

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

**Université d'Adrar**  
**Faculté des sciences et de la technologie**  
**Département des sciences de la matière**



**Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'Obtention du Diplôme de**  
**Master en Physique Energétique**

# Thème

**Modélisation et Analyse des Performances Energétiques**  
**d'un Distillateur Thermosolaire à Cascades à Simple Effet**  
**sur Site d'Adrar.**

**Soutenu le :3/10/2013**

**Présenté par :**

LARKANI Naima

**Membres de jury :**

**Président :**

Dr HAMOUDA Messaoud (Univ.d' ADRAR)

**Encadré par :**

Mr. KHELIFI CHERIF (CHR  
URER.MS d'Adrar)

**Examineurs**

Mr.FERROUDGI Fateh (A.R  
URER.MS Adrar)

# Remerciement

*-Avant tout je remercie mon dieu tout Puissant  
pour m'avoir accordé le courage, la volonté  
et la patience pour terminer ce travail*

*- Je remercie sincèrement monsieur Messoud  
HAMOUDA directeur URER.MS Adrar pour tous  
son aide*

*- Je remercie également monsieur **KHELIFI Cherif**  
Chargé de Recherche en Héliotechnique URER.MS Adrar*

*- Il m'est aussi impossible d'oublier tous les enseignant  
Faculté des sciences et de la technologie surtout monsieur  
T.BOUSSKAIA et monsieur B.OMMARI.*

*Je remercie particulièrement mes amis et tous ceux  
qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration  
de ce mémoire.*

*Enfin je remercie mes parents et tous  
ma famille qui sont encouragés pour  
terminer ce travail*

**Naima**





# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail:*

*A Ma mère ;*

*A Mon père ;*

*A mes chers frères, A ma chère sœur Et toute la famille;*

*A tout mes voisins;*

*A Tous mes amis et collègues ;*

*Tous ceux qui me sont chers*

*Naima.*

## Modélisation et Analyse des Performances Energétiques d'un Distillateur Thermosolaire à Cascades à Simple Effet sur Site d'Adrar.

### Résumée :

L'eau potable est indispensable pour la vie sur la terre. Elle couvre 75% de la surface de la terre dont 97% dans les océans. L'eau potable terrestre est d'environ 3% dont 0.07 uniquement est accessible. Les régions sahariennes de l'Algérie sont immenses et riches en ressources hydriques saumâtres et en énergie solaire horizontale dépassant les ( $6\text{kWh}/\text{m}^2\text{J}$ ). La maîtrise de la technicité de distillation et la disponibilité des matériaux de construction des distillateurs encouragent fortement le développement de cette filière d'énergie renouvelable pour produire de l'eau distillée pour les diverses usages. La quasi totalité des études effectuées dans le domaine de la distillation thermosolaire visent l'optimisation des distillateurs. Le travail entrepris dans ce mémoire, porte sur une approche de caractérisation thermo-optique d'un distillateur à cascades à simple effet sous des conditions climatiques réelles du site d'Adrar ( $27.88^\circ\text{Nord}$  et  $0.18^\circ\text{Ouest}$ ). Ces distillateurs donnent des rendements plus élevés que le type à chapelle de 10 à 15% en raison de la réduction de l'inertie thermique de la charge d'eau dans le bac absorbeur et l'inclinaison de la surface d'ouverture du distillateur à la latitude du lieu favorisant ainsi la captation de l'énergie solaire au cours de l'année. Cependant, la détermination des performances thermooptiques est importante pour décrire, comprendre, caractériser et optimiser la conception du système. A l'issue de cette étude semi empirique le résultat de caractérisation du distillateur montre que le système est caractérisé par une efficacité optique (69%) et un facteur de perte thermique global ( $U_L \approx 4.4 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$ ) acceptables en comparaison avec les distillateurs similaires de hautes performances. Également la variation de la production journalière en fonction de l'énergie solaire incidente et les températures de fonctionnement du système sont aussi présentés et analysés.

**Mots-clés :** Energie renouvelable, Distillateur à cascades, Simple effet, Effet-Serre, Caractérisation, Facteur des pertes thermiques globales, Rendement optique.

### الملخص:

وجود المياه الصالحة للشرب هو ضروري للحياة على الأرض ، ولدينا منطقة صحراوية هي كبيرة وغنية بالطاقة الشمسية (حوالي 6 كيلواط ساعي / المتر مربع في اليوم ) وغنية أيضا بمصادر للمياه (الفقاير) ، كل هذه العوامل شجعت على تطوير التقطير الشمسي في المنطقة الصحراوية حيث بلغ إنتاج الماء المقطر حوالي 5 لتر في اليوم . في هذا الموضوع نقوم بدراسة المقطر الشمسي المنتوج الأحواض الذي يعمل وفق مبدأ الدفيئة تحت الظروف المناخية لمدينة أدرار ) الموجودة على خط العرض 27.88 درجة شمالا ، 0.17 غربا خط الطول .  
**الكلمات الدالة :** المياه الصالحة للشرب، المقطر الشمسي المتعدد الأحواض، الخصائص الحرارية الضوئية .



### **Abstract**

Fresh water is indispensable for life on earth, The solar distillation is a separation process as simple Our Saharan region is large and rich in solar energy higher (6kWh/m<sup>2</sup>.J) and brackish mere technicality and the availability of materials courage the development of the sector of solar thermal distillation in the Sahara region an output of 5 l / day . Our study focuses on the distiller waterfalls (Our distiller operates under the climatic conditions of the city of Adrar (located at 27.88° latitude, 0.17W longitude) altitude). which are higher than the type of vault 10 to 15% because of the reduction of the inertia of the head of water in the tray and the inclination of the opening surface of the distiller yield. However, the determination of the thermo-optical performance of the system is crucial to describe, understand and optimize its design. The system is characterized by efficiency and optical performance that are acceptable in comparison with similar high quality stills. Also the variation of the daily production according to the incident solar energy and operating temperatures are also presented.

**Keywords:** Cascade solar still, solar thermal, briny water, thermo-optical performance.



# Sommaire

**Sommaire**

Liste des figures .....	i
Liste des tableaux .....	iii
Nomenclature .....	iv
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>

**Chapitre I**

I.1.Introduction .....	5
I.2. Constitution physique du soleil .....	5
I.3.Caractéristiques du Soleil, .....	5
I.4 L'atmosphère terrestre.....	6
I.5. Mouvement de la terre .....	7
I.6. Paramètres de position.....	8
I.6.1 Les coordonnées géographiques terrestres .....	8
I. 6.2. Les coordonnées horaires .....	9
I.6.3. Les coordonnées horizontales .....	10
I.7. Les temps solaires .....	12
I.7.1. Temps solaire vrai.....	12
I.7.2. Durée du jour .....	12
I.7.3. Equation de temps.....	13
I.7.4. Temps solaire moyen TSM .....	14
I.7.5. Temps universel TU .....	14
I.7.6.Temps légal TL.....	14
I.8. L'angle d'incidence sur un plan quelconque .....	14
I.8. 1. Plans particuliers importants.....	15
I.9. La constante solaire .....	15
I.10. Rayonnement solaire horizontal hors atmosphère .....	16
I.11. L'irradiation ou rayonnement solaire au sol .....	16
I.11.1. Le rayonnement direct (S): .....	17
I.11.2. Le rayonnement diffus (D) : .....	18
I.11.3. Le rayonnement global (G) : .....	19
I.11.4. Mesure de la fraction d'insolation.....	19
I.12. L'albédo du sol.....	20
I.13.Conclusion . .....	21



**Chapitre II**

II.1.Introduction .....	23
II.2. Bref historique de la distillation therrmosolaire.....	23
II.3. Principe de la distillation solaire dans la nature. ....	23
II.3.1. Principe de fonctionnement des distillateurs solaire à effet serre. ....	24
II.3.2. L'effet de serre .....	24
II.4. Composants d'un distillateur solaire .....	25
II.5. Types de distillateurs solaires.....	25
II.5.1. Distillation solaire à effet de serre.....	25
II.5.2. Distillation solaire à multiples effets:.....	30
II.5.3. Distillateurs de types spéciaux .....	33
II.5.3.Autres techniques de dessalement de l'eau salée.....	37
II.6. Les paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur .....	39
II.6.1 Paramètres internes.....	39
II.6.1.1. Paramètres de position.....	39
II.6.1.2. Paramètres de construction.....	39
II.6.1.3. Paramètres thermo-physiques.....	40
II.6.1.4. Paramètres optiques.....	41
II.6.1.5. Paramètres thermiques .....	41
II.6.1.6. Paramètres de la saumure .....	41
II.6.2. Paramètres Externes .....	42
II.6.2. 1. Paramètres Météorologiques .....	42
II.6.2. 1. Paramètres Géographiques .....	42
II.7. Conception objective pour un distillateur solaire efficace .....	43
II.8.Caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire .....	44
II.8.1.Le débit de distillat ou la production du distillateur.....	44
II.8.2.Le rendement :.....	44
II.8.3 L'efficacité globale.....	44
II.8.4 .L'efficacité interne .....	44
II.8.5.Les critères de performances .....	45
II.9.Conclusion .....	46

### Chapitre III

III.1.Introduction.....	48
III.2. Description du distillateur à cascades .....	48
III.3. Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur .....	49
III.3.1 . Echanges de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation: .....	49
III.3.2 . Echanges de chaleur entre la vitre et la surface d'eau .....	49
III.3.3 . Echange de chaleur entre la vitre et le milieu ambiant .....	49
III.4 . Mise en équation des échanges thermiques: .....	49
III.5. Bilan thermique du distillateur en régime dynamique .....	50
III.6 Modélisation simplifiée d'un distillateur solaire à cascades en régime permanent .....	51
III.7. Conclusion .....	52

### Chapitre IV

IV .1.Introduction.....	54
IV.2. Présentation des résultats .....	54
IV.3. Discussion des résultats .....	60
IV.4.Conclusion .....	62
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>63</b>

### Annexe

- A. Coefficients d'échange de chaleur et de masse
- B. Propriétés des eaux saumâtres

### Références bibliographique

<b>Indexe des figures</b>	<b>Numéro de page</b>
Figure (I.1): Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre .....	6
Figure ( I.2): Mouvement de la terre autour du soleil .....	7
Figure (I.3):Variation de la distance terre–soleil en fonction du nombre du jour de l'année .....	8
Figure (I.4): Les coordonnées géographiques terrestres .....	9
Figure( I.5): Déclinaison du soleil au cours le d'année .....	9
Figure (I.6): Les coordonnées horaires .....	10
Figure ( I.7): Hauteur du soleil sur site d'Adrar .....	10
Figure( I.8): Les coordonnées horizontales.....	11
Figure ( I.9): La Hauteur du soleil en fonction de son Azimut (site d'Adrar).....	11
Figure (I.10): Durée du jour dans l'année (site d'Adrar).....	13
Figure ( I.11):Variation de l'équation de temps en fonction du numéro du jour (site d'Adrar) .....	14
Figure(I.12): Composantes du rayonnement solaire au sol.....	17
Figure (I.13): Pyrhéliomètre .....	18
Figure( I.14): Diffusomètre.....	19
Figure (I.15): Le pyranomètre.....	20
Figure (I.16): Héliographe .....	20
Figure (I.17): L'albédomètre .....	21
Figure (II. 1): Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire simple effet .....	24
Figure (II.2) : Modèle expérimental de distillateur solaire à effet de serre plan.....	26
Figure (II.3): Distillateur solaire incliné à cascades .....	27
Figure(II.4): Distillateur solaire incliné à mèche .....	28
Figure (II. 5): Distillateur solaire vertical. ....	29
Figure (II.6) : Distillateur solaire plan-capteur. ....	30
Figure (II.7): Distillateur solaire plan avec concentration .....	30
Figure (II.8) Principe d'un distillateur à multiple effets .....	31
Figure (II.9) : Distillateur à diffusion.....	32



Figure (II .10): Distillateur à cheminée. ....	32
Figure (II. 11): Distillateur à mèche évaporant .....	33
Figure (II.12) : Distillateur solaire sphérique à balayage .....	33
Figure (II.13) : Distillateur solaire à film capillaire .....	34
Figure ( II.14): Distillateur de type barrage.....	35
Figure (II.15) : Distillateur solaire à simple pente.....	35
Figure (II.16):Distillateur solaire à plusieurs étages.....	36
Figure( II.17)Distillateur de type Water Cône .....	36
Figure (II.18) : Distillateur solaire gonflable .....	37
Figure (II.19):Principe de l'osmose inverse .....	37
Figure(II.20) :Principe de fonctionnement de l'électrodialyse .....	38
Figure (II.21 ):Principe de fonctionnement de la distillation < flash> .....	38
Figure (II.22) : Variation du débit de distillat en fonction de la température saumure .....	42
Figure( III.1):Distillateur a cascades. ....	48
Figure( IV .1):Variation des composantes du rayonnement solaire journalier.....	54
Figure ( IV .2):Variation des composantes du rayonneàmnt solaire .....	55
Figure. ( IV .3) :Variation journalière de la température saumure .....	55
Figure ( IV. 4):Variation journalière de la température de l'absorbeur .....	56
Figure ( IV.5) Variation journalière des températures moyennes bac,saumure,vitrage et ambiance .....	56
Figure( IV.6) Caractéristique du distillateur à cascades .....	57
Figure) ( IV .7) :Caractéristique du distillateur a cascade pour la marche inférieure.....	57
Figure ( IV.8) Caractéristique du distillateur a cascade pour la marche moyenne .....	58
Figure ( IV.9) :Caractéristique du distillateur a cascade pour la marche supérieure .....	58
Figure ( IV.10):Variation de énergie solaire incidente et le débit du distillat pendant l'année.....	59
Figure ( IV.11):La variation de débit du distillat en fonction l'énergie solaire incidente .....	59
Figure ( IV.12): La variation de débit du distillat en fonction le gradient de température .....	60

<i>Indexe des tableaux</i>	<i>Numéro de page</i>
Tableau (I.1): Caractéristiques géophysiques principales du soleil.....	5
Tableau(I.2): Albédo pour différentes surfaces.....	21
Tableau II.1. Paramètres optiques des composantes d'un distillateur solaire simple effet.....	45
Tableau (IV.1) : Performances thermiques et optiques du distillateurs .....	59

**Nomenclatures**

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$j$	Numéro du jour de l'année	
$L$	Longitude	[°]
$\Phi$	Latitude	[°]
$\omega$	L'angle horaire	[°]
$\delta$	Déclinaison	[°]
$\beta$	Azimut	[°]
$a$	Inclinaison de la vitre	[°]
$h$	Hauteur du soleil	[°]
TSV	Temps solaire vrai	[Heure]
TU	Temps universel	[Heure]
TL	Temps légal	[Heure]
Et	Equation de temps	[min]
$I_c$	Constante solaire	[W/m <sup>2</sup> ]
$S$	Rayonnement direct	[W/m <sup>2</sup> ]
$D$	Rayonnement diffus	[W/m <sup>2</sup> ]
$G$	Rayonnement global	[W/m <sup>2</sup> ]
$L_v$	Chaleur latente	[J/kg]
$\dot{m}$	débit de masse	[kg /s]
$h_{ij}^c$	coefficient d' échangé par convection entre <b>i</b> et <b>j</b>	[W/m <sup>2</sup> °C]
$h_{ij}^r$	coefficient d' échangé par rayonnement entre <b>i</b> et <b>j</b>	[W/m <sup>2</sup> °C]
$h_{ij}^{ev}$	coefficient d' échangé par évaporation entre <b>i</b> et <b>j</b>	[W/m <sup>2</sup> °C]
$q_{ij}^c$	Flux de chaleur échangé par convection entre <b>i</b> et <b>j</b>	[W]
$q_{ij}^r$	Flux de chaleur échangé par rayonnement entre <b>i</b> et <b>j</b>	[W]
$q_{ij}^{ev}$	Flux de chaleur échangé par évaporation entre <b>i</b> et <b>j</b>	[W]
$\eta$	Rendement du distillateur	[%]
$\eta_g$	Efficacité globale du distillateur	[%]
$\eta_i$	Efficacité interne du distillateur	[%]
$C_p$	Capacité calorifique	[J/kg°C]
$\alpha_t$	Rendement optique	[%]
$U_L$	facteur des pertes thermiques	[W/m <sup>2</sup> °C]
$\tau_g, \tau_w$	transmittivité du vitrage, et celle de la saumure	[%]
$\alpha_b, \alpha_w$	l'absorptivité du bac et celle de la saumure	[%]
$\varepsilon$	Emissivité	[%]
$\lambda$	Conductivité thermique	[W/m <sup>2</sup> °C]
$\nu$	Viscosité cinématique	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Masse volumique	Kg/ m <sup>3</sup>



# Introduction

## Introduction

L'eau potable est une source de vie, c'est un élément indispensable à la survie des êtres vivants, malheureusement certaines régions de notre planète sont menacées par de graves pénuries d'eau. Le manque d'eau ne concerne pas seulement les régions confrontées à la sécheresse ou à une démographie galopante. Il touche également une grande partie du monde industrialisé, où les exigences de confort plus élevées et les importantes quantités d'eau consommées par les industries à grande échelle appauvrissent les réserves aquatiques naturelles. Cette pénurie est aggravée par la pollution due aux déchets toxiques et à l'utilisation abusive de fumier et de fertilisants. Face à ce problème crucial, le dessalement des eaux salées et/ou des eaux saumâtres apparaît comme l'une des solutions possibles à la survie de l'humanité. Parmi les techniques utilisées dans ce domaine, et pour des besoins relativement faibles d'eau potable, la distillation solaire peut être une solution très intéressante surtout pour les zones arides et désertiques. La rareté de l'eau potable n'est pas le seul défi de notre siècle, le changement climatique, l'épuisement des ressources en énergies fossiles et plus généralement la pollution du milieu naturel, privilégient l'utilisation de l'énergie solaire, cette dernière offrant l'avantage d'être inépuisable, gratuite et respectueuse de la santé et de l'environnement [2].

Les zones sahariennes sont caractérisées par une intensité élevée du rayonnement solaire et d'importantes quantités en eaux saumâtres et salées. Il est séduisant d'utiliser l'énergie solaire comme source de chaleur pour distiller l'eau. L'Algérie s'étendait du nord au sud, entre le 37° et 19° parallèle, et d'est en ouest entre le 12° et le 90 °méridien. Le territoire algérien bénéficie généralement d'un rayonnement exceptionnel, la durée annuelle moyenne d'insolation est de 300 jours. L'insolation globale horizontale annuelle journalière moyenne reçue par jour varie de 4.5 à 7.5 kWh/m<sup>2</sup>/Jour [3].

L'objectif de ce modeste travail intitulé : Modélisation et analyse des performances énergétiques d'un Distillateur Thermosolaire à cascades à simple effet sur site d'Adrar est la détermination de ces performances thermiques et optiques (facteur des pertes thermiques et rendement optique). Pour atteindre cet objectif, nous avons divisé notre travail en quatre grands chapitres et une partie annexe :

# Introduction générale

---

- Le premier chapitre est centré sur les rappels concernant le rayonnement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.
- Le deuxième chapitre expose l'état de l'art sur la distillation thermosolaire avec un aperçu sur les différents types de distillateurs solaires en général et du distillateur à simple effet en particulier.
- Le troisième chapitre décrit la modélisation et la caractérisation du distillateur à cascades à travers les échanges thermiques et les propriétés thermodynamiques.
- Le quatrième et le dernier chapitre est réservé à la présentation et à l'interprétation des résultats de caractérisation obtenus.





# Chapitre I: Généralité sur le rayonnement solaire

## I.1. Introduction

La quantité d'énergie libérée par le soleil est captée par la planète terre pendant une heure pourrait suffire à couvrir tous les besoins énergétiques mondiaux pendant une année. En outre, grâce aux divers procédés, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine. Il est certain que l'énergie solaire doit être comme l'une des principales énergies du futur. La maîtrise de l'énergie solaire est étroitement liée à l'étude du rayonnement solaire, [2].

## I.2. Constitution physique du soleil [1]:

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 ( $4\text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^4_2\text{He} + 2e^+ + 2e\nu + 2,5.10^{12} \text{ J/mole He}$ ).

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

- **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.
- **La photosphère:** l'épaisseur est d'environ 300 km qui est responsable de la presque totalité du rayonnement solaire que nous recevons.
- **Chromosphère et couronne solaire:** où la matière est très diluée, ce qui explique bien que la température y soit très élevée (1 million de degrés) le rayonnement émis est très faible.

## I.3. Caractéristiques du Soleil, [2]

Tableau (I.1): Caractéristiques géophysiques principales du soleil

Caractéristiques		Valeur
Masse		$1,9891 \times 10^{30} \text{ kg}$
Diamètre		1 392 000 km
Masse volumique moyenne		$1\,408 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Surface		$6,09 \times 10^{12} \text{ km}^2$
Volume		$1,41 \times 10^{18} \text{ km}^3$
Vitesse		$217 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$
Gravité à la surface		$273,95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
Température	au centre	15,1 MK
	à la surface	5770K
Distance terre-soleil		149 000km

I.4 L'atmosphère terrestre [1,2]

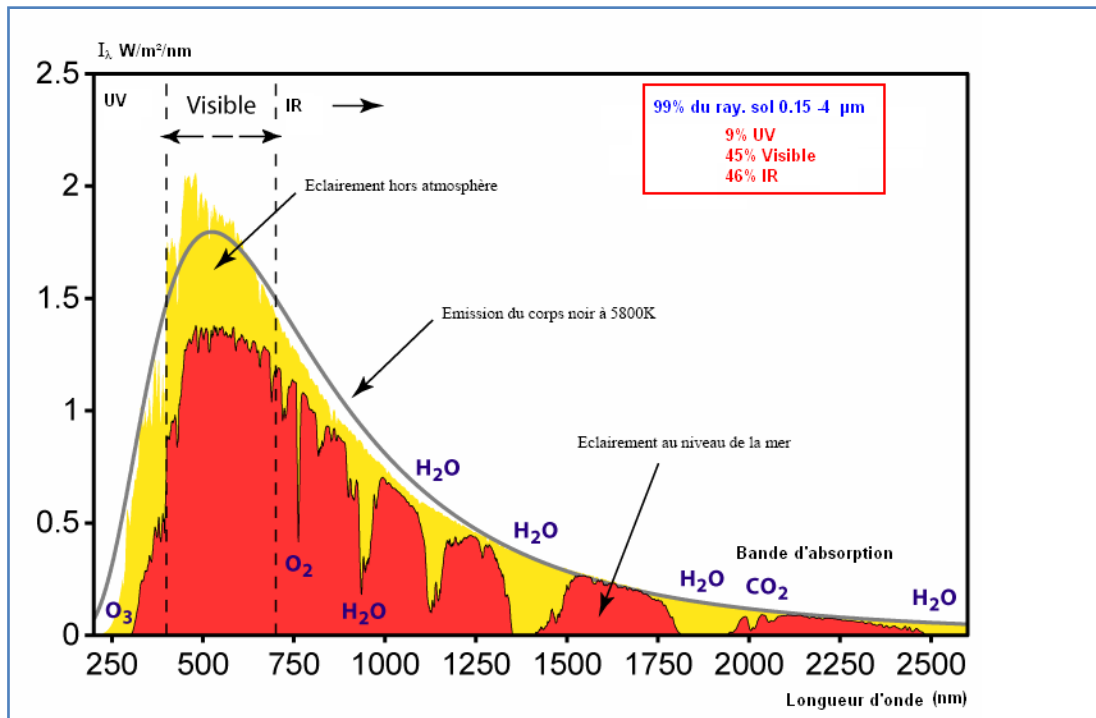
L'atmosphère est constituée de plusieurs couches on distingue notamment:

- ✓ 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 O<sub>3</sub> située entre 10 et 30 km d'altitude.
- Aérosols: grains de sable, poussières, fumées...

On trouvera sur la **Figure( I.1)** 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.1):** Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre, [4]

Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO2, O3, H2O) émettent vers la terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes :

- Vers 14,7 μm pour le CO2.

- Entre 5 et 7 μm et entre 14 et 20 μm pour la vapeur d'eau.
- Vers 9,6μm pour O3.

**I.5. Mouvement de la terre, [2]**

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible, il en résulte que la distance terre-soleil ne varie que de ±1.7% par rapport à la distance moyenne qui est de 149,597.106 km (figure I.1). La position de la terre à l'équinoxe de printemps est appelée point vernal. La révolution complète de la terre autour du soleil s'effectue en une année, on distingue :

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

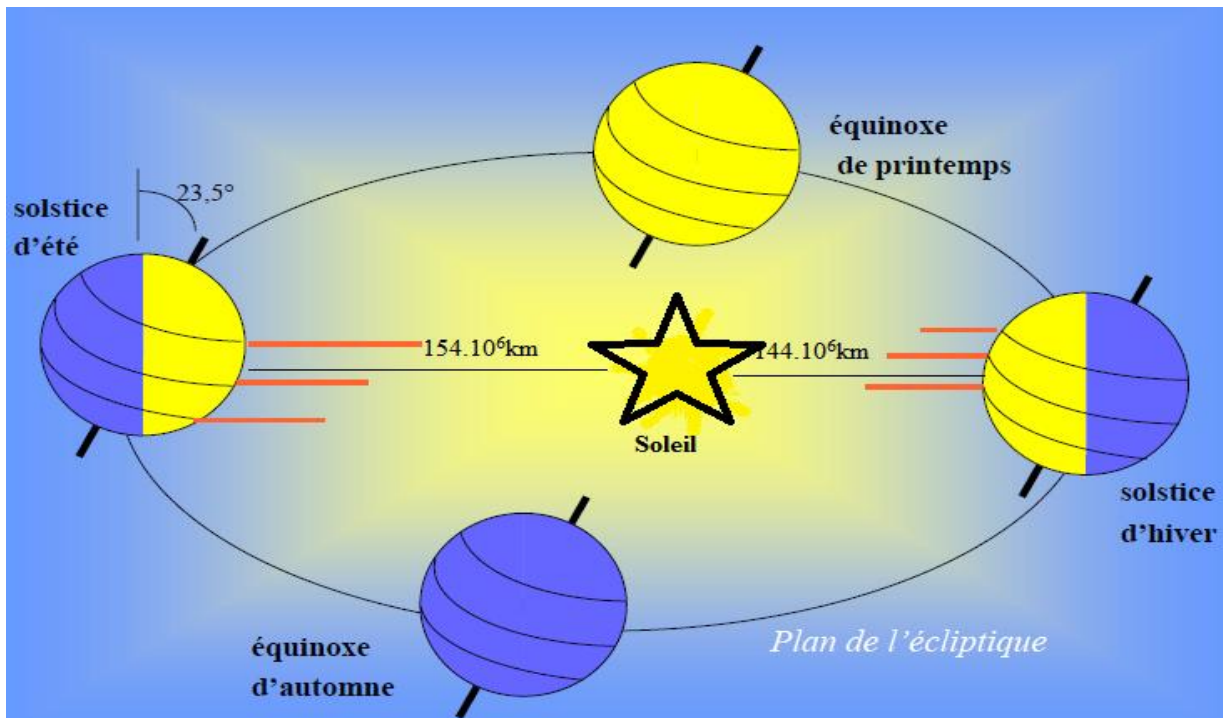


Figure ( I.2): Mouvement de la terre autour du soleil, [4]

**a. Distance Terre-Soleil, [9]**

La variation de la distance terre-soleil en fonction de la date est donnée par la formule suivante:

$$d(j) = 1 - 0.017 \cos[(360/365).(j - 2)] \quad \text{(I. 1)}$$

Avec:

j : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année :

Année civile :  $j = (1, 365)$  jours

Année bissextile :  $j = (1, 366)$  jours

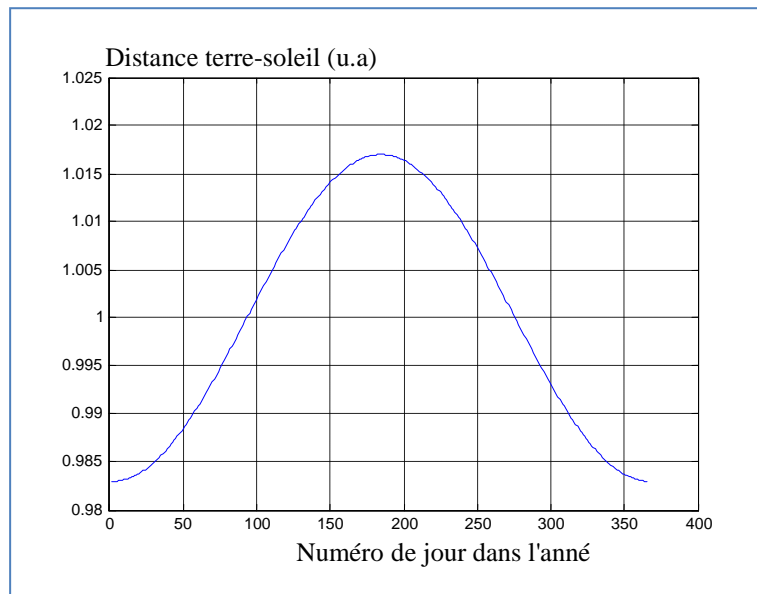
$d_{TS}(\min) = 0,983$  UA vers le 2 janvier (Périgée).

$d_{TS}(\max) = 1,017$  UA vers le 5 juillet (Apogée).

Avec :

$1 \text{ ua} = 149\,597\,890 \pm 500 \text{ km} \approx 150 \text{ million km} = 500 \text{ secondes lumière} = 8.3 \text{ mn-lumière}$

La variation de la distance terre-soleil est illustrée par la figure (I-3).



**Figure (I.3):** Variation de la distance terre-soleil en fonction du nombre du jour de l'année en site d'Adrar

## I.6. Paramètres de position, [1, 2]

Pour définir la position terre-soleil à un instant donné, on utilise les coordonnées suivantes:

**I.6.1 Les coordonnées géographiques terrestres ( $\Phi, L$ )** qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure I.4), à savoir :

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

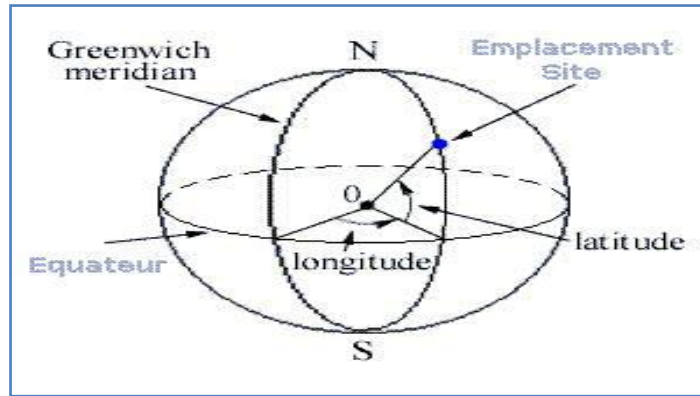


Figure (I.4): Les coordonnées géographiques terrestres

**I.6.2. Les coordonnées horaires ( $\delta$ ,  $\omega$ ,  $a$ )**

Les coordonnées horaires sont :

— **L'angle horaire:** ( $\omega_{l,c}$ ): qui est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire du soleil avec le plan contenant le méridien céleste, il est compté positivement l'après midi.

— **La déclinaison  $\delta$ :** est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre  $-23.45^\circ$  et  $+23.45^\circ$ . Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation:

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (j + 284) \right] \tag{I. 2}$$

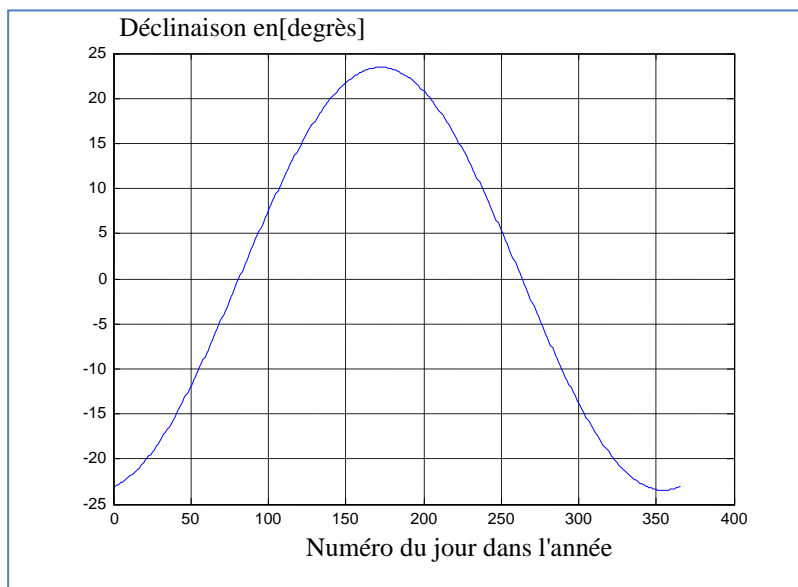


Figure (I.5): Déclinaison du soleil au cours de l'année en site d'Adrar , [9]

— **L'ascension droite ( $a$ ):** est l'angle qui fait le plan contenant le cercle horaire passant par le soleil et celui passant par le point vernal  $g$  et contenant l'axe du monde.



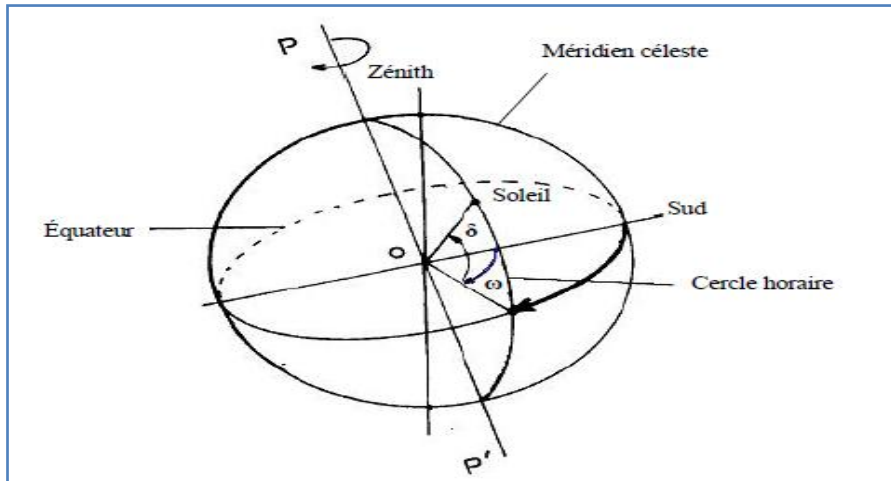


Figure (I.6): Les coordonnées horaires

I.6.3. Les coordonnées horizontales ( $h, a$ ) déterminent la projection du soleil sur l’horizon du lieu (figure I.4), et sont définies comme suit :

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

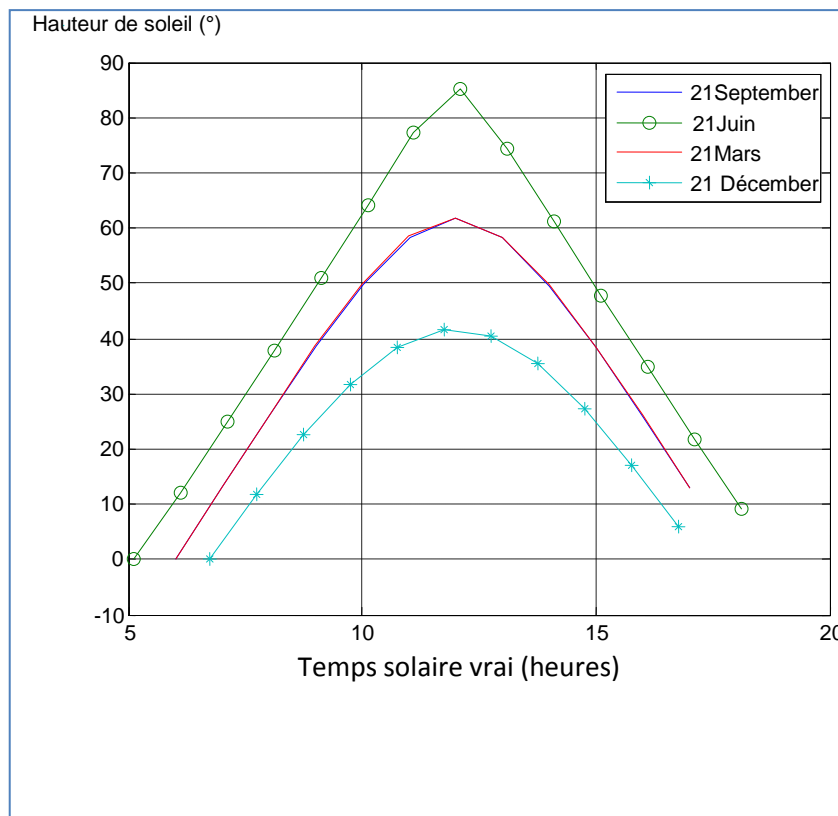


Figure ( I.7): Hauteur du soleil sur site d'Adrar

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

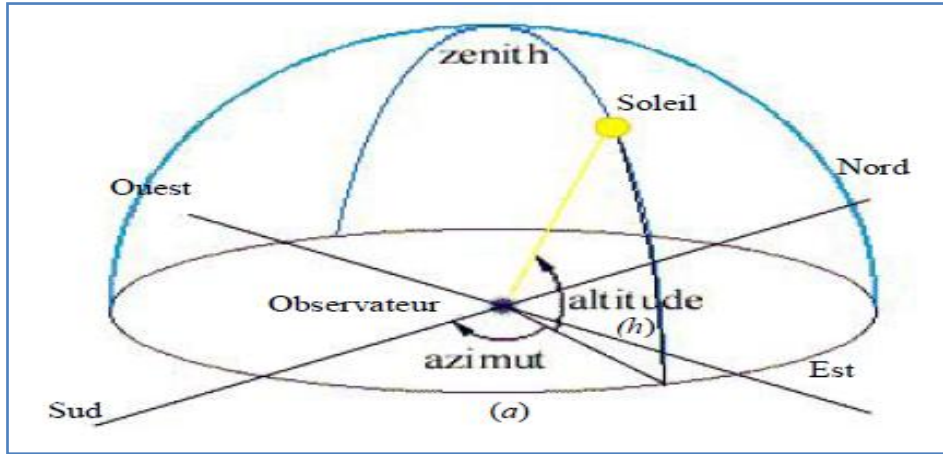


Figure ( I.8): Les coordonnées horizontales

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

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

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

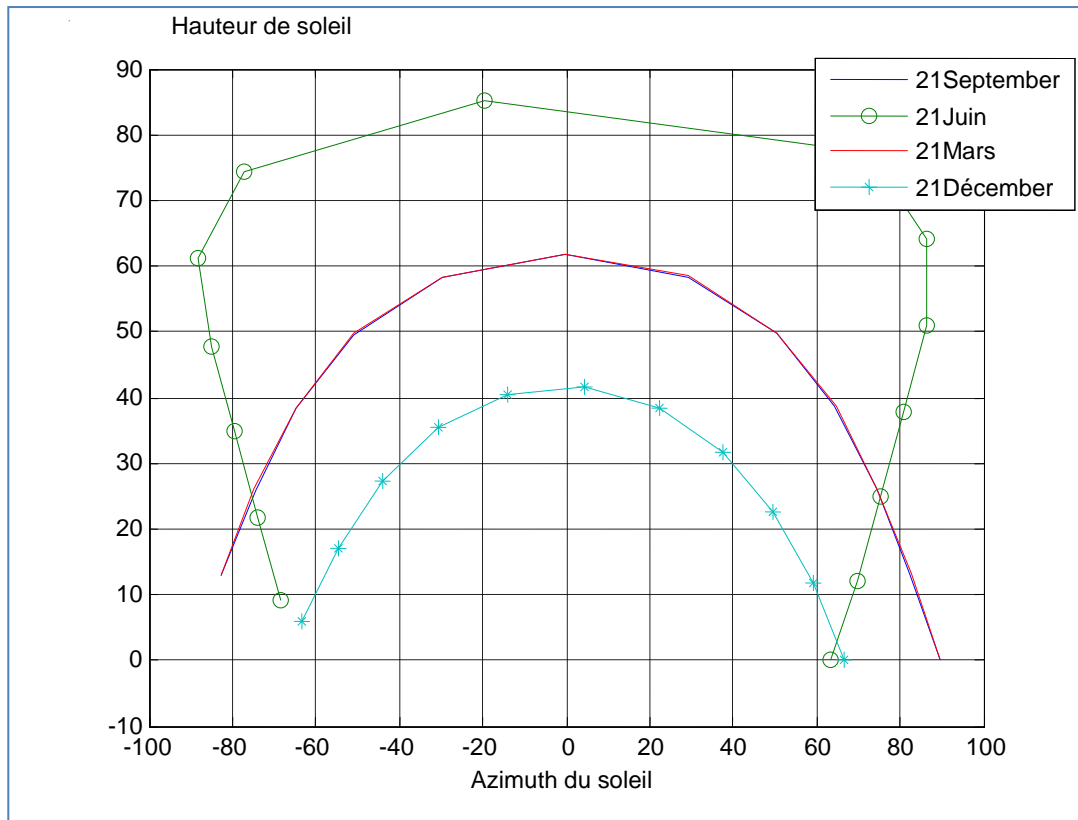


Figure ( I.9): La Hauteur du soleil en fonction de son Azimut (site d'Adrar)

## I.7. Les temps solaire, [2,9,11]

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

### I.7.1. Temps solaire vrai

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

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

### I.7.2. Durée du jour

#### ▪ Lever et coucher du soleil

On connaît à présent la hauteur du soleil dans le ciel à tout moment de la journée. Mais la journée commence bien lors du lever du soleil et prend fin au coucher du soleil. Il nous faut donc connaître ces heures afin de pouvoir les comparer à une base de données et de vérifier que nos calculs soient justes. L'heure du lever et du coucher.

En reprenant l'équation (I.2) et en posant  $\sin(h) = 0$  on obtient :

$$\omega = \arccos(-\tan(L) \tan(\delta)) \quad (\text{I.6})$$

on définit l'angle angulaire  $\omega$  positif l'après midi. De l'équation (I.5) , On obtient :

$$TS = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{I.7})$$

Si  $\omega > 0$  alors  $TS = TSc$  : Temps solaire du coucher

Si  $\omega < 0$  alors  $TS = TSl$  : Temps solaire du lever

$$TSl = 12 - \frac{\omega l}{15} \quad (\text{I.8})$$

$\omega l$  : angle horaire du lever

$$TSc = 12 + \frac{\omega c}{15} \quad (\text{I.9})$$

$\omega c$  : angle horaire du coucher

On définit la durée du jour  $dj$  :

$$dj = TSc - TSl \quad (\text{I.10})$$

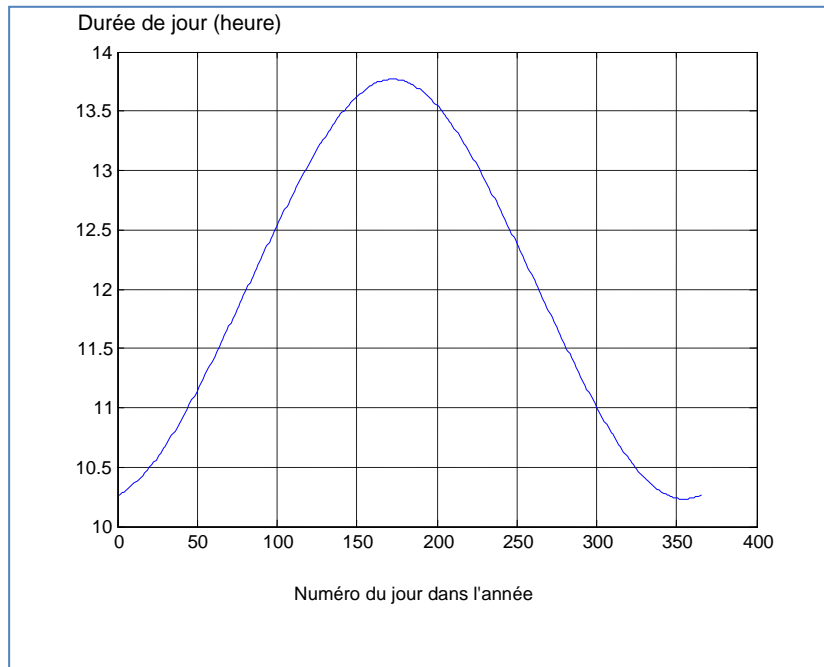


Figure (I.10): Durée du jour dans l'année (site d'Adrar)

- La durée minimale est de 645 minutes soit une journée de 10h45mn.
- La durée maximale est de 794 minutes soit une journée qui dure 13h14mn.

### I.7.3. Equation de temps

La variation de la vitesse de la terre sur sa trajectoire autour du soleil qui introduit un terme correctif appelé équation de temps noté ET en min figure ( I.10), est donné par la relation suivante:

$$ET = -0.0002 + 0.4797 \cos(0,984 j) - 3,2265 \cos(2.0,984j) - 0,00903\cos (3,0984j) - 7,3509\sin( 0.984j) - 9,3912\sin( 2.0,984j) - 0.3361\sin( 3,0984j) \quad (I. 11)$$

j: numéro du jour de l'année (N = 1 le premier janvier).

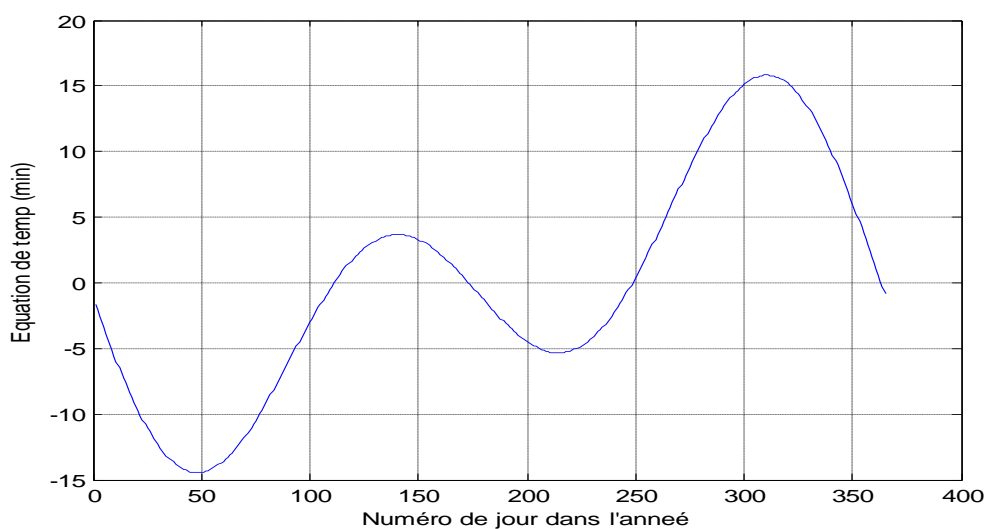


Figure ( I.11):Variation de l'équation de temps en fonction du numéro du jour (site d'Adrar)

**I.7.4. Temps solaire moyen** TSM varie de  $\pm 16$ min par rapport au TSV:

$$TSM = TSV - ET \quad (\text{I.12})$$

**I.7.5. Temps universel** TU est égal au TSM du méridien origine (méridien de Greenwich), on a donc:

$$TU = TSM + (L/15) \quad (\text{I.13})$$

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

$L > 0$ , 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.7.6. Temps légal** TL c'est l'heure que nous lisons aux horloges publiques :

$$TL = TU + C \quad (\text{I.14})$$

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

## I.8. L'angle d'incidence sur un plan quelconque, [9]

L'angle d'incidence  $\theta$ , c'est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan. Cet angle détermine l'importance du rayonnement direct intercepté par la paroi, il peut être déterminé dans les coordonnées horizontales ou dans les coordonnées verticales.

- **En coordonnées horizontales** : l'angle d'incidence est donné par :

$$\cos \theta = \cos(\alpha - a) \cos \gamma \cosh + \sin \gamma \sinh \quad (\text{I.15})$$

- **En coordonnées horaires** : l'angle d'incidence est donné par

$$\cos \theta = \sin \alpha \cos \gamma \sin \omega \cos \delta + \cos \alpha \cos \gamma [\cos \omega \cos \delta \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi] + \sin \gamma [\cosh \cos \delta \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi] \quad (\text{I.16})$$

Bien que cette formule soit plus lourde elle est généralement plus pratique à utiliser. En effet :

- avec les coordonnées horizontales  $\theta = \theta(\alpha, \gamma, a, h)$  : deux valeurs  $a$  et  $h$  sont

à déterminer pour connaître l'angle d'incidence sur un plan donné.

- Avec les coordonnées horaires,  $\theta = \theta(\alpha, \gamma, \omega, \delta, \varphi)$  : pour un plan  $(\alpha, \gamma)$ ,

un lieu  $(\varphi)$  et un jour  $(\delta)$  donnés,  $i$  est fonction de l'angle horaire,  $\omega$ ,

variable particulièrement pratique puisque il s'agit du temps.

On exprimera donc  $\cos(\theta)$  en faisant apparaître la variable  $\omega$ .

$$\cos \theta = \cos(\alpha - a) \cos \gamma \cosh + \sin \gamma \sinh \quad (\text{I.17})$$

$$\cos \theta = A \sin(\omega) + B \cos(\omega) + C \quad (\text{I.18})$$

Avec :

$$\begin{aligned} A &= A' \cos(\omega) & A' &= \sin(\alpha) \cos(\gamma) \\ B &= B' \cos(\delta) & B' &= \cos(\alpha) \cos(\gamma) \sin(\varphi) + \sin(\gamma) \cos(\varphi) \\ C &= C' \sin(\delta) & C' &= -\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\varphi) + \sin(\gamma) \sin(\varphi) \end{aligned}$$

### I.8. 1. Plans particuliers importants

Plan horizontal

Pour le plan horizontal on a  $\gamma = 90$  :

D'où :

$$A' = 0; B' = \cos(\varphi); C' = \sin(\varphi)$$

D'où :

$$\cos \theta = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (\text{I.19})$$

#### ❖ Plan vertical

Pour le plan vertical on a  $\gamma = 0$

D'où :

$$A' = \sin(\alpha); B' = \cos(\alpha) \sin(\varphi); C' = -\cos(\alpha) \cos(\varphi)$$

D'où :

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin(\alpha) \cos(\varphi) \sin(\omega) + \cos(\alpha) \sin(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) - \\ &\cos(\alpha) \cos(\varphi) \sin(\delta) \end{aligned} \quad (\text{I.20})$$

#### ❖ Plan Sud

Pour le plan sud on a  $\alpha = 0$  :

$$A' = 0; B' = \sin(\gamma + \varphi); C' = -\cos(\gamma + \varphi)$$

D'où :

$$\cos \theta = \sin(\gamma + \varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) - \cos(\gamma + \varphi) \sin(\delta) \quad (\text{I.21})$$

#### ❖ Plan orienté plein sud à la latitude du lieu

C'est un plan sud d'inclinaison égale à la latitude on a  $\alpha = 0$  et  $\gamma = 90 - \varphi$

$$A' = 0; B' = 1; C' = 0$$

D'où :

$$\cos \theta = \cos(\delta) \cos(\omega) \quad , \quad (\text{I.22})$$

### I.9. La constante solaire, [1,18]:

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

$$C_{te\ solar} = \sigma \times T^4 \times \left( \frac{R_s}{D_{st}} \right)^2 \quad (I.23)$$

Avec:

$R_s$ : le rayon du soleil (m);  $D_{st}$ : distance terre- soleil et  $\sigma$  : constante de Stéphane-Boltzmann:

$$\frac{2\pi^5 \cdot K^4}{15 \cdot h^3 \cdot C^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \text{ La distance terre-soleil varie au cours de l'année.}$$

### I.10. Rayonnement solaire horizontal hors atmosphère, [12]

Le rayonnement hors atmosphère couvre un très large domaine de longueur d'ondes il ne dépend d'aucun paramètre météorologique, mais il est en fonction de quelque paramètre astronomique et géographique tel que: la latitude du lieu  $\varphi$ , la déclinaison solaire  $\delta$  et l'angle horaire au coucher du soleil  $\omega_c$ . Sur une surface horizontale, et pour le jour  $n$ , le rayonnement extraterrestre  $G_0$  (MJ/m<sup>2</sup>.jour) est obtenu à l'aide de l'équation suivante:

$$G_0 = \frac{24 \times 60}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot \left[ 1 + 0.034 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \right] \cdot \left[ \frac{\omega_c \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_c)}{\pi} \right] \quad (I.24)$$

- **L'Indice de clarté**

C'est le rapport entre le rayonnement horizontal au sol et le rayonnement extraterrestre, notée  $K_T$  est défini par l'expression :

$$K_T = \frac{G}{G_0} \quad (I.25)$$

- **L'éclairement, [13]**

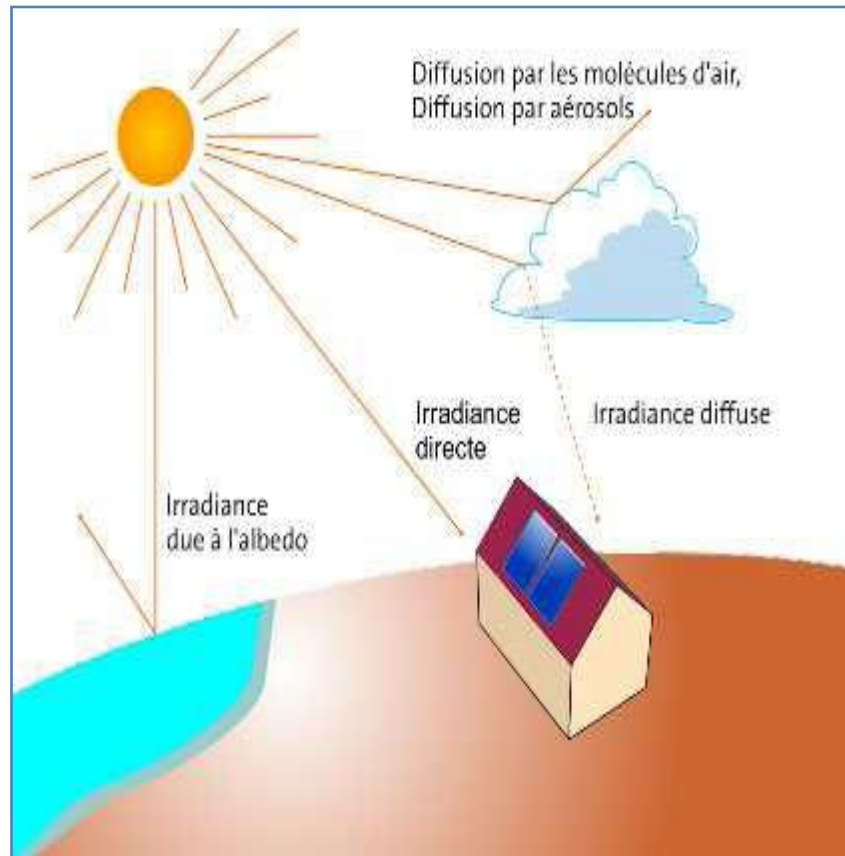
L'éclairement est la puissance de rayonnement reçu par unité de surface. L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire. Les nuages, les gouttes d'eau, les molécules de gaz, les particules solides en suspension dans l'atmosphère empêchent la totalité du rayonnement solaire à atteindre le sol.

### I.11. L'irradiation ou rayonnement solaire au sol, [2,7,12]

C'est la quantité d'énergie reçue au niveau du sol par unité de surface pendant une certaine durée. Ces unités usuelles sont le: J/m<sup>2</sup>, J/cm<sup>2</sup>, Wh/m<sup>2</sup>, ou bien kWh/m<sup>2</sup>. Elle dépend de nombreux facteurs dont principalement la couverture nuageuse, la durée du jour, l'instant considéré dans la journée, l'orientation et l'inclinaison de la surface la latitude du lieu, son degré de pollution et la



hauteur angulaire du soleil au –dessus de l'horizon. On distingue plusieurs composantes qui sont principalement :



**Figure(I.12):** Composantes du rayonnement solaire au sol, [4].

### I.11.1. Le rayonnement direct (S):

C'est le rayonnement qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est reçu directement du disque solaire, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux. Il est mesuré par le Pyrhéliomètre.

#### Principe de mesure

Les radiations solaires directes peuvent être mesurées par un Pyrhéliomètre **Figure (I.13)**. Contrairement au pyranomètre un disque noir détecteur est placé à la base du tube dont l'axe est aligné avec la direction des rayons solaire, ainsi la radiation diffusée est bloquée par la surface du détecteur. Le Pyrhéliomètre est continuellement pointé directement au soleil tout au long du jour. Cette grandeur est nulle lorsque le soleil est occulté par les nuages. La radiation diffusée peut être déterminée par la soustraction de la radiation directe de la radiation globale, [9].



Figure (I.13): Pyrhéliomètre

### I.11.2. Le rayonnement diffus (D) :

C'est la fraction du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère (vapeur d'eau, air, nébulosité, aérosols, ...). Il n'a pas de direction privilégiée. Il est mesuré par le Diffusomètre **Figure (I.14)**. La détermination de la distance de visibilité repose sur le principe de la diffusion de la lumière par les particules en suspension dans l'atmosphère dans un volume restreint d'atmosphère (20 litres environ à 2 mètres au-dessus du sol). Cette diffusion est proportionnelle à la densité de particules en suspension et la visibilité est inversement proportionnelle à l'intensité du signal diffuse reçu, [7].



Figure (I.14): Diffusomètre , [7]

### I.11.3. Le rayonnement global (G) :

est la somme des rayonnements direct et diffus. On utilise le pyranomètre **Figure (I.15)** pour mesurer le rayonnement global, ( $G=S+D$ ).

#### Principe de la mesure

On mesure la puissance du rayonnement solaire globale sur une surface horizontale grâce à un pyranomètre figure (III.4). Un pyranomètre comprend une double coupelle de verre, un thermophile (série de thermocouples) et un système d'enregistrement de la force électromotrice produite par ce thermophile sous l'action d'un rayonnement. Quand l'instrument est exposé à la radiation solaire, une différence de température est créée entre les secteurs noirs et les secteurs blancs. Cette différence de température est détectée par la thermophile qui convertie l'énergie thermique en énergie électrique. Ce courant peut être mesuré et amplifié et le signal de millivolt est converti par un facteur de calibrage en un flux en Watt par mètre carré. Les coupelles de verre filtrent la bande de longueurs d'onde à mesurer (en général de 0,3 à 3mm) et limitent la condensation de vapeur d'eau. Pour mesurer uniquement le rayonnement diffus, on ajoute une bande pare soleil (bande métallique ou en composite circulaire) qui protège le pyranomètre du rayonnement solaire direct. Le pyranomètre, appelé "solarimètre" dans le passé, fait partie de l'instrumentation classique des parcs météorologiques ; il est placé sur une surface horizontale, [9].



**Figure (I.15):** Le pyranomètre

### I.11.4. Mesure de la fraction d'insolation

La durée d'insolation est mesurée à l'aide d'un héliographe **Figure (I.16)** c'est un appareil simple constitué d'une sphère de verre focalisant les rayons du soleil sur une bande de papier graduée en

minute et dixième de minutes. Ce papier spécial est brûlé lorsque l'éclairement du rayonnement direct est supérieur à  $120 \text{ W/m}^2$ , [9]



(a): Héliographe de Campbell-Stokes



(b): Héliographe à fibres optique

Figure (I.16): Héliographe

## I.12. L'albédo du sol

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

Tableau(I.2): Albédo pour différentes surfaces

Type de surface	Albédo
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Sol sombre	0,05 à 0,15
Glace	0,30 à 0,40
Mer chaude	0,05
Mer froide	0,15
Neige tassée	0,60
Neige fraîche	0,85
Nuage	0,86
Verre à vitres	0.10

### Principe de la mesure

L'albédomètre **Figure (I.17)** est un appareil destiné à mesurer l'albédo d'une surface. L'albédo est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface sur l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, avec 0 correspondant au noir, pour un corps avec aucune réflexion, et 1 au miroir parfait, pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption de tout le rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit. Dans la pratique, un corps est perçu comme blanc dès qu'il réfléchit au moins 80% de la lumière d'une source lumineuse blanche. à l'inverse tout corps réfléchissant moins de 3 % de la lumière incidente paraît noir, [10].



**Figure (I.17):** L'albédomètre

### I.13. Conclusion

Ce chapitre a permis de faire le point sur l'aspect physique et géométrique du rayonnement solaire hors atmosphère et au sol terrestre du site d'Adrar. IL permet de mieux décrire et comprendre les différentes composantes du rayonnement solaire, les paramètres astronomiques et les modes de collectes de données et les instruments et méthodes de mesures utilisés.

# **Chapitre II: État de l'art sur la distillation thermosolaire**

## II.1.Introduction

La distillation solaire est un procédé de production d'eau distillée à valeur économique ajoutée, surtout dans les régions caractérisées par un bon ensoleillement. La production d'eau douce trouve toute sa justification au sud algérien. La plupart des eaux d'origine souterraine sont saumâtres et impropres à la consommation humaine. Ces eaux sont caractérisées par une salinité qui dépasse 1.5 g/l. Selon les normes de (OMS), la salinité doit être inférieure ou égale à 0.5 g/l. A petite échelle. Plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés, les plus répandus sont ceux du type à effet de serre. En effet ils présentent l'avantage d'être simple, facile à réaliser, de conception rustique, et peu coûteuse.

Le dessalement de l'eau marine ou saumâtre est un processus qui permet d'extraire le sel pour la rendre potable ou l'utiliser pour l'irrigation, donc la distillation solaire est une solution intéressante pour les régions isolées et/ ou éloignées,[3, 5, 16, 17].

## II.2. Bref historique de la distillation therrmosolaire

Dés le IV<sup>ème</sup> siècle avant JC, **Aristote** observe le principe de la distillation. Au XII<sup>ème</sup> siècle, **Abélard de Bath** décrit deux expériences dans les questions naturelles «au soleil, après l'évaporation sur une roche, l'eau de mer se transforme en sel ; lorsque le soleil fait défaut, on chauffe l'eau de mer et sous l'effet de la cuisson on la voit également se transformé en sel. Cette métamorphose explique que la mer soit plus salée l'été que l'hiver, que les mers méridionales le soient davantage que les mers septentrionales». Depuis les temps les plus anciens, les marins ont dessalé l'eau de mer à partir de simples bouilleurs sur leurs bateaux, mais l'utilisation à des fins industrielles est récente. Dans les années 60, les procédés thermiques sont mis au point et utilisés pour dessaler l'eau de mer. Par ailleurs, des recherches sont développées sur les procédés de dessalement, [5].

## II.3. Principe de la distillation solaire dans la nature [18].

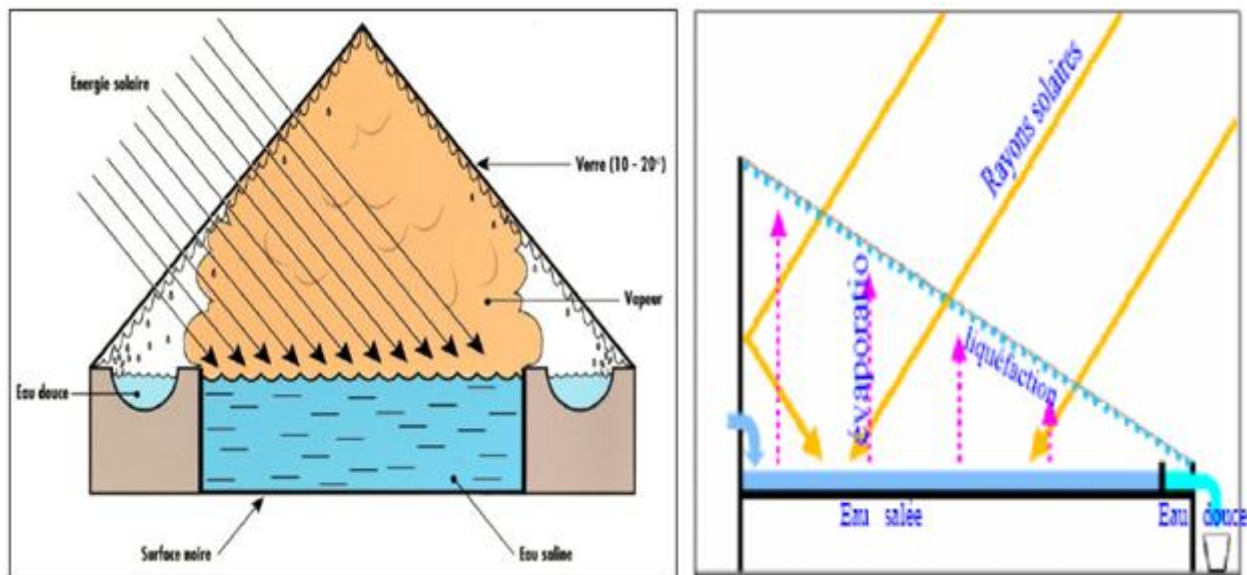
La distillation solaire est l'une des techniques utilisées pour la production de l'eau douce à partir d'eau saumâtre et d'eau de mer grâce à l'énergie solaire. Il s'agit de réaliser artificiellement et à petite échelle ce que la nature fait journalièrement et à grande échelle et qui consiste en, l'absorption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



par application d'un des procédés industriels de distillation thermique, la vapeur étant produite non par une chaudière classique, mais par une chaudière solaire,.

### II.3.1. Principe de fonctionnement des distillateurs solaire à effet serre [6].

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée **Figure (II. 1)**. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir et bien isolé thermiquement) et avec l'augmentation de la température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente. Les gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé sur les rebords. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le dépôt des sels.



**Figure (II. 1):** Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire simple effet [1]

### II.3.2. L'effet de serre

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

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

repose sur l'effet de serre. L'énergie solaire entrant par la couverture est absorbée par l'eau et le fond noir ; puis elle est transmise à l'air par conduction, convection et rayonnement. Comme les parois sont isolées et le verre opaque aux radiations infrarouges de grandes longueurs d'ondes l'énergie solaire se trouve ainsi emprisonnée (effet-serre) et l'air chauffé.. La température de la couverture en contact avec l'air atmosphérique étant inférieure à celle du mélange air vapeur d'eau, il se produit une condensation de la vapeur d'eau sur la surface intérieure de la vitre.

#### II.4. Composants d'un distillateur solaire

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

- **Une couverture transparente** en verre ou parfois en plastique disposée en pente. Le verre est recommandé pour les applications à long terme mais il est généralement coûteux, fragile et lourd. Le plastique (tel que polyéthylène) peut être choisi pour usage de courte durée, à cause de sa faible résistance à la chaleur.
- **Un bac absorbant.** La plaque de l'absorbeur est généralement en métal, le plus couramment est l'acier inoxydable.
- **Une isolation thermique,** on place une ou plusieurs couches d'isolant du type laine de verre, polystyrène, mousse-polyuréthane...etc. ces derniers peuvent être construits sous forme de produits modulables, il s'agit généralement d'un bac (plastique, tôle, bois...) isolé inférieurement et recouvert d'un vitrage. Ce modèle est utilisé seulement pour de très petites capacités, plusieurs dizaines de litres par jour. Quand les besoins sont plus importants, plusieurs centaines de litres par jour, les distillateurs sont construits en maçonnerie (béton, bois,...) sous forme de grands bassins vitrés [2].

#### II.5. Types de distillateurs solaires

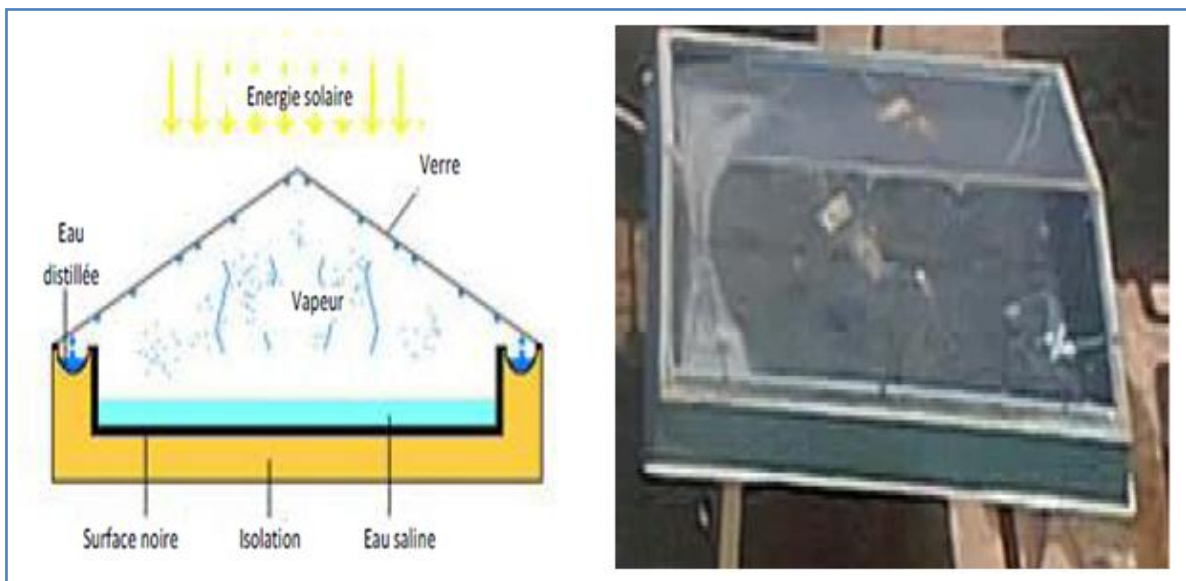
Les procédés de dessalement par distillation utilisant l'énergie solaire sous forme thermique sont:

- ✓ Distillation solaire à effet de serre.
- ✓ Distillation solaire à multiples effets [1].

##### II.5.1. Distillation solaire à effet de serre

C'est un distillateur qui a un seul évaporateur. Néanmoins il existe plusieurs modèles de ce type, le plus connu est le distillateur type bassin. Cependant, il présente un certain nombre d'inconvénients et principalement la position pratiquement horizontale de la vitre qui intercepte moins de

rayonnement solaire qu'une surface convenablement inclinée. 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 (II.2)** [1,18]. Le distillateur solaire est réalisé pour la latitude de  $33.31^{\circ}\text{N}$  qui est une inclination optimale de la couverture verrière pour l'été et l'hiver. Le rendement journalier moyen du distillateur solaire est de 3.15 litre/jour pour une surface d'absorbant de  $1\text{m}^2$ . Durant huit jours en juillet 2004, l'efficacité du distillateur est de 30.65% avec une production horaire maximale de 0.34 litres/h, [1, 6].



**Figure (II.2)** : Modèle expérimental de distillateur solaire à effet de serre plan , [1,2].

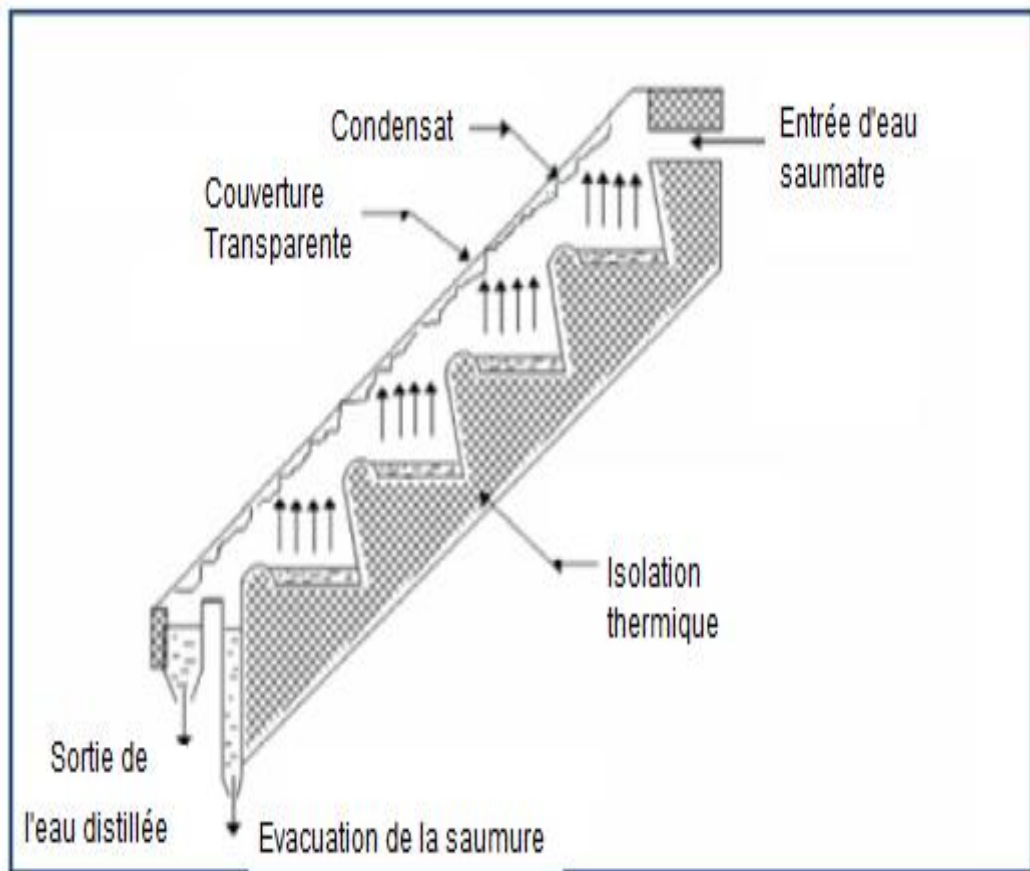
#### a. Distillateur solaire plan type chapelle

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

#### b. 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

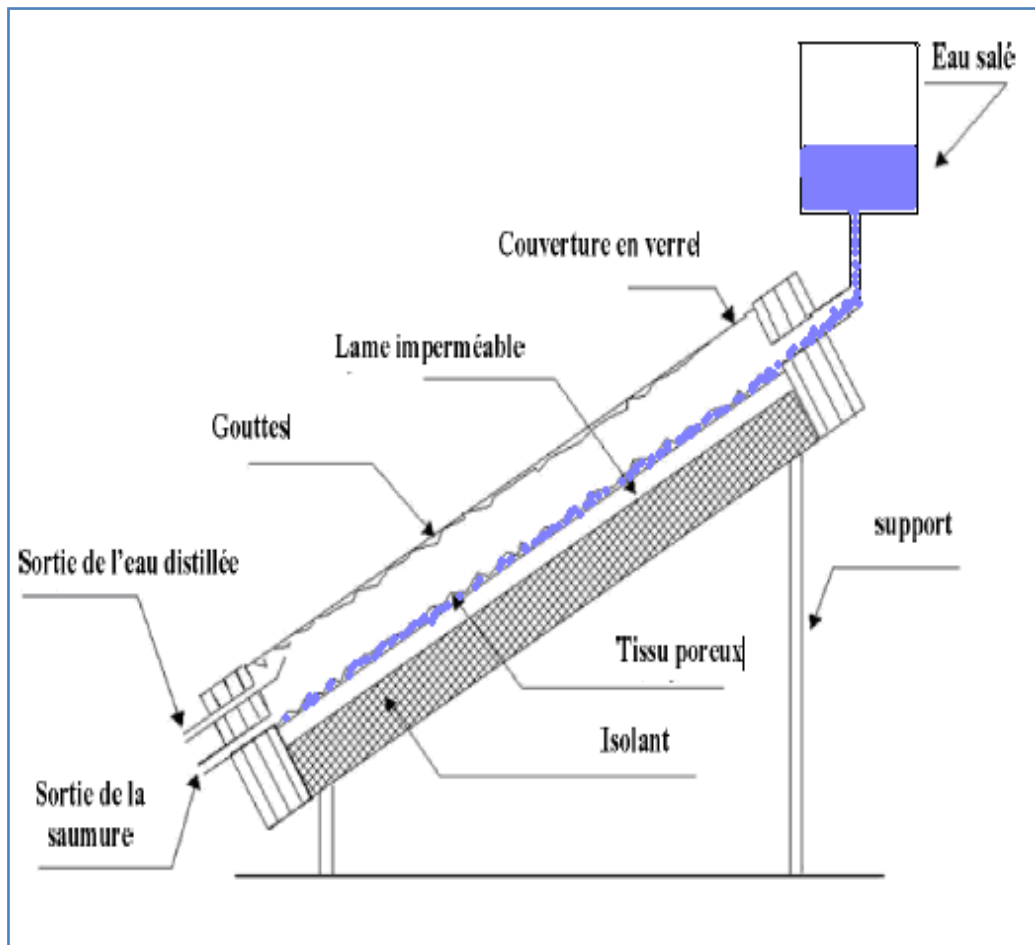
**Figure (II.3)**, n'a été exécuté qu'en petites tailles. Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux [1].



**Figure (II.3):** Distillateur solaire incliné à cascades, [5]

### c. 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. 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 (II .4)** a été testé pendant quelque temps d'une façon satisfaisante, mais il a été très difficile de maintenir une humidité sur les mèches sans points secs,[1].



**Figure(II.4):** Distillateur solaire incliné à mèche, [5]

#### d. distillateur solaire vertical (distillateur à ruissellement)

Le distillateur vertical est composé d'un capteur solaire permettant la captation du rayonnement solaire; d'un compartiment d'évaporation et d'un compartiment de condensation.

La **Figure (II.5)**, présente le principe de fonctionnement du distillateur vertical. Le distillateur est alimenté par l'eau saumâtre à partir d'un réservoir (1), le distillateur est connecté au réservoir à l'aide d'un tube en cuivre (2), le débit d'eau à l'entrée du distillateur est réglé à l'aide d'une vanne (3). La position du réservoir d'alimentation permet l'alimentation du distillateur par un débit constant. Un distributeur d'eau (4), muni de perforations sur la longueur, permet la distribution de l'eau en film sur le tissu spongieux (5), l'eau ruisselle sur le tissu, et la saumure est évacuée en bas (6). L'eau qui s'écoule derrière l'absorbant (7), s'évapore dans le compartiment d'évaporation, le mélange d'eau et d'air à l'intérieur saturé en vapeur d'eau circule naturellement à travers les deux ouvertures (8) réalisées dans une cloison isolée vers le compartiment de condensation (9), et la vapeur se condense au contact de la plaque de condensation à l'arrière du distillateur. La collecte de l'eau se produit dans la gouttière fabriquée en dessous de la plaque de condensation ,[5].

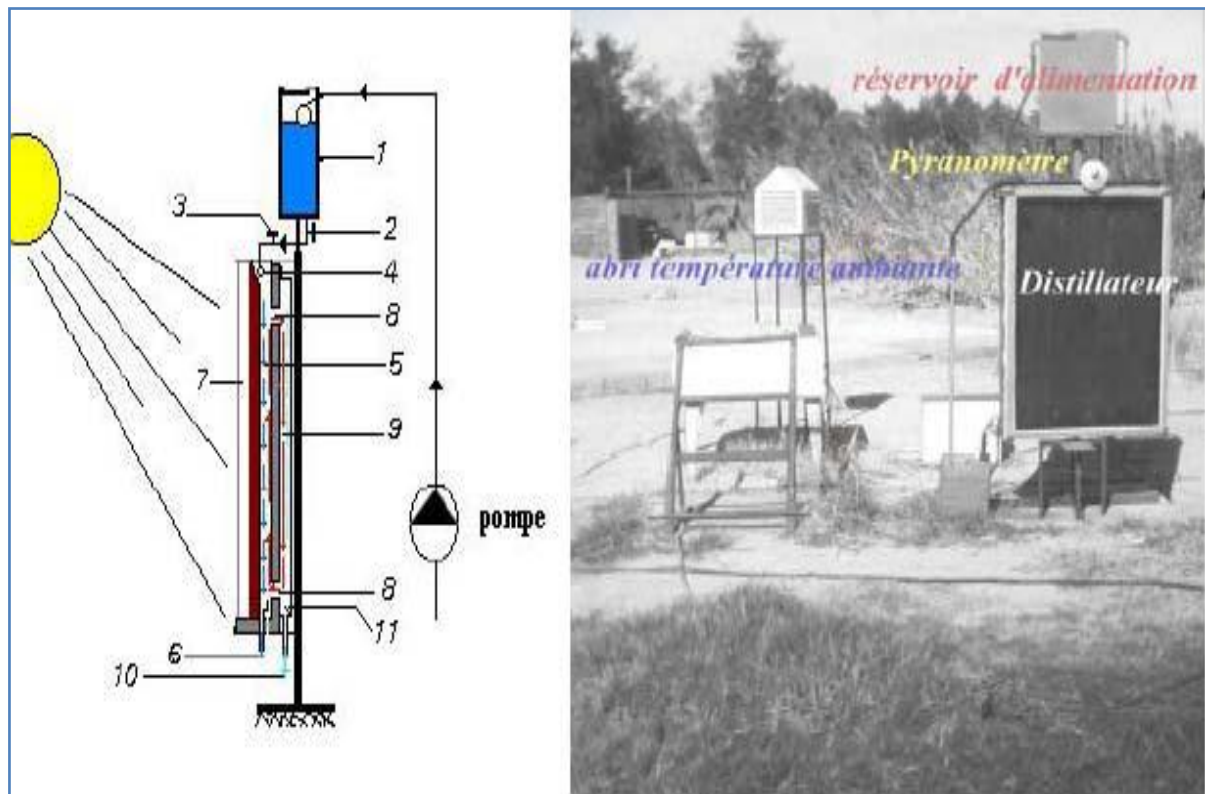


Figure (II. 5): Distillateur solaire vertical, [5].

Le distillateur à ruissellement présente certains inconvénients tels que :

- Un réglage difficile du débit de l'eau à distiller.
- Une perte de chaleur sensible emportée par l'excédent d'eau non évaporée.

e. **Distillateur à évaporateur séparé du condenseur, [2]**

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

✓ **Distillateur solaire-capteur**

Des études expérimentales, ont montré que la production d'un distillateur couplé avec un capteur solaire a augmenté approximativement la production de 36% par rapport à celle d'un distillateur seul. La circulation à travers le capteur solaire peut être naturelle (Thermosiphon) ou forcée en utilisant une un circulateur (petite pompe) (Figure II.6) .



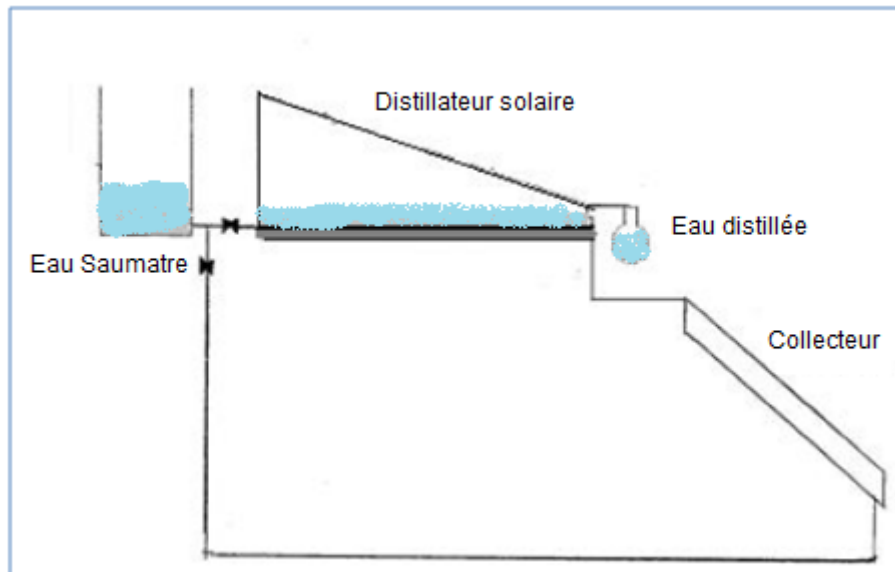


Figure (II.6) : Distillateur solaire plan-captateur.

#### ✓ Distillateur solaire-réflécteur

L'ajout de réflecteurs internes et externes à un distillateur plan permet d'augmenter remarquablement la quantité d'irradiation solaire absorbée par l'absorbeur et améliorer par conséquent la production d'eau distillée de près de 48% quand l'inclinaison de la vitre est de  $20^\circ$ . L'utilisation d'un réflecteur est plus efficace en hiver qu'en été (Figure (II.7)).

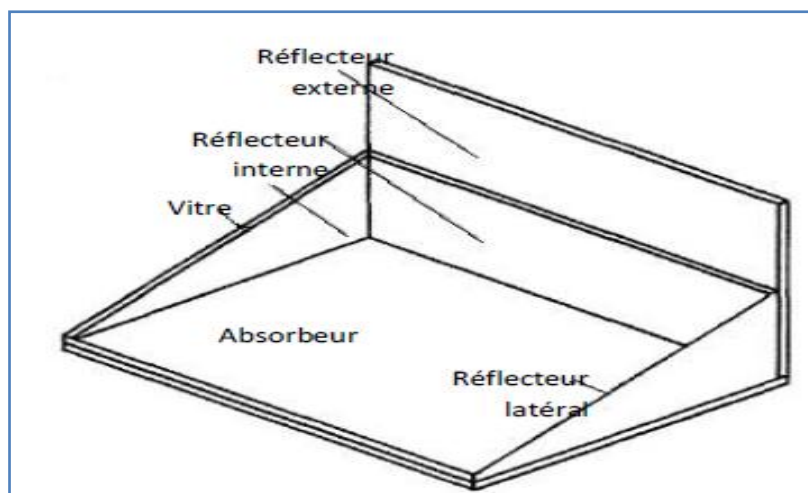
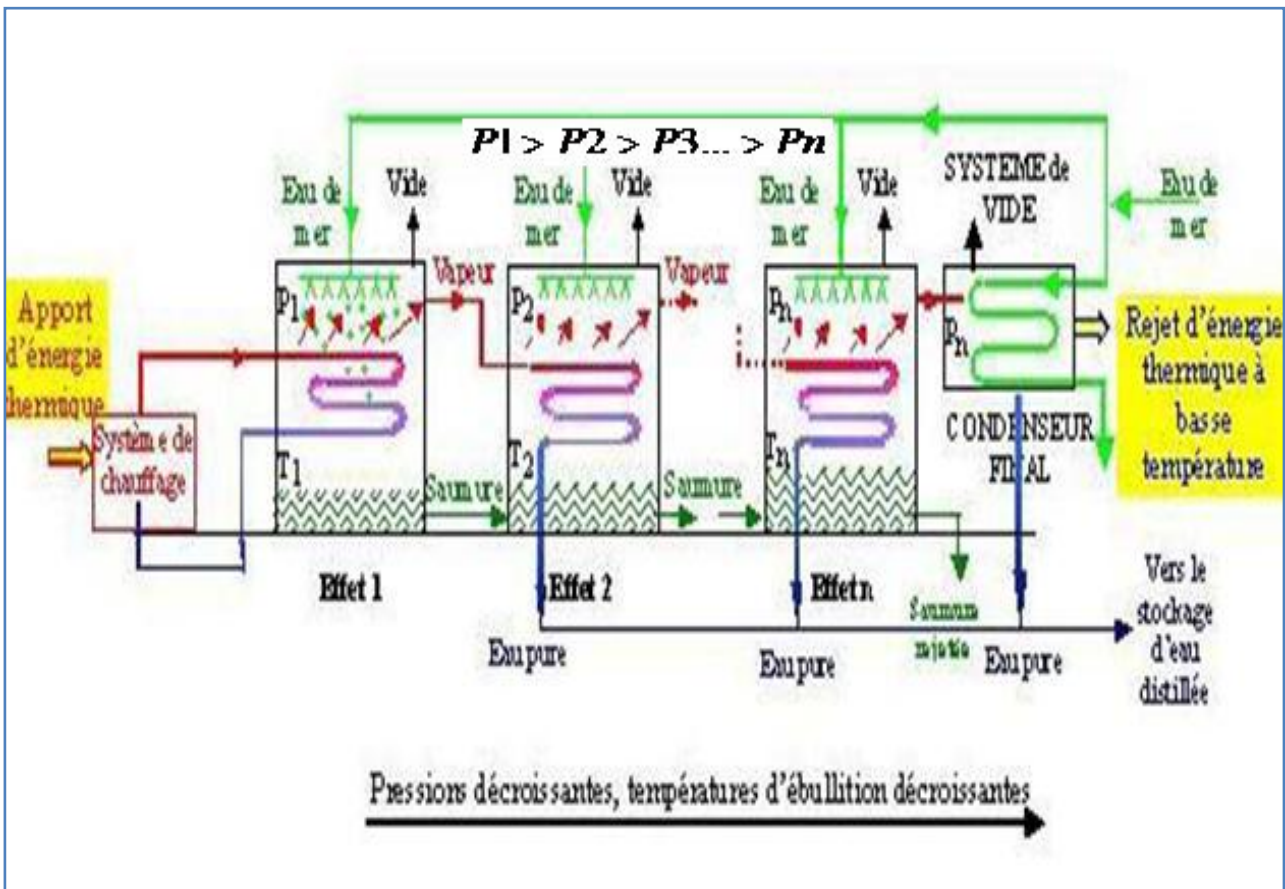


Figure (II.7): Distillateur solaire plan avec concentration

#### II.5.2. 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 à température plus faibles, et ainsi de suite **Figure (II .8)**. 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, [1] .



**Figure (II.8) :** Principe d'un distillateur à multiple effets, [1] .

Le distillateur solaire à multiples effets est constitué de plusieurs évaporateurs placés en série et opérant à des pressions décroissantes; l'effet de tête et l'effet de queue. Dans ce qui suit, nous allons décrire brièvement la conception et le fonctionnement de quelque modèle [18].

**a. Distillateur à diffusion**

Cet appareil **Figure (II. 9)** se compose principalement de deux parties : un réservoir de stockage relié à un capteur et une série de plaques métalliques parallèles et verticales. L'eau chaude provenant du réservoir de stockage échauffe la première plaque et provoque l'évaporation de l'eau qui coule sur le côté droit de celle-ci, la vapeur d'eau produite se condense sur le côté gauche de la deuxième plaque, la chaleur de condensation libérée servira à évaporer l'eau qui coule sur le côté droit de la deuxième plaque et ainsi de suite jusqu'à la dernière plaque où la chaleur de condensation va contribuer au préchauffage de l'eau salée d'alimentation, [18].



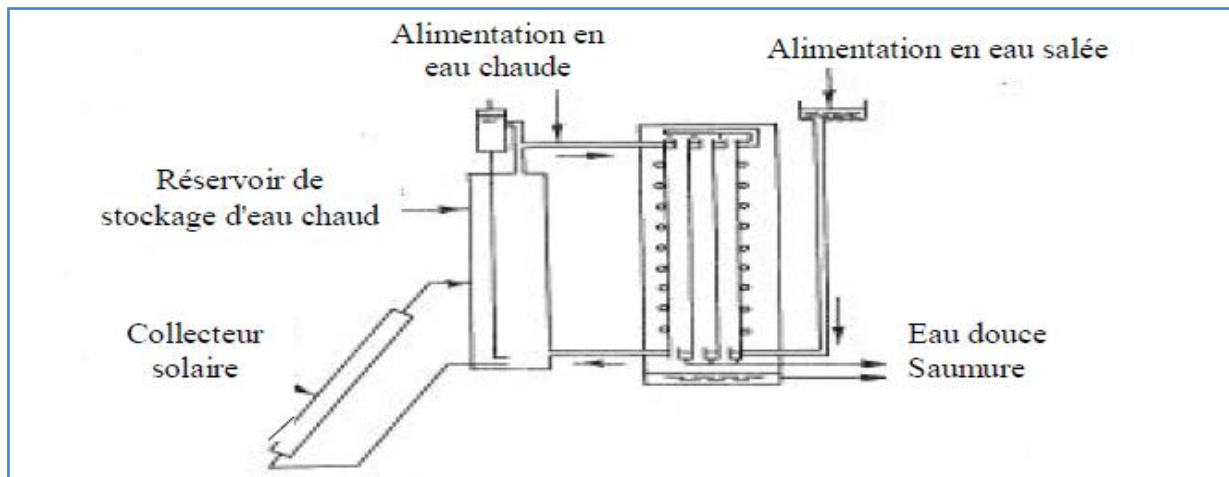


Figure (II.9) : Distillateur à diffusion, [14]

### b. Distillateur solaire a cheminée

Ce distillateur se différencie des autres distillateurs conventionnels par l'adjonction d'une cheminée dans laquelle se trouve un échangeur de chaleur, le conduit plan couvert d'une vitre sert à capter l'énergie solaire. Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau saumâtre qui coule dans le conduit s'évapore et monte dans la cheminée où il se condense, la chaleur de condensation peut être utilisée pour le préchauffage de l'eau entrant dans le système **Figure (II .10),[18]**.

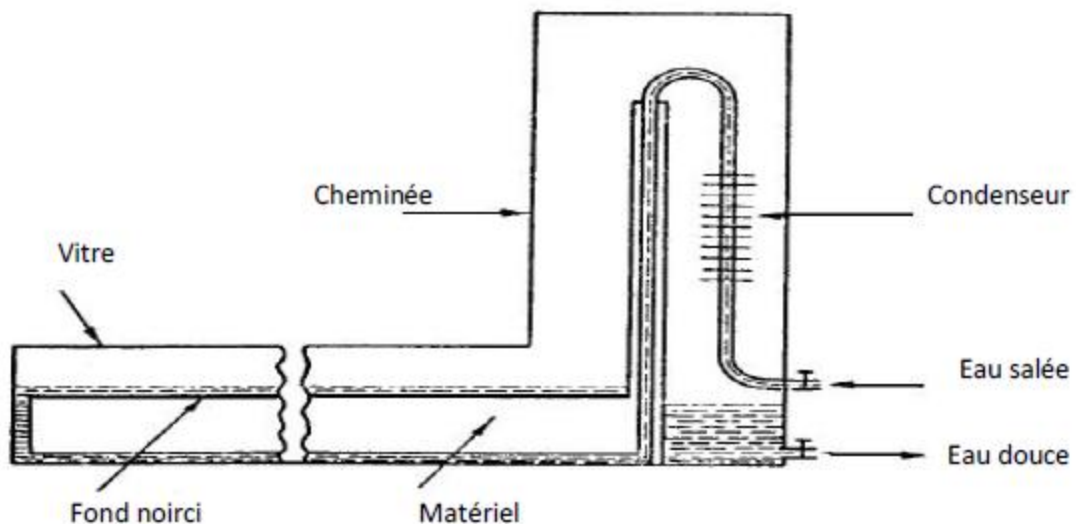


Figure (II .10): Distillateur à cheminée, [2].

### c. Distillateur à mèche évaporant

Ce distillateur est conçu pour économiser la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation (**figure II.11**). L'évaporateur est constitué par la juxtaposition de trois plaques parallèles légèrement distinctes. L'eau à distiller passe dans la première enceinte et arrive au capteur où elle s'échauffe puis s'évapore dans la deuxième enceinte, et la condensation s'effectue sur la face inférieure du

milieu. Les deux dernières plaques sont munies d'un grillage qui augmente l'échauffement et uniformise l'écoulement de l'eau,[18].

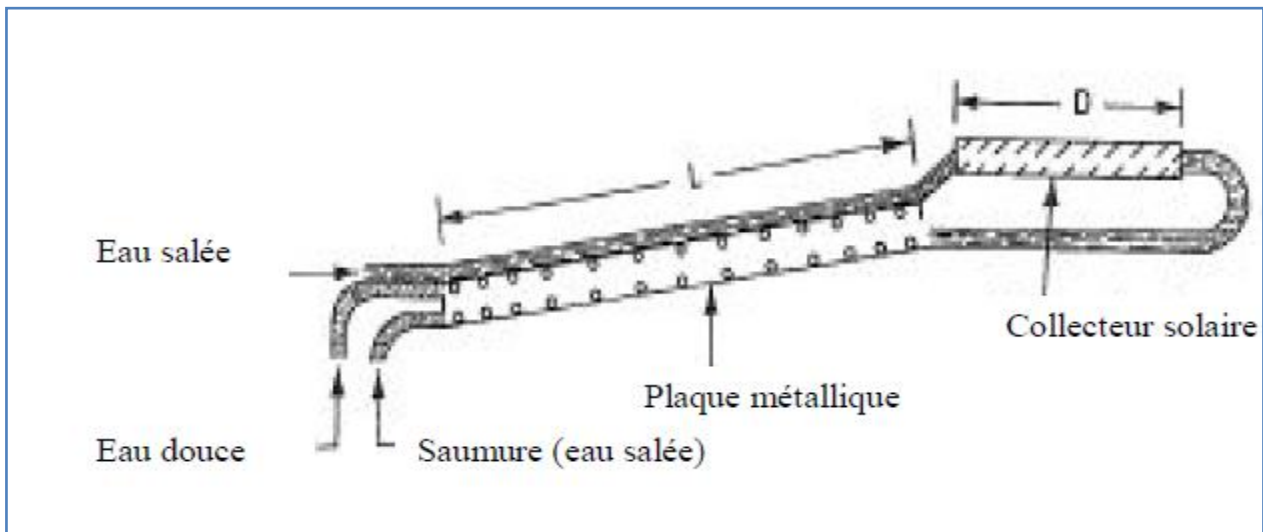


Figure (II. 11): Distillateur à mèche évaporant, [14]

### II.5.3. Distillateurs de types spéciaux

#### a. Distillateur sphérique à balayage

Ce distillateur **Figure (II.12)** 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].

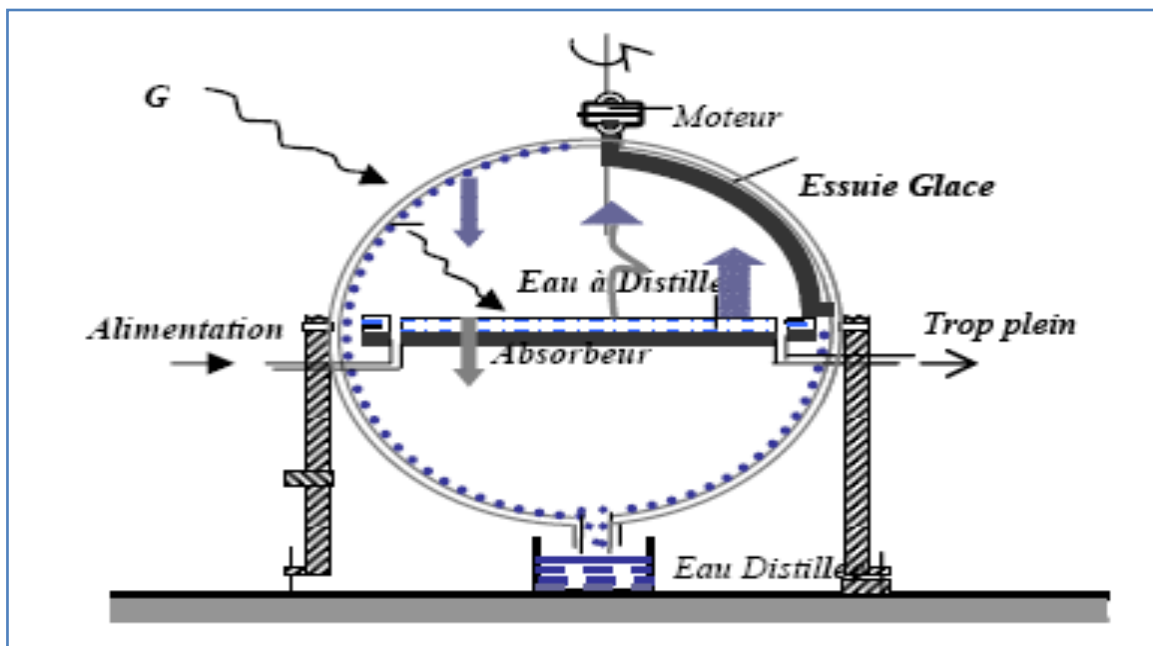


Figure (II.12) : Distillateur solaire sphérique à balayage

### b. Distillateur solaire à film capillaire

Ce système **Figure (II.13)** 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, [1].

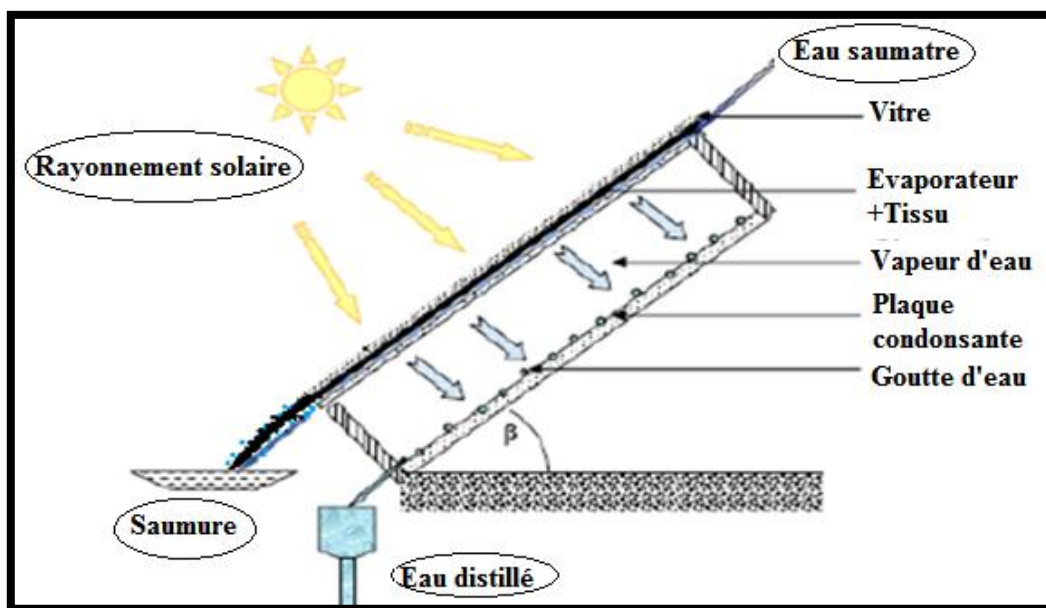


Figure (II.13) : Distillateur solaire à film capillaire

### c. Distillateur barrage

C'est un distillateur incliné (**Figure II.14**). Il est composé d'une couverture de verre jouant aussi le rôle d'un condenseur, d'un récipient pour collecter l'eau distillée, d'un système de circulation, d'un support de structure et d'un absorbeur qui s'est composé de 20 jauges d'acier galvanisé, la graduation ascensionnelle de la plaque absorbante sert pour diminuer la profondeur de l'eau dans le bassin et d'augmenter la surface exposée à l'irradiation solaire. Il faut noter que l'utilisation de ce type de distillateur améliore la production d'eau douce de 20% par rapport à un distillateur conventionnel, c'est pour cela que le distillateur à barrage est proposé dans les projets d'hydrogène solaire, [2].

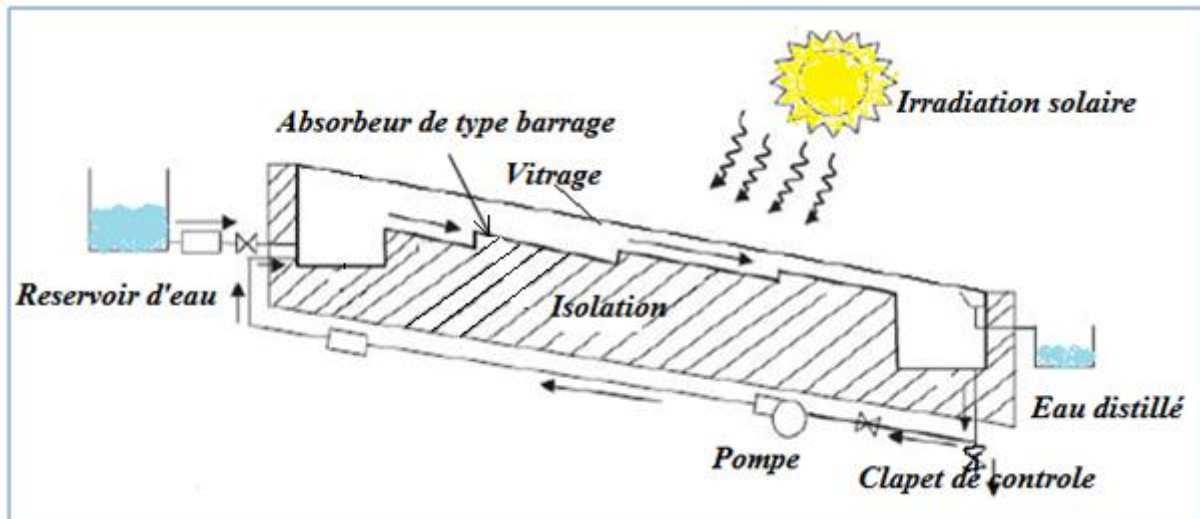


Figure ( II.14): Distillateur de type barrage

#### d. Distillateur solaire à simple pente

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

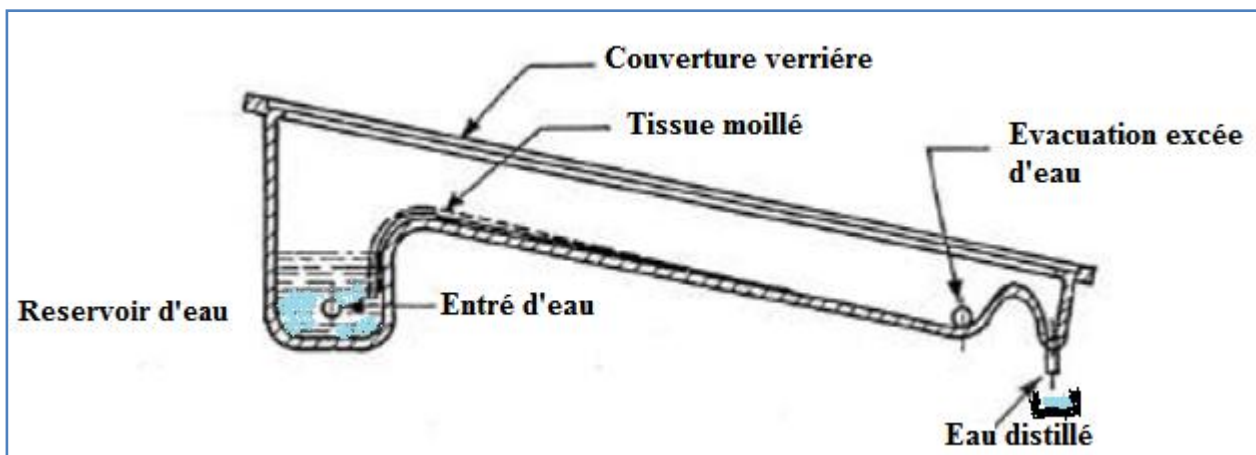


Figure (II.15) : Distillateur solaire à simple pente.

#### e. Distillateur multi-étages

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

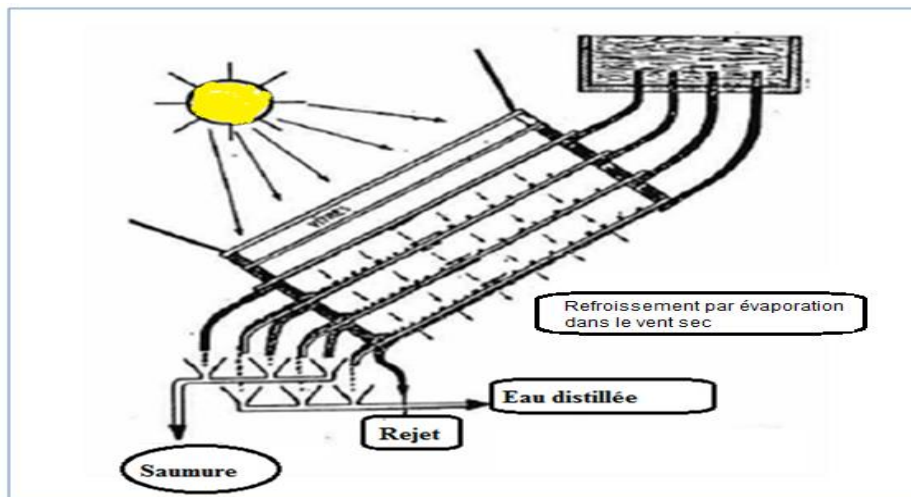


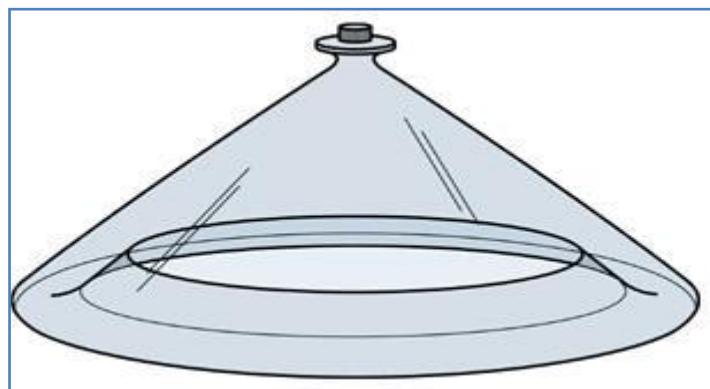
Figure (II.16): Distillateur solaire à plusieurs étages

#### f. Distillateurs de secours

Les distillateurs décrits précédemment sont lourds, encombrants, et difficiles à transporter. Ainsi les distillateurs construits avec des matières plus légères sont plus pratiques. Ils furent utilisés notamment pour fournir l'eau potable de secours lors des voyages. Les plus connus de ces dispositifs sont :

##### - Distillateur de type WaterCone

C'est un distillateur solaire composé d'un récipient noir et d'une cloche transparente de forme conique (**Figure II.17**). Cette dernière est munie d'une gouttière à l'intérieur pour récolter l'eau qui se condense sur la surface, et d'une ouverture au sommet pour récupérer l'eau distillée. Le diamètre extérieur du "WaterCone" est d'environ 80 cm, exposé au soleil, il peut produire un maximum de 1,6 litre d'eau distillée par jour, [2].



Figure( II.17) Distillateur de type WaterCone



- **Distillateur AKA (Vapor-Still)**

Pour fournir l'eau potable de secours à partir de l'eau de mer, un petit distillateur solaire gonflable a été conçu et réalisé pour satisfaire les besoins en eau distillée, (**Figure II.18**) [2].



Figure (II.18) : Distillateur solaire gonflable

**II.5.3. Autres techniques de dessalement de l'eau salée, [1]:**

+ **Technique de l'osmose inverse:**

L'osmose inverse consiste à filtrer l'eau par son passage à travers une membrane semipermeable 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 semipermeable 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

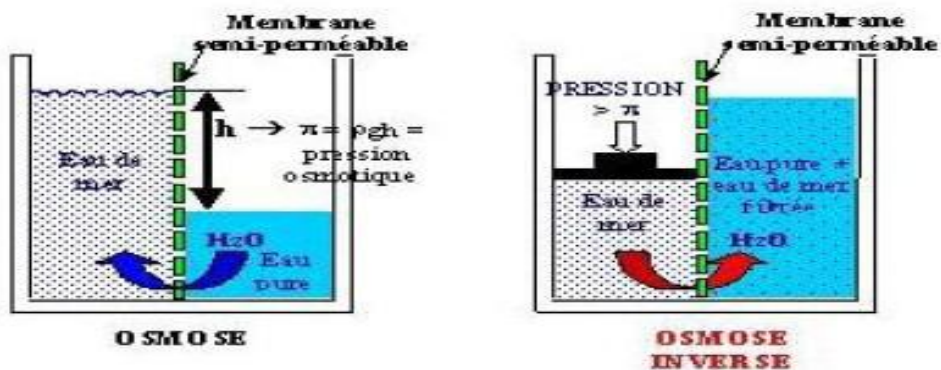
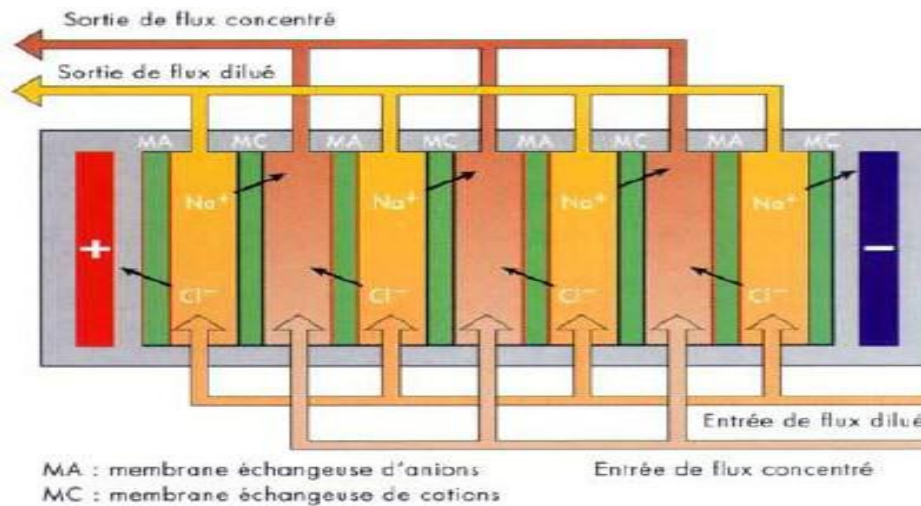


Figure (II.19): Principe de l'osmose inverse

+ **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

tremplant dans le liquide. Les ions positifs ou cations (par  $\text{Na}^+$  sont attirés par l'électrode négative (ou cathode) tandis que les ions négatifs ( $\text{Cl}^-$ ) 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.



Figure(II.20) :Principe de fonctionnement de l'électrodialyse

**✚ 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.

**✚ Technique de la distillation (flash):**

Cette technique est illustrée par la **figure (I.25)**, où l'eau salée subit un préchauffage progressif lors de son passage à travers les différents condenseurs, puis un chauffage de  $90^\circ\text{C}$  par vapeur et entre dans une série de chambres de distillation où règne une faible pression (par rapport à la pression atmosphérique)

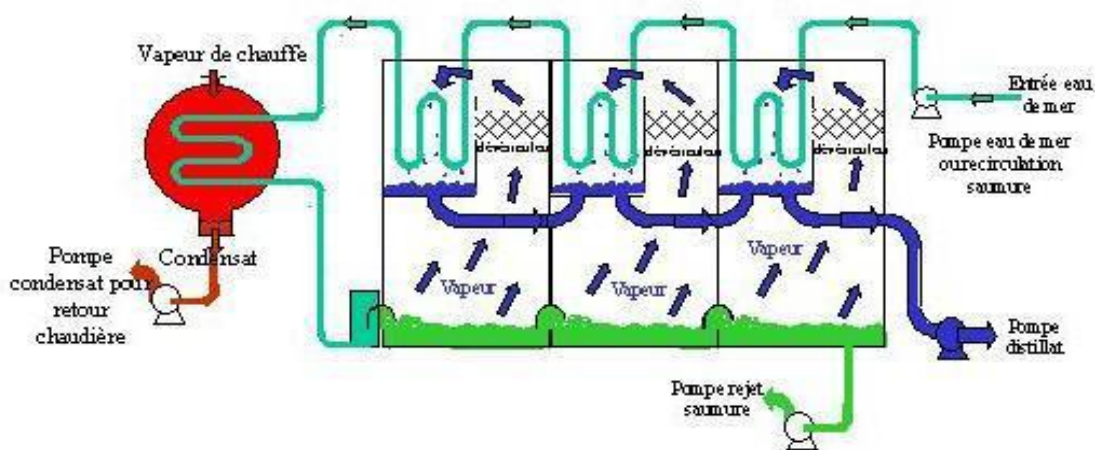


Figure (II.21) :Principe de fonctionnement de la distillation < flash> , [2]

## II.6. Les paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur

Les paramètres qui influent sur le fonctionnement des distillateurs thermosolaires sont classés en paramètres externes et paramètres internes, [5].

### II.6.1 Paramètres internes

#### II.6.1.1. Paramètres de position

- ✓ L'emplacement du distillateur, où les distillateurs doivent être placés de façon à éviter les obstacles "l'effet de masque", qui empêchent le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.
- ✓ L'orientation; dépend essentiellement du fonctionnement du distillateur pendant la journée où on distingue ;

Fonctionnement pendant la matinée → face à l'Est. Fonctionnement pendant l'après -midi→ face Ouest. Fonctionnement durant toute la journée → face Sud. L'inclinaison dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année, [1].

#### II.6.1.2. Paramètres de construction

- **Couverture**

La couverture transparente intervient essentiellement par sa nature qui peut être en verre ou en plastique. Elle a un double rôle à jouer : d'une part c'est un filtre sélectif du rayonnement solaire (le rayonnement émis ou réémis par l'intérieur du bassin à basse température qui ne la traverse pas) et d'autre part, c'est une surface de condensation de la vapeur d'eau : une bonne mouillabilité est nécessaire pour éviter la condensation en gouttelettes qui ont tendance à retomber dans le bassin et qui réfléchissent une partie importante du rayonnement incident. Pour assurer le ruissellement de l'eau condensée vers la gouttière (collecteur), [5].

- **L'inclinaison**

L'inclinaison par rapport à l'horizontale permet de déterminer la quantité d'énergie solaire introduite dans le distillateur et minimiser la distance entre la saumure et la vitre (longueur caractéristique du système) pour le distillateur Hot-Box cet inclinaison est de 10° environ par contre le calage des distillateurs à cascades est égale à la latitude du lieu. Toutefois, l'orientation doit faire l'objet d'un choix judicieux cas par cas selon le type de distillateur. L'inclinaison influe aussi sur les équations des bilans énergétiques des différents constituants du distillateur avec son environnement, [1].



- **L'absorbeur**

Les études faites dans ce domaine montrent que la surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, polystyrène, béton, matière synthétique, verre ordinaire). Le choix de la matière de la surface absorbante ou du bac noir dépend de son inertie thermique, de la résistance à l'oxydation par l'eau et des dépôts minéraux,[5].

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

La performance du distillateur augmente quand la distance entre la saumure et la vitre diminue. Cette remarque doit être prise avec précaution car la minimisation de la distance peut créer un problème de vapeur non condensable induisant une réduction de la production. Il est plus raisonnable de dire il faut chercher la distance optimale de conception ,[5].

- **L'épaisseur de la lame d'eau à distiller**

L'épaisseur de l'eau saumâtre dans le bac joue un rôle très important. La production est autant plus importante pour un distillateur à faible épaisseur de saumure, mais pour un distillateur de grande épaisseur de la saumure, le maximum de production est toujours obtenu au cours de la journée mais avec un décalage horaire de 2 heures maximum après midi TSV.

L'augmentation de l'épaisseur de la lame d'eau induit une forte inertie thermique et par conséquent une augmentation de la période de fonctionnement qui peut durer jusqu'à minuit mais avec une production faible dégradée,[5].

- **L'isolation des faces latérales du distillateur**

L'isolation des faces latérales et arrières est pour but de réduire les pertes par conduction vers l'ambiance (transfert de chaleur avec le milieu extérieur) [5].

### II.6.1.3. Paramètres thermo-physiques,[1,5,18]

Les paramètres thermo-physiques sont caractérisés par :

- La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique pour (**La couverture et la surface absorbante**).
- La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique **pour (La saumure)** .
- La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, le coefficient de dilatation thermique pour (**Le mélange air-vapeur**).

**II.6.1.4. Paramètres optiques**

Les paramètres optiques sont caractérisés par (l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmittivité du rayonnement) de la surface de la couverture et de la surface absorbante.

**II.6.1.5. Paramètres thermiques**

Ces paramètres sont les différentes températures du système, du fluide caloporteur, en particulier la température de l'eau à distiller (source chaude) et la température de l'ambiance (source froide) ou les paramètres de pression et de volume associés selon les lois thermodynamiques.

**II.6.1.6. Paramètres de la saumure [1]:**

L'épaisseur de la nappe d'eau, plus ce dernier 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 en 24 heures diminue lorsque l'épaisseur de la nappe augmente. Des expériences ont montré que cette production suit la loi

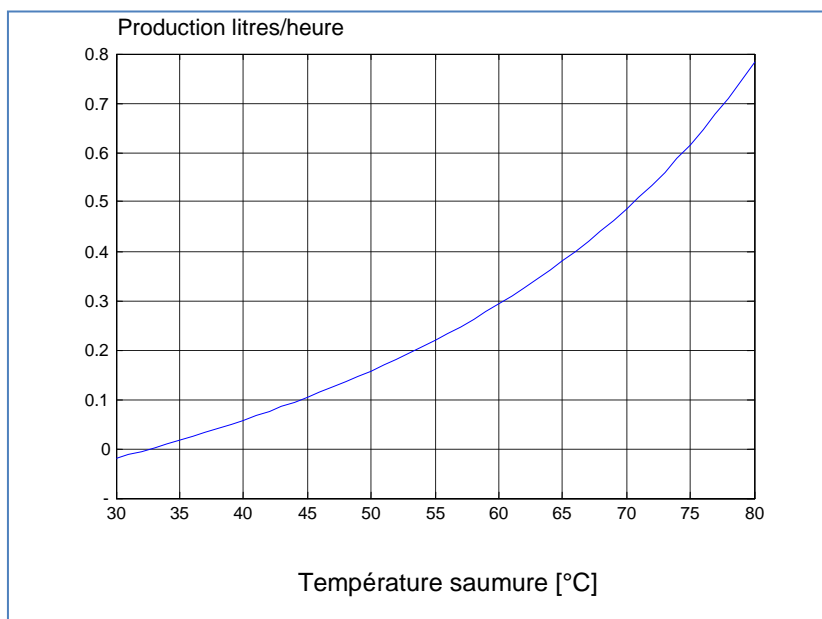
$$Y = \frac{a}{X + b} + c \tag{II.7}$$

Y: la production. X: l'épaisseur de la saumure. a, b, c des 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 a montré que le débit [litres/heure] en fonction de la température saumure T [°C] suit une loi hyperbolique de la forme:

$$y = \frac{51.607}{117 - T} - 0.613 \tag{II.8}$$



**Figure (II.22) :** Variation du débit de distillat en fonction de la température saumure

Lorsque la température de la saumure augmente; un dépôt sur la surface absorbante due à la formation de bicarbonates de sodium insolubles dans la saumure à 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 des sels augmente, le dépôt salin agit sur le pouvoir absorbant de la surface noire et fait chuter considérablement la production.

## **II.6.2. Paramètres Externes**

Les études faites par plusieurs chercheurs ont montré que les paramètres les plus fréquemment retenus sont:

### **II.6.2. 1. Paramètres Météorologiques**

#### **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  $\mu\text{m}$ ). Le maximum d'intensité est obtenu pour la longueur d'onde 0.47  $\mu\text{m}$  dans le spectre visible. L'intensité globale du rayonnement solaire (éclairage) arrivant aux confins de l'atmosphère sur une surface perpendiculaire est constante, est égale à 1.35 kW/m<sup>2</sup>. Cependant, l'énergie arrivant au voisinage de la surface terrestre est affaiblie par l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère. Le coefficient de transmission est assez constant en cours d'année et se situe entre 0.7 et 0.9. Pour le site d'Adrar l'indice de clarté est d'environ 0.65. Plusieurs études montrent que l'irradiation globale reste le paramètre le plus influant sur les caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire,[1].

#### **b) La température ambiante de l'air et la vitesse du vent**

Aux températures de saumure élevées, l'augmentation de la différence de température entre la saumure et le vitrage par l'augmentation de la vitesse de vent fait augmenter la production. Par contre, aux températures saumure faibles, l'augmentation de la vitesse du vent fait chuter le taux d'évaporation.

#### **c) L'intermittence des nuages**

La quantité d'énergie solaire reçue par une surface dépend des paramètres de trouble atmosphérique A et B qui dépendent de l'état du ciel. Cela revient à dire que le passage des nuages diminue l'absorptance effective moyenne du système et fait chuter la production.

### **II.6.2. 2 Paramètres Géographiques**

Les paramètres géographiques tels que la longitude, la latitude et la hauteur de soleil qui détermine l'intensité de la radiation solaire incidente sont à prendre en considération lors de la conception des distillateurs.

## II.7. Conception objective pour un distillateur solaire efficace,[5]

Pour obtenir un rendement élevé, le distillateur solaire devrait maintenir

- Une température d'eau d'alimentation élevée.
- Une grande différence de température entre l'eau d'alimentation (source chaude) et la surface de condensation.
- Une faible perte de chaleur par égouttement dans le bac
- Une faible fuite de mélange air-vapeur
- Un gradient de température optimal entre la source chaude et la source froide
- Une réduction d'absorption du rayonnement solaire par la surface de condensation
- Un transfert optimal des échanges thermiques entre l'eau de condensation et la surface de condensation.

Une grande différence de température peut être réalisée si :

- ✓ La surface de la condensation absorbe peu ou rien le rayonnement entrant.
- ✓ L'eau de condensation absorbe la chaleur qui doit être enlevée rapidement de la surface de condensation.

En plus on doit surveiller les éléments suivants :

- **Emplacement**
- Les distillateurs solaires fonctionnent à l'aide de l'énergie solaire directe sans une énergie additionnelle.
- **La consommation et l'espace additionnel**

L'eau distillée provenant du distillateur peut être de chaude à tiède. Il vaut mieux réfrigérer l'eau dans un pichet (petit broc) en verre pour la refroidir et la stocker.

- **Le goût**

L'eau distillée est insipide à cause de l'absence des minéraux selon les préférences personnelles, le refroidissement de l'eau pourrait en améliorer le goût.

- **La facilité de nettoyage**

On choisit un modèle doté d'un absorbeur facile à nettoyer.

- **La composition des distillateurs**

On recommande que les distillateurs soient en acier inoxydable, acier galvanisé, en polyester (résine armée de fibre de verre), en plastique, en silico-calcaire, et aluminium, selon les considérations

technico-économiques et les performances désirées en fonction de l'usage du système.

## II.8. Caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire, [1,2,20]

Un distillateur solaire dépend essentiellement des grandeurs de fonctionnement, appelées caractéristiques. On distingue notamment la production, le rendement, l'efficacité interne et globale et le facteur des pertes thermiques et le rendement optique.

### II.8.1. Le débit de distillat ou la production du distillateur

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

$$\dot{m} = \frac{Q_{ev}}{L_v} \quad (\text{II. 3})$$

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

### II.8.2. Le rendement :

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de captation par jour. L'inconvénient majeur de ce critère est qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qui arrive sur le distillateur. Le rendement d'un distillateur simple est [5] :

$$\eta = \frac{\dot{m}.L_v}{G} \quad (\text{II. 4})$$

$G$ : Puissance de rayonnement solaire incident par unité de surface.

### II.8.3 L'efficacité globale

L'efficacité globale est définie par le rapport suivant:

$$\eta_g = \frac{Q_{ev}}{G.A_c} = \frac{\dot{m}.L_v}{G.A_c} \quad (\text{II. 4})$$

$A_{vit}$  : Surface de la couverture transparente

### II.8.4 .L'efficacité interne

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

$$\eta_{in} = \frac{Q_{ev}}{Q_{eau}} \quad (\text{II. 6})$$

$Q_{eau}$  : étant le flux de chaleur effectivement absorbé par la masse d'eau saumâtre, pour une intensité globale  $G$ , l'expression de  $Q_{eau}$  est :

$$Q_{eau} = \alpha_t \cdot G \cdot A_c \quad (\text{II. 7})$$

$$\alpha_t = \tau_v \cdot \alpha_e + \tau_e \cdot \tau_v \cdot \alpha_b \quad (\text{II. 8})$$

$\alpha_t$  : étant le coefficient d'absorption effectif de la masse d'eau saumâtre.

$\alpha_e, \alpha_b$  sont respectivement les facteurs d'absorption de l'eau et du fond du distillateur (bac).

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

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

(Voir le tableau II.1. pour l'angle d'incidence du rayonnement entre 0 et 30° est  $\alpha_t = 0.8$ ).

**Tableau II.1. Paramètres optiques des composantes d'un distillateur solaire simple effet,[1]**

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

### II.8.5. Les critères de performances

Le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus objective a conduit ainsi Satcunathan et Hansen à définir le facteur de performance brut (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H) du distillateur de la manière suivante:

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24h}} \quad (\text{II. 9})$$

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (\text{II. 10})$$

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

$$FP = \frac{\dot{m}}{\alpha_t \cdot G \cdot A_c} \quad (\text{II. 11})$$

**II.9. Conclusion**

Ce chapitre expose un état de l'art sur les différents distillateurs thermosolaires à effet serre à simple et multiples effet du point de vue principe de fonctionnement, avantages et inconvénients des différentes technologies réalisées, éléments de conception, paramètres de caractérisation et d'optimisation du système.

# Chapitre III: Modélisation des échanges thermique dans un distillateur



**III.1.Introduction**

L'étude du distillateur solaire à cascade permet de prévoir le comportement de celui-ci, lorsqu'on fait varier les paramètres d'entrées. Les températures des différents éléments constituant le système qui 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 donnée par l'équation suivante :

$$Q = h(T_1 - T_2).A \tag{III.1}$$

$Q$  : flux thermique en (W).  $h$  : Coefficient du mode de transfert de chaleur en  $(W/m^2.K)$ , [1]

**III.2. Description du distillateur à cascades**

Le système (Figure III.1) représente une enceinte fermée qui contient une charge d'eau saumâtre répartie sur plusieurs marches horizontales. Cette charge est chauffée par le rayonnement solaire incident selon le principe de l'effet-serre. De la vapeur se produit au dessus de la surface de la saumure et le mélange air-vapeur se transporte et se condense au niveau de la surface du vitrage. Les gouttelettes du distillat se précipitent dans des rigoles de récupération. Pour une bonne production, Le bac absorbeur peint en noir mat et le système est orienté à la latitude de lieu.

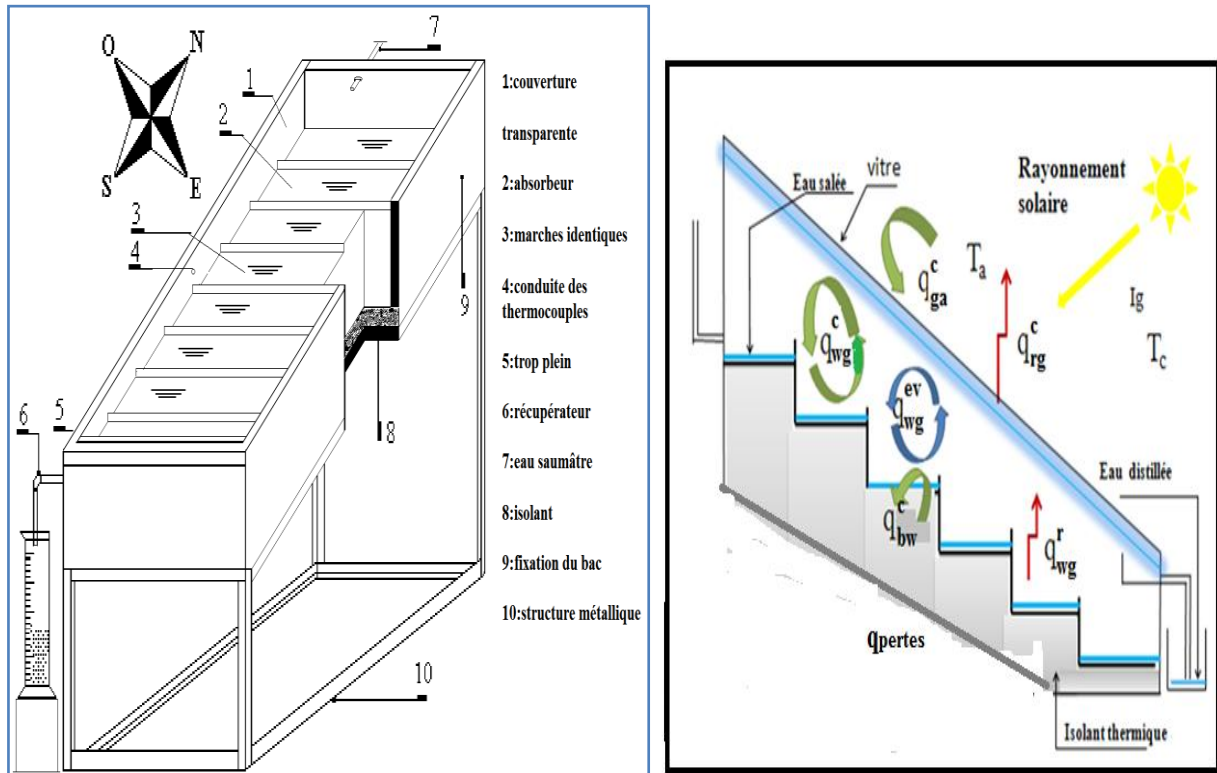


Figure III.1:Distillateur a cascades [15]

### III.3. Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur [1,19]

#### III.3.1 . Echanges de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation:

L'eau saumâtre reçoit essentiellement un flux solaire par convection naturelle de l'absorbeur. 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.

#### III.3.2 . Echanges 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.

#### III.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.

### III.4 . Mise en équation des échanges thermiques

On tenant compte des hypothèses suivantes:

- La couverture est propre,
- La température de chaque composant est uniforme,
- Le soleil est assimilé à un corps noir qui rayonne à une température égale **5800K** ,
- La chaleur perdue par l'eau d'appoint et celle emportée par le distillat sont négligeables,
- Les parois latérales sont supposées adiabatiques,
- Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes,
- La condensation se fait uniquement sur la couverture (pas de condensat 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 et faible.
- Le bassin est étanche.

### III.5. Bilan thermique du distillateur en régime dynamique [1,21]

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],  $C_p$  sa chaleur spécifique en [J/kg °C],  $T$  sa température en [°C]. L'équilibre thermique du nœud  $i$  en régime dynamique est donné par l'équation :

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

$P_i$ : Terme de source .

Pour un distillateur à inertie thermique négligeable (faible masse de ses éléments ou faible chaleur spécifique) ou pour un régime permanent la variation de l'énergie interne est nulle

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

— Dans la couverture transparent

$$M_g \times C_{p_g} \times \frac{dT_g}{dt} = P_g + q_{wg}^r + q_{wg}^c + q_{wg}^{ev} - q_{ga}^c - q_{ga}^r \quad (\text{III.2})$$

$$q_{wg}^c = h_{wg}^c (T_w - T_g) A_w \quad (\text{III.2.a})$$

$$q_{wg}^r = h_{wg}^r (T_w - T_g) A_w \quad (\text{III.2.b})$$

$$q_{wg}^{ev} = h_{wg}^{ev} (T_w - T_g) A_w \quad (\text{III.2.c})$$

$$q_{ga}^r = h_{ga}^r (T_g - T_a) A_g \quad (\text{III.2.d})$$

$$q_{ga}^c = h_{ga}^c (T_g - T_a) A_g \quad (\text{III.2.e})$$

$$P_g = \alpha_g \cdot I_g \cdot A_g \quad (\text{III.2.f})$$

— Dans le saumure

$$M_w \times C_{p_w} \times \frac{dT_w}{dt} = P_w - q_{wg}^r - q_{wg}^c - q_{wg}^{ev} - q_{bw}^c \quad (\text{III.3})$$

$q_{bw}^c$  : 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]

$$q_{bw}^c = h_{bw}^c \times (T_b - T_w) A_b \quad (\text{III.3.a})$$

$$P_w = \alpha_w I_g A_w \quad (\text{III.3.b})$$

— Dans le bac absorbant:

$$M_b \times C_{p_b} \times \frac{dT_b}{dt} = P_b - q_{bw}^c - q_{pertes} \quad (III.4)$$

$P_b$  : 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

$$P_b = \alpha_b I_g A_b \quad (III.4.a)$$

$\alpha_b$  : Coefficient d'absorption

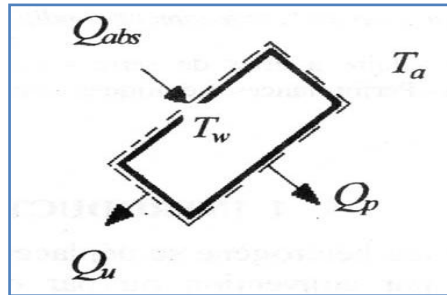
$$q_{pertes} = U_b (T_b - T_a) A_b \quad (III.4.b)$$

$U_b$  : Coefficient global des pertes thermiques  $U_b=14W/m^2K$

**Remarque**

Les différents coefficients d'échange sont dans l'annexe A

**III.6 Modélisation simplifiée d'un distillateur solaire à cascades en régime permanent [15]**



La première loi de la thermodynamique permet d'écrire l'équilibre global du système :

$$Q_u = \dot{m}L_v = Q_b - Q_{pertes} = A_c [\alpha_t I_g - U_L (T_w - T_a)] \quad (III.5)$$

$$Q_{pertes} = U_L A_c (T_w - T_a) \quad (III.6)$$

$$Q_b = \alpha_t Q_{in} = \alpha_t (A_c I_g) \quad (III.7)$$

$\alpha_t$ , l'absorptivité effective totale de la saumure (rendement optique du distillateur), est donnée par l'expression suivante:

$$\alpha_t = \tau_g \cdot \alpha_w + \tau_g \cdot \tau_w \cdot \alpha_b \quad (III.8)$$

$\tau_g$  et  $\tau_w$  sont respectivement la transmittivité du vitrage et de la saumure;  $\alpha_b$  et  $\alpha_w$ , l'absorptivité du bac et celle de la saumure. Pour un angle d'incidence inférieur à  $30^\circ$ ,  $\alpha_t$  est estimée à environ **0.85**. Le facteur des pertes globales  $U_L$  calculé par rapport à la surface d'évaporation en tenant compte des pertes thermiques avant, arrière et latérales est donné par la relation :

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad \text{(III.9)}$$

Dans ce cas,  $U_L$  est estimé à environ  $5.12 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . D'autre part, l'efficacité globale  $\eta_g$  et l'efficacité interne  $\eta_{in}$  du distillateur sont exprimées par la relation :

$$\eta_g = \alpha_t \eta_{in} = \frac{Q_u}{Q_{in}} = \frac{\sum \dot{m} L_v}{\sum I_g A_c} \quad \text{(III.10)}$$

La chaleur latente d'évaporation est estimée par l'expression

$$L_v = 4.18[883 - 0.668(T_w + 273.15)] \quad \text{(III.11)}$$

La combinaison des équations (III.5) et (III.10) permet de déduire le rendement global comme suit:

$$\eta_g = \alpha_t - U_L \left( \frac{T_w - T_a}{I_g} \right) \equiv A - B.X \quad \text{(III.12)}$$

Les constantes A et B de l'équation (3) sont respectivement l'absorptivité effective de la saumure et le facteur des pertes globales du distillateur.

### **III.7.Conclusion**

Ce chapitre est assigné à décrire les éléments de la modélisation des échanges thermiques dans le distillateur aux niveaux des surfaces pertinentes (absorbeur, saumure, vitrage) en tenant compte des hypothèses simplificatrice de fonctionnement et d'environnement. Le travail est concentré sur la description et l'utilisation d'une modélisation globale simplifiée permettant la détermination rapide à moindre cout les paramètres de performance du système caractérisées par le rendement optique et le facteur des pertes thermiques globales.

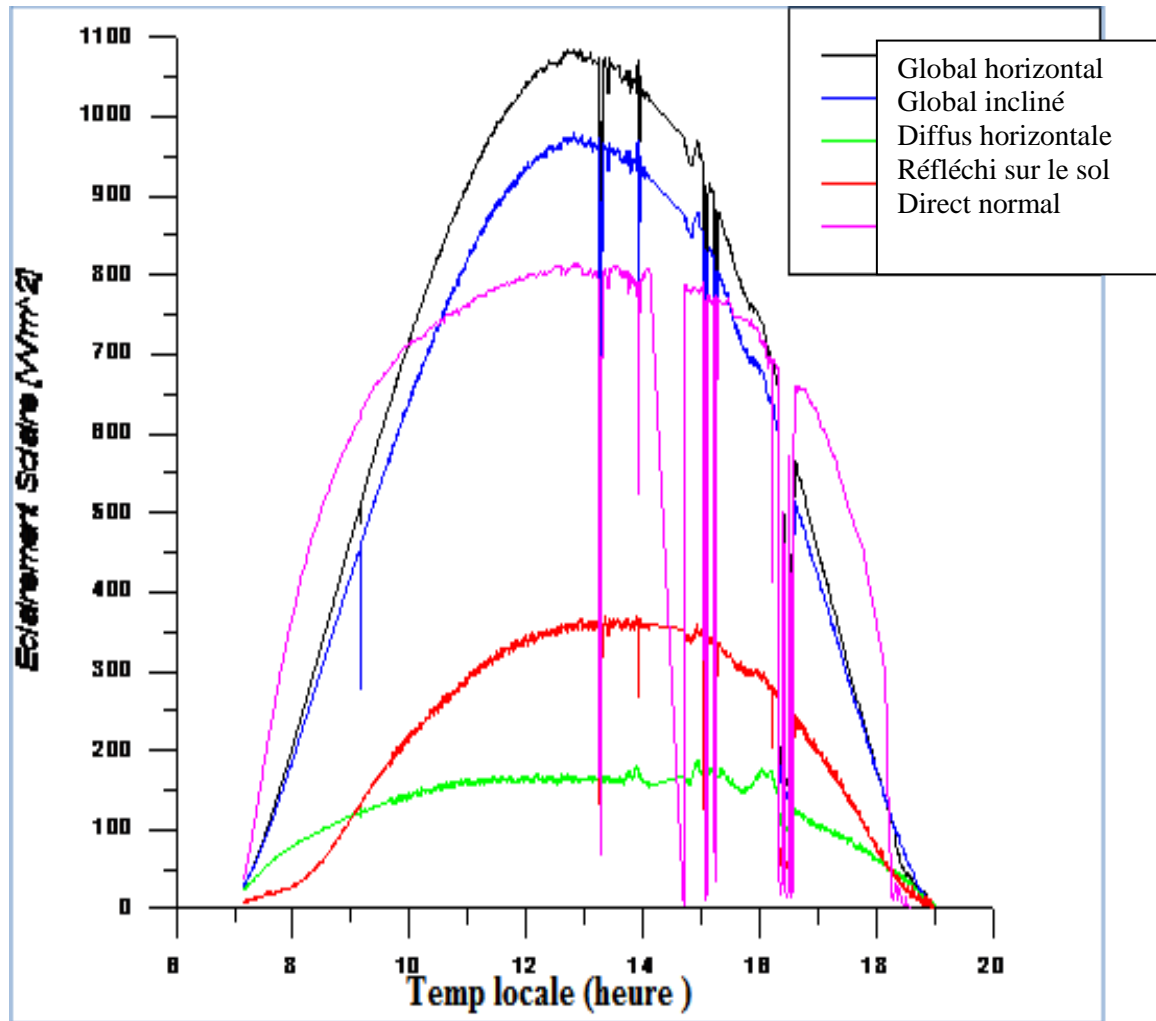


# *Chapitre IV: Résultat & Discussion*

## IV .1.Introduction

Ce chapitre est destiné à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus à l'issue de cette étude de modélisation et de caractérisation réelle du distillateur à cascades. Il présente des courbes sur le rayonnement solaire, les températures de fonctionnement et les performes optiques et thermiques du système.

## IV.2. Présentation des Résultats



Figure( IV. 1) : Variation des composantes du rayonnement solaire journalier (13 Juin)

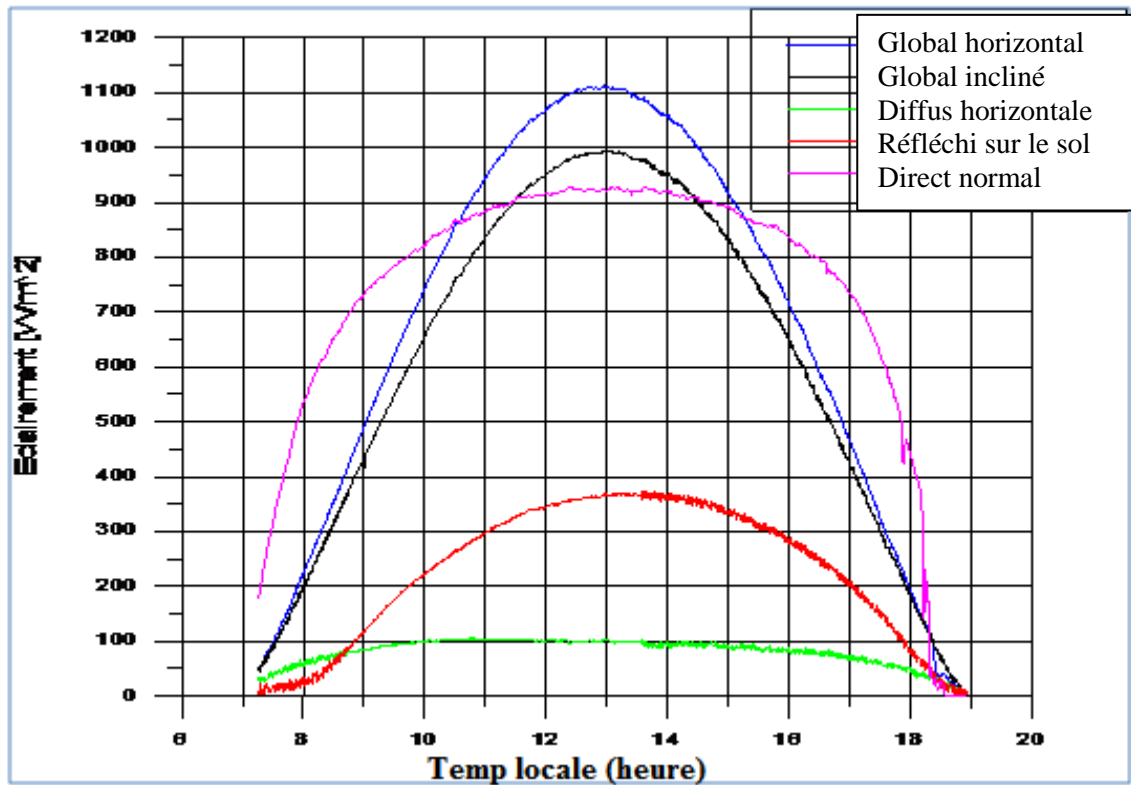


Figure ( IV.2) : Variation des composantes du rayonnement solaire (18 Septembre)

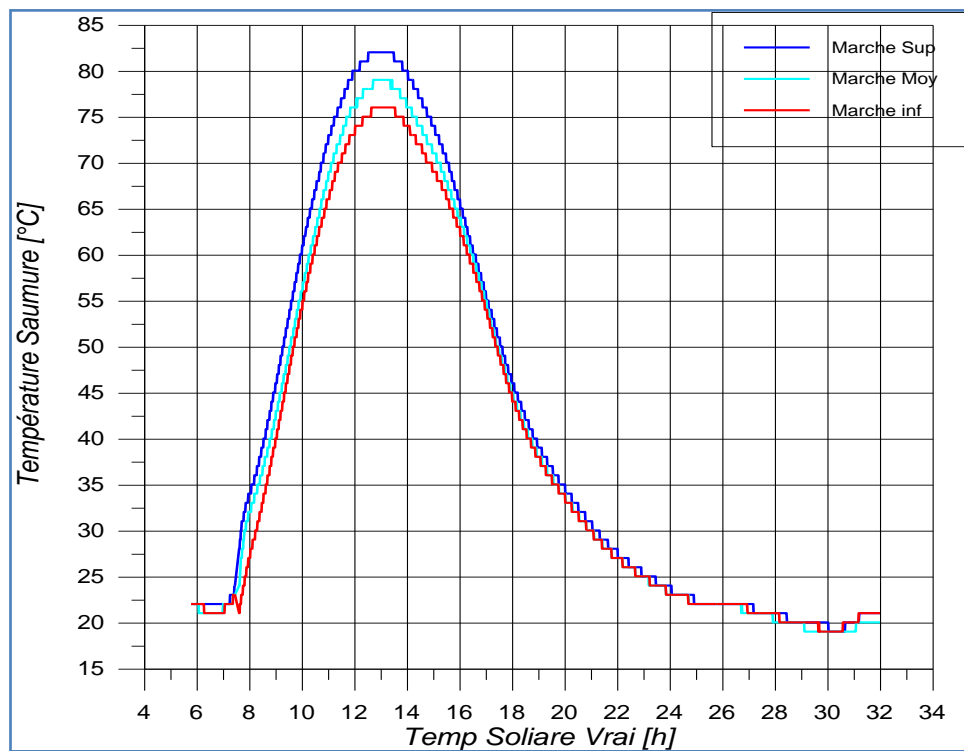


Figure ( IV. 3): Variation journalière de la température saumure (le 3 Octobre)



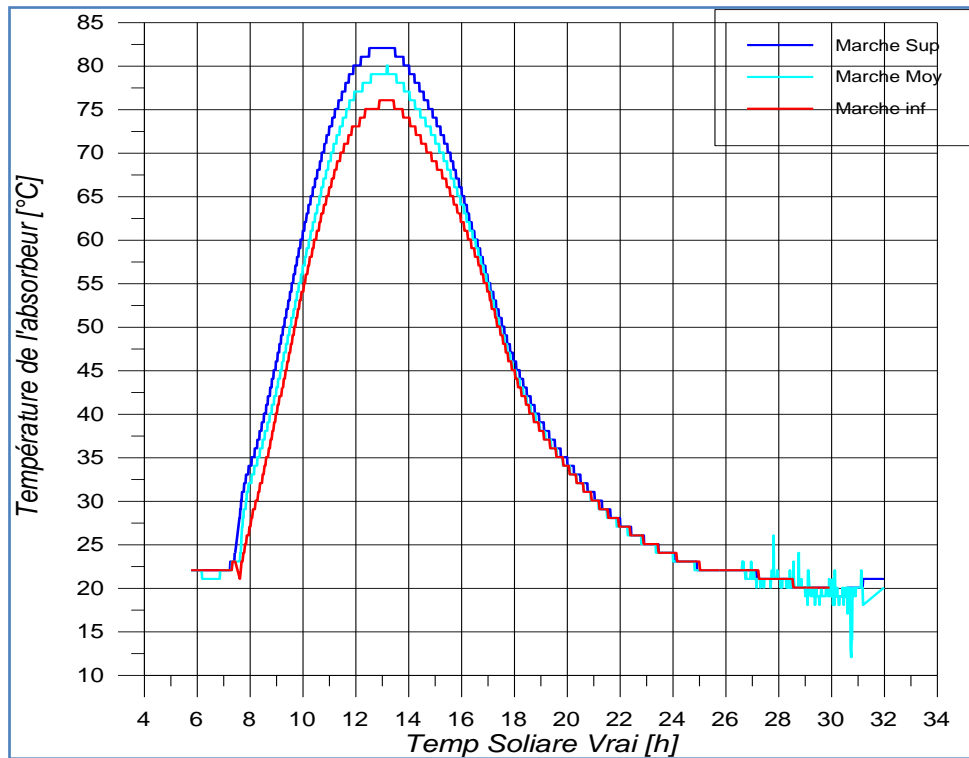


Figure ( IV.4): Variation journalière de la température de l'absorbeur le (3 Octobre)

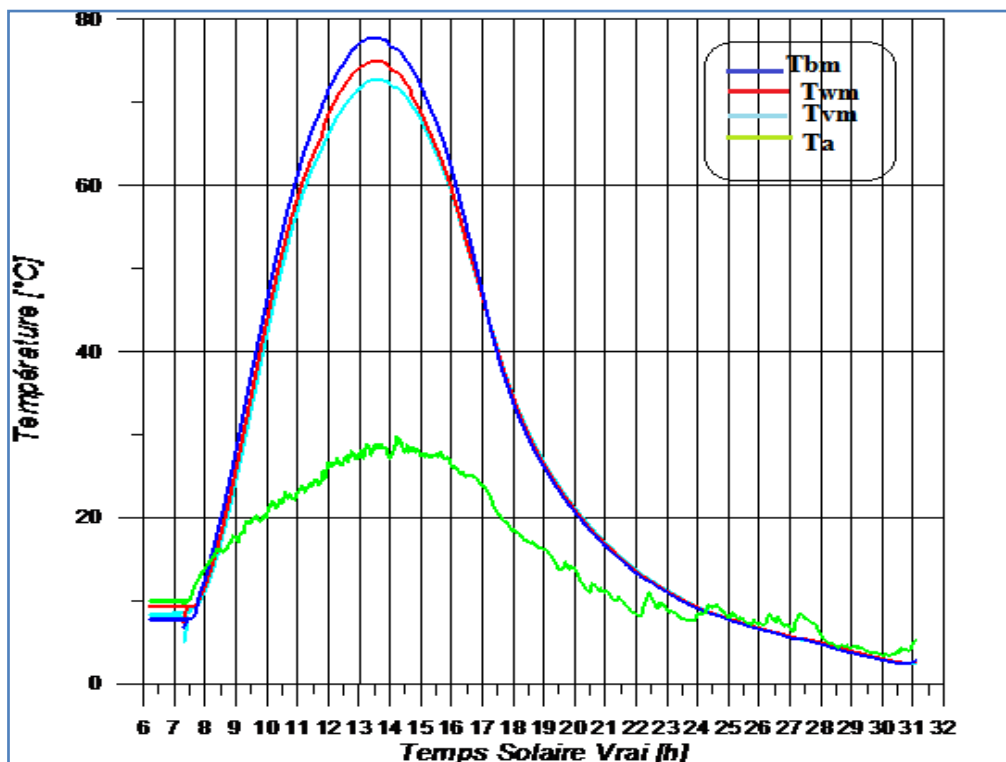
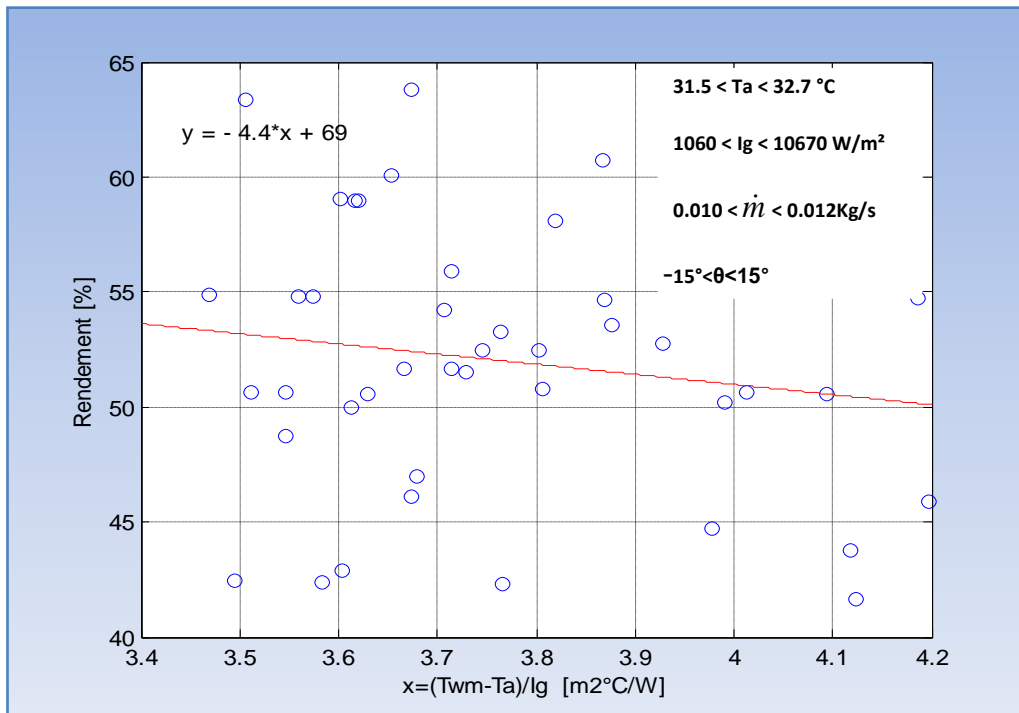
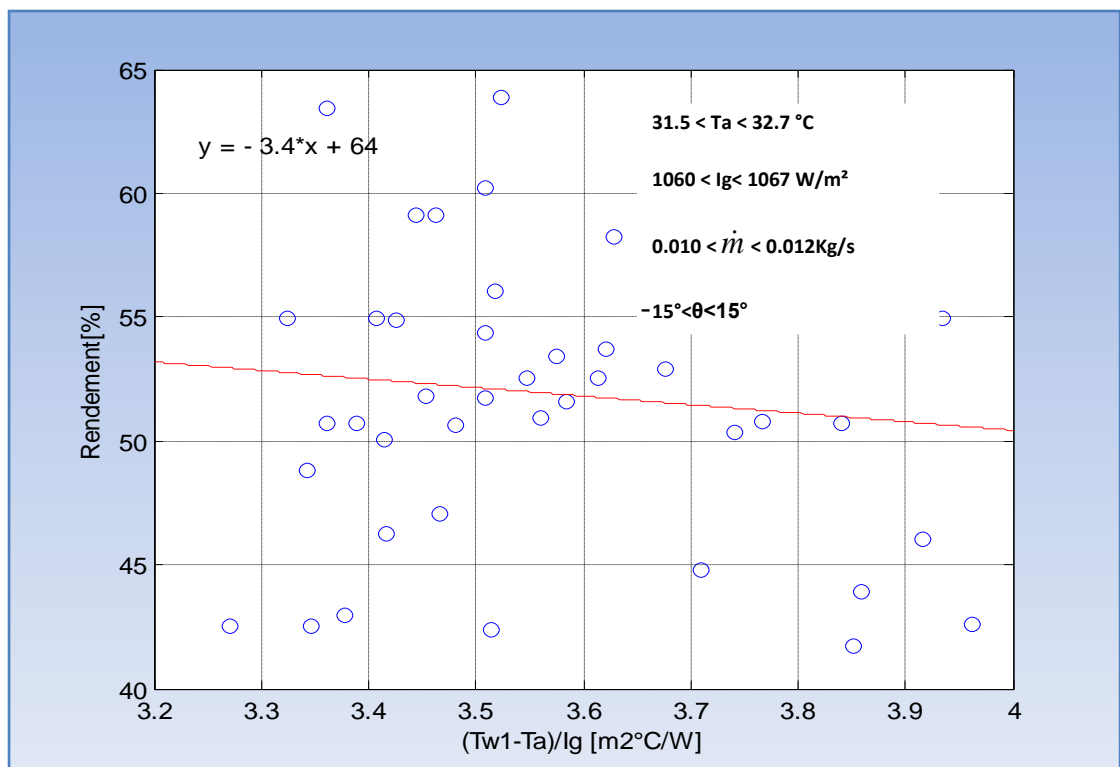


Figure ( IV.5): Variation journalière des températures moyennes (bac: Tbm, saumure :Twm,vitrage: Tvm) et ambiance Ta (le 3 Octobre)

**Remarque :** Pour les figures qui présentent les caractéristique thermo-optique du distillateur Les axes ( x,y) sont multiplié par 100



**Figure( IV.6):** Caractéristique du distillateur à cascades pour les jours du (12 à 15) Décembre



**Figure ( IV.7):** Caractéristique du distillateur a cascade pour les jours (de 12 au 15 décembre) pour la marche inférieure ( Tw1).

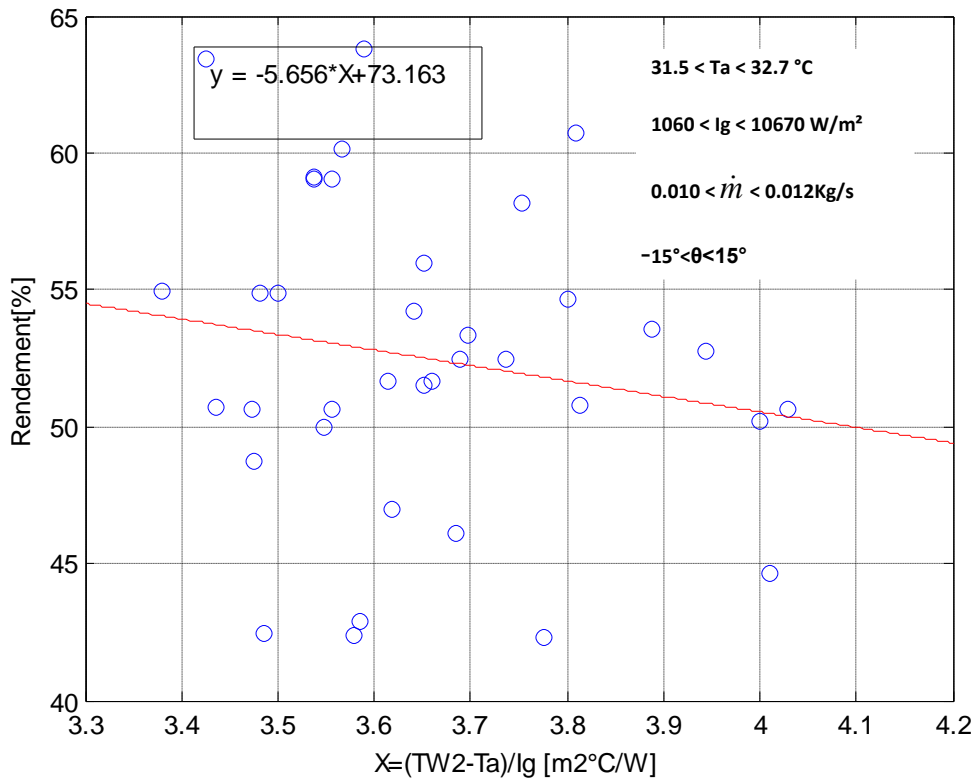


Figure ( IV.8) : Caractéristique du distillateur a cascade pour les jours(de 12 au 15)dicember pour la marche moyenne (Tw2)

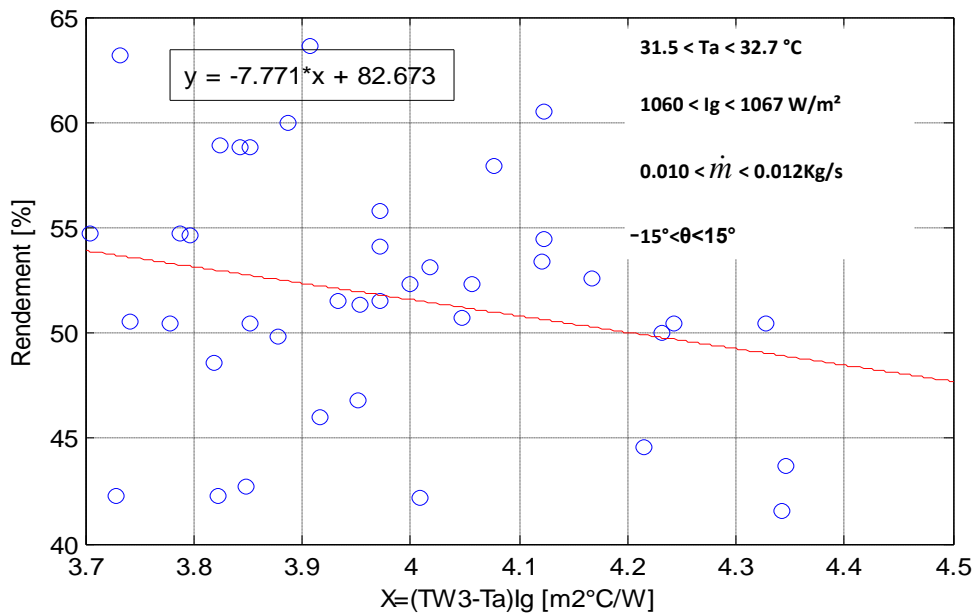


Figure ( IV.9): Caractéristique du distillateur a cascade pour les jours(de 12 au 15) décembre pour la marche supérieure (Tw3)

Tableau (IV.1) : Performances thermiques et optiques du distillateur

Journée du (16, 20, 23) Décembre	Rendement optique $\alpha_t$ [%]	Facteur des pertes thermiques globales $U_L$ [W/m <sup>2</sup> °C]
Marche Inferieur	52	0.75
Marche milieu	68	5.8
marche Supérieure	75	6.2
Marche moyenne	73	5.9

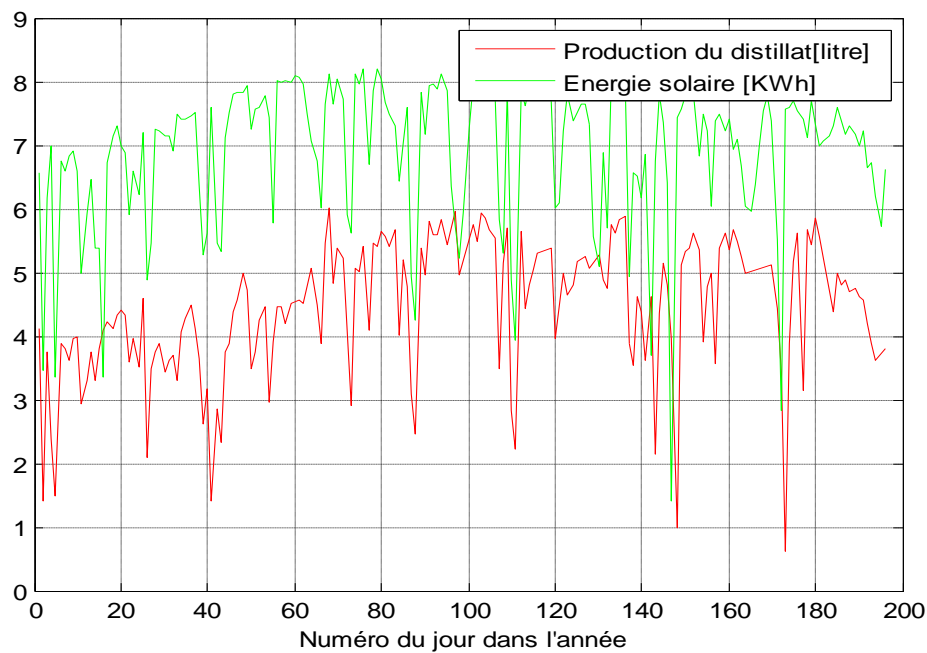


Figure (IV.10): Variation de énergie solaire incidente et le débit du distillat pendant l'année

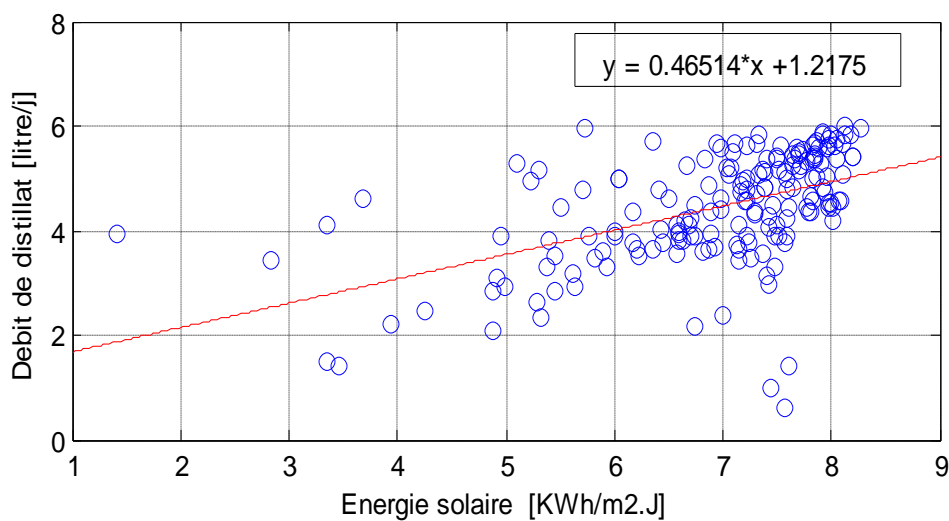
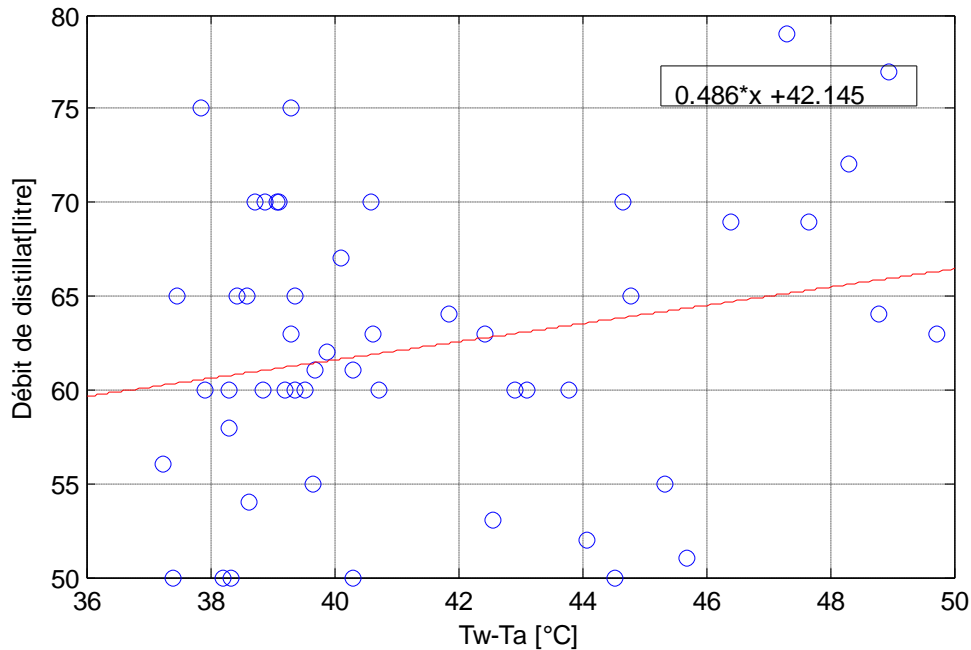


Figure (IV.11): La variation de débit du distillat en fonction l'énergie solaire incidente



**Figure ( IV.12):** La variation de débit du distillat en fonction le gradient de température

### IV.3. Discussion des résultats

Les figures (IV.1 et IV.2), donnent les différentes composantes du rayonnement solaire (Global horizontal, global incliné) à l'ouverture du distillateur, direct, diffus et réfléchi par le sol durant deux périodes distinctes de l'année. L'éclairement solaire incliné est inférieur ou supérieur l'éclairement solaire global horizontal selon la période de l'année (chaude ou froide). Cela est un inconvénient pour la conception des systèmes fixes. Seulement, pour le distillateur à cascades en particulier c'est la source chaude qui nécessite une orientation du système pour absorber le maximum d'énergie. Le système profite aussi de la fraction de l'éclairement réfléchi par le sol qui dépasse les 35% du rayonnement global horizontal. Le cascade est plus favorable pour la captation de la radiation solaire incidente sur plan incliné.

- Les figures ( IV.3; IV.4) montrent la variation de la température de la saumure (source chaude du système) en fonction du temps solaire vrai (TSV) le 3 Octobre pour les différentes marches. La température des charges d'eau dans le bac sur les marches augmente avec l'augmentation du niveau de la marche par rapport à l'horizontal. Cette variation est liée à l'absorption de l'irradiation solaire et passe par trois phases : La première phase est la charge thermique (du lever de soleil à 14 h temps local selon la période de l'année) dans cette phase la température de la saumure est croissante car l'énergie solaire incidente dans cette durée est croissante et en même temps les pertes thermiques sont décroissantes par ce que la température ambiante augmente. Dans la deuxième phase (de 14h à 16h) la température est pratiquement constante car

toute l'énergie absorbée est transformée en énergie utile de vaporisation de l'eau saumâtre, c-à-d la variation de l'énergie interne du système est nulle. La troisième phase est la décharge thermique (de 16h au coucher du soleil). Dans cette phase on constate une décroissance de la température saumure et une augmentation des pertes thermiques jusqu'à l'équilibre thermique total des composantes du distillateur en fin de journée au lendemain. La comparaison des deux figures (IV.3 et V.4) montrent une légère différence entre la température du bac et de la saumure dans les différentes marches du système car l'épaisseur de la lame d'eau est faible (1-2 cm).

- La figure ( IV.5) : représente respectivement l'évolution de la température moyenne du bac absorbant, la saumure et la vitre. On remarque que les trois courbes ont les mêmes allures (progressent dans le même sens), seulement, la température du bac absorbant est supérieure à celle de la saumure et que cette dernière est supérieure à celle de la vitre. La température du vitrage est inférieure aux températures saumure et absorbeur car le vitrage est soumis à des déperditions thermiques excessives par convection avec l'ambiance et le rayonnement avec le ciel. La température du bac absorbeur est la plus élevée à cause des caractéristiques thermiques et optiques du matériau de construction et de l'effet serre. La température saumure est conditionnée par les propriétés thermo-physiques du matériau, de l'effet serre et de la chaleur latente d'évaporation de l'eau (tension superficielle de l'eau). Elle se situe entre la température vitrage et la température du bac.
- La figure ( IV.6) donne la caractéristique principale du système. Elle présente la variation du rendement énergétique du distillateur en fonction de la température moyenne de la saumure réduite  $(T_w - T_a)/I_g$  sous des conditions de fonctionnement et d'environnement pratiquement constantes ( $31.5 < T_a < 32.7$ ) °C , ( $1060 < G_I < 1070$ ) W/m<sup>2</sup> ; ( $0.010 < \dot{m} < 0.012$ ) kg/s ,  $-15^\circ < \theta$  (angle d'incidence)  $< 15^\circ$  ).

Plusieurs tests ont été effectués à l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable d'Adrar pour caractériser ce type de systèmes. Seulement uniquement un nombre très limité de points de mesure répond aux conditions de caractérisation et permettant l'estimation du facteur des pertes thermiques et du rendement optique du système. Ainsi, la pente de la droite est ( $U_L \approx 4.4$  W/m<sup>2</sup>C) mesure le facteur des pertes thermiques globales. L'intersection avec l'axe des coordonnées donne ( $\alpha_t \approx 69\%$ ) qui mesure le rendement optique du système. Ces valeurs sont acceptables en comparaison aux valeurs estimées par le calcul direct à partir des propriétés thermo-physiques du système qui sont ( $U_L = 5.12$  W/m<sup>2</sup>C,  $\alpha_t \approx 85\%$ ) avec des erreurs respectives de (14% et 18.8%).

- Le facteur des pertes thermiques globales est fortement influencé par la variation de la température de la saumure figures (IV.7, IV.8, IV.9). Ainsi, l'augmentation de la température le long des marches du distillateur conduit à une réduction du facteur des pertes thermiques globales de (6.2 à 1.9 W/m<sup>2</sup>C) pour un rendement optique moyen de 67%.
- Le rayonnement solaire sur plan incliné figure (( IV.10), ( IV.11)) au cours de l'année présente deux extrémums aux équinoxes de printemps et d'automne. Il engendre des caractéristiques de variation similaires pour la production du distillat.
- L'accroissement de l'écart de température ( $T_w - T_a$ ) figure ( IV.12), augmente la différence de température entre les surfaces intérieure et extérieure du distillateur, cette dernière étant en contact avec l'air ambiant; il en résulte un accroissement de différence de pressions partielles, ce qui provoque l'augmentation de la quantité d'eau condensée

#### **IV .4.Conclusion**

Ce chapitre montre que la production d'eau distillée dépend de plusieurs grandeurs (le gradient de température saumure-ambiance, chaleur latente d'évaporation, énergie solaire incidente et position des marches). Les performances thermophysiques du système sont acceptables en comparaison avec les distillateurs de haute qualité .





Conclusion

### Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire concernant la modélisation du distillateur à cascades à simple effet sur site d'Adrar a permis de maîtriser les principes et les techniques de dessalement et de la distillation thermosolaire ainsi que l'initiation à la recherche technique et scientifique à travers la recherche bibliographique la maîtrise des logiciels de calcul et les méthodes de traitement des données expérimentaux.

- La production du distillat dépend de la chaleur latente d'évaporation de l'eau saumâtre, du gradient de température entre la source chaude et la source froide et de la fraction de la radiation solaire incidente sur le système.
- les bilans énergétiques de chaleur et de masse dans le distillateur à cascades avec son environnement sont très complexes à cause des hypothèses simplificatrices, des coefficients d'échanges thermiques, les facteurs de forme et la variation des propriétés thermophysiques en fonction des températures. Cependant, la caractérisation simplifiée assimilant le système à une boîte noire fonctionnant entre deux sources de chaleur (chaude et froide) semble une meilleure solution technico-économique pour déterminer les performances thermiques et optiques du système pour des fins d'optimisation.

Facteur des pertes thermiques [W/m <sup>2</sup> C]	Théorique	5.12	Erreur =14%
	Expérimentale	4.4	
Rendement optiques [%]	Théorique	85	Erreur = 18.8%
	Expérimentale	69	

- Le rendement du distillateur étudié est supérieur à celle de type chapelle a (10 -15)%

### Perspective

La production du distillat avoisine les 5 litres par m<sup>2</sup> et par jour sur site d'Adrar. Ainsi le système constitue un projet intéressant à valeur ajoutée pour le développement durable des régions sahariennes dans plusieurs domaines socioéconomiques: sanitaire, chimique, transport, stockage électrochimique... dans le cadre d'entreprises d'emploi de jeunes.

Les températures de fonctionnement du distillateur peuvent atteindre les 80°C en période chaude de l'année au sud algérien ce qui encourage l'utilisation de ces systèmes pour **la production des alcools** à partir des déchets de dattes abondants au Sahara algérien



Annexe

## A. Coefficients d'échange de chaleur et de masse

### A.1 Echange par convection

La convection de chaleur naturelle ou forcée est un mode de transfert thermique observable dans un fluide en mouvement. Il est donc lié à un transfert de masse macroscopique. La convection peut prendre plusieurs formes :

- Le fluide par son mouvement d'ensemble véhicule de l'énergie thermique.
- Un transfert d'énergie a lieu entre un fluide et une paroi correspondant à la surface du fluide.

Au voisinage immédiat de la paroi, le transfert est surtout conductible car la vitesse du fluide est très faible (même nulle sur la paroi elle même). Mais lorsqu'on s'éloigne de la paroi la vitesse du fluide croît et les effets convectifs deviennent importants jusqu'à devenir dominants. En fait le processus de convection est presque toujours associé à de la conduction. Ici on s'intéressera uniquement à ce deuxième type de transfert de chaleur (convection) souvent appelé conducto – convection, [13].

#### A.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 :

$$h_{bw}^c = \frac{Nu \times \lambda_w}{L}$$

$\lambda_w$  : conductivité thermique de l'eau [W/m°C]

Dans ce type de problème, les corrélations expérimentales aboutissent à des relations de la Forme

$$Nu = c(Gr \times Pr)^n$$

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

$$Gr = \frac{\beta_w \times L^3 \times g \times (T_b - T_w)}{\nu_w^2}$$

**Gr**: nombre de Grashoff mesurant le rapport des forces de volume et de viscosité.

**g**: accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>]

$\beta_w$  : Coefficient d'expansion volumétrique de l'eau [K<sup>-1</sup>]

L : Longueur caractéristique de la convection

Avec: **Pr** : Nombre de **Prandtl**

$$Pr = \frac{\mu_w \times cp_w}{\lambda_w}$$

$$Nu = 1 \text{ si } Gr < 10^5$$

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

$$Nu = 0.14 \times (Gr \times Pr)^{0.33} \text{ pour si } Gr > 2 \cdot 10^7$$

### A.1.2 Echange convectif entre la saumure et la vitre.

Dans l'échange thermique et massique entre la surface libre de la saumure et la couverture transparente, il existe une «zone Tampon» qui ne participe pas dans les échanges, 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 chaleur et de masse. L'échange par convection entre la saumure et la vitre dépend du nombre de Grashoff (Gr) et de l'inclinaison de la couverture  $\beta$ . Pour  $\beta = 30^\circ$

$$\text{Si ; } Gr < 3 \cdot 10^3 : Nu = 1$$

$$\text{Si : } 3 \cdot 10^3 < Gr < 5 \cdot 10^4 : Nu = 0.0588 \times Gr^{0.37}$$

$$\text{Si : } Gr > 2 \cdot 10^5 ; Nu = 0.0354 \times Gr^{0.37}$$

Avec

$$Gr = \frac{\beta_w \times L^3 \times g \times (T_w - T_g)}{v_m^2}$$

L : Longueur caractéristique du distillateur ;  $v_m$  : Viscosité cinématique du mélange air-vapeur

$$h_{wg}^c = \frac{Nu \times \lambda_m}{L}$$

$\lambda_m$  : Conductivité thermique du mélange air-vapeur. Certaine référence donne le coefficient d'échange par convection entre la saumure et la vitre en fonction des pressions partielles de la vapeur d'eau.

$$h_{wg}^c = 0.884 \left[ \left\{ T_w - T_g + \frac{(p_w - p_g)}{268.9 \times 10^3 - p_w} \right\} \times \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$p_w, p_g$  : représente la pression de vapeur au niveau de la saumure et la surface intérieure de la vitre respectivement

### A.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 **Mac Adams**.

$$h_{ga}^c = 5.7 + 3.8 \times V$$

**V**: Vitesse du vent en m/s

## A.2. Echange thermique par rayonnement

Le transfert d'énergie par rayonnement ne nécessite pas de milieu matériel. Le transport se fait par propagation des ondes électromagnétiques. Le corps chaud émet des photons donc une onde est absorbée par le corps froid et transformé en chaleur. Un exemple typique de ce mode de transfert est le chauffage de la terre par la lumière solaire, [13]

### A.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.** pour deux surfaces planes, infinies en parallèles, le coefficient radiatif est donné sous la forme

$$h_{wg}^r = \varepsilon_{eff} \times \sigma \times (T_w^2 + T_g^2) \times (T_w + T_g)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1}$$

$\varepsilon_w$  : coefficient d'émissivité de l'eau;  $\varepsilon_g$  : coefficient émissivité de la vitre; et  $\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann  $5.6697 \cdot 10^{-8} [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$

### A.2.2. Echange par rayonnement entre la vitre et le milieu extérieur

$$h_{ga}^r = \varepsilon_g \times \sigma \times (T_g^2 + T_c^2) \times (T_g + T_c)$$

Cette température est donnée en fonction de la température ambiante

$$\begin{cases} T_c = T_a - 6 \\ \text{ou } T_c = 0.0552T_a^{1.5} \end{cases}$$

$T_c, T_a$  : températures du ciel et de l'ambiance [K].

### A.2.3 Echange thermique par 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 chaleur et de masse, **Dunkle** a établi l'expression du coefficient thermique par évaporation [1].

$$h_{wg}^{ev} = 16.276 \times 10^{-3} \times h_{wg}^c \times \left( \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \right)$$

Les pressions partielles sont estimées par les relations suivantes:

$$\begin{cases} p_g = 25.317 - \frac{5144}{T_g + 273} \\ p_w = 25.317 - \frac{5144}{T_w + 273} \end{cases}$$

## B. Propriétés des eaux saumâtres, [3, 27]

### a. L'eau potable

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

### b. L'eau de mer

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

### c. L'eau saumâtre

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

### d. L'eau distillée

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

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

La masse volumique de l'eau distillée est toujours égale à  $1\text{kg}/\text{m}^3$  ou  $1\text{g}/\text{cm}^3$  à la température de  $4^\circ\text{C}$ . L'eau distillée redonne absolument une eau pure identique. L'eau pure est un liquide incolore, inodore, elle n'est pas potable car elle est sans sels minéraux; pour avoir un goût agréable, l'eau doit contenir 0.1 à 0.5g par litre de corps minéraux dissous et une oxygénation de 6.4mg/l.

## B.1 Caractéristiques thermophysiques de l'eau et du mélange air-vapeur, [1,5]:

### B.1.1 Caractéristiques thermophysiques de l'eau saumâtre

#### a. Conductivité thermique $\lambda_w$ [W/mC]

$$\lambda_w(T) = 0.569 + 0.185 \times 10^2 \times T_w - 0.749 \times T_w^2$$

#### b. Chaleur latente de vaporisation de l'eau saumâtre $L_v(T)$ [kJ/kg]:

$$L_v(T) = 4185 \times [597 - 0.56 \times (T_w - 273)]$$



**c. Chaleur massique de l'eau saumâtre  $C_p(T_w)$  [ J/kgC]**

$$C_p(T_w) = 4216.66 - 3.165 \times T_w + 0.886 \times 10^{-2} T_w^2 - 0.101 \times 10^{-2} \times T_w^3 + 0.445 \times 10^{-5} \times T_w^4$$

**d. Masse volumique  $\rho(T_w)$  [ kg/m<sup>3</sup> ]**

$$\rho(T) = 999.879 + 0.0469 \times T - 0.667 \times T^2 + 0.208 \times 10^{-4} \times T^3$$

**e. Viscosité dynamique de l'eau saumâtre  $\mu(T)$  [kg/m.s]:**

$$\mu(T) = \rho(T_w) \nu(T_w) = 5.449 - 0.167 \times T_w + 7.325 \times 10^{-4} + T_w^2$$

**f. Coefficient de dilatation volumique  $\beta$  [1/°K]**

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

**B.1.2 Caractéristiques thermophysiques du mélange air-vapeur**

Le mélange air-vapeur d'eau à l'intérieur du distillateur est assimilé à un mélange de gaz parfaits régit par la loi de Dalton qui indique 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».

**a. Pression partielle du mélange**

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

$$P = P_a + P_v$$

$P_a$  : pression partielle de l'air sec ;  $P_v$  : pression partielle de la vapeur d'eau.

**b. Humidité relative de l'air humide**

$$H_r = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}} = \frac{m_v \times P_v}{m_{vs} \times P_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}}$$

$\rho_v$ : masse volumique de la vapeur ;  $\rho_{vs}$ : masse volumique de la vapeur saturée ;  $m_v$  : masse molaire de la vapeur ;  $m_{vs}$ : masse molaire de la vapeur saturée.

**c. Concentration de la vapeur d'eau dans l'air**

La concentration de la vapeur d'eau dans l'air (la fraction massique de l'air humide) par la relation suivante :

$$c_v = \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378}$$

P : pression atmosphérique.

**d. Conductivité thermique du mélange  $\lambda_m$  [W/mC]**

$$\lambda_m(T) = \lambda_0(T) + 0.00476 \times (c_v / 1 - c_v)$$

où  $\lambda_0(T_{air})$  est la conductivité de l'air à la température  $T_{air}$  [°C], qui peut être approchée par un polynôme de degré trois :

$$\lambda_0(T_{air}) = 0.0243 + (9.7416 \times T_{air} - 0.1825 \times T_{air}^2 + 0.00227 \times T_{air}^3) \times 10^5$$

**e. Viscosité dynamique:  $\mu_m$  [kg/m.s]**

$$\mu_m(T_{air}) = \frac{\rho \times g \times h}{\frac{P_v}{\mu_v} + \frac{P_a}{\mu_a}}$$

$\rho \times h \approx 1$ , g est l'accélération de la pesanteur.

$\mu_v$  et  $\mu_a$  [kg/m.s] représentent respectivement la viscosité dynamique de la vapeur d'eau et de l'air sec

$$\mu_v(T_{air}) = 30.147 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T_{air}}{273}} \times \left(1 + \frac{637}{T_{air}}\right)^{-1}$$

$$\mu_a = 25.393 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{T_{air}}{273}} \times \left(1 + \frac{122}{T_{air}}\right)^{-1} \quad [\text{kg/m.s}]$$

P[atm] et T en [°K].

**f. Viscosité cinématique:  $\nu_m$  [m²/s]**

$$\nu_m = \frac{\mu_m}{\rho_m}$$

où  $\rho_m$  est la masse volumique du mélange air-vapeur ;

$$\rho_m = \frac{1}{R_m \times T_m} \times [(m_v - m_a) \times P_v + m_a \times P_a]$$

**g. 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  $m \times cp_m \times dT$  telle que :

$$m \times Cp_m \times dT = m_v \times Cp_v \times dT + m_a \times Cp_a \times dT$$

$cp_a$  et  $cp_v$ : étant les chaleurs spécifiques de l'air et de la vapeur d'eau.

Comme :  $m = m_v + m_a$  et  $\frac{m_v}{m_a} = \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378 \times P_v}$

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

$$cp_m = cp_a + \frac{0.622 \times P_v}{P - 0.378 \times P_v} \times (cp_v - cp_a)$$

$$cp_v = 1862.3 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}; cp_a = 1004.4 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$$

# Références Bibliographiques

## Bibliographie

- [1] TABET Ismail, étude d'un distillateur solaire a cascades, Thèse de magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE , 2010.
- [2] Salima KARROUTE, Etude théorique et numérique des systèmes couplés : Distillateur hot box –capteur 2009.
- [3] M. Boukar A. Harmim et M. Amar , Construction et expérimentation d'un distillateur solaire vertical indirect à simple effet, [Revue des Energies Renouvelables, ICRES-07 Tlemcen (2007) ,pp 75 – 81.
- [4] Noémie Poize – Rhônealpennergie-Environnement, Le gisement solaire, CNFPT – 21-23 février 2007.
- [5] HALLOUFI Ouahid, Etude de la performance d'un distillateur solaire par un système de pré-chauffage solaire de l'eau saumâtre ,Thèse de magister, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE , 2010
- [6] FEDALI SAIDA, Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres a bas coût pour les communautés rurales, Thèse de magister, Université de Batna ,2008
- [7] Mylène Civate et Flavie Mandel – ENM, La mesure de la visibilité, Fiche descriptive sur les instruments de mesure météorologique -Version 1.0 - décembre 2008 A destination des enseignants des collèges et lycées de l'Education Nationale .
- [8] BERRICHON Jean-Damien, Installation et mise en service d'un instrument de mesure du rayonnement solaire diffus , rapport de stage, Université de la Réunion.  
Site Web: <http://www.univ-reunion.fr/recherche/laboratoires/sciences/le2p.html>
- [9] Benbouza Naima, Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna, Thèse de magister Université de Batna , 2008
- [10] Scérén CRDP Limousin, Manuel d'utilisation de la maquette albédomètre Enseignement secondaire
- [11] Mr roche sébastien ,Théorie du Concentrateur Solaire et du Rayonnement Solaire sur l'île de la Réunion, rapport de stage, Université de la Réunion
- [12] TRAHI Fatiha ,Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de TIZI-OUZOU par les réseaux de neurones artificiels , Thèse de magister ,Université MOULOUD MEMERI de TIZI-OUZOU.
- [13] ZIYADOU Ahmed, Etude et conception d'un distillateur solaire a effet de serre , mémoire d'études approfondies ,Université d'ANTANANARIVO, 2011

- [14] SOTEHI Oualid ,Etude des caractéristique de fonctionnement et de la performance d'une distillateur solaire , Thèse de magister , Université MENTOURI CONSTANTINE, 2009
- [15] C. KHELIF et B.TOUATI, Semi-empirical characterization of a greenhouse-effect cascades solar distiller, *Renewable Energy* 19(2000), pp. 103-110, Elsevier Science Ltd, Science direct.
- [16] A.Deliou, N. Bessas, Z. Belgroun, H. Aburideh, A. Lounis et A. Chikouche , Etude expérimentale des caractéristiques d'un distillateur solaire à effet de serre. *Revue des Energies Renouvelables*, CICME'0, Sousse Tunisie (2008), pp 109 – 118.
- [17] Moussa ZERROUKI1, Yacine MARIF 1, Moustapha BELHADJ1 et Nour Eddinne SETTOU, Simulation et expérimentation d'un distillateur solaire à film capillaire dans le sud Algérien. *Annales des Sciences et Technologie* Vol. 4, N° 1, Juin 2012.
- [18] BOUKERZAZA Nassima, étude de l'effet des pertes thermiques sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire, Thèse de magister, Université MENTOURI DE CONSTANTINE .
- [19] Abdulwahid Al-Hajjaj, Hamza A. Kadhim ,Aziz H. Al-Hilfi, Development and Evaluation of Solar Still With an Internal Heater[ *Basrah journal of science*], Vol 24(2) ,pp 48-56
- [20] Nassima BOUKERZAZA1, Abla CHAKER1, Zakaria HADDAD ,Efficacité interne et global d'un distillateur solaire , Boumediène BENYOUCEF , 13èmes Journées Internationales de Thermique Albi, France de 28 au 30 Août 2007 .
- [21] N. Bellel ,et I. Tabet , Etude réalisation et simulation numérique D'un distillateur solaire à cascade , *Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa* (2012) ,pp 49 – 57

