système d'équations, les paramètres inconnus sont T_{vi} , T_{ve} , T_e , T_b , T_{isi} , T_{ise} .

On forme la matrice A qui s'écrit comme suit:

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

Avec

a_{ij} ($i=j=1, 6$) correspond aux coefficients de chaque température

b_i ($i= 1, 6$) correspond aux coefficients de second membre des équations considérées.

**ETUDE DE L'EFFET DES PERTES THERMIQUES SUR LES
CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT D'UN
DISTILLATEUR SOLAIRE**

E

n Algérie, comme dans les pays en voie de développement, le problème d'approvisionnement en eau potable devient de plus en plus crucial, du fait de la croissance démographique et de l'élévation du niveau de vie. Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres est désormais envisageable pour répondre à la demande en eau potable. Parmi les différents procédés, la distillation solaire est une solution intéressantes, pour les régions isolées et/ ou éloignées.

L'objectif de notre travail est l'étude de deux types de distillateurs solaires, le distillateur plan et le distillateur sphérique. Par ailleurs, notre intérêt a également porté sur les différentes pertes de chaleur qui se produisent pendant le processus de distillation. Ces pertes thermiques peuvent affecter considérablement les caractéristiques de fonctionnement de tout distillateur solaire, notamment le débit de distillat, l'efficacité globale et l'efficacité interne. Nous avons établi le bilan thermique, calculé les températures au niveau de chaque partie composant le distillateur, puis estimé les différentes pertes qui se produisent pendant le processus de distillation.

Les équations régissant le fonctionnement d'un distillateur solaire sont résolues par une approche numérique basée sur la méthode de Gauss-Seidel d'iteration, et les résultats obtenus mettent en évidence l'influence de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement.

Le programme de calcul élaboré permet également de préciser l'effet des pertes thermiques sur les caractéristiques de fonctionnement, et de montrer qu'elles sont plus importantes dans le cas du distillateur plan.

Mots clés: Distillation solaire- Distillateur solaire- Efficacité interne- Efficacité globale- Pertes thermiques- Simulation.