

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

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'études



En vue de l'obtention du diplôme de Master en génie mécanique

Option : Energétique

Spécialité : Energie renouvelable

THEME

*Etude et réalisation d'un distillateur
solaire*

Proposé et dirigé par :

Mr : S.MAKHLOUF



Réalisé par :

AMEUR abdelhak

AIT ALLAOUA rachid

2015/2016

Remerciements

Au terme de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu Dieu qui nous a donné la force pour mener à bien l'étude de ce projet.

Nous exprimons nos vifs remerciements à notre promoteur Mr S.MAKHLOUF, enseignant à l'institut de Génie Mécanique de Tizi-Ouzou de nous avoir proposé le sujet. On tient à le remercier pour sa précieuse aide, sa disponibilité et ses précieux conseils pour l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi aux personnels de hall de technologie d'Oued-Aissi et spécialement à Mr M. Ahcene et Mr A. Sofiane

Nos remerciements vont également aux personnels de l'usine des <<panneaux publicitaires>> de DBK pour nous avoir fourni les plaques d'aluminium

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants de l'institut de Génie Mécanique de nous avoir suivis le long de notre cursus universitaire

Nos remerciements également le président et les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en jugeant notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

-A mon très cher père et ma très chère mère auxquels je dois tout mon respect et que je ne remercierai jamais assez pour leur soutien, encouragements et conseils durant tout mon parcours universitaire ;

-A mon frère ;

-A mes sœurs ;

-A mon cher binôme Rachid et toute sa famille ;

-A mes très chers amis de B 215, Younes, Aghiles, Remdane, Khaled ;

-A tous mes amis ;

-A toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.

AMEUR ABDELHAK

Je dédie ce travail à :

Mon très cher père et ma très chère mère auxquels je dois tout dans la vie et que je ne remercierai jamais assez pour leurs soutiens, encouragements durant tous mon parcours universitaire.

Mes frères et ma sœur ainsi que toute la famille

A mon pote et cher binôme ABDELHAK

Ames chers amis MADJID, FATAH et SOFIANE

Tous mes amis et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin dans ce travail.

AIT ALLAOUA RACHID

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Gisement solaire	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Généralités sur le soleil.....	3
I.3.Mouvement de la terre.....	5
I.4.La sphère céleste	6
I.5.Les coordonnées célestes.....	6
I.5.1- Les coordonnées géographiques terrestres.....	6
I.5.2-Les coordonnées horaires.....	7
I.5.3-Les coordonnées horizontales.....	8
I.6.Les temps solaires.....	9
I.6.1. Le temps solaire vrai (T.S.V)	9
I.6.2. Le temps solaire moyen (T.S.M).....	9
I.6.3. Le temps universel (T.U).....	10
I.6.4. Le temps légal (TL).....	10
I.7. Direction des rayons solaires.....	10
I.8. La constante solaire.....	12
I.9. Potentiel de l'énergie solaire.....	12
I.10. Le rayonnement solaire.....	13
I.10.1. Rayonnement direct	13
a- L'éclairement direct.....	13
b- Irradiation direct.....	14

I.10.2. Le rayonnement diffus.....	14
a- L'éclairement diffus S_{dif}	14
b- irradiation diffuse H_{dif}	14
I.10.4 : Rayonnement global.....	15
I .11 .Rayonnement solaire en Algérie.....	15
I.12.Conclusion.....	16

Chapitre II : Connaissance générales sur la distillation solaire

II.1. Introduction.....	17
II.2.Définition.....	17
II.3.Origine et historique de la distillation solaire.....	18
II.4.Principe du distillateur solaire.....	18
II.5.Types de distillation solaires.....	19
II.5.1.Distillateur solaire a multiples effets.....	19
II.5.2.Distillateur solaire a effet de serre.....	20
a- Les distillateurs statiques	20
b- Les distillateurs à ruissellement	23
II.5.3.distillateur à concentration	25
II.5.4.Distillateurs avec stockage de chaleur	26
II.5.4.1.Stockage avec chaleur sensible.....	27
II.5.4.1.Stockage avec chaleur latente.....	27
II.6.Principe de la réflexion	28

II.6.1.Réflexion sur une surface plane.....	28
II.6.2.Réflexion sur une surface courbe.....	29
II.7.Technologie de bassin.....	29
II.8.Besoin en énergie pour la distillation de l'eau.....	30
II.9. Le cas d'un distillateur d'urgence	30
II.10.Conclusion	31

Chapitre III : Etude théorique d'un distillateur solaire

III.1. Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur.....	32
III.1.1.Paramètres internes.....	32
III.1.1.1.Les paramètres de positions.....	32
III.1.1.2.paramètre de construction.....	32
III.1.1.3.Paramètres thermo physiques	33
III.1.1.4.Paramètres optiques.....	34
III.1.1.5.Paramètre de fonctionnement	34
III.1.2. Paramètres Externes.....	34
III.1.2.1. Intensité du rayonnement solaire.....	34
III.1.2.2.La vitesse du vent.....	34
III.1.2.3. Température ambiante de l'air.....	35
III.1.2.4. Paramètres Géographiques.....	35
III.2. Conception objective pour un distillateur solaire efficace.....	35
III.3. Principe du fonctionnement du prototype réalisé.....	36

III.4.Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur.....	37
III.4.1.Echange de chaleur entre l'absorbeur et la marmite.....	37
III.4.2.Echange de chaleur entre la marmite et le vase.....	37
III.4.3.Echange de chaleur entre la vitre et l'ambient.....	37
III.5.Bilan énergétiques.....	37
III.5.1.Bilan énergétique de la vitre extérieure.....	38
III.5.2 Bilan énergétique de la vitre intérieure.....	39
III.5.3. Bilan énergétique de la marmite.....	39
III.5.4. Bilan énergétique de l'eau	40
III.5.5.Bilan énergétique de l'absorbeur.....	40
III.5.6. Bilan énergétique d'un réflecteur.....	41
III.5.7. Le flux perdu à travers les murs.....	41
III.5.8. La surface d'échange d'un condenseur.....	41
III.6. Caractéristiques de fonctionnement du distillateur.....	43
III.6.1 Le rendement.....	43
III.6.2. La performance.....	43
III.7.Conclusion.....	44

Chapitre IV : Matériels et Méthodes

IV.1. Conception du distillateur solaire simple.....	45
1. Bac réfléchissant	45
2. Réflecteur extérieur.....	46
3. Couverture verrière (verre).....	46
4. L'isolation thermique	46

5. Couverture extérieure	47
6. La marmite	47
7. L'absorbeur.....	47
8. Bac de condensation.....	47
9. Cuve de récupération du distillat	48
10. Tuyauterie	48
IV.2.Composants standards utilisés (achetés).....	48
IV.3.Estimation du cout de distillateur	50
IV.4.Réalisation des composants du distillateur solaire	50
IV.4.1.Coté extérieur.....	50
IV.4.2.Bac réfléchissant.....	51
IV.4.3.Vase de condensation	51
IV.4.4.Le récepteur (marmite).....	52
IV.4.5. La couverture transparente	52
IV.4.6. Le condenseur.....	53
IV.5.Le montage.....	54
IV .6.Conclusion	54

CHAPITRE V : Résultats et discussions

V.1.Discutions des résultats.....	55
V.2.Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62

CHAPITRE I :

Figure (I.1) : La structure du soleil	4
Figure (I.2) : Mouvement du globe terrestre	5
Figure (I.3) : La sphère céleste.....	6
Figure (I.4): Les coordonnées géographiques terrestres.....	7
Figure (I.5): Les coordonnées horaires.....	8
Figure (I.6): Les coordonnées horizontales.....	9
Figure (I.7): Représentation des vecteurs unitaires.....	11
Figure (I.8) Carte du monde de l'enseillement moyen annuel.....	15
Figure (I.9) Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu	16

CHAPITRE II :

Figure (II.1) : principe de construction et de fonctionnement d'un distillateur solaire simple.....	17
Figure(II.2) distillateur solaire simple à effet de serre.....	19
Figure (II .3) distillateur solaire à multiple effet.....	19
Figure (II.4) distillateur solaire à pente unique.....	21
Figure(II.5) distillateur à double pente.....	21
Figure(II.6) distillateur incliné à cascade.....	22
Figure (II.7) distillateur solaire sphérique.....	23
Figure (II.8) distillateur solaire à mèche.....	24
Figure (II.9) Distillateur solaire verticale	25

Figure (II.10) Concentrateur cylindro-parabolique.....	25
Figure (II.11) Concentrateur sphérique.....	26
Figure (II.12) Concentrateur parabolique.....	26
Figure(II.13) Le four solaire.....	27
Figure(II.14) Réflexion sur une surface plane.....	28
Figure(II.15) Réflexion sur une surface courbée	29
Figure (II.16) Distillateur solaire d'urgence.....	30

CHAPITRE III :

Figure III.1 : Schéma du principe de fonctionnement.....	36
Figure III.2 : Schéma explicatif du rayonnement incident sur la surface verrière.....	37
Figure III.3: Les modes de transfert de chaleur lors de la condensation.....	41

CHAPITRE IV :

Figure (IV.1) distillateur solaire.....	45
Figure (IV.2) composants standards utilisés.....	49
Figure (IV.3) Estimation du cout de distillation	50
Figure (IV.4) coté extérieur d'un distillateur.....	50
Figure (IV.5) Bac réfléchissant.....	51
Figure (IV.6) Vase de condensation.....	51
Figure (IV.7) Une marmite en acier peinte en noir.....	52
Figure (IV.8) Couverture verrière en double vitrage.....	53
Figure (IV.9) Le Condenseur.....	53
Figure (IV.10) Distillateur solaire.....	54

CHAPITRE V :

Figure(V.1) : Schéma d'acquisition de donnée avec un thermocouple.....54

Figure(V.2) : Les différentes températures mesurées 2^{eme} essai.....55

Figure(V.3) : L'évolution des températures mesurées du 2^{eme} essai.....56

Figure(V.4) : Les différentes températures mesurées 3^{eme} essai.....57

Figure(V.5) : L'évolution des températures au 3^{eme} essai après 2500 s.....58

Figure(V.6) : L'évolution des températures après 5000 s.....58

Figure(V.7) : Les différentes températures mesurées 4^{eme} essai.....59

Figure(V.8): L'évolution des températures au 4^{eme} essai.....60

Nomenclature

Notation	Unités
d : Le numéro du jour a partir du 1 ^{er} janvier	(jrs)
L : La longitude du lieu	(degré)
TSV : Temps solaire vrai	(heur)
TL : Le temps légal	(heur)
h: Hauteur du soleil	(degré)
N : vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaire	/
n: vecteur unitaire porté par la normale à la surface	/
α : l'angle entre le méridien local et la normale au plan	(degré)
γ : l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré	(degré)
I_c : la constante solaire corrigée	(W/m ²)
I_0 : la constante solaire	(W/m ²)

Liste des figures

m : est le numéro du mois dans l'année	(mois)
n : est le numéro du jour dans le mois	(jour)
D^* : Le rayonnement solaire diffus	(W/m ²)
G^* : Le rayonnement solaire global	(MJ/m ² j)

S_{dir} : puissance reçue directe	(W/m ²)
H_{dir} : Energie reçue directe	(J/m ²)
S_{ref} : puissance réfléchie reçue par la surface inclinée	(W/m ²)
H_{ref} : Energie réfléchie reçue par la surface inclinée	(J/m ²)
S_{dif} : puissance diffuse reçue	(W/m ²)
H_{dif} : Energie reçue directe	(J/m ²)
T_r : Coefficient de trouble de LINK	/
P_v : Pression de vapeur	(mmHg)
Φ : flux de chaleur	w
C_p : chaleur spécifique	(j/kg.k)
G_g : rayonnement solaire globale reçue par le distillateur	(w/m ²)
G : rayonnement solaire globale au sol	(w/m ²)
h_c : coefficient d'échange par convection	(w.m ² .k ⁻¹)
h_r : coefficient d'échange par rayonnement	(w.m ² .k ⁻¹)
A : surface	m ²
T : température	k
L_v : chaleur latente de vaporisation	(kj/kg)

Liste des figures

Indices

Ab	Absorbeur
ext	extérieur
ref	Réflecteur extérieur
v ₁	vitre extérieure
v ₂	vitre intérieure
mar	Marmite
is	Isolant
vap	Vapeur
cui	Cuivre
Al	Aluminium
e	Epaisseur
Cond	la conduction

Lettres grecques :

δ : Déclinaison solaire	(degré)
ω : L'angle horaire	(degré)
a : Azimut du soleil	(degré)
Δ : Décalage administrative	(heure)
Φ : La latitude du lieu	(degré)
i : L'angle d'incidence	(degré)
β : Coefficient de trouble atmosphérique	/
α : coefficient d'absorption	/
τ : Coefficient de transmission	/
r : Coefficient de réflexion	/
λ : conductivité thermique	(w/m.k)
ε : Coefficient de Stefan Boltzmann	(W/m ² .K ⁴)
ρ : La masse volumique	(kg/m ³)

Introduction générale

L'eau est la source de vie, elle se trouve dans les océans, les mers, les lacs, les nappes souterraines,...etc. Dans l'atmosphère, l'eau se trouve à l'état vapeur, puis sous l'effet du refroidissement, l'eau passe de l'état vapeur à l'état liquide (pluie) ou solide (neige). Le moteur de ce cycle est l'énergie solaire qui est responsable de ce changement d'état de l'eau pure.

Le manque de cette dernière et la rareté des ressources naturelles, causée à la fois par la sécheresse et la surexploitation des nappes phréatiques, devient un grand problème qui menace la vie des habitants dans plusieurs régions du Monde.

L'augmentation de la population mondiale, associée au développement agricole et industriel a entraîné un accroissement de la demande d'eau douce et l'approvisionnement de l'humanité en eau potable devient un problème de plus en plus aigu.

La terre est recouverte d'eau à 71%. Cependant 98% de celle-ci a une concentration en sel trop élevée pour être potable ou même pour être utilisée dans l'irrigation ou dans l'industrie.

Par ailleurs, les ressources en eau douce sont très faibles. Les statistiques prévoient que dans la prochaine décennie, un tiers de la population mondiale n'aura pas accès à l'eau, ce qui risque d'engendrer des guerres.

Pour faire face à cette pénurie qui menace son existence, l'homme doit s'intéresser au dessalement de l'eau de mer et ou de l'eau salée et particulièrement au dessalement par voie solaire, parfaitement adapté aux régions arides et ou isolées dans lesquelles l'énergie solaire est largement disponible.

Notre travail porte sur l'étude et la réalisation d'un prototype, qui consiste à produire de l'eau douce en utilisant l'énergie solaire.

Le manuscrit est organisé en cinq chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'énergie solaire et l'étude de la course du soleil par rapport à la terre.
- Le second chapitre porte sur les différents types de distillateurs solaires.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude théorique.
- Le quatrième porte sur les méthodes et les outils utilisés.
- Le dernier chapitre comporte les résultats obtenus et discussions.

En fin, le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE I : Gisement solaire

I.1-introduction :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique.

Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.

Afin d'exploiter au mieux cette ressource énergétique et pour un bon dimensionnement des installations solaires, il est nécessaire de connaître la quantité d'énergie solaire disponible à un endroit spécifique à chaque instant de la journée de l'année.

Pour cette raison, on a jugé nécessaire de présenter dans ce chapitre les notions générales sur les coordonnées célestes ainsi que le rayonnement solaire.

I.2- Généralités sur le Soleil

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de $1,39.10^9$ m et à distance moyenne de $1,49.10^{11}$ m de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 aux régions polaires [1]. Le soleil est considéré comme un corps noir avec une température effective de 5777 K. La température des régions intérieures centrales est de l'ordre de 15.10^6 K et la densité est estimée à 100 fois celle de l'eau. Le soleil est en effet, un réacteur de fusion continu avec ses constituants sous forme gazeuse retenue par des forces gravitationnelles, plusieurs réactions de fusion sont déclenchées pour intensifier l'énergie rayonnée par le soleil.

Le processus le plus important est la transformation de l'hydrogène en hélium par une réaction thermonucléaire. Cependant, comme la masse du noyau de l'hélium est moins lourde que celle de quatre protons d'hydrogène, la masse perdue dans la réaction thermonucléaire est convertie en énergie

L'énergie produite à l'intérieur de la sphère solaire à une température de l'ordre de plusieurs millions de degrés est transférée à la surface extérieure puis transférée par rayonnement dans l'espace. Les processus radiatif et convectif sont le résultat des états successifs d'émission, d'absorption et de radiation; la gamme de spectre de rayonnement dans le noyau du soleil est comprise entre la longueur d'onde des rayons X et celle des rayons gamma, avec une longueur d'onde de radiation qui augmente suivant la diminution de la température à de grandes distances.

Dans la structure schématique du soleil illustré dans la figure I.1, on estime que 90% de l'énergie est générée dans la région du disque solaire située entre 0 et 0,23 R, où R est le rayon du soleil qui représente 40% de la masse du soleil. A la distance de 0,7 R du centre, la température diminue d'environ 130 000 K et la densité de 70 kg/m^3 ; là, le processus convectif du soleil devient important et la zone comprise entre 0,7 et 1,0 R est appelée : zone convective. Dans cette zone, la température atteint environ 5000 K et la densité d'environ 10^{-5} kg/m^3 .

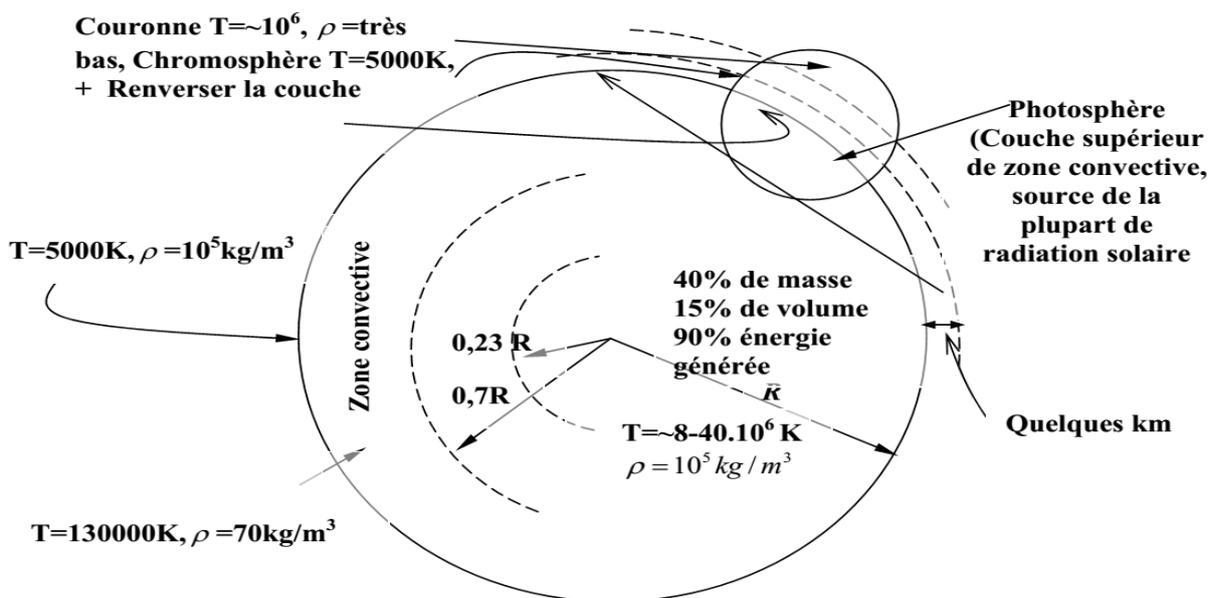


Figure I.1 : La structure du soleil [2]

I.3-Mouvement de la terre :

La terre tourne autour du soleil en une année (365 jours 6 heures et 9 minutes et 4 secondes) avec une vitesse moyenne de 106.000 Km/h, qui n'est pas constante car la terre va plus vite quand elle est près du Soleil, ceci étant démontré par la troisième loi de Kepler [3]. L'orbite de cette révolution est une ellipse, le soleil est placé à l'un de ses deux foyers. Le plan formé par ce mouvement de révolution s'appelle le plan de l'écliptique, le nom d'écliptique provient du fait que la lune doit être dans ce plan pour qu'une éclipse se produise. Le cercle écliptique coupe le cercle équatorial en deux points γ et γ' ; le point γ , appelé point vernal, indique la direction dans laquelle un observateur terrestre verra le Soleil le jour de l'équinoxe de printemps. L'axe des pôles terrestres fait avec l'axe des pôles écliptiques un angle « δ » dont la valeur est égale à $23^{\circ} 27'$, et reste parallèle à lui-même quelle que soit la position de la Terre par rapport au Soleil. C'est ce qu'on appelle l'obliquité de la terre. L'ensemble des constellations traversées par le soleil au cours de l'année s'appelle le Zodiaque.

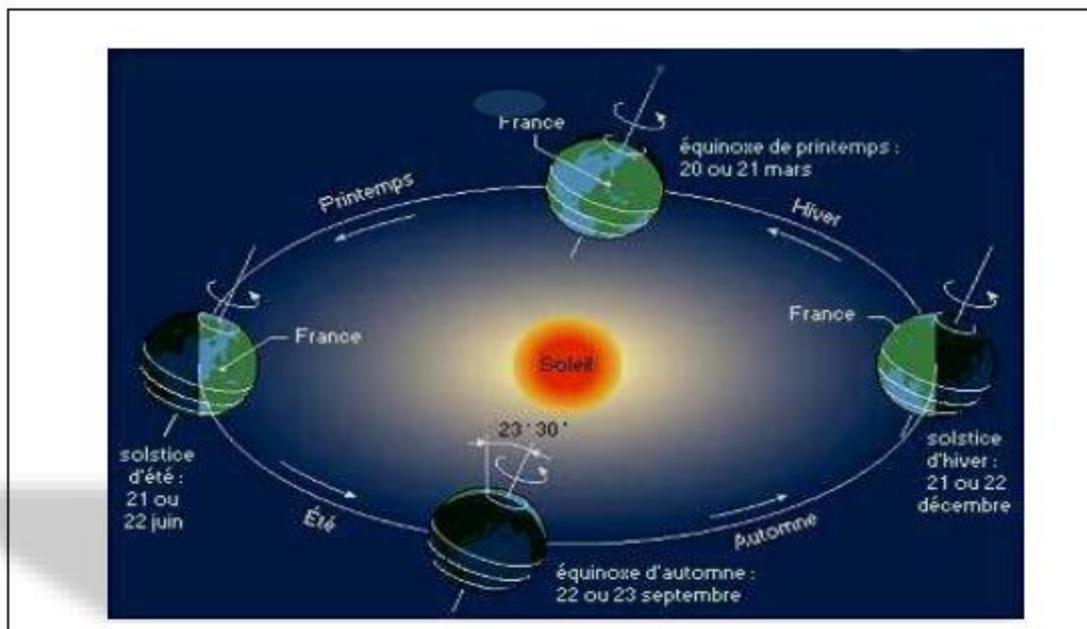


Figure I.2: Mouvement du globe terrestre [1]

I.4- La sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, avec la terre au centre.

On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la figure (figure I.3).

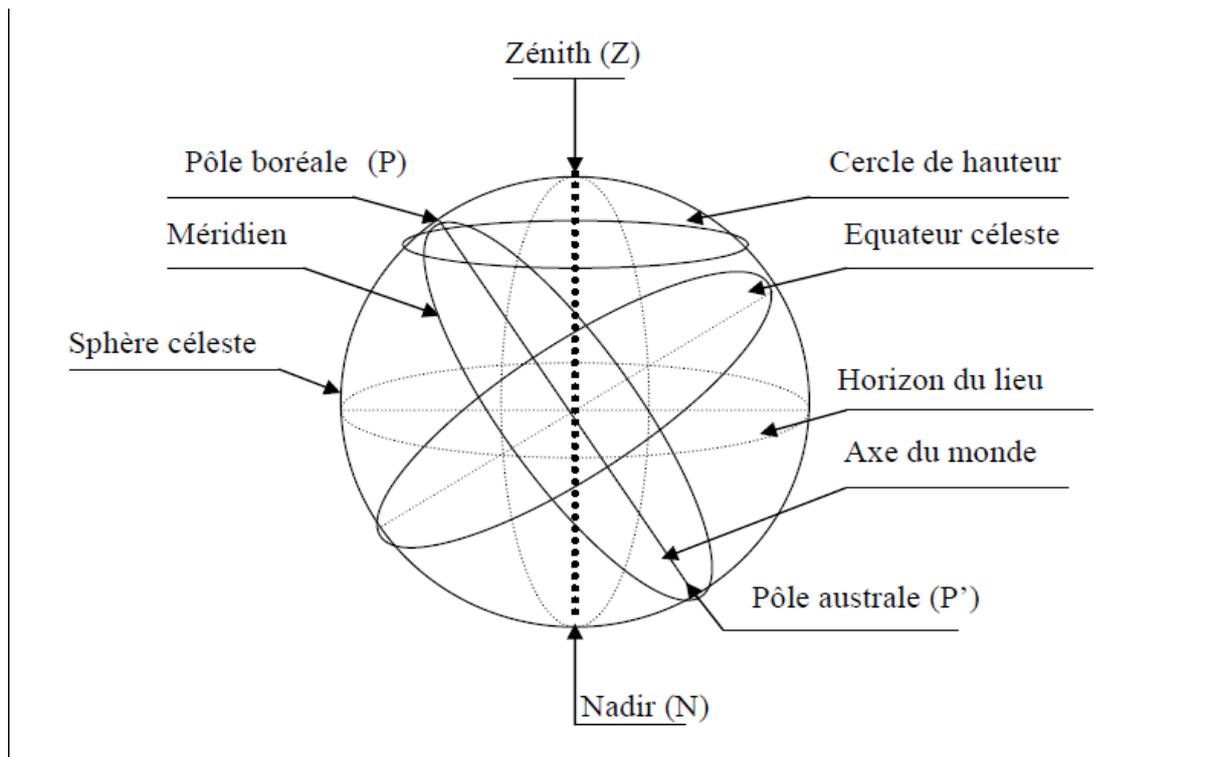


Figure I.3 : La sphère céleste [3]

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

I.5- Les coordonnées célestes :

I.5.1- Les coordonnées géographiques terrestres :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (Figures I.4) :

- **La longitude λ** : Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et négative à l'est du méridien.

- **La latitude Φ** : Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère sud.

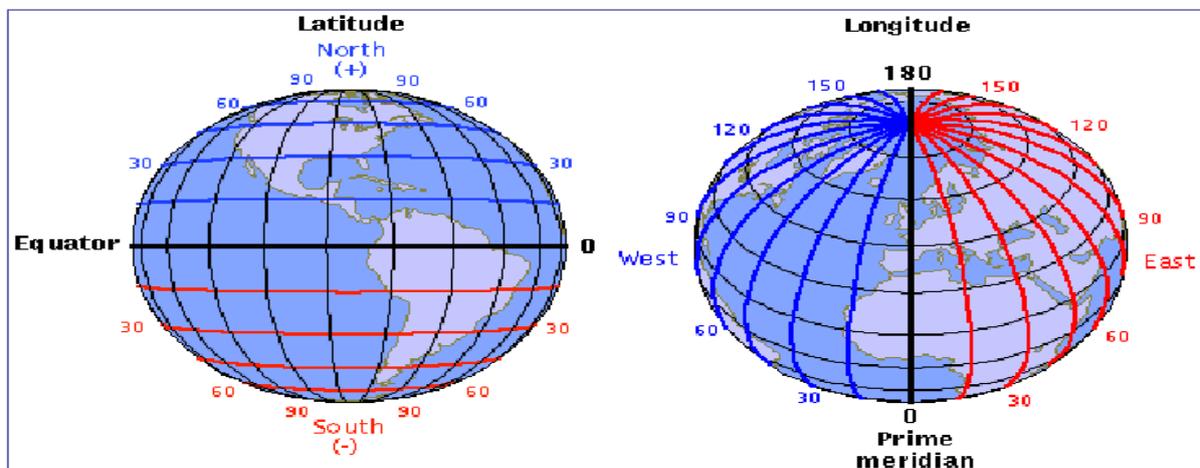
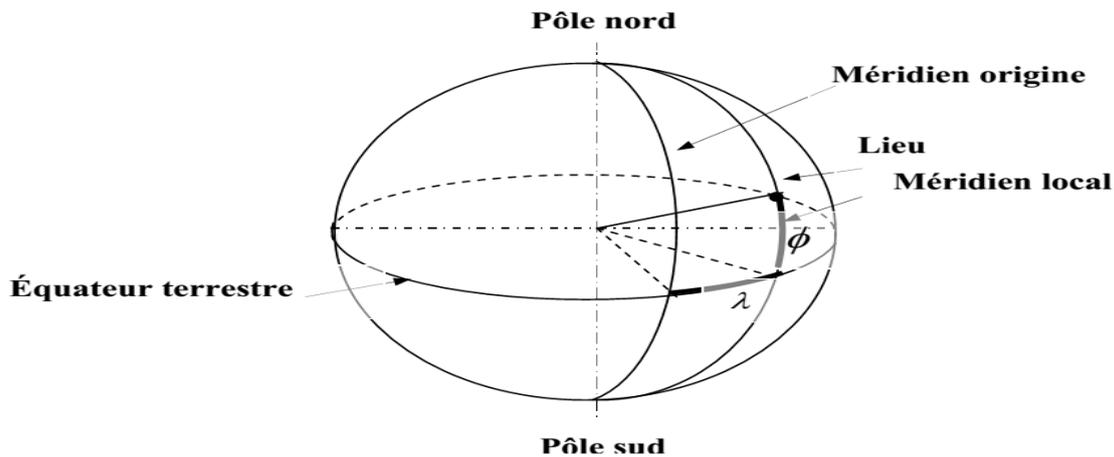


Figure I.4 : les coordonnées géographiques terrestres [4]

I.5.2-Les coordonnées horaires :

Les coordonnées horaires sont liées à l'heure de l'observation et n'ont aucune relation avec la position d'un observateur sur la terre. Elles ont comme plan de référence, le plan de l'équateur. Les coordonnées horaires sont au nombre de deux :

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

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

Où 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.5.2).

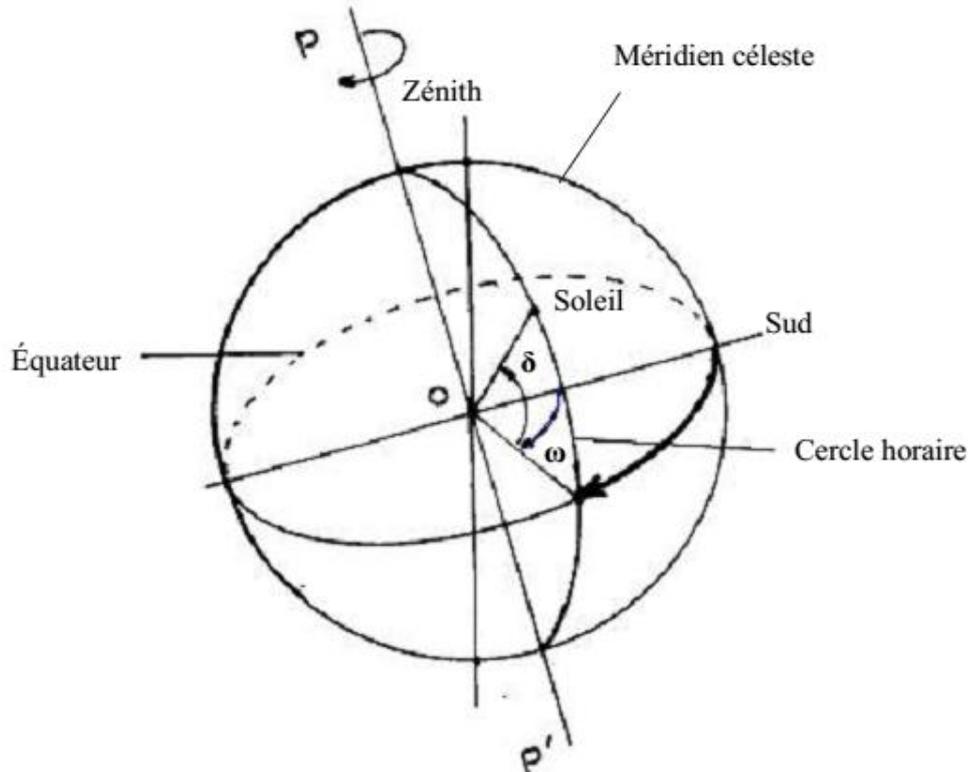


Figure I.5: Les coordonnées horaires [5]

I.5.3-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 sur le plan horizontal du lieu. Il est compté de 0° à 90° vers le **zénith** et de 0° à -90° vers le **nadir**.

On appelle quelquefois **distance zénithale** le complément de l'angle **h** : $z + h = 90^\circ$ (Figure I.5.3).

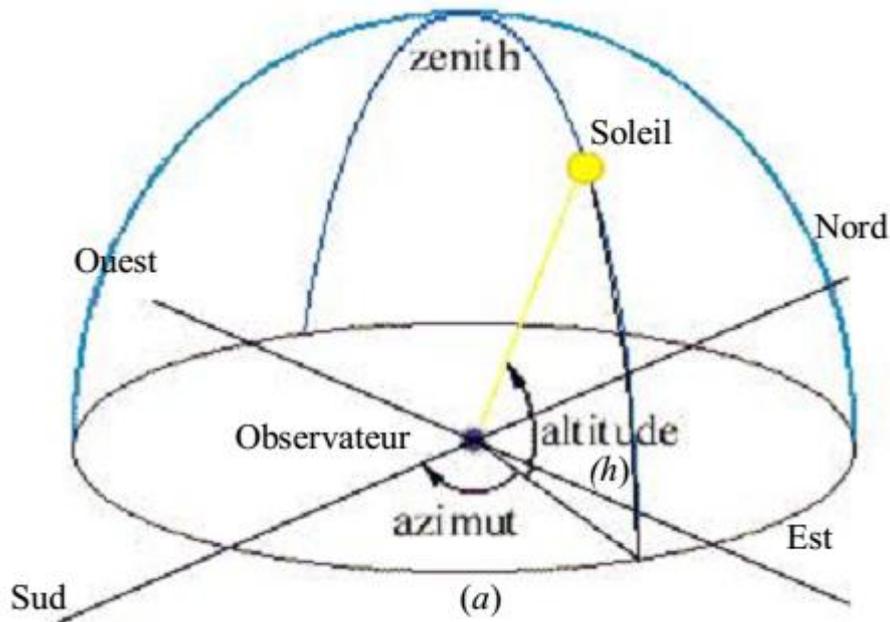


Figure I.6: Les coordonnées horizontales [5]

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

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

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

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

I.6. Les temps solaires :

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 :

$$\text{TSV} = 12 + \omega / 15 \tag{I.2}$$

ω en degré.

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

$$\text{TSV} - \text{TSM} = \text{Et} \tag{I.3}$$

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

$$Et = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \text{ [min]} \quad (\text{I.4})$$

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

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) :

$$TU = TSM - L/15 \quad (\text{I.5})$$

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 :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et le lieu considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

I.7. Direction des rayons solaires :

On considère un plan quelconque caractérisé par deux angles :

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

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

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

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

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

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

$\gamma = 0$, si le plan est horizontal;

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

Soit \vec{N} : le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires ;

\vec{n} : le vecteur unitaire porté par la normale à la surface ;

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

$$\vec{N} \begin{cases} \sin(a) \cos(h) \\ \cos(a) \cos(h) \\ \sin(h) \end{cases}$$

$$\vec{n} \begin{cases} \sin(\alpha) \cos(\gamma) \\ \cos(\alpha) \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{cases}$$

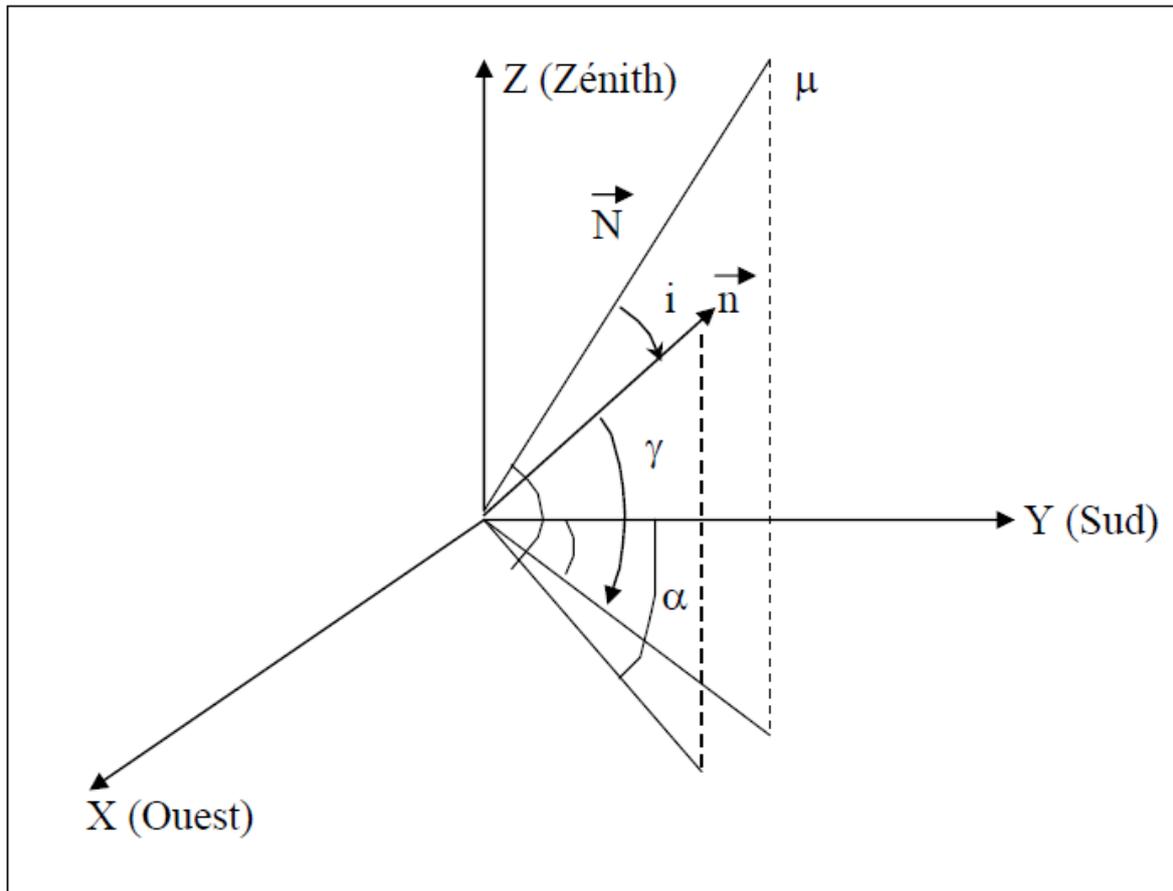


Figure I.7 : Représentation des vecteurs unitaires [6]

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

$$\vec{N} \times \vec{n} = \sin(a) \times \cos(h) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + \cos(a) \times \cos(h) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + \sin(h) \times \sin(\gamma) = \cos(i) \quad (I.6)$$

$$\text{Donc: } \cos(i) = \cos(h) \times \cos(\gamma) \times \cos(a - \alpha) + \sin(h) \times \sin(\gamma) \quad (I.7)$$

Formule de “cos (i)” en coordonnées horaires :

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\cos(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta)) \times \sin(\gamma). \quad (I.8)$$

Cas particuliers :

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

$$\cos(i) = \cos(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta) \quad (I.8 a)$$

Surfaces verticales: $\gamma = 0$

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

$$\cos(i) = \sin(\Phi) \times \cos(\omega) \times \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta) \quad (I.8 b)$$

- Surfaces verticales orientées vers le Nord: $\alpha = \pi$
 $\cos (i) = \cos (\Phi) \times \sin (\delta) - \sin (\Phi) \times \cos (\omega) \times \cos (\delta)$ (I.8 c)

- Surfaces verticales orientées vers l'Est : $\alpha = -\pi / 2$
 $\cos (i) = -\cos (\delta) \times \sin (\omega)$ (I.8 d)

- Surfaces verticales orientées vers l'Ouest: $\alpha = +\pi / 2$
 $\cos (i) = \cos (\delta) \times \sin (\omega)$ (I.8 e)

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

$$\cos (i) = \cos (\delta) \times \cos (\omega) \times \cos (\Phi - \beta) + \sin (\delta) \sin (\Phi - \beta)$$
 (I.8 f)

I.8. La constante solaire :

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

La valeur moyenne actuellement retenue est :

$$I_0 = 1360 \text{ W/m}^2$$
 (I.9)

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

$$I_c = I_0 \times [1 + 0.0034 \times \cos (0.948 \times N)]$$
 (I.10)

Où $I_0 = 1360 \text{ W/m}^2$;

N: est le numéro du jour à partir du 1^{er} janvier;

I.9. Potentiel de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie dégagée par le soleil grâce à son rayonnement, et directement à travers l'atmosphère. La terre reçoit chaque année 1070000×10^{15} Wh d'énergie solaire, c'est une quantité considérable, soit 8.000 fois la consommation énergétique mondiale. Pour couvrir les besoins énergétiques de la planète, exploiter seulement 0,01% de cette énergie suffirait. Sa production intermittente, en fonction de l'ensoleillement (nuage, nuit, saison), et la difficulté de son stockage, représente l'un des freins au développement de l'exploitation de cette source renouvelable, non polluante et abondante. L'énergie solaire, est en fait la somme de rayonnements électromagnétiques

qu'envoie le soleil, particulièrement la partie de ce rayonnement qui impacte la terre. Ce rayonnement est une source de lumière, de chaleur, de vie, etc.

I.10. Le Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toute la gamme de rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. En effet, une partie du rayonnement solaire est réfléchi par l'atmosphère, une autre partie y est diffusée et le reste atteindra la surface de la terre, formant le rayonnement global qui est le rayonnement solaire restant à disposition à la surface de la terre. Il comprend deux composantes: une composante directe (I^*) et une composante diffuse (D^*).

La somme de ces deux rayonnement est appelée solaire globale (G^*).

Puissance et énergie reçue par un récepteur plan :

La puissance ou l'énergie reçue par une surface est tributaire de plusieurs facteurs selon son orientation et son inclinaison. En revanche, elle se compose des mêmes éléments de base que sont les quantités directe, diffuse et réfléchi :

Les grandeurs directes : Reçues directement du soleil en traversant l'atmosphère sans qu'elles ne soient restituées ou réfléchies:

S_{dir} : puissance reçue directe (W/m^2).

H_{dir} : énergie reçue directe (J/m^2).

Les grandeurs réfléchies : Ce sont les quantités réfléchies par l'entourage du capteur ; les plus prépondérantes sont dues au sol (albédo) et au ciel :

S_{ref} : puissance réfléchi reçue par la surface de captation inclinée (W/m^2).

H_{dir} : énergie réfléchi reçue par la surface de captation inclinée (W/m^2).

I.10.1. Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil par ciel clair. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol.

Il ya deux types :

a- l'éclairement direct :

-pour un plan horizontal :

$$S_{dir} = I^* \sin (h) \tag{I.11}$$

$$I^* = 1370 \exp - \left(\frac{Tr}{0,9+9,4 \sin(h)} \right) \quad (I.12)$$

$$T_r = 2,4 + 14,6\beta + 0,4(1+2\beta) \ln(P_v) \quad (I.13)$$

β est le coefficient de trouble atmosphérique:

0,05 zone rurale

0,1 zone urbaine

0,2 zone industrielle

P_v : pression de vapeur (mm Hg)

-pour une surface inclinée :

$$S_{dir}(\gamma, i) = I \cdot \cos\theta \quad (I.14)$$

b-Irradiation direct :

$$H_{dir} = \int_l^c I_{dif} dt \quad (I.15)$$

I.10.2. Rayonnement diffus :

Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit.

Il ya deux types :

a- Eclairage diffus S_{dif}

-Pour une surface horizontale :

$$S_{dif} = (54,8 \sin h) (Tr - 0,5 - \sqrt{\sin h}) \quad (I.16)$$

-Pour un plan incliné:

$$S_{dif}(i, \gamma) = \frac{1+\cos i}{2} S_{dif} \quad (I.17)$$

b- irradiation diffuse H_{dif} :

$$H_{dif} = \int_l^c I_{dif} dt \quad (I.18)$$

I.10.3 Rayonnement réfléchi:

C'est la partie réfléchi par le sol.

-pour un plan horizontal ($R=0$)

-pour un plan incliné :

$$R(i, \gamma) = (S_{dir} + S_{dif}) \rho \left(\frac{1-\cos i}{2} \right) \quad (I.19)$$

ρ (albédo) : facteur de réflexion du sol.

I.10.4 : Rayonnement global :

Est la somme des trois types de rayonnement, le direct, le diffus et l'albédo (réfléchi par le sol).

Pour un plan horizontal : $G^* = S_{\text{dir}} + S_{\text{dif}}$

Pour un plan incliné : $G^* = S_{\text{dir}} + S_{\text{dif}} + R$

I.11 : Rayonnement solaire en Algérie :

L'Algérie est un pays qui possède un gisement solaire important, ainsi son climat, la puissance maximale en tout point dans le pays est d'environ (1 kW/m^2).

L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de Juillet) dépasse les $6 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ et l'énergie annuelle maximale moyenne en Algérie est de l'ordre $2500 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$.

La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques du monde :

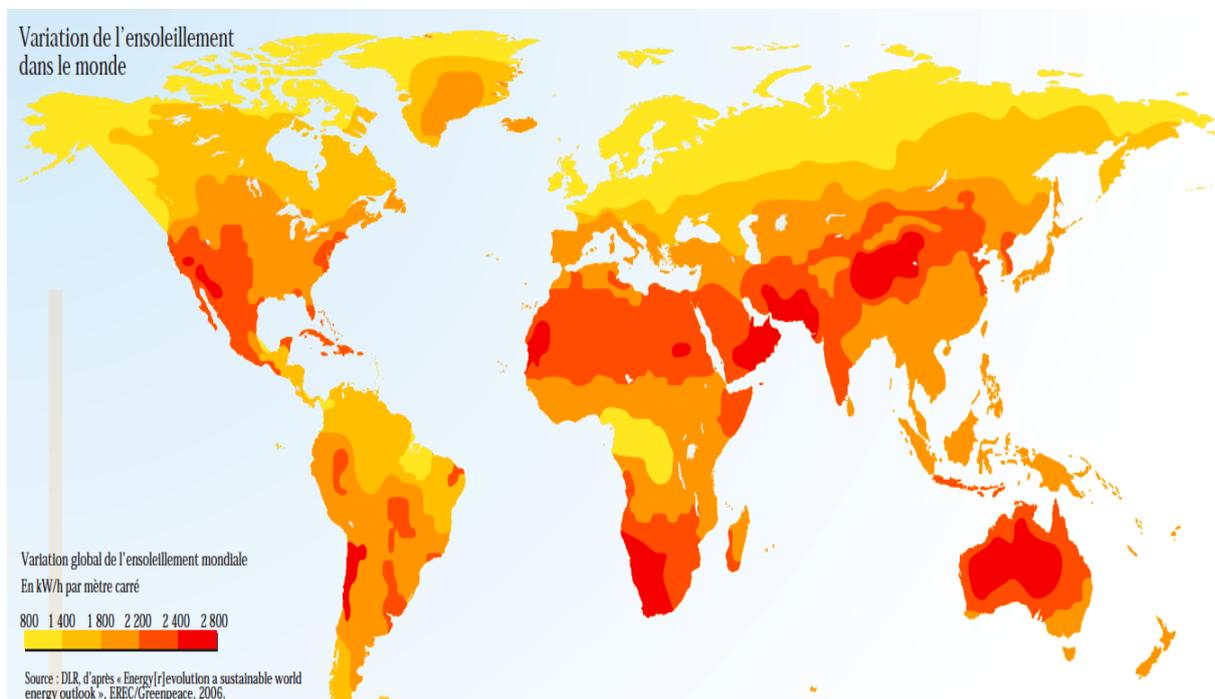


Figure I.8 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [1]

La distribution de l'énergie reçue en Algérie, en moyenne annuelle, et en moyenne mensuelle est donnée par les figures ci-dessous. Elles présentent les différents niveaux énergétiques qui donnent ainsi un découpage du pays en régions iso-énergétiques.

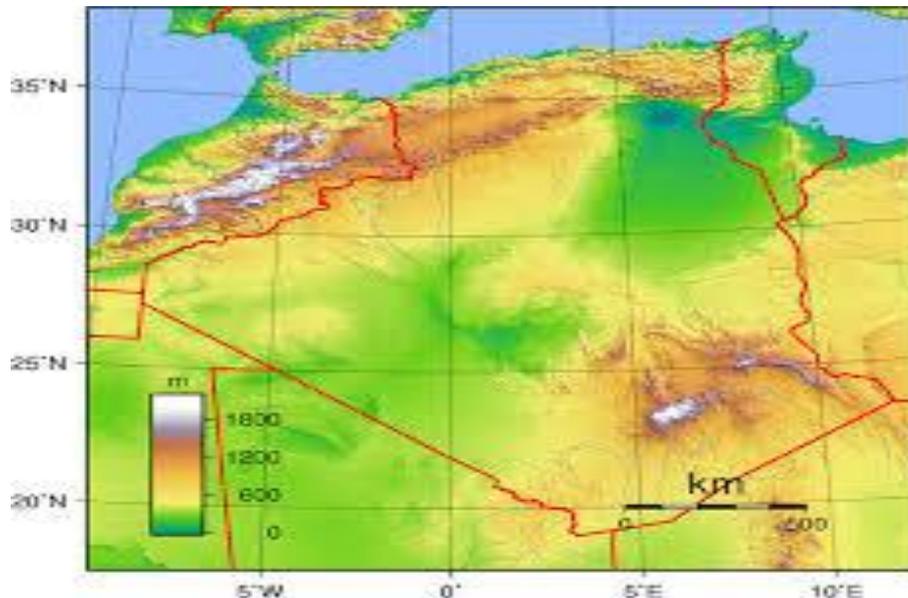


Figure I.9 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [7]

I.12. Conclusion :

L'énergie solaire est la source de base et la plus importante pour tous les potentiels énergétiques renouvelables.

Et afin d'exploiter au mieux cette ressource énergétique et pour un bon dimensionnement des installations solaires, il est nécessaire de connaître la quantité d'énergie solaire disponible à un endroit spécifique à chaque instant de la journée et de l'année.

Pour cette raison, on a jugé nécessaire de présenter dans ce 1^{er} chapitre les notions générales sur les coordonnées célestes ainsi que le rayonnement solaire.

Chapitre II : connaissances générales sur la distillation solaire

II.1. Introduction:

Rechercher et produire de l'eau potable, à partir d'autres ressources naturelles, est d'une extrême importance.

Or, au voisinage de plusieurs régions, manquantes d'eau potable, existe des sources d'eaux saumâtres contenant un certain pourcentage de sel, si ce n'est l'eau de mer.

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

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

II .2. Définition :

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée [8]. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente.

Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel, voir la figure ci-dessus (Figure II.1).

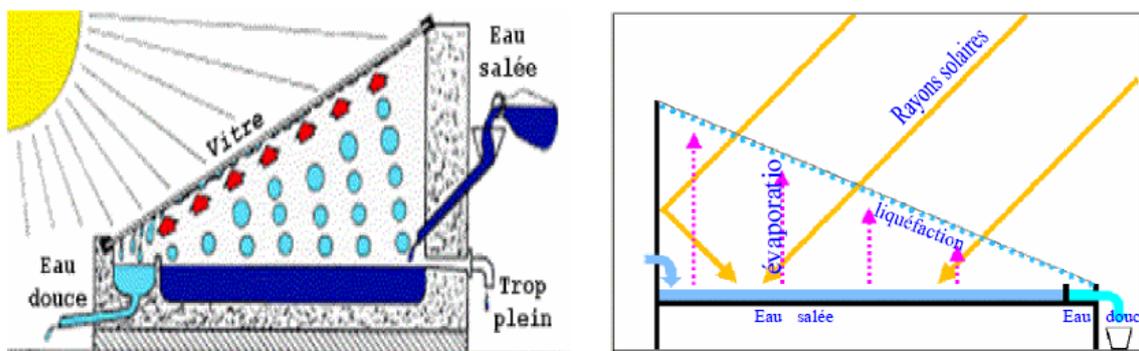


Figure II.1 : principe de construction et de fonctionnement d'un distillateur solaire [8].

II.3. Origine et historique de la distillation solaire :

La distillation solaire a été utilisée depuis plusieurs siècles où :

En **1551**, les premiers appareils pour distiller l'eau salée ont été conçus par les alchimistes arabes ; c'est une certitude rapportée par Mouchot [9].

En **1862**, le chimiste français Lavoisier a utilisé de larges lentilles en verre pour concentrer les rayons solaires afin de distiller l'eau contenue dans des flacons [10].

En **1872**, fabrication du premier distillateur solaire conventionnel de 5.000 m² de surface à Las-Salinas dans le nord du Chili par l'ingénieur suédois Carlos Wilson. A cause du problème d'accumulation rapide des sels dans le bassin, la nécessité d'un nettoyage régulier du distillateur a donné une fin de fonctionnement de ce dernier en 1910 [11]. En **1920**, Kaush a utilisé des réflecteurs métalliques pour concentrer les rayons solaires [11]. Au début des années 30, Trivinof avait proposé un distillateur incliné [12], et en **1938** Abbot a utilisé des réflecteurs cylindriques paraboliques pour concentrer les rayons solaires acheminés dans des tubes contenant de l'eau [12].

En **1945**, invention d'un nouveau distillateur solaire type sphérique, où un grand nombre de ce modèle a été utilisé pendant la 2^{ème} guerre mondiale.

En **1952** l'université de Californie a commencé des investigations dont le but est d'étudier les effets de certains paramètres affectant le rendement tels que la géométrie et les différents matériaux d'isolation [13].

En **1953** Cyril Goméla a développé en Algérie une dizaine de types de distillateurs solaires qui ont été ensuite testés et commercialisés à travers l'Afrique du nord, le Sénégal et l'Australie [14].

Afin d'augmenter le rendement, Savornin et Le Jeune ont aussi étudiés d'autres types de distillateurs solaires inclinés.

En **1960** trois grandes stations de distillateurs solaires ont été construites en Tunisie.

En **1962** le groupe d'énergie solaire de l'Agence Tunisienne de l'Energie Atomique, a étudié activement la distillation solaire.

Entre **1963** et **1967** le CSIRO d'Australie (Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization) a construit et testé plus de 8 distillateurs dans le but d'améliorer l'efficacité par l'étude de l'effet de certains paramètres [15].

En **1969** Cooper a proposé une simulation pour étudier les performances d'un distillateur solaire à effet de serre [16].

II.4. Principe du distillateur solaire :

Le distillateur solaire est le procédé de dessalement le plus ancien et le plus simple puisqu'il utilise l'énergie du soleil pour distiller l'eau. Ce procédé élimine également les impuretés telles que le sel, les métaux lourds et les micro-

organismes. Le distillateur solaire est composé d'une serre de verre fermée et exposée au soleil. L'eau à dessaler est conduite dans la serre, l'épaisseur de l'eau étant de quelques centimètres. Le rayonnement « UV » solaire traverse le toit de verre et est absorbé en grande partie par l'eau et le fond du bac, pour être converti en énergie thermique. L'intérieur de la serre s'échauffe et émet un rayonnement « IR ». Le verre étant opaque aux rayons « IR », ce rayonnement ne peut pas sortir et son énergie fait élever la température de l'air intérieur de la serre, surchauffé et saturé en vapeur d'eau qui finit par se condenser au contact de la paroi en verre. Le condensat (eau douce) descend par gravité le long de la paroi pour être recueilli en bas du vitrage [9].

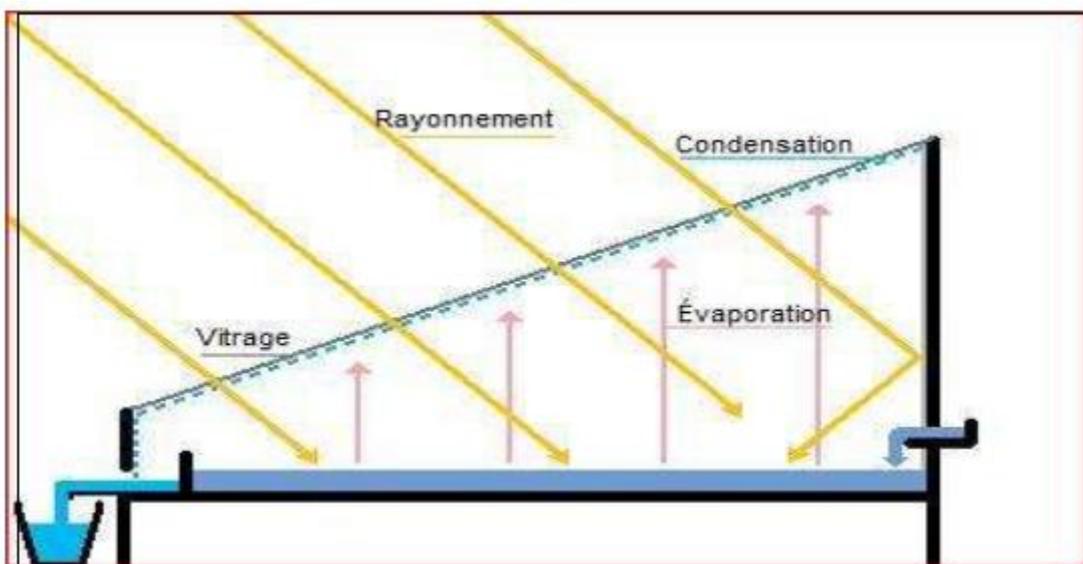


Figure II.2 : distillateur solaire simple à effet de serre [8]

II.5. Type de distillation solaire :

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

II.5.1. Distillateur solaire à multiples effets :

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80 °C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange. La vapeur ainsi produite dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet, où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le deuxième effet et ainsi de suite [17]. La multiplication du nombre d'effets est un paramètre de réduction de la consommation.

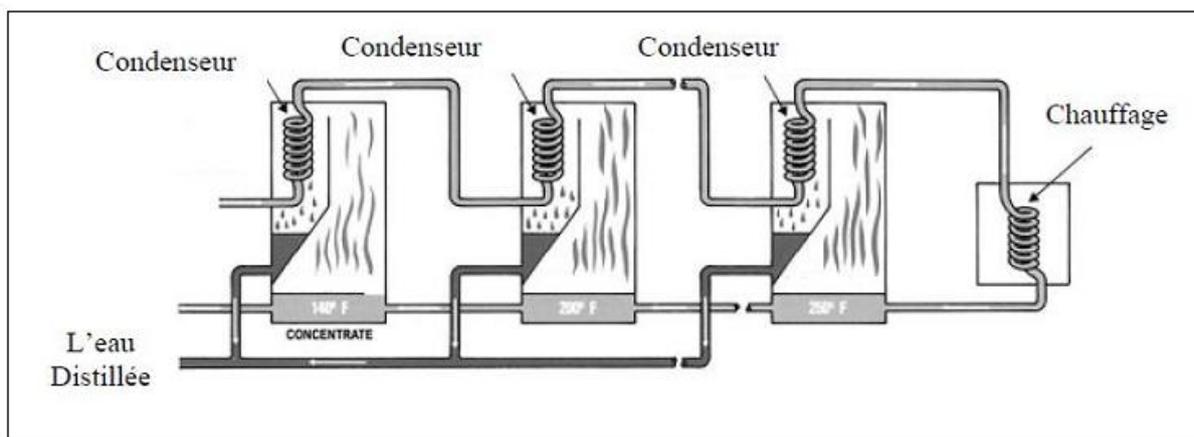


Figure II.3 : le principe de technique de flash à multi effets

II.5.2. Distillateur solaire à effet de serre :

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée. L'eau salée dans le bac va se chauffer, Avec l'augmentation de la température une partie de l'eau qui a reçue suffisamment d'énergie (exactement la chaleur latente de vaporisation) s'évapore et cette dernière se liquéfie sur la surface interne de la vitre [17].

Eventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et qui finissent par tomber dans le récupérateur situé au coin. plusieurs types de distillateurs solaires ont été réalisés suivent ce principe , les plus répandus sont ceux du type à effet de serre car ils présentent l'avantage d'être simples, faciles à réaliser, de conception rustique, et peu coûteux.

Parmi ces derniers on distingue deux types :

- a) **Les distillateurs statiques :** Ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est immobile.

Les principales géométries rencontrées sont représentées ci-dessous

✚ Distillateur plan à pente unique :

Ce système de distillateur est essentiellement constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre, la partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau saumâtre ou eau de mer). Sous l'action de flux solaire, transmis par la couverture transparente l'eau s'échauffe et une partie de celle-ci, la vapeur produite se condense sur la face intérieur de la vitre et le condensât est récupère

par un récepteur, un appoint d'eau compense le débit distillât. A fin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur les parois latérales et inférieure sont isolées.

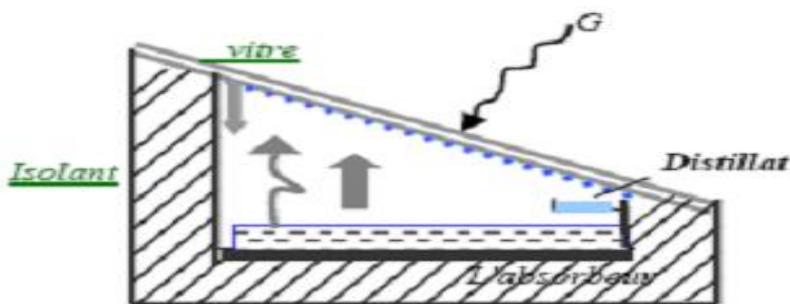


Figure II.4 : distillateur solaire à pente unique [8]

Distillateur plan à double pente :

Ce système suit typiquement le principe précédent seulement ce dernier présente deux cotés le 1^{er} est exposé au soleil et l'autre coté joue le rôle de condenseur qui donne l'avantage de l'accélération de la condensation.

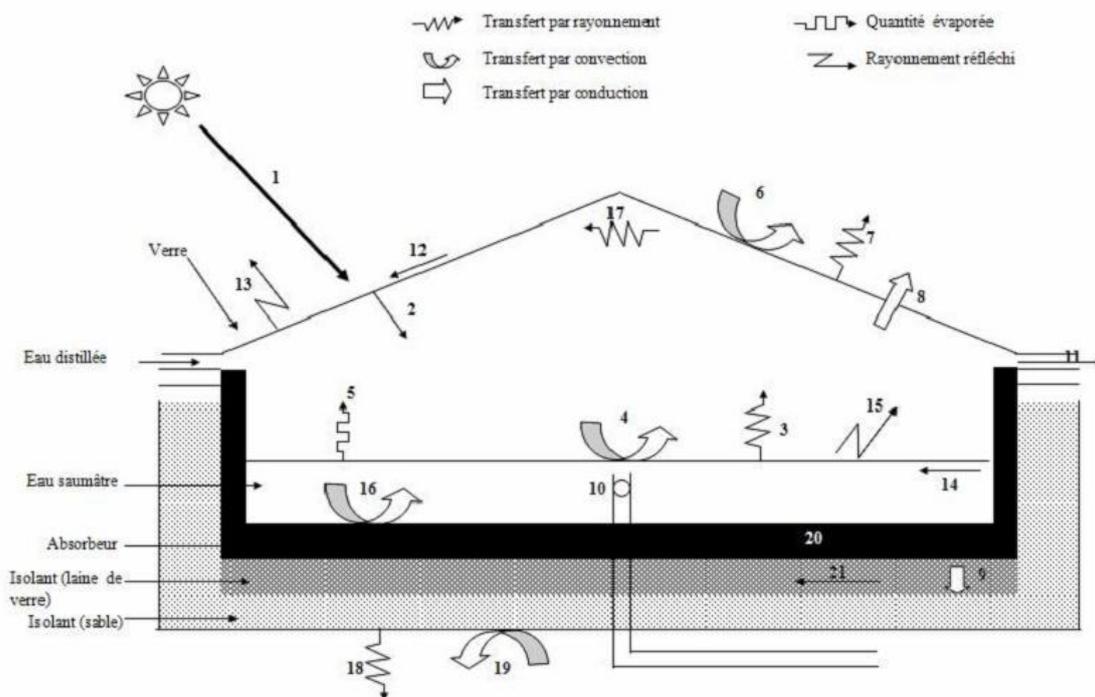


Figure II.5 : distillateur à double pentes [18]

✚ Distillateur incliné à cascade :

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 n'a été exécuté qu'en petites tailles, ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux [19].

Ce type de distillateur a un absorbeur sous forme d'escaliers ; une géométrie qui permet d'avoir:

- Une surface d'échange de chaleur plus grande.
- Un ralentissement du mouvement de la masse d'eau sur l'absorbeur ; ce qui donne à la masse d'eau suffisamment de temps pour qu'elle se charge en calories.
- Une réduction de la distance entre la vitre et la saumure ; ce qui améliore les performances du distillateur.

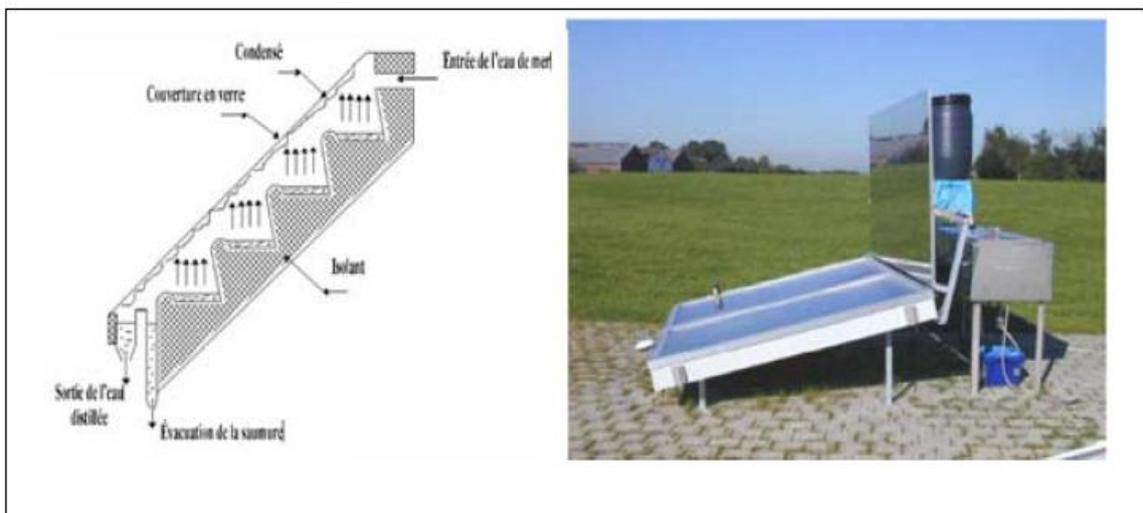


Figure II.6 : distillateur incliné à cascade [20]

✚ Distillateur sphérique :

C'est un distillateur en plexiglas (figure II.6), composé de trois parties principales; une demi-sphère supérieure qui transmet le rayonnement solaire d'une part et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi-sphère inférieure qui récupère le distillât et un bac horizontal en métal noir contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian [21].

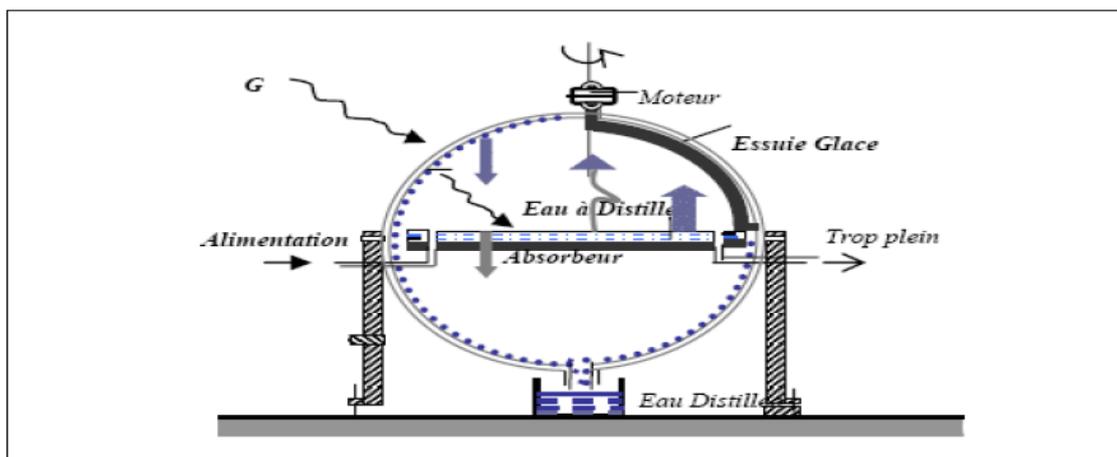


Figure II.7 : distillateur solaire sphérique [22]

Un essuie-glace entraîné par moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation au rayonnement, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes.

Le principe de fonctionnement est similaire à celui du distillateur plan.

b) Les distillateurs à ruissellement :

Ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est en mouvement. Les principales géométries rencontrées sont représentées Ci-dessous :

+ Distillateur solaire à mèche :

Dans un distillateur à mèche, l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture poreuse, absorbant les rayonnements. Deux avantages sont revendiqués sur les distillateurs de bassin. D'abord, la mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (réduisant la réflexion et présentant une grande surface efficace). En second lieu, moins d'eau d'alimentation est dans le distillateur à tout moment donc l'eau est chauffée plus rapidement et a une température élevée. Les distillateurs simples à mèche sont plus efficaces que les distillateurs à bassin et quelques conceptions sont prétendues pour coûter moins qu'un distillateur à bassin de même rendement [19].

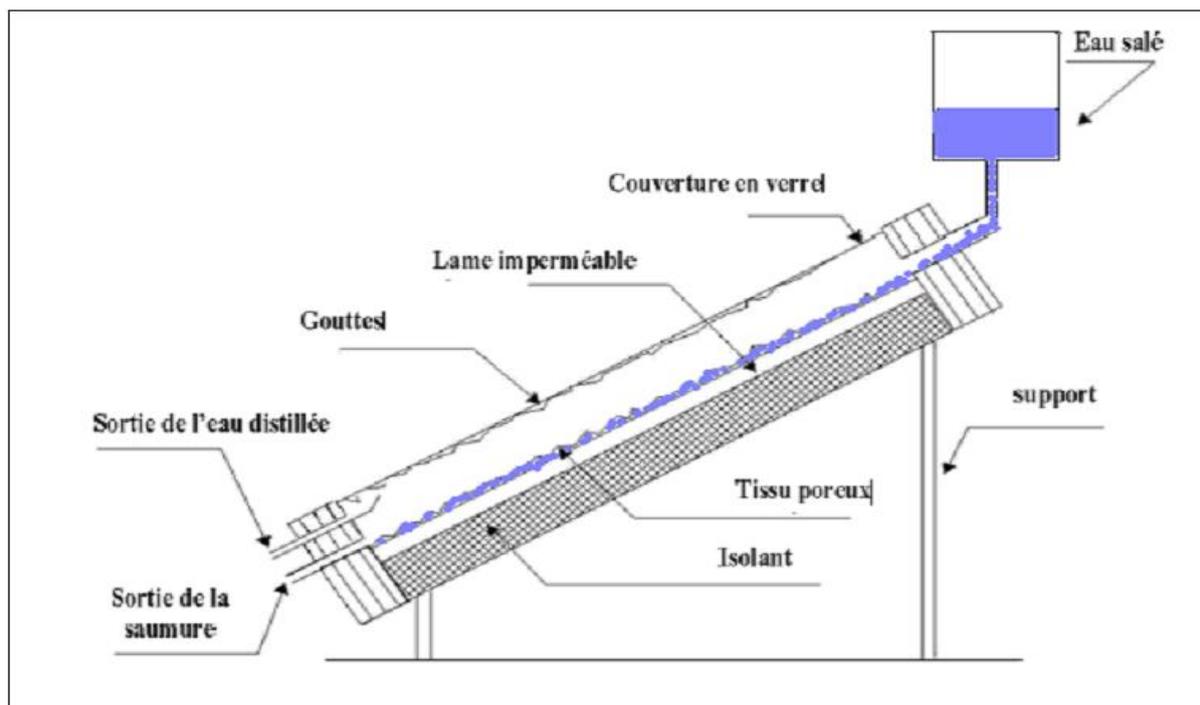


Figure II.8 : distillateur solaire à mèche [20]

L'appareil incliné à mèche permet de maintenir à peu près constante l'épaisseur de la lame d'eau.

✚ Distillateur solaire vertical :

Le distillateur solaire vertical est composé:

- D'un capteur solaire permettant la captation du rayonnement solaire.
- D'un compartiment d'évaporation.
- D'un compartiment de condensation.

La figure II.8, présente le principe de fonctionnement du distillateur vertical. Le distillateur est alimenté par l'eau saumâtre à partir d'un réservoir (1), le distillateur est connecté au réservoir à l'aide d'un tube en cuivre (2), le débit d'eau à l'entrée du distillateur est régulé à l'aide d'une vanne (3). La position du réservoir d'alimentation permet l'alimentation du distillateur par un débit constant.

Un distributeur d'eau (4), muni de perforations sur la longueur, permet la distribution de l'eau en film sur le tissu spongieux (5), l'eau ruisselle sur le tissu, et la saumure est évacuée en bas (6).

L'eau qui s'écoule derrière l'absorbeur (7), s'évapore dans le compartiment d'évaporation, le mélange d'eau et d'air à l'intérieur saturé en vapeur d'eau circule naturellement à travers les deux ouvertures (8) réalisées dans une cloison isolée vers le compartiment de condensation (9), et la vapeur se condense au contact de la plaque de condensation à l'arrière du distillateur. La collecte de

l'eau se produit dans la gouttière (figure II.8) fabriquée en dessous de la plaque de condensation.

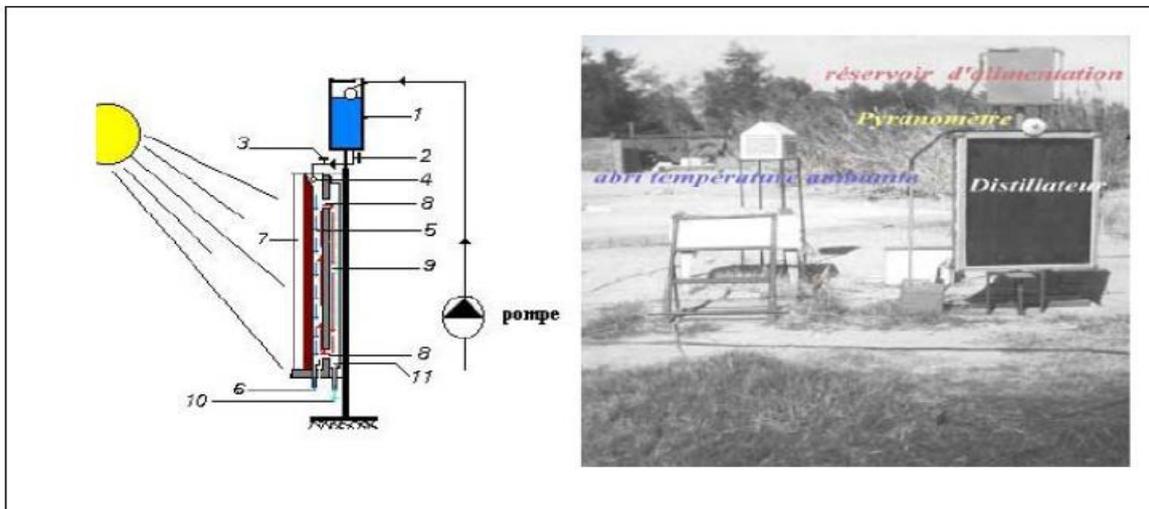


Figure II.9 : distillateur solaire verticale [23]

Le distillateur à ruissellement 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.5.3. Distillateur à concentration :

Les distillateurs solaires à concentration fonctionnent selon le principe de la concentration et de la réflexion des rayons solaire. Ils utilisent une surface réfléchissante dont la forme permet de concentrer en un même point la réverbération de l'énergie. De nombreux modèles de réflecteurs existent :

- **Cylindro-parabolique**: cette géométrie permet une focalisation linéaire, elle est utilisée dans le cas des collecteurs à tubes sous vides ou les centrales solaires thermiques de type Luz.



Figure II.10 : concentrateur cylindro-parabolique

- **Sphérique:** le réflecteur sphérique concentre le rayonnement solaire sur un foyer linéaire mobile porté par un rayon de la sphère orienté en direction du Soleil.



Figure II.11 : concentrateur sphérique

- **Parabolique:** c'est le type de géométrie le plus utilisé. Il permet de concentrer les rayons lumineux en un point pour obtenir de très hautes températures. Il est souvent utilisé dans le cas des cuiseurs solaires ou couplé à un moteur Stirling.



Figure II.12 : concentrateur parabolique

- **Plan:** le réflecteur plan est en général mobile afin de suivre le Soleil, on parle alors d'héliostat plan. Ce système est utilisé dans le cas des centrales solaires thermiques à tour ou couplé à un miroir parabolique comme dans le cas des fours solaires de type Odeillo.



Figure II.13 : Le four solaire

II.5.4. Distillateurs avec stockage de chaleur :

La variabilité de l'énergie solaire incidente nécessite son stockage dès qu'il faut adapter la production à la consommation. Par définition «stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante pour la récupérer quand c'est nécessaire.

Dans le but d'améliorer le temps de fonctionnement du distillateur qui est conditionnée par la présence du rayonnement solaire, le stockage de chaleur devient une nécessité.

On distingue deux catégories :

II.5.4.1. Stockage avec chaleur sensible :

Ce type de stockage est le moyen le plus ancien, le plus simple et le moins onéreux, il utilise une source de chaleur pour augmenter la température du matériau. L'eau stocke de l'énergie dans une gamme de température excluant le changement d'état. Son inconvénient majeur, est sa faible densité énergétique, qui implique des volumes de stockage importants

II.5.4.1. Stockage avec chaleur latente :

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est emmagasinée grâce au changement d'état d'un matériau de stockage. La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et à pression constantes, la quantité de chaleur utilisée pour le stockage est exprimée par :

$$\Phi = m \cdot L$$

m (kg), est la masse du matériau de stockage et L ($J \cdot kg^{-1}$) la chaleur massique de changement d'état du matériau. Les matériaux utilisés sont appelés

Matériaux à Changement de Phase « MCP ». Ces matériaux changent de phase à une température précise, ou dans une plage de température déterminée (cas des mélanges non eutectiques). Il existe trois groupes de matériaux à changement de phase :

- Les MCP inorganiques.
- Les MCP Organiques.
- Les MCP Eutectiques.

II.6. Principe de la réflexion :

La réflexion d'un rayon lumineux sur une surface est depuis l'Antiquité un phénomène connu et appliqué.

II.6.1. Réflexion sur une surface plane :

Considérons d'abord le cas de la réflexion d'un rayon sur une surface plane. Deux lois permettent de décrire géométriquement (donc sans tenir compte de la nature ondulatoire de la lumière) ce que devient un rayon après réflexion sur une surface plane :

Première loi : le rayon incident et la normale à la surface (droite perpendiculaire à la surface passant par le point du contact du rayon incident sur la surface) définissent un plan : le plan incident. Le rayon réfléchi appartient à ce même plan.

Deuxième loi : l'angle (appelé angle incident) entre le rayon incident et la normale est égale à l'angle (appelé angle de réflexion) entre la normale et le rayon réfléchi.

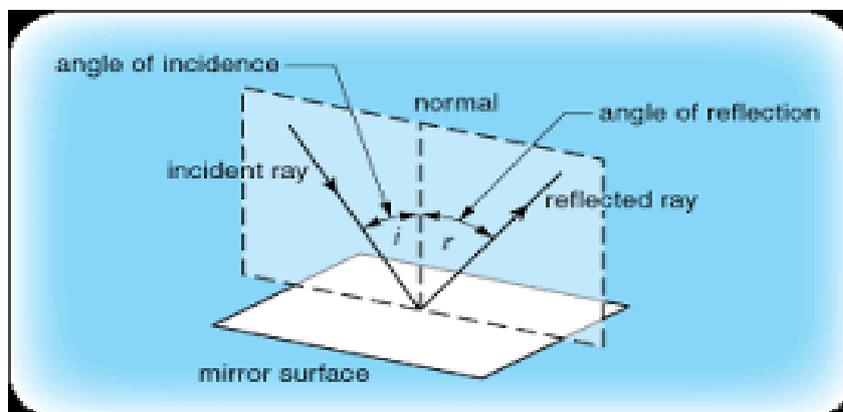


Figure II.14 : réflexion sur une surface plane

II.6.2. Réflexion sur une surface courbe :

Si la surface réfléchissante est courbe, celle-ci peut être décomposée en une multitude de plan infiniment petits. Ainsi, au point d'impact du rayon incident sur la surface réfléchissante, il faut considérer le plan tangent en ce point. On obtient ainsi la normale du plan tangent au point, et les deux lois de la réflexion sont alors d'application pour déterminer le rayon réfléchi.

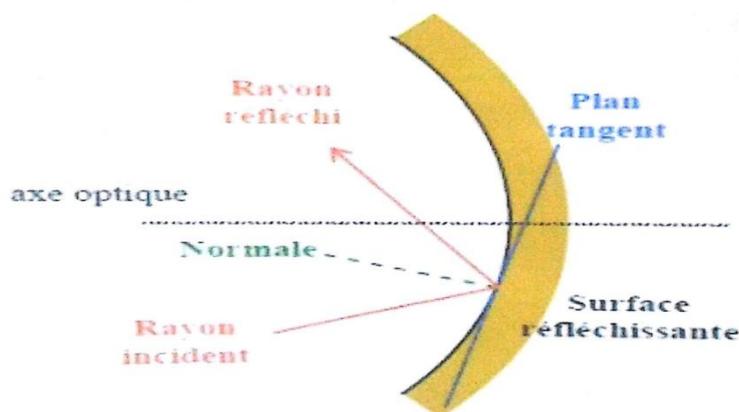


Figure II.15 : Réflexion sur une paroi courbée

II.7. Technologie du bassin :

Le bassin est réalisé soit en béton dans le cas de grands distillateurs, soit en métal (aluminium) 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 m² dont la construction s'appuie sur des méthodes génie civil.

II.8. Besoins en énergie pour la distillation de l'eau :

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.9. Le cas d'un distillateur d'urgence :

Pour fournir l'eau potable de secours sur la terre, un distillateur très simple peut être fait. Il se sert de l'humidité de l'air [19]. Tout ce qui est exigé est une couverture en plastique, une cuvette ou un seau, et un caillou (Figure II-9).

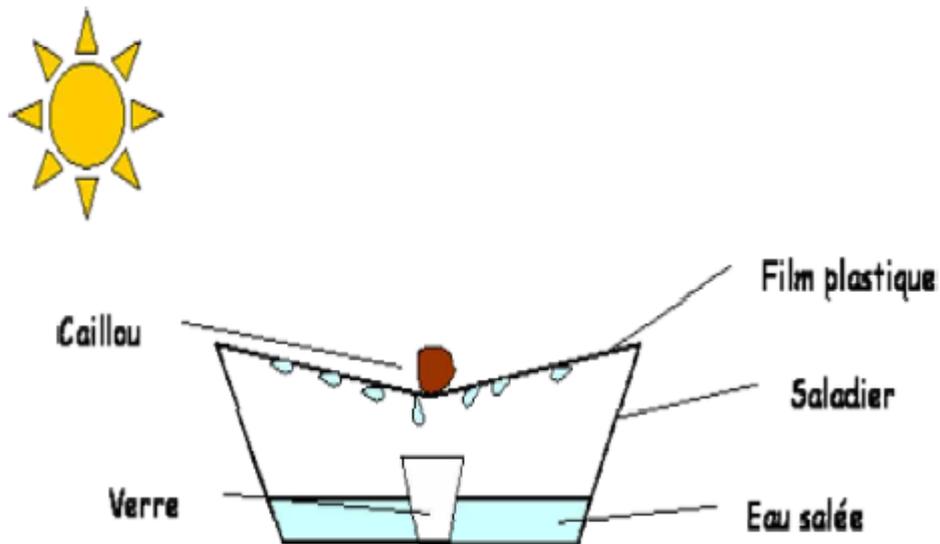


Figure II.16 : distillateur solaire d'urgence

II.10.CONCLUSION :

Ce second chapitre porte sur les différents procédés de la distillation solaire et les différents modèles des distillateurs qui existent, comme il récapitule le principe de fonctionnement de chaque dispositif.

Et nous avons accordé l'importance au stockage de chaleur avec ces divers types et utilisations.

Chapitre III : Etude théorique d'un distillateur solaire

III.1. Paramètres influant 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.

III.1.1. Paramètres internes :

On distingue notamment :

III.1.1.1. Les paramètres de position :

- L'emplacement du distillateur est choisi de façon à éviter les obstacles " L'effet de masque", qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.
- L'orientation dont dépend essentiellement le fonctionnement du distillateur pendant la journée. Généralement on opte pour :
 - Une orientation Est pendant la matinée.
 - Une orientation Ouest pendant l'après - midi.
 - Une orientation Sud si le distillateur doit fonctionner toute la Journée.
- L'inclinaison: généralement elle est liée à la période de fonctionnement durant l'année.
 - Pour un fonctionnement estival, le distillateur doit être incliné d'un angle : $B = \phi - 10^\circ$, Ou ϕ est l'altitude du lieu.
 - Pour un fonctionnement hivernal, l'inclinaison est $B = \phi + 20^\circ$.
 - Pour un fonctionnement annuel, on choisit $B = \phi + 10^\circ$.

III.1.1.2. paramètre de construction :

- **La couverture :**

La couverture verrière intervient essentiellement par sa nature, telle que transmettre le maximum de rayonnement solaire et être opaque à l'infrarouge. [24] Un tel dispositif représente donc un véritable piège au rayonnement solaire. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture (l'effet de serre).

Il faut qu'elle soit non hydrophobe; elle doit aussi résister aux attaques du vent et des particules solides.

L'absorbeur (récepteur) :

Le récepteur doit absorber autant de flux solaire concentré possible, et le convertir en énergie thermique, cette chaleur est transférée dans un fluide d'un certain type (liquide, gaz).

La surface de récepteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- une bonne conductivité et diffusion thermique.
- une bonne inertie thermique.
- un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- une bonne résistance chimique vis-à-vis du fluide utilisé.

Il est important que le récepteur soit métallique car seul les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre : 360 W/m.K, aluminium : 200 W/m.K, acier : 60 W/m.K).

Le réflecteur :

Le réflecteur est un miroir de surface plane, possédant une propriété réfléchive grâce à un dépôt métallique.

Retenons une propriété importante de ces miroirs : quand un faisceau lumineux arrive sur la surface réfléchissante, tous les rayons réfléchis convergent vers le récepteur.

On a choisi l'aluminium comme réflecteur car il a un coefficient de réflexion important. Ce métal n'est de plus pas trop cher, contrairement à l'or ou à l'argent.

L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller :

L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller joue un grand rôle dans la production, cette dernière est d'autant plus importante que l'épaisseur est faible, cependant plus l'épaisseur est grande plus la distillation dure.

L'isolation des faces latérales du distillateur :

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

III.1.1.3. Paramètres thermo physiques :

Les paramètres thermo physiques sont représentés par :

La couverture et la surface absorbante : la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la diffusivité thermique, le coefficient de dilatation 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.

III.1.1.4. 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.

III.1.1.5. Paramètre de fonctionnement :

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

III.1.2. Paramètres Externes :

Ce sont des paramètres qui influent sur le bon fonctionnement et le rendement du distillateur, ces paramètres sont liés au site [25] :

III.1.2.1. Intensité du rayonnement solaire :

C'est le facteur essentiel dans cette étude. C'est une énergie rayonnante de courte longueur d'onde (0.17 à 4 μm) [26].

Le maximum d'intensité est obtenu pour la longueur d'onde 0.47 μm dans le spectre visible. L'intensité globale du rayonnement solaire arrivant aux confins de l'atmosphère sur une surface perpendiculaire est constante, est égale à 1.35KW/m². Cependant, l'énergie arrivant au voisinage de la surface terrestre est affaiblie par l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère [26]. Le coefficient de transmission est assez constant en cours d'année et se situe entre 0.7 et 0.9.

Plusieurs études montrent que l'irradiation globale reste le paramètre le plus influent sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire [27].

III.1.2.2. La vitesse du vent :

L'effet convectif sur la face de la vitre joue un rôle important sur le fonctionnement du système. La vitesse du vent est liée au coefficient de transfert convectif entre la couverture et l'extérieur.

III.1.2.3. Température ambiante de l'air :

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

III.1.2.4. Paramètres géographiques :

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

III.2. Conception objective pour un distillateur solaire efficace :

Pour un rendement élevé, le distillateur solaire devrait maintenir :

- Une température d'eau d'alimentation élevée.
- Une importante différence de température entre l'eau d'alimentation et la surface de condensation.
- Une faible fuite de vapeur.

Une grande différence de température peut être obtenue lorsque :

- la surface de condensation absorbe peu du rayonnement entrant,
- l'eau de condensation absorbe la chaleur qui doit être enlevée rapidement de la surface de condensation.

En plus on doit surveiller les éléments suivants :

- Emplacement

Les distillateurs solaires fonctionnent à l'aide de l'énergie solaire; son emplacement est choisi d'une façon à éviter les obstacles.

- 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 goût.

- La facilité de nettoyage

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

- La composition des distillateurs

On recommande que les distillateurs soient en fer galvanisé, en aluminium ou en bois.

III.3.Principe du fonctionnement du prototype réalisé:

Le distillateur est mis en marche lorsqu'on l'alimente avec de l'eau saumâtre à l'aide d'une conduite extérieure (1), qui est équipé d'un flotteur pour maintenir le niveau d'eau dans la marmite.

Une fois que l'eau est arrivée à la marmite (2), et sous l'effet du rayonnement solaire, cette dernière s'échauffe pour atteindre sa température d'évaporation(3). La vapeur produite suit la tuyauterie (4) pour qu'elle se condense au niveau du serpentín(5).

Finalement on récupère l'eau distillée au bout du serpentín(6).

Note: Le réflecteur sert comme concentrateur du rayonnement solaire.

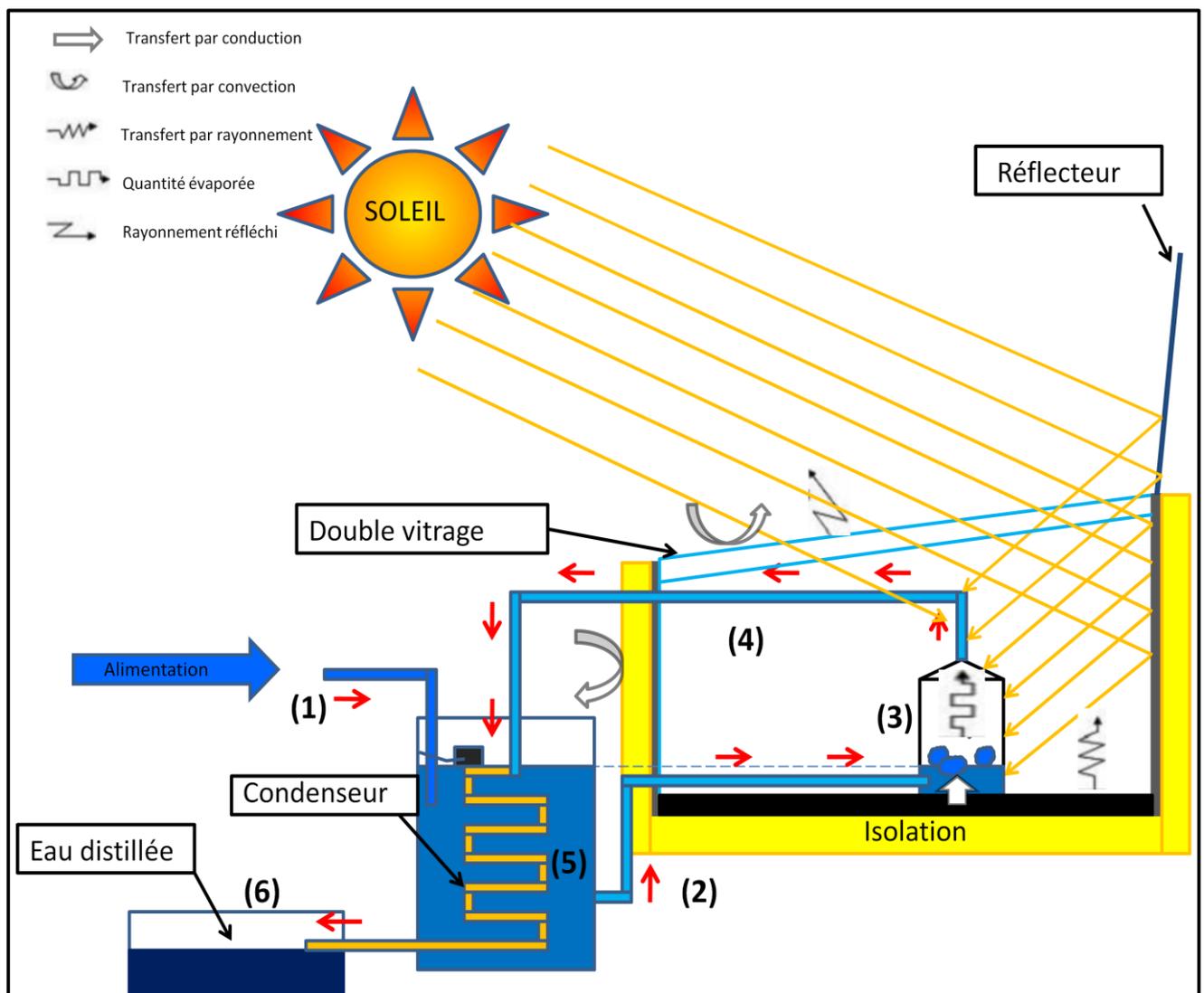


Figure III.1 : Schéma du principe de fonctionnement

III.4. Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur :

III.4.1. Echange de chaleur entre l'absorbeur et la marmite :

L'eau reçoit de la marmite un flux solaire ou de chaleur par convection naturelle et conduction. la marmite elle-même reçoit de l'absorbeur un flux de chaleur.

III.4.2. Echange de chaleur entre la marmite et le vase :

L'eau à l'intérieur de la marmite cède un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle aux surfaces de condensation. Puisque il existe une évaporation, l'eau perd un flux de chaleur.

La vapeur récupérer au niveau de la marmite est envoyée vers le condenseur à travers des conduites.

III.4.3. Echange de chaleur entre la vitre et l'ambient :

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

La vitre cède au milieu extérieur un flux de chaleur par rayonnement est par convection naturel.

III.5. Bilan énergétique :

Pour effectuer le bilan énergétique de notre système on définit le flux global incident sur le vitrage extérieur, en tenant compte du flux réfléchi par les réflecteurs en direction de la vitre:

$$\Phi_{\text{Reçu}} = \Phi_{\text{global}} + \Phi_{\text{Reflété}}$$

$$\Phi_{\text{global}} = \Phi_{\text{directe}} + \Phi_{\text{diffus}} + \Phi_{\text{réfléchi sol}}$$

$$\Phi_{\text{direct}} = S_{\text{directe}} \cdot A_{\text{vitre}} \quad \text{ou: } S_{\text{directe}} = I \cos \theta$$

où θ représente l'angle d'incidence des rayons solaires sur la surface des vitrages ;

$$\Phi_{\text{Reflété}} = S_{\text{directe}} \cdot A_{\text{ref}} \cdot r_{\text{ref}}$$

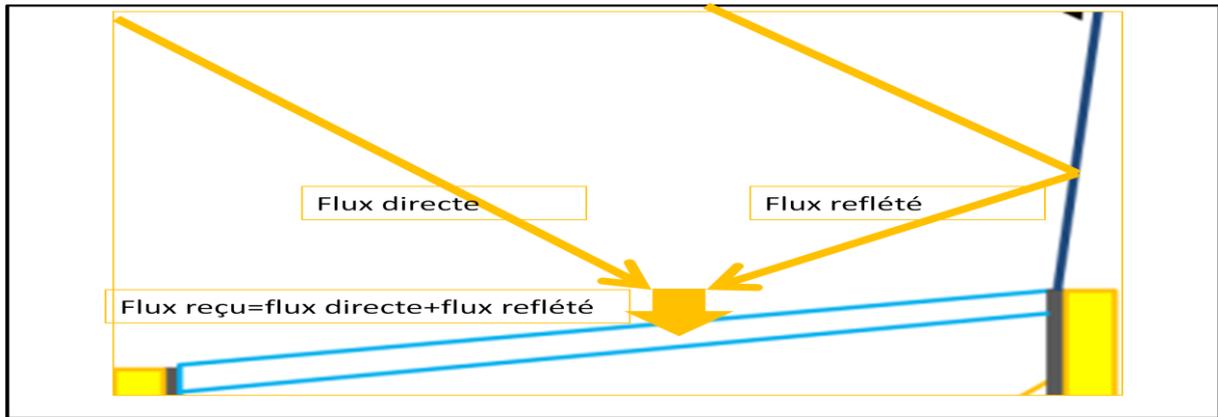


Figure III.2 : Schéma explicatif du rayonnement incident sur la surface verrière

III.5.1. Bilan énergétique de la vitre extérieure :

La variation d'énergie interne est égale à la somme des quantités de chaleur échangées :

$$\Delta U_{v1} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 \quad (\text{III.1})$$

$$\Delta U_{v1} = m_v \cdot c_{p_v} \frac{\partial T_v}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

Φ_1 : puissance solaire absorbée par la vitre extérieure

$$\Phi_1 = \alpha_{v1} \cdot \Phi_{\text{Reçu}} \quad (\text{III.3})$$

Φ_2 : Puissance thermique échangée par convection entre la vitre extérieure et le milieu ambiant :

$$\Phi_2 = h_{\text{cext}} \cdot A_{v1} \cdot (T_{\text{ext}} - T_{v1}) \quad (\text{III.4})$$

Φ_3 : puissance thermique échangée par convection entre les deux vitres

$$\Phi_3 = h_{c,v1-v2} \cdot A_{v1} \cdot (T_{v1} - T_{v2}) \quad (\text{III.5})$$

Φ_4 : puissance échangée par rayonnement entre les deux vitres

$$\Phi_4 = h_r \varepsilon_{v2-v1} \cdot A_{v1} \cdot (T_{v2} - T_{v1}) \quad (\text{III.6})$$

Φ_5 : puissance échangée par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste

$$\Phi_5 = h_r \varepsilon_{vc-v1} \cdot A_{v1} \cdot (T_{vc} - T_{v1}) \quad (\text{III.7})$$

III.5.2. Bilan énergétique de la vitre intérieure :

L'équation résultante du bilan énergétique est :

$$\Delta U_{V2} = \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8 + \Phi_9 + \Phi_{10} \quad (\text{III.8})$$

ΔU_{V2} : puissance thermique moyenne contribuant à l'échauffement de la vitre intérieure

$$\Delta U_{V2} = m_v \cdot c_{p_v} \frac{\partial T_{V2}}{\partial t} \quad (\text{III.9})$$

Φ_6 : Puissance absorbée par la vitre intérieure

$$\Phi_6 = \tau_{v1} \cdot \alpha_{v2} \cdot \Phi_{\text{Reçu}} \quad (\text{III.10})$$

Φ_7 : Flux de rayonnement entre la vitre intérieure et l'absorbeur

$$\Phi_7 = h_r \varepsilon_{v2-ab} \cdot A_{v2} \cdot (T_{ab} - T_{V2}) \quad (\text{III.11})$$

Φ_8 : Flux de rayonnement entre la vitre intérieure et la vitre extérieure

$$\Phi_8 = h_r \varepsilon_{v1-v2} \cdot A_{v2} \cdot (T_{V1} - T_{V2}) \quad (\text{III.12})$$

Φ_9 : Puissance due à l'échange convectif entre la vitre intérieure et la lame d'air statique au dessus de l'absorbeur

$$\Phi_9 = h_{c2} \cdot A_{v2} \cdot (T_{ab} - T_{V2}) \quad (\text{III.13})$$

Φ_{10} : puissance due à l'échange par convection entre la vitre intérieure et la vitre extérieure

$$\Phi_{10} = h_{c1} \cdot A \cdot (T_{V1} - T_{V2}) \quad (\text{III.14})$$

III.5.3. Bilan énergétique de la marmite :

$$\Delta U_{\text{mar}} = \Phi_{11} + \Phi_{12} \quad (\text{III.15})$$

ΔU_{mar} : Puissance thermique moyenne contribuant à échauffer la marmite

$$\Delta U_{\text{mar}} = m_{\text{mar}} \cdot c_{p_{\text{mar}}} \frac{\partial T_{\text{mar}}}{\partial t} \quad (\text{III.16})$$

Φ_{11} : Puissance absorbée par la marmite

$$\Phi_{11} = \alpha_{\text{mar}} \cdot A_{\text{marp}} \cdot \Phi_{\text{Reçu}} \cdot \tau_{v1} \tau_{v2} \quad (\text{III.17})$$

Φ_{12} : Flux échangé avec le liquide à évaporer

$$\Phi_{12} = -m_e \cdot c_{p_e} \frac{\partial T_e}{\partial t} - \dot{m}_{\text{evap}} \cdot L_v \quad (\text{III.18})$$

III.5.4. Bilan énergétique de l'eau:

$$\Delta U_e = m_e \cdot c_{p_e} \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\dot{m}_{\text{evap}} \cdot L_v + h_{\text{mare}} A_{\text{mare}} (T_{\text{mar}} - T_e) \quad (\text{III.19})$$

III.5.5. Bilan énergétique de l'absorbeur :

$$\Delta U_{\text{ab}} = \Phi_{13} + \Phi_{14} + \Phi_{15} \quad (\text{III.20})$$

ΔU_{ab} : Puissance thermique moyenne contribuant à échauffer l'absorbeur

$$\Delta U_{\text{ab}} = m_{\text{ab}} \cdot c_{p_{\text{ab}}} \frac{\partial T_{\text{ab}}}{\partial t} \quad (\text{III.21})$$

Φ_{13} : Puissance absorbée par l'absorbeur

$$\Phi_{13} = \alpha_{\text{ab}} \cdot A_{\text{ab}} \cdot \Phi_{\text{Reçu}} \cdot \tau_{v2-v1} \quad (\text{III.22})$$

Φ_{14} : Flux échangé par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre intérieure

$$\Phi_{14} = -\Phi_7 = -h_r \varepsilon_{v2-ab} \cdot A_{v2} \cdot (T_{\text{ab}} - T_{v2}) \quad (\text{III.23})$$

Φ_{15} : Flux dû à l'échange convectif entre l'absorbeur et la lame d'air statique

$$\Phi_{15} = h_{c2} \cdot A_{\text{ab}} \cdot (T_{v2} - T_{\text{ab}}) \quad (\text{III.24})$$

Φ_{16} : Flux échangé par conduction entre l'absorbeur et la marmite

$$\Phi_{16} = \frac{\lambda_{ab}}{e_{ab}} \cdot S_{ab-mar} \cdot (T_{ab} - T_{mar}) \quad (III.25)$$

III.5.6. Bilan énergétique d'un réflecteur :

$$\Phi_{ref} = G_r \cdot A_{ref} \cdot r_{ref} \quad (III.26)$$

Avec :

Φ_{ref} : puissance réfléchi sur le récepteur

A_{ref} : surface d'un réflecteur

G_r : éclairement global arrivant sur le réflecteur

r_{ref} : coefficient de réflexion de l'aluminium

III.5.7. Le flux perdu à travers les murs est :

$$\Phi = (h_i \cdot s \cdot \frac{\lambda_{al}}{e_{al}} S_{al} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} S_{is} + \frac{\lambda_{boit}}{e_{boit}} S_{boit} + h_e \cdot s)(T_i - T_e) \quad (III.27)$$

III.5.8. la surface d'échange d'un condenseur :

Le calcul de la surface d'échange du condenseur (surface de condensation) est basé sur les hypothèses suivantes :

- Les fuites de vapeur sont négligeables,
- L'échange de chaleur à travers la tuyauterie en dehors du vase de condensation est négligeable,
- le transfert de chaleur est unidirectionnel.

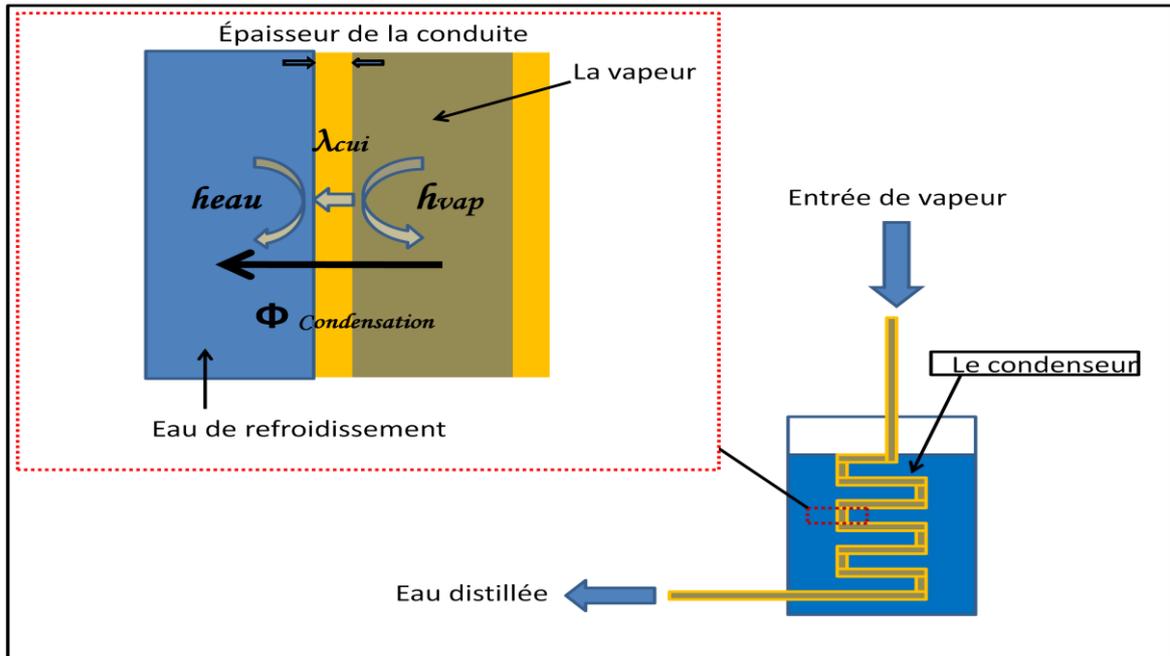


Figure III.3: Les modes de transfert de chaleur lors de la condensation

Le flux échangé entre l'eau et la vapeur par convection et conduction à travers les parois du condenseur par unité de longueur de serpentin est :

$$\Phi_{e-v} = (T_{vap} - T_e)/R \quad (III.28)$$

$$R = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{h_{vap}R_i} + \frac{\text{Ln}\left(\frac{R_e}{R_i}\right)}{\lambda_{cui}} + \frac{1}{h_{eau}R_e} \right)$$

On aura :

$$\Phi_{cond} = \dot{m}_{cond} \cdot L_V = (T_{vap} - T_{eau}) / \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{h_{vap}R_i} + \frac{\text{Ln}\left(\frac{R_e}{R_i}\right)}{\lambda_{cui}} + \frac{1}{h_{eau}R_e} \right) \quad (III.29)$$

Donc le débit de condensation par unité de longueur de serpentin est:

$$\dot{m}_{cond} = (T_{vap} - T_{eau}) / \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{h_{vap}R_i} + \frac{\text{Ln}\left(\frac{R_e}{R_i}\right)}{\lambda_{cui}} + \frac{1}{h_{eau}R_e} \right) L_V \quad (III.30)$$

III.6 Caractéristiques de fonctionnement du distillateur:

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production d'eau de tels distillateurs. On distingue constamment : le rendement, l'efficacité interne et globale et la performance.

III.6.1 Le rendement :

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan noir et par jour [24]. 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 :

$$\eta = \frac{\dot{M}_d \cdot L_v}{G} \quad (\text{III.31})$$

Avec : $\dot{m}_d = \frac{q_{\text{evp}}}{L_v}$

L_v : Chaleur latente d'évaporation.

\dot{M}_d : Débit de masse distillat.

G : densité de flux solaire global incident

III.6.2. La performance :

Le souci de caractériser un distillateur de manière absolue amène à définir le facteur de performance brut (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H) [24], [27].

F. P. B: C'est le rapport de la quantité d'eau produite au bout de 24 h sur la quantité d'énergie entrée durant cette période.

F. P. H: C'est le rapport de la quantité horaire d'eau produite sur la quantité d'énergie entrée en une heure.

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

$$FP = \frac{\dot{M}_d}{\alpha_{ab} \cdot G \cdot A_{ab}} \quad (\text{III.32})$$

FP : facteur de performance.

III.7.Conclusion :

Dans cette partie théorique nous avons écrit les équations qui régissent le fonctionnement du distillateur et qui conduisent à l'évaluation numérique du rendement et des différents flux qui interviennent dans le distillateur, ainsi que les différentes pertes d'énergie engendrées dans ce prototype.

Pour améliorer le rendement du distillateur, il est nécessaire d'augmenter le plus possible la surface d'échange entre l'absorbeur sur lequel repose le fond de la cocotte ainsi que la surface de cette dernière à fin d'améliorer l'énergie absorbée et transmise à l'eau.

Chapitre IV: Matériels et Méthodes

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

IV.1. Conception du distillateur solaire simple:

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

Le distillateur est essentiellement constitué comme le montre la figure (IV.1)

1. Un bac réfléchissant
2. Réflecteur extérieur.
3. Une couverture verrière.
4. Une isolation thermique.
5. Une couverture extérieure.
6. Une marmite.
7. Un absorbeur
8. Un vase de condensation.
9. Une tuyauterie.



Figure(IV.1) distillateur solaire

1. Bac réfléchissant :

Le rôle du bac réfléchissant est de réfléchir le maximum de rayonnement solaire global vers la marmite.

Il est fixé sur le cadre intérieur essentiellement en aluminium.

Les dimensions de la surface du bac sont :

- ☞ Longueur : 0,4 à 0,8m
- ☞ Largeur : 0,3 à 0,7m
- ☞ Hauteur : 0,5 à 0,6m
- ☞ Epaisseur : 0,05m

2. Réflecteur extérieur :

Les dimensions de la surface des réflecteurs sont :

- ☞ Longueur : 0.7 à 0,82m
- ☞ largeur : 0,7m

3. Couverture verrière (verre)

Elle est réalisée avec deux vitres ordinaires ayant un bon coefficient de transmission lumineux.

Elles sont assemblées sur un cadre en bois sous forme d'un double vitrage avec une lame d'air entre elle afin de minimiser les pertes de chaleur à travers la couverture.

Pour assurer une bonne étanchéité entre la vitre et les autres constituants du distillateur on a utilisé de la silicone.

Les dimensions du double vitrage sont :

- ☞ Longueur : 0,75m.
- ☞ Largeur : 0,65m.
- ☞ L'épaisseur : 0,015m.
- ☞ Superficie : 0,487m².

4. L'isolation thermique

Généralement, l'isolation thermique du distillateur est en laine de verre ou en polystyrène expansé. L'épaisseur varie de 3 à 6cm. Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement.

Dans notre cas on a utilisé du polystyrène expansé.

Les dimensions de l'isolant thermique sont :

- ☞ Longueur : 0,6m.
- ☞ Largeur : 0,5m.
- ☞ Epaisseur : 2x 0,05m.
- ☞ Hauteur : 0,7m et 0,5m.
- ☞ Superficie de la base : 0,3m².
- ☞ conductivité thermique : 0,04w/m .k

5. Couverture extérieure

Le coffre du distillateur renferme les différents éléments actifs. Il devra donc assurer une protection efficace aux agents atmosphériques. Le coffre du distillateur est réalisé en bois.

Les dimensions de la couverture extérieure sont :

- ☞ Longueur : 0,82m.
- ☞ Largeur : 0,72m.
- ☞ Epaisseur : 0,01m.
- ☞ Hauteur : 0,71m et 0,51m.
- ☞ Superficie de la base : 0,59m².

6. La marmite

Elle absorbe le maximum de rayonnement solaire soit directement ou bien indirectement .Elle est sous forme d'une cocotte- minute (hermétique).

C'est pour cette raison qu'il est peint en noir mat.

Il est essentiellement en acier.

7. L'absorbeur

Le rôle du l'absorbeur est d'absorber le maximum de rayonnement solaire global et transmettre la chaleur produite par cette absorption vers la marmite, c'est pour cette raison qu'il est peint en noir.

Il est essentiellement en fer galvanisé.

Les dimensions de la surface de l'absorbeur sont :

- ☞ Longueur : 0,4m.
- ☞ Largeur : 0,3m.
- ☞ Epaisseur : 1mm.
- ☞ Superficie de la base : 0,12m².

8. Un bac de condensation

Le rôle de ce bac est de refroidir la vapeur qui passe de la marmite vers le condenseur à travers la conduite pour avoir de l'eau distillée.

On peut avoir de l'eau à l'intérieur de ce bac à travers une conduite extérieure et pour cela on à mis un système de flotteur pour ne pas avoir des pertes d'eau dans le cas ou le bac est plein.

Il est obtenu par soudage et est essentiellement en fer galvanisé.

Les dimensions de ce bac sont :

- ☞ Longueur : 0,3m.
- ☞ Largeur : 0,3m.
- ☞ Hauteurs : 0,45m.
- ☞ Superficie de la base : 0,09m².

9 .Cuve de récupération du distillat

Pour la récupération du distillat on a utilisé une tige soudée au bac de condensation et reliée au même temps au condenseur.

10 .Tuyauterie

La tuyauterie utilisée entre la marmite et le bac de condensation est en cuivre.

IV.2.Composants standards utilisés (achetés)

<i>Matière</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Quantité</i>	<i>Observation</i>
Polystyrène expansé	1m × 2m × 5cm	3	
Verre ordinaire	0,72m × 0,82m 6mm	1	
Tôle galvanisée	1m × 2m × 1mm	1	
Bois	2m × 1m × 1cm	3	
Profil en acier	4mm×4mm×1m	4	
Papier d'aluminium			

Silicone		3	
Peinture noire+la grise		1	
Conduite en cuivre + Mamelon	3m×14mm	8	
Marmite		1	
Flotteur		1	
Colle bois		1	
Boulon de fixation			
Coudes		4	

Figure (IV.2) Composants standards utilisés

IV.3. Estimation du coût du distillateur réalisé :

matériau	Coût unitaire (DA)	Nombre d'Unités	Coût total
polystyrène	500.00	3 plaques	1500.00
colle silicone	200.00	3 Tubes	600.00
Flotteur	200.00	1	200.00
Papier aluminium	100.00	2 rouleaux	200.00
Aluminium coulant	100.00	4 rouleaux	400.00
Cuivre + Mamelons	400 + 500	3 Mètres + 5	1700.00
Tubes de peinture	200.00	2 tubes	400.00
Montant total			5000.00

Figure (IV.3) Estimation du coût de distillateur

IV.4. Réalisation des composants du distillateur solaire :

IV.4.1. Coté extérieur :

Pour la réalisation du coté extérieur, on prend une plaque en bois de (2m × 1m × 1cm), qu'on découpe en cinq parties qui seront assembler par la suite en un seul bac. Enfin, on obtient la structure qui est présentée dans la figure ci-dessous.



Avant l'isolation

Après l'isolation

Figure (IV.4) Coté extérieur d'un distillateur

IV.4.2. Bac réfléchissant :

Pour la réalisation du bac réfléchissant, il suffit de fixer le papier aluminium sur la façade intérieure du distillateur dont les dimensions sont indiquées dans le paragraphe précédent. Enfin, on obtient la structure qui est présentée dans la figure ci-dessous.



Figure (IV.5) Bac réfléchissant

IV.4.3. Vase de condensation :

Pour la réalisation du vase il suffit de découper la tôle galvanisée en Cinq parties et de les souder par la suite en un seul bac dont les démentions sont indiquées dans le paragraphe précédent. la structure est présentée dans la figure ci-dessous.



Figure (IV.6) Vase de condensation

IV.4.4. Le récepteur (marmite) :

Notre récepteur est une simple marmite en acier qui a une bonne conductivité thermique, elle est peinte en noire afin d'augmenter sa capacité à absorber le rayonnement solaire ; Il faudra aussi mettre un couvercle pour réduire les pertes de chaleur par convection et par évaporation de l'eau.

Le remplissage se fait du coté droit du vase à l'aide d'une tuyauterie soudée à la marmite.

L'évacuation de la vapeur vers le condenseur est réalisée par une tuyauterie soudée sur le couvercle de la marmite.



Figure (IV.7) Une marmite en acier peint en noir

IV.4.5. La couverture transparente :

La couverture transparente permet le passage d'une grande parties du rayonnement solaire (de 80% a 95% selon le verre utilisé) et elle est opaque aux infrarouges émis par la surface absorbante ; ce qui crée l'effet de serre.

Dans notre cas on a utilisé un verre ordinaire de 5mm d'épaisseur en double vitrage avec une lame d'air de 2mm.

Le double vitrage est porté sur un cadre en bois.



Figure (IV.8) Couverture verrière en double vitrage

IV.4.6. Le condenseur :

Pour accélérer la conduction de la chaleur entre la vapeur et l'eau de refroidissement au cours de la condensation de la vapeur, on a utilisé une tuyauterie réalisée en cuivre qui à une bonne conductivité thermique. La tuyauterie est réalisée sous forme d'un serpentín a fin de réduire l'espace occupé par le condenseur.



Figure (IV.9) Le condenseur

IV.5.Le montage

Le vase est équipé d'un système de remplissage et de vidange.

Le remplissage se fait du coté haut du vase à l'aide d'une conduite.

La vidange se fait en bas du vase.

L'évacuation du distillat vers l'extérieur est réalisée par une tuyauterie.



Figure (IV.10) Distillateur solaire

Conclusion :

Dans ce chapitre on a cité les critères du choix des matériaux utilisés, comme on a exposé les différentes pièces, leurs dimensions et les outils que nous avons utilisé dans le montage.

CHAPITRE V : Résultats et discussions

Dans le but de l'évaluation des performances du distillateur, une série de testes expérimentaux ont été effectués sous l'ensoleillement naturel au niveau du hall technologique de Oued-Aissi,

Durant les différents essais, on mesure les paramètres suivants:

1. La température ambiante,
2. La température de l'eau.
3. La température de l'eau a l'intérieur de la marmite.
4. La température de la vitre.
5. La température de l'absorbeur.
6. La température à l'air interne.

Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples de type K.

Note :

Le thermocouple mesure les températures des différents endroits avec un pas d'une seconde pendant une période de 5000 secondes.

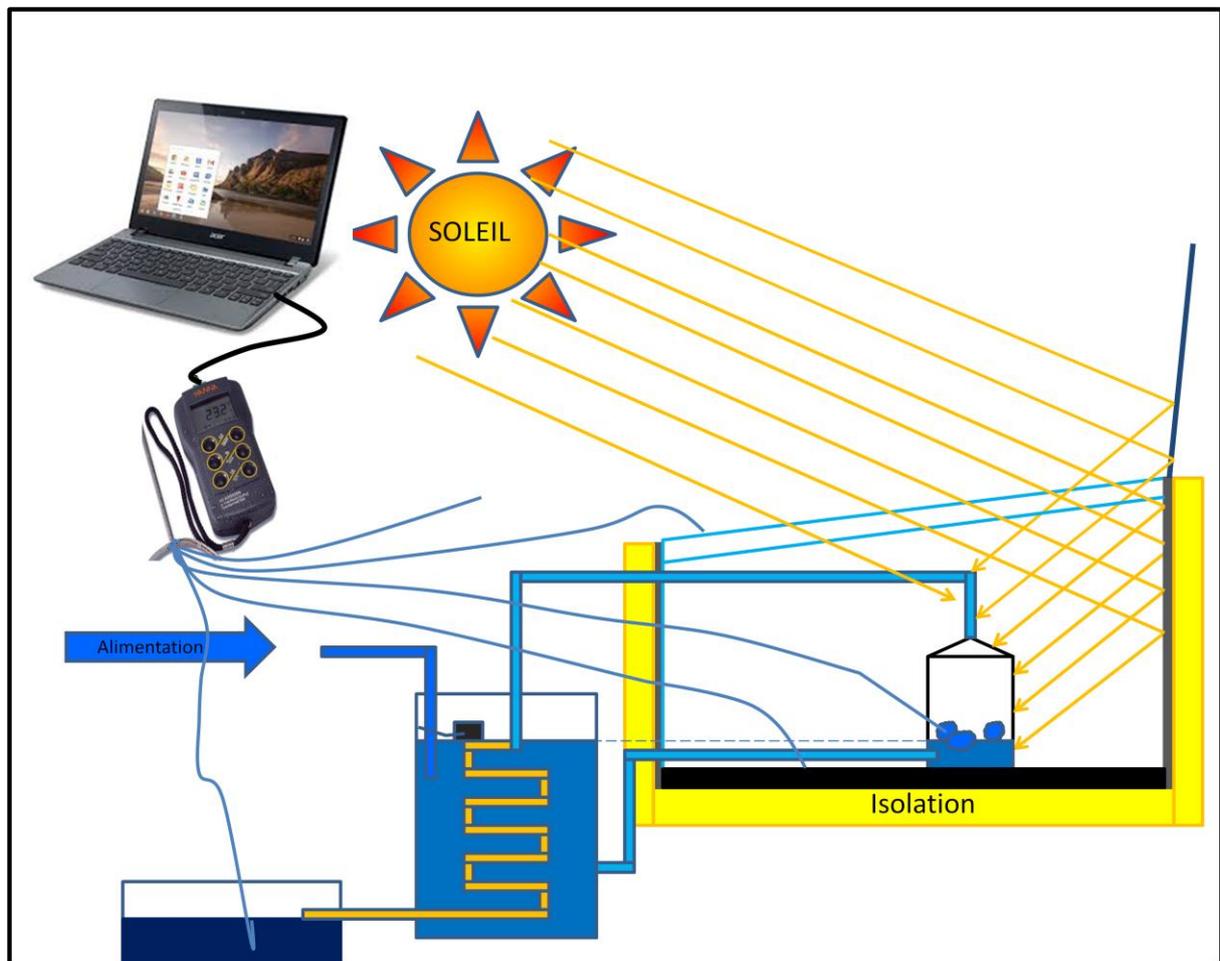


Figure V.1 : Schéma d'acquisition de donnée avec un thermocouple

V .1. Discussions des résultats :

- 1^{er} essai (23-06-2016) :

Juste après avoir terminé la réalisation et assemblé tous les éléments du distillateur, on a directement effectué un teste sans aucun appareil de mesure.

A 13 heures on a mis une petite quantité d'eau dans la marmite sachant qu'à ce moment là le ciel était clair.

Après 30 minutes de temps écoulé, nous avons aperçu des gouttes d'eau distillé, on à conclu que l'eau a atteint sa température d'ébullition, et ensuite la vapeur produite à subi une condensation après son contact avec le condenseur qui est en dessous de la température de rosée.

- 2^{eme} essai le (26/06/2016) à 14 :00 :

A 14 :00 heur on a alimenté le distillateur en eau à l'aide d'un tuyau et on a lancé l'enregistrement des températures. Ce jour-là, il y avait des nuages.

Les résultats obtenus après chaque 250 secondes sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Heure	1-Air ambiant	2-air interne	3-dans la marmite	4-sur l'absorbeur	5-Vitre	6-eau de condensation
Secondes	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	48,84	95,64	80,66	116,31	70,73	52,13
250	49,05	95,15	81,61	116,09	70,44	51,92
500	48,7	95,11	82,18	115,64	70,46	52,72
750	49,9	94,7	82,37	114,77	69,3	53,18
1000	49,51	94,4	82,48	113,53	68,55	52,75
1250	50,62	94,03	82,75	113,08	68,98	53,57
1500	49,72	90,89	75,49	110,62	67,89	53,43
1750	49,46	91,31	76,7	109,61	67,99	53,18
2000	49,5	90,17	77,39	108,28	65,22	53,1
2250	49,08	89,35	78,01	106,79	65,25	52,95
2500	47,2	86,79	77,73	105,29	64,95	52,05
2750	45,11	85,32	76,11	102,43	61,73	50,64
3000	43,4	82,5	75,11	99,84	61,47	48,38
3250	41,73	78,13	73,83	96,32	58,18	43,11
3500	40,61	74,17	52,79	89,57	56,63	42,8
3750	41,11	72,93	54,24	88,03	56,16	44,76
4000	38,62	71,03	54	85,05	53,35	41,7
4250	38,57	68,11	53,93	79,8	51,75	40,17
4500	37,79	64,49	53,95	73,91	49,79	38,86
4750	37,31	61,25	53,91	66,74	47,22	39,07
4802	37,7	60,63	53,82	65,57	47,43	38,57

Tableau V.2 : Les différentes températures mesurées 2^{eme} essai

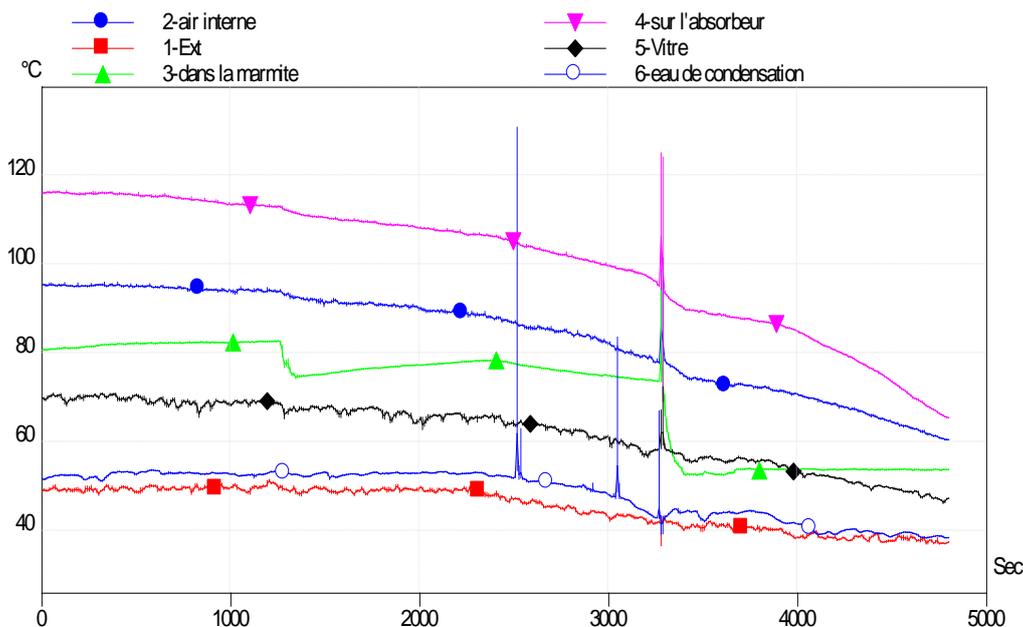


Figure V.3 : L'évolution des températures mesurées du 2^{ème} essai

Discussion des résultats obtenus dans le 2^{ème} essai :

Dans cet essai on a mesuré des températures élevées au début de l'essai. Après un moment on assiste à une diminution des températures mesurées, ce qui s'explique par l'éloignement du rayonnement solaire incident sur la surface d'absorption.

- 3^{ème} essai (04-07-2016) à 13 heures:

Dans le but d'arriver à avoir la plus grande quantité de l'eau distillée on a mis notre dispositif en marche après avoir assemblé tous ses éléments, et on a procédé à l'enregistrement des températures aux différents points mesurés.

Heure	2-air interne	1-Air ambiant	3-dans marmite	4-sur l'absorbeur	5-Vitre	6-eau condensation
Secondes	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	47,06	38,29	48,11	37,84	36,19	41,47
250	68,04	38,58	51,51	38,44	37,77	43,57
500	79,57	40,63	54,22	88,16	44,77	45,71
750	80,7	39,08	55,1	97,47	56,05	42,33
1000	86,47	38,59	58,26	101,55	59,45	43,36
1250	90,14	38,4	61,01	105,39	62,45	43,23
1500	93,43	39,8	63,82	108,33	66,24	43,27
1750	96,34	38,41	66,96	111,55	67,25	44,12

2000	98,33	39,45	69,63	114,53	68,78	44,01
2250	100,36	40,74	71,33	116,75	69,88	43,96
2500	99,69	41,51	73	118,67	71,51	43,71
2750	100,45	39,41	73,36	119,04	70	45,17
3000	100,23	40,25	73,34	119,27	71,47	44,86
3250	99,59	39,02	73,36	118,82	70,89	46,01
3500	99,31	41,36	73,34	118,04	71,48	44,87
3750	98,97	40,89	73,52	117,9	69,73	45,38
4000	97,17	42,07	73,81	117,01	68,74	45,44
4250	97,52	42,24	74,1	116,71	69,17	45,9
4500	97,18	42,39	74,73	115,81	66,5	46,33
4750	97,15	45	75,14	114,8	67,02	46,62
4999	97,24	46,02	76,06	114,8	65,4	47,11

Tableau V.4 : Les différentes températures mesurées 3^{ème} essai

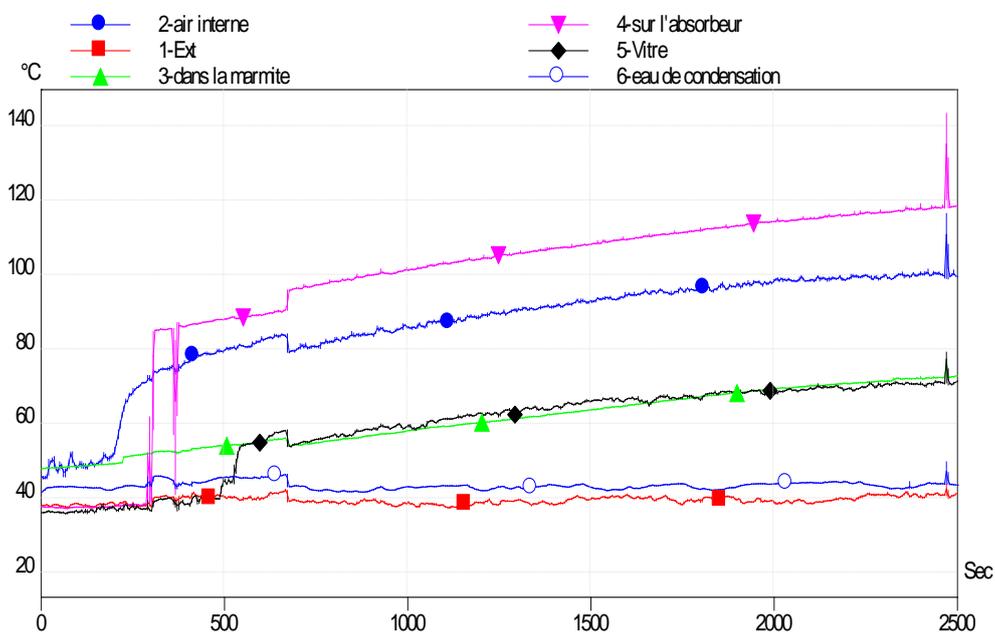


Figure V.5 : L'évolution des températures au 3^{ème} essai après 2500 s

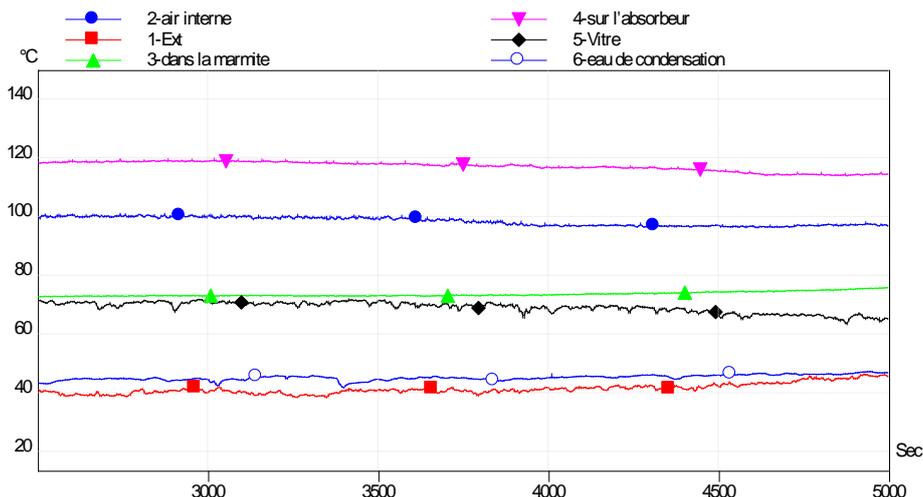


Figure V.6 : L'évolution des températures après 5000 s

Discussion des résultats obtenus dans le 3^{ème} essai :

Au début on a obtenu des températures approximatives à celle de la température ambiante, après quelques minutes les températures commencent à remonter pour se stabiliser après 2500 secondes du début de l'essai.

La température de l'absorbeur a dépassée 120 °C qui semble suffisante pour l'ébullition de l'eau.

À la fin de l'essai, on a remarqué des bulles d'eau condensées au niveau de la vitre qui prouve la présence d'une fuite de la vapeur au niveau de la marmite.

Au bout de 25 minutes du début de condensation on a obtenu 180 ml.

- 4^{ème} essai (12-07-2016) à 14 heures 20min :

On a refait le teste avec les mêmes quantités que le 3^{ème} essai, à 14 heures 20min. Ce jour la il y avait du vent, les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Heure	1-Air ambient	2-SUR ABSORBEUR	3-dans la marmite	4-sur la vitre dist
Secondes	°C	°C	°C	°C
0	42,02	60,84	45,41	40,06
200	43,28	61,53	45,44	42,04
400	46,49	60,97	46,41	48,93
600	45,14	61,56	46,36	50,96
800	45,35	62	46,47	52,85
1000	45,77	62,62	46,56	54,54
1200	45,84	62,99	45,92	55,54

1400	46,69	63,14	46,07	56,53
1600	40,28	66,96	45,57	50,61
1800	37,09	75,16	45,25	51,79
2000	40,95	79,3	42,89	60,18
2200	40,84	79,71	72,17	62,16
2400	38,81	78,34	74,67	61,09
2600	38,89	78,89	76,29	61,4
2800	38,02	79,44	77,81	62,15
3000	39,31	80,09	79,02	62,72
3200	39,89	80,56	80,31	62,54
3400	39,25	80,93	81,3	62,52
3600	38,05	81,1	82,18	62,17
3800	38,9	81,18	82,75	62,25
4000	39,54	81,2	83,12	62,29
4133	39,41	81,23	83,81	61,93

Tableau V.7 : Les différentes températures mesurées 4^{ème} essai

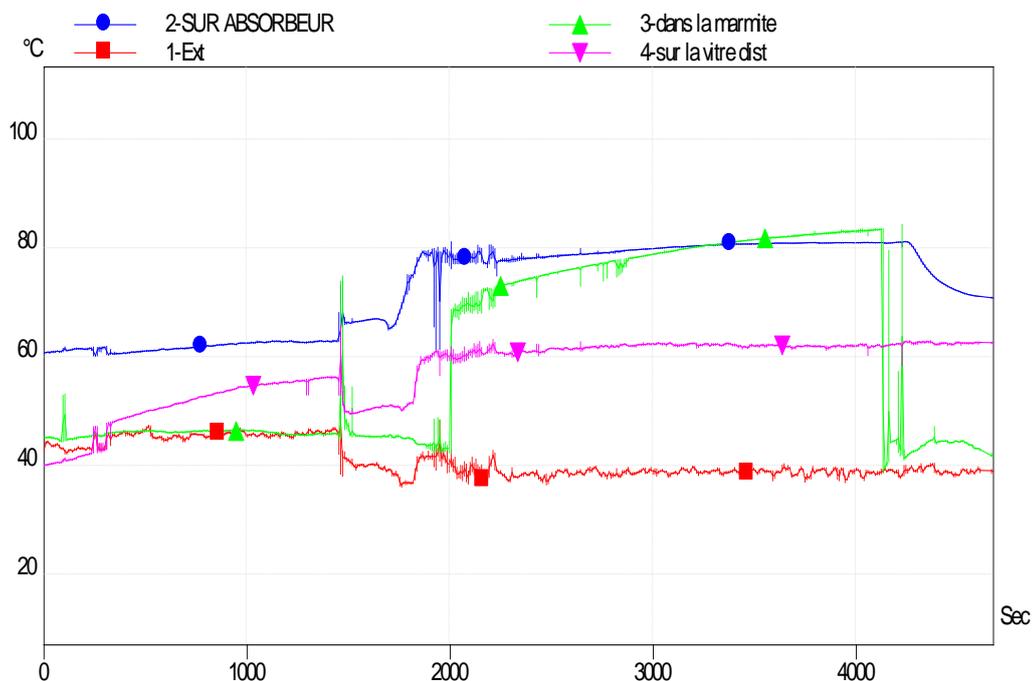


Figure V.8: L'évolution des températures au 4^{ème} essai

Discussion des résultats obtenus dans le 4^{ème} essai :

Dans cet essai on a remarqué que la température de l'absorbeur et la température de l'eau dans la marmite sont presque confondus. Cela s'explique par le fait que l'eau du récepteur absorbe la totalité de la chaleur disponible au niveau de l'absorbeur, sauf que ce dernier n'atteint pas les températures désirées car le dispositif perd une quantité importante par convection qui est dû à la présence du vent.

Le capteur placé sur l'absorbeur et l'autre dans la marmite se sont décrochés plusieurs fois pendant le teste à cause du vent, ce qui a engendré des fluctuations sur le graphe (vert et bleu) qui indique leurs température.

Conclusion :

D'après les essais effectués sur notre prototype, on a remarqué qu'au cours de l'insolation, la température des différents éléments du distillateur suit l'évolution du rayonnement solaire ; d'où les maximas se trouvent là où le rayonnement solaire est maximal.

Au cours du dernier essai on remarque la température de l'absorbeur et la température de l'eau dans la marmite sont presque confondues. Cela nous permet de conclure que l'eau située à l'intérieur du récepteur absorbe la majorité de la chaleur disponible au niveau de l'absorbeur.

Conclusion générale

Notre étude a visé principalement le distillateur solaire conventionnel, ce dernier est basé sur le principe de l'effet de serre. Le distillateur se compose de deux éléments principaux (évaporateur et condenseur), une couche noire absorbante et d'un couvert transparent en verre ordinaire mis en pente. L'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'eau qui s'évapore. Cette capacité d'évaporation grandit au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau. La vapeur d'eau ainsi obtenue se condense sur la surface de cuivre. Les gouttelettes d'eau s'écoulent vers la sortie inférieure du vase dans une gouttière conduisant à un réservoir de stockage et de récupération du distillat.

Notre travail est composé de : la conception et la réalisation d'un prototype à faible coût destiné surtout pour les communautés rurales et pauvres. Par ailleurs, une série de mesures expérimentales à lieu durant les journées ensoleillées du mois de juin et juillet.

Les variations des températures nos suggèrent à dire que la production d'eau distillée dépend évidemment de l'énergie solaire incidente et aussi de la surface absorbante et principalement de la surface d'échange entre l'absorbeur et la marmite ; entre autre un volume de 2 litres de distillat de très bonne qualité a pu être récupéré en fin de journée.

Le coût du distillateur reste relativement élevé à cause de la cherté des matériaux utilisés, cependant ce dernier est amorti après un moment de fonctionnement en se basant sur le prix du litre d'eau distillée pratiqué sur le marché.

Références bibliographiques

- [1] **J. Bernard**. Energie solaire Calculs et optimisation. Edition ellipses, 2004.
- [2] **R, Bernard, G Merguy, M.Schwartz**, Le rayonnement solaire : conversion Thermique et application .Technique et documentation, deuxième édition -1980.
- [3] **Michel Capderou**. Atlas solaire de l'Algérie Tome 2 : Aspect énergétique. 2006.
- [4] **C. Zidani, F. Benyarou**. Simulation de la position apparente du soleil et estimation des Energies Solaires incidentes sur un Capteur Plan pour la Ville de Tlemcen en Algérie. Rev.Energ. Ren, Vol.6, pp 69-76, 2003.
- [5] **Rym Rahmani**. Rendement d'un distillateur solaire à plusieurs étages effet de certain paramètre thermophysique sur le rendement, mémoire de Magister université Mentouri, Constantine (2007).
- [6] J. M. Chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire, Bordas Paris.1984.
- [7] **S. Bonned. et A. Alaphilippe**, Conversion thermodynamique de l'énergie solaire dans des installations de faible ou de moyenne puissance. Energ. Ren : 11^{èmes} journées Internationales de la thermique. pp.73-80. 2003.
- [8] http://fr.ekopedia.org/wiki/Dessaleur_solaire. "Dessaleur Solaire", *Licence Art Libre V1.2.*, 2006.
- [9] **A. Maurel**. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : Et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, Tec & Doc Lavoisier, 2006.
- [10] **A.A.S. Malik, G.N. Tiwari, A. Kumar and M.S. Sodha**, Solar Distillation, Pergamon Press, Oxford, England, 1982.
- [11] **A.A. Sfeir and G. Guarracina**, Ingénierie des Systèmes Solaires, Applications à l'Habitat, Technique et Documentation, Paris, 1981.
- [12] **M. Telks**. Solar Distiller for Life Rafts, Office of Science, USA, 1945.

- [13] **E.D. Howe and B.W. Theimat**, Twenty Years of Work on Solar Distillation at the University of California, *Solar. Energy*, 16 (1974) 97–195.
- [14] **L.G. Savornin**, Etude sur l'Evaporation et la Condensation de l'Eau dans les Distillateurs Solaires, Application Thermique de l'Energie Solaire dans le Domaine de la Recherche et de l'Industrie, Colloques Internationaux, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), 1961, 589–600. *Bibliographie et webgraphie* 110.
- [15] **E. Delyannis**, The patros solar distillation plant, *Sol. Energy*, 12 (1968) 113–115.
- [16] **P.I. Cooper**, Digital simulation of transient solar stills process, *Sol. Energy*, 12 (3) 313, (1969).
- [17] **Alain Maurel**. "Dessalement de l'Eau de Mer et des Eaux Saumâtres", *Technique & Documentation, Paris, France, 2001*.
- [18] **A. Sadi**. "Le Dessalement : Procédés et Energie Solaire" *Division Thermique Solaire, CDER, Alger, Bulletin N°6 Décembre, 2004*.
- [19] www.itdg.org/docs/technical_information_service/solar_distillation.n." Solar Distillation", *Intermediate Technology Development Group, 2006*.
- [20] **Eduardo Zarza Moya**. www.gem.es/MATERIEL/DOCU " Dessalement de l'Eau au Moyen d'Energie ", *CIEMAT- Plateforme Solaire d'Almeria, 2006*.
- [21] **R. Bernard, G. Merguy, M. Schwartz**. Le rayonnement solaire : conversion thermique et application. *Technique et documentation, deuxième édition -1980*.
- [22] **Abla.CHAKER, Nassima. BOUKERZAZA**. "Caracteristiques de Fonctionnement d'un Distillateur Solaire", *12ème Journées Internationales de Thermique Tanger, Maroc, 15 au 17 novembre 2005*.

- [23] **Rajesh Tripathi, G.N. Tiwari** "Effect of Water Depth on Internal Heat and Mass Transfer for Active Solar Distillation", *Desalination*, 173,187-200, 2005.
- [24] **R. Tchinda et E. Kaptoum**, Simulation numérique des performances d'un distillateur solaire fonctionnant en mode indirect. *African journal of science and technology (AJST) science and engineering series* vol.5, no1, pp.79-91, 2004.
- [25] **Halima Zaidi**. Etude et optimisation des paramètres thermophysique en vue l'amélioration de la performance d'un distillateur solaire. Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2006.
- [26] **Rym Rahmani**. Rendement d'un distillateur solaire à plusieurs étages effet de certain paramètre thermophysique sur le rendement, Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine (2007).
- [27] **Saida Fedali**. Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales : Mémoire de Magister, Université Batna, 2008.