

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



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en  
Installations énergétiques et turbomachines

Etude expérimentale d'un concentrateur cylindro-parabolique

Réalisé par :  
Kechidi Mehdi Sayeh Abdelkader  
Lazali Adel Abbas

Proposé et encadré par :  
Pr.A.Hamid  
Dr.O.Cheknane

Année universitaire 2018/2019

## Remerciements

Nos remerciements les plus sincères vont à tout d'abord à nos encadreurs Mr.A.Hamid et Mr.O.Cheknane nous le remercions de nous avoir encadrés, orienté, aidé, et conseillé.

Nous voulons aussi remercier tout le corps enseignant du département de Génie Mécanique qui ont contribués à notre formation tout au long de notre cursus.

Nous tenons aussi à remercier particulièrement tous les membres du pavillon 18, ainsi que Mr.Lafrey et Mme.Chafa, sans oublier nos parents qui nous ont accompagnées depuis le premier jour de notre scolarité, nous remercions tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement et a la finalisation de ce projet.

Et enfin nous remercions Mr.Karoua Houssein chercheur au CDER de Bouzereah pour nous avoir guidé et aidé dans ce projet, ainsi que l'imprimerie maugain et particulièrement Mlle Yasmine.

## Résumé

L'objectif de notre travail est de tester et étudier expérimentalement un concentrateur solaire cylindro-parabolique de 2,40 m de longueur et 1.20m de largeur, notre étude a porté sur le fait d'optimiser ce concentrateur, et de mesurer les températures de sortie, ainsi que la puissance utile et le rendement de ce dernier, nous avons également abordés brièvement le coté théorique en mettant en place un bilan thermique et énergétique de l'installation, nous avons atteint une température maximale de 120 °C dans les meilleures conditions , ainsi qu'une puissance de 1200 watt, et des rendements instantané de l'ordre de 10 % a 40%, et nous avons conclu que le défaut principale de ce concentrateur cylindro-parabolique est le fait qu'il soit tordu, et donc nous avons une perte sur la ligne focale qui ne nous permet pas de dépasser les 125°C en utilisant l'eau comme fluide caloporteur dans cet état, nous avons également donner des recommandations et perspectives pour l'amélioration et l'optimisation de l'installation.

### ملخص

الهدف من عملنا هو اختبار ودراسة مرکز أسطوانی مكافی شمسی طوله 2.40 مترًا وعرضه 1.20 مترًا، ركزت دراستنا على تحسين هذا المرکز ، وقياس درجات حرارة الإخراج ، بالإضافة إلى الطاقة المفيدة ، كما درسنا الجانب النظري من خلال وضع توازن الحرارة والطاقة في التثبيت ، وصلنا إلى درجة حرارة تصل إلى 120 درجة مئوية في أفضل الظروف وكذلك قوة 1200 واط ، وعوائد لحظية تتراوح بين 10 ٪ إلى 40 ٪ ، وخلصنا إلى أن الخطأ الرئيسي لهذا المكثف مكافی هو حقيقة أنه ملتوية ، وبالتالي لدينا خسارة على الخط البؤري الذي لا يسمح لنا بتجاوز 125 درجة مئوية عن طريق استخدام الماء كسائل نقل الحرارة في هذه الحالة ، كما نقدم توصيات ووجهة نظر لتحسين هذا المرکز.

### summary

The objective of our work is to experimentally test and study a solar cylindrical-parabolic concentrator 2.40 m long and 1.20 m wide, our study focused on the optimization of this concentrator, and to measure the temperatures of output, as well as the useful power and the output of the latter, we also briefly touched on the theoretical side by setting up a thermal and energy balance of the installation, we reached a maximum temperature of 120 ° C in the best conditions , as well as a power of 1200 watt, and instantaneous yields of the order of 10% to 40%, and we concluded that the main fault of this parabolic concentrator is the fact that it is crooked, and therefore we have a loss on the focal line that does not allow us to exceed 125 ° C by using water as heat transfer fluid in this state, we also give recommendations and perspective for the improvement and optimization of the installation.

<b>Résumé</b> .....	2
<b>Nomenclature</b> .....	10
<b>Introduction générale</b> .....	13
<b>1.1. Introduction</b> .....	15
<b>1.2. Constante Solaire</b> .....	15
<b>1.3. Translation et Rotation de la Terre</b> .....	15
<b>1.4. Le spectre solaire</b> .....	16
<b>1.5. Rayonnement solaire à la limite de l’atmosphère</b> .....	17
<b>1.6. La position du soleil</b> .....	17
<b>1.6.2. Déclinaison du soleil <math>\delta</math></b> .....	19
<b>1.6.3. Le temps solaire vrai et l’angle horaire du soleil</b> .....	20
<b>1.6.4. L’équation du temps ET</b> .....	21
<b>1.6.5. Hauteur angulaire du soleil h</b> .....	22
<b>1.6.7. Durée du jour</b> .....	23
<b>1.6.8 Décalage horaires</b> .....	23
<b>1.7. Modèles pour le rayonnement solaire</b> .....	23
<b>1.7.1. Rayonnement direct</b> .....	23
<b>1.7.2. Rayonnement diffus</b> .....	24
<b>1.7.3. L’albédo</b> .....	25
<b>1.7.4. Le rayonnement global</b> .....	25
<b>1.8. Le potentiel, les ressources</b> .....	25
<b>1.9. Potentiel en Algérie</b> .....	26
<b>1.10. Conversion thermique de l’énergie solaire</b> .....	26
<b>1.11. Les différents types de concentrateur</b> .....	27
<b>1.11.1. Les concentrateurs ponctuels</b> .....	27
<b>1.11.2.les concentrateurs linéaires</b> .....	29
<b>1.12. Les différents types de capteurs solaires thermique</b> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>1.12.1. Le capteur plan vitré</b> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>1.12.2. Le capteur plan non vitré</b> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>1.12.3. Le capteur à tubes sous vide</b> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>2.1. Introduction</b> .....	32
<b>2.2. Principe de fonctionnement</b> .....	32
<b>2.3. Caractéristiques d’un concentrateur cylindro-parabolique</b> .....	32
<b>2.4. Orientation optimal d’un capteur solaire</b> .....	34
<b>2.4.1 Montage</b> .....	35
<b>2.5. Les composantes d’un concentrateur cylindro-parabolique</b> .....	35

2.5.1. Le réflecteur .....	35
2.5.2. L'absorbeur .....	35
2.5.3. Le fluide caloporteur .....	36
2.6. Performances Optiques d'un Concentrateur Cylindro parabolique .....	37
2.6.1. Taux de concentration .....	37
2.6.2. Facteurs Optiques .....	38
2.6.3. Température de Sortie du Fluide Caloporteur « Ts » .....	38
2.6.4. Rendement instantané du concentrateur solaire $\eta$ .....	39
2.6.5. Coefficient des pertes thermiques .....	39
2.6.6. Puissance utile « Qu » .....	40
2.6.7. Puissance solaire absorbée par l'ouverture du récepteur .....	40
2.7. Hypothèses utilisées dans le model de calcul : .....	40
2.8. Bilan Thermique .....	42
2.8.1. Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur .....	42
2.8.2. Entre l'Absorbeur et l'Enveloppe en Verre .....	42
2.8.3. Entre l'Enveloppe du verre et l'environnement .....	43
2.9. Différents modes de transfert de chaleur .....	43
2.9.1. Transfert de Chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur .....	43
2.9.2. Transfert de chaleur entre l'absorbeur et l'environnement du Verre .....	44
2.9.3. Transfert de Chaleur entre l'Enveloppe en verre et l'environnement .....	45
2.10. Pertes Thermiques .....	46
2.10.1. Pertes par conduction .....	46
2.10.2. Pertes par Convection .....	46
2.10.3. Pertes par rayonnement .....	47
Chapitre 3 Partie expérimentale .....	49
3.1. Introduction .....	50
3.2.1. Températures .....	50
3.2.2. Rayonnement solaire .....	51
3.2.3 Réception des données .....	52
3.3. Schéma du banc d'essai .....	52
3.4. Etalonnage des thermocouples .....	53
3.4.1. Méthode et instrumentation utilisée .....	53
3.4.2. Résultat de l'étalonnage .....	54
3.5. Début de l'expérimentation .....	56
3.5.1. Etat zéro de l'installation : .....	56
3.5.2. Nouveaux paramètres .....	61

<b>3.5.3. Tests finaux.....</b>	<b>66</b>
<b>Conclusion générale et recommandations.....</b>	<b>79</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>81</b>

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre 1 Généralité

Figure 1.1 image du mouvement de la terre autour du Soleil.....	15
Figure 1.2 Graphe démontrant le Spectre du rayonnement solaire.....	16
Figure 1.3 représentation des différents paramètres des coordonnées géographiques.....	18
Figure 1.4 Représentation de la Sphère céleste et plan de l'écliptique.....	18
Figure 1.5 Schéma L'angle horaire et la déclinaison.....	19
Figure 1.6 schéma de l'angles solaire.....	20
Figure 1.7 Variations annuelles de l'équation du temps.....	20
Figure 1.8 Représentation de l'azimut du soleil.....	21
Figure 1. 9 Transmission du rayonnement.....	24
Figure 1.10 potentiel solaire mondial.....	25
Figure 1.11 Image d'un concentrateur à tour.....	26
Figure 1.12 principe de fonctionnement du concentrateur à tour.....	26
Figure 1.13 1.13 Image concentrateur parabolique.....	27
Figure 1.14 principe de fonctionnement du concentrateur parabolique.....	27
Figure 1.15 Image d'un collecteur a miroir de Fresnel.....	28
Figure 1.16 principe de fonctionnement du collecteur de Fresnel.....	28
Figure 1.17 Image d'un concentrateur cylindro parabolique.....	29
Figure 1.18 principe de fonctionnement du cylindro-parabolique.....	29
Figure 1.19 schéma du Capteur plan vitré.....	30
Figure 1.20 image d'un capteur sous vide.....	31
Chapitre 2 Étude théorique du concentrateur cylindro-parabolique	
Figure 2.1 Principe de fonctionnement du concentrateur.....	33
Figure 2.2 Position du foyer d'un concentrateur cylindro-parabolique.....	34
Figure 2.3 Dimensions d'un concentrateur cylindro- parabolique.....	35
Figure 2.4 Installation d'un capteur solaire.....	35
Figure 2.5 Montage d'un capteur cylindro- parabolique.....	36

Figure 2.6 Schéma d'un tube absorbeur.....	37
Figure 2.7 surface d'ouverture.....	38
Figure 2.8 graphe démontrant Relation entre le taux de concentration et la température du récepteur.....	39
Figure 2.9 Schéma qui représente les différents transferts de chaleur dans notre prototype.....	42
Figure 2.10 Présentation des Nœuds de notre système.....	42
<b>Chapitre 3 : Partie expérimentale</b>	
Figure 3.1 image démontrant les différents types de thermocouples et leurs intervalles.....	51
Figure 3.2 Image du thermocouple de type « J » utilisé.....	51
Figure 3.3 Image du Pyranomètre « cm6b » utilisé.....	52
Figure 3.4 image de l'Hydra Fluke ii.....	53
Figure 3.5 schéma du banc d'essai.....	53
Figure 3.6 image du thermomètre a dilatation utilisé.....	54
Figure 3.7 image du thermocouple de type « k » utilisé.....	54
Figure 3.8 sonde multimètre.....	54
Figure 3.9 Image des instruments pour l'étalonnage.....	55
Figure 3.10 prélèvement des mesures.....	55
Figure 2.11 Thermocouples en fonction de la référence 1.....	55
Figure 3.12 Thermocouples en fonction de la référence 2.....	56
Figure 3.13 Thermocouples en fonction de la référence 3.....	56
Figure 3.14 Image de l'état de base de l'installation.....	57
Figure 3.15 image de la fixation pour la partie mobile.....	58
Figure 3.16 fixation pour la partie fixe.....	58
Figure 3.17 Image du support du tube avant modification.....	58
Figure 3.18 Image démontrant que le support du tube est tordu.....	59
Figure 3.19 vanne d'arrivé d'eau.....	59
Figure 3.20 pompe.....	59
Figure 3.21 Image du bac a eau (arrivée d'eau).....	60

Figure 3.22 Image de l'installation finalisé pour les premières mesures préliminaires.....	60
Figure 3.23 Graphe des températures de sortie en fonction du temps pour les jour 4, 5 et 6.....	61
Figure 3.24 image de comparaison entre le tube de néon avant et après nettoyage.....	63
Figure 3.25 Image Tube en verre finalisé.....	63
Figure 3.26 Représentation de la nouvelle ligne focale après modification.....	63
Figure 3.27 Image de l'anneau de support du tube récepteur.....	64
Figure 3.28 Image de la nouvelle vanne de contrôle du débit.....	64
Figure 3.29 thermocouple pour la mesure de la température ambiante.....	64
Figure 3.30 Image des thermocouples pour la température de sortie et de vapeur.....	65
Figure 3.31 Image de l'installation finalisée.....	65
Figure 3.32 Image du dessus de toute l'installation finalisée.....	65
Figure 3.33 Graphe du rayonnement en fonction du temps.....	69
Figure 3.34 Graphe de la température d'entrée en fonction du temps.....	69
Figure 3.35 Graphe de la température de sortie en fonction du temps.....	70
Figure 3.36 Graphe de la température de vapeur en fonction du temps.....	70
Figure 3.37 Graphe de la puissance utile en fonction du temps.....	71
Figure 3.38 Graphe du rendement en fonction du temps.....	71
Figure 3.39 Graphe du rayonnement en fonction du temps.....	74
Figure 3.40 Graphe des températures de sortie en fonction du temps.....	74
Figure 3.41 Graphe de la puissance utile en fonction du temps.....	75
Figure 3.42 Graphe du rendement en fonction du temps.....	75
Figure 3.43 Graphe du rayonnement en fonction du temps.....	76
Figure 3.44 température de sortie en fonction du temps.....	76
Figure 3.45 puissance utile en fonction du temps.....	77
Figure 3.46 Graphe du rendement en fonction.....	77
Figure 3.47 température de sortie en utilisant l'air comme fluide.....	78

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	25
Tableau 3.1 Caractéristiques géométriques du réflecteur.....	57
Tableau 3.2 caractéristiques du tube absorbeur.....	57
Tableau 3.3 tableau des données météorologique pour les jours 4,5 et 6 (27et 26 Avril et 06 Mai).....	60
Tableau 3.4 paramètres des jours 4 ,5 et 6 (27et 26 Avril et 06 Mai).....	61
Tableau 3.5 nouveaux paramètre du récepteur.....	62
Tableau 3.6 tableau des données météorologiques des jours 7 ,8,9 et 10 (13-14-15, et 16 Mai 2019).....	66
Tableau 3.7 paramètres des jours 7,8,9 et 10 10 (13-14-15, et 16 Mai 2019).....	66
Tableau 3.8 résultats du jour 7 (13-05-2019).....	67
Tableau 3.9 résultats du jour 8 (14-05-2019).....	67
Tableau 3.10 résultats du jour 9 (15-05-2019).....	68
Tableau 3.11 résultats du jour 10 (16-05-2019).....	68
Tableau 3.12 données météorologiques des jours 11 et 12 Jour 11 et jour 12 (21 et 22 Mai 2019).....	72
Tableau 3.13 paramètres des jours 11 et 12.....	72
Tableau 3.14 résultats du jour 11 (21-05-2019).....	73
Tableau 3.15 résultats du jour 12 (22-05-2019).....	73

## Nomenclature

a	: Azimut	[degré]
alb	: Albédo du sol avoisinant.	
C	: Taux de concentrateur	
C <sub>p</sub>	: Chaleur spécifique	[j/kg.K]
D	: Rayonnement solaire diffus.	[W/m <sup>2</sup> ]
D <sub>c,h</sub>	: L'éclairement diffus par ciel clair sur une surface horizontale.	[W/m <sup>2</sup> ]
D <sub>c(i)</sub>	: L'éclairement diffus par ciel clair sur une surface d'inclinaison quelconque	[W/m <sup>2</sup> ]
D <sub>e</sub> , D <sub>i</sub>	: Diamètre extérieur et intérieur de l'absorbeur	[m]
D <sub>j</sub>	: Durée de jour.	[heure]
E	: Emittance	[W/m <sup>2</sup> ]
ET	: Equation du temps	[minute]
f	: Distance focale	[m]
F'	: Coefficient d'efficacité local de transfert eau-absorbeur	
F <sub>R</sub>	: Coefficient globale de transfert fluide-absorbeur	
F <sub>r,c</sub>	: Facteur de forme entre le récepteur et le couvert, qui est égal à 1	
G <sub>h</sub>	: L'éclairement global reçu par la même surface.	[W/m <sup>2</sup> ]
h	: Hauteur angulaire solaire	[degré]
h <sub>fi</sub>	: Coefficient de transfert de chaleur à l'intérieur de l'absorbeur	[W/m <sup>2</sup> °C]
h <sub>r,c-a</sub>	: Coefficient de transfert couver- absorbeur par rayonnement.	[W/m <sup>2</sup> °C]
h <sub>r,a-c</sub>	: Coefficient de transfert absorbeur-couver par rayonnement.	[W/m <sup>2</sup> °C]
h <sub>v</sub>	: Coefficient d'échange du au vent.	[W/m <sup>2</sup> °C]
I	: Eclairement solaire direct	[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>C</sub>	: L'énergie reçue à l'ouverture de concentrateur.	[W]
I <sub>h</sub>	: Le rayonnement direct reçu sur une surface horizontale.	[W/m <sup>2</sup> ]
K	: Conductivité thermique	[W/m °C]
L	: Longitude du lieu	[degré]
Ḣ	: Débit massique.	[kg/s]

$n$	: Nombre de jour.	
$Q_{conv}$	: Perte de transfert par convection	[W]
$Q_{ray}$	: Perte de transfert par rayonnement	[W]
$Q_{cond}$	: Perte de transfert par conduction	[W]
$r$	: Rayon du cylindro- parabolique	[m]
$S_c$	: Surface d'ouverture du concentrateur	[m <sup>2</sup> ]
$S_r$	: Surface de l'absorbeur (récepteur)	[m <sup>2</sup> ]
$T$	: Température moyenne irradiation.	[°C]
$T_a$	: Température ambiante.	[°C]
$T_{abs}$	: Température de l'absorbeur	[°C]
$T_c$	: Température de concentration.	[°C]
$T_e$	: Température d'entrée du fluide.	[°C]
$TCF$	: Temps civile du fuseau horaire	[heure]
$TL$	: Temps local (légale)	[heure]
$T_s$	: Température de sortie du fluide Caloporteur	[°C]
$TSV$	: Temps solaire vrai	[heure]
$TSM$	: Temps solaire moyen	[heure]
$TU$	: Le temps universel	[heure]
$U_L$	: Coefficient des pertes thermiques	[W/m <sup>2</sup> °C]
$w$	: Ouverture du concentrateur	[m]
$\sigma$	: Coefficient de Stefan-Boltzmann (5,667 x 10 <sup>7</sup> ; W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	
$\omega$	: Angle horaire.	[degré]
$\phi$	: La latitude du lieu.	[degré]
$\delta$	: Déclinaison solaire.	[degré]
$\beta$	: L'angle d'inclinaison	[degré]
$\varphi$	: Angle d'ouverture du concentrateur	[degré]
$\alpha$	: Facteur d'absorption.	
$T_\alpha$	: Coefficient transmission-absorption.	
$\tau$	: Facteur de transmission.	
$\rho$	: Facteur de réflexion du miroir du concentrateur.	

$\gamma$  : Facteur optique du collecteur.  
 $\varepsilon_c$  : Émissivité de verre du couvert.  
 $\varepsilon_r$  : Émissivité de la surface de l'absorbeur  
 $\eta$  : Rendement du concentrateur.

Nombres adimensionnels :

$Re$  : Nombre de Reynolds.

$Pr$  : Nombre de Prandtl.

$Nu$  : Nombre de Nusselt

## Introduction générale

De nos jours, une importance particulière est accordée aux énergies nouvelles et renouvelables. Cet intérêt est dû d'une part à la croissance accrue de la demande mondiale en énergie conventionnelle et ses problèmes d'approvisionnement, et d'autre part, au coût élevé de cette dernière et la pollution qu'elle provoque.

De ce fait, apparaît l'énergie solaire comme étant l'énergie de l'avenir. Elle a un grand rôle dans la transition énergétique

L'un des avantages de cette énergie est son aptitude à la transformation en chaleur par l'intermédiaire d'un fluide (eau, air, huile) circulant au contact d'une surface recevant le rayonnement solaire. Le capteur constitue l'effecteur dans le système technique assurant cette transformation. Pour la collecte de l'énergie solaire on distingue deux techniques. La première est le capteur plan utilisé pour la conversion de l'énergie solaire incidente en énergie thermique directement utilisable. Cependant, le domaine d'application et d'utilisation de ce type de capteurs est très restreint. Il présente en outre un certain nombre d'inconvénients et les constructeurs ont été amenés à concevoir d'autres modèles de configuration plus rentables utilisant le principe de concentration.

Le concentrateur solaire cylindro-parabolique est l'un des concentrateurs les plus utilisés au monde vu les performances élevées qu'il propose, ce dernier se présente comme un module ayant un réflecteur de forme cylindro-parabolique, cette géométrie lui permet de focaliser l'énergie solaire incidente, sur une ligne focale réfléchissante sur le tube absorbeur.

L'objectif de ce travail est de faire une étude expérimentale et une optimisation d'un concentrateur cylindro-parabolique ayant ensuite pour but d'alimenter un four stérilisateur

# **CHAPITRE 1**

## **Généralités sur l'énergie solaire thermique**

## 1.1. Introduction

Les énergies renouvelables correspondent à des sources d'énergie qui sont non seulement issues de phénomènes naturels, mais qui se régénèrent également par elles-mêmes, à l'aide de processus naturels indépendants des humains.

Le soleil et la chaleur interne de la Terre font partie des sources d'énergie naturelles les plus importantes, le fait qu'une ressource soit renouvelable ou non dépend aussi de la vitesse à laquelle celle-ci est consommée. Prenons par exemple, le bois, tant que le nombre d'arbres coupés n'excède pas le nombre d'arbres qui poussent, le bois peut être considéré comme étant une ressource renouvelable, la question n'est donc pas seulement d'utiliser des énergies vertes, mais aussi de ne pas consommer l'énergie de façon abusive.

## 1.2. Constante Solaire

La constante solaire exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de  $1 \text{ m}^2$  située à une distance de  $1,47 \cdot 10^8 \text{ km}$  (distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère.

Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère, sur Terre cette distance a une faible variation au cours de l'année, compte tenu de la légère anomalie de l'orbite terrestre qui est d'environ 1,7%.

La constante solaire est une valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à  $1367 \text{ W/m}^2$ . [1]

## 1.3. Translation et Rotation de la Terre

Le nombre de rotations de la Terre sur elle-même est de 365,2425 par an environ, soit 366,2425 jours sidéraux (rotation par rapport au système de référence céleste). Comme la Terre n'est pas rigoureusement un solide massif indéformable, le concept de vitesse de rotation angulaire doit être soigneusement défini par des géodésiens et des astronomes, puis mesuré. Ce service est effectué par l'IERS (*International Earth Rotation Service*), qui met en ligne toutes les données connues.

La vitesse de rotation oscille de manière irrégulière, dans la période de rotation (longueur du jour), on observe principalement une variation saisonnière d'environ 1 millième de seconde (ms) et des changements décennaux (entre 10 et 70 ans) de l'ordre de 5 ms. De plus, les actions du soleil et de la Lune, sur le soulèvement de la marée produisent un couple retardateur qui induit une augmentation séculaire de la durée du jour d'environ 2 ms/siècle et un éloignement de la Lune de 3,84 cm/an.

Par rapport aux étoiles l'axe de rotation balaye en 25 800 ans un cône axé sur les pôles du plan de l'écliptique (l'axe perpendiculaire à l'orbite terrestre), dont le demi-angle au sommet - l'obliquité de l'écliptique - vaut environ  $23^\circ 26'$ . À ce mouvement, la précession, se superpose de petites oscillations périodiques, les nutations, dont la principale, en 18,6 ans, a une amplitude de  $20''$ , la précession-nutation est provoquée par l'action gravitationnelle conjointe de la Lune et du Soleil sur le bourrelet équatorial de la Terre, et de ce fait l'objet de modèles relativement précis, donnant la position spatiale de l'axe de rotation à la milliseconde de degré près.

On peut dissocier les mouvements de la terre en considérant séparément le mouvement par rapport au centre de masse (rotation) et le mouvement de ce centre de masse par rapport à lui-même (déplacement).

- Rotation de la Terre:

En un jour, la terre effectue une rotation complète d'Ouest en Est autour de son axe ; c'est la base du système horaire, de cette rotation découle la succession des jours et des nuits.

- Revolution de la Terre:

La terre accomplit un tour entier autour du soleil en 365,25 jours suivant une orbite elliptique, tant que la vitesse moyenne de ce mouvement est d'environ 30 km/s. La distance entre les centres de ces deux astres change d'une grandeur minimale au Périhélie ( $1,47 \cdot 10^6$  km), aux environs du 2 janvier, à une grandeur maximale, à l'Aphélie ( $1,52 \cdot 10^6$  km), aux environs du 3 juillet, la valeur moyenne étant appelée unité astronomique (UA). Les mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil son distingué dans la figure 1.1. [2]

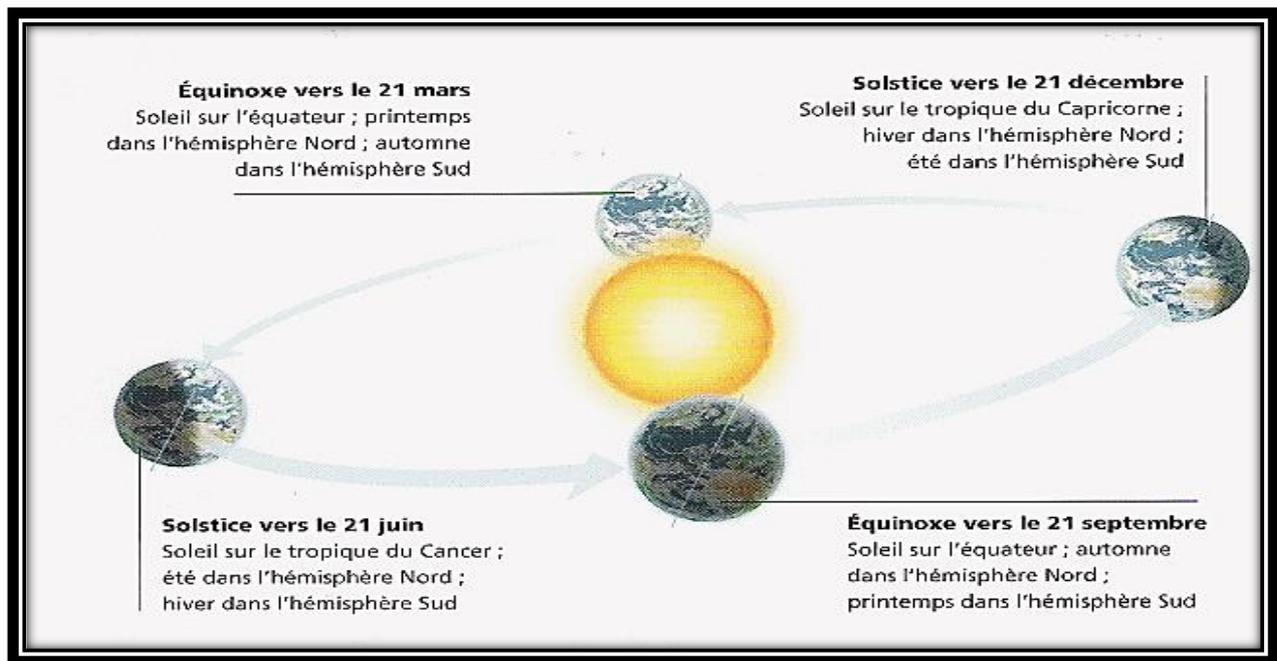


Figure 1.1 image du mouvement de la terre autour du Soleil [image provenant de liberation.fr]

## 1.4. Le spectre solaire

On appelle émittance énergétique  $E$  (en un point d'une surface) le quotient du flux énergétique émis par un élément de surface par l'aire de cet élément :

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.1)$$

L'émittance énergétique monochromatique  $E_\lambda$  est l'émittance énergétique de radiation comprise entre  $\lambda$  et  $\lambda+d\lambda$  ou  $d\lambda$  est un infiniment petit positif, tel que

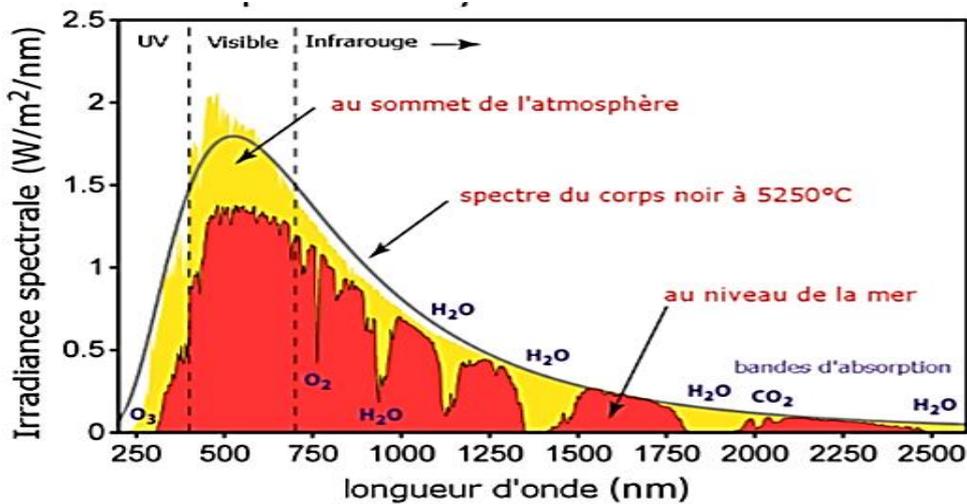


Figure 1.2 Graphe démontrant le Spectre du rayonnement solaire [2]

On remarque que L'émission d'ondes électromagnétiques par le Soleil est bien modélisée par un corps noir à 5800 Kelvin, donc par la loi de Planck. Le pic d'émission est dans le jaune ( $\lambda=570$  nm), et la répartition du rayonnement est à peu près pour moitié dans la lumière visible, pour moitié dans l'infrarouge, avec 1% d'ultraviolets.

Arrivé au niveau de la mer, c'est-à-dire ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire a subi plusieurs « filtrations ». On peut repérer notamment sur le spectre ci-contre les bandes d'absorption de l'ozone (connu pour stopper une bonne partie des ultraviolets), du dioxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau. [2]

### 1.5. Rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère

L'émission de rayonnement électromagnétique du soleil s'énonce par une puissance moyenne de 1367 W/m<sup>2</sup>. Dans un plan perpendiculaire au rayonnement, qui varie de  $\pm 3,4\%$  environ au cours de l'année. (365jrs), Le calcul du rayonnement extraterrestre peut être accompli par la formule approximative Suivante : [3]

$$I = I_{sc} \left[ 1 + 0,034 \cos \left( \frac{360n}{365,25} \right) \right] \quad (1.2)$$

### 1.6. La position du soleil

En effet, la position du soleil varie constamment, à la fois pendant la journée, mais aussi pendant les différentes périodes de l'année. Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie est liée à l'orientation de la surface réceptrice. Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est fondamentale.

#### 1.6.1. Les coordonnées géographiques terrestres

On entend la latitude, la longitude et le niveau de la mer. Pour se repérer à la surface de la planète, on peut utiliser un autre système appelé « repères cartographiques ».

Pour se localiser sur la terre, il est nécessaire d'utiliser un système géodésique du quel découlent les coordonnées géographiques suivantes [4] :

### **A\Latitude $\varnothing$ :**

C'est une mesure angulaire s'étendant de  $0^\circ$  à l'équateur à  $90^\circ$  aux pôles ; l'expression du positionnement nord-sud d'un point sur terre. Ce plan coupe la surface terrestre suivant un cercle approximatif (les irrégularités du cercle sont liées aux variations d'altitude), sauf aux pôles où ce cercle se réduit à un point.

Plus la latitude s'écarte de  $0^\circ$ , plus on s'éloigne du plan de l'équateur, cependant la latitude n'est pas une mesure proportionnelle à la distance entre les deux plans, mais proportionnelle à la distance la plus courte pour rejoindre l'équateur en parcourant la surface terrestre soit vers le nord géographique soit vers le sud géographique. En effet, la distance au plan de l'équateur ne varie pratiquement pas près des pôles même si la latitude varie beaucoup, au contraire des plans de latitude près de l'équateur où la variation de la distance inter-plan est maximale. [4]

### **B\Longitude $\lambda$ :**

La longitude est une valeur angulaire c'est l'expression du positionnement est-ouest d'un point sur Terre. Tous les lieux situés à la même longitude forment un demi-plan limité par l'axe des pôles géographiques, coupant la surface de la terre sur un demi-cercle approximatif dont le centre est le centre de la Terre, l'arc allant d'un pôle à l'autre. Un tel demi-cercle est appelé méridien. [4]

À la différence de la latitude (position nord-sud) qui bénéficie de l'équateur et des pôles comme références, aucune référence naturelle n'existe pour la longitude.

La longitude est donc une mesure angulaire sur  $360^\circ$  par rapport à un méridien de référence, avec une étendue de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ , ou respectivement de  $180^\circ$  ouest à  $180^\circ$  est.

### **C\Méridien**

C'est un demi grand cercle imaginaire tracé sur le globe terrestre reliant les pôles géographiques. Tous les points de la Terre situés sur un même méridien ont la même longitude. On parle également d'arc de méridien entre deux latitudes.

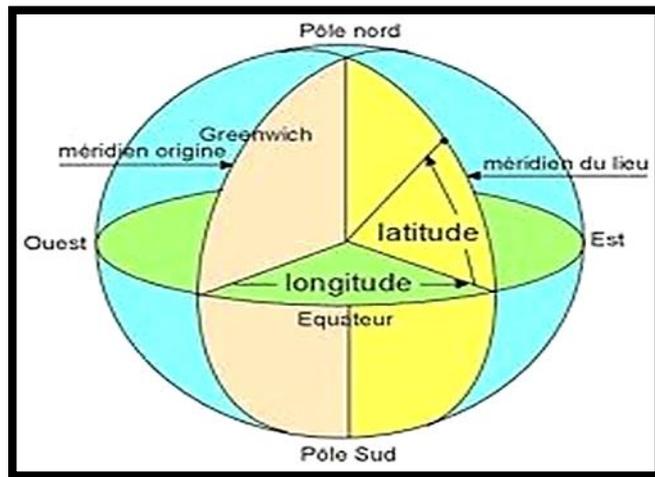


Figure 1.3 Représentation des différents paramètres des coordonnées géographiques [4]

### 1.6.2. Déclinaison du soleil $\delta$

Le plan de l'orbite terrestre autour du soleil s'appelle plan de l'écliptique. La Terre tourne elle-même autour de l'axe polaire, qui est incliné à  $23,5^\circ$  par rapport à la perpendiculaire avec le plan de l'écliptique tout au long de l'année. La rotation de la Terre autour de son axe provoque les variations diurnes du rayonnement. La position de l'axe par rapport au soleil est la cause des variations saisonnières du rayonnement solaire. L'angle entre la ligne qui relie les centres du soleil et de la Terre d'une part et le plan équatorial d'autre part change constamment. Cet angle est appelé déclinaison solaire. Pour le solstice d'hiver (22 décembre), il est de  $-23,5^\circ$  alors que pour le solstice d'été (22 juin) la déclinaison est de  $+23,5^\circ$ . [4]

$$\delta = 23,45 \sin \left( 2\pi \frac{284+n}{365} \right) \quad (1.3)$$

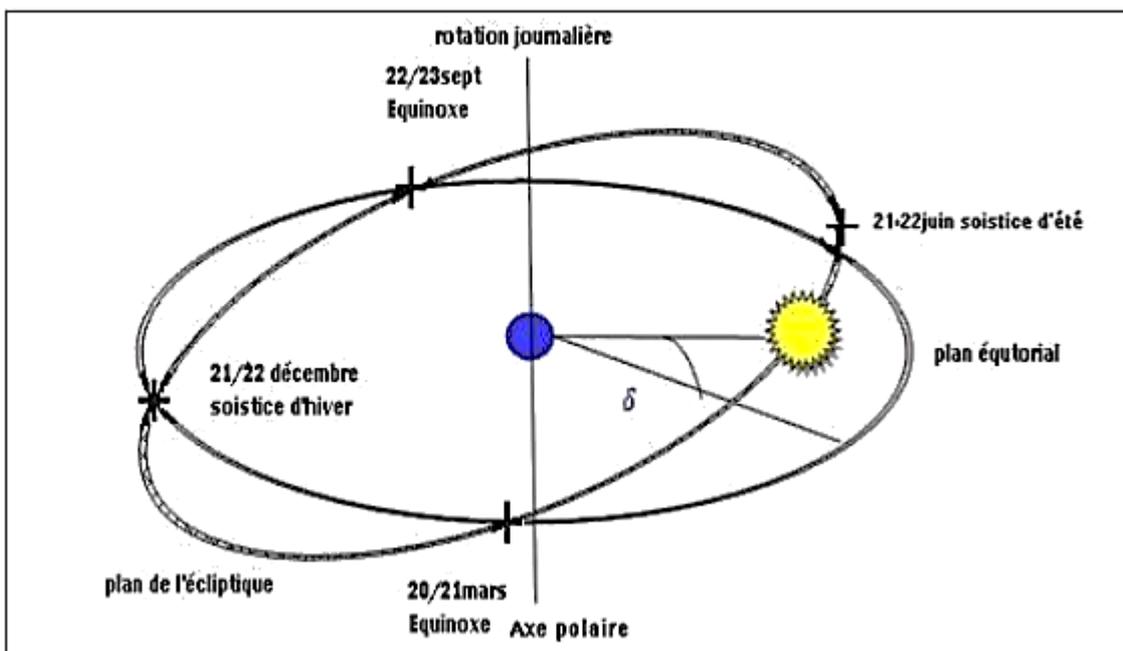


Figure 1.4 Représentation de la Sphère céleste et plan de l'écliptique [5]

### 1.6.3. Le temps solaire vrai et l'angle horaire du soleil

La notion du temps solaire vrai TSV a une liaison avec l'angle solide  $\omega$ , qui représente l'arc compris entre le rayonnement solaire incident et le plan méridien du lieu. Cet angle augmente de quinze degrés ( $15^\circ$ ) par heure. La valeur zéro degré ( $0^\circ$ ) est atteinte au passage du soleil à la verticale (zénith) du plan méridien (midi solaire vrai = 12 h TSV). [1]

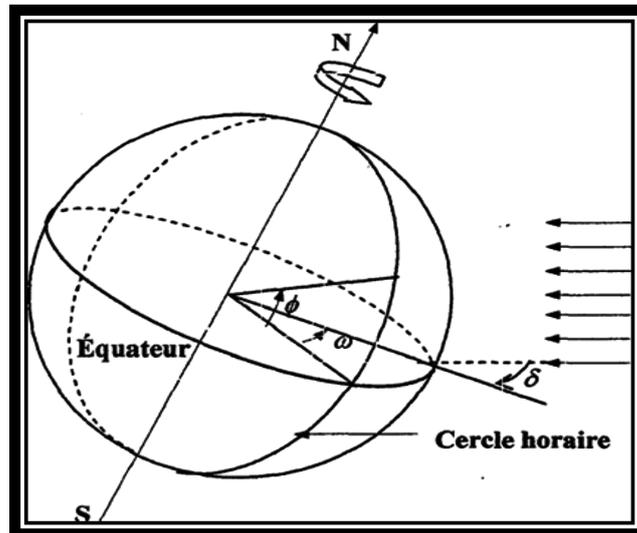


Figure 1.5 Schéma L'angle horaire et la déclinaison [1]

L'angle horaire est compté négativement avant midi TSV, et positivement après-midi.

La relation directe entre TSV et l'angle horaire  $\omega$  du soleil est donnée par :

$$\omega = 15^\circ(TSV - 12) \quad (1.4)$$

Où  $\omega$  est mesuré en degrés et TSV en heures.

#### ➤ Le temps solaire moyen TSM

Le temps solaire moyen est basé sur un soleil moyen fictif qui se déplacerait à vitesse constante tout au long de l'année. Cette moyenne est de 24 heures

Il est défini par les coordonnées angulaires d'un soleil fictif qui serait animé d'une vitesse constante sur l'Ecliptique. [1]

#### ➤ Le temps solaire vrai TSV

C'est une mesure du temps basée sur la définition du midi solaire : c'est l'instant où le Soleil atteint son point de culmination, en un endroit donné de la Terre, il est défini par les différentes coordonnées angulaires du soleil. Il est lié au temps solaire moyen TSM par l'équation du temps ET avec un maximum de 16 minutes. [2]

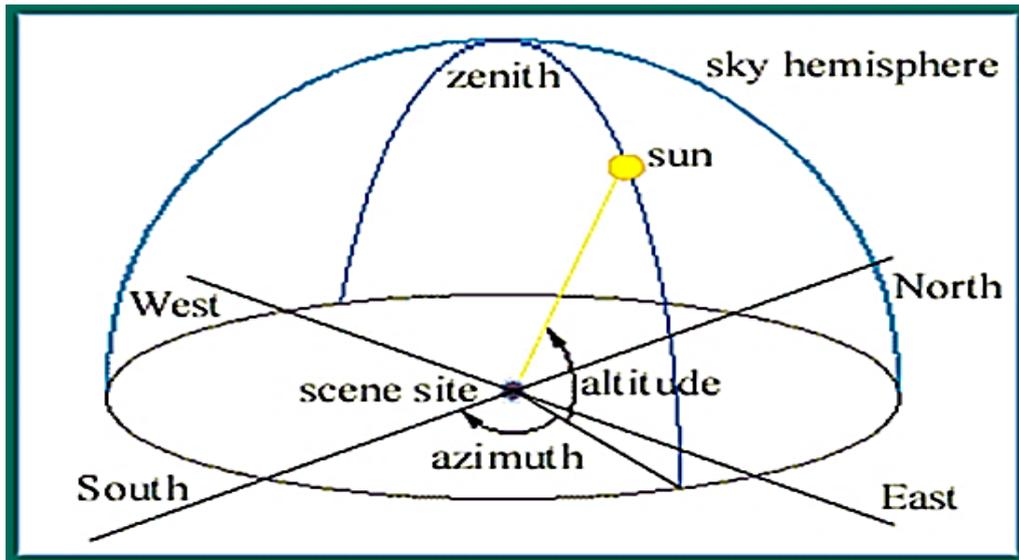


Figure 1.6 schéma de l'angles solaire [2]

#### 1.6.4. L'équation du temps ET

C'est l'écart entre le temps solaire moyen TSM et le temps solaire vrai TSV selon le jour de l'année considéré [1]

$$ET = TSV - TSM \quad (1.5)$$

La **figure 1.7** montre la variation de ET durant l'année donnée par la formule suivante :

$$ET = 0.258 \cos x - 7.416 \sin x - 3.648 \cos 2x - 9.228 \sin 2x \quad (1.6)$$

Avec :

$$x = \frac{360(N-1)}{365.25}$$

Où l'angle x est défini en fonction du numéro du jour n. Le décompte commence à partir du 1er janvier où n=1.

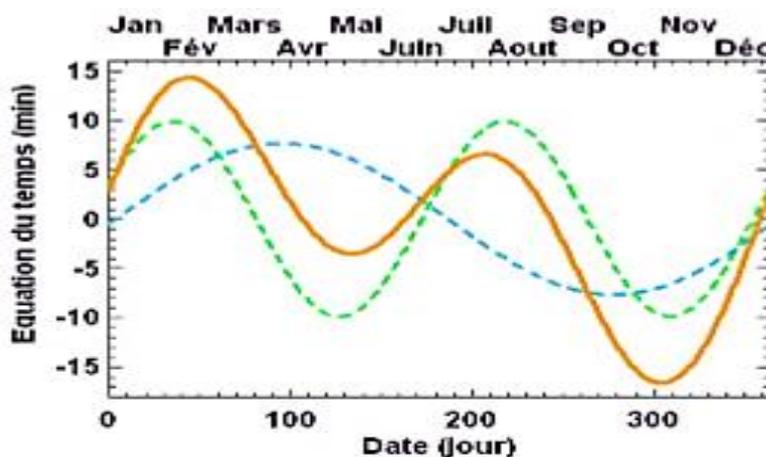


Figure 1.7 Variations annuelles de l'équation du temps [1]

### 1.6.5. Hauteur angulaire du soleil h

C'est l'angle qui est formé par le plan horizontal du lieu d'observation avec la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de 0° (soleil à l'horizon) à 90° (soleil au zénith). La hauteur angulaire du soleil h est alors donnée par :

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (1.7)$$

### 1.6.6 Azimut du soleil a

C'est l'angle formé par le plan méridien d'un lieu avec un plan vertical situé en ce lieu. La connaissance de l'azimut est essentielle pour déterminer l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale, l'azimut ne correspond nul à la direction sud [4]

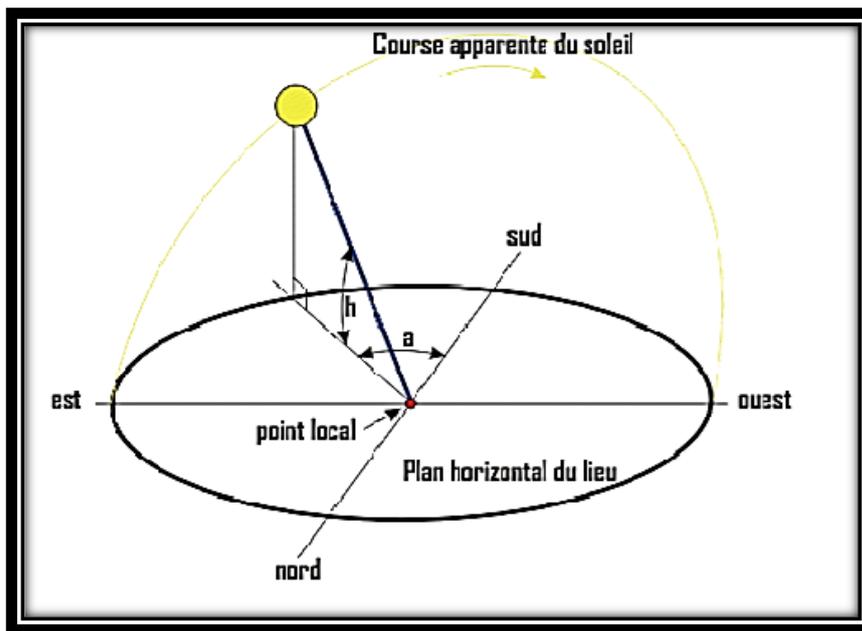


Figure 1.8 Représentation de l'azimut du soleil [4]

L'azimut a est défini par les relations suivantes :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (1.8)$$

Où

$$\cos a = \frac{\sin \phi \sin h - \sin \delta}{\cos \phi \cos h} \quad (1.9)$$

Ou bien

$$\cos a = \frac{\sin \phi \cos \delta \cos \omega - \cos \phi \sin \delta}{\cos h} \quad (1.10)$$

### 1.6.7. Durée du jour [5]

On peut déduire les heures de lever et de coucher du soleil à partir de la hauteur angulaire du soleil en posant  $\sin h = 0$  (soleil à l'horizon) dans l'équation (1.11).

Ce qui donne :

$$\cos \gamma = \cosh \sin i \cos(a-\alpha) + \sinh \cos i \quad (1.11)$$

$$\cos \omega_1 = -\tan \phi \tan \delta \quad (1.12)$$

Où  $\omega_1$  est l'angle horaire du soleil à son lever (et, au signe près, à son coucher). La durée du jour est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$dj = \omega_c - \omega_1 \quad (1.13)$$

En intégrant (1.12) dans (1.13), on obtient :

$$dj = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (1.14)$$

### 1.6.8 Décalage horaires

Les relations se rapportant au mouvement du Soleil utilisent le temps solaire TS qui diffère généralement du temps légal TL (heure des montres) du lieu considéré. Cette différence est liée à :

- La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF correspondant au fuseau horaire adopté par le pays :

$$C = TL - TCF \quad (1.15)$$

- L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire méridien De Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire fixé. [1]

## 1.7. Modèles pour le rayonnement solaire

### 1.7.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est défini comme étant le rayonnement provenant au sol sous un angle solide limité au seul disque solaire sans aucun intermédiaire et reçu sur une surface normale à l'axe de cet angle solide. [5]

La composante directe du rayonnement solaire est donnée par les expressions empiriques suivantes :

➤ Equation pour un ciel clair :

$$I = 1230 \exp \cdot \left[ \frac{-1}{3,8 \cdot \sin(h+1,6)} \right] \quad (1.16)$$

➤ Equation pour un ciel très clair :

$$I = 1210 \exp \cdot \left[ \frac{-1}{6 \cdot \sin (h+1)} \right] \quad (1.17)$$

➤ Equation pour un ciel pollué (zone industrielle) :

$$I = 1260 \exp \cdot \left[ \frac{-1}{2,3 \cdot \sin (h+3)} \right] \quad (1.18)$$

### 1.7.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus, issu du ciel, à l'exception du disque solaire et du sol, est beaucoup plus difficile à analyser. Tout d'abord, le sol réfléchi en moyenne le tiers du rayonnement qu'il reçoit et il faut tenir compte également de la diffusion de ce rayonnement réfléchi.

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et

Peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.

Les expressions empiriques permettant d'estimer le composant du rayonnement Solaire diffus sont ci-dessous [5] :

#### A\Part du ciel :

- part du ciel sur une surface horizontale :

Par un ciel clair :

$$D_{c,h} = 125 \cdot (\sin h)^{0,4} \quad (1.19)$$

Par un ciel très clair, on multiplie cette dernière expression par 3/4, et si le ciel est couvert, on la multiplie par 4/3.

- Part du ciel sur une surface d'inclinaison quelconque :

$$D_c(i) = D_{c,h} \frac{1 + \cos i}{2} \quad (1.20)$$

#### B\Part du sol :

$$D_c(i) = \text{alb} \cdot \frac{1 - \cos i}{2} \quad (1.21)$$

$$G_h = I_h + D_h = I_{dir} \cdot \sin h + D_h \quad (1.22)$$

### 1.7.3. L'albédo

C'est la partie réfléchié par le sol. Elle dépend de l'environnement du site.

La neige par exemple renvoie énormément de rayons solaires alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur un plan incliné.

On définit l'albédo comme le rapport réfléchi au sol par une surface et l'énergie incident par le soleil.

[17]

### 1.7.4. Le rayonnement global

C'est tout simplement la somme de ces diverses contributions (direct + diffus + albédo) comme la montre la figure ci-dessous :

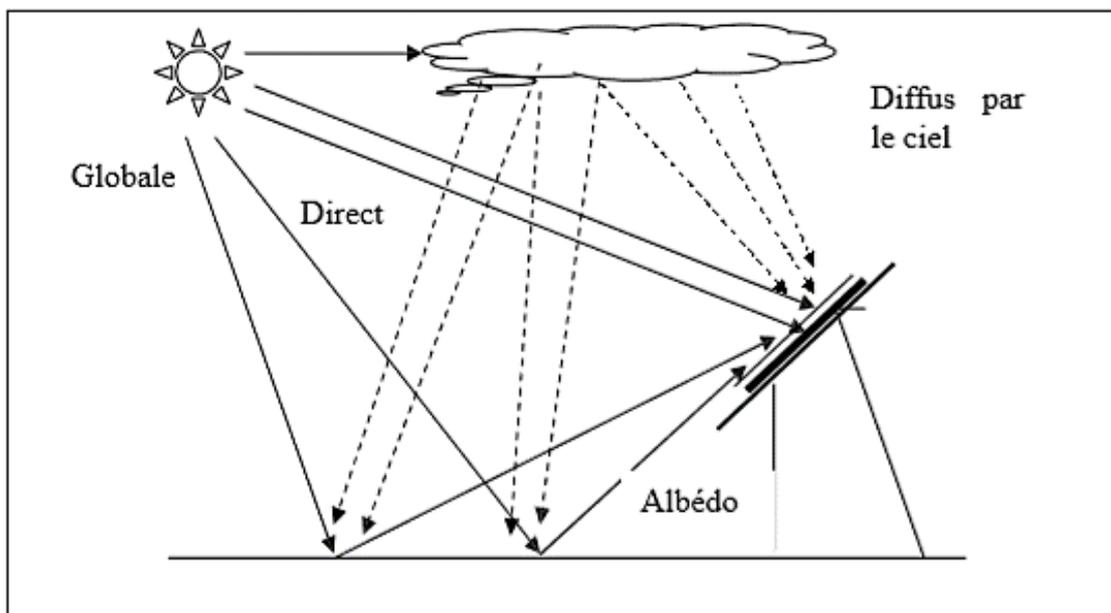


Figure 1. 9 Transmission du rayonnement [5]

## 1.8. Le potentiel, les ressources

Les zones les plus favorables à l'utilisation de l'énergie solaire concentrée sont celles où l'ensoleillement direct est supérieur à 1900 kWh/m<sup>2</sup>/an. Les régions adaptées sont très nombreuses et recèlent un potentiel très important. Elles se situent principalement en Afrique du Nord et septentrionale, au Proche et Moyen-Orient, en Australie, dans le sud-ouest des États-Unis, en Inde ou encore en Asie centrale. [18]

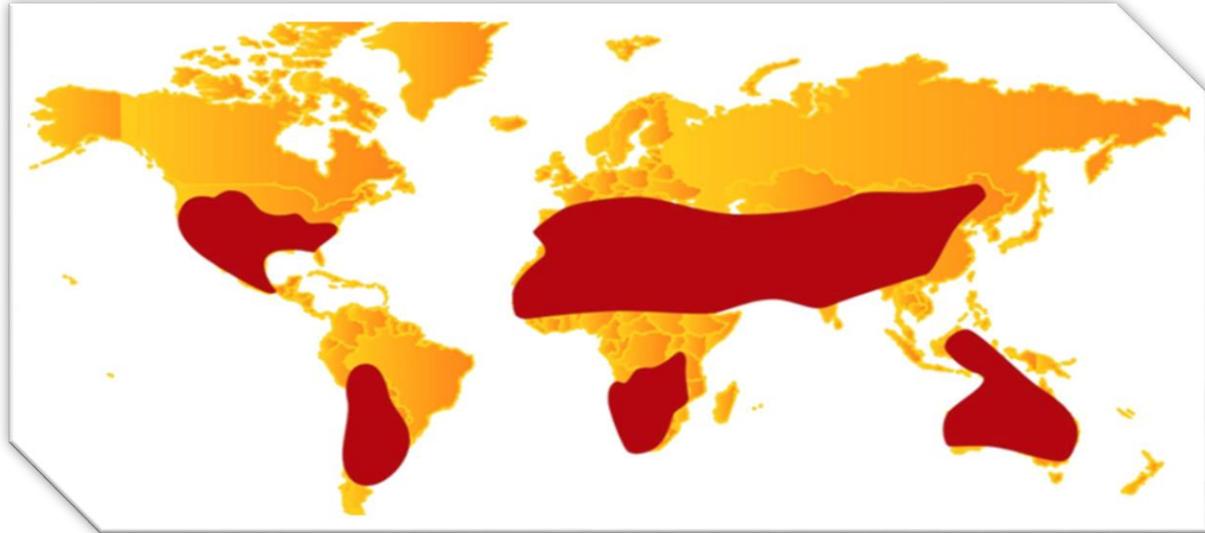


Figure 1.10 potentiel solaire mondial [18]

### 1.9. Potentiel en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays. [19]

Tableau 2.1Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [19]

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue	1700	1900	2650

### 1.10. Conversion thermique de l'énergie solaire

Une des manifestations les plus évidentes du rayonnement solaire est la chaleur qu'il apporte. Le solaire thermodynamique est l'une des valorisations du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température (de l'ordre de 250 à 1 000°C).

Il devient alors envisageable de les utiliser dans des processus industriels comme la génération d'électricité, D'autres utilisations directes ou indirectes des fluides chauds sont possibles comme le dessalement de l'eau de mer, le refroidissement ou encore la génération d'hydrogène.

Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent une grande variété de systèmes disponibles tant au niveau de la concentration du rayonnement, du choix des fluides caloporteur et thermodynamique ou du mode de stockage.

## 1.11. Les différents types de concentrateur [18]

### 1.11.1. Les concentrateurs ponctuels :

#### A) concentrateur à tour :(fixe)

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 ° C à 1000 ° C. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée au fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines.

Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité.

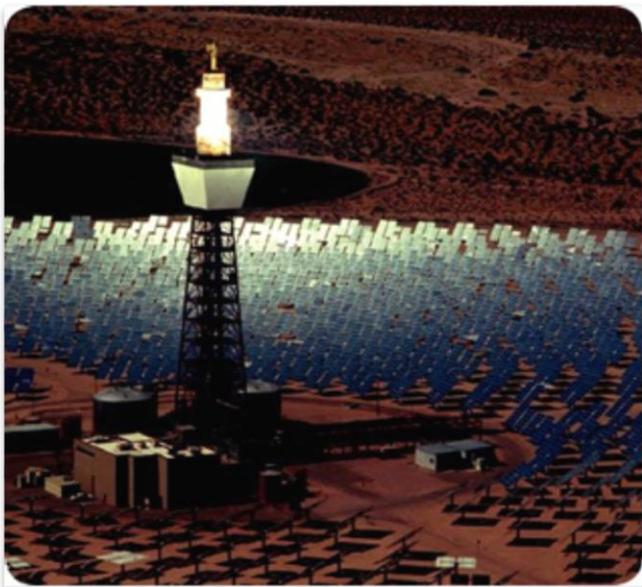


Figure 1.11 Image d'un concentrateur à tour

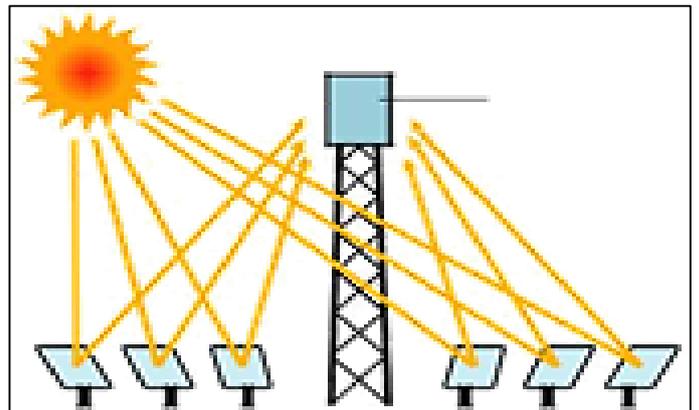


Figure 1.12 principe de fonctionnement du concentrateur à tour

#### Avantages :

- Source d'énergie inépuisable et gratuite
- Pas d'émission polluante
- Permet de valoriser des zones désertiques

#### Inconvénients :

- Nécessite un fort ensoleillement
- Surface au sol importante
- Investissement lourd

## B) concentrateur parabolique : (mobile)

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes afin de réfléchir et de concentrer les rayons du soleil vers un point de convergence appelé foyer. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui est monté en température sous l'effet de la concentration. Cela entraîne un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité. Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000 °C.



Figure 1.13 Image concentrateur parabolique

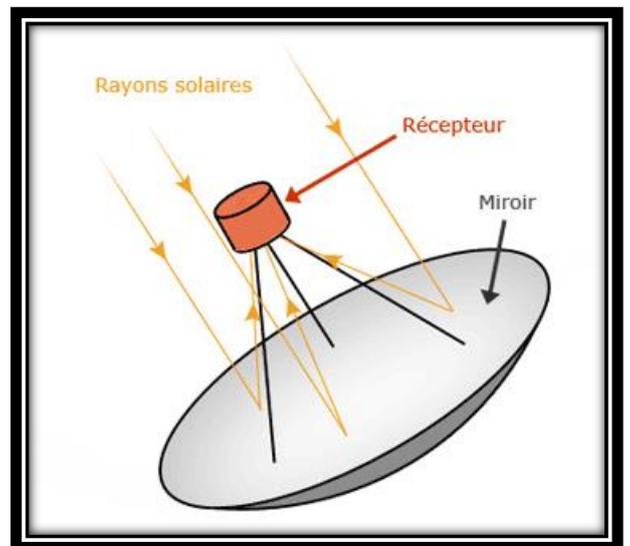


Figure 1.14 principe de fonctionnement du concentrateur parabolique

### Avantages :

- Modulaire
- Pas d'émissions polluantes
- Bon rendement
- Petites unités indépendantes
- Peuvent être installés dans des endroits isolés

### Inconvénients :

- Fonctionnement par intermittence
- Stockage impossible

## 1.11.2.les concentrateurs linéaires

### A\collecteur Fresnel linéaire : (fixe)

Le principe d'un concentrateur de Fresnel réside dans ses miroirs plans (plats) dits "réflecteurs compacts linéaires".

Chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube absorbeur.

Principal avantage de cette technologie, les miroirs plats sont bien meilleur marché que les miroirs paraboliques.



Figure 1.15 Image d'un collecteur a miroir de Fresnel

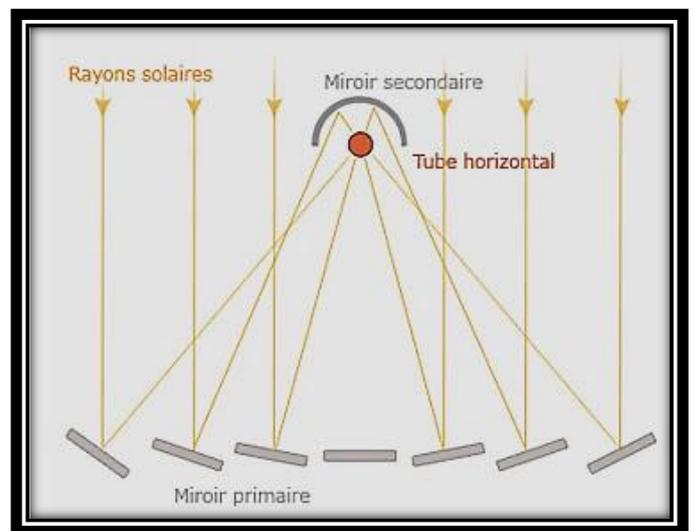


Figure 1.16 principe de fonctionnement du collecteur de Fresnel

### Avantages :

- Les miroirs plans sont plus simples à fabriquer et meilleur marché que les paraboliques et cylindro-paraboliques.
- Moins de prise au vent, infrastructure moins importante qu'une centrale à capteurs cylindro-paraboliques.

### Inconvénients :

- Performances optiques inférieures d'environ 30% par rapport aux réflecteurs paraboliques et cylindro-paraboliques.
- Investissement lourd

## B) concentrateur cylindro-parabolique : (mobile)

Il est constitué d'un long miroir (généralement recouvert d'un plaquage en argent ou en aluminium poli), rectangulaire, en forme de cylindre parabolique, complété par un tube à double enveloppe sous vide (tube Dewar) qui court sur toute sa longueur le long de la droite focale.

Les rayons solaires sont reflétés par le miroir pour converger sur le tube Dewar.

L'alignement des panneaux peut être :

- Statique selon un axe primaire nord-sud et pivotant dans le plan perpendiculaire correspondant, de façon à suivre un plan de la course elliptique du Soleil au cours de la journée.
  - Alignée selon un axe est-ouest. Dans ce cas l'efficacité du collecteur est diminuée en proportion du décalage angulaire conjugué, Dans cette configuration, on corrige l'orientation beaucoup plus occasionnellement, selon une cadence saisonnière et non pas quotidienne. Ce type de configuration ne produit son rendement optimal qu'aux dates d'équinoxe de printemps et d'automne, la déviance de focale s'accroissant progressivement dans l'intervalle, et variant également de manière constante au cours de la journée, avec un minima à l'heure du zénith.



Figure 1.17 Image d'un concentrateur cylindro parabolique

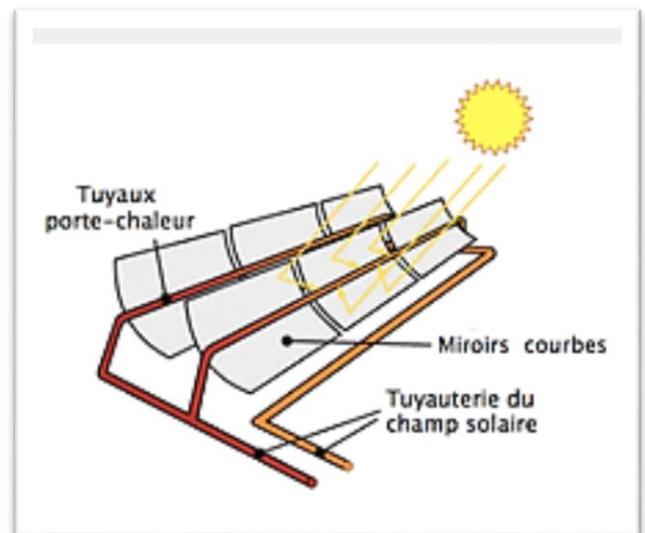


Figure 1.18 principe de fonctionnement du cylindro-parabolique

# **Chapitre 2**

## **étude théorique d'un concentrateur cylindro-parabolique**

## 2.1. Introduction

Dans cette partie nous allons étudier théoriquement le fonctionnement d'un concentrateur cylindro-parabolique, en passant par tous les points importants du principe de fonctionnement jusqu'au équations qui régissent une telle installation

## 2.2. Principe de fonctionnement

Le capteur solaire a concentration cylindro-parabolique qui est l'objet de notre étude a pour but de concentrer et transformer l'énergie solaire incidente en énergie thermique extraite Par le fluide qui s'écoule dans le tube de l'absorbeur. Ce qui permet d'atteindre des températures élevées, le fluide caloporteur refroidit l'absorbeur en emportant la chaleur utile qui est ensuite convertie ou transférée pour différents usages, le flux solaire reçu par le capteur est d'abord réfléchi sur la surface du concentrateur, puis il traverse généralement un vitrage destiné à isoler thermiquement le foyer où il est absorbé par une surface appropriée. La composante directe du rayonnement solaire peut être dirigée vers le foyer, mais les composantes diffuses ne pouvant être concentrée.

L'absorbeur s'échauffe et perd de la chaleur vers l'extérieur sous forme de rayonnement et de convection. Cette perte peut être caractérisée par un coefficient de pertes thermiques.

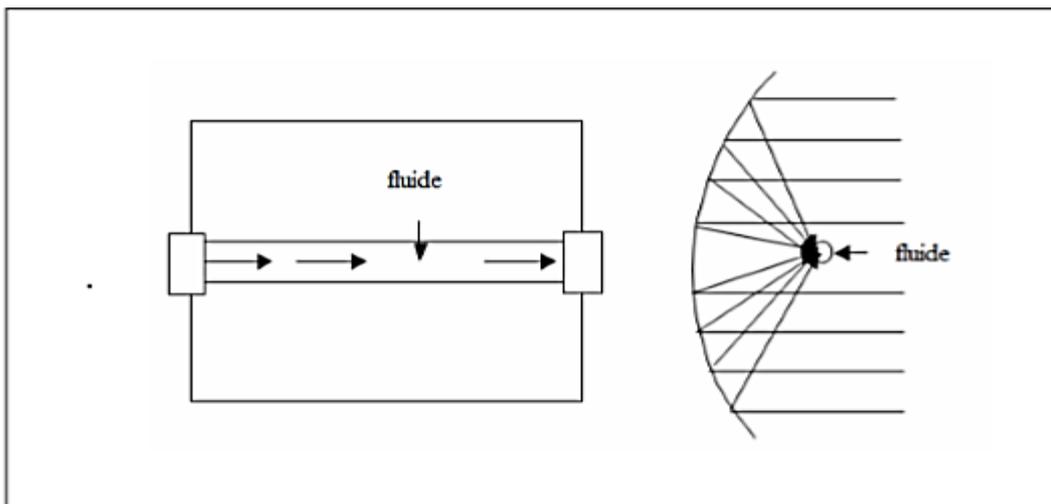


Figure 2.1 : Principe de fonctionnement du concentrateur [12]

## 2.3. Caractéristiques d'un concentrateur cylindro-parabolique :

Le concentrateur cylindro-parabolique est l'un des meilleurs capteurs pour la production de la vapeur d'eau à hautes températures qui peut être obtenue sans altération du rendement. Il se construit par un réflecteur (miroir ou matériau réfléchissant) de forme cylindro- parabolique. Cette géométrie permet de focaliser l'énergie solaire incidente selon une génératrice linéaire où est placé un tube absorbeur dans lequel circule un fluide caloporteur.

Pour augmenter le principe de captation ainsi que le processus de transfert de chaleur, on a généralement recours à des surfaces sélectives, une enveloppe transparente souvent en verre recouvre le tube absorbeur afin de réduire les pertes thermiques par rayonnement par conduction et par convection vers l'extérieur. Pour un (CCP) l'équation géométrique, en coordonnées cartésiennes, s'écrit [10] :

$$X^2 = 4. F. Y \quad (2.1)$$

Et en coordonnées polaire, elle s'écrit :

$$r = \frac{F}{\cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (2.2)$$

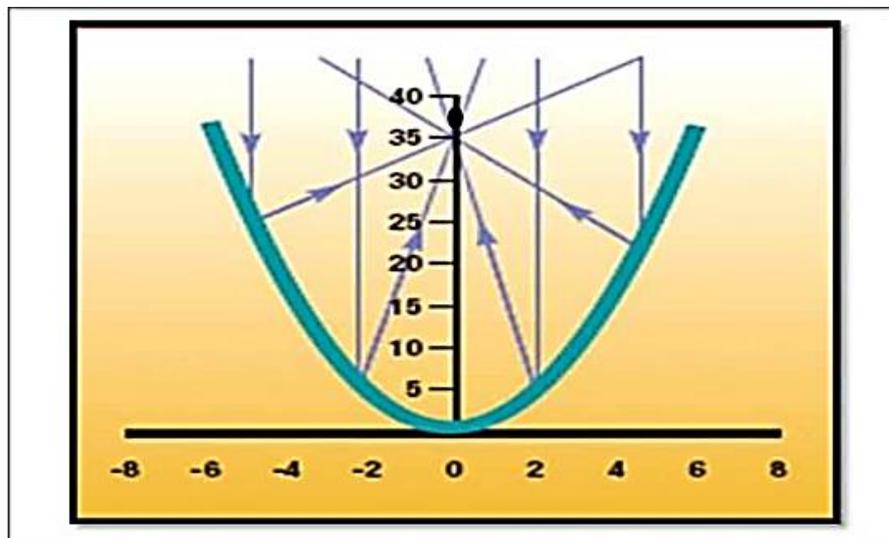


Figure 2.2 : Position du foyer d'un concentrateur cylindro-parabolique [10]

L'ouverture  $W$  du concentrateur en fonction de l'angle d'ouverture ( $\varphi$ ) est donnée par L'équation suivante [10] :

$$W=2.r.\sin(\varphi)=4F\tan(\varphi) \quad (2.3)$$

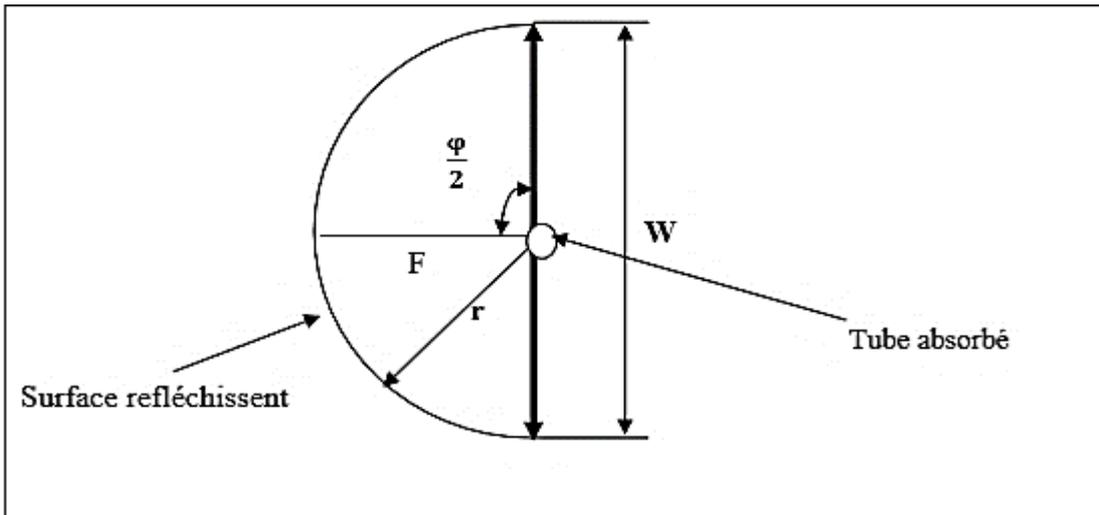


Figure 2.3 Dimensions d'un concentrateur cylindro-parabolique [10]

## 2.4. Orientation optimal d'un capteur solaire

Les capteurs solaires peuvent être installés au sol, contre le côté d'un édifice ou sur la toiture. Idéalement, ils devraient être orientés vers le sud, à l'écart des zones ombragées, et devraient présenter un angle d'inclinaison qui permette que la surface du capteur soit perpendiculaire aux rayons solaires et ainsi exposés au maximum de lumière solaire. Le calcul de l'angle d'inclinaison se fait en soustrayant la déclinaison du soleil de la latitude géographique de l'emplacement du système de chauffage solaire. En général, il s'agit de la latitude de l'emplacement plus ou moins 10 à 15 degrés. En hiver (position hivernale), lorsque la trajectoire du soleil est basse dans le ciel, il faut employer un angle d'inclinaison plus élevé (la latitude plus 10 à 15 degrés). Par contre, il est recommandé d'employer un angle d'inclinaison moins élevé (la latitude moins 10 à 15 degrés) durant les mois d'été lorsque le soleil est plus haut dans le ciel (position estivale). Toutefois, l'angle n'est pas d'une telle importance qu'on ne puisse le varier de 10 degrés.

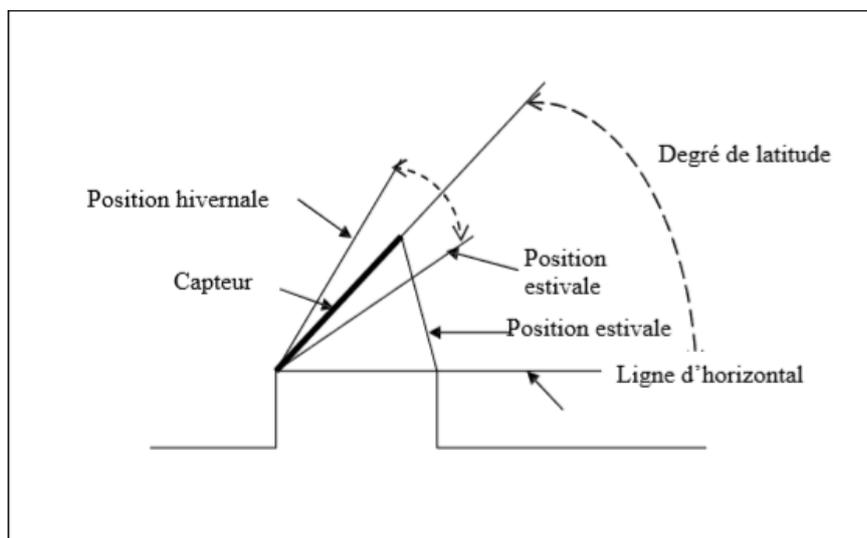


Figure 2.4 Installation d'un capteur solaire [7]

## 2.4.1 Montage

Il existe deux types de montage d'un capteur cylindro-parabolique : [8]

**1. Le montage suivant l'axe du monde :** le tube récepteur est parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Le suivi du Soleil nécessite un simple asservissement en rotation autour de cet axe.

**2. le montage est-ouest :** le tube récepteur est orienté est-ouest. Il faut orienter le capteur vers le soleil deux ou trois fois par jour pour optimiser la réception du rayonnement. Le rendement de captation est moins bon qu'avec le montage est-ouest asservi en rotation.

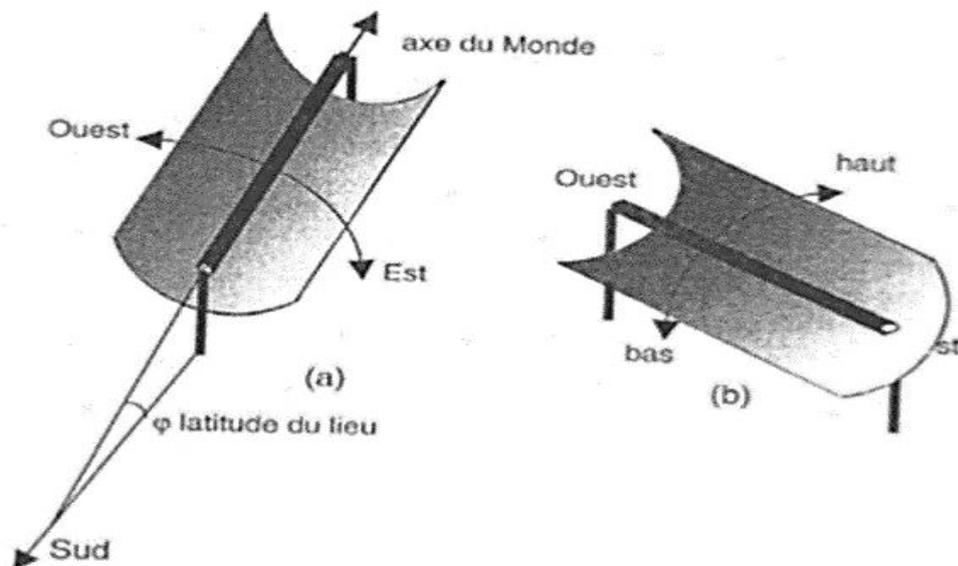


Figure 2.5 Montage d'un capteur cylindro- parabolique [15]

(a) Suivant l'axe du Monde.

(b) Suivant la direction Est-Ouest

## 2.5. Les composantes d'un concentrateur cylindro-parabolique :

### 2.5.1. Le réflecteur

Il doit faire en sorte de réfléchir le maximum de rayonnement vers le tube absorbeur et ainsi permettre de transmettre le plus de chaleur possible au fluide. Pour cela, il faut courbée une tôle paraboliquement et la couvrir par un matériau réflecteur. Le plus efficace serait une plaque d'incox avec une face polie miroir.

### 2.5.2. L'absorbeur

C'est un tube métallique recouvert d'une couche de peinture noire, C'est la partie essentielle du concentrateur, puisqu'il absorbe l'énergie du rayonnement et la transforme en chaleur il faut trouver le bon compromis entre le diamètre, la longueur et l'épaisseur du tube pour ainsi diminuer au maximum les pertes thermiques.

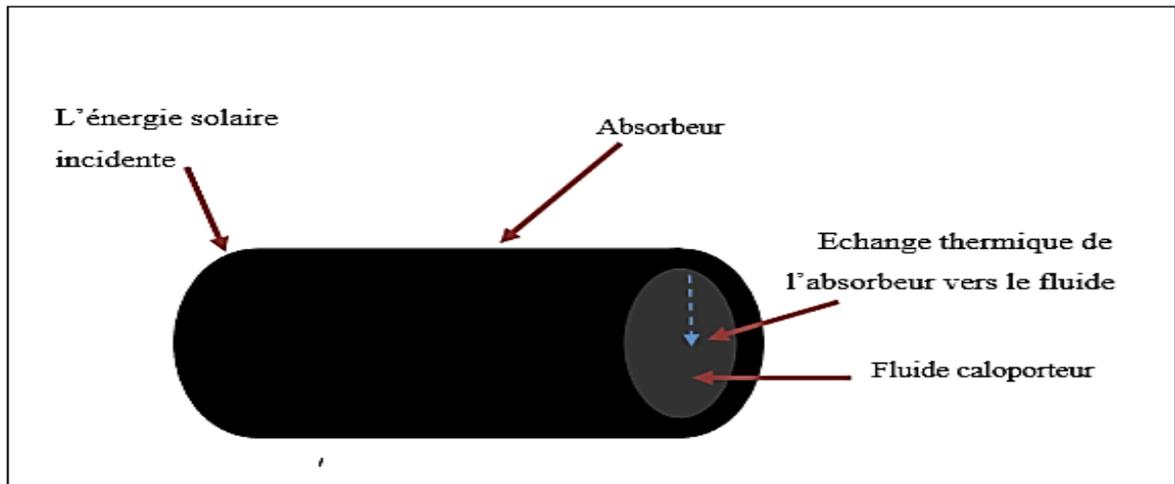


Figure 2.6 Schéma d'un tube absorbeur [12]

### 2.5.3. Le fluide caloporteur

Le fluide caloporteur a pour rôle de véhiculer l'énergie convertie sous forme de chaleur au moyen de l'absorbeur pour l'utilisation ou le stockage, il doit répondre aux conditions suivantes :

- Faible viscosité et avoir un point de coulée aussi bas que possible.
- Haut point d'ébullition et bas point de congélation.
- Résistance chimique vis-à-vis des matériaux de l'installation.
- Pertes de charge faibles.
- Coefficient de transfert thermique élevé.
- Grande capacité calorifique et toxicité faible.

Parmi les différents types de fluides caloporteur nous pouvons citer :

#### a. Les huiles :

Ce sont des fluides monophasiques qui présentent un bon coefficient d'échange. Leurs gammes de température sont limitées à environ 400°C. C'est le fluide le plus couramment employé dans les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.

#### b. Les sels fondus :

A base de nitrates de sodium et de potassium ils offrent un bon coefficient d'échange et possèdent une densité élevée, ils sont donc également de très bons fluides de stockage. Leur température de sortie peut atteindre 650 °C. Leurs associations avec un concentrateur à tour et un cycle de Rankine constitue une combinaison déjà approuvée.

#### c. Les gaz :

L'hydrogène ou l'hélium peuvent être utilisés comme fluides thermodynamiques et entrainer les moteurs Stirling qui sont associés aux collecteurs paraboliques.

L'air peut aussi être utilisé comme fluide caloporteur ou comme fluide thermodynamique comme dans les turbines à gaz.

**d. L'eau liquide :**

C'est a priori le fluide de transfert idéal. Il offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique. En outre, l'eau peut être utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine. Cependant son utilisation implique de travailler à des pressions très élevées dans les récepteurs en raison des hautes températures atteintes, ce qui pose problème pour les technologies cylindro-paraboliques.

**e. Les fluides organiques :**

(Butane, propane, etc.) possèdent une température d'évaporation relativement basse et sont utilisés comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine.

**2.6. Performances Optiques d'un Concentrateur Cylindro parabolique**

**2.6.1. Taux de concentration**

La définition la plus commune du taux de concentration est basée sur la notion de surface. Elle est donnée comme étant le rapport de la surface de l'ouverture sur la surface du récepteur. [12]

$$C = S_c / S_r \tag{2.4}$$

**S<sub>c</sub>** : Surface d'ouverture du concentrateur

**S<sub>r</sub>** : Surface de l'absorbeur (récepteur)

**Avec :**  $S_c = f \cdot x \cdot a \tag{2.5}$

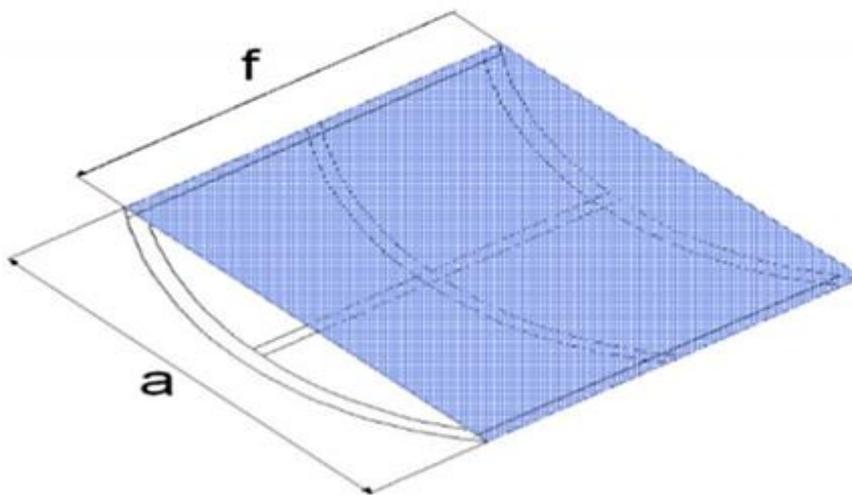


Figure 2.7 schéma d'une surface d'ouverture

- Les faibles concentrations :  $(1 < C < 10 \Rightarrow T_c \sim 150^\circ\text{C})$ .
- Les moyennes concentrations :  $(10 < C < 100 \Rightarrow T_c \sim 300^\circ\text{C})$ .
- Les fortes concentrations :  $(C \geq 10 \Rightarrow T_c \geq 500^\circ\text{C})$ .

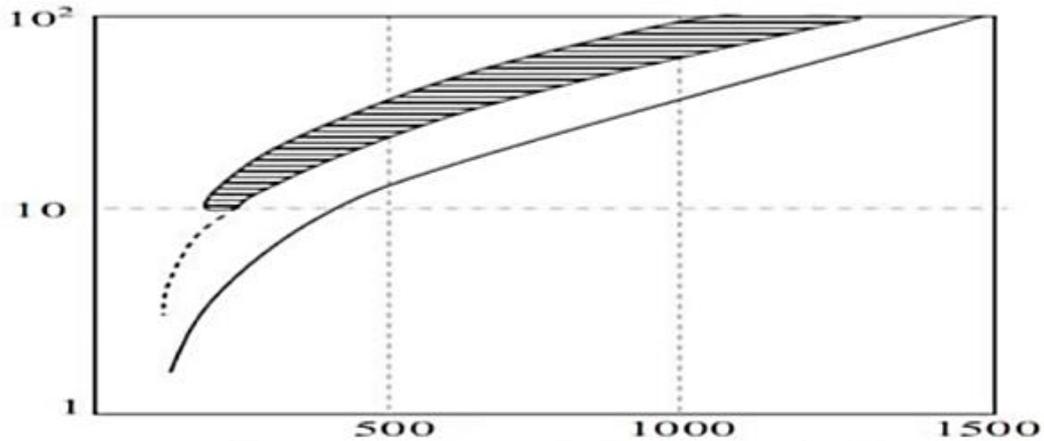


Figure 2.8 graphe démontrant Relation entre le taux de concentration et la température du récepteur [12]  
**La limite minimale :** lorsque les pertes thermiques sont égales à l'énergie absorbée.  
**La zone hachurée :** correspond à l'intervalle de fonctionnement du concentrateur.

### 2.6.2. Facteurs Optiques [9]

Facteur d'interception  $\sigma$  est le facteur optique le plus compliqué dans le calcul de la performance optique d'un concentrateur CCP. Il représente le rapport entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et celle réfléchiée par les surfaces réfléchissantes. Il traduit le fait que certains rayons solaires peuvent être renvoyés vers l'extérieur du concentrateur ou bien passer à côté de l'absorbeur lorsque les surfaces optiques présentent des défauts ou des irrégularités et lorsque l'absorbeur est mal positionné dans le plan focal. Donc il dépend des propriétés optiques des matériaux utilisés. Il existe aussi que certaines erreurs peuvent apparaître dans la construction du concentrateur ou le système de poursuite. Si on utilise les paramètres d'erreurs universelles appliquées pour toutes les géométries du collecteur, le collecteur d'interception  $\sigma$  est donné par l'équation générale suivante :

$$\gamma = \frac{1 + \cos \varphi}{2 \cos \varphi} \int_0^{\varphi} \text{Erf} \left[ \frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi_i) (1 - 2d'x \sin \varphi_i) - \pi \beta' (1 + \cos \varphi_i)}{\sqrt{2\pi\sigma' (1 + \cos \varphi)}} \right] - \text{Erf} \left( - \frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi_i) (1 + 2d' \sin \varphi_i) + \pi \beta' (1 + \cos \varphi_i)}{\sqrt{2\pi\sigma' (1 + \cos \varphi)}} \right) \frac{d\varphi_i}{(1 + \cos \varphi_i)} \quad (2.6)$$

La fonction d'erreur Erf est définie comme suit :

$$\text{Erf}(y) = \frac{2}{\pi} x \int_0^y e^{-z^2} x dz \quad (2.7)$$

### 2.6.3. Température de Sortie du Fluide Caloporteur « Ts »

Pour calculer la température de sortie, l'équation suivante a été utilisée [10] :

$$T_s = T_e + \frac{Q_u}{C_p \dot{M}} \quad (2.8)$$

#### 2.6.4. Rendement instantané du concentrateur solaire $\eta$

La mesure des performances d'un collecteur solaire est une étape importante et nécessaire pour la compréhension du fonctionnement du système. Cette efficacité se définit comme le rapport de l'énergie thermique absorbée par le récepteur à l'énergie reçue à l'ouverture du concentrateur [12].

$$\eta = \frac{Q_u}{G \times S_c} \quad (2.9)$$

Le rendement atteint par le concentrateur dépend de l'intensité du rayonnement et de la différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.

#### 2.6.5. Coefficient des pertes thermiques

Dans le cas où l'absorbeur est couvert d'un tube en verre de surface ( $S_r$ ), le Coefficient d'irradiation entre le couvert et l'absorbeur est différent du coefficient entre l'absorbeur et le couvert qui est généralement négligeable.

Le coefficient des pertes thermiques s'écrit comme suit [12] :

$$U_L = \left[ \frac{1}{(h_v + h_{r,c-a})S_r} + \frac{1}{h_{r,a-c}} \right]^{-1} \quad (2.10)$$

Avec :

$$h_{r,a-c} = \frac{\sigma \cdot (T_f^2 + T_c^2) \cdot (T_r + T_c)}{\frac{1 - \epsilon_r}{\epsilon_r} + \frac{1}{F_{rc}} + \frac{(1 - \epsilon_c) \cdot S_r}{\epsilon_c \cdot S_c}} \quad (2.11)$$

Et

$$h_{r,c-a} = 4 \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot T^3 \quad (2.12)$$

On peut écrire Coefficient globale de transfert fluide-absorbeur

En fonction du  $U_L$  comme suite [12] :

$$F_R = \frac{\dot{M} \cdot C_P}{S_r \cdot U_L} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{S_r \cdot U_L \cdot F'}{\dot{M} \cdot C_P}} \right] \quad (2.13)$$

Où :

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_e}{h_{f_i} \cdot D_i} + \left[ \frac{D_e \cdot \ln \frac{D_e}{D_i}}{2K} \right]} \quad (2.14)$$

### 2.6.6. Puissance utile « Qu »

La puissance utile, c'est la puissance récupérée par le collecteur au niveau du foyer, elle peut être déterminée par l'expression suivante [12] :

$$Q_u = Q_a - Q_p \quad (2.15)$$

$$Q_u = F_R \times [I_c \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \gamma - U_L \cdot S_r \times (T_e - T_a)] \quad (2.16)$$

Où :  $Q_u = \dot{M} \cdot C_p \cdot (T_a - T_e)$  (2.17)

### 2.6.7. Puissance solaire absorbée par l'ouverture du récepteur

La puissance absorbée par unité de surface d'ouverture peut être écrit comme suit [12] :

$$Q_a = I_c S_r \tau \alpha \rho \quad (2.18)$$

Où :  $\eta_{op} = F_r \cdot \rho$  (2.19)

L'équation devient :

$$Q_a = \eta_{op} I_c \quad (2.20)$$

## 2.7. Hypothèses utilisées dans le model de calcul :

- On néglige le transfert de chaleur par conduction dans tous les éléments du concentrateur.
- La géométrie est traitée comme un problème unidimensionnel dans la direction radiale.
- Les propriétés radiatives de l'absorbeur et de l'enveloppe en verre obéissent à la loi de Kirchhoff (surface grise : émettrice, diffuse et absorbante).
- Les propriétés de l'eau dans le tube absorbeur sont en fonction de la température.
- Les propriétés de l'air dans l'espace annulaire sont en fonction de la température.
- Les effets de l'extrémité sont négligés.
- La température de l'absorbeur varie en fonction du temps.
- La température du vitrage varie en fonction du temps.
- Le régime est transitoire.



Pour simplifier notre étude en transfert de chaleur dans notre système on représente chaque élément qui compose notre prototype comme un nœud chaque nœud est caractérisé par un mode de transfert de chaleur, la température du nœud varie en fonction du temps et de l'espace.

## 2.8. Bilan Thermique :

### 2.8.1. Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur [13]

D'après le bilan utilisé on a :

$q_{gagnée}$  : C'est la quantité d'énergie gagnée par le fluide caloporteur et qui indique le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le tube absorbeur.

$$\Delta Q_F(x,t) = \rho_F C_F A_{abs} \Delta x T_F(x,t) \quad (2.21)$$

Et  $\rho_F$  et  $C_F$ ,  $T_F$  sont respectivement la densité, la chaleur spécifique et la température du fluide caloporteur.

$$A_{abs} = \pi D_{abs}, \quad D_{abs} = \text{diamètre intérieur du tube absorbeur}$$

$$Q_F(x,t) = \rho_F C_F V T(x,t) \quad (2.22)$$

$V$  : débit volumique du fluide caloporteur.

$$\rho_F C_F A_{abs} \Delta x \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial t} = \rho_F C_F V T_F(x,t) - \rho_F C_F V T_F(x+\Delta x,t) + q_{gagnée}^{(x,t)} \Delta x \quad (2.23)$$

La simplification de l'équation donne :

$$\rho_F C_F A_{abs} \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial t} = \rho_F C_F V \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial x} + q_{gagnée}^{(x,t)} \quad (2.24)$$

### 2.8.2. Entre l'Absorbeur et l'Enveloppe en Verre

Par analogie avec l'équation (1) la température du tube absorbeur  $T_2$  est donnée par :

$$\frac{\partial(\Delta Q_{abs}(x,t))}{\partial t} = (q_{absorbée}(t) - q_{intérieur}(x,t) - q_{gagnée}(x,t)) \Delta x \quad (2.25)$$

**Avec :**

$q_{intérieur}$ . La quantité d'énergie qui indique le transfert thermique entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre [13].

$Q_{\text{absorbée}}$  = est la quantité d'énergie solaire absorbée de la thermodynamique on a :

$$\Delta Q_{\text{abs}}(x, t) = \rho_{\text{abs}} C_{\text{abs}} A_{\text{abs}} \Delta x T_{\text{abs}}(x, t) \quad (2.26)$$

$\rho_{\text{abs}}$ ,  $C_{\text{abs}}$  et  $T_{\text{abs}}$  sont respectivement la densité, la chaleur spécifique et la température du tube absorbeur.

Puis on trouve :

$$\rho_{\text{abs}} C_{\text{abs}} A_{\text{abs}} \frac{\partial T_{\text{abs}}}{\partial t}(x, t) = q_{\text{absorbée}}(t) - q_{\text{intérieur}}(x, t) - q_{\text{gagnée}}(x, t) \quad (2.27)$$

### 2.8.3. Entre l'Enveloppe du verre et l'environnement

De la même façon pour la température du tube en verre  $T_v$ , on obtient :

$$\rho_v C_v A_v \frac{\partial T_v(x, t)}{\partial t} = q_{\text{intérieur}}(x, t) - q_{\text{extérieur}} \quad (2.28)$$

$\rho_v$ ,  $C_v$  et  $T_v$  sont respectivement la densité de la chaleur spécifique et la température de l'enveloppe du verre.

$$A_v = \pi D_v$$

$D_v$  : le diamètre extérieur de l'enveloppe du verre.

Avec  $q_{\text{extérieur}}$  = la quantité d'énergie qui indique le transfert thermique entre l'enveloppe du verre et l'environnement

## 2.9. Différents modes de transfert de chaleur

### 2.9.1. Transfert de Chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur

Considérant la convection forcée du fluide caloporteur dans le tube  $q_{\text{gagnée}}$  absorbeur,

Elle est calculée par l'équation de Dittus-Boelter pour l'écoulement totalement développé dans un tube circulaire lisse. Par conséquent, le nombre de Nusselt local est donnée par :

$$Nu_1 = 0,023 Re_1^{4/5} Pr_1^4 \quad (2.29)$$

$Pr_1$  : est le nombre de Prandtl et  $Re_1$  le nombre de Reynolds.

Le nombre de Reynolds  $Re_1$  pour un flux dans un tube circulaire est donné par

$$Re_1 = \frac{4\rho_f}{\pi D_{\text{abs}} \mu_f} \quad (2.30)$$

$\mu_f$  : est la viscosité du fluide caloporteur.

Le nombre de Prandtl est donné par

$$Pr_1 = \frac{\mu_f C_f}{K_f} \quad (2.31)$$

Le coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur  $Pr_1$  est donné par l'équation suivante :

$$q_{gagnée} = h_1 \pi D_1 (T_{abs} - T_f) \quad (2.32)$$

Les propriétés du fluide caloporteur  $C_f, K_f, \mu_f, \rho_f$  sont fonction de la température  $T_{abs}$ .

### 2.9.2. Transfert de chaleur entre l'absorbeur et l'environnement du Verre

Dans ce cas, nous avons deux modes de transfert de chaleur. La convection et le rayonnement entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre.

$Q_{interieur}$  est calculée comme suit :

$$Q_{interieur} = Q_{interieur-convection} + Q_{interieur, rayonnement} \quad (2.33)$$

La convection dans l'espace annulaire entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre est estimée par des relations de la convection naturelle entre deux cylindres horizontaux et concentriques [14], cependant l'enveloppe du verre est usuellement plus froide que le tube absorbeur ( $T_{abs} > T_V$ )

$$Q_{interieur-convection} = \frac{2 \pi K_{eff}}{\ln(D_{vi}/D_{abse})} (T_{abs} - T_V) \quad (2.34)$$

**Dabse** : c'est le diamètre extérieur du tube absorbeur.

**Dvi** : le diamètre intérieur de l'enveloppe du verre.

**Keff** : la conductivité thermique effectuée de l'air, elle représente la conductivité thermique que l'air stationnaire devrait avoir pour transférer la même quantité de chaleur que l'air mobile, elle est donnée par [15] :

$$\frac{K_{eff}}{K_{air}} = 0,386 \left[ \frac{Pr_{air}}{0,861 + Pr_{air}} \right]^{1/4} \quad (2.35)$$

Ou

$$Rac = \frac{[\ln(D_{vi}/D_{abse})]^4}{L^3 (D_{abse}^{-1/5} + D_{vi}^{-3/5})^5} Ra_l \quad (2.36)$$

$Pr_{air}$  Représente le nombre Prandtl de l'air dans l'espace annulaire entre l'absorbeur et l'enveloppe du verre.

$K_{air}$  Est la conductivité thermique de l'air.

$L$  : est la longueur effective de l'absorbeur

$$L = 0,5 (D_{vi} - D_{abse}) \quad (2.37)$$

Le nombre de Rayleigh est défini comme suit :

$$Ra_L = \frac{g B_{air} \rho_{air} (T_{abs} - T_V) L^3}{I_{air} \mu_{air}} \quad (2.38)$$

$B_{air}$  est le coefficient volumétrique de dilatation thermique de l'air.

Les propriétés de l'air dans l'espace annulaire, telles que :  $\alpha_{air}, B_{air}, \rho_{air}, K_{air}, C_{air}$ , et  $P_{rair}$  sont fonction de la température moyenne  $T = 0,5 (T_{abs} + T_V)$  en plus la densité de l'air.

Le transfert thermique par rayonnement  $q_{int-Ray}$  entre deux cylindres concentriques et horizontaux entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre peut être exprimé par la relation suivante

$$q_{int\u00e9rieur,rayonnement} = \frac{\tau \pi D_{abse} (T_{abs}^4 - T_V^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} \left( \frac{D_{abse}}{D_{vi}} \right)} \quad (2.39)$$

Où  $\varepsilon_{abs}$  c'est l'émissivité de l'absorbeur. Elle dépend de la température de l'absorbeur

$\varepsilon_g$  L'émissivité de l'enveloppe du verre dans ce model  $\varepsilon_g$ .

### 2.9.3. Transfert de Chaleur entre l'Enveloppe en verre et l'environnement

On suppose que le transfert thermique entre l'enveloppe en verre et l'environnement est dû à la convection et au rayonnement.

$$q_{ext\u00e9rieur} = q_{ext\u00e9rieur, convection} + q_{ext\u00e9rieur, rayonnement} \quad (2.40)$$

Le nombre de Nusselt dû à la convection est donné par la formule suivante [13] :

$$Nu_3 = 0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr_3^{1/3}}{\left[ 1 + (0,4/Pr_3)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[ 1 + \left[ \frac{Re_3}{282} \right]^{5/8} \right]^{4/5} \quad (2.41)$$

Pour l'enveloppe de verre, le nombre de Reynolds  $Re_3$  est défini par :

$$Re_3 = \frac{\rho_{air,amb} V_{vent} D_{ve}}{\mu_{air,amb}} \quad (2.42)$$

$V_{vent}$  : est la vitesse du vent.

$\rho_{air,amb}$ ,  $\mu_{air,amb}$  : Sont respectivement la densité et la viscosité de l'air ambiant  $D_{ve}$  : est le diamètre extérieur de l'enveloppe du verre.

Le nombre de Prandtl  $Pr_3$  est toute les propriétés de l'air sont fonction de la température moyenne de l'air.

$$T_{amb} = 0,5 (T_{abs} + T_{amb}) \quad (2.43)$$

La densité de l'air dans ce cas est une fonction de la pression atmosphérique.

Le transfert thermique à l'environnement dû à la convection est :

$$q_{ext,conv} = h_3 \pi D_{ve} (T_V - T_{amb}) \quad (2.44)$$

avec 
$$h_3 = \frac{Nu_3 K_{air,amb}}{D_{ve}} \quad (2.45)$$

Le transfert thermique à l'environnement dû au rayonnement peut s'exprimer par [1] :

$$q_{ext,ray} = \varepsilon_3 \pi D_{ve} (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \quad (2.46)$$

## 2.10. Pertes Thermiques [13]

Une fois que les rayons solaires ont fait leurs chemins vers le récepteur au-dessus de la température ambiante, ce qui produit un processus des pertes de chaleurs à partir du récepteur. Ces modes des pertes sont la convection, le rayonnement et la conduction, qui sont dépendants de la différence dans la température entre le récepteur et l'environnement et de la géométrie du récepteur et celle du concentrateur. La formule est donnée sous la forme suivante :

$$Q_p = Q_{p,cv} + Q_{p,r} + Q_{p,cd} \quad (2.47)$$

### 2.10.1. Pertes par conduction

Les pertes par conduction sont habituellement petites comparées à ceux par convection et par rayonnement. Elles sont souvent combinées avec le terme de perte de convection dans la plupart des analyses.

$$Q_{cond} = \lambda_{abs} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) / \Delta z \quad (2.48)$$

### 2.10.2. Pertes par Convection

La mauvaise connaissance du phénomène de la convection est encore posée pour une plaque plane. Elle est dépendante de la vitesse du vent et sa direction par rapport au site. Ces pertes sont proportionnelles à la surface de l'absorbeur et la différence entre la température de surface captatrice et la température ambiante donnée par la 
$$Q_{conv} = h_{conv} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (2.49)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donné par la formule suivante [13] :

$$h_{\text{conv}} = \frac{\text{Nu}\lambda_{\text{air}}}{d} \quad (2.50)$$

$d$  : Diamètre du récepteur.

$\lambda_{\text{air}}$  : Conductivité thermique de l'air

Le nombre du Nusselt  $\text{Nu}$  est donné par :

$$\text{Nu} = 0,664(\text{Re})^{1/2}(\text{Pr})^{1/3} \quad (2.51)$$

Le calcul du nombre de Reynolds  $\text{Re}$  se fait par la formule suivante :

$$\text{Re} = \frac{Vd}{\nu_{\text{air}}} \quad (2.52)$$

### 2.10.3. Pertes par rayonnement

La perte de chaleur par rayonnement est importante pour des récepteurs fonctionnant seulement aux températures légèrement au-dessus de la température ambiante, et devient dominante pour des collecteurs fonctionnant à températures élevées. Le schéma 5,2 illustre cette transition pour une surface verticale noire en air immobile. Le taux de perte de chaleur de rayonnement est proportionnel à l'émissivité de la surface et à la différence dans la température à la puissance quatre. L'équation décrite sous la forme, nous avons :

$$Q_{\text{ray}} = \varepsilon_{\text{abs}} \sigma A_{\text{abs}} (T_{\text{abs}}^4 - T_{\text{ciel}}^4) \quad (2.53)$$

Où :

$\varepsilon_{\text{abs}}$  : Facteur émissivité de l'absorbeur.

$\sigma$  : Constante Stefan-Boltzmann.

$T_{\text{ciel}}$  : Température du ciel.

La température équivalente du rayonnement du ciel dépend de la densité de l'air et de son contenu d'humidité, quand l'humidité relative est haute où qu'on soit au niveau de la mer, on peut supposer que la température du ciel est identique à la température de l'air ambiant. Cependant pour

Les basses humidités relatives ou aux altitudes élevées, la température du rayonnement du ciel peut être inférieur de 6°C que la température ambiante [13], donné par la formule de Whillier (1967) :

$$T_{ciel} = T_{amb} - \delta \quad (2.54)$$

Et par la formule de Swinbank (1963) :

$$T_{ciel} = 0,0552 T_{amb}^{1,5} \quad (2.55)$$

On obtient la forme suivante :

$$Q_{ray} = A_{abs} h_{ray} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (2.56)$$

$$h_{ray} = \varepsilon_{abs} \sigma \frac{T_{abs}^4 - T_{ciel}^4}{T_{abs} - T_{amb}} \quad (2.57)$$

# **Chapitre 3**

## **Partie expérimentale**

### 3.1. Introduction

Notre travail se concentre sur l'aspect expérimental d'un concentrateur cylindro-parabolique réalisé en laboratoire, le travail que nous avons accompli a eu pour but d'étudier le fonctionnement d'un concentrateur cylindro-parabolique et de faire en sorte de l'optimiser au maximum

Ce chapitre va exposer les résultats expérimentaux que nous avons mesurés au niveau de l'université Saad Dahleb de Blida durant la période Avril-Mai, ces résultats démontre les températures d'entrée et de sortie du fluide, ainsi que le rayonnement, la puissance utile et le rendement de ce concentrateur.

### 3.2. Instruments de mesures

#### 3.2.1. Températures

Pour mesurer les différentes températures nous avons utilisés des thermocouples de type « J ».

#### Définition d'un thermocouple

Un thermocouple est un capteur servant à mesurer la température, constitué de deux conducteurs filiformes de deux métaux de natures différentes reliés par une jonction. Quand la jonction des métaux est chauffée ou réfrigérée, une tension variable est produite, La différence de température entre les deux soudures engendre une force électromotrice qui peut être ensuite transcrite en température.

#### Les différents types de thermocouple et leurs intervalles

Calibration	Tem Range	Std. Limits of Error	Spec. Limits of Error
J	0°C to 750°C (32° F to 13382°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
K	-200°C to 1250°C (-328° F to 2282°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
E	-200°C to 900°C (-328° F to 1652°F)	Greater of 1.7°C or 0.5%	Greater of 1.0°C or 0.4%
T	-250°C to 350°C (-328° F to 662°F)	Greater of 1.0°C or 0.75%	Greater of 0.5°C or 0.4%

Figure 3.1 image démontrant les différents types de thermocouples et leurs intervalles



Figure 3.2 Image du thermocouple de type « J » utilisé

### 3.2.2. Rayonnement solaire

Pour la mesure du rayonnement solaire nous avons utilisé un Pyranomètre « CM6B ».

#### Définition d'un Pyranomètre

Un pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle, L'unité de mesure du rayonnement est celle de l'éclairement énergétique, le watt par mètre carré ( $W/m^2$ ). Il est sensible dans un domaine spectral de 300 à 2500 nanomètres selon le filtre utilisé.

Les pyranomètres à thermopile sont classés selon leur précision de mesure dans 3 catégories (classe A, B et C) selon la norme ISO 9060 :2018. La norme prend en compte en autres le temps de chargement des capteurs thermopiles (la rapidité de réponse) et le comportement du capteur en fonctions des variations de températures (offsets). Des taux d'échantillonnage plus rapides permettent au capteur de « capturer » plus précisément les valeurs d'éclairement maximal en cas de changements atmosphériques rapides. Même en jours de ciel clair, l'irradiation solaire semble être constante sur une échelle minime. En raison de la turbidité atmosphérique, l'irradiance peut facilement fluctuer de quelques  $W / m^2$ . Pour détecter les changements de sous-seconde, il est important de faire correspondre le taux d'échantillonnage du système d'acquisition de données avec le temps de réponse du capteur. [ 21]

#### Pyranomètre cm6b

Le « CM6B » est un pyranomètre global ISO classe « A » mesurant la radiation solaire globale dans le spectre 300 à 3000nm, cet appareil est donné pour une précision de +/- 5%. [21]



Figure 3.3 Image du Pyranomètre « cm6b » utilisé

### 3.2.3 Réception des données

Nous avons relié tous les instruments de mesure a un système d'acquisition de données portables « Hydra Fluke ii » :

La série Hydra offre une portabilité facile, ainsi que le conditionnement de signal intégré Fluke et le module d'entrée universelle. Cet appareil permet de facilement extraire des données dans les unités Hydra via l'interface RS-232 ou à l'aide d'un modem en mode chargement ou temps réel.

Trois modèles comportant des options de stockage de données sur carte mémoire amovible, de stockage de mémoire interne et de transfert direct de données en temps réel. [22]



Figure 3.4 image de l'Hydra Fluke ii [22]

### 3.3. Schéma du banc d'essai

l'image suivante démontre le schéma technique de notre installation :

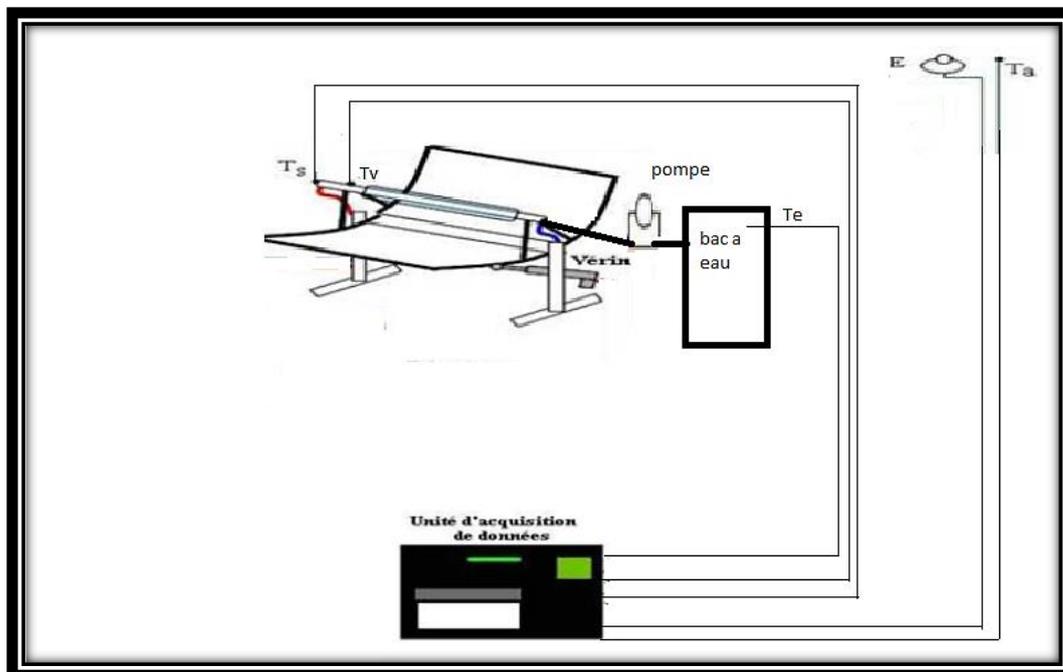


Figure 3.5 Schéma du banc d'essai

Notre installation se compose d'un concentrateur cylindro-parabolique de 2,40 m de longueur et 1,20 m de largeur, ce dernier est relié à un bac à eau de 30 litres par une pompe, une vanne est placée après la

pompe pour contrôler le débit, un thermocouple est placé à l'intérieur du bac pour mesurer la température d'entrée, le tube absorbeur est composé d'un tube en cuivre peint en noir mate recouvert de deux tubes de néon pour l'enveloppe en verre, à la sortie de ce dernier nous avons placé deux thermocouples pour la mesure des températures de sortie, l'installation comporte aussi un pyranomètre pour la mesure du rayonnement solaire, le tout est relié à une unité d'acquisition de données.

### 3.4. Etalonnage des thermocouples

Le vocabulaire International de Métrologie définit ainsi le terme Etalonnage en opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication

Un étalonnage peut être exprimé sous la forme d'un énoncé, d'une fonction, d'un diagramme, d'une courbe ou d'une table d'étalonnage. Dans certains cas, il peut consister en une correction additive ou multiplicative de l'indication avec une incertitude de mesure associée.

Il convient de ne pas confondre l'étalonnage avec l'ajustage d'un système de mesure, souvent appelé improprement « auto-étalonnage », ni avec la vérification de l'étalonnage.

#### 3.4.1. Méthode et instrumentation utilisée

Pour notre étalonnage nous avons utilisés trois thermocouple de type J, un thermomètre a dilatation liquide d'une limite de 120 C, une sonde multimètre d'une limite de 120 C et un thermocouple de type « K ».



Figure 3.6 image du thermomètre a dilatation utilisé

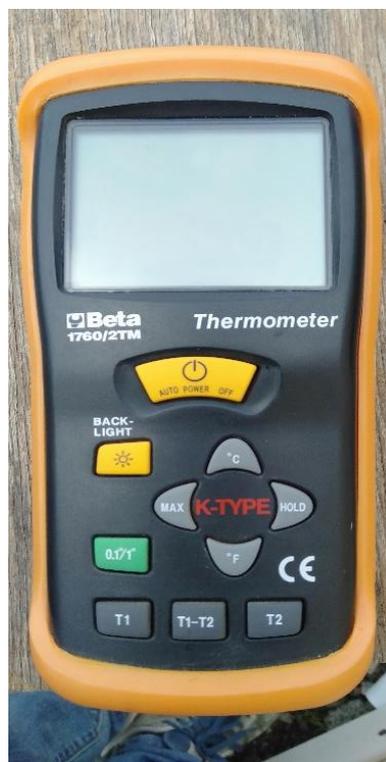


Figure 3.7 image du thermocouple de type « k » utilisé



Figure 3.8 sonde multimetre

➤ Méthode utilisé :

Nous avons commencé par fixer nos instruments de mesure ensemble de façon à ce que le bout des capteurs soit à la même hauteur, puis nous les avons mis à la même profondeur dans un récipient remplie de glace, après ça nous avons chauffé l'eau de quelques degrés après chaque mesure.



Figure 3.9 Image des instruments pour l'étalonnage



Figure 3.10 prélèvement des mesures

### 3.4.2. Résultat de l'étalonnage

Les graphes suivants représentent les résultats expérimentaux de notre étalonnage :

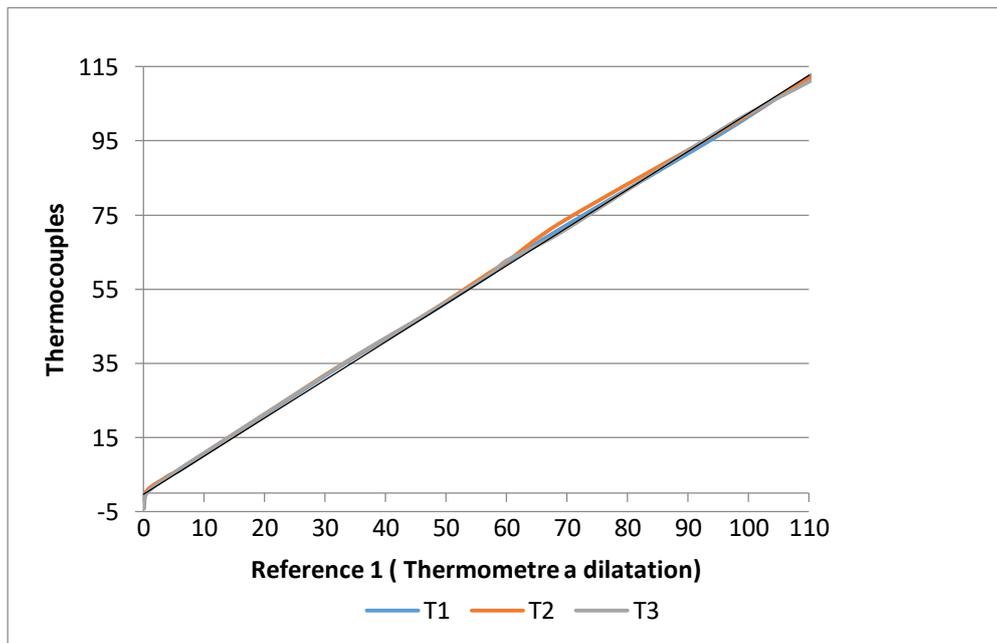


Figure 3.11 Thermocouples en fonction de la référence 1

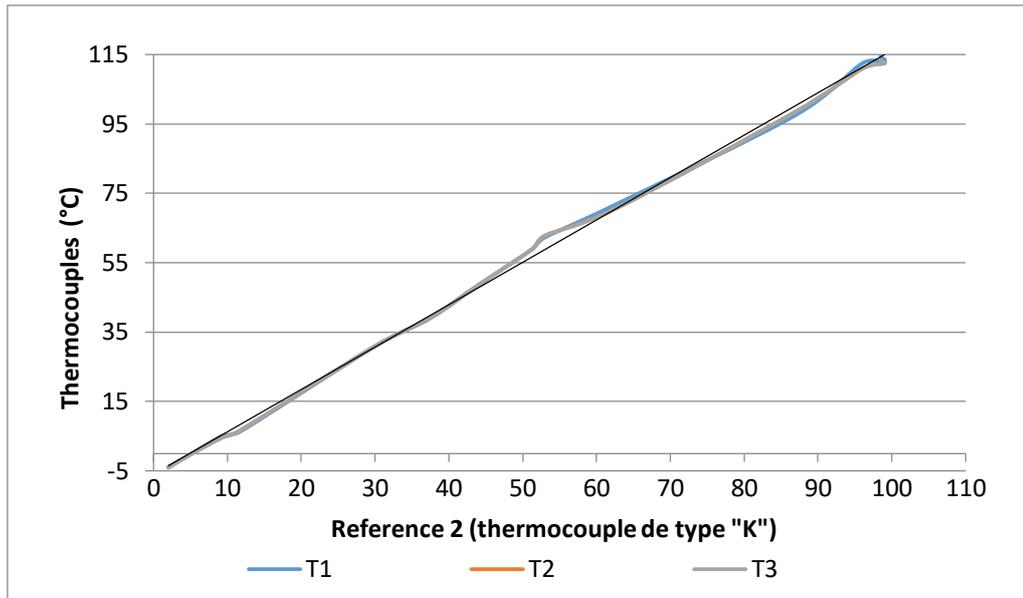


Figure 3.12 Thermocouples en fonction de la référence

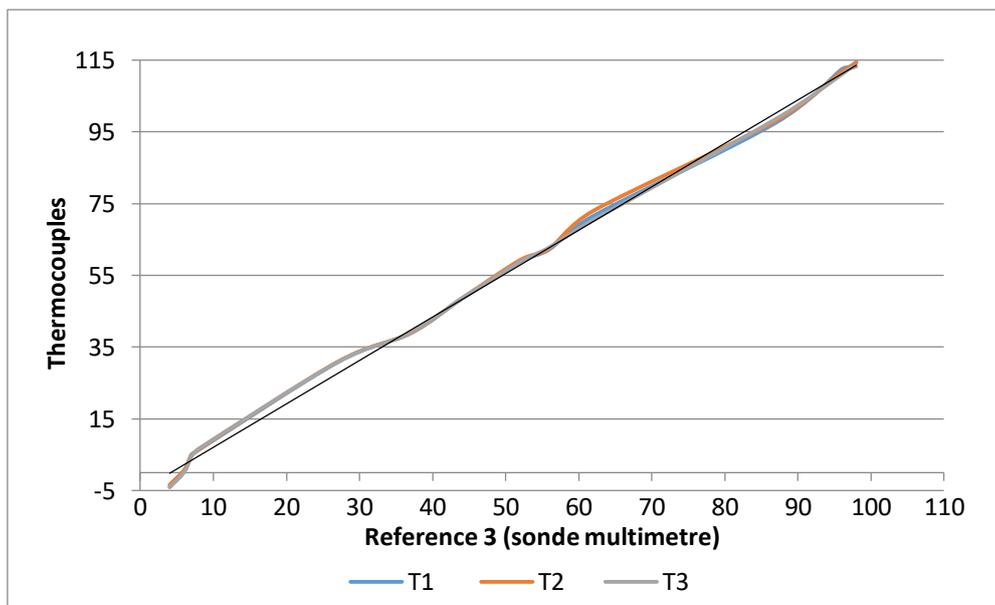


Figure 3.13 Thermocouples en fonction de la référence 3

Sur les figures (3.11), (3.12) et (3.13) Nous remarquons qu'il n'y'a pas de grande différence entre les thermocouples et nos références, la différence de température ne dépasse pas les 3 °C

Donc la marge d'erreur pour la prise de mesures est petite.

### 3.5. Début de l'expérimentation

#### 3.5.1. Etat zéro de l'installation :

Les tableaux suivants comportent les caractéristiques géométriques du réflecteur et du tube absorbeur

Tableau 3.1 Caractéristiques géométriques du réflecteur

Caractéristiques géométriques du réflecteur	
Longueur de tôle	2,42 m
Largeur de tôle	1,20 m
L'ouverture	1,01 m
Position du foyer	0,53m/0,54 m
Longueur focale	0,9 m
Surface de tôle	2,904 m <sup>2</sup>
Surface d'ouverture	2,444 m <sup>2</sup>
Orientation de l'installation	Plein sud
Altitude de Blida	36°
Longitude de Blida	3.0699°
Taux de concentration	22.23

Tableau 3.2 caractéristiques du tube absorbeur

Caractéristiques du tube absorbeur	
Epaisseur du tube	0,002 m
Diamètre interne du tube	0,022 m



- ❖ Les premières mesures sont faites sans tube en verre, donc sans effet de serre, le tube absorbeur était directement exposé à l'air ambiant, et les pertes par convection étaient plus grandes.

## Jour 1

### 1\ Installation du vérin :

- Fixation de la tête du vérin sur la partie mobile du cylindro-parabolique (plaque en fer + 2 boulons).
- Fixation du corps du vérin sur la partie fixe du cylindro-parabolique.



Figure 3.14 Image de l'état de base de l'installation

Figure 3.15 image de la fixation pour la partie mobile

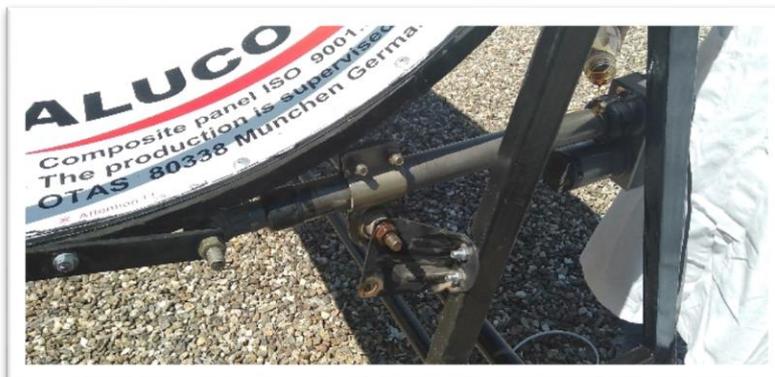


Figure 3.16 fixation pour la partie fixe

- ### 2\ Modification sur les supports du tube du milieu pour diminuer l'ombre sur la partie réfléchissante du cylindro-parabolique, nous avons enlevé les deux supports du milieu pour en laisser un seul au centre.

Deuxième cause : l'installation étant tordu (erreur de conception) nous avons dû modifier les supports pour ne pas avoir un tube tordu.



Figure 3.17 Image du support du tube avant modification

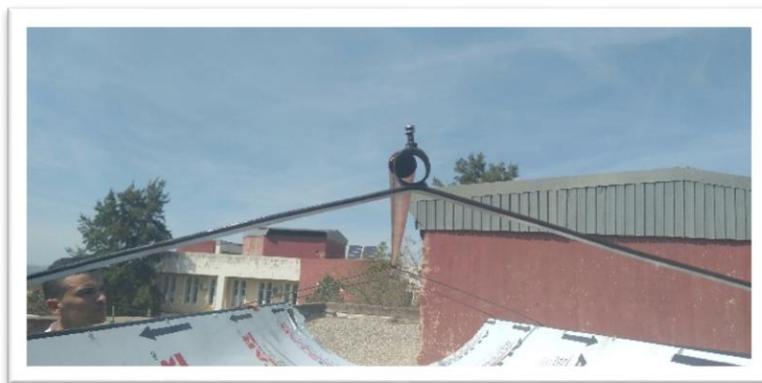


Figure 3.18 Image démontrant que le support du tube est tordu

## Jour 2

Les modifications apportées sont les suivantes :

- Peinture du tube absorbeur en noir matte.
- Installation et teste du premier système hydraulique

Compositions du système hydraulique :

Arrivée d'eau (bac de 10 l) ➡ vanne ➡ Pompe ➡ flexible ➡ coude ➡ tube absorbeur ➡  
coude ➡ flexible (sortie)



Figure 3.19 vanne d'arrivé d'eau



Figure 3.20 pompe

### Jour 3

- Modification du système hydraulique
- Changement du bac a eau de 10 litres par un autre de 30 litres et suppression du flexible de sortie.



Figure 3.21 Image du bac a eau de 30 litres (arrivée d'eau)



Figure 3.22 Image de l'installation finalisé pour les premières mesures préliminaires

Jour 4, jour 5 et jour 6 (27et 26 Avril et 06 Mai 2019)

Les tableaux suivants comportent les données météorologiques ainsi que les différents paramètres des journées de mesures préliminaires

**Tableau 3.1 : tableau des données météorologique pour les jours 4,5 et 6 (27et 26 Avril et 06 Mai)**

Température maximale	20°	22°	19°
Température minimale	14°	14°	16°
Vitesse du vent	14 km/h	13 km/h	11 km/h
Température du vent	15°	14°	17°
Précipitations	0 mm	0 mm	0 mm
Humidité	72%	64%	79%
Visibilité	10 km	10 km	10 km
Couverture nuageuse	1%	7%	34%
Indice de chaleur	20	24	19
Point de rosée	11°	11°	13°
Pression	1026 hPa	1025 hPa	1017 hPa
Heure du lever du soleil	06:01:00	05:59:00	05:51:00
Heure du coucher du soleil	19:33:00	19:34:00	19:41:00
Durée du jour	13:32:00	13:35:00	13:50:00

**Tableau 3.2 : paramètres des jours 4 ,5 et 6 (27et 26 Avril et 06 Mai)**

Paramètres	Jour 4	Jour 5	Jour 6
Mise en marche	10 :10 heure	10 :15 heure	10 h
Température d'entrée	19 C	18.4 C	18.9 C
Débit utilisé	0,047 Kg/s x10 <sup>-3</sup> kg/s	0,055 Kg/s x10 <sup>-3</sup> kg/s	0,071 Kg/s x10 <sup>-3</sup> kg/s

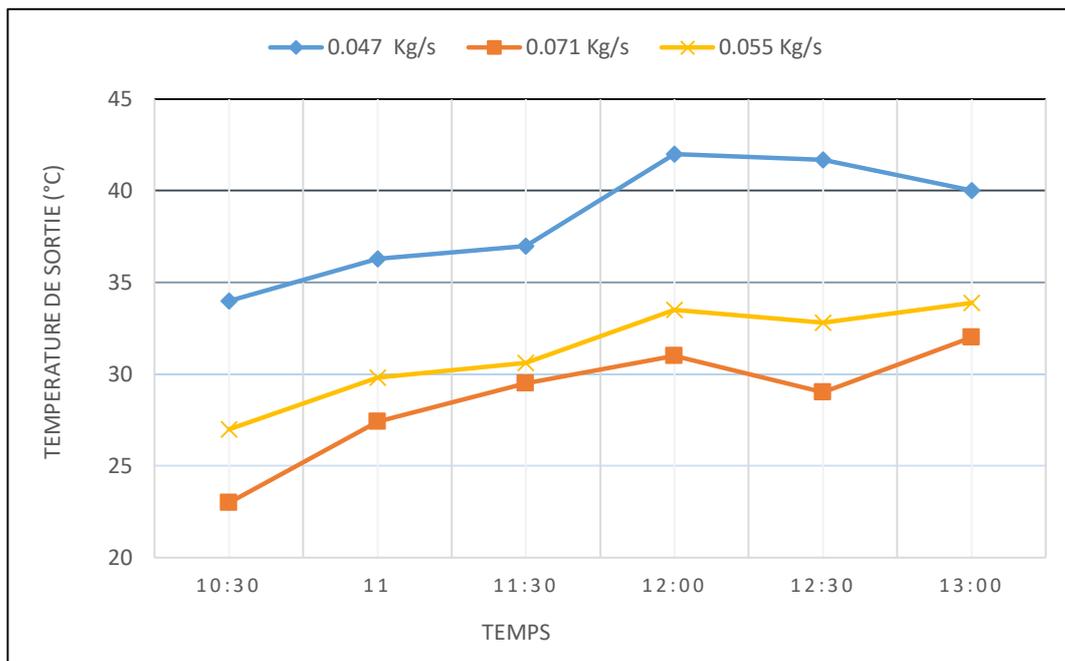


Figure 3.23 Evolution des températures de sortie en fonction du temps pour les jour 4, 5 et 6 (27et 26 Avril et 06 Mai)

Nous remarquons que pour un débit de 0.047 Kg/s les températures varient de 34 °C à 42.5 °C, et que pour un débit de 0.055 Kg/s on obtient des températures plus basse de 10 °C par rapport au débit précédent, cela peut aussi s'expliquer par les conditions météorologiques vu que la couverture nuageuse des jours 5 et 6 était plus importante, la limite de 42.5 °C maximum est dû au faite que la ligne focale soit tordue (erreur de conception).

A partir de 13 h nous avons remarqué que la distance focale était trop grande ce qui ne permettait pas une bonne concentration, nous avons une ligne focale tordu.

Nous avons abaissé les supports du tube récepteur d'une façon à avoir une ligne focale optimale

Nous avons également changé les dimensions du tube en verre et du tube absorbeur pour obtenir un meilleur débit et une plus haute température.

## Jour7

### 3.5.2. Nouveaux paramètres

Le tableau suivant comporte les nouveaux paramètres du réflecteur et du tube récepteur

**Tableau 3.5 nouveaux paramètre du récepteur**

Epaisseur tube absorbeur	0,002 m
Epaisseur de tube en verre	2mm
Langueur de tube absorbeur	2.50m
Langueur de tube en verre	2.40m
Diamètre interne du tube absorbeur	0,014m
Diamètre intérieur de l'enveloppe en verre	0,024m
Surface du tube absorbeur	0,1099 m <sup>2</sup>
Orientation	Plein sud
L'altitude de Blida	36°
Longitude de Blida	3.0699

➤ **Les caractéristiques de l'eau :**

- Chaleur spécifique de l'eau  $c_p = 4180 \text{ J/kg.k}$
- Conductivité thermique  $K = 0,6071 \text{ w/m.k}$  a (25°C)
- Masse volumique  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ .
- Température d'ébullition 100°C à la pression atmosphérique

➤ **Les caractéristiques de l'absorbeur :**

➤ **Tube en cuivre :** Le cuivre utilisé dans l'expérience a un diamètre de 14mm et une longueur de 2.5m. Ces tubes sont teints en peinture noire mate pour les assimilés à un corps noir.

- Densité  $d = 8,92$ .
- Conductivité thermique  $K = 384 \text{ w/m.k}$
- Masse volumique  $\rho = 8940 \text{ kg/m}^3$
- Température de fusion 1085°C

❖ **Peinture noir mate :**

- Absorptivité=0.98
- Emissivité=0.02

❖ **Les caractéristiques de l'air :**

- Chaleur spécifique de l'air  $c_p = 1004 \text{ J/kg.k}$
- Masse volumique  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ .

- Conductivité thermique  $K= 0.0234 \text{ w/m.k}$ .

### Les caractéristiques du Verre à vitre

- Conductivité Thermique.  $K= 0,93 \text{ w/m.k}$
- Masse Volumique  $\rho = 2700 \text{ Kg/m}^3$
- Chaleur Massique  $C_{p_{\text{eau}}}= 840 \text{ g}^\circ/\text{kg.k}$
- Emissivité = 0,85-0,92

- ❖ Pour le tube en verre nous avons utilisé deux tubes de néon que nous avons ouvert et nettoyé.  
Deux tubes on était nécessaire pour avoir une distance suffisante de 2.40m pour notre installation.



Figure 3.24 image de comparaison entre le tube de néon avant et après nettoyage



Figure 3.25 Image Tube en verre finalisé



Figure 3.26 Représentation de la nouvelle ligne focale après modification

- ❖ Pour un meilleur confort d'utilisation nous avons modifié les anneaux pour soutenir le tube absorbeur et l'enveloppe en verre et pour un meilleur contrôle du débit nous avons changé de vanne d'arrivée d'eau

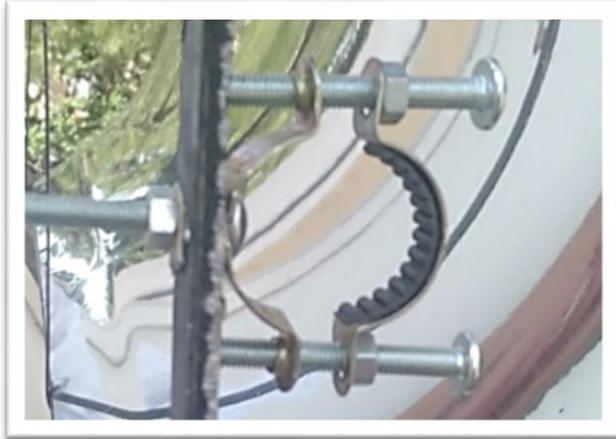


Figure 3.27 Image de l'anneau de support du tube récepteur



Figure 3.28 Image de la nouvelle vanne de contrôle du débit

- ❖ Pour mesurer la température nous avons placé nos thermocouples comme suit :

Température d'entrée ➡ un thermocouple dans le bac à eau.

Température sortie ➡ un thermocouple 2 cm à la sortie du tube absorbeur.

Température vapeur ➡ nous avons percé le haut du tube absorbeur à 2 cm de sa fin pour capter uniquement la vapeur d'eau.

Température ambiante ➡ nous avons placé un thermocouple dans une cloche en aluminium que nous avons placée à l'ombre.



Figure 3.29 thermocouple pour la mesure de la température ambiante

- ❖ Sur les photos suivantes nous pouvons observer la ligne focale ainsi que notre concentrateur finalisé pour les tests finaux :



**Figure 3.30** Image des thermocouples pour la température de sortie et de vapeur



**Figure 3.31** Image de l'installation finalisée



**Figure 3.32** Image du dessus de toute l'installation finalisée

### 3.5.3. Tests finaux

Les tableaux suivants comportent les données météorologiques ainsi que les différents paramètres des journées de mesures finals (13-14-15, et 16 Mai 2019)

**Tableau 3.4 tableau des données météorologiques des jours 7 ,8,9 et 10 (13-14-15, et 16 Mai 2019)**

Paramètres	Jour 7	jour 8	jour 9	Jour 10
Température maximale	19°	21°	26°	27°
Température minimale	16°	14°	16°	16°
Vitesse du vent	18 km/h	13 km/h	13 km/h	11 km/h
Température du vent	16°	14°	16°	16°
Précipitations	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Humidité	63%	74%	56%	52%
Visibilité	10 km	10 km	10 km	10 km
Couverture nuageuse	3%	4%	4%	2%
Indice de chaleur	19	21	25	27
Point de rosée	11°	12°	10°	14°
Pression	1022 hPa	1021hPa	1017hPa	1013hPa
Heure du lever du soleil	05:44:00	05:43:00	05:43:00	05:42:00
Heure du coucher du soleil	19:47:00	19:48:00	19:49:00	19:50:00
Durée du jour	14:03:00	14:05:00	14:05:00	14:08:00

**Tableau 3.5 paramètres des jours 7,8,9 et 10 10 (13-14-15, et 16 Mai 2019)**

Paramètres	Jour 7	Jour 8	Jour 9	Jour 10
Mise en marche	9 :40 heure	10 : 00 heure	9 : 45 heure	9 : 45 heure
Débit utilisé	$0.88 \times 10^{-3}$ kg/s	$1.01 \times 10^{-3}$ kg/s	$1.36 \times 10^{-3}$ kg/s	$3.125 \times 10^{-3}$ kg/s

Tableau 3.6 : résultats du jour 7 (13-05-2019)

heure	Rayonnement (w/m <sup>2</sup> )	Température D'entrée (C°)	Température sortie (C°)	Température Vapeur(C°)	Température Ambiante(C°)	Q.Utile (watt)	Rendement (%)
10:00	890,97	18	109,1	116,5	19	335,102	15,38
10:30	983,08	18,8	120,9	114,6	19,6	375,39	15,62
11:00	1008,45	19,7	122,1	116,5	19,2	376,668	15,28
11:30	1027,25	20,4	110,8	115,8	20	332,527	13,24
12:00	1032,89	20,7	110,7	115,3	20	331,056	13,11
12:30	1022,55	21,1	111,3	115,6	22,5	331,791	13,27
13:00	997,18	22,7	109,3	114,5	22,2	318,549	13,06
13:30	945,48	25,8	118,2	115,4	22,4	339,884	14,7
14:00	923,87	25	117,1	116,6	21,7	338,78	15
14:30	866,54	25,3	115,6	113,9	22	332,159	15,68
15:00	839,28	24,1	114,9	110	22,4	333,998	16,28

Tableau 3.7 résultats du jour 8 (14-05-2019)

heure	Rayonnement (w/m <sup>2</sup> )	Température D'entrée (C°)	Température sortie (C°)	Température Vapeur(C°)	Température Ambiante(C°)	Q.Utile (watt)	Rendement (%)
10:30	944,54	19	121,9	119	25,5	434,42	18,81
11:00	987,78	19,3	120,7	114,9	24,8	428,09	17,73
11:30	998,12	19,9	119,2	112,4	25	419,22	17,18
12:00	1017,85	21,7	118,3	113,4	27,6	407,82	16,39
12:30	1071,42	23,7	117,7	114,2	27,5	396,84	15,15
13:00	327,06	24,6	92,4	83	27,8	286,23	35,8
13:30	964,28	26	118,5	118	26,8	390,51	16,56
14:00	975,56	26,8	117,7	115,8	25,8	383,76	16,09
14:30	867,48	25,9	114,2	112,1	25,3	372,78	17,58

Tableau 3.8 résultats du jour 9 (15-05-2019)

heure	Rayonnement (w/m <sup>2</sup> )	Température D'entrée (C°)	Température sortie (C°)	Température Vapeur(C°)	Température Ambiante(C°)	Q.Utile (watt)	Rendement (%)
10:00	899,43	20,4	73,1	70,3	26,8	528,686	24,09
10:30	937,03	23	105,6	106	25,6	528,686	22,43
11:00	957,7	24,1	112,6	110,8	27,1	517,316	20,74
11:30	982,14	24,8	112,4	110,5	26,9	500,83	19,97
12:00	981,2	24	116,9	112,9	26,3	490,029	20,22
12:30	964,28	24,3	110,5	111,9	26,5	492,872	20,33
13:00	940,78	24,9	110,7	112,9	26	484,344	20,51
13:30	893,79	25,4	110,3	113,5	27,3	483,208	22,18
14:00	859,02	26	113,8	114,5	28,6	486,05	22,67
14:30	845,86	26	112,6	115,3	27	474,68	23,37
15:00	817,66	26,3	111,8	115	28,2	349,04	17,93

Tableau 3.9 résultats du jour 10 (16-05-2019)

heure	Rayonnement (w/m <sup>2</sup> )	Température D'entrée (C°)	Température sortie (C°)	Température Vapeur(C°)	Température Ambiante(C°)	Q.Utile (watt)	Rendement (%)
10:00	899,43	20,4	73,1	70,3	26,8	688,393	31,31
10:30	943,6	18	111	113,2	26	1078,962	47,11
11:00	987,78	19,3	110,3	111	27,5	1156,031	49,38
11:30	1003,75	21	109,1	111	28,7	1144,275	47,66
12:00	997,18	22,2	108,4	112,1	28,7	1213,459	50,59
12:30	991,54	24,1	110,8	113,1	28,5	1125,944	47,77
13:00	966,16	25,6	110,8	114,5	28,2	1120,762	48,74
13:30	890,97	25,2	110,2	117,4	27,3	1109,006	50,76
14:00	876,87	26	111,5	113,4	29,3	1146,887	54,62
14:30	830,82	26,8	110,3	110,7	28,1	1131,212	54,71
15:00	796,05	25,9	87,3	88,2	28,6	1116,843	55,88

❖ Nos résultats sous forme de graphes :

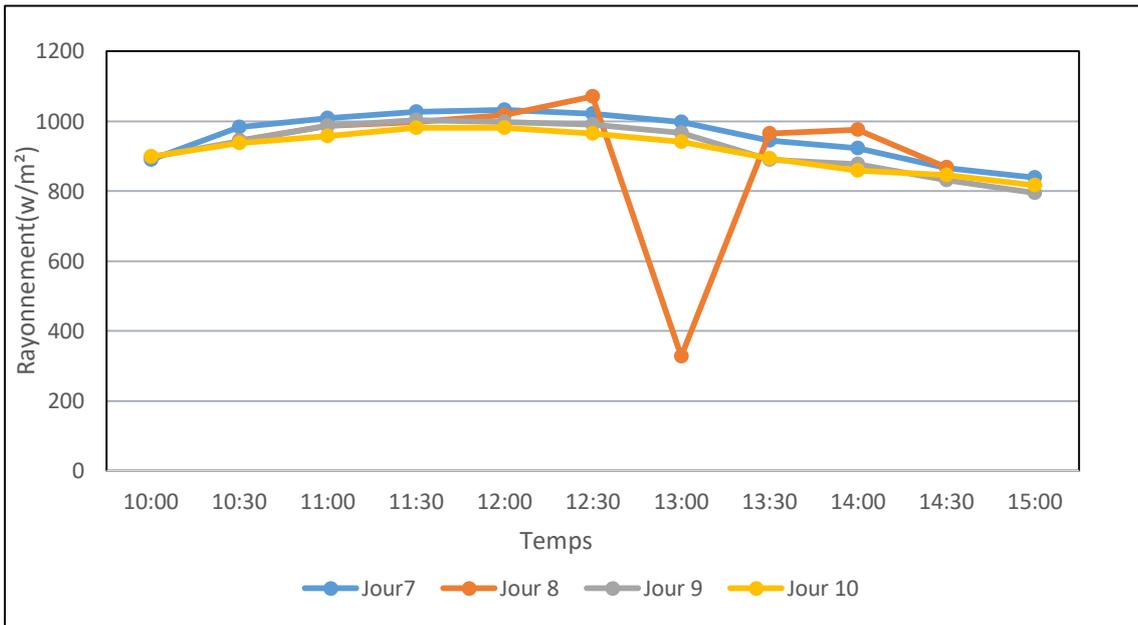


Figure 3.33 Graphe du rayonnement en fonction du temps

Sur la figure (3.33) nous avons représentés le développement du rayonnement solaire en fonction du temps, nous remarquons qu'il n'a pas changé sauf pour le jour 8 où il y'a eu un important passage nuageux de 12 :30 h à 13 :30 h.

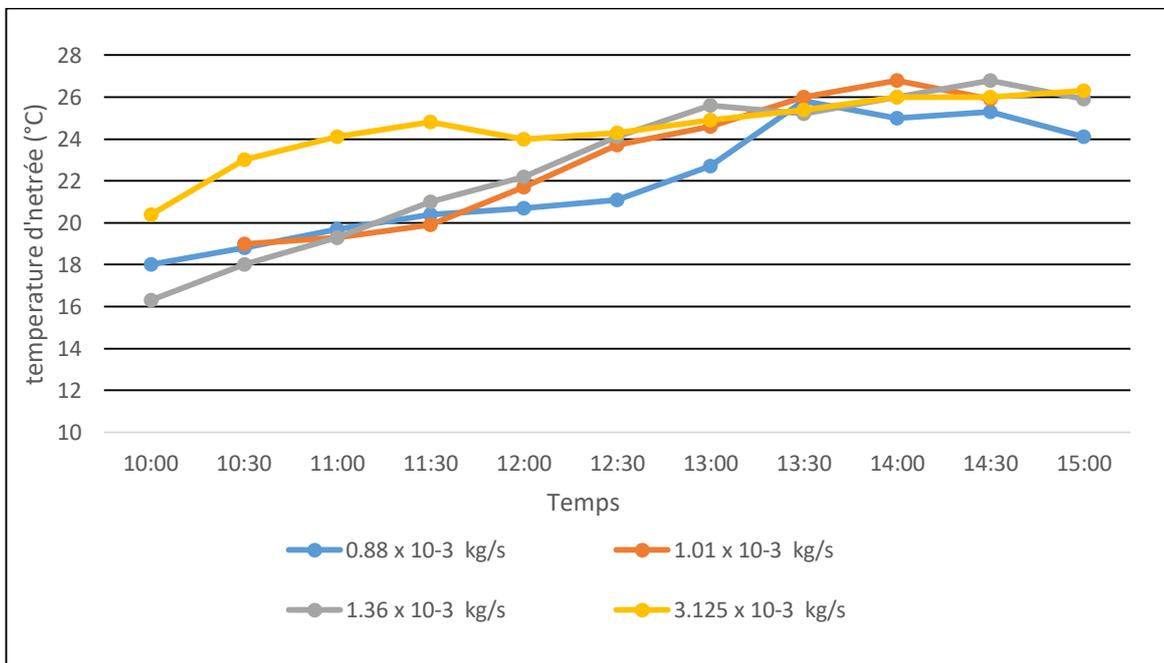


Figure 3.34 Graphe de la température d'entrée en fonction du temps

Sur la figure (3.34) nous remarquons qu'il n'y a pas une très grande différence entre les températures d'entrée, sur l'ensemble des quatre jours les températures augmentent en fonction du temps, ce paramètre la varie en fonction de la température ambiante et donc des conditions météorologiques,

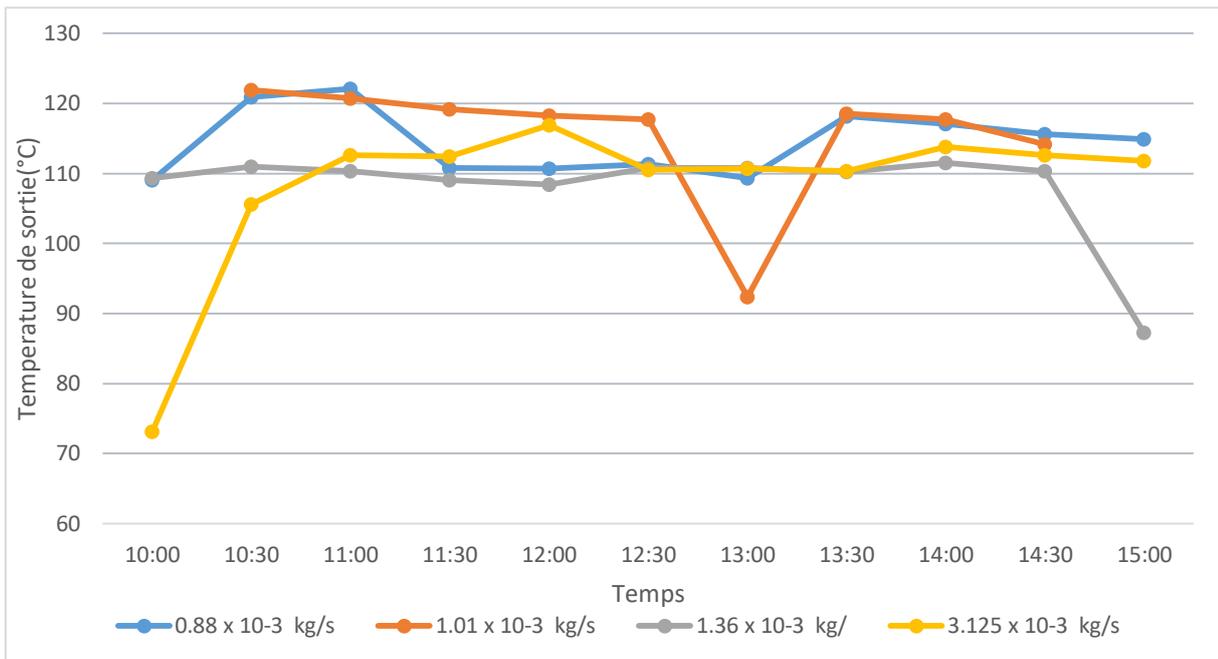


Figure 3.35 Graphe de la température de sortie en fonction du temps

En toute logique le débit devrait influencer sur la température de sortie, seulement les conditions météorologiques ont eu une plus grande influence, la plage des températures évolue entre 110 °C et 125°C mise à part les grandes baisses dû à la baisse du rayonnement solaire pour cause de passage nuageux.

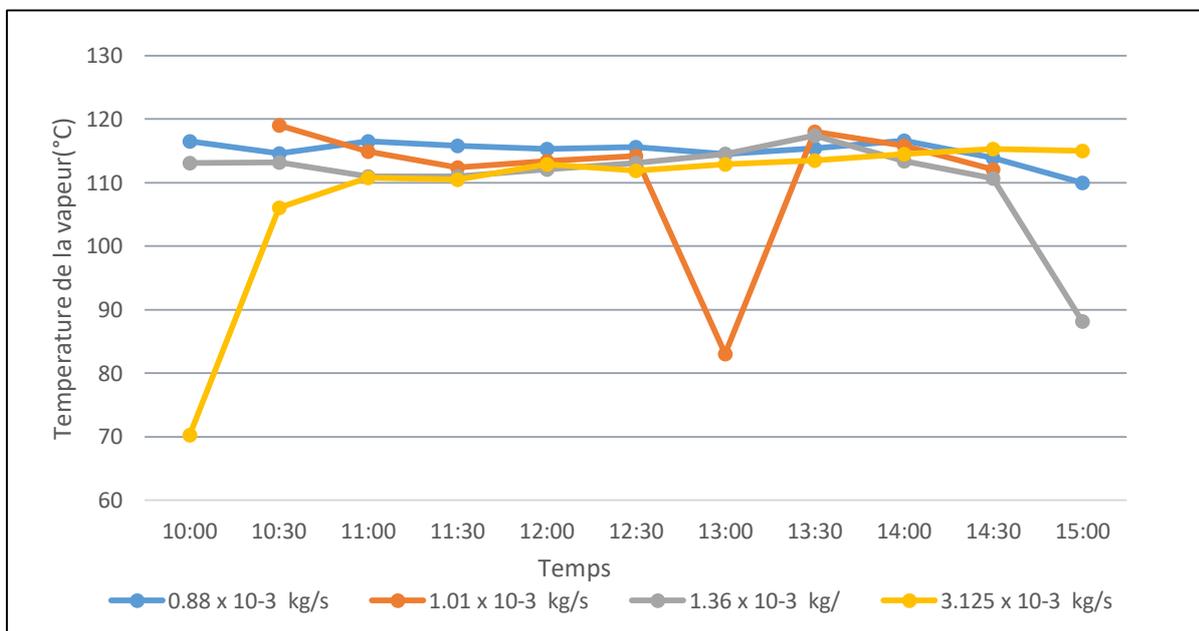


Figure 3.36 Graphe de la température de vapeur en fonction du temps

Sur la figure (3.36) on peut voir que la température de la vapeur est pratiquement stable à 115 °C, puis suivant le débit cela varie de quelques degrés seulement, nous avons atteint un maximum de 122 °C et un minimum de 84 °C sur l'ensemble des quatre jours.

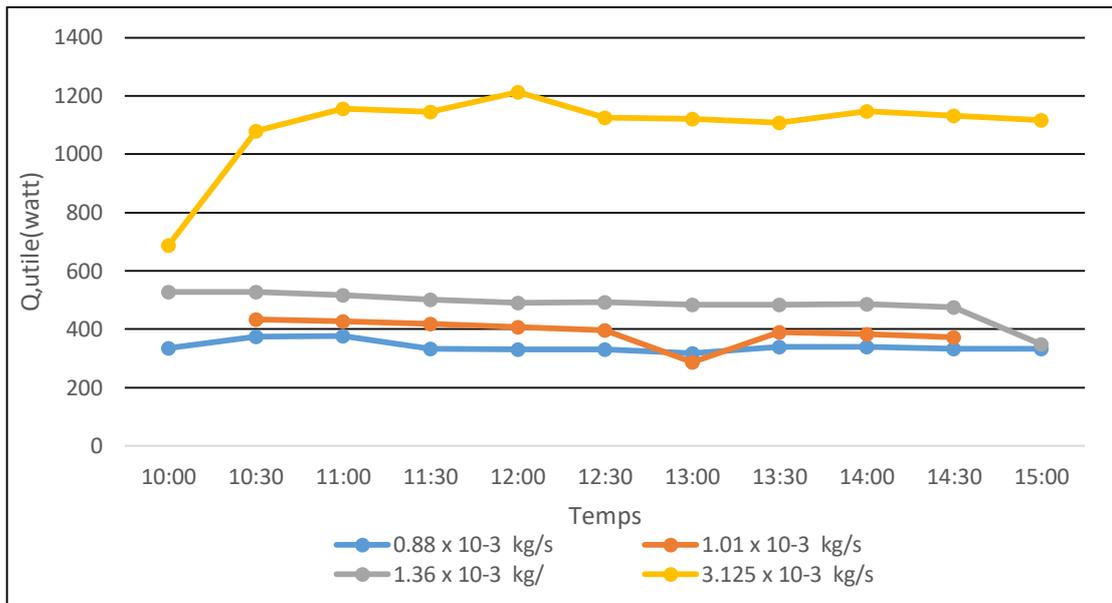


Figure 3.37 Graphe de la puissance utile en fonction du temps

La figure (3.37) représente l'évolution de la puissance utile en fonction du temps, la puissance utile a un rapport direct avec le débit donc plus le débit augmente plus la puissance augmente, nous avons la plus grande puissance avec le plus grand débit, la puissance maximum atteinte par notre concentrateur est de 1200 watt avec un minimum d'environ 300 watt du a la baisse du rayonnement solaire.

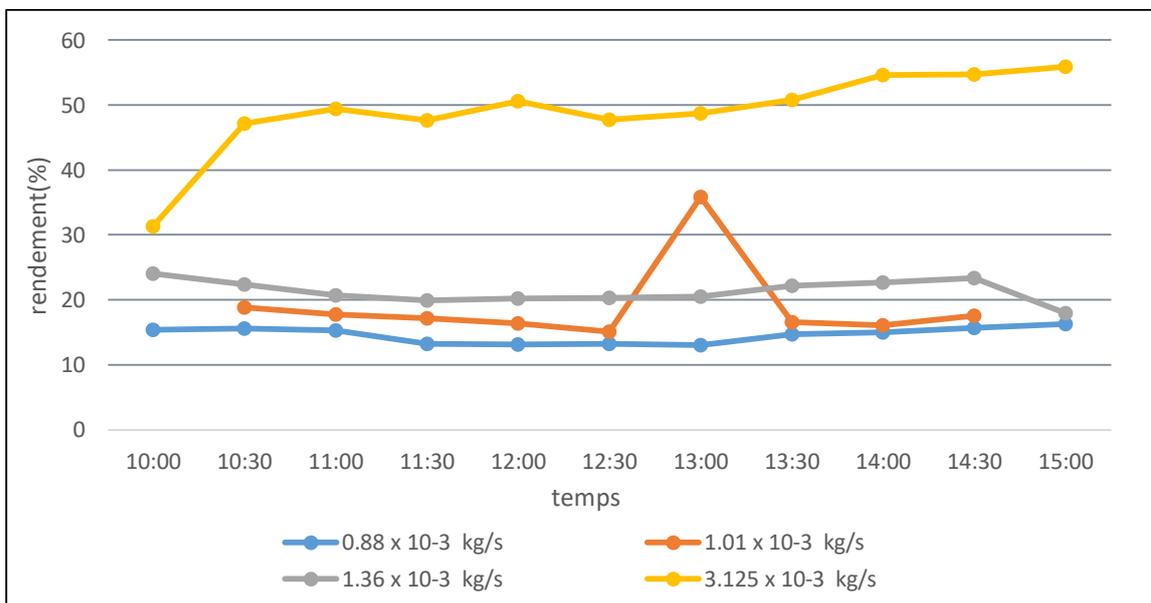


Figure 3.38 Graphe du rendement en fonction du temps

La figure (3.38) nous démontre que le rendement varie d'une façon stable, sauf pour le jour 8 ou le rendement augmente subitement à 13 heure malgré la baisse du rayonnement, cela peut s'expliquer par l'inertie thermique de notre installation, le rendement instantané augmente en fonction du rayonnement solaire et donc de la puissance utile, en toute logique le débit le plus grand a la plus grande puissance et donc le rendement le plus élevé.

### Jour 11 et jour 12 (21 et 22 Mai 2019)

Pour ces deux derniers jours nous avons retirés l'enveloppe en verre pour mieux étudier son influence.

Les tableaux suivants représentent les données météorologiques et les paramètres des jours 11 et 12

Tableau 3.10 données météorologiques des jours 11 et 12 Jour 11 et jour 12 (21 et 22 Mai 2019)

Paramètres	Jour 11	jour 12
Température maximale	25°	24°
Température minimale	19°	17°
Vitesse du vent	15 km/h	15 km/h
Température du vent	19°	17°
Précipitations	2 mm	1 mm
Humidité	51%	67%
Visibilité	10 km	10 km
Couverture nuageuse	35%	26%
Indice de chaleur	25	25
Point de rosée	13°	13°
Pression	1015 hPa	1019 hPa
Heure du lever du soleil	05:38:00	05:38:00
Heure du coucher du soleil	19:53:00	19:54:00
Durée du jour	14:15:00	14:16:00

Nous avons utilisé des débits similaires au jour 9 pour le jour 11 et au jour 10 pour le jour 12.

Tableau 3.11 : paramètres des jours 11 et 12

Paramètres	Jour 11	Jour12
Débit	$1.25 \times 10^{-3}$ kg/s	$2.85 \times 10^{-3}$ kg/s
Mise en marche	11 : 00 heure	9 : 00 heure

Tableau 3.12 résultats du jour 11 (21-05-2019)

heure	Rayonnement (w/m <sup>2</sup> )	Température D'entrée (C°)	Température sortie (C°)	Température Vapeur(C°)	Température Ambiante(C°)	Q.Utile (watt)	Rendement (%)
11:15	965,22	20,6	68,6	67,8	26,8	250,8	10,63
11:45	974,62	20,2	89	87,5	27	354,255	14,87
12:15	375,93	22	69,1	66,3	27,6	246,097	26,78
12:45	269,73	23	39	39,1	30	83,6	12,68
13:15	234,96	23,6	90,5	88,5	29,3	349,552	60,86
13:45	939,84	25	112,3	107	30,1	456,142	19,85
14:15	860,9	27	107,8	108	30	422,18	20,06
14:45	233,08	26,4	37,5	37,8	31,8	57,997	10,18
15:15	735,9	25	113,8	104,7	30,3	463,98	25,79

Tableau 3.13 résultats du jour 12 (22-05-2019)

heure	Rayonnement (w/m <sup>2</sup> )	Température D'entrée (C°)	Température sortie (C°)	Température Vapeur(C°)	Température Ambiante(C°)	Q.Utile (watt)	Rendement (%)
09:15	775,37	19	110	104,8	22	559,65	31,43
09:45	827,06	20	76	71,2	22,8	667,128	33
10:15	891,91	22,5	86,7	83,5	25,8	764,814	35,08
10:45	942,66	22	108,4	112,5	24,8	1029,283	44,67
11:15	961,46	23,6	113,5	114	25,1	1070,978	45,57
11:45	987,78	23,9	112,2	113,1	25,5	1051,917	43,56
12:15	977,44	24,7	109,9	108,9	27	1014,987	42,48
12:45	970,86	25,1	113,3	115,4	27,4	1050,726	44,28
13:15	928,57	26	113	115,5	27	1036,431	45,66
13:45	890,03	25,8	110,4	115,5	28,2	1007,839	46,32
14:15	875	26,4	110	113,3	27,7	995,926	46,56
14:45	827,06	27,2	109,4	113,4	27	979,248	48,44
15:15	786,65	26	105,6	100,8	27	948,274	49,31

❖ Comparaison entre le jour 9 (avec enveloppe en verre) et le jour 11 (sans enveloppe en verre) :

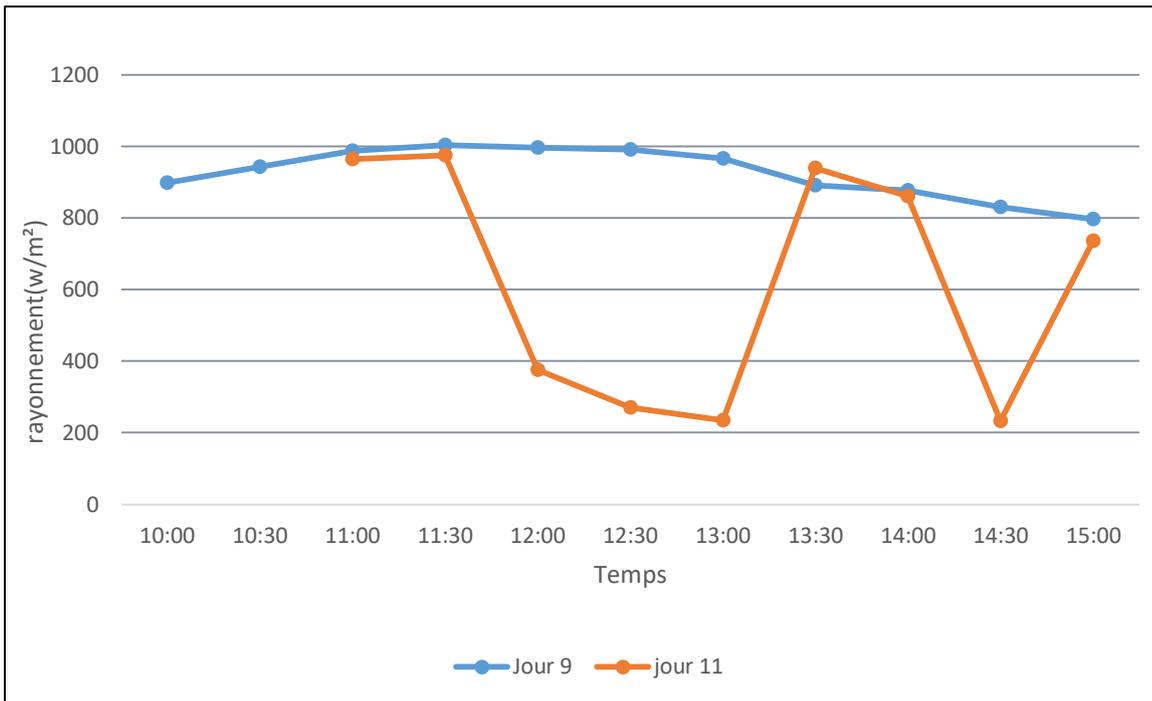


Figure 3.39 Graphe du rayonnement en fonction du temps

L'évolution du rayonnement sur la figure (3.39) nous montre que les deux journées étaient très différentes en terme de conditions météorologiques puisque le jour 11 a connu beaucoup de passage nuageux, ce qui explique le développement du rayonnement non stable.

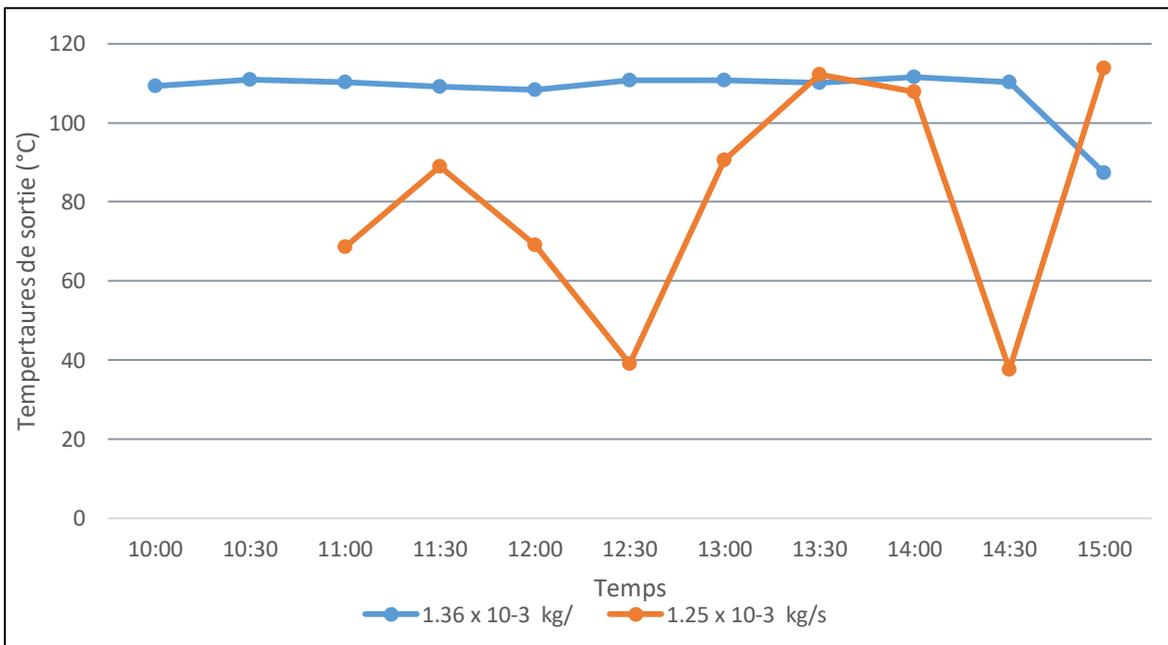


Figure 3.40 Graphe des températures de sortie en fonction du temps

Nous remarquons sur la figure (3.40) que même sans enveloppe en verre nous avons réussi à atteindre une plus haute température que celle mesurée avec l'enveloppe en verre au cours de la 9ème journée, cela s'explique par le petit écart du débit entre les deux journées et cela nous donne aussi une indication sur le fait que l'effet de serre créé est trop petit.

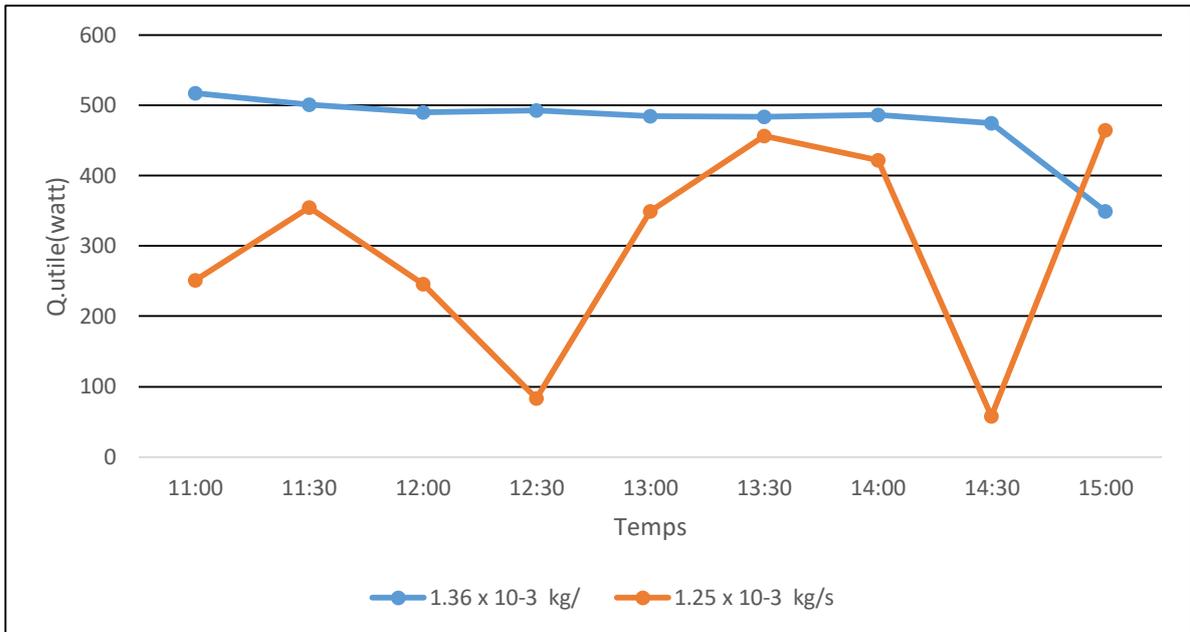


Figure 3.41 Graphe de la puissance utile en fonction du temps

Sur la figure (3.41) on voit que le rayonnement influe énormément sur la puissance utile ce qui explique la grande différence en puissance utile sur les deux journées.

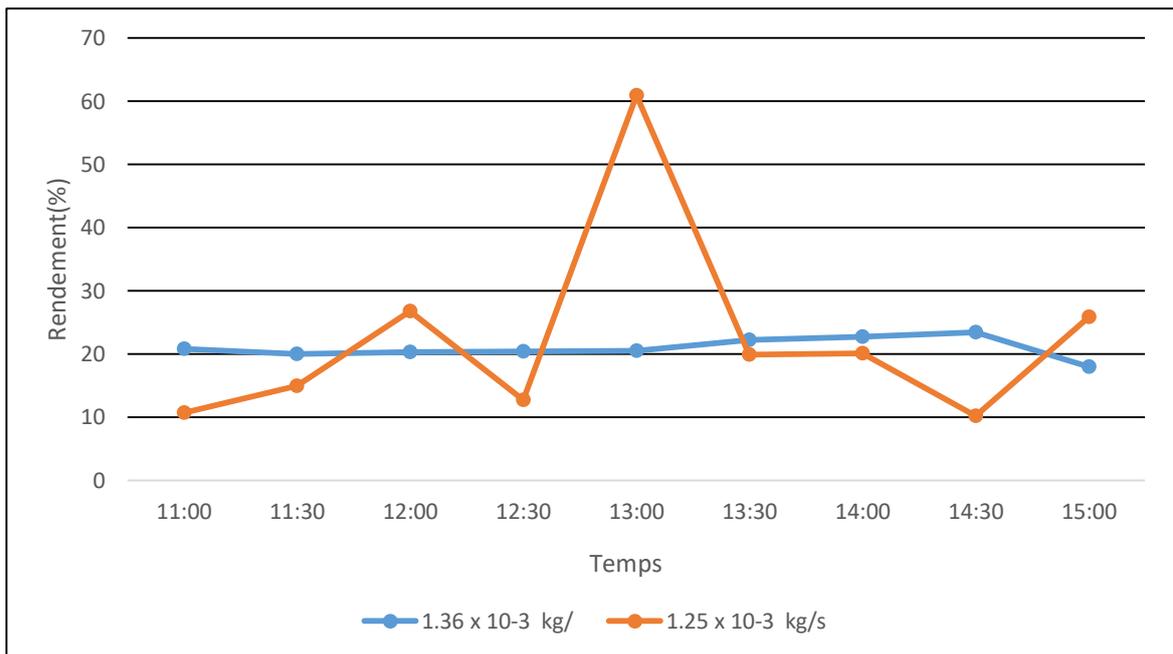


Figure 3.42 Graphe du rendement en fonction du temps

Le rendement atteint par le concentrateur dépend de l'intensité du rayonnement et la différence de température entre l'absorbeur l'air ambiant. De 12 :30 h à 13 :30 h la différence de température était petite donc le rendement était maximum. Cela s'explique aussi par l'inertie thermique de l'installation qui était chaude et donc n'a pas eu le temps de refroidir malgré l'important passage nuageux.

Comparaison entre le jour 10 (avec enveloppe en verre) et le jour 12 (sans enveloppe en verre) :

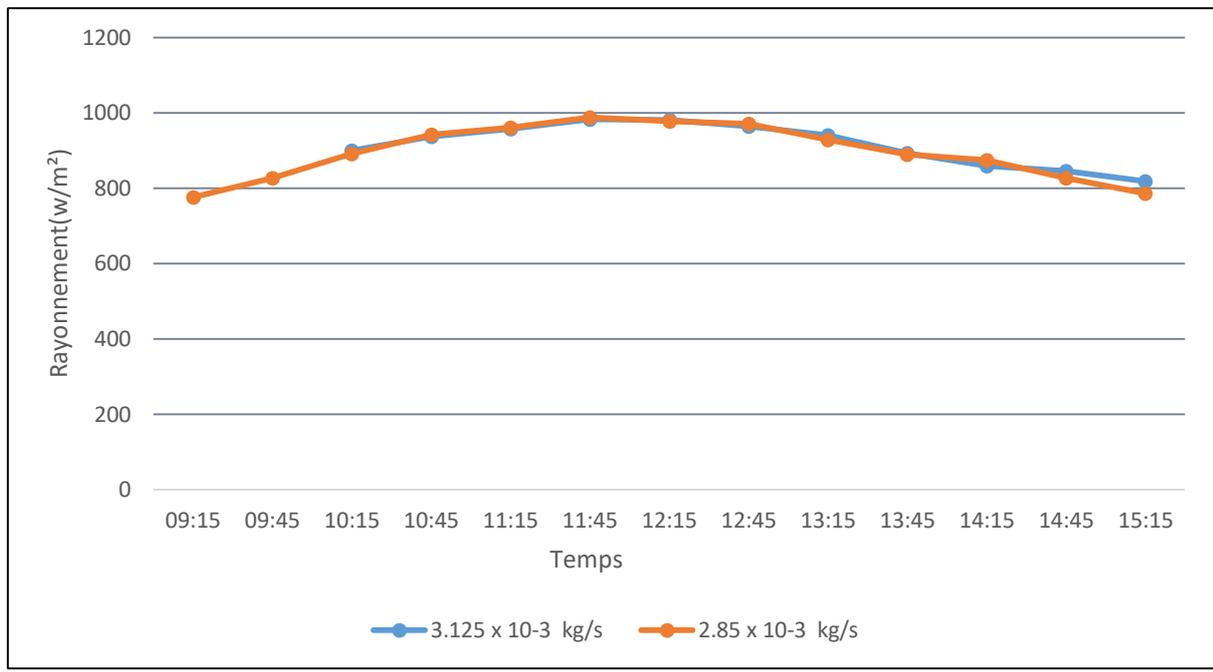


Figure 3.43 Graphe du rayonnement en fonction du temps

La figure (3.43) nous montre que les deux journées ont été assez similaires en terme de rayonnement et de données météorologiques.

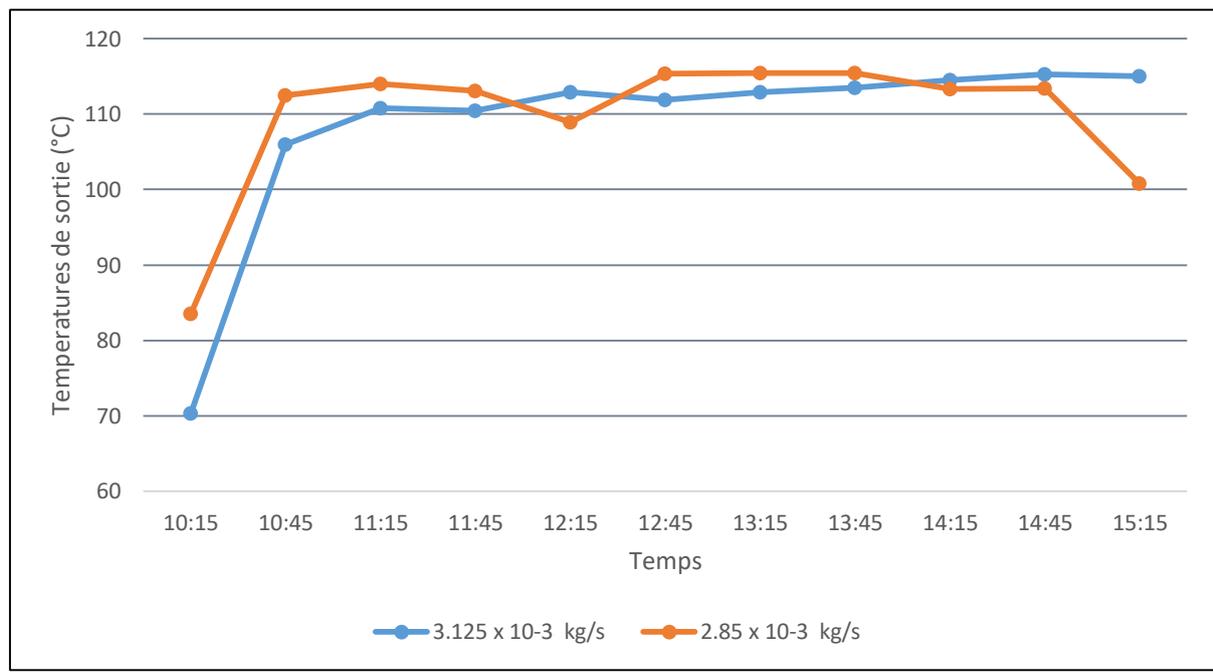


Figure 3.44 température de sortie en fonction du temps

Sur la figure (3.44) l'on remarque que les températures de sortie sont pratiquement stables à 118 C° même sans enveloppe en verre, cela confirme que la distance de notre effet de serre entre le tube absorbeur et l'enveloppe en verre est trop petite, de ce fait ce que l'on gagne en effet de serre on le perd en rayonnement absorbé et vice versa.

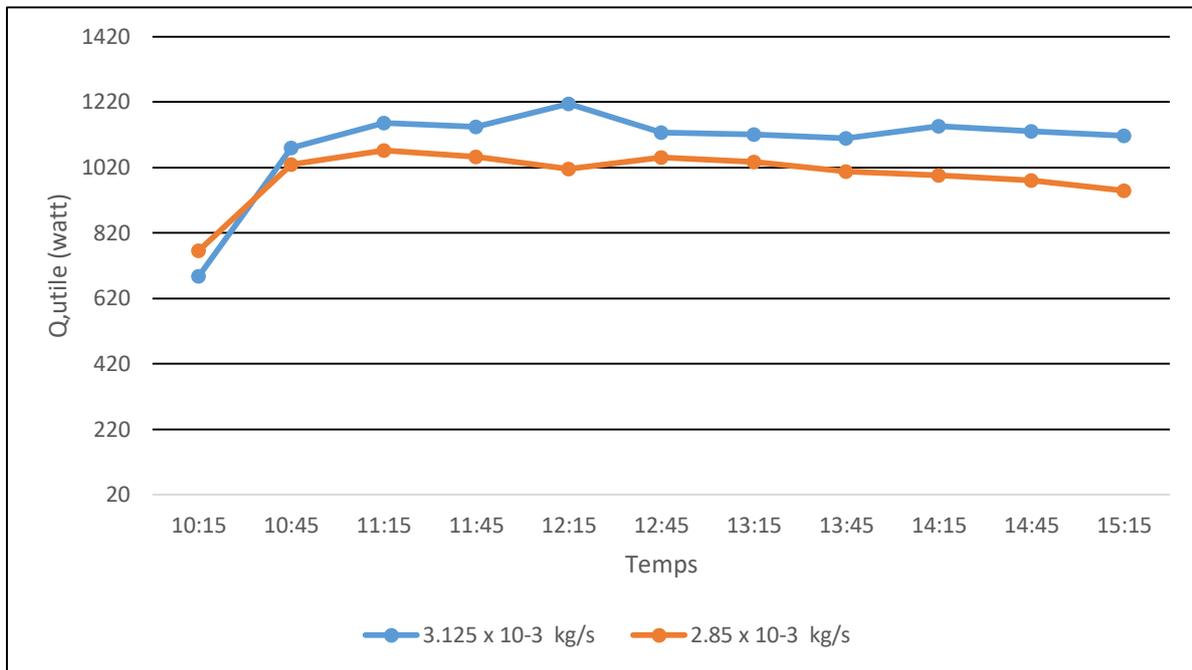


Figure 3.45 Evolution puissance utile en fonction du temps

Sur la figure (3.45) on voit que les puissances les plus grandes sont liées au débit le plus grand, vu que les valeurs du rayonnement sont similaires donc c'est le débit qui influence le plus la puissance utile, on note aussi que l'influence de l'enveloppe en verre puisque c'est cette courbe qui a les plus grandes puissances.

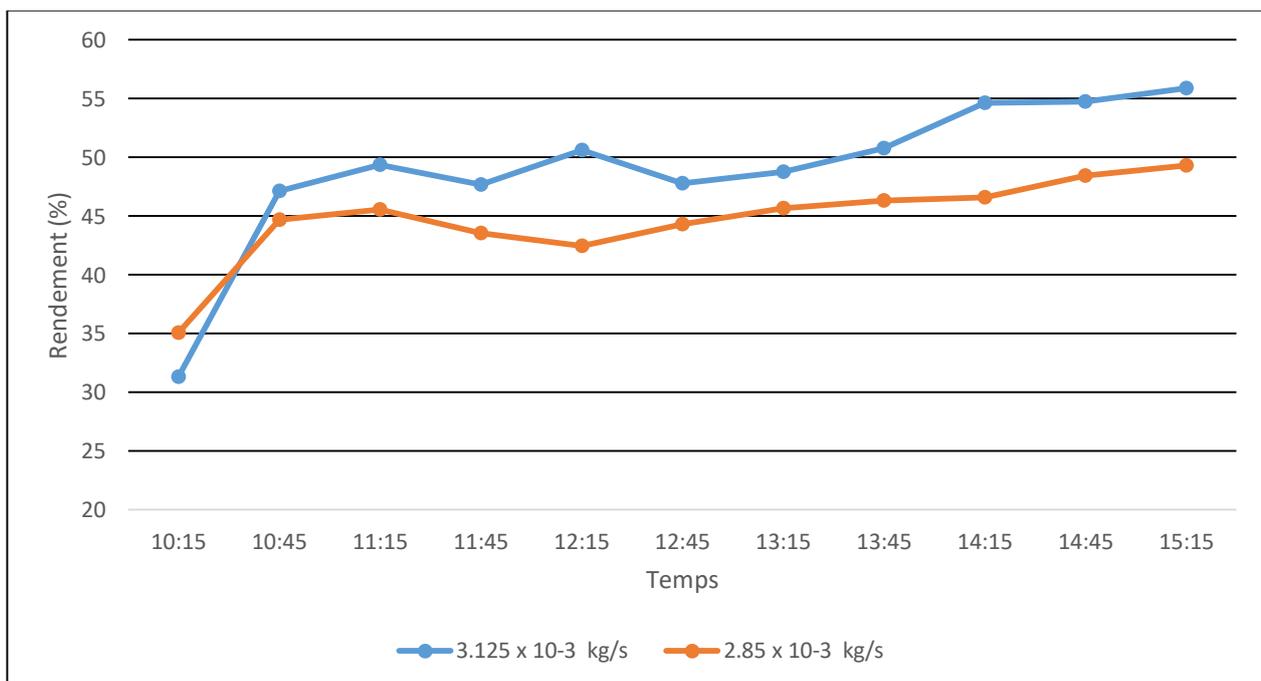


Figure 3.46 Graphe du rendement en fonction

On remarque sur la figure (3.46) que l'installation avec le tube en verre à un plus grand rendement malgré un débit un peu plus important, cela s'explique par l'influence qu'à l'effet de serre créé par le tube en verre sur la température de sortie.

❖ En prenant l'air comme fluide pour quelques mesures nous avons atteint un maximum de 298 C°. Cela s'explique par la différence entre la chaleur spécifique de l'air et de l'eau :

Cp. Eau = 4180 J/ (kg K)

Cp. Air : 1004J/ (kg K)

L'air chauffe beaucoup plus rapidement par rapport à l'eau.



**Figure 3.4 température de sortie en utilisant l'air comme fluide**

## **Conclusion générale et recommandations**

Suite à notre étude expérimentale exécuté dans différentes conditions et avec différents paramètres nous avons déduis que la température de sortie varie en fonction du Débit, en effet ce dernier a une grande influence, plus le débit est petit plus la température de sortie sera élevée, on peut aussi assimiler ce dernier au diamètre du tube absorbeur, un petit diamètre confère un petit débit.

Elle varie aussi en fonction du rayonnement, une journée de ciel clair avec un bon ensoleillement nous donnera de meilleures températures de sortie si l'installation est bien optimisée.

Nous avons étudié aussi l'influence de l'enveloppe en verre et donc l'importance de l'effet de serre que crée cette dernière, un bon effet de serre de 25 mm à 35 mm garantira moins de pertes de chaleur quand la température diminuera.

Notre installation dans son état actuel ne peut dépasser les 130 C° vu les nombreux défauts persistant, pour espérer atteindre de plus haute températures il faudrait revoir les points suivant :

### **A\la conception de l'installation :**

En effet il y'a une erreur de conception sur les arcs qui support la surface réflectrice ce qui rend la surface réceptrice un peu tordu et non symétrique, cela donne aussi une distorsion de la ligne focale à 20 cm de la fin du tube récepteur.

### **B\surface réflectrice :**

L'Alluco étant un composite de plastique et d'aluminium il serait préférable d'utiliser des miroirs ou des feuilles d'aluminium pour avoir une surface beaucoup plus réfléchissante.

### **C\Angle et surface d'ouverture :**

L'angle d'ouverture est assez petit ce qui nous donne une petite surface d'ouverture et limite la réception et concentration du rayonnement.

❖ Pour augmenter l'efficacité de concentrateur cylindro parabolique il existe plusieurs solutions très efficace tel que :

### **Changer de fluide caloporteur :**

En utilisant l'eau comme fluide caloporteur on pose la problématique du changement de phase puisque l'eau s'évapore à un peu plus que 100C°, préconiser un fluide caloporteur qui ne s'évapore pas à moins de 300C° serait un plus pour une telle installation.

### **Longueur du concentrateur :**

Un concentrateur plus long donnerait forcément une plus longue distance de concentration et donc des températures plus haute.

### **Cycle fermé :**

Notre étude s'est portée sur un cycle ouvert, en utilisant un cycle fermé nous aurions une plus grande température d'entrée et cela augmenterait également la température de sortie.

### **Double concentrateur :**

Contrairement un concentrateur cylindro-parabolique classique qui concentre la ligne focale sur la partie inférieure du tube absorbeur un double concentrateur crée une deuxième ligne focale qui se concentre sur la partie supérieure du tube récepteur et ainsi toute la surface du tube est recouverte par les deux lignes focales.

### **Tube modifié :**

L'on peut modifier l'intérieur du tube absorbeur pour y installer des ailettes pour ainsi augmenter la surface d'échange et faire passer plus d'énergie au fluide caloporteur, cela permettra ainsi d'augmenter beaucoup plus la température de sortie.

- ❖ Nous pouvons aussi conseiller une étude en modélisation pour ainsi connaître le plein potentiel théorique de l'installation et tester différents paramètres.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Y. Jannot, cours de transfert thermique, thermique solaire, édition : Mac Graw Hill, octobre 2003
- [2] J.A. Duffie and J.W. Beckman, solar engineering, edition: thermal process 2nd .INC ,1991
- [3] C. P. de brichaumbot et C. vauge, le gisement solaire, édition : ed.tek et doc paris, 1982
- [4] J.E. Braun et J.C. Mitchell, solar geometry for fixed and tracking surface, edition: solar energy laboratory, 1983
- [5] : Abderraouf Meziani et Mohamed Temim, Mémoire de fin d'étude, « Étude d'un capteur solaire à eau avec effet de concentrateur de type cylindro-parabolique », Université de Biskra, 2005.
- [6] M. capderou, atlas solaire de l'Algérie, tome 1, vol 1 et 2 modèle théorique et expérimentaux, édition : office des publications universitaire, Algérie ,1987
- [7] : Syndicat des énergies renouvelables, dernière révision du document : mai 2010, [www.enr.fr](http://www.enr.fr).
- [8] N. ESKIN, transient performance analysis of cylindrical parabolic concentrating collectors and comparison with experimental results, thèse,1999
- [9] s. kalogéro. sliod and j. ward., a simplified method for estimating intercept factor of parabolique Through collectors, proceedings of the forth word renewable energy congress, Denver. Colorado. USA
- [10] : Hamani Nadjette, Mémoire de magister, « Modélisation du flux solaire incident et de la Température de sortie dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration du rayonnement solaire incident », Université de Biskra, 2005.
- [11] : Zaghbi Ilham, Mémoire de magister, « Étude et réalisation d'un concentrateur solaire Parabolique », Université de Constantine, 2005.
- [12] A. Gama, M. Haddadi et A. Malek, « Étude et réalisation d'un concentrateur cylindro Parabolique avec poursuite solaire aveugle » Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 11, N°3 (2008) 437 – 451.
- [13] Donald R, Pitts, heat transfer, edition: shaums series, 1977
- [14] M. Iqbal, an introduction to solar energy, edition: academic press. Toronto, 1983
- [15] J. Bernard, énergie solaire calculs et optimisations, édition : ellipses, 2004
- [16] A. Mefti, M.Y. bouroubi, H. Mimouni, ' Evaluation du potentiel énergétique solaire', Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002).
- [17] K. Med El-Cherif, D. Lazhar, Mémoire de fin d'étude, « Étude des performances Thermiques d'un chauffe-eau solaire », Université de Ouargla, 2009.
- [18] « Enr.fr » site web spécialisé dans l'énergie solaire thermique.
- [19] « energy.gov.dz » site web du ministère Algérien de l'énergie.

[20] « lepanneausolaire.net » site web spécialisé dans les capteurs solaire thermique

[21] « hellopro.fr » site web de vente des instruments de mesure

[22] « Eu.flukecal.com » site web de « Fluke » le constructeur de l'acquisition utilisée