

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'étude en vue de l'obtention du diplôme de
Master en physique énergétique

Thème

Caractérisation Thermo-Optique d'un Distillateur
Thermosolaire à Effet-Serre à simple effet sur site
d'Adrar

Soutenu le : 06/10/2013

Présenté par :

Melle. Zohra .DJAMAI

Membres de jury :

Président :

Pr. Ali. BENATIALLAH Univ.d'ADRAR

Encadré par :

Mr. Cherif.KHELIFI (C.H.R) URER ADRAR

Examineurs

Mr. Boumediene .OMARI Univ.d'ADRAR

Remerciements

Je remercie le bon Dieu qui m'a donné la patience et la force qui m'ont aidé à préparer ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Khelifi Cherif, qui, en tant qu'encadreur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Pour avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer au jury mémoire. Je tiens à remercier :

Pr : Benatiallah Ali

Mr :Omari Boumediene

Je remercie également Pr.Hammoud Massoud le directeur de l'Unité de Recherche des Energies Renouvelables «l'URER», pour leurs aides et encouragements

Tous mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du département de Sciences de la matière de l'Université d'Adrar pour leurs aides et leurs encouragements continus.

J'adresse mes vives reconnaissances à tous les membres de l'Unité de Recherche des Energies Renouvelables «l'URER» sans oublier les étudiants

Je garde une place toute particulière à mes parents, mes frères et mes sœurs qui sont toujours à mes côtés.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire .Merci à tous et à toutes.



Dédicaces

Je dédie ce travail à:

Ma mère;

Mon père;

Mes frères;

Mes sœurs;

Tous mes amis et collègues;

Tous ceux qui me sont chers;

ZOHRA

Caractérisation Thermo-Optique d'un Distillateur Thermosolaire à Effet-Serre à simple effet sur site d'Adrar

ملخص

إن إنتاج الماء المقطر مبرر تماما في الجنوب الجزائري بسبب توفر المياه المالحة الجوفية، مكن الإشعاع الشمسي الهائل، مساحة السطح المستوية الشاسعة، مواد البناء والتقنية اللازمة. من أجل كل هذه العوامل فإن تطوير و استغلال التقطير الحراري الشمسي الذي يعمل وفق مبدأ الدفينة أمر ممكن واقتصادي على أوسع نطاق من أجل الاستعمالات المختلفة: الصناعية، الصحية والعلمية. من أجل هذه الأغراض تم إنشاء وتجريب عدة نماذج في محطة تجريب الأجهزة الشمسية في الوسط الصحراوي بادرار من أجل الحصول على مقطرات ذات جودة عالية بغية الحصول على كميات أعلى من المياه المقطرة. الدراسة المنجزة في هذه المذكرة تخص الوصف الديناميكي الحراري والتجسيد الحراري والضوئي لمقطر شمسي بسيط الأثر، يعمل وفق مبدأ الدفينة من نوع العلب الساخنة بإمكانه إنتاج من خمس إلى تسع لترات يوميا في المتر المربع الواحد من أجل تعيين خصائصه الحرارية بهدف تحسين خصائصه ونجاعته.

هذه الدراسة مكنت من فهم أدق للخصائص الحرارية والضوئية للجهاز وبينت أن معامل ضياع الحرارة الكلي للمقطر هو $4.5 [W/m^2 \cdot ^\circ C]$ والمردود الضوئي يساوي 74%. وهذه الخصائص مقبولة نسبيا بالمقارنة مع النماذج النظرية والمقطرات الجيدة التصميم.

الكلمات الدالة : الطاقة الشمسية، المقطر الشمسي أحادي الأثر، مبدأ الدفينة، معامل ضياع الحرارة، المردود الضوئي

RESUME

La production de l'eau distillée trouve toute sa justification au sud algérien à cause de la disponibilité des eaux saumâtres souterraines, le gisement solaire, la superficie, les matériaux de construction et la technicité nécessaire. Cependant pour tous ces paramètres le développement et l'exploitation de la distillation thermosolaire à effet-serre est tout à fait possible et rentable à grande échelle pour les divers usages : industriels, sanitaire et pour labos de recherche scientifique. A ce propos, plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés et testés à l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable d'Adrar pour des fins d'optimisation des performances et d'amélioration de la production de distillat. Toutefois, cette étude à permis de mieux comprendre les caractéristiques thermophysiques du distillateur, le principe de conception et de fonctionnement sous des conditions réelles d'environnement sur site d'Adrar. L'étude menée dans ce mémoire concerne essentiellement la caractérisation thermo-optique d'un distillateur solaire simple effet à effet-serre de type Hot-Box de $1m^2$ de surface qui produit de 4-7 litres d'eau distillée par jour pour des fins d'identification des performances et d'optimisation. Elle montre que le facteur des pertes thermiques globales est d'environ $(4.5 W/m^2 \cdot ^\circ C)$ et le rendement optique est de (74) qui sont acceptables en comparaison avec les modèles théoriques et les distillateurs bien conçus qui sont $(5W/m^2 \cdot ^\circ C)$ et 85%.

Mots clés : Energie solaire, Distillation solaire, Production, Distillateur solaire, Effet-serre, Caractérisation : Facteur de pertes thermiques, Rendement optique.

Sommaire

Sommaire

Nomenclature

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale

Introduction..... 1

Chapitre I:

Généralités sur le Rayonnement Solaire

I.1 Introduction	3
I.2. Origine de l'énergie solaire	3
I.3. Différents composantes du rayonnement.....	4
I.4. Spectre d'absorption du rayonnement solaire	7
I.5. Les corps noirs	8
I.6. Mouvements de la Terre	8
I.7. Géométrie Terre-Soleil	9
I.8. Les coordonnées horaires	9
I.8.1. La variation de la déclinaison du soleil	9
I.8.2. Angle horaire	10
I.9. Les coordonnées horizontales	10
I.9.1. Hauteur du soleil	10
I.9.2. l'azimut du soleil (Az)	10
I.10. Direction du rayonnement direct (Angle d'incidence solaire).....	11
I.11. Les coordonnées géographiques	11
I.11.1. La latitude	11
I.11.2. La longitude	12
I.12. La constante solaire	12
I.13. Les temps solaires.....	13
I.14. Conclusion	14

Chapitre II.A :

Généralité sur les Techniques de Dessalement de l'eau

II.1. Introduction	15
II.2. Etude sur l'eau	15

II.3.Ressources mondiales en eaux	15
II.4.Les eaux distillablés	16
II.5.L'eau potable	16
II.6. Techniques de dessalement d'eau.....	17
II.6.1. La technologie thermique	18
II.6.2. Les technologies à membranes	18
II.7.Distillation	20
II.7.1. Distillation classique	20
II.7.2.La distillation solaire directe.....	21
II.7.2.1 Le distillateur solaire à effet de serre.....	21
II.7.2.1.1.Historique	22
II.7.2.1.2. L'effet de serre.....	22
II.8. Principe de fonctionnement des distillateurs thermosolaires.....	23
II.9.Les facteurs influant sur le fonctionnement des distillateurs	29
II.9.1.les facteurs internes	29
II.9.2. Les facteurs thermo physiques	31
II.9.3. Les facteurs optiques	31
II.9.4. Les facteurs de fonctionnement	31
II.9.5. Les facteurs Externes	31
II.9.6. Les facteurs météorologiques (atmosphérique).....	31
II.9.7. Les facteurs géographiques	32
II.10.Conclusion.....	32

Chapitre II.B :

Etude Théorique du Distillateur Solaire Simple :

II.11.1. Bilans énergétiques dans un distillateur simple	33
II.12.Caractéristique (performance) du distillateur	35
II.12.1. Performance	35
II.12.2.Production (le débit de distillat)	35
II.12.3.Rendement global (efficacité).....	36
II.12.4. Rendement interne (Efficacité interne)	36
II.13. Conclusion.....	37

II.1. Introduction	38
III.2. Schémas du dispositif expérimental à l'URER-MS d'Adrar	38
III.3. Propriétés du système	38
III.4. Modèle de caractérisation du distillateur	38
III.5. Résultats et Discussions.....	40
III.5.1. Présentation des résultats	40
III.5.2. Interprétation des résultats	44
III.6. Conclusion.....	45

Conclusion et Perspectives

Conclusion et Perspectives.....	46
---------------------------------	----

Annexe

Annexe A

Annexe B

Références bibliographique

Nomenclature

Nomenclature

A: Notation latine :

Symbole	Désignation	Unité
h	La hauteur du soleil	(°)
I_c	Constant solaire	/
I_{dir}	Rayonnement directe	W/m ²
g	L'accélération	(m/s ²).
A_z	l'azimuth	(°)
TSV	le temps solaire vrai	Heure
TL	Temps légal	Heure
TU	Temps universel	Heure
ET	équation de temps	min
C_p	Capacité calorifique:	[J/kg°C]
q_b	Flux de conduction à travers le bac.	W/m ²
q_{ri}	Les flux de chaleur échangés par rayonnement	W/m ²
q_{ci}	Les flux de chaleur échangés par convection	W/m ²
q_e	Les flux de chaleur échangés par évaporation	W/m ²
T_{vi}	Températures intérieure de la vitre.	°C
T_{ve}	Températures extérieure de la vitre.	°C
T_b	Température de bac	°C
T_i	Température de l'isolant.	°C
T_w	Température de l'eau	°C
e_v	Épaisseur de la vitre	m
L_v	Chaleur latente de vaporisation	kJ/kg
\dot{m}_d	Débit du distillat	kg/s
I_g	Puissance du rayonnement solaire incidente (Eclairement) par unité de surface.	W/m ²
P	Pression	Pa
L	Longueur du bac absorbant	m
FPB	Facteur de performance brut	/
FPH	Facteur de performance horaire	/
FP	Facteur de performance	Kg/J

Nomenclature

B: Notation Grecque :

Symbole	Désignation	Unité
ρ	La masse volumique de l'eau , L'albédo du sol	(kg/m ³) /
μ	La viscosité dynamique	(kg/ms.)
β	Coefficient d'expansion volumétrique de l'eau. L'inclinaison du plan considéré	(K ⁻¹) (°)
ε_v	Emissivité de la vitre.	/
ε_w	Emissivité de l'eau.	/
σ	Constante de Steaffan-Boltzman	W/m ² K ⁴
ε_{Eff}	Emissivité effectif;	/
η	Rendement, efficacité	%
α_{bac}	Absorptivité du bac	
α_e	Absorptivité de l'eau	
τ_e	Transmittivité de l'eau	
τ_v	Transmittivité du vitrage	
λ_v	Conductivité thermique.	W/m°C
φ	Latitude d'un lieu	(°)
ω_c	L'angle horaire	(°)
θ_i	L'angle d'incidence	(°)
δ	La déclinaison, épaisseur	(°) , m
ν	Viscosité cinématique	m ² /s
Σ	Somme	/

Liste des figures :

Titre	Page
Figure I.1 : Composantes de l'éclairement solaire.	4
Figure I.2 : Pyranomètre pour la mesure de l'éclairement global horizontal	4
Figure I.3: Pyréliomètre pour la mesure de l'éclairement directe.	5
Figure I.4: Diffusomètre pour la mesure de l'éclairement diffus.	6
Figure I.5 Albédomètre pour la mesure des éclairagements globaux (horizontal et réfléchi)	6
Figure I.6: Spectre d'absorption du rayonnement solaire au niveau de la mer	7
Figure I.7: Spectre du rayonnement électromagnétique.	7
Figure I.8 : Mouvement de la terre autour du soleil.	8
Figure.I.9. : Variation de la déclinaison et l'équation du temps dans l'année	9
Figure I.10 : Schéma descriptif pour les angles azimut et hauteur solaire	10
Figure I.11 : Schéma descriptif pour les angles Latitude et Longitude de la terre .	12
Figure.II.1: Techniques de dessalement d'eau.	17
Figure II .2 : Les techniques de dessalement par distillation	18
Figure II.3. Schéma de principe de l'électrodialyse	19
Figure II.4. Les techniques de dessalement par osmose inverse.	19
Figure .II.5 : Compression de la vapeur	20
Figure. II.6. La distillation multi flash (MSF).	22
Figure II.7. Effet de serre	22
Figure II.8. Distillateur solaire plan à chapelle (type Hot-Box)	23
Figure II.9: Distillateur à double vitrage	24
Figure II.10 : Distillateur solaire sphérique	25
Figure II.11: Distillateur solaire à cascades	26
Figure II.12 : Distillateur solaire a film capillaire	27
Figure II.13: Distillateur solaire à mèche	28
Figure II.14: Distillateur solaire vertical.	29
Figure II.15 : Bilan énergétique d'un distillateur solaire statique	33
Figure II.16.: Les différents transferts thermiques dans un distillateur solaire	33
Figure III.1 : Schéma du dispositif expérimental de distillation à l'URER-M	38
Figure III.2 : Modèle de caractérisation du distilateur	39
Figure. III.1 : Caractéristique thermo-optiques du système	41
Figure III.2 : Températures de fonctionnement du distillateur le (15 OCT)	41
Figure III.3 : Grandeurs de fonctionnement du Distillateur (29SEP et 12 DEC)	42
Figure III.4 : Gradient journalier de température saumure ambiance du Distillateur	42
Figure III.5 : Débit instantané et cumulé journalier du distillat	43

Liste des Tableaux :

Titre	Page
Tableau II.1 Réserves d'eau de la planète terre	16
Tableau II.2 : Degré de salinité de l'eau	17
Tableau II.3.: Réflexion, Absorption, Transmission vis –à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur	37
Tableau III.1 : Grandeurs Thermophysiques de Caractérisation du distillateur	43

Introduction générale

Introduction Générale :

Les régions sahariennes en général et le site d'Adrar en particulier disposent d'un gisement solaire important qui dépassent les $6.5 \text{ kWh/m}^2/\text{J}$ au cours de l'année, d'un gisement hydrique important et une superficie de sol d'environ 428000 km^2 . Ces caractéristiques encouragent fortement la maîtrise, la conception et le développement des procédés de distillation thermosolaires à grande échelle pour la production de l'eau distillée pour les divers secteurs socioéconomiques pour les diverses usages : pour les batteries des véhicules de transports, les systèmes d'appoint de secours comme les relais hertziens, la préparation des produits cosmétiques, les laboratoires chimiques et sanitaires...etc. Outre que faire le point sur les procédés de dessalement, notre contribution consiste à une étude d'un procédé de distillation à effet-serre simple-effet de type Hot-Box dans le but de maîtriser son principe de fonctionnement, les paramètres qui conditionnent sa production et ses performances sur site réel d'Adrar pour des fins d'optimisation.

La distillation solaire est un procédé de production d'eau distillée rentable sur tout dans les régions caractérisées par un bon ensoleillement avec la disponibilité des eaux saumâtres. Le dessalement des eaux saumâtres est désormais envisageable pour répondre à la demande en eau distillée pour les diverses usages. Parmi les différents procédés de dessalement, la distillation solaire à effet-serre est une solution intéressante pour les régions sahariennes de l'Algérie.

Le travail entrepris dans ce mémoire consiste à une approche de caractérisation d'un distillateur thermosolaire à effet-serre à simple effet afin de déterminer ses caractéristiques thermo-optiques (Facteur des pertes thermiques globales et rendement optique). Il comporte trois chapitres et des annexes.

— **Le chapitre I** est consacré à l'étude du rayonnement solaire : notions et définitions astronomiques et radiométriques couramment utilisées dans tout domaine relatif aux applications solaires thermiques ou photovoltaïque.

Introduction Générale

- **Le chapitre II** est constitué de deux parties : Une partie exposant l'état de l'art sur les techniques de dessalement des eaux saumâtres et une deuxième partie présentant les bilans énergétique de chaleur et de masse du distillateur solaire statique à effet serre.
- **Le chapitre III** traite la caractérisation mathématique d'un distillateur solaire à simple effet à effet-serre, les principaux résultats obtenus et leurs interprétations.
- L'annexe expose, les quantités de chaleurs échangées dans le distillateur et propriétés thermophysiques du distillateur.
- **Une Introduction et une Conclusion** générale et des recommandations complétant ce mémoire.

*Chapitre I : généralité sur Les Rayonnement
solaire*

I.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à une présentation des connaissances générales sur du rayonnement solaire et les instruments de mesure. Géométrie Terre-Soleil. Le rayonnement solaire est caractérisé par différentes grandeurs, essentiellement la constante solaire ; l'énergie totale rayonnée par le soleil à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre et les différentes composantes du rayonnement au sol.

I.2. Origine de l'énergie solaire :

Le soleil tire son énergie des réactions thermonucléaires se produisant en permanence dans son noyau, dont la température atteint 15 millions de degrés. Compte tenu des températures et des pressions énormes qui y règnent, toute la matière se trouve à l'état gazeux ou sous forme de plasma. La couche externe du soleil, la photosphère, celle qui est visible de la terre, a une température considérablement plus faible qui décroît vers l'extérieur, jusqu'à environ 5800°K les réactions thermonucléaires qui se produisent dans le noyau du soleil transforment chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium selon l'équation suivante. $4\text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^4_2\text{He} + 2\beta + 26.7\text{MeV}$. L'hydrogène qui représente 71% de la masse dans la photosphère n'est plus présent qu'à 34% dans la partie centrale du soleil, du fait de cette transformation permanente en gagée il y'a 4.5 milliards d'années. Les 4 millions de tonnes manquantes volatilisées désintégrées dans de gigantesques explosions nucléaires, le processus mis-en jeu est bien compris de puis la célèbre relation d'ALBERT Einstein ($E=mc^2$) qui montre que tout disparition de masse(m) entraine une production d'énergie égale au produit de cette masse par le carrée de la vitesse de la lumière [6].

I.3. Différents composantes du rayonnement:

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé, au sol, on distingue plusieurs composantes.

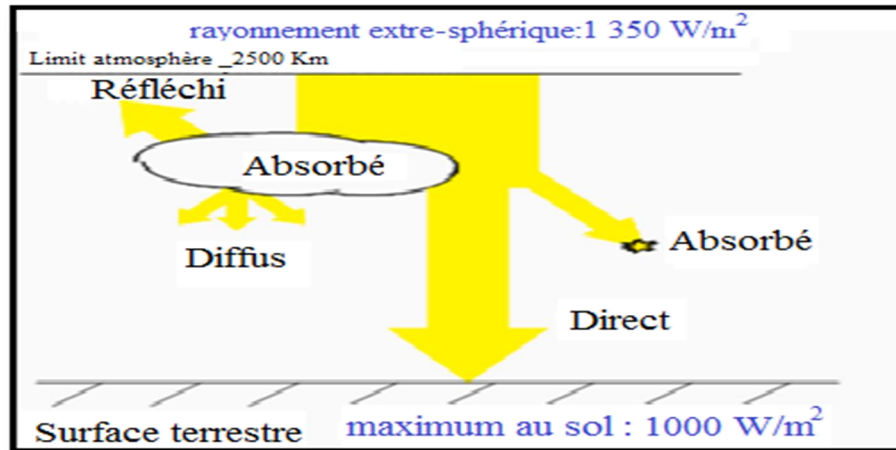


Figure I.1 : Composantes de l'éclairage solaire [2].

❖ Le rayonnement solaire global :

Le rayonnement global sur une surface quelconque au voisinage du sol est la somme de ces deux composantes :

$$I_g = I_D + I_d \quad (I.1)$$

On le mesure par un pyranomètre figure I.2:



Figure I.2 : Pyranomètre pour la mesure de l'éclairage global horizontal [2]

❖ **Le rayonnement direct :**

Est le rayonnement solaire incident sur un plan donné, et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire [2]. L'expression du rayonnement direct pour un plan orienté vers le sud est [3].

$$I_{dir} = I_c \times A \times \exp\left(\frac{-B}{\sin(h)} \times \frac{P}{1000}\right) \times \cos(i) \quad (I.2)$$

Avec :

$$I_c = I_0 [1 + 0.0034 \times \cos(30 \times (m - 1) + n)]$$

I_0 constante solaire, i angle d'incidence, h hauteur du soleil, m numéro du mois dans l'année, n le jour dans l'année, A et B : coefficients traduisant les troubles atmosphérique. P : la pression atmosphérique en fonction de l'altitude. On le mesure par un pyréliomètre :

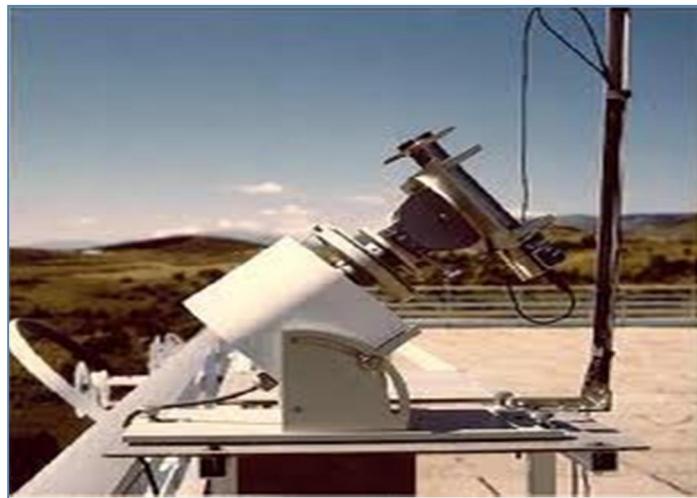


Figure I.3: Pyréliomètre pour la mesure de l'éclairement directe.

❖ **Le rayonnement diffus :** est le rayonnement solaire global horizontal diffusé venant de toute la voute céleste à l'exception du disque solaire (le rayonnement direct).il comprend la partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol, suivant l'inclinaison de la surface réceptrice [2]. On le mesure par un diffusomètre



Figure I.4: Diffusomètre pour la mesure de l'éclairement diffus.

❖ **Le rayonnement solaire réfléchi par le sol :**

C'est la fraction du rayonnement incident réfléchi par le sol sur le capteur. Il permet de définir l'albédo du sol, mesurant la fraction réfléchie sur la fraction incidente. Ainsi un site sableux comme Adrar possède un Albédo de 0.35 par contre un site neigeux possède un albédo de 0.8 [5].

$$l' \text{ Albédo } (Alb) = \frac{\text{Eclairement global réfléchi}}{\text{Eclairement global incident}}$$

On le mesure par un Albédomètre figure I.5:



Figure I.5: Albédomètre pour la mesure des éclairagements globaux (horizontal et réfléchi)

I.4. Spectre d'absorption du rayonnement solaire :

La Figure I.6 illustre les Spectre d'absorption du rayonnement solaire au niveau de la mer

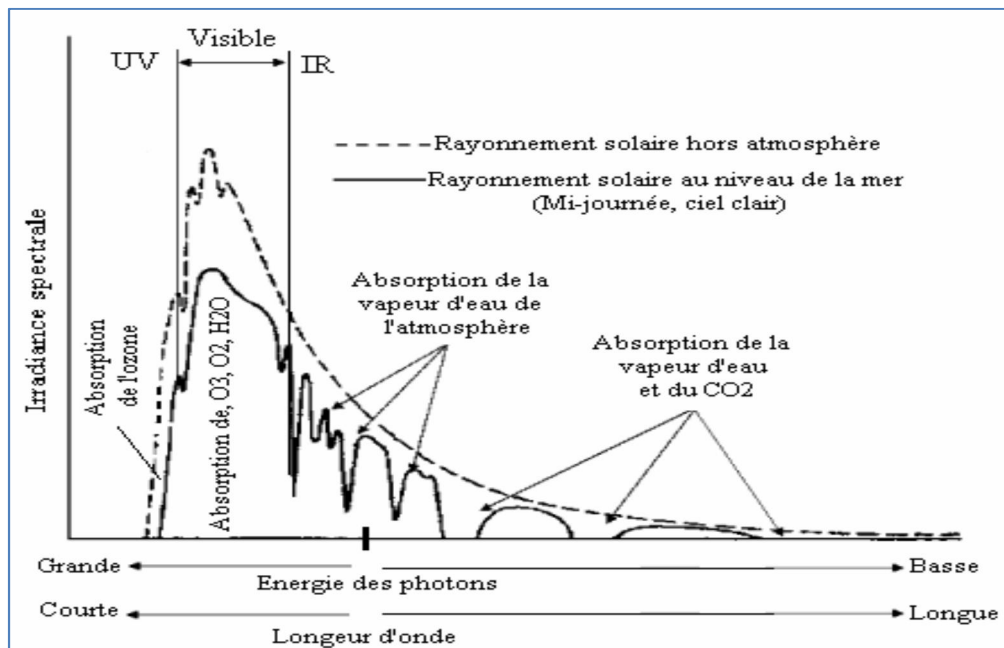


Figure I.6: Spectre d'absorption du rayonnement solaire au niveau de la mer

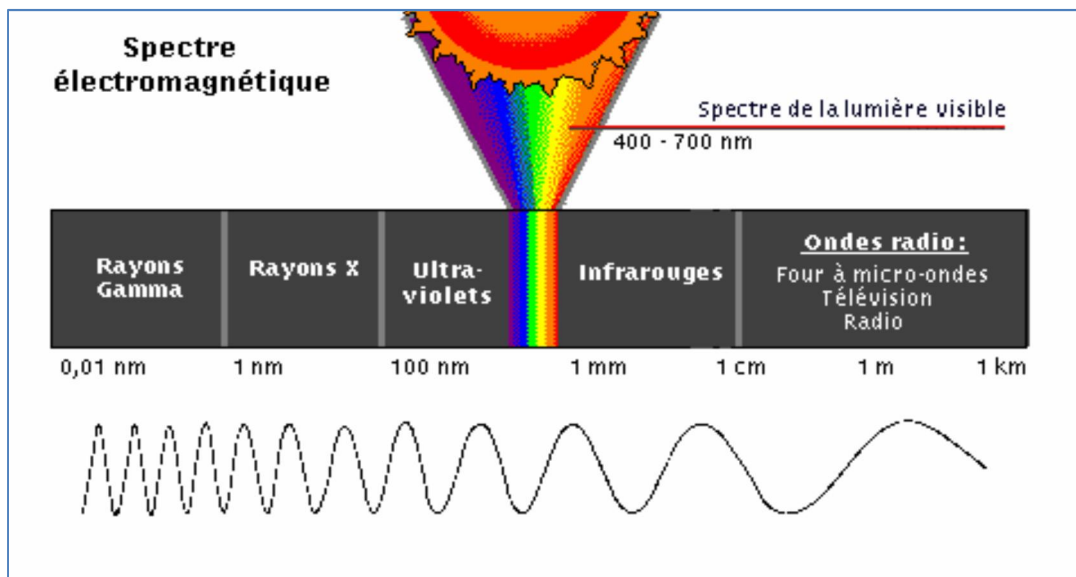


Figure I.7: Spectre du rayonnement électromagnétique.

- ❖ Lumière visible est une fenêtre étroite (0.4 à 0.8 μm).
- ❖ Rayons ultraviolets UV (0.1 à 0.4 μm).
- ❖ Rayonnement infrarouge (0.8 à 100 μm)[6].

I.5. Les corps noirs : c'est un corps qui absorbe tout le rayonnement incident $\alpha_\lambda=1$ sans réfléchir ni transmettre la radiation ($\rho_\lambda=0, \tau_\lambda=0$) quelque soient les longueurs d'onde et les directions de propagation à une température donnée. Un corps noir rayonne le maximum d'énergie pour chaque longueur d'onde [6].

I.6. Mouvements de la Terre : la trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des Foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre-soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de $149675 \cdot 10^6$ km. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique en fait l'équateur, et l'écliptique font entre eux un angle appelé angle d'inclinaison de l'ordre de ($+23^\circ 27'$ et $-23^\circ 27'$) en solstices et zéro degré aux équinoxes.

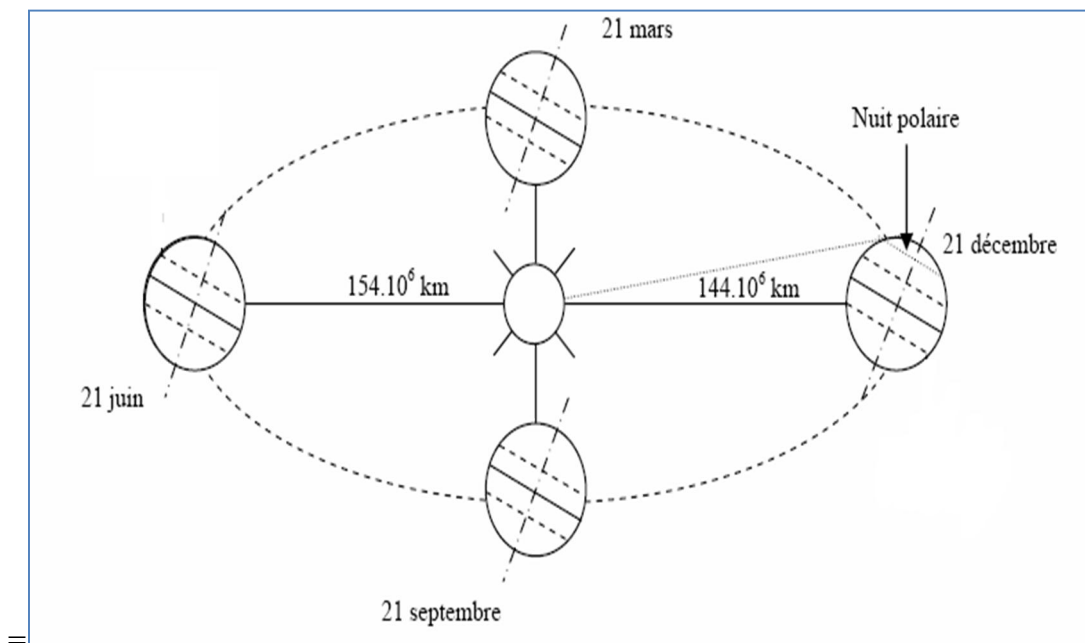


Figure I.8 : Mouvement de la terre autour du soleil.

I.7.Géométrie Terre-Soleil : la direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

I.8.Les coordonnées horaires :

I.8.1.la variation de la déclinaison du soleil :

La déclinaison δ c'est l'angle entre le plan de l'équateur de la terre avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours [2]. Elle s'obtient à partir de la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \sin 360 \times \frac{284 + N}{365} \quad (I.3)$$

N : le numéro du jour dans l'année

Si une meilleure précision est requise, l'équation de Spencer est utilisée :

$$\delta = \frac{180}{\pi} \times (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.00658 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.00269 \cos 3\Gamma - 0.00148 \sin 3\Gamma) \quad (I.3.a)$$

Avec :

$$\Gamma = \frac{360(n-1)}{365}$$

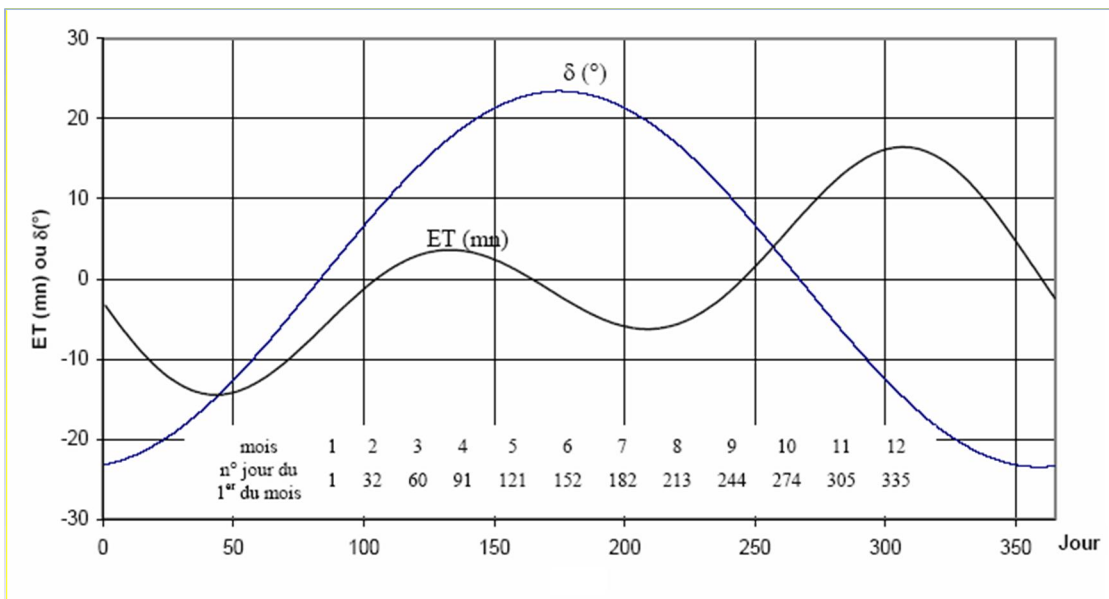


Figure.I.9. : Variation de la déclinaison et l'équation du temps dans l'année

I.8.2. Angle horaire : l'angle horaire ω étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV. L'angle horaire est donné par l'équation suivante [1] :

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

Si $\omega = 0$ à TSV=12 h , $\omega < 0$, la matinée et $\omega > 0$, l'après-midi

I.9. Les coordonnées horizontales :

I.9.1. Hauteur du soleil : La hauteur du soleil (h) est l'angle que fait le plan horizontal avec la direction du soleil, la valeur $h=0$ correspond au lever et au coucher du soleil. La hauteur du soleil varie entre $+90^\circ$ (Zénith) et -90 (Nadir). La hauteur du soleil est représentée par la formule bien connue:

$$\sin(h) = \cos(\phi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega_c) + \sin(\phi) \times \sin(\delta) \quad (I.6)$$

Avec : h : la hauteur du soleil et δ : la déclinaison solaire, ϕ : latitude du lieu OÙ ω_c : est l'angle horaire du soleil au coucher [6]. donc

$$\cos(\omega_c) = -\tan \phi. \tan \delta \quad (I.7)$$

I.9.2. l'azimut du soleil (Az) : l'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction sud. il se compte de 0° à -180° et 0 à $+180$. La relation qui donne l'azimut est donnée ci-dessous [4].

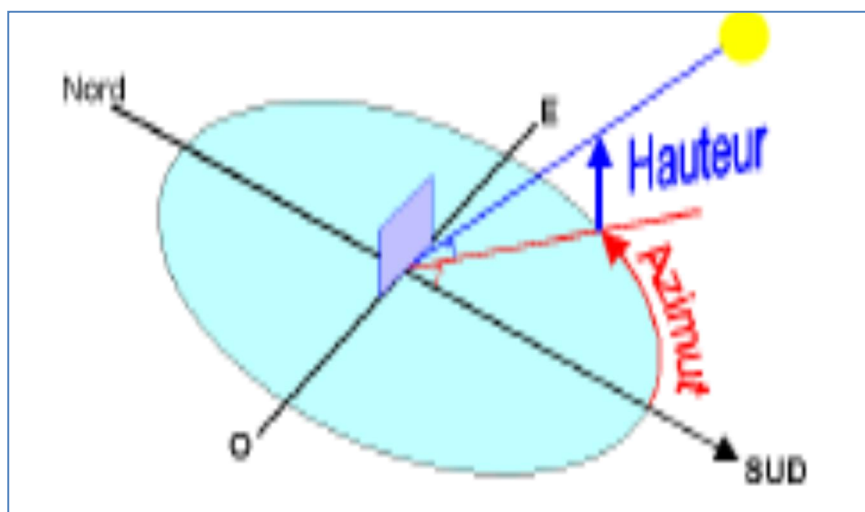


Figure I.10 : Schéma descriptif pour les angles azimut et hauteur solaire [4]

$$A_z = \sin^{-1} \times \left(\frac{\cos \delta \times \sin \omega}{\cosh} \right) \quad \text{Si } \cosh \geq \frac{\tan \delta}{\tan L} \quad (\text{I.8})$$

$$A_z = 180 - \sin^{-1} \times \left(\frac{\cos \delta \times \sin \omega}{\cosh} \right) \quad \text{Si } \cosh < \frac{\tan \delta}{\tan L} \quad (\text{I.9})$$

A midi solaire, $\omega = 0$ donc $\cosh < \frac{\tan \delta}{\tan L}$ et $A_z = 0$ [1].

I.10.Direction du rayonnement direct (Angle d'incidence solaire): Les relations géométriques entre un plan d'orientation particulière par rapport à la terre à un instant quelconque (le plan peut être fixe ou en mouvement par rapport à la terre) et le rayonnement solaire direct incident (la position du soleil par rapport au plan) peut être décrite en terme d'angles:

$$\cos \theta_i = \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos S - \sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin s \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos S \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin s \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \quad (\text{I.10})$$

S : La pente ou l'angle entre l'horizontale et le plan. ϕ : Latitude, γ : l'angle azimutal du plan θ_i : L'angle d'incidence de rayonnement direct.

I.11. Les coordonnées géographiques :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre constitué par deux angles :

I.11.1. La latitude :

La latitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression de la position d'un point sur la terre (ou sur une autre planète), au nord ou au sud de l'équateur qui est le plan de référence. C'est une mesure angulaire, elle varie entre la valeur 0° à l'équateur et $+90/-90^\circ$ aux pôles [2].

I.11.2. La longitude : la longitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression du positionnement est-ouest d'un point sur terre (ou sur une autre planète). la longitude de référence sur terre est le méridien de Greenwich. La longitude, généralement notée L est donc une mesure angulaire sur 360° par rapport à un méridien de référence, avec une étendue de -180° (180°) Ouest à $+180^\circ$ (-180°) Est [2].

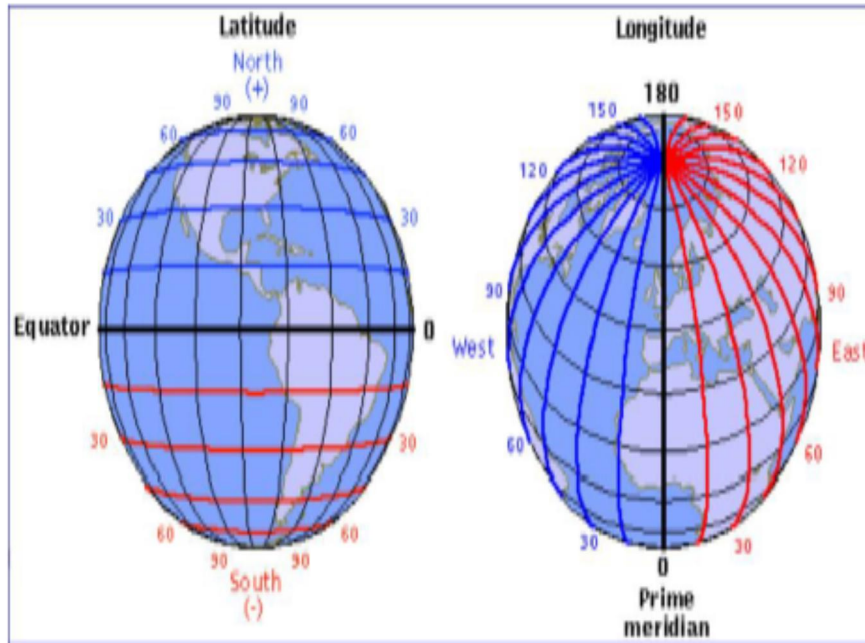


Figure I.11 : Schéma descriptif pour les angles Latitude et Longitude de la terre [2].

I.12. La constante solaire :

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère, sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Soleil égale à valeur moyenne, est appelée La constant solaire. la constante solaire a été estimée à 1367 W.m^{-2} [7]. Cette valeur est la moyenne sur l'année du flux extraterrestre. En effet la trajectoire de la terre autour du soleil étant elliptique, il s'en suit une variation saisonnière de $\pm 1.6 \%$ de la distance Terre soleil et donc une variation de ce flux. La relation suivant donne la valeur corrigée de la constante solaire [2] :

$$I_c = I_0 \times [1 + 0.0034 \times \cos(30 \times (m - 1) + n)] \quad (\text{I.11})$$

Où: $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$, m : numéro du mois dans l'année, n : numéro du jour dans le mois.

I.13. Les temps solaires [2] :

L'heure solaire est l'heure de la journée déterminée par le mouvement apparent du soleil, égale à 12h au midi vrai. Pour obtenir le temps légal, il faut lui additionner l'équation du temps, la correction de longitude et éventuellement l'heure d'été. Le midi vrai ou midi solaire est l'heure locale à laquelle le soleil passe au méridien du point d'observation :

$$TSV = TL - DEL + ET + L/15[\text{heure}] \quad (\text{I.12})$$

- **TSV** : temps solaire vrai est défini à partir de la rotation de la terre sur elle-même. Il est donc directement lié à l'angle horaire. L'intervalle de temps entre deux passages du soleil au méridien est de 24 h. Il est donc midi (12h) lorsque le soleil est à son zénith.
- **Temps légal TL** : temps légal est défini comme le temps moyen du fuseau horaire de rattachement, augmenté éventuellement de l'heure d'été. C'est l'heure de la montre sa relation est donnée en fonction du temps universel :

$$TL = TU - DEL \quad (\text{I.13})$$

TU : le temps universel du méridien de Greenwich (méridien d'origine)

DEL : est la correction due au changement de l'heure légale (en Algérie DEL=1).

- **Equation de temps (ET)** : équation de temps, ce terme corrige le temps solaire de plus ou moins 15minutes et pourra donc être négligé en première approximation ; sa relation est donnée par la formule suivante :

$$ET = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') [\text{min}] \quad (\text{I.14})$$

N' = $(n - 81) \times 360/365$: le numéro du jour dans l'année.

On a aussi autre forme de cette équation mais en fonction de TSV et TSM

$$ET = TSV - TSM \quad (\text{I.15})$$

TSM : le temps solaire moyen

I.14. Conclusion :

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est parmi les plus importante au monde elle dépasse 3650 heures par ans. La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente un potentiel solaire important qui dépasse les 3300 heures par an qui mérite une attention particulière de maîtrise, d'évaluation et d'exploitation pour les différentes applications solaires ou autres dans les divers domaines socioéconomiques.

***Chapitre II.A : Généralités sur Les
Techniques De Dessalement d'eau***

II.1. Introduction :

Ce chapitre comprend deux parties: la première partie est une généralité sur les techniques de dessalement de l'eau et la deuxième partie concerne l'étude théorique d'un distillateur solaire à effet-serre. Les principaux paramètres de fonctionnement et de modélisation thermodynamique du système à travers des bilans énergétiques au niveau de chaque partie du distillateur solaire sont présentés et détaillés.

II.2. Etude sur l'eau [11]: Le manque des ressources naturelles d'eau, cause un problème pour la vie des habitants dans plusieurs pays, donc pour trouver une solution il faut produire de l'eau potable à partir d'autre ressources naturelles salines. Les besoins en eau sont principalement répartis entre 4 types de consommation :

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

II.3.Ressources mondiales en eaux :

Les ressources mondiales en eaux sont les mers, les océans, les glaciers, les fleuves, les eaux souterraines, et enfin les lacs. Cependant l'eau douce ne représente que 2.5% de l'eau totale et sur les 2.5% d'eau douce, les lacs, les fleuves et les eaux souterraines représentent 14% soit l'équivalent de 0.35%de l'eau totale, et pour les 86% de l'eau douce qui reste sont gelés aux pôles

Réservoirs	Volume [10 ¹⁵ m ³]	Total [%]	Temps de résidence
Océans	1350	97	2500ans
Glaciers (calotte glaciers)	33	2.4	1000à10 000ans
Eaux souterraines	8	0.6	1500 ans
Lacs	0.1	<0.01	17 ans
Eau dans le sol	0.07	<0.01	1ans
Eau dans l'atmosphère	0.013	<0.001	8 jours
Rivières	0.017	0.0001	16 jours
Eau dans la matière vivante	0.0011	0.0001	Quelques heures
Total	1391	100%	

Tableau II.1 Réserves d'eau de la planète terre [11]

II.4. Les eaux distillables : les différentes eaux qui peuvent être distillées sont :

- **L'eau de mer :** La salinité des mers varie d'une mer à l'autre est elle est en moyenne de 35g/l.
- **Les eaux saumâtres :** ce sont les eaux non potables dont la salinité est inférieure à celle des eaux dures qui peuvent être classé en trois catégories :
 - ❖ Eau légèrement saumâtres : 1000 à 3000 ppm (partie pour million).
 - ❖ Eau moyennement saumâtres : 8000 à 10000 ppm
 - ❖ Eau très saumâtres : 10000 à 33000 ppm
- **Les eaux naturelles :** ce sont les eaux qui proviennent des lacs, fleuves, rivières et nappes souterraines. Elles ont une composition chimique différente et parfois elles sont polluées et impropres à la consommation. Elle représente prèsde 14% de l'eau douce [3]
- **Les eaux usées :** ce sont les eaux rejetées par les collectivités domestiques, industrielles ou agricoles.

II.5. L'eau potable : En conséquence de les normes sanitaires de l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S) tout eau distribuée à une collectivité doit être potable. Un eau est considérée comme potable sa salinité totale est comprise entre 100 et 1000 ppm (partie pour million), soit 0.1 et 1g/l. La salinité des mers varie d'une mer à autre et elle

est en moyenne de 35g/l, avec de fortes variations régionales dans certains cas :39g/l en Méditerranée, 42 g/l dans le Golfe persique et jusqu'à 270g/l en mer morte.

Mers	Salinité en (mg/l)
Mer Baltique	7 000
Mer Caspienne	13 500
Mer Noire	13000
Océan Pacifique	33000
Océan Indien	33800
Océan Atlantique	36000
Mer Méditerranée	39 400
Golf Arabique	43 000
Mer Rouge	43 000
Mer Morte	270 000

Tableau II.2 : Degré de salinité de l'eau [11]

II.6. Techniques de dessalement d'eau : On distingue deux techniques de dessalement : La technologie de membrane et la technologie thermique

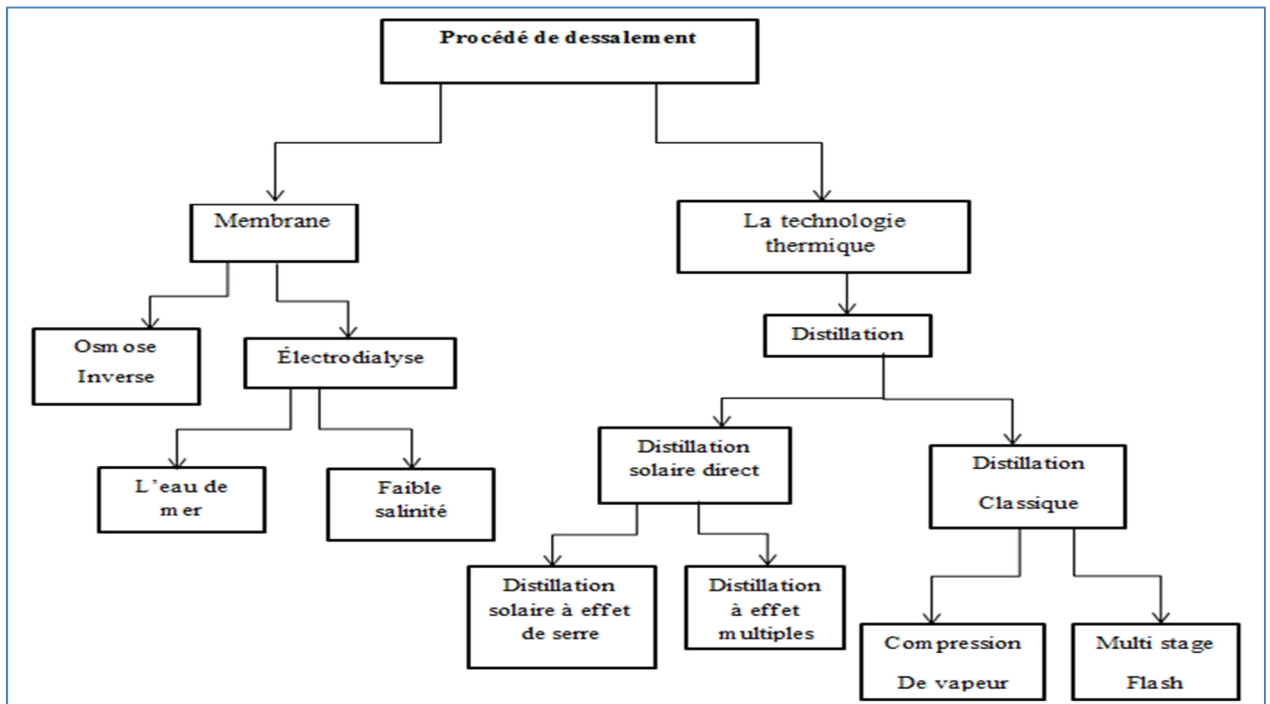


Figure.II.1: Techniques de dessalement d'eau.

II.6.1. La technologie thermique :

Les technologies thermiques se basent sur le chauffage de l'eau action recueil de vapeur condensée pour produire de l'eau saine. Elles peuvent être utilisées pour dessaler l'eau saumâtre. Les technologies thermiques possèdent les processus suivant :

Distillation par compression de la vapeur notée par (VC), distillation à effets multiples notée par (MED). Et distillation à multi étage flash aussi noté par (MSF).

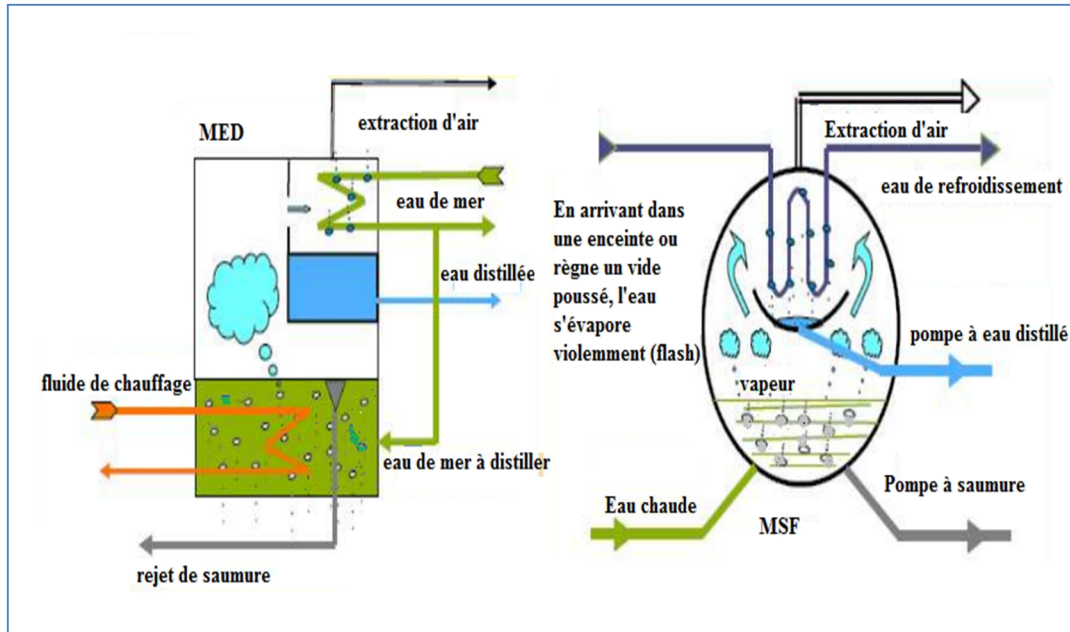


Figure II .2 : Les techniques de dessalement par distillation

II.6.2. Les technologies à membranes :

Cette technique utilise une membrane semi-perméable les alimentant en deux flux divergents de concentration, un produit courant et de concentrer. Dans les applications de dessalement. Pour l'alimentation de l'eau saumâtre ou l'eau de mer les technologies de membrane comportent deux évolutions : osmose inverse (RO) et électrodialyse (ED).

❖ L'électrodialyse :

Ce procédé nécessite, pour son fonctionnement, l'application d'un champ électrique entre une cathode et une anode pour permettre la migration des ions (positifs et négatifs) à travers les membranes. C'est un grand consommateur d'énergie, ce qui rend son application solaire possible, seulement pour les eaux saumâtres de très faible salinité.

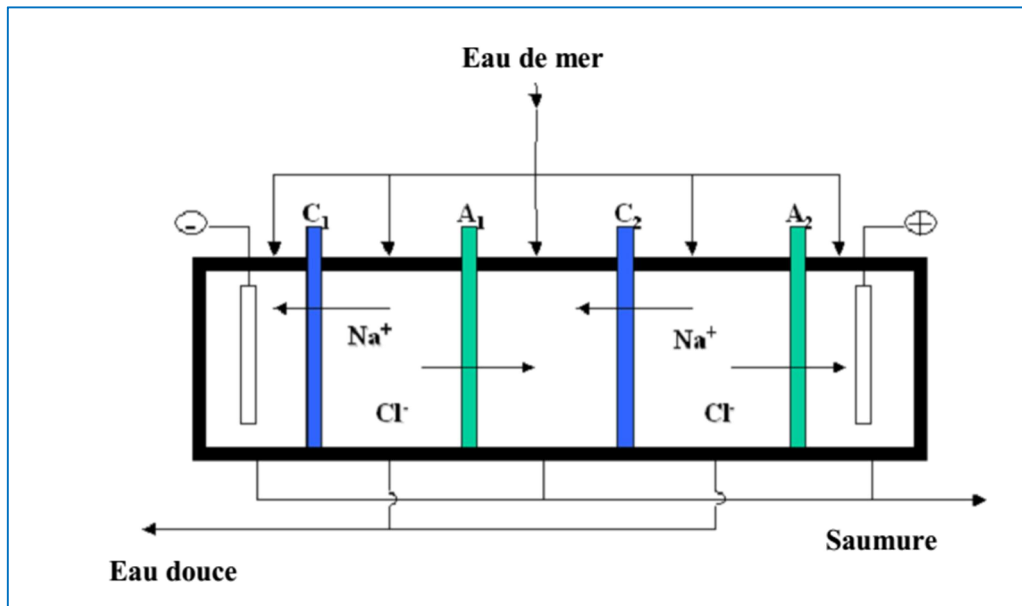


Figure II.3. Schéma de principe de l'électrodialyse

❖ **L'osmose inverse :**

Ce procédé consiste à faire passer, sous l'effet d'une pression, de l'eau pure à travers une membrane semi-perméable qui a la caractéristique de retenir les sels dissous dans l'eau. Donc on a besoin de l'énergie nécessaire à alimenter une pompe haute pression, ce qui peut être fournie de façon économique (pour les petites installations) par un générateur photovoltaïque ou un aérogénérateur. Un certain nombre d'installations sont en fonctionnement à travers le monde, et les résultats obtenus à travers les différentes études et expérimentations rendant son application très encourageante. Parmi ces applications

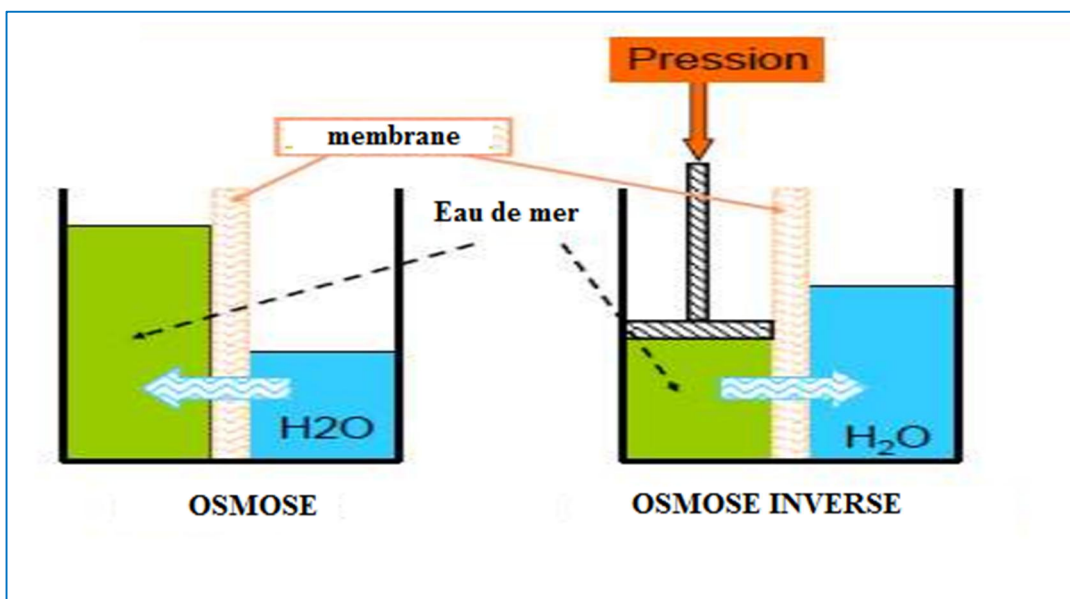


Figure II.4. Les techniques de dessalement par osmose inverse [10]

II.7. Distillation :

II.7.1. Distillation classique :

- **La distillation par compression de vapeur :** c'est un procédé qui comporte une série d'évaporateurs, ses performances sont cependant améliorées en recyclant la vapeur issue du dernier effet (au niveau thermique le plus bas) en la comprimant pour ensuite l'utiliser comme vapeur de chauffe au premier effet. Ce procédé peut utiliser de l'énergie solaire comme source de chaleur, mais nécessite une énergie supplémentaire pour assurer la compression mécanique (compression mécanique) ou un éjecteur de vapeur (thermo compression).

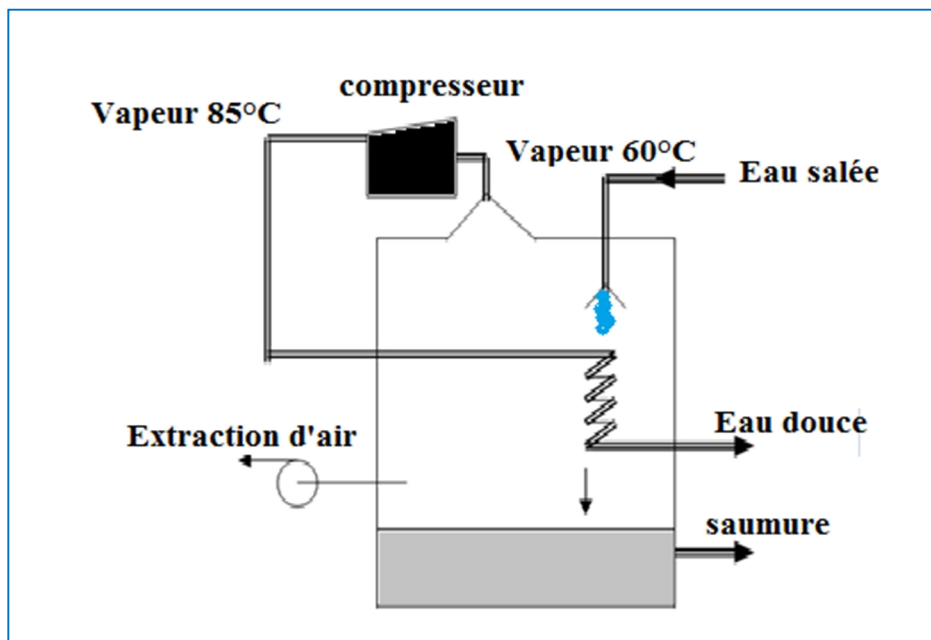


Figure .II.5 : Compression de la vapeur [18]

- **La distillation multi –Stage flash (MSF) :** La distillation Multi-Stage Flash est une autre méthode généralement utilisée pour le dessalement de l'eau telle que l'eau de mer qui est chauffée sous pression à 120°C tout en restant liquide. Elle est ensuite envoyée dans une cellule où règne une pression réduite. Une partie de l'eau sous pression est immédiatement vaporisée par détente appelée flash. La vapeur d'eau formée monte au contact de conduits froids, où circule l'eau de mer, et se condense en eau douce. Une pompe retire alors l'eau distillée de la cellule. L'eau de mer non vaporisée dans la première cellule entre dans une deuxième cellule où règne une pression plus faible que

Celle de la première cellule. Une seconde détente se produit d'où le nom de distillation multi flash. Les usines de dessalement MSF peuvent comporter jusqu'à 40 cellules [19]

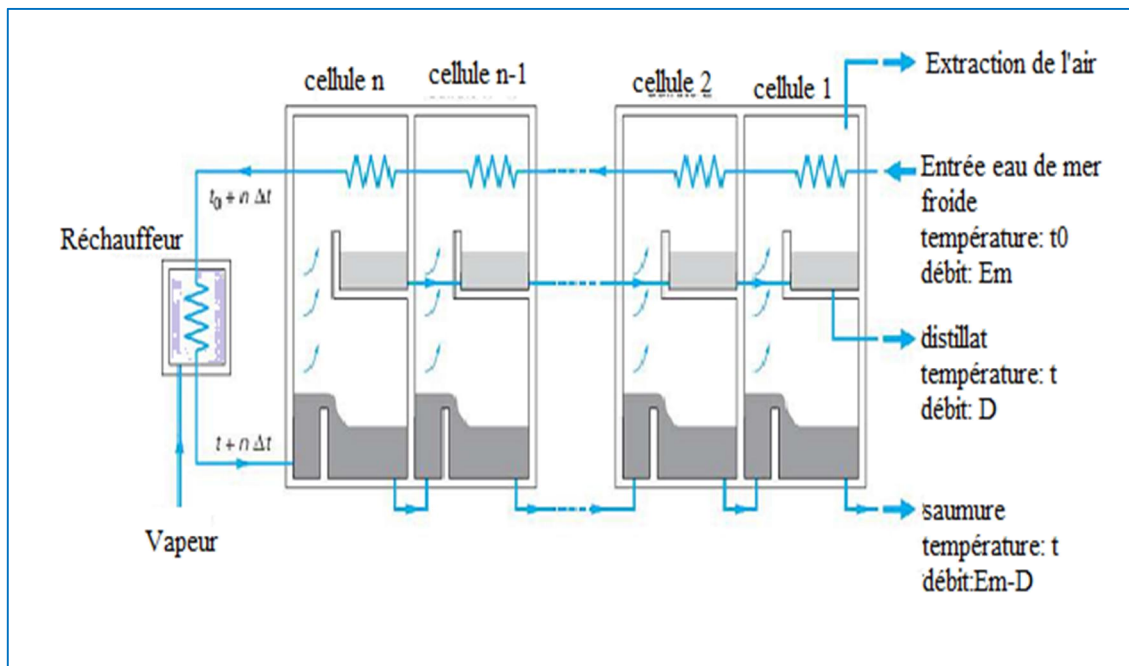


Figure. II.6. La distillation multi flash (MSF) [19].

II.7.2. La distillation solaire directe [18] : ce procédé consiste à chauffer de l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. La vapeur produite, qui se condense sur le vitrage plus froid et légèrement incliné, et est recueillie sous forme de condensat dans des gouttières. Le principe est très simple, fiable et ne nécessite peu d'entretien. Mais son rendement est relativement faible 4 à 5 litres/jours/m²

II.7.2.1 Le distillateur solaire à effet de serre:

La distillation solaire est un procédé économique de production d'eau distillée surtout dans les régions caractérisées par un bon ensoleillement [8]. Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres sont désormais envisageables pour répondre à la demande en eau potable. Parmi les différents procédés, la distillation solaire est une solution intéressante pour les régions isolées.

II.7.2.1.1. Historique :

L'utilisation actuelle de l'énergie solaire pour le procédé de distillation de l'eau saumâtre a débuté en 1872, dans le nord du Chili par l'installation d'un distillateur solaire de type bassin par l'ingénieur Suédois Carlos Wilson. Pour fournir de l'eau distillée à l'usine de l'amonitrate [11].

II.7.2.1.2 L'effet de serre:

Le rayonnement solaire apporte de l'énergie sous forme de flux lumineux dans un domaine de longueur d'onde allant de 0.2 à 3.5 μm (le visible et le proche de l'infrarouge). L'énergie incidente traverse une couverture transparente aux rayons de faible longueur d'onde, puis elle est absorbée par une surface (noire mate) qui s'échauffe et remet dans le domaine de grandes longueurs d'onde comprises entre 4 à 30 μm (infrarouge éloigné) et qui ne peut traverser la vitre réalisant ainsi un piège à calories " l'effet de serre" [8].

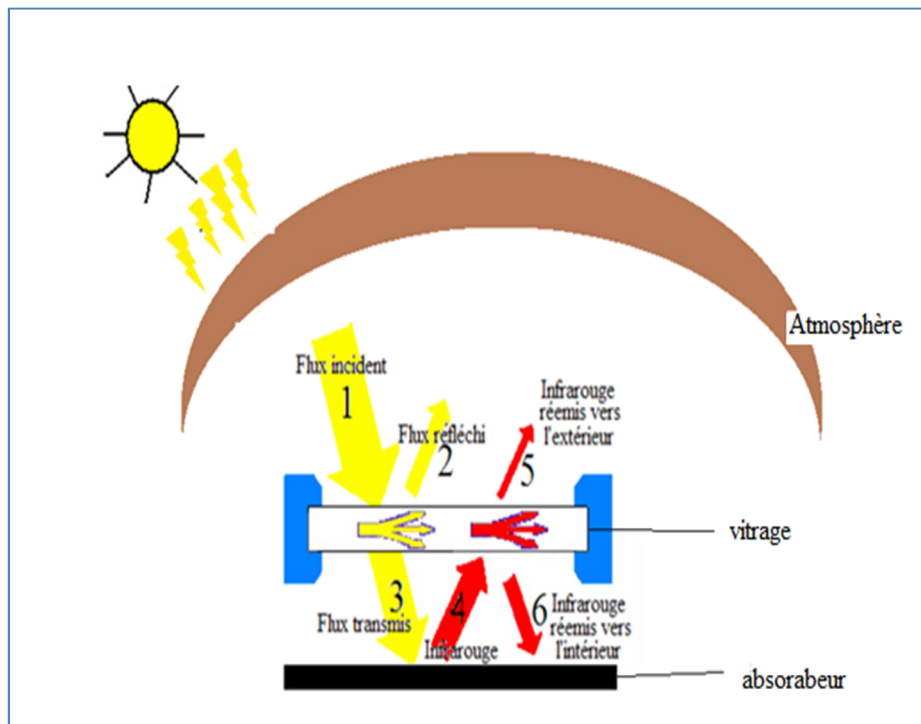


Figure II.7. Effet de serre [8]

II.8. Principe de fonctionnement des distillateurs thermosolaires.

On distingue deux types de distillateurs solaires à effet de serre, dont la condensation n'est pas séparée de l'évaporation : distillateurs statiques et distillateurs dynamique.

1) Les distillateurs statiques :

Ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est immobile dans le bac absorbeur. Les principales géométries rencontrées sont représentées ci-dessous :

❖ Le distillateur solaire plan (Hot-Box) :

Ce système de distillateur est constitué d'une enceinte fermée, étanche surmontée d'une vitre de 3 mm d'épaisseur, inclinée à 10° environ, transparent pour le rayonnement solaire visible et opaque pour le rayonnement infrarouge remis par la saumure et le bac absorbeur peint en noir mât. Le bac est rempli par une lame d'eau saumâtre d'une épaisseur de 2 à 3 cm. Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau saumâtre s'évapore avec ou sans ébullition à cause de la pression partielle du mélange air-vapeur et se condense en gouttelettes au niveau du vitrage en contact avec le milieu extérieur. L'eau distillée s'écoule le long du vitrage dans les gouttières. Un appoint d'eau d'alimentation compense le débit de distillât à travers un régulateur de niveau par un flotteur. Le système est isolé thermiquement par une couche isolante (laine de verre, polyester, polystyrène, mousse polyuréthane,...). Des trous sont pratiqués dans la base et les surfaces latérales pour le rinçage et le trop plein. Le système repose sur une structure métallique en cornières d'acier.

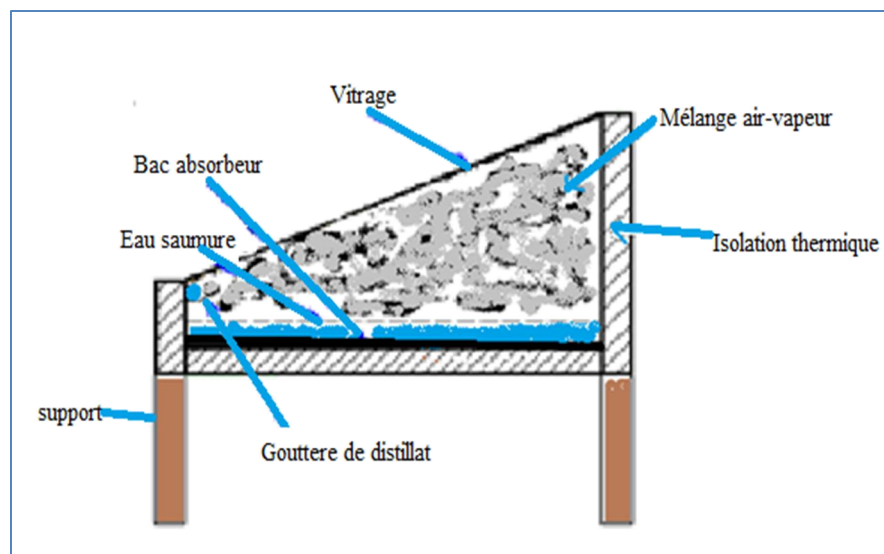


Figure II.8. Distillateur solaire plan à chapelle (type Hot-Box)

❖ Le distillateur à double vitrage :

Les distillateurs gardent la même surface d'évaporation mais les surfaces de condensation ont des inclinaisons différentes favorisant la captation de la radiation solaire et la production du distillat.

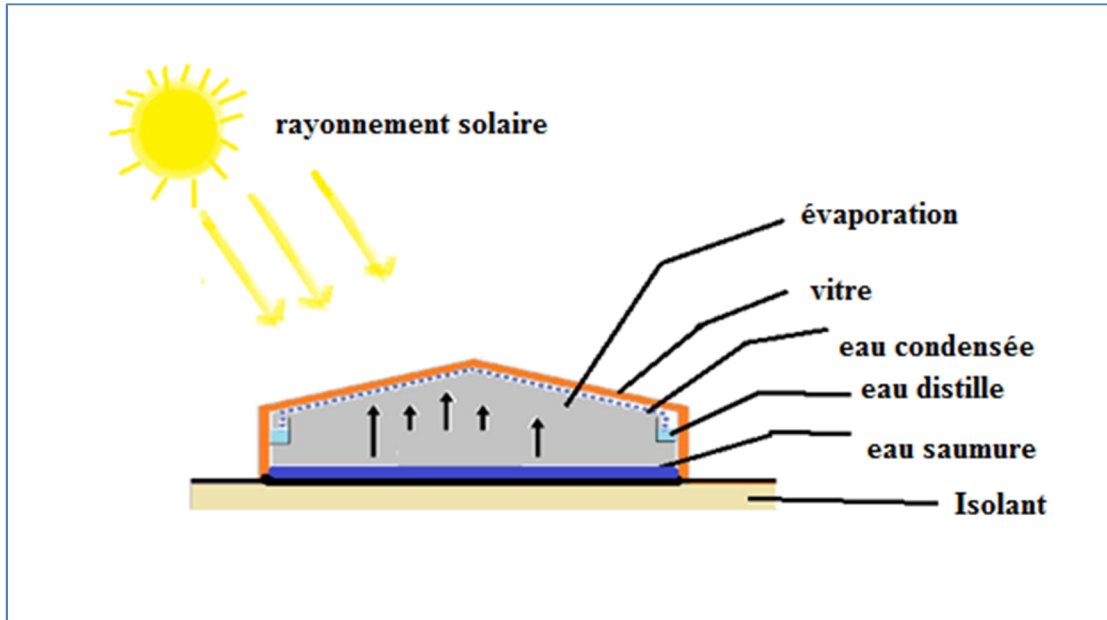


Figure II.9: Distillateur à double vitrage

❖ Le distillateur sphérique : ce système de trois parties principales, une demi-sphère qui transmet le rayonnement solaire d'une part joue le rôle de surface de condensation et de l'autre part, et une demi-sphère inférieure qui récupère le distillat et un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian. Un essuie-glace entraîné par un moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation transparente au rayonnement solaire, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes de distillat. Le principe de fonctionnement est similaire à celui du distillateur plan.

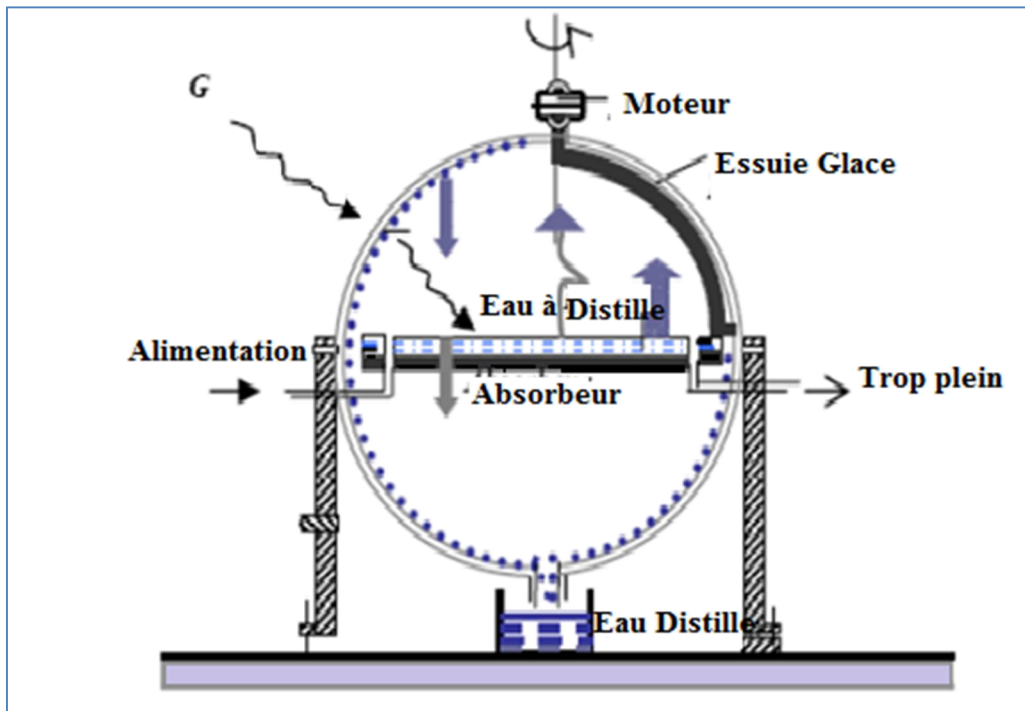


Figure II.10 : Distillateur solaire sphérique.

❖ **distillateur solaire à cascades :**

Ce système est caractérisé par deux avantages principaux par rapport au distillateur plan qui sont :

- La réduction de l'inertie thermique sous l'effet de la répartition de la charge d'eau saumâtre sur plusieurs marches en cascades.
- La possibilité de concevoir des distillateurs inclinés pour intercepter le maximum de rayonnement solaire.

Ces avantages permettent d'améliorer la production du distillateur de 10 à 20 % par rapport au distillateur plan. Un modèle de ce type, représenté dans la figure II.11 n'a été exécutée qu'en petites tailles. Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux, [11].

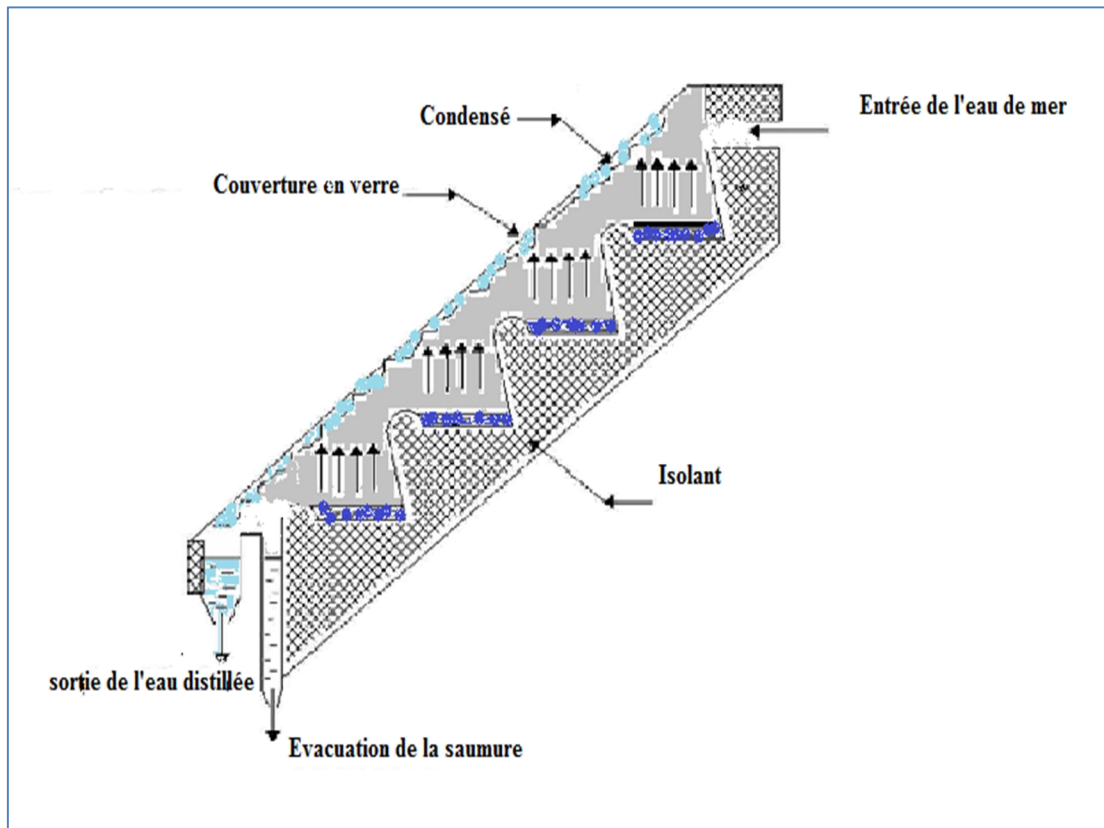


Figure II.11: Distillateur solaire à cascades [11].

❖ Distillateur solaire à film capillaire

Le système se compose d'une très mince couche de textile à mailles fines, trempée d'eau qui se fixe d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension interfaciale, nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air. Ce distillateur est composé des éléments suivants : le capteur-évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi.[11]

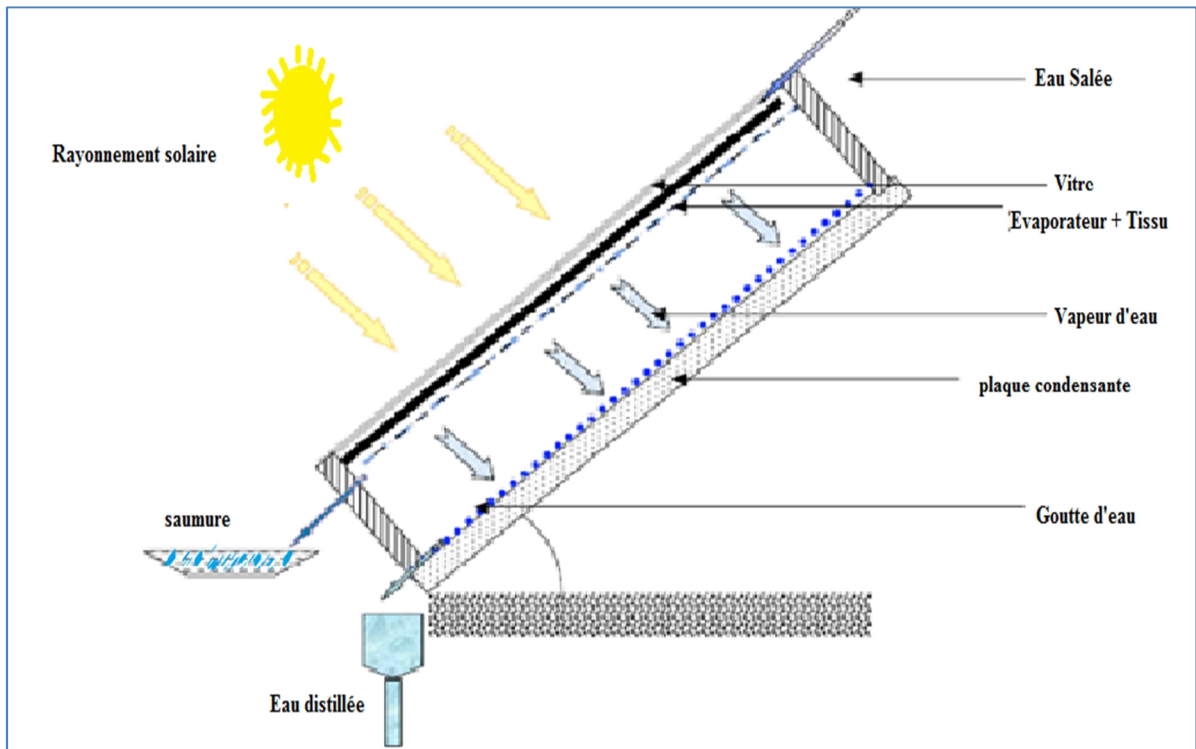


Figure II.12 : Distillateur solaire a film capillaire

2) **les distillateurs dynamiques :** ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est en mouvement. Les principales géométries rencontrées sont représentées ci-dessous :

a. Distillateur solaire a mèche :

Pour cet appareil l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture perméable, absorbant le rayonnement solaire. Le système favorise la production par autre système de distillateurs (distillateur de bassin). La mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (présentant une grande surface efficace et réduisant la réflexion). Moins d'eau d'alimentation est le distillateur à tout moment donc l'eau chauffée plus rapide à une température élevée. Les distillateurs à mèche sont plus efficaces que les distillateurs à bassin [10].

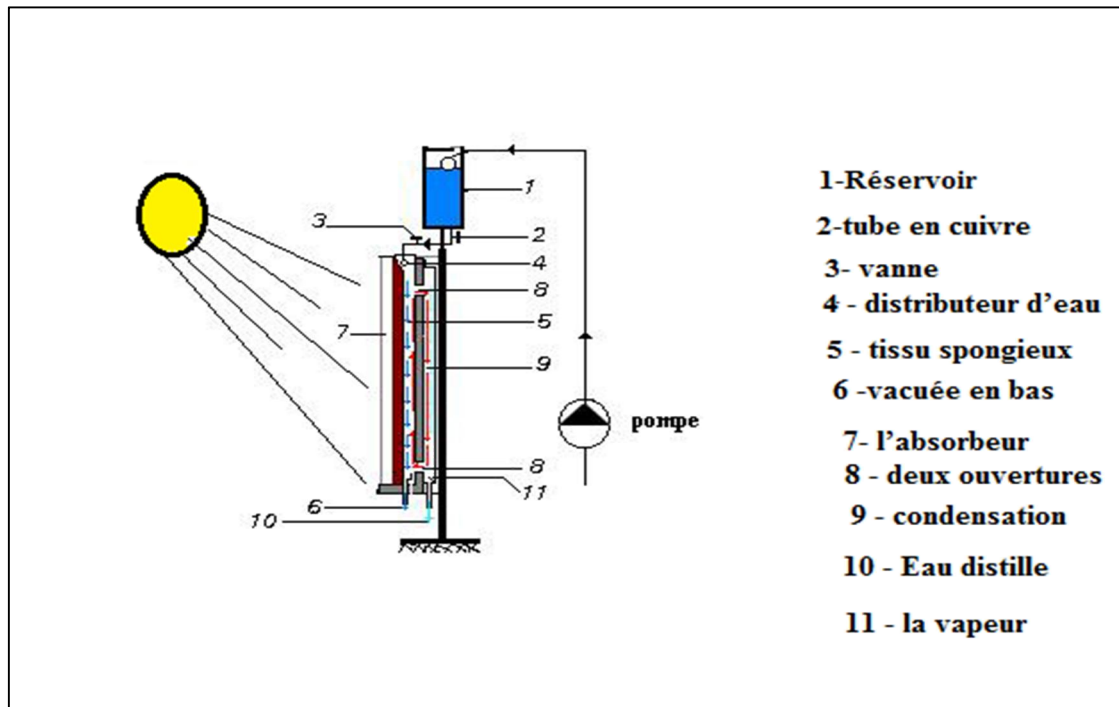


Figure II.14: Distillateur solaire vertical.

Le distillateur statique présentent des inconvénients tels que :

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

II.9. Les facteurs influant sur le fonctionnement des distillateurs [11, 14,15] :

Les facteurs qui influent sur le fonctionnement des distillateurs thermosolaires peuvent être classés selon les facteurs externes et les facteurs internes :

II.9.1. les facteurs internes :

- a. **Facteurs de construction** : (L'inclinaison, la couverture transparente, l'absorbeur, la distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation, la hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller, l'isolation des faces latérales et arrières du distillateur)

❖ 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 : $\beta = \Phi - 23.45^\circ$; le plan horizontal.

Fonctionnement hivernal $\beta = \Phi + 23.45^\circ$; le plan incliné à plus de 50

Fonctionnement annuel $\beta = \Phi = 27.88$

β : inclinaison de vitre , Φ : latitude

❖ La Couverture transparente

La couverture transparente est généralement construite en verre et parfois en plastique ou en matière synthétique (polymères). Elle constitue un filtre sélectif de rayonnement solaire (transparent au rayonnement solaire). Elle est opaque pour le rayonnement infrarouge réémis par la saumure et le bac absorbeur et le siège de condensation du mélange air-vapeur. Elle doit être mouillable pour réduire l'égouttement dans le bac et assurer le ruissellement du distillat vers le collecteur.

❖ L'absorbeur

La surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique ou en verre ordinaire en fonction de son pouvoir absorbant et émissif, de son inertie thermique, de sa résistance à l'oxydation par l'eau, des dépôts minéraux et de son coût.

❖ La distance entre la surface d'évaporation et la surface condensation (longueur caractéristique)

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

a. La hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller

L'épaisseur de l'eau saumâtre est cruciale pour la production du distillat. La production est autant plus importante que l'épaisseur est faible. L'augmentation de l'épaisseur de la saumure conduit à un fonctionnement prolongé durant la nuit. Mais en général cela conduit à une chute de la production au cours des jours.

- b. **L'isolation des faces latérales et arrières du distillateur** : Un choix judicieux de la matière isolante conduit à une réduction des déperditions thermiques par conduction vers l'ambiance et l'amélioration de la production.

II.9.2. Les facteurs thermo physiques : Les facteurs thermo physiques sont représentés par :

- a. **La couverture et la surface absorbante** : la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique.
- b. **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.
- c. **Le mélange air-vapeur** : la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, le coefficient de dilatation thermique.

II.9.3. Les facteurs optiques :

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

II.9.4. Les facteurs de fonctionnement :

Ces facteurs sont les différentes températures du système et du fluide, en particulier la température de la source chaude et de la source froide.

II.9.5. Les facteurs Externes :

Les facteurs les plus fréquemment retenus sont:

II.9.6. Les facteurs météorologiques (atmosphérique)

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[11,14] :

L'énergie solaire reçue par une surface dépend de trouble atmosphérique, état du ciel. Cela revient à dire que le passage nuageux diminue l'absorptance effective moyenne.

II.9.7. Les facteurs géographiques :

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

➤ Conception objective pour un distillateur solaire efficace :

Pour un rendement élevé, le distillateur solaire devrait maintenir :

- ❖ une température d'eau d'alimentation élevée
- ❖ Une grande différence de température entre l'eau d'alimentation et de condensation
- ✚ Une faible fuite de la vapeur. Une grande différence de la température
- ✚ La surface de la condensation absorbe peu ou rien le rayonnement entrant.
- ✚ L'eau de condensation absorbe la chaleur qui doit être enlevée rapidement de la surface de condensation [11, 14].

En plus on doit surveiller les éléments suivants :

- ✓ **Emplacement** : Les distillateurs solaires fonctionnent à l'aide de l'énergie solaire directe sans une énergie additionnelle.
- ✓ **La consommation et l'espace additionnel** : L'eau distillée provenant du distillateur peut être de chaude à tiède. Il vaut mieux réfrigérer l'eau dans un pichet (petit broc) en verre pour la refroidir et la stocker.
- ✓ **Le goût** : L'eau distillée est insipide à cause de l'absence de minéraux selon les préférences personnelles, le refroidissement de l'eau pourrait en améliorer le gout.
- ✓ **La facilité de nettoyage** : On choisit un modèle doté d'un absorbeur facile à nettoyer.
- ✓ **La composition des distillateurs** : On recommande que les distillateurs soient en acier galvanisé, en aluminium, plastique, bois ...

II.10. Conclusion :

Cette partie a permis de mieux décrire et comprendre les différentes technologies et principes de fonctionnement et les facteurs internes et externes sur la production du distillat des procédés de dessalement thermosolaires des eaux saumâtres en général et des distillateurs à effet serre en particulier.

*Chapitre II.B : Etude Théorique du
Distillateur Solaire Simple*

II.11. Etude théorique du distillateur solaire simple :

II.11.1. Bilans énergétiques dans un distillateur simple :

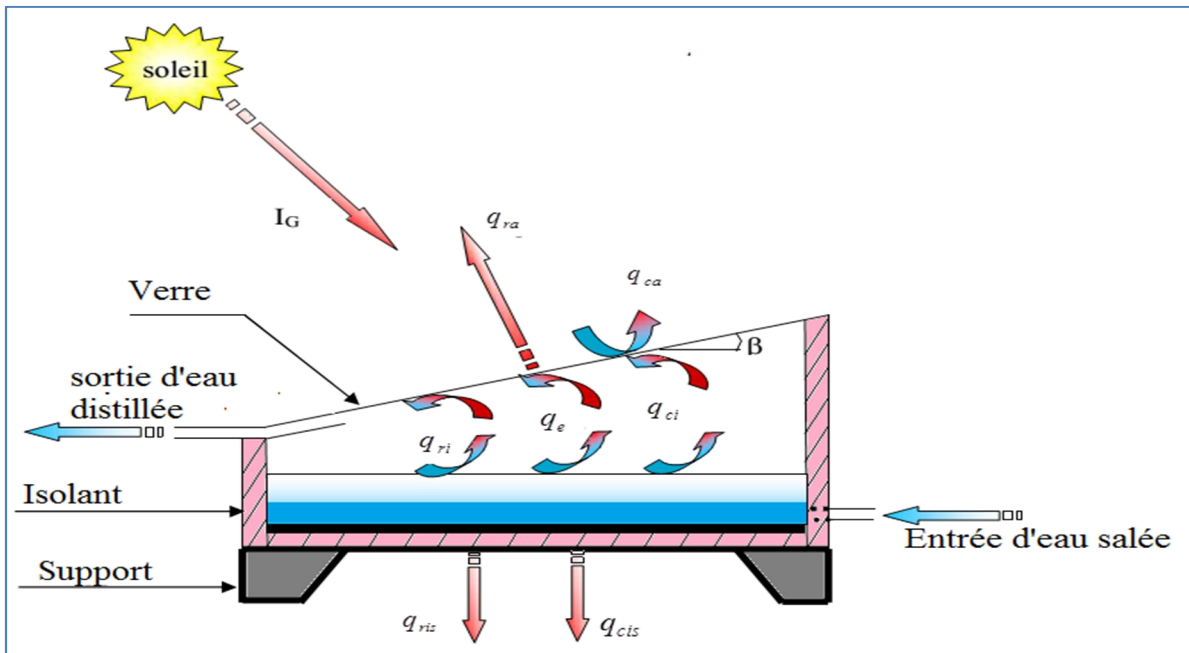


Figure II.15 : Bilan énergétique d'un distillateur solaire statique

La **figure II.16** illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire [13].

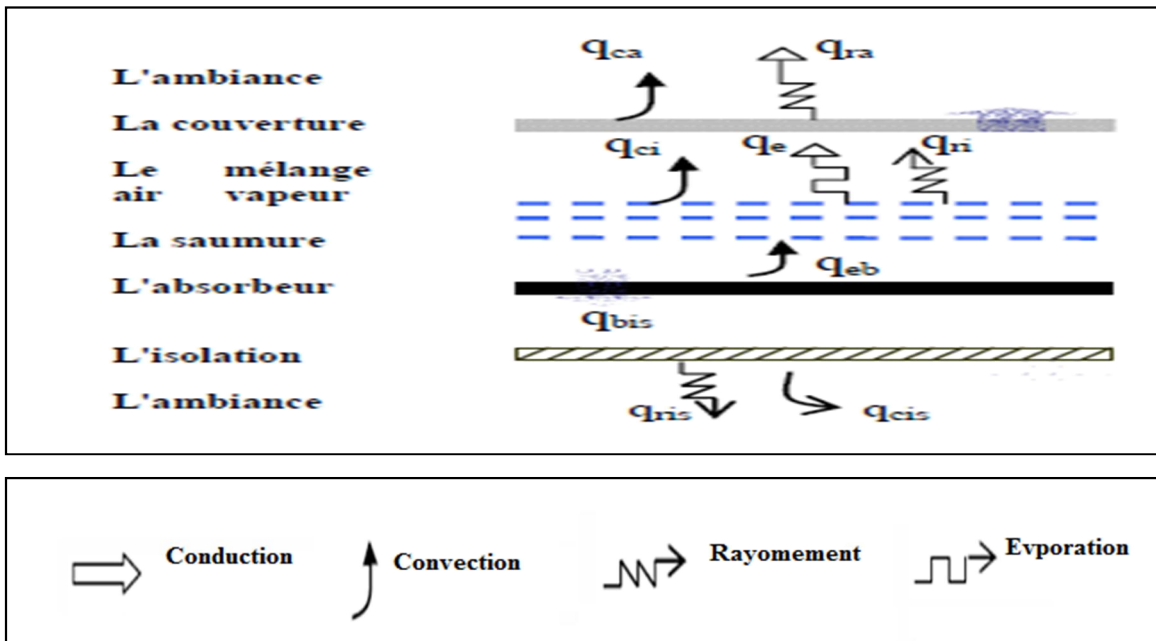


Figure II.16: Les différents transferts thermiques dans un distillateur solaire [12]

❖ **Bilan thermique de la masse d'eau :**

$$q_{ri} + q_{ci} + q_e + \dot{m}_d \cdot c_e (T_e - T_a) + q_b = q_{eau} \quad (\text{II.1})$$

q_{ri} , q_{ci} et q_e sont respectivement, les flux de chaleur échangés par rayonnement, par convection et par évaporation à l'intérieur du distillateur. q_b : Flux de conduction à travers le bac. $\dot{m}_d \cdot c_e \cdot (T_e - T_a)$: Flux de chaleur perdu par l'apport d'eau d'appoint. [13]

❖ **Bilan thermique de la vitre :**

$$q_{ri} + q_{ci} + q_e = \frac{\lambda_v}{e_v} (T_{vi} - T_{ve}) A_v \quad (\text{II.2})$$

$$q_{ra} + q_{ca} = \frac{\lambda_v}{e_v} (T_{vi} - T_{ve}) A_v \quad (\text{II.3})$$

q_{ra} , q_{ca} étant les flux de chaleur échangés par rayonnement et par convection entre la vitre et le milieu ambiant T_{vi} et T_{ve} , respectivement les températures intérieure et extérieure de la vitre. e_v : Épaisseur de la vitre, et λ_v : sa conductivité thermique. A_v , la surface de la vitre .

❖ **Bilan thermique de l'absorbeur :**

$$q_{eb} + q_{bis} = I_g \cdot A \cdot \tau \quad (\text{II.4})$$

τ : Coefficient de transmission global de l'eau et la vitre. q_{eb} Et q_{bis} : respectivement les flux de chaleur cédés à la masse d'eau et à l'isolant. [12]

I_g Puissance du rayonnement solaire incidente (Eclairement) par unité de surface.

❖ **Bilan thermique de l'isolant :**

Pour réduire les pertes de chaleur à travers la base, nous utilisons un isolant, qui du coté intérieur reçoit q_{bis} de l'absorbeur et du coté extérieur cède par rayonnement et par convection respectivement les flux de chaleur q_{ris} et q_{cis} d'où les équations: [12]

$$q_{bis} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} (T_{isi} - T_{ise}) \quad (II.5)$$

$$q_{ris} + q_{cis} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} (T_{isi} - T_{ise}) \quad (II.6)$$

λ_{is} facteur de conduction de chaleur à travers une couche d'isolation e_{ie}

II.12.Caractéristique (performance) du distillateur : plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production d'eau distillée de distillateur. On distingue constamment : le rendement, l'efficacité interne et globale et la performance. La production d'eau (le débit du distillat) [10]

II.12.1. Performance

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

$$FPB = \frac{\text{quantité d'eau produite au bout de 24h}}{\text{quantité d'énergie incidente par jour}}$$

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

A un instant donné de la journée, le facteur de performance "F.P" est donné par la relation: [8].

$$FP = \frac{\dot{m}_d}{\alpha_t \times I_g \times A_g} \quad (II.7)$$

II.12.2.Production (le débit de distillat) : Qui est la quantité d'eau distillée journalière produite par unité de surface d'évaporation [8].

$$\dot{m}_d = \frac{q_{ev}}{L_v} \quad (II.8)$$

$$L_v = 4.18[883 - 0.668(T_w + 273.15)] [15] \quad (II.8.a)$$

q_{ev} : [W/m²] Quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps (gain utile).

L_v [kJ/kg] Chaleur latente de vaporisation (enthalpie de vaporisation)

\dot{m}_d : [kg/s] Le débit massique de distillat.

II.12.3. Rendement global (efficacité)

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. Le rendement d'un distillateur simple est [10].

$$\eta = \frac{\dot{m}_d \cdot L_v}{I_g \cdot A} \quad (\text{II.9})$$

I_g Puissance du rayonnement solaire incidente (Eclairement) par unité de surface.

A : surface d'ouverture du distillateur.

II.12.4. Rendement interne (Efficacité interne) :

Si l'efficacité globale rapporte la quantité d'eau produite à l'énergie solaire reçue 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 : [8].

$$\eta_i = \frac{q_{ev}}{q_{abs}} = \frac{\dot{m}_d \cdot L_v}{\alpha_t \cdot I_g \cdot A} \quad (\text{II.10})$$

I_g est une intensité globale, l'expression de q_{abs} est :

$$q_{abs} = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f) I_g \cdot A \quad (\text{II.11})$$

$\alpha_t = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_{bac})$: Absorptivité effective de l'eau. τ_v : Transmittivité du vitrage ;

τ_e : Transmittivité de l'eau , α_e : Absorptivité de l'eau, α_{bac} : Absorptivité du bac

Angle d'incidence du rayonnement en degrés		0-30	45	60
Vitrage	Réflexion %	5	6	10
	Absorption%	5	5	5
	Transmission%	90	89	85
Saumure	Réflexion%	2	3	6
	Absorption%	30	30	30
	Transmission%	68	67	64
Absorbeur	Réflexion%	5	5	5
	Absorption%	95	95	95
	Transmission%	0	0	0

Tableau II.3.: Réflexion, Absorption, Transmission vis –à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur

II.13. Conclusion:

Les bilans énergétiques des échanges de chaleur et de masse du distillateur avec son environnement basées sur le principe de la première loi de la thermodynamique (sortie – entrée + stockage =0), sont relativement facile à établir, seulement les hypothèses simplificatrices et les coefficients d'échanges sont très difficiles à identifier. Cependant la recherche de nouvelles approches de modélisations simplifiées est indispensable.

*Chapitre III : caractérisation du
Distillateur Thermosolaire*

III.1. Introduction :

Ce chapitre expose l'essentiel du travail de modélisation et de caractérisation d'un distillateur solaire à simple effet de type Hot-Box conçu et réalisé à l'URER-MS par la combinaison de l'expression du rendement global du système avec la température réduite déduite de la relation des bilans énergétiques globaux obtenue en assimilant le système à une boîte noire fonctionnant entre deux sources de chaleur, la saumure et l'ambiance. Ces considérations permettent de déterminer le facteur des pertes thermiques globales et l'efficacité optique du système.

III.2. Schéma du dispositif expérimental à l'URER-MS d'Adrar



Figure III.1 : Schéma du dispositif expérimental de distillation à l'URER-MS

III.3. Propriétés du système :

- Charge d'eau saumâtre : 10 litres.
- Quantité de distillat produite : 4-5 litres /m²/J.
- Caractéristique du distillat : Conductivité = 12 Micron Siemens et le PH=6.5-7.
- Absorbeur en Acier inoxydable de 1m² de surface.
- Boîtier en acier galvanisé.
- Isolation en Polystyrène de 4 cm d'épaisseur.
- Verre ordinaire de 3 mm d'épaisseur
- Inclinaison du vitrage 10°
- Jointure et étanchéité par rivets et mastic silicone
- Support en cornière d'acier.

III.4. Modèle de caractérisation du distillateur [16]

Le distillateur est considéré comme une boîte noire contenant une charge d'eau saumâtre et fonctionnement entre deux sources de chaleur : l'eau saumâtre représente la source chaude de

température moyenne T_w , et l'ambiance représente la source froide de température T_a . La fraction de la puissance solaire incidente q_{inc} et absorbée par la charge d'eau q_{abs} est utilisée comme chaleur utile q_u pour l'évaporation d'une quantité d'eau et la fraction restante q_p est perdue vers l'ambiance. L'application de la première loi de la thermodynamique à un volume de contrôle (Figure III.2) délimitant la surface effective pertinente du système permet d'écrire le bilan d'équilibre thermique du système :

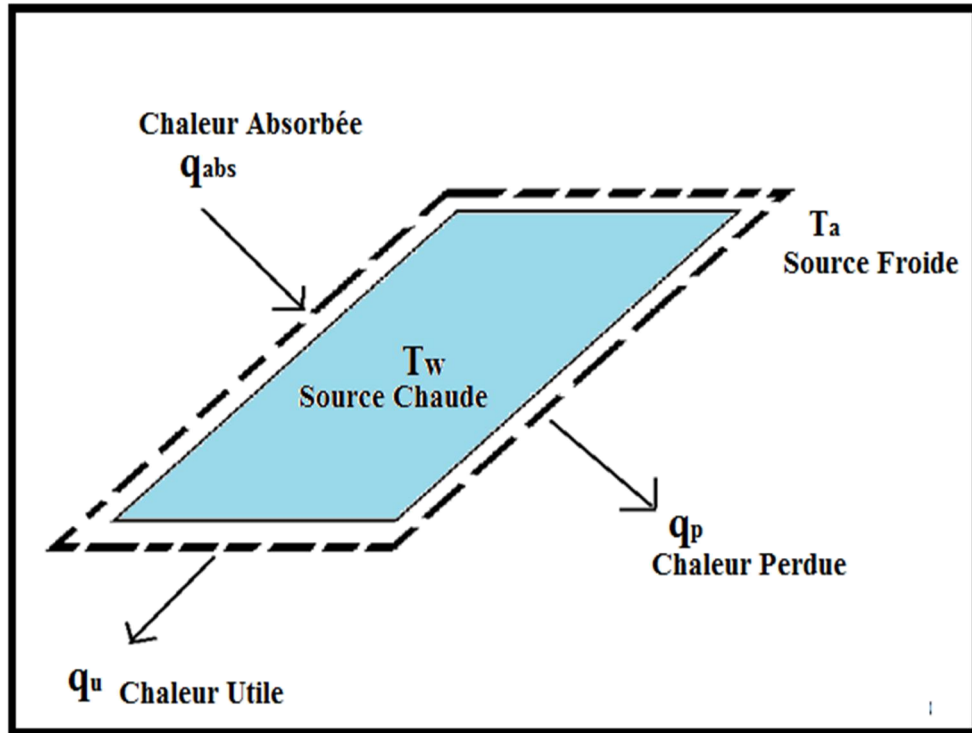


Figure III.2 : Modèle de caractérisation du distillateur

$$q_u = q_{abs} - q_p = A_c [\alpha_t I_g - U_L (T_w - T_a)] \quad (III.1)$$

$$q_u = q_{abs} - q_p = A_c [\alpha_t I_g - U_L (T_w - T_a)] q_p = U_L A_c (T_w - T_a) \quad (III.2)$$

$$q_{abs} = \alpha_t q_{inc} = \alpha_t (A_c I_g) \quad (III.3)$$

α_t , l'absorptivité effective totale de la saumure (rendement optique du distillateur), est donnée par l'expression suivante [3]:

$$\alpha_t = \tau_g \cdot \alpha_w + \tau_g \cdot \tau_w \cdot \alpha_b \quad (III.4)$$

τ_g Et τ_w sont respectivement la transmittivité du vitrage et de la saumure et α_b et α_w leurs absorptivités. Le facteur des pertes thermiques globales U_L du système calculé par rapport à la

surface d'évaporation en tenant compte des pertes thermiques globales avants U_t , arrières U_b et latérales U_e données par la relation :

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (\text{III.5})$$

D'autre part, l'efficacité globale du système η_g est donnée par la relation thermodynamique:

$$\eta_g = \frac{q_u}{q_{inc}} = \frac{\sum \dot{m} L_v}{\sum I_g A_c} = \alpha_t \eta_{in} \quad (\text{III.6})$$

L_v la chaleur latente d'évaporation à la température de l'eau et \dot{m} le débit du distillat. Est donnée par:

$$L_v = 4.18 [883 - 0.668 (T_w + 273.15)] \quad (\text{III.7})$$

La combinaison des équations (1) et (2) permet de déduire le rendement global comme suit:

$$\eta_g = \alpha_t - U_L \left(\frac{T_w - T_a}{I_g} \right) \quad (\text{III.8})$$

Les constantes α_t et U_L de l'équation (8) sont respectivement l'absorptivité effective de la saumure et le facteur des pertes globales du distillateur.

III.5. Résultats et Discussions

III.5.1. Présentation des résultats

La (courbe III. 1) représente la corrélation du rendement (efficacité) η_g globale du système en fonction de la température réduite $X = (T_w - T_a)/I_g$ au voisinage de Midi Temps Solaire Vrai sous des conditions les plus proches des conditions standards ASHRAE par la méthode des moindres carrées. Le courbe donne un rendement optique de 74 % et un facteur de pertes thermiques de 4.5 W/m²°C. En tenant compte de toutes sources d'erreurs, ce résultats est en bonne concordance avec le modèle d'estimation analytique qui 85% et 5.2 W/m²°C.

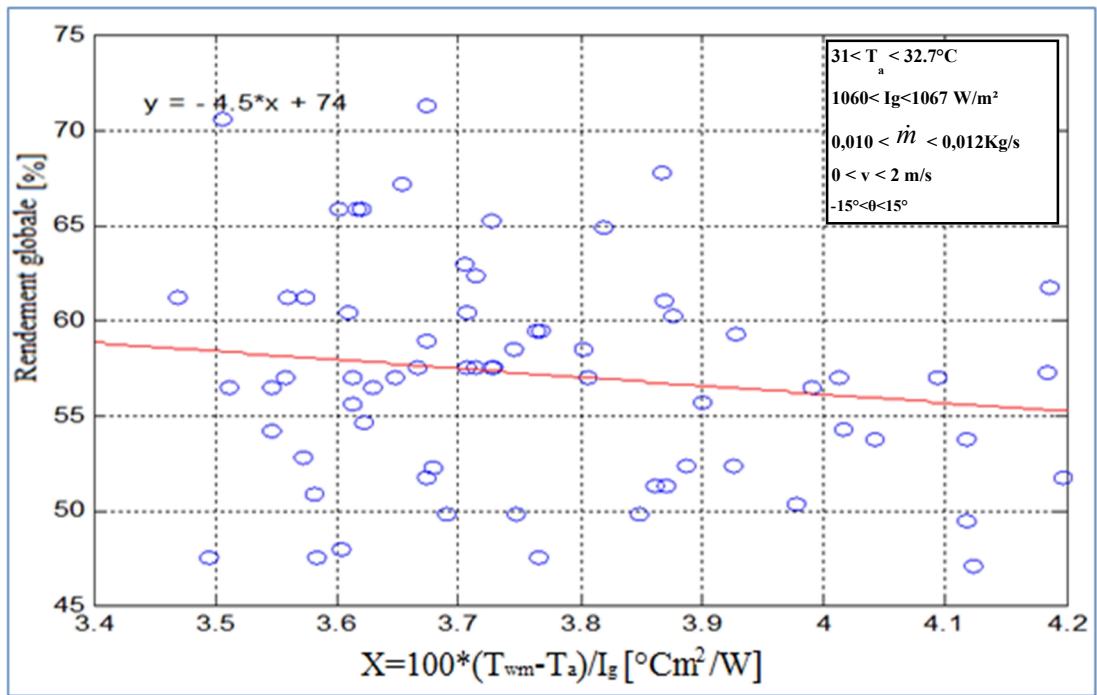
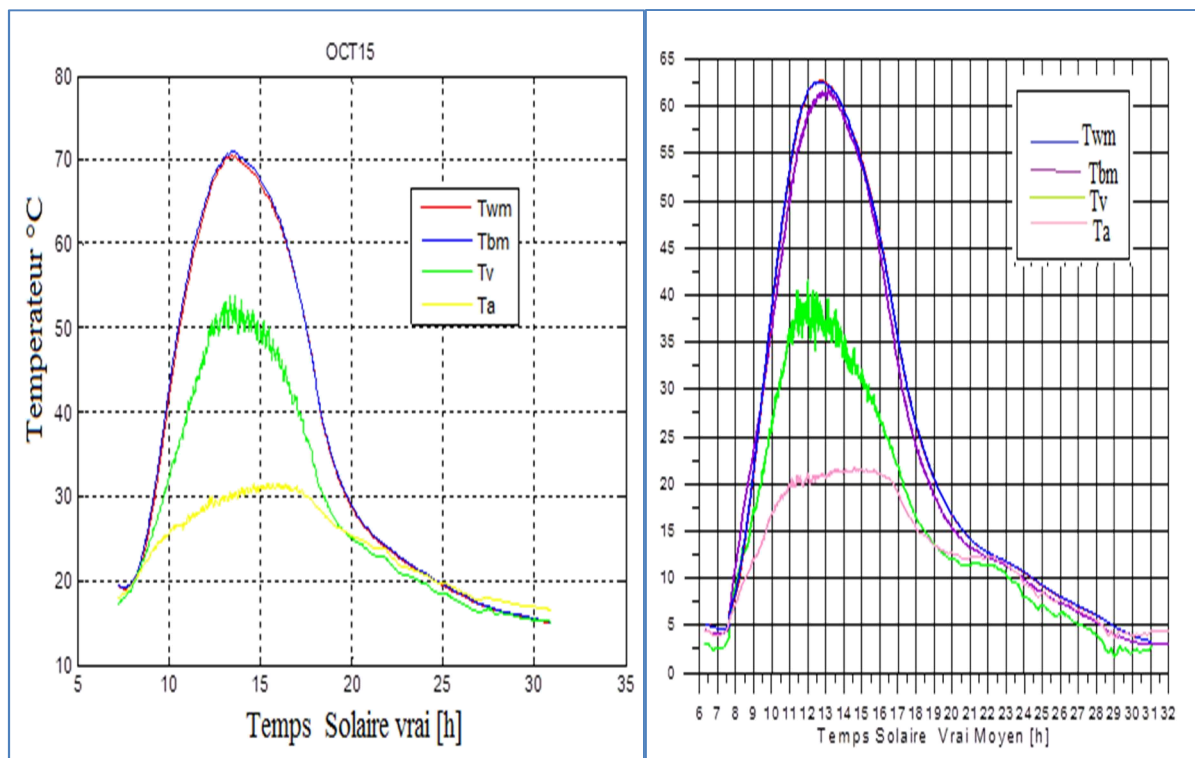


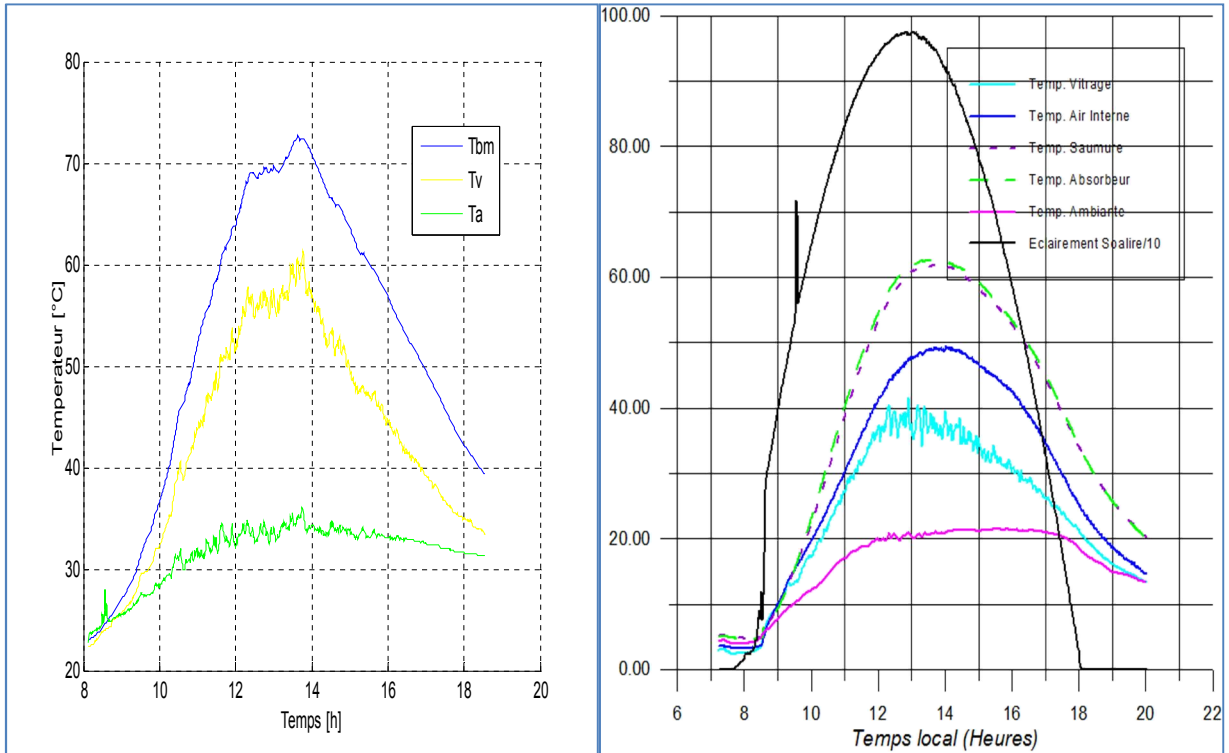
Figure. III.1 : Caractéristique thermo-optiques du système



a. (15 Octobre)

b. (2 Décembre)

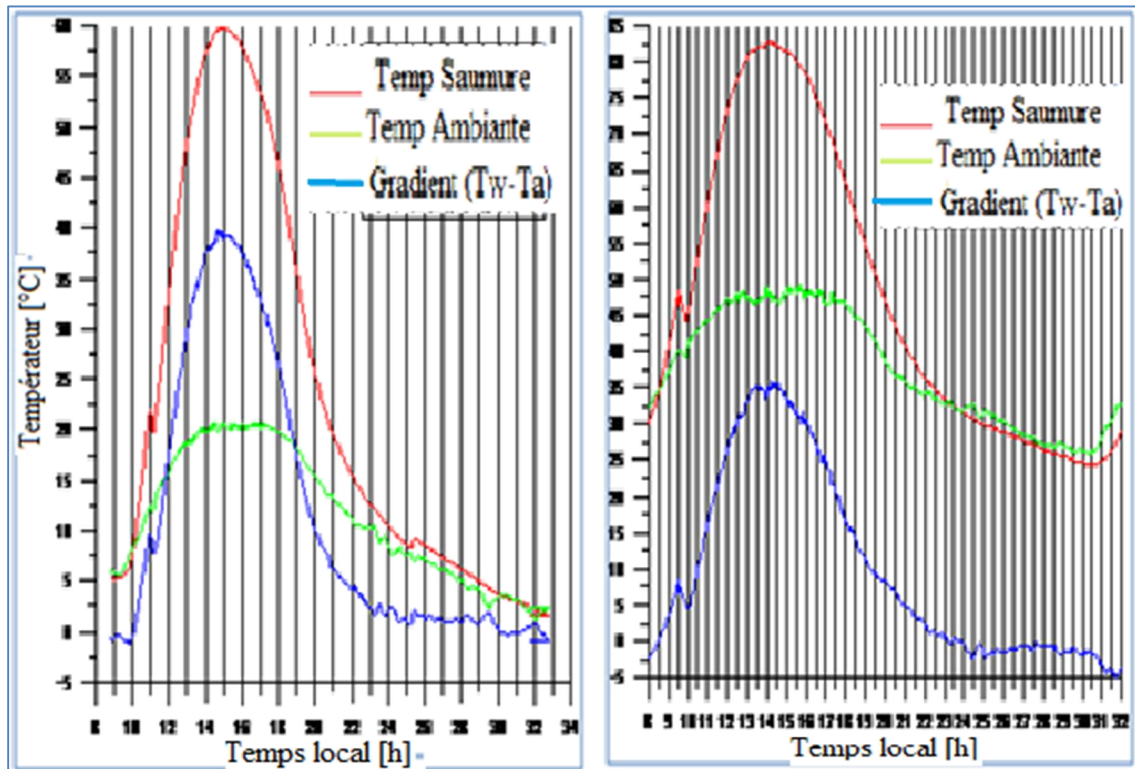
Figure III.2 : Températures de fonctionnement du distillateur le (15 OCT et 2 DEC)



a. (29 Septembre)

b.(12 Decembre)

Figure III.3 : Grandeurs de fonctionnement du Distillateur (29SEP et 12 DEC)



a. (15 Janvier)

b. (5 Juillet)

Figure III.4 : Gradient journalier de température saumure ambiante du Distillateur

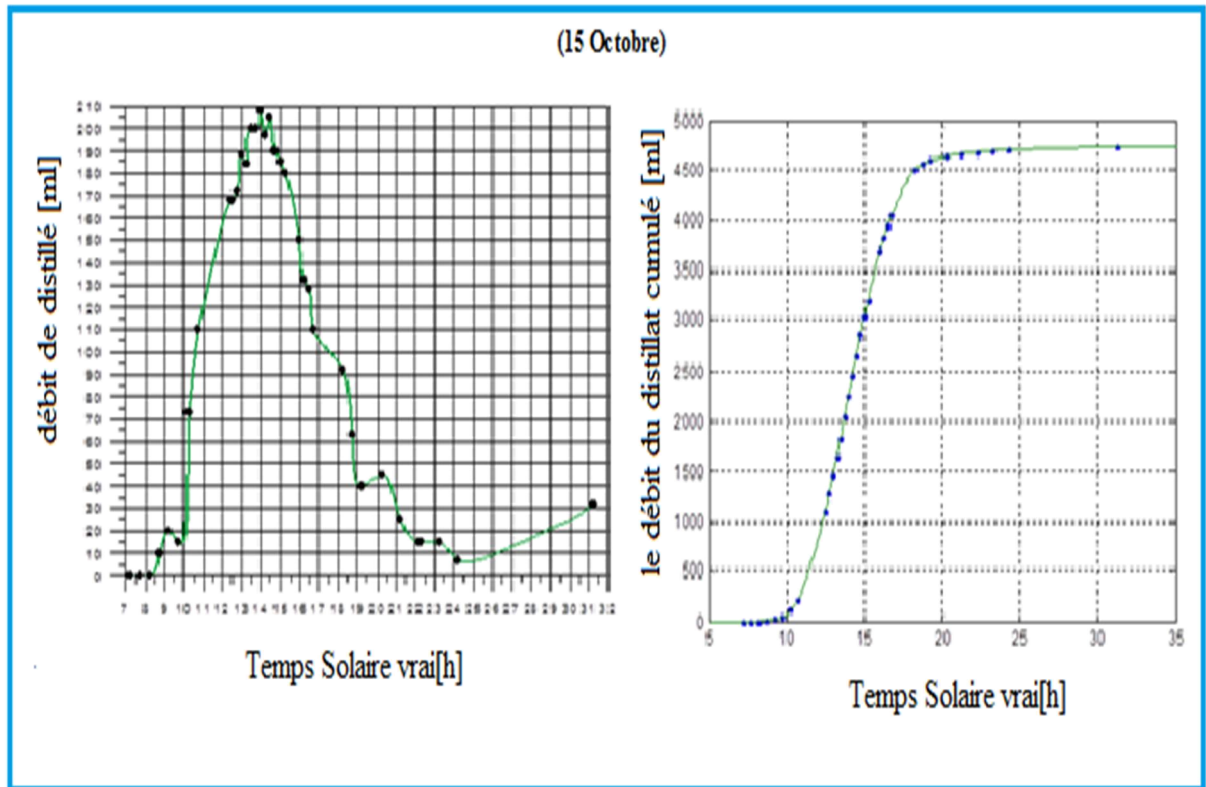


Figure III.5 : Débit instantané et cumulé journalier du distillat

Tableau III.1 : Grandeurs Thermophysiques de Caractérisation du distillateur

Ta[°C]	Tw[°C]	Déb [ml]	Ig [W/m²]	Rend [.]	X [°Cm²/W]
34.33	79.88	61.1541	1034.88	0.6155515	0.0424770
35.67	80.31	61.27039	1038.69	0.6144598	0.0442327
36.78	81.01	61.25112	1041.27	0.6127445	0.0452277
35.49	81.63	61.33707	1043.12	0.6125161	0.0448573
34.68	81.99	61.45593	1046.04	0.6119899	0.0458499
35.53	82.47	61.52465	1046.43	0.6124459	0.0453394
34.91	82.93	61.69074	1047.33	0.6135716	0.0453558
35.97	71.13	49.7561	980.08	0.5288269	0.0358746
36.4	71.66	49.7561	984.39	0.5265115	0.0358191
36.73	72.43	49.7561	997.3	0.5196959	0.0357967
36.51	73.21	49.7561	996.38	0.5201757	0.0368333
35.91	73.75	49.75609	1000.94	0.5178059	0.0378045
37.74	79.69	57.01464	1072.764	0.5536189	0.0391046
37.47	80.69	57.01463	1074.146	0.5529066	0.0402366
35.7	81.4	57.01463	1077.52	0.5511753	0.0424122
36.68	82.22	57.01464	1081.748	0.5490211	0.0420985
37.41	83	57.01463	1079.35	0.5502408	0.0422384
35.05	72	56.80975	1062.2	0.5571157	0.0347863
35.2	72.94	56.80975	1066.62	0.554807	0.0353828
35.67	73.88	56.80975	1069.26	0.5534372	0.0357350
34.89	74.74	56.80976	1071.78	0.552136	0.0371811
35.04	75.37	56.80976	1074.93	0.550518	0.0375187
36.57	76.17	56.80976	1074.59	0.5506922	0.0368513
35.63	77.01	56.80975	1074.02	0.5509844	0.0385282
35.24	77.45	56.80976	1076.08	0.5499297	0.0392257
35.55	78.03	56.80976	1075.96	0.549991	0.0394810
29.58	66.7	60.02927	1048.06	0.5966308	0.0354178
29.06	67.35	60.02927	1049.43	0.5958519	0.0364865
29.13	67.7	60.02927	1056.03	0.5921279	0.0365236
29.45	68.11	60.02926	1059.1	0.5904115	0.0365027
29.22	68.53	60.02927	1059.68	0.5900884	0.0370961
29.16	68.67	60.02927	1061.62	0.5890101	0.0372167
29.46	68.83	60.02927	1064.8	0.587251	0.0369741
29.77	69.23	60.02927	1067.84	0.5855792	0.0369531
27.99	65.82	60.10732	1055.79	0.5930326	0.0358310
27.86	66.24	60.10732	1060.6	0.5903431	0.0361871
28.08	66.56	60.10731	1064.22	0.588335	0.0361579
28.29	66.9	60.10733	1066.77	0.5869287	0.0361934
28.26	67.27	60.10732	1067.22	0.5866812	0.0365529
28.72	67.61	60.10731	1069.24	0.5855728	0.0363716
31.96	68.7	58.90731	1052.93	0.5827717	0.0348931
31.87	69.29	58.90732	1056.94	0.5805608	0.0354041
31.61	69.74	58.90731	1060.6	0.5785573	0.0359514
31.68	70.07	58.90732	1063.32	0.5770774	0.0361039
31.85	70.44	58.90732	1064.36	0.5765135	0.0362565
31.51	70.66	58.90732	1067.2	0.5749793	0.0366848
32.6	70.91	58.90731	1067.4	0.5748715	0.0358910

III.5.2. Interprétation des résultats

- La figure III.1 et le Tableau III.1 donne la variation du rendement du système en fonction de la température réduite $X = \frac{T_w - T_a}{I_g}$ pour dans une première approximation on a considéré le modèle le plus simple (modèle linéaire) pour la détermination de la caractéristique thermo-optiques du système. Cette caractéristique est déduite par un simple lissage sur le nuage de points de mesure du rendement global en fonction de X par la méthode d'approximation des moindres carrées. Ainsi, la pente de la droite est de l'ordre $U_L = 4.5^\circ W / m^2 C$ et le rendement optique est de 74%. Ces valeurs sont en bon concordance avec l'estimation théorique qui donne un facteur de pertes de $U_L = 5.12^\circ W / m^2 C$ avec une erreur relative de 12% et une efficacité optique de 85%. Avec une précision de 13% .
- Les figures III.2 et III.3 représentent l'évolution journalière des températures de fonctionnement du système pendant des périodes différentes de l'année (relativement chaudes et froides) en Septembre, en Octobre et en Décembre. Ces températures (vitrage, absorbeur et saumure) sont fortement influencées par les fluctuations de l'éclairement solaire. On distingue trois phases distinctes :
- La première phase de charge thermique** : dure de 8h :00 à 12h :00 temps solaire vrai. Durant cette phase la température de la saumure et la production croit avec l'augmentation du rayonnement solaire et l'augmentation de la température ce qui réduit les pertes thermiques et augmente la production du distillat. La variation de l'énergie interne du système est positive.
 - La deuxième phase de fonctionnement nominal** : de 12h :00 à 14h :00 temps solaire vrai ou à 16 heure selon la conception et la période de l'année (régime de fonctionnement stationnaire) la température ambiante, et saumure demeurent pratiquement constantes car l'énergie absorbée par le système est pratiquement convertie en totalité en énergie utile avec un taux de pertes fixe.
 - La troisième phase de décharge thermique** : cette phase dure jusqu'au coucher du soleil. On constate une réduction des températures de fonctionnement sous l'effet de la décroissance du rayonnement solaire incident et la température ambiante induisant ainsi une augmentation des pertes thermiques et une réduction de la production de distillat.
 - La quatrième phase d'équilibre thermodynamique du système sans source de chaleur**. Cette phase dure du coucher de soleil jusqu'au lever du soleil du jour suivant.

Elle est marquée par la stabilisation progressive des températures de fonctionnement au voisinage de la température ambiante, équilibre du distillateur avec son environnement. Les températures de fonctionnement augmentent/diminuent en général avec l'augmentation/diminution du rayonnement solaire. Les niveaux d'énergie atteints leurs maximums avec un décalage de 2 à 4 heures par au rayonnement maximal à cause de l'inertie du système

- La figure III.4, donne la variation journalière du gradient de température entre la source chaude et la source froide du système. Ce gradient est fortement lié au rayonnement solaire, à la chaleur latente d'évaporation de l'eau, aux propriétés optiques et thermiques du système, de la température ambiante. Cet élément moteur varie dans la fourchette (35-40) degrés selon la période de l'année (été-hiver).
- La figure III.5, donne l'évolution de la production instantanée et cumulée du distillat qui s'élève à 5 litres par jour (200 ml pour un rayonnement de 1000 W/m^2 et une température ambiante de 20 à 30°C). Son intensité est étroitement liée au gradient de température et au rayonnement solaire incident.

III.6. Conclusion :

- La modélisation numérique du distillateur est très complexe à cause des hypothèses simplificatrices et des coefficients d'échanges thermiques, ainsi, la caractérisation semi empirique simplifiée semble une meilleure solution technico-économique pour déterminer d'une manière rapide et avec le minimum d'instrumentation de mesure les performances thermiques et optiques du système.
- La production du distillat est fonction de la chaleur latente d'évaporation de l'eau saumâtre, du gradient de température entre la source chaude et la source froide et de la fraction de la radiation solaire incidente sur le système.
- Les performances du système identifiées sont le facteur des pertes thermiques globales de ($4.5 \text{ W/m}^2\text{C}$) et l'efficacité optique de (74%). Ces facteurs sont acceptables en comparaison avec les valeurs théoriques qui sont ($5.2 \text{ W/m}^2\text{C}$) et 85% . les précisions son de l'ordre de 12 % et 13%. Ils donnent une idée très claire sur la façon d'améliorer les performances du distillateur avec le renforcement de l'isolation thermique et le rendement optique par l'utilisation de matériaux sélectifs pour l'absorption de la radiation solaire par le bac absorbeur et la réflexion par les surfaces latérales et la transmission par le vitrage.

Conclusion générale

Et Perspectives

Conclusion :

Cette investigation technique et scientifique sur les procédés de dessalement thermosolaire des eaux saumâtres a permis de mieux comprendre et maîtriser leur principes de fonctionnement notamment la distillation statique à effet serre à simple-effet du type Hot-Box et les paramètres internes et externe d'influence sur son fonctionnement. Elle montre que :

- ❖ La production du distillat est fonction de la chaleur latente d'évaporation de l'eau saumâtre, du gradient de température entre la source chaude et la source froide et de la fraction de la radiation solaire incidente sur le système.
- ❖ Les échanges de chaleur et de masse dans le distillateur sont régis par des bilans énergétiques et des coefficients d'échanges très compliqués à évaluer et à modéliser ce qui rend chaque approche un cas particulier. Cependant la modélisation et la caractérisation proposées dans ce mémoire sont basées sur des bilans énergétiques globaux simplifiés permettant d'identifier les paramètres essentiels de performance du système (**Rendement optique et Facteur des pertes thermiques globales**) en utilisant un minimum d'instrumentation de mesure et de grandeurs thermophysique de calcul. En tenant compte des fluctuations des modèles d'échanges et des hypothèses simplificatrices associées les résultats obtenus sont acceptables.
- ❖ Les températures de fonctionnement du distillateur dépassent les 80°C en période chaude de l'année au sud algérien ce qui encourage l'utilisation de ces systèmes pour la production des alcools à partir des déchets de dattes abondants au Sahara algérien.
- ❖ La production du distillat avoisine les 5 litres par m² et par jour sur site d'Adrar. Ainsi le système constitue un sujet intéressant pour le développement durable des régions sahariennes dans plusieurs domaines socioéconomiques sanitaire, chimique, transport, stockage électrochimique... via le perfectionnement par la formation et par l'application industrielle à grande échelle par des compétences et des matériaux de construction locaux.

Facteur des pertes thermiques [W/m² C]		Rendement optiques [%]	
Théorique	Expérimental	Théorique	Expérimental
5.12	4.5	85	74
Erreur = 12%		Erreur = 13%	

Perspectives :

- Les températures de fonctionnement du distillateur peuvent atteindre les 80°C en période chaude de l'année au sud algérien ce qui encourage l'utilisation de ces systèmes pour **la production des alcools** à partir des déchets de dattes abondants au Sahara algérien.
- La production du distillat avoisine **les 5 litres par m² et par jour** sur site d'Adrar. Ainsi le système constitue un projet intéressant à valeur ajoutée pour le développement durable des régions sahariennes dans plusieurs domaines socioéconomiques : sanitaire, chimique, transport, stockage électrochimique dans le cadre d'entreprises d'emploi de jeunes.

Annexe

A. Quantités de chaleur échangées et les coefficients associés

A.1 Echange de chaleur par rayonnement entre la saumure et vitrage : [13]

$$q_{r.w-v} = h_{r.w-v} (T_w - T_v)$$

$h_{r.w-v}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre le film d'eau et la vitre.

$$h_{r,w-v} = \frac{\varepsilon_{Eff} \cdot \sigma \left[(T_w + 273.15)^4 - (T_v + 273.15)^4 \right]}{T_w - T_v}$$

ε_{Eff} : Emissivité effectif; σ : Constante de Steffan-Boltzmann. $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

$$\varepsilon_{Eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right]^{-1}$$

ε_w : Emissivité de l'eau. ε_v : Emissivité de la vitre.

A.2 Echange de chaleur par convection entre la saumure et vitrage :

$$q_{c.w-v} = h_{c.w-v} (T_w - T_v)$$

$h_{c.w-v}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le film d'eau et le vitrage

$$h_{c.w-v} = 0.884 \left[T_w - T_v + \frac{(P_w - P_v)(T_w + 273.15)}{268.9 \cdot 10^3 - P_w} \right]^{1/3}$$

P_w : Pression de vaporisation à T_w ; P_v : Pression de vaporisation à T_v

A.3 Echange de chaleur par changement de phase

$$q_{evap} = h_{evap} (T_w - T_v)$$

h_{evap} : Coefficient de transfert de chaleur par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage.

$$h_{evap} = 16.273 \cdot 10^{-3} h_{c.w-v} \frac{(P_w - P_v)}{(T_w - T_v)}$$

La chaleur latente d'évaporation et la pression de la vapeur d'eau sont exprimées comme suit :

$$h_{fg} = 3.1615 \times 10^6 - 2.40714 \times 10^3 T$$

$$P = \exp \left(25.317 - \frac{5144}{T + 273.15} \right)$$

La relation linéaire entre la pression de saturation et la température (T en °C) est donc :

$$P = 0.14862T - 0.36526 \times 10^{-2} T^2 + 0.11242 \times 10^{-3} T^3$$

A.4 Echange de chaleur par rayonnement entre le vitrage et l'ambiance :

$$q_{r.v-a} = h_{r.v-ciel} (T_v - T_a)$$

$h_{r.v-ciel}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement par la vitre vers l'extérieur.

$$h_{r.v-ciel} = \frac{\varepsilon_v \sigma [(T_v + 273.15)^4 - (T_{Ciel} + 273.15)^4]}{T_v - T_a}$$

T_{Ciel} : La température du ciel est donnée par deux relations approximatives

$$T_{Ciel} = T_a - 6 \text{ ou } T_{Ciel} = T_a - 12$$

T_a : Température ambiante.

A.5 Echange de chaleur par convection entre le vitrage et l'ambiance :

$$q_{c.v-a} = h_{c.v-a} (T_v - T_a)$$

$h_{c.v-a}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'extérieur.

Le coefficient d'échange par convection entre la face externe de la vitre et l'air est donné par

$$h_{c.v-a} = 5.7 + 3.8 V$$

$h_{c.v-a}$ est donné par la corrélation suivante :

$$h_{c.v-a} = 2.8 + 3.0V \quad \text{lorsque } V \leq 5 \text{ m/s}$$

$$h_{c.v-a} = 6.15V^{0.8} \quad \text{lorsque } V > 5 \text{ m/s}$$

Où V est la vitesse du vent.

A.6 Echange de chaleur par convection entre le bac absorbeur et la saumure:

$$q_{c.b-w} = h_{c.b-w} (T_b - T_w)$$

$$h_{c.b-w} = \frac{Nu k_f}{L}$$

k_f : Conductivité thermique du fluide (eau).

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

$$Nu = c(G_r P_r)^n$$

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

- L'écoulement est toujours laminaire et on a:

$$\text{Si } G_r < 10^5 \Rightarrow Nu = 1$$

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

$$\text{Si } 10^5 < G_r < 2 \times 10^7 \Rightarrow Nu = \frac{\lambda_e}{L} 0.54 \times (G_r P_r)^{0.25}$$

$$\text{Si } G_r > 2 \times 10^7 \Rightarrow Nu = 0.14 \times (G_r P_r)^{0.33}$$

$$G_r : \text{Nombre de GRASHOF} \Rightarrow G_r = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\mu^2}$$

β : Coefficient d'expansion volumétrique de l'eau en (K^{-1}).

L : Longueur du bac absorbant en (m). ρ : La masse volumique de l'eau en (kg/m^3).

g : L'accélération en (m/s^2). μ : La viscosité dynamique en (kg/ms).

$$P_r : \text{Nombre de PRANDLT} \Rightarrow P_r = \frac{\mu_e \cdot C_{pe}}{\lambda_e}$$

Les pertes thermiques du bassin par conduction thermique à travers l'isolation est donnée comme suit :

$$q_{cdb-iso.i} = k_b \times (T_b - T_{iso.i})$$

T_b : Température de bac. T_i : Température de l'isolant.

Avec :

$$k_b = \frac{\lambda_b}{\delta_b}$$

λ_b : Conductivité thermique du bac. δ_b : Épaisseur du bac.

A.7 Echange de chaleur Parconduction entre Isolant-bassin :

$$q_{cd.iso.i-b} = \frac{\lambda_b}{\delta_b} (T_b - T_i)$$

A.8 Echange de chaleur par conduction à travers l'isolant :

$$k_i = \left(\frac{\delta_{soi}}{\lambda_{iso}} \right) \times (T_{iso.i} - T_{iso.w})$$

λ_{iso} : Conductivité de l'isolant. δ_{iso} : Épaisseur de l'isolant.

A.9 Echange de chaleur par convection entre l'isolant et l'air extérieur :

$$q_{c.iso.i-a} = h_{iso.w-a} (T_{iso.w} - T_a)$$

$h_{iso.w-a}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'isolant et l'air extérieur.

A.10 Echange de chaleur par rayonnement entre l'isolant et le sol :

$$h_{iso.w-a} = \varepsilon_{iso} \times \sigma \times (T_{Sol}^2 + T_{iso.w}^2) \times (T_{iso.w} + T_{sol})$$

B. Caractéristiques thermophysiques de l'eau saumâtre :

Les caractéristiques thermophysiques de l'eau saumâtre sont exprimées en fonction de la température.

B.1 Conductivité thermique pour $T_w \in [0,20]^\circ\text{C}$: [W/m °C]

$$\lambda(T_w) = \{3.65 \times T_w + 1.788 \times 10^{-6}$$

B.2 Capacité calorifique: C_p [J/kg °C]

$$C_p = 4216.664 - 3.165 \times T_w + 0.886 \times 10^{-1} \times T_w^2 - 0.101 \times 10^{-2} \times T_w^3 + 0.445 \times 10^{-5} \times T_w^4 \quad \text{B.3}$$

Coefficient de dilatation volumique: β [1/°K]

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

B.4 Chaleur latente de vaporisation: L_v [kJ/kg]

Une valeur empirique donne avec une très bonne approximation la valeur de la chaleur latente de vaporisation de l'eau pour $0^\circ\text{C} < T < 200^\circ\text{C}$:

$$L_v = 2500.8 - 2.48 \times T_w$$

B.5 Viscosité dynamique: μ [kg/m.s]

$$\mu = 5.449 - 0.1067 \times T_w + 7.325 \times 10^{-4} \times T_w^2$$

B.6 Viscosité cinématique: ν [m²/s]

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

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques :

- [1]. **A. M’Raoui, S. Mouhous, A. Malek et B. Ben Youcef**« Etude statistique du rayonnement solaire à Alger », (article Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°4 (2011) PP.637 – 648) en, Algérie, le 10 Novembre 2011.
- [2].**M’BERCHIDE Abdeslam**, « Etude et expérimentation d’un chauffe -eau solaire de type capteur-stockeur », (thèse master), Université Abou BakrBelkaïd, Tlemcen, Algérie, le 6juillet 2011
- [3]. **HADJ BELKACEMI Mohammed**, « Modélisation et Etude Expérimentation d'un capteur solaire non Vitré et Perforé », (mémoire de master en énergétique et Matériaux) , Université Abou BakrBelkaïd, Tlemcen, Algérie, le 6juillet 2011.
- [4]. **M^{elle}MEZIANI Fariza**, « Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG » (mémoire de magister en électronique), Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2010
- [5]. **HELALI KAMELIA**,« Modélisation d'une cellule photovoltaïque étude comparative », (mémoire de magister en électrotechnique), Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, le 25/06/2012
- [6].**NIA Mohamed**, « Etude comparative des méthodes d’estimation du rayonnement solaire », (mémoire de magister en énergétique et mécanique des fluides), université Ferhat Abbas Sétif, 2010.
- [7].**Claus Fröhlich et Christoph Wehrli**, du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse).
- [8]. **A. Deliou1***, **N. Bessas1**, **Z. Belgroun1**, **H. Aburideh1**, **A. Lounis2** et **A. Chikouche1**,« Etude expérimentale des caractéristiques d’un distillateur solaire à effet de serre », (article Revue des Energies Renouvelables CICME’08 Sousse pp109 - 118) Algérie, (2008)

Références Bibliographiques

- [9]. **BOUKERZAZA NASSIMA**, « étude de l'effet des pertes thermiques sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire ». (Mémoire de magister en physique énergétique) ,2007
- [10]. **BENARIM Azineelabdine**, « Amélioration de la capacité de l'absorbeur d'un distillateur solaire simple par l'ajout d'une Couche de sable », (mémoire de master en génie des procédés), université kasdi merbah ouargla,16/06/2012.
- [11]. **HALLOUFI OUAHID**, « etude de la performance d'un distillateur solaire par un système de préchauffage solaire de l'eau saumâtre », (mémoire de magister en génie climatique), université mentouri constantine,2010.
- [12].**ZIYADOU AHMED**, « étude et conception d'un distillateur solaire à effet de serre », (mémoire de magistère en Physique Nucléaire, Physique Théorique et Physique Appliquée), université d'Antananarivo,04/08 /2011.
- [13]. **Abla.CHAKER, Nassima.BOUKERZAZA**,« caracteristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire », (article 13èmes Journées Internationales de Thermique) Laboratoire de Physique Energétique, 17 Novembre 2005
- [14].**FEDALI SAIDA**, « modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas cout pour les communautés rurales », (article Laboratoire d'Etudes des Systèmes Energétiques Industriels (LESEI) ,2008
- [15].**Salima KARROUTE**, « étude théorique et numériques des systèmes couples : distillateur Hot-Box capteur », université mentouri de Constantine, 2009
- [16] **C. Khelif et B. Touati**, « Caractérisation d'un Distillateur à Effet de Serre,Station d'Expérimentation des Equipements Solaires en Milieu Saharien »,Route de Reggane,(article) Rev. Energ. Ren. Vol PP.99-108 478 Adrar, Algérie, 15.11.98,
- [17].**A.Sadi**,« Le Dessalement Solaire Considérations Techniques », (article Centre de Développement des Energies Renouvelables, P.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah Alger 2000

Références Bibliographiques

[18].**ABADA DJALLEL**, « étude comparative de la production d'eau distillée de deux distillateurs solaires, a effet de serre et à film capillaire » (mémoire de magister en Génie Climatique) 2000

[19]. **Farid TATA**, « Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes », France, Janvier 2009.