

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

Caractérisation Thermo-optique d'un Distillateur Thermosolaire à Effet-Serre
à multiples-effet sur site d'Adrar

Soutenu le 11 /12/2013

Présenté par :

HADJ KOUIDER HALIMA

Membres de jury :

Président :HAMOUDA MASSAOU

Encadré par :

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

Examineur

FERROUDJI FATAH

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

A Mon père que dieu garde à son Paradies

*A Ma chère mère , A mon cher marie, A mon fils Taha, A
mes chers frères, A mes chères sœurs Et toute la famille;*

A tout mes voisins;

A Tous mes amis et collègues ;

Tous ceux qui me sont chers

Halima.

Remerciements

*-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

KHELIFI CHERIF

Chargé de Recherche en Hélicoptère URER.MS Adrar

- Il m'est aussi impossible d' oublier tous les enseignants

De faculté des sciences et de la technologie.

*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 ma mère, mon père et tous
ma famille qui sont m'encouragée pour
terminer ce travail*

Hamima

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale	01
Chapitre I Gisement solaire et échanges thermiques	
II.1- Introduction.....	03
I.2- Constitution physique du soleil.....	03
I.3- La sphère céleste.....	04
I.4- Les coordonnées célestes.....	05
I.4.1 - Les coordonnées géographique.....	05
I.4.2 - Les coordonnées horaires.....	05
I.4.3- Les coordonnées horizontales.....	06
I.5- Mouvement de la terre.....	07
I.6 - Les temps solaires.....	08
I.6.1 - Le temps solaire vrai (T.S.V).....	08
I.6.2 - Le temps solaire moyen (T.S.M).....	08
I.6.3 - Le temps universel (T.U).....	09
I.6.4 - Le temps légal (TL).....	09
I.7- La constante solaire.....	09
I.8- Direction des rayons solaire par rapport a un plan.....	10
I.9- Eclairage hors terrestre.....	10
I.10- La radiation solaire au niveau du sol.....	11
I.10.1- Composantes du rayonnement solaire.....	11
a- Le rayonnement directe.....	11
b- Le rayonnement diffus.....	12
I.11- Propriétés optiques de vitrage.....	13
I.11.1- Facteur solaire.....	13
I.11.2- Effet de serre.....	14
I.12- Echange thermique.....	14
I.12.1- Echange thermique par conduction.....	14
I.12.2- Echange thermique par convection.....	15

I.12.3- Echange thermique par rayonnement.....	15
I.12.4- Echange thermique par changement de phase.....	16
I.13- Les appareils de mesure des rayonnements solaire.....	17
I.13.1- Pyranomètres.....	17
I.13.2- Le pyrhéliomètre.....	17
I.13.3- Héliographe.....	18
I.14- Conclusion.....	18

Chapitre II Les procédés de distillation des eaux saumâtres par effet-serre

II.1- Introduction	19
II.2.1- Les différents procédés de dessalement.....	19
a- La distillation à simples effets [SED].....	20
b- La distillation à multiples effets [MED].....	19
c - La distillation avec vaporisation instantanée à étages multiples[MSF].....	21
d -La distillation avec compression de la vapeur (thermo compression)[VC].....	22
e- L'osmose inverse [RO].....	22
f- L'électrodialyse [ED].....	23
g- Echange d'ions.....	24
h- La méthode de congélation.....	24
I.3- Distillation solaire.....	25
II.4- Principe de la distillation solaire.....	25
II.5- Les différents types de distillateurs solaires.....	26
II.5.1- Distillation solaire à effet de serre.....	26
II.5.2- Distillateur solaire incliné à cascades.....	27
II.5.3- Distillateur solaire incliné à mèche.....	27
I.5.4- Distillateur solaire sphérique.....	27
II.5.5- Distillateur solaire à étages multiples avec récupération de chaleur.....	28
II.6- Paramètres et caractéristiques de fonctionnement.....	29
II.6.1- Paramètres et caractéristiques de fonctionnement.....	29
II.6.1.1- Paramètres internes.....	29
II.6.2- Paramètres externes.....	31
II.7- Caractéristiques du Distillateur.....	32
II.8- Technologie de la couverture.....	33
II.9- Technologie du bassin.....	33

II.10- Besoin en énergie pour la distillation.....	34
II.10- Conclusion.....	34

Chapitre III Performances thermo-optiques du distillateur

III.1. Introduction.....	35
III.2.Modélisation des échanges thermiques au niveau du distillateur solaire multiple effet de serre.....	35
III.2.1. Description et principe de fonctionnement.....	36
III.2.2. Bilan thermique dans le distillateur.....	36
a- Rendement optique du distillateur.....	38
b- Facteur des pertes thermiques.....	38
III.2.3. Le rendement thermodynamique du distillateur.....	39
III.2.4. Mode opératoire.....	41
III.3- Résultat et discussions.....	42
III.4- Conclusion.....	47
Conclusion générale.....	48

Bibliographie

Liste des figures:

Figure I.1- La sphère céleste.....	04
Figure I.2- Les coordonnées géographiques.....	05
Figure I.3- Les coordonnées horaires.....	06
Figure I.4 - Les coordonnées horizontales.....	06
Figure I-5- Hauteur du soleil sur site d'Adrar.....	07
Figure I.6- Mouvement de la terre autour de soleil.....	08
Figure I.7- Propriétés optiques du verre rayonnement.....	13
Figure I.8- L'effet de serre.....	14
Figure I.9.a- Un pyranomètre pour la mesure du rayonnement solaire global.....	17
Figure I.9.b - Un pyranomètre bande pare-soleil pour la mesure du rayonnement solaire diffus, où l'ombre de la bande apparaît sur la demi sphère de l'instrument.....	17
Figure I-11- Le pyréliomètre.....	17
Figure I.11 - Héliographe.....	18
Figure II.1- Distillateur simple effet.....	20
Figure II.2- Distillation à multi effets (M.E.D).....	21
Figure II.3- Distillateur par détentes successives.....	21
Figure II.4 - Distillation avec compression de la vapeur.....	22
Figure II.5- Les techniques de dessalement par osmose.....	23
Figure II.6: Schéma de principe de l'électrodialyse.....	23
Figure II.7: Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire à effet de serre.....	26
Figure II.8: Distillation solaire à effet de serre.....	26
Figure II.9-Distillateur incliné à cascades (ou à marches).....	27
Figure II.10- Le distillateur solaire sphérique.....	28
Figure II.11: Schéma d'un distillateur solaire à étages multiples.....	29
Figure III-1: Distillateur solaire à multiple-effets à effet de serre.....	36
Figure III-2: Schéma du dispositif expérimental.....	41
Figure III-3: (a)Variation des températures de vitrage des deux sous distillateurs, (b)variation temporelle du gradient de température de vitre ($T_{V1}-T_{V2}$).....	42
Figure III-4: (a) Variation du température de distillat dans les deux sous distillateurs inférieur et supérieur. (b): Variation temporelle de l'écart température de saumure (TE_1-TE_2).....	43

Figure III-5: (a): Variation des températures des bacs des deux sous distillateurs inférieur et supérieur. b: Variation temporelle de l'écart température de saumure ($T_{b1} - T_{b2}$).....	43
Figure III-6: Température de fonctionnement des sous distillateurs.....	44
Figure III-7: Variation des débits des sous distillateurs en fonction du gradient ($T_E - T_a$).....	45
Figure III-8: Variation des débits en fonction de l'éclairement incident	45
Figure III-9: Caractéristiques thermo-physiques des sous distillateurs.....	46

Liste des tableaux

Tableau I.1: Valeurs des coefficients de trouble atmosphérique.....12

Tableau I.2: Variation de la pression atmosphérique avec l'attitude.....12

Tableau I.3: Albédo des différents sols.....13

Tableau III.1: Paramètres optiques des composantes d'un distillateur solaire
simple effet.....38

Tableau III.2: Les performances de système.....47

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
L	Longitude	[°]
Φ	Latitude	[°]
ω	L'angle horaire	[°]
α	Angle entre le méridien local et la normale au plan	[°]
δ	Déclinaison	[°]
β	azimut	[°]
h	Hauteur du soleil	[°]
TSV	Temps solaire vrai	[Heure]
TU	Temps universel	[Heure]
TL	Temps local	[Heure]
Et	Equation de temps	[min]
Ic	Constante solaire	[W/m ²]
I _b	Rayonnement direct	[W/m ²]
I _d	Rayonnement diffus	[W/m ²]
G	Rayonnement global	[W/m ²]
G _h	le rayonnement horizontal au sol	[W/m ²]
\dot{m}	Débit de masse	[kg /s]
Q _u	Gain utile	[W]
Q _{abs}	Flux de chaleur absorbé	[W]
Q _p	Flux de chaleur dissipé	[W]
Q _{ev}	Quantité se la chaleur d'évaporation	[W]
Q _E	flux de chaleur effectivement absorbé par la masse d'eau saumâtre	[W]
U _L	Coefficients de perte globale	[W/m ² °C]
U _{avant}	Coefficients de perte avant	[W/m ² °C]
U _{arrière}	Coefficients de perte arrière	[W/m ² °C]
U _{latéral}	Coefficients de perte latéral	[W/m ² °C]
T _a	Température de l'ambiance	[°C]
T _E	Température de l'eau	[°C]
A _c	Surface d'ouverture de distillateur	[m ²]
η_d	Efficacité globale du distillateur	[%]
N	Numéro de jour	[jour]
$\alpha_v, \alpha_b, \alpha_E$	L'absorptivité du vitre, du bac ,et celle de la saumure	[%]
τ_v, τ_E	Transmittivité du vitrage, et celle de la saumure	[%]
L _v	Chaleur latente	[J/kg]

Caractérisation Thermo-optique d'un Distillateur Thermosolaire à Effet-Serre à Multiples-Effet sur site d'Adrar

Résumé:

La distillation des eaux saumâtres par effet-serre est limitée par la fraction de la radiation solaire incidente sur l'ouverture du capteur et par la chaleur latente d'évaporation étroitement liée au gradient de température entre la source chaude (la saumure) et la source froide (le condenseur). Le travail entrepris dans ce mémoire a permis de mieux comprendre les bilans énergétiques mis en jeu avec l'ambiance dans le distillateur à effet serre à multiple effets, et les propriétés thermodynamiques d'évaluation. La caractérisation thermo-optique du système est effectuée par une méthode simple basée sur des bilans énergétiques et des propriétés thermo-optiques sous des conditions de fonctionnement constantes. La détermination du rendement optique et du facteur des pertes thermiques est effectué par la méthode des moindres carrées sur le nuage de points de mesure entre le rendement à la température réduite. Les résultats de caractérisation du distillateur à multiple effets sur site d'Adrar montrent que le rendement optique et le facteur des pertes thermiques globales obtenus sont ($\alpha_r \approx 80\%$, $U_L \approx 6.2 \text{ W/m}^2\text{C}$) sous les conditions les plus proches du standard ASHRAE. Ces résultats sont relativement acceptables en comparaison avec les caractéristiques calculées qui sont ($\alpha_r \approx 87\%$, $U_L \approx 5,5 \text{ W/m}^2\text{C}$) et tenant compte des hypothèses simplificatrices du modèle et des erreurs de mesure. Le distillateur à multiples effets permet d'améliorer la production du distillat de 10 à 24% par rapport au distillateur à simple effet.

Mos-clés: Distillation solaire, rendement optique, facteur des pertes thermiques, caractérisation, distillateur solaire à effet de serre multiples effets.

المخلص:

عملية التقطير الشمسي التي تعمل بظاهرة الاحتباس الحراري محدودة بكمية الإشعاع الشمسي الوارد إلى المساحة المفتوحة للمقطر الشمسي ، وبالحرارة الكامنة للتبخر التي ترتبط ارتباطا وثيقا بالتغير بدرجة الحرارة بين المصدر الساخن (الماء المالح) و المصدر البارد (المكثف). العمل المطروح في هذه المذكرة يسمح بفهم جل التبادلات الطاقوية الحادثة بين المقطر الشمسي الحراري متعدد الأثر و المحيط الخارجي ، و كذا الخصائص الحرارية. يتم تنفيذ الوصف الحراري البصري للمقطر من خلال طريقة بسيطة، تعتمد على التبادلات الطاقوية

والخصائص الحرارية البصرية، تحت ظروف تشغيل ثابتة. تحديد الكفاءة البصرية و عامل ضياع الحرارة يتم تنفيذها بواسطة طريقة التقايف من نقاط القياس للسحابة النقطية المحصورة بين المردود الطاقوي و درجة الحرارة. النتائج المتحصل عليها من دراسة المقطر الشمسي الحراري متعدد الأثر في مدينة أدرار تبين أن قيم الكفاءة البصرية و عامل ضياع الحرارة هي: ($\alpha_p \approx 80\%$, $U_L \approx 6.2 \text{ W/m}^2\text{C}$) في ظل ظروف أقرب إلى ASHRAE القياسية هذه النتائج مقبولة جدا بالمقارنة مع الخصائص المحسوبة ($\alpha_p \approx 87\%$, $U_L \approx 5.5 \text{ W/m}^2\text{C}$)، مع مراعاة الفرضيات التبسيطية و الخطأ في القياس. يحسن إنتاج المقطر الشمسي الحراري متعدد الأثر إنتاج الماء المقطر من ١٠% إلى ٢٤% بالمقارنة مع المقطر الشمسي الحراري بسيط الأثر.

الكلمات الدالة: التقطير الشمسي، الكفاءة البصرية، عامل ضياع الحرارة، التوصيف، المقطر الشمسي الحراري متعدد الأثر.



**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction générale:

La demande en eau douce en Algérie, croît chaque année de 4 à 5%, tandis que les ressources naturelles restent invariables. Le problème majeur, qui se pose aujourd'hui à l'homme avec une acuité de plus en plus accrue n'est certainement par d'ordre quantitatif, mais plutôt de nature qualitative. En effet, les eaux de qualité requise sont de plus en plus rares même dans les pays relativement bien dotés par la nature, suite à un processus de développement hautement polluant surtout dans le monde industrialisé[12]. La distillation solaire est un procédé de production d'eau douce à fort économique, surtout dans les régions caractérisées par un bon ensoleillement[3].

Les régions sahariennes en général et la région d'Adrar en particulier recèlent d'importants gisement hydriques et solaires qui dépassent les 2200 kWh/m²/an sur une superficie aplanie de 428000 m², très favorable pour la production de l'eau distillée à grande échelle permettant de réduire les frais de transport et de stockage et le développements des industries cosmétiques, chimiques à valeur ajoutée. Il est communément admis que la distillation des eaux saumâtres par effet-serre est limitée par la fraction de la radiation solaire incidente sur l'ouverture du capteur et par la chaleur latente d'évaporation étroitement liée au gradient de température entre la source chaude et la source froide. En basse et moyenne température, le transfert de chaleur est une propriété de surface. Cependant, les distillateurs à multiple effets basés sur les propriétés optiques et thermiques permettent d'améliorer le rendement par rapport aux distillateurs à simple effet à effet serre. La quantité de distillat produite est fonction de la qualité de design du système et de l'énergie disponible sur site. Ainsi, la connaissance des performances thermiques et optiques de fonctionnement optimal du système sous des conditions de fonctionnement standards est cruciale pour décrire, comprendre et optimiser son design.

L'objectif de ce travail intitulé: Caractérisation Thermo-Optique d'un Distillateur Thermosolaire à Effet-Serre à multiples-effet sur site d'Adrar, est la détermination de rendement optique et le facteur des pertes thermiques de système. On décomposé ce travail en trois chapitre:

Le premier chapitre "gisement solaire et échanges thermiques " expose une généralité sur le gisement solaire et le transfert de chaleur.

Le deuxième chapitre est consacré à des procédés de distillation des eaux saumâtres par effet-serre.

Le dernier chapitre décrit les performances thermiques et optiques du distillateur par des bilans énergétiques. Il décrit aussi le mode opératoire, et l'exploitation des résultats expérimentaux et numériques.

Chapitre I: Gisement solaire et échanges thermiques

I.1.Introduction

La terre est considérée comme une sphère ayant un diamètre égal à $1,27 \cdot 10^7$ m donc 100 fois plus petit que celui du soleil. Elle est entourée de l'atmosphère où la pression de l'air diminue quant l'altitude augmente. La puissance solaire est de l'ordre de 1kW/m^2 au niveau du sol.

En ce qui concerne l'Algérie, nous avons au nord du pays $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ pour 2600 heures d'ensoleillement ; dans les hauts plateaux $1900 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ pour 3000 heures d'ensoleillement et au sud $2200 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ pour 3400 heures d'ensoleillement.

La dispersion fait que l'énergie solaire est disponible, c'est une énergie qui couvre les besoins décentralisés et à la portée des populations rurale [12]. Il est plus important pour notre étude de s'intéresser au mouvement apparent du soleil dans la sphère céleste, les modes de transfert de chaleur et les rayonnements solaires et leurs appareils de mesure.

I.2- Constitution physique du soleil[1,3]

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

a- **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.

b- **La photosphère:** l'épaisseur est d'environ 300 km qui est responsable de la presque totalité du rayonnement solaire que nous recevons.

c- **Chromosphère et couronne solaire:** où la matière est très diluée, fait qui explique que bien que la température y soit très élevée (1 million de degrés) le rayonnement émis est très faible.

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de Centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre.

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques.

I.3- la sphère céleste[1]

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

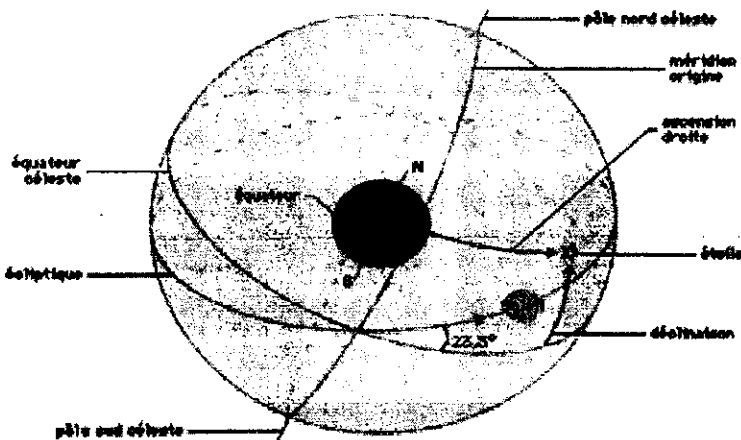


Figure I.1: La sphère céleste[1]

I.4- Les coordonnées célestes[1,2,22]

I.4.1 - Les coordonnées géographiques:

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la Terre (figure I.2).

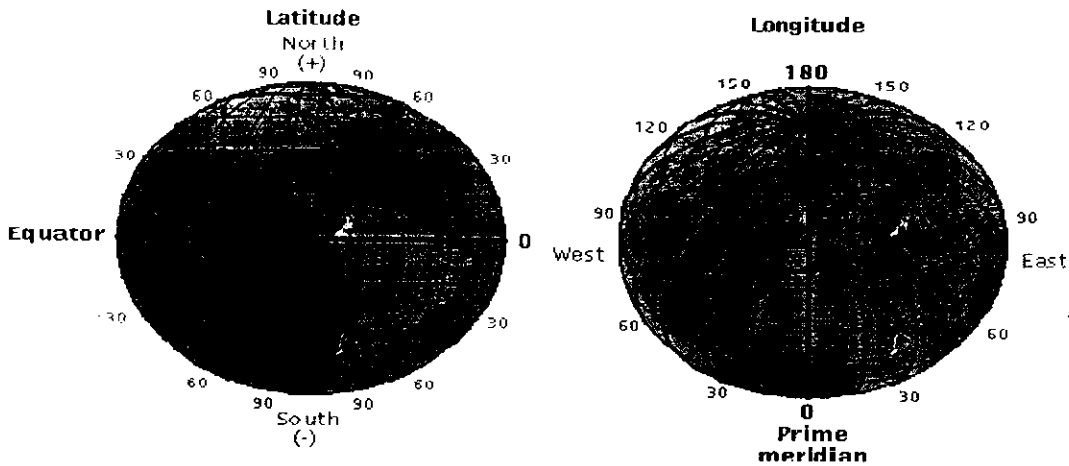


Figure I.2: Les coordonnées géographiques[1]

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

I.4.2 - Les coordonnées horaires:

- La **déclinaison δ** , c'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de +23°27' à -23°27' et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{284+N}{365} \times 360 \right] \text{ Degré} \quad (\text{I.1})$$

ou :

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

- **L'angle horaire ω** : il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° (Figure I.3).

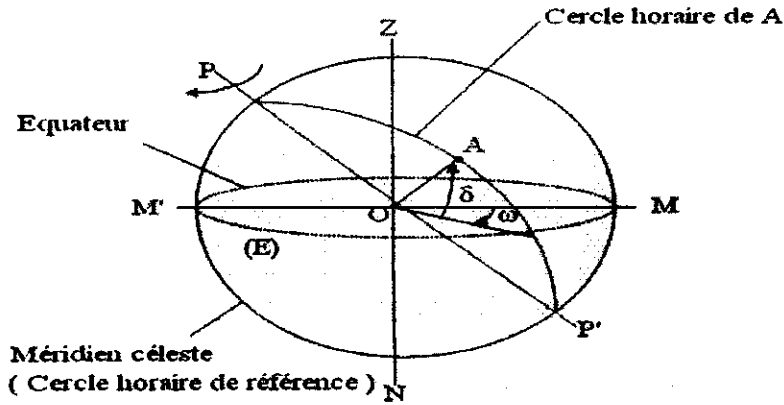


Figure I.3: Les coordonnées horaires[22]

I.4.3 - Les coordonnées horizontales:

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

- **L'azimut a** , ou l'angle que fait la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest.
- **La hauteur h** , ou l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir.

On appelle quelquefois **distance zénithale** le complément de l'angle h : $z + h = 90^\circ$ (figure I.4).

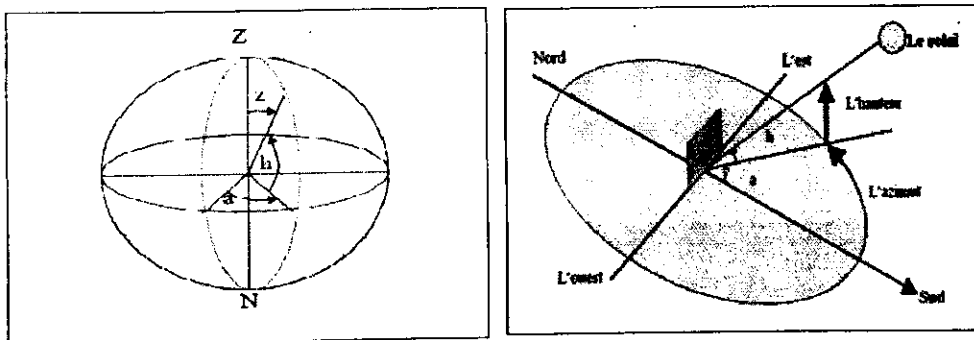


Figure I.4 - Les coordonnées horizontales[1,22]

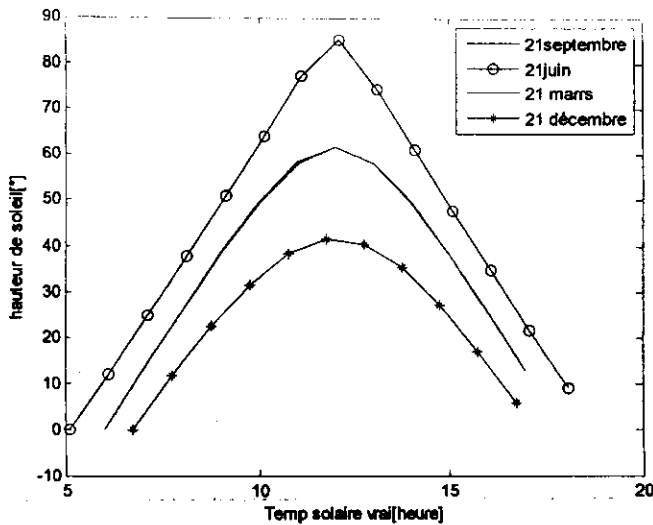


Figure I-5: Hauteur du soleil sur site d'Adrar

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

$$\sin(a) \times \cos(h) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \quad (I.2)$$

$$\cos(a) \times \cos(h) = \cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \sin(\Phi) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta) \quad (I.3)$$

$$\sin(h) = \cos(\Phi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta) \quad (I.4)$$

I.5- Mouvement de la terre[4,12]

La trajectoire de la terre autour du Soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique, l'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre-Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne.

La révolution complète de la terre au tour du soleil s'effectue en une année sidérale de 365 jours, 6 heures, 9 minutes et 10 secondes. Cette révolution fait varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles en une journée sidérale de 23 heures, 56 minutes et 4 seconds. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé

l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut $23^{\circ}27'$.

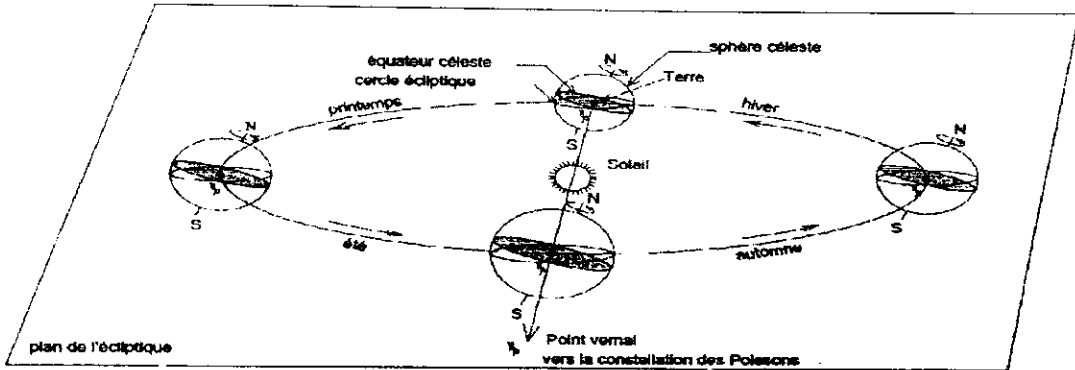


Figure I.6- Mouvement de la terre autour de soleil[12]

I.6- Les temps solaires[1]

I.6.1 - Le temps solaire vrai (T.S.V):

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

$$TSV + 12 + \omega / 15 \quad (I.5)$$

ω en degré.

Si $\omega = 0$, TSV = 12h.00; Si $\omega < 0$, la matinée; Si $\omega > 0$, l'après-midi.

I.6.2 - Le temps solaire moyen (T.S.M):

Il est donné par la relation:

$$ET = TSV - TSM \quad (I.6)$$

Avec:

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

$$Et = \sin(2N') - 7.53 \cos(N') \text{ [min]} \quad (I.7)$$

$$N' = (N - 81) \times 360 / 365 \quad (I.8)$$

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

I.6.3 - Le temps universel (T.U):

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

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

Où :

L : est la longitude. $L > 0$, pour les villes situées à l'Est de Greenwich; $L < 0$, pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

TU = TSM, pour le méridien de Greenwich.

I.6.4 - Le temps légal (TL):

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

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

Où :

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

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

I.7- La constante solaire[2]

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

$$Cte_{\text{solaire}} = I_0 = \sigma \times T^4 \times \left(\frac{R_s}{D_{st}}\right)^2 \quad (I.11)$$

Avec:

R_s : le rayon du soleil [mètre]; D_{st} : distance terre- soleil[mètre]; σ : constante de Stephane-Boltzman: $2\pi^5 \cdot k^4 / 15 \cdot h^3 \cdot c^2 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}^4$.

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

$$I_c = I_0 \times (1 + 0.033 \cos(360/365) \times N) \approx I_0 (1 + 0.034 \times \cos(m-1) + n) \quad (I.12)$$

Ou encore en fonction de la déclinaison:

$$I_c(\delta) = I_0 \times (1 - (\sin(\delta)/11.8)) \quad (I.13)$$

Où: δ représente la déclinaison ($^\circ$), n : numéro du jour dans le mois. m : numéro du mois dans l'année.

I.8- Direction des rayons solaire par rapport a un plan[2]

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

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

$\beta > 0$ si le plan en face de l'équateur, $\beta = 0$ pour le plan horizontal, $\beta = 90^\circ$ pour un plan vertical.

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

$\alpha = 0$ vers le sud, $\alpha < 0$ vers l'est, $\alpha > 0$ vers l'ouest, $\alpha = \pi$ vers le nord.

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

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

$$\cos(i) = \cos(\omega) \times \cos(\delta) \times \cos(\Phi - \beta) + \sin(\delta) \times \sin(\Phi - \beta) \quad (I.14)$$

I.9- Eclairage hors terrestre[4,21]

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 φ , la déclinaison solaire δ et l'angle horaire au coucher du soleil ω_c . Sur une surface horizontale, et pour le jour n , le rayonnement extraterrestre G_o ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{jour}$) est obtenu à l'aide de l'équation suivante:

$$G_o = \frac{24 \times 60}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot \left[1 + 0.034 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \right] \cdot \left[\begin{array}{l} \omega_c \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \\ \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_c) \end{array} \right] \quad (I.15)$$

- **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 :

$$K_T = \frac{G_h}{G_o} \quad (I.16)$$

G_o : c'est le rayonnement horizontal au sol .

- **L'éclairement**

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.10- La radiation solaire au niveau du sol [2]

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altérations et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère; réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols (la poussière, les gouttelettes...). Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse (c'est-à-dire isotrope). L'autre partie dite directe est anisotrope. Le rayonnement global est par conséquent la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

I.10.1- Composantes du rayonnement solaire:

L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit.

Les composantes du rayonnement solaire incident instantané sont:

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

$$I_D = I_c \times a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times P/1000\right) \cdot \cos i \quad (I.17)$$

Avec: a et b: Coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

Le tableau (I.1) rassemble quelques valeurs de a et b.

$$\text{Sin } h = \text{Cos}(\delta) \times \text{Cos}(\omega) \times \text{Cos}(\phi) + \text{Sin}(\delta) \times \text{Sin}(\phi) \quad (\text{I.18})$$

h: Etant la hauteur du soleil.

ω, δ, ϕ Sont respectivement l'angle horaire, la déclinaison, et la latitude [°].

La pression atmosphérique "p" en fonction de l'altitude est illustrée par le tableau (I.2)

Tableau I.1: Valeurs des coefficients de trouble atmosphérique

	Ciel pur	Condition normale	Zones industrielles
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

Tableau I.2: Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude

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

b- Le rayonnement diffus: provient de tous les éléments irradiés par le soleil.

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

Le flux diffus émit par la voûte céleste (φ_1), donné par la relation:

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times (1 + \cos(\beta)/2) \quad (\text{I.19})$$

Le flux émis par le sol (φ_2):

$$\varphi_2 = \rho \times (1 - \cos(\beta)/2) \times I_c \times \tau_{dir} \times \sin(h) + \varphi_0 \quad (\text{I.20})$$

$$\varphi_0 = I_c \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times \tau_{dir}) \quad (\text{I.21})$$

avec:

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

$$\tau_{dir} = a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times p/100\right) \quad (\text{I.22})$$

ρ l'albédo du sol donnée par le tableau (I.3)

Tableau I.3: Albédo de différents sols

Nature du sol	L'albédo
Herbe fraîche	0.20
Herbe sèche	0.30
Terra cultivée, nue	0.16
Gravier	0.22
Neige fraîche	0.85
Etndu d'eau	0.05

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

$$I_d = \phi_1 + \phi_2 \quad (I.23)$$

c- le rayonnement global: Le rayonnement global sur une surface quelconque au Voisinage du sol est la somme de ces deux composantes:

$$G = I_D + I_d \quad (I.24)$$

I.11- Propriétés optiques du vitrage

I.11.1- Facteur solaire:

Le facteur solaire (FS) d'un vitrage est le rapport entre l'énergie totale entrant dans le local à travers ce vitrage et l'énergie solaire incidente. Cette énergie totale est la somme de l'énergie solaire entrant par transmission directe, et de l'énergie cédée par le vitrage à l'intérieur à la suite de son échauffement par absorption (flux transmis + flux absorbé réémis vers l'intérieur)(figure I.7).

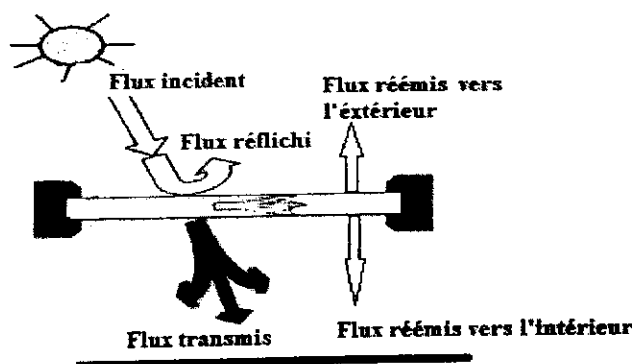


Figure I.7: Propriétés optiques du verre[4]

I.11.2- Effet de serre:

Lorsque le rayonnement solaire frappe une paroi vitrée, une partie sera réfléchi, une partie sera absorbée puis réémise et le reste sera directement transmis. Ce rayonnement direct transmis à l'intérieur des locaux est partiellement absorbé par les parois qui s'échauffent et par la suite le rayonnement infrarouge est réémis dans toutes les directions. Le vitrage étant pratiquement opaque au rayonnement réémis, celui-ci reste piégé à l'intérieur du local, y entraînant une augmentation de la température. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre figure(I.8).

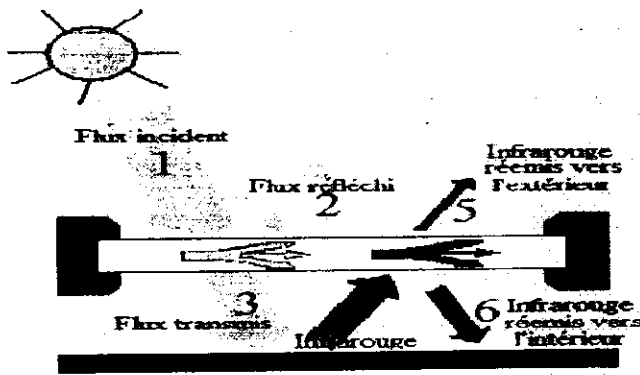


Figure I.8 : L'effet de serre[4]

I.12-Echanges thermique[3]

Le transfert de chaleur est l'un des modes d'échange d'énergie les plus connus. Le flux de chaleur entre deux corps est dirigé spontanément du corps froid.

Un corps quelconque chauffé absorbant une quantité de chaleur (Q) peut :

- Soit voir sa température augmenter d'une valeur (ΔT), ou
- Soit conserver sa température $T_0 = C_{te}$ en changeant d'état (du solide vers le liquide, du liquide vers la vapeur, du solide vers la vapeur). On dit alors qu'il échange une quantité chaleur dite chaleur latente de changement d'état.

I.12.1- Echange de chaleur par conduction:

La conduction est définie comme étant le mode de transfert de chaleur provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux. L'effet macroscopique observable est une égalisation des températures du système. Cependant si certaines zones sont maintenues à température constante par apport de

chaleur (réservoir de chaleur) ou évacuation de chaleur (puits de chaleur), il s'établit un transfert continu de la chaleur de la région chaude vers la région froide.

$$dQ = \lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dt \quad (1.25)$$

dQ : énergie élémentaire en Joule; λ : Conductivité thermique du matériau en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
 S : section en m^2 ; dt : temps élémentaire en s; $\frac{dT}{dx}$: gradient de température en x [$\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$].

I.12.2- Echange de chaleur par convection:

Dans un processus de convection le transfert de chaleur entre un solide et un fluide l'énergie étant transmis par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton:

$$Q = h \cdot S(T_p - T_\infty) \quad (1.26)$$

Q : Flux de chaleur transmis par convection [W];

h : coefficient de transfert de chaleur par convection [$\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$];

T_p : Température de la surface solide [$^\circ\text{C}$];

T_∞ : Température du fluide de la surface solide [$^\circ\text{C}$];

S : Aire la surface contact solide/fluide [m^2].

Selon le mécanisme qui génère le mouvement du fluide, on distingue :

- La convection naturelle ou libre
- La convection forcée

I.12.3- Echange de chaleur par rayonnement:

Tout corps chauffé émet par sa surface extérieure un rayonnement électromagnétique dont la puissance est fonction de sa température ; C'est le rayonnement thermique. L'analyse spectrale de ce rayonnement montre une majorité de courtes longueurs d'onde aux très hautes températures et une majorité de grandes longueurs d'onde pour des températures inférieures à 500 K.

D'après la loi de Stéphan, le flux de chaleur échangé entre la surface S et le milieu ambiant peut s'écrire :

$$Q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S(T_s^4 - T_a^4) \quad (1.27)$$

σ : constante de Stéphan Boltzmann $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ [W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}]$;

S : surface d'échange $[\text{m}^2]$;

ε : coefficient d'émission de la surface ($\varepsilon=1$ pour un corps noir , $\varepsilon \ll 1$ corps brillant);

T_s : température de surface du corps $[\text{k}]$;

T_a : température ambiante $[\text{k}]$.

I.12.4- Echange de chaleur par changement de phase:

Lors de changement de phase d'un corps un échange de chaleur s'effectue, le flux chaleur échangé est:

$$Q = m \cdot L \quad (I.28)$$

Tel que:

m : la masse de corps

L : La chaleur latente massique de changement d'état représente la quantité de chaleur nécessaire pour permettre le changement d'état d'une unité de masse (ou une mole) d'un corps pur d'une substance sous une pression constante. Elles s'expriment en J.kg^{-1} (J.mol^{-1}) dans le système légal. Plus couramment on trouve les unités kJ.kg^{-1} (kJ.mol^{-1}).

Suivant la convention thermodynamique, les chaleurs latentes de changement d'état sont positives si on doit fournir de l'énergie à un corps ou négatives si le corps libère de l'énergie.

I.13- Les appareils de mesure des rayonnements solaire

I.13.1- Pyranomètre[14]:

Le pyranomètre mesure le rayonnement sur une surface plane (Watt/m^2). Le rayonnement mesuré représente la somme du rayonnement direct produit par le soleil et du rayonnement diffus. Ils ne nécessitent aucune alimentation extérieure. Ils génèrent une tension qui, typiquement, équivaut à : $10(\text{mV}/(\text{kW} \cdot \text{m}^2))$. Chaque pyranomètre est calibré individuellement conformément à WRR (World Radiometric Référence).



Figure I.9.a : Un pyranomètre pour la mesure du rayonnement solaire global[14]



Figure I.9.b : Un pyranomètre bande pare-soleil pour la mesure du rayonnement solaire diffus, où l'ombre de la bande apparaît sur la demi-sphère de l'instrument[14]

I.13.2- Le pyréliomètre[15]:

Le pyréliomètre est conçu pour effectuer des mesures du rayonnement solaire direct en incidence normale, sans surveillance. Un pyréliomètre est un instrument conçu spécialement pour mesurer le flux lumineux solaire du faisceau direct avec un champ visuel limité à 5° . Ce résultat est obtenu grâce à la configuration du tube collimateur, doté d'ouvertures de précision, et à la conception du détecteur. L'ouverture avant est équipée d'une vitre de quartz pour protéger l'instrument et pour faire office de filtre faisant passer le rayonnement solaire à des longueurs d'ondes comprises entre 200 nm et 4000 nm.

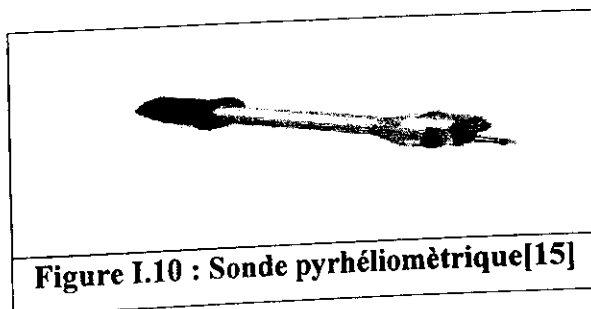
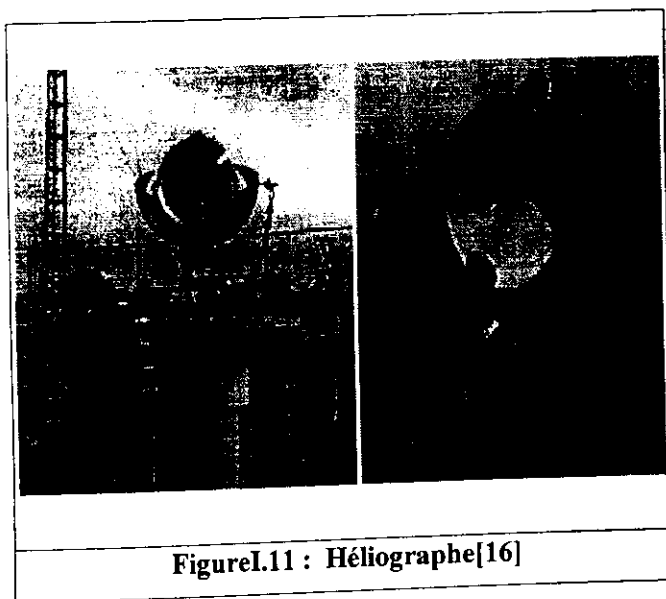


Figure I.10 : Sonde pyréliométrique[15]

I.13.3- Héliographe[16]:

Il est utilisé pour mesurer le nombre d'heures d'ensoleillement dans une journée. Une boule de cristal maintenue par un support amovible (qui peut bouger) constitue la base de l'héliographe. Derrière la boule de cristal est placé un carton sur lequel les mesures s'inscriront. L'appareil est fixé sur un support d'une hauteur approximative de 1,5 m. Chaque soir, après le coucher du soleil, il faut enlever le carton qui a été brûlé par les rayons du soleil ayant traversé la boule de cristal. Celle-ci agit comme une loupe en concentrant les rayons sur le carton. Le déplacement du soleil fait changer le point de convergence des rayons sur le carton, ce qui produit une ligne brûlée sur celui-ci. Si un nuage cache les rayons du soleil, il y aura sur le carton un endroit, correspondant à cette heure, qui ne sera pas brûlé. À l'aide d'une règle graduée en heures, on mesure la longueur des brûlures sur le carton.

Ainsi, en additionnant le temps de toutes les sections, il est possible d'obtenir le nombre d'heures d'ensoleillement total de la journée en tenant compte de la présence ou de l'absence de nuages. Cet appareil fut inventé par J.F. Campbell vers 1853 et modifié vers 1879 par G.G. Stokes. On doit placer cet appareil loin des édifices et des choses qui pourraient produire une ombre sur lui .



I.14- Conclusion:

Ce chapitre a permis de décrire les paramètres astronomiques et radiatifs, l'effet de serre, les composantes de rayonnement solaire et leur instruments de mesure utilisés.

Chapitre III: Les procédés de distillation des eaux saumâtres par effet-see

II.1- Introduction

Le dessalement est le processus de traitement d'eau qui consiste à enlever les sels de l'eau saline. Cette technologie a été réellement utilisée pour la première fois il y a environ soixante ans, durant la deuxième guerre mondiale, quand les bases militaires dans les régions arides ont eu besoin d'eau pour leurs troupes. Le gouvernement américain a investi beaucoup pour le développement des technologies du dessalement. Par la suite, des stations de dessalement de capacité 8000 (m^3/j) ont été installées dans diverses régions du monde.

Elles sont utilisées spécialement pour le dessalement de l'eau de mer. En 1970, de nouvelles technologies, des processus commerciaux membranaires comme l'électrodialyse (ED) et l'Osiose inverse (RO), sont apparues et commençaient à être utilisées. L'ED est appropriée pour dessaler l'eau saumâtre parce qu'elle est beaucoup plus économique que la distillation alors que le RO est utilisée pour dessaler à la fois l'eau saumâtre et les eaux de mer qui sont très salées.

Dix ans plus tard, le dessalement est devenu une entreprise commerciale mature. Un grand nombre de chercheurs ont travaillé dans ce domaine pour améliorer le rendement de ces technologies et atteindre une efficacité meilleure. A partir de 1990, l'utilisation des technologies de dessalement est devenue une chose banale. Ces technologies étaient utilisées pour produire de l'eau potable pour préserver la vie dans certaines régions comme les pays de la région aride et les pays de Moyen-Orient. Par la suite, des technologies diverses ont été développées et certaines d'entre elles sont devenues de plus en plus efficaces[12].

II.2- Les différents procédés de dessalement[3,12,13,22]

Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, par les différents procédés existant, connaît un développement important. Parmi les plus connus, il y a les processus de distillation thermiques comme :

- La distillation à simple effet (simple effet distillation [SED]).
- La distillation à multiples effets (multiple effet distillation [MED]).
- La distillation à multiples étages (multiple stage flash [MSF]).
- La distillation par compression de la vapeur (vapeur compression [VC]).

Les procédés Membranes sont les procédés dont la source principale d'énergie est l'électricité comme : L'osmose inverse (reverse osmosis [RO]) et L'électrodialyse [ED]. De plus il y a d'autres procédés comme le procédé d'échange d'ions, et le procédé de congélation.

a- La distillation à simples effets [SED]

Une circulation de vapeur permet de chauffer dans un évaporateur l'eau salée, qui s'évapore sous une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique, on peut alors condenser directement la vapeur sortant de l'évaporateur, sans récupération de la chaleur de condensation, ou bien, au contraire, on peut envoyer la vapeur dans un condenseur en vue du préchauffage de l'eau salée qui arrive dans l'installation.

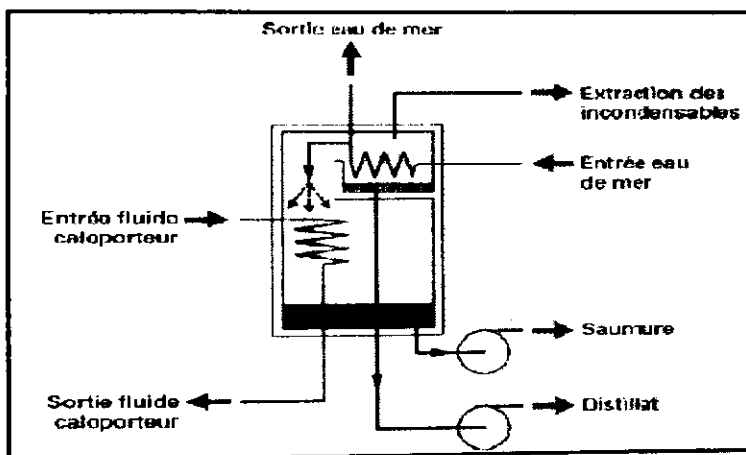


Figure II.1- Distillateur simple effet[22]

b- La distillation à multiples effets [MED]

Pour augmenter le rendement de l'opération, il y a intérêt à récupérer la chaleur de condensation et à l'utiliser comme chaleur d'apport pour une nouvelle distillation, on réalise alors plusieurs effets en cascade, la chaleur résiduelle est récupérée et utilisée pour le chauffage de l'eau brute à traiter. Dans les industries de traitement divers, on réunit ainsi jusqu'à six ou sept évaporateurs – condenseurs (le premier évaporateur et le dernier condenseur ayant une seule fonction), et peut être combinée avec une centrale électrique thermique. Du point de vue technologique deux types peuvent être utilisés à long tube vertical (LTV) inventé en 1905 par le français KESTNER ou à tube horizontal. Pour fixer le nombre d'effet, on tient compte de la différence globale de température disponible entre la source chaude et froide, et du gradient de température nécessaire dans chaque évaporateur pour assurer efficacement la transmission de

chaleur de la vapeur de chauffe à l'eau saline à distillée. Il dépend aussi du prix de revient de la vapeur d'alimentation, donc du coût de combustible employé.

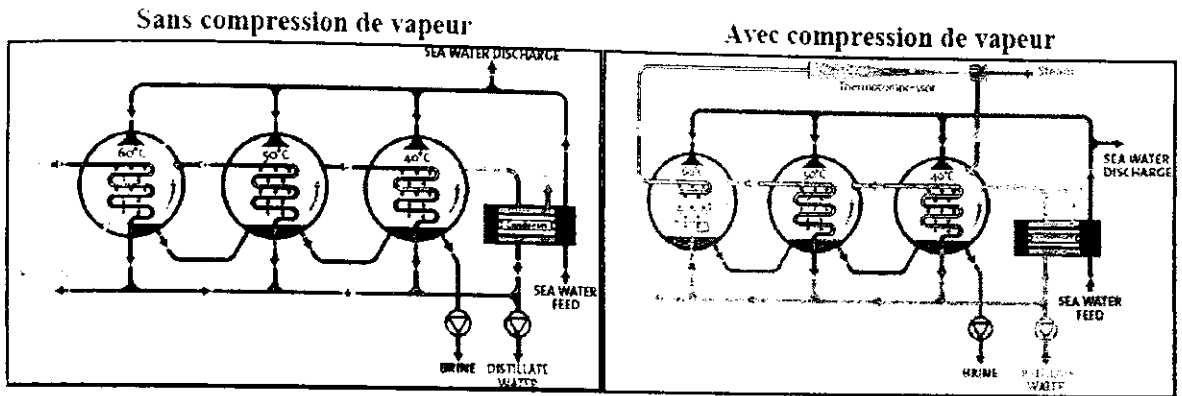


Figure II.2: Distillation à multi effets (M.E.D)[22]

c- La distillation avec vaporisation instantanée à étages multiples ou par détente successives [MSF]

L'installation comprend un certain nombre d'enceintes ou cellules, thermiquement isolées disposées en série dans lesquelles se produit la vaporisation instantanée par détente.

L'eau saline à traiter est chauffée sous pression, sans évaporation, puis introduit dans les cellules sous vide partiel ou elle circule successivement, à chaque étage la vapeur produit par détente et va se condenser a la partie supérieur au contact d'un faisceau tubulaire dans lequel l'eau d'alimentation circule.

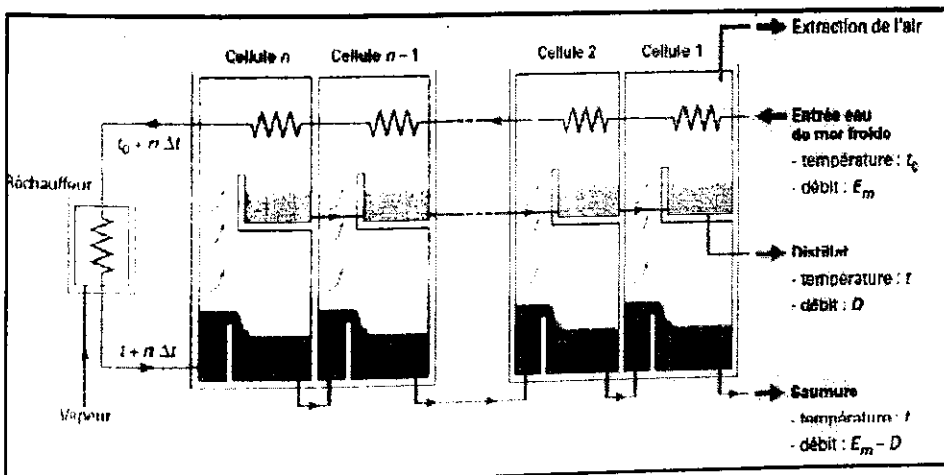


Figure II.3- Distillateur par détente successives[22]

d- La distillation avec compression de la vapeur (thermo compression)[VC]

L'eau salée arrive dans un évaporateur, ou elle se vaporise aux environs de 100°C grâce à un serpentin auxiliaire de vapeur qui est ensuite mis hors circuit. La vapeur d'eau à la pression atmosphérique et vers 100°C est alors aspirée par un compresseur qui la porte à une pression relative de l'ordre de 0,2 bar, avec une surchauffe de l'ordre de seulement 6°C, la vapeur surchauffée passe ensuite dans le serpentin principal de l'évaporateur où elle se condense. Les avantages de la thermo compression sont son haut rendement, on peut retirer environ 0,8 m³ d'eau douce de 1 m³ d'eau brute.

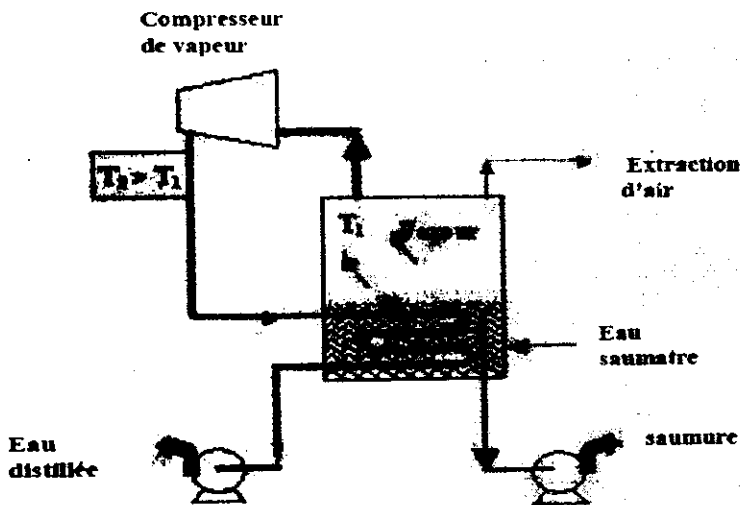


Figure II.4 : La distillation avec compression de la vapeur [13]

e- L'osmose inverse [RO]

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée.

Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler: cette pression est nommée la pression osmotique (en faisant l'hypothèse que la solution diluée est de l'eau pure). Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique: c'est le phénomène d'osmose inverse.

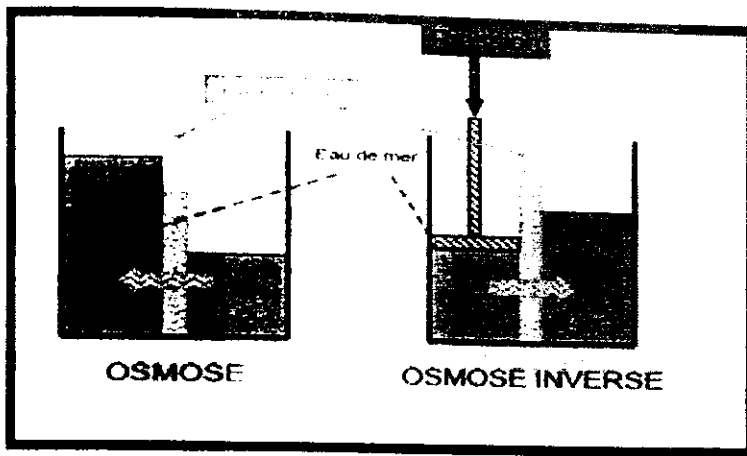


Figure II.5: Les techniques de dessalement par osmose[3]

f- L'électrodialyse [ED]

Un électro-dialyseur est formé essentiellement d'une cuve dans laquelle on place un certain nombre de membranes sélectives, en faisant alterner les membranes anionique et les membranes cationiques, qui délimitent une suite de compartiments. On fait circuler dans cette cuve l'eau saline, tandis qu'on la fait traverser par un courant électrique continu grâce à des électrodes, donc on va voir une migration des ions de l'eau saline à travers ces membranes imperméables à l'eau.

Une membrane sélective est infranchissable par les ions d'une catégorie tels que les cations, mais laisse pénétrer sur une face de la membrane les ions de l'autre catégorie (anions) et ne laisse pas pénétrer sur l'autre face, donc la membrane était perméable aux anions et imperméable aux cations, on dit que c'est une membrane anionique et on définirait de façon analogique une membrane cationique, possédant la propriété inverse.

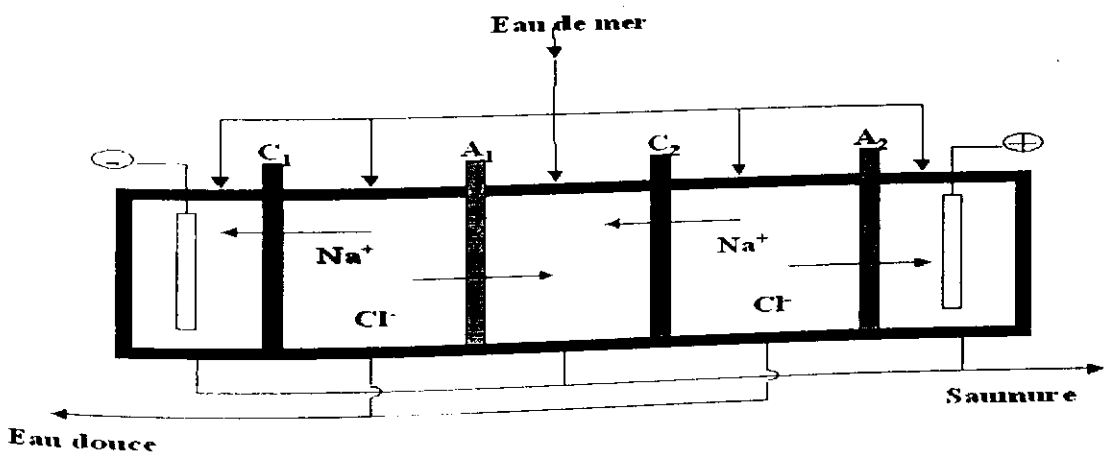


Figure II.6: Schéma de principe de l'électrodialyse[13]

g- Echange d'ions

Le phénomène d'échange d'ions se produit quand on met en contact une eau saumâtre avec certaines substances insolubles ayant la propriété d'échanger certains de leurs ions avec les sels de l'eau, les produits employés actuellement sont des produits insolubles dénommés échangeurs d'ions (résines synthétiques sous la forme de graines d'environ 0,3 à 1,5 mm). Cette méthode est applicable seulement pour les eaux contenant jusqu'à 8 et même 10 g/L.

h- La méthode de congélation

La température de congélation est presque indépendante de la pression, elle est déterminée par la concentration saline et varie depuis 0°C par l'eau pure jusqu'à environ -2°C pour l'eau de mer et -4°C pour une concentration double de celle de l'eau de mer, le dessalement par congélation est basé sur le fait qu'une fraction d'une masse donnée d'eau saline se dérobe à la congélation en s'enrichissant en sels, la partie congelée étant formée d'eau pure.

Quelques remarques :

- 1) D'une façon générale les procédés thermiques représentent, environ 75% du volume d'eau dessalée, l'osmose inverse occupe environ 22% du marché mondial le reste est porté sur le compte des autres procédés.
- 2) L'utilisation de toutes ces procédées exige, cependant, de gros investissements que la plupart des pays en voie de développement ne possèdent pas, ces régions ont besoin de systèmes de dessalement performant certes, mais leur capacité de production doit être appropriée à la consommation modeste des habitants et aux ressources énergétiques naturelles qu'elles possèdent sur leur territoire, par exemple, l'énergie solaire[12].

II.3- Distillation solaire[4,13,18]

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer l'eau salée ou saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée. Une partie de l'eau s'évapore et la vapeur produite se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre. La distillation solaire a été utilisée depuis plusieurs siècles; mais la plus grande réalisation est apparue en 1872 près de Las-Slinas dans le nord du Chili. Le modèle a été fabriqué par Carlos Wilson, un ingénieur Suédois avec une surface vitrée de 5000m^2 , produisant jusqu'à 20 m^3 d'eau douce par jour, à partir d'une eau saline contenant 140g/l . La distillation solaire connut une période creuse entre 1880 et la première guerre mondiale. En 1920, Kaush utilisa des réflecteurs en métal pour concentrer les rayons solaires. Une installation due à Ginistous groupant 30 appareils de 1m^2 fut réalisée et exploitée en Tunisie en 1929. Au début des années 30, Tifinov proposa un distillateur incliné. Maria Telks inventa en 1945, un nouveau type de distillateur solaire de forme sphérique. En 1969, Cooper proposa une simulation pour analyser les performances d'un distillateur solaire type serre. Depuis les années 70, plusieurs autres types de distillateurs ont été élaborés et étudiés, parmi lesquels:

- Le distillateur à effet multiple
- Le plateau incliné ou distillateur solaire incliné
- Le distillateur solaire type mèche ou type multiple mèche.

II.4- Principe de la distillation solaire[2]

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

L'énergie solaire entrant par la couverture est absorbée par l'eau et le fond noirci ; puis elle est transmise à l'air par conduction, convection et rayonnement. Comme les parois sont isolées et le verre opaque aux radiations infrarouges de grandes longueurs d'ondes l'énergie solaire se trouve ainsi emprisonnée (effet serre) et l'air chauffé (figure II.7).

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.

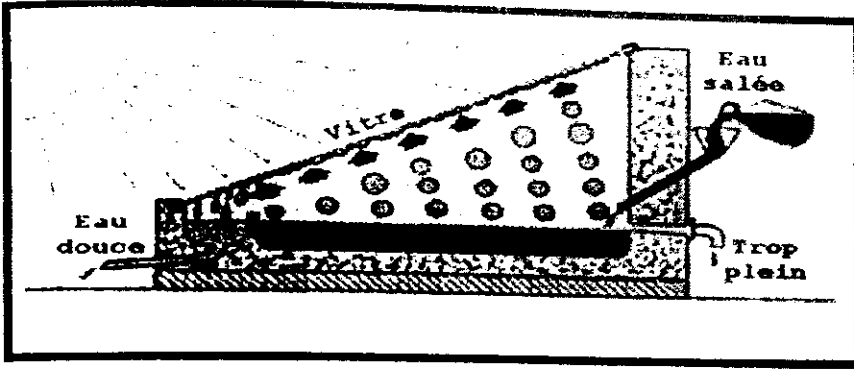


Figure II.7: Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire à effet de serre[2]

II.5- Les différents types de distillateurs solaires [7,13,18]

Les distillateurs solaires connus se répartissent en deux grandes groupes, ceux dont la surface de condensation est également la couverture transparente au rayonnement solaire (mode direct), et ceux dont la surface de condensation est séparée du chauffage de l'eau (mode indirect).

II.5.1- Distillation solaire à effet de serre:

Soit une serre fermée et exposée au soleil, à l'intérieur de laquelle se trouve une lame d'eau de mer ou d'eau saumâtre de quelques centimètres d'épaisseur. L'air à l'intérieur de la serre est surchauffé et saturé de vapeur d'eau (douce) qui se condense au contact de la paroi en verre relativement froide. Les gouttes d'eau douce peuvent être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière (figure II.8).

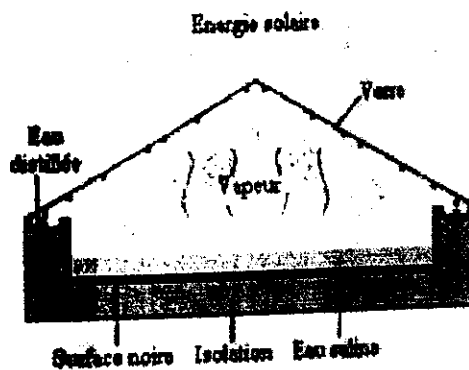


Figure II.8: Distillation solaire à effet de serre[13]

II.5.2- 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 (figure II.9) n'a été exécuté qu'en petite taille. Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux.

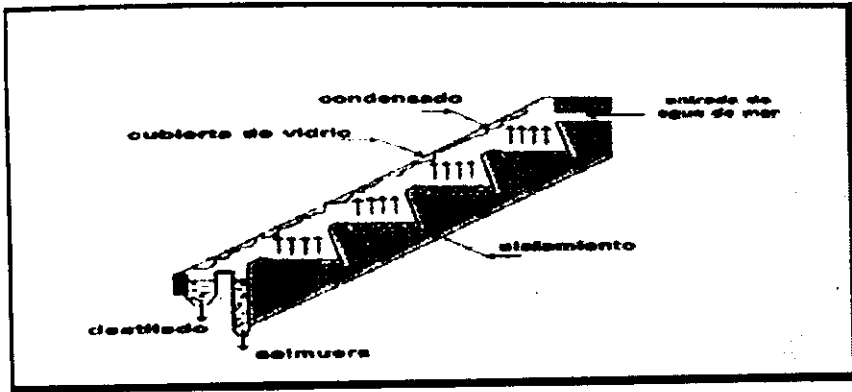


Figure II.9-Distillateur incliné à cascades (ou à marches)[7]

II.5.3- Distillateur solaire incliné à mèche:

Il se compose d'une très mince couche de textile à mailles fines, imbibée d'eau qui se maintient d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension interfaciales, 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 d'un capteur - évaporateur, d'un condenseur et d'une 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.

I.5.4- Distillateur solaire sphérique:

C'est un distillateur en plexiglas transparent, à bac horizontal, et à surface de condensation demi-sphérique (figure II.10). Le rayonnement incident transmis par le demi-sphère supérieure pénètre dans le bac et sert, à chauffer la masse d'eau contenue dans celui-ci. Une partie de l'eau s'évapore, et la vapeur dégagée vient se condenser sur la face intérieure de la vitre. Le distillat passe dans le demi-sphère inférieure à travers

l'espace annulaire entre le bac et la sphère. Le balayage de la surface de condensation est réalisé au moyen d'un essuie - glace entraîné par un moteur. L'avantage de ce système de balayage est de maintenir la surface de condensation, constamment transparente au rayonnement, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes.

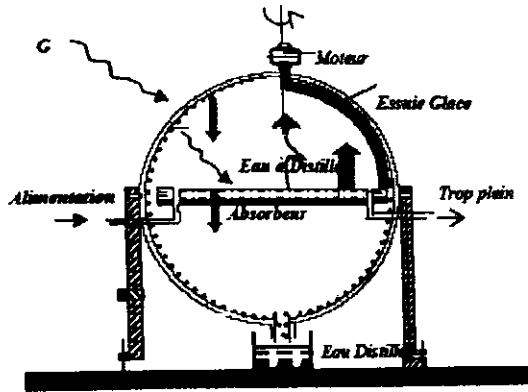


Figure II.10- Le distillateur solaire sphérique[2]

II.5.5- Distillateur solaire à étages multiples avec récupération de chaleur:

Seul, le bassin inférieur est alimenté en énergie thermique (figure I.11). Lorsque l'eau de ce bassin est réchauffée, elle s'évapore et se condense à la surface inférieure du bassin conique situé au-dessus. Il y a une formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers une gouttière qui les conduit au stockage. A la condensation de la vapeur d'eau, l'énergie de conversion de phase, appelée aussi l'enthalpie d'évaporation, est libérée. Cette énergie réchauffe l'eau contenue dans l'étage supérieur qui s'évapore à son tour et se condense à la surface inférieure de l'étage suivant et ainsi de suite...De cette manière, l'énergie, prévue pour réchauffer l'eau du bassin inférieur, est récupérée, du moins en grande partie, pour être plusieurs fois utilisée. Ce processus de récupération de chaleur a un effet multiplicateur sur la production d'eau potable. Le remplissage du distillateur s'effectue à partir du dernier étage, le système est alimenté en eau saline à un débit deux fois plus élevé que celui de l'eau évaporée. Cette quantité d'eau injectée continuellement à travers les tuyaux de débordement a pour but :

- de compenser la quantité d'eau évaporée,
- d'éviter une accumulation des sels dans les bassins et de contribuer à conserver les gradients de température entre les étages.

Le circuit entre le capteur solaire à l'unité de distillation fonctionne en thermosiphon; il n'y a donc pas de pompe nécessitant une source d'énergie supplémentaire. Pour éviter

une surpression, une huile végétale est utilisée comme fluide caloporteur car la température peut dépasser les 100°C.

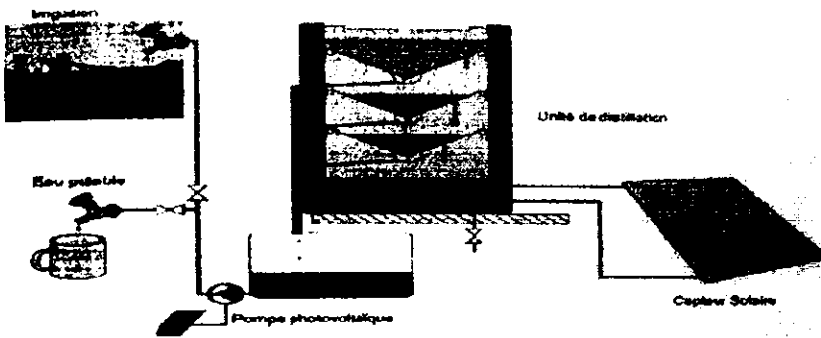


Figure II.11: Schéma d'un distillateur solaire à étages multiples[13]

II.6- Paramètres et caractéristiques de fonctionnement:[8]

II.6.1- Les paramètres influants sur le fonctionnement du distillateur:

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

- Les paramètres externes.
- Les paramètres internes.

II.6.1.1- Paramètres Internes:

❖ Paramètres de construction:

- Couverture:

La couverture verrière intervient essentiellement par sa nature qui peut être en verre ou en plastique. Elle a deux rôles à jouer : d'une part c'est un filtre sélectif de rayonnement solaire (le rayonnement émis ou réémis par l'intérieur du bassin à température basse 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).

- L'inclinaison:

Son inclinaison par rapport à l'horizontale, pour déterminer la quantité d'énergie solaire introduite dans le distillateur et pour minimiser la distance entre la saumure et la vitre, l'angle d'inclinaison doit faire l'objet d'un choix judicieux.

L'inclinaison influe aussi sur les équations des bilans énergétiques des différents constituants du distillateur. Elle dépend du fonctionnement du distillateur durant l'année:

- Fonctionnement estival: $\beta = \phi$
- Fonctionnement hivernal: $\beta = \phi$
- Fonctionnement annuel: $\beta = \phi - 10^\circ$

- L'absorbeur:

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

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

STCUNANTHAN et HANSEN ont montré que la performance du distillateur augmente quand la distance entre la saumure et la vitre diminue.

- L'hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller:

L'épaisseur de l'eau saumâtre 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 la production n'est observé que peu après le coucher de soleil.

- L'isolation des faces latérales du distillateur:

L'isolation des faces latérales est pour but d'éliminer les pertes (transfert de chaleur avec le milieu extérieur).

❖ Paramètres thermophysiques:

Les paramètres thermophysiques sont représentés par :

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

La saumure: 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.

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

❖ **Paramètres optiques:**

Ce sont les paramètres optiques (l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmittivité) de la surface de la couverture et de la surface absorbante.

❖ **Paramètres de fonctionnement:**

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

II.6.1.2- Paramètres Externes:

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

♣ **Paramètres météorologiques**

a) Intensité du Rayonnement Solaire

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

Aux températures de saumure élevées, augmenter la différence de température entre la saumure et la vitre en augmentant la vitesse de vent, en baissant la température ambiante. Par contre, aux températures faibles de la saumure, et en augmentant la vitesse du vent revient à faire chuter le taux d'évaporation.

c) L'intermittence des nuages :

La quantité d'énergie solaire reçue par une surface dépend des paramètres A, et B qui dépendent de la nature de ciel. Cela revient à dire que le passage des nuages diminue l'absorptance effective moyenne.

♣ **Paramètres Géographiques**

Les paramètres géographiques tels que la longitude, la latitude et la hauteur de soleil, sont à prendre en considération dans cette étude.

II.7- Caractéristiques du distillateur[3]

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production d'eau d'un distillateur. On distingue constamment, le rendement, l'efficacité interne et globale, et la performance. Le taux de production ;

• Le rendement:

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

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot L_v}{G} \quad \text{(II-1)}$$

\dot{m} : Débit massique de distillat.

L_v : Chaleur latente de vaporisation.

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

• L'efficacité:

- L'efficacité globale:

L'efficacité globale est définie par le rapport:

$$\eta_i = \frac{Q_{ev}}{G \cdot A_v} \quad \text{(II-2)}$$

- L'efficacité interne:

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

$$\eta_i = \frac{Q_{ev}}{Q_E} \quad \text{(II-3)}$$

• La performance

Le souci de caractériser un distillateur d'une manière absolue a amené ainsi Satcunanathan et Hansen [9] à définir le facteur de performance brut (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H):

$$F. P. B = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de } t \text{ h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de } t \text{ h}} \quad (\text{II-4})$$

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (\text{II-5})$$

II.8- Technologie de la couverture[7]

Dans la plupart des appareils, la couverture est réalisée soit en verre soit en plastique. Elle a deux rôles à jouer: d'une part c'est un filtre sélectif de rayonnement solaire (le rayonnement solaire la traverse, le rayonnement réémis par l'intérieure du bassin à température basse 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), le toit est en pente (5 à 20°) en général). L'emploi du verre permet de satisfaire ces exigences ; le seul inconvénient étant son prix relativement élevé. C'est pourquoi différents auteurs préconisent l'emploi de films plastique (Chlorure de polyvinyle, polyéthylène, nylon, teldar). L'expérience a montré que les films plastiques sont fragiles, vieillissent trop vite et résistent mal aux ouragans ! Toutefois, l'emploi du plastique est systématique pour les petits distillateurs portatifs ou embarqués à bord de canots de sauvages.

II.9- Technologie du bassin[7]

Le bassin est réalisé soit en béton dans le cas de grands distillateurs, soit en métal ou en polyester stratifié dans le cas des petits distillateurs. L'isolation thermique entre l'eau et le terrain d'assise peut être réalisée soit par un revêtement intérieur au bassin, soit dans la « masse » par l'emploi de ciment d'amiante. L'étanchéité du fond du bassin est réalisée par un tapis de revêtement en caoutchouc synthétique ou en toile de verre

bitumée. Ce même revêtement de couleur sombre absorbe le rayonnement solaire. Eventuellement l'utilisation de l'énergie absorbée peut être améliorée par la mise en place dans l'eau du bassin d'une mèche noire flottante. D'une façon générale, les réalisations pratiques se sont orientées dans deux voies différentes :

Celle des distillateurs de petites dimensions appelés à répondre aux besoins en eau potable d'individus isolés ou de petites communautés et même à des besoins plus importants par juxtaposition d'une grande quantité de petits appareils construits en série. Celle des distillateurs solaires de plusieurs centaines de m^2 dont la construction s'appuie sur des méthodes génie civil.

II.10- Besoins en énergie pour la distillation de l'eau[7]

L'énergie exigée pour évaporer l'eau est la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Ceci a une valeur de 2260 kilojoules par kilogramme (kJ/kg). Cela signifie que pour produire 1 litre (c'est-à-dire 1kg puisque la densité d'eau est 1kg/litre) d'eau pure en distillant l'eau saumâtre exige un apport de chaleur de 2260 kJ. Cela ne tient pas compte de l'efficacité de la méthode chauffante, qui sera moins de 100 %, ou pour tout rétablissement de la chaleur latente qui est rejetée quand la vapeur d'eau est condensée.

II.11- Conclusion

Ce chapitre expose un état de l'art des procédés de dessalement de distillation thermique et à effet serre et leurs principes de fonctionnement, et leurs performances énergétiques.

Chapitre III. Performances thermooptiques du cristal ATR

III.1. Introduction

Ce chapitre reprend l'essentiel des travaux de modélisation du distillateur à multiples effets à effet de serre en se basant sur des bilans énergétiques et des propriétés thermodynamiques globaux. Dans cette approche le distillateur est décomposé en deux sous distillateurs à simple effet superposés. Chaque sous système fonctionne entre deux sources de chaleur chaude et froide caractérisant l'eau saumâtre et l'ambiance. Le fonctionnement du distillateur global est régi par une loi linéaire exprimant l'efficacité globale en fonction de la température réduite, mesurant le gradient de température entre les deux sources de chaleur sur la radiation solaire incidente sur le plan d'ouverture permettant la détermination du rendement optique et du facteur des pertes globales. Les températures de fonctionnement sont aussi présentées et analysées.

III.2. Modélisation des échanges thermiques au niveau du distillateur solaire multiple effet de serre

III.2.1. Description et principe de fonctionnement:

a- Description

Le dispositif expérimental (figure. III.1) est un distillateur à effet serre à double effets. Le système est constitué de deux compartiments superposés l'une au dessus de l'autre et fonctionnant selon l'effet de serre. Le bac absorbeur de l'unité de base est construit en acier inoxydable et peint en noir mat, de 1m^2 de surface. Les surfaces latérales des deux unités sont peintes en peinture réfléchissantes pour améliorer la réflexion du rayonnement solaire dans les bacs et les saumures. Le bac de base contient 20 litres de saumure, et recouvert d'un vitrage ordinaire de 4mm d'épaisseur. L'unité supérieure est recouverte en verre ordinaire de 4mm d'épaisseur et contient 12,5 litres d'eau saumâtre. Le système est isolé thermiquement par une couche de polystyrène de 4cm d'épaisseur. Les niveaux de saumure dans le bac sont fixés par des flotteurs. Sur les rebords du système, sont pratiquées des orifices connectés à des cannelures (collecteurs), destinées à alimenter le distillateur en eau saumâtre, à rincer les bassins, recueillir les distillats et conduire les thermocouples au cours des essais expérimentaux du distillateur.

Le système est assemblé par des boulons, des jointures en caoutchouc et des mastiques silicones. L'ensemble repose sur une structure en cornière d'acier soudé élevé de 70 cm au-dessus du sol et orienté plein sur site d'Adrar.

b- Principe de fonctionnement

Le distillateur solaire à double effets de serre (figure. III.1) est composé de deux unités superposées. Ces unités sont deux sous distillateurs à effet serre. Ainsi, chaque sous-système est assimilé à une boîte noire qui fonctionne entre deux sources de chaleur (chaude et froide). Pour simplifier l'étude du système, on peut considérer chaque sous-distillateur comme un siège d'une isolation thermique pour le sous distillateur voisin.

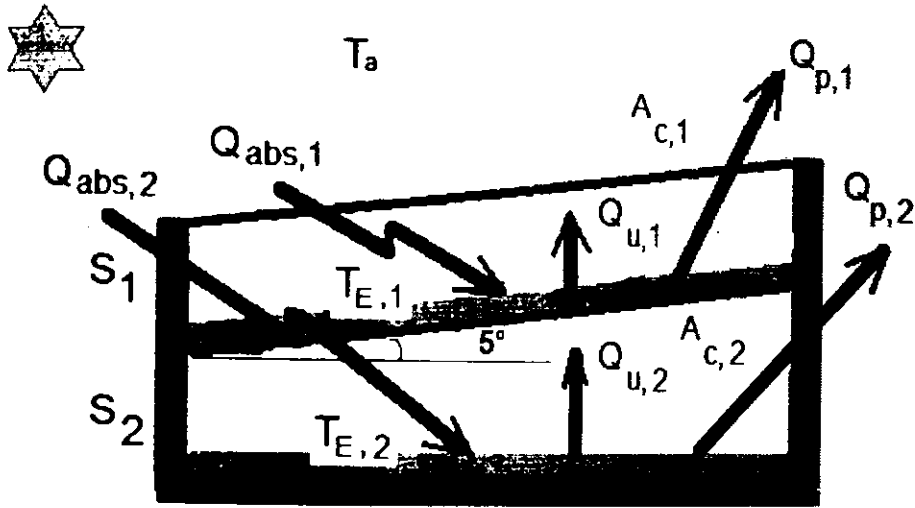


Figure III-1: Distillateur solaire à multiple-effets à effet de serre

Les principales hypothèses de modélisation sont :

- Chaque sous système est assimilé à une boîte noire fonctionnant entre deux sources de chaleur (saumure, ambiance).
- les propriétés thermophysiques (transmittivité, absorptivité, conductivité, densité, capacité, viscosité,...) des composants de chaque sous système sont indépendantes des températures.
- Les facteurs d'échanges par conduction, par convection et par rayonnement sont modalisés par un seul facteur de pertes thermique global indépendant de la température.

III.2.2. Bilan thermique dans le distillateur [9, 10, 11]

La surface d'ouverture du distillateur reçoit une fraction de la radiation solaire G_1 . Cette fraction est transmise par le vitrage et absorbée par la saumure Q_{abs} (source chaude). Une partie de cette énergie est absorbée par l'eau saumâtre et elle est utilisée comme gain utile pour évaporer une quantité d'eau à la température moyenne de la

saumure. La quantité de chaleur qui reste est dissipée dans l'atmosphère Q_p (source froide). L'application du premier principe de la thermodynamique (sortie - entrée + stockage = 0) à un volume de contrôle délimitant les surfaces fonctionnelle du système, permet d'écrire l'équation l'équilibre thermique du système avec son environnement.

. Au niveau du sous système supérieur:

$$Q_{u,1} = Q_{abs,1} - Q_{p,1} = A_{c,1}\alpha_{r,1}G_1 - U_{L,1}A_{c,1}(T_{E,1} - T_a) \quad (III.1)$$

. Au niveau du sous système inférieur

$$Q_{u,2} = Q_{abs,2} - Q_{p,2} = A_{c,2}\alpha_{r,2}G_1 - U_{L,2}A_{c,2}(T_{E,2} - T_a) \quad (III.2)$$

Les fractions de chaleur $Q_{u,1}$, $Q_{u,2}$ représentent respectivement les gains utiles des sous distillateurs supérieur et inférieur.

Les quantités de chaleur $Q_{abs,1}$, $Q_{abs,2}$ sont respectivement les flux de chaleur absorbés par le saumure dans le sous distillateur supérieur in inférieur.

Les quantités de chaleur $Q_{p,1}$, $Q_{p,2}$ sont respectivement les flux de chaleur dissipés par le sous distillateurs supérieur et inférieur .

$A_{c,1}$, $A_{c,2}$ sont les surfaces d'ouverture des deux sous systèmes.

$\alpha_{r,1}$, $\alpha_{r,2}$ représentent respectivement les coefficients d'absorption globale effective (rendement optique) de chaque sous système.

G_1 : L'irradiation globale sur le plan d'ouverture du sous système supérieur.

$U_{L,1}$, $U_{L,2}$ sont respectivement les coefficients des pertes thermiques globales des sous distillateurs supérieur et inférieur.

$T_{E,1}$, $T_{E,2}$ sont les températures moyennes des saumures dans les sous système supérieur et inférieur.

T_a : La température moyenne de l'ambiance.

a- Rendement optique du distillateur

L'efficacité optique du distillateur supérieur est estimée à partir des fractions de chaleur transmise par le vitrage et absorbée par la saumure en additionnant celle qui est transmise par le vitrage et par la saumure et absorbée par le vitrage .

$$\alpha_{I,1} = \tau_{v,1}\alpha_{E,1} + \tau_{v,1}\tau_{E,1}\alpha_{v,1} \quad (III.3)$$

Il est tout à fait clair que si on néglige le terme $\tau_{v,1}\tau_{E,1}\alpha_{v,1} \approx 0$, on retrouve l'absorptance effective d'un capteur plan.

Par analogie le rendement optique du distillateur inférieur peut être estimé par l'expression :

$$\alpha_{I,2} = (\tau_{v,1} - \alpha_{I,1})(\alpha_{E,2} + \tau_{E,2}\alpha_{v,2}) \quad (III.4)$$

$\tau_{v,1}$, $\tau_{v,2}$: sont respectivement les transmittances des vitres des deux sous systèmes supérieur et inférieur.

$\alpha_{I,2}$: est le coefficient d'absorption du bac du sous distillateur inférieur.

$\tau_{E,1}$, $\tau_{E,2}$: représentent respectivement les transmittances des saumures.

$\alpha_{E,1}$, $\alpha_{E,2}$ représentent respectivement les coefficients d'absorption des saumures.

Tableau III.1- Paramètres optiques des composantes d'un distillateur solaire simple effet[1]

Angle d'incidence du rayonnement solaire en degrés		0-30
vitre	Réflexion %	5
	Absorption%	5
	Transmission%	90
Nappe d'eau	Réflexion %	2
	Absorption%	30
	Transmission%	68
Fond distillateur	Réflexion %	5
	Absorption%	95
	Transmission%	0

Pour un angle d'incidence inférieur à 15 degrés $\alpha_{I,1}=0.3$ et $\alpha_{I,2}=0.57$.

b- Facteur des pertes thermiques

Le coefficient des pertes thermiques globales est estimé à partir des facteurs des pertes thermiques arrières, avants et latérales pour chaque sous distillateur supérieur $U_{L,1}$ et inférieur $U_{L,2}$ similaire au collecteur solaire plan:

$$U_{L,1} = U_{avant,1} + U_{arrière,1} + U_{latéral,1} \tag{III.5}$$

$$U_{L,2} = U_{avant,2} + U_{arrière,2} + U_{latéral,2} \tag{III.6}$$

$U_{avant,1}$, $U_{arrière,1}$ et $U_{latéral,1}$ représente respectivement les coefficients des pertes avant, arrière et latéral du sous distillateur supérieur, et $U_{avant,2}$, $U_{arrière,2}$ et $U_{latéral,2}$ sont respectivement les coefficients des pertes avant, arrière et de latéral du sous distillateur inférieur.

Le facteur de perte global sera alors:

$$U_L = U_{L,1} + U_{L,2} \tag{III.7}$$

III.2.3. Le rendement thermodynamique du distillateur

Le rapport entre le gain utile et l'énergie solaire incidente sur le plan d'ouverture du distillateur durant une de temps donne l'efficacité thermique globale des sous-systèmes comme suit :

$$\eta_{d,1} = \frac{\sum \dot{m}_1 L_{v,1}}{A_{c,1} \sum G_1} \tag{III.8}$$

$$\eta_{d,2} = \frac{\sum \dot{m}_2 L_{v,2}}{A_{c,2} \sum G_1} \tag{III.9}$$

$\eta_{d,1}$, $\eta_{d,2}$ représente respectivement les efficacités thermiques des sous-systèmes supérieur et inférieur.

\dot{m}_1 , \dot{m}_2 sont respectivement les débits d'eau distillée dans les sous-systèmes supérieur et inférieur. $A_{c,1}$, $A_{c,2}$: sont les surfaces pertinentes. $E_{g,1}$: l'énergie solaire incidente .

$L_{v,1}$, $L_{v,2}$ en kJ/kg: sont respectivement chaleur latente de vaporisation de l'eau dans les sous-systèmes supérieur et inférieur.

$$L_{v,1} = 4.18[883 - 0.668(T_{E,1} + 273.15)] \quad (\text{III.10})$$

$$L_{v,2} = 4.18[883 - 0.668(T_{E,2} + 273.15)] \quad (\text{III.11})$$

La combinaison des équations (III.1), (III.2) avec les équations (III.8) et (III.9), donne l'expression des efficacités linéaires des sous systèmes sous les formes:

$$\eta_{d,1} = \alpha_{t,1} - U_{L,1} \left(\frac{T_{E,1} - T_a}{G_1} \right) \equiv A_1 - B_1 T_{r,1} \quad (\text{III.12})$$

$$\eta_{d,2} = \alpha_{t,2} - U_{L,2} \left(\frac{T_{E,1} - T_a}{G_1} \right) \equiv A_2 - B_2 T_{r,2} \quad (\text{III.13})$$

Les constantes A_1 , B_1 , A_2 et B_2 sont déterminés expérimentalement.

$T_{r,1}$: est la température réduite des sous distillateur supérieur.

$T_{r,2}$: est la température réduite des sous distillateur inférieur.

G_1 : l'éclairement global.

Selon le principe de superposition, le rendement global du distillateur à multiples effet est déduit à partir des rendement des deux distillateur sous la forme:

$$\eta_d = \frac{Q_{u,1} + Q_{u,2}}{GA_c} = (\alpha_{t,1} + \alpha_{t,2}) - \left[U_{L,1} \frac{(T_{E,1} - T_a)}{G_1} + U_{L,2} \frac{(T_{E,2} - T_a)}{G_1} \right] \quad (\text{III.14})$$

Les gradients $T_{E,1} - T_a \cong T_{E,2} - T_a$ sont pratiquement constantes ce qui permet de déduire

la loi de fonctionnement du distillateur à multiple-effets:

$$\eta_d = \frac{Q_{u,1} + Q_{u,2}}{GA_c} = (\alpha_{t,1} + \alpha_{t,2}) - (U_{L,1} + U_{L,2}) \frac{(T_{E,moy} - T_a)}{G_1} = \alpha_t + U_L \frac{(T_{E,moy} - T_a)}{G_1} \quad (\text{III.15})$$

III.2.4. Mode opératoire

Cette étude a été effectuée par l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar (latitude = 27.88 °N, longitude = 0.28° Ouest et une altitude de 264 m). Le distillateur solaire est exposé au soleil aux alentours de midi temps solaire vrai pour un angle d'incidence <15 degrés, une vitesse de vent <2 m/s, un éclairement de 1000 W/m² et température ambiante <30. Le rayonnement solaire incident sur la surface d'ouverture du distillateur solaire a été mesuré par un pyranomètre Kipp & Zonnen de seconde classe. La vitesse du vent a été mesurée avec un anémomètre de précision. Les températures ambiantes et des saumures sont mesurées par des thermocouples de type K reliés à un dataloger (enregistreur de données) de 21 voies de type (Fluke 2635A) à mémoire de stockage incorporé et les données sont stockées toutes les 5 minutes pendant les essais. Les quantités d'eau distillée sont mesurées par deux vases gradués (figure III.2).

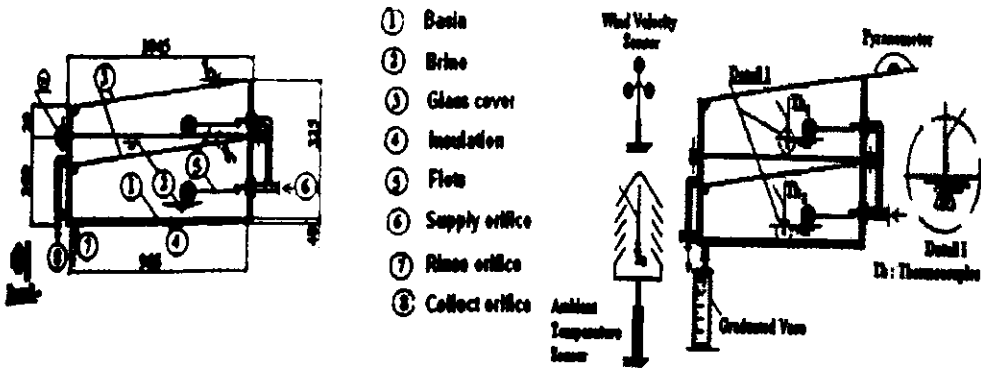


Figure III-2: Schéma du dispositif expérimental

III.3- Résultats et discussions

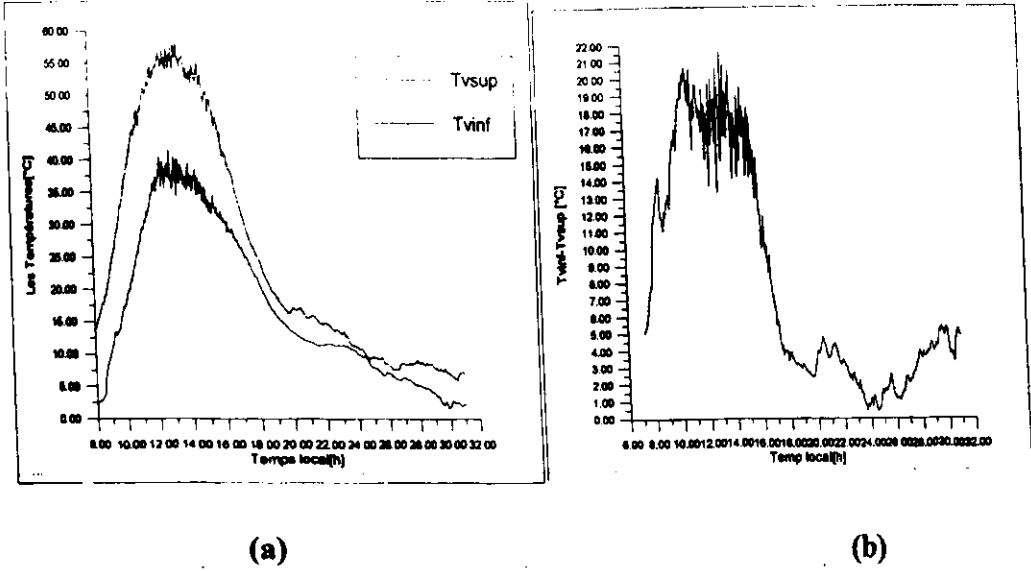


Figure III-3: (a) Variation des températures de vitrage des deux sous distillateurs, (b) variation temporelle du gradient de température de vitre ($T_{V_{inf}} - T_{V_{sup}}$)

La courbe (a) représente la variation temporelle de température des vitres dans les deux sous distillateurs inférieur et supérieur. On remarque une élévation des températures des deux vitres en fonction de l'augmentation de l'éclairement solaire incident, la réduction des déperditions thermiques. Cette élévation devient maximale vers 13 à 14 heures temps local, avec un maximum de 55°C pour la vitre de sous distillateurs inférieur. En même temps, la température de la vitre du sous système supérieur atteint un maximum de 44°C. Elle est inférieure à celle de sous système inférieur à cause de pertes de chaleur par convection vers l'ambiance sous l'action du vent. L'après midi TSV, on remarque une diminution des températures des vitres de chaque sous systèmes due à la diminution de l'éclairement et l'augmentation des pertes thermiques vers l'ambiance jusqu'à l'équilibre total du système avec son environnement.

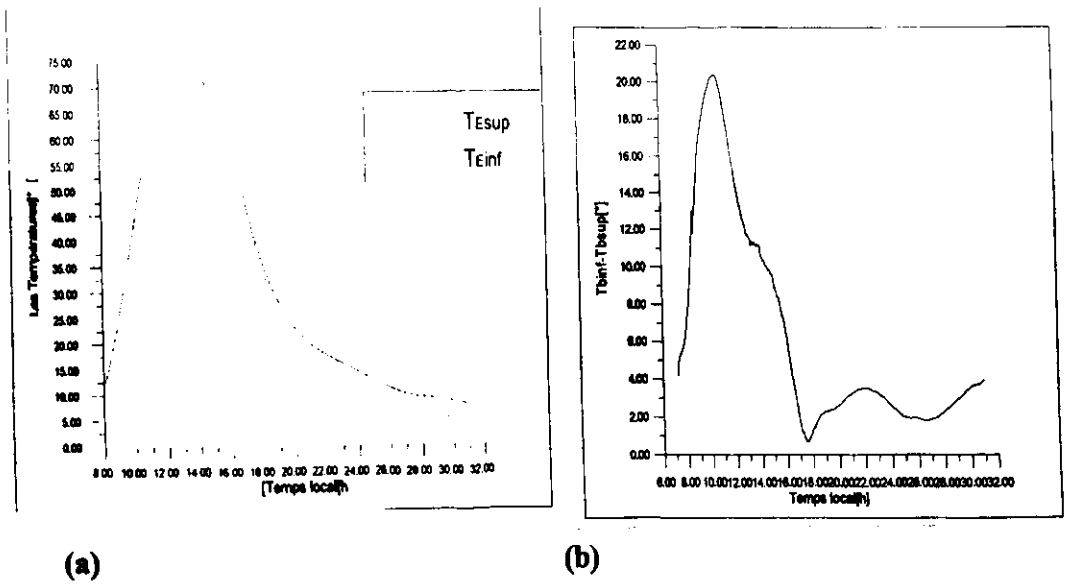


Figure III-4: (a) Variation du température de saumure dans les deux sous distillateurs inférieur et supérieur. (b): Variation temporelle de l'écart température de saumure ($T_{Einf} - T_{Esup}$)

La courbe (a): représente la variation des températures des eaux saumâtres des sous systèmes inférieur est supérieur. Le gradient de température entre ces deux sous systèmes augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire pour dépasser les 20°C en raison de l'isolation thermique avant et arrière du distillateur de base. Ainsi, la production se trouve amélioré. Toutefois les fluctuations sont similaires à celles des vitrages et l'interprétation est donc semblable.

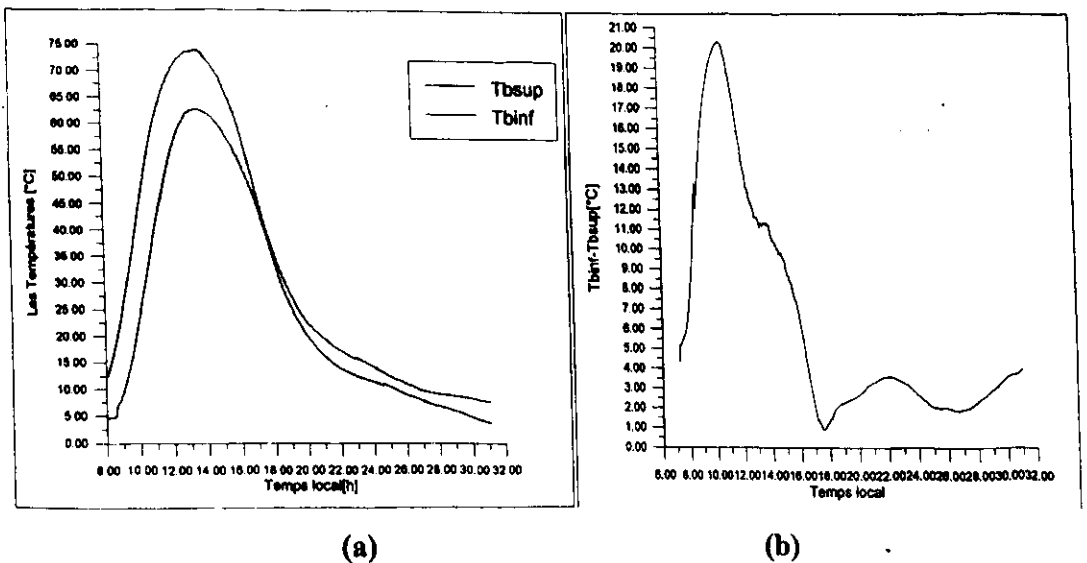
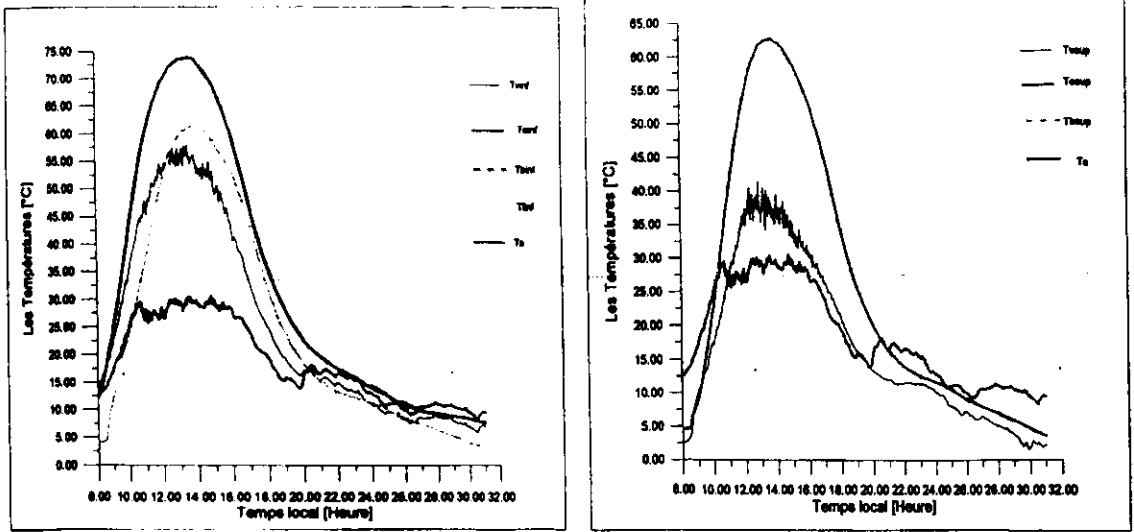


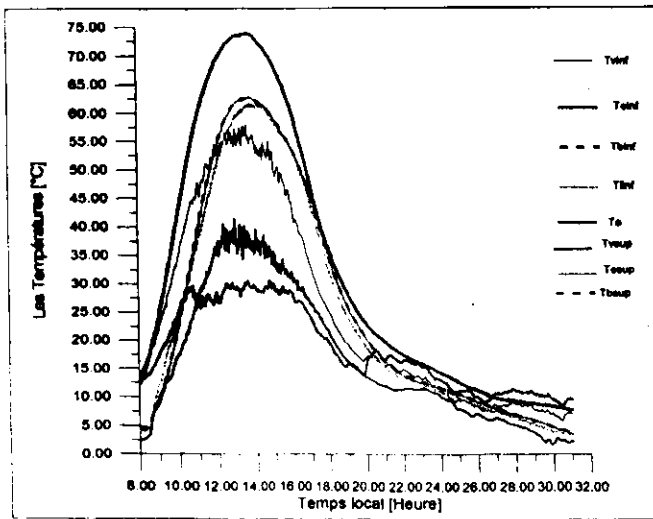
Figure III-5: (a): Variation des températures des bacs des deux sous distillateurs inférieur et supérieur. b: Variation temporelle de l'écart température des bacs ($T_{binf} - T_{bsup}$)

L'allure des fluctuations des températures des bacs sont similaires aux températures de l'eau saumâtre et du vitrage. Les gradients de température entre les deux bacs dépassent les 20°C et leurs pics atteints les 75°C à cause du rayonnement solaire et les déperditions thermiques.



(a) Sous distillateur inférieur

(b) Sous distillateur supérieur

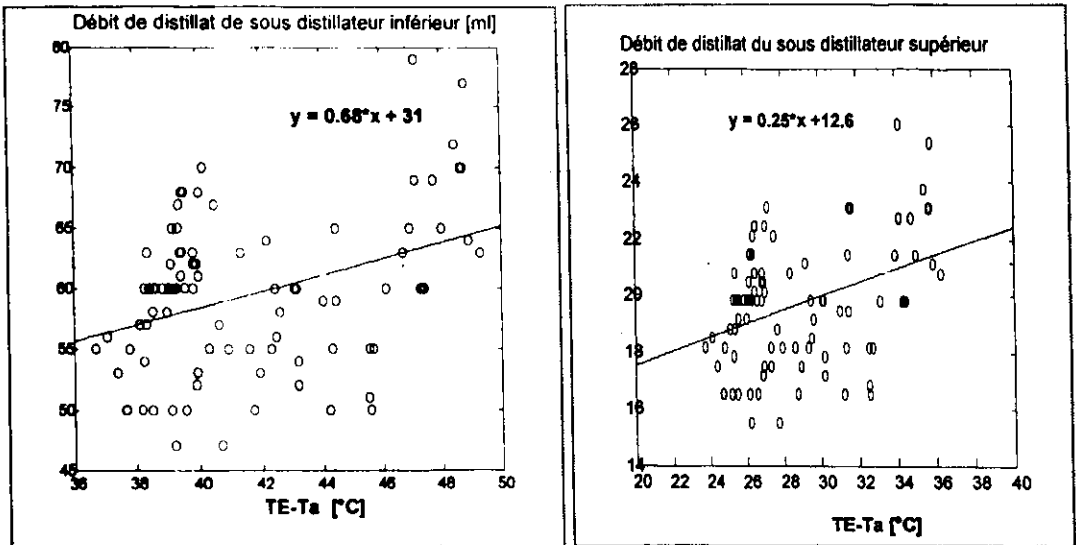


(c) Les deux sous distillateurs

Figure III-6: Température de fonctionnement des sous distillateurs

La figure III-6 montre la variation de température de chaque composante de sous distillateur avec son environnement en fonction du temps. Les niveaux de température sont conditionnés par le rayonnement solaire, les propriétés thermophysiques et les pertes thermiques et optiques. Les températures des bacs sont les plus élevées et celles des vitrages sont les plus faibles. Les courbes présentent des augmentations progressives de

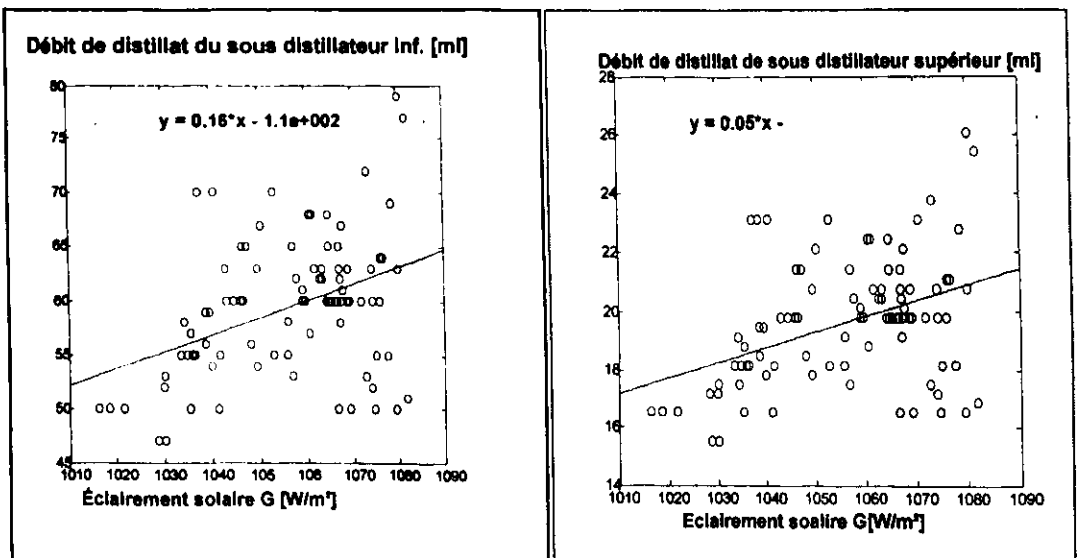
températures en fonction du rayonnement solaire du lever de soleil à 12 tsv, ensuite une relative constance durant 2 à 3 heure indiquant une variation nulle de l'énergie interne du système, c'est une phase d'équilibre entre les pertes thermiques et les gains utiles suivi d'une décroissance progressive indiquant la phase de décharge thermique augmentation progressive des pertes thermique le soir pour arriver à un équilibre thermodynamique du système avec le milieu extérieur en fin de journée.



(a) Sous distillateur inférieur

(b) Sous distillateur supérieur

Figure III-7: Variation des débits de distillat dans les sous distillateurs en fonction du gradient ($T_E - T_a$)

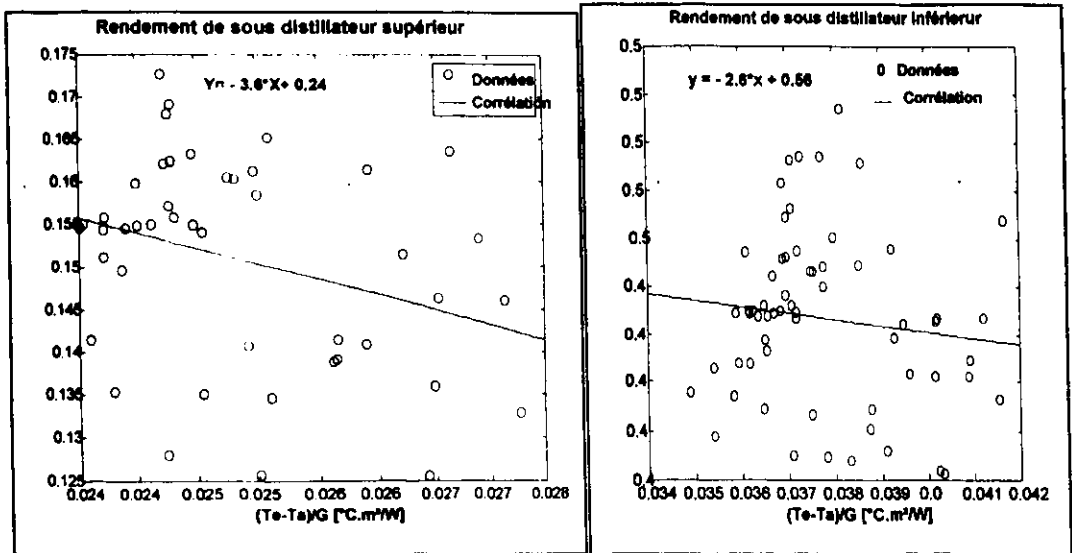


(b) Sous distillateur inférieur

(b) Sous distillateur supérieur

Figure III-8: Variation des débits de distillat en fonction de l'éclairement incident

Les débits des distillats dans les deux sous distillateurs augmentent avec l'augmentation des gradients des températures entre les sources chaudes (saumures) et les sources froides (ambiances) (figure III-7). Également les débits augmentent avec l'augmentation de la radiation solaire incidente (figure III-8). Selon les droites de corrélation, l'augmentation dans le sous distillateur inférieur est plus importante que celle dans le sous système supérieur pour les raison précitées.



(a) Sous distillateur inférieur

(b) Sous distillateur supérieur

Figure III-9: Caractéristiques thermo-physiques des sous distillateurs

Les courbes de la figure III-9, représentent les caractéristiques principales des sous systèmes; exprimant le rendement de chaque sous distillateur en fonction de la température réduite. Le nombre de point de mesure choisis répond relativement aux conditions de caractérisation des capteurs plans la plus proche du standard ASHRAE (1000 W/m², 25°C 0 à 3 m/s, incidence inférieure à 15 degrés). L'approximation du nuage de points par la méthode des moindres carrés donne une droite. L'intersection de la droite avec l'axe des abscisses donne les facteurs des pertes thermiques globales qui ($U_{L,1} \approx 3.6 \text{ W/m}^2\text{C}$ et $U_{L,2} \approx 2,6 \text{ w/m}^2\text{C}$) et l'intersection avec l'axe des coordonnées donne les rendements optiques qui sont ($\alpha_{1,1} \approx 24\%$ et $\alpha_{1,2} \approx 56\%$). Le facteur des pertes thermiques du distillateur supérieur est relativement réduit car le sous système compense les pertes thermiques par la chaleur de condensation et de rayonnement du sous système inférieur.

La comparaison des résultats obtenus avec les valeurs estimées par le calcul direct à partir des propriétés thermo-physiques des sous systèmes donne ($U_{i,1} = 3,5 \text{ W/m}^2\text{C}$ et $\alpha_{i,1} \approx 30\%$) et ($U_{i,2} = 2 \text{ W/m}^2\text{C}$ et $\alpha_{i,2} \approx 57\%$) avec des erreurs respectives de (2.78% et 25 %) pour le système inférieur et de (23.01% et 1.78 %) pour le système supérieur. Cependant le distillateur à multiple effets est caractérisé par un rendement optique de 87% et un facteur de pertes de $5,5 \text{ W/m}^2\text{C}$. En tenant compte des hypothèses simplificatrices, des erreurs accidentelles et systématiques ces résultats sont relativement acceptables.

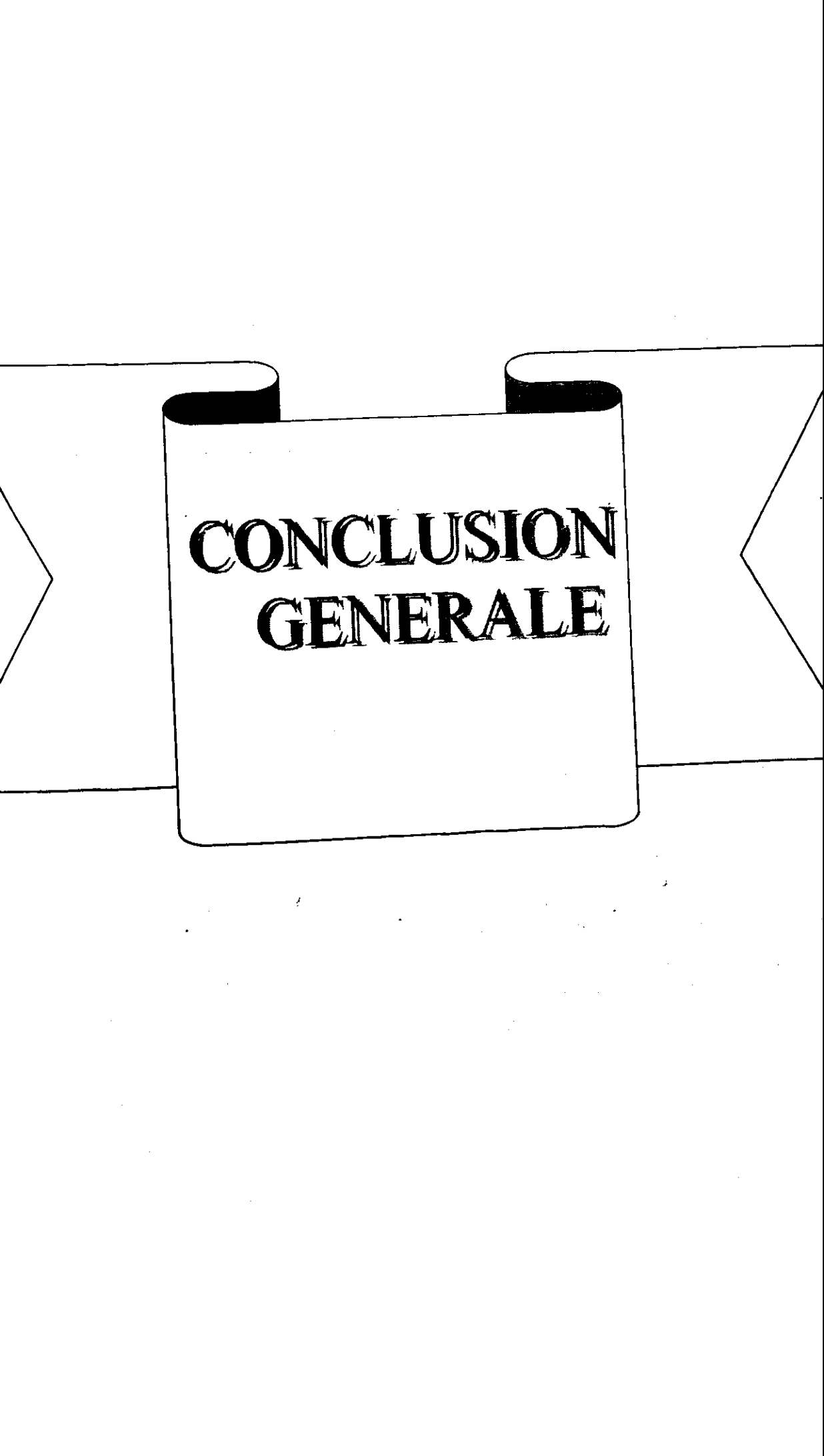
III.4- Conclusion

Ce chapitre a exposé une modélisation simplifiée de distillateur à effet de serre double effet aussi il a permis de déterminer les caractéristiques principales de système. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau suivant:

Tableau III.2. Les performances de système

Système	Absorbité effective [%]	Absorbité Mesuré [%]	Erreur [%]	Coefficient de perte effectif [$\text{W/m}^2\text{C}$]	Coefficient de perte mesuré [$\text{W/m}^2\text{C}$]	Erreur [%]
Sous distillateur supérieur	30	24	20	3.5	3.6	2.78
Sous distillateur inférieur	57	56	1.75	2	2.6	23.01
Distillateur multiples effet	87	80	21.75	5.5	6.2	25.79

Le rendement et le facteur des pertes thermiques du sous distillateur supérieur est relativement réduit car le sous système compense les pertes thermiques par la chaleur de condensation et de rayonnement du sous système inférieur.



**CONCLUSION
GENERALE**

Conclusion générale

Cette modeste approche de modélisation et de caractérisation d'un distillateur thermosolaire à multiple effets a permis de mieux comprendre les sources d'énergie solaire les bilans énergétiques mis en jeu dans le système avec l'ambiance et les propriétés thermodynamiques d'évaluation. Elle a permis d'appliquer une méthode globale simple basé sur des bilans énergétiques et des propriétés thermo-optiques pour caractériser le système en se basant sur un minimum de grandeurs physiques et de moyens de mesure. Cette procédure semi-empirique a permis de donner les deux paramètres clés de design du système : le rendement optique et le facteur des pertes thermique globales dans des conditions les plus proches des standards internationales des tests des capteurs solaires plans. Les résultats obtenus sont relativement acceptables en tenant compte des hypothèses simplificatrices. À surface égale le distillateur thermosolaire à multiples effets permet d'améliorer la production de distillat de 10 à 24% par rapport au distillateur à simple effet. Cette approche de caractérisation constitue une base pour la modélisation fine des distillateurs à effet serre à simple et à multiples effet à grande échelle, elle aussi crucial pour le dimensionnement et l'optimisation des prototypes expérimentaux.

Perspectives

- Amélioration de la qualité de caractérisation en tenant compte des fluctuations des paramètres thermo-optiques en fonction de la température.
- Introduction de la notion de constante de temps pour l'optimisation de l'inertie thermique du système.
- Proposition de nouvelles configurations de distillateurs thermosolaires en séparant l'évaporateur du condenseur.

Bibliographie

- [1] Tabet Ismail, Etude d'un distillateur solaire à cascade , Mémoire de magister Université Mentouri Constantine, 2010.
- [2] Boukerzaza Nassima, Etude de l'effet des pertes thermiques sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire, Mémoire de magistère, Université Mentouri Constantine, 2012.
- [3] Benarima Zine el abdine, Amélioration de la capacité de l'absorbeur d'un distillateur solaire simple par l'ajout d'une couche de sable, Mémoire Master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [4] Ziyadou Ahmed, Etude et conception d'un distillateur solaire a effet de serre, Mémoire pour l'obtention du diplôme d'études approfondies en physique, Université d'Antananarivo, 2011.
- [5] Saida Fedali, Cherif Bougriou, Etudes théorique et expérimentale d'un distillateur solaire sous les conditions climatiques de batna ,article ,2010.
- [6] Nassima Boukerzaza, Abla Chaker, Zakaria Haddad, Boumediène Benyoucef, Efficacités interne et globale d'un distillateur solaire, article, 2007.
- [7] Fedali Saida, Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales, Mémoire de magistère Université de Batna, 2007/2008.
- [8] Halloufi Ouahid, Etude de la performance d'un distillateur solaire par un système de préchauffage solaire de l'eau saumâtre, Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 2010
- [9] Khelifi Cherif and Chieb Fathy, Dynamic modelization of a cascades solar distiller greenhouse effect, proceeding, VI World Renewable Energy Congress VI (WREC2000), pp 2255-2260, article.
- [10] C. Khelifi and B. Touati, Semi-empirical Characterization of a Greenhouse-effect Cascades Solar Distiller, Journal, Renewable Energy, 19(2000), pp. 103-110, article.

- [11] Khelifi Chérif, . Thermo-optic behaviors modélization of a multiple effects solar still, First International Seminar on Water, Energy and Environment ISWEE'11 Algiers 1 to 3 march 2011, article.
- [12] Djamel Bechki, Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes, Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, 2011.
- [13] Izzeddine Saouane, Etude des transferts de chaleur et de masse à l'intérieur d'un système de dessalement par voie solaire, Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [14] www.instrumentation-et-regulation.com
- [15] www.kippzonen.fr
- [16] galileo.cyberscol.qc.ca
- [17] www.imcce.fr
- [18] Zerouali Mekki, Contribution à l'optimisation des performances d'un distillateur solaire, Mémoire de magistère, Université de Batna, 2012.
- [19] Salima Karroute, Etude théorique et numérique des systèmes couples, distillateur plan- capteur et distillateur hot box-cpteur, Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 2009/2010.
- [20] Boudjebir Hind, Etude de l'impact de l'écart de température (ambiance- eau) sur le rendement d'un distillateur solaire a effet de serre, Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [21]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.
- [22] Farid Tata-ducru , Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes, article, 2009.
- [23] Sotehi Oualid, Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire, Thèse de magister, Université Mentouri Constantine, 2009.