

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

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES EXACTES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° d'ordre :

Série :

MEMOIRE

PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MAGISTER EN PHYSIQUE

OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES

THEME

**ETUDE D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE
A CASCADE**

Présenté Par:

TABET Ismail

Soutenu le : 06 /07/2010

Devant le jury

Président : A. CHAKER	Prof. Université Mentouri	Constantine
Rapporteur : N. BELLEL	M.C. Université Mentouri	Constantine
Examineur : A.ZAATRI	Prof. Université Mentouri	Constantine
Examineur : M. DJEZZAR	M.C. Université Mentouri	Constantine

Dedicace

*Je dédie ce travail à mes chers parents
A mes chers frères, A mes chères sœurs
Et toute la famille.*

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **Bellel Nadir**, Maître de conférence à l'université Mentouri-Constantine, qui m'a permis de réaliser ce travail sous sa direction et pour le soutien précieux tout le long du travail.

Je remercie vivement :

- Mme A. Chaker professeur à l'université Mentouri-Constantine qui a bien voulu accepter de présider le jury de ma soutenance.

Messieurs,

- Mr. A. Zaatri Professeur à l'université Mentouri-Constantine
- Mr M.Djezzar Maître de conférence à l'université Mentouri-Constantine.

De m'avoir fait l'honneur d'accepter de participer à mon jury de mémoire.

Je remercie aussi Mr. Djemal technicien supérieur et Mr.T. yazid qui ont contribué à la réalisation et le montage expérimental de ce travail.

Je remercie également,

Tous les étudiants de l'école doctorale des énergies Renouvelables : Taher, Izeeldine, Monire, Hassene, Nouar, Walid, Mouiz, Mourad.

Tous mes remerciements et mon estime à tous les enseignants du département de physique énergétique.

Sommaire

1 .Introduction.....	11
Chapitre I : Etude bibliographique	
I.1- Gisement solaire	11
I.1.1- Constitution physique du soleil.....	14
I.1.2 - La sphère céleste.....	14
I.1.3 - Mouvements apparents du soleil sur la sphère céleste.....	15
I.1.4 - Les coordonnées célestes.....	17
I.1.4.1 - Les coordonnées géographiques.....	17
I.1.4.2 - Les coordonnées horaires	17
I.1.4.3 - Les coordonnées horizontales.....	18
II.1.5 - Les temps solaires.....	19
II.1.5.1- Le temps solaire vrai (T.S.V).....	19
I.1.5.2 - Le temps solaire moyen (T.S.M).....	19
I.1.5.3 - Le temps universel (T.U).....	19
I.1.5.4 - Le temps légal (TL).....	20
I.1.5.5 - Direction des rayons solaires.....	20
II.1.6 - L a constante solaire.....	22
I.1.7 - Structure et composition de l'atmosphère.....	22
II.8 - Mass d'aire.....	22
I.1.9 - Estimation du flux solaire reçu sur le vitre du distillateur.....	23
I.1.9.1 - Calcul du flux solaire reçu sur la vitre.....	23
I.1.9.2 - Calcul du flux diffus reçu sur la vitre.....	24
I.1.9.3 - Autre formule estimation du flux solaire.....	25
I.2 - Distillateur solaire	27
I.2.1 - Généralité.....	27
1.2.2 - Définition.....	28
1.2.3 - Types de distillation solaire.....	28
1.2.3.1 - Distillation solaire à effet de serre.....	28
1.2.3.1.1-Types de conception du distillateur solaire à effet de serre et leur Performance	29

1.2.3.2 - Distillation solaire à multiples effets.....	33
I.2.3.3 - Autre technique de dessalement de l'eau salée.....	33
I.2.4 - Paramètre influant sur le système de distillation solaire.....	36
1.2.4.1 - Paramètres externe.....	36
a) Intensité du Rayonnement Solaire.....	36
b) La Vitesse du Vent.....	37
c) Température Ambiante de l'air	37
d) Paramètres Météorologiques.....	37
e) Paramètres Géographiques.....	37
f) Nature de l'eau à traiter.....	37
I.2.4.2 - Paramètre internes.....	37
a) Paramètre de position.....	37
b) Paramètre de construction.....	38
c) Paramétrer de la saumure.....	39
d) Paramètres optiques.....	39
e) Paramètre thermo physique.....	40
1.2.5 - les caractéristiques de fonctionnement.....	40
1.2.5.1 - La production (le débit de distillat).....	40
1.2.5.3 - L'efficacité globale.....	40
1.2.5.4 - L'efficacité interne.....	41
1.2.5.5 - Performance.....	42

Chapitre II Etude théorique

II.1 - Introduction générale sur la modalisation de distillateur solaire.....	34
II.2 - Principe de fonctionnement de distillateur à cascade.....	44
II.3 - Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur.....	45
II.3.1- Echange de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation.....	45
II.3.2 - Echange de chaleur entre la vitre et la surface d'eau.....	45
II.3.3 - Echange de chaleur entre la vitre et l'ambiant.....	46
II.4 - Mise en équation des échanges thermiques	46
II.5 - Bilan thermique pour un régime transitoire.....	47
II.6 - Expression des différents coefficients d'échange thermique.....	49
II.6.1 - Echange par convection.....	49

II.6.1.1 - Echange convectif entre la masse d'eau et le bac absorbant.....	49
II.6.1.2 - Echange convectif entre la saumure et la vitre.....	50
II.6.1.3 - Echange convective entre la vitre et le milieu ambiant.....	51
II.6.2 - Echange par rayonnement.....	51
II.6.2.1 - Echange par rayonnement entre la saumure et la vitre.....	51
II.6.2.2 - Echange par rayonnement entre la vitre et l'extérieur.....	52
II.6.3 - Echange pendant le changement de phase	52
II.7 - Treatment informatique.....	53
II.7.1 - Principe de la simulation.....	53
II.7.2 - Resolution numirique.....	53
II.7.3 - Programme.....	53
II.7.4 - Organigramme.....	55

Chapitre III Réalisation d'un distillateur à cascade

III.1 - Conception du distillateur solaire a cascade	59
III.1.2 - Bac absorbant.....	59
III.1.2 - Couverture verrière (verre).....	59
III.1.3 - L'isolation thermique.....	60
III.2 - Composants standards acheté.....	61
III.3 - Réalisation des composants du distillateur solaire.....	62
III.3.1 - Réalisation du bac absorbant.....	62
III.3.2 - Montage.....	63
III.4- Essais.....	60
III.5 - Traitement de l'eau distillait.....	65
III.6 - Estimation du cout du distillateur	66
III.6.1 - Calcul la rentabilité du projet	66

Chapitre IV Résultats et discussions

IV.1- Résultats théoriques.....	70
IV.1.1- Introduction	70
IV.1.2 - Variation des puissances solaires absorbées	70

IV.1.3 - Variation des temperatures	71
IV .1.4 - Variation du rendement, de l'efficacité et de performance du distillateur	73
IV.1.5 - Variation des caractéristique thermophysique de la saumure.....	76
IV.1.5.1 - La chaleur spécifique	76
IV.1.5.2 - La conductivité ,la diffusivité thermique et le coefficient de dilatation thermique.	76
IV.1.5.3- Masse volumique ,chaleur latente ,et la viscosité	78
IV.1.5.4 - Effet de l'ecart de temùperature entre la saumure et la vitre	81
I V.2 - Résulttas experimental	81
IV.2.1 - Variation de la température ambiante	82
IV.2.2 - Quantité d'eau distillait.....	82
IV.2.3 - Evolution de la production en fonction de la température ambiante.....	84
IV.2.4- Résultats des essais de traitement de l'eau âpres la distillation:.....	85
IV.3 - Comparaison entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux	85
Conclusion et recommandation.....	87
Annexe.....	89
Références bibliographiques	111

Nomenclature

	Désignation	Unité
A_i	Surface du corps i	M^2
a	Diffusivité thermique du corps i	M^2/S
C_{pi}	Chaleur massique à pression constante du corps indice i	$J/Kg. ^\circ C$
e_i	Epaisseur du corps indice i	M
g	Accélération de la pesanteur	M^2/S^2
h^c_{i-j}	Coefficient d'échange thermique par convection entre les surfaces matérielles indices i et j	$W/M^2.^\circ C$
h^r_{i-j}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre les Surfaces matérielles indices i et j	$W/M^2.^\circ C$
h^{ev}_{i-j}	Coefficient d'échange thermique par évaporation entre les surfaces matérielles indices i et j	$W/M^2. ^\circ C$
U	Coefficient global des pertes thermiques	$W/M^2. K$
I_g	Rayonnement globale incident	W/M^2
L_v	Chaleur latente de vaporisation	Kj/Kg
M_i	Masse du corps d'indice i	Kg/s
P^g_v	Pression de la vapeur d'eau à la température du vitrage	Pa
P^w_v	Pression de la vapeur d'eau à la température de la saumure	Pa
P_i	Puissance solaire absorbé par le corps d'indice i	W/M^2
q^c_{i-j}	Flux de chaleur échangé par convection entre la surface matérielle indices i et j	W
q^r_{i-j}	Flux de chaleur échangé par rayonnement entre les surfaces matérielle indices i et j	W
q^{ev}_{i-j}	Flux de chaleur échangé par évaporation entre les surfaces matérielles indices i et j	W
T_i	Température du corps d'indice i	$^\circ C$

V	Vitesse du vent	M/S
VAC	Valeur actualisée nette	
INV	Investissement initial net	
VA	Valeur actuelle d'une variable (gain ou dépense)	

Indices

a	Air ambiant
b	Bac absorbant
c	Ciel
g	Vitrage (glass)
w	Eau (water)

Lettres grecques	Désignation	Unité
α	Coefficient d'absorption	
β	Inclinaison de la vitre	
ε	Emissivité	
η	Efficacité	%
λ	Conductivité thermique	W/M.°C
μ	Viscosité dynamique	Kg/M.S
ν	Viscosité cinématique	M ² /S
ρ	Masse volumique	Kg/M ³
τ	Coefficient de transmission	

Introduction

Introduction

Sur le plan mondial, la demande de l'eau potable de bonne qualité est de plus en plus forte, en effet, la population augmente rapidement et les besoins en eau de l'industrie et de l'agriculture sont de plus en plus élevés.

En Algérie le problème d'approvisionnement en eau potable est déjà posé, d'abord il faut mettre des mécanismes pour diminuer le gaspillage et les fuites d'eau, car cette substance reste insuffisante. L'une des solutions est la production de l'eau douce à partir de l'eau salée.

Néanmoins, le dessalement nécessite une énergie dont le coût est important, pour ce la des projets dans le domaine de l'énergie solaire ont montré depuis 1872, que la distillation solaire est économiquement la plus compétitive lorsque la demande en eau douce n'est pas trop grande.

Par sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du Bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire Algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays.

Plusieurs types de configurations de distillateurs solaires ont été construits et essayés à travers le monde. Dans le même temps beaucoup de chercheurs ont proposé des modèles mathématiques pour décrire les transferts de chaleur et de matière dans les distillateurs solaires.

Pour réaliser ce travail nous avons pu nous appuyer sur nombreuses études théoriques et expérimentales dans le domaine de la distillation solaire à simple effet (distillateur solaire A cascade). Ainsi, le choix de la simulation numérique comme outil d'étude a été motivé par Les résultats présentés dans les différentes études. Le distillateur solaire à cascade développé repose sur une géométrie simple à réaliser avec un coût minimum.

Ce travail de modélisation, de réalisation, de validation, et d'exploitation du distillateur solaire à cascade se traduit par une bibliographie exhaustive relatée au premier chapitre.

Nous avons présentés au deuxième chapitre une étude théorique sur les distillateurs solaires, le principe de fonctionnement du distillateur solaire à cascade et les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système, les expressions des différents coefficients intervenant dans ce système d'équations ensuite la résolution numérique applicable.

Au troisième chapitre nous avons présentés la réalisation du distillateur solaire à cascade et l'étude expérimentale qui consiste à observer les évolutions (température, production).

Le quatrième chapitre est consacré à l'exploitation des résultats expérimentaux et numériques.

La conclusion générale de ce mémoire reprend les principaux résultats de nos travaux de recherche, ainsi que les remarques générales à l'égard de ceux-ci, des perspectives sont également présentées tant au niveau des développements à venir sur ce travail qu'au niveau des voies ouvertes par l'usage de ce dernier.

Enfin, la partie annexe comprend notamment, les différents nombre adimensionnels, les propriétés thermophysique de l'eau et du mélange air-vapeur la discrétisation des équations de transferts thermique et la méthode de résolution numérique et les graphes du mélange air-vapeur à l'intérieur du distillateur.

CHAPITRE I
ETUBE BILOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1- Gisement solaire:

I.1.1 - Constitution physique du soleil:

Le soleil est une sphère gazeuse composée d'Hydrogène (74 % de la masse ou 92,1 % du volume) et d'Hélium (24 % de la masse ou 7,8 % du volume). L'hydrogène se transforme en hélium par fusion nucléaire, chaque seconde 700 milliards (7 1011) de kilogrammes d'hydrogène se transforme en 695.7 milliards de kilogrammes d'hélium. La différence -4.3 milliards de kilogrammes se transforment en énergie $-38.7 \cdot 10^{25}$ joules, c'est équivalent à 26 mille milliards de fois la consommation énergétique mondiale dans le même temps. Avec un diamètre de 1391000 km, le Soleil se trouve à une distance moyenne de 149 000 km par rapport à la Terre. A cause de l'ellipticité de l'orbite terrestre, la distance minimale se situe vers le 15 janvier, et la maximal vers la fin juin [1].

Le Soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales [1]

- 1- **L'intérieur:** où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire et qui est inaccessible aux Investigations, car le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches extérieures. La température atteint plusieurs millions et la pression un milliard d'atmosphère.
- 2- **La photosphère:** l'épaisseur est d'environ 300 km qui est responsable de la presque totalité du rayonnement solaire que nous recevons.
- 3- **Chromosphère et couronne solaire:** où la matière est très diluée, fait qui explique que bien que la température y soit très élevée (1 million de degrés) le rayonnement émis est très faible.

I.1.2 - La sphère céleste:

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle même comme c'est indiqué sur la figure I.1 [1,2].

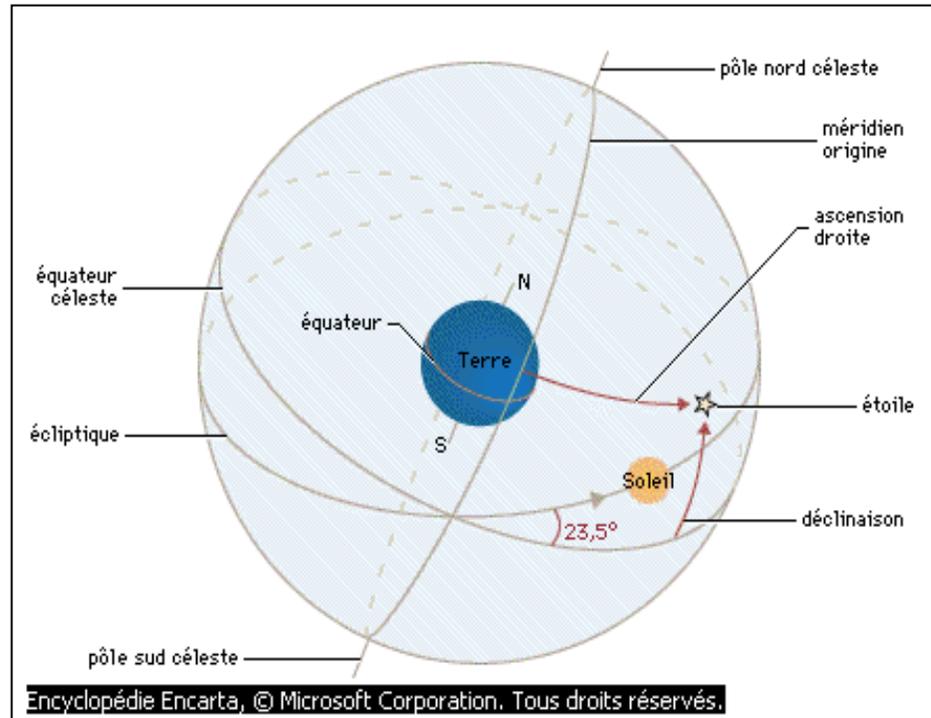
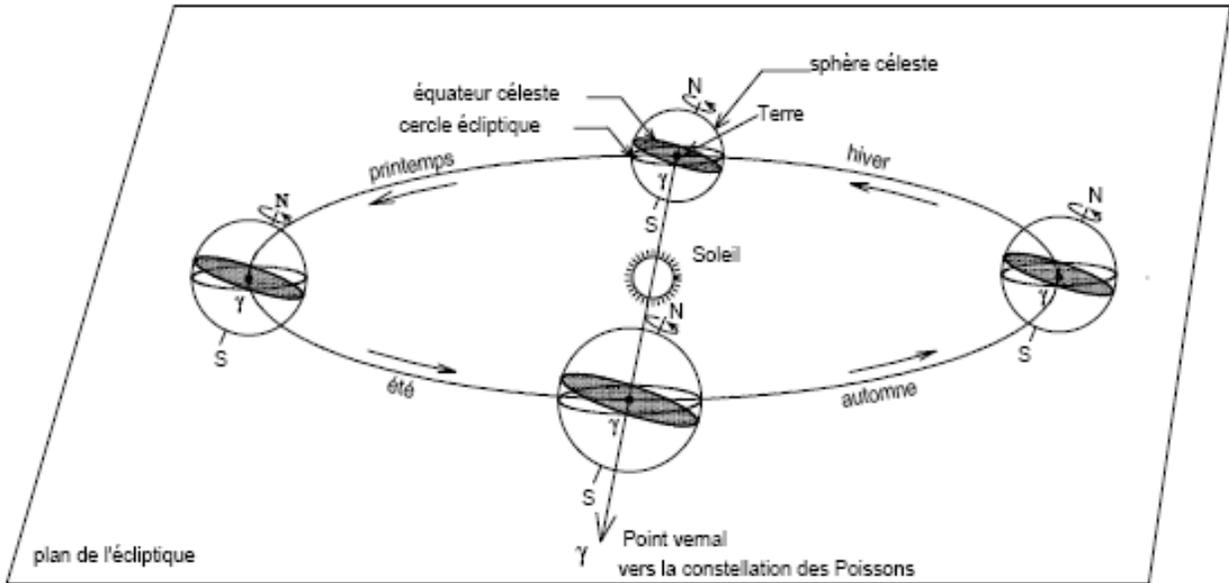


Figure I.1 La sphère céleste

I.1.3 - Mouvements apparents du soleil sur la sphère céleste:

La figure ci-dessous représente le mouvement annuel de la Terre autour du Soleil dans un plan appelé **plan écliptique**. Le nom d'écliptique provient du fait que la lune doit être dans ce plan pour qu'une éclipse se produise [4].

Ce mouvement annuel de la Terre donne l'impression que le soleil se déplace, au cours de l'année, sur un grand cercle de la sphère céleste appelé **cercle écliptique**: le cercle écliptique coupe le cercle équatorial en deux points γ et γ' ; le point γ , appelé point vernal, indique la direction dans laquelle un observateur terrestre verra le soleil le jour de **l'équinoxe de printemps**.



printemps 92.81 j - été 93.62 j - automne 89.82 j - hiver 89.00 j

Figure I.2 Mouvement apparent du soleil sur la sphère céleste (source [4])

L'axe des pôles terrestres P et P' fait avec l'axe des pôles Q et Q' de l'écliptique un angle ε dont la valeur est égale à $23^{\circ}27'$.

Cette révolution fait varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices (voire figure I.2) [8]

- Equinoxe de printemps correspond au 21 Mars,
- Equinoxe d'automne correspond au 23 Septembre,
- Solstice d'été correspond au 22 Juin,
- Solstice d'hiver correspond au 22 Décembre.

La distance entre le soleil et la terre peut être calculé par la relation suivante :

$$d(n) = 1 - 0.017 \times \cos\left[\frac{360}{365}(n - 2)\right] \quad (\text{I.1})$$

n : est le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1^{er} janvier.

La rotation de la Terre autour de l'axe des pôles d'Ouest en Est (fois/jour), s'effectue en une journée sidérale de 23 heures, 56 minutes, 4 secondes. Cette rotation produit l'alternance du jour et de la nuit.

1.1.4 - Les coordonnées célestes:

1.1.4.1 - Les coordonnées géographiques:

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la Terre (figure I.3)

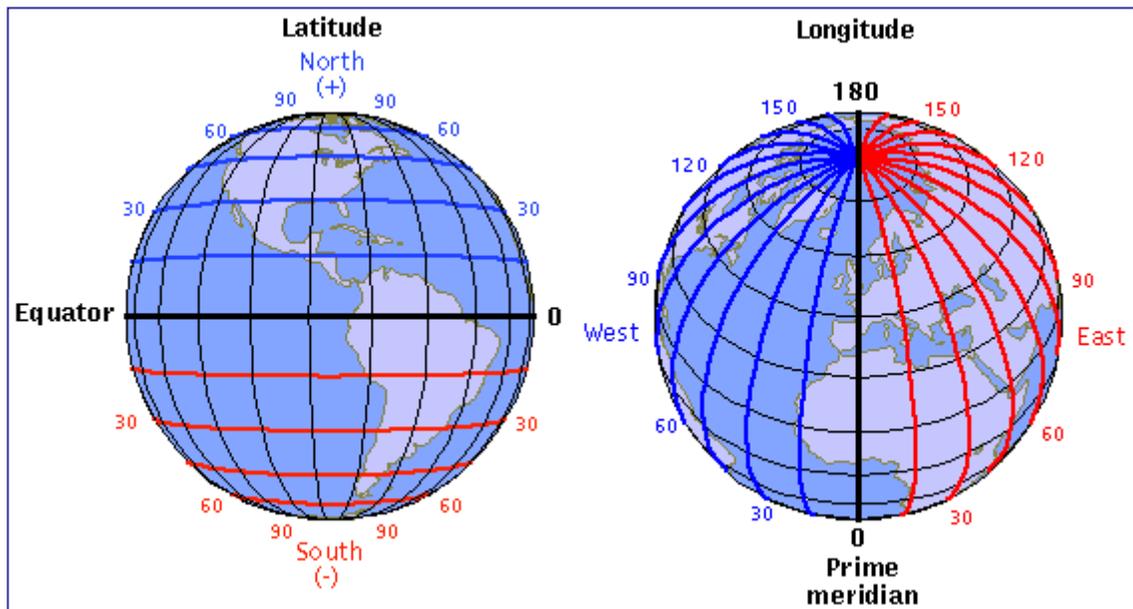


Figure 1.3 Les coordonnées géographiques (source [36])

- **La longitude L** , est comptée positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest, à partir du méridien **Greenwich**.
- **La latitude Φ** , permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère Nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère Sud.

1.1.4.2 - Les coordonnées horaires:

- **La déclinaison δ** , c'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^\circ27'$ à $-23^\circ27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{284 + N}{365} \times 360 \right] \text{ [Degré]} \quad (\text{I.2})$$

Ou:

N : le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1^{er} Janvier.

- **L'angle horaire ω** : il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° (Figure I.4).

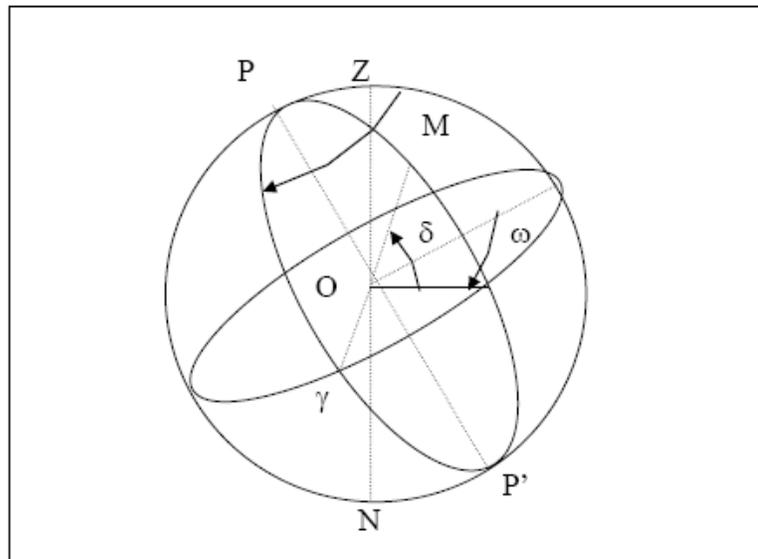


Figure I.4 - Les coordonnées horaires (source [2])

I.1.4.3 - Les coordonnées horizontales:

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

- **L'azimut a** , ou l'angle que fait la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest.

- **La hauteur h** , ou 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 quelquefois **distance zénithale** le complément de l'angle h : $z + h = 90^\circ$ (figure I.5).

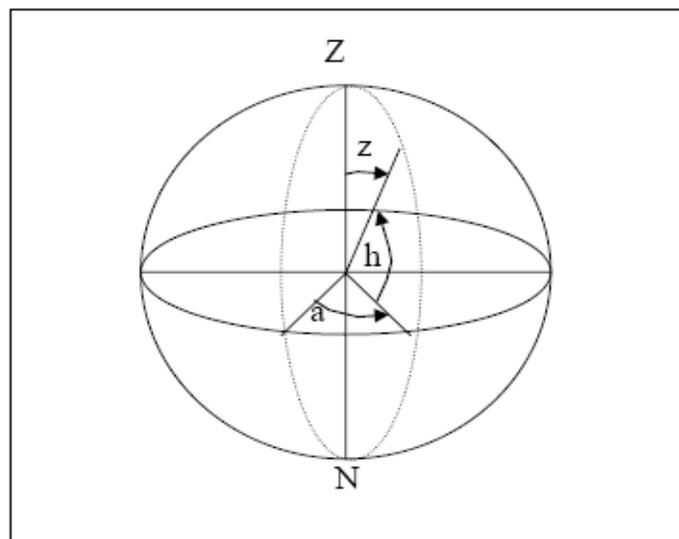


Figure I.5 - Les coordonnées horizontales (source [2])

L'équation de passage des coordonnées horizontales en coordonnées horaires est la suivante :

$$\sin (a) \times \cos (h) = \cos (\delta) \times \sin (\omega)$$

$$\cos (a) \times \cos (h) = \cos (\delta) \times \cos (\omega) \times \sin (\Phi) - \cos (\Phi) \times \sin (\delta)$$

$$\sin (h) = \cos (\Phi) \times \cos (\delta) \times \cos (\omega) + \sin (\Phi) \times \sin (\delta)$$

I.1.5 - Les temps solaires: [1],[2]

II.1.5.1 - Le temps solaire vrai (T.S.V):

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil ω . Il est donné sous la forme suivante :

$$\text{TSV} = 12 + \omega/15 \quad (\text{I.3})$$

ω en degré.

Si $\omega = 0$, TSV = 12h.00

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

I.1.5.2 - Le temps solaire moyen (T.S.M):

Il est donné par la relation:

$$\text{ET} = \text{TSV} - \text{TSM} \quad (\text{I.4})$$

Avec:

Et, l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$\text{Et} = 9.87 \sin (2N') - 7.53 \cos (N') - 1.5 \sin (N') \text{ [min]} \quad (\text{I.5})$$

$$N' = (N - 81) \times 360/365$$

Où : N est le numéro du jour dans l'année.

I.1.5.3 - Le temps universel (T.U):

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine)

$$\text{TU} = \text{TSM} - L/15 \quad (\text{I.6})$$

Où : L : est la longitude.

$L > 0$, pour les villes situées à l'Est de Greenwich

$L < 0$, pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich

TU = TSM, pour le méridien de Greenwich

I.1.5.4 - Le temps légal (TL):

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.7)$$

Où :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

I.1.5.5 - Direction des rayons solaires:

On considère un plan quelconque caractérisé par deux angles:

α : l'angle entre le méridien local et la normale au plan.

$\alpha = 0$, le plan est orienté vers le Sud;

$\alpha = \pi$, le plan est orienté vers le Nord;

$\alpha = -\pi/2$, le plan est orienté vers l'Est;

$\alpha = \pi/2$, le plan est orienté vers l'Ouest;

γ = l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré.

$\gamma = 0$, le plan est horizontal.

$\gamma = \pi/2$, le plan est vertical

Soit :

N : le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires;

n : le vecteur unitaire porté par la normale à la surface ;

i : l'angle d'incidence (n, N) (figure I.6)

$$\begin{matrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{n} \end{matrix} \begin{cases} \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) \\ \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{cases} \quad \begin{matrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{N} \end{matrix} \begin{cases} \sin(a) \times \cos(h) \\ \cos(a) \times \cos(h) \\ \sin(h) \end{cases}$$

$$\mathbf{N} \times \mathbf{n} = \|\mathbf{N}\| \times \|\mathbf{n}\| \times \cos(i) = \cos(i)$$

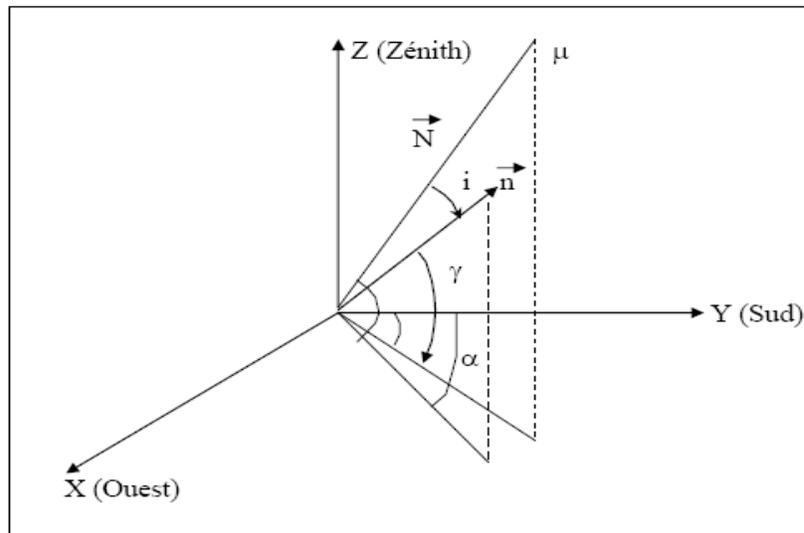


Figure 1.6 : représentation des vecteurs unitaires (source [2])

$$\begin{aligned} \vec{N} \times \vec{n} &= \sin(a) \times \cos(h) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) \\ &+ \cos(a) \times \cos(h) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + \sin(h) \times \sin(\gamma) = \cos(i) \end{aligned}$$

Donc: $\cos(i) = \cos(h) \times \cos(\gamma) \times \cos(a - \alpha) + \sin(h) \times \sin(\gamma)$

Formule de "cos (i)" en coordonnées horaires

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\cos(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta)) \times \sin(\gamma).$$

Cas particuliers

• Surfaces horizontales : $\gamma = \pi/2$

$$\cos(i) = \cos(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta)$$

• Surfaces verticales: $\gamma = 0$

- Surfaces verticales orientées vers le Sud: $\alpha = 0$

$$\cos(i) = \sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)$$

- Surfaces verticales orientées vers le Nord: $\alpha = \pi$

$$\cos(i) = \cos(\Phi) \times \sin(\delta) - \sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta)$$

- Surfaces verticales orientées vers l'Est : $\alpha = -\pi/2$

$$\cos(i) = -\cos(\delta) \times \sin(\omega)$$

- Surfaces verticales orientées vers l'Ouest: $\alpha = +\pi/2$

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega)$$

Surface orientée vers le Sud et inclinée d'un angle β par rapport à l'horizontale:

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \cos(\Phi - \beta) + \sin(\delta) \times \sin(\Phi - \beta)$$

I.I.6 - La constante solaire:

Le flux solaire moyen sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons, placé en dehors de l'atmosphère terrestre, est appelé constante solaire **I_c** [2].

La valeur moyenne actuellement retenue est : $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$

Cette valeur est la moyenne sur l'année du flux extra terrestre. En effet, la trajectoire de la terre autour du soleil étant elliptique, il s'en suit une variation saisonnière de $\pm 1.6 \%$ de la distance Terre Soleil et donc une variation de ce flux. La relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire :

$$I_c = I_0 \times [1 + 0.0034 \times \cos(30 \times (m - 1) + n)] \quad \text{(I.8)}$$

Ou:

$$I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$$

m : est le numéro du mois dans l'année;

n : est le numéro du jour dans le mois.

I.1.7 - Structure et composition de l'atmosphère:

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, ce sont:

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

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de:

- CO₂ (0,03%)
- Vapeur d'eau: en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.
- Ozone O₃ située entre 10 et 30 km d'altitude.
- Aérosols: grains de sable, poussières, fumées...

On trouvera sur la **figure 1.7** la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon longueur d'onde.

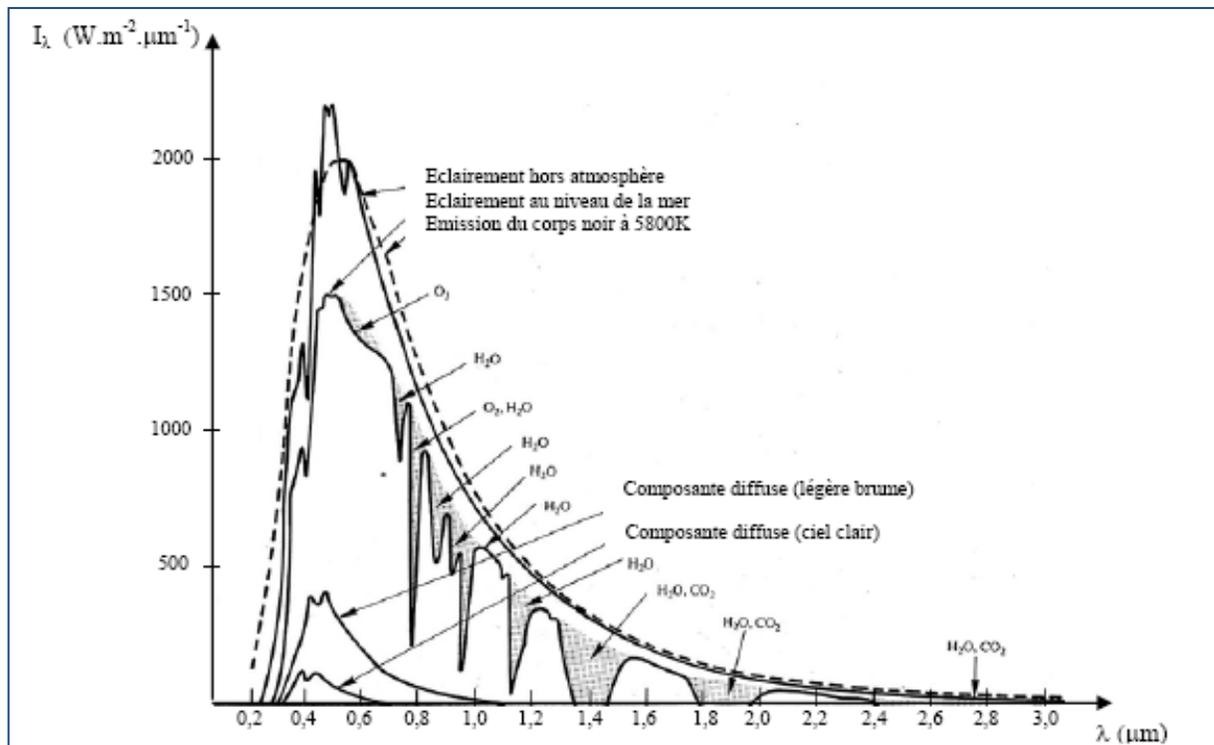


Figure I.7 Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre (source [23])

Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO_2 , O_3 , H_2O) émettent vers la Terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes :

- Vers $14,7 \mu\text{m}$ pour le CO_2 .
- Entre 5 et $7 \mu\text{m}$ et entre 14 et $20 \mu\text{m}$ pour la vapeur d'eau.
- Vers $9,6 \mu\text{m}$ pour O_3 .

I.1.8 - Masse d'air:

Par convection une masse d'air unité correspond au trajet d'un rayon solaire selon la verticale du lieu, elle est définie par [1], [8]

$$m = \frac{1}{\sin(h)} \quad (1.9)$$

Ou h : hauteur angulaire solaire

$$m = \frac{1}{\sin(h) + 0.15(3.885 + h)^{-1.253}} \quad (1.10)$$

$h \leq 10^\circ$ h en degré

I.1.9 - Estimation du flux solaire reçu sur la vitre du distillateur:

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 [2].

Au niveau du sol et à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse, l'autre partie est directe. On écrit alors que le rayonnement global (I_G) est la somme du rayonnement direct (I_D) et du rayonnement diffus (I_d) ;

$$I_G = I_D + I_d \quad (\text{I.11})$$

I.1.9.1 - Calcul du flux solaire reçu sur la vitre:

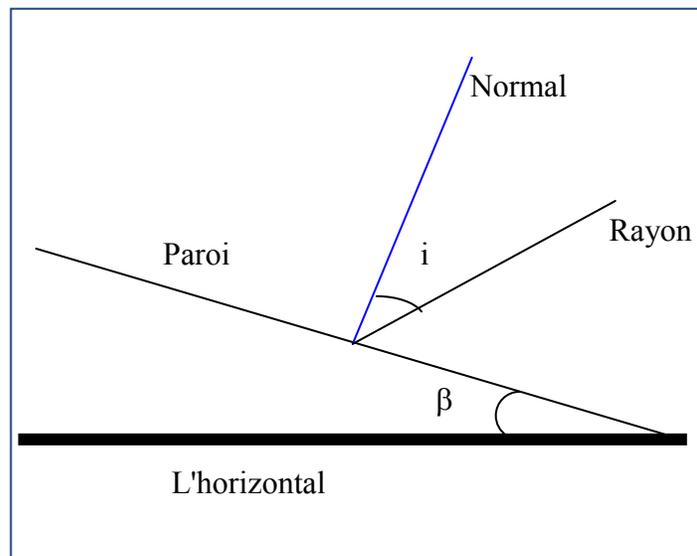


Figure I.8 Représentation des angles (i, β)

Il est donné par la relation suivante:

$$I_D = I_C \times a \times \exp [-b / \sin (h)] \times \cos (i) \quad (\text{I.12})$$

Avec:

$$I_C = I_0 \times [1 + 0.0034 \times \cos (30 \times (m - 1) + n)] \quad (\text{I.13})$$

a et b étant les coefficients de trouble du ciel dont les valeurs sont confinées dans le tableau ci-dessous.

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

Tableau I.1 : Valeurs de "a" et de "b"(pour les formules de Hottel et Liu et Jordan) (source [2])

I.1.9.2 - Calcul du flux diffus reçu sur la vitre:

Le flux diffus reçu par la vitre provient du flux diffus émis par la voûte céleste (φ_1) et de celui qui est émis par le sol (φ_2).

Donc:

$$I_d = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (\text{I.14})$$

φ_1 et φ_2 sont donnés par les relations suivantes:

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times (1 + \cos(\beta)) / 2 \quad (\text{I.15})$$

$$\varphi_2 = \rho \times (I_0 \times \sin(h) + \varphi_0) \times (1 - \cos(\beta)) / 2 \quad (\text{I.16})$$

$$\varphi_0 = I_c \times \sin(h) \times [0.271 - 0.2939 \times \exp(-b / \sin(h))] \quad (\text{I.17})$$

ρ : l'albédo du sol où les valeurs de ce coefficient sont données ci-dessous, suivant la nature du sol:

Nature du sol	Neige fraîche	Neige ancienne	Sol rocheux	Sol cultivé	Forêt	Etendue
Valeurs ρ	0.8-0.9	0.5-0.7	0.15-0.25	0.07-0.14	0.06-0.20	0.05

Tableau I.2: Valeurs différents de l'albédo du sol " ρ " (source [2])

I.1.9.3 - Autres formules d'estimation du flux solaire:**Formules de Perrin de Brichambaut:**

$$I_G = I_D + I_d$$

$$I_D = a \sin(h) \exp\left(\frac{-1}{c \sin(h+2)}\right) \quad (1.18)$$

$$I_d = b (\sin(h))^{0.4} \quad (1.19)$$

Avec

Ciel	a	b	c
Très pur	1300	87	6
Moyen	1230	125	4
Pollué	1200	187	2.5

Tableau (1.3) Valeurs de a, b, c (pour les formules de Perrin de Brichambaut) (**source 8**)

Les puissances sont exprimées en $W.M^{-2}$ et les angles en degrés.

Formules globales de Perrin de Brichambaut:

Le global est obtenu directement sous la forme:

$$I_G = a (\sin(h))^b \quad (1.20)$$

Avec

Ciel	a	b
Très pur	1150	1.15
Moyen	1080	1.22
pollué	990	1.25

Tableau (1.4) Valeur de a et b (pour formule globale de Perrin de Brichambaut) (**source22**)

I.2 - Distillateur solaire

I.2.1 - Généralités:

- L'évolution des conditions climatiques et l'augmentation de la population amènent de nombreuses régions du monde à se trouver en manque d'eau. Or au voisinage de plusieurs régions, manquantes d'eau potable, existe des sources d'eaux saumâtres contenant un certain pourcentage de sel, si ce n'est l'eau de mer [5].
- En Algérie depuis le milieu des années 1990, la situation s'est améliorée et l'alimentation en eau potable qui était peu régulière, est aujourd'hui mieux conduite [10].

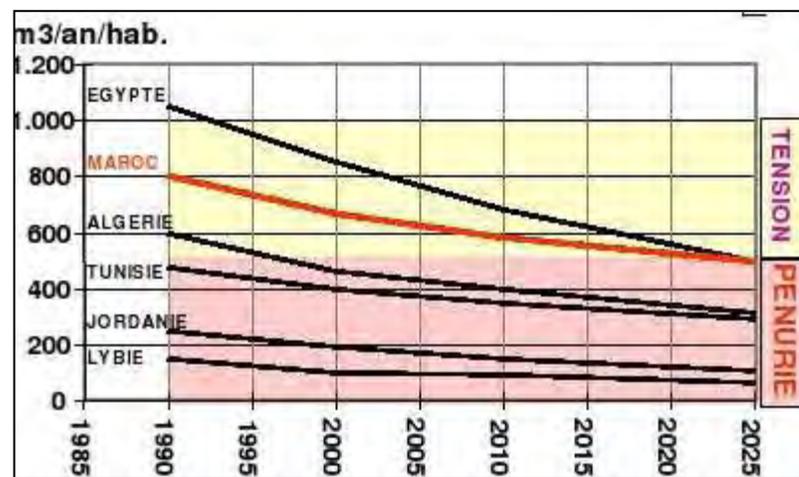


Figure I.9 : Estimation pour les divers pays du Maghreb des besoins En eau par habitant et de leur évolution (source [9])

Le dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer par distillation solaire est une opération très utilisée dans les régions arides, à l'échelle d'un petit village ou même d'une famille.

Plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés, les plus répandus sont ceux du type à effet de serre: ils présentent l'avantage d'être simples, faciles à réaliser, de conception rustique, et peu coûteux. Mais ils présentent le gros inconvénient d'une production très faible d'eau potable (de l'ordre de 2,5 à 3 litres par m² par jour), [5].

1.2.2 - Définition :

Le principe de fonctionnement d'un distillateur solaire est le suivant (**figure I.10**)

- Le rayonnement solaire chauffe l'eau salée qui se trouve dans le distillateur.
- L'eau salée s'évapore.
- Cette vapeur se transporte par convection naturelle vers le toit du distillateur (verre)
- Elle se condense sur le verre et s'écoule suivant un film mince.

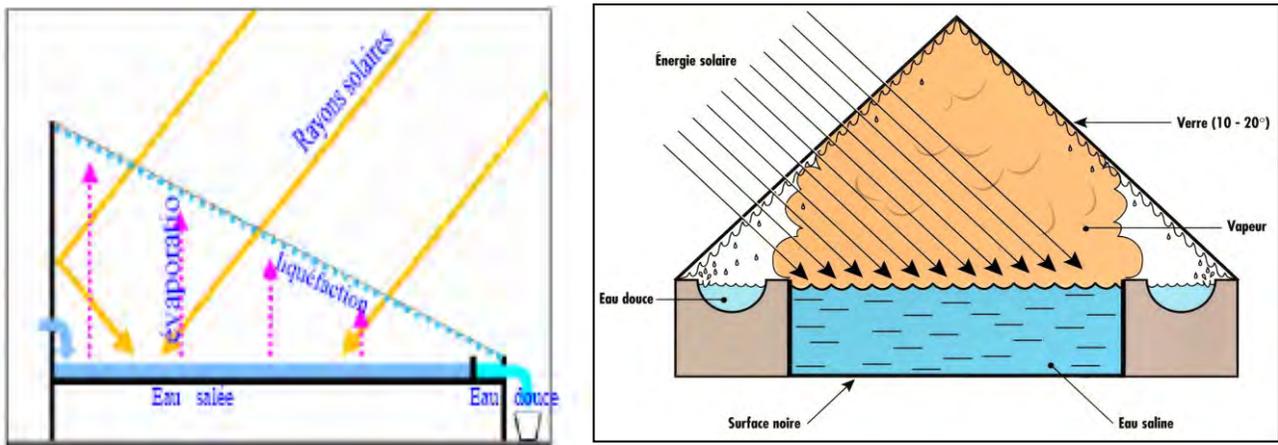


Figure 1.10 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire simple (Source [5], [11])

1.2.3 -Types de distillation solaire:

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

- Distillation solaire à effet de serre.
- Distillation solaire à multiples effets.

1.2.3.1 - Distillation solaire à effet de serre:

Soit une serre fermée et exposée au soleil à l'intérieur de laquelle se trouve une lame d'eau de mer ou d'eau saumâtre de quelques centimètres d'épaisseur. L'air à l'intérieur de la serre est surchauffé et saturé de vapeur d'eau (douce) qui se condense au contact de la paroi en verre relativement froide. Les gouttes d'eau douce peuvent être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière par exemple (Figure I.11).

1.2.3.1.1-Types de conception du distillateur solaire à effet de serre et leurs performances:

Les distillateurs solaires simples (bassin simple) ont été très étudiés et leur comportement est bien compris. L'efficacité de 25% est typique. La productivité journalière en fonction de l'irradiation solaire est plus grande en soirée où l'eau à distiller est encore chaude quand les températures extérieures chutent [5].

Le cas d'un distillateur d'urgence:

Pour fournir l'eau potable de secours sur la terre, un distillateur très simple peut être fait. Il se sert d'une couverture en plastique, une cuvette ou un seau, et un caillou (Figure 1-11).

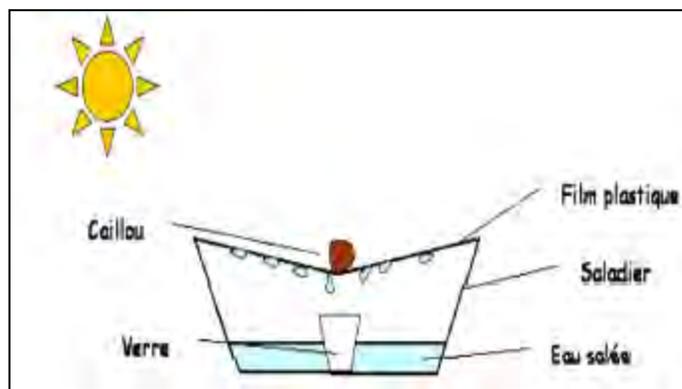


Figure 1.11 Distillateur solaire d'urgence (Source [5]).

Distillateurs à pente unique:

Le distillateur à pente unique à un capteur unique incliné d'un angle (β). (Figure I.12)



Figure I.12 Distillateur à pente unique (source [15])

Distillateur à double pentes:

C'est un distillateur à double capteurs où chacun d'eux est incliné d'angle (β); son avantage est qu'il expose un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation (figure I.13)



Figure I.13 Distillateur à double pentes (source [15])

Distillateur sphérique à balayage:

Ce distillateur est constitué d'une sphère en plexiglas ou autres matériaux plastiques transparents reposants sur des supports, et d'un système mécanique de récupération de l'eau distillée par l'intermédiaire d'un essuie-glace entraîné par moteur électrique [1].

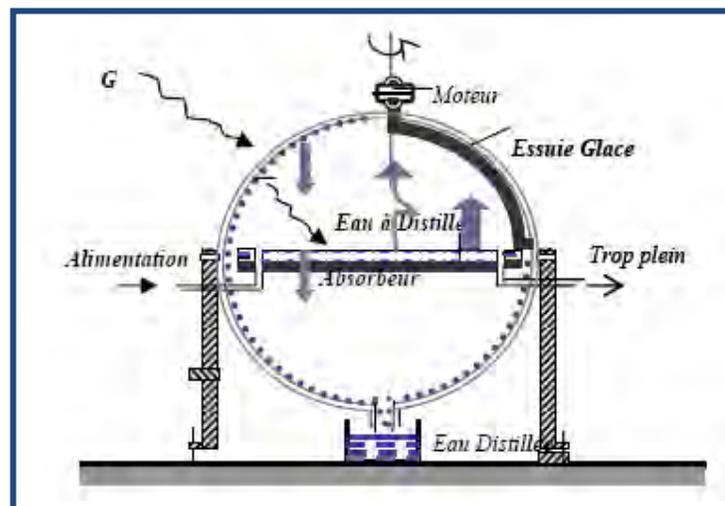


Figure I.14 Distillateur solaire sphérique à balayage (source [6])

Distillateur solaire incliné à cascades:

Cet appareil présente deux avantages: la lame d'eau est très faible et l'orientation par rapport au rayonnement incident se rapproche davantage de l'optimum. Un modèle de ce type, représenté à la **figure 1.15**, n'a été exécuté qu'en petites tailles. Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux [5].

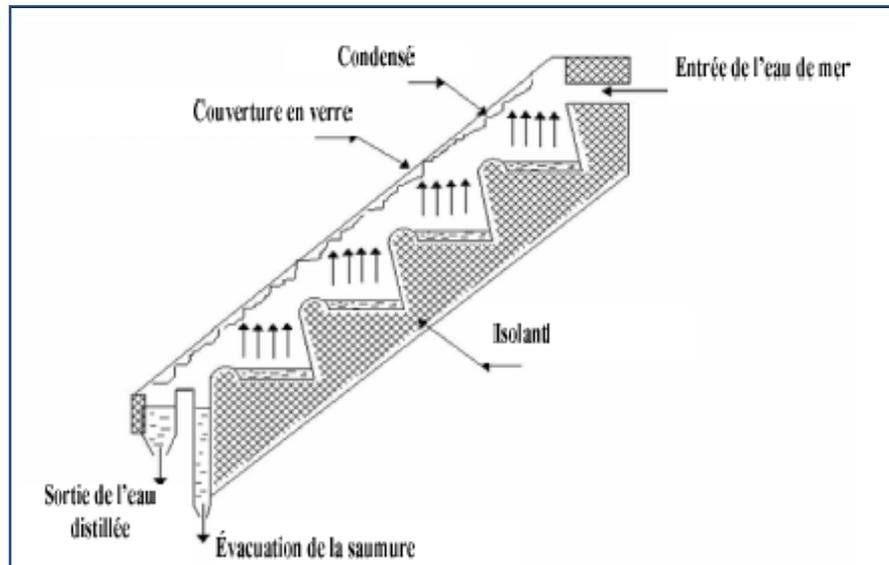


Figure 1.15 Distillateur solaire incliné à cascades (Source [5]).

Distillateur solaire incliné à mèche:

Dans un distillateur à mèche, l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture poreuse, absorbant les rayonnements (mèche). Deux avantages sont revendiqués sur les distillateurs de bassin. D'abord, la mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (réduisant la réflexion et présentant une grande surface efficace). En second lieu, moins d'eau d'alimentation est dans le distillateur à tout moment, donc l'eau est chauffée plus rapidement et à une température élevée [5].

Les distillateurs simples à mèche sont plus efficaces que les distillateurs à bassin et quelques conceptions sont prétendues coûter moins qu'un distillateur à bassin de même rendement. L'appareil incliné à mèche permet de maintenir à peu près constante l'épaisseur de la lame d'eau. Le modèle représenté sur la **figure 1.16** a été essayé pendant quelque temps d'une façon satisfaisante, mais il a été très difficile de maintenir une humidité sur les mèches sans points secs.

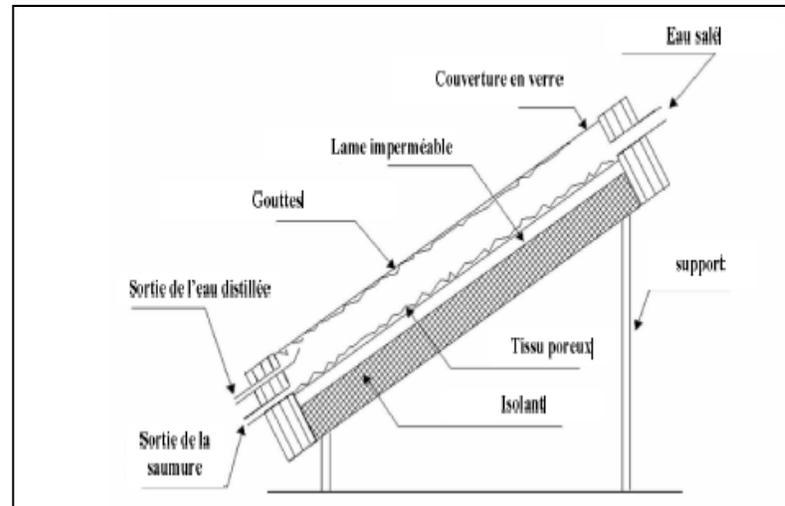


Figure 1.16 Distillateur solaire incliné à mèche (Source [5]).

Distillateur solaire à film capillaire:

Il se compose d'une très mince couche de textile à mailles fines, imbibée d'eau qui se maintient d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension inter-faciale, nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air.

Ce distillateur est composé des éléments suivants : le capteur – évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi [2].

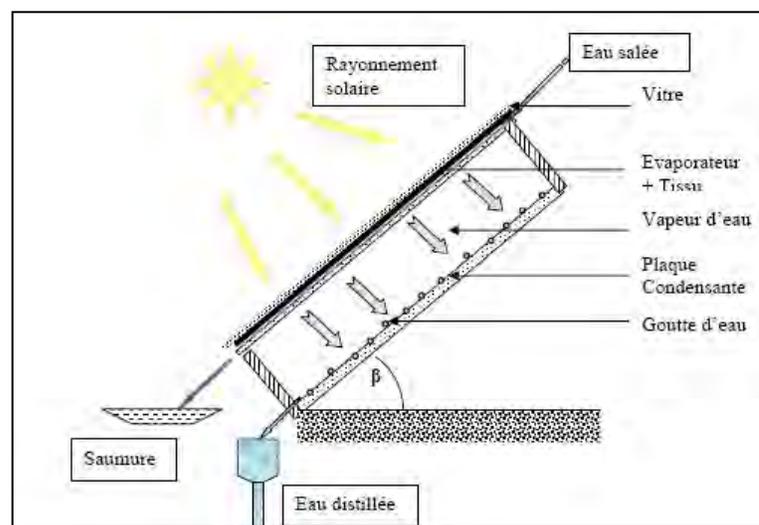


Figure I.17 Distillateur solaire à film capillaire (source [2])

1.2.3.2 - Distillation solaire à multiples effets:

Il est donc apparu absolument nécessaire d'améliorer la consommation spécifique de l'évaporateur à simple effet. Ceci a été obtenu grâce à la distillation à multiples effets. On sait en effet, que la température d'ébullition de l'eau varie avec la pression.

On peut donc utiliser la chaleur de condensation de la vapeur produite dans une première chambre d'évaporation pour faire fonctionner le faisceau de chauffe d'une seconde chambre à pression et température plus faibles, et ainsi de suite (Figure.18), [5].

Le nom de multiples effets a été donné à ce type d'appareils parce que la vapeur initiale (Vapeur de chaudière) accomplit plusieurs fois son effet.

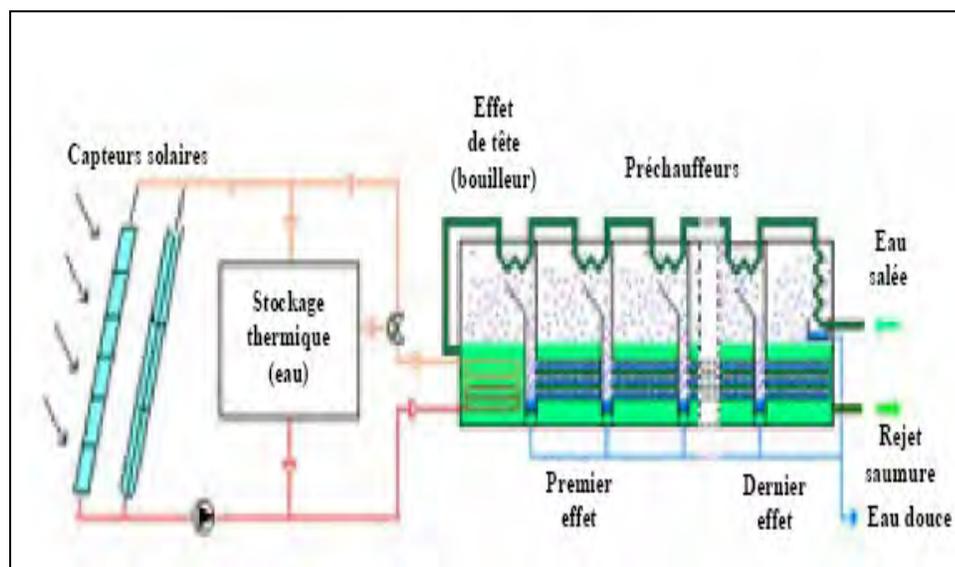


Figure 1.18 Principe de construction d'un distillateur à multiple effets (source [5])

1.2.3.3 - Autres techniques de dessalement de l'eau salée:

Technique de l'osmose inverse:

L'osmose inverse consiste à filtrer l'eau par son passage à travers une membrane semi-perméable d'une extrême finesse dont sont séparées deux solutions de concentrations différentes.

Elle consiste à placer de l'eau salée et de l'eau douce, séparée par une membrane semi-perméable dans un récipient comme (normalement c'est l'eau pure qui migre vers la solution concentrée appelé saumure), mais si on exerce une pression sur l'eau salée, le processus est inverse. Alors, elle est appelée osmose inverse, parmi les avantages de l'osmose inverse (figure.19)

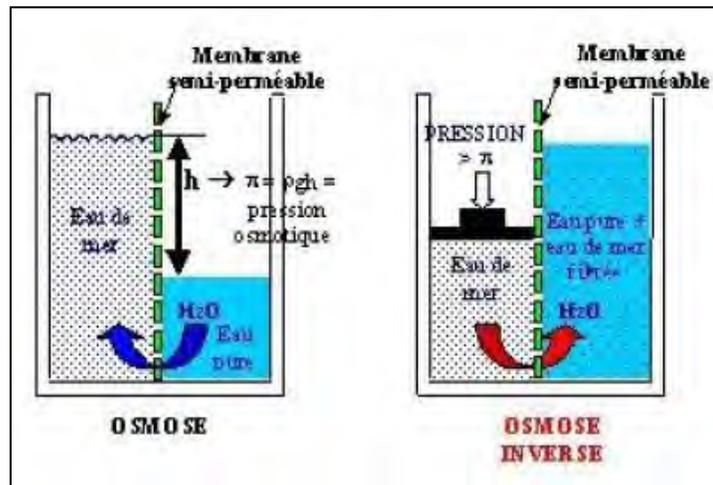


Figure I.19 Principe de l'osmose inverse (source [12])

Technique de l'électrodialyse

Le principe de l'électrolyse est bien connu. Les ions d'un sel dissous dans l'eau, comme le chlore de sodium par exemple, déplacent sous l'action d'un champ électrique créé par deux électrodes trempant dans le liquide. Les ions positifs ou cations (par Na^+) sont attirés par l'électrode négative (ou cathode) tandis que les ions négatifs (Cl^-) sont par l'électrode positive.

Dans l'électrodialyse, on intercale alternativement des membranes filtrantes soit imperméables aux anions et perméables aux cations, soit imperméables aux cations et perméables aux anions. On obtient ainsi une série de compartiments à forte concentration de sels et d'autres à faible concentration. [12]

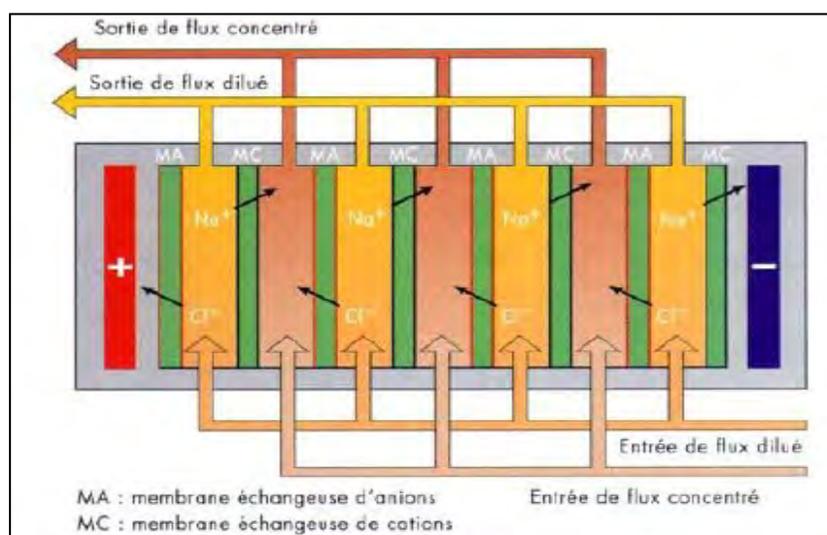


Figure I.20 Principe de fonctionnement de l'électrodialyse (source [12])

Dessalement par congélation:

Lorsqu'on fait geler de l'eau salée. Les cristaux qui se forment consistent en de la glace pratiquement pure, le sel étant chassé de l'eau lors de cristallisation forme une saumure à la surface du cristal. Ce processus a été mis au point aux Etats-Unis [8].

Technique de la distillation (flash):

Cette technique est illustrée par la **figure (I.21)**, où l'eau salée subit un préchauffage progressif lors de son passage à travers les différents condenseurs, puis un chauffage de 90°C par vapeur et entre dans une série de chambres de distillation où règne une faible pression (par rapport à la pression atmosphérique) [8]

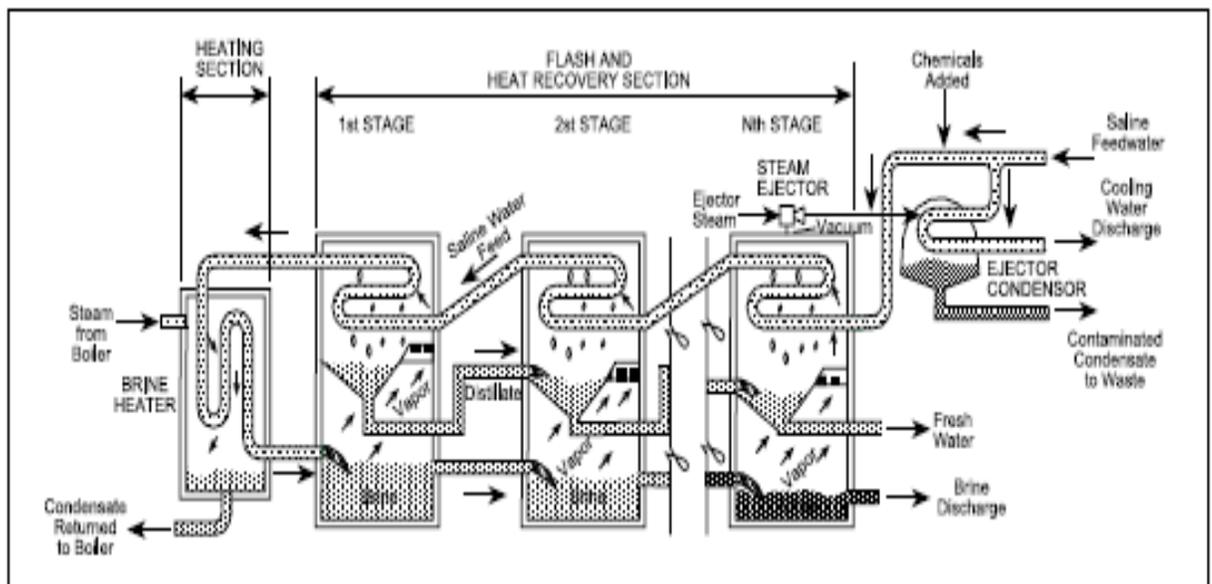


Figure I.21 Principe de fonctionnement de la distillation < flash > (source [13])

Technique de la distillation à multiples effets:

Ce système est constitué de plusieurs évaporateurs (cellules) placés en série, seule la première évaporation est alimentée par la vapeur provenant d'une chaudière à vapeur. Le premier étage où la vapeur produite, sert pour le chauffage du second étage, elle se condense ... etc. Le processus continue au dernier étage (voir **figure I. 22**) [8].

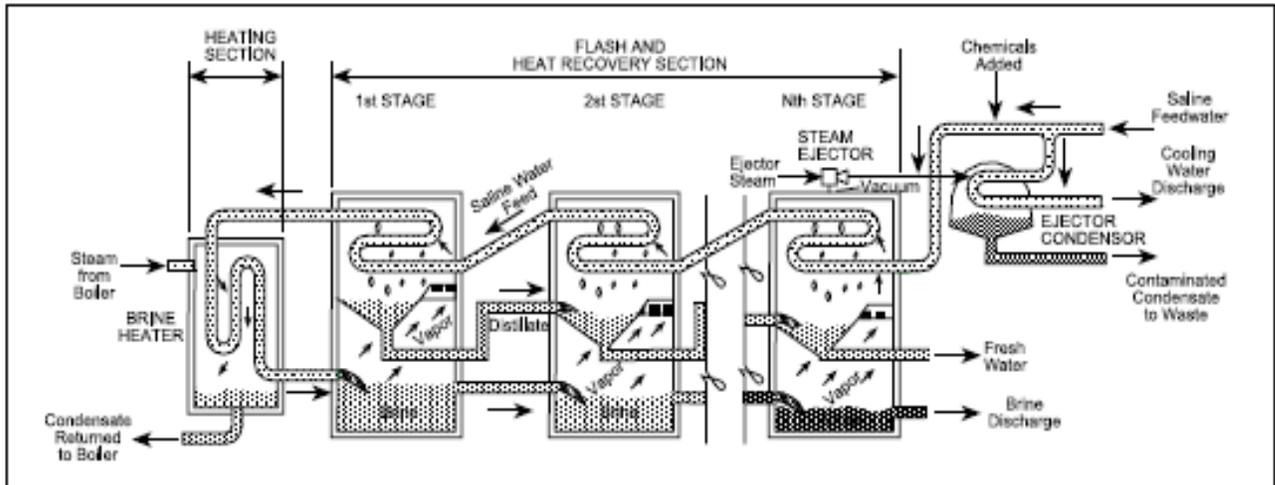


Figure I.22 Principes de fonctionnement de la distillation à multiples effets (source [13])

1.2.4 - Paramètre influant sur le système de distillation solaire:

On doit tenir compte de deux types de paramètre influant le système de distillation pour un site donné [16]

- Les paramètres externes par rapport au système de distillation.
- Les paramètres internes par rapport au système de distillation.

1.2.4.1 - Paramètres externes:

Ce sont des paramètres qui influent sur le bon fonctionnement et le rendement du distillateur, ces paramètres sont liés au site [16].

a) Intensité du rayonnement solaire:

C'est le facteur essentiel dans cette étude. C'est une énergie rayonnante de courte longueur d'onde (0.17 à 4 μm) [2].

Le maximum d'intensité est obtenu pour la longueur d'onde 0.47 μm dans le spectre visible. L'intensité globale du rayonnement solaire arrivant aux confins de l'atmosphère sur une surface perpendiculaire est constante, est égale à 1.35KW/m². Cependant, l'énergie arrivant au voisinage de la surface terrestre est affaiblie par l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère [2].

Le coefficient de transmission est assez constant en cours d'année et se situe entre 0.7 et 0.9.

Plusieurs études montrent que l'irradiation globale reste le paramètre le plus influent sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire [5], [6], [14].

b) La vitesse du vent :

L'effet convectif sur la face de la vitre joue un rôle important sur le fonctionnement du système. Un anémomètre placé au voisinage de la vitre permet de préciser cet aspect du problème. Or d'après Duffie et Beckman, la vitesse du vent est liée au coefficient de transfert convectif entre la couverture et l'extérieur par l'expression : $H_{cla} = a + b.v^n$

Cette expression est souvent utilisée pour des modélisations de capteurs. Elle est relative à des plaques horizontales ou inclinées.

c) Température ambiante de l'air:

La valeur de cette température intervient pour la détermination des échanges thermiques entre la partie interne et le milieu extérieur.

d) Paramètres météorologiques:

L'humidité de l'air, la pluviométrie et l'intermittence des nuages doivent être prises en considération dans la mesure, où ces deux facteurs modifient le bilan thermique du distillateur.

e) Paramètres géographiques:

Tels que la longitude et la hauteur du soleil.

f) Nature de l'eau à traiter:

Choix du prétraitement, taux de conversion et rapport de performance, ainsi que la nature et la situation socio-économique du site: choix des matériaux, degré d'automatisation du système, infrastructure, main d'oeuvre [9,18].

1.2.4.2 - Paramètres internes:**a) Paramètre 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 où on distingue ;
 - Fonctionnement pendant la matinée → orientation Est,
 - Fonctionnement pendant l'après-midi → orientation Ouest,
 - Fonctionnement durant toute la journée → orientation Sud.
- **L'inclinaison**; elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année:
 - Fonctionnement estival → $\beta = \theta - 10^\circ$

- Fonctionnement hivernal $\rightarrow \beta = \theta + 20^\circ$
- Fonctionnement annuel $\rightarrow \beta = \theta + 10^\circ$

b) Paramètre de construction:

Couverture:

La couverture intervient essentiellement par : [5], [7]

- Sa nature,
- Sa mouillabilité par l'eau,
- Sa transparence au rayonnement solaire,
- Son opacité au rayonnement infrarouge des 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.

Une étude expérimentale de C.D.E.R. montre que le verre reste le plus adéquat malgré la production du distillateur en plexiglas (plexiglas = 2.63litre/jour, verre = 2.23litre /jour) vu que l'installation de ce dernier demande une maintenance plus fréquente (déformation de plexiglas, décollement des extrémités). [14]

Inclinaison:

Son inclinaison par rapport à l'horizontale, pour déterminer la quantité d'énergie solaire introduite dans le distillateur et pour minimiser la distance entre saumure et vitre, l'angle d'inclinaison doit faire l'objet d'un choix judicieux. L'inclinaison influe d'autre part sur les équations des bilans énergétiques des différents constituants du distillateur. Les expressions seront données dans le chapitre suivant [5], [7]

L'absorbeur :

Les testes menés par certains chercheur ont montre que la surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique ou en verre ordinaire). Le choix de la matière de la surface absorbante ou bac noir dépend de son inertie thermique, de la résistance à l'oxydation par l'eau et les dépôts minéraux [16]

La distance entre la surface 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 que la réduction de ce paramètre augmente le facteur de performance brut [5], [7]

c) 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 24 heures diminue lorsque l'épaisseur augmente. Des expériences ont montré que cette production suit la loi : [5], [7]

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

- 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: l'expérience faite dans le Sahara algérien 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 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.

Concentration du sel

La production du distillateur diminue quand la concentration augmente, le dépôt salin agit sur le pouvoir absorbant de la surface noire et fait chuter considérablement la production.

d) Paramètres optiques:

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

e) 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.

1.2.5 - Les caractéristiques de fonctionnement:

Un distillateur solaire est essentiellement caractérisé par les grandeurs suivantes [5], [7]

1.2.5.1- La production (le débit du distillat)

Qui est la quantité d'eau distillée journalière produite par de surface d'évaporation.

$$m_d = \frac{q_{ev}}{l_v} \quad (I.21)$$

1.2.5.2 - 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 [5], [7] :

$$\eta_g = \frac{q_{ev}}{G.A} = \frac{m_d \cdot L_v}{G.A} \quad (I.22)$$

Avec;

q_{ev} ; quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps

S: superficie du capteur (aire de 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

1.2.5.3 - L'efficacité interne:

Qui représente le rapport de la quantité d'énergie évaporée par (m²) de surface, à la quantité effectivement absorbée par la saumure par (m²) de surface [5], [7].

$$\eta_i = \frac{q_{ev}}{q_{eau}} = \frac{m_d \cdot L_v}{\alpha_t \cdot G \cdot A} \quad (I.23)$$

$\alpha_t GA$: la quantité de chaleur absorbée par l'eau.

α_t : le coefficient d'absorption thermique

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

$$\varphi_{eau} = (\tau_e \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f) \times G \cdot A \quad (I.24)$$

En posant:

$$\alpha_t = \tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f \quad (I.25)$$

$$\varphi_{eau} = \alpha_t G \cdot A \quad (I.26)$$

Il en résulte:

$$\eta_i = \frac{\eta_g}{\alpha_t} \quad (I.27)$$

α_f : coefficient d'absorption du fond du distillateur.

α_e : coefficient d'absorption de l'eau.

τ_e : coefficient de transmission de la l'eau.

τ_v : coefficient de transmission de la vitre.

Le coefficient α_t dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre.

(Voir le tableau I.3 .pour l'angle d'incidence du rayonnement entre 0° et 30° $\alpha_t = 0.8$)

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

Tableau I.5 Réflexion; absorption, transmission vis à vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur (**source [1]**)

1.2.5.4 - Performance:

Le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus absolue a amené, ainsi à définir le facteur de performance brut (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H) [5], [7].

F. P. B.: Le rapport de la quantité d'eau produite au bout de 24h sur la quantité d'énergie entrée au bout de 24h.

F. P. H: Le rapport de la quantité d'eau produite au bout d'une heure sur la 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:

$$FP = \frac{m_d}{\alpha_t G.A} \quad (I.28)$$

CHAPITRE II
ETUDE THEORIQUE

Chapitre II : Etude théorique du distillateur solaire

Dans ce chapitre on présentera l'étude théorique du distillateur solaire à cascade. On abordera le principe de fonctionnement du distillateur solaire à cascade, et nous essayerons d'établir le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur et le système d'équation résultant par le biais d'une approche numérique basée sur la méthode de Gauss Seidel d'itération.

II.1 - Introduction générale sur la modélisation du distillateur solaire :

Il est reconnu que la complexité de la simulation d'un distillateur solaire réside principalement dans les bilans des différentes parties du distillateur, que ce soit pour la géométrie choisie ou pour les données des calculs. Cette difficulté a motivé de nombreuses approches différentes, allant de la géométrie la plus simple qui présente une simple conception, à la modélisation du distillateur solaire simple. [5]

Le but de cette étude (distillateur solaire à cascade) est de prévoir le comportement de celui-ci, lorsqu'on fait varier les paramètres d'entrées. Les températures des différents éléments constituant le système changent instantanément, et de ce fait, échangent entre eux de la chaleur par conduction, convection, rayonnement et évaporation.

D'une façon générale, la densité du flux thermique échangé entre deux surfaces, l'une portée à la température T_1 et l'autre à la température T_2 est régie par une équation simple de la forme:

$$Q = h (T_1 - T_2) A \quad \text{(II.1)}$$

Q : flux thermique en (W).

h : Coefficient du mode de transfert de chaleur en ($W/M^2.K$) .

II.2 - Principe de fonctionnement du distillateur à cascade:

Un distillateur solaire à cascades est constitué d'une capacité étanche surmonté d'une vitre, le même principe appliqué dans un distillateur plan, sauf que l'absorbeur a une forme en cascade. L'eau salée versée dans le distillateur se répartie sur plusieurs petits bassins, on remarque que si la masse d'eau est faible, l'eau s'échauffe plus rapidement et s'évapore.

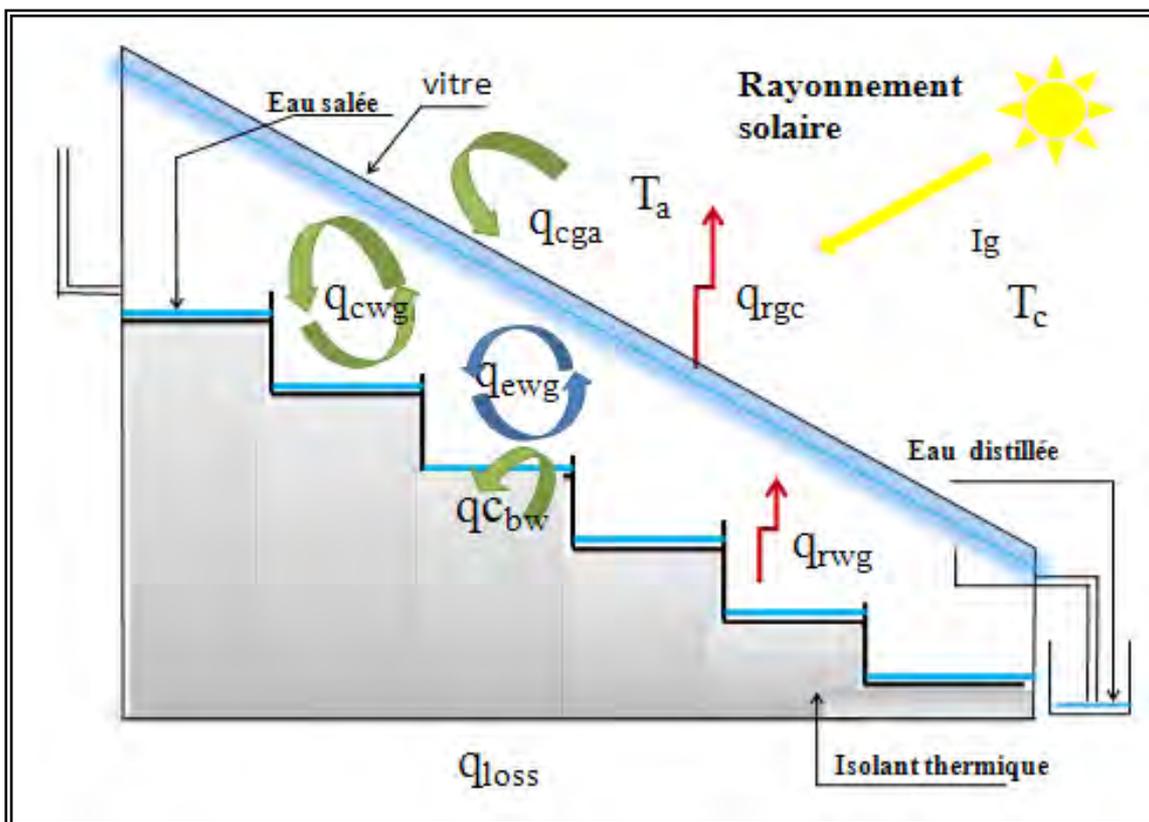


Figure II.1 : Principe de fonctionnement du distillateur à cascade

II.3 - Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur:

II.3.1 - Echange de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation:

L'eau reçoit de l'absorbeur un flux solaire ou de chaleur par convection naturelle [5]. L'eau cède un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle aux surfaces de condensation. Puisque il existe une évaporation, l'eau perd un flux de chaleur.

II.3.2 - Echange de chaleur entre la vitre et la surface d'eau:

Les flux solaires incidents cédés par la nappe d'eau ne sont pas reçus intégralement par la surface de condensation, à cet égard au cours du transfert, une partie est absorbée par l'atmosphère interne et par les parois latérales.

La vitre reçoit les flux incidents par convection naturelle, par rayonnement et par condensation de la vapeur d'eau.

II.3.3 - Echange de chaleur entre la vitre et le milieu ambiant:

Le milieu extérieur cède un flux de chaleur par rayonnement solaire à la vitre, dont une partie est réfléchi. La vitre cède au milieu extérieur un flux de chaleur par rayonnement par convection naturelle.

II.4 - Mise en équation des échanges thermiques:

On tenant compte des hypothèses suivantes [16], [5], [6]:

- ❖ La couverture est propre,
- ❖ La température de chaque composant est uniforme,
- ❖ Le soleil est assimilé à un corps noir,
- ❖ La chaleur perdue par addition de l'eau d'appoint et celle emportée par le distillat sont supposées négligeables,
- ❖ Les parois latérales sont supposées adiabatiques,
- ❖ Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes,
- ❖ La condensation se fait uniquement sur la couverture (il n'y a pas de condensation sur les parois latérales),
- ❖ La concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse,
- ❖ La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité),
- ❖ Vitesse du vent constante.
- ❖ Le bassin est étanche.

II.5 - Bilan thermique pour un régime transitoire:

Considérons une section quelconque du système à l'instant " t " soit i l'un des milieux représentés dans cette section M_i , sa masse en [Kg], CP sa chaleur spécifique en [j/Kg °C], sa température en [°C].

Le bilan au nœud i donne:

$$M_i \times C_{p_i} \times \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n Q_{ij} + P_i \quad (\text{II.2})$$

P_i : Terme de source ou de puits.

$$M_i \times c_{p_i} \times \frac{dT_i}{dt} = 0$$

Dans les cas suivants :

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

Remarque:

Parmi plusieurs modèles trouvés qui traduisent le principe de fonctionnement du distillateur à cascades, nous avons choisi d'utiliser le modèle de Mr V. VEIMRUGAN qui est simple et donnant des résultats probants [17].

❖ **Dans la couverture:**

$$M_g c_{p_g} \frac{dT_g}{dt} = P_g + q_{wg}^r + q_{wg}^c + q_{wg}^{ev} - q_{ga}^c - q_{ga}^r \quad (II.3)$$

q_{wg}^c : Flux de chaleur échangé par convection entre la vitre intérieur et la masse d'eau [W]

q_{wg}^r : Flux de chaleur échangé par rayonnement entre la vitre et la masse d'eau [W]

q_{wg}^{ev} : Flux de chaleur échangé par évaporation entre la vitre et la masse d'eau [W]

q_{ga}^r : Flux de chaleur échangé par rayonnement entre le milieu ambiant et la surface extérieure de la vitre [W]

q_{ga}^c : Flux de chaleur échangé par convection entre le milieu ambiant et la surface extérieure de la vitre [W]

P_g : Puissance solaire de la surface absorbée par la masse d'eau [W]

$$P_g = \alpha_g I_g A_g \quad (II.4)$$

$$q_{wg}^c = h_{wg}^c (T_w - T_g) A_w \quad (II.5)$$

$$q_{wg}^r = h_{wg}^r (T_w - T_g) A_w \quad (II.6)$$

$$q_{wg}^{ev} = h_{wg}^{ev} (T_w - T_g) A_w \quad (II.7)$$

$$q_{ga}^r = h_{ga}^r (T_g - T_c) A_g \quad (II.8)$$

$$q_{ga}^c = h_{ga}^c (T_g - T_a) A_g \quad (II.9)$$

❖ **Dans la saumure :**

$$M_w c p_w \times \frac{dT_w}{dt} = P_w - q_{wg}^{ev} - q_{wg}^r - q_{wg}^c + q_{bw}^c \quad (II.10)$$

q_{bw}^c : Flux de chaleur échangé par convection entre le l'absorbeur et la masse d'eau [W].

P_w : Puissance solaire de la surface absorbée par la masse d'eau [W]

$$P_w = \alpha_w I_g A_w \quad (II.11)$$

$$q_{bw}^c = h_{bw}^c \times (T_b - T_w) A_b \quad (II.12)$$

❖ **Dans le bac absorbant:**

$$M_b c p_b \times \frac{dT_b}{dt} = P_b - q_{bw}^c - q_{pertes} \quad (II.13)$$

P_b : Puissance solaire absorbée par l'absorbeur [W]

q_{bw}^c : Flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et la masse d'eau [W]

q_{pertes} : Pertes thermiques entre le bassin et le milieu ambiant

$$P_b = \alpha_b I_g A_b \quad (II.14)$$

$$q_{pertes} = U_b (T_b - T_a) A_b$$

$$\text{D'après V.VEIMRUGAN [17] et [25] } U_b = 14 \text{ W/M}^2\text{K} \quad (II.15)$$

II.6 - Expression des différents coefficients d'échange thermique :

II.6.1 - Echange par convection:

II.6.1.1 - Echange convectif entre la masse d'eau et le bac absorbant:

Le coefficient d'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant est donné par :

$$h_{bw}^c = \frac{Nu \times \lambda_w}{l} \quad (\text{II.16})$$

Dans ce type de problème, les corrélations expérimentales aboutissent à des relations de la Forme [5] [6]

$$Nu = c(Gr \times Pr)^n \quad (\text{II.17})$$

Ou **c** et **n** sont des constantes dépendant de la géométrie du système et de la nature de l'écoulement, laminaire ou turbulent

$$\text{Gr: nombre de GRASHOF} \quad Gr = \frac{\beta_w \times L^3 \times g \times (T_b - T_w)}{v_w^2} \quad (\text{voire annexe})$$

β_w : Coefficient d'expansion volumétrique de l'eau [K⁻¹]

L : Longueur du bac absorbant

$$\text{Avec: Pr : Nombre de Prandtl} \quad Pr = \frac{\mu_w \times cp_w}{\lambda_w} \quad (\text{voir Annexe})$$

➤ si $Gr < 10^5$; $Nu = 1$

L'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant se fait uniquement par conduction

$$\text{➤ si } 10^5 < Gr < 2 \times 10^7 \quad Nu = \frac{\lambda_w}{L} \times 0.54 \times (Gr \times Pr)^{0.25}$$

$$\text{Avec: Pr : Nombre de Prandtl} \quad Pr = \frac{\mu_w \times cp_w}{\lambda_w} \quad (\text{voir Annexe})$$

➤ Si $Gr > 2 \times 10^7$: $Nu = 0.14 \times (Gr \times Pr)^{0.33}$

II.6.1.2 - Echange convectif entre la saumure et la vitre:

Selon BAUM [16] dans l'échange thermique et massique entre la surface libre de la saumure et la couverture transparente, il existe une «zone tampon», la température et la pression partielle de la vapeur d'eau sont constantes, ce qui implique que seule la couche adjacente d'évaporation (saumure) et la surface de condensation (vitre) participent au processus de transfert de masse et de chaleur.

L'échange par convection entre la saumure et la vitre dépend du nombre de **Grashoff** (Gr) et de l'inclinaison de la couverture β .

Pour $\beta = 30^\circ$

- Si ; $Gr < 3 \times 10^3$: $Nu = 1$
- Si : $3 \times 10^3 < Gr < 5 \times 10^4$: $Nu = 0.0588 \times Gr^{0.37}$
- Si : $Gr > 2 \times 10^5$; $Nu = 0.0354 \times Gr^{0.37}$

Ave

$$Gr = \frac{B_w \times D^3 \times g \times (T_w - T_g)}{v_m^2} \quad (\text{II.18})$$

Ou :

D: Longueur caractéristique du distillateur

v_m : Viscosité cinématique du mélange air-vapeur

Et :

$$h_{wg}^c = \frac{Nu \times \lambda_m}{D} \quad (\text{II.19})$$

λ_m : Conductivité thermique du mélange air-vapeur

D'autres références ont donné le coefficient d'échange par convection entre la saumure et la vitre en fonction des pressions partielles de la vapeur d'eau [16],[5],[6]

$$h_{wg}^c = 0.884 \left[\left\{ (T_w - T_g) + \frac{(p_v^w - p_v^g)}{268.9 \times 10^3 - p_v^w} \right\} \times \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{II.20})$$

p_v^w, p_v^g Représente la pression de vapeur au niveau de la saumure et la surface intérieure de la vitre respectivement.

II.6.1.3 - Echange convective entre la vitre et le milieu ambiant:

L'échange thermique entre la vitre et l'extérieur dépend de la vitesse du vent, est donné par la corrélation MACADAMS [2]

$$h_{ga}^c = 5.7 + 3.8 \times v \quad (\text{II.21})$$

Avec

V: Vitesse du vent en M/S

II.6.2 - Echange par rayonnement:

II.6.2.1 - Echange par rayonnement entre la saumure et la vitre:

Par approximation, la couverture à faible pente ($\beta=30^\circ$) est considérée horizontale, d'après P. I. Cooper et W. R. W. [17] pour deux surfaces planes, infinies en parallèle, le coefficient radiatif est donné sous la forme

$$h_{wg}^r = \varepsilon_{\text{eff}} \times \sigma \times (T_w^2 + T_g^2) \times (T_w + T_g) \quad (\text{II.22})$$

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1} \quad (\text{II.23})$$

Avec:

ε_w : coefficient d'émissivité de l'eau.

ε_g : coefficient émissivité de la vitre.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($=5.6697 \cdot 10^{-8} [\text{WM}^{-2}\text{K}^{-4}]$)

II.6.2.2 - Echange par rayonnement entre la vitre et l'extérieur:

$$h_{ga}^r = \epsilon_g \times \sigma \times (T_g^2 + T_c^2) \times (T_g + T_c) \quad (\text{II.24})$$

T_c : est la température du ciel.

Cette température est donnée en fonction de la température ambiante

$$T_c = T_a - 6$$

En général, on utilise l'expression :

$$T_c = 0.0552(T_a)^{1.5} \quad T_a \text{ En } K^\circ \quad (\text{II.25})$$

II.6.3 - Echange pendant le changement de phase

Par l'utilisation de la relation de la convection naturelle à l'intérieur du distillateur et par analogie entre les transferts de masse et de chaleur **Dunkle** est arrivé à l'expression du coefficient thermique par évaporation [17], [20], [21].

$$h_{wg}^{ev} = 16.276 \times 10^{-3} \times h_{wg}^c \times \frac{(p_v^w - p_v^g)}{(T_w - T_g)} \quad (\text{II.26})$$

p_v^w, p_v^g Représente la pression de vapeur au niveau de la saumure et la surface intérieur de la vitre respectivement, ils sont estimés par les relations suivantes [21]:

$$p_g = e^{\left(25.317 - \frac{5144}{T_g + 273}\right)} \quad (\text{II.27})$$

$$p_w = e^{\left(25.317 - \frac{5144}{T_w + 273}\right)}$$

II.7 - Traitement informatique:**II.7.1 - Principe de simulation:**

Pour le régime transitoire, la plus rigoureuse est une simulation "pas à pas" qui rend compte de l'évolution des températures de tous les éléments du distillateur dans le temps et dans l'espace, les données météorologiques proviennent de fichiers (vitesse du vent et température ambiante) ou de formules approchées (température du ciel).

II.7.2 - Résolution numérique:

Les équations régissant le fonctionnement d'un distillateur solaire résolues par une approche numérique basée sur la méthode de **Gauss -Seidel**, pour cela nous commençons par ordonner les équations finales des divers bilans par rapport à la température comme suit:

❖ **Au niveau de la vitre**

$$M_g c_p \frac{dT_g}{dt} = P_g + h_{wg}^r (T_w - T_g) A_w + h_{wg}^c (T_w - T_g) A_w + h_{wg}^{ev} (T_w - T_g) - h_{ga}^r (T_g - T_c) A_g - h_{ga}^c (T_g - T_a) A_g$$

❖ **Au niveau de la masse d'eau**

$$M_w c_p \frac{dT_w}{dt} = P_w + h_{wb}^c (T_b - T_w) A_b - h_{wg}^r (T_w - T_g) A_w - h_{wg}^c (T_w - T_g) A_w - h_{wg}^{ev} (T_w - T_g) A_w$$

❖ **Au niveau de l'absorbeur**

$$M_b c_p \frac{dT_b}{dt} = P_b - h_{bw}^c (T_b - T_w) A_b - U_b (T_b - T_a) A_b$$

II.7.3 - Programme:

Le programme informatique élaboré est établi en FORTRAN (**Compaq Visuel Fortran Version 9.0**).

1) La première étape consiste à calculer les différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température.

❖ Les coefficients d'échange thermique dus au vent.

2) On calcule, à chaque heure de la journée:

Le rayonnement solaire frappant un plan horizontal et un plan incliné:

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

3) On suppose que les différents composants du distillateur sont à la température ambiante, seulement la saumure et le bac absorbant sont à des températures supérieures que cette dernière, et on calcule pour les températures initiales:

- Les pressions partielles de la vapeur d'eau à la température de la saumure et la pression partielle de la vapeur à la température de la couverture.

- A la température T_w , on calcule les propriétés de la saumure:

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

- Calcul des coefficients d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste,

- Calcul du coefficient d'échange thermique par convection entre:

- ❖ Le bac absorbant et la saumure.
- ❖ La saumure et la vitre.

- Calcul du coefficient d'échange thermique par évaporation entre la saumure et la vitre.

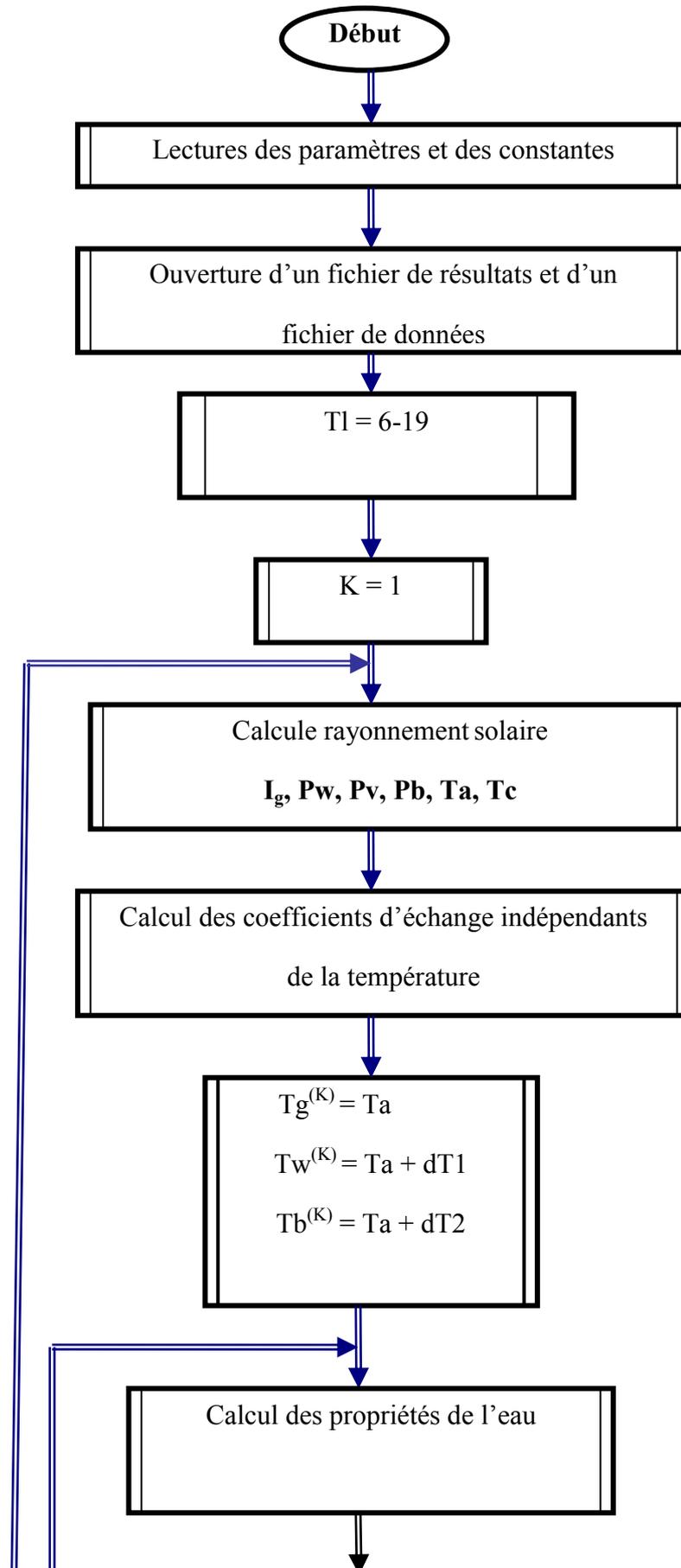
- Calcul des éléments de la matrice.

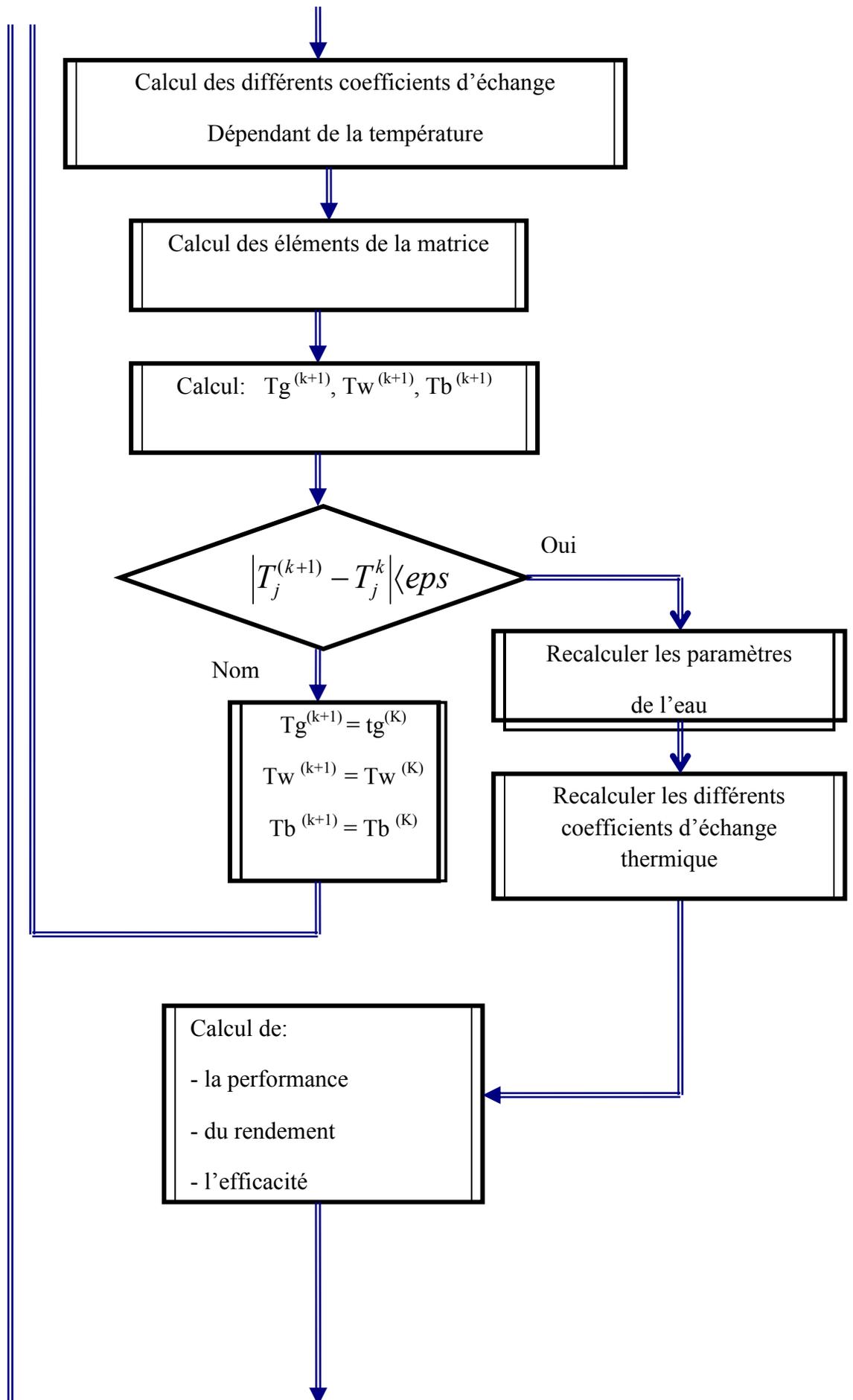
- Résolution du système d'équation par méthode de **GAUSS-SEIDEL** d'itération.

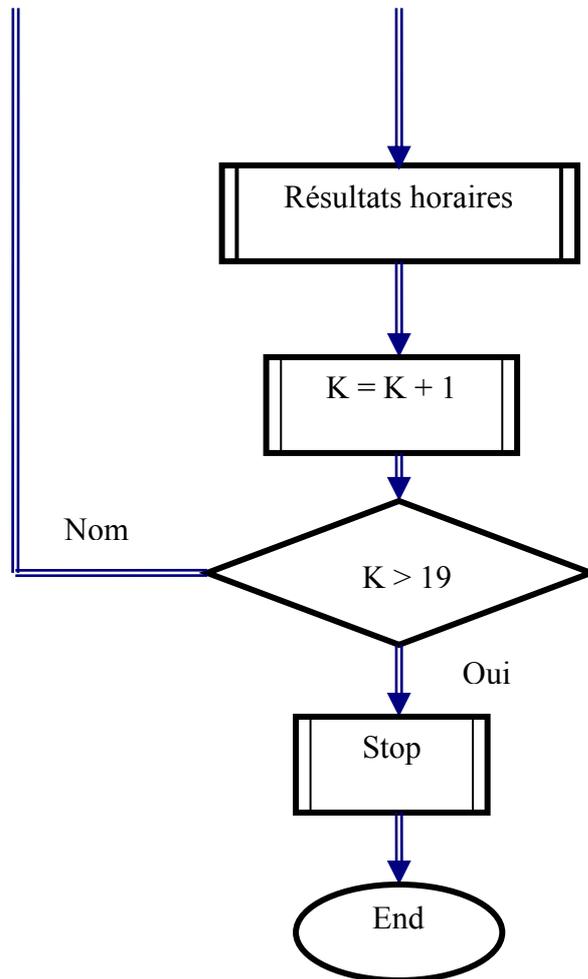
La troisième étape est représentée par les températures obtenues.

4) Calcul de :

- ❖ L'efficacité globale,
- ❖ La production,
- ❖ L'efficacité interne,
- ❖ La performance.

II.7.4 - Organigramme:





CHAPITRE III
REALISATION D'UN
DISTILLATEUR A CASCADE

Chapitre III: Réalisation d'un distillateur solaire à cascade à effet de serre:

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différents éléments du distillateur à cascades et les différentes étapes concernant la réalisation de ce distillateur, ainsi que les essais effectués.

III.1 - Conception du distillateur solaire à cascade :

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

Les éléments principaux du distillateur solaire à cascade sont les suivants:

1. Un bac absorbant.
2. Une vitre.
3. Une isolation thermique.

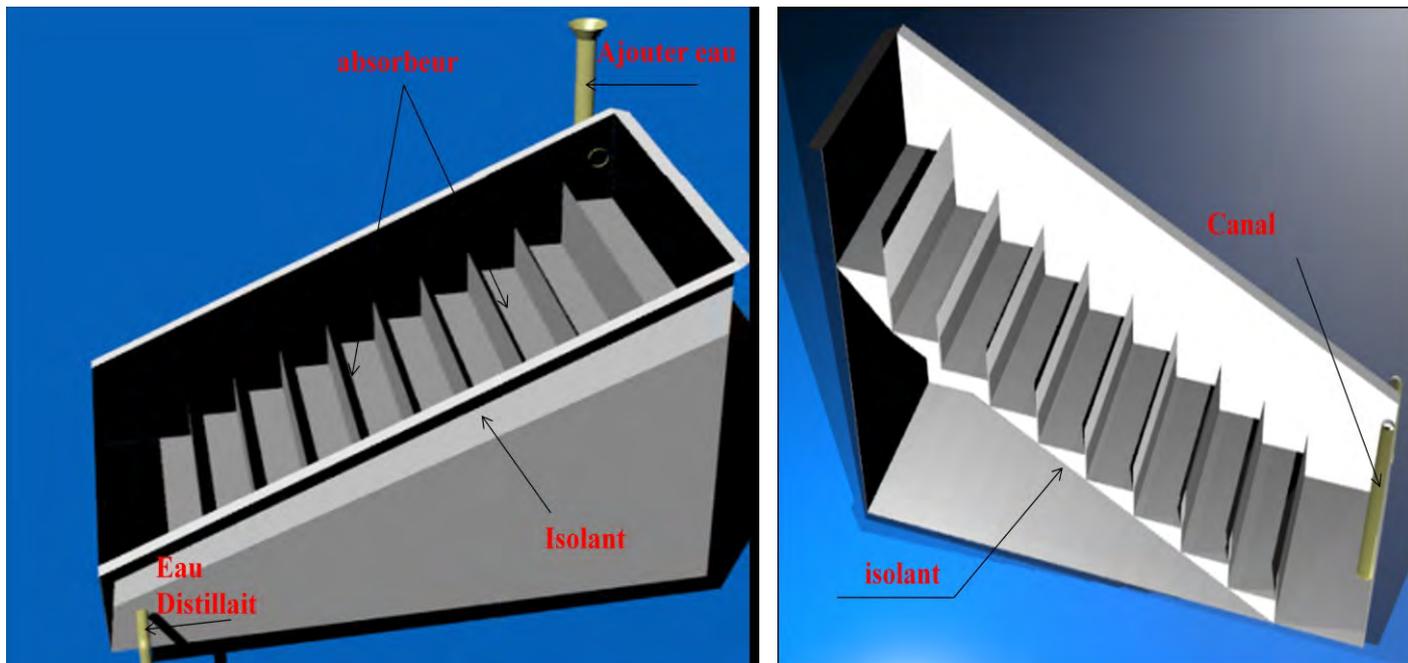


Figure III. 1 Distillateur solaire à cascade

III.1.1- Bac absorbant

Le rôle du bac absorbant permet d'absorber le maximum de rayonnement solaire global et transmettre la chaleur produite par cette absorption vers la saumure, c'est pour cette raison qu'il est peint en noir mat. Il est obtenu par soudage, et est construit essentiellement en fer galvanisé.

La dimension de l'absorbeur

Nous avons huit plateaux

Chaque plateau a les dimensions suivantes :

- Longueur 0.5 M
- Largeur 0.105 M
- La surface totale de l'absorbeur est de 0.436 M²

III.1.2 - Couverture verrière (verre)

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

Les dimensions de la vitre sont :

- Longueur : 1 M
- Largeur : 0,5 M
- Epaisseur : 0,005 M
- Superficie 0.5 M²

On a choisi un verre ordinaire pour leur bonne transmission du rayonnement visible et leur mouillabilité.

III.1.3 - L'isolation thermique:

Généralement, l'isolation thermique du distillateur est en laine de verre ou en polystyrène expansé. L'épaisseur varie de 0.03 à 0.06M .Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement.

Les dimensions de l'isolant thermique sont:

- Longueur: 1 M
- Largeur: 0,5 M
- Epaisseur: 0.06 M
- Superficie de la base: 0,5 M

II.2 - Composants standards:

Ces composants ont été choisis de façon constructive (dimensions proportionnelles à la taille du système) et selon la disponibilité sur le marché. Ces composants sont décrits dans le tableau III-1.

Matière	Dimension	Quantité	Observation
La laine de verre	$1 \times 1 \text{ M}^2$	1	
Verre ordinaire	$1 \times 0.5 \times 0.003 \text{ M}^3$	1	
Tôle galvanisée	$1 \times 2 \times 0.004 \text{ M}^3$	2	
Mastic de fer		1	
Peinture noire	0.5kg	1	
Colle			
Boulon de fixation	0.005 M	6	
Robinet	0.015/0.021 M	1	
Tige	0.01 M	1	
Silicone	/	1	

Tableau III.1 Différents composants standards du distillateur

III.3 - Réalisation des composants du distillateur solaire

III.3.1 - Réalisation du bac absorbant:

Pour la réalisation du bac absorbant, il a suffi d'une tôle en fer galvanisée d'1 m × 2 m × 4 mm. On a procédé au découpage de la tôle en (08) huit parties de dimension 0.5×0.105M², ensuite on les a soudé et collé à l'aide d'une colle spéciale de fer qui nous a permis d'obtenir la structure présentée ci-dessous dans la figure III.3



Figure III.3 Absorbeur



Figure III.4 : Isolant

III.3.2 - Montage:

Le bac est équipé d'un système de remplissage et de vidange. Pour le montage des différents composants, on utilise une colle spéciale de fer,

- Le remplissage se fait du côté droit du bac à l'aide d'une tuyauterie composée d'un raccord en cuivre 15/21mm, et d'un robinet en bronze de même diamètre.
- Pour l'évacuation de l'eau distillée, on utilise une tige de diamètre 15/21mm et de longueur 30 mm
- La vidange est réalisée en bas du bac à l'aide d'un manchon soudé de diamètre 15/21 mm, raccordé à un bout de tige 15/21 mm.



Figure III.4 Schéma finale du distillateur à cascade

III.4 - Essais

- Les essais effectués, à Constantine, dans un endroit où le distillateur fut exposé aux rayons solaires pour qu'il puisse capter le maximum de rayonnement solaire sans aucune obstruction. L'orientation du distillateur fut vers le sud.
- Les différents essais effectués durant la période estivale, nous ont permis de mesurer la production journalière d'eau distillée pendant une durée allant de (06) six heures du matin jusqu'à (18) dix-huit heures du soir..
- On utilisa un thermomètre pour mesurer la température ambiante.

Heure	Production de l'eau distillée pendant chaque jour (ml/M ²)					
	12/07/2009	02/08/2009	18/08/2009	17/09/2009	18/09/2009	03/10/09
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	6	0
9	100	180	20	60	180	50
10	200	220	200	240	200	300
11	250	400	300	300	220	410
12	500	500	640	320	440	300
13	520	480	540	140	300	450
14	600	230	400	100	110	280
15	502	200	380	10	100	210
16	460	160	260	6	60	80
17	400	0	80	2	16	60
18	200	0	20	0	20	8

Tableau III.2 Résultats obtenus au cours des essais effectués (la production journalière de l'eau distillée)

Heure	Température ambiante				
	02/08/2009	18/08/2009	16/09/2009	17/09/2009	05/10/2009
6	26	28	17	16	15
7	29	30	22	17	18
8	33	31.5	25	22	22
9	37	39	24	30	27
10	38	41	28	35	32
11	40	42	34	36	35
12	41.2	43	39	41	38
13	43	45	35	42	40
14	39	43	34	38	38
15	35.5	38	28	30	34
16	35	35	22	29	28
17	30	33	20	26	26
18	28	29	19	22	22

Tableau III. 3 Résultats obtenus de la température ambiante (°C)

Jour	Pluie (mm)	Evaporation (mm)	Insolation (Heure)	Humidité (%)	Nébulosité (Octas)	Vitesse moyenne (M/s)	Pression (Hecto P)
12/07/09	0	6.5	12.5	49.6	1.1	1.9	938.9
02/08/09	0	7.5	12.5	49.9	0.6	2.6	937.2
18/08/09	0	6.8	11.9	63.4	0.5	1.6	944.2
16/09/09	0	3.6	9.5	77.4	2.2	0.8	932.3
17/09/09	0.1	2.4	8.5	69.5	2.2	0.8	936.3
05/10/09	0	-	-	68	0.9	1.8	942,9

Tableau III. 4 Données météorologiques pendant les jours des essais

Nous avons recueillis ces données au niveau de l'Agence météorologique de wilaya de Constantine

III.5 - Traitement de l'eau distillée:

L'eau utilisée dans nos expériences est l'eau de mer. On a mesuré les grandeurs suivantes: TDS, PH, conductivité, salinité, turbidité. Oxygène dessous.

Le PH décrit la concentration des ions hydrogénés dans un liquide. Ceci détermine dans les termes chimiques si l'eau est par exemple acide, neutre ou basique. L'eau pure a une valeur neutre de 7,0. Des valeurs inférieures démontrent qu'un liquide est acide (un acide) et des valeurs supérieures démontrent qu'un liquide est basique (alcalin). Dans notre expérience le PH dépend de la salinité (**voire annexe H**)

Après avoir procédé au traitement de l'eau (TDS, PH, ...), au niveau du Laboratoire de l'Algérienne des Eaux (**ADE**) de la wilaya de Skikda



Figure III.5 Appareil de mesure de l'oxygène



Figure III.6 PH-mètre



Figure III.7 Appareil de mesure de la conductivité électrique



Figure III.8 Appareil de mesure de la turbidité

III.6 - Estimation du coût du distillateur:

La conception d'un distillateur à cascade solaire pour les communautés rurales doit avoir le coût le plus bas possible. Le coût de fabrication de notre distillateur est estimé à 6000 DA,

L'utilisation de l'eau distillée est très vaste dans l'industrie pharmaceutique et chimique pour la production et la dilution d'émulsions. Pour l'usage domestique, l'eau distillée est utilisée dans les fers à repasser et lors du lavage des vêtements. L'eau distillée ne convient pas à la consommation car elle peut déstabiliser l'équilibre de minéraux dans le corps humain par la déminéralisation.

Si on admet que la production journalière est de 1.5 l/jour pendant toute l'année (pendant la période hivernale la production est négligeable), on trouve que la production annuelle est de 412.5l. Sachant que le prix d'un litre d'eau distillée sur le marché est de 20 DA, le coût total de la production annuelle est estimé à 8250 DA. On conclut que le retour de cet investissement est d'une année pour le coût de leur fabrication.

III.6.1 - Calcul la rentabilité du projet:

La durée de vie du distillateur est d'environ 10 ans. Sa maintenance est limitée uniquement au nettoyage périodique de l'absorbeur après chaque utilisation pour éviter le problème d'entartrage de celui-ci, ainsi que la vitre qui doit permettre une bonne captation du rayonnement solaire. Le coût de maintenance est faible puisque les constituants du distillateur sont à la portée de tous les utilisateurs.

Le projet rentable si la valeur comptable VAC est supérieure à 0 [5].

$$VAC = -IVV + \sum VA(\text{Gains}) - \sum VA(\text{Dépenses}) \quad (\text{IV.1})$$

Avec

$$\sum Va(\text{Gains}) = \sum_{t=1 \text{ à } n} \left(\text{Gains} \times \frac{(1+j)^t}{(1+i)^t} \right) \quad (\text{IV.2})$$

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

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

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

Début

$$VA(\text{Gain})_0 = 0 \text{ DA}$$

Première année

$$VA(\text{Gain})_1 = \left(\frac{412.5 \times 20}{(1+0.08)^1} \right)$$

$$VA(\text{Gain})_1 = 7638.88 \text{ DA}$$

Deuxième année

$$VA(\text{Gain})_2 = \left(\frac{412.5 \times 20}{(1+0.08)^2} \right)$$

$$VA(\text{Gain})_2 = 7073.04 \text{ DA}$$

Troisième année

$$VA(\text{Gain})_3 = \left(\frac{412.5 \times 20}{(1+0.08)^3} \right)$$

$$VA(\text{Gain})_3 = 6549.11 \text{ DA}$$

Quatrième année

$$VA(\text{Gain})_4 = \left(\frac{412.5 \times 20}{(1+0.08)^4} \right)$$

$$VA(\text{Gain})_4 = 6063.99 \text{ DA}$$

Cinquième année

$$VA(\text{Gain})_5 = \left(\frac{412.5 \times 20}{(1+0.08)^5} \right)$$

$$VA(\text{Gain})_5 = 5614.81 \text{ D}$$

Sixième année

$$VA(\text{Gain})_6 = \left(\frac{412.5 \times 20}{(1+0.08)^6} \right)$$

$$VA(\text{Gain})_6 = 5198.89 \text{ DA}$$

Septième année

$$VA(\text{Gain})_7 = \left(\frac{412.5 \times 2}{(1+0.08)^7} \right)$$

$$VA(\text{Gain})_7 = 4813.79 \text{ DA}$$

Huitième année

$$VA(\text{Gain})_8 = \left(\frac{412.5 \times 2}{(1+0.08)^8} \right)$$

$$VA(\text{Gain})_8 = 4457.21 \text{ DA}$$

Neuvième année

$$VA(\text{Gain})_9 = \left(\frac{412.5 \times 2}{(1+0.08)^9} \right)$$

$$VA(\text{Gain})_9 = 4127.05 \text{ DA}$$

Dixième année

$$VA(\text{Gain})_{10} = \left(\frac{412.5 \times 2}{(1+0.08)^{10}} \right)$$

$$VA(\text{Gain})_{10} = 3821.346 \text{ DA}$$

$$\text{INV} = 6000 \text{ DA}$$

$$\text{VAC} = - 6000 \text{ DA} + 7638.88 \text{ DA} + 7073.04 \text{ DA} + 6549.11 \text{ DA} + 6063.99 \text{ DA} + 5614.81 \text{ DA} \\ + 5198.89 \text{ DA} + 4813.79 \text{ DA} + 4457.21 \text{ DA} + 4127.05 \text{ DA} + 3821.346 \text{ DA}$$

$$\text{VAC} = 49357.246 \text{ DA} \quad \Longrightarrow \quad \text{le projet est rentable}$$

L'analyse du coût de notre réalisation montre qu'elle est moins chère. Le coût du distillateur diminuera encore, dans le cas où il sera fabriqué en série.



Figure IV.9: Eau distillée commerciale.

CHAPITRE IV
RESULTAS ET DISCUSSION

IV Chapitre: Résultats et discussion :**IV.1 - Résultats théoriques****IV.1.1 - Introduction:**

La résolution du système des équations décrites dans les annexes nous a permis d'obtenir des résultats en tenant compte des considérations suivantes :

- Les calculs réalisés à Constantine en tenant compte des coordonnées géographiques du site :
Latitude 37°.17 Nord,
Longitude 6°.62 Est,
Décalage horaire: (01) heure.
- Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial T_0 pour chaque composant du distillateur, à une température initiale et avec un pas de temps égale à (01) heure.
- Inclinaison de la couverture est égale à 30° par rapport à l'horizontale avec un azimut de 0° par rapport au Sud.
- Le 18 août a été choisi comme jour de calcul.
- Les résultats ont été reproduits à l'aide d'un graphe grâce au logiciel d'**origine**.

IV.1.2 - Variation des puissances solaires absorbées :

La **figure (IV.1)** montre l'évolution, en fonction du temps du rayonnement solaire globale, reçu par mètre carré de surface plane et de la puissance absorbé par la saumure et par la vitre. D'après cette figure, on remarque que la puissance a atteint son maximum à 13^h00 (les valeurs maximales sont situées entre 11^h00 et 15^h00).

La puissance absorbée par la vitre n'est pas considérable et reste toujours inférieur à celle absorbée par la saumure; en raison de ces caractéristiques géométriques (faible épaisseur) et optique (coefficient d'absorption faible et coefficient de transmission élevée).

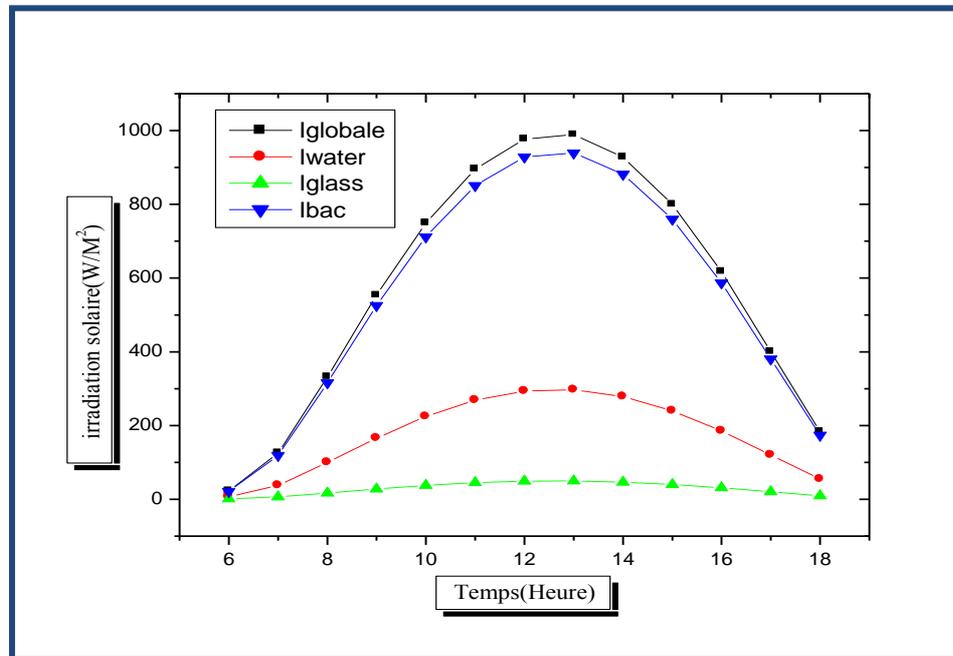


Figure IV .1 Variation temporelle des puissances absorbées

IV.1. 3 - Variation des températures :

La relation (II-25) montre que la température du ciel varie en fonction de la température ambiante, donc elles suivent la même allure, et atteignent leur valeur maximale à 13^h d'où le flux solaire est important (**figure IV.2 et figure IV.3**)

La figure IV.4 représente la variation temporelle des températures de chaque composant du distillateur comme prévu dans cette figure, le bac absorbant et la température à son niveau le plus élevé, ceci est due à la puissance absorbée par l'absorbeur qui est importante par rapport à celle absorbé par la saumure et la vitre.

L'élévation des températures du vitrage est due à l'absorption par la vitre du rayonnement solaire incident et de la chaleur cédée par la surface d'évaporation (la saumure) par rayonnement, évaporation, et convection naturelle.

Après absorption du flux solaire, l'eau s'échauffe entrainant ainsi l'élévation progressive de sa température.

La température du bac absorbant est légèrement supérieure à celle de la saumure en raison des caractéristiques de l'absorbeur (coefficient d'absorption élevé et coefficient de transmission faible).

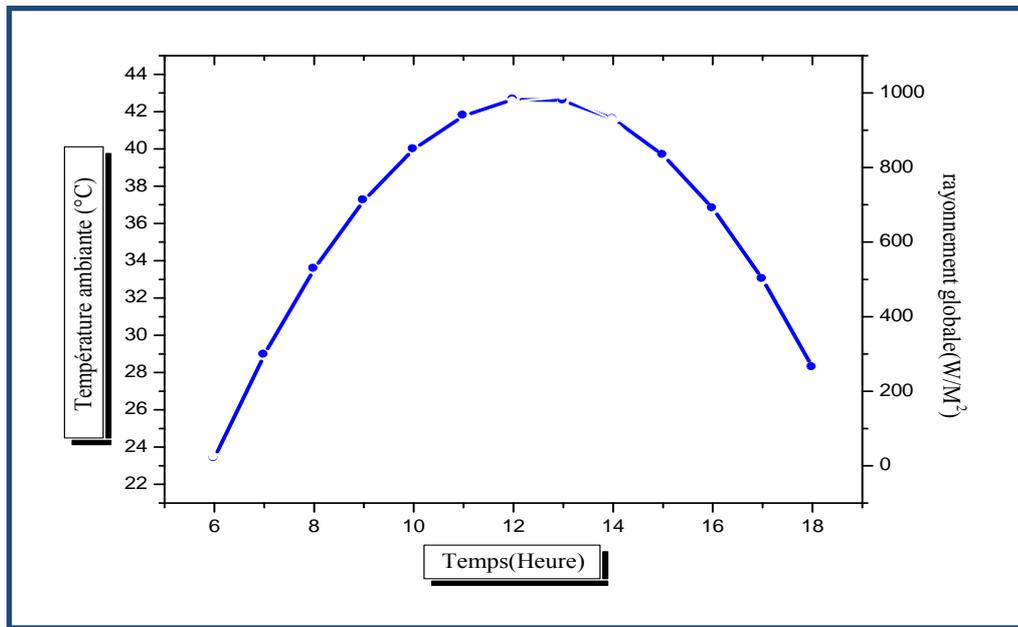


Figure IV.2 Variation temporelle de la température ambiante

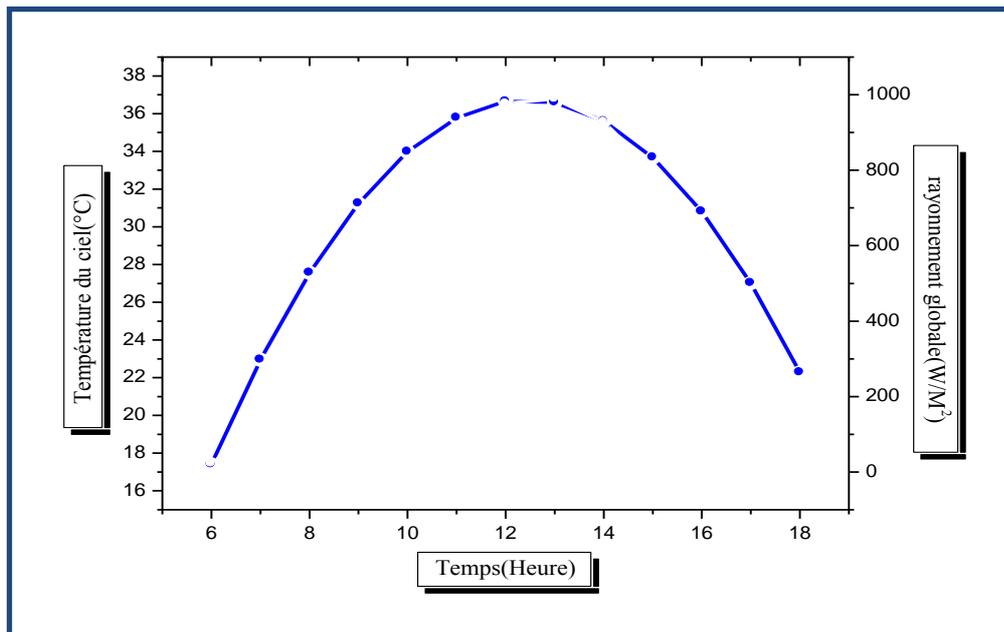


Figure IV.3 Variation temporelle de la température du ciel

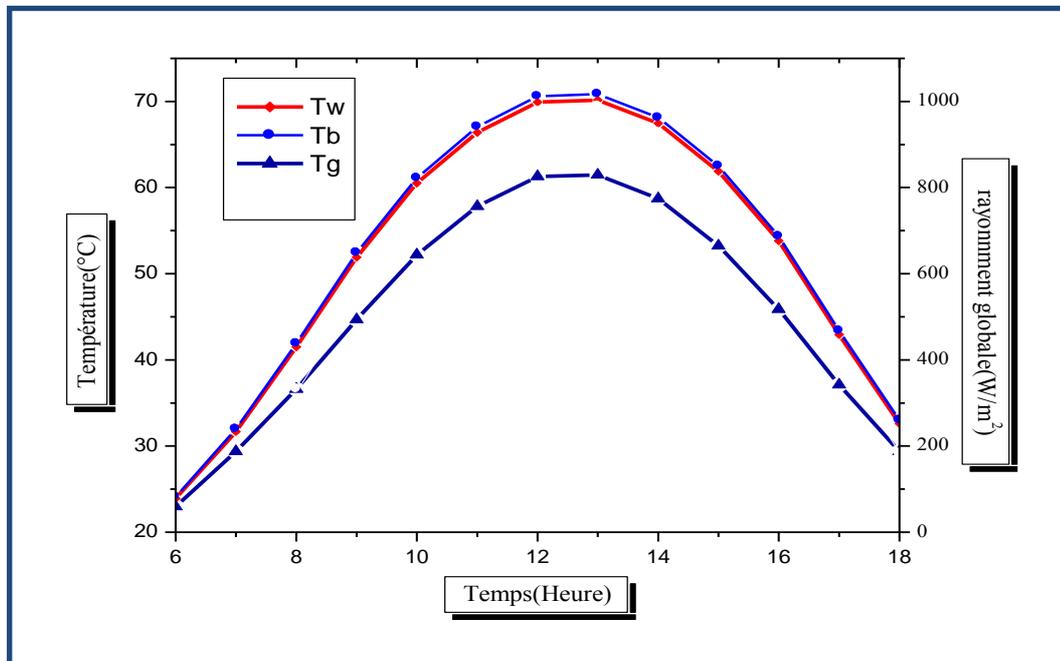


Figure IV.4 Variation temporelle des différentes températures

IV .1.4 - Variation du rendement, de l'efficacité et de la performance du distillateur :

La production horaire de l'eau distillée est représentée sur la figure IV.5. Cette production commence à être considérable à partir de 6h 00 du matin. En effet, la production de l'eau distillée dépend de l'écart entre les températures de la saumure et celle de la face intérieure de la vitre, où l'écart maximal est atteint à 13h00.

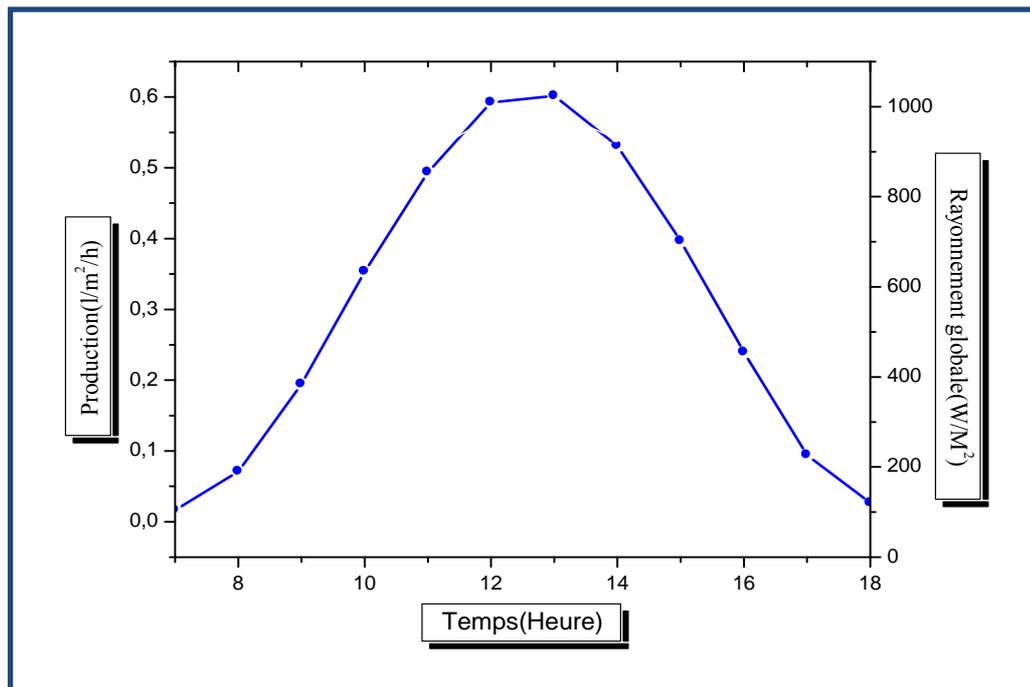


Figure IV. 5 Variation temporelle de la production de l'eau distillée

Les variations de l'efficacité interne et l'efficacité globale sont représentées dans la **figure IV.6** et la **figure IV.7**

On constate que les deux variations suivent la même allure, mais celle de l'efficacité interne est plus élevée par rapport à celle de l'efficacité globale, parce 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 par l'évaporation et de la quantité de chaleur effectivement reçue par la masse d'eau.

En raison du rayonnement faible absorbé par la saumure, l'efficacité interne sera donc plus élevée que l'efficacité globale.

Par ailleurs, si on raisonne en quantité d'eau douce produite par unité d'énergie solaire absorbée par l'eau, on peut constater que notre distillateur ne devient performant qu'entre 12h00 et 14h00, ceci est dû à la quantité d'eau produite qui est importante dans cette intervalle de temps (**figure IV.5**)

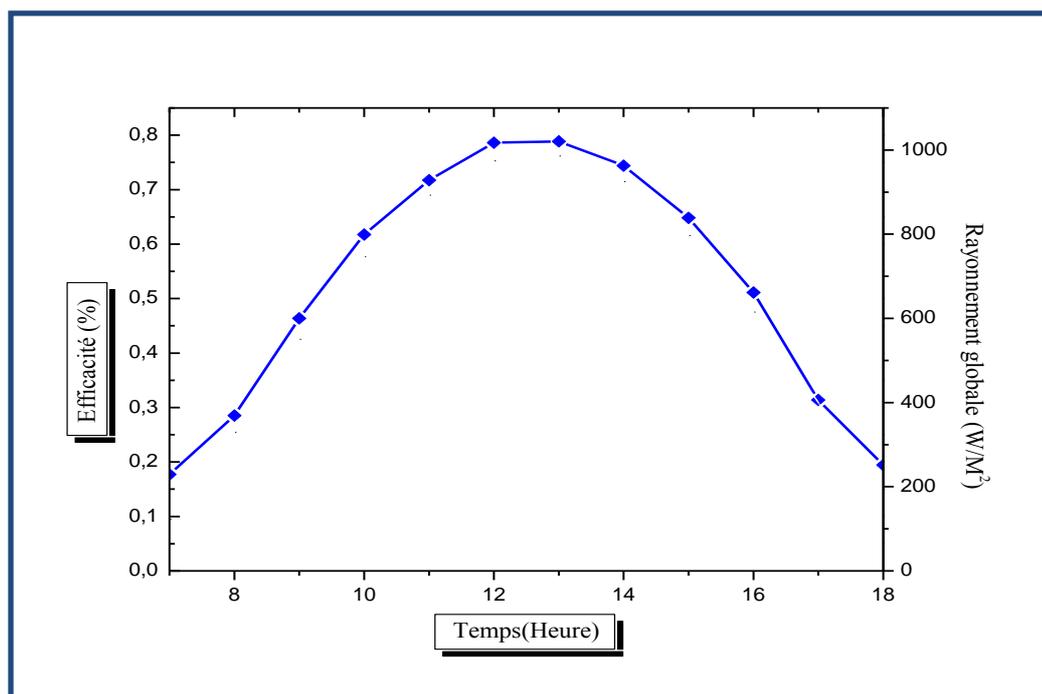


Figure IV.6 Variation temporelle de l'efficacité globale

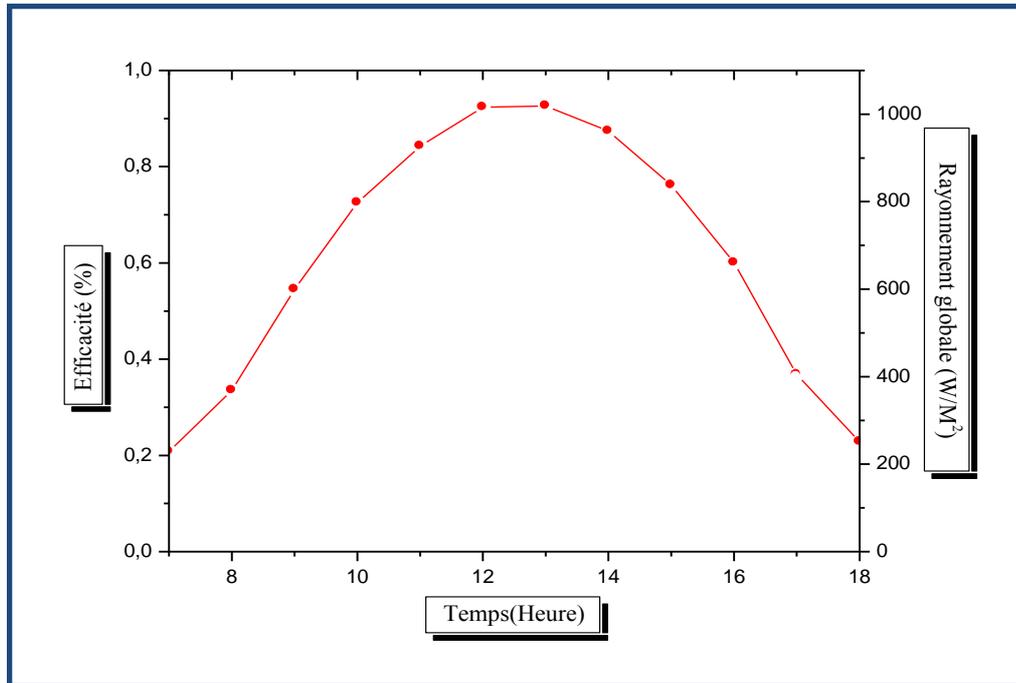


Figure IV .7 Variation temporelle de l'efficacité interne

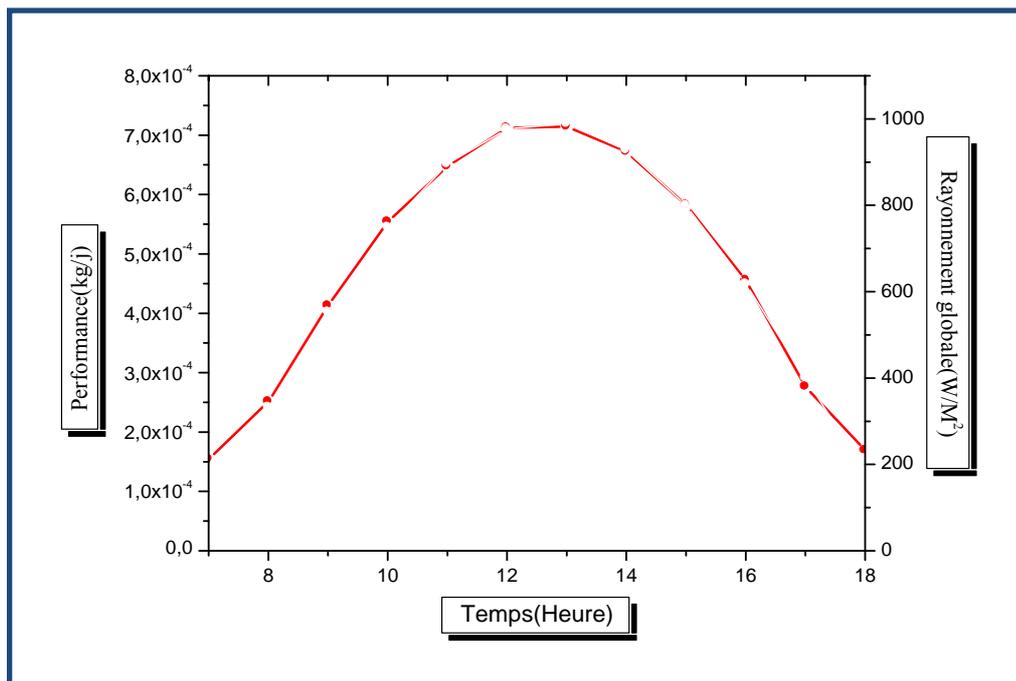


Figure IV. 8 Variation temporelle de la performance

IV.1.5 -Variation des caractéristiques thermo-physiques de la saumure :

IV.1.5.1 - la chaleur spécifique :

L'évolution temporelle de la chaleur spécifique est proportionnelle à l'évolution temporelle de la température de la saumure, ce qui explique que ses variations ont la même allure.

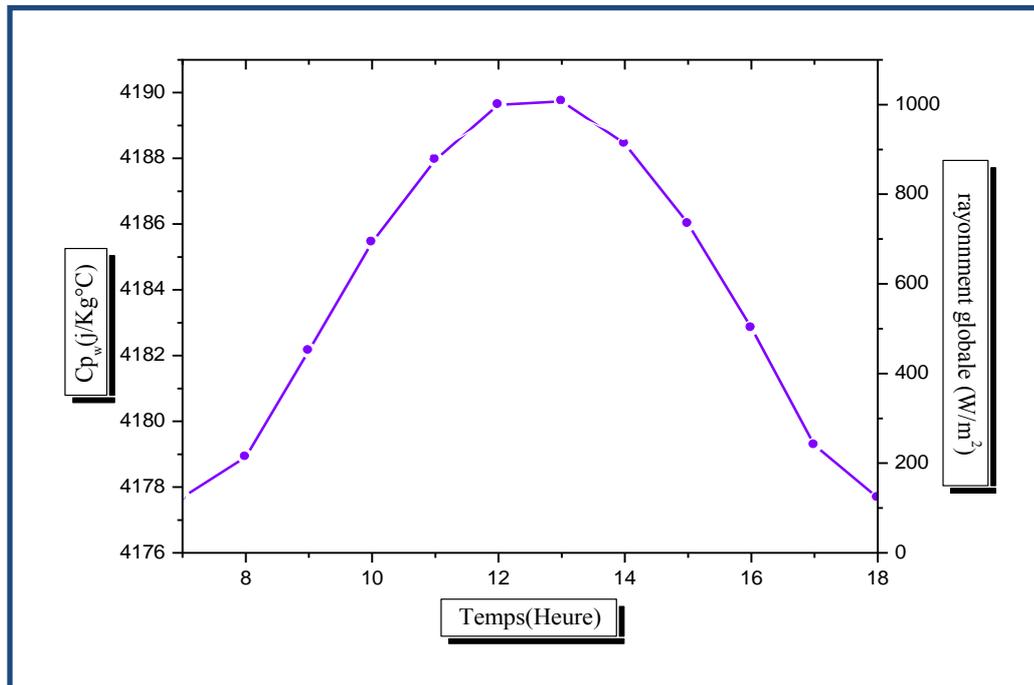


Figure IV .9 Variation temporelle de la chaleur spécifique de la saumure

IV.1.5.2 - La conductivité, la diffusivité thermique et le coefficient de dilatation thermique :

Ces propriétés sont représentées, respectivement, dans les figures **IV.10**, **IV.11**, **IV.12**.

Nous avons constaté que ces trois propriétés augmentent lorsque la température de la saumure augmente, et si on compare les allures de leurs variations, on remarque que les trois variations représentées suivent la même allure que celle de la température de la saumure, le maximum est donc atteint entre 12^h00 et 14^h00 lorsque le flux de chaleur est important.

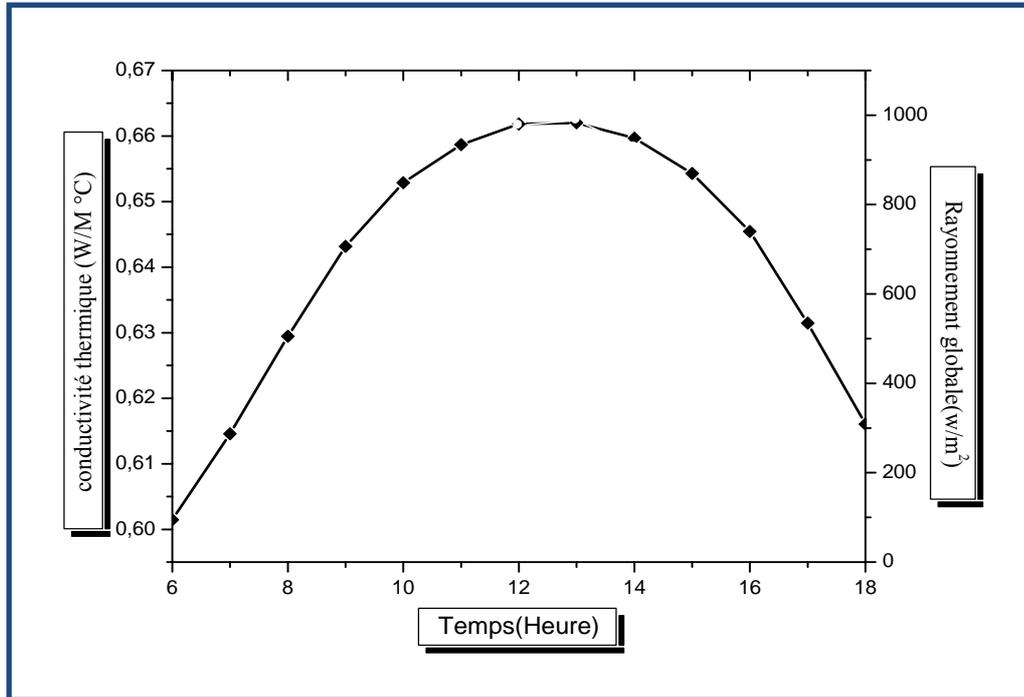


Figure IV 10 Variation temporelle de la conductivité thermique de la saumure

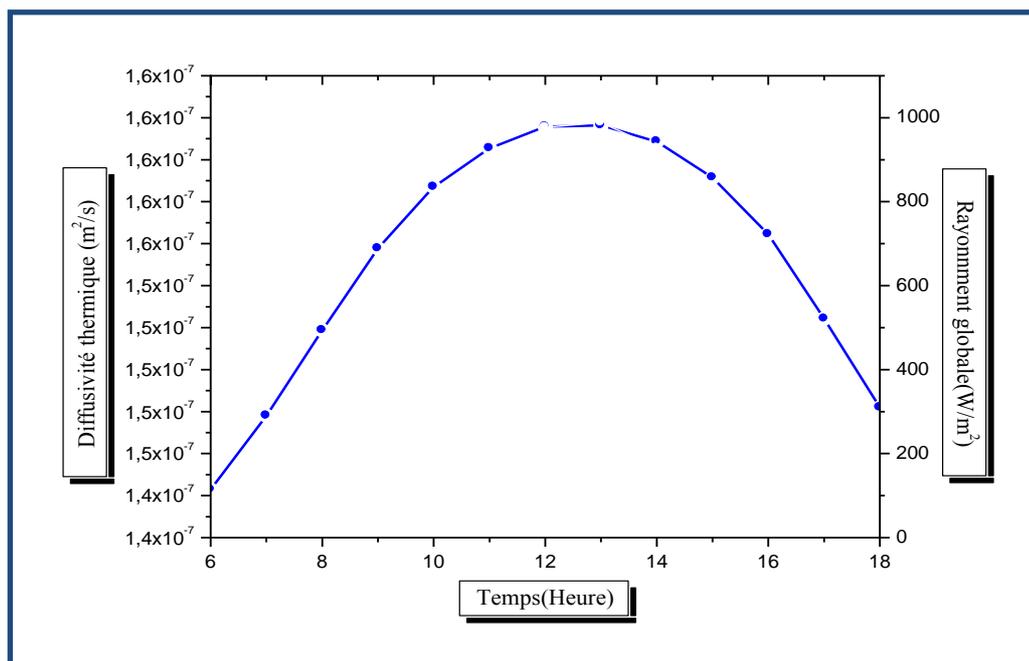


Figure IV.11 Variation temporelle de la diffusivité thermique de la saumure

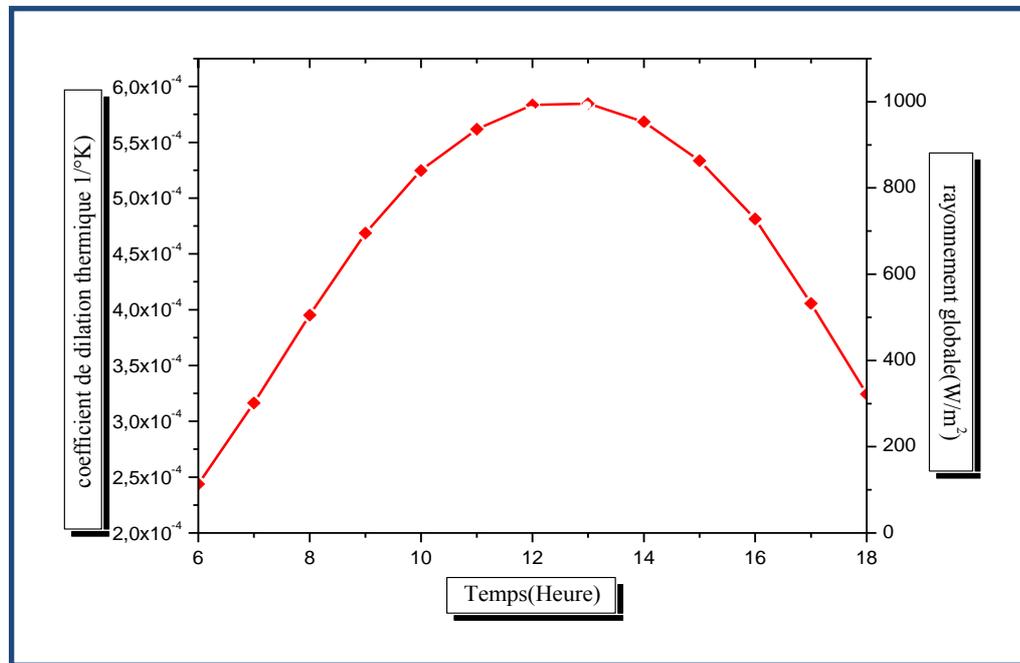


Figure IV 12 Variation temporelle du coefficient de dilatation thermique de la saumure

IV.1.5.3 - Masse volumique, chaleur latente, et viscosité

Ces paramètres sont représentés, respectivement dans les figures IV.13, IV.14, IV.15, IV.16.

On remarque que la chaleur latente, la masse volumique et la viscosité diminuent lorsque la température de la saumure augmente. Autrement dit, la température de la saumure influe inversement sur la chaleur latente, la masse volumique et sur la viscosité, elle atteint le minimum entre 12h00 et 14h00.

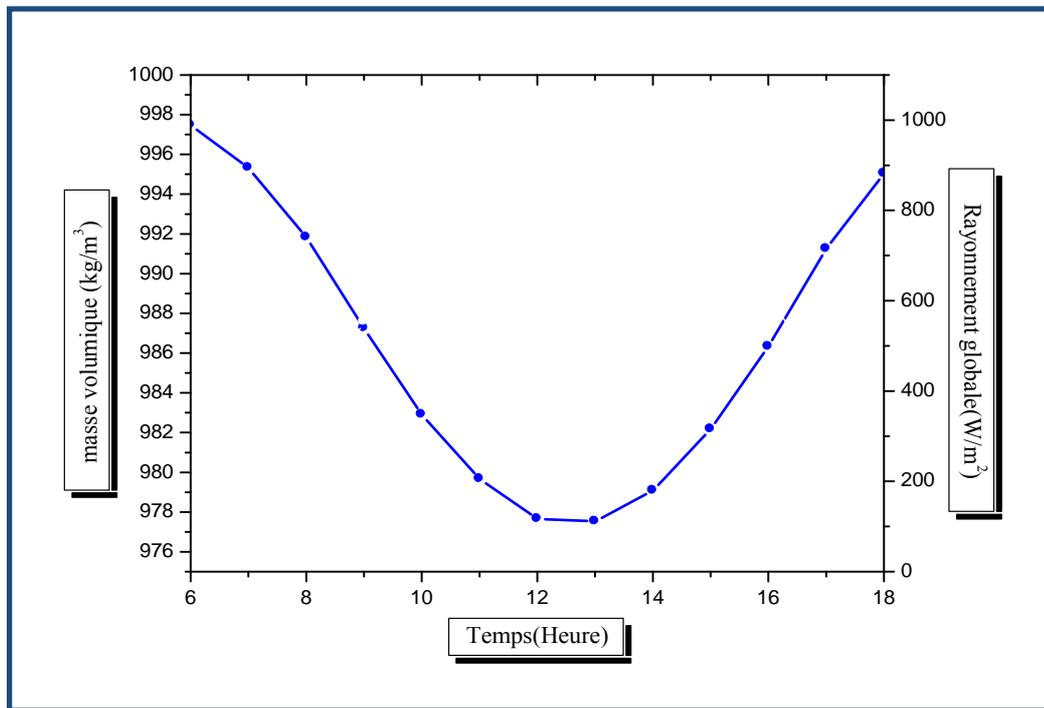


Figure IV 13 Variation temporelle de la masse volumique de la saumure

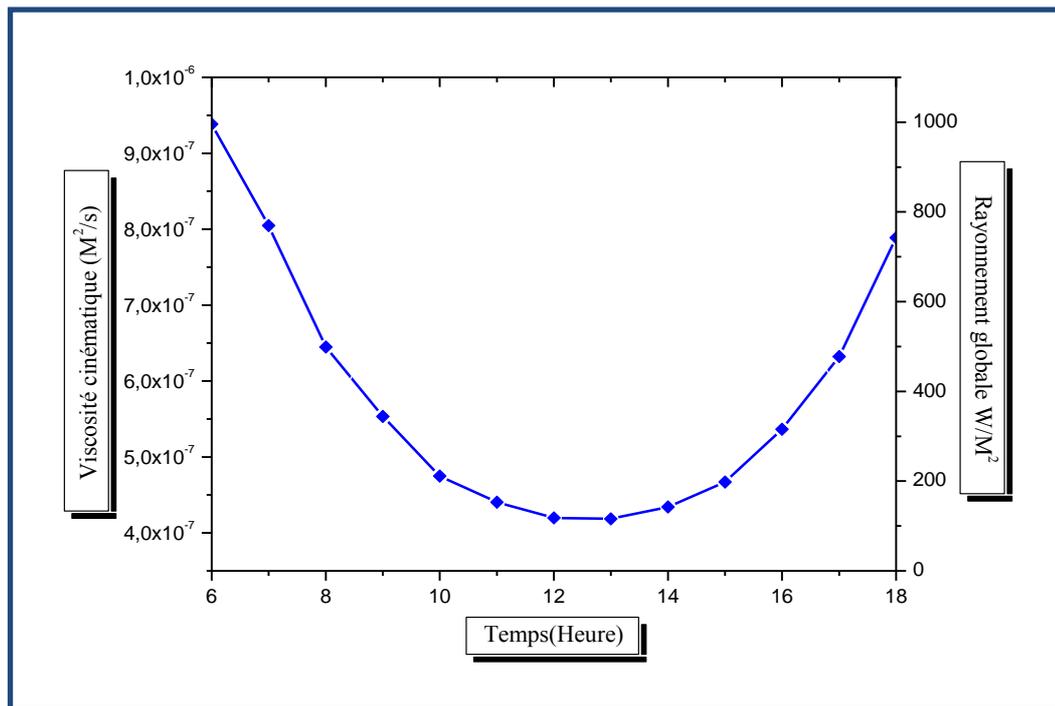


Figure IV 14 Variation temporelle de la viscosité cinématique de la saumure

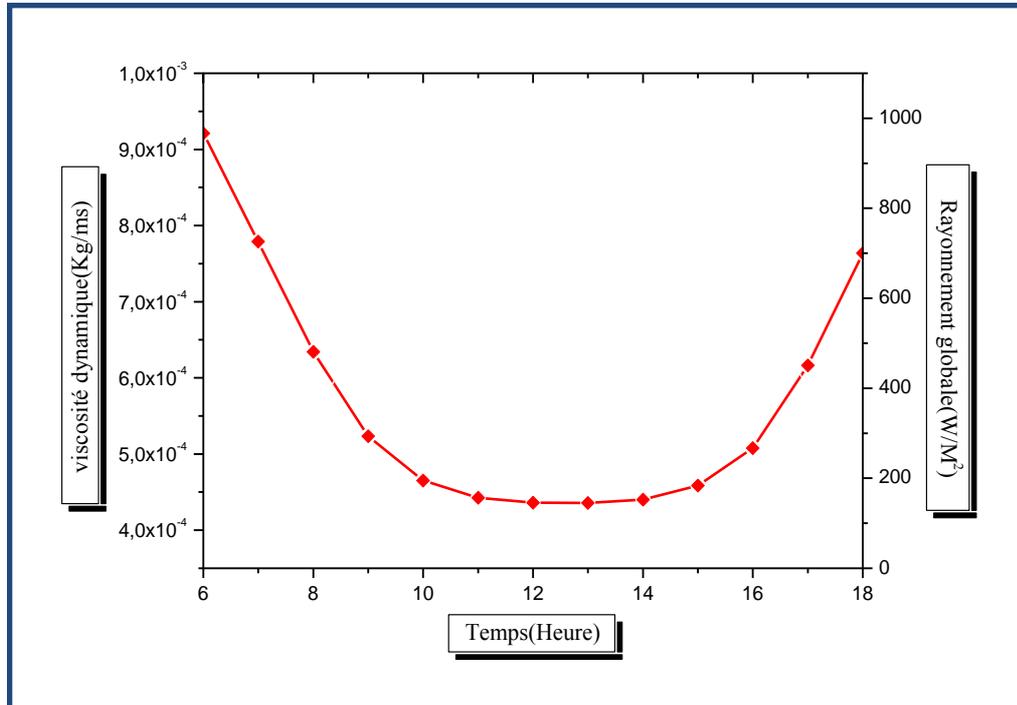


Figure IV 15 Variation temporelle de la viscosité dynamique de la saumure

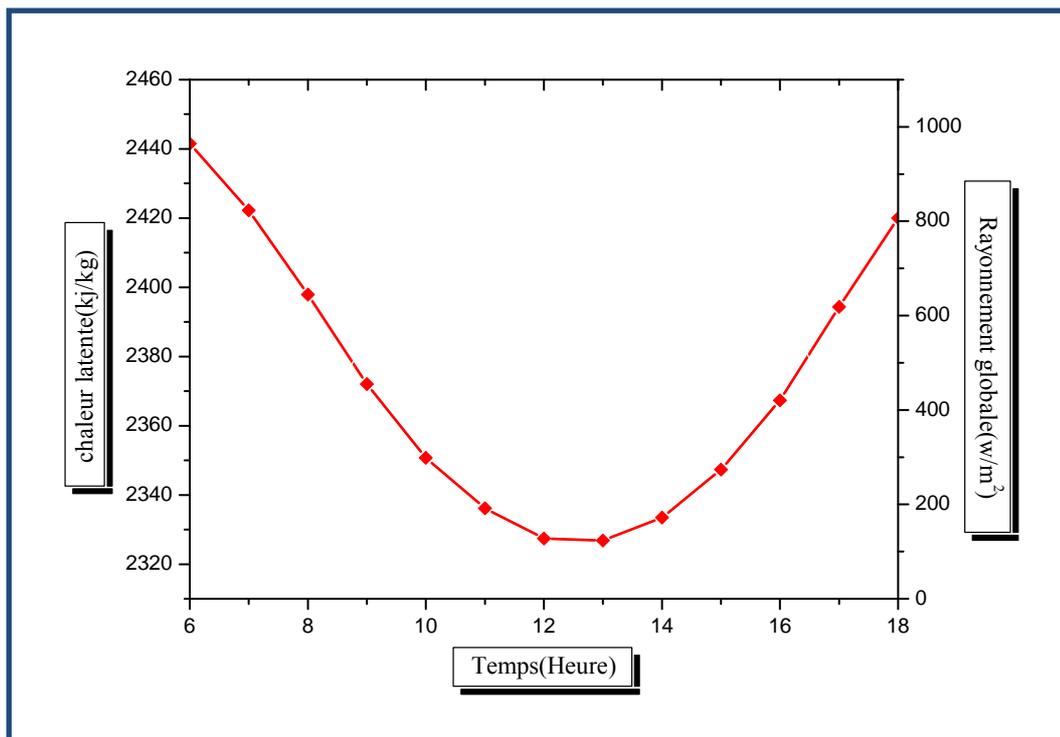


Figure IV. 16 Variation temporelle de la chaleur latente de vaporisation de la saumure

IV.1.5. 3 - Effet de l'écart de température entre la saumure et la vitre :

L'augmentation de l'écart de température entre la saumure et le vitrage, d'où un accroissement de la différence de pression partielle, ce qui conduit à l'augmentation de la quantité d'eau condensée.

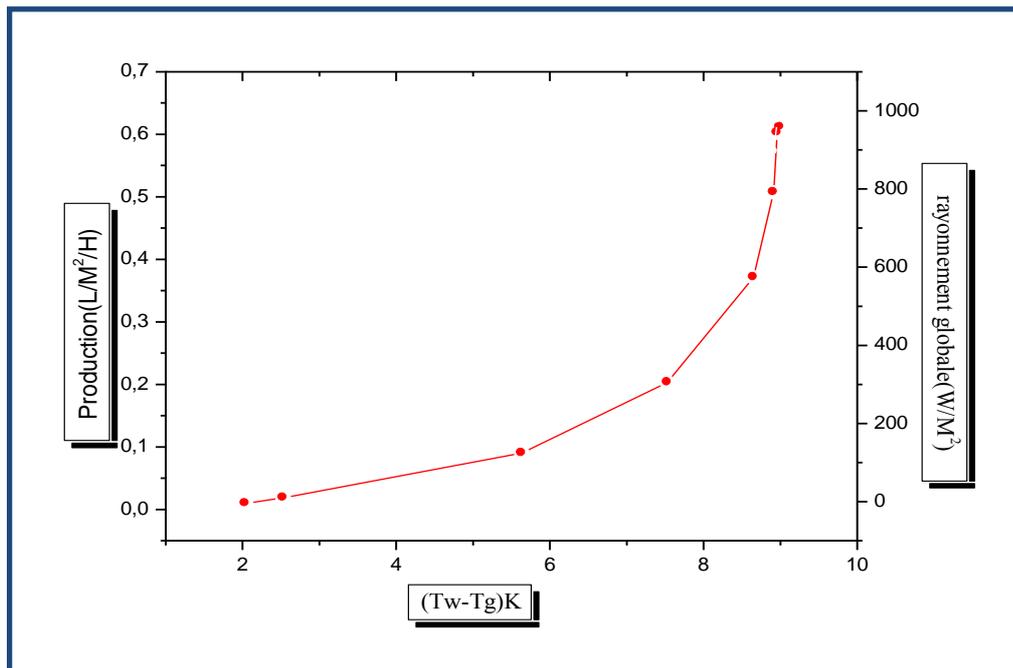


Figure IV.17 Variation de la production en fonction de (Tw-Tg)

IV.2 - Résultat expérimentale:

L'allure générale des courbes, illustre respectivement la production journalière d'eau distillée au cours des jours des mois de : Juillet, Août, Septembre et Octobre atteignant approximativement 1,2 - 1,8 litres/jour avec une profondeur d'eau égale à 1 cm.

On a distillé de l'eau de mer. La production journalière pendant le mois de Juillet s'avéra la plus élevée en raison de la forte irradiation solaire

Pour permettre d'obtenir un meilleur rendement, il faut minimiser les pertes thermiques par conduction en utilisant une bonne isolation des parois du distillateur et de la vitre.

IV.2.1 - Variation de la température ambiante:

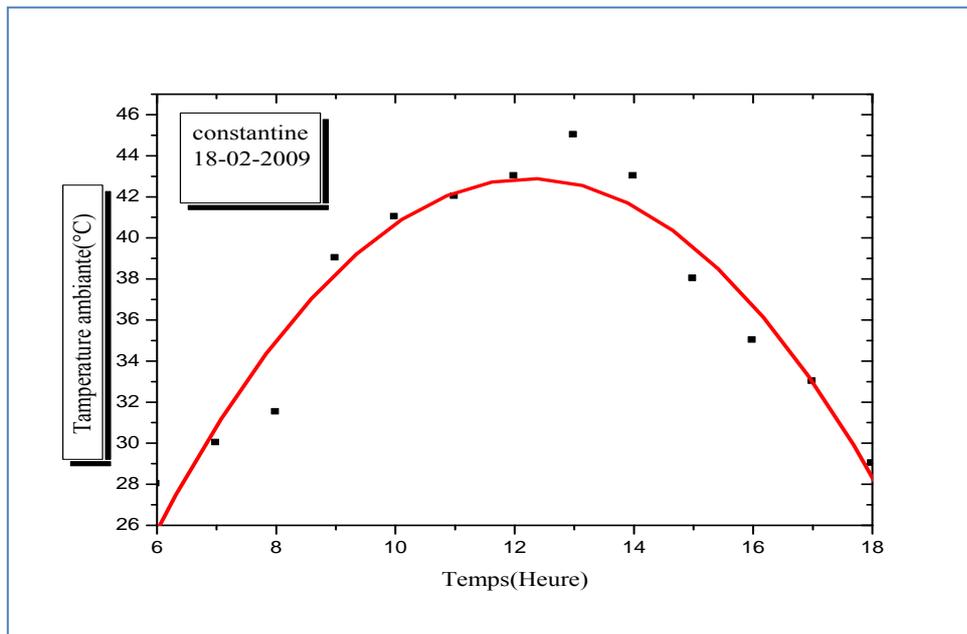


Figure IV.18 Evolution de la température ambiante

La **figure IV.18** montre l'évolution de la température ambiante pendant le jour, par une approximation polynomiale des résultats expérimentaux, la courbe d'approximation est exprimée par l'équation, sous les conditions suivantes : $6 \leq TL \leq 18$ et $15^\circ\text{C} \leq ta \leq 45^\circ\text{C}$

$$Ta = -19.64595 + 9.91394 TL - 0.40724 TL^2$$

IV.2.2 - Quantité d'eau distillée

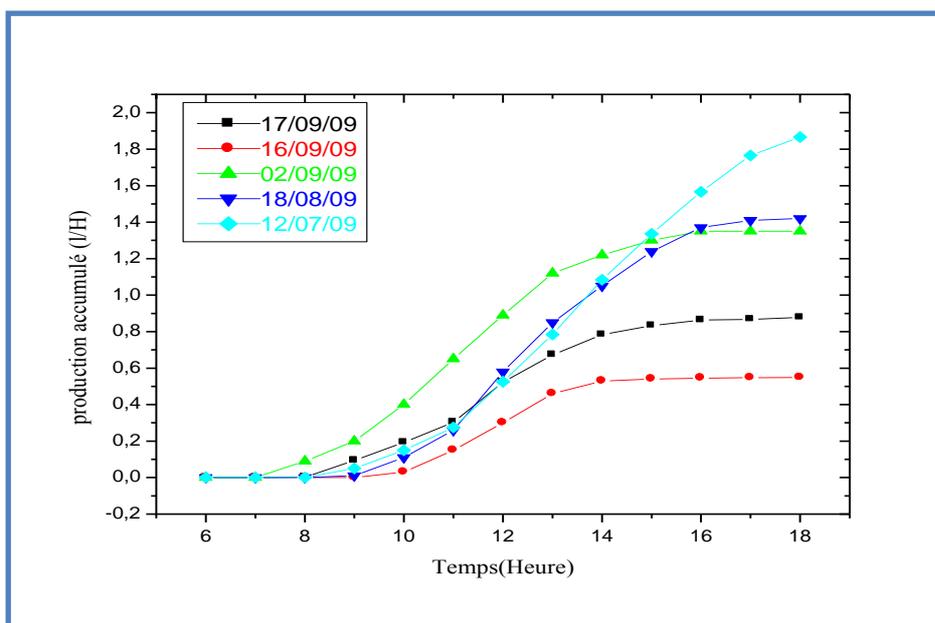


Figure IV.19 Variation de la quantité d'eau distillée accumulée

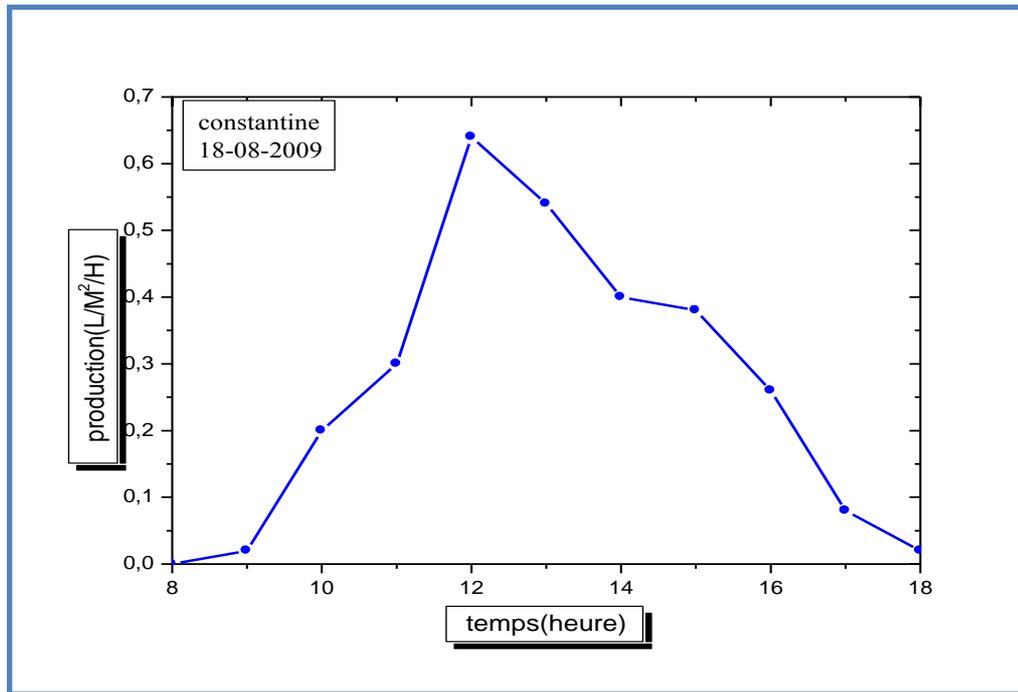


Figure IV.20 Variation de la quantité d'eau distillée dans la journée du (18-08-2009)

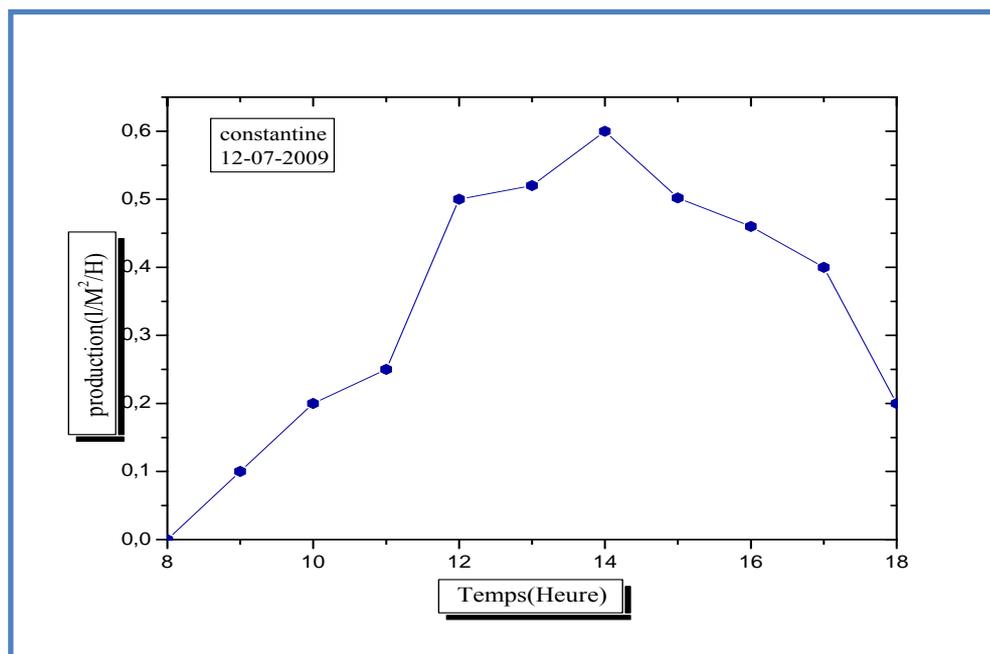


Figure IV.21 Variation de la quantité d'eau distillée dans la journée du (12-07-2009)

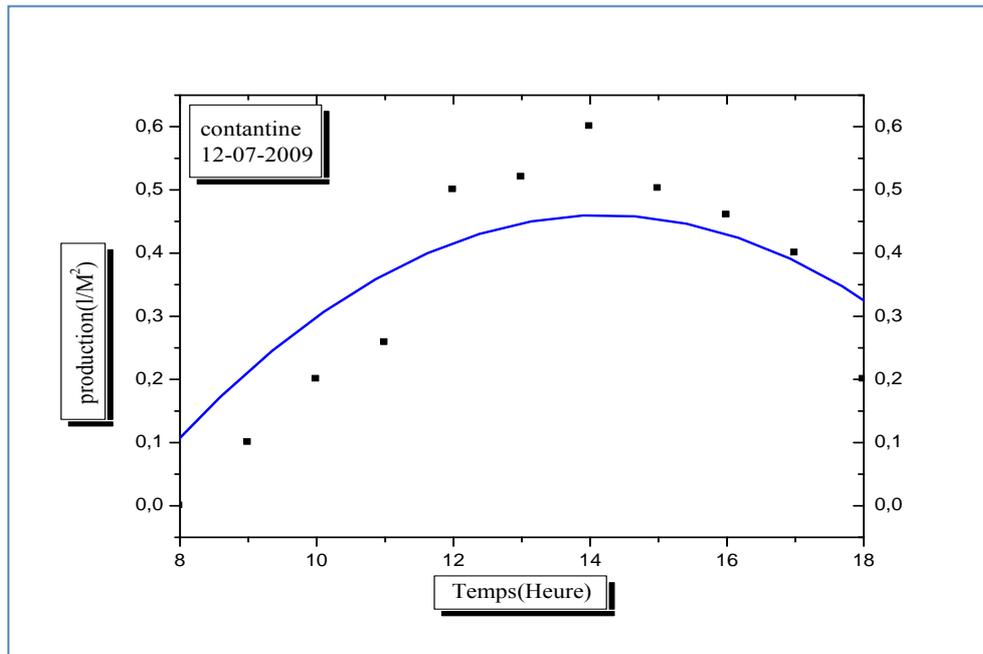


Figure IV.22 - Evolution de la production journalière

La figure IV.22 montre l'évolution de la production journalière, par une approximation polynomiale des résultats expérimentaux, la courbe d'approximation est exprimée par l'équation, sous les conditions suivantes : $6 \leq TL \leq 18$ et $0C \leq mde \leq 0.6$

$$md = -1.38922 + 0.26078 T1 - 0.009919 T1^2$$

IV.2. 3 - Evolution de la production en fonction de la température ambiante:

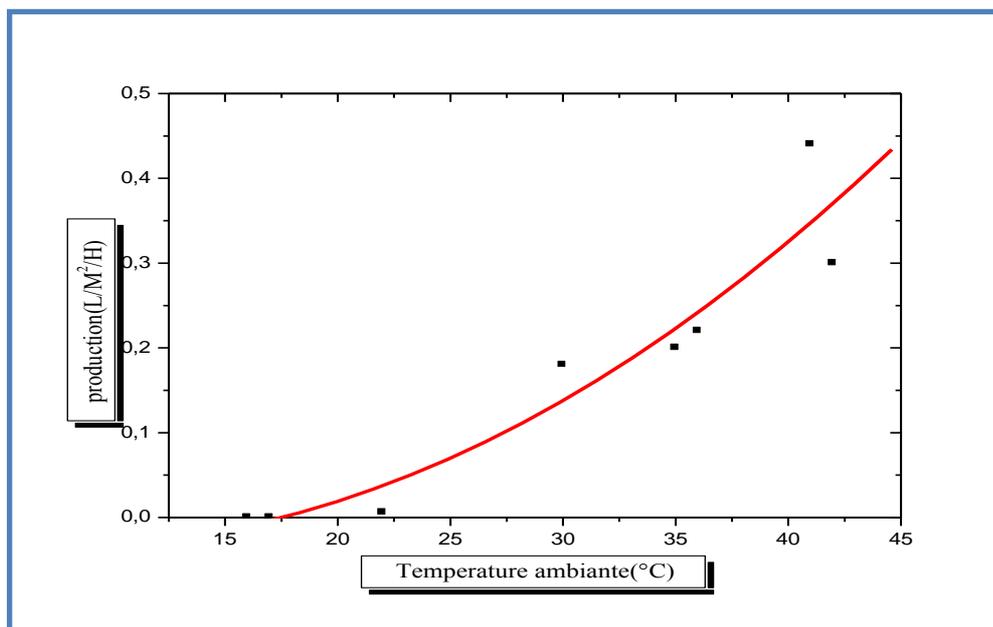


Figure IV.23 Evolution de la production en fonction de la température ambiante

La figure IV.23 montre l'évolution du distillat produit en fonction de la température ambiante, par une approximation polynomiale des résultats expérimentaux, la courbe d'approximation est exprimée par l'équation, sous les conditions suivantes : $0 \leq md \leq 0.6$ et $15^\circ\text{C} \leq ta \leq 45^\circ\text{C}$ $md=6.20544-0.37194Ta+0.00552Ta^2$.

IV.2.4 - Résultats des essais de traitement de l'eau après la distillation :

Les tests effectués après distillation montrent qu'il y a une diminution des grandeurs citées ci-dessus, à cause de l'absence des sels, puisque le pourcentage de la salinité devient 0.2 dans la plupart des tests, lorsqu'on parle de sels on signifie la conductivité, PH et TDS.

Enfin, on peut dire que notre distillateur fonctionne normalement et donne de bons résultats.

Paramètre	Turbidité (NTU)	O ₂ en dissous (mg/l)	Conductivité μs/cm	TDS Mg/l	Salinité Mg/l	PH
Ech n°=1	8.24	1.89	361	196	0.2	6.82
Ech n°=2	2.01	2.30	1426	782	0.8	7.94
Ech n°=3	2.06	2.27	188.7	99.6	0.1	7.52
Ech n°=4	2.20	1.89	149.2	81.4	0.2	6.73
Norme eau potable	0-5	210	400-1000	300-600	0.2-0.4%	6.5-8.5

Tableau VI -1 Propriété de l'eau de mer après distillation

IV. 3 - Comparaison entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux

La comparaison entre la théorie et l'expérience a été faite pendant la période allant de 6 : 00 à 18 : 00 dans laquelle on a pu constater que l'allure des courbes de production en fonction du temps est due au flux solaire transmis par la vitre vers le milieu intérieur du distillateur.

D'après les courbes, on observe qu'il ya un écart entre les valeurs numériques et expérimentales d'environ 15 %, cet écart est probablement du à l'hypothèse faite au chapitre II.

CONCLUSION

Conclusion :

Notre travail est composé de deux axes principales, a prés avoir introduits des notions sur les gisements solaire et les différents méthodes d'estimation du flux solaire, ainsi que les différents types des distillateurs solaire et les autres technique de dessalement de l'eau de mer

Une étude théorique et numérique nous nous avons établir les systèmes d'équation concernant le distillateur à cascade, on a utilisé la méthode de Gauss Seidel pour résoudre ce système d'équation.

Par ailleurs, une campagne de mesure expérimentale de la production de l'eau distillait et la température ambiante à un lieu durant les jours de la saison d'été, la validité de notre travaille a été appréciée en comparant les résultats expérimentale avec ceux donnés par la simulation numérique

A travers les résultats obtenus, concernant la production journalière de l'eau distillée et la température ambiante, on a constaté une différence entre les résultats de la simulation numérique et ceux de l'expérimentale et sa due a la précision de la mesure et d'autre par à l'hypothèse utilisées dans la simulation numérique et aussi les pertes thermiques.

Les résultats expérimentaux qui a été obtenue nous suggèrent à dire que la production d'eau distillée dépend évidemment de l'énergie solaire incidente et aussi la surface absorbante entre autre un volume de 1.8litre de distillat de très bonne qualité a pu récupérer en fin de journée

On constate également un fort gradient de température entre la nappe d'eau et la vitre, ce qui favoris la condensation et l'évaporation

Les voies de recherches futures

Les limites de la distillation solaire évoquées suscitent différentes pistes de recherche. Nous en avons souligné quelques unes au cours des paragraphes précédents, mais certaines voies majeures nous semblent être très intéressantes à développer pour améliorer le rendement de la distillation solaire et d'autre part afin de développer des études théoriques, simulation et modélisation de la distillation solaire :

- ❖ Il s'agit de poursuivre le développement d'un distillateur solaire sous des normes pouvant travailler dans n'importe quelles conditions de travail afin de valider son utilisation pour n'importe quel lieu.
- ❖ Pour augmenter le flux solaire, il est recommandé de mettre les miroirs à côté du distillateur et de concentrer le rayonnement solaire à l'intérieur du distillateur.
- ❖ Etude et analyse pour réduire le rayant réfléchi à partir de la vitre.
- ❖ Introduire de nouveaux matériaux légers et efficaces à bas coût permet de réduire les pertes thermiques et d'autre part de réduire sensiblement le prix de la réalisation du distillateur.
- ❖ L'introduction d'un système de refroidissement autonome pouvant refroidir le vitrage périodiquement dans le but d'augmenter la condensation.

Annexes

Annexe A:**L'eau dans le monde**

Sur le plan mondial, la demande en eau potable de bonne qualité est de plus en plus forte. En effet, la population augmente rapidement et les besoins en eau de l'industrie et de l'agriculture sont de plus en plus élevés [5].

Les besoins en eau sont principalement répartis entre 4 types de consommation:

- ❖ 55% de l'eau consommée sert à fournir de l'énergie (barrage hydroélectrique, refroidissement des centrales nucléaires, énergie géothermique, etc.),
- ❖ 18% est consommée par les particuliers;
- ❖ 15% est utilisée par l'agriculture;
- ❖ 12% est consacrée à un usage industriel [ALA 2004].

Il y a actuellement, pour l'ensemble de la planète suffisamment d'eau pour satisfaire à toutes les utilisations. Toutefois, cette eau n'est pas répartie selon les besoins de chaque région; ainsi, certaines régions sont affectées de pénuries chroniques (désert), alors que d'autres affichent des surplus. Les eaux sont réparties sur le globe terrestre de la façon présentée au **tableau.A 1** [8].

Provenance de l'eau	Quantité (%)
Eau douce de lacs	0.009
Eau de rivières	0.0001
Eau souterraine (près de la surface)	0.005
Eau souterraine (en profondeur)	0.61
Eau des glaciers et les calottes glaciaires	2.15
Eau salée de lacs ou de mers intérieures	0.008
Eau dans l'atmosphère	0.0001
Eau des océans	97.2

Tableau A.1 Répartition des eaux sur le globe terrestre.

On constate rapidement que 99.3 % de l'eau sur la terre est soit trop salée (océans), soit située dans des régions inaccessibles (calottes glaciaires). De plus, le reste de l'eau est

réparti inégalement sur le globe terrestre. Il faut donc, dans certaines régions, envisager de réutiliser les eaux d'égouts, de traiter les eaux saumâtres ou de traiter les eaux de mer.

Avant de classer les eaux, il faut définir les eaux saumâtres et l'eau de mer.

L'eau de mer :

Est l'eau salée des mers et océans de la Terre. Ceux-ci occupent un volume estimé à 1340 millions de km³, ce qui représente 96,4% de la capacité des grands réservoirs d'eau à la surface de la Terre. Ce volume n'inclut pas les eaux souterraines (aquifères), dont 85% des capacités sont plus ou moins salées. L'eau de mer contient environ 35g de sel par litre, c'est l'équivalent d'une petite cuillère à soupe, mais le sel rend l'eau de mer imbuvable [5].

Les eaux saumâtres :

Généralement, on appelle eau saumâtre une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. En fait, la plupart des eaux saumâtres ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/l. Elles se présentent soit, sous forme d'eaux de surface, soit sous forme souterraines.

Lorsqu'on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent, on obtient les données présentées au tableau A-2 [5]

Les eaux saumâtres, qui proviennent habituellement des nappes d'eau souterraines, contiennent le plus souvent de 2 à 10g/l de matière dissoute.

Type d'eau	Salinité (mg/L)
Eau douce	< 500
Eau légèrement saumâtre	1000 - 5000
Eau modérément saumâtre	5000 - 15000
Eau très saumâtre	15000 - 35000
Eau de mer	35000 - 42000

Tableau A-2 : Classification des eaux selon la salinité

Annexe B:**Les nombres adimensionnelles:****B.1 - Nombre de Nusselt:**

La combinaison du coefficient d'échange de chaleur par convection, de la longueur caractéristique et de la conductivité thermique du fluide est appelée module ou nombre de Nusselt .

C'est le rapport du gradient de température dans le fluide en contact immédiat avec la surface au gradient de température de référence il caractérise l'intensité de l'échange de chaleur sur la limite fluide –surface

$$Nu = \frac{\bar{h}c \times L}{\lambda_f} \quad (\text{B-1})$$

$\bar{h}c$: Coefficient de convection thermique [$W.M^{-2}.^{\circ}C^{-1}$]

L: Longueur caractéristique [m]

λ_f : Coefficient de conductivité thermique du fluide [$W.M^{-2}.^{\circ}C^{-1}$]

B.2 - Nombre de Grashoff:

Ce nombre caractérise la transmission de chaleur en convection naturelle, il exprime le rapport entre les forces de viscosité et les forces ascensionnelles créées dans le fluide par les différences de températures qui y règnent [16].

$$Gr = \frac{\beta \times \rho^2 \times g \times L^3 \times \Delta T}{\mu^2} = \frac{\beta \times g \times L^3 \times \Delta T}{\nu^2} \quad (\text{B-2})$$

β : est le coefficient de dilatation thermique rapporte a la température moyenne du fluide

($\beta = 1/T$ pour un fluide parfait) [$1/^{\circ}C$]

g: l'accélération de la chute libre [M/S^2]

L : une dimension caractéristique (par exemple : la hauteur d'une plaque plane verticale) [M]

B.3 - Nombre de Prandtl:

Ce nombre représente le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique : il caractérise la propriété physique du fluide [16].

$$Pr = \frac{\mu \times c_p}{\lambda_f} = \frac{\nu}{a} \quad (\text{B. 3})$$

c_p : La chaleur spécifique a pression constante [$J/Kg.^{\circ}C$]

λ_f : La conductivité thermique du fluide [W/M.°C]

a: La diffusivité thermique [M²/S]

Plus la viscosité est grande est plus l'énergie dépensée nécessaire pour véhiculer le fluide est élevée et plus la diffusivité est grande plus le fluide extrait facilement la chaleur de la paroi.

B.4 - Nombre de Reynolds:

Ce nombre est mesuré de la grandeur relative des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité dans l'écoulement [16].

$$Re = \frac{\rho \times v \times L}{\mu} = \frac{v \times L}{\nu} \quad (\text{B.4})$$

v: Est la vitesse caractéristique du fluide [M/S]

μ: La viscosité dynamique [Kg/M.S]

ρ: La densité du fluide [Kg/M³]

ν: La viscosité cinématique [M²/S]

B.5.-Nombre de Peclet:

Il exprime le rapport des flux thermiques par convection et par conduction dans un échange de chaleur convectif. Ce nombre intervient surtout dans les problèmes d'écoulements à faible nombre de Prandlt: c'est à dire pour les métaux liquides [16].

$$pe = Pr \times Re = \frac{v \times L}{a} \quad (\text{B.5})$$

B.6 - Nombre de Stanton ou de Margoulis:

Ce nombre est un coefficient de transfert de chaleur sans dimension: il exprime le rapport entre le flux thermique total et par convection dans un échange de chaleur convectif [16].

$$st = \frac{Nu}{Re \times Pr} = \frac{q}{\rho \times cp \times L^2 \times \Delta T} \quad (\text{B.6})$$

B.7 - Nombre de Rayleigh:

Il exprime la relation entre le nombre de Grashoff et de Prandlt. Ce nombre peut fournir un critère de passage de la convection naturelle laminaire à la convection naturelle turbulente [16]

$$Ra = Gr \times Pr \quad (\text{B.7})$$

B.8- Nombre de Graetz:

$$Gr = Re \times Pr \left(\frac{L}{D} \right) \quad (B.8)$$

L et D sont des dimensions caractéristiques du conduit.

Annexe C:**Caractéristiques thermophysiques de l'eau et du mélange air –vapeur:****C.1- Caractéristiques thermophysiques de l'eau:**

Dans ce paragraphe, nous avons exprimé les caractéristiques thermophysiques de l'eau en fonction de la température exprimée en °C. [16]

C.1.1- Conductivité thermique(W/M.°C):

$$\lambda = 0.569 + 0.185 \times 10^{-2} \times T - 0.749 \times 10^{-5} \times T^2 \quad (C.1)$$

C.1.2 - Capacité calorifique Cp(j/Kg.°C):

$$Cp = 4216.664 - 3.165 \times T + 0.886 \times 10^{-1} \times T^2 - 0.101 \times 10^{-2} \times T^3 + 0.445 \times 10^{-5} \times T^4 \quad (C.2)$$

C.1.3 - Coefficient de dilatation volumique β[1/°K]:

$$\beta = (-0.884 + 0.188 \times T - 0.26 \times 10^{-2} \times T^2 + 0.252 \times 10^{-4} \times T^3 - 0.975 \times 10^{-7} \times T^4) \times 10^{-4} \quad (C.3)$$

C.1.4 - Chaleur latente de vaporisation Lv [KJ/Kg]:

Une valeur empirique donne avec très bonne approximation la valeur de la chaleur latente de vaporisation pour $0^\circ < T < 200^\circ C$:

$$Lv = 2500.8 - 2.48 \times T \quad (C.4)$$

Formule que l'on peut arrondir avec une erreur négligeable de façon à la rendre plus facile:

$$Lv = 500 - 2.5 \times T \quad (C.5)$$

On peut aussi utiliser la formule suivante:

$$Lv = 4185 \times (597 - 0.56 \times T) \quad (C.6)$$

C.1.5 - Viscosité dynamique μ [Kg/M.h]:

$$\mu = 5.449 - 0.1067 \times T + 7.325 \times 10^{-4} \times T^2 \quad (C.7)$$

C.1.6- Viscosité cinématique ν [M²/S]:

$$\nu = \begin{cases} -3.65 \times T + 1.788 \times 10^{-6} \text{ pour } T \hat{=} [0, 20]^\circ\text{C} \\ -1.725 \times (T - 20) + 1.006 \times 10^{-6} \text{ pour } T \hat{=} [20, 40]^\circ\text{C} \\ -0.875 \times (T - 40) + 0.568 \times 10^{-6} \text{ pour } T \hat{=} [40, 60]^\circ\text{C} \\ -0.587 \times (T - 60) + 0.478 \times 10^{-6} \text{ pour } T \hat{=} [60, 80]^\circ\text{C} \end{cases} \quad (\text{C.8})$$

C.2- Mélange air-vapeur:**C.2.1- Définition:**

Nous allons considérer le mélange air-vapeur d'eau à l'intérieur du distillateur, comme mélange de gaz parfaits et nous utiliserons donc la loi de Dalton qui nous dit que < la pression, l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie d'un mélange de gaz parfaits sont respectivement égales à la somme des pressions partielles, des énergies internes partielles, des enthalpies partielles et des entropies partielles qu'auraient les gaz constituants s'ils occupaient seuls le volume total à la température du mélange. [16]

C.2.2 - Pression partielle:

La pression partielle de l'air humide est donnée par la loi de Dalton:

$$P = P_a + P_v \quad (\text{C.9})$$

P_a : Pression partielle de l'air sec,

P_v : Pression partielle de la vapeur d'eau.

C.2.3 - Humidité relative:

Par définition, l'humidité relative de l'air humide est:

$$H_r = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}} = \frac{m_v \times P_v}{m_{vs} \times p_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (m_v = m_{vs}) \quad (\text{C.10})$$

ρ_v : Masse volumique de la vapeur,

ρ_{vs} : Masse volumique de la vapeur saturée,

m_v : Masse molaire de la vapeur,

m_{vs} : Masse molaire de la vapeur saturée.

C.2.4 - Concentration de la vapeur d'eau dans l'air

On définit la concentration de la vapeur d'eau dans l'air (ou bien la fraction massique de l'air humide) par la relation suivante:

$$C_v = \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378} \quad (\text{C.11})$$

P: Pression atmosphérique.

C.3 - Caractéristiques thermophysiques de l'air – humide

C.3.1 - Conductivité thermique λ_m [W/M.°C]:

$$\lambda_m = \lambda_0 + 0.00476 \times (C_v / 1 - C_v) \quad (\text{C.12})$$

Ou λ_0 : est la conductivité de l'air à la température T, qui peut être approchée par un polynôme de degré trois:

$$\lambda_0 = 0.0243 + (9.7416 \times T - 0.1825 \times T^2 + 0.00227 \times T^3) \times 10^5 \quad (\text{C.13})$$

T est exprimé en °C

C.3.2 - Viscosité dynamique μ_m [Kg/M.S]:

$$\mu = \frac{\rho \times g \times h}{\frac{P_v}{\mu_v} + \frac{P_a}{\mu_a}} \quad (\text{C.14})$$

ph pris à l'unité ,g est l'accélération de la pesanteur.

μ_v et μ_a représentent respectivement la viscosité dynamique de la vapeur d'eau et de l'air sec avec:

$$\mu_v = 30.147 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T}{273}} \times \left(1 + \frac{676}{T}\right)^{-1} \quad [\text{Kg/M.S}] \quad (\text{C.15})$$

$$\mu_a = 25.393 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T}{273}} \times \left(1 + \frac{122}{T}\right)^{-1} \quad [\text{Kg/M.S}] \quad (\text{C.16})$$

P en atm et T en °K

C.3.3 - Viscosité cinématique v_m [M²/S]:

$$v_m = \frac{\mu_m}{\rho_m} \quad (\text{C.17})$$

Ou ρ_m : est la masse volumique du mélange air-vapeur :

$$\rho = \frac{1}{R \times T} (P - 0.378) = \frac{32.989}{T} \left(1 - \frac{0.378 \times C_v}{0.622 + 0.378 \times C_v}\right) \times P \quad (\text{C.18})$$

Ou P et P_v sont exprimés en atm et T en °K

C.3.4 - Chaleur spécifique C_{pm} [j/Kg.°C]:

Considérons une masse m du mélange la température T . Pour élever sa température de dT en une seconde, il faudrait lui fournir une énergie ($M \times C_p \times dT$) que:

$$m \times C_{p_m} \times dT = m_v \times C_{p_v} \times dT + m_a \times C_{p_a} \times dT \quad (\text{C.19})$$

C_{pa} et C_{pv} : étant les chaleurs spécifiques de l'air et de la vapeur d'eau :

$$\text{Comme : } m = m_v + m_a \text{ et } \frac{m_v}{m_a} = \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378 \times P_v} \quad (\text{C.20})$$

L'expression de la chaleur massique du mélange s'écrit:

$$C_{p_m} = C_{p_a} + \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378 \times P_v} \times (C_{p_v} - C_{p_a})$$

(C.21)

$$C_{pv} = 1862.3 \text{ j/Kg.}^\circ\text{C}$$

$$C_{pa} = 1004.4 \text{ j/Kg.}^\circ\text{C}$$

Annexe D:**Discretisation des équations de transferts thermique:**

Les équations des transferts thermiques en régime transitoire, sont discrétisées et ordonnées, par rapport à la température comme suit:

1) Dans la couverture:

$$M_g \times C_{pg} \times \frac{(T_g(j) - T_g^*(j))}{\Delta t} + h_{ga}^r (T_g(j) - T_c) \times A_g + h_{ga}^c (T_g(j) - T_a) \times A_g = P_g + h_{wg}^t (T_w(j) - T_g(j)) \times A_w$$

2) Au niveau de la masse d'eau :

$$M_w \times C_{pw} \times \frac{(T_w(j) - T_w^*(j))}{\Delta t} + h_{wg}^t (T_w(j) - T_g(j)) \times A_w = P_w + h_{bw}^c (T_b(j) - T_w(j)) \times A_b$$

3) **Au niveau de l'absorbeur:**

$$M_b \times C_{p_b} \times \frac{(T_b(j) - T_b^*(j))}{\Delta t} + h_{bw}^c (T_b(j) - T_w(j)) \times A_b + h_{ba}^c (T_b(j) - T_a) \times A_b + h_{bw}^r (T_b(j) - T_c) \times A_b = P_b$$

Après développement, on aura:

1) **Au niveau de la couverture :**

$$\left(\frac{M_g \times C_{p_g}}{\Delta t} + h_{ga}^r \times A_g + h_{ga}^c \times A_g + h_{wg}^t \times A_w \right) \times T_g + T_w(j) \times (-h_{wg}^t \times A_w) = P_g + \frac{M_g \times C_{p_g}}{\Delta t} \times T_g^* + h_{ga}^c \times A_g \times T_a + h_{ga}^r \times A_g \times T_c \quad (D.1)$$

2) **Au niveau de la masse d'eau:**

$$\left(\frac{M_w \times C_{p_w}}{\Delta t} + h_{ba}^c \times A_w - h_{wg}^t \times A_w \right) \times T_w(j) + T_g(j) \times (h_{wg}^t \times A_w) + T_b(j) \times (-h_{bw}^c \times A_b) = P_w + \frac{M_w \times C_{p_w}}{\Delta t} \times T_w^* \quad (D.2)$$

3) **Au niveau de l'absorbeur:**

$$\left(\frac{M_b \times C_{p_b}}{\Delta t} + h_{bw}^c \times A_b + U_b \times A_b \right) \times T_b(j) = P_w + \frac{M_b \times C_{p_b}}{\Delta t} \times T_b^* + h_{bw}^c \times A_b \times T_w + U_b \times A_b \times T_a \quad (D.3)$$

Ces équations forment un système des équations linéaires sous forme:

$$A \times X = B$$

On résoud ce système par les méthodes itératives. On forme la matrice A qui s'écrit comme suit:

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_g \\ T_w \\ T_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix}$$

- $A_{11} = \frac{M_g \times C_{p_g}}{\Delta t} + h_{ga}^r \times A_g + h_{ga}^c \times A_g + h_{wg}^t \times A_w$

- $A_{12} = -h_{wg}^t \times A_w$
- $A_{13} = 0$
- $A_{21} = h_{wg}^t \times A_w$
- $A_{22} = \frac{M_w \times Cp_w}{Dt} + h_{bw}^c \times A_b - h_{wg}^t \times A_w$
- $A_{23} = 0$
- $A_{31} = 0$
- $A_{32} = -h_{bw}^c \times A_b$
- $A_{33} = \frac{M_b \times Cp_b}{\Delta t} + h_{bw}^c \times A_b + U_b \times A_b$
- $B_1 = P_g + \frac{M_g \times Cp_g}{\Delta t} \times T_g^* + h_{ga}^r \times A_g \times T_c + h_{ga}^c \times A_g \times T_a$
- $B_2 = \frac{M_w \times Cp_w}{\Delta t} \times T_w^* + P_w$
- $B_3 = \frac{M_b \times Cp_b}{\Delta t} \times T_b^* + U_b \times T_a \times A_b$

Annexe E:**Résolution des systèmes d'équation linéaires par les méthodes itératives:****E.1- Introduction:**

Les méthodes itératives sont généralement préférées pour les grands systèmes linéaires $A \times T = B$ à matrice A creuse parce qu'elles ne modifient pas la matrice A, et que dans un grand nombre d'applications, A est creuse et présente une structure particulière (tridiagonale, pentadiagonale) ce qui lui permet de ne pas être mémorisée explicitement et d'assurer pratiquement la convergence.

Dans les méthodes élémentaires, la méthode de **Gauss-Seidel** est préférée parce qu'elle consomme moins de mémoire et converge plus vite.

E.2 - Méthode de Gauss Seidel:

On veut résoudre le système linéaire:

$$A \times T = B \quad (\text{E.1})$$

Où;

A : est une matrice carrée d'ordre n;

B; est une matrice colonne;

T: est le vecteur des inconnues; $T = (T_1; T_2; \dots; T_n)$

Ecrivons A sous forme :

$$A = M - N \quad (\text{E.2})$$

Ou:

$$M = D - L \quad (\text{E.3})$$

$$N = U \quad (\text{E.4})$$

Avec

D: Matrice diagonale

L: Matrice inférieure

U: Matrice supérieure

$$A = (D - L) - U \quad (\text{E.5})$$

A partir d'un vecteur initial $T^{(0)}$ on peut écrire:

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

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

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

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

Ou :

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

.....

$$\mathbf{T}^{(k+1)} = \mathbf{D}^{-1} \times \mathbf{L} \times \mathbf{T}^{(k+1)} + \mathbf{D}^{-1} \times \mathbf{U} \times \mathbf{T}^{(k+1)} + \mathbf{D}^{-1} \times \mathbf{B}$$

En développant cette récurrence vectorielle on obtient :

$$\mathbf{T}_1^{(k+1)} = (\mathbf{B}_1 - \mathbf{A}_{12} \times \mathbf{T}_2^{(k)} - \mathbf{A}_{13} \times \mathbf{T}_3^{(k)} - \dots - \mathbf{A}_{1n} \times \mathbf{T}_n^{(k)}) / \mathbf{A}_{11}$$

$$\mathbf{T}_2^{(k+1)} = (\mathbf{B}_2 - \mathbf{A}_{21} \times \mathbf{T}_1^{(k+1)} - \mathbf{A}_{23} \times \mathbf{T}_3^{(k)} - \dots - \mathbf{A}_{2n} \times \mathbf{T}_n^{(k)}) / \mathbf{A}_{22}$$

.....

$$\mathbf{T}_n^{(k+1)} = (\mathbf{B}_n - \mathbf{A}_{n1} \times \mathbf{T}_1^{(k)} - \mathbf{A}_{n2} \times \mathbf{T}_2^{(k)} - \dots - \mathbf{A}_{nn} \times \mathbf{T}_{n-1}^{(k)}) / \mathbf{A}_{nn}$$

E.3- Conditions de convergence:

Le système de ces équations précédentes converge si:

$$1) \quad \left| \mathbf{T}_j^{(k+1)} - \mathbf{T}_j^{k+1} \right| \leq \text{eps} \tag{E.10}$$

$$2) \quad \frac{\left| \mathbf{T}_j^{(k+1)} - \mathbf{T}_j^{(k)} \right|}{\left| \mathbf{T}_j^{(K+1)} \right|} \leq \text{eps} \tag{E.11}$$

Ou bien:

$$3) \quad \sqrt{\sum_{j=1}^n (\mathbf{T}_j^{(k+1)} - \mathbf{T}_j^{(k)})^2} \leq \text{eps} \tag{E.12}$$

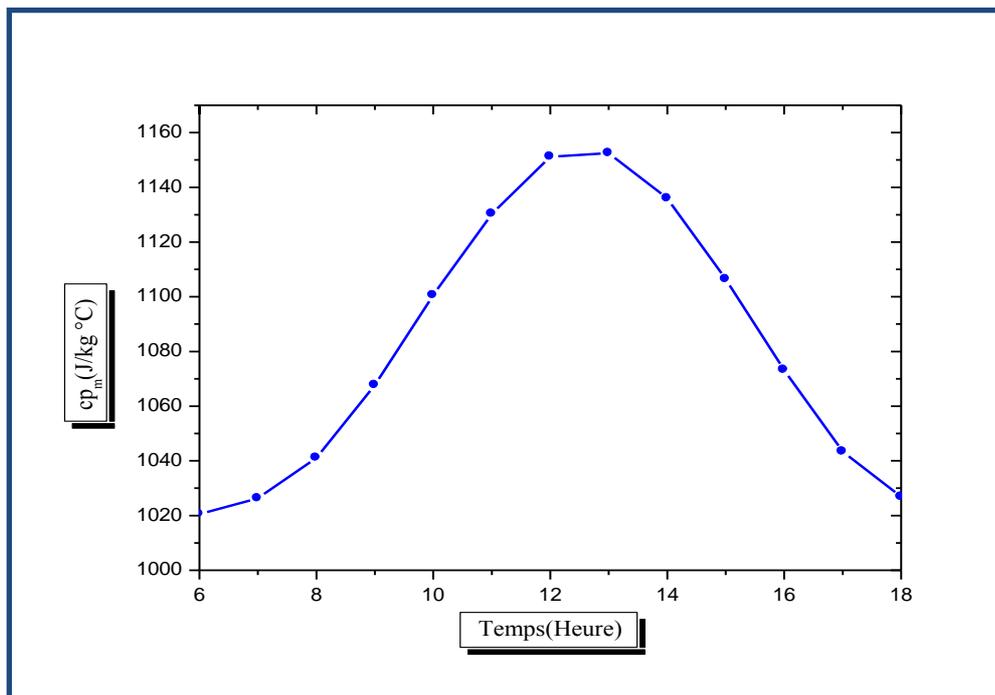
Annexe F:**Variation temporelle des paramètres thermophysiques du mélange air-vapeur:**

Figure F.1 Variation temporelle de la chaleur spécifique du mélange air-vapeur

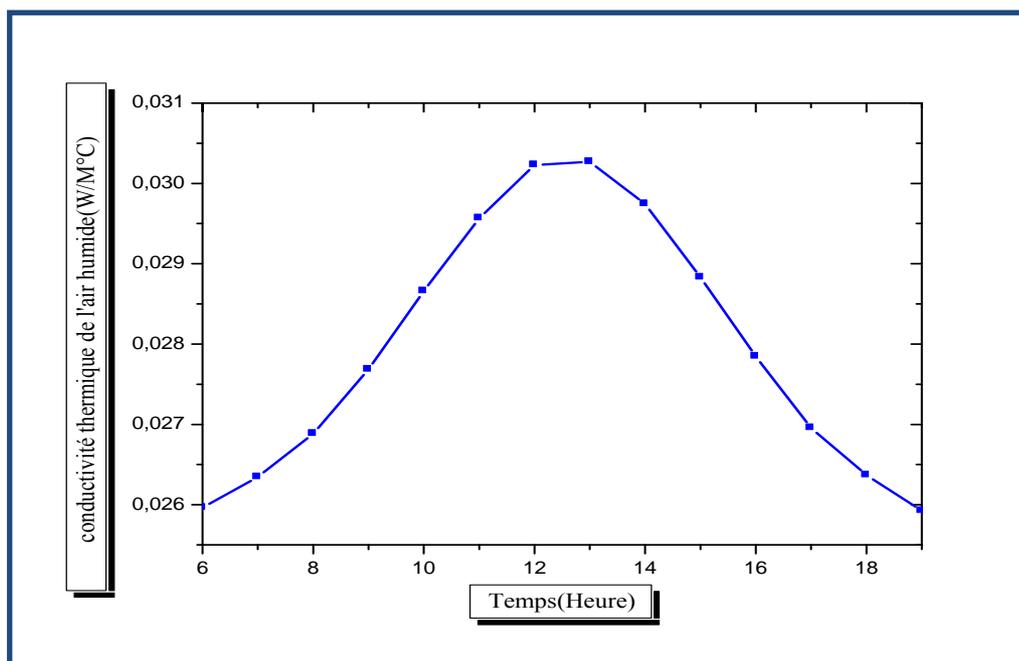


Figure F.2 Variation temporelle de la conductivité thermique du mélange air-vapeur

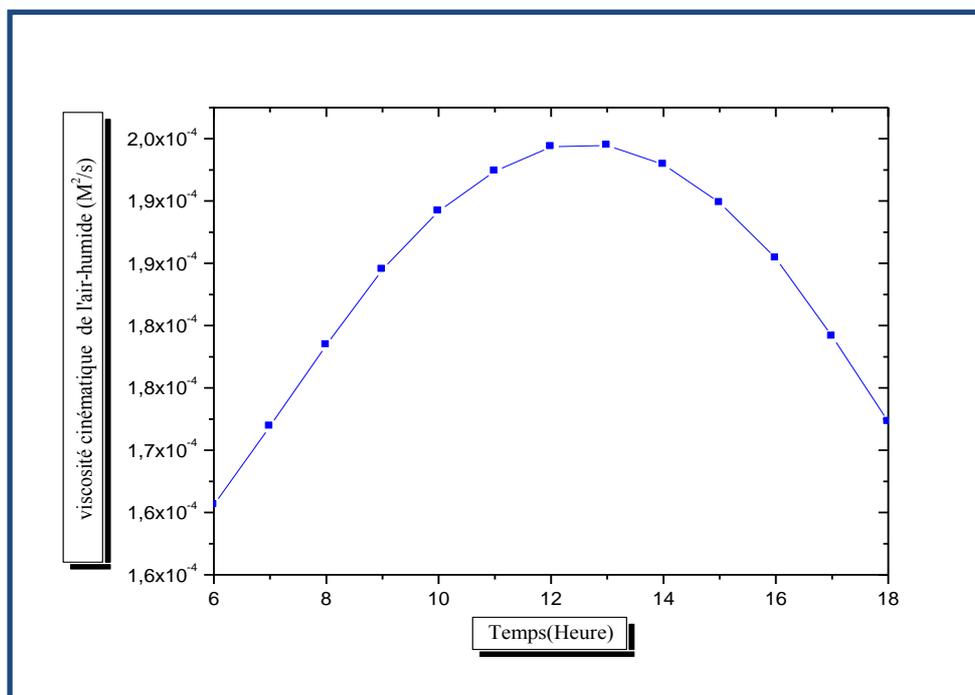


Figure F.3 Variation temporelle de la viscosité cinématique du mélange air-vapeur

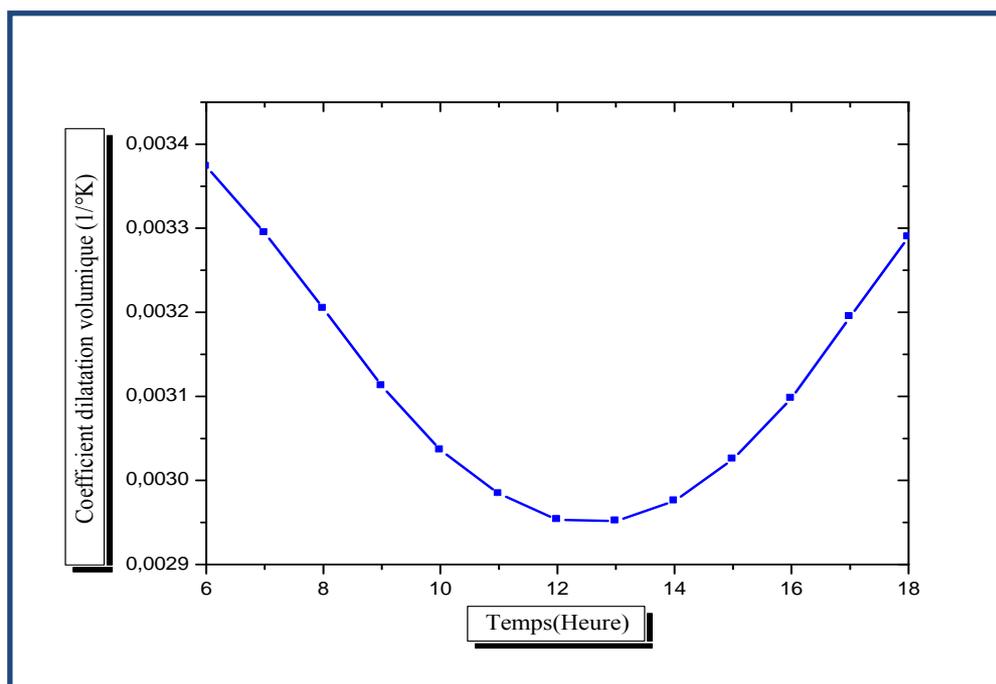


Figure F.4 Variation temporelle du coefficient dilatation volumique du mélange air-vapeur

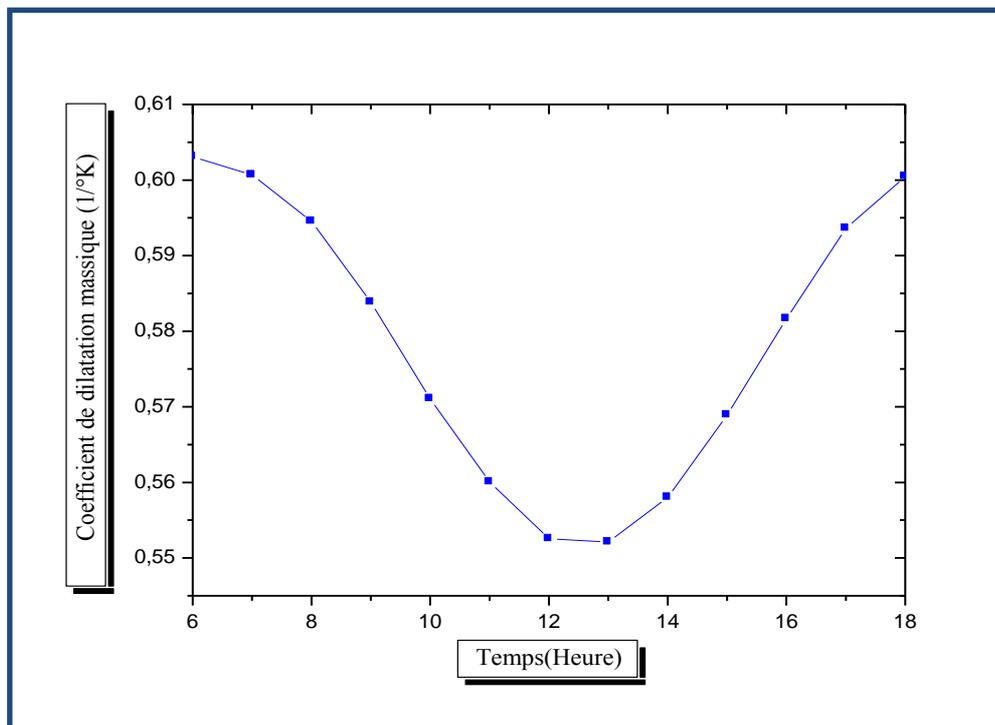


Figure F.5 Variation temporelle du coefficient dilatation massique du mélange air-vapeur

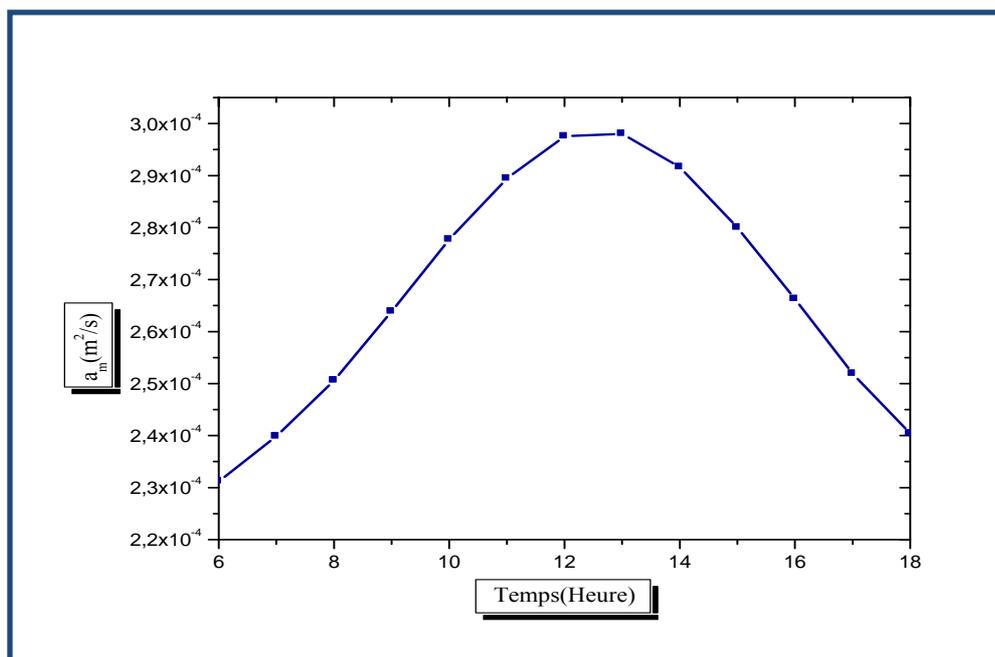


Figure F.6 Variation temporelle de la diffusivité thermique du mélange air-vapeur

Annexe G :**Instrument de mesure du rayonnement solaire:****G.1 - Les bolomètres:**

Appareil mesurant la température à l'aide de résistance coefficient de température. C'est un cristal auquel on couple un thermo-senseur capable de détecter de très faibles variations de température. Placé dans un cryostat, les particules arrivant sur l'appareil déposent leur énergie sous forme d'ionisation, de lumière et de chaleur. On identifie alors le rayonnement arrivant de l'extérieur.

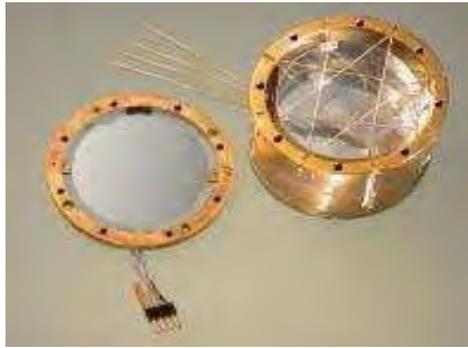


Figure G.1 Les bolomètres

G.2 - Les pyranomètres:

Ce sont des appareils permettant de mesurer le rayonnement incident dans un plan.

Il mesure le rayonnement situé dans **tout l'hémisphère au-dessus de l'instrument**.

A la différence des bolomètres, il utilise des **thermocouples** pour sa mesure de température.

Nous avons ainsi:

G.3 - Le pyrromètre:

Appareil permettant de mesurer la totalité du rayonnement arrivant sur la terre, y compris le rayonnement **infrarouge de grande longueur d'onde** émis par l'atmosphère et le sol. Il couvre donc des longueurs d'onde relativement importante.



Figure G.2 Le pyrromètre

G.4 Le pyréliomètre:

Appareil servant à **mesurer les irradiances directes** + le circumsolaire qui n'est autre que la zone entourant le soleil dans le ciel.

En principe, il doit être maintenue normal aux rayons du soleil. Son principe de fonctionnement est simple: à l'intérieur du tube se trouve un disque d'argent noirci qui va s'élever en température de par le rayonnement solaire qui lui parvient.

On mesure ainsi la température du disque d'argent à intervalles réguliers. Il doit cependant être maintenue normal aux rayons du soleil.



Figure G.3 : Le pyréliomètre

G.5 Les pyranomètres d'Eppley

Il permet de mesurer un rayonnement de tout un hémisphère, dans une longueur d'onde allant de 0.3 à 3 μ m. Il ne capte donc pas les rayonnements infrarouges de grandes longueurs d'onde (dépassant 3 μ m) qui sont notamment émis par l'atmosphère et le sol.



Figure G.4 Les pyranomètres d'Eppley

G.5.1- Principe de fonctionnement du pyranomètres d'Eppley:

Constitué d'une série de thermocouples exposés au rayonnement solaire et dont les **soudures** froides sont maintenues à la température de l'air par conduction et qui délivre donc en sortie une différence de potentiel proportionnelle au flux incident.

Il suffit alors de diviser les valeurs obtenues par son facteur de sensibilité pour en déterminer le flux global mesuré.

En effet le laboratoire d'Energétique, d'Electronique et Procédés (LE2P) dispose de plusieurs types de pyranomètres d'Eppley servant principalement à la mesure du flux global et disposés sur le toit du bâtiment S2 près de certains équipements comme la station météo ou encore le chauffe eau solaire. Cela permet de pouvoir caractériser les performances de l'équipement et donc de son rendement.

Cependant, l'information la plus intéressante pour cette caractérisation n'est autre que le rayonnement direct lui-même.

Bien évidemment, la mesure de ces flux dépend grandement de l'environnement ainsi que des conditions météo, mais aussi de l'appareil de mesure.

G.6 Héliographe: Instrument de mesure et d'enregistrement de la durée d'insolation.

Annexe H:

Analyses physico-chimiques de l'eau:

Les paramètres à analyser sont choisis en fonction de l'objectif recherché.

H.1 - La température:

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau.

La température doit être mesurée in situ. Les appareils de mesure de la conductivité ou du pH possèdent généralement un thermomètre intégré.

H.2- Conductivité:

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau.

La conductivité est également fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente. Les résultats doivent donc être présentés pour une conductivité équivalente à 20 ou 25°C. Les appareils de mesure utilisés sur le terrain font généralement la conversion automatiquement.

Ce paramètre doit impérativement être mesuré sur le terrain. La procédure est facile, et permet d'obtenir une information très utile pour caractériser l'eau (χ à 25°C).

$\chi = 0.005 \mu\text{S/cm}$	Eau déminéralisée
$10 < \chi < 80 \mu\text{S/cm}$	Eau de pluie
$30 < \chi < 100 \mu\text{S/cm}$	Eau peu minéralisée, domaine granitique
$300 < \chi < 500 \mu\text{S/cm}$	Eau moyennement minéralisée, domaine des roches carbonatées (karst)
$500 < \chi < 1000 \mu\text{S/cm}$	Eau très minéralisée, saumâtre ou saline
$\chi > 30000 \mu\text{S/cm}$	Eau de mer

Comme la température, des contrastes de conductivité mesurés sur un milieu permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélange ou d'infiltration.

La conductivité est également un des moyens de valider les analyses physicochimiques de l'eau: la valeur mesurée sur le terrain doit être comparable à celle mesurée au laboratoire.

H.3 - pH:

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples, dont la température et l'origine de l'eau.

$\text{pH} < 5$	- Acidité forte, $\text{pH}_{\text{coca cola}} = 3$, $\text{pH}_{\text{jus d'orange}} = 5$ - Présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
$\text{pH} = 7$	pH neutre
$7 < \text{pH} < 8$	Neutralité approchée, majorité des eaux de surfaces
$5.5 < \text{pH} < 8$	Eaux souterraines
$\text{pH} > 8$	Alcalinité, évaporation intense

Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain, à l'aide d'un pH mètre ou par colorimétrie (bandelettes peu précis).

H.4 - Turbidité:

Elle permet de préciser les informations visuelles de la couleur de l'eau. La turbidité est causée par les particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques ...). Les désagréments causés par une turbidité auprès des usagers est relative: certaines populations habituées à consommer une eau très colorée n'apprécient pas les qualités d'une eau très claire. Cependant, une turbidité forte peut permettre à des micro-organismes de se fixer sur les particules en suspension: la qualité bactériologique d'une eau turbide est donc suspecte.

Elle se mesure sur le terrain à l'aide d'un tube en plastique transparent.
Unités: 1 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) = 1 JTU (Jackson TU) = 1 FTU (Formazin TU).

Les classes de turbidités usuelles sont les suivantes:

NTU < 5	Eau incolore
5 < NTU < 30	Eau légèrement colorée
NTU > 50	Eau colorée
NTU > 200	Eau de surface "Africaine"

H.5 Ions majeurs:

La minéralisation de la plupart des eaux est dominée par 8 ions, appelés couramment les majeurs. On distingue les cations: Calcium, Magnésium, Sodium et Potassium, et les anions: Chlorure, Sulfate, Nitrate, et bicarbonate.

H.6 - Oxygène dissous:

L'eau absorbe autant d'oxygène que nécessaire pour que la pression partielle d'oxygène dans le liquide et l'air soit en équilibre. La solubilité de l'oxygène dans l'eau est fonction de la pression atmosphérique (donc de l'altitude), de la température et de la minéralisation de l'eau: la saturation en O₂ diminue lorsque la température et l'altitude augmente.

La concentration en oxygène dissous est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie, et donc dans les phénomènes de dégradation de la matière organique et de la photosynthèse.

C'est un paramètre utilisé essentiellement pour les eaux de surface. Au niveau de la mer à 20°C, la concentration en oxygène en équilibre avec la pression atmosphérique est de 8.8 mg/l d'O₂, ou 100% de saturation. Une eau très aérée est généralement sursaturée en oxygène (torrent), alors qu'une eau chargée en matières organiques dégradables par des micro-organismes est sous saturée. En effet, la forte présence de matières organiques dans un plan d'eau par exemple, permet aux microorganismes de se développer tout en consommant de l'oxygène.

L'oxygène dissous est donc un paramètre utile dans le diagnostique biologique du "milieu eau".



Références bibliographiques

- [1] **R, Bernard, G Merguy, M.Schwartz**, Le rayonnement solaire : conversion Thermique et application .Technique et documentation ,deuxième édition -1980.
- [2] **Rahmani Rym** Rendement d'un distillateur solaire à plusieurs étages effet de certain paramètre thermophysique sur le rendement, thèse magister université mentouri Constantine (2007).
- [3] **M A S Malik, G N Tiwari ,A Kumar,M s sodha , solar** distillation oxford, pergamon press (1982).
- [4] **A. Sadi Le Dessalement Solaire - Considérations Techniques** Revue. Energie. Renouvelable. : Chemss pp. 91-97,2000
- [5] **Fedali saida** modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales:thèse magister université Batna 2008.
- [6] **Boukerzaza nassima** étude des pertes thermique sur les caractéristiques de Fonctionnement d'un distillateur solaire .thèse magister université mentouri de Constantine (2005)
- [7] **Tchinda.R.et Kaptoum,E.** simulation numérique des performances d'un distillateur solaire fonctionnant en mode indirect .Afreican journal of science and technology (AJST) science and engéeneering series vol.5, no, 1, pp.79-91,2004
- [8] **Boualatfi yamina** investigation de la performance d'un distillateur solaire, thèse magister Université d'Ouargla 2004.
- [9] **Dossier thématique** –la cité de la mer –Technopole Cherbourg-Normandie /Mars 2005.
- [10] **Alain Maurel Consultant**, atelier plan bleu/meditep, Eau, énergie et changement Climatique en méditerrané, Carthage TUNISIE –lundi 17 décembre 2007
- [11] **Frederic Livet**; Besoins et Procèdes pour le dessalement de l'eau de SIMP, UMR CNRS 5266, INPG-UJF, mer, BP 75 38402-St Martin d'Herès, France 15 Novembre 2007.
- [12] **Zineb A. Maiche**, Dessalement de l'eau de mer en Algérie, El watan, 30/1/2008.
- [13] **O.K. Buros** the ABCs of Desalting, P.O.Box241325, Denver, Colorado, 80224, Etats-Unis 1990.

- [14] **L.Cherrared et hamid**, Influence de la nature du vitrage sur la production journalière d'un distillateur solaire, revue énergie renouvelable : physique énergétique pp 69-71,1998.
- [15] **L. Cherrared**, Amélioration du Rendement d'un Distillateur Solaire à Effet de Serre, Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Revue. Energie. Renouvelable, Valorisation pp 121-124,1999
- [16] **Zaidi halima**, étude et optimisation des paramètres thermophysique en vue l'amélioration de la performance d'un distillateur solaire, thèse magister, université mentouri 2006
- [17] **V .Velmurugan, s, senthil, kumaran, V.niranjan prabhi, and K, srithar**, productivity enhancement of stepped solar still-performance analysis, thermal science. .vol.12 No, pp, 153-163,2008.
- [18] **A. Khedim**, Mesure et Caractérisation Thermodynamique d'un Nouveau Système Solaire de Dessalement de l'Eau de Mer avec Récupération de Chaleur; Institut Solaire de Revue Energie. Renouvelable. 11èmes Journées Internationales de Thermique 1-12, 2003
- [19] **Ahmed Khedim, Klemens Scharzer, Christian, Christian, ChristophMuller**, Production décentralisée de l'eau potable à l'énergie solaire, Desalination 168 pp 13-20, 2004.
- [20] **Abdulhaiy M.Radhan**, Transient analysis of a stepped solar for heating and humidifying greenhouses, Désalination 161 89-97,2004.
- [21] **M.Sakthivel and S.Shanmugasundaram**, Effect of energy storage medium (black granite gravel) on the performance of a solar still .Ineternational journal of energy research, published online in Wiley Inter –science,6 join 2007.
- [22] **Omar O.Badran .Mazen M Abu –Khader**. Evaluating thermal performance of a single slope still, Heat Mass Transfert 43:985-995, 2007.
- [23] thermique solaire, paris 2007.

- [24] **Claude Delannoy** programmé en fortran 90 troisième tirage 2000.
- [25] **V. Velmurugan , M. Gopalakrishnan , R. Raghu , K. Srithar** , Single basin solar still with fin for enhancing productivity, *Energy Conversion and Management*, 49, pp,2602–2608,2008.
- [26] **A.A. El-Sebaï , A.A. Al-Ghamdi, F.S. Al-Hazmi, Adel S. Faidah**, Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium, *Applied Energy* 86 1187–1195,2009.
- [27] **Himet S Aybar, Fuat Egelioglu, U.Atikol** An experimental study on an inclined solar water distillation system, *Desalination* 180,pp 285-289, 2005.
- [28] **G.M. Cappelletti**, An experiment with a plastic solar still, *Desalination*,pp 142 221-227. 2002.
- [29], **Soteris A. Kalogirou**, Seawater desalination using renewable energy sources, *Elsevier Progress in Energy and Combustion Science* 31,pp 242–281,2005.
- [30] **P .Valsaraj** an experimental study on solar distillation in a single slope basin still by surface heating the water mass, *Renwable Energy* 25 ,pp 607-612,2002.
- [31] **Hassan E.S. Fath***, **H.M. Hosny**, Thermal performance of a single-sloped basin still with an inherent built-in additional condenser, *Desalination* 142 ,pp 19-27,2002.
- [32] **M, Boukar et A, Harmim** production d'un distillateur solaire couple à un capteur plan en Milieu saharien, *R, Energ. Ren. : Valorisation* pp 91-96,1999.
- [33] **A. Deliou, N.Bessas, Z, Belgroun, H. Aburideh, A.Lounis et A. Chikouche**, Etude expérimentale des caractéristique d'un distillateur solaire à effet de serre, *R, Energ.Ren CICM*, 08 sousse109-18, 2008.
- [34] **IDAM Skikda (Alger)** cours pour le personnel d'exploitation et d'entretien 2008.

- [35] **Sotehi oulid** étude des caractéristiques de fonctionnement et de performance d'un distillateur solaire, thèse magister Constantine 2009.
- [36] **Ch. Perrin de brichambaut, Ch.Vauge.** Le gisement solaire évaluation de la ressource énergétique. Edit Technique et Documentation, Paris, France 1981.
- [37] **M.Bailly** .thermodynamique technique 1.chaleur principe, gaz et vapeurs Bordas paris-Montréal 1971.
- [38] **B .K.Koffi, D, K, Konan, R.K.N Guessan.** Modelling of solar still for Production of Pure Water in the Abidjan Zones, Research Journal of Physics 3(1):5-13, 2009.
- [39] **Bassam A/K Abu-Hijleh , Hamzeh M. Rababa-h** Experimental study of a solar still with sponge cubes in basin, Energy Conversion and Management 44 pp 1411–1418,2003.
- [40] **Mission économique d'Alger,** Les énergies renouvelables en Algérie, Fiche Synthèse, avril 2009.

Résumés

Summary

The solar distillation is a separation process as simple. In this study, we made a theoretical and experimental study of a solar distiller cascade greenhouse at reduced cost. This device is intended to distill salt water for rural consumers. first we did a literature review on solar stills ,quoting the news from the distillers and a program to calculate several parameters such as temperatures ,the overall effectiveness and internal efficiency and factor performance and we presented the design of solar still (the metal box with insulation layer on the outside and bottom of the basin (glass wool) is closed by a glass tilted at 30. °).In the second phase we presented the results of tests on conventional distiller, where a series of tests conducted during the summer on a less than seawater to identify its parameters, The daily output of solar still is between 1.2 and 1.8litre/jour for a surface of the absorber around 0.436M2 .all the dissolved solids (TDS), conductivity and PH of the water was measured. Finally we present an assessment of the cost and performance of our design.

Keywords

Cascade solar still, Solar Energy, Design

ملخص

التقطير الشمسي هو واحد من ابسط العمليات الفصل ، في هذه الدراسة قمنا بانجاز و اختبار مقطر متعدد الأحواض بضاهرة الاحتباس الحراري ذات كلفة منخفضة . هذا المقطر مخصص لتقطير مياه البحر، في البداية أنجزنا برنامج معلوماتي لحساب درجات الحرارة ، الفاعلية الإجمالية و الداخلية ، معدل مجموع التكيف و عامل الأداء ثم في المرحلة الثانية قمنا بتصميم المقطر الشمسي الذي هو عبارة عن صندوق من الحديد مغلق بواسطة لوح زجاجي مائل بزاوية 30° ، ثم قمنا بعدة تجارب على هذا المقطر خلال أيام الصيف من اجل تحديد مختلف القيم المقطرة و المردود اليومي للمقطر الشمسي المتعدد الأحواض، الماء المستعمل هو ماء البحر حيث بلغت نسبة الماء المقطر بين 1.2 الى 1.8 لتر /اليوم لأجل مساحة الممتص 0.436 م^2 . بعد ذلك قمنا بقياس العناصر الفيزيائية والكيميائية لهذا الماء المتحصل عليه، جميع المواد الصلبة (TDS)، الناقلية و درجة حرارة الحموضة وفي الأخير قدمنا تقيما بشأن التكلفة والمردود لهذا المقطر الشمسي

الكلمات الرئيسية مقطر شمسي، الطاقة الشمسية، تصميم

ETUDE D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE A CASCADE

Résumé

Dans cette étude, nous intéressons à la réalisation et l'expérimentation d'un distillateur solaire à cascade à effet de serre à coût réduit. Cet appareil est destiné à distiller des eaux salées pour les consommateurs ruraux. En premier lieu, nous présentons une synthèse bibliographique sur les distillateurs solaires, une citation des nouveautés relatives aux distillateurs solaires, une étude analytique et théorique de notre dispositif et enfin un programme permettant de calculer plusieurs paramètres tel que : les températures, l'efficacité globale et interne, le rendement et le facteur de performance et nous présentons la conception du distillateur solaire. Les résultats des essais sur notre dispositif, où une série de tests à été effectuée durant les moins d'été sur l'eau de mer pour voir l'évolution des différents paramètres. Le rendement journalier du distillateur solaire est de 1.8litre/jour pour une surface de l'absorbeur de 0.436 m². Toutes les matières solides dissoutes (TDS), la conductivité et le PH de cette eau ont été mesurées. Enfin nous présentons un bilan sur le coût et le rendement de notre conception.

Mots clés :

Distillateur solaire à cascade, Énergie solaire, Conception
