

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

*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

*Faculté du Génie de la Construction*

*Département de génie mécanique*



# Mémoire de fin d'études

*En vue d'obtention du diplôme de Master en génie mécanique*

*Option : Energétique*

*Thème : Etude et réalisation d'un capteur solaire parabolique  
pour distillation d'eau de mer*

*Proposé et dirigé par :*

*Mr.MAKHLOUF.S*

*Réalisé par :*

*AKNOUCHE Thileli*

*FEKRAOUI Yakoub*



*Promotion : 2018/2019*

# ***Remerciements***

*Tout d'abord, merci pour le grand DIEU de nous avoir accordé la  
Puissance et la volonté de terminer ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre  
encadreur Monsieur S.Makhlouf enseignant à l'université Mouloud  
Mammeri Tizi-Ouzou qui nous a permis et aidé, sous sa direction, à  
réaliser ce travail ainsi que pour ses précieux conseils et sa  
disponibilité tout le long de la recherche.*

*Nous remercions vivement les membres de jurys d'avoir accepté de  
juger notre travail.*

*Nos sincères remerciements pour tous ceux qui ont contribué, de  
près ou de loin, à la réalisation de ce modeste projet.*

# Dédicaces

*A mes chers parents auxquels je dois tout, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être, que Dieu vous garde  
prés de moi*

*A mon frère Sofiane qui a été un deuxième père pour moi, a mes petites sœurs Thiziri et Dyhia*

*A mon très cher époux Massinissa qui m'a soutenu et encouragé et à toute ma belle famille*

*A ma meilleure copine Jasmine*

*Je vous remercie.*

*Aknouche Thileli*

## *Sommaire*

Introduction générale	1
<b>Chapitre I : Gisement solaire</b>	
I.1-Introduction	2
I.2- Composition du soleil	2
I.2.1- L'intérieur	2
I.2.2- La photosphère	2
I.2.3- La chromosphère	2
I.2.4- La couronne solaire	2
I.3-La sphère céleste	3
I.4- Les coordonnées célestes	3
I.4.1- Coordonnées géographiques	3
➤ La latitude	3
➤ La longitude	3
➤ L'altitude	3
I.4.2- Coordonnées équatoriales	4
➤ La déclinaison du soleil	4
➤ L'angle horaire	5
I.4.3- Coordonnées horizontales	6
➤ Hauteur du soleil	6
➤ Azimut du soleil	6
I.5- Paramètres de temps	6
I.5.1- Equation du temps	6
I.5.2- Temps solaire moyen	7
I.5.3- Temps solaire universel	7
I.5.4- Temps légal	7
I.5.5- Temps solaire vrai	7
I.6- Le rayonnement solaire	7
I.6.1- La durée d'insolation	7
I.6.2- Rayonnement hors atmosphère	7
I.6.3- Rayonnement en atmosphère terrestre	8
I.6.4- Indice de clarté	8
I.6.5- La constance solaire	9
I.7- Rayonnement solaire arrivant au sol	9
I.7.1- Le rayonnement direct	9
I.7.2- Le rayonnement diffus	9
I.7.3- Le rayonnement réfléchi	10
I.7.4- Le rayonnement global	10
I.8-Le rayonnement solaire en Algérie	10
I.9-Conclusion	11
<b>Chapitre II : Etude théorique d'un concentrateur solaire parabolique</b>	
II-1- Introduction	12
II-2- Géométrie parabolique	12
II-2-1- Définition	12

II-2-2-Equation d'une parabole	13
II-2-3-Equation réduite d'une parabole	13
II-2-4-Caractéristiques d'une parabole	14
➤ Surface d'une parabole	14
➤ Longueur d'arc parabolique	14
➤ Surface d'ouverture d'une parabole	14
➤ Angle d'ouverture d'une parabole	15
II-3- Système optique d'une surface parabolique	16
II-4- Composants d'un concentrateur solaire parabolique	17
II-4-1- Réflecteur	17
II-4-2-Récepteur	18
II-4-3- Le support	19
II-5- La concentration solaire	19
II-5-1- Concentration géométrique	19
II-5-2- Concentration optique	19
II-6-Bilan thermique sur le concentrateur parabolique	20
II-6-1- Réflecteur	20
II-6-2- Récepteur	20
➤ Puissance solaire utile	20
➤ Puissance solaire absorbée	21
➤ Pertes thermiques	21
II-7- Expression de la température au niveau du récepteur	22
II-8- Efficacité du concentrateur parabolique	23
II-9- Conclusion	23
<b>Chapitre III : Dessalement d'eau de mer</b>	
III-1- Introduction	24
III-2- Source d'eau	24
III-3- origine de l'eau sur la terre	25
III-3-1- Les eaux souterraines	25
III-3-2- Les eaux de surfaces captives ou en écoulement	25
III-3-3- Les eaux de mer et eaux saumâtres	26
III-4- Classification des eaux selon la salinité	26
III-5-L'eau potable	27
III-6- Les différents procédés de dessalement	27
III-6-1- La distillation de l'eau	27
➤ Distillation Multiples -Effets	28
➤ Distillation Multi-Flash	28
➤ Distillation par voie solaire	29
➤ Distillateur solaire d'urgence	29
III-6-2- L'osmose inverse	30
III-6-3- L'électrodialyse	31
III-6-4- Dessalement par congélation	32
III-7- Avantages et inconvénients du dessalement	32
III-8- Conclusion	33
<b>Chapitre IV : réalisation du concentrateur solaire parabolique</b>	
IV-1- introduction	34
IV-2- Les différentes étapes de réalisation	34

IV-2-1-Le réflecteur	34
➤ Calculs des différentes dimensions de la parabole	34
➤ Calculs effectués sur EXCEL	35
➤ Conception de la parabole en 3D avec SolidWorks	36
➤ Réalisation de la parabole	37
Le moule	37
La parabole	38
➤ Couverture en aluminium	38
IV-2-2-Le récepteur	39
IV -2-3-Tuyau de condensation	40
IV -2-4-Système de refroidissement	40
IV-2-5- réservoir d'eau distillée	41
IV-2-6- Le support et le système de poursuite	41
IV-3-Conclusion	43
<b>Chapitre V : résultats et discussions</b>	
V-1- Introduction	44
V-2-Installation du concentrateur	44
V-3-L'emplacement du thermocouple	45
V-4- L'expérience	46
➤ Test 01 : 04-11-2019 à 13h	46
➤ Test 02 Eau de robinet réalisé le 27-11-2019 à 12h30 mn	47
➤ Test 03 Eau salée réalisé le 01-12-2019 à 13h05 mn	48
➤ Test 04 Les margines effectué le 02-12-2019 à 10h	50
➤ Test 05 : Séchage complet des margines effectué le 06-12-2019	52
V-5-Comparaison des Test	52
V-6- Mesures de PH effectuées sur les eaux	52
V-7-Problèmes rencontrés	53
V-8-Conclusion	53
Conclusion générale	54

## *Nomenclature*

$\varphi$ : Latitude	[degré°]
L : Longitude	[degré°]
$\delta$ : déclinaison du soleil	[degré°]
n <sub>j</sub> : numéro de jour de l'année à partir du 1 <sup>er</sup> janvier	[Jr]
$\omega$ : Angle horaire	[degré°]
h : hauteur du soleil	[degré°]
a : Azimut	[degré°]
E <sub>t</sub> : Equation du temps	[heure]
TSM : Temps solaire moyen	[heure]
TU : Temps universel	[heure]
TL : Temps légal	[heure]
TSV : Temps solaire vrai	[heure]
S <sub>0</sub> : Durée du jour	[heure]
G <sub>0</sub> : rayonnement extraterrestre	[W/m <sup>2</sup> ]
G : rayonnement terrestre	[W/m <sup>2</sup> ]
K <sub>T</sub> : indice de clarté	/
I <sub>m</sub> : puissance moyenne reçue par la terre	[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>0</sub> : puissance interceptée au sommet de l'atmosphère	[W/m <sup>2</sup> ]
C <sub>t,s</sub> : constante solaire	/
D : diamètre de la parabole	[m]
P : paramètre de la parabole	[m]
f : distance focale= p/2	[m]
P <sub>f</sub> : profondeur de la parabole	[m]
S <sub>x</sub> : surface de la parabole	[m <sup>2</sup> ]
L <sub>p</sub> : longueur d'une parabole	[m]
A <sub>p</sub> : surface d'ouverture d'une parabole	[m <sup>2</sup> ]
$\Psi$ : angle d'ouverture d'une parabole	[degré]
C <sub>g</sub> : concentration géométrique	/
C <sub>o</sub> : concentration optique	/
A <sub>rec</sub> : surface du récepteur	[m <sup>2</sup> ]
Q <sub>rec</sub> : flux reçu à l'ouverture du récepteur	[w]

$S_{dir}$ : flux reçu à l'ouverture du réflecteur	[w]
$Q_{ref}$ : flux réfléchi	[w]
$A_{ref}$ : surface rayonnée	[m <sup>2</sup> ]
$\phi_{ref}$ : coefficient de réflexion de l'aluminium	/
$Q_u$ : puissance solaire utile	[w]
$Q_a$ : puissance solaire absorbée par le récepteur	[w]
$Q_p$ : puissance solaire perdue	[w]
$C_f$ : chaleur massique du fluide	[J/Kg.K]
$m_f$ : masse du fluide	[kg]
$C_r$ : chaleur massique du récepteur	[J/Kg.K]
$m_r$ : masse du récepteur	[kg]
$\tau_{rec}$ : facteur de transmission du récepteur	/
$\alpha_{rec}$ : facteur d'absorption de la surface du récepteur	/
$\eta_{opt}$ : rendement optique du récepteur	/
$Q_{cv}$ : flux perdu par convection	[w]
$Q_{ray}$ : flux perdu par rayonnement	[w]
$Q_{evap}$ : flux perdu par évaporation d'eau	[w]
$h_{cv}$ : coefficient de transfert par convection	[w/m <sup>2</sup> .k]
$h_{ray}$ : coefficient de perte par rayonnement	[w/m <sup>2</sup> .k]
$T_{rec}$ : température du récepteur	[°C]
$T_a$ : température ambiante	[°C]
$T_{ciel}$ : température du ciel	[°C]
$\epsilon_{rec}$ : facteur émissivité de l'absorbeur	/
$\sigma$ : Constante Stefan-Boltzmann	[W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]
$C_p$ : chaleur massique à pression constante	[J/kg.k]
$L_v$ : chaleur latente de vaporisation	[J/kg]
$\eta$ : Efficacité du concentrateur	/

## *Liste des tableaux*

<b>Chapitre I : Gisement solaire</b>		
<b>Tableau I-1</b>	Ensoleillement solaire en Algérie par régions climatiques	10
<b>Chapitre III : dessalement d'eau de mer</b>		
<b>Tableau III -1</b>	Les principales ressources d'eau distribuées dans le monde	25
<b>Tableau III -2</b>	Classification des eaux selon la salinité	26
<b>Chapitre IV : réalisation du concentrateur solaire parabolique</b>		
<b>Tableau IV-1</b>	Coordonnées de quelques points de notre courbe	35
<b>Tableau IV-2</b>	Caractéristiques du récepteur	39
<b>Chapitre V : résultats et discussions</b>		
<b>Tableau V-1</b>	Différentes températures mesurées au Test 02	47
<b>Tableau V-2</b>	Différentes températures mesurées au Test 03	49
<b>Tableau V-3</b>	Différentes températures mesurées au Test 04	50
<b>Tableau V-4</b>	Résultats des mesures de PH effectuées sur les eaux	53

## *Liste des figures*

<b>Chapitre I : Gisement solaire</b>		
<b>Figure I-1</b>	Structure du soleil	3
<b>Figure I-2</b>	Les coordonnées géographiques du soleil	4
<b>Figure I-3</b>	Variation de la déclinaison solaire en fonction des jours	5
<b>Figure I-4</b>	Les coordonnées horaires du soleil	5
<b>Figure I-5</b>	Les coordonnées horizontales du soleil	6
<b>Figure I-6</b>	Répartition spectrale du rayonnement solaire	8
<b>Figure I-7</b>	Evolution annuelle de la constante solaire	9
<b>Figure I-8</b>	Les composantes du rayonnement solaire	10
<b>Figure I-9</b>	Irradiation globale journalière reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu	11
<b>Chapitre II : Etude théorique d'un concentrateur solaire parabolique</b>		
<b>Figure II-1</b>	Propriétés géométriques de la parabole	12
<b>Figure II-2</b>	Graphe d'une parabole d'équation $y = \frac{x^2}{2p}$	13
<b>Figure II-3</b>	Angle d'ouverture d'une parabole en fonction de la distance focale	15
<b>Figure II-4</b>	Graphe montrant l'angle d'ouverture en fonction de la distance focale	16
<b>Figure II-5</b>	Système optique d'une surface parabolique	16
<b>Figure II-6</b>	Variation du coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde perpendiculaire à la surface	17
<b>Figure II-7</b>	Catégories de récepteur	18
<b>Figure II-8</b>	Concentrateur solaire parabolique	19
<b>Figure II-9</b>	Bilan énergétique sur un récepteur	22
<b>Chapitre III : dessalement d'eau de mer</b>		
<b>Figure III-1</b>	Origine de l'eau sur terre	26
<b>Figure III-2</b>	Distillation a multiples effets	28
<b>Figure III-3</b>	Distillation multi-flash	29
<b>Figure III-4</b>	Distillateur d'urgence	30
<b>Figure III-5</b>	L'osmose et l'osmose inverse	30

<b>Figure III-6</b>	Principe d'une électrodialyse	31
<b>Chapitre IV : réalisation du concentrateur solaire parabolique</b>		
<b>Figure IV-1</b>	Courbe de la parabole $y = \frac{x^2}{2p}$ tracée avec excel	35
<b>Figure IV-2</b>	Courbe de la parabole $y = \frac{x^2}{2p}$ tracée à la main	36
<b>Figure IV-3</b>	Parabole conçue avec logiciel solidworks	36
<b>Figure IV-4</b>	Modèle de l'arc parabolique	37
<b>Figure IV-5</b>	Le moule en plâtre	37
<b>Figure IV-6</b>	Moulage de la parabole	38
<b>Figure IV-7</b>	Découpage du papier Aluminium	38
<b>Figure IV-8</b>	Collage de l'Aluminium sur la parabole	39
<b>Figure IV-9</b>	Récepteur et tuyau de condensation	40
<b>Figure IV-10</b>	Système de refroidissement	40
<b>Figure IV-11</b>	Réservoir d'eau distillée	41
<b>Figure IV-12</b>	Support du réflecteur et système de poursuite	42
<b>Figure IV-13</b>	Le concentrateur solaire parabolique	42
<b>Chapitre V : résultats et discussions</b>		
<b>Figure V-1</b>	Localisation du foyer	44
<b>Figure V-2</b>	Schéma montrant l'emplacement du thermocouple	45
<b>Figure V-3</b>	Emplacement du thermocouple sur le concentrateur	46
<b>Figure V-4</b>	Mesure de la température à l'ouverture du récepteur	46
<b>Figure V-5</b>	Evolution des températures en fonction du temps Test02	48
<b>Figure V-6</b>	Evolution des températures en fonction du temps au Test 03	49
<b>Figure V-7</b>	Evolution des températures en fonction du temps au Test 04	51

## *Introduction générale*

L'eau est une substance essentielle à la survie et au développement de l'humanité. Mais que va devenir cette fragile ressource ?

Au plan mondial, la question de l'approvisionnement en eau devient chaque jour plus préoccupante, les besoins en eau potable dans le monde augmentent d'une manière continue, alors que les réserves souterraines se trouvent constamment diminuées, la situation ne pourra qu'empirer dans les années à venir.

Les réserves d'eau saumâtre et d'eau de mer, représente une richesse quasiment inépuisable mais uniquement si on peut les dessaler car elles ont des teneurs en sel dépassant les normes exigées pour une eau potable, Le dessalement de ces eaux, par des unités classiques de traitement, nécessite beaucoup d'énergie électrique et/ou calorifique. Il s'avère que les régions où l'eau potable est un bien rare et que l'énergie électrique nécessaire à la production de l'eau douce à partir d'eau salée soit souvent inexistante, sont les zones les plus ensoleillées du globe.

L'homme de ces régions pourra pallier aux contraintes de ravitaillement et fourniture énergétiques en s'intéressant à l'utilisation de l'énergie solaire pour le dessalement.

C'est donc dans cette optique que les chercheurs de nombreux pays développent des techniques de dessalement de plus en plus performantes, afin de produire une plus grande quantité d'eau potable à un coût plus faible.

Plusieurs types de distillateurs solaires ont été construits et essayés à travers le monde.

L'objectif de ce travail est l'étude et la réalisation d'un capteur solaire parabolique destiné à la distillation de l'eau de mer.

Le premier chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire et présente quelques définitions de base et généralité sur le rayonnement solaire et les systèmes de coordonnées.

Le second chapitre consiste en l'étude théorique d'un concentrateur parabolique.

Le troisième chapitre présente quelques notions de base sur les ressources d'eau sur terre et les différentes techniques du dessalement.

Le quatrième chapitre est consacré à la réalisation du capteur solaire parabolique en mettant l'accent sur toutes les étapes de mise en œuvre du prototype.

Le cinquième chapitre qui est le dernier est porté sur l'expérience de la distillation d'eau de mer et les résultats obtenus.

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale.

*Chapitre I : Le gisement  
solaire*

### I-1-Introduction

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables. Comme la plupart des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. La connaissance de la position du soleil dans le ciel, à tout instant et en tout lieu, est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher de soleil ainsi que sa trajectoire dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer le gisement solaire pour un site donné. Ce chapitre sera consacré au rappel de quelques notions de bases.

### I-2-Composition du soleil

**I-2.1- L'intérieur :** Contient 40% de la masse solaire, c'est là où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire. Cette couche est composée de trois zones :

**Le noyau :** qui occupe 15% du soleil, à une température de 15 millions de degrés est la partie dans laquelle l'énergie du soleil est créée et où l'hydrogène est transformé en hélium par réaction nucléaire.

**Zone radiative :** Appelée aussi zone du rayonnement, dans cette région l'énergie créée dans le noyau est transportée vers l'extérieur par des photons [2].

**Zone convective :** La température descend sous le million de degrés, dans cette couche le transport d'énergie se fait par convection, c'est-à-dire par des mouvements de la matière présente. Le gaz chaud des profondeurs remonte vers la surface, libère l'énergie en se refroidissant [2].

**I-2.2- La photosphère :** C'est une couche de gaz qui constitue la surface visible du soleil, d'une épaisseur d'environ 300 km et de température de l'ordre 5800 K décroissant avec l'altitude jusqu'à une température de surface de 4200 K. Elle émet la plus grande partie du rayonnement solaire [3].

**I-2.3- La chromosphère :** C'est la basse atmosphère du soleil, une fine couche rose de gaz, invisible en plein jour et observable lors des éclipses de soleil. Sa couleur rose est due à l'émission lumineuse de l'hydrogène ionisé [4].

**I-2.4- La couronne solaire :** C'est la couche la plus externe de l'atmosphère du soleil, elle peut être observée à l'œil nu uniquement lors d'une éclipse solaire. Cette masse gazeuse s'étend sur près de 10 millions de kilomètres au dessus de la surface solaire. La température est de l'ordre du million dans la couronne qui est un plasma [5].

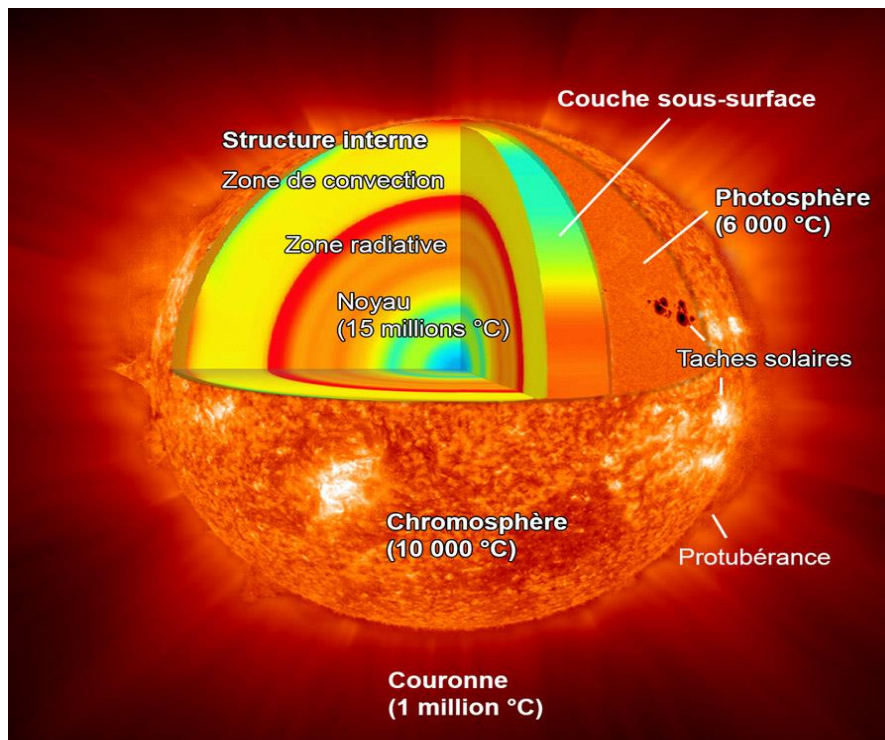


Figure I-1 : Structure du soleil [33]

### I-3-La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre énorme qui admet pour centre la terre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. Ce concept astronomique hérité de l'antiquité, permet de positionner les astres dans le ciel en leur attribuant des coordonnées uniques.

### I-4- Coordonnées célestes

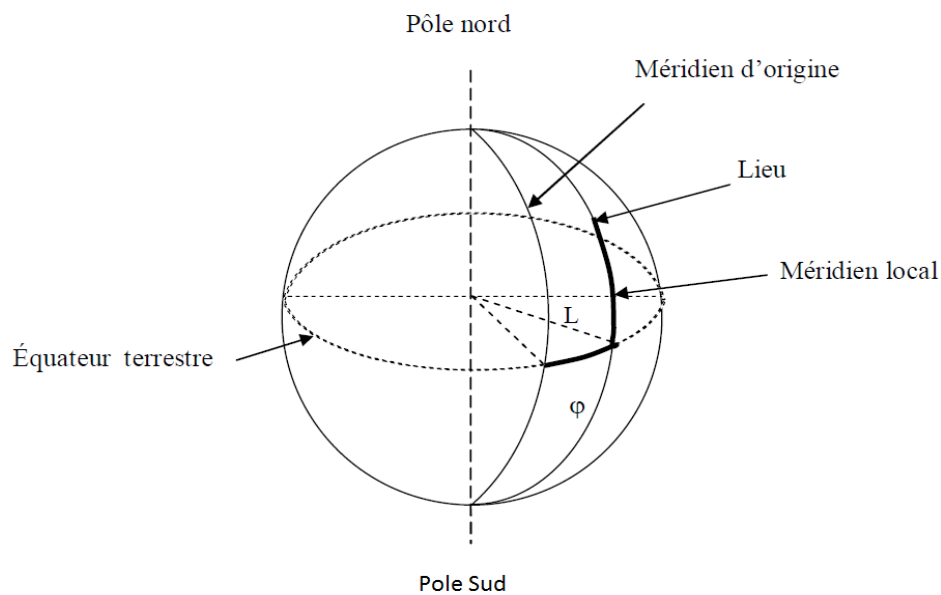
#### I-4.1- Coordonnées géographiques

La Terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle Nord, et le pôle Sud. Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude, ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point, ainsi que par son altitude [8].

**La latitude ( $\varphi$ ):** Une latitude donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur. C'est l'angle  $\theta$  que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial. Elle varie entre 0 et 90°, positivement vers le pôle nord et négativement vers le pôle sud.

**La longitude ( $L$ ):** C'est l'angle formé par le méridien du lieu considéré et le méridien d'origine (Greenwich), c'est une mesure sur 360°, elle est comprise entre -180° (Ouest) et +180° (Est).

**L'altitude :** Elle exprime la distance verticale séparant un point considéré du relief terrestre du niveau de la mer.



**Figure I-2: Les coordonnées géographiques du soleil [1]**

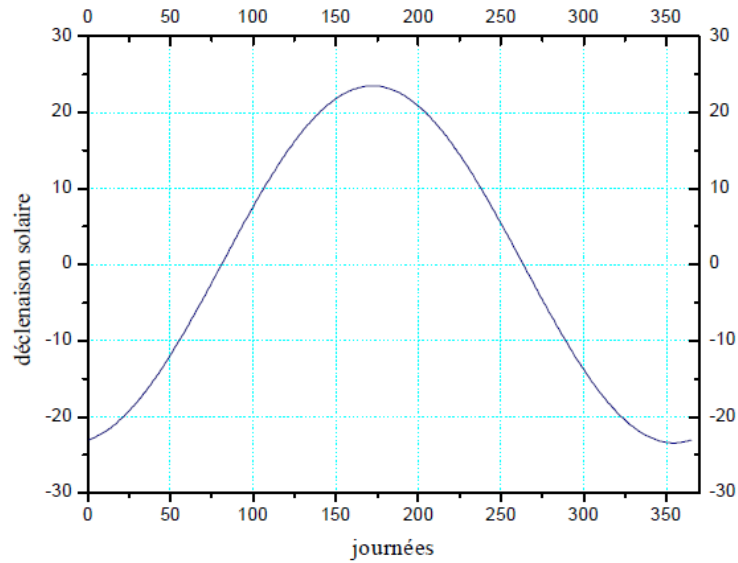
### I-4.2- Coordonnées équatoriales (horaires)

**La déclinaison du soleil  $\delta$ :** La déclinaison solaire est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Elle est exprimée en degré ( $^{\circ}$ ), minute ( $'$ ) et seconde ( $''$ ) d'arc. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. L'équation de Copernic qui relie ces deux grandeurs est donnée par [7,8] :

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(nj + 284)\right]$$

$nj$  : numéro de jour de l'année variant de 1 à 365

La déclinaison est de  $-23.45^{\circ}$  le 21 Décembre qui correspond au solstice d'hiver,  $23.45^{\circ}$  le 21 Juin qui correspond au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes de printemps et d'automne le 21 Mars et le 21 Septembre.



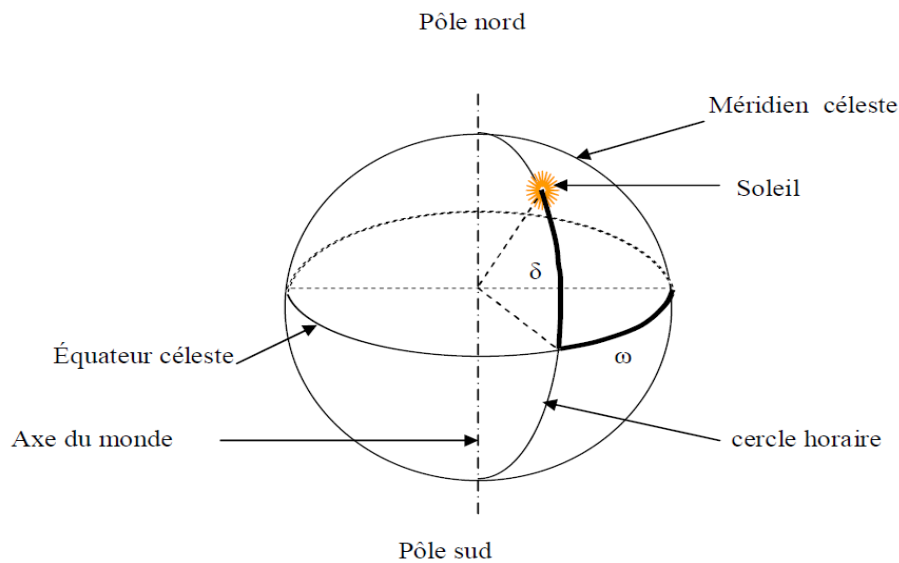
**Figure I-3: Variation de la déclinaison solaire en fonction des jours [9]**

**L'angle horaire ( $\omega$ ):** A chaque moment, il est plus pratique de calculer le temps en degrés qu'en heures. L'unité est l'angle horaire (24 h représente  $360^\circ$  horaires). L'angle horaire est l'angle compris entre le méridien-origine, passant par le Sud et la projection de la direction du soleil sur le plan équatorial. Il mesure la course du soleil dans le ciel. Il est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15(\text{TSV} - 12)$$

TSV : temps solaire vrai

L'angle horaire se mesure à partir du midi solaire, il est positif s'il est avant midi et négatif s'il est après midi ( $\omega$  vaut  $0^\circ$  à midi,  $-90^\circ$  à 18 heures et  $90^\circ$  à 6 heures, en temps solaire vrai, chaque heure le décale de  $15^\circ$ , positif le matin et négatif l'après midi).



**Figure I-4: Les coordonnées horaires du soleil [9]**

### I-4.3- Coordonnées horizontales

- **La hauteur du soleil (h)** : C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à  $0^\circ$  au lever et au coucher astronomiques du soleil. Sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai. L'expression de la hauteur du soleil est donnée par :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega)$$
$$h_{max} = \frac{\pi}{2} - \varphi + \delta$$

$\varphi$  : Latitude du lieu.

$\delta$ : La déclinaison du soleil.

$\omega$ : L'angle horaire.

La hauteur du soleil intervient fortement sur la valeur de l'éclairement solaire [7,8].

- **L'azimut du soleil (a)** : C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le Sud. L'azimut est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'Est, Il est nul à midi TSV et maximal au lever et au coucher du soleil. Il est donné par la relation suivante [7,8] :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)}$$

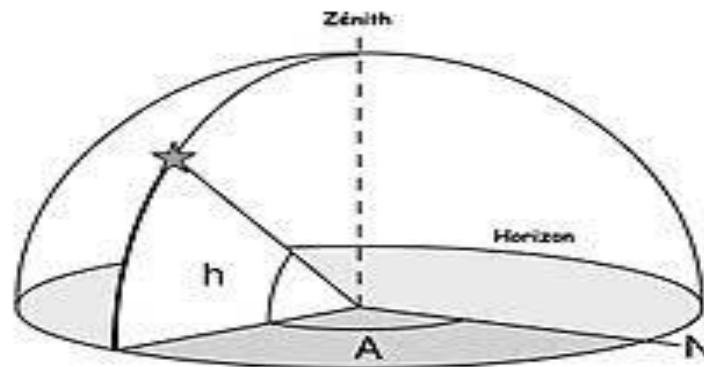


Figure I-5: Les coordonnées horizontales du soleil [34]

### I-5- Paramètres de temps

**I-5.1- Equation du temps** : l'équation du temps à un instant donné est la différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai, elle est définie par [9] :

$$E_t = 9.87 \sin \left[ 2 \frac{360}{365} (nj - 81) \right] - 7.53 \cos \left[ \frac{360}{365} (nj - 81) \right] - 1.5 \sin \left[ \frac{360}{365} (nj - 81) \right]$$

**I-5.2- Le temps solaire moyen :** La rotation de la terre autour d'elle-même introduit la notion du temps solaire moyen ou TSM. On le définit comme étant le temps qui sépare en moyenne deux passages successifs par le méridien du lieu, une rotation complète de la terre autour d'elle-même prend 24 heures [1].

**I-5.3- Le temps solaire universel :** Le temps universel TU est défini par l'heure du passage du soleil au méridien d'origine. Le méridien retenu comme origine est celui de Greenwich et le TSM correspond au temps universel (c'est le TSM à la longitude 0°). La différence entre le temps solaire moyen et le temps universel est appelée correction de longitude, le temps universel est lié au temps solaire moyen (local) par la relation [1] :

$$TSM = TU \pm \frac{L}{15}$$

L: longitude du lieu, (+) pour longitude Est, (-) pour longitude Ouest.

**I-5.4- Le temps légal :** Le temps légal (ou local) est le temps officiel de l'Etat. Il diffère par rapport au temps mondial de Greenwich par un décalage exprimé en heures.

$$TL = TU + \Delta H$$

$\Delta H$  : étant le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'Etat considéré, ( $\Delta H = 1$  heure pour l'Algérie) [1].

**I-5.5- Le temps solaire vrai :** C'est le temps mis par le soleil entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu (direction Nord-Sud). Le temps solaire vrai et le temps solaire moyen diffèrent. Cette différence est appelée équation du temps, elle varie en fonction du jour [1] :

$$TSV = TSM + E_t$$

## I-6- Le rayonnement solaire

**I-6.1- Durée d'insolation :** La durée d'ensoleillement, ou durée de l'insolation est un indicateur climatique qui mesure la durée pendant laquelle un endroit, un lieu est soumis à rayonnement solaire direct supérieur à 120 W/m<sup>2</sup>. L'insolation est directement liée à la couverture nuageuse, en absence permanente de nuages. La durée est pratiquement égale à la durée du jour. Elle est définie par :

$$S_0 = \frac{2\omega_c}{15}$$

$\omega_c$  : Angle horaire au coucher du soleil

$S_0$  : Durée du jour (h) [11]

**I-6.2- Rayonnement hors atmosphère (extraterrestre) :** Le rayonnement solaire extraterrestre est celui qui frappe la surface de la couche atmosphérique et il couvre un très large domaine de longueur d'ondes. Sur une surface horizontale, et pour le jour n le rayonnement  $G_0$  est défini par l'équation suivante :

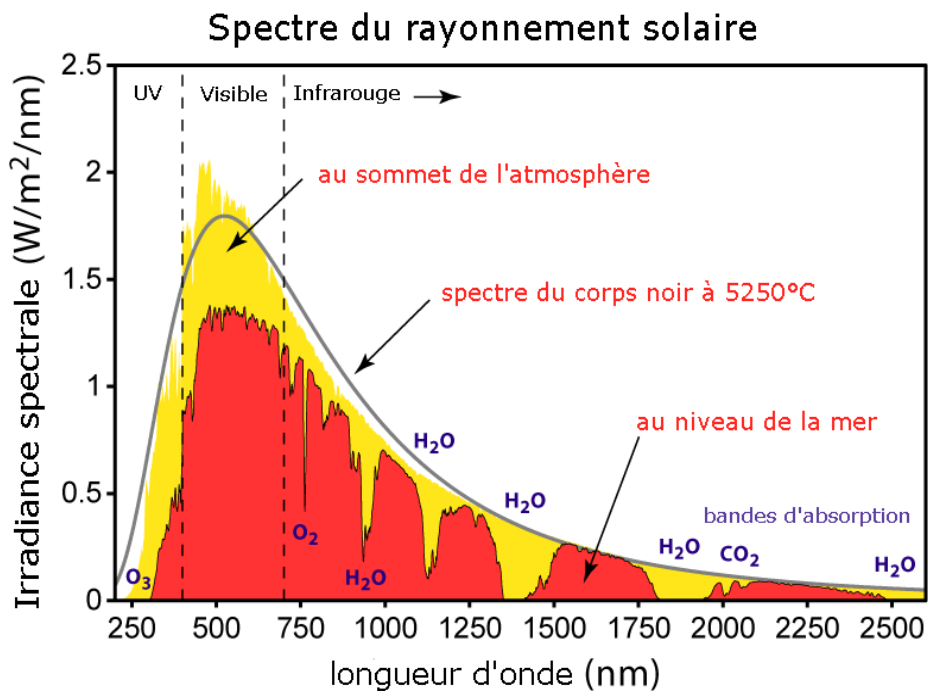
$$G_0 = \frac{60 * 24}{\pi} G_{sc} \left[ 1 + 0.034 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \right] [\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_0) + \omega_0 \sin(\varphi) \sin(\delta)]$$

$n$ : Numéro du jour à partir du premier Janvier

$G_{sc}$ : Constante solaire égale à  $0.082 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{mn}^{-1}$

Le rayonnement hors atmosphère dépend d'aucun paramètre météorologique, il est fonction de quelques paramètres astronomiques et géographiques tels que : la latitude du lieu ( $\varphi$ ), la déclinaison solaire ( $\delta$ ) et l'angle horaire au coucher du soleil ( $\omega_0$ ) [11].

**I-6.3- Rayonnement en atmosphère terrestre :** Le rayonnement solaire entrant dans l'atmosphère de la terre est une infime partie de celui émis par le soleil, l'atmosphère et la surface de la planète absorbent une partie de ce rayonnement incident qui arrive dans les courtes longueurs d'ondes comprises entre  $0.2$  et  $2.5 \mu\text{m}$ . Il inclut le domaine du visible [11].



**Figure I-6: Répartition spectrale du rayonnement solaire [11]**

**I-6.4- Indice de clarté :** Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère terrestre et les nuages. Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté et est défini par :

$$K_T = \frac{G}{G_0}$$

Où  $G$  est le rayonnement solaire moyen mesuré sur une surface horizontale au niveau du sol et  $G_0$  le rayonnement extraterrestre.

La moyenne mensuelle de l'indice de clarté varie selon les endroits et les saisons et varie généralement entre  $0.3$  (pour des régions et des saisons pluvieuses) et  $0.8$  (pour des saisons ou des climats secs et ensoleillés) [11].

**I-6.5- La constante solaire :** La constante solaire est l'intensité d'énergie solaire moyenne qui tombe sur une surface unité se trouvant à la limite de l'atmosphère terrestre et perpendiculaire aux rayons solaires. Elle est indépendante des conditions météorologiques, par contre elle dépend de la distance Terre-Soleil.

En moyenne, la valeur reçue par la terre est  $I_m=1370 \text{ W/m}^2$ , mais la puissance solaire  $I_0$  interceptée au sommet de l'atmosphère est variable au cours de l'année puisque la distance Terre-Soleil est elle-même variable en raison de la trajectoire elliptique.

La correction de la distance est donnée par :

$$C_{ts} = 1 + 0.034 \cos \left[ \left( \frac{360}{365} \right) (n - 2) \right]$$

La puissance  $I_0$  est calculée à partir de la constante solaire corrigée :

$$I_0 = I_m * C_{ts}$$

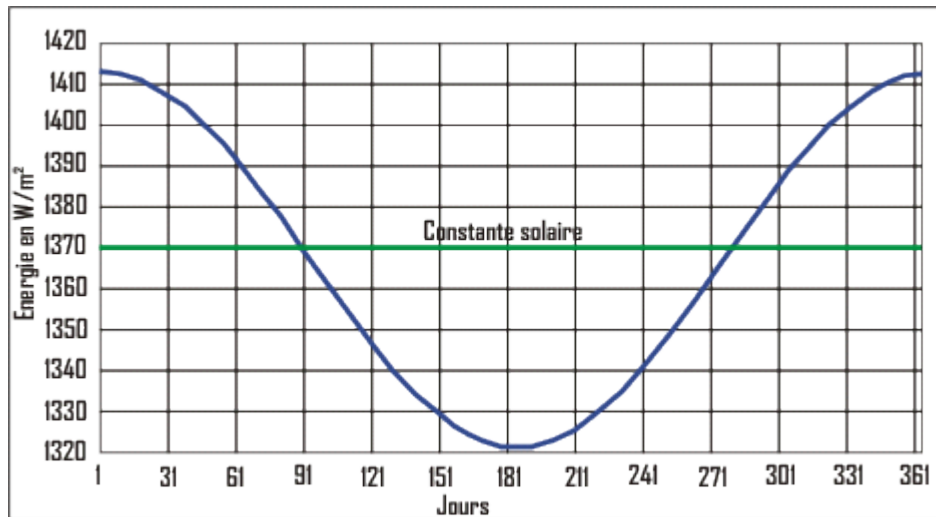


Figure I-7: Evolution annuelle de la constante solaire [11]

### I-7- Rayonnement solaire arrivant au sol

L'énergie radiative du soleil subit de profondes modifications en traversant l'atmosphère qui absorbe une partie de ce rayonnement (environ 15%), la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus et réfléchit une autre partie vers l'espace.

**I-7.1- Rayonnement direct :** Le rayonnement solaire direct se définit comme étant la lumière qui arrive directement par ciel clair. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages [8].

**I-7.2- Rayonnement diffus :** C'est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, bâtiments sol, molécules de l'air). Il n'a pas d'orientation privilégiée et provient de toutes les directions. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit [8].

**I-7.3- Rayonnement réfléchi (Albédo) :** C'est la partie du rayonnement réfléchi par la surface de la terre en raison de l'albédo qui est le coefficient de réflexion du sol [8].

**I-7.4- Rayonnement global :** On appelle rayonnement global le rayonnement solaire total parvenant au niveau du sol, soit directement, soit après diffusion. Il s'exprime simplement comme la somme du rayonnement diffus, direct et réfléchi [8].

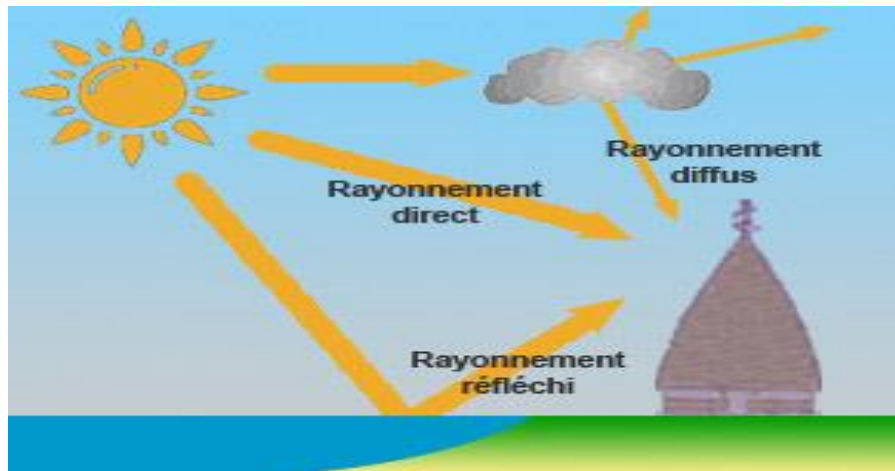


Figure I-8: Les composantes du rayonnement solaire [35]

### I-8- Le rayonnement solaire en Algérie

L'Algérie, de par sa situation géographique, constitue sur le globe terrestre une zone particulièrement bien ensoleillée. L'Algérie dispose l'un des gisements solaires parmi les plus élevés au monde. Aussi les moyennes annuelles d'ensoleillement varient entre 2600 h/an dans le Nord à 3500 h/an dans le Sud. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1 \text{ m}^2$  est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays [1].

Tableau I-1: Ensoleillement solaire en Algérie par régions climatiques [1]

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie %	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kwh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

## Chapitre I : Le gisement solaire

La distribution de l'énergie reçue en Algérie, en moyenne annuelle est donnée par la figure ci-dessous. Elle représente les différents niveaux énergétiques qui donnent un découpage du pays en régions iso-énergétiques.

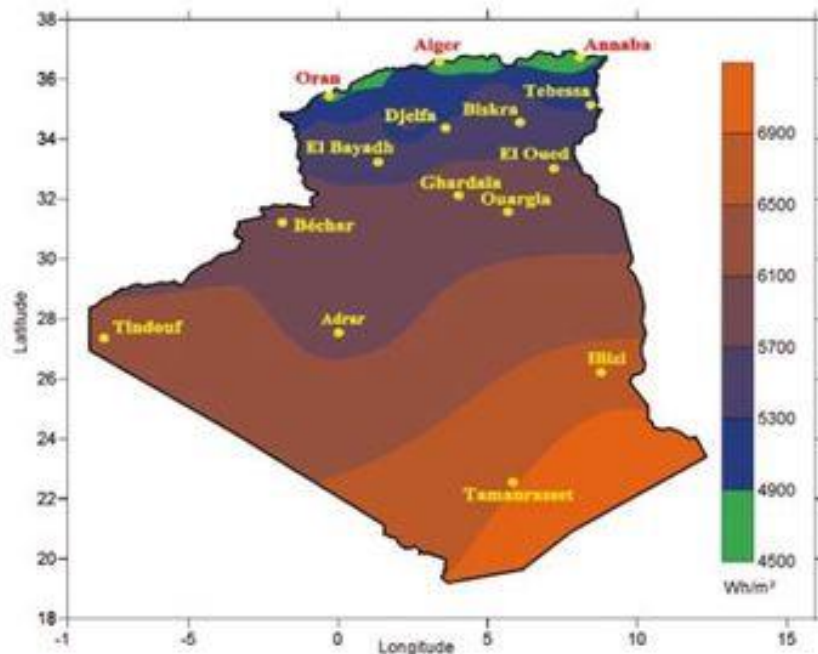


Figure I-9: Irradiation globale journalière reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [7]

### I-9-Conclusion

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire. Pour que le rayonnement solaire soit perpendiculaire au panneau solaire, et afin d'optimiser tout le système de captation, il est nécessaire de recourir à la technique de poursuite du soleil.

*Chapitre II : Etude théorique  
d'un concentrateur solaire  
parabolique*

### II-1- Introduction

L'énergie solaire est puissante, mais relativement peu dense. Il est nécessaire de concentrer le rayonnement solaire pour obtenir des températures exploitables au niveau industriel. C'est ce que propose la technique du capteur solaire à concentration, qui permet d'atteindre des températures suffisantes pour des procédés nécessitant de la vapeur ou de l'eau très chaude.

Dans ce chapitre nous allons faire une étude théorique sur un concentrateur solaire de géométrie parabolique.

### II-2- Géométrie parabolique

#### II-2-1- Définition

La parabole est une courbe plane, symétrique par rapport à un axe approximativement en forme de U. C'est un lieu des points équidistants d'une droite fixe appelée la Directrice et d'un point fixe appelé Foyer, la droite perpendiculaire à la directrice qui passe par le foyer est l'axe de symétrie de la parabole, son intersection avec la parabole est le sommet.

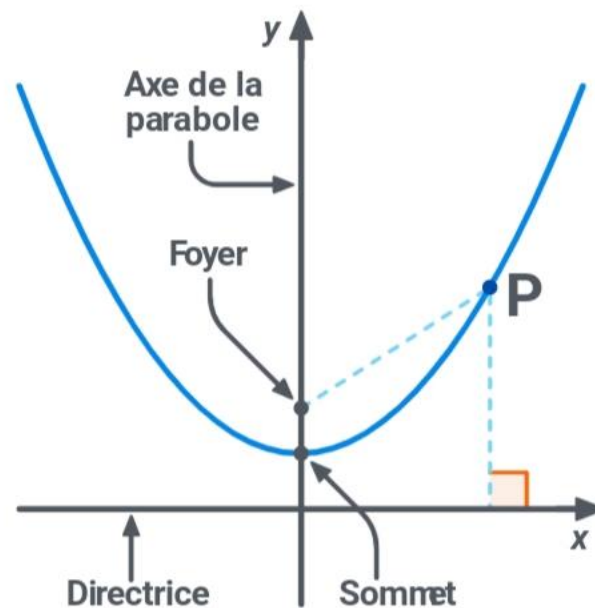


Figure II-1 : Propriétés géométriques de la parabole

### II-2-2-Equation d'une parabole

Si la parabole est donnée par son foyer F qui a pour coordonnées  $(0, \frac{p}{2})$  et une directrice, qui a pour équation  $y = \frac{-p}{2}$  (on appelle p : Paramètre de la parabole), l'équation de la parabole sera [11] :

$$y = \frac{x^2}{2p} \quad (\text{II-1})$$

### II-2-3- Equation réduite d'une parabole

On choisit un repère orthonormé  $(S, \vec{i}, \vec{j})$  d'origine S le sommet de la parabole, d'axe des ordonnées  $(\Delta)$  et l'axe focal, tel que le point F a pour coordonnées  $(0, \frac{p}{2})$ . Dans ce repère, l'ordonnée de F est strictement positive et le point K a pour coordonnées  $(0, \frac{-p}{2})$ .

Soient M(x, y) un point du plan et H  $(x, \frac{-p}{2})$  son projeté orthogonal sur (D).

$$\text{Soit } M \in (p) : MF^2 = MH^2 \Leftrightarrow x^2 + \left(y - \frac{p}{2}\right)^2 = \left(y + \frac{p}{2}\right)^2 \quad (\text{II-2})$$

Après simplification, la parabole a pour équation :

$$y = \frac{x^2}{2p}$$

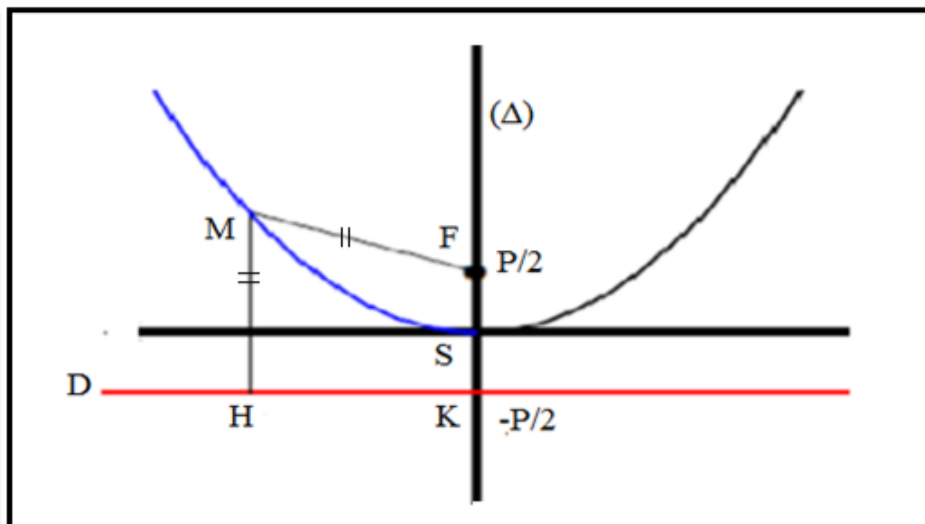


Figure II-2 : Graphe d'une parabole d'équation :  $y = \frac{x^2}{2p}$  [11]

### II-2-4- Caractéristiques d'une parabole

Deux paramètres permettent de décrire complètement une parabole et de fixer ses dimensions :

- Le coefficient « p » est responsable de l'ouverture de la parabole, il intervient dans l'équation de la parabole génératrice du paraboloïde. Plus le paramètre « p » augmente, plus l'ouverture de la parabole est petite donc la parabole devient plate, et inversement plus « p » diminue plus l'ouverture est grande et la parabole devient profonde. Ce paramètre règle donc la profondeur de la parabole.
- Le diamètre D : vu de haut, la parabole présente une ouverture circulaire dont le diamètre est D [11].

#### La profondeur d'une parabole (taille)

La taille de la courbe ou la profondeur de la parabole peut être définie comme la distance maximale depuis le sommet jusqu'à une ligne tracée à travers l'ouverture de la parabole. Elle est définie par [18] :

$$P_f = \frac{D^2}{16f} \quad (\text{II-3})$$

D : diamètre de la parabole

f : distance focale  $f = \frac{p}{2}$

#### Surface d'une parabole

La surface de l'espace enfermé entre une parabole et une ligne à travers son ouverture est donnée par :

$$S_x = \frac{2}{3} \pi \sqrt{2f} \left[ (2P_f + 2f)^{\frac{3}{2}} - 2f^{\frac{3}{2}} \right] \quad (\text{II-4})$$

#### Longueur d'une parabole

Une autre propriété de la parabole qui peut être utile dans la compréhension de la conception de concentrateur solaire est la longueur de l'arc  $L_p$ . Elle peut être trouvée en intégrant un segment différentiel de cette courbe avec les conditions limites  $X = h$  et  $Y = D/2$ . Le résultat donne l'expression [12] :

$$L_p = \left[ \frac{D}{2} \sqrt{\left(\frac{4P_f}{D}\right)^2 + 1} + 2f \text{Ln} \left[ \frac{4P_f}{D} + \sqrt{\left[\frac{4P_f}{D}\right]^2 + 1} \right] \right] \quad (\text{II-5})$$

#### Surface d'ouverture d'une parabole

La surface d'ouverture d'une parabole est la surface du disque supérieur de la parabole, elle se calcule par la formule suivante :

$$A_p = \pi \frac{D^2}{4} \quad (\text{II-6})$$

### Angle d'ouverture d'une parabole

L'angle d'ouverture d'une parabole augmente avec la diminution de la distance focale et devient plus petit avec l'augmentation de  $f$ . Plus  $f$  augmente, plus l'angle est petit, donc la parabole est relativement plate [19].

$$\tan\Psi = \frac{f/d}{2(f/d)^2 - 1/8} \quad (\text{II-7})$$

$f$  : distance focale.

$d$  : diamètre de l'ouverture de la parabole.

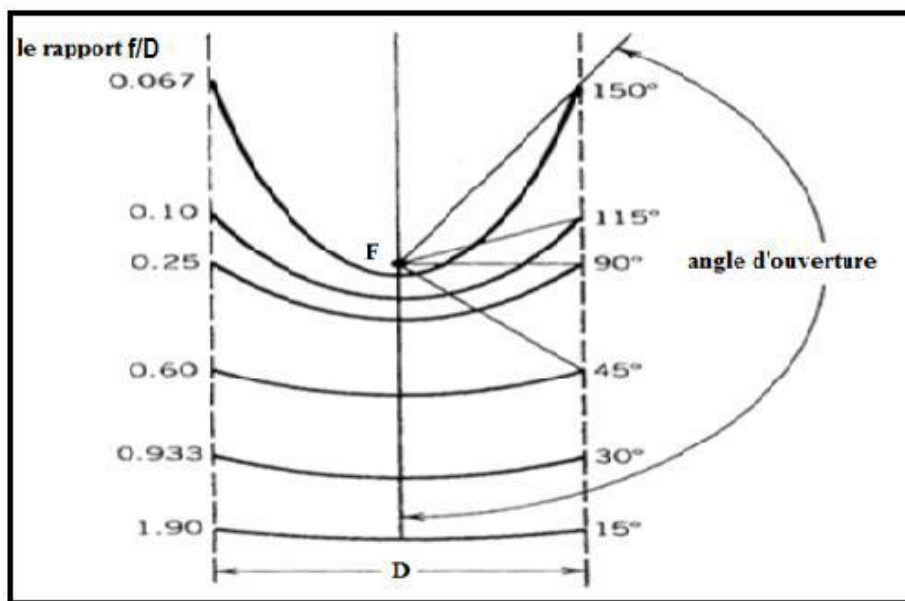


Figure II-3 : Angle d'ouverture d'une parabole en fonction de la distance focale [10]

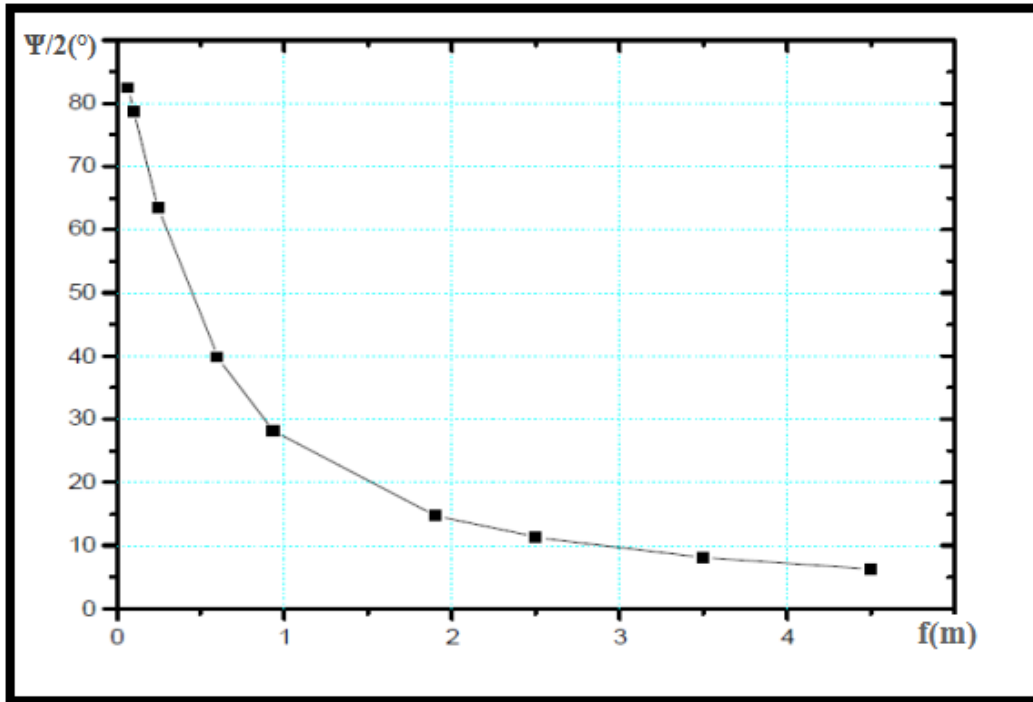


Figure II-4 : Graphe montrant l'angle d'ouverture en fonction de la distance focale [10]

### II-3- Système optique d'une surface parabolique

L'idée d'utiliser une surface parabolique vient du fait qu'elle est stigmatique pour les points à l'infini situés sur son axe. D'après les lois de réflexion, tout rayon lumineux parallèle à l'axe de la parabole est réfléchi par la parabole suivant une droite passant par le foyer. Donc la parabole focalise tous les rayons réfléchis en un point appelé « foyer » [20].

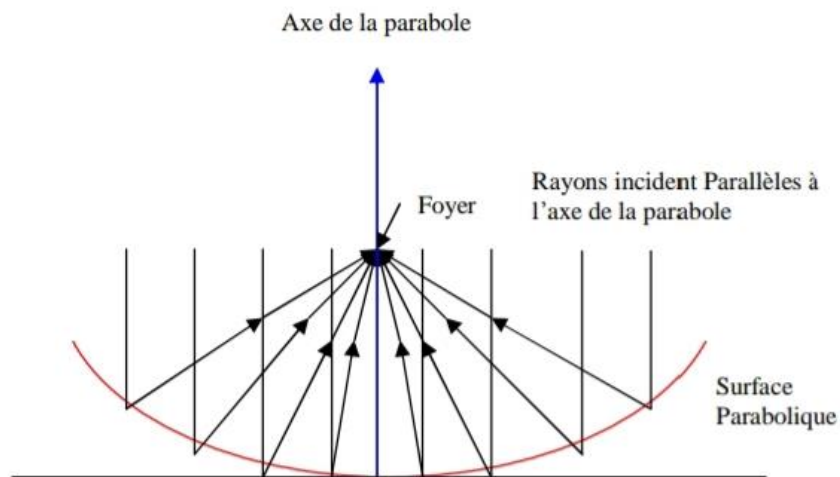


Figure II-5 : Système optique d'une surface parabolique [10]

### II-4- Composants d'un concentrateur solaire parabolique

#### II-4-1- Réflecteur

Le réflecteur est un miroir de surface parabolique qui a pour fonction de diriger les rayonnements solaires. Sa propriété la plus importante : quand un faisceau lumineux arrive parallèlement à l'axe tous les rayons réfléchis convergent et se concentrent en un point unique pour obtenir de très hautes températures [11].

#### Choix du métal

Pour la surface réfléchissante de la parabole, il faut utiliser un métal qui réfléchit le mieux les rayons du soleil. La réflexion d'un métal est caractérisée par son coefficient de réflexion, défini comme le rapport entre l'intensité réfléchie et l'intensité incidente. Le coefficient de réflexion, noté  $\phi_{ref}$ , est donc un nombre adimensionnel compris entre 0 et 1. Le coefficient de réflexion dépend de la longueur d'onde du rayon incident et de l'angle d'incidence. Lorsque l'angle incident augmente, le coefficient de réflexion augmente également.

A la limite, lorsque l'angle incident tend vers  $90^\circ$ ,  $\phi_{ref}$  tend vers 1.

Nous avons vu que l'énergie solaire qui arrive sur Terre provient principalement des Ultraviolets (UV-A), de la lumière visible et des Infrarouges. Il faut donc choisir un métal qui est caractérisé par un coefficient de réflexion élevé pour des longueurs d'ondes comprises entre 280 et 1400 nm [11]

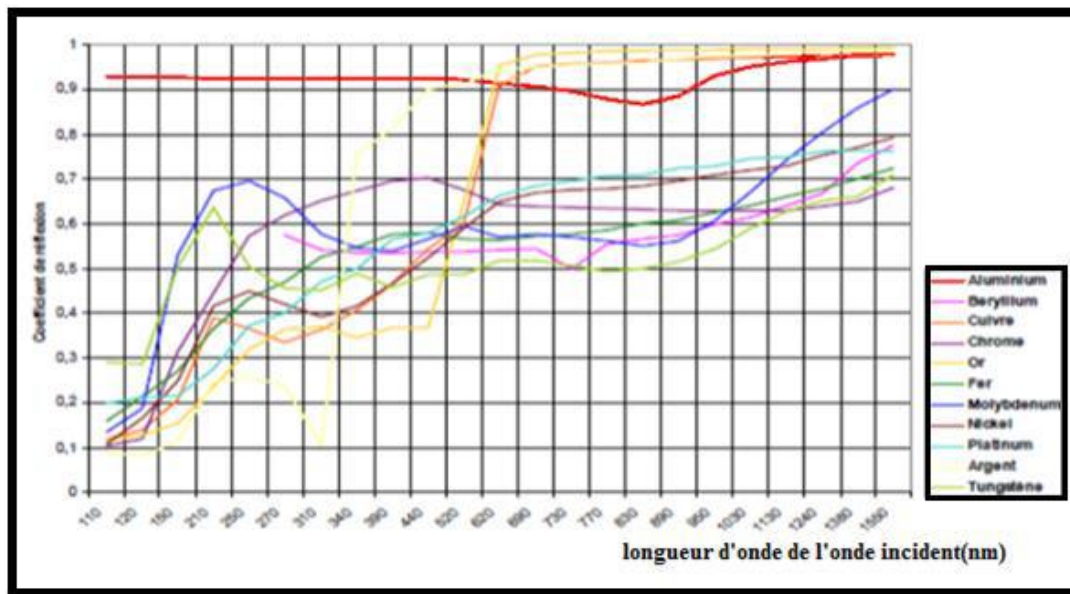


Figure II-6 : Variation du coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde perpendiculaire à la surface [16].

Grâce à cette figure, on peut remarquer qu'entre 100 et 600 nm, l'aluminium a le meilleur coefficient de réflexion (environ 0.92). Après 600 nm, l'or, l'argent et le cuivre ont un coefficient de réflexion plus élevé. Cependant, l'aluminium conserve un coefficient de réflexion avoisinant 0.9. En conclusion, l'aluminium est le meilleur métal du point de vue de la réflexion des rayons de longueurs d'ondes comprises entre 100 et 1400 nm. Ce métal n'est de plus pas trop cher, contrairement à l'or ou l'argent.

### II-4-2-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 ou gaz).

La surface du récepteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une bonne conductivité 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 seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre : 360 W/m.K, aluminium : 200 K/m.K, acier 60 K/m.K)

En fonction de leur surface de transfert, on classe les récepteurs solaires en 2 catégories :

**1- Surface externe** : Il y a plusieurs configurations possibles : plane, cylindrique, conique ou sphérique, dépendantes de la répartition, de l'intensité du flux, de la température et de l'application. Ce genre de récepteur s'applique généralement dans la gamme température de l'ordre 300-400 °C maximum.

**2- Surface interne ou cavité** : Ce type de récepteur est bien adapté pour le cas où l'intensité du flux et la température de travail sont élevées. Le flux énergétique concentré entre dans le récepteur par l'ouverture dont la surface est généralement 5 à 10 fois inférieure à celle de la surface de transfert dans la cavité. C'est un moyen efficace pour augmenter le coefficient d'absorption et diminuer les pertes [13].

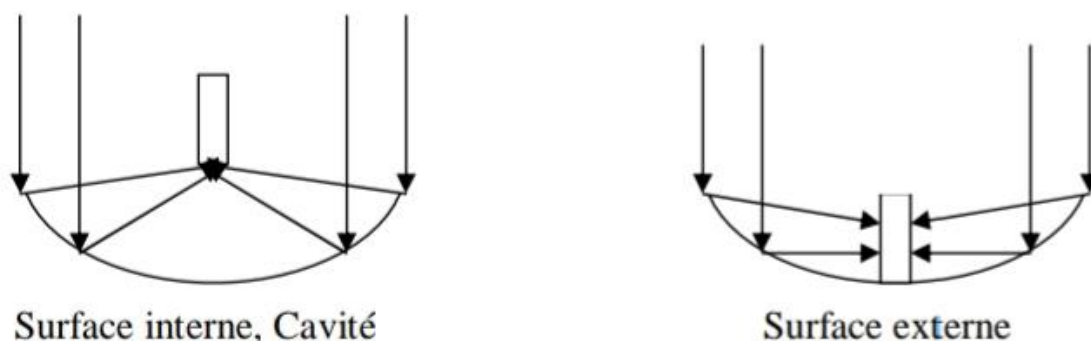


Figure II-7 : Catégories de récepteur [10]

### II-4-3- Le support

C'est un élément qui tient les composants, permet au capteur de tourner pour suivre le soleil pendant qu'il se déplace dans le ciel et permettant d'installer son panneau à l'endroit le plus favorable [17].

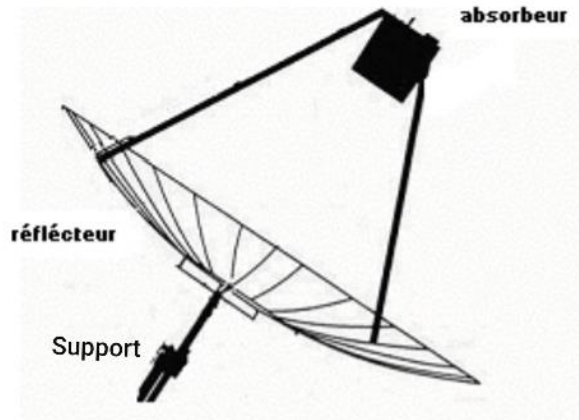


Figure II-8 : Concentrateur solaire parabolique [11]

### II-5- La concentration solaire

Ce paramètre indique la quantité de concentration d'énergie réalisée par un collecteur donné. Les deux définitions normales de la concentration solaire sont la concentration géométrique (surface) et la concentration système optique (flux) [11].

#### II-5-1- Concentration géométrique

C'est le rapport de la surface d'ouverture du collecteur (parabole)  $A_p$  à celle du récepteur (surface de la base du cylindre)  $A_r$ .

$$C_g = \frac{A_p}{A_r} \quad (\text{II-8})$$

#### II-5-2- Concentration optique :

Elle est égale au rapport de l'éclairement moyen sur la surface de l'absorbeur à l'éclairement de l'ouverture :

$$C_o = \frac{Q_{rec}}{S_{dir p}} \quad (\text{II-9})$$

$Q_{rec}$  : flux reçu à l'ouverture du récepteur [w].

$S_{dir p}$  : flux reçu à l'ouverture du réflecteur (parabole) [w].

### II-6-Bilan thermique sur le concentrateur parabolique

#### II-6-1- Réflecteur

Soit  $S_{dir}$  (en  $W/m^2$ ) le flux solaire qui arrive sur le concentrateur. Le miroir parabolique du concentrateur capte une partie des rayons dont la puissance (en  $W$ ) est donnée par le produit du flux  $S_{dir}$  avec la surface  $A_p$  de l'ouverture de la parabole. Pour être rigoureux, il faut retrancher à  $A_p$  la surface de l'ouverture  $A_{base}$  du récepteur (fond de récepteur) qui bloque une faible partie des rayons, qui ne sont donc pas concentrés par le miroir. Ces rayons sont ensuite réfléchis par l'aluminium.

A ce niveau, il y a une perte de la puissance puisque 10 % des rayons sont absorbés par le métal (le coefficient de réflexion de l'aluminium est égal à 0,9).

La puissance réfléchi sur le récepteur est donc égale à :

$$Q_{ref} = S_{dir}(A_p - A_{base})\varphi_{ref}$$

$$\text{Soit : } Q_{ref} = S_{dir}\varphi_{ref}A_{ref} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

$A_p$ : Surface de la parabole [ $m^2$ ].

$A_{base}$ : Surface du récepteur [ $m^2$ ].

$A_{ref}$ : Surface rayonné [ $m^2$ ].

$S_{dir}$ : Éclairement solaire arrivant sur le concentrateur (parabole) [ $w$ ].

$\varphi_{ref}$ : Coefficient de réflexion de l'aluminium.

#### II-6-2- Récepteur

Pour réaliser un bilan énergétique sur un récepteur sous forme cylindrique, on isole pour cela la surface qui absorbe le rayonnement solaire concentré par le réflecteur.

Le bilan énergétique de la surface absorbante de concentration solaire peut être écrit sous forme : [10]

- **La puissance solaire utile**

$$Q_u = (C_f m_f + C_r m_r) \frac{dT}{dt} \quad (\text{II-11})$$

$C_f$  : chaleur massique du fluide [ $J/kg.k$ ].

$m_f$  : masse du fluide [ $kg$ ].

$C_r$  : chaleur massique du récepteur [ $J/kg.k$ ].

$m_r$  : masse du récepteur [ $kg$ ].

$$\text{Ou : } Q_u = Q_a - Q_p \quad (\text{II-12})$$

$Q_a$  : puissance solaire (flux) absorbé par le récepteur [ $w$ ].

$Q_p$  : puissance solaire correspondante aux pertes thermiques [ $w$ ].

### - Puissance solaire absorbée

$$\begin{aligned}
 Q_a &= \tau_{rec} \alpha_{rec} Q_{ref} \\
 Q_a &= \tau_{rec} \alpha_{rec} \varphi_{ref} A_{ref} S_{dir} \\
 Q_a &= \eta_{opt} A_{ref} S_{dir} \\
 \text{Avec } \eta_{opt} &= \tau_{rec} \alpha_{rec} \varphi_{ref}
 \end{aligned}
 \tag{II-13}$$

$\alpha_{rec}$ : facteur d'absorption de la surface du récepteur.

$\tau_{rec}$ : facteur de transmission du récepteur.

$\eta_{opt}$ : rendement optique du récepteur.

### - Pertes thermiques

Une fois que l'énergie solaire est passée vers la surface d'ouverture du récepteur, elle élève sa température au-dessus de la température ambiante. Cette variation de température provoque ainsi un processus des pertes de chaleur, ce sont des pertes par convection, par rayonnement et par évaporation de l'eau [15].

$$Q_p = Q_{cv} + Q_{ray} + Q_{evap} \tag{II-14}$$

#### Pertes par convection $Q_{cv}$

La convection est un phénomène encore peu connu pour la plaque plane. Elle est de plus liée à la vitesse et la direction du vent sur le site. Ces pertes sont proportionnelles à la surface du récepteur et la différence entre la température de surface d'absorbeur et l'air ambiant.

$$Q_{cv} = h_{cv} A_{rec} (T_{rec} - T_a) \tag{II-15}$$

$h_{cv}$ : coefficient de transfert par convection [W/m<sup>2</sup>.k].

$A_{rec}$ : surface d'ouverture du récepteur [m<sup>2</sup>].

$T_{rec}$ : température du récepteur [°C].

$T_a$ : température ambiante [°C].

#### Pertes par rayonnement $Q_{ray}$

Les pertes de chaleur par rayonnement sont importantes pour des récepteurs fonctionnant seulement aux températures légèrement au-dessus de la température ambiante, et deviennent dominantes pour des collecteurs fonctionnant à température élevée.

Ces pertes dépendent de la forme du récepteur mais plus particulièrement de la température du récepteur. Ils sont proportionnels à l'émissivité de l'absorbeur [15].

$$Q_{ray} = \varepsilon_{rec} \sigma A_{rec} (T_{rec}^4 - T_{ciel}^4) \tag{II-16}$$

$\varepsilon_{rec}$ : facteur émissivité de l'absorbeur.

$\sigma$ : constante Stefan-Boltzmann qui égal a (5,67 × 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>).

$T_{ciel}$ : température du ciel elle se calcule par la formule de Swinbank [°C].

$$T_{ciel} = 0.0552T_a^{1.5} \quad (II-17)$$

On peut écrire l'expression :

$$Q_{ray} = A_{rec}h_{ray}(T_{rec} - T_{ciel}) \quad (II-18)$$

Avec  $h_{ray} = \sigma\varepsilon_{rec}(T_{rec}^2 + T_{ciel}^2)(T_{rec} + T_{ciel})$

### Pertes par évaporation de l'eau $Q_{evap}$

Les pertes par évaporation sont importantes lorsque la masse d'eau contenue dans le récepteur est importante, elles se calculent par la formule suivante :

$$Q_{evap} = mC_p\Delta T + mL_v \quad (II-19)$$

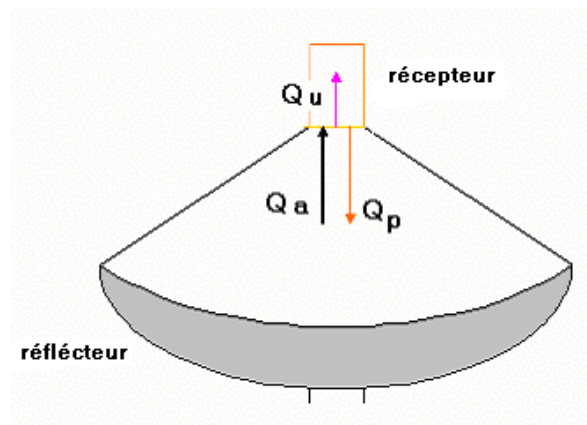


Figure II-9 : Bilan énergétique sur un récepteur [10]

On a  $Q_u = Q_a - Q_p$

On trouve alors :

$$Q_u = \eta_{opt}S_{dir}A_{ref} - A_{ref}[h_{cv}(T_{rec} - T_a) + h_{ray}(T_{rec} - T_{ciel})] \quad (II-20)$$

### II-7-Expression de la température au niveau du récepteur

Le flux perdu est égal à :  $Q_p = Q_{cv} + Q_{ray} + Q_{evap}$

$$Q_p = h_{cv}A_{rec}(T_{rec} - T_a) + A_{rec}h_{ray}(T_{rec} - T_{ciel}) + mL_v$$

$$Q_p = A_{rec}[T_{rec}(h_{cv} + h_{ray}) - h_{cv}T_a - h_{ray}T_{ciel}] + mL_v$$

On a aussi  $Q_p = Q_a - Q_u$

$$Q_a = A_{rec}[T_{rec}(h_{cv} + h_{ray}) - h_{cv}T_a - h_{ray}T_{ciel}] + mL_v$$

Donc :

$$T_{rec} = \frac{(Q_p - mL_v) + (h_{cv}T_a + h_{ray}T_{ciel})A_{rec}}{A_{rec}(h_{cv} + h_{ray})} \quad (II-21)$$

A l'équilibre, on aura le flux absorbé égal au flux perdu donc l'équation devient [11]:

$$T_{rec} = \frac{(Q_a - mL_v) + (h_{cv}T_a + h_{ray}T_{ciel})A_{rec}}{A_{rec}(h_{cv} + h_{ray})} \quad (II-22)$$

### II-8- Efficacité du concentrateur parabolique

La mesure des performances d'un concentrateur solaire est une opération importante et nécessaire pour la compréhension du fonctionnement du système.

Cette efficacité se définit comme le rapport de l'énergie thermique absorbée par le récepteur et l'énergie reçue à l'ouverture du réflecteur se calcule par la formule suivante [11] :

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{ref}}$$
$$\eta = \frac{\eta_{opt}}{\varphi_{ref}} - \frac{A_{rec}[h_{cv}(T_{rec} - T_a) + h_{ray}(T_{rec} - T_{ciel}) + mL_v]}{S_{dir}\varphi_{ref}A_{ref}} \quad (II-23)$$

### II-9- Conclusion

Le modèle théorique développé nous a permis de calculer la température à l'ouverture du récepteur et le rendement du concentrateur, en tenant compte de certaines hypothèses et connaissant le flux à l'ouverture du récepteur, la concentration géométrique et le rendement optique.

On peut donc améliorer le rendement en modifiant certaines propriétés de façon à augmenter l'absorption solaire et diminuer les pertes radiatives à la température de fonctionnement.

***Chapitre III : Dessalement  
d'eau de mer***

### III-1- Introduction

L'eau est un élément indispensable à la vie de l'homme. Elle recouvre près de 70% de la surface de la terre et constitue le liquide le plus abondant sur la planète. L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,07 % de la ressource totale soit environ 1 million de km<sup>3</sup>. Mais, la répartition de cette eau est très inégale.

Les besoins d'eau douce sont de plus en plus croissants. Les pressions qui pèsent sur les ressources en eau sont de plus en plus fortes, principalement en raison des activités humaines et notamment l'urbanisation, la croissance démographique, l'augmentation du niveau de vie. Face à cette situation, le dessalement des eaux de mer ou des eaux saumâtres constitue ainsi une des réponses possibles pour s'adapter à la pénurie croissante des ressources en eau et pour obtenir de l'eau potable.

### III-2- Source d'eau

L'eau est abondante sur terre, elle représente 1,4 milliards de km<sup>3</sup>. Elle est constituée d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %) directement inutilisables.

L'eau douce ne représente que 0,07 % de la ressource totale et sa répartition est très inégale, En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce et vingt neuf autres principalement en Afrique et au Moyen-Orient sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce. Dans ces pays, selon le Water Resources Institute, 250 millions d'individus, ne disposent pas aujourd'hui du minimum vital d'eau, défini à 1000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. Quatre cent (400) millions de personnes vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. On estime également que 2,5 milliards de personnes pourraient souffrir du manque d'eau en 2050, compte tenu de l'évolution de la démographie et de l'augmentation des consommations d'eau [23].

Les principales ressources en eau distribuées dans le monde entier sont représentées dans le tableau suivant :

**Tableau III -1 : Les principales ressources d'eau distribuées dans le monde [24]**

Ressources	Volume en (m <sup>3</sup> )	Total pour cent de l'eau	Pour cent de l'eau Douce
Eau atmosphérique	12 900	0.001	0.01
Glaciers	24 064 000	1.72	68.7
La glace de sol	300 000	0.021	0.86
Rivières	2 120	0.0002	0.006
Lacs	176 400	0.013	0.026
Marais	11 470	0.0008	0.03
l'humidité du sol	16 500	0.0012	0.05
Aquifères	10 530 000	0.75	30.1
Lithosphere	23 400 000	1.68	
Océans	1 338 000 000	95.81	
<b>Total</b>	<b>1 396 513 390</b>		

### III-3-Origine de l'eau sur la terre

Aujourd'hui encore les scientifiques ne sont pas unanimes quant à l'origine de l'eau sur terre, principalement présente depuis des milliards d'années. L'eau pourrait provenir du processus de fusion thermonucléaire qui a produit les éléments du système périodique et leurs composés. On admet généralement que la majeure partie de l'eau formant l'hydrosphère provient d'un dégazage du manteau par l'intermédiaire des éruptions volcaniques et des laves qui se sont épanchées à la surface (basaltes) au cours des 5 milliards d'années d'existence de la terre.

Cependant, on sait que la terre est également exposée aux collisions avec du matériel cosmique dont les comètes de glace. Ainsi, une origine extraterrestre d'au moins une partie de l'eau terrestre est probable. Il existe trois réserves disponibles d'eaux naturelles :

#### III-3-1- Les eaux souterraines (aquifère, nappe phréatique, infiltration)

Les eaux souterraines sont contenues dans des aquifères de natures très variées, définies par la porosité et la structure du terrain. Ces paramètres déterminent le type de nappe et le mode de circulation de l'eau [25].

#### III-3-2- Les eaux de surfaces captives ou en écoulement (lacs, étangs, rivières, fleuves)

Les eaux de surface ont pour origines soit les eaux souterraines (par une résurgence, source), soit les eaux de ruissellements. Ces eaux se regroupent en cours d'eau et sont caractérisées par une surface libre, surface de contact entre l'eau et l'atmosphère, toujours en mouvement, avec

## Chapitre III : Dessalement d'eau de mer

une vitesse variable. Les eaux de surface peuvent se retrouver stockées dans des réservoirs naturels (lacs) ou artificiels (barrages), de profondeur variable [25].

### III-3-3- Les eaux de mer et eaux saumâtres :

Ces eaux sont caractérisées par une salinité importante. Selon leurs origines (pleine mer, estran, estuaire) les caractéristiques physiques sont très variables : turbidité, présence de plancton, teneur en sable, pollution par des rejets urbains ou industrielle, influence des fleuves, influence de la marée, température de l'eau...etc

À cause de sa forte concentration en sels, l'eau de mer n'est pas potable et nécessite une importante désalinisation [25].

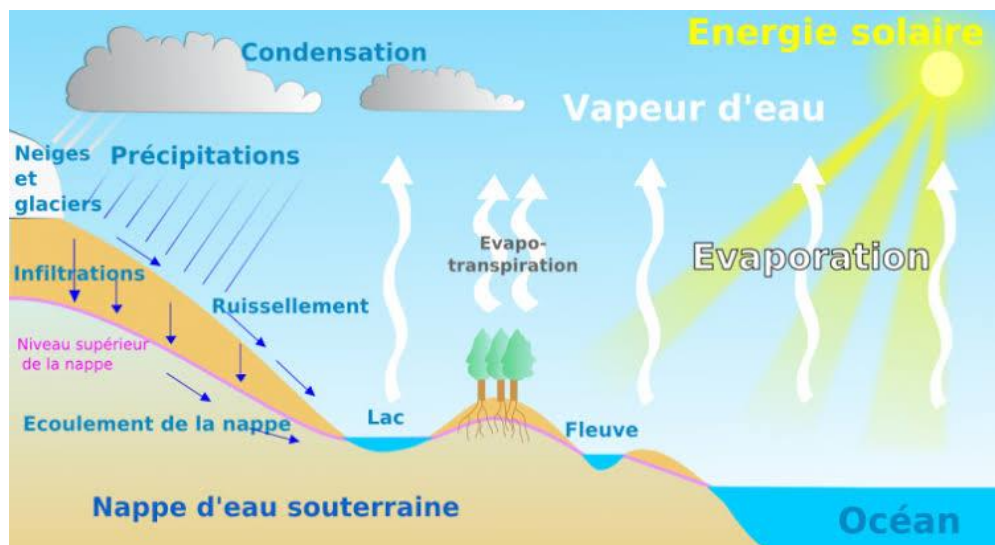


Figure III-1 : Origine de l'eau sur terre [26]

### III-4- Classification des eaux selon la salinité

La salinité mesure la concentration d'une eau en sels dissous (chlorure de sodium, chlorure de magnésium, sulfate de magnésium ...etc). C'est la masse de sels contenue dans 1 litre d'eau. Lorsqu'on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent, on obtient les données présentées au tableau suivant :

Tableau III -2 : Classification des eaux selon la salinité [21]

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

### III-5-L'eau potable

Une eau potable est une eau que l'on peut boire sans risque pour la santé. Afin de définir précisément ce qu'est une eau potable, des normes ont été établies pour fixer notamment les teneurs limites à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances nocives et susceptibles d'être présentes dans l'eau. Une eau de consommation ne doit être ni trouble, ni colorée.

### III-6- Les différents procédés de dessalement

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué, on distingue :

- Les procédés utilisant des membranes : l'osmose inverse et l'électrodialyse.
- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phase : la congélation et la distillation.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent [27].

#### III-6-1- La distillation de l'eau

La distillation consiste à évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur émise par les rayons du soleil, soit en la chauffant dans une chaudière. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en dépôt les sels dissous et toutes les autres substances contenues dans l'eau de mer. Il suffit alors de condenser la vapeur d'eau pour obtenir une eau douce consommable.

On retrouve le cycle naturel de l'eau, en effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations de pluie et de neige. Ce principe de dessalement très simple a été découvert par Aristote et utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux.

L'inconvénient majeur de ce type de procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau mais aussi d'énergie électrique, pour faire circuler l'eau [27].

### ➤ La distillation Multiples -Effets

Ce procédé est basé sur l'évaporation d'une partie de l'eau de mer chauffée à une température de 70 à 80°. L'évaporation a lieu sur une surface d'échanges où une chaudière fait bouillir l'eau. La vapeur produite dans le premier bassin est condensée et s'évapore vers le tuyau qui passe vers le second bassin et va le réchauffer et faire évaporer l'eau du second bassin qui va faire de même avec le troisième bassin. Les vapeurs contenues dans les tuyaux sont récupérées dans un autre bassin. Un tuyau amène continuellement de l'eau dans les bassins au fur et à mesure de l'évaporation. La saumure est évacuée vers l'extérieur. Cette technique est peu coûteuse car seul le premier bassin nécessite une source de chaleur extérieure pour faire évaporer l'eau [28].

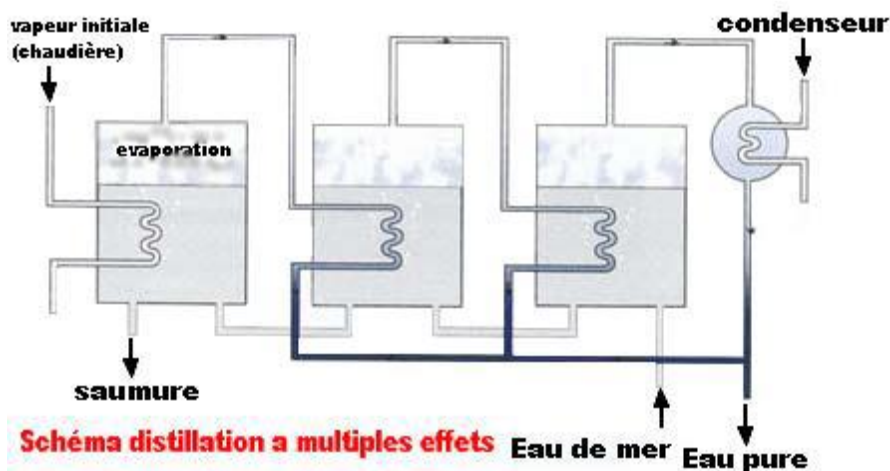


Figure III-2 : Distillation à multiples effets [28]

### ➤ Distillation Multi-Flash :

Cette technique est quasiment identique à la précédente, elle a pour but de maintenir la pression durant la durée du chauffage. Une fois que la température est arrivée à 120 °C, elle est introduite dans un "étage" où la pression est faible.

Instantanément, une vaporisation par détente a lieu, appelée flash. Une partie de l'eau s'évapore et va se placer dans les tubes condenseurs en haut de l'étage. L'eau de mer chaude se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation. L'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré.

Ce phénomène sera réutilisé dans le second étage où la pression est plus faible et ainsi de suite. Dans une unité Multi flash industrielle, on peut retrouver jusqu'à 40 étages. De même que pour la distillation multiples effets, le coût est réduit et seule la chaudière nécessite une énergie extérieure [28].

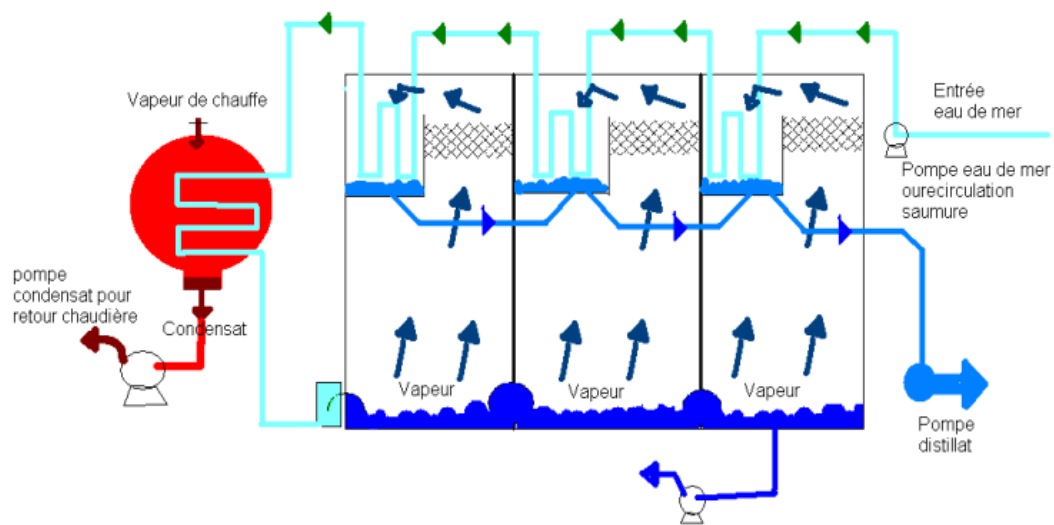


Figure III-3 : Distillation Multi-Flash [28]

### ➤ Distillation par voie solaire

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 [36].

Le distillateur solaire est un bassin couvert qui enferme l'eau saline. Il est utilisé pour épurer cette eau. La couverture emprisonne l'énergie solaire dans le bassin, qui chauffe alors l'eau saline. Ceci cause l'évaporation et la condensation sur la surface intérieure de la couverture inclinée ou en suivant un tuyau de condensation qui mène vers un système de refroidissement. L'eau se condense et retombe dans une cuvette qui rassemble le distillat qui ne contient ni sel ni autres composantes chimiques.

### ➤ Distillateur solaire d'urgence

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

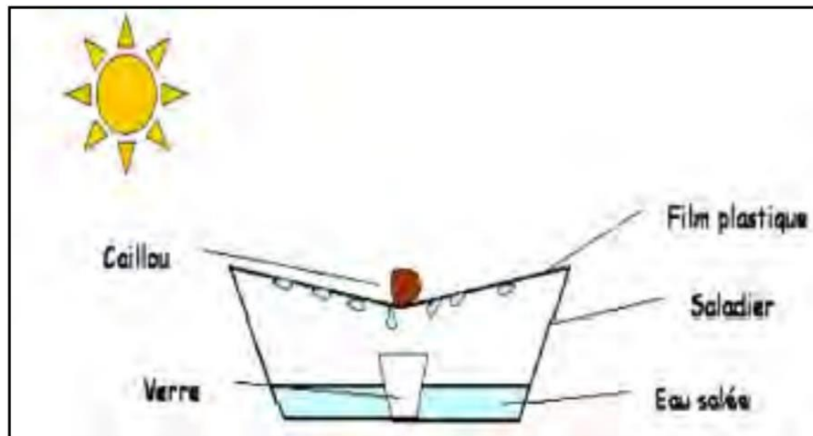


Figure III-4 : Distillateur d'urgence [36]

### III-6-2- L'osmose inverse

Le principe de l'osmose inverse est simple, l'eau de mer est filtrée sous pression à travers une membrane. Les sels et les micro-organismes sont retenus par cette dernière.

L'osmose est un principe naturel. Si deux solutions aqueuses ayant une concentration saline différente, sont séparées par une membrane, l'eau passe spontanément de la solution la moins concentrée en sel à la plus concentrée.

L'osmose inverse est basée sur le principe opposé. Elle consiste à appliquer à cette eau salée une pression importante, qui nécessite une consommation énergétique élevée, pour la faire passer à travers une membrane. Au terme de l'opération, seules les molécules d'eau traversent la membrane, fournissant ainsi de l'eau douce.

L'ensemble des caractéristiques de l'eau de mer à dessaler est à prendre en compte dans le choix et les paramètres de fonctionnement des procédés pour maîtriser les aspects de corrosion, de dépôts et les coûts [22].

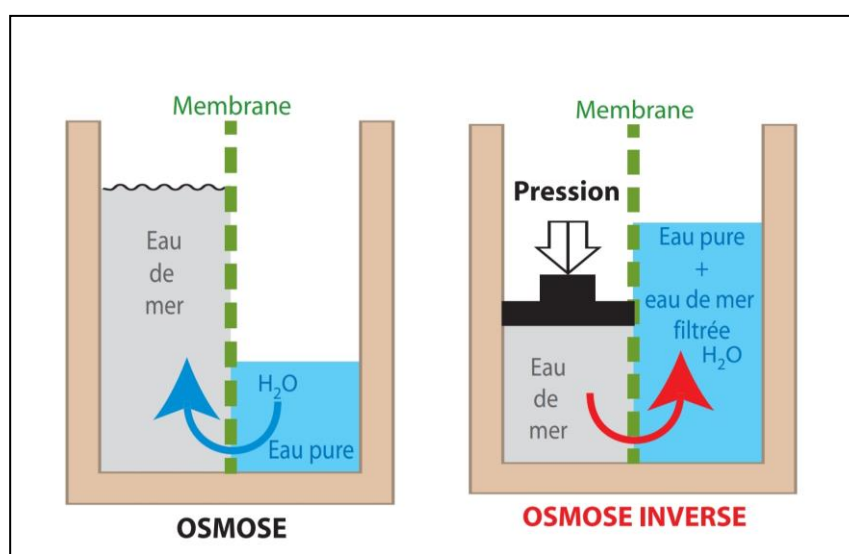


Figure III-5 : L'osmose et l'osmose inverse [22]

### III-6-3- L'électrodialyse :

L'électrodialyse est un procédé électro membranaire permettant la concentration et la déminéralisation de solutions contenant des espèces chargées. La force motrice est un gradient de potentiel appliqué entre deux électrodes. Entre ces électrodes, sont placées alternativement des membranes échangeuses d'anions et des membranes échangeuses de cations. Le champ électrique provoque un déplacement des ions présents dans l'eau. Ces ions se concentrent dans un compartiment (concentrât) tandis que l'autre est appauvri en sel. [30]

Sous l'effet d'un courant appliqué dans les bacs externes les ions  $\text{Na}^+$  sont attirés vers l'électrode négative et les ions  $\text{Cl}^-$  vers l'électrode positive. En raison de la sélectivité des membranes, les ions  $\text{Na}^+$  peuvent uniquement traverser les membranes cathodiques et les ions  $\text{Cl}^-$  les membranes anioniques, on obtient de l'eau douce dans deux des quatre compartiments [27].

En raison de sa consommation électrique, l'électrodialyse n'est compétitive (face à l'osmose inverse) et donc utilisée que pour le traitement des eaux saumâtres de concentration inférieure à 3 g/l.

En fait, l'électrodialyse a été surtout envisagée jusqu'ici pour le dessalement d'eaux saumâtres, dont la salinité n'excède pas 1%, le procédé n'étant pas rentable pour des teneurs en sels supérieures, les membranes étant en effet très sensibles, la moindre impureté en solution ou en suspension peut les endommager. Pour prolonger la vie des membranes, il peut être nécessaire d'effectuer un pré-traitement, parfois coûteux. Malgré ces limitations, plusieurs petites usines de dessalement par électrodialyse sont exploitées dans le monde sur des bases commerciales [29].

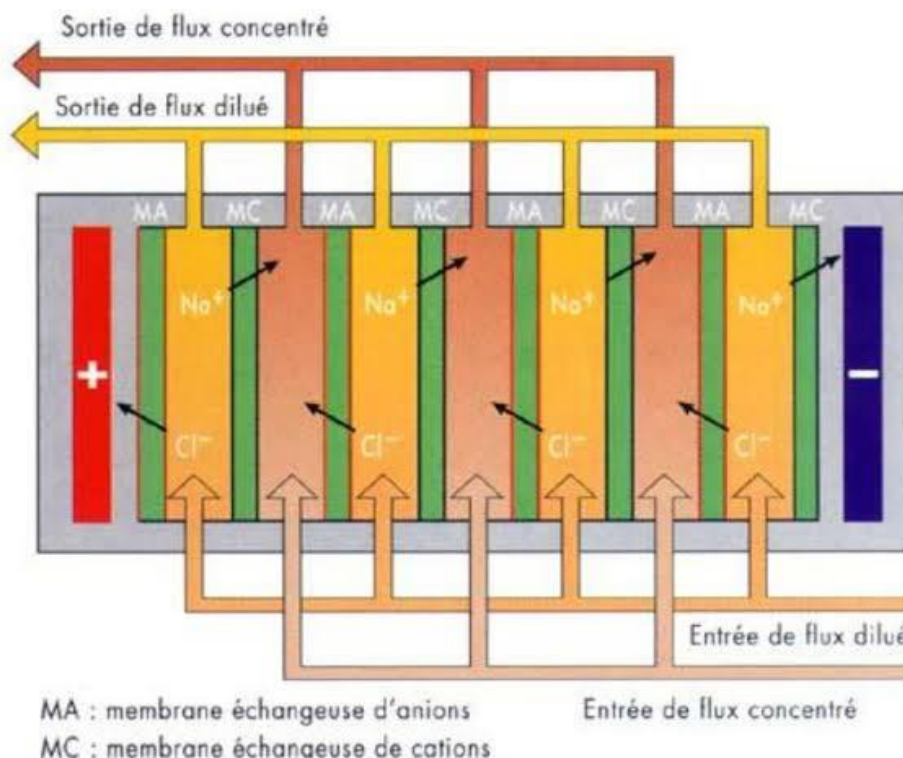


Figure III-6 : Principe d'une électrodialyse [31]

### III-6-4- Dessalement par congélation

Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de l'eau de mer. Selon la thermodynamique, la glace formée à partir de l'eau de mer est pure. Elle peut être séparée de la solution concentrée, puis fondue afin d'obtenir une eau douce.

Les opérations unitaires d'un procédé de dessalement par congélation sont :

- 1- le prétraitement de l'eau de mer (élimination des solides en suspension, élimination des gaz dissouts pour les procédés sous vide),
- 2- la formation des cristaux de glace à partir de la solution saline (pour les procédés en suspension, des cristaux de grande taille sont souhaités pour faciliter le lavage),
- 3- le lavage et/ou ressuage des cristaux de glace (pour les procédés continus, lavage dans une colonne par environ 5% de l'eau produite),
- 4- la fusion des cristaux de glace.

Cette technique est généralement plus onéreuse que l'évaporation de l'eau : la chaleur nécessaire pour congeler de l'eau est plus coûteuse que celle utilisée pour son évaporation. Un autre inconvénient pour cette méthode de congélation c'est qu'il existe une difficulté majeure concernant la séparation des cristaux de glace et de la saumure qui nécessite des opérations complexes : il reste une couche limite de saumure collée aux cristaux.

### III-7- Avantages et inconvénients du dessalement

Le dessalement de l'eau de mer apporte une réponse aux besoins d'eau douce. Il présente de nombreux avantages dont :

- D'une part, il peut s'avérer très utile dans les situations d'urgence, lorsque les réserves d'eau ont subi des infiltrations d'eau salée, à la suite par exemple de marées salines, comme cela s'est produit récemment avec les tsunamis en Asie.
- D'autre part, l'irrigation à base d'eau dessalée est bénéfique pour l'environnement car elle permet une salinisation réduite du sol.

Toutefois, quel que soit le procédé utilisé, il n'est pas sans inconvénients : besoins énergétiques importants, rejet des saumures concentrées en mer ou injectées dans le sol, emplois de produits chimiques pour nettoyer les membranes, traces des métaux lourds échappés des installations et surtout aucune législation spécifique concernant la potabilité de l'eau issue de ces traitements [32].

### III-8- Conclusion

L'eau est la source de vie, elle est de toutes les matières la plus importante pour l'existence de l'homme, indispensable pour la survie et pour le développement de la société moderne. Elle est non seulement nécessaire en quantité suffisante mais sa qualité est aussi un paramètre très important.

Toutes les techniques de dessalement sont très intéressantes au vu de leurs performances et de leur rentabilité. Le dessalement est une technologie d'avenir mais il faut l'utiliser en dernier recours et quand aucune autre solution n'est possible.

*Chapitre IV : Réalisation du  
concentrateur solaire  
parabolique*

### IV.1- Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons avec détails les différentes étapes de réalisation et d'assemblage de tous les éléments constitutifs du concentrateur solaire parabolique conçu pour la distillation de l'eau de mer. Notre expérience a été réalisée au niveau du laboratoire des moteurs à combustion interne du département de Génie Mécanique de l'université de Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou.

### IV-2- Les différentes étapes de réalisation

#### IV-2-1-Le réflecteur

##### ➤ Calculs des différentes dimensions de la parabole

En prenant l'angle d'ouverture à  $45^\circ$  et un diamètre = 1m

A partir de la figure II-3 pour un angle d'ouverture de  $45^\circ$  on a :  $f/D = 0.6$

On trouve alors la distance focale  $f = 0.6m$

On a ensuite calculé :

##### - la profondeur de notre parabole

$$P_f = \frac{D^2}{16f}$$

$$P_f = \frac{1^2}{16 \cdot 0.6} = 0.104m = 10.4cm$$

##### - La longueur de l'arc de la parabole

$$L_p = \left[ \frac{D}{2} \sqrt{\left(\frac{4P_f}{D}\right)^2 + 1} + 2f \ln \left[ \frac{4P_f}{D} + \sqrt{\left[\frac{4P_f}{D}\right]^2 + 1} \right] \right]$$

$$L_p = 1.0273m$$

##### - Surface d'ouverture de la parabole

$$A_p = \pi \frac{D^2}{4} = 0.785m^2$$

## Chapitre IV : Réalisation du concentrateur solaire parabolique

### ➤ Calculs effectués sur EXCEL

$$y = \frac{x^2}{2p} \quad p = 2f = 1.2m \quad \text{Donc } y = \frac{x^2}{2.4}$$

Tableau IV-1 : coordonnées de quelques points de notre courbe

x	x <sup>2</sup>	x <sup>2</sup> /2,4(m)	x <sup>2</sup> /2,4 (cm)
-0,5	0,25	0,10416667	10,4166667
-0,4	0,16	0,06666667	6,6666667
-0,3	0,09	0,0375	3,75
-0,2	0,04	0,01666667	1,6666667
-0,1	0,01	0,00416667	0,4166667
0	0	0	0
0,1	0,01	0,00416667	0,4166667
0,2	0,04	0,01666667	1,6666667
0,3	0,09	0,0375	3,75
0,4	0,16	0,06666667	6,6666667
0,5	0,25	0,10416667	10,4166667

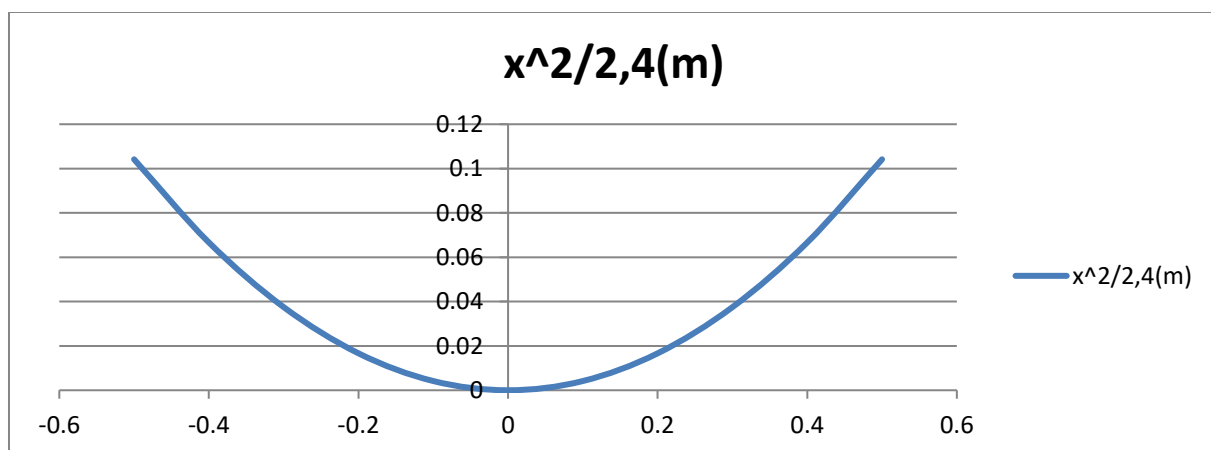


Figure IV-1 : Courbe de la parabole  $y = \frac{x^2}{2p}$  tracée avec Excel

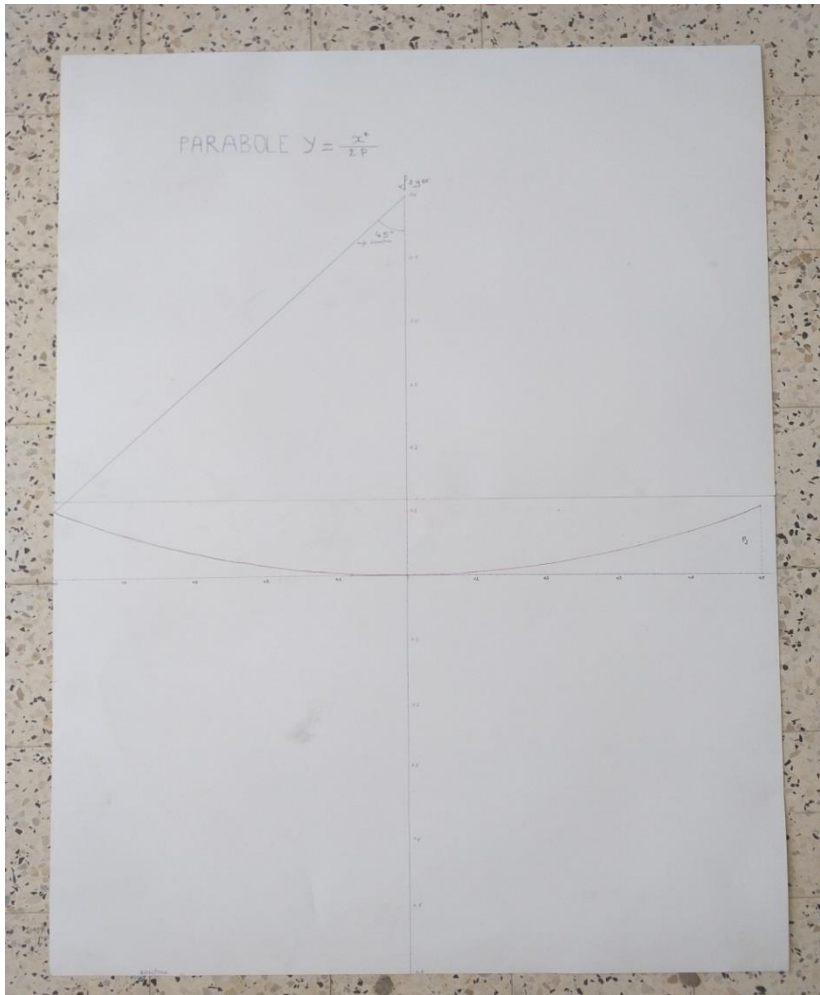


Figure IV-2 : courbe de la parabole  $y = \frac{x^2}{2p}$  tracée à la main

➤ Conception de la parabole en 3D avec SolidWorks

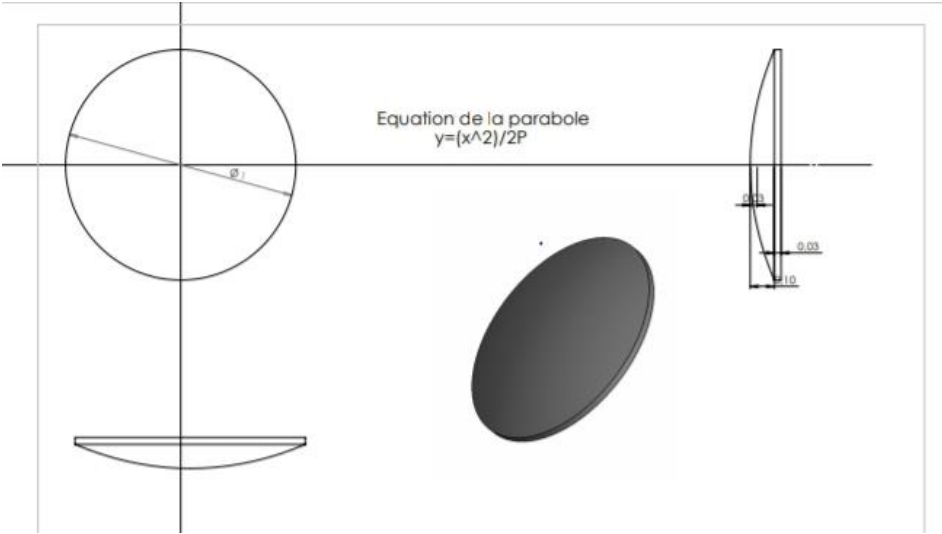


Figure IV-3 : parabole conçue avec logiciel SolidWorks

### ➤ Réalisation de la parabole

**Le moule :** nous avons fabriqué un moule en plâtre en mélangeant environ 20kg de plâtre et de l'eau. Nous l'avons ensuite façonné en fonction de la courbe de la figure IV-2 et laissé sécher.



**Figure IV-4 : Modèle de l'arc parabolique**



**Figure IV-5 : Le moule en plâtre**

## Chapitre IV : Réalisation du concentrateur solaire parabolique

**La parabole :** Nous avons réalisé notre parabole en moulage sur le moule de la figure IV-5. Nous avons d'abord posé la fibre de verre sur toute la surface du moule et ensuite versé de la résine liquide pour moulage qui va se solidifier au contact avec la fibre. Nous avons répété cette opération jusqu'à obtention d'une parabole assez résistante et solide de 5 couches et nous avons laissé sécher pendant environ 3 h.



**Figure IV-6: Moulage de la parabole**

### ➤ Couverture en Aluminium :

Nous avons utilisé un papier collant aluminium que nous avons coupé en triangles d'environ 60 cm de hauteur et ensuite collé sur la parabole, comme le montre les figures IV-7 et IV-8.



**Figure IV-7: Découpage du papier Aluminium**



**Figure IV-8: Collage de l'Aluminium sur la parabole**

### IV-2-2-Le récepteur

Notre récepteur est un autocuiseur également appelé cocotte minute, qui est en aluminium, constitué d'un récipient d'une capacité de 2.5 litres, hermétiquement clos par un couvercle parfaitement étanche qui permet d'augmenter la pression à l'intérieur ainsi de faire monter la température. Nous avons choisi un récepteur en aluminium pour sa conductivité thermique élevée ( $\lambda = 237 \text{ W/m.K}$ ) car plus la conductivité est élevée plus le matériau est conducteur et plus elle est faible plus il est isolant. Nous avons peint la cocotte en noir afin d'augmenter sa capacité à absorber le rayonnement solaire.

### Caractéristiques du récepteur

**Tableau IV-2 : caractéristiques du récepteur**

Diamètre r	0.16 m
hauteur	0.12 m
Surface de la base	0.02 m <sup>2</sup>
Coefficient d'absorption de la surface du récepteur	0.94

### IV -2-3-Tuyau de condensation

Nous avons choisi d'utiliser un tuyau en cuivre que nous fixons avec soudure à la soupape de la cocotte minute pour permettre à la vapeur de passer et suivre le chemin jusqu'au tuyau de refroidissement.



Figure IV-9 : Récepteur et tuyau de condensation

### IV -2-4- Système de refroidissement

Nous avons utilisé un tuyau serpentin refroidisseur en cuivre de diamètre 4 mm plongé dans un seau d'eau froide et soudé à son extrémité à la sortie vapeur de la cocotte minute et relié de l'autre côté au réservoir d'eau distillée.



Figure IV-10: Système de refroidissement

### IV-2-5- Réservoir d'eau distillée

Nous avons couvert une bouteille en verre de polystyrène qui est un isolant pour empêcher l'eau distillée qui rentre dans le réservoir de s'évaporer à nouveau comme le montre la figure ci-dessous.



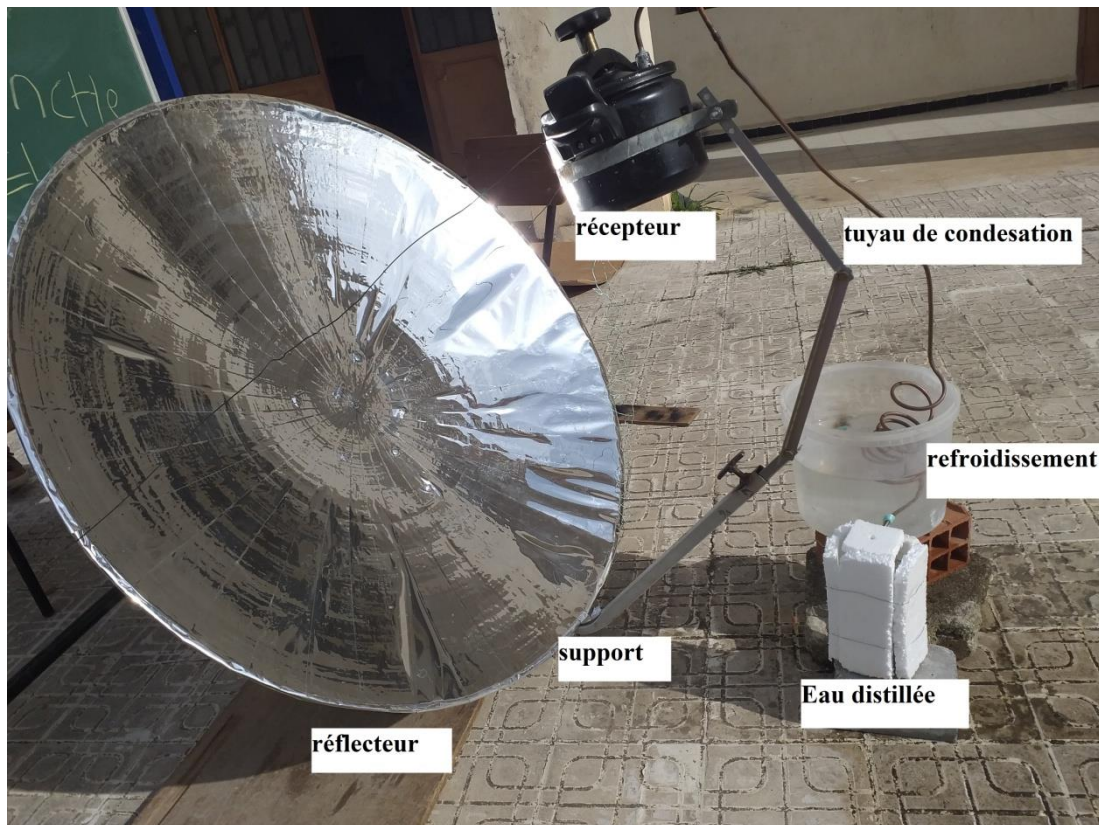
**Figure IV-11: Réservoir d'eau distillée**

### IV-2-6- Le support et le système de poursuite

Pour que la parabole soit fixée nous avons réalisé un support sur lequel celle-ci va se poser. Il se compose d'une barre fixe bien solide pour supporter le poids de la parabole sur laquelle nous avons également fixé le système de rotation manuel qui nous permet d'orienter le réflecteur vers le soleil. Une autre barre vient porter le récepteur et bien le positionner sur le foyer.



**Figure IV-12: Support du réflecteur et système de poursuite**



**Figure IV-13 : Le concentrateur solaire parabolique**

### IV-3-Conclusion

Dans ce chapitre en plus des différentes étapes de réalisations du concentrateur solaire parabolique que nous avons retracées en détails, nous avons aussi rapporté les caractéristiques de chaque élément utilisé dans la conception du concentrateur.

Malgré les difficultés que nous avons rencontrées (manque du matériel), nous avons réussi à nous rapprocher le plus possible du modèle théorique prévu.

*Chapitre IV : Résultats et  
discussions*

### V-1- Introduction :

Dans le but de l'évaluation des performances du distillateur, nous avons effectué plusieurs expériences sous ensoleillement naturel, et nous avons mesuré différentes températures nécessaires pour notre étude.

### V-2-Installation du concentrateur

Nous savons que le concentrateur parabolique fonctionne quand les rayons solaires sont parallèles à son axe. Il faut donc le placer dans un environnement clair et bien aéré, avec un ciel dégagé en évitant les zones d'ombre autour de l'équipement.

#### ➤ Localisation du foyer

Nous avons placé une petite planche en bois devant le réflecteur pour localiser le foyer du concentrateur. Après même pas cinq secondes une fumée s'est produite et un trou a commencé à se creuser sur la planche. C'est donc le point où la parabole concentre l'ensemble des rayons solaires.



Figure V-1 : Localisation du foyer

### V-3-L'emplacement du thermocouple

Pour mesurer les températures atteintes sur différents endroits du récepteur un Picolog (appareil de mesure) muni de thermocouples a été installé comme le montre le schéma suivant :

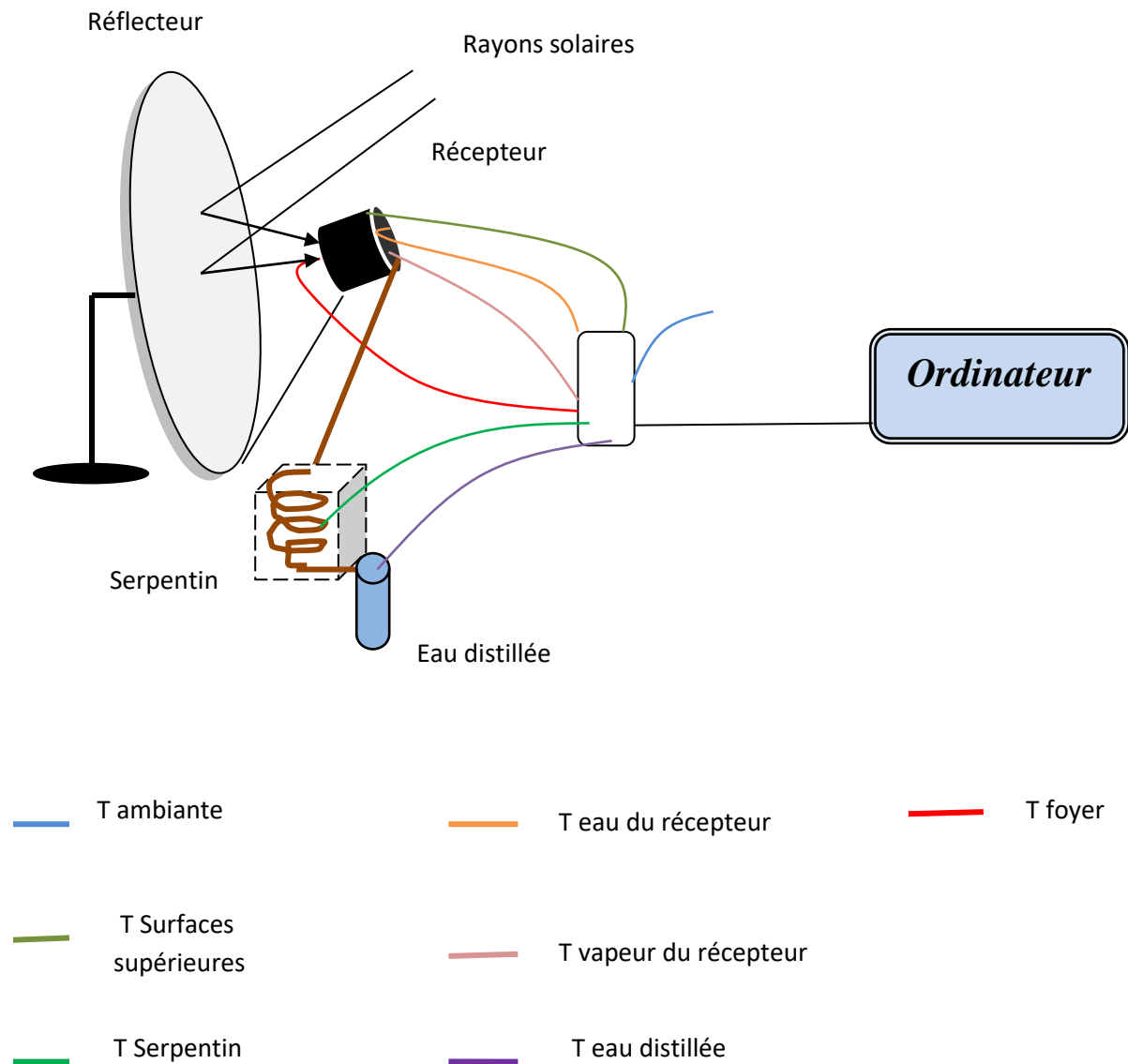


Figure V-2: Schéma montrant l'emplacement des thermocouples



Figure V-3 : Emplacement du thermocouple sur le concentrateur

### V-4- L'expérience

➤ Test 01 réalisé le 04-11-2019 à 13 h

Après avoir terminé la réalisation et assemblé tous les éléments, nous avons effectué un premier essai. Nous avons mis un demi-litre d'eau dans le récepteur sachant que le ciel était couvert de nuages et la température ambiante était 20 °C. Nous avons fermé et après environ 15 minutes des gouttes d'eau coulent dans notre réservoir d'eau distillée. Après une heure de temps nous avons récupéré la moitié de l'eau versée soit 250 ml. A l'aide d'un capteur de température nous avons mesuré la température à l'intérieur du récepteur après l'ouverture qui est de 81°C.



Figure V-4: Mesure de la température à l'ouverture du récepteur

## Chapitre V : Résultats et discussions

### ➤ Test 02 Eau de robinet réalisé le 27-11-2019 à 12 h 30 mn

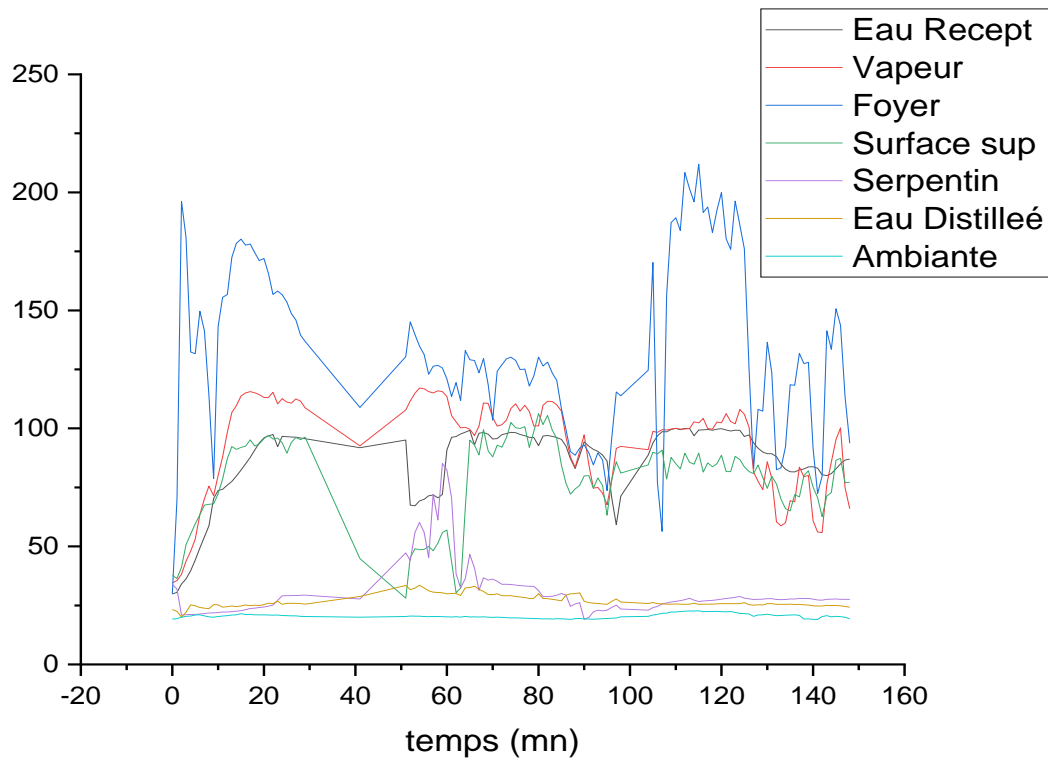
Dans le récepteur nous avons versé 0.5 litre d'eau de robinet à une température initiale de 17.2 °C puis nous avons placé les thermocouples à différents endroits comme montrés dans la figure (V-2). Nous avons commencé notre expérience à 12 h 30 mn.

Les températures ont été mesurées à l'aide des thermocouples de type K et enregistrées sur ordinateur. Les relevés se font toutes les 60 secondes (une minute). Au bout de 120 minutes nous avons arrêté l'enregistrement. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau V-1 : Différentes températures mesurées au Test 02**

Temps (mn)	T foyer (°C)	T surface (°C)	T eau récepteur (°C)	T vapeur (°C)	T ambiante (°C)	T serpentín (°C)	T eau distillée (°C)
0	29,87	37,67	29,88	34,6	19,22	33,99	23,26
10	143,26	72,3	73,71	80,04	20,31	22,02	25,23
20	171,95	95,65	96	113,12	21	24,3	25,34
30	108,85	44,84	91,8	92,6	20,01	27,71	28,77
40	120,98	56,92	90,84	113,54	20,19	82,34	29,91
50	103,51	87,93	95,51	104,66	19,95	36,15	29,54
60	130,23	106,25	92,67	101,06	19,36	31,26	29,99
70	93,04	79,84	94,3	97,29	19,33	19,08	26,75
80	170,27	89,94	93,8	98,73	20,96	24,07	26,28
90	211,97	89,56	99,34	102,39	22,69	26,68	25,47
100	176,07	83,72	96,56	105,96	21,51	28,08	26,17
110	118,52	65,06	81,62	69,43	20,92	27,76	25,53
120	150,68	86,5	82,94	95,32	20,35	27,7	24,97

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.



**Figure V-5: Evolution des températures en fonction du temps Test02**

### Discussions des résultats du Test02

Comme le montre le tableau (V-1) ainsi que la figure (V-5), les températures ne sont pas stables et cela est dû au temps très nuageux, au vent assez présent toute la journée et parfois aux détachements des thermocouples pendant l'expérience.

Avant de verser l'eau dans le récepteur, elle était à une température de 17.2 °C. Au bout à peine d'une minute la température de l'eau est passée à 29,88 °C à l'intérieur du récepteur. A bout de 13 minutes, la température de la vapeur dépasse déjà les 100°C. On conclut alors que l'eau commence à bouillir en moins de 13 minutes de chauffage.

Pour une température ambiante ne dépassant pas 23 °C, la température maximale atteinte au foyer est de 208 °C.

A la fin de l'opération après 2 h de distillation, nous avons récupéré 0.25 litre d'eau distillée dans le réservoir et le récepteur contient encore 0.23 litre d'eau de robinet, avec une concentration beaucoup plus élevée en résidus.

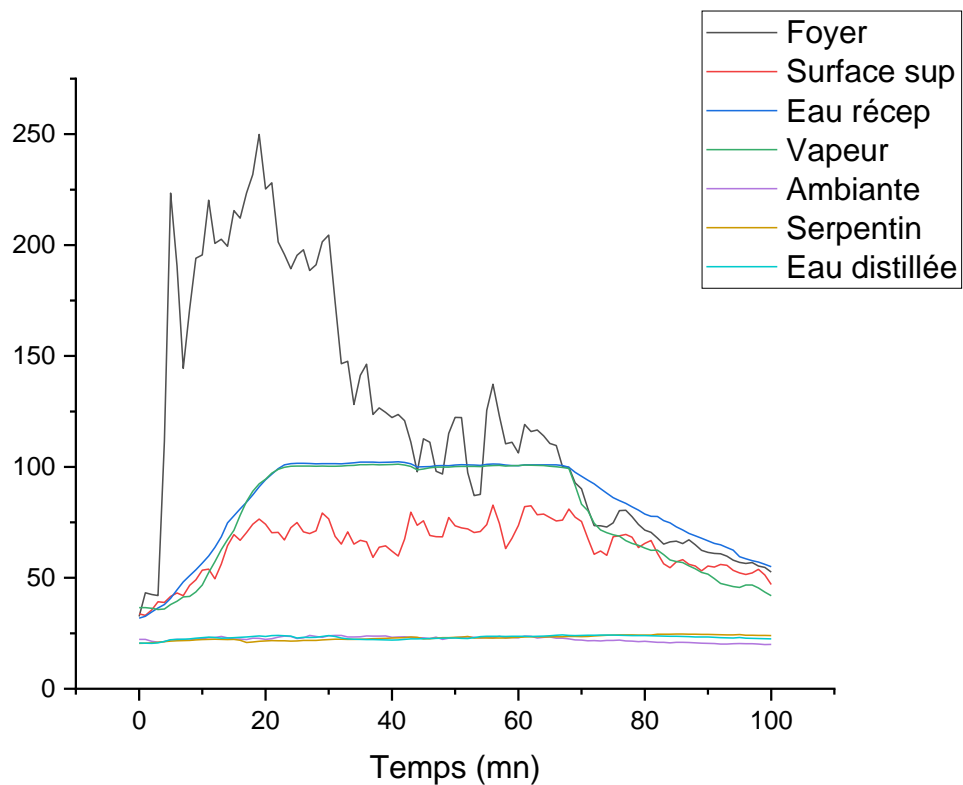
#### ➤ Test 03 Eau salée réalisé le 01-12-2019 à 13 h 05 mn

Dans ce test, nous avons distillé une eau salée. Pour la préparer nous avons versé 35g de sel dans un litre d'eau pour avoir la même salinité que celle de l'eau de mer. Nous avons ensuite versé 0.5 litre dans le récepteur, branché les thermocouples et lancé l'opération. L'enregistrement est fait chaque minute et les valeurs obtenues sont résumées dans ce tableau :

**Tableau V-2 : Différentes températures mesurées au Test 03**

Temps (mn)	T foyer (°C)	T surface (°C)	T eau récepteur (°C)	T vapeur (°C)	T ambiante (°C)	T serpentín (°C)	T eau distillée (°C)
0	32,64	33,8	31,82	36,61	22,28	20,47	20,6
10	195,54	53,49	56,63	46,78	22,55	22,15	23,01
20	225,3	74,16	94,21	94,5	22,29	21,58	23,59
30	204,5	76,55	101,49	100,31	23,86	22,17	23,94
40	122,23	62,05	102,17	101,11	23,16	22,85	21,96
50	122,35	73,46	100,87	100,16	23,03	23,19	22,86
60	106,28	73,64	100,56	100,65	22,98	23,2	23,65
70	90,11	75,44	95,8	83,22	21,91	23,51	24,05
80	71,54	65,5	78,76	63,4	21,39	24,17	23,96
90	61,45	55,31	66,66	51,64	20,49	24,48	23,31
100	52,63	46,98	54,99	41,95	19,96	23,93	22,46

La courbe ci-dessous reprend le tracé de l'évolution des températures mesurées en fonction du temps.



**Figure V-6: Evolution des températures en fonction du temps au Test 03**

### Discussions des résultats du Test 03 :

Comme dans le test précédent, les températures ne sont pas stables à cause du vent et du ciel très couvert de nuages. La température initiale de l'eau avant de la verser dans le récepteur était de 17.1°C. Après seulement 23 minutes, elle atteint les 100 °C. La température maximale atteinte au foyer est de 250°C.

Après 60 minutes de l'exposition au soleil, des nuages sont apparus et ont couvert totalement le soleil. Les températures ont commencé à chuter. Après 100 minutes, nous avons arrêté l'expérience et récupéré environ 0.15 L d'eau distillée et le volume d'eau restant dans le récepteur (de l'ordre 0.33 L) est beaucoup plus chargé en sels.

### ➤ Test 04 Les margines effectué le 02-12-2019 à 10 h

Les margines ou eaux de végétation, sont des effluents issus de l'extraction de l'huile d'olive rejeté par des huileries. Par leur composition chimique, elles possèdent un pouvoir polluant très élevé. Nous avons récupéré 500 g de margines et nous l'avons versé dans la cocotte pour la distillation.

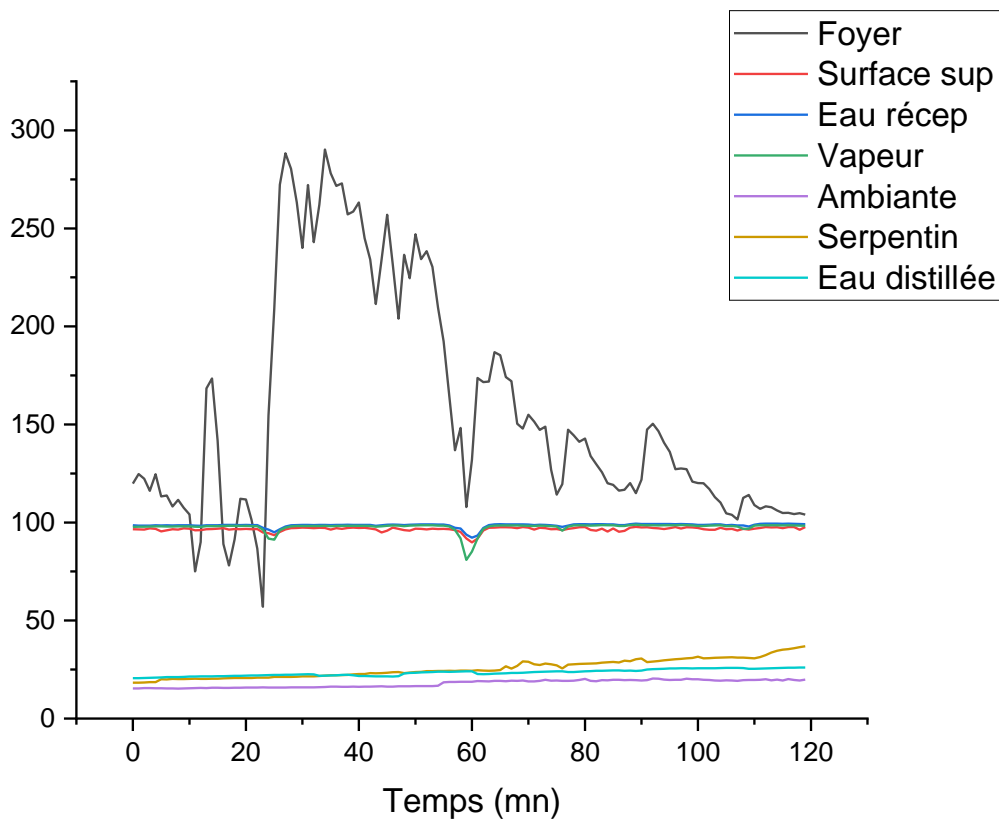
Nous avons placé les thermocouples comme dans les tests précédents, les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau et la figure suivante :

**Tableau V-3 : Différentes températures mesurées au Test 04**

Temps (mn)	T Foyer (°C)	T surface (°C)	T eau récepteur (°C)	T vapeur (°C)	T ambiante (°C)	T serpentín (°C)	T eau distillée (°C)
0	119,83	96,53	98,58	97,73	15,35	18,29	20,59
10	104,08	96,81	98,56	98,03	15,45	20,22	21,39
20	111,7	96,77	98,74	98,27	15,78	20,73	21,92
30	240,03	97,35	98,77	98,22	15,93	21,49	22,56
40	263,21	97,17	98,79	98,35	16,22	22,76	21,66
50	247,03	96,87	98,93	98,47	16,56	23,73	23,39
60	131,94	89,87	92,2	85,14	18,73	24,41	24,11
70	154,98	97,4	98,94	98,28	18,96	28,95	23,52
80	142,82	97,65	99,15	98,51	20,19	27,98	24,05
90	121,83	97,49	99,26	98,66	19,42	30,59	24,44
100	120,12	97,17	98,81	98,21	20,09	31,56	25,65
110	108,85	96,85	98,9	98,38	19,72	30,73	25,34

## Chapitre V : Résultats et discussions

La courbe ci-dessous reprend le tracé de l'évolution des températures mesurées en fonction du temps.



**Figure V-7: Evolution des températures en fonction du temps au Test 04**

### Discussions des résultats du Test 04

Comme le montre la figure du test 04, la température au foyer atteinte ce jour est de 290 °C. La température de la vapeur et de l'eau du récepteur est presque stable et tourne autour de 98°C et la température de la surface ne dépasse pas les 98 °C. Ce qui montre que l'eau du récepteur absorbe une grande quantité de chaleur pour s'échauffer.

A la fin de cette opération nous avons pu récupérer 0.23 L d'eau distillée et la margine séchant dans le récepteur est considérablement moins humide qu'au début et pèse 246 g.

A l'issu de ce travail, les résultats obtenus montrent que la distillation peut être une technique efficace pour le traitement de la margine qui présente un véritable danger pour l'environnement.

### Test 05 : Séchage complet des margines effectué le 06-12-2019

Nous avons lancé l'opération avec 300 g de margine dans le récepteur à une température ambiante de 18 °C. Après 1h 30mn, la margine est séchée et pesée 13g et nous avons récupéré environ 250 ml d'eau distillée.

### V-5-Comparaison des Tests effectués

- Au test 03 nous avons atteint des températures au foyer plus élevées par rapport au test 02
- L'eau de robinet (test02) commence à s'évaporer au bout de 13 minutes et l'eau salée (test03) après 23 minutes.
- C'est dans le test 02 où nous avons distillé de l'eau de robinet que nous avons récupéré la plus grande quantité d'eau distillée à l'inverse de l'opération de distillation d'eau salée. Nous pouvons alors conclure que l'eau salée a besoin de plus d'énergie pour s'échauffer et pour la séparation des molécules d'eau et celles du sel et donc prend plus de temps pour la distillation.
- Dans chacun des tests nous avons une perte d'eau estimée environ 0.02 L due au problème d'étanchéité.

### V-6- Mesures de PH effectuées sur les eaux

La qualité d'une eau et le pH de l'eau (potentiel hydrogène) sont souvent mentionnés dans une même phrase. Le pH de l'eau est un facteur important dans le traitement et dans l'appréciation de l'eau.

Le pH donne une indication de l'acidité d'une substance. L'acidité est donc un des paramètres les plus importants des propriétés de l'eau. Le résultat d'une mesure de pH est défini par les quantités d'ions  $H^+$  et d'ions  $OH^-$  présentes dans la substance. Quand les quantités de ces deux ions sont égales, l'eau (ou la substance) est considérée comme neutre, et le pH à une valeur aux alentours de 7.

Le pH d'une substance varie entre 1 et 14. Au-dessus de 7, la substance est considérée comme basique (ou alcaline) et la quantité d'ions  $OH^-$  est supérieure à celle d'ions  $H^+$ . Au-dessous de 7, la substance est acide ; les ions  $H^+$  sont en quantités supérieures [37].

- **une solution de pH = 7 est dite neutre.**
- **une solution de pH < 7 est dite acide :** plus son pH diminue, plus elle est acide.
  - pH 1 – pH 3 : acides forts et potentiellement très dangereux.
  - pH 4 – pH 5 : acides faibles.
  - pH 6 – pH 7 : acides neutres (eau potable).
- **une solution de pH > 7 est dite basique ou alcaline :** plus son pH augmente, plus elle est basique.
  - pH 7 – pH 8 : bases neutres (eau potable).
  - pH 8 – pH 9 : bases faibles.
  - pH 10 – pH 14 : bases fortes.

## Chapitre V : Résultats et discussions

Les mesures ont été faites au niveau d'un laboratoire de l'université. Pour déterminer le pH de ces eaux nous avons utilisé un pH mètre. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau V-4 : Résultats des mesures de PH effectuées sur les eaux**

	PH état initiale	PH eau restante	PH eau distillée
Margine	5.42	-	4.99
Eau de robinet	6.27	6.30	6.63
eau salée (35g/l)	6.36	6.62	6.85

### Discussions des résultats

Les résultats obtenus montrent que l'eau distillée produite à partir de l'eau de robinet et de l'eau salée est totalement dans les normes fixées du PH pour une eau potable (6.63 pour l'eau de robinet et 6.85 pour l'eau salée). Contrairement à l'eau produite à partir des margines qui est légèrement acide, qui ne représente donc pas une eau potable.

### V-7-Problèmes rencontrés

Dans cette étude, les problèmes rencontrés lors de l'exécution de l'expérience de distillation sont :

- Insuffisance des rayons solaires pour monter les températures, vu que l'expérience a été réalisée lors de la période de l'automne où le ciel était souvent couvert de nuages.
- Le vent qui est assez présent toute la journée.
- Les thermocouples qui se détachent au cours de l'expérience

### V-8-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus lors des multiples essais effectués avec le distillateur solaire que nous avons précédemment réalisé. Les températures mesurées au niveau du foyer de ce concentrateur sont suffisamment élevées pour des températures ambiante dépassants pas les 22°, mais les débits d'eau douce produite restent faibles.

Vu le cout très bas de ce concentrateur l'expérience est à considérer largement positive en ce qui concerne la production de l'eau douce à partir de l'eau de mer ou de l'eau polluée.

## Conclusion générale

La distillation de l'eau par voie solaire est importante pour deux raisons, la première est l'économie d'énergie et la deuxième est de procurer de nouvelles ressources d'eau douce.

Pour atteindre ce but, nous avons illustré dans ce travail l'étude et la réalisation d'un concentrateur solaire parabolique pour la distillation de l'eau qui nous a permis de mettre en application nos connaissances théoriques sur l'énergie solaire ainsi que certaines lois que nous avons précédemment étudiées.

Cette technique n'a aucun effet sur l'environnement et ne dégage ni CO<sub>2</sub>, ni autre corps qui peut desservir la nature.

L'utilisation de ce distillateur s'avère très intéressante. Nous avons réussi à obtenir des températures élevées au niveau du récepteur au bout d'un temps très court et récupérer des quantités d'eau douce malgré sa dépendance de plusieurs facteurs comme : la variation de l'éclairement solaire, la géométrie du réflecteur (diamètre, angle d'ouverture), la nature de sa matière réfléchissante ainsi que la nature et les dimensions de l'absorbeur.

Les domaines d'application de ce système sont multiples, il peut aussi être destiné à la cuisson solaire, la pasteurisation des aliments et la production d'eau chaude sanitaire.

Avec des matériaux plus performants et un système de poursuite automatique du soleil, le distillateur peut être perfectionné pour profiter au maximum des rayons solaires et augmenter les températures ainsi améliorer le rendement afin d'étendre son domaine d'utilisation.

## Références Bibliographiques

- [1] **Docteur Merad Mokhtaria** : Introduction au gisement solaire algérien théorie et application, université Amar Telidji, Laghouat.
- [2] <https://www.astronomes.com/le-soleil-et-les-etoiles/soleil>
- [3] <https://www.futura-sciences.com/sciences/définitions/univers-photosphere-3733/>
- [4] <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Chromosph%C3%A8re>
- [5] [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Couronne\\_solaire](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Couronne_solaire)
- [6] **Bernard.R Menguy.G Schwartz.M** : le rayonnement solaire- conversion thermique et applications, technique et documentation, Paris 1980.
- [7] **Capderou.M** : Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, 1987.
- [8] **Bernard.J** : Energie solaire calculs et optimisations, Edition ellipses, 2004.
- [9] **Ait Sai.S , Noufel.S** : étude et réalisation d'un capteur solaire à air chaud UMMTO 2017.
- [10] **ZEGHIB Ilham**, étude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique UM Constantine.
- [11] **N.Kherous, J.Hamzaoui**, étude et réalisation d'un concentrateur parabolique UMMTO.
- [12] **William B.stine et Michael Geyer** power from the sun, Lyle centre for regenerative studies, 2001.
- [13] **Neeranartvong vudichai**, étude d'un concentrateur solaire à simple réflexion, thèse de Doteur-Igénieur, Institut national polytechnique (Toulouse), Juillet 1983.
- [14] **Paul de Neyer**, énergie solaire thermique, guide des énergies renouvelables mai 2003
- [15] **Edwards D.K/ traduit par Lucien Marlot** Capteurs solaires Editions 1979
- [16] **Handbook of optics**: devices, measurements & properties volume II sponsored by the optical society of America

- [17] **Khennoua A.O, Lachibi B**: étude d'un cuiseur solaire Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
- [18] **Srinivasan M, L.V Kulkarni.L.V and Pasupathy C S**: a simple technique of fabrication of paraboloidal concentrators 1978
- [19] **Dan dye, Byard Wood**: non-imaging devices for uniform irradiation on planar surface for parabolic concentrators. Nevada August2002-April2003
- [20] **U.H Kurzweg and J.P Benson**: ISO-Intensity absorber configurations for parabolic concentrators, solar energy 1982
- [21] **Halloufi ouahid**, étude de la performance d'un distillateur solaire par un système de préchauffage solaire de l'eau saumâtre, UM Constantine
- [22] Magazine **la chronique scientifique**, dessalement d'eau de mer, juillet 2005
- [23] **Lamia Cherif** : l'influence de la coagulation-floculation et décantation sur le prétraitement des eaux saumâtres2012. UAB Tlemcen
- [24] **Zerouali Mekki** : contribution à l'optimisation des performances d'un distillateur solaire 2012. UHL Batna
- [25] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Production\\_d'eau\\_potable](http://fr.wikipedia.org/wiki/Production_d'eau_potable)
- [26] Blog du **géodumonde** Skyrock.com
- [27] **F. TATA-Ducru** : dessalement de l'eau de mer bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes. Agence française de développement janvier 2009.
- [28] **Mandri Youcef** : étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide 2011. Université Claude Bernard Lyon 1.
- [29] **Rahmani Rym** : rendement d'un distillateur solaire à film capillaire à plusieurs étages, effets de certains paramètres thermo physiques sur le rendement 2007. UM Constantine
- [30] <http://www.lycee-kerichen.org/dossiers/ProjetInde/page5.html>

[31] <http://dessalementunisie.e-monsite.com/pages/sous-partie/2-1-electrodialyse.html>

[32] **Loren BERTHET Isabelle JACQUETTE, Audrey PROVASI** : l'eau gratuite c'est fini ? Grenoble éthique des affaires 2005-2006

[33] <http://sesp.esep.pro/fr/>

[34] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me\\_de\\_coordonn%C3%A9es\\_horizontales](https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_de_coordonn%C3%A9es_horizontales)

[35] <http://www.meteo.nc/en-savoir-plus/comprendre-la-meteo/observation/obs-param#actinometrie>

[36] **TABET Ismail** étude d'un distillateur solaire à cascade 2010 UM Constantine

[37] <https://naturolistique.fr/ph-de-l-eau-et-des-eaux-minerales/#Leau-ideale-possede-un-pH-entre-6-et-7>