



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
La République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de L'Enseignement Supérieur & la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم  
Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
قسم الهندسة الميكانيكية  
Département Génie Mécanique



N° d'ordre : M...../GM/2019

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétique**

## *Thème*

**ETUDE EXPERIMENTALE D'UN RETRO-CONCENTRATEUR  
SOLAIRE PARABOLIQUE**

**Présenté par :**

- ❖ BALLO Djibril
- ❖ BETTARCHA Nesrine Manel

***Soutenu le 06/07 / 2019 devant le jury composé de :***

Président	Pr. S. HOUAT	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. A.KHALDI	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Pr. N.RETIEL	Université de Mostaganem UMAB

**Année Universitaire : 2018 / 2019**

## Remerciement

Tout d'abord Al-hamdoullillah, Louage à ALLAH le tout puissant, qui nous a donné la force, la volonté, le courage et la patience à mener ce travail à son terme dans les meilleures conditions.

Ce thème nous a été proposé par monsieur RETIEL Nouredine, Professeur au département Génie mécanique à l'Université de Mostaganem, nous lui sommes honoré d'adresser nos remerciements les plus sincères, son encadrement, sa disponibilité, ses directives, ses conseils, ses efforts, son application ainsi que sa participation nous ont été d'une importance capitale à aboutissement de ce travail. Nous avons beaucoup appris de ses expériences.

Au terme de la réalisation de ce projet, nous tenons à remercier Mr Hackim le technicien du Laboratoire de Modélisation Numérique et Expérimentale des Phénomènes Mécaniques (LMNEPM) de l'Université Abedelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour son aide durant la réalisation du récepteur.

Nous adressons nos remerciements à Monsieur HOUAT Samir Professeur au département génie mécanique, pour nous avoir fait honoré de présider le jury de ce mémoire.

Nous remercions monsieur KHALDI Abdelaziz maître de conférences au département génie mécanique à UMAB génie mécanique pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail et pour avoir bien voulu examiner notre travail.

Nous voudrions exprimer nos gratitudes à tout le corps Professoral et administrative de la Faculté des Sciences et de la Technologie de l'Université de Mostaganem, particulièrement ceux du département de Génie Mécanique pour la formation qui nous ont offert durant ces années d'études.

Nous remercions également monsieur le chef de département du génie mécanique, pour avoir mis à notre disposition le laboratoire durant toute la période de la réalisation.

Aussi, nos sincères remerciements à Madame la secrétaire du département génie mécanique, pour son accueil toujours aussi souriante.

Sans oublier nos collègues et camarades qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés de loin ou de prêt au bon déroulement de ce travail.

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon papa BALLO Chaka, qui a donné un sens à ma vie, m'a mis dans les meilleures conditions pour aller loin dans mes études.*

*A mon adorable maman COULIBALY Maimouna, qui m'a donnée la vie et qui m'a toujours éclairée le chemin de la vie en veillant sur moi tout au long de mes études. « Que Dieu me les garde ».*

*A ma défunte grand-mère DENSO Kadidia, qui m'a toujours soutenu et poussé à faire plus dans mes études. Que son âme en paix.*

*A mes sœurs : Fatoumata, Ramatou et Kadidia.*

*A mes frères : Souleymane, Ibrahim, Yaya. Vous êtes ma source de motivation.*

*A mon cher tonton BALLO Adama et mes chères tantes : Habibatou, Noumoutenin.*

*A toute ma famille (du Mali, de l'Algérie)*

*A tous mes ami(e)s (au Mali et en Algérie).*

*A tous les étudiant(e)s Maliens ici à Mostaganem.*

*A tous ceux qui m'ont aimé, m'aiment et m'aimeront sans condition.*

*Je dédie également ce mémoire à mon très cher binôme BETTARCHA Nesrine Manel, qui a toujours été à mon côté et m'a toujours soutenu. J'ai passé des moments magnifiques à tes côtés.*

***Djibril Ballo***

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mon très cher père :*

***BETTARCHA Mohamed zine dine**, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur. Autant de phrase ne saurait exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Tes conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Ta patience sans fin, ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter, que dieu le tout puissant te préserve, t'accorde et te protège de tous mal.*

*A ma très chère mère :*

***KHOUSSA Hassnia**, la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, maman que j'adore. Autant de phrases ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection et tu n'as cessé de me soutenir et m'encourager durant toutes les années de mes études. Puisse le tout puissant te donner longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.*

*A mes très chères sœurs :*

***Khadija, Ferial, Iméne et Amira**, Qui a toujours été à mes côtés, à partager ma vie et mes problèmes de tous les jours. Je ne peux exprimer à travers ses lignes tous mes sentiments d'amour et de tendresse envers vous. Puisse l'amour et la fraternité nous unissent à jamais. Je vous souhaite la réussite dans votre vie et tout le bonheur du monde pour vous combler. J'ai de la chance de vous avoir. Que dieu vous garde mes merveilleuses.*

*A ma très chère grand-mère maternelle, Que se modeste travail soit l'expression des vœux que tu n'as cessé de formuler dans tes prières. Que dieu te préserve santé et longue vie.*

*A la mémoire de mes grand parents paternelle et maternelle, qui ont toujours été dans mon esprit dans mon cœur, je vous dédis aujourd'hui ma réussite. Que dieu vous accueille dans son éternel paradis.*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude*

*A mon cher binôme, **BALLO Djibril**, pour l'amitié et le soutien durant tous notre parcours d'étude. Je te dédie notre travail comme preuve de respect, gratitude et remerciement. Je te souhaite beaucoup de réussites dans ta vie.*

*Enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

***Bettarcha Nesrine Manel***

## Résumé

La demande énergétique croît du jour au jour, avec l'industrialisation, la mondialisation du commerce et surtout avec la multiplication des équipements domestiques. Cette augmentation a été majoritairement couverte par surexploitation des sources d'énergies fossiles (non renouvelable).

Et face aux exigences environnementales et devant la menace d'épuisement des combustibles fossiles, le défi présenté est de trouver des sources d'énergie propres et renouvelables, comme l'énergie solaire.

La conversion d'énergie solaire en énergie thermique peut se faire à l'aide des capteurs thermiques à concentration, qui concentrent les rayons du soleil à l'aide d'un moyen de réflexion afin d'accroître l'intensité du flux, et ces capteurs sont utilisés lorsque les températures élevées sont demandées. Seulement le rayonnement direct est exploité par ces capteurs.

C'est dans ce but, que nous nous sommes donné comme tâche étude expérimentale d'un rétro-concentrateur solaire parabolique pour la production de la vapeur afin, d'optimiser la production. L'énergie solaire thermodynamique est une forme d'énergie renouvelable qui émet très peu de gaz toxique. La réalisation et les essais sont effectués à la faculté des Sciences et de la Technologie où nous avons vaporisé 0.5 L d'eau. La production de la vapeur passe d'abord par la production d'eau chaude.

Le vent et l'ensoleillement influent énormément sur les performances du concentrateur.

La particularité de notre modèle est que le récepteur est placé en bas du réflecteur afin, d'éviter l'ombrage du récepteur sur le collecteur.

Mot clé : concentrateur solaire, énergie solaire, ensoleillement, évaporation

## Abstract

The energy demand is growing from day to day, with industrialization, the globalization of trade and mainly with the proliferation of domestic equipment. This increase has been mostly covered by overexploitation of fossil energy sources (non-renewable).

And in the face of environmental demands and the threat of fossil fuel depletion, the challenge is to find clean and renewable sources of energy, such as solar energy.

The conversion of solar energy into thermal energy can be done using concentrating thermal sensors, which concentrate the sun's rays by means of a means of reflection to increase the intensity of the flow, and these Sensors are used when high temperatures are required. Only the direct radiation is exploited by these sensors.

It is for this purpose, that we give ourselves as an experimental study spot of a parabolic solar retro-concentrator for the production of steam so, to optimize the production. Thermodynamic solar is a form of renewable energy that emits very little toxic gas. The realization and tests are carried out at the Faculty of Science and Technology where we sprayed 0.5 L of water. Steam production goes through the production of hot water

Wind and sunshine greatly affect the performance of the concentrator.

The peculiarity of our model is that the receiver is placed at the bottom of the reflector to avoid shading the receiver on the collector.

Keyword: solar concentrator, solar energy, sunshine, evaporation.

# Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre 1 : Gisement solaire</b>	
I. Gisement solaire .....	4
I.1. Introduction .....	4
I.2. Le soleil .....	4
I.2.1. L'origine de l'énergie solaire .....	4
I.2.2. Carte d'identité du soleil .....	5
I.3. L'histoire de l'énergie solaire .....	5
I.4. Construction physique du soleil .....	7
I.4.1. L'intérieur : .....	7
I.4.2. La photosphère : .....	8
I.4.3. Chromosphère : .....	8
I.4.4. La couronne : .....	9
I.5. Constante solaire .....	9
I.6. Le rayonnement solaire .....	9
I.7. Eclairement solaire .....	11
I.7.1. Rayonnement solaire direct .....	11
I.7.2. Rayonnement diffus .....	11
I.7.3. Rayonnement réfléchi (albédo) .....	12
I.7.4. Rayonnement global .....	12
I.8. Gisement solaire .....	13
I.8.1. Le gisement solaire en Algérie .....	14
I.9. Différents types d'utilisation d'énergie solaire .....	15
I.9.1. L'énergie passive .....	15
I.9.2. L'énergie thermique .....	16
I.9.3. L'énergie photovoltaïque .....	16

I.9.4.	L'énergie thermodynamique .....	16
I.10.	Avantages et inconvénients de l'énergie solaire .....	17
I.11.	Conclusion.....	18

## **Chapitre II : Concentration solaire**

II.	Concentration solaire.....	19
II.1.	Introduction .....	19
II.2.	Capteurs solaires thermiques.....	19
II.2.1.	Capteurs sans concentration (capteurs plans).....	20
II.2.1.1.	Principe de conversion .....	20
II.2.2.	Capteur avec concentration .....	21
II.2.2.1.	Nécessité de la concentration.....	21
II.2.2.2.	Principe .....	21
II.2.2.3.	Le potentiel solaire à concentration dans le monde .....	21
II.2.2.4.	Différentes technologies de concentration.....	22
II.2.2.4.1.	Filière cylindro-parabolique.....	23
II.2.2.4.2.	Filière Fresnel .....	24
II.2.2.4.3.	Tours solaires .....	25
II.2.2.4.4.	Filière parabolique .....	25
II.2.2.5.	Quelques applications des capteurs solaires thermiques.....	26
II.2.2.6.	Les avantages de la concentration.....	26
II.3.	Conclusion.....	26

## **Chapitre III : Etude du concentrateur solaire parabolique**

III.	Étude du concentrateur solaire parabolique .....	28
III.1.	Introduction .....	28
III.2.	Les caractéristiques géométriques.....	28
III.2.1.	La parabole .....	28
III.2.2.	Angle d'ouverture d'une parabole .....	29
III.2.3.	La taille d'une parabole .....	31

III.2.4.	Surface d'une parabole .....	31
III.2.5.	Longueur d'une parabole.....	31
III.2.6.	Les composantes du concentrateur solaire parabolique.....	32
III.2.6.1.	Le réflecteur ou collecteur (paraboloïde) .....	32
III.2.6.2.	Le récepteur (absorbeur).....	34
III.3.	La concentration .....	35
III.3.1.	Concentration géométrique.....	35
III.3.2.	Concentration optique.....	35
III.3.3.	Calcul de la concentration maximale.....	35
III.4.	Etudes énergétiques.....	36
III.4.1.	L'énergie reçue à l'ouverture du paraboloïde.....	36
III.4.2.	La puissance absorbée par l'ouverture du récepteur (absorbeur).....	37
III.4.3.	Température maximale du récepteur .....	38
III.4.4.	Puissance utile .....	39
III.4.5.	Puissance thermique perdue .....	40
III.4.5.1.	Pertes par convection.....	40
III.4.5.2.	Pertes par rayonnement .....	41
III.4.5.3.	Pertes par conduction.....	41
III.5.	Efficacités énergétiques.....	42
III.5.1.	Efficacité du concentrateur .....	42
III.5.2.	Efficacité du récepteur.....	42
III.6.	Conclusion.....	43
<b>Chapitre IV : Etude expérimentale du rétro-concentrateur solaire parabolique</b>		
IV.	Étude expérimentale du rétro-concentrateur parabolique .....	44
IV.1.	Introduction .....	44
IV.2.	Description des composantes de l'installation .....	44
IV.2.1.	Collecteur (réflecteur).....	44

IV.2.2.	Récepteur (absorbeur).....	45
IV.2.3.	Le fluide caloporteur .....	46
IV.2.4.	Le support .....	46
IV.3.	Dispositifs de mesures.....	47
IV.3.1.	Le pyranomètre.....	47
IV.3.2.	Les thermomètres .....	47
IV.4.	Plan expérimental.....	48
IV.4.1.	Le positionnement par rapport au soleil .....	48
IV.4.2.	Mesures.....	49
IV.4.3.	Objectifs.....	49
IV.4.4.	Protocole de mesures .....	50
IV.5.	Dépouillement des résultats .....	50
IV.5.1.	Tableaux de valeurs .....	50
IV.6.	Problèmes rencontrés .....	52

## **Chapitre V : Résultats et discussions**

V.	Résultats et discussions .....	53
V.1.	Introduction .....	53
V.2.	Résultats de la journée du 28 Mai 2019 : .....	53
V.2.1.	L'évolution du rayonnement direct (global) .....	53
V.2.2.	L'évolution des différentes températures .....	54
V.3.	Résultats de la journée du 11 juin .....	54
V.3.1.	L'évolution du rayonnement direct (global) .....	55
V.3.2.	L'évolution des différentes températures .....	55
V.4.	Paramètres qui influents les performances.....	56
V.4.1.	Influence du rayonnement direct (global) sur la température du récepteur .....	56
V.4.2.	Influence du vent sur la température du récepteur .....	56
V.4.3.	Influence du rayonnement et du vent sur l'efficacité du concentrateur .....	56

V.5. Les efficacités énergétiques.....	57
Conclusion générale et recommandation .....	58
Bibliographie.....	60
Annexes.....	62

## Table des figures

Figure 1 : Actions de sources d'énergie dans l'offre totale mondiale d'énergie primaire en 2008 .....	3
---	---

### Chapitre I : Gisement solaire

Figure 2 : La photosphère solaire .....	8
Figure 3 : Couronne solaire visible en France lors de l'éclipse solaire du 11 août 1999.....	8
Figure 4 : Structure du soleil en coup .....	9
Figure 5 : Analyse spectrale du rayonnement solaire .....	11
Figure 6 : Composantes du rayonnement solaire au sol.....	13
Figure 7 : L'énergie solaire dans le monde .....	14
Figure 8 : Potentiel d'Energie solaire en Algérie.....	15

### Chapitre II : Concentration solaire

Figure 9 : Schéma de principe des capteurs plans.....	20
Figure 10 : Distribution du gisement solaire à concentration .....	22
Figure 11 : Centrales solaires à concentration.....	23
Figure 12 : Schéma d'un collecteur cylindro-parabolique .....	24
Figure 13 : Schéma de principe de miroirs de Fresnel .....	24
Figure 14 : Schéma d'une centrale à tour .....	25
Figure 15 : Concentrateur parabolique .....	26

### Chapitre III : Etude du concentrateur solaire parabolique

Figure 16 : géométrie de la parabole .....	29
Figure 17 : Segments d'une parabole ayant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture .....	30
Figure 18 : Distance focale en fonction de l'angle d'ouverture d'une parabole de diamètre ..	30
Figure 19 : concentrateur parabolique.....	32
Figure 20 : parabolioïde de révolution .....	33
Figure 21 : élément différentiel de surface parabolique.....	33
Figure 22 : Réflexion d'un rayon lumineux parallèle .....	36
Figure 23 : Bilan énergétique au niveau du récepteur.....	39

### Chapitre IV : Etude expérimentale du rétro-concentrateur solaire parabolique

Figure 24 : Le réflecteur parabolique .....	44
---	----

Figure 25 : Le récepteur .....	45
Figure 26 : Le pyranomètre .....	47
Figure 27 : Les thermomètres.....	48
Figure 28 : Vue générale de l'installation complète.....	49

### Chapitre V : Résultats et discussions

Figure 29 : Le profil de l'ensoleillement direct (global) en fonction du temps .....	53
Figure 30 : Les profils de températures en fonction du temps .....	54
Figure 31 : Profil de l'ensoleillement direct en fonction du temps .....	55
Figure 32 : Le profil de températures en fonction du temps .....	55

## Liste des tableaux

Tableau 1 : albédo solaire de différentes surfaces.....	12
Tableau 2 : caractéristiques géométriques du réflecteur .....	45
Tableau 3 : Caractéristiques de l'absorbeur .....	46
Tableau 4 : Caractéristiques thermo physiques de l'eau .....	46
Tableau 5 : Résultats de mesures de la journée du 28/05/2019 .....	51
Tableau 6 : Mesure de la durée de l'évaporation de l'eau.....	51
Tableau 7 : Résultats de mesures de la journée du 11/06/2019 .....	51

## Nomenclature

Notation	Désignation	Unités
F	Distance focale	m
P	Le rayon parabolique	m
$\psi$	L'angle d'ouverture d'une parabole	Degré (°C)
d	Le diamètre d'ouverture	m
h	La taille d'une parabole	m
$A_x$	La surface d'une parabole	$m^2$
S	La longueur d'une parabole	m
$A_s$	La surface du paraboloïde	$m^2$
$A_a$	La surface d'ouverture d'un paraboloïde	$m^2$
$A_r$	La surface du récepteur	$m^2$
$C_g$	La concentration géométrique	
$C_0$	La concentration optique	
$I_a$	Rayonnement incident reçu à la surface du collecteur	W
$I_r$	Rayonnement arrivant à la surface réceptrice	W
C	Facteur de concentration	
$\varepsilon$	L'angle sous lequel on voit le soleil à partir de la terre	Radians
$C_{max}$	Concentration maximale	
$I_b$	Rayon solaire parallèle à l'axe de la parabole	$W/m^2$
$\eta_{op}$	le rendement optique du concentrateur	
$\alpha$	Absorptivité de la surface absorbante	
$\tau$	Transmittance de toute la vitre du récepteur	
$\rho$	Réflectance de toutes les surfaces réfléchissantes	
$T_{r,max}$	Température maximale du récepteur	Degré Celsius (°C)

$\sigma$	La constante de Stefan – Boltzmann	$W/m^2 K^4$
$\epsilon$	L'émittance de la surface de l'absorbeur	
$Q_u$	Puissance utile	$W$
$m_m$	Le débit massique du fluide circulant dans l'absorbeur	$Kg/s$
$C_p$	Chaleur spécifique du fluide	$J/kg\ ^\circ C$
$T_e$	La température du fluide à l'entrée	$^\circ C$
$T_s$	La température du fluide à la sortie	$^\circ C$
$Q_a$	Puissance thermique absorbée par l'absorbeur	$W$
$Q_{perdue}$	Puissance thermique perdue par le récepteur	$W$
$Q_{conv}$	La perte de chaleur par convection du récepteur	$W$
$Q_{cond}$	La perte de chaleur par convection du récepteur	$W$
$Q_{ray}$	La perte de chaleur de rayonnement du récepteur	$W$
$T_{recp}$	Température du récepteur (absorbeur)	$^\circ C$
$T_a$	Température ambiant	$^\circ C$
$h_{cv}$	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$W/m^2\ C$
$K_{air}$	La conductivité thermique de l'air	$W/m\ ^\circ C$
$k_r$	Conductivité thermique du récepteur	$W/m\ ^\circ C$
$\Delta x$	L'épaisseur du matériau	$m$
$h_{ray}$	Coefficient de transfert par rayonnement	$W/m^2\ C$
$D$	Le diamètre de l'absorbeur (récepteur)	$m$
$V$	vitesse du vent	$(m/s)$
$\gamma$	viscosité de cinématique l'air	$m^2/s$
$U_L$	Coefficient d'échange de chaleur	$W/m^2\ C$
$\eta_{concentrateur}$	L'efficacité du concentrateur	
$\eta_{recp}$	L'efficacité du récepteur	
$Nu_D$	Le nombre de Nuselt	

**$P_r$**  Le nombre de Prandtl

**$R_{eD}$**  Le nombre de Reynolds

**$CSP$**  Concentrateur solaire parabolique

## Introduction générale

Depuis des siècles, nous consommons l'énergie sous ses différentes formes, dans l'industrie, le tertiaire et le transport. Le développement industriel, l'augmentation du parc d'automobile et la multiplication des équipements domestiques ont conduit à une croissance importante de la demande énergétique. Cette demande a été majoritairement couverte par l'exploitation des sources d'énergies fossiles, qui n'a pas sans conséquences considérables. D'abord la rareté de ces ressources fossiles ce qui implique à une augmentation gigantesque du prix des énergies. Ensuite leurs effets sur l'environnement (les gaz à effets de serre, la formation des gaz toxique NOx sont contre les exigences environnementales). Le défi présent est alors de trouver des sources d'énergie propre dont l'exploitation a très peu d'effet sur l'environnement. Nous rappelons qu'aujourd'hui 85% d'énergies utilisées dans le monde provient du gisement de combustible fossiles (charbon, pétrole, gaz) comme illustré dans la figure 1 ci-dessous. Face à l'épuisement des sources d'énergies fossiles et de leur impact négatif sur l'environnement, les énergies renouvelables s'imposent comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux. Parmi les énergies renouvelables, on a l'énergie solaire qui est une source 100% propre et disponible sur toute la surface du globe terrestre.

Après la crise successive pétrolière et les catastrophes nucléaires, le développement et l'implantation des énergies renouvelables est devenu incontournable. Les énergies renouvelables pourraient substituer aux énergies fossiles ou fissiles dont l'épuisement semble proche et dont les inconvénients environnementaux sont immédiats [15]. Des ressources énergétique illimitées et abondamment disponibles existent et doivent être exploitées. Comme alternative aux ressources classiques, l'énergie solaire se distingue par son coût d'exploitation, sa facilité d'exploitation et ses multiples choix d'exploitation.

Dans l'option de production d'électricité, l'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable qui n'émet pas des gaz toxiques. Deux filières possibles existent pour réaliser la conversion d'énergie solaire en électricité : le recours à des cellules photovoltaïques, ou la conversion thermodynamique. La première solution est assez chère, pour un rendement limité. On désigne par « solaire thermodynamique » l'ensemble des techniques visant à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique (et électrique) à travers un cycle thermodynamique. La génération d'électricité avec des installations solaires à concentration (Concentration Solar Power, CSP en Anglais) est présentée comme une source d'avenir pour produire de l'électricité renouvelable.

Avec un taux d'émission estimé inférieur à 20 kg CO<sub>2</sub>/MWh. L'électricité solaire thermodynamique se situe de ce point de vue au même niveau que l'électricité d'origine hydraulique (4 kg CO<sub>2</sub>/MWh) ou nucléaire (6 kg CO<sub>2</sub>/MWh), et sans commune mesure avec l'électricité photovoltaïque (100 kg CO<sub>2</sub>/MWh) ou encore l'électricité issue de la combustion du charbon (900 kg CO<sub>2</sub>/MWh) [27].

Ces technologies se basent sur des collecteurs qui concentrent la radiation solaire et réchauffent à haute température un fluide caloporteur. Ce fluide peut ensuite être utilisé pour la génération d'électricité.

Ces dernières années, on constate une renaissance de la filière parabolique notamment pour la production d'électricité avec un moteur Stirling.

Notre travail a pour but de faire une étude expérimentale et théorique d'un retro-concentrateur parabolique afin, d'identifier les différents paramètres qui influent les performances du système.

Le mémoire se compose en cinq chapitres :

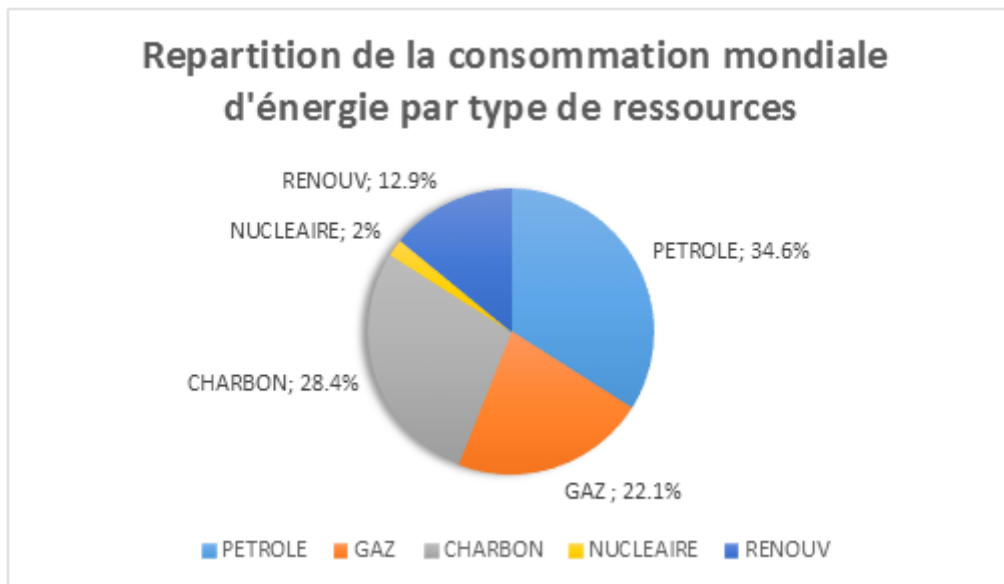
Le premier chapitre porte sur l'étude théorique de l'énergie solaire comme toute installation solaire dépend principalement de l'ensoleillement du site.

Ensuite dans le second chapitre nous présentons les capteurs solaires thermiques, tels que les capteurs avec concentration et les capteurs sans concentration.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude théorique du modèle concentrateur parabolique.

Après nous présentons les différentes étapes de la réalisation de notre modèle (le rétro-concentrateur parabolique) dans le chapitre quatre.

Enfin, dans le cinquième et dernier chapitre nous présentons et interprétons nos résultats expérimentaux. Tout ce travail sera clôturé par une conclusion.



*Figure 1 : Actions de sources d'énergie dans l'offre totale mondiale d'énergie primaire en 2008*

# I. Gisement solaire

## I.1. Introduction

Le soleil est à l'origine de la vie sur terre et la perpétue par son rapport incessant d'énergie. Cette énergie nous arrive sous forme d'un rayonnement électromagnétique après avoir parcouru des millions de kilomètres. Notre Etoile, véritable boule de feu, nous envoie à travers l'espace, une énergie considérable qui nous éclaire, nous réchauffe, fait croître les plante (photosynthèse des plantes), l'origine du cycle de l'eau, et des vents. Les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) que nous utilisons abondamment ont également pour origine l'énergie de photosynthèse accumulée durant des millions d'années.

Depuis les temps les plus reculés l'homme a perçu l'importance du soleil et l'a affublé de pouvoirs divins. Devenu " Œil de ciel " en Australie, adoré chez les Egyptiens (dieu Ré ou Râ), appelé le nourrisseur dans les textes hindous, symbolise la puissance royale du japon...

Toute forme de vie sur terre dépend directement ou indirectement du soleil. Il est évident que, dans ces conditions l'énergie solaire pourrait satisfaire pleinement les besoins en énergie de l'humanité, surtout si l'on tient compte du fait que cette forme d'énergie rayonnante peut se transformer sous deux autres formes couramment utilisées par l'homme : l'énergie thermique et l'énergie électrique.

## I.2. Le soleil

### I.2.1. L'origine de l'énergie solaire

L'astre solaire est une étoile de 1397 000 km de diamètre (110 fois celui de la terre) au sein duquel se produit une réaction de fusion (fusion d'hydrogène en hélium) générant d'énormes quantités d'énergies. Une toute petite partie de cette énergie arrive sur terre, par rayonnement électromagnétique.

Globalement, l'énergie reçue est néanmoins considérable (1 million de Téra wattheures). Elle est de l'ordre de 10000 fois la consommation énergétique annuelle de la population mondiale. La puissance maximale moyenne délivrée sur terre par mètre carré d'environ 1000 Watts.

## I.2.2. Carte d'identité du soleil

- **Âge** : estimé à 4,7 milliards d'années
- **Durée de vie** : estimée à 10 milliards d'années
- **Diamètre** : 1 397 000 km (110 fois celui de la Terre, 12 700 km)
  - **Circonférence** : 4 372 544 km
- **Masse** :  $2 \times 10^{30}$  Kg (1 300 000 fois celle de la Terre)
  - **Distance Terre-Soleil** : 149 598 000 km
  - **Temps de transfert de la lumière** : 8 mn 20 s.
- **Composition (éléments /pourcentages)** : environ 73,46 % H<sub>2</sub>, 24 ,85 % H<sub>e</sub> et traces d'autres éléments (O, C, Fe, Ne, N, Si, Mg, S etc.)
- **Température** : à la surface : environ 5 800° C ; au centre : 15 millions de degrés ;



## I.3. L'histoire de l'énergie solaire

Il semble que ce soient les Egyptiens qui aient découvert l'effet de serre. Archimède, au 3<sup>ème</sup> siècle avant J-C, incendie la flotte romaine à Syracuse avec des miroirs plans (ou des boucliers polis). Vers 100 ans après J-C, Héron d'Alexandrie construit un dispositif de pompage de l'eau. En 1615, Salomon de Caus construit une pompe dont la force motrice est fournie par l'air chauffé par le soleil. Au 18<sup>ème</sup> siècle, Buffon utilise des miroirs concaves à facettes. En 1774, Joseph Priestley concentre les rayons solaires sur de l'oxyde de mercure, et recueille le gaz produit dont la propriété est de faire brûler une bougie plus vivement que l'air : il découvre ainsi l'oxygène, ce qui permet à Lavoisier d'établir la théorie complète de la combustion due à la combinaison d'un corps avec l'oxygène de l'air. Lavoisier lui-même construit un four solaire

à l'aide d'une lentille liquide, et réussit à fondre le platine. A la fin du 18<sup>ème</sup> siècle, le suisse H.B. de Saussure crée des machines solaires (deux vitres planes sur un collecteur orienté vers le soleil). En 1872, dans le désert d'Atacama, au Chili, on construit un distillateur solaire de 5000 m<sup>2</sup> pour fournir de l'eau à une mine de nitrate de sodium [1].

En 1878, A. Mouchot, professeur au lycée de Tours, invente une machine à vapeur fonctionnant sous 3,5 atmosphères à l'aide d'un grand miroir conique et servant à actionner l'imprimerie de l'Exposition Universelle : sa puissance est de deux chevaux pour une surface de collecteurs de 20 m<sup>2</sup>. De 1902 à 1908, Willies et Boyle construisent à Saint-Louis et à Needles, en Californie, des engins de 6 à 20 chevaux fonctionnant à l'eau et au gaz sulfureux. A la même époque, Shuman développe des machines solaires de plusieurs chevaux pour pomper de l'eau. En 1913, avec Boys, il installe près du Caire, une grosse machine de 50 chevaux, avec de longs cylindres paraboliques qui concentrent les radiations solaires sur une canalisation centrale avec un facteur de concentration de 4,5 pour pomper de l'eau du Nil à des fins d'irrigation.

A l'exception de G. Abbot qui, à la conférence internationale de l'énergie en 1936, présente une machine à vapeur d'un demi-cheval, et en 1938 en Floride une machine de 1/5 de cheval avec un bouilleur flash, il n'y a aucun autre développement de l'énergie solaire dans les années suivantes. Ce n'est qu'à partir de 1950 que les applications de l'énergie solaire commencent timidement à se développer [2].

Pendant l'année 1954, trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement (9 %) et les Laboratoires Bell construisent le premier panneau solaire mais il était trop coûteux pour être produit en série. En 1958 a lieu le premier lancement d'un satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque. L'industrie spatiale investira beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaires. Pendant les années 1970 et 1980, des efforts sont faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. L'énergie solaire connaîtra un second élan au cours du premier choc pétrolier dans les années 1970. Alors que le prix du pétrole augmente de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques commencent à être utilisés pour la première fois dans les maisons. En effet, en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université du Delaware et en 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie. Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement. Des centrales solaires sont en cours de construction dans le monde entier. Les entreprises d'électricité et les gouvernements ont

offre des subventions et des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans l'énergie solaire pour leur maison. En effet, en 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

## I.4. Construction physique du soleil

Le soleil est situé au centre d'un système dit « système solaire » dont la terre fait partie avec d'autres planètes. C'est une sphère non homogène dans laquelle on peut distinguer trois zones principales : l'intérieur, la photosphère, la chromosphère et la couronne solaire [4].

### I.4.1. L'intérieur :

C'est la source d'énergie du soleil, créée par réaction thermonucléaire. La température atteint plusieurs millions de degrés et la pression un milliard d'atmosphère ; cette zone comprend trois régions essentielles :

**Le noyau (ou cœur) :** Il s'étend du centre à environ 0,2 du rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à  $76000 \text{ kg/m}^3$ , la densité est très élevée ( $\approx 10^5 \text{ kg/m}^3$ ) ainsi que la température (15 million de degrés Kelvin) et sa pression ( $2 \cdot 10^{11}$  bars). C'est dans le noyau que se produisent les réactions nucléaires de fusion libérant une énergie considérable.

**La zone radiative :** Elle s'étend de 0,2 à 0,7 du rayon solaire environ. Sa température est bien plus basse que celle du noyau, mais sa densité reste très forte. Cette zone joue un rôle important dans les transferts et le filtrage de l'énergie, du cœur vers la surface du Soleil.

**La zone de convection :** Elle s'étend de 0,7 du rayon solaire à 400 km de la surface du soleil environ. Elle permet les échanges d'énergie entre la zone radiative et la photosphère. En raison de sa faible densité, les échanges dans cette zone se font par convection : les gaz chauds remontent à la surface, se refroidissent, puis redescendent, se réchauffent, remontent, et ainsi de suite.

### I.4.2. La photosphère :

C'est une couche d'environ 300 km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil. Elle est composée de gaz moins denses que les autres couches du soleil, sa surface apparaît granuleuse à cause de cellules de convection, la photosphère apparaît donc comme une surface bouillonnante. On y observe aussi des taches consistent l'aspect le plus évident de l'activité solaire, elle correspond à une température moindre ce qui les fait apparaître de couleur sombre.



### I.4.3. Chromosphère :

*Figure 2 : La photosphère solaire*

Elle surmonte la photosphère. C'est une couche gazeuse qu'on assimile à l'atmosphère solaire dont l'épaisseur ne dépasse pas 800km et sa température est de 10 K. C'est une région à faible densité où la matière est très diluée, fait qui explique l'élévation de la température. La matière est très agitée : formation de jets au sein de la chromosphère ou de grands jets dans la couronne.



*Figure 3 : Couronne solaire visible en France lors de l'éclipse solaire du 11 août 1999*

#### I.4.4. La couronne :

La couronne est le prolongement de la photosphère. C'est une auréole blanche irrégulière, sans limite définies, formée de gaz peu denses, son épaisseur est d'environ 8000 km et une température qui dépasse le million de degrés. Invisible depuis la Terre, car son éclat se confond avec celui du ciel bleu, elle ne peut être observée que pendant un éclipse solaire. [5].



Figure 4 : Structure du soleil en coup

#### I.5. Constante solaire

Une surface plane d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire et située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée fonction de la distance Soleil-Terre. Cette distance variant quelque peu au cours de l'année, néanmoins le flux solaire varie peu au cours de temps. Aussi appelle-t-on constante solaire, notée  $C^*$ , la valeur reçue à la limite de l'atmosphère terrestre.

Un grand nombre de données ont été recueillies lors de mission spéciale par des satellites d'observation. La communauté internationale a choisi en l'an 2000 la valeur :

$$C^* = 1366 \text{ W/m}^2.$$

#### I.6. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire traverse l'atmosphère pour atteindre la surface de la terre, ce rayonnement est reçu par un corps, la nature de ce dernier est caractérisée par son taux d'absorption ou d'émission du rayonnement, on distingue :

**Corps noir** : c'est un corps qui absorbe toutes les radiations indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident, c'est-à-dire qui a un facteur d'absorption égal à 1 pour toutes les radiations  $\alpha_{T\lambda}=1$ .

Les propriétés du corps noir sont :

- Tous les corps noir rayonnent de la même manière.
- Le corps noir rayonne plus que le corps non noir à la même température.

**Corps gris** : c'est un corps dont le pouvoir d'absorption  $\alpha_{\lambda T}$  est indépendant de la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement qu'il reçoit. Il est défini :  $\alpha_{\lambda T}=\alpha_T$

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K, il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$  et se décompose approximativement sur 3 bandes :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ( $< 0,4 \mu\text{m}$ )
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$ )
- 44% dans la bande des infrarouges ( $> 0,8 \mu\text{m}$ )

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370  $\text{W}/\text{m}^2$  cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les 1000  $\text{W}/\text{m}^2$  à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu[6].

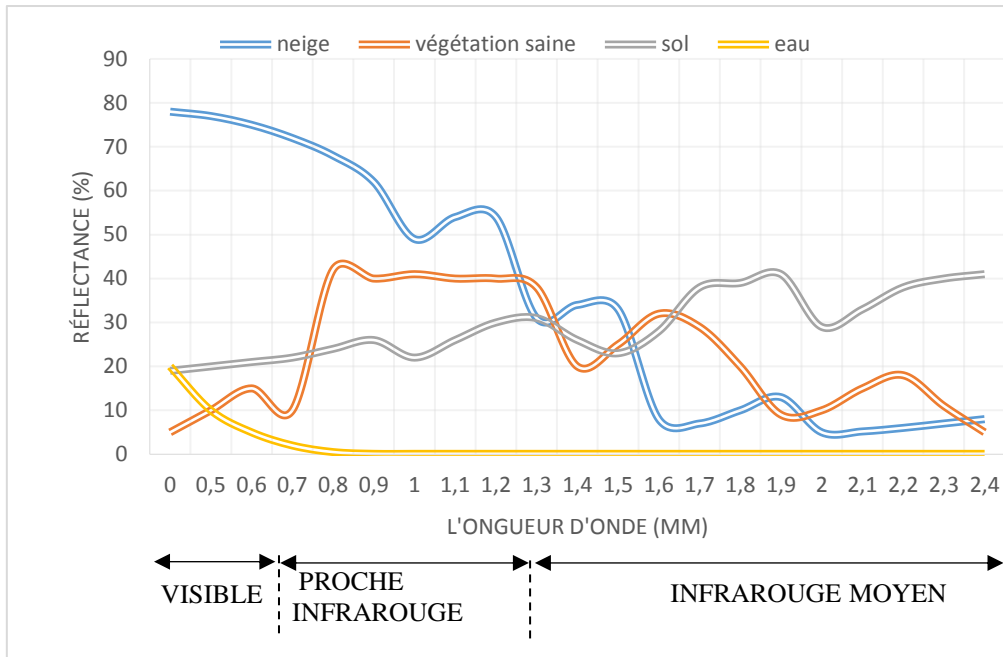


Figure 5 : Analyse spectrale du rayonnement solaire

## I.7. Eclairage solaire

L'éclairage correspond à la puissance solaire reçue par une surface plane élémentaire, appelée capteur. On distingue l'éclairage dû aux rayons solaires directs et celui dû au rayonnement solaire diffusé par le ciel ou réfléchi par une surface (le sol, un mur ...) [7].

### I.7.1. Rayonnement solaire direct

Le rayonnement direct est le rayonnement provenant directement du soleil sans avoir été dissipé par l'atmosphère. Il peut être mesuré par un pyrohéliomètre qui est un instrument destiné à la mesure de l'intensité du rayonnement solaire direct. Ce type de rayonnement est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages.

### I.7.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement reçu par toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (déviations de la lumière par les nuages et les molécules diverses). Les couches atmosphériques modifient la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il subit une atténuation à cause des phénomènes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols. Ainsi par exemple, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, la vapeur d'eau

absorbe le rayonnement infrarouge. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil. Donc, ce rayonnement est nul que la nuit.

### I.7.3. Rayonnement réfléchi (albédo)

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par une surface (sol, des objets...). Cet albédo peut être important lorsque le sol est plutôt réfléchissant (à cause de l'eau, la neige). En toute rigueur la notion d'albédo dépend de la longueur d'onde et de la direction du rayonnement incident ainsi que de la température. L'albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

$$\text{Albédo} = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}}$$

On représente quelque valeur de L'albédo selon la surface du sol :

Surface	Albédo solaire
mer chaude	0,05
Lune	0,07
Forêt tropicale	0,12
Mer froide	0,15
Pierre, ciment, sol cultivé	0,15 à 0,25
Herbe verte	0,25
Sable clair	0,37
neige tassée	0,60
Vénus	0,64
Neige fraîche	0,85
Nuage	0,80

Tableau 1 : albédo solaire de différentes surfaces

### I.7.4. Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, il est mesuré par un pyranomètre ou un polarimètre sans écran.

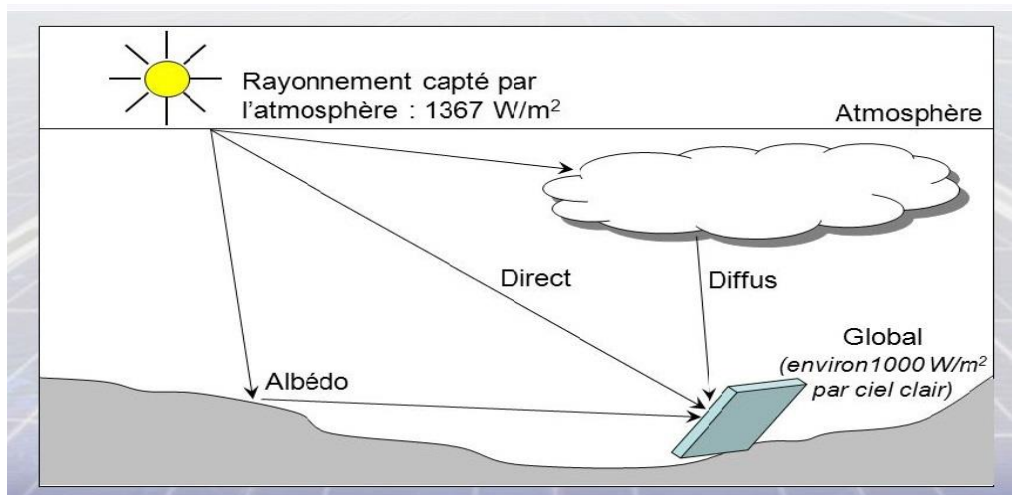


Figure 6 : Composantes du rayonnement solaire au sol

### I.8. Gisement solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu au cours d'une période donnée grâce aux stations météorologiques, son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire. Le gisement solaire est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique [8].

L'énergie solaire s'est d'abord développée pour satisfaire des besoins électriques en sites isolés, tels que les régions de montagnes, les îles et les zones rurales des pays en développement, particulièrement en Afrique et en Asie. Depuis le début des années 2000, le développement de l'énergie solaire a pris une toute autre dimension, à l'échelle mondiale, suite à la prise de conscience de l'enjeu environnemental lié au réchauffement climatique et à la nécessité de développer des énergies renouvelables, non émettrices de  $\text{CO}_2$ .

Les principaux pays producteurs de l'énergie solaire sont la Chine, les Etats-Unis, le Japon et l'Allemagne. La puissance installée dans le monde est passée de quelques MegaWatts au début des années 2000 à 102 GigaWatts à la fin 2012 puis 227 GigaWatts en 2015 et 300 GigaWatts à la fin 2016. Le rythme d'installation de puissance solaire photovoltaïque est actuellement de plus de 70 GigaWatts par an. C'est en Asie, notamment en Chine et en Inde, que plus de la moitié des installations solaires sont réalisées [9].

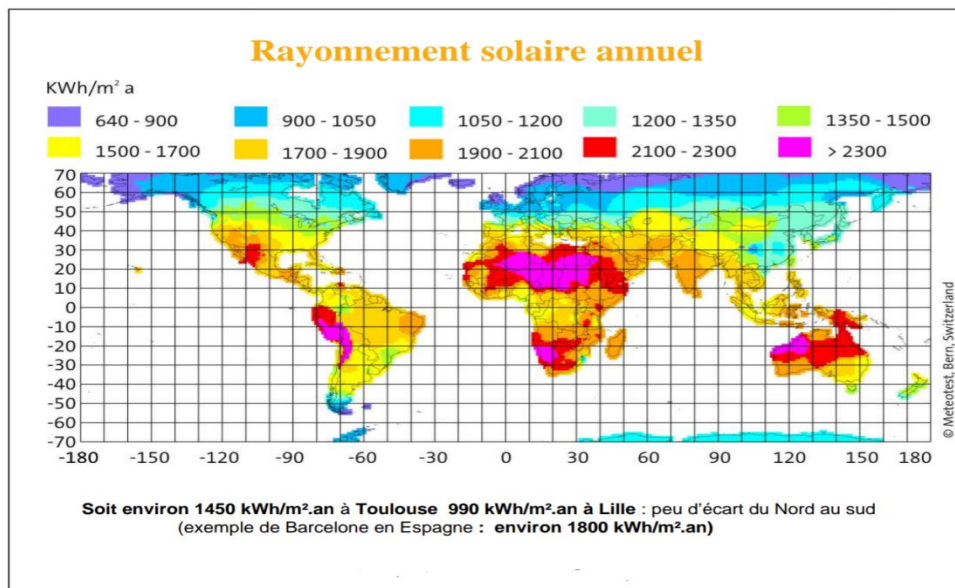


Figure 7 : L'énergie solaire dans le monde

### I.8.1. Le gisement solaire en Algérie

Par sa position privilégiée, l'Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire, de par sa situation géographique il dispose d'un gisement solaire très important sur le bassin méditerranéen et compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrée sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux du Sahara. Par conséquent, la quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KW/h sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup> au nord et 2263 KWh/m<sup>2</sup> au sud du pays.

L'estimation du gisement solaire est réalisée par l'Atlas Solaire de l'Algérie (A.S.A.), modèle élaboré par Capderou, sert de référence aux concepteurs de systèmes énergétiques solaires. Bien qu'il existe un réseau de stations d'évaluation du gisement solaire, le nombre de ces stations est très limité. En Algérie, seules sept stations assurent depuis 1970 la mesure de la composante globale et diffuse du rayonnement solaire. Les différentes composantes du rayonnement solaire sont déterminées sur l'ensemble du territoire algérien et une représentation cartographique à grande échelle y est présentée. Toutefois, d'une part l'Atlas Solaire n'a fait jusqu'à présent l'objet d'aucune validation et d'autre part les modèles utilisés sont relativement complexes et leur utilisation est peu répandue [10].

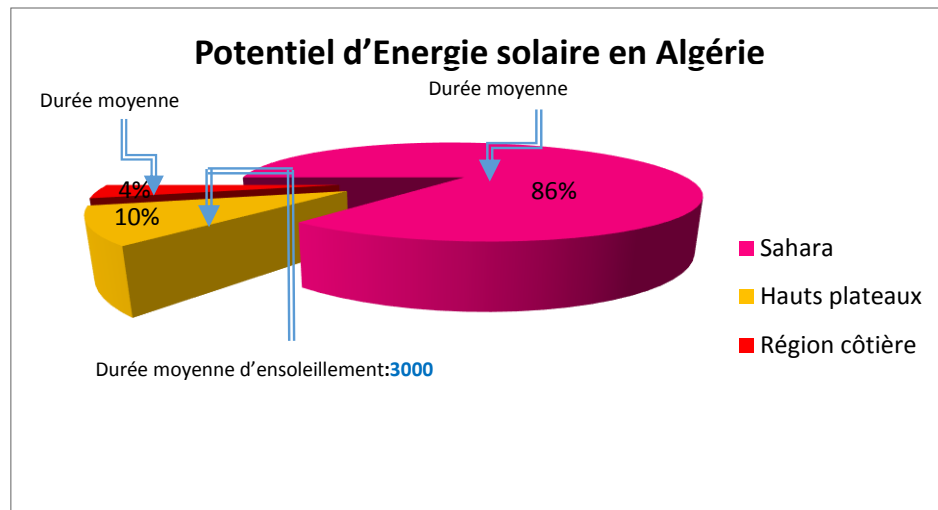


Figure 8 : Potentiel d'Énergie solaire en Algérie

## I.9. Différents types d'utilisation d'énergie solaire

La première et plus répandue des utilisations de l'énergie solaire est sa transformation en énergie thermique. Nous effectuons cette transformation naturellement : il suffit de se mettre au soleil pour ressentir de la chaleur. Notre corps transforme l'énergie solaire en énergie thermique. Avec une architecture appropriée, un bâtiment est aussi capable de transformer cette énergie en énergie thermique. L'utilisation la plus connue actuellement est le chauffage « solaire » :

L'eau pour les robinets ou les radiateurs est chauffée par des panneaux solaires. Une autre utilisation de cette transformation est l'usage de fours solaires. Les petits fours solaires « domestiques » peuvent chauffer facilement jusqu'à 150°C et les fours industriels ou pour la recherche peuvent atteindre jusqu'à 3000°C en quelques secondes.

Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires tout d'abord nous allons les citer et ensuite les expliquer :

- L'énergie passive
- L'énergie thermique
- L'énergie photovoltaïque
- L'énergie thermodynamique

### I.9.1. L'énergie passive

C'est une énergie non polluante et qui est disponible en grande quantité. Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, pour l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.

Son fonctionnement : l'énergie lumineuse du soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres et qui est absorbée par les murs mais aussi par les meubles, par les planches, est rejetée sous forme de chaleur.

### **I.9.2. L'énergie thermique**

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires.

### **I.9.3. L'énergie photovoltaïque**

Cet effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement négligeable mais on lui prédit un grand avenir, son coût baissera fortement dans les années à venir. Cette énergie sera durable et ne devra nécessiter aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison, contrairement aux autres formes d'énergies solaires qui ne produisent que de la chaleur grâce aux capteurs du panneau qui transforment les rayonnements du soleil en cellule photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière, génère une tension électrique, ces cellules se présentent sous la forme de deux fines plaques. Le courant qui en ressort est continu donc cette énergie produit de l'électricité.

### **I.9.4. L'énergie thermodynamique**

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer un fluide haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après

le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante.

### **I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire**

#### **○ Les avantages :**

Les avantages de l'énergie solaire sont multiples :

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante.
- L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre.
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage. L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes.
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Le rendement énergétique est positif : il faut en moyenne entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication.

#### **○ Inconvénients :**

Malgré ses multiples avantages, les énergies solaires présentent quelques limites :

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé.
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes.
- Un cycle de vie en question : la durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an. De plus, les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre, chrome, silicium, cadmium et tellure.

Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20% (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple.

## **I.11. Conclusion**

On a présenté dans ce chapitre un récapitulatif de quelques notions de base relatif au gisement solaire, la connaissance de ces notions fondamentales et particulièrement le rayonnement global au sol va nous servir par la suite dans l'exploitation de l'énergie solaire par un concentrateur solaire.

Le Soleil se trouve à la base de toutes les énergies. Cette énergie est reçue sous forme de rayons solaires. On distingue trois types de rayonnements solaires : directs, diffus et réfléchi (notion d'albédo) par le ciel ou une surface.

L'énergie solaire est disponible sur toute la surface de notre planète qui reçoit plus de 15000 fois l'énergie que l'humanité consomme. L'exploitation de cette énergie peut se faire de trois manières : énergie thermique, énergie thermodynamique et l'énergie photovoltaïque. Les mesures solaires sont principalement des mesures au sol du rayonnement direct, diffus et du rayonnement global.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important encore inexploité. Cette forme d'énergie présente beaucoup d'avantages en conversion thermique pour le chauffage et la production d'électricité principalement. C'est une forme d'énergie disponible, économique, non polluante.

## II. Concentration solaire

### II.1. Introduction

Avec les problèmes de changement climatique et l'épuisement des ressources d'énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon,...), il est primordial de trouver de nouvelles sources d'énergies propres et renouvelables. En effet le soleil constitue une meilleure alternative de ces sources d'énergies fossiles et doit être exploité. En plus il est inépuisable, propre, fiable et présent sur presque toutes les surfaces du globe terrestre.

Le développement des énergies renouvelables montre un engouement particulier pour le solaire thermique a concentration (Concentrating Solar Thermal Power ou encore CSP), la technologie la plus avancée du solaire thermique [11]. L'énergie solaire a été utilisée depuis longtemps pour produire de la chaleur et, bien que l'expérience accumulée soit considérable, ce domaine a connu avec le développement technologique actuel, un renouvellement important sur le plan théorique et expérimental.

Dans le cas de la filière thermodynamique ses applications sont nombreuses, on peut citer, à titre d'exemple, le chauffage de l'eau, le séchage et les centrales thermodynamiques pour la production d'électricité [12].

Cependant, il existe deux grandes technologies de captation du rayonnement solaire. Ces deux technologies font appel à des techniques totalement différentes. Ce sont deux filières d'énergie renouvelable distinctes et mobilisent des compétences et des matériels différents.

- Les capteurs photo thermiques qui captent et transforment directement le rayonnement solaire en chaleur.
- Les capteurs photovoltaïques qui captent et transforment directement le rayonnement solaire en électricité.

Nous nous intéressons dans notre étude qu'à la première technique de conversion (la photo thermie).

### II.2. Capteurs solaires thermiques

La conversion du rayonnement solaire en énergie thermique (chaleur) se fait à l'aide des capteurs solaires. Le rayonnement solaire capté est transmis sous forme de chaleur à un fluide caloporteur, liquide (généralement de l'eau avec ou sans antigel) ou gazeux (généralement de l'air). C'est un processus de conversion d'énergie direct.

L'énergie calorifique ainsi obtenue est utilisée dans les divers domaines (domestiques, industries,...). Dans de nombreux types de capteurs, des revêtements sélectifs sont appliqués sur les surfaces absorbantes pour augmenter l'efficacité de celles-ci.

Il existe deux techniques de captation thermique à savoir : captation sans concentration et captation avec concentration.

### II.2.1. Capteurs sans concentration (capteurs plans)

Les capteurs plans sont des collecteurs solaires thermiques qui transforment l'énergie solaire en chaleur à basse température grâce à un absorbeur.

Sans concentration du rayonnement solaire, le flux solaire tombant sur une surface située au niveau de la mer ne peut guère dépasser  $1 \text{ kW/m}^2$ . Cette valeur ne permet pas d'atteindre des températures supérieures à  $100^\circ\text{C}$ . Par contre, ils ne nécessitent pas un suivi du soleil et utilisent la composante directe et diffuse du rayonnement incident [7]. C'est-à-dire que même par temps couvert le fluide caloporteur parvient à s'échauffer.

#### II.2.1.1. Principe de conversion

Un fluide caloporteur absorbe les calories emmagasinées sur la surface absorbante issues du rayonnement solaire incident. Une vitre en verre transparent pour le rayonnement solaire mais opaque au rayonnement infrarouge est utilisée pour créer un effet de serre.

La face arrière du capteur est isolée par des isolants conventionnels pour éviter des pertes par conduction afin d'optimiser les performances du capteur [13].

Ils sont utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage d'habitations ou de piscines.

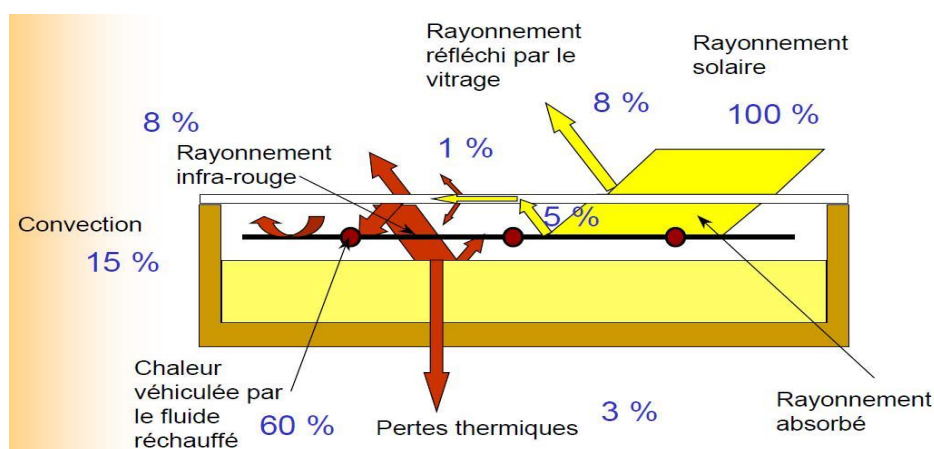


Figure 9 : Schéma de principe des capteurs plans

## II.2.2. Capteur avec concentration

### II.2.2.1. Nécessité de la concentration

Les capteurs plans ne permettent pas, en général, de dépasser 130°C au niveau de la surface absorbante. Cette température peu élevée constitue une limite au rendement thermodynamique des systèmes qui les utilisent. Il faut une surface de 50 m<sup>2</sup> par kW, et ces capteurs ne sont pas adaptés à la production de fortes puissances. Et d'après le cycle théorique de Carnot, pour augmenter le rendement, il faut élever la température de la source chaude et, par conséquent, concentrer le rayonnement solaire [5].

### II.2.2.2. Principe

Les concentrateurs solaires concentrent et focalisent le rayonnement solaire directement sur une surface plus petite (surface réceptrice) qui se trouve en leur point ou ligne focal au moyen des surfaces réfléchissantes. Cette concentration permet d'accroître l'intensité du flux solaire. L'énergie ainsi concentrée est transmise à un fluide pour augmenter sa température qui sera ensuite utilisée dans les différents procédés. Généralement, on parle de centrale solaire thermodynamique lorsqu'une production d'électricité est faite à l'aide d'un cycle thermodynamique.

Ainsi, les concentrateurs solaires permettent de diminuer la surface de réception, par conséquent, réduire les pertes thermiques ce qui implique une température élevée. En pratique l'énergie rayonnée de façon diffuse ne peut pas être concentrée. Une orientation permanente et précise de ces capteurs s'avère nécessaire pour obtenir un bon rendement. Un système de captation de l'énergie solaire avec concentration sera donc le plus souvent un système dynamique contrairement aux capteurs plans d'où nécessité d'un mécanisme d'orientation. Cependant, plusieurs technologies sont utilisées pour la concentration du rayonnement solaire.

### II.2.2.3. Le potentiel solaire à concentration dans le monde

Le solaire à concentration nécessite un ensoleillement direct élevé et un faible taux d'humidité, il est particulièrement adapté au sud-ouest américain, au Moyen-Orient, au pourtour méditerranéen, aux déserts d'Australie ou du Chili. Les Etats-Unis et l'Espagne sont actuellement les deux marchés les plus importants et les plus attractifs [12].

Avec 2.381.741km<sup>2</sup> de surface, l'Algérie est le pays le plus vaste du méditerranéen. Selon une étude de l'agence aérospatiale allemande, l'Algérie offre de plus grandes possibilités

intéressantes, à long terme, pour investir dans les centrales thermiques solaires. En effet l'Algérie est l'un des pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel solaire énorme. Selon les données d'ensoleillement, l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillés dans le monde avec un ensoleillement direct moyen annuel de plus de 2000 kWh/m<sup>2</sup>.an.

Le potentiel des ressources solaires du pays est optimal pour l'exécution des projets des concentrateurs solaires le Sahara notamment [15].

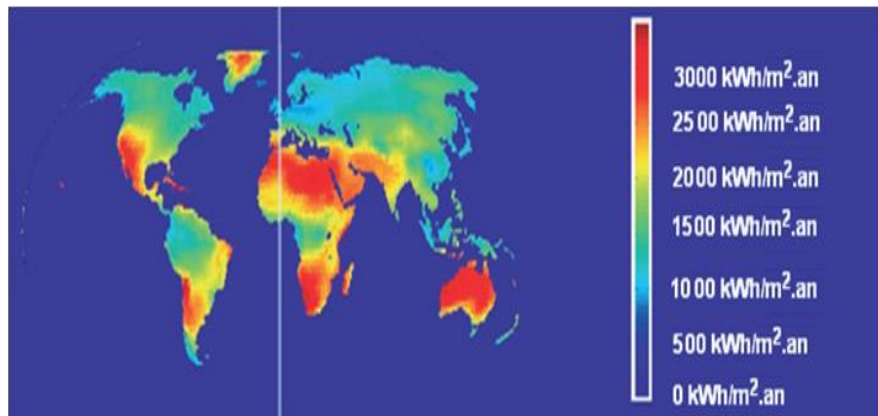


Figure 10 : Distribution du gisement solaire à concentration

Dans beaucoup de régions du monde, un kilomètre carré de terrain suffirait à générer jusqu'à 120 GWh d'électricité par an, grâce à la technologie des centrales solaire. Cette énergie est équivalente à la production annuelle d'une centrale classique de 50 MW.

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. [14]

#### II.2.2.4. Différentes technologies de concentration

Les conceptions solaires à haute température nécessitent des systèmes de concentration, tels que des systèmes paraboliques réflecteurs. Les centrales thermiques solaires dotées de technologies de concentration sont importantes candidats pour fournir l'énergie solaire en quantité nécessaire au cours des prochaines décennies.

Il s'agit de concentrer le rayonnement solaire et une grande variété de configurations est possible. Quatre technologies d'énergie solaire à concentration sont développées et peuvent être classées en deux catégories :

- Les systèmes de concentration linéaire : cylindro-parabolique, miroir de Fresnel,
- Les systèmes de concentration ponctuels : récepteur central (tour), parabole-Stirling.

Ces technologies, qui ne valorisent que la composante directe du rayonnement solaire, et sont équipées de dispositifs de suivi de la trajectoire du soleil et de miroirs pour concentrer ses rayons.

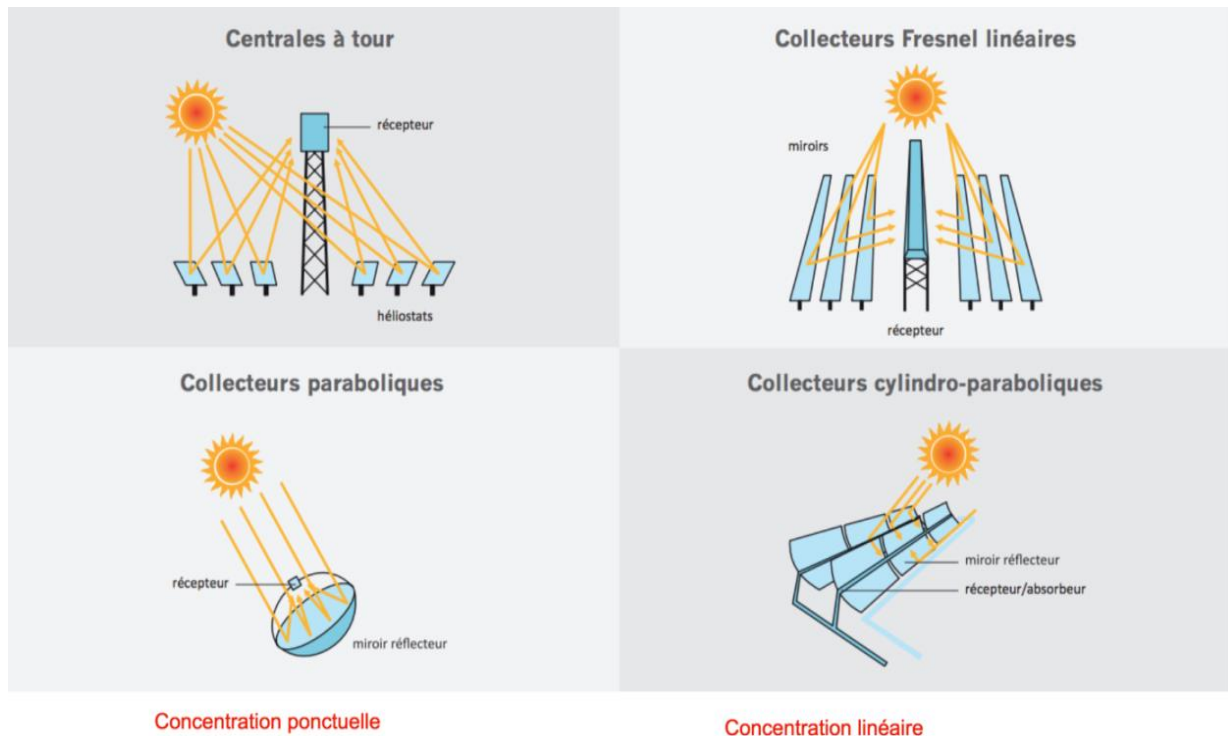


Figure 11 : Centrales solaires à concentration

#### II.2.2.4.1. Filière cylindro-parabolique

C'est la filière de loin la plus mature. Ces systèmes utilisent une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole. La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur [15]. Le concentrateur suit la course du soleil en tournant sur un axe. Le fluide caloporteur, généralement une huile de synthèse, chauffé lors de son passage dans les tubes, circule à travers une série d'échangeurs de chaleur pour produire de la vapeur surchauffée et les températures peuvent atteindre 400 °C qui fait fonctionner une turbine/générateur électrique.

Le rendement solaire-électrique maximal est dans le meilleur des cas d'environ 25% tandis que le rendement annuel net est de 15%. L'empreinte au sol est de l'ordre de 3,25 ha/MW pour les centrales sans stockage.

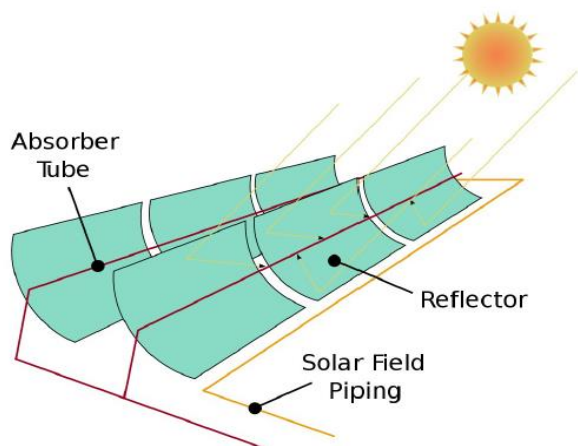


Figure 12 : Schéma d'un collecteur cylindro-parabolique

#### II.2.2.4.2. Filière Fresnel

Cette filière est simple et peu coûteuse. Les collecteurs sont des miroirs en bandes parallèles disposés à plat et près du sol concentrant les rayons sur des tubes récepteurs fixes. L'eau, portée à 100 bars et à 500°C, est utilisée comme fluide caloporteur et comme fluide de travail qui fait fonctionner une turbine/générateur électrique. Cette technologie est encore au stade de la démonstration. Son principe est similaire à celui de la filière cylindro-parabolique mais elle utilise des miroirs plans ou légèrement incurvés moins chers que les réflecteurs paraboliques. Cette filière possède les plus faibles performances optiques et le plus faible rendement solaire-électrique annuel net (10%) mais son empreinte au sol est de 1,5 ha/MW, soit moins de 60% par rapport aux centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.

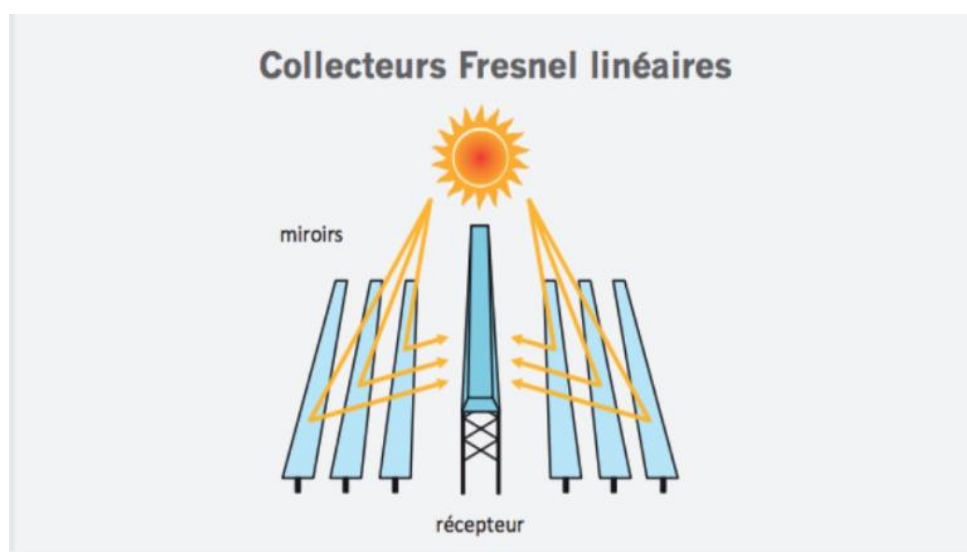


Figure 13 : Schéma de principe de miroirs de Fresnel

### II.2.2.4.3. Tours solaires

La technologie la plus souple d'utilisation. Des baisses de coûts importantes sont attendues. Deux technologies : la production directe de vapeur, à coûts moindres, et l'utilisation de sels fondus pouvant être utilisés comme fluide caloporteur et milieu de stockage thermique. Le stockage est trois fois plus efficace qu'avec la filière cylindro-parabolique.

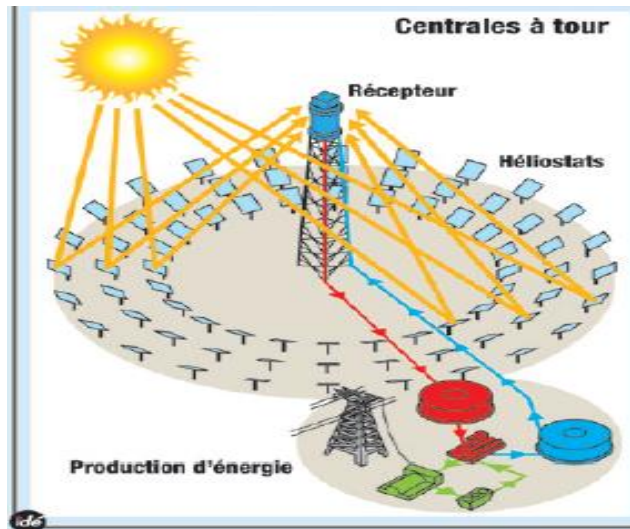


Figure 14 : Schéma d'une centrale à tour

Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement et le réfléchit en direction d'un récepteur situé au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 800 °C à 1000°C [14]. Le rendement maximal des centrales à tour à cycle de Rankine est de l'ordre de 22% pour un rendement annuel net d'environ 16%. L'avantage de la tour solaire par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques est que les pertes à l'ambiance sont inférieures car la surface exposée est limitée. L'empreinte au sol sans stockage est de 4 ha/MW. Les héliostats acceptent un terrain pentu.

### II.2.2.4.4. Filière parabolique

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température de 750°C.

De toutes les technologies solaires, les capteurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité, qui est d'ordre de (29.4%).

Un de leurs principaux avantages est qu'ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Ils possèdent donc également un important potentiel

de développement, particulièrement dans des régions peu peuplées de certains pays du sud. En outre cette technologie reste de même la plus couteuse de toutes.

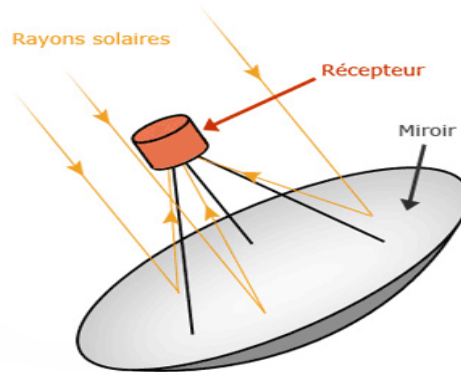


Figure 15 : Concentrateur parabolique

#### II.2.2.5. Quelques applications des capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaire sont utilisés pour :

- La production d'eau chaude sanitaire
- Le chauffage d'habitation
- La production de la vapeur
- La production d'électricité
- La distillation de l'eau
- La cuisson solaire.

#### II.2.2.6. Les avantages de la concentration

L'utilisation des concentrateurs permet :

- ✓ D'accroître le flux incident sur le capteur
- ✓ De diminuer la surface réceptrice
- ✓ De diminuer les pertes thermiques
- ✓ D'augmenter la température du récepteur (l'absorbeur).

### II.3. Conclusion

D'après ce chapitre, le soleil peut être exploité par deux technologies de capteurs : capteurs photovoltaïques et les capteurs solaires thermiques. Le choix des capteurs solaires thermiques

dépend du domaine d'utilisation et de la température de travail souhaitée. Les capteurs solaires à concentration sont les plus adaptés à la production d'électricité et aux besoins industriels.

La technologie de concentration offre la possibilité de stockage d'énergie calorifique en sel fondu notamment. Depuis des années, plusieurs technologies de concentration ont vu le jour dont d'autres déjà commercialisées, on peut citer [7] :

- 2007 : Solar One à Boulder ( Nevada, USA) de puissance 64 MW
- 2008-2009 : AndasolSolar à Grenade (Espagne), puissance 100 MW (2 unités)
- 2009 : NovatecBiosol AG à Calasparra (Espagne), puissance 11.4 MW
- 2010 : MaricopaSolar à Peoria ( Arizona, USA), puissance 1.5 MW

Parmi toutes les technologies de captation solaire (photovoltaïque et thermique), c'est les capteurs solaires paraboliques qui ont enregistré le meilleur rendement solaire-électrique 29.4%.

Le chapitre qui suivra fera l'objet d'une étude théorique détaillée du capteur solaire parabolique.

### III. Étude du concentrateur solaire parabolique

#### III.1. Introduction

L'épuisement des ressources d'énergies fossiles et la prise en compte de l'environnement ont conduit au développement de l'exploitation de l'énergie solaire. Qui présente une alternative face à la crise mondiale d'énergie et surtout les technologies à concentration qui laisse les voies ouvertes pour l'utilisation des systèmes fonctionnant à haute température [16]. Ainsi, depuis l'antiquité, nous utilisons la chaleur du soleil pour se chauffer, chauffer de l'eau, et pour les différentes tâches. Depuis ce temps, l'homme ne cesse de chercher des techniques plus efficaces pour exploiter le soleil. C'est dans ce but que la technologie de concentration a été découverte et développée. Parmi ces technologies, on peut citer les concentrateurs solaires paraboliques, cylindro-paraboliques, etc...

Le concentrateur solaire parabolique est constitué d'une parabole de réception satellite couverte de miroir réfléchissant qui réfléchit la lumière du soleil en un point appelé foyer ou point focal où se situe le récepteur. La seule ressource dans ce type d'installation est le rayonnement direct. Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer les rayons solaires parallèle à son axe sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température de 750°C.

Les concentrateurs solaires paraboliques sont les plus utilisés dans les installations de production des petites puissances avec un cycle thermodynamique (moteur Sterling) dans lequel ils sont utilisés comme source chaude. Ils sont aussi appelé Solar Dish-Stirling en anglais.

Les performances de ces systèmes dépendent de plusieurs paramètres. Par la suite on fera une étude théorique de ces paramètres et donner les expressions des différentes efficacités, afin de voir comment optimiser les performances.

#### III.2. Les caractéristiques géométriques

##### III.2.1. La parabole [17]

Une parabole est le lieu d'un point qui se déplace de sorte que ses distances par rapport à une ligne fixe et à un point fixe soient égales. Ceci est illustré à la figure III.1, où la ligne fixe est appelée directrice et le point fixe F, le focus. Notons que la longueur FR est égale à la longueur RD. La ligne perpendiculaire à la directrice et passant par le foyer F est appelée l'axe

de la parabole. La parabole coupe son axe en un point V appelé sommet, situé exactement à mi-chemin entre le foyer et la directrice.

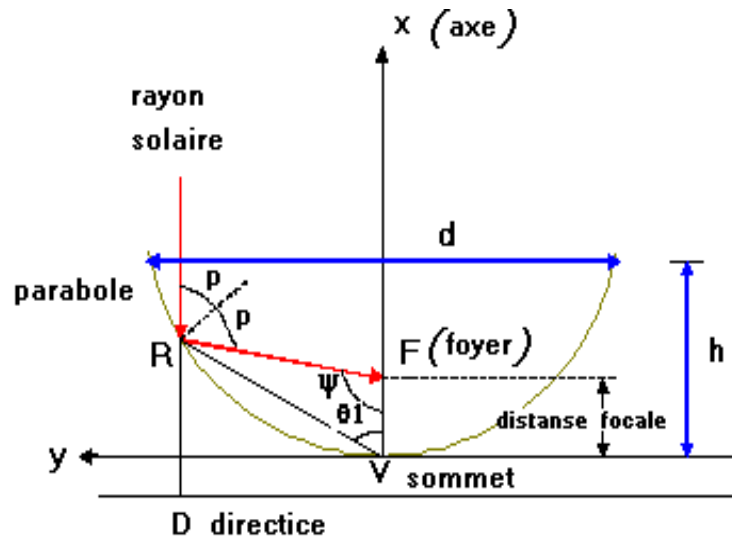


Figure 16 : géométrie de la parabole

Si l'origine est prise au sommet V et à l'axe des x le long de l'axe de la parabole, l'équation de la parabole en coordonnées cartésiennes est [18], [17] :

$$y^2 = 4fx \tag{III - 1}$$

f : la distance focale, est la distance VF du sommet au foyer.

Souvent, dans les études solaires, il est plus utile de définir la courbe parabolique à l'origine à F et en termes de l'angle en coordonnées polaires avec l'origine à F. L'angle  $\psi$  est mesuré à partir de la ligne VF et le rayon parabolique  $p$ , est la distance entre le foyer F de la courbe. Déplacement de l'origine sur le focus F, nous avons [17] :

$$P = \frac{2f}{1 + \cos \psi} \tag{III - 2}$$

### III.2.2. Angle d'ouverture d'une parabole

L'angle d'ouverture d'une parabole est définie par : [5]

$$\tan(\psi) = \frac{f/d}{2(f/d)^2 - \frac{1}{8}} \tag{III - 3}$$

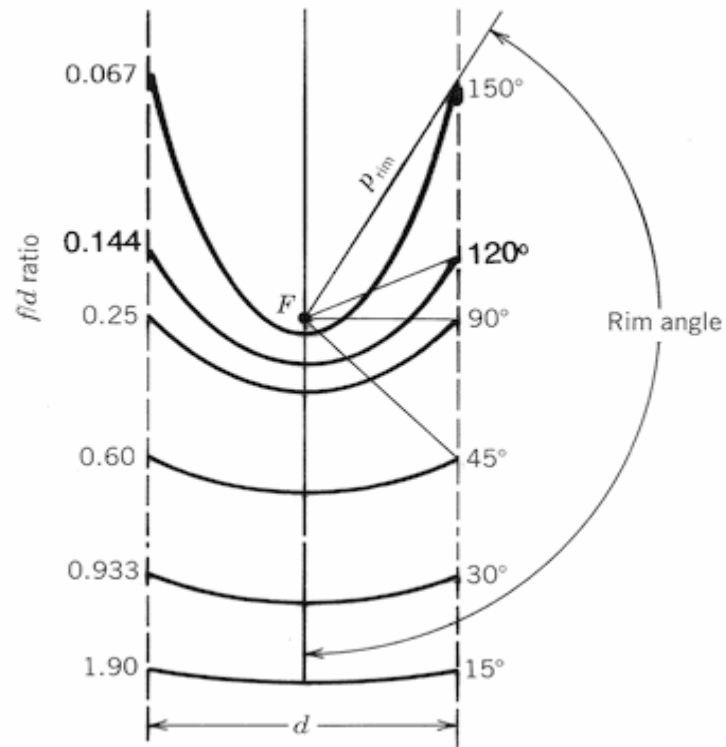


Figure 17 : Segments d'une parabole ayant un foyer commun  $F$  et le même diamètre  $d$  d'ouverture

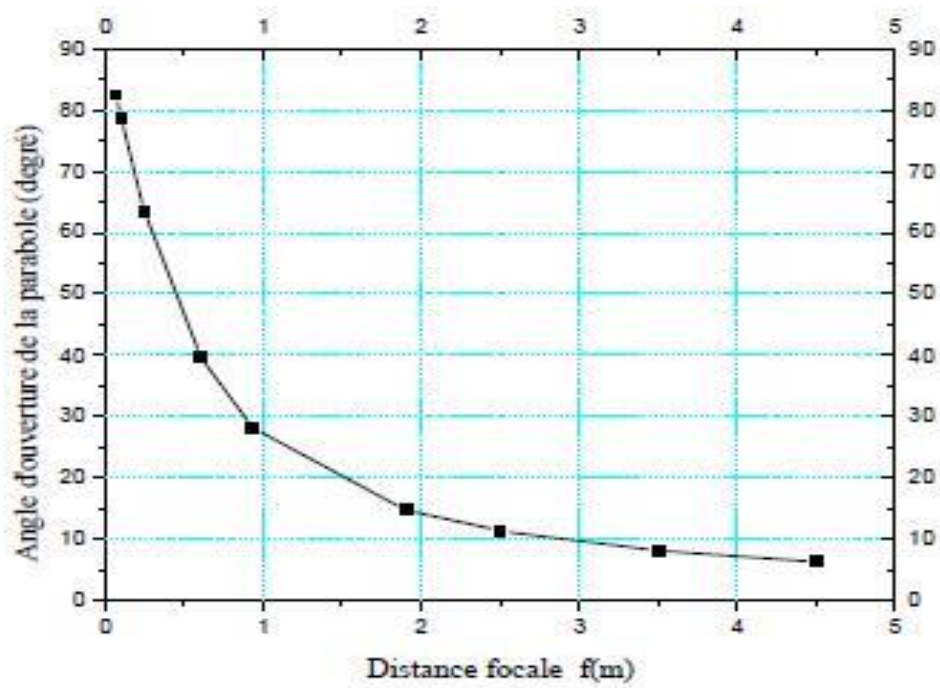


Figure 18 : Distance focale en fonction de l'angle d'ouverture d'une parabole de diamètre [19]

On peut voir qu'une parabole avec un petit angle d'ouverture est relativement plate et que la distance focale est longue comparée à son diamètre d'ouverture. D'après la figure (III.3), une augmentation de l'angle d'ouverture entraîne une diminution de la distance focale.

### III.2.3. La taille d'une parabole

La distance maximale entre le sommet et une ligne tracée à travers l'ouverture de la parabole définit la hauteur ou la taille de la parabole. Elle est donnée par [18] :

$$h = \frac{d^2}{16f} \quad (\text{m}) \quad (\text{III} - 4)$$

La distance focale d'une parabole peut être trouvée à partir de l'équation (III-4)

$$f = \frac{d^2}{16h} \quad (\text{m}) \quad (\text{III} - 5)$$

De la même manière, l'angle de la d'ouverture peut être déterminé en fonction des dimensions de la parabole.

$$\tan \psi = \frac{1}{(d/8h) - (2h/d)} \quad (\text{III} - 6)$$

### III.2.4. Surface d'une parabole

La surface en coupe transversale de l'espace compris entre une parabole et une ligne perpendiculaire à son ouverture et perpendiculaire à son axe est donnée par [17] :

$$A_x = \frac{2}{3} dh \quad (\text{m}^2) \quad (\text{III} - 7)$$

Cette surface ne doit être confondue avec la surface réfléchissante d'un creux ou d'une parabole ou de leurs zones d'ouverture.

### III.2.5. Longueur d'une parabole

La longueur de l'arc d'une parabole peut être trouvée à partir de l'équation (III-1) en intégrant un segment différentiel de cette courbe avec conditions aux limites  $x=h$  et  $y= d/2$ , comme illustré à la figure (III.1). On aura comme résultat [17] :

$$S = \left[ \frac{d}{2} \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right] + 2f \ln \left[ \frac{4h}{d} + \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right] \quad (\text{m}) \quad (\text{III} - 8)$$

### III.2.6. Les composantes du concentrateur solaire parabolique

Un concentrateur solaire parabolique est principalement composé de deux éléments comme illustré sur la figure III.4 ci-dessous.

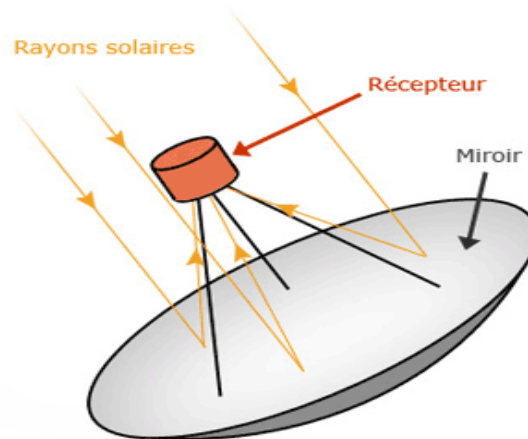


Figure 19 : concentrateur parabolique

#### III.2.6.1. Le réflecteur ou collecteur (paraboloïde)

La surface formée en faisant tourner une courbe parabolique autour de son axe s'appelle un paraboloïde de révolution. Les concentrateurs solaires ayant une surface réfléchissante de cette forme sont souvent appelés concentrateurs paraboliques. L'équation du paraboloïde de révolution, représentée à la figure III.5, en coordonnées rectangulaires avec l'axe z comme axe de symétrie, est la suivante [17] :

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (\text{III} - 9)$$

Où la distance f est la distance focale VF. En coordonnées cylindriques, où a est la distance de l'axe z, cela devient :

$$z = \frac{a^2}{4f} \quad (\text{III} - 10)$$

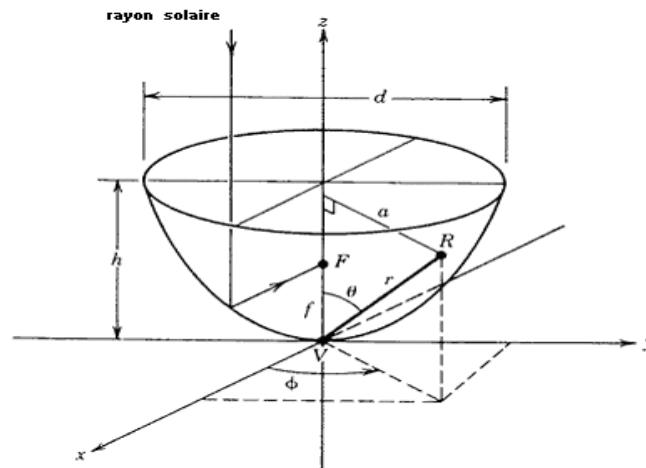


Figure 20 : paraboloïde de révolution

La surface du paraboloïde peut être déterminée en intégrant l'équation (III-9) au-dessus des limites appropriées. Nous pouvons définir une bande différentielle circulaire sur le paraboloïde, comme indiqué à la figure III.6 :

$$dA_s = 2\pi a \sqrt{dz^2 + da^2} \quad \text{(III - 11)}$$

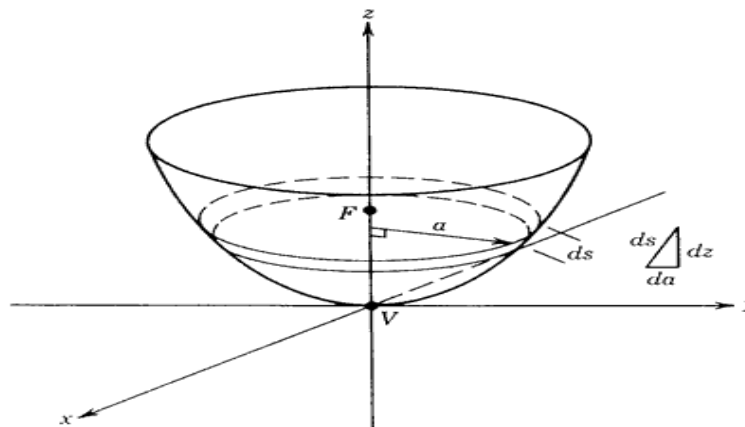


Figure 21 : élément différentiel de surface parabolique

Notez que l'élément différentiel d'arc ds est exprimé en fonction de la hauteur dz et de la distance radiale da. Pour trouver la dérivée de z par rapport à une équation utilisant (III-9), nous exprimons la bande surfacique différentielle comme suit :

$$dA_s = 2\pi a \sqrt{\left(\frac{a}{2f}\right)^2 + 1} da \quad \text{(III - 12)}$$

L'intégration de l'équation (III-11) permet de déterminer la surface totale A d'un paraboloïde ayant une distance focale f et un diamètre d'ouverture d. On aura [20] :

$$A_s = \int_0^{\frac{d}{2}} dA_s = \frac{8\pi f^2}{3} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{d}{4f} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} - 1 \right\} \quad (m^2) \quad (\text{III} - 13)$$

La surface d'ouverture d'un paraboloïde de diamètre d'ouverture  $d$  est donnée par [20], [17] :

$$A_a = \frac{\pi d^2}{4} \quad (m^2) \quad (\text{III} - 14)$$

Cette surface peut être exprimée en fonction de la distance focale  $f$  et de l'angle d'ouverture  $\psi$  en utilisant l'équation (III-2) :

$$A_a = \frac{\pi}{4} (2p \sin \psi)^2$$

$$A_a = 4\pi f^2 \frac{\sin^2 \psi}{(1 + \cos \psi)^2} \quad (m^2) \quad (\text{III} - 15)$$

### III.2.6.2. Le récepteur (absorbeur)

Le récepteur absorbe l'énergie réfléchiée par le réflecteur et la transfère au fluide caloporteur (liquide ou gaz), tout en minimisant les pertes. La température de la source chaude peut être adaptée en plaçant le récepteur plus ou moins loin du foyer du collecteur. Le récepteur doit absorber autant de flux concentré possible.

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles en fonction de leur surface de transfert [21].

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.

Il est préférable que le récepteur soit métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre 380 W/m °C, aluminium 200 W/m °C, acier 60 W/m °C). Plus le coefficient de conduction est faible et plus l'absorbeur doit être épais, ce qui augmente le prix et l'inertie de l'absorbeur.

### III.3. La concentration

Certains paramètres optiques liés au collecteur doivent être pris en compte lors de l'étude de la réalisation des concentrateurs solaire parabolique. La concentration définit les performances du capteur.

#### III.3.1. Concentration géométrique

Ce facteur est défini comme étant le rapport entre la surface du collecteur et la surface du récepteur. La concentration géométrique est donnée par [22].

$$C_g = \frac{A_a}{A_r} \quad (\text{III} - 16)$$

Avec

$A_a$  : surface d'ouverture du concentrateur ( $m^2$ )

$A_r$  : surface du récepteur ( $m^2$ )

Les concentrateurs ponctuels ont un facteur de concentration plus élevé que les linéaires.

#### III.3.2. Concentration optique

Est la relation entre le rayonnement incident sur la surface réfléchissante ( $I_a$ ) et le rayonnement qui atteint le récepteur ( $I_r$ ).

$$C_0 = \frac{I_r}{I_a} \quad (\text{III} - 17)$$

#### III.3.3. Calcul de la concentration maximale

D'après l'expression de la concentration géométrique (équation III-16), on constate que pour un collecteur parabolique donné, plus la surface (le diamètre) du récepteur diminue plus la concentration est importante. L'optique peut délivrer des concentrations théoriques considérable qui, dans la pratique, peuvent être approchées mais ne sont jamais atteintes compte tenu de la qualité optique des surfaces qui ne sont jamais parfaitement réfléchissante.

On peut définir la concentration d'un concentrateur parabolique par [7]

$$C = \left( \frac{2}{\varepsilon} \sin \psi \right)^2 \quad (\text{III} - 18)$$

$\varepsilon$ : L'angle sous lequel on voit le soleil à partir de la terre. Sa valeur est égale à  $9.3 \cdot 10^{-3}$  radians.

Pour  $\psi = \frac{\pi}{2}$ , on trouve la concentration maximale:

$$C_{max} = 46250$$

### III.4. Etudes énergétiques

#### III.4.1. L'énergie reçue à l'ouverture du paraboloïde

Considérons le miroir parabolique illustré à la figure III.8. Comme indiqué, un rayon de lumière dont l'intensité de  $I_b$  est parallèle à l'axe de la parabole sera réfléchi sur le foyer F de la parabole. Puisque nous voulons discuter de la quantité totale de lumière réfléchie par toute la surface du miroir, il convient d'abord d'envisager une zone différentielle qui peut, à son tour, être intégrée sur toute la surface du miroir. La surface différentielle est définie par [17] :

$$A_s = l d_s (\text{m}^2) \tag{III - 19}$$

$ds$  = longueur d'arc différentiel de la parabole

$l$  = soit la longueur d'une bande différentielle à la surface d'un creux parabolique dans la direction de la ligne focale, soit la circonférence de l'anneau différentiel à la surface d'une parabole.

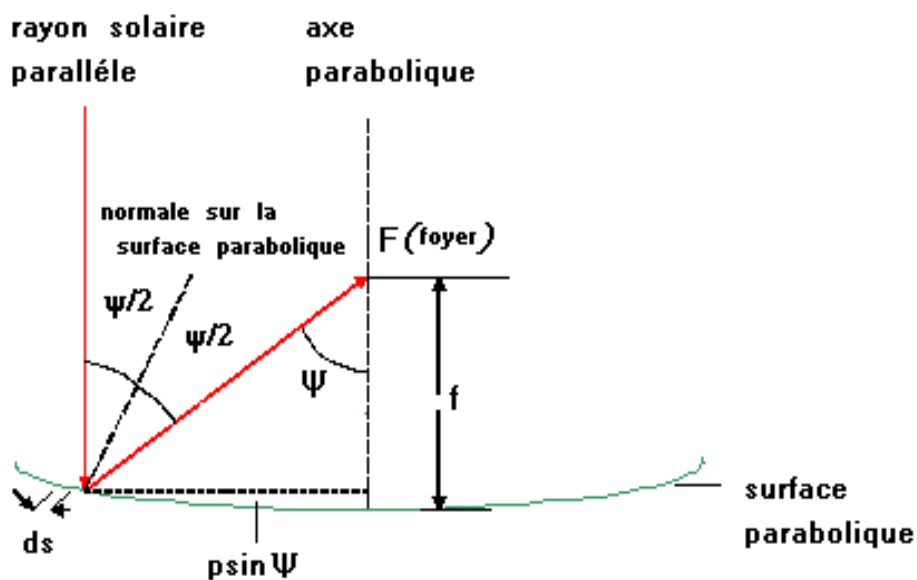


Figure 22 : Réflexion d'un rayon lumineux parallèle

D'après la figure III.8, on a :

$$d_s = \frac{p \sin(d\psi)}{\cos(\psi/2)} \text{ (m)} \quad (\text{III} - 20)$$

Comme l'angle  $d\psi$  est petit,  $\sin d\psi = d\psi$ , l'équation (III-20) se réduit à :

$$d_s = \frac{p(d\psi)}{\cos(\psi/2)} \quad \text{(m)} \quad (\text{III} - 21)$$

$$dA_s = \frac{l p d\psi}{\cos(\psi/2)} \quad \text{(m}^2\text{)} \quad (\text{III} - 22)$$

Le flux radiant total réfléchi par cette zone différentielle (en supposant qu'il n'y a aucune perte de réflectance) sur le point focal est ( $dI_a$ )[17] :

$$dI_a = dA_s I_b \cos(\psi/2) \\ dI_a = l p I_b d\psi \quad \text{(W)} \quad (\text{III} - 23)$$

En remplaçant  $p$  par son expression, l'équation (III-23) nous donne :

$$dI_a = \frac{2 f l I_b d\psi}{(1 + \cos \psi)} \quad (\text{III} - 24)$$

où  $l = 2\pi p \sin \psi$

$$\text{Après avoir remplacé } p \text{ par sa valeur, } l = \frac{4\pi f \sin \psi}{(1 + \cos \psi)} \text{ (m)} \quad (\text{III} - 25)$$

D'où l'énergie reçue à l'ouverture d'un paraboloïde est :

$$I_a = \int \frac{8\pi f^2 I_b \sin(\psi) d\psi}{(1 + \cos \psi)^2} \text{ (W)} \quad (\text{III} - 26)$$

$I_b$  : Le flux incident parallèle à l'axe de la parabole en ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

#### III.4.2. La puissance absorbée par l'ouverture du récepteur (absorbteur)

La puissance thermique émise par le soleil et reçue par le concentrateur vaut [26] :

$$I_a = I_b A_a \quad \text{(W)} \quad (\text{III} - 27)$$

Cette ressource solaire est réduite d'un certain nombre de pertes lorsqu'elle passe de l'ouverture du capteur à l'absorbeur. La puissance thermique envoyée par le concentrateur sur la cavité réceptrice et absorbée par l'absorbeur vaut :

$$Q_a = I_a \eta_{op} \quad (\text{W}) \quad (\text{III} - 28)$$

+Où  $\eta_{op}$  : le rendement optique du concentrateur, il vaut [22], [17] :

$$\eta_{op} = \alpha \tau \rho$$

Donc :

$$Q_a = \alpha \tau \rho I_b A_a \quad (\text{W}) \quad (\text{III} - 29)$$

Avec :

$\alpha$  : Absorption de la surface de l'absorbeur ou récepteur

$\tau$  : Transmittance de toute la vitre du récepteur

$\rho$  : Réflectance de toutes les surfaces réfléchissantes.

### III.4.3. Température maximale du récepteur

En raison de la concentration de rayons solaires dans une petite zone, le récepteur, la zone absorbante de ce composant peut atteindre extrêmement hautes températures. Connaître la maximum théorique température que le récepteur peut atteindre et dans quelle proportion le diamètre de la zone absorbante influence cette température. Une augmentation des dimensions du récepteur par rapport à la taille de la parabole (le facteur  $C_g$  diminue avec l'augmentation du diamètre du récepteur, pour le diamètre du capteur constant) conduit à une concentration plus basse des températures, c'est-à-dire une plus grande dissipation de la concentration de chaleur par le matériel.

$$T_{r,max} = \left( \frac{C_g Q_a}{\epsilon \sigma} \right)^{1/4} \quad (^\circ\text{C}) \quad (\text{III} - 30)$$

Où  $C_g$  est la concentration géométrique,

$Q_a$ :La puissance absorbée par le récepteur ",

$\epsilon$  : Facteur d'émission infrarouge de la surface du récepteur

$\sigma$  : La constante de Stefan – Boltzmann ( $5,670367 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ).

En raison de sa température, le récepteur est le composant responsable des plus grandes pertes de chaleur dans l'environnement.

Il existe de nombreux types de pertes de chaleur par le récepteur présentés dans le bilan énergétique illustré à la Figure III.9.

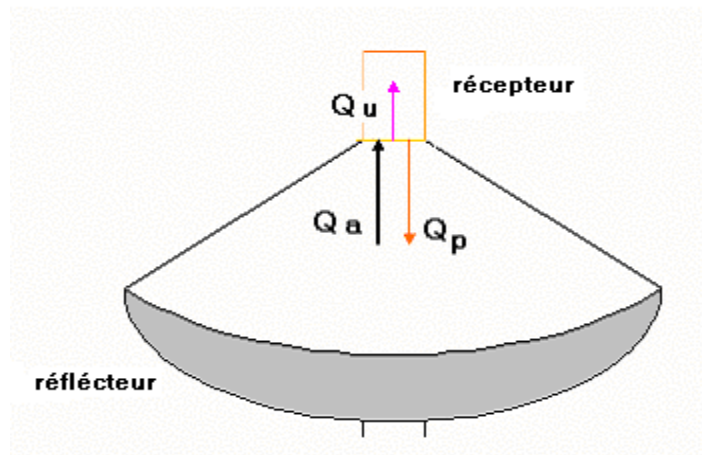


Figure 23 : Bilan énergétique au niveau du récepteur

#### III.4.4. Puissance utile

La puissance utile définie la puissance réellement transmise au fluide caloporteur.

D'une part, elle est donnée par :

$$Q_u = m_m C_p (T_s - T_e) + m_v L_v \quad (\text{W}) \quad (\text{III} - 31)$$

Ici :

$m_m$  : Le débit massique du fluide circulant dans l'absorbeur en ( $\text{Kg/s}$ )

$m_v$  : Le débit massique de l'eau évaporé ( $\text{Kg/s}$ )

$L_v$  : La chaleur latente de l'évaporation ( $\text{J/Kg}$ )

$C_p$  : Chaleur spécifique du fluide en ( $\text{J/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$T_s$  : La température du fluide de la sortie en ( $^\circ\text{C}$ )

$T_e$  : La température du fluide à l'entrée en ( $^\circ\text{C}$ )

D'autre part, elle vaut [7], [5] :

$$Q_u = Q_a - Q_{perdue}$$

$$Q_u = \alpha \tau \rho I_b A_a - Q_{perdue} \quad (\text{III} - 32)$$

### III.4.5. Puissance thermique perdue

Les pertes thermiques du récepteur correspondent aux pertes par conduction, convection et rayonnement. Cependant les pertes par convection et rayonnement sont beaucoup plus élevées que les pertes de conduction dans la mesure où le récepteur est bien isolé.

$$Q_{perdue} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{ray}$$

#### III.4.5.1. Pertes par convection

Les pertes de chaleur par convection du récepteur du capteur solaire sont proportionnelles à la surface de l'absorbeur ou du récepteur et à la différence de température entre la surface de l'absorbeur et l'air environnant. Les pertes par convection peuvent être obtenues par équation (III-33) [24] :

$$Q_{conv} = h_{cv} A_{rec} (T_{recp} - T_a) \quad (\text{W}) \quad (\text{III} - 33)$$

Dans laquelle :

$A_{rec}$  : La surface du récepteur en ( $m^2$ )

$T_{recp}$  : La température du récepteur en ( $^{\circ}C$ )

$T_a$  : La température de l'air ambiant ( $^{\circ}C$ )

$h_{cv}$  : est le coefficient de transfert de chaleur par convection entre le récepteur et l'environnement en ( $W/m^2 C$ ) est donné par [22] :

$$h_{cv} = \frac{Nu_D K_{air}}{D} \quad (\text{III} - 34)$$

$Nu_D$  : Le nombre de Nuselt

$K_{air}$  : La conductivité de l'air ( $W/m^{\circ}C$ )

$D$  : Le diamètre de l'absorbeur (récepteur) (m)

En supposant le récepteur comme une plaque plate, deux régimes d'écoulement sont possibles :

✓ 1<sup>er</sup> cas : régime laminaire ( $Re_D < 5.10^5$ )

$$Nu_D = 0.0664 \cdot R_{eD}^{0.5} \cdot P_r^{1/3} \quad (\text{III} - 35)$$

✓ 2<sup>ème</sup> cas : régime turbulent ( $5 \cdot 10^5 < R_{eD} < 10^7$ )

$$Nu_D = 0.037 \cdot R_{eD}^{0.8} \cdot P_r^{1/3} \quad (\text{III} - 36)$$

$P_r$  : Le nombre de Prandtl

$$R_{eD} : \text{Le nombre de Reynolds, défini par : } R_{eD} = \frac{V D}{\gamma} \quad (\text{III} - 37)$$

$V$  : vitesse du vent (m/s)

$\gamma$  : viscosité de cinématique l'air (m<sup>2</sup>/s)

### III.4.5.2. Pertes par rayonnement

La perte de chaleur de rayonnement est importante pour les capteurs fonctionnant à des températures légèrement supérieures à la température ambiante, et devient dominante pour les capteurs fonctionnant à des températures plus élevées. Le taux de perte de chaleur par rayonnement est proportionnel à l'émittance de la surface et à la différence de température jusqu'à la quatrième puissance. Elles sont exprimées par [24], [25] :

$$Q_{ray} = \varepsilon \sigma A_{rec} (T_{rec}^4 - T_a^4) \quad (\text{W}) \quad (\text{III} - 38)$$

Où :

$\varepsilon$  : Émittance de la surface de l'absorbeur

$\sigma$  : La constante de Stefan-Boltzmann ( $5,670 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$ ).

Les températures en Kelvin (K)

### III.4.5.3. Pertes par conduction

Le dernier mode de perte de chaleur à prendre en compte dans la conception du capteur est la conduction thermique. Elles sont déterminées par [24] :

$$Q_{cond} = k_r \frac{1}{\Delta x} A_{rec} (T_r - T_a) \quad (\text{W}) \quad (\text{III} - 39)$$

$k_r$  : Conductivité thermique du récepteur (W/m °C)

$\Delta x$  : L'épaisseur du matériau (m)

La puissance correspondante aux pertes est alors donnée par :

$$Q_{perdue} = k_r \Delta x A_{rec}(T_r - T_a) + h_{cv} A_{rec}(T_{recp} - T_a) + \varepsilon \sigma A_{rec}(T_{recp}^4 - T_a^4)$$

$$Q_{perdue} = (h_{conv} + h_{cond} + h_{ray}) A_r (T_r - T_a)$$

$$Q_{perdue} = U_L A_r (T_r - T_a) \quad (\text{W}) \quad (\text{III} - 40)$$

Avec :  $h_{cond} = \frac{k_r}{\Delta x}$

$$U_L = h_{conv} + h_{cond} + h_{ray}$$

$h_{ray}$ : est donné par [11] :

$$h_{ray} = \frac{\varepsilon \sigma (T_r^4 - T_a^4)}{T_r - T_a} \quad (\text{III} - 41)$$

$$Q_u = m_m C_p (T_r - T_a) = \alpha \tau \rho I_b A_a - U_L A_r (T_r - T_a) \quad (\text{W}) \quad (\text{III} - 42)$$

### III.5. Efficacités énergétiques

Deux efficacités sont essentielles pour définir les performances thermiques du système.

#### III.5.1. Efficacité du concentrateur

Cette efficacité se définit comme le rapport entre l'énergie utile délivrée au fluide et l'énergie totale capturée par la surface réfléchissante du concentrateur, exprimée par [22] :

$$\eta_{concentrateur} = \frac{Q_u}{A_a I_b} \quad (\text{III} - 43)$$

$$\eta_{concentrateur} = \frac{\alpha \tau \rho I_b A_a - U_L A_r (T_r - T_a)}{A_a I_b} \quad (\text{III} - 44)$$

$$\eta_{concentrateur} = \eta_{op} - \frac{U_L A_r (T_r - T_a)}{I_b A_a} \quad (\text{III} - 45)$$

En fonction de la concentration géométrique :

$$\eta_{concentrateur} = \eta_{op} - \frac{U_L (T_r - T_a)}{I_b C_g} \quad (\text{III} - 46)$$

#### III.5.2. Efficacité du récepteur

L'efficacité thermique du récepteur (équation III-47) est défini comme le rapport entre l'énergie utile délivrée du récepteur au fluide et l'énergie tombant sur le récepteur.

$$\eta_{recp} = \frac{Q_u}{\alpha \tau \rho I_b A_a} \quad (\text{III} - 47)$$

$$\eta_{recp} = \frac{\alpha \tau \rho I_b A_a - U_L A_r (T_r - T_a)}{\alpha \tau \rho I_b A_a} \quad (\text{III} - 48)$$

$$\eta_{recp} = 1 - \frac{U_L (T_r - T_a)}{\eta_{opt} C_g I_b} \quad (\text{III} - 49)$$

### III.6. Conclusion

A l'issue de l'étude théorique de ce modèle, nous avons pu déterminer plusieurs paramètres influant les performances du concentrateur. La concentration géométrique est le facteur que dépende beaucoup plus la température du récepteur, plus il est important plus la température atteint par la surface du récepteur est élevée. L'efficacité du concentrateur et du récepteur (absorbeur) dépendent de la géométrie ainsi que les caractéristiques thermo-physique de ces derniers. Pour la conception d'un tel système, on doit tenir compte de ces paramètres.

## IV. Étude expérimentale du rétro-concentrateur parabolique

### IV.1. Introduction

Après avoir effectué une étude théorique du concentrateur solaire parabolique. Nous présentons les différentes étapes de la réalisation notre prototype, avec une description des différentes parties et matériels utilisés. Le rétro-concentrateur parabolique est conforme au modèle théorique étudié précédemment, c'est-à-dire il a les mêmes paramètres seulement au lieu de réceptionner le flux concentré au point focal principal (en haut), notre récepteur sera placé à la base au centre de la parabole.

Ensuite, nous ferons une expérimentation notre concentrateur où nous effectuons plusieurs essais de mesure de températures. Les températures sont données en fonction du rayonnement global, seule la composante directe sera exploitée par le concentrateur.

Notre prototype a été conçu au niveau du Laboratoire de Modélisation Numérique et Expérimentale des Phénomènes Mécaniques (LMNEPM) de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. Sachant que les essais ont été faits au niveau de la faculté, le concentrateur a été placé dans un terrain ouvert afin de capté le maximum de rayonnement pour avoir des résultats fiables.

### IV.2. Description des composantes de l'installation

#### IV.2.1. Collecteur (réflecteur)

Il est constitué d'une parabole de réception satellite dont la surface intérieure est couverte de papier aluminium. La surface réfléchissante réfléchit les rayons incidents parallèles à son axe.

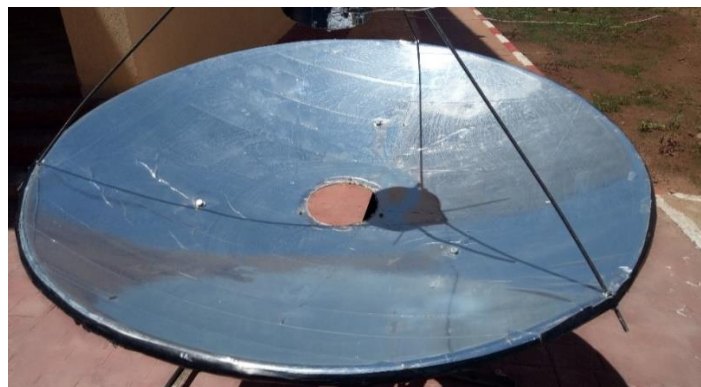


Figure 24 : Le réflecteur parabolique

La caractéristiques géométriques du réflecteur sont données dans le tableau IV.1 suivant :

Diamètre	<b>D = 1.47 m</b>
Hauteur (taille)	<b>h = 0.24 m</b>
Distance focale (f)	<b>f = 0.56 m</b>
Surface d'ouverture (totale)	<b><math>A_{tot} = 1.697 m^2</math></b>
Surface de captation	<b><math>A_a = 1.665 m^2</math></b>
Angle d'ouverture	<b><math>\Psi = 66^\circ</math></b>

Tableau 2 : caractéristiques géométriques du réflecteur

#### IV.2.2. Récepteur (absorbeur)

Notre étude concerne la concentration à haute température, nous avons donc choisi un récepteur de type cavité de forme cylindrique. Le récepteur est un échangeur de chaleur grâce auquel se fait l'échange de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur. Le récepteur est en plaque d'aluminium de forme cylindrique dont la surface supérieur est isolée par de la laine de roche. L'absorbeur de cuivre en serpentín est placé à l'intérieur du cylindre. Une couche de revêtement noir est utilisée pour réduire le taux de réflexion et augmenter le taux d'absorption. L'ensemble est fermé par une vitre transparente comme illustré dans la figure IV.2.



Figure 25 : Le récepteur

Les caractéristiques de l'absorbeur sont données par le tableau IV.2

Longueur de l'absorbeur	L=3 m
Diamètre	Dr=0.10 m
Conductivité thermique	k= 380 W/m°C
Surface totale	A <sub>tot</sub> = 0.942 m <sup>2</sup>
Surface réceptrice	A <sub>recep</sub> = 0.0314 m <sup>2</sup>
Coefficient d'absorptivité	0.8

Tableau 3 : Caractéristiques de l'absorbeur

#### IV.2.3. Le fluide caloporteur

Un fluide caloporteur est un fluide (gaz ou liquide) qui permet le transport de la chaleur entre plusieurs sources de température. Ils sont notamment utilisés dans les centrales solaires thermiques. Chaque fluide caloporteur est choisi selon ses propriétés thermo physiques : viscosité, chaleur spécifique, conductivité thermique, tenue à la température maximale. Il est donc recommandé de traiter le fluide caloporteur ou utiliser de l'eau distillée pour éviter le dépôt du tartre et du calcaire sur la paroi intérieur des tubes en cuivre vu le faible diamètre de ces derniers (10 mm). Les caractéristiques de l'eau sont présentées dans le tableau suivant :

<b>Chaleur spécifique de l'eau</b>	<b>4180 J/Kg °C</b>
<b>Conductivité thermique</b>	0,0059 W/m°C
<b>Masse volumique</b>	1000 Kg/m <sup>3</sup> .
<b>Température d'ébullition</b>	100°C

Tableau 4 : Caractéristiques thermo physiques de l'eau

#### IV.2.4. Le support

Comme tous les systèmes de concentration, le retro concentrateur solaire parabole nécessite un système de poursuite du soleil afin de recevoir le maximum du rayonnement direct. Le dispositif expérimental est monté sur un support rigide mobile qui permet de suivre la course du soleil sur les deux axes à défaut de système de poursuite.

### IV.3. Dispositifs de mesures

#### IV.3.1. Le pyranomètre

La connaissance du rayonnement direct ainsi que global du lieu est nécessaire pour toute installation à concentration. Un pyranomètre à affichage numérique est utilisé pour mesurer le rayonnement direct à défaut d'avoir un pyrohéliomètre. Il est placé au terrain d'essai sur une surface bien plane avec une certaine hauteur afin de minimiser l'influence des rayons réfléchit par les surfaces de l'entourage (voir figure IV.3).



Figure 26 : Le pyranomètre

#### IV.3.2. Les thermomètres

Deux types de thermomètre sont utilisés pour relever les différentes températures :

- Les températures de l'absorbeur et la surface extérieur du récepteur sont données par à un thermomètre laser (-50°C – 900°C).
- La température ambiante est mesurée à l'aide d'un thermomètre à sonde (capteur).



Figure 27 : Les thermomètres

#### IV.4. Plan expérimental

Les essais ont été faits au niveau de la faculté des Sciences et de la Technologie de l'université de Mostaganem. Le concentrateur a été placé dans un terrain ouvert afin de capté le maximum de rayonnement pour avoir des résultats fiables.

##### ✚ Coordonnées géographiques

Nous considérons les coordonnées de Mostaganem qui sont :

- Altitude : 104m
- Latitude :  $35^{\circ} 55' 52''$  N
- Longitude :  $0^{\circ} 5' 21''$  E

Le temps d'expositions s'étalant de 12h00 à 14h00 GMT+1.

##### IV.4.1. Le positionnement par rapport au soleil

Le système est placé et dirigé vers le soleil de telle sorte que les rayons solaires parallèles à son axe soient concentrés sur le récepteur au point focal. Une poursuite de la course du soleil est donc nécessaire. Pour savoir s'il est bien positionné par rapport au soleil, il suffit juste de vérifier si l'ombre du récepteur est au centre de la parabole.



Figure 28 : Vue générale de l'installation complète

#### IV.4.2. Mesures

Nos mesures sont constituées de deux parties réparties en deux jours :

- ✓ La mesure des températures de l'air ambiant, de la surface de l'absorbeur, de la surface extérieure du récepteur afin de nous faire une idée sur l'évolution de ces données. Aussi la mesure de l'ensoleillement instantané du site avec un pyranomètre.

Ensuite la mesure de la durée nécessaire à l'évaporation totale de 0,5 litres d'eau introduit dans l'absorbeur.

#### IV.4.3. Objectifs

Le changement de phase de l'eau de liquide en vapeur est obtenu par un apport de chaleur. Le processus de vaporisation est donc endothermique. Dans un premier temps, l'eau reçoit une quantité de chaleur, appelée chaleur sensible, pour élever sa température jusqu'à 100°C ensuite celle qui permet sa vaporisation, appelée chaleur latente de vaporisation.

Selon notre model expérimental, les objectifs principales de notre expérimentation consiste à :

- La détermination de la quantité d'eau évaporée en fonction du flux de chaleur au fil du temps. Ceci nous permet d'avoir une idée sur production selon la taille du capteur.
- L'évaluation de la quantité d'énergie absorbée par l'eau, en fonction de l'ensoleillement du site et du temps.
- L'évaluation de la puissance perdue par conduction, convection et rayonnement.

L'évaluation de la puissance absorbée par l'eau et celle délivrée par le réflecteur. Ceci permet de définir l'efficacité du concentrateur.

#### IV.4.4. Protocole de mesures

- Au début, nettoyer la surface réfléchissante de la parabole avec de l'eau.
- Peser la quantité d'eau à évaporer (0,5 litres).
- Bien placer le récepteur au foyer.
- Mettre en place les thermomètres et le pyromètre
- Relever les températures de l'eau, de l'ambiance, de l'absorbeur et de la surface extérieure du récepteur au début des expériences.
- Relever la température ambiante, de l'absorbeur, de la surface extérieure du récepteur ainsi que l'ensoleillement direct du lieu de mesure toutes les cinq (5) minutes.
- Placer la parabole au soleil et l'orienter sur les deux axes afin, que tous les rayons parallèles soient concentré.
- Orienter instantanément la parabole de sorte que l'ombre du récepteur soit au centre de la parabole.

#### IV.5. Dépouillement des résultats

##### IV.5.1. Tableaux de valeurs

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux (Tab IV.1 et Tab IV.2) pour chaque Journée.

Premier essai : le 28 mai 2019.

Deuxième essai : le 11 juin 2019.

Temps (minutes)	Ensoleillement direct (W/m <sup>2</sup> )	Température ambiante (°C)	Température de l'absorbeur (°C)	Température extérieure du récepteur (°C)	ciel	vent
12h40	973	34,4	184	37,5	Très clair	calme
12h45	985	32,6	434	84,8	//	//
12h50	987	30,5	469	90,0	//	//
12h55	987	31,1	508	112,0	//	//
13h00	986	34,7	463	127,0	//	//
13h05	993	34,4	441	156,0	//	//
13h10	993	34,1	383	165,0	//	//
13h15	997	33,5	314	117,9	//	Peut fort
13h20	997	33,1	462	127,5	//	//
13h25	1000	34,8	337	164,0	//	//

13h30	995	33,5	354	140,0	//	calme
13h35	997	33,5	443	168,5	//	//
13h40	984	36,0	408	162,0	//	//
13h45	993	36,7	415	215,0	//	//
13h50	979	36,5	411	148,0	//	//

Tableau 5 : Résultats de mesures de la journée du 28/05/2019

Quantité d'eau Litres (L)	Température de l'absorbeur au début (°C)	Température de l'absorbeur à la fin (°C)	Durée de l'évaporation (minutes)
0.5	511	220	18

Tableau 6 : Mesure de la durée de l'évaporation de l'eau

Temps (minutes)	Ensoleillement direct (W/m <sup>2</sup> )	Température ambiante (°C)	Température de l'absorbeur (°C)	Température extérieure du récepteur (°C)	Etat du ciel	Vent
12h15	1017	27,4	31	28	Très Clair	Calme
12h20	1014	27,9	328	126	//	//
12h25	1005	25,1	360	125	//	//
12h30	1009	25,5	392	188	//	//
12h35	1012	27,5	466	105	//	Peut fort
12h40	1017	27,7	547	102	//	//
12h45	1018	26,3	494	95	//	//
12h50	1019	27,6	505	157	//	calme
12h55	1018	25,4	552	113	Peut nuageux	//
13h00	1017	26,5	577	112	//	//
13h05	1013	25,4	541	122	//	//
13h10	1015	27,1	566	184	//	//
13h15	1015	25,0	592	117	//	Peut fort
13h20	1016	27,0	599	92	//	//
13h25	1011	26,4	602	100	//	//
13h30	1016	27,4	555	86	clair	//
13h35	1017	26,3	553	67	//	//
13h40	1017	26,0	446	66	//	//
13h45	1015	26,2	395	60	//	//
13h50	1016	27,4	435	69	//	//

Tableau 7 : Résultats de mesures de la journée du 11/06/2019

#### IV.6. Problèmes rencontrés

Quelques problèmes lors de la réalisation et l'expérimentation de ce prototype se résument :

- Aux problèmes d'équipements du laboratoire, matériels de réalisation
- Aux problèmes de la haute pression qui règne dans le récepteur, les vitres utilisées pour la fermeture de l'échangeur et pour la réflexion du flux concentré ne résistent pas à la température et pression élevées.
- Aux problèmes de relever de la température car sa valeur très rapidement sous l'influence du vent.
- Aux problèmes de manipulation, le thermomètre laser à un point de contact très petit. Alors il se peut que le laser tombe sur le vide qui y a entre les serpentes de l'absorbeur. Dans ce cas, il n'affiche pas la température de la surface de l'absorbeur.
- Aux problèmes de terrain d'essai, sur le site de la faculté, il n'y a un terrain qui correspond aux exigences du mesure du rayonnement direct avec un pyranomètre (terrain dégagé), ce qui a beaucoup influencé nos mesures de l'ensoleillement direct bien que cela n'influent pas nos mesures de températures.
- Problèmes de la cassure du miroir réflecteur utilisé pour refléter les rayons concentrés.

## V. Résultats et discussions

### V.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de nos résultats expérimentaux et à l'interprétation de ces derniers. Dans cette partie, nous avons étudié l'évolution des températures de la surface de l'absorbeur, de la surface supérieure du récepteur et de l'ambiance au cours du temps pendant les essais de la journée du 28 Mai 2019 et de la journée du 11 juin 2019. Comme la température de l'absorbeur est directement liée à l'éclairement solaire direct, nous avons étudié aussi l'évolution du rayonnement solaire direct, après une identification des différents paramètres qui influencent ces valeurs.

### V.2. Résultats de la journée du 28 Mai 2019 :

#### V.2.1. L'évolution du rayonnement direct (global)

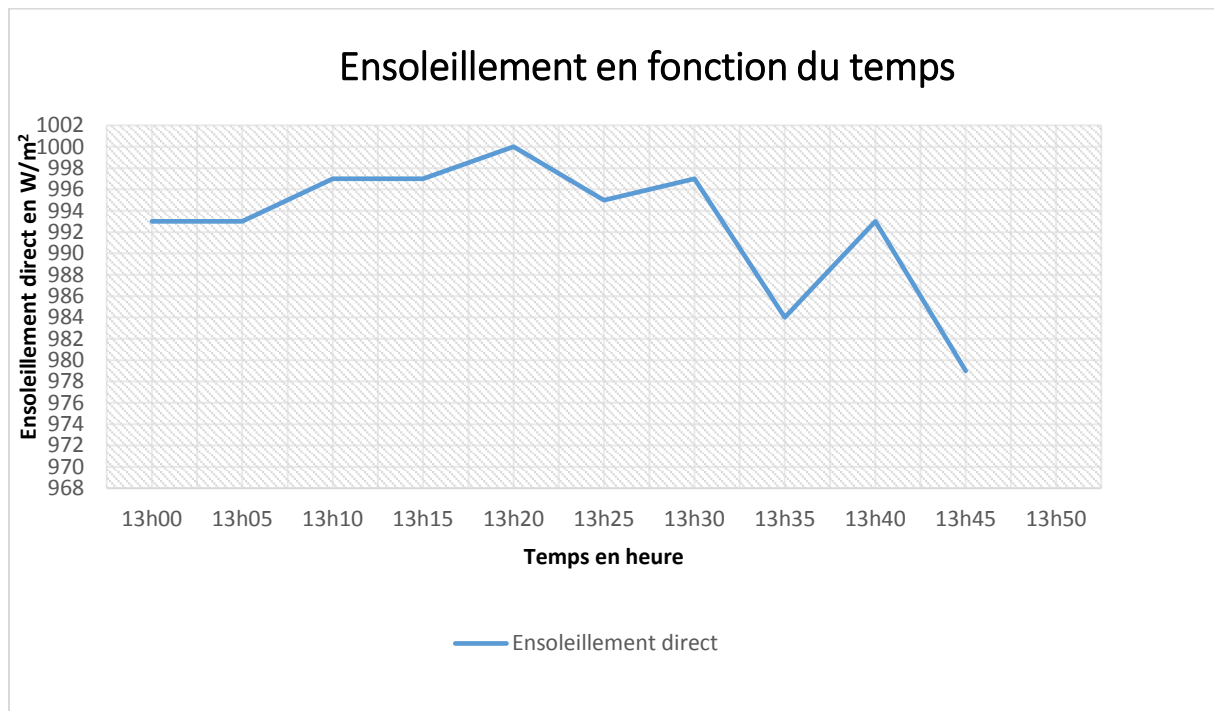


Figure 29 : Le profil de l'ensoleillement direct (global) en fonction du temps

La figure V.1 nous montre l'évolution de l'ensoleillement direct (global) de la journée du 28 Mai 2019 du site durant la période d'essai, l'éclairement solaire augmente proportionnellement avec le temps jusqu'à atteindre sa limite avant d'entamer sa diminution due à la position du soleil par rapport au midi-solaire. Ses valeurs ont été très peu perturbées par les facteurs du temps, ce

qui nous a laissé dans de bonnes conditions de mesures. C'est le premier agent direct qui influe la température de la surface du récepteur. Plus l'ensoleillement est bon, meilleurs sont les résultats. Dans le cas de passage de nuage, le concentrateur ne pourra pas fournir de l'énergie au récepteur vu son incapacité à concentrer le rayonnement diffus.

### V.2.2. L'évolution des différentes températures

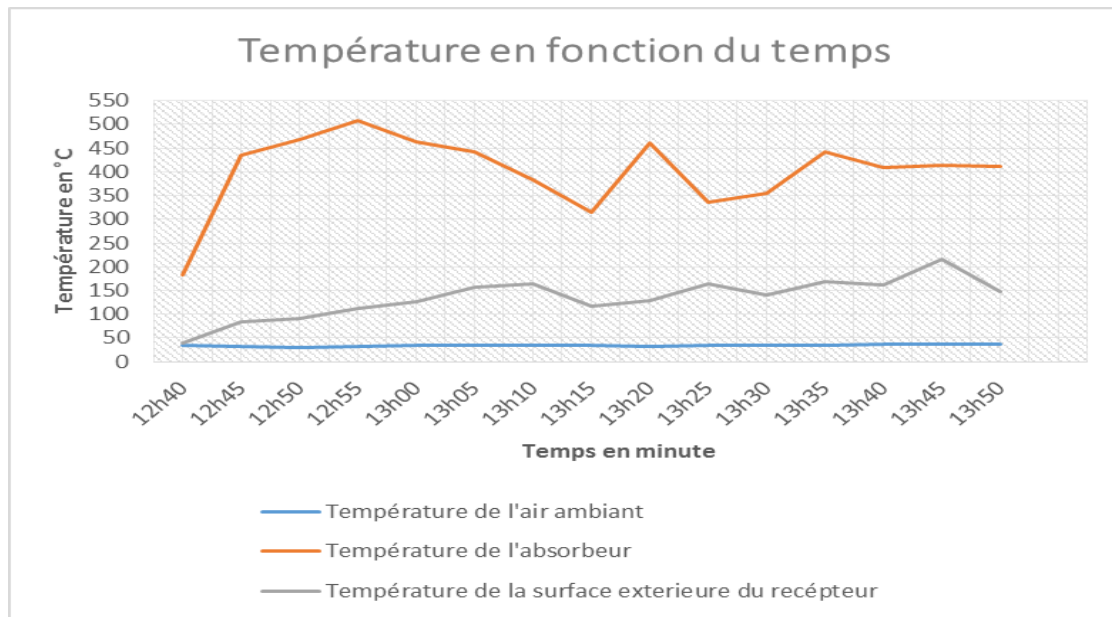


Figure 30 : Les profils de températures en fonction du temps

Nous montrons dans la figure V.2 l'évolution des différentes températures en fonction du temps accompagné par des fortes perturbations. L'évolution commence après cinq minutes du début des essais. Ces fluctuations sont en générale du à l'effet du vent et des pertes, mais aussi aux erreurs de mesure de celles-ci et au rayonnement solaire direct (global). La température de la surface extérieure du récepteur évolue avec des faibles fluctuations. On ne remarque pratiquement pas la variation de la température ambiante. L'absorbeur atteint sa température maximale juste après 20 minutes du début. La fourchette de cette journée est comprise entre [183°C-508°C].

### V.3. Résultats de la journée du 11 juin

Nous rappelons que l'ensoleillement de cette journée était excellent.

**V.3.1. L'évolution du rayonnement direct (global)**

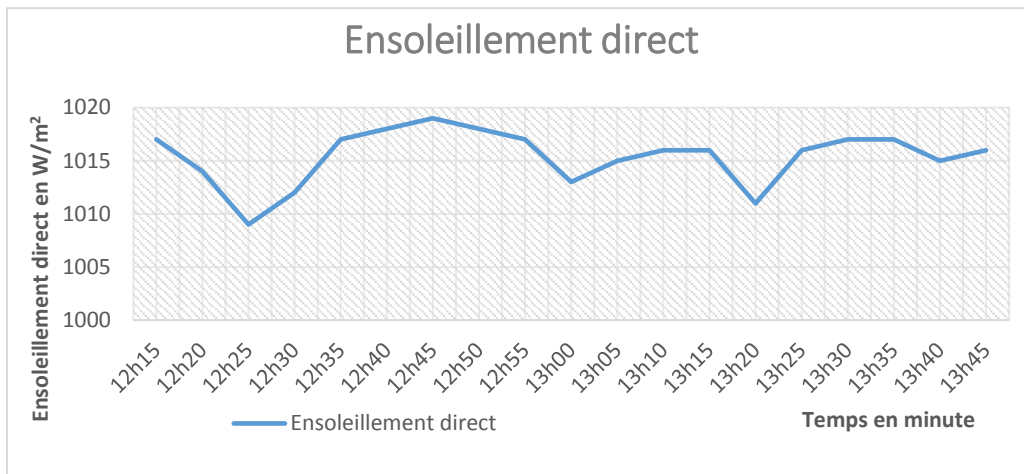


Figure 31 : Profil de l'ensoleillement direct en fonction du temps

La figure V.3 nous montre l'évolution de l'ensoleillement direct (global) du site durant la période d'essai. Pendant nos essais, l'éclairement a été très peu perturbé par les facteurs du temps. Cela s'explique par les températures élevées de la surface de l'absorbeur. Plus l'ensoleillement est bon, plus les résultats sont meilleurs. Mais au-delà de ce raisonnement, on remarque des fluctuations de la température de l'absorbeur lesquelles pourraient être attribuées au mauvais relevé de la valeur (pointage du rayon laser sur l'absorbeur) et les pertes au niveau du récepteur.

**V.3.2. L'évolution des différentes températures**

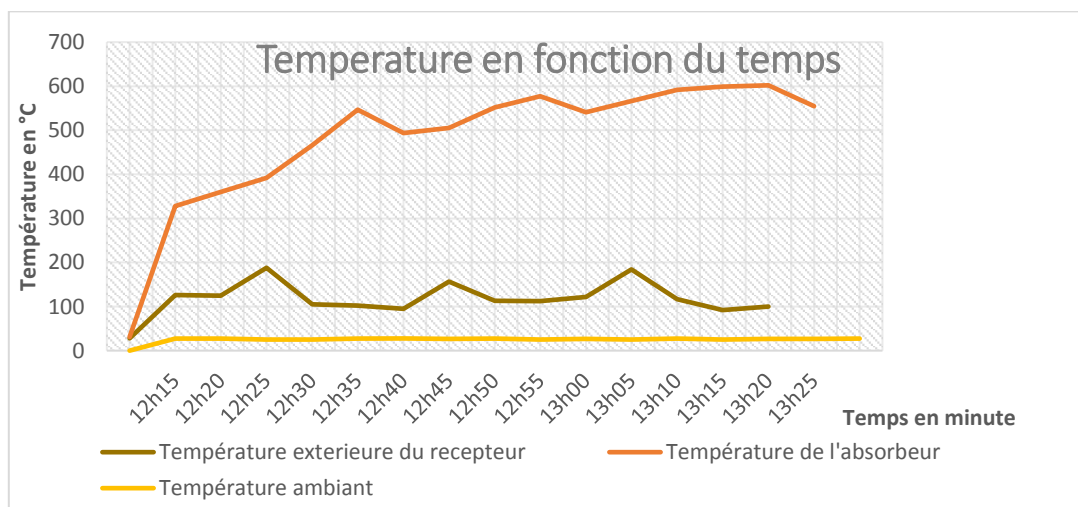


Figure 32 : Le profil de températures en fonction du temps

La figure V.4 nous montre une croissance brutale des températures après cinq minutes du début. La température de la surface de l'absorbeur continue sa croissance avec des faibles perturbations avec un intervalle compris entre [330°C-602°C], pendant ce temps, la température de la surface supérieure du récepteur est marquée par des fortes variations avec un intervalle compris entre [100-200°C]. Par contre, la température de l'air ambiant reste pratiquement linéaire avec une variation négligeable. L'absorbeur atteint sa température maximale après une heure et cinq minutes du début des essais avant de commencer sa chute.

#### **V.4. Paramètres qui influents les performances**

##### **V.4.1. Influence du rayonnement direct (global) sur la température du récepteur**

L'influence du rayonnement direct sur la température atteinte par la surface de l'absorbeur est directe, la température varie avec la variation du rayonnement direct du site, la moindre perturbation du rayonnement provoque un effet direct sur la température. Le fluide caloporteur arrive à s'échauffer seulement en présence du rayonnement solaire direct. La température du récepteur revient à la température ambiante lorsque celui-ci est nul c'est-à-dire au moment du passage des nuages.

##### **V.4.2. Influence du vent sur la température du récepteur**

Quand la température de l'ouverture du récepteur augmente, le récepteur cède de la chaleur à l'environnement par conduction, rayonnement et convection. Plus l'écart entre la température de l'absorbeur et l'air ambiant est élevé, plus les pertes thermiques du concentrateur sont importantes et plus la puissance utile diminue. Ces pertes peuvent être attribué au vent, plus la vitesse du vent est importante plus les pertes par convection augmentent. Egalement une circulation rapide du vent autour du récepteur provoque un refroidissement assez rapide de celui-ci au profit de l'environnement. Ce qui se traduit par une baisse de température de la surface réceptrice.

##### **V.4.3. Influence du rayonnement et du vent sur l'efficacité du concentrateur**

Le rendement thermique du concentrateur est le rapport de la puissance thermique reçue par le collecteur sur la puissance utile.

D'une part pour un système de concentration donné, une augmentation du rayonnement direct provoque l'augmentation de la température de la surface du récepteur donc celle du fluide

à la sortie de l'absorbeur. Par la suite on a une meilleure puissance utile. D'autre part une augmentation de la température du fluide à la sortie de l'absorbeur fait croître la puissance utile donc le rendement du concentrateur et le rendement du récepteur. Ce rendement décroît lorsque les pertes thermiques entre le récepteur et l'environnement deviennent importante.

### V.5. Les efficacités énergétiques

$$Q_u = 0.5 * 1000 * 4.18 (100 - 24) + 0.5 * 1000 * 2250 = 1283.84 \text{ KJ}$$

$$Q_u = 1283.84 * 10^3 / 1080 = 1188.74 \text{ W}$$

- Efficacité du concentrateur

$$\eta_{concentrateur} = \frac{Q_u}{A_a I_b} \quad (2 - 10)$$

**Application numérique :**  $\eta_{concentrateur} = \frac{1188.74}{1500} = 0.79$

- Efficacité du récepteur

$$\eta_{recep} = \frac{Q_u}{\eta_{op} I_b A_a} \quad (2 - 11)$$

$$\eta_{recep} = \frac{1188.74}{0.9 * 1500} = 0.88$$

$$\eta_{recep} = 0.88$$

## Conclusion générale :

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la technologie solaire à concentration, basée sur l'étude expérimentale du concentrateur solaire parabolique. La technologie solaire à concentration est en pleine évolution avec l'évolution de la technologie. Elles permettent le stockage d'énergie. Le concentrateur solaire parabolique est idéal pour l'expérimentation, pour son rendement élevé. Il faut noter que l'utilisation de la parabole pour la production de l'électricité, de vapeur, et la production d'eau chaude prend de plus en plus ampleur en raison des besoins croissant en énergie dans le monde et constitue une solution écologique à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles dont le prix ne cesse d'augmenter. De plus, il peut constituer, une solution très intéressante pour des pays qui ont un potentiel d'ensoleillement non négligeable. Egalement, ce procédé qui s'inscrit dans la technique de dessalement d'eau de mer peut représenter une véritable source d'approvisionnement d'eau douce pour certaines régions. Les performances de cette technologie s'améliorent de jour en jour, et des systèmes ont été commercialisés.

L'intérêt pour cette technologie est du à sa conception simple, qui permet de réduire les coûts.

L'étude expérimentale que nous avons réalisée sur notre prototype, nous a permis de connaître le fonctionnement de ce système, de prévoir la température maximale que peut atteindre du récepteur. Nous avons montré que celle dépend de plusieurs facteurs, dont les plus importants sont l'éclairement direct, la géométrie du réflecteur, les dimensions et les propriétés thermo physiques du récepteur, de la qualité optique de la surface réfléchissante, et de la vitesse du vent. C'est la raison pour laquelle son application nécessite une étude au préalable de l'influence des paramètres qui engendrent des pertes thermiques entre le collecteur et le récepteur.

Notre travail consistait à la production de vapeur d'eau à partir du rétro-concentrateur solaire parabolique, en vue de déterminer la puissance thermique utile que peut générer le rétro-concentrateur en fonction de l'ensoleillement du site.

A la suite de nos expériences, le concentrateur peut vaporiser 0.5 L en 18 minutes, équivalentes de  $4.629 \cdot 10^{-4}$  Kg/S. Sa température maximale est environ 600 °C. Son rendement thermique s'élève à 79%.

### **Recommandations :**

En perspective, le rétro-concentrateur parabolique, comme tous les systèmes à concentration mettent en évidence seulement le rayonnement direct, donc pour que ce système soit autonome, un système de suivi de la course du soleil durant la journée est nécessaire.

L'idée de départ de notre projet était le rétro-concentrateur, un matériau réflecteur adapté des températures élevées est nécessaires pour réaliser ce modèle.

La vapeur produit peut être utiliser pour la production d'électricité à travers un moteur à vapeur, mais également dans les différents procédés.

## Bibliographie

- [1] (F.DANIELS: Direct Use of the sun's Energy, Yale University Press (USA), 1964)
- [2] (L'énergie solaire, de la recherche appliquée aux utilisations pratiques-Perspectives d'avenir, Premier Ministre, service d'information et de diffusion, 19 rue Constantine- 75700 Paris – Ministère de l'industrie, du commerce et de l'Artisanat , Délégation aux énergies nouvelles, 13 rue de Bourgogne -75700 Paris )
- [4] (PEUSER F.A., REMMERS K-H., SCHNAUSS M.: Installations solaires thermiques : conception et mise en œuvre, Systèmes solaires, 2005, 400 p)
- [5] (R.BERNARD G.MENGUY M. SCHWARTZ : Rayonnement solaire, conversion thermique et applications 1980, p 17)
- [5] (R. BERNARD , G. MENGUY, M. SCHWARTZ, Le rayonnement solaire : conversion thermique et applications, 2<sup>e</sup>édition augmentée, p 197 dans technique et documentation).
- [6] (Le pompage photovoltaïque par Jimmy Royer, Thomas Djako, Eric Schiller, Bocar Sadasy, IEPF/ université d'Ottawa/ EIER/ CREPA.
- [7] Jacques BERNARD, Génie Energétique, Energie solaire : calculs et optimisation (ISBN 978-2-7298-6492-7), Ellipses Edition Marketing S.A., 2011
- [8] A.Mefti , M.Y.Bouroubi et A.Khellaf , Article (26/09/99): Analyse critique du modèle de l'Atlas solaire de l'Algérie
- [9] Energie solaire dans le monde site : [www.soltys.fr](http://www.soltys.fr)
- [10] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie, Tome1, Vol 1 et 2 : Modèles théoriques et expérimentaux', Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987
- [11] Sofiane BOUAICHAOU, L'électricité d'origine solaire : Les centrales solaires thermodynamiques.
- [12] *Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique (1998) 13-18).*
- [13] Michel Tissot, « Energie solaire thermique et photovoltaïque ».
- [14] Quoilin Sylvain : Centrales solaires à concentration, Université de Liège
- [15] (International Congress on the Environment and Renewable Energies, 6-8 November, 2006, Mahdia ,Tunisie).
- [16] (Vème Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement. 04-06 Novembre, 2010, Sousse, Tunisie)

- [17] (William B. Stine et Michael Geyer : power of the sun, chapitre 8 : <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html>)
- [18] : Eltahir Ahmed Mohamed : **DESIGN AND TESTING OF A SOLAR PARABOLIC CONCENTRATING COLLECTOR**, International Conference on Renewable energies and Power Quality (ICRPQ'13) ISSN 2172-038 X, No.11, March 2013.
- [19] <https://docplayer.fr/69485195-parabolique-avec-une-poursuite-automatique.html>
- [20] : A.R. El Ouederni et al : *Experimental study of a parabolic solar concentrator*, *Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°3 (2009) 395 – 404*
- [21] : ZEGHIB ILHEM, mémoire de fin d'étude UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE, 200
- [22] : **(Development of a solar concentrator with tracking system : Flávia V. Barbosa<sup>1</sup>, João L. Afonso<sup>2</sup>, Filipe B. Rodrigues<sup>2</sup>, and José C. F. Teixeira<sup>1</sup>)**
- [23] : Saša P, Darko V, Velimir S : **(Optical Design of a Solar Parabolic Thermal Concentrator Based on Trapezoidal Reflective Petals**
- [24] : John A. Duffie et William A. Beckman : Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition
- [25] : cours transfert de chaleur, Mr Retiel, Houat Université de Mostaganem
- [26] : S. Bonnet, M. Alaphilippe, P. Stouffs, Conversion Thermodynamique de l'Energie Solaire dans des Installations de Faible ou de Moyenne Puissance : Réflexions sur le Choix du Meilleur Degré de Concentration, Rev. Energ. Ren. : 11<sup>èmes</sup> Journées Internationales de Thermique (2003)73-80
- [27] Alain FERRIÈRE, dans technique de l'ingénieur

## Annexes

A

Propriétés de quelques matériaux utilisés dans notre réalisation :

### 1. surfaces absorbantes :

Le tableau suivant donne la sélectivité de quelques surfaces. Notons que c'est le revêtement qui compte : une surface d'un matériau donné mais revêtue d'une couche de peinture noire ou blanche n'aura pas le même comportement sur le plan des échanges radiatifs.

Etat de surface de différents matériaux	$\alpha$	$\varepsilon$	$\alpha/\varepsilon$
Cuivre poli	0,25	0,02	12,5
Film plastique recouvert d'or	0,30	0,03	10
Acier poli	0,63	0,09	7
Aluminium anodisé	0,80	0,14	5,71
Nickel brillant	0,34	0,07	4,86
Aluminium poli	0,10	0,04	2,5
Peinture noire (silicate)	0,97	0,88	1,10
Peinture aluminium	0,26	0,26	1
Acier sablé	0,75	0,80	0,94
Peinture blanche (silicate)	0,14	0,90	0,16

Tableau 1 : caractéristiques radiatives de quelques surfaces

La sélectivité est le rapport de l'absorptivité solaire  $\alpha$  sur l'émissivité infrarouge  $\varepsilon$ .

### 2. L'absorbeur :

Le matériau constituant l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique.

Dans le cas des métaux on utilise le plus couramment le cuivre, l'acier inoxydable ou bien l'aluminium. Certaines de leurs caractéristiques thermodynamiques sont données dans le tableau ci-dessous.

Métal	Conductivité thermique $\lambda$ ( $W/m\ ^\circ C$ )	Chaleur massique $C_p$ ( $J/Kg\ ^\circ C$ )	Masse volumique $\rho$ ( $Kg/m^3$ )	Diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ ( $10^{-6} m^2/s$ )
Cuivre	384	398	8900	108
Acier inoxydable	14	460	7800	4
Aluminium	204	879	2700	86

Tableau 2 : caractéristiques thermodynamiques de matériaux métalliques pouvant constituer l'absorbeur.

### 3. Isolant :

Les parois du récepteur doivent être isolées afin de minimiser les pertes calorifiques du système. Vers l'avant c'est le plus souvent une lame d'air qui fait office d'isolant. Son épaisseur ne doit pas être trop importante pour limiter les transferts par convection. On choisira une distance entre 2 et 3 cm.

A la partie arrière du capteur, on place une ou plusieurs couches d'isolant du type laine de verre, laine de roche, polystyrène, mousse de polyuréthane.... Le tableau 3 suivant donne les caractéristiques de différents matériaux pouvant servir d'isolant.

Matériaux	Conductivité thermique $\lambda$ ( $W/m\ ^\circ C$ )	Masse volumique $\rho$ ( $Kg/m^3$ )	Chaleur massique $C_p$ ( $J/Kg\ ^\circ C$ )	Diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ ( $10^{-7} m^2/s$ )
Air (à 20°C)	0,025	1,2	1003	208
Laine de verre	0,036	40	840	10,7
Laine de roche	0,040	40	840	11,9
Mousse de polyuréthane	0,029	30	1600	6,0
Polystyrène expansé	0,040	20	1500	13,3
Laine (vêtement)	0,04	450	1880	0,47
Neige (273 K)	0,046	100	1800	2,6
Feutre d'amiante	0,047	116	800	5,1
Liège expansé	0,048	120	1380	2,9
Perlite	0,048	60	840	9,5

Silicate de calcium	0,052	200	920	2,8
Magnésie	0,055	200	880	3,1
Soie	0,06	510	1250	0,94
Béton cellulaire	0,075	280	800	3,3
Vermiculite	0,09	80	880	12,8
Papier journal comprimé	0,105	130	1340	6,0
Bois de pin	0,118	500	1210	1,95
Papier	0,14	700	1340	1,5
Bois de sapin	0,114	535	272	9,9
Caoutchouc pur	0,153	1200	2170	0,6
PVC	0,166	1380	1000	1,2
Bois de chêne	0,198	825	2400	1,0
Plâtre	0,35	800	800	5,5
Brique	0,697	1700	900	4,6
Sol naturel	1,5	1650	-	-
Glace (273K)	2,21	917	2135	11,3

Tableau 3 : propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolant

Note : les valeurs sont données pour une température de 288 K sauf celles mentionnées (la variation de  $\lambda$  avec la température est suffisamment faible dans les problèmes pratiques pour qu'on puisse la négliger).

#### 4. couverture transparente :

Elle est facultative mais peut permettre d'accroître sensiblement le rayonnement du convertisseur par effet de serre.

L'intérêt d'une couverture transparente pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. C'est donc pour des températures dépassant 70°C que l'on peut envisager d'installer un vitrage afin d'accroître le rendement.

Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre mais on peut trouver aussi des produits de synthèse tel que le polycarbonate, le poly méthacrylate ou bien le polyester armé. Le tableau 4 fournit quelques indications sur ces matériaux.

Matériaux	Noms commerciaux	Epaisseur r mm	$\tau$ %	$\rho$ ( $Kg/m^3$ )	$C_p$ ( $J/Kg\ ^\circ C$ )	$\lambda$ ( $W/m\ ^\circ C$ )	$k_d$ $10^{-5}$ /K
Verre à vitre		3	85-92	2700	840	0,93	0,9
Polycarbonate	Makrolon Lexan	3,2	82-89	1200	1260	0,2	6,6
polyméthacrylate	Altuglas plexiglas	3,2	98-92	1200	1460	0,2	7
Polyester armé		1	77-90	1400	1050	0,21	3,5
Polytéréphtalate d'éthylène	Mylar Terphane	0,025	84	1,38	1170	0,25	7
Polyfluoéthylène propylène	Teflon FEP	0,05	97	2,15	1170	0,25	10
Polyfluorure vinyle	Tedlar	0,1	93	1,50	1380	0,12	4

Tableau 4 : Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge, pouvant servir à réaliser un effet de serre.

$\tau$  : Facteur de transmission solaire

$\rho$  : Masse volumique

$C_p$  : Chaleur massique

$\lambda$  : Conductivité thermique

$k_d$  : Coefficient de dilatation thermique

B

Applications Numériques :

- Calcul de quelques paramètres géométriques de la parabole :
  - La distance focale

$$f = \frac{d^2}{16h} (2 - 1)$$

**Application numérique :**  $f = \frac{(1.47)^2}{16 \cdot 0.24} = 0.5627 \text{ m}$

- Angle d'ouverture

$$\tan(\psi) = \frac{f/d}{2(f/d)^2 - \frac{1}{8}} \quad (2 - 2)$$

**Application numérique :**  $\tan(\psi) = \frac{0.5627/1.47}{2(0.5627/1.47)^2 - \frac{1}{8}} = 2.2668$

$$\psi = 66^\circ$$

- La surface d'ouverture du réflecteur

$$A_a = 4\pi f^2 \frac{\sin^2 \psi}{(1 + \cos \psi)^2} = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2 - 3)$$

**Application numérique :**  $A_a = \frac{\pi \cdot 1.47^2}{4} = 1.697 \text{ m}^2$

Cette surface est réduite de la surface du récepteur, donc la surface de captation nette vaut :

$$A_a = \frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi d_2^2}{4} \quad (2 - 4)$$

**Application**

**numérique :**

$$A_a = \frac{\pi * (1.47)^2}{4} - \frac{\pi(0.2)^2}{4} = 1.6657 \text{ m}^2$$

- La concentration géométrique

$$C_g = \frac{A_a}{A_r} \quad (2 - 5)$$

**Application numérique :**  $A_r = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{\pi(0.2)^2}{4} = 0.0314 \text{ m}^2$

$$C_g = \frac{1.6657}{0.0314} = 53$$

## 2. Calculs énergétiques :

- La puissance thermique reçue à l'ouverture du collecteur

$$I_a = I_b A_a \quad (2 - 6)$$

L'éclairement moyen de la journée du 27 Mai 2019 est  $I_b = 900 \text{ W/m}^2$

**Application numérique :**  $I_a = 900 * 1.6657 = 1500 \text{ W}$

- La puissance thermique reçue à la surface réceptrice

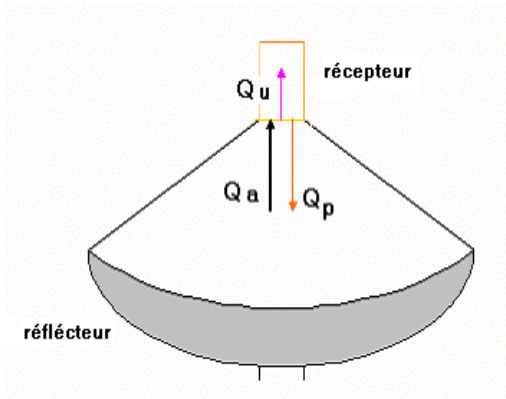
$$Q_a = I_a \eta_{op} \quad (2-7)$$

$$\eta_{op} = 0.9$$

$$Q_a = 1500 * 0.9 = 1350 \text{ W}$$

- La puissance utile

Le bilan thermique au niveau du récepteur



$$Q_u = Q_a - Q_{perdue} \quad (2-8)$$

$$Q_u = m_m C_p (T_s - T_e) + m_v L_v \quad (2-9)$$

$\rho$	$1000 \text{ Kg/m}^3$
$C_p$	$4.18 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}$
$T_s$	$100^\circ\text{C}$
$T_e$	$24^\circ\text{C}$
$m_e$	$0.5 \text{ L}$
La durée t	$18 \text{ min}=1080 \text{ s}$

Propriétés de l'eau

$L_v$	$2250 \text{ KJ/Kg}$
$m_v$	$0.5 \text{ L}$
La durée t	$18 \text{ min}=1080 \text{ s}$

Propriétés de la vapeur

$$Q_u = 0.5 * 1000 * 4.18 (100 - 24) + 0.5 * 1000 * 2250 = 1283.84 \text{ KJ}$$

$$Q_u = 1283.84 * 10^3 / 1080 = 1188.74 \text{ W}$$