

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en génie mécanique,
Spécialité : Energétique.

Thème :

**Etude préliminaire des performances optiques
et thermiques d'un prototype solaire à
concentrateurs linéaire de Fresnel.**

Présenté par :

Mlle LAMMARI Leticia

Mlle KADI Fatima

Jury d'évaluation du mémoire :

President: Mr Sidali FOUCHANE

UMM TIZI-OUZOU

Examineur: Mr Nouredine YAMANI

UMM TIZI-OUZOU

Encadreur: Mr Hani BELTAGY

UMM TIZI-OUZOU

Co-encadreur: Mr Hicham BENDJEBBAS

UDES BOU-ISMAIL TIPASA

Promotion 2021/2022

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى اختبار أولي لمركز شمسي من نوع فريزل الذي تم إنشائه للتو في وحدة تنمية الأجهزة الشمسية ببواسماعيل ولاية تيبازة تم تقييم هذا الأخير عن طريق دراسة تجريبية تتعلق بالإشعاع الشمسي الحقل الشمسي و المستقبل تم إنشاء محطة قياس بغرض إجراء مختلف الاختبارات (الأداء و النجاعة).

يتكون النظام من صفين من المرايا و 6 خطوط من كل جانب من المستقبل و 12 مرايا في كل صف بطول 1.55م و عرضها 0.5م. المركز قيد التشغيل التلقائي الدائم بفضل نظام التتبع الشمسي الذي يسجل مختلف الإعدادات التي تسمح بقياس مختلف الأداء الطاقوية.

الكلمات المفتاحية

ضياح بصري ضياح شمسي، مستقبل فريزل، نوع من شمسي مركز شمسي، تركيز شمسية، طاقة حرارية.

Résumé

Le présent travail consiste à tester préliminairement un prototype solaire à concentration de type Fresnel qui vient d'être réalisé à l'unité de développement des équipements solaire (UDES). Les performances de ce dernier ont été évaluées et testées expérimentalement, elles concernent l'ensoleillement, le champ, et le récepteur. Une station de mesure a été conçue à cet effet permet de réaliser les différents tests et estimer les différentes performances de notre prototype solaire. Le prototype en question est composé de 2 rangées de miroirs et 6 lignes de chaque côté du récepteur, 12 miroirs par rangées d'une longueur de 1.55 m chacun et d'une largeur de 0.5 m. Le prototype est en fonctionnement automatique permanent, le système de contrôle enregistre différents paramètres de fonctionnement qui permettent de mesurer les performances énergétiques.

Mots clés : Energie solaire, concentration solaire, concentrateur linéaire de Fresnel, Focalisation, performances optiques, performances thermiques, pertes thermiques, pertes optiques.

Abstract

The present work consists of preliminary testing of a Fresnel-type concentrating solar prototype which has just been produced at the solar equipment development unit (UDES). The performances of the latter have been evaluated and tested experimentally, they concern sunshine, the field, and the receiver. A measuring station has been designed for this purpose to perform the various tests and estimate the different performances of our solar prototype.

The prototype in question is composed of 2 rows of mirrors and 6 lines on each side of the receiver, 12 mirrors per row with a length of 1.55 m each and a width of 0.5 m. The prototype is in permanent automatic operation, the control system records various operating parameters that allow energy performance to be measured.

Key words: Solar energy, Concentrating Solar Power, Fresnel concentrator, solar receiver, focusing, optical losses, thermal losses.

REMERCIEMENTS

Nous remercions avant tout Allah qui nous à donné le courage, la volonté et la patience pour accomplir ce modeste travail.

*Nos remerciements s'adressent à Monsieur **H. BENDJEBAS**, pour son encadrement de qualité et son soutien tout au long de stage, nous tenons à lui exprimer toute notre admiration et notre reconnaissance.*

*On tient aussi à remercier Monsieur **Z. BELGROUN** pour sa disponibilité et son aide au sien de l'unité, merci pour votre effort et le temps que vous nous avez consacré.*

*Nous tenons à exprimer nous remerciements les plus vifs et notre gratitude a Monsieur **M.ABBAS** le directeur de l'Unité de Développement des Equipements Solaire(UDÉS) d'avoir mis à notre disposition toutes les ressources nécessaires pour l'achèvement de notre travail.*

*Nous remercions sincèrement Monsieur **BELTAGY Hani** pour ses encouragements, ses conseils précieux sa patience et sa disponibilité qui nous à permis de mener à bien ce travail, ainsi que de nous avoir souvent fait partager sa vaste expérience.*

*A monsieur le président de jury **S.FOUCHANE**, qui nous à fait l'honneur de présider le jury de soutenance.*

A monsieur l'examineur le membre de jury soit vivement remercié pour avoir accepté d'examiner le présent travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes parents qui m'ont encouragé et soutenus tout au long de mon parcours étudiant, pour leurs sacrifices, bienveillance je n'en serais jamais arrivée là où je suis sans eux, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance et gratitude,

A la mémoire de ma grand-mère,

*A mes sœurs **KAHINA**, **DAHBLA**, **NADIA**, **FETTA**, **NASSIMA**, **SONIA** pour leur soutien permanent,*

*A mon frère **MEZIANE** ma force,*

*A mes précieux neveux **DACINE**, **MIRINA**, **ANAIS**, **YOUNES**, **MOHAMMED**, **LEA**, **WANES** la source de mon bonheur au quotidien,*

*A tous mes amis spécialement **SELMA**, **SOUAD** et **AHMED** qui m'ont toujours encouragés et tirés vers le haut,*

*A ma chère binôme et amie **FATIMA**,*

A toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragés,

Merci à tous.

LITICIA

Dédicaces

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance,.....

Je dédie le fruit de ma recherche :

A Ma mère, pour son affection qui me couvre, sa bienveillance qui me guide et sa présence à mes cotés a toujours été ma source de force, a celle qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A Mon père, l'épaule solide, la personne la plus digne de mon estime et de mon respect ,qui n'a jamais cessé de croire en moi.

Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain.

A mes très chères sœurs ; Karima, Chafiaa, Nora, Cylia et Lydia

Et leurs familles.

A mes chers frères ; Mohamed, Madjid.

A ma source de joie et du bonheur, mes neveux ; Islem, Adem, Kenza, Cerine, Rabah, Walid, et A toute ma famille.

A Mon meilleur ami : Younes .

A toutes les personnes qui ont cru en moi.

A ma chère binôme et amie LITICIA.

Merci à tous.

FATIMA

TABLE DES MATIERES :

RESUME

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAFIQUES ET TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

Introduction générale	17
Chapitre 1 : Généralités.....	19
I.1 Les énergies renouvelables	20
I.1.1 Energie éolienne	20
I.1.2 Energie hydraulique	20
I.1.3 La biomasse	21
I.1.4 La géothermie	22
I.1.5 L'énergie solaire	22
I.1.6 Conversion de l'énergie solaire.....	23
I.1.6.1 Energie solaire photovoltaïque	24
I.1.6.2 Energie solaire thermique	24
I.1.6.3 Technologie de la concentration du rayonnement solaire.....	25
I.2 Gisement et potentiel solaire.....	26
I.2.1 Etude du Gisement solaire	26
I.2.2 L'origine de l'énergie solaire.....	26
I.2.3 Calculs de différentes puissances liées au gisement solaire	26
I.2.3.1 Puissance dégagée par un astre.....	26
I.2.3.2 Puissance dégagée par le soleil.....	26
I.2.3.3 Puissance captée par la terre.....	27
I.2.4 L'énergie solaire reçue en un point du globe.....	27
I.2.5 Densité de flux solaire et localisation.....	28
I.2.6 Coordonnées géographiques.....	28
I.2.6.1 La latitude φ	28
I.2.6.2 La longitude	29

I.2.6.3 L'altitude Z	29
I.2.7 Les coordonnées horaires.....	29
I.2.7.1 La déclinaison δ	29
I.2.7.2 Angle horaire ω	30
I.2.8 Les coordonnées horizontales.....	30
I.2.8.1 Hauteur du soleil h	30
I.2.8.2 L'azimut solaire a	30
I.2.9 Eclairement solaire.....	31
I.2.9.1 Eclairement direct.....	31
I.2.9.2 Eclairement diffus.....	31
I.2.9.3 Eclairement global.....	31
I.2.10 Constante solaire.....	32
Conclusion.....	32
CHAPITRE II : LES CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES.....	33
II.1 Les systèmes à concentration solaire	34
II.2 Les différentes centrales solaires.....	35
II.2.1 Centrales à tour	36
II.2.2 Centrales à miroir parabolique (Dish-Stirling).....	37
II.2.3 Centrales à miroirs cylindro-paraboliques.....	38
II.2.4 Centrales solaires à miroirs de Fresnel	40
II.3 Les fluides caloporteurs ou thermodynamiques.....	41
II.4 Avantages et inconvénients des centrales CSP.....	43
II.5 Le stockage thermique	44
II.5.1 Méthodes de stockage thermique.....	44
II.5.2 Stockage thermique direct, indirect et semi-direct.....	47
II.6 Hybridation des centrales CSP.....	48
Conclusion	49

Chapitre III : Etat de l'art des collecteurs linéaires de Fresnel.....	50
III.1 Introduction.....	51
III.2 Définition et historique.....	51
III.3 Principe de fonctionnement.....	52
III.4 L'état de l'art des LFR.....	53
III.5 Différentes conceptions des LFR.....	55
III.6 Le récepteur thermique.....	58
III.7 Le récepteur multitube	58
III.8 Types de configurations de collecteurs de Fresnel linéaires.....	59
III.9 Génération de vapeur dans une centrale de Fresnel.....	61
III.9.1 Génération directe de vapeur	61
III.9.2 Génération indirecte de vapeur.....	63
III.10 Les installations de type linéaire de Fresnel dans le monde.....	63
III.11 Quelques travaux de recherche publiée dans le domaine des LFR.....	66
Conclusion.....	69
Chapitre IV : Modélisation du système.....	70
IV.1 Introduction	71
IV.2 Méthodologie	71
IV.3 Les paramètres d'un miroir	72
IV.4 La concentration solaire totale (CR)	74
IV.5 La puissance solaire	76
IV.6 Calcul des performances	77
IV.6.1 La relation entre la concentration solaire totale et le nombre de miroir	77
IV.6.2 Les nombres de miroirs	78
IV.6.3 La concentration solaire	78

IV.7 Optimisation de la centrale	79
Conclusion.....	85
Chapitre V : Etude expérimentale	86
V.1 Introduction	87
Présentation de l'UDES.....	87
V.2 Description physique de chaque étape	88
V.2.1 Optimisation des paramètres de conception	88
V.2.2 Paramètres d'optimisation de la géométrie du récepteur	88
V.2.3. La hauteur du récepteur.....	88
V.2.4 La largeur du récepteur	89
V.3 Les pertes optiques.....	90
V.3.1 Pertes dû à l'ombre des miroirs.....	90
V.3.2 Pertes par blockage.....	90
V.3.3 Pertes par débordement de rayon réfléchis.....	90
V.4 Les pertes thermiques	90
V.5 Déroulement du processus expérimental	91
V.5.1 Mise en place des miroirs réflecteurs sur la structure.....	91
V.5.2 Mise en place des supports miroirs	92
V.6 L'emplacement des moteurs électriques	93
V.6.1 Matériels utilisés	94
V.7 Présentation des résultats.....	99
V.8 Mesure des températures.....	106
V.9 Les pertes au bout d'une ligne.....	113
Conclusion.....	115
Conclusion générale	116
Références bibliographiques	119
Annexe.....	123

Liste des figures

Figure I.01: schéma d'une éolienne.

Figure I.02: Schéma de principe de la production de l'électricité par énergie hydraulique.

Figure I.03 : L'énergie biomasse.

Figure I.04 : Schéma de principe de la production de l'énergie par la géothermie.

Figure I.05 : Schéma d'un panneau photovoltaïque.

Figure I.06: Différentes formes de conversion de l'énergie solaire.

Figure I.07: Schéma de principe de la production de l'énergie électrique par les systèmes photovoltaïques.

Figure I.08 : Panneaux solaire thermique.

Figure I.09 : principe de fonctionnement d'un panneau solaire thermique.

Figure I.10: la relation entre le flux solaire et la période de l'année.

Figure I.11 : La densité du flux solaire en fonction des saisons.

Figure I.12 : Coordonnées géographiques du site.

Figure I.13 : La déclinaison solaire.

Figure I.14 : Les coordonnées horizontales.

Figure I.15 : Les différentes composantes du rayonnement solaire sur un plan Horizontal.

Figure II.01: Principe de fonctionnement des concentrateurs solaires

Figure II.02 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à tour.

Figure II.03: Centrale solaire à tour : Complexe solaire Noor Ouarzazate Maroc.

Figure II.04 : Centrale solaire utilisant des concentrateurs paraboliques (Maricopa, Arizona, États-Unis).

Figure II.05 : Principe de fonctionnement d'un capteur à miroirs paraboliques.

Figure II.06 : Schéma de principe de fonctionnement d'un concentrateur cylindro-parabolique.

Figure II.07 : Concentrateur à capteur cylindro-parabolique.

Figure II.08 : Principe de fonctionnement des concentrateurs linéaires de Fresnel.

Figure II.09 : Centrale solaire à miroirs de Fresnel.

Figure II.10 : Principe du stockage par chaleur sensible.

Figure II.11: Les différentes techniques du stockage de l'énergie thermique.

Figure II.12 : Schéma de principe d'une centrale hybride.

Figure III.01 : Concentrateur linéaire de Fresnel.

Figure III.02: Schéma de principe d'un concentrateur solaire de type Fresnel.

Figure III.03 : Premier prototype de collecteur linéaire de Fresnel de Francia en Italie en 1964.

Figure III.04 : Un collecteur linéaire de Fresnel dont le cadre est fabriqué en bois, (50-120°C).

Figure III.06 : Système de poursuite.

Figure III.07: Récepteur monotube sous vide.

Figure III.08 : Récepteur trapézoïdal avec surface absorbante rectangulaire.

Figure III.09 : Collecteurs linéaires de Fresnel avec différentes configurations d'absorbeurs.

Figure III.10 : Distribution des miroirs entre deux tubes d'absorbeurs.

Figure III.11 : Schéma de principe d'une centrale solaire à concentrateur linéaire de Fresnel avec mode DSG.

Figure III.12 : Schéma de principe d'une centrale solaire à concentrateur linéaire de Fresnel avec mode ISG.

Figure III.13 : Centrale Llo en France.

Figure IV.01: Concentrateur solaire de Fresnel avec une cavité trapézoïdale.

Figure IV.02: La relation entre la concentration solaire et le nombre des miroirs dans le réflecteur solaire de Fresnel pour $n=7$.

Figure IV.03: La relation entre la concentration solaire et le nombre des miroirs dans le réflecteur solaire de Fresnel pour $n=48$.

Figure V.01 : Unité de développement des équipements solaire.

Figure V.02 : Photo de la structure et du récepteur thermique.

Figure V.03 : Support miroir et palier roulement.

Figure V.04 : Test de focalisation.

Figure V.05 : Moteur électrique pas à pas.

Figure V.06 : Matériels utilisés pour les systèmes de poursuite électrique.

Figure V.07 : Les étapes de réalisation d'un système de poursuite manuelle.

Figure V.08 : Système de poursuite manuelle mis en place sur les concentrateurs.

Figure V.09 : L'état final de l'installation obtenue.

Figure V.10 : Acquisition de mesures.

Figure V.11 : La variation de l'éclairement direct durant quelques journées de tests.

Figure V.12 : Mesure du blockage.

Figure V.13 : Mesure de l'angle d'inclinaison.

Figure V.14 : Profil des températures pour la journée du 16/06/2022 avec 50% du champ.

Figure V.15 : Profil des températures pour la journée du 19/06/2022.

Figure V.16 : Profil des températures pour la journée du 21/06/2022.

Figure V.17 : Profil des températures pour la journée du 26/06/2022.

Figure V.18 : Pertes au bout d'une ligne du récepteur.

Figure V.19 : Etats du récepteur durant les tests.

Figure V.20 : Profil des températures pour la journée du 27/06/2022.

Figure V.21 : Profil des températures pour la journée du 28/06/2022.

Figure V.22 : Profil des températures pour la journée du 29/06/2022.

Figure V.23 : Niveau des températures enregistrées à l'aide de la camera thermique.

Liste des tableaux

Tableau II.01 : Températures de fonctionnement des fluides caloporteurs

Tableau II.02 : Différence entre les centrales CSP

Tableau II.03 : Avantages et inconvénients des centrales CSP

Tableau III.01: Principales caractéristiques des centrales solaires à réflecteurs linéaires de Fresnel existants

Tableau IV.01: Nombre de miroirs en fonction des paramètres de position θ_n , Q_n , S_n .

Tableau IV.02: Configuration de sept miroirs en fonction de U_n , D_n , l_n pour $n=7$

Tableau IV.03: La variation de la concentration solaire en fonction du nombre de miroirs pour $n=7$

Tableau IV.04: Nombre de miroirs en fonction des paramètres de position θ_n , Q_n , S_n pour $n=25$

Tableau IV.05: Configuration des miroirs en fonction de U_n , D_n , l_n pour $n=25$

Tableau IV.06: La variation de la concentration solaire en fonction du nombre de miroirs pour $n= 25$

Tableau V.01 : Valeurs mesurées de l'angle d'inclinaison optimale de chaque miroir pour la journée de 26/06/2022

Tableau V.02 : Valeurs mesurées de l'angle d'inclinaison optimale de chaque miroir pour la journée de 29/06/2022

Tableau V.03 : Valeurs mesurées du blockage de la journée du 26/06/2022

Tableau V.04 : Valeurs mesurées du blockage de la journée du 29/06/2022

Tableau V.05 : Valeurs mesurées des pertes au bout d'une ligne du récepteur pour les journées du 28 et 29/06/2022

Liste des abréviations

ORC : Organic Rankine Cycle (cycle de Rankine organique).

CSP : Concentrating solar power (centrale thermodynamique à concentration).

HFCs : Heliostat Field collectors (concentrateur solaire à tour).

PDCs : Parabolic Dish collectors (concentrateur solaire parabolique Dish-Stirling).

LFRs : Linear Fresnel Reflectors (réflecteur linéaire de Fresnel).

PTCs : Parabolic trough collectors (collecteur cylindro-parabolique).

HTF : heat transfer fluid (Fluide de transfert thermique).

PCM : Phase Change Material (matériau à changement de phase).

CPC : Composed Parabolic Concentrator (réflecteur secondaire composé).

CLFR : Compact Linear Fresnel Reflector (Réflecteur de Fresnel linéaire compact).

PSA : Plataforma Solar de Almeria.

DSG : Direct Steam Generation (génération directe de vapeur).

ISG : Indirect Steam Generation (génération indirecte de vapeur).

CNIM : Constructions Navales et Industrielles de la Méditerranée.

FirstOPTIC : First-principle OPTical Intercept Calculation.

UDES : Unité de Développement des Equipements Solaires.

GPS : Global Positioning System (Système de positionnement par satellite).

DNI : Direct Normal Irradiation (les irradiances normales directes).

IAM : Incidence angle modifier.

EES : Engineering Equation Solver.

Liste des symboles

φ	La latitude du lieu	(degré)
δ	La déclinaison solaire	(degré)
L	La longitude du lieu	(degré)
Z	L'altitude d'un point	(mètre)
a	L'azimut solaire	(degré)
ω	L'angle horaire	(degré)
TSV	Le temps solaire vrai	(heure)
σ	Constante de Stefan – Boltzmann	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$
h	La hauteur du soleil	(degré)
C	La constante solaire	(W/m ²)
C_P	Chaleur spécifique	(J/kg.K)
m	La masse	(kg)
H	L'enthalpie	(kj/kg)
T	Température	(K)
	Blockage	(cm)
DNI	Irradiation normal directe	(KWh/m ²)
S	La surface	(m ²)
P	La puissance	(W)
Q_n	La position	(mm)
(θ_n)	L'angle d'inclinaison	(degré)
(S_n)	Le décalage	(mm)
ζ_0	La moitié de la distance angulaire	(degré)
W	La largeur des miroirs	(mm)
f	La distance focale	(mm)
ζ_0	La moitié de la distance angulaire du soleil	(degré)
E_f	L'énergie solaire sur l'absorbeur	(J)
U_n, D_n, I_n	Rayons solaires réfléchis l'absorbeur	/
Sec	La sécante l'inverse du cosinus	(degré)
CR	La concentration solaire totale	/

C_{l_0}	La concentration solaire du miroir central primaire	/
A	La surface collectrice totale	(m ²)
I	L'éclairement solaire direct.	(W/m ²)
ρ	La réflectivité de miroir.	/
γ	Le facteur d'interception.	/
τ	La transmittivité de la couverture en verre.	/
α	L'absorptivité de la surface de récepteur	/

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Ces dernières années, notre société a connu beaucoup de changements, l'évolution des activités humaines vont mener à l'épuisement des ressources fossiles non renouvelables et la demande croissante en énergie. De plus, le phénomène du changement climatique menace l'équilibre de notre écosystème et fait peser un risque sur notre planète, le penchement vers les énergies renouvelables devient alors une solution cohérente en vue de ses multiples avantages.

Des ressources énergétiques infinies et abondamment disponibles existent et doivent être exploitées ; parmi elles on trouve l'énergie solaire, actuellement les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation grâce à leur rentabilité en termes de performance, et aux rendements élevés qui peuvent être obtenus, l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, L'utilisation des concentrateurs solaires linéaires de Fresnel pour la production d'électricité par centrale thermodynamique est une solution de plus en plus attractive, il s'agit d'une technologie simple et nécessitant des coûts d'investissements moindres par rapport aux autres technologies des concentrateurs solaires. Malgré les bonnes performances de cette technologie, ça reste toujours nécessaire de les améliorer.

Notre travail est consacré à une étude préliminaire des performances optiques et thermiques d'un prototype solaire à concentration linéaire de Fresnel à travers une étude théorique et expérimentale, ce dernier est situé à l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) situé à Bou-Ismaïl wilaya de Tipaza. Pour cela nous avons établi le plan de travail suivant :

- Le premier chapitre présente quelques généralités, il comprend deux parties, la première est consacrée aux énergies renouvelables et leurs utilisations et les diverses applications de l'énergie solaire, puis en seconde partie nous avons parlé sur le gisement solaire où nous avons présenté les différents paramètres qui influent sur ce dernier : coordonnées géographiques, coordonnées horizontales et coordonnées horaires.
- L'étude des différentes technologies des centrales solaires thermodynamiques a fait l'objet du deuxième chapitre dans lequel nous avons présenté les différents types de concentrateurs solaires linéaires et ponctuelles.

INTRODUCTION GENERALE

- Dans le chapitre trois nous avons présenté un état de l'art et un état des lieux des concentrateurs linéaires de Fresnel où nous avons présenté une description détaillée de cette technologie : optique et thermique.
- Une modélisation théorique du système a fait l'objet du quatrième chapitre, où un calcul d'optimisation et de dimensionnement a été effectué dans lequel nous avons pris en considération tout les paramètres constituant le système : l'angle d'inclinaison, décalage, le positionnement, la distance focale et la puissance absorbée, à la base de calcul une configuration optimale a été obtenue qui donne de meilleures performances.
- Le dernier chapitre est consacré à l'étude expérimentale de notre prototype solaire où nous avons décrit les différentes étapes de réalisation, les instruments de mesure utilisées et les différents résultats de tests.

Enfin, on termine par une conclusion générale regroupant les conclusions sur les différents chapitres, clôturés par quelques recommandations afin d'enrichir ce travail dans le futur.

Chapitre 1 : Généralités

GENERALITES

I.1 Les énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyen de produire de l'énergie à partir de sources ou ressource théoriquement illimité, disponible sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... au contraire les énergies renouvelables sont produites à partir de source comme le soleil, le vent l'eau, la chaleur de la terre, et les déchets organiques. Qui sont théoriquement inépuisables à l'échelle humaine.

I.1.1 Energie éolienne :

L'énergie éolienne exploite l'énergie cinétique du vent à l'aide des ancêtres éoliennes qui sont des moulins à vent. Elles peuvent être installées sur terre ou en mer. L'énergie éolienne est une énergie intermittente c'est-à-dire que les éoliennes ne produisent de l'énergie que lorsqu'il y a du vent. Cette énergie cinétique est transformée en énergie mécanique puis cette dernière en énergie électrique (électricité).[1]



Figure I.01: schéma d'une éolienne.

I.1.2 Energie hydraulique :

L'énergie hydraulique désigne l'énergie qui peut être obtenue via les courants marins et les barrages. Les mouvements de l'eau actionnent des turbines qui ainsi produisent de l'énergie, plus la pression de l'eau est forte plus la production de l'énergie est importante. Elle dépend des précipitations du débit des cours d'eau. [1]



Figure I.02: schéma de principe de la production de l'électricité par énergie hydraulique.

I.1.3 La biomasse :

(Masse des végétaux) réunit le bois, la paille, les rafles de maïs, le biogaz et les biocarburants:

Le bois énergie représente 14 % de la consommation énergétique mondiale. Issu des déchets de la forêt ou des industries du bois, il est brûlé pour produire de la chaleur.

Le biogaz est issu de la fermentation des déchets organiques. Sa combustion produit de la chaleur, mais également de l'électricité par cogénération.

Les biocarburants proviennent de plantes cultivées (tournesol, betterave, colza...).

Le biodiesel, l'éthanol, et son dérivé. Ils sont mélangés à de l'essence ou à du gazole.[2]



Figure I.03 : L'énergie biomasse.

GENERALITES

I.1.4 La géothermie :

Depuis plusieurs années, les ingénieurs ont développé différentes méthodes pour produire de l'énergie. La géothermie en fait partie. Ce terme regroupe toutes les applications qui permettent de récupérer la chaleur contenue dans le sous-sol ou les nappes d'eau souterraines pour ensuite la transformer en énergie. La géothermie consiste à exploiter la chaleur souterraine pour générer de l'électricité ou pour le chauffage. Contrairement aux énergies fossiles comme le pétrole ou le gaz naturel, cette technique exploite un stock d'énergie inépuisable. En effet, la chaleur qui provient du centre de la Terre est illimitée. Est qu'elle constitue une source d'énergie écologique. Son exploitation nécessite très peu de combustibles fossiles et la quantité moyenne du CO₂ dégagée dans l'atmosphère est dix fois plus faible que les centrales de gaz naturel. [3]



Figure I.04 : schéma de principe de la production de l'énergie par la géothermie.

I.1.5 L'énergie solaire :

L'énergie solaire produite à partir de la conversion du rayonnement solaire, est la plus abondante de toutes les ressources énergétiques et peut même être exploitée par temps nuageux (pour les applications basses températures). La vitesse à laquelle l'énergie solaire est interceptée par la Terre est environ 10 000 fois supérieure à la vitesse à laquelle l'humanité consomme de l'énergie. [4]

Les technologies de l'énergie solaire permettent de produire de la chaleur, du froid, de l'éclairage naturel, de l'électricité. Elles consistent à convertir la lumière du soleil en énergie électrique ou en chaleur, soit au moyen de panneaux photovoltaïques, soit au moyen de miroirs qui concentrent le rayonnement solaire. On distingue deux moyens principaux de convertir l'énergie solaire :

GENERALITES

- Conversion en électricité : Energie solaire photovoltaïque.
- Conversion en chaleur : Energie solaire thermique.



Figure I.05 : Schéma d'un panneau photovoltaïque.

I.1.6 Conversion de l'énergie solaire :

Il existe de nombreuses technologies permettant de produire de la chaleur et/ou de l'électricité en utilisant directement l'énergie solaire.

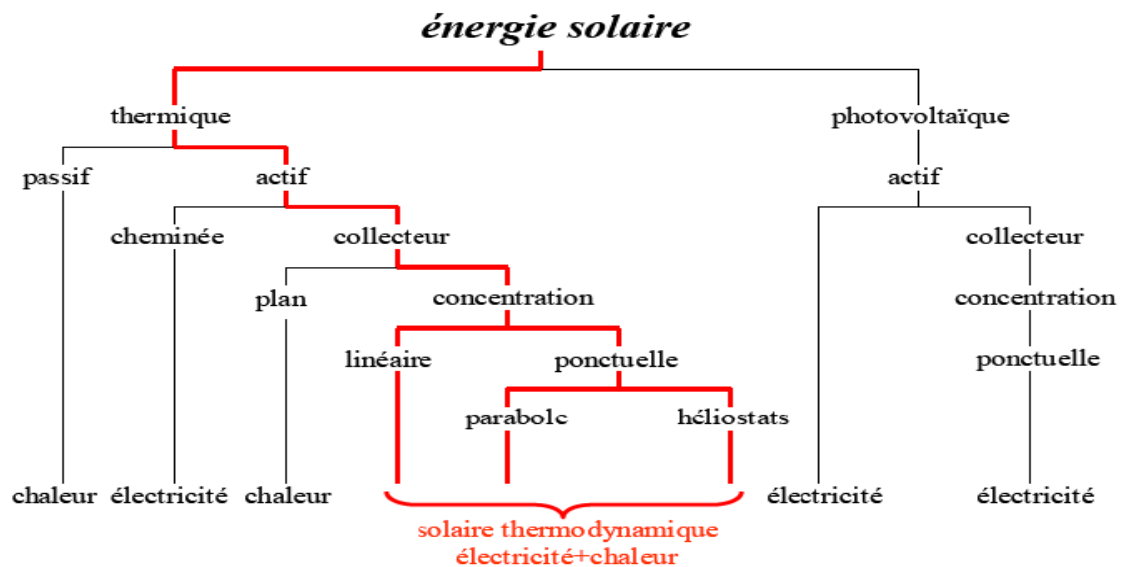


Figure I.06: Différentes formes de conversion de l'énergie solaire. [5]

GENERALITES

La première distinction à faire entre ces différentes technologies réside entre le solaire thermique et le solaire photovoltaïque.

I.1.6.1 Energie solaire photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir du silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité.[6]

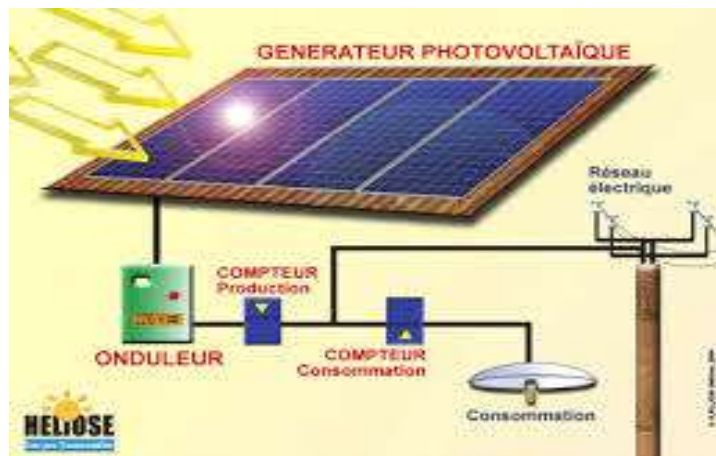


Figure I.07: schéma de principe de la production de l'énergie électrique par les systèmes photovoltaïques.

I.1.6.2 Energie solaire thermique :

Le solaire thermique consiste à convertir l'énergie radiative du soleil en énergie thermique ou calorifique utilisable, grâce à des panneaux solaires et des absorbeurs fonctionnant par effet de serre, on peut citer par exemple un capteur solaire plan qui est utilisé pour la production de

GENERALITES

l'eau chaude sanitaire, un capteur solaire à air qui est utilisé pour le chauffage des locaux. La deuxième application de l'énergie solaire thermique est l'utilisation des miroirs qui concentrent le rayonnement solaire directe pour rediriger et concentrer le rayonnement solaire sur une cible appelée foyer.



Figure I.08 : Panneaux solaire thermique.

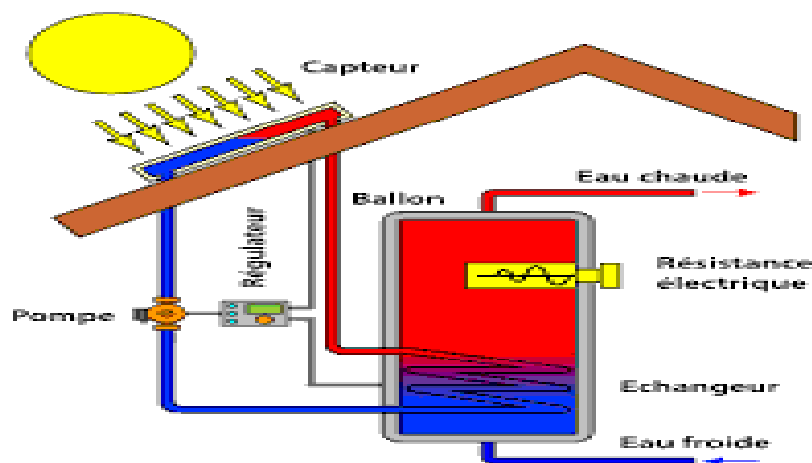


Figure I.09 : principe de fonctionnement su solaire thermique.

I.1.6.3 Technologie de la concentration du rayonnement solaire :

L'énergie solaire thermodynamique est l'une des utilisations du rayonnement solaire direct. La technique consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer des fluides à haute température pour produire de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels. Pour produire de l'électricité, la technologie de concentration exploite le rayonnement solaire direct, et en raison de l'énergie le soleil n'est pas très dense, il faut le concentrer pour obtenir de hautes température (obtenir de la vapeur). Au fait, grâce à la surface parabolique

GENERALITES

réfléchissante (miroir) ou cylindro-paraboliques ou plats, La lumière est concentrée en foyer ponctuel ou en foyer linéaire. Le rayonnement solaire concentré est transformé en chaleur grâce à des absorbeurs, cette dernière est extraite par un fluide caloporteur généralement l'eau qui se transforme en vapeur saturée surchauffée afin de produire de l'électricité grâce à un cycle ORC. [7]

I.2 Gisement et potentiel solaire.

I.2.1 Etude du Gisement solaire :

L'étude du gisement solaire revient essentiellement à évaluer le rayonnement solaire reçu au sol. En pratique, il existe deux sources de données solaires : la première est constituée de données solaires mesurées au sol disponible au sein de réseaux météorologiques et dans les stations radiométriques. L'autre se compose d'images numériques fournies par les satellites météorologiques. Il y a plusieurs modèles donnent le rayonnement solaire en fonction des paramètres atmosphériques et astronomiques. Généralement exprimés par des approches semi empiriques.

I.2.2 L'origine de l'énergie solaire :

L'astre solaire est une étoile de 1 400 000 km de diamètre (110 fois celui de la Terre) au sein duquel se produit une réaction de fusion (fusion d'hydrogène en hélium) générant d'énormes quantités d'énergie. Une toute petite partie de cette énergie arrive sur la Terre, par rayonnement électromagnétique.[8]

I.2.3 Calculs de différentes puissances liées au gisement solaire :

I.2.3.1 Puissance dégagée par un astre :

Loi de Stefan-Boltzmann : La puissance dégagée par un astre est proportionnelle à sa température de surface à la puissance 4 : [8]

$$P_{\text{dégagée}} = S \times \sigma \times T^4 \quad (1)$$

S : Aire de l'astre.

σ : Constante de Stefan – Boltzmann $\simeq 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

I.2.3.2 Puissance dégagée par le soleil :

Aire de la surface du soleil : $S = 4\pi R^2$ (2)

Avec $R = 696\,342\,000\,m$

GENERALITES

Température superficielle du soleil : $T = 5800\text{K}$.

$P_{\text{dégagée par le Soleil}} \approx 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$ [8]

I.2.3.3 Puissance captée par la terre :

Pour calculer la puissance totale reçue par la surface de la terre, on considère que le rayonnement solaire intercepté par la terre est approximativement le même que celui intercepté par un disque de même rayon que la terre et qui ferait face au rayonnement : [8]

$$P_{\text{capté par la terre}} = 1369 \times \pi \times 6371000^2 = 17 \cdot 10^{16} \text{ W} \quad (3)$$

C'est la puissance captée par la terre avant de traverser l'atmosphère (Air Mass 0).

$$P_{\text{captée par la terre}} \ll P_{\text{dégagée par le soleil}} \approx 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}.$$

I.2.4 L'énergie solaire reçue en un point du globe :

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- l'énergie solaire envoyée par le Soleil (fluctuations décennales, saisonnières, et ponctuelles).
- la nébulosité (nuages, brouillards, etc.).
- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du Soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface.

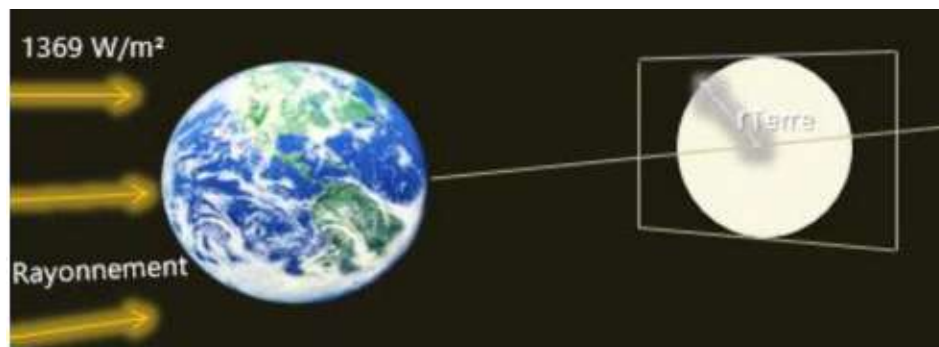


Figure I.10: la relation entre le flux solaire et la période de l'année.

Le rayonnement solaire n'est pas uniforme au sol, il dépend de la période de l'année, de l'heure, de la localisation (longitude, latitude) et des conditions atmosphériques (Trouble de Link et météo).

Plus on est proche des pôles, plus le rayonnement est important, Donc la surface couverte par la puissance est plus grande et le flux solaire par mètre carré faible. [8]

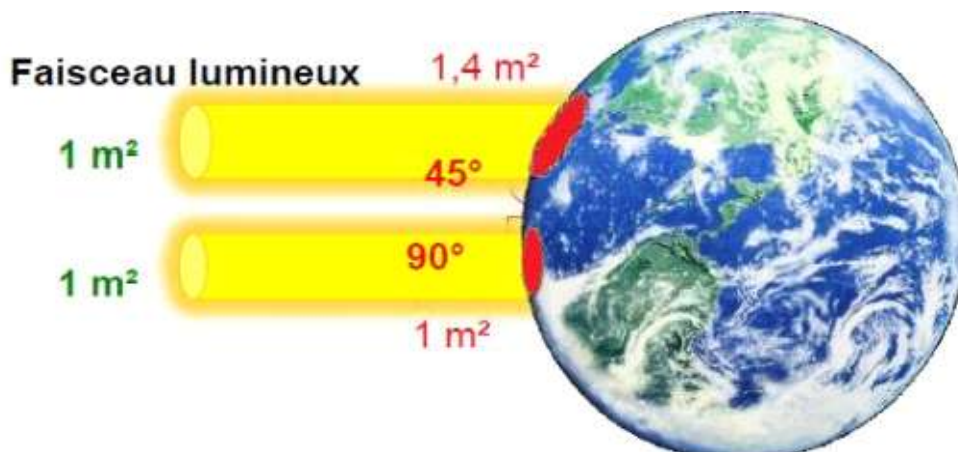


Figure I.11 : La densité du flux solaire en fonction des saisons.

I.2.5 Densité de flux solaire et localisation :

Le pôle nord est incliné vers le soleil, l'hémisphère sud est d'abord à l'ombre, puis l'équateur et enfin dans l'hémisphère nord. C'est pour cette raison que les journées sont longues dans l'hémisphère nord, courtes dans l'hémisphère sud, d'une durée de 12 heures à l'équateur.

Le soleil apparaît d'abord dans l'hémisphère nord, puis dans l'équateur, et en dernier dans l'hémisphère sud.

Pôle Sud incliné vers le soleil : Il fait jour d'abord dans l'hémisphère sud, puis à l'équateur et enfin dans l'hémisphère nord. C'est pour cette raison que les journées sont longues dans l'hémisphère sud, courtes dans l'hémisphère nord et durent 12h à l'équateur.

La nuit apparaît d'abord dans l'hémisphère nord, puis l'équateur et enfin dans l'hémisphère sud. [8]

I.2.6 Coordonnées géographiques :

La Terre est séparée par l'équateur en deux demi sphères, l'hémisphère Nord pour celle située du côté du pôle Nord, et l'hémisphère Sud pour celle qui est située du côté du pôle Sud. D'autre part, elle est partagée d'Ouest en Est, par le méridien d'origine qui passe par Greenwich. Les coordonnées géographiques permettent de repérer un point sur la terre.

I.2.6.1 La latitude φ :

La latitude d'un lieu donné est l'angle formé par la verticale de ce lieu et le plan de l'équateur, elle est exprimée en degré, elle est comptée de 0 à 90° à partir de l'équateur vers les pôles, positivement vers le nord et négativement vers le sud.

I.2.6.2 La longitude L :

La longitude d'un lieu donné est l'angle formé par le méridien de ce lieu avec le méridien d'origine. A partir de cette origine elle varie entre 0 et 180° positivement vers l'ouest et négativement vers l'est.

I.2.6.3 L'altitude Z :

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer=0), elle est exprimée en mètre.

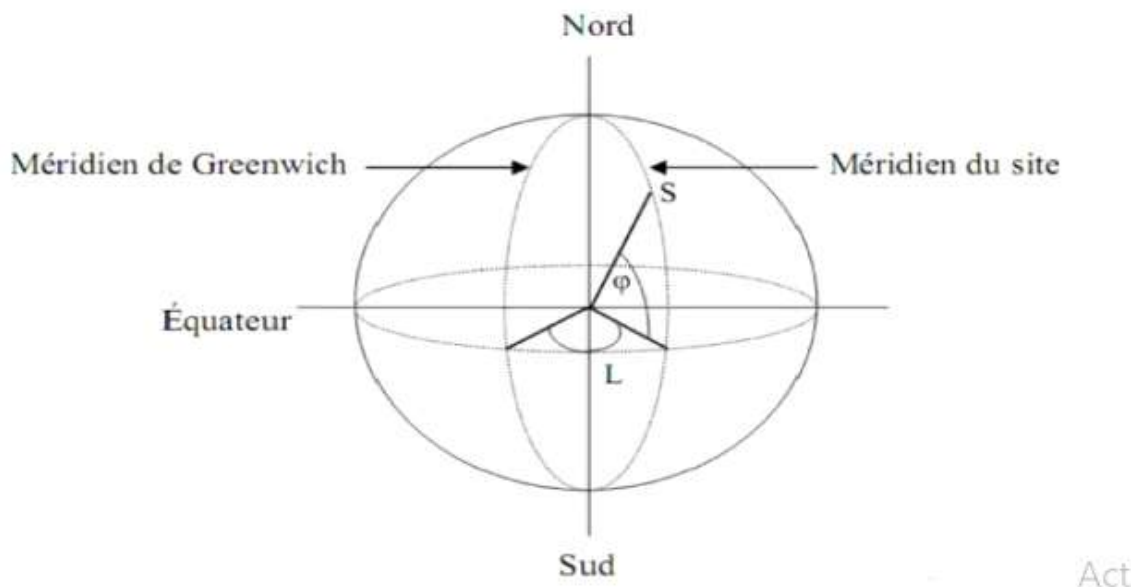


Figure I.12 : Coordonnées géographiques du site.

I.2.7 Les coordonnées horaires :

I.2.7.1 La déclinaison δ :

Coordonnée verticale dans le système de coordonnées horaires, c'est l'angle compris entre la direction d'un astre et le plan de l'équateur céleste. Il varie de 0° à 90° positivement vers le pôle nord et négativement vers le pôle sud, la valeur de la déclinaison peut être obtenue (en degrés) par la formule suivante ou l'argument de la fonction sin est en degrés et n le numéro n du jour de l'année :

$$\delta = 23.45 \sin ((n-81)) \quad (4)$$

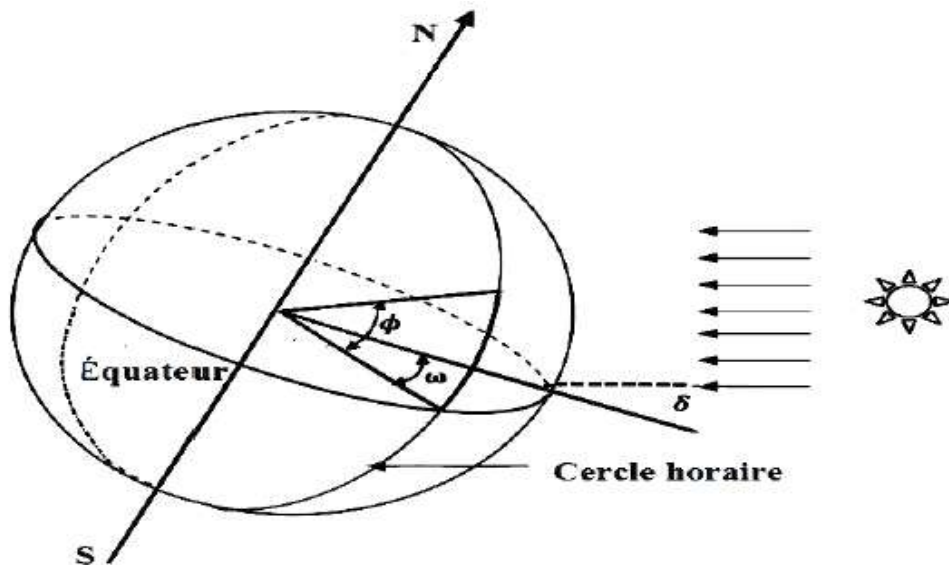


Figure I.13 : la déclinaison solaire.

I.2.7.2 Angle horaire ω :

C'est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui passant par la direction du soleil, correspond au déplacement angulaire du soleil vers l'est ou vers l'ouest de plan méridien local, il définit le vrai temps solaire. Il peut être calculé par la relation suivante :

$$\omega = 15(\text{TSV}-12) \quad (5)$$

TSV : temps solaire vrai

I.2.8 Les coordonnées horizontales :

I.2.8.1 Hauteur du soleil h :

Angle que fait la direction de l'astre avec le plan horizontal (tangent au sol) varie entre 0 et 90, au lever et au coucher du soleil cet angle vaut 0.

L'expression de h est donnée par

$$\text{Sin}(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (6)$$

$$h = \arcsin[\sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega)] \quad (7)$$

I.2.8.2 L'azimut solaire a :

C'est l'angle formé par la projection de la direction du soleil et la direction sud. On le calcul par la relation suivante :

$$\sin(a) = \frac{\sin(\omega) + \cos(\delta)}{\cos(h)} \quad (8)$$

GENERALITES

$$a = \arcsin \frac{\sin(\omega) + \cos(\delta)}{\cos(h)} \quad (9)$$

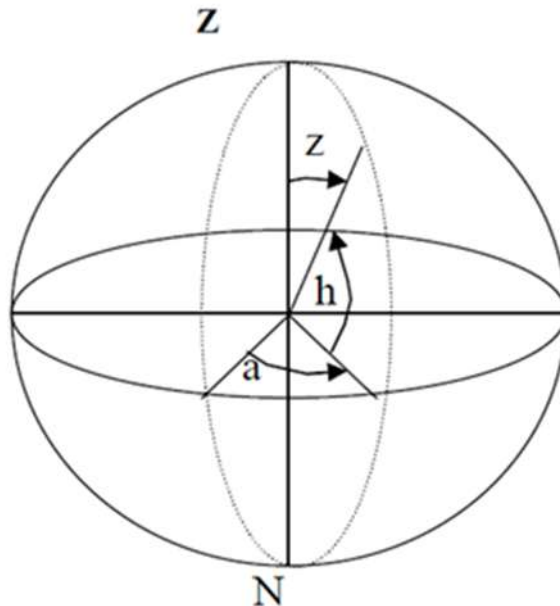


Figure I.14 : Les coordonnées horizontales.

I.2.9 Eclairement solaire :

L'éclairement équivaut à la puissance solaire reçue par un récepteur, on distingue deux types d'éclairement : celui du aux rayons solaires directs et celui du au rayonnement solaire diffusé par le ciel ou réfléchi par une surface, cela dépend de l'orientation de la surface par rapport au soleil.

I.2.9.1 Eclairement direct :

C'est la lumière du soleil qui atteint directement la surface de la terre sans obstacles, il provient du seul disque solaire, mesuré sur une surface perpendiculaire à l'angle solide limité au disque solaire d'où provient le rayonnement direct, pour mesurer l'éclairement direct on utilise un pyrhéliomètre.

I.2.9.2 Eclairement diffus :

C'est le rayonnement qui a subi une réflexion ou une diffusion durant sa traversée de l'atmosphère, il n'a pas de direction unique, son intensité est mesurée à l'aide d'un pyranomètre muni d'une bande.

I.2.9.3 Eclairement global :

GENERALITES

Englobe tous les rayonnements solaires, c'est la somme du rayonnement direct et diffus, il est mesuré à l'aide d'un pyranomètre.

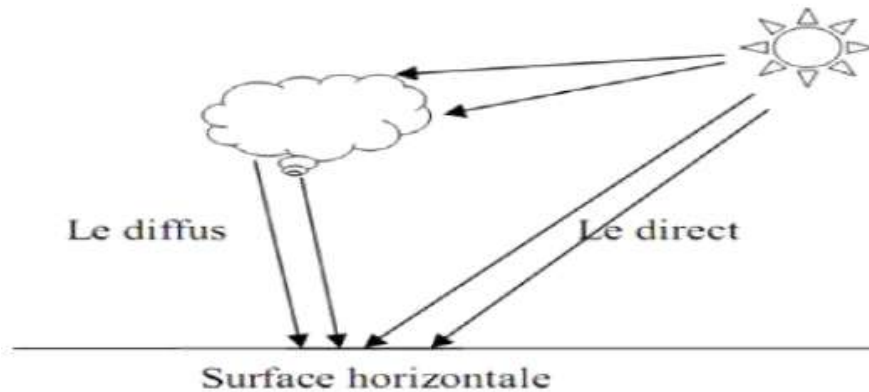


Figure I.15 : Les différentes composantes du rayonnement solaire sur un plan Horizontal.

I.2.10 Constante solaire :

Un plan d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire et au bord de l'atmosphère terrestre reçoit la fonction de puissance rayonnante de la distance Soleil-Terre. Compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre, cette distance varie au cours de l'année, tout comme la puissance reçue par la surface associée. Cependant, le flux solaire n'a pas beaucoup changé au fil du temps. Aussi appelée constante solaire, notée C , est la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre. La communauté internationale a choisi en l'an 2000 la valeur C^* de la constante solaire :

$$C = 1366 \text{ W/m}^2.[9]$$

Conclusion :

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire. Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend principalement du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

CHAPITRE II
LES CENTRALES SOLAIRES
THERMODYNAMIQUES

CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES

II.1 Les systèmes à concentration solaire :

A la fin du 19^{ème} siècle, les premières expérimentations apparaissent dans le domaine du CSP (l'Exposition Universelle de 1878). Au 20^{ème} siècle, les premiers systèmes paraboliques pour la génération de vapeur ont été développés. À la fin des années 1970, des projets pilotes de centrales solaires à concentration ont été lancés aux États-Unis, en Russie, au Japon et en Europe. Les années 1980 marquent le début de la production en série de ces centrales électriques dans le désert californien. Aujourd'hui, la technologie solaire thermique s'est considérablement développée et de nombreux projets l'utilisent.[10]

Un système solaire à concentrations est un système qui utilise des concentrateurs pour concentrer et rediriger le rayonnement solaire sur un absorbeur linéaire ou ponctuel, ce système thermique centralisé peut atteindre des températures plus élevées que les systèmes thermiques non concentrés conventionnels. Alors que les chauffe-eau domestiques produisent de l'eau à environ 50 degrés, le fluide peut être chauffé à des températures d'environ 250 à 1000°C par concentration. Ils peuvent ensuite être utilisés dans des procédés industriels, comme la production d'électricité (on dit parfois « énergie solaire thermodynamique »). D'autres utilisations directes ou indirectes des fluides thermiques sont également possibles, comme le dessalement de l'eau de mer, le refroidissement ou la génération d'hydrogène.[10]

L'un des avantages de cette technologie est l'utilisation de cycles thermodynamiques classiques (cycle de Rankine) et des équipements déjà largement testé et approuvé. Autre principal avantage est la possibilité de connecter la centrale au système de stockage thermique, les centrales solaires à concentration peuvent également être hybrides avec d'autres sources de production intermittentes, telles que le photovoltaïque ou l'éolien, ou bien une autre ressource conventionnelle tel que le gaz naturel ou le charbon pour mieux répondre à la demande du réseau. [11]

CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES

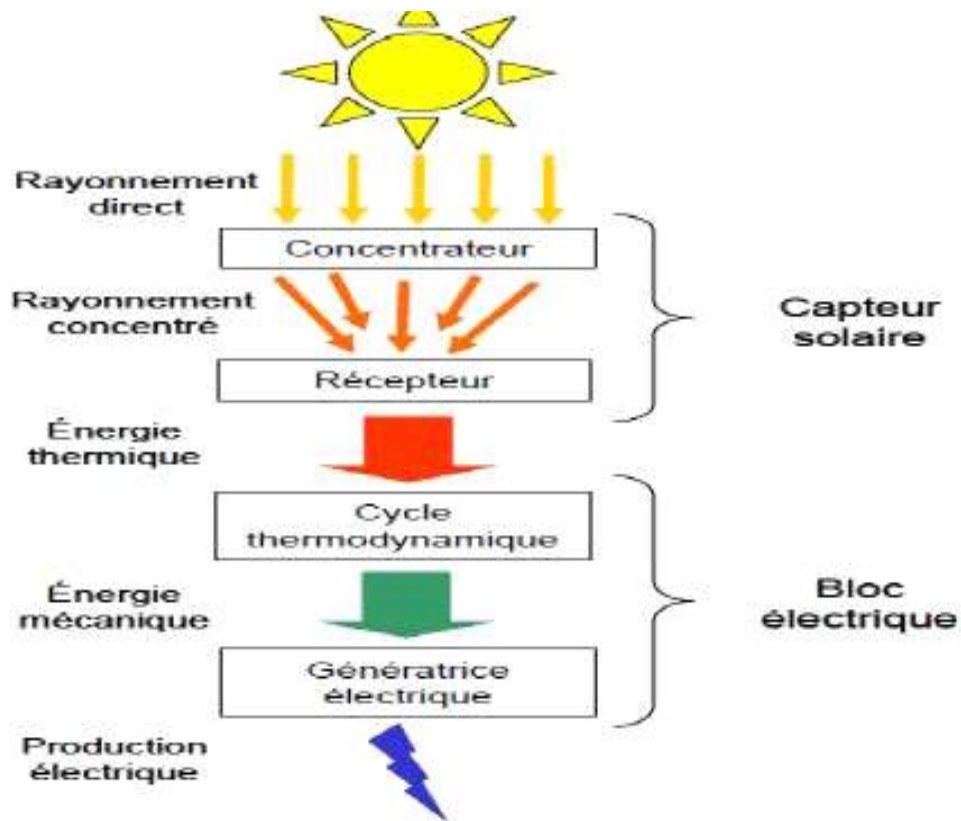


Figure II.01: principe de fonctionnement des concentrateurs solaires.

II.2 Les différentes centrales solaires :

Les centrales solaires thermiques utilisent un grand nombre de miroirs qui concentrent les rayons solaires et un fluide caloporteur chauffé à haute température. Pour cela, les miroirs doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et concentrer le rayonnement tout au long du cycle solaire quotidien. Le fluide traverse une turbine à vapeur ou à gaz pour produire de l'électricité, il existe 2 types de systèmes à concentration : ponctuel et linéaire

- Ponctuel : Il s'agit des paraboles-Stirling ou des héliostats (les centrales à tour et les fours solaires). Ce type de concentrateur assure le suivi du soleil sur deux axes, en azimut et en élévation tel que :
 - Centrales à tour
 - Centrales à miroirs parabolique (Dish-Stirling)
- Linéaire : Ces systèmes sont composés de réflecteurs assez longs qui suivent le soleil grâce à un seul axe de rotation, un tube dans lequel circule le fluide caloporteur est placé dans la ligne focal du concentrateur, c'est le récepteur, tel que :
 - Centrales à miroirs cylindro-paraboliques

CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES

-Centrales solaires à miroirs de Fresnel

II.2.1 Centrales à tour :

La technologie des centrales solaires à tour est le deuxième type de système le plus répandu à ce jour. [12] Pour ce type de configuration, le champ solaire se compose de plusieurs milliers de miroirs, formant des héliostats, qui concentrent le rayonnement solaire au sommet d'une tour sur laquelle est installé le récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur (généralement les sels fondus). Comme dans les systèmes cylindro-paraboliques, la chaleur du fluide est alors transférée à un cycle classique à vapeur pour générer de l'électricité. Par rapport à un système cylindro-parabolique, la tour solaire offre l'avantage de ne pas avoir à faire circuler de fluide dans l'ensemble du champ de miroirs : les pertes thermiques sont donc significativement réduites. Par ailleurs, le niveau de concentration de l'irradiation peut être bien supérieur et l'efficacité du cycle thermodynamique s'en trouve augmentée. Il reste que ces gains techniques doivent aussi se traduire par un gain technico-économique, limité par le coût de construction de la tour.

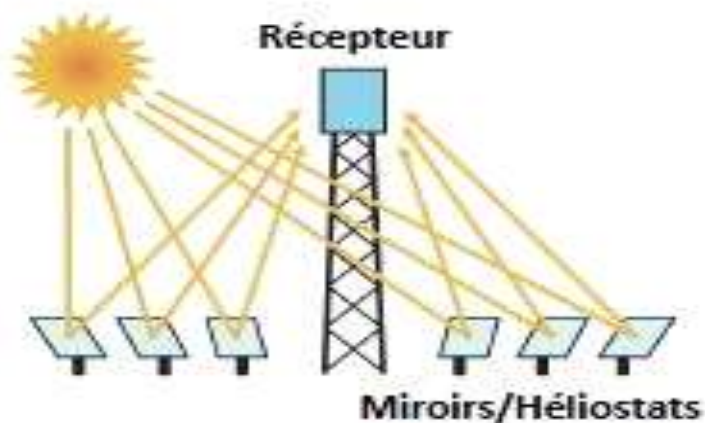


Figure II.02 :Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à tour



Figure II.03: centrale solaire à tour : Complexe solaire Noor Ouarzazate (Maroc).

II.2.2 Centrales à miroir parabolique (Dish-Stirling):

Pour ce type de configuration, le champ solaire est constitué d'un grand nombre de paraboles, qui assure le suivi du soleil sur deux axes, tous avec un récepteur placé à leur point focal. Les récepteurs sont donc ici mobiles et ponctuels, et chaque parabole constitue à elle seule une petite centrale électrique. En raison de sa configuration, le système peut également atteindre le facteur de concentration le plus élevé des quatre technologies proposées, de sorte que les températures peuvent dépasser 1000 °C, c'est-à-dire des rendements théoriques plus élevés. Grâce à ce type de concentrateur, un rendement de conversion record de près de 32 % a également été obtenu.[13] Enfin, le récepteur est un moteur Stirling, qui a la particularité de ne pas nécessiter de circuit de refroidissement. Or, les moteurs Stirling convertissent directement l'énergie solaire en énergie mécanique puis en électricité. Par conséquent, le système n'est plus adapté au stockage thermique.

CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES



Figure II.04 : Centrale solaire utilisant des concentrateurs paraboliques (Maricopa, Arizona, États-Unis).

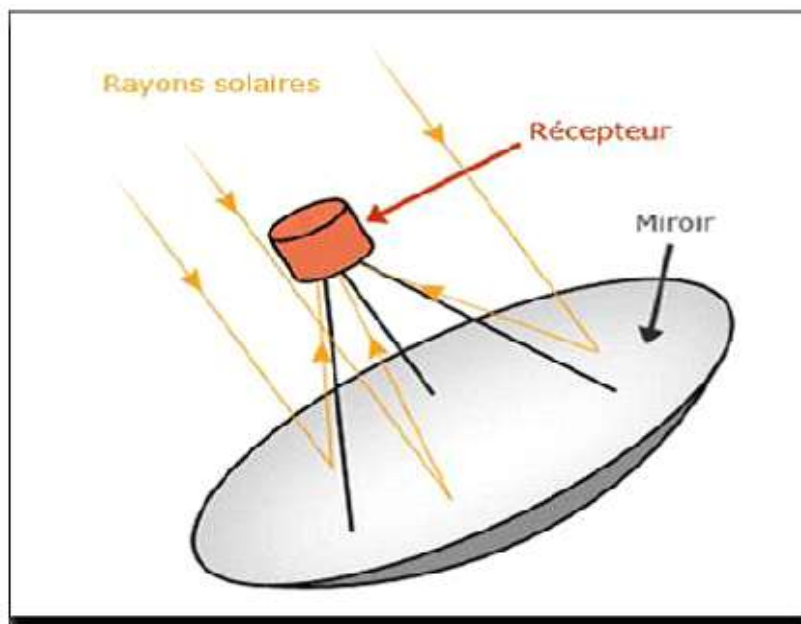


Figure II.05 : Principe de fonctionnement d'un capteur à miroirs paraboliques.

II.2.3 Centrales à miroirs cylindro-paraboliques :

Les centrales solaires à concentration utilisant la technologie cylindro-parabolique sont actuellement les systèmes les plus matures. En effet, près de 85% de la capacité installée se base sur cette technologie [12]. Ces centrales sont pour la plupart des répliques de la première centrale CSP commercialisée au monde, dans les années 80 en Californie.[14]

Ce type de centrale est constitué de longues rangées parallèles de miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les

CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES

rayons du soleil sont concentrés sur un tube récepteur horizontal situé dans la ligne focale du concentrateur, dans ce tube circule un fluide caloporteur, dont la température atteint typiquement 400°C . Ce fluide est ensuite pompé à travers un échangeur de chaleur pour générer de la vapeur surchauffée qui entraîne une turbine ou un générateur. Un absorbeur à tube sous vide, permettant de réduire les pertes thermiques par convection.

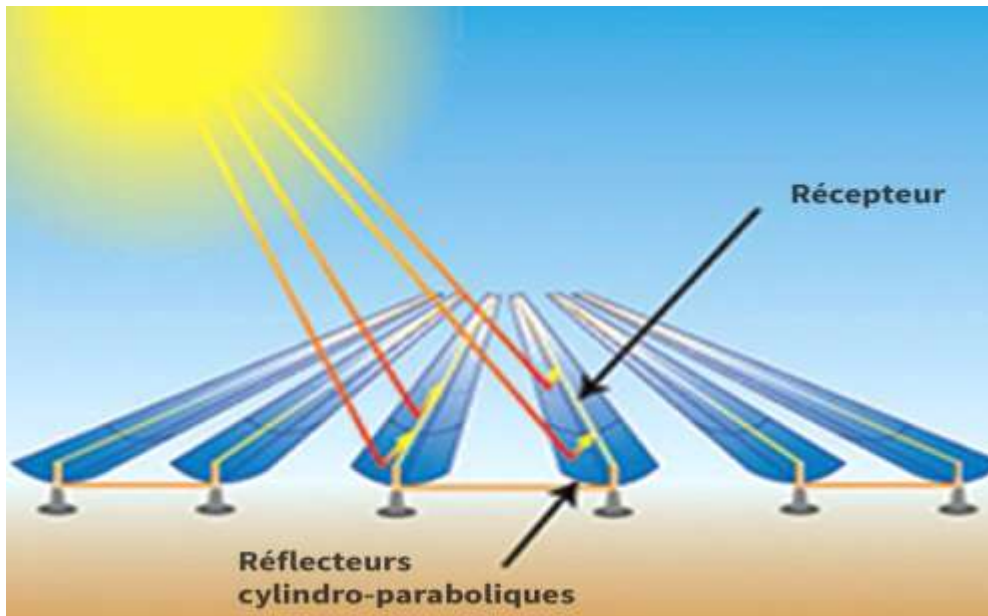


Figure II.06 : Schéma de principe de fonctionnement d'un concentrateur cylindro-parabolique.



Figure II.07 : Concentrateur à capteur cylindro-parabolique.

II.2.4 Centrales solaires à miroirs de Fresnel :

Pour ce type de configuration, le champ solaire est constitué d'une série de miroirs plans parallèles (ou légèrement incurvés) qui tournent sur un seul axe et se rapprochent de la forme d'un concentrateur cylindro-parabolique. Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un récepteur linéaire fixe placé à quelques mètres du sol. Le récepteur contient un tube (ou des tubes) dans lequel circule le fluide caloporteur. Ce fluide est généralement de l'eau surchauffée. Les fluides thermodynamiques peuvent être vaporisés puis surchauffés à 500°C. La vapeur qui en résulte entraîne ensuite une turbine pour produire de l'électricité. Le cycle thermodynamique peut être direct ou indirect. Un concentrateur secondaire monté au-dessus du récepteur redirige une partie du rayonnement solaire pour augmenter le facteur de concentration.[13]

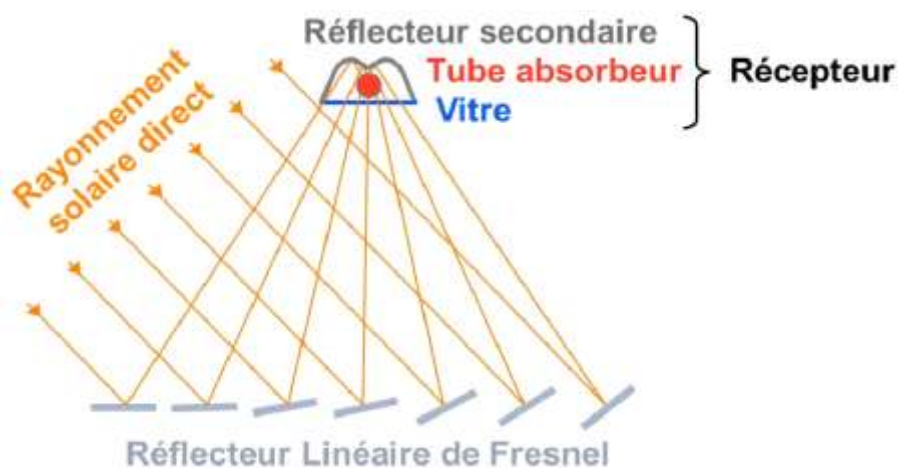


Figure II.08 : Principe de fonctionnement des concentrateurs linéaires de Fresnel.



Figure II.09 : Centrale solaire à miroirs de Fresnel.

II.3 Les fluides caloporteurs ou thermodynamiques :

L'énergie thermique originaire du rayonnement solaire collecte et convertit à l'aide d'un fluide caloporteur puis d'un fluide thermodynamique. Dans certaines circonstances, Le fluide caloporteur est utilisé directement comme fluide thermodynamique. Le choix du fluide caloporteur détermine la température maximale admissible, guide le choix de la technologie et des matériaux du récepteur et détermine la possibilité et la commodité du stockage.

➤ **L'eau :**

A priori, l'eau liquide est un fluide de transport idéal. Il a un excellent coefficient d'échange et possède une grande capacité calorifique. De plus, il peut être directement utilisé comme fluide thermodynamique dans le cycle de Rankine. Cependant, du fait des hautes températures atteintes, son utilisation implique de travailler à des pressions très élevées dans le récepteur, ce qui pose des problèmes pour la technique cylindro- parabolique.

➤ **L'huile :**

Les huiles sont des fluides monophasiques qui présentent un bon coefficient d'échange. Leur gamme de température est limitée à environ 400 °C. C'est le fluide le plus couramment employé dans les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.

➤ **Les sels fondus :**

Les sels fondus sont à base de nitrates de sodium et de potassium qui produisent un bon coefficient d'échange et possèdent une haute densité. Ils sont donc également de très bons fluides de stockage. Leur température de sortie peut atteindre 650 °C. Leur association avec un concentrateur à tour et un cycle de Rankine constitue une combinaison déjà éprouvée.

➤ **Les gaz :**

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

➤ **Les fluides organiques :**

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

CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES

➤ **L'air :**

Peut être utilisé comme fluide caloporteur ou comme fluide thermodynamique dans les turbines à gaz (cycles de Baryton).

Tableau II.01 : Températures de fonctionnement des fluides caloporteurs.[15]

Fluides caloporteurs	Pression (bar)	Température (°C)
Huile synthétisés	10	400
Vapeur saturée	40	260
Vapeur surchauffée	50 à 100	400 à 700
Sels fondus	1	500 à 600
Air	15	800 à 900

Tableau II.02 : Différence entre les centrales CSP.[16]

Type de collecteurs	Axes de poursuites	Rapport de concentration locale	Gammes de température (°C)
HFCs	Deux axes	De 300 à 1500	De 150 à 1200
PDCs	Deux axes	De 600 à 2000	De 100 à 1200
LFRs	Un axe	De 10 à 40	De 60 à 250
PTCs	Un axe	De 10 à 85	De 60 à 400

CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES

II.4 Avantages et inconvénients des centrales CSP :

Tableau II.03 : avantages et inconvénients des centrales CSP

Centrale	Avantages	Inconvénients
Centrale à tours	<ul style="list-style-type: none"> -offre une bonne perceptivité au moyen terme grâce à son potentiel lui permettant d'atteindre des hautes températures -Pas de combustible ni d'émission polluante. 	<ul style="list-style-type: none"> -Nécessite un fort ensoleillement. -Surface au sol importante. - très coûteuses
Centrale à miroirs cylindro-paraboliques	<ul style="list-style-type: none"> -Cette technologie est la plus développée donc la plus accessible -Le rendement, le coût d'investissement et de fonctionnement a été éprouvé sur le plan commercial -Hybridation avec les sources conventionnelles est possible avec bonne capacité de stockage. 	<ul style="list-style-type: none"> - un grand problème de conversion de chaleur est dû à la longueur de canalisation reliant le système de production et le champ -Nécessite une poursuite sensible et coûteuse pour une zone climatique peu ensoleillée.
Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling	<ul style="list-style-type: none"> -Un rendement de conversion qui peut atteindre les 30% -l'eau n'est pas nécessaire pour le refroidissement -ces systèmes sont adaptés à la production décentralisée et à des applications autonomes isolés - le stockage thermique peut être intégré. 	<ul style="list-style-type: none"> -fonctionne par intermittence - très coûteuses
Centrale à miroirs de Fresnel	<ul style="list-style-type: none"> -le coût de fabrication est moins élevé que les systèmes cylindro-paraboliques due à la disponibilité et la facilité d'obtention des matériaux -Le fluide caloporteur utilisé est l'eau. Donc, la production de la vapeur directe est possible, ce qui entraîne moins de pertes lors 	<ul style="list-style-type: none"> -Performances optiques inférieures d'environ 30% par rapport aux réflecteurs paraboliques et cylindro-paraboliques.

CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES

	du transport entre le champ et la turbine à vapeur. -Les contraintes mécaniques imposées par la poussée du vent sont réduites grâce à la disposition plane des miroirs, infrastructure moins importante.	
--	---	--

II.5 Le stockage thermique :

Le système de stockage d'énergie thermique se compose de trois parties principales : le principe de stockage, le mécanisme de transfert d'énergie et le système de restitution. Le principe de stockage d'énergie stocke l'énergie thermique sous forme de chaleur sensible, latente ou thermochimique. Le but du mécanisme de transfert d'énergie est de charger et de libérer efficacement la chaleur du système de stockage. L'intégration d'un système de stockage thermique au sein d'une centrale CSP permet de répondre à différentes utilisations, de la variation journalière du rayonnement solaire et du profil de la demande énergétique en électricité.[17]

II.5.1 Méthodes de stockage thermique :

Le stockage de l'énergie thermique ou de chaleur est réalisé en exploitant des phénomènes induits au sein du matériau de stockage. Le phénomène correspond à l'augmentation ou à la diminution de l'énergie interne d'une substance par chauffage ou refroidissement. L'énergie thermique est stockée dans les matériaux qui sont classés selon la méthode par laquelle ils stockent l'énergie. Les différentes méthodes de stockage de l'énergie thermique sont le stockage par chaleur sensible, latente ou thermochimique.

➤ La chaleur sensible :

Consiste à utiliser les propriétés calorifiques d'un matériau avec uniquement un simple changement de température de celui-ci. La quantité d'énergie stockée dépend de la chaleur spécifique du corps, de l'écart de température qu'il subit et de la quantité de matière présente. En effet, si la température s'élève de T_1 à T_2 pour un corps de masse m , il va stocker une énergie donnée par une variation d'enthalpie

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} mC_p(T) dT \quad (1)$$

CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES

Ce type de stockage est donc efficace dans le cas de systèmes fonctionnant dans de larges intervalles de température. Cette méthode est conceptuellement le stockage thermique le plus simple et le plus utilisé dans les centrales thermodynamiques. Il intervient à pression constante mais demande pour être efficace de ne pas négliger les pertes. Dans le domaine du solaire à concentration, le stockage par chaleur sensible est réalisé à l'aide d'un milieu solide ou liquide. [18] Dans le cadre des procédés solaires à concentration, les gammes de températures sont classées de moyenne température et haute température. Les températures, comprises entre 100 et 500°C, appartiennent au domaine des moyennes températures et au-delà on parle de haute température. L'équation (1) indique que les propriétés importantes pour un matériau de stockage sont la densité et la chaleur spécifique C_p . Mais d'autres propriétés sont importantes, telles que la gamme de température d'utilisation du matériau, la conductivité thermique k , la diffusivité, le coefficient de dilatation thermique, la stabilité cyclique, la disponibilité, le coût et l'empreinte environnementale. [19] Pour le stockage thermique, les milieux solides sont généralement constitués de lits de roche ou de modules composés de béton ou de céramiques et nécessitent dans tous les cas un fluide de transfert. Le HTF permettra de charger et décharger l'énergie dans le matériau de stockage solide. Lorsque la chaleur spécifique du HTF est très faible, comme l'air par exemple, le solide est le seul matériau de stockage. Mais quand le HTF est un liquide, sa chaleur spécifique n'étant plus négligeable, le HTF du fait de sa variation de température participe pleinement au processus de stockage. Les milieux liquides sont capables de maintenir une stratification thermique naturelle en raison de la différence de masse volumique entre le fluide chaud et le fluide froid. Pour pouvoir utiliser au mieux le phénomène de stratification, il est nécessaire d'utiliser un mécanisme pour optimiser les entrées / sorties du fluide dans la cuve pour éviter les mélanges. Dans les centrales CSP, les fluides couramment présents sont les huiles thermiques et les sels fondus.

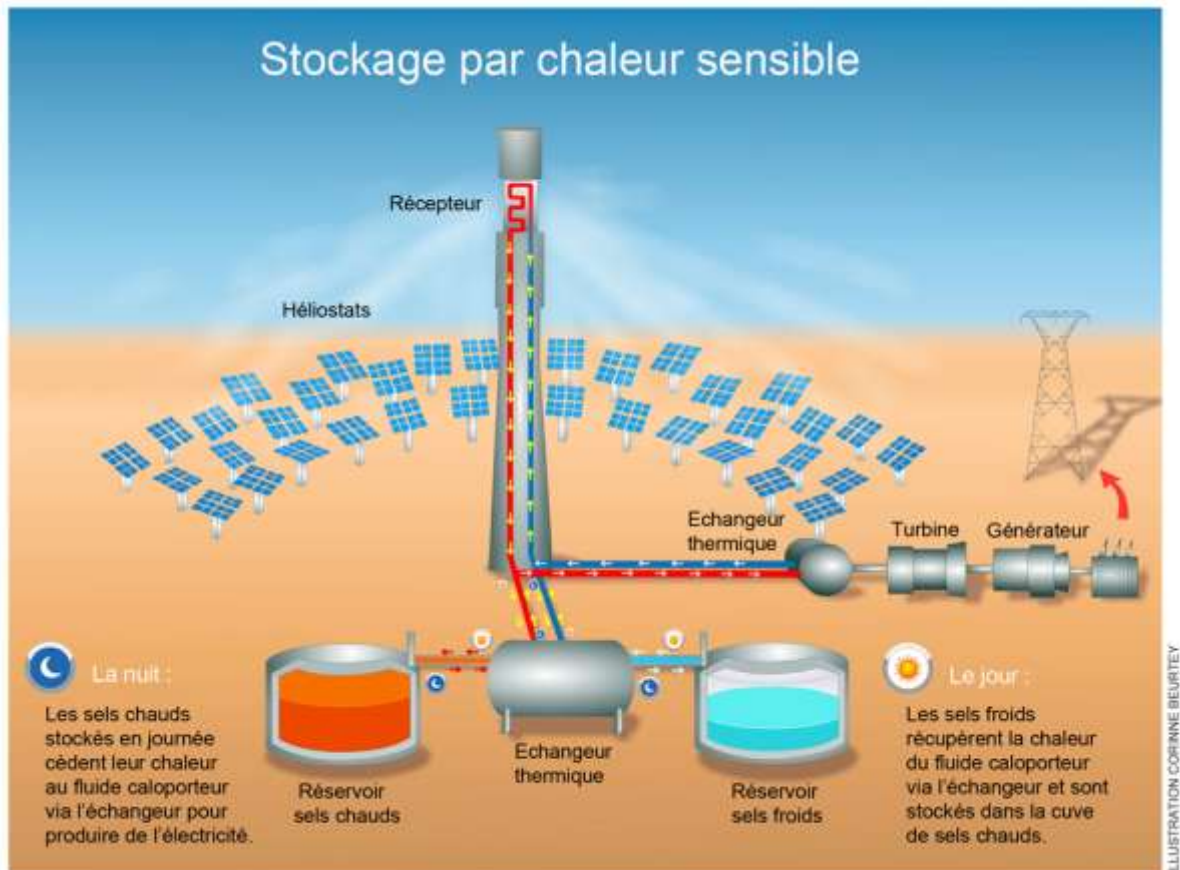


Figure II.10 : principe du stockage par chaleur sensible.

➤ La chaleur latente :

La chaleur latente exploite un changement de phase isotherme à pression constante du matériau de stockage. Dans le système de stockage de chaleur latente, le matériau de stockage est communément appelé PCM (Phase Change Material), en effet le matériau change d'état physique du solide au liquide et vice versa. Pendant l'étape de fusion, le matériau stocke une certaine énergie, définie par sa chaleur latente de fusion (variation d'enthalpie du corps lors de sa fusion) et par sa température constante. Le changement de phase intervient idéalement à température constante correspondant à sa température de fusion. Puis le système libère une énergie sensiblement équivalant à la même température durant le processus de solidification. Lors d'un processus de stockage en chaleur latente, une grande quantité d'énergie peut être emmagasinée dans une gamme de température réduite autour de la température de changement d'état en utilisant la chaleur émise durant le passage d'un matériau de l'état liquide à l'état solide.[17]

➤ Par voie thermochimique :

Les systèmes de stockage par voie thermochimique sont basés sur une réaction thermochimique renversible du matériau de stockage avec un fluide. La réaction thermochimique consomme ou libère de la chaleur par dissociation ou combinaison de deux réactifs. Les réactions solide-gaz sont particulièrement adaptées pour pouvoir facilement séparer et stocker les réactifs, sans pertes, pour de longues durées. Plus délicat à maîtriser, les systèmes de stockage thermochimique peuvent atteindre en théorie des densités de stockage intrinsèques supérieures à celles des systèmes par chaleur sensible ou latente. De plus, ils permettent d'ajuster la température de réaction en régulant la pression de gaz réactif. Suivant le choix du réactif, ces systèmes de stockage peuvent être utilisés dans de nombreuses applications de stockage ayant des gammes de température différentes.[17]

II.5.2 Stockage thermique direct, indirect et semi-direct :

Un stockage thermique est dit indirect lorsque le médium de stockage, de nature différente du caloporteur utilisé dans la boucle principale, est chauffé et refroidi à travers des échangeurs. C'est le cas des matrices solides, les sels liquides et la plupart des matériaux à changement de phase solide/liquide, qui ne peuvent généralement pas être utilisés comme caloporteurs. L'inconvénient du stockage indirect est de générer des pertes entropiques à travers les échangeurs : Les transferts thermiques ne sont en effet possibles que par le biais d'un gradient de température. La température moyenne du caloporteur sera donc toujours supérieure à celle du stock lors de l'accumulation thermique, et inférieure lors de la restitution.

Le stockage est direct lorsque la réserve thermique est constituée par un réservoir de caloporteur. Le processus de stockage est donc nettement plus simple que pour le stockage indirect.[20]

CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES

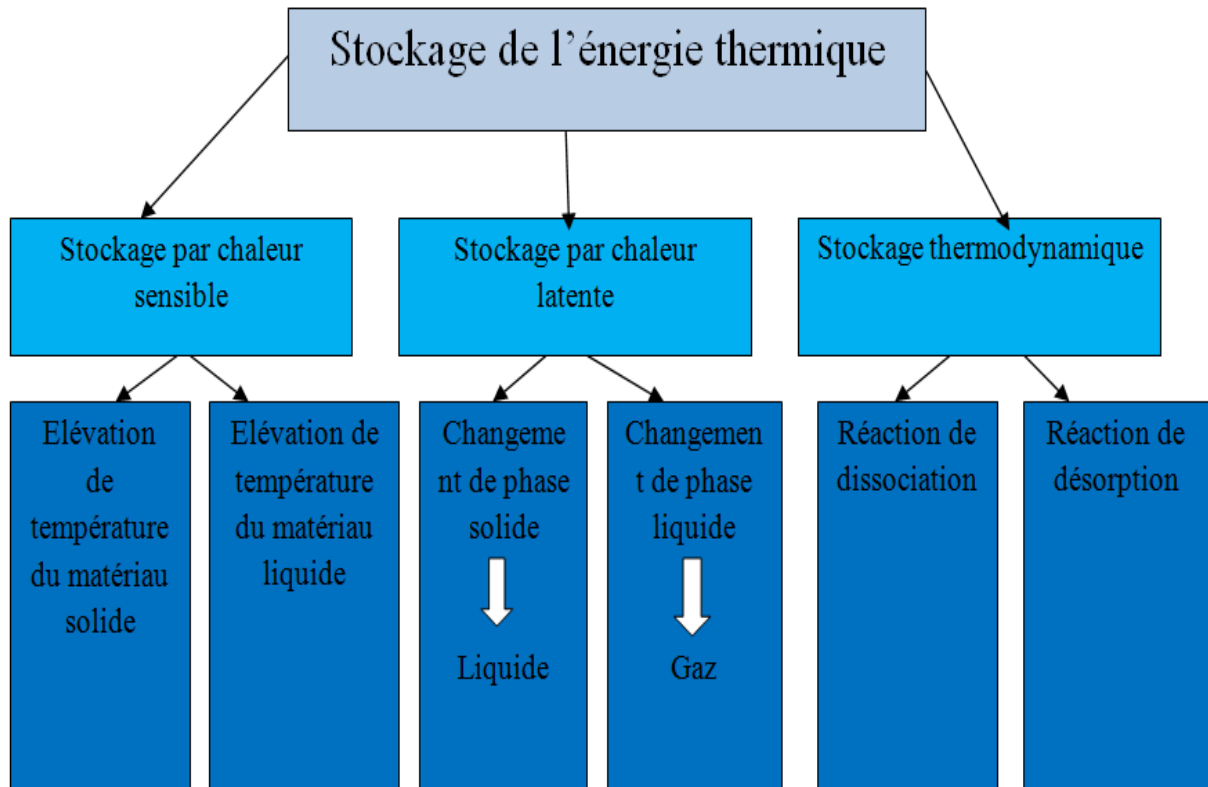


Figure II.11: Les différentes techniques du stockage de l'énergie thermique.

II.6 Hybridation des centrales CSP :

La disponibilité de l'énergie solaire étant intermittente, il n'est pas rentable d'investir dans un champ solaire seul avec sa turbine et son générateur électrique. Le taux d'utilisation du système de génération de puissance en effet très faible et ne justifie pas l'investissement.

Afin de mettre à profit le système même quand l'énergie solaire n'est pas disponible, l'installation est généralement hybridée : une unité auxiliaire au gaz ou au pétrole est utilisée pendant les périodes nuageuses ou en fin de journée afin d'assurer une production continue. Le concept de centrale solaire hybride comprend une centrale solaire thermique, convertissant en électricité la chaleur provenant de concentrateurs solaires, et un appoint à carburant fossile (ou à biocarburant). L'appoint permet de satisfaire la demande électrique nocturne et d'assurer le fonctionnement de la centrale solaire lorsque le rayonnement est trop faible (passage nuageux, léger voile, etc.). Ce concept permet donc de produire en permanence, la nuit ou lorsque les conditions météo ne sont pas optimales. Tout comme pour la tour solaire et le capteur cylindro-parabolique, il est souvent économiquement préférable d'hybrider le système avec un système de combustion traditionnel. Un brûleur à gaz ou à pétrole est alors intégré au capteur parabolique, à proximité du récepteur.[21]

CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES

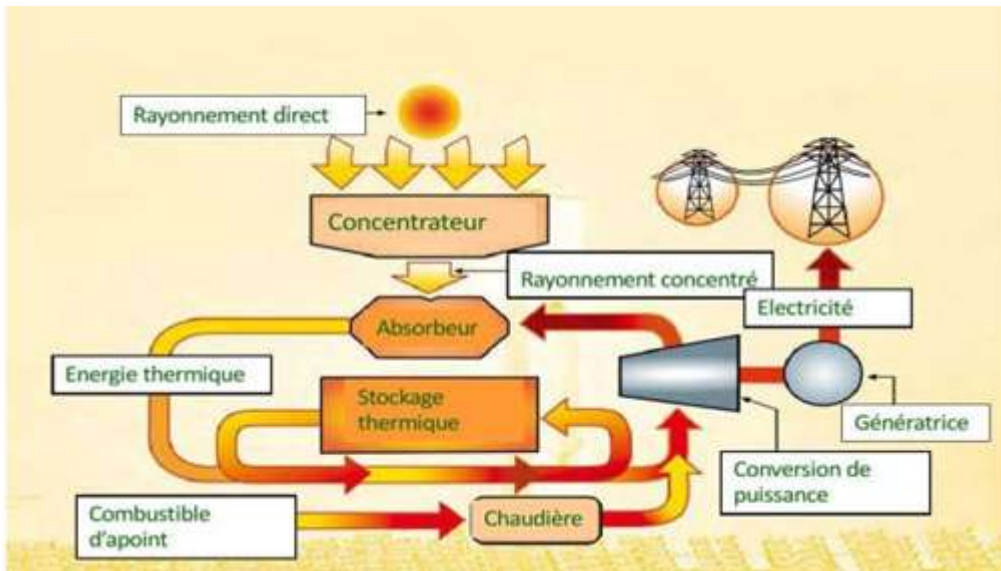


Figure II.12 : Schéma de principe d'une centrale hybride.

Conclusion :

L'étude des systèmes à concentration du rayonnement solaire est toujours nécessaire, c'est une technologie qui représente une excellente alternative aux centrales conventionnelles surtout les centrales solaires à concentrateur de Fresnel qui sont plus facile à réaliser par rapport aux autres technologies CSP

Chapitre III : Etat de l'art des collecteurs
linéaires de Fresnel

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

III.1 Introduction :

Les collecteurs linéaires de Fresnel ont été utilisés ou développés pour la génération de chaleur à basse ou moyenne température. La chaleur produite par les collecteurs Fresnel linéaires est largement utilisée dans la climatisation et le chauffage des bâtiments, le chauffage dans les processus industriels, le traitement de l'eau et une variété d'autres applications. Les collecteurs linéaires de Fresnel sont généralement conçus pour générer de la chaleur à température modérée pour les processus de chauffage à grande échelle ou la production d'électricité à l'échelle commerciale. Dans ce qui suit, nous présentons les dernières technologies et inventaires des concentrateurs de Fresnel linéaires, les domaines d'application, leur histoire et les indications possibles de l'utilisation de la technologie Fresnel linéaire pour la production d'électricité à haute température.

III.2 Définition et historique :

La technologie de réflecteur linéaire de Fresnel tire son nom d'une lentille de Fresnel, qui possède plusieurs plans de réfraction conçus pour améliorer la concentration de la lumière sous de nombreux angles différents en un seul point ou une seule ligne. Développé au 18^e siècle par Augustin-Jean Fresnel, cet objectif réduit drastiquement l'épaisseur, l'encombrement et le poids de la lentille, mais réduit également la qualité de l'image. Il a été utilisé pour la première fois en 1960 par Giovanni Francia d'Italie pour développer un système de génération de vapeur linéaire biaxial Fresnel. La conception du réflecteur Fresnel linéaire est basée sur le principe entre une tour solaire et un système de concentrateur parabolique.

Ce système est constitué des plusieurs bandes rectangulaires de miroirs réfléchissent et concentrent le rayonnement sur le récepteur. Sont moins coûteux que les autres types de capteurs solaires à concentration. Ils utilisent des miroirs plans, ou des miroirs plans très légèrement incurvés, disposés en lames parallèles qui s'inclinent par rotation pour éclairer un récepteur tubulaire fixe placé au foyer. Leurs performances optiques sont de 30 à 40 % inférieures à celles des capteurs solaires cylindro-paraboliques.[22]

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL



Figure III.01 : Concentrateur linéaire de Fresnel.

III.3 Principe de fonctionnement :

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. Un fluide caloporteur est chauffé jusqu'à 500°C en circulant dans ce tube horizontal. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. [23]

Chaque récepteur possède un réflecteur CPC secondaire qui dirige le rayonnement du faisceau sur le tube absorbeur. L'ensemble du système optique est enfermé dans un boîtier vitré scellé. Le tube absorbeur contient un fluide de transfert qui est chauffé pour créer de la vapeur surchauffée qui fait fonctionner une turbine pour produire de l'électricité. De nouveaux systèmes sont conçus pour chauffer l'eau pour produire de la vapeur à 285°C (545°F) dans les tubes absorbeurs qui seront directement utilisés pour entraîner une turbine pour produire de l'électricité au lieu d'utiliser un échangeur de chaleur pour produire de la vapeur à partir d'autres fluides à haute température.[24]

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

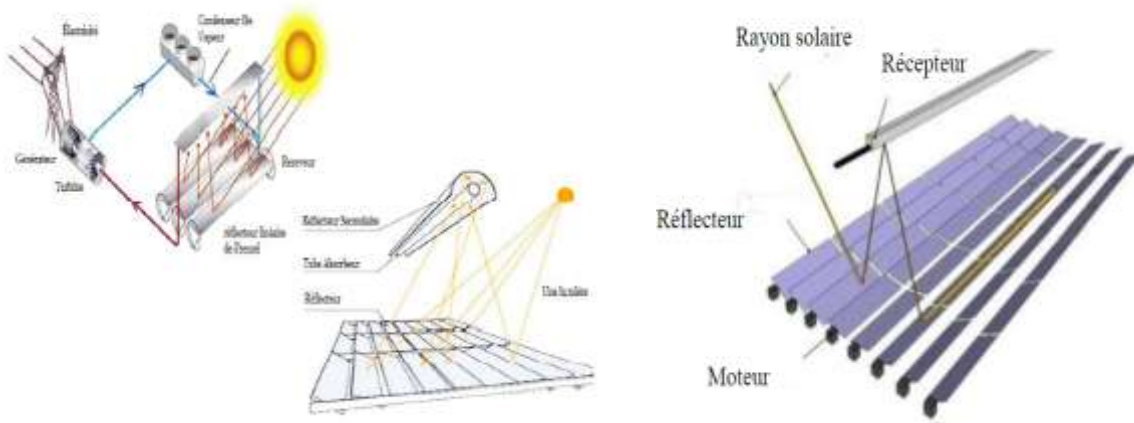


Figure III.02: schéma de principe d'un concentrateur solaire de type Fresnel.

III.4 L'état de l'art des LFR :

Un rapport notable financé par les États-Unis Département de Energy (DOE) dans les années 1970 a mené une profonde et vaste étude de la technologie de Fresnel linéaire et a indiqué qu'il s'agit d'une technologie commercialement viable Par la suite, la technologie a suscité l'intérêt autour du monde.[25]

Un certain nombre de concepts de conception ont été analysés et proposés, et certains d'entre eux ont procédé dans la conception technique et le prototypage.

Le développement de la technologie Fresnel linéaire retrace plusieurs décennies. Le premier collecteur de Fresnel linéaire significatif a été breveté et prototypé par Francia en Italie en 1964. [25]



Figure III.03 : Premier prototype de collecteur linéaire de Fresnel de Francia en Italie en 1964.

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

Depuis lors, en raison de sa simplicité concept de structure, un certain nombre de collecteurs de Fresnel linéaire sont été conçus et testés. Parmi tant d'autres, un collecteur Fresnel linéaire à ossature bois avec une conception de mini-structure qui était capable de produire jusqu'à 120 °C de puissance thermique. Une prototype commercial innovant basé sur la technologie CLFRa été fabriqué par SolarHeat and Power Company.[25]

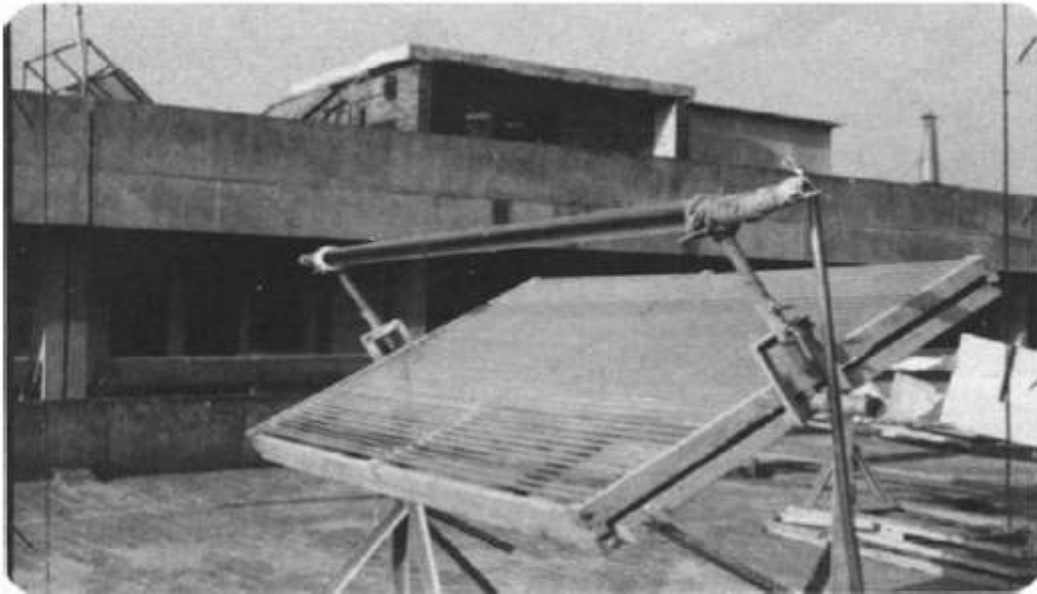


Figure III.04 :un collecteur linéaire de Fresnel dont le cadre est fabriqué en bois, (50-120°C).

Le CLFR a utilisé une tour multi- linéaire comme une partie d'un seul collecteur et été conçu pour des applications commerciales à grande échelle. Ausra, qui est devenu Areva Solar en 2010, a adopté les CLFR comme sa technologie principale linéaire de Fresnel.

Les collecteurs linéaires de Fresnel les plus développés comprennent une série de réflecteurs au profil bas et un ensemble récepteur unique, ce qui simplifie largement le mécanisme de suivi par rapport aux CLFR., on peut citer des exemples des prototypes de collecteur linéaire de Fresnel par Solarmundo en Belgique, la démonstration du projet FRESDEMO sur le collecteur linéaire de Fresnel à PlataformaSolar de Almeria (PSA)en Espagne, un prototype de collecteur linéaire de Fresnel en Italie, et un collecteur linéaire de Fresnel en Espagne.[25]

III.5 Différentes conceptions des LFR :

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

Le concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel (concentrateur LFR) est généralement composé de :

➤ **Les miroirs :**

Ce sont des miroirs en verre recuit qui sont traités pour des propriétés réfléchissantes.

Les miroirs solaires doivent être d'excellente qualité : leurs propriétés optiques et leur résistance à long terme ont un impact important sur la rentabilité du système, et ils doivent également avoir une très bonne réflectivité. Leur longévité est également un critère important.

Les miroirs sont sujets aux intempéries. Ils doivent résister au vent fort et au sable. Le revêtement doit pouvoir résister au nettoyage mécanique et supporter des températures élevées (notamment pour d'éventuels récepteurs auxiliaires). Malgré toutes ces attaques, les miroirs doivent conserver leur qualité optique pendant 10 ans, si possible 20 ans ou plus, la qualité et la longévité des miroirs sont donc essentielles à la rentabilité des centrales solaires.

La sensibilité à l'encrassement des miroirs doit également être prise en compte. Les pertes de rendement dues à l'encrassement peuvent être élevées. Mais le nettoyage peut parfois consommer beaucoup d'eau. Quant au nettoyage mécanique, il a tendance à endommager le miroir. Par conséquent, la nature "autonettoyante" de certains miroirs est un avantage non négligeable.

➤ **Récepteur :**

Le récepteur se trouve à la focale du concentrateur. Il est un agencement de différentes pièces que sont: l'absorbeur, le réflecteur secondaire et l'isolation thermique. Une enveloppe métallique protège l'arrière du récepteur intempéries et du vent. Le récepteur a pour rôle d'absorber le rayonnement solaire concentré, de le convertir en chaleur et de transférer cette chaleur au fluide caloporteur qui passe par l'absorbeur. L'absorbeur se trouve au noyau du récepteur. Leur température peut atteindre des valeurs supérieures à 250 °C. La différence de température entre l'absorbeur et le milieu ambiant occasionne des pertes thermiques : par rayonnement, par convection et par conduction. Ainsi, la présence du réflecteur secondaire et de l'isolant thermique aide à réduire ces différentes pertes.[26]

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

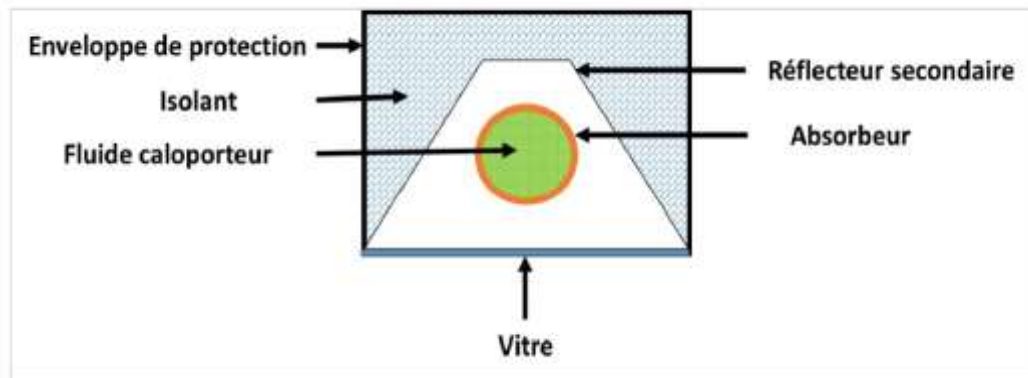


Figure III.05 : schéma global d'un récepteur.

De façon spécifique, les caractéristiques ainsi que les rôles de chacune des pièces constitutives du récepteur sont décrites ci-dessous :

➤ **L'absorbeur :**

L'absorbeur : est l'élément principal du récepteur. Il permet l'échange entre le flux solaire concentré et le fluide caloporteur. Lors de la conception, la largeur de l'absorbeur est choisie pour s'adapter à la largeur des réflecteurs. L'absorbeur peut être orienté de façon horizontale ou de façon verticale. Il peut avoir différentes formes. Il existe des absorbeurs tubulaires, multitubulaires, parallélépipédiques. L'absorbeur est fait à partir de différents matériaux.[26]

➤ **Le réflecteur secondaire :**

Le réflecteur secondaire : est fait à partir d'un matériau réfléchissant. Il peut remplir plusieurs fonctions. Le réflecteur secondaire peut être utilisé pour assurer une répartition uniforme des rayons solaires réfléchis sur toute la surface de l'absorbeur. Il permet de réduire les pertes optiques en renvoyant vers le concentrateur les rayons solaires réfléchis qui n'ont pas pu atteindre l'absorbeur. Le réflecteur secondaire permet de générer un espace clos tout autour de l'absorbeur et donc de le protéger de la convection avec l'extérieur. Il existe plusieurs types de réflecteurs secondaires : les réflecteurs secondaires en forme d'aile, les réflecteurs secondaires trapézoïdaux et les réflecteurs secondaires composés (CPC). Tous sont adaptés à l'absorbeur en tenant compte du concentrateur. [26]

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

➤ La plaque de verre (couverture transparente):

Le rôle principal du verre est la création de l'effet de serre ce qui va permettre de chauffer l'absorbeur en créant l'effet de cavité, comme aussi le verre peut jouer le rôle d'un isolant thermique Il peut être de différentes natures. Le verre en raison de sa propriété sélective est également un excellent élément pour réduire les pertes radiatives. En effet, le verre est transparent aux faibles longueurs d'onde du rayonnement solaire $< 2,5 \mu\text{m}$ et est opaque aux longueurs d'onde élevées telles que celles de l'infrarouge. L'absorbeur chauffé émet un rayonnement infrarouge. En enfermant l'absorbeur dans une enceinte recouverte de verre, on réduit les pertes radiatives pour cette gamme de température. De plus, l'utilisation du verre permet de créer un environnement clos ce qui permet également de limiter les pertes convectives. Le vide peut être utilisé pour isoler l'absorbeur ce qui réduit les pertes par convection. Les isolants, tels que la laine de verre et la laine de roche, permettent de réduire les pertes par conduction. Lors du fonctionnement, le récepteur doit continuellement recevoir les rayons solaires réfléchis, ce qui implique que les réflecteurs soient toujours bien orientés. À cet effet, on utilise un système de suivi du soleil.[26]

➤ Système de suivi

Pour assurer le suivi du soleil tout au long de la journée, un système d'entraînement permet la rotation des lignes de miroirs sur leurs axes.

Le principe de contrôle de la focalisation est le suivant :

- Un algorithme calcule en temps réel la position du soleil (en fonction de la position GPS de la centrale et de l'heure locale),
- Le système de contrôle commande de l'installation calcul en fonction de la position du soleil l'inclinaison optimale des lignes de miroirs,
- Un automate programmable assure la commande du système d'entraînement afin de garantir que l'inclinaison des miroirs suit l'inclinaison optimale calculée par le système de contrôle commande.

Le système d'entraînement est réglé lors de la mise en service de l'installation et ne nécessite plus aucune intervention ultérieure pendant le fonctionnement de l'installation.

De par sa conception il ne nécessite que peu ou pas d'entretien, les mouvements mis en jeu étant extrêmement lents et n'entraînant pratiquement aucune usure mécanique des pièces.

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL



Figure III.06 : Système de poursuite.

III.6 Le récepteur thermique :

Ce type de récepteur est composé d'un tube absorbeur, d'une plaque en verre, d'un réflecteur secondaire. Les récepteurs mono-tube sous vide sont utilisés principalement dans les centrales cylindro-paraboliques. Ils sont parfois utilisés dans les petites centrales de type de Fresnel. [27]

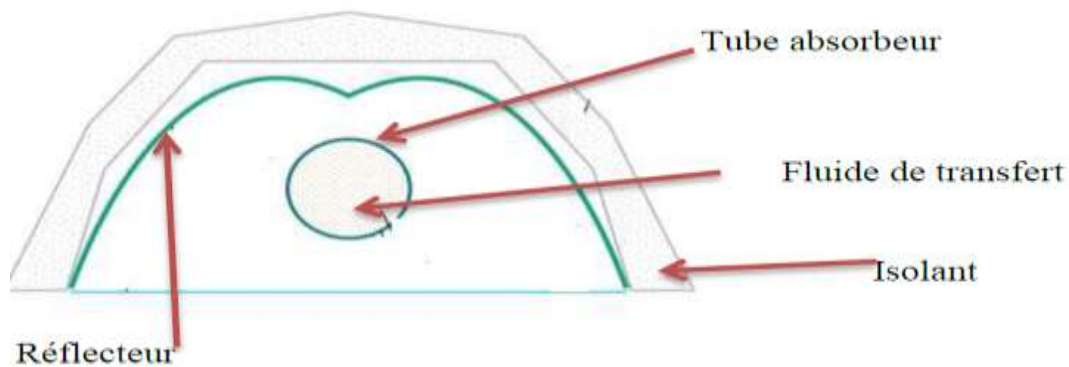


Figure III.07: Récepteur monotube sous vide

III.7 Le récepteur multitube :

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

La conception multitube la plus conventionnelle consiste en une série de tubes parallèles disposés horizontalement dans une cavité, généralement de section trapézoïdale et donc sans concentrateur secondaire comme le montre la Figure III-08.

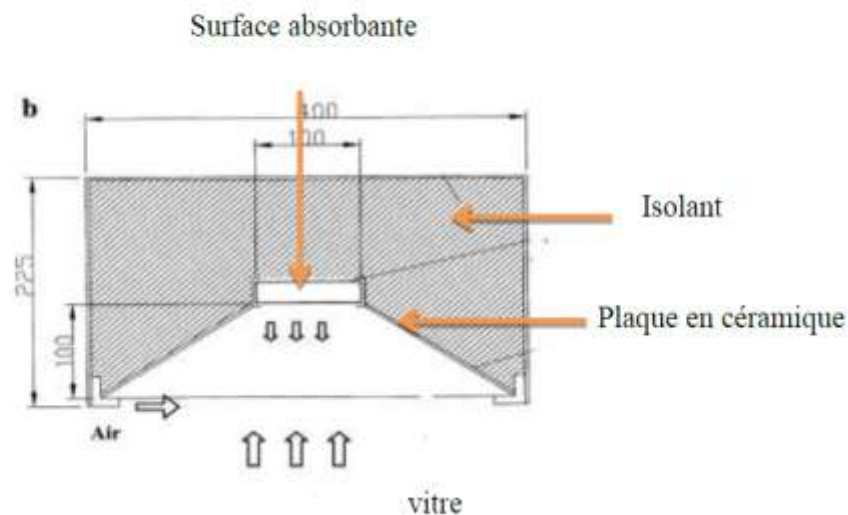


Figure III.08 : Récepteur trapézoïdal avec surface absorbante rectangulaire.

III.8 Types de configurations de collecteurs de Fresnel linéaires :

Le concept de Fresnel linéaire a été largement analysé dans le passé, et il existe de nombreux types de collecteur conceptions. Certains d'entre eux se sont lancés dans le prototypage et les étapes d'ingénierie tandis que d'autres étaient soit uniquement pour exploration théorique ou sont encore en cours d'évaluation conceptuelle.

En particulier, le réflecteur linéaire de Fresnel compact (CLFR) peut utiliser deux tours de réception distinctes. [23] Un miroir dans le CLFR peut suivre l'un ou l'autre des récepteurs à un moment donné de jour en fonction du choix de suivi qui fournit le moins d'ombrage/perte de blocage ; cela peut fournir une meilleure efficacité optique, mais cela augmente la complexité de conception mécanisme de poursuite.

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

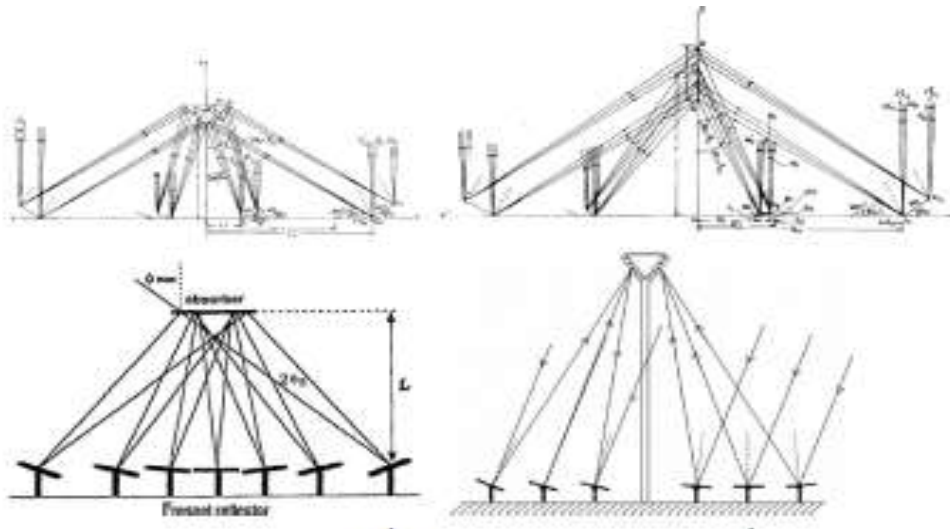


Figure III.09 : Collecteurs linéaires de Fresnel avec différentes configurations d'absorbeurs

Le principal problème de la technologie LFR est principalement lié à l'effet d'ombrage et blocages entre les miroirs, ces derniers peuvent être réduits en augmentant la hauteur de l'absorbeur, mais cela affectera le coût de construction.

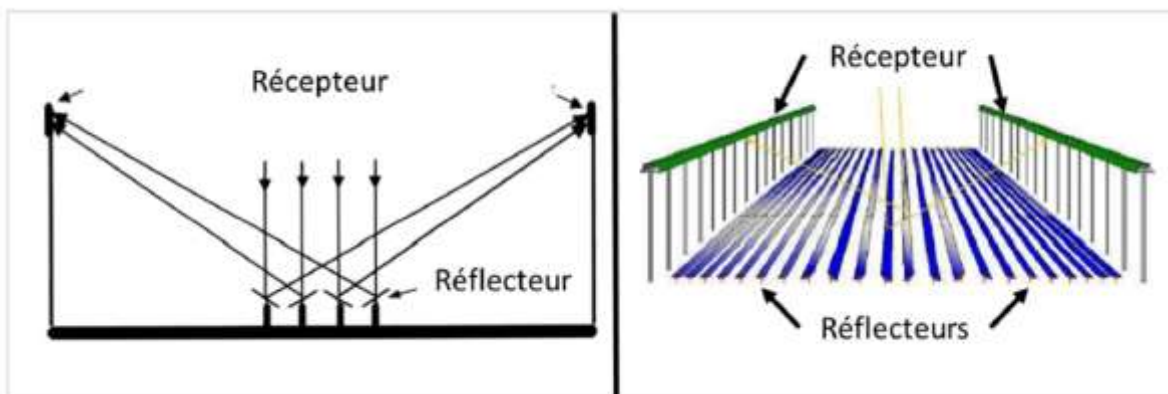


Figure III.10 : Distribution des miroirs entre deux tubes d'absorbeurs.

Cet arrangement minimise le blocage du rayonnement solaire entre les réflecteurs adjacents, et augmente par conséquent leur nombre, et au même temps avec moins d'absorbeurs. L'espace étroit entre les réflecteurs réduit l'espace du champ solaire occupé, il s'agit du coût de préparation de sol, de la structure métallique des tours d'absorbeur et des conduites d'acheminement du fluide en circulation.

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

III.9 Génération de vapeur dans une centrale de Fresnel :

L'une des plus importantes utilisations des centrale a concentration solaire linéaire de Fresnel est la génération de vapeur, on en trouve deux types : génération directe et indirecte

III.9.1 Génération directe de vapeur :

Dans une centrale solaire de Fresnel a génération directe de vapeur le fluide caloporteur utilisé est l'eau ou elle est transformée directement en vapeur saturée surchauffée sans l'utilisation d'un échangeur de chaleur. Dans ce type de centrale le fluide caloporteur et le fluide thermodynamique sont les mêmes.

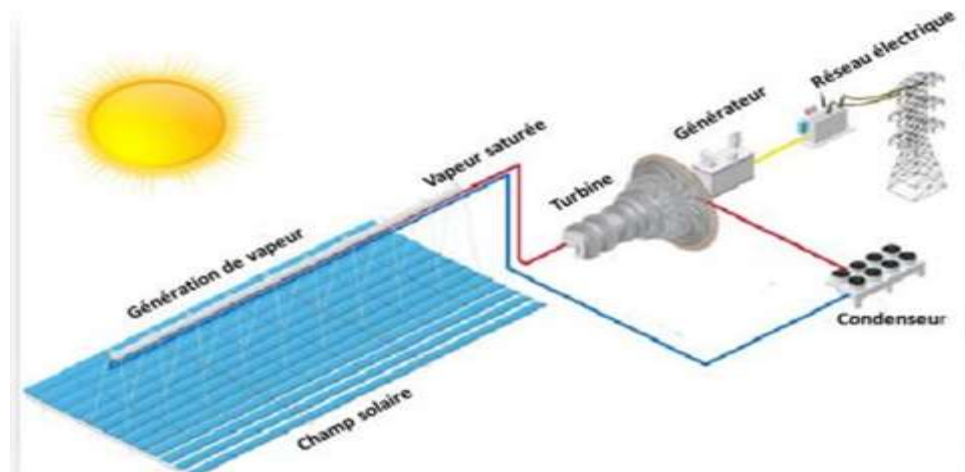


Figure III.11: Schéma du principe d'une centrale solaire à concentrateur linéaire de Fresnel avec mode DSG

On distingue trois modes de fonctionnement

➤ **Mode à passage unique :**

En mode à passage unique, l'eau d'alimentation est préchauffée, évaporée et convertie en vapeur surchauffée lorsqu'elle s'écoule de l'entrée à la sortie du circuit collecteur. Le principal inconvénient de ce concept, qui est le plus simple des trois modes, qui n'a la possibilité de contrôler que les paramètres de la vapeur surchauffée à la sortie de la zone du collecteur. Un arroseur est placé avant le dernier collecteur pour contrôler la température de la vapeur de sortie. Si les tubes métalliques atteignent des températures autour de 450°C, le revêtement sélectif des tubes absorbeurs se dégradera.[28]

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

➤ Mode d'injection :

En mode injection, l'eau est injectée en plusieurs points dans une rangée de collecteurs. La complexité et le coût de ce mode de fonctionnement incitent à l'abandonner au profit de nouveaux développements.[28]

➤ Mode de recirculation :

Le mode de recirculation est le plus fiable des trois. Le séparateur de vapeur d'eau est placé à l'extrémité de la section d'évaporation de la rangée de capteurs solaires. La quantité d'eau introduite à l'entrée de l'absorbeur est supérieure à la quantité pouvant être évaporée. Dans le séparateur intermédiaire, l'eau excédentaire est recirculée à l'entrée de la boucle collectrice, où elle est mélangée à de l'eau préchauffée. L'excès d'eau dans la section d'évaporation assure un bon mouillage du tube absorbeur et rend la stratification impossible. La vapeur produite est séparée de l'eau par un séparateur et introduite à l'entrée de la section surchauffeur. Ce système DSG est hautement contrôlable, mais l'excès d'eau qui doit être recirculé, le séparateur de vapeur d'eau moyen et la pompe de circulation d'eau augmentent la charge du système.[28]

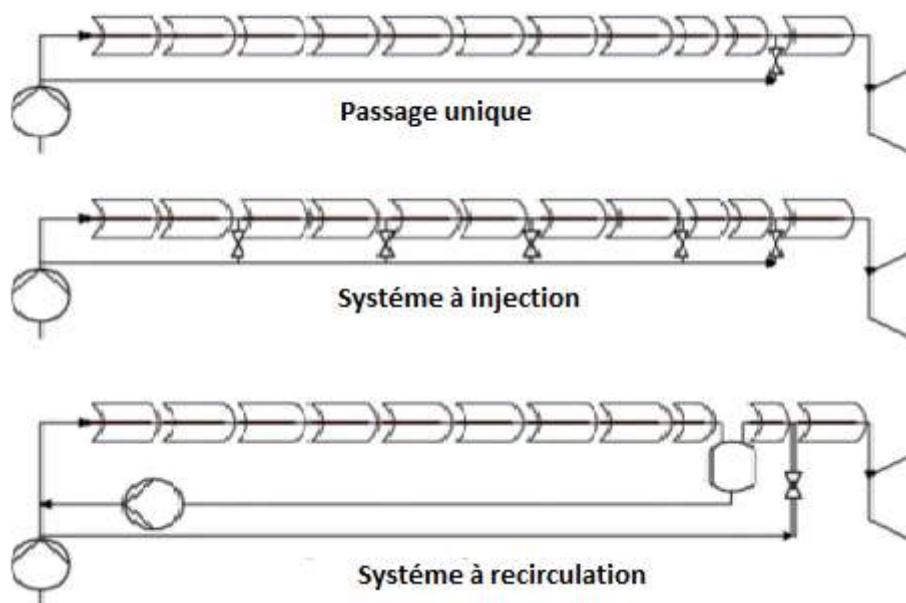


Figure III.12 : Différents modes de fonctionnement des concentrateurs solaires de Fresnel.

III.9.2 Génération indirecte de vapeur :

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

Dans ce type de centrale, un fluide caloporteur est chauffé à travers un champ solaire, puis il passe par une série d'échangeurs de chaleur, ou il cède sa chaleur à l'eau qui se transforme en vapeur surchauffée à haute température. Cette vapeur ensuite dirigée vers une turbine/génération pour produire de l'électricité ou l'utiliser dans divers procédés tel que le froid et le chauffage.

La vapeur issue de la turbine est condensée dans un condenseur (tour de refroidissement), et retourne vers l'échangeur de chaleur grâce à des pompes pour reprendre le cycle à nouveau.

Dans la figure II.14 Un schéma explicatif d'une centrale solaire de Fresnel à génération indirecte de vapeur.

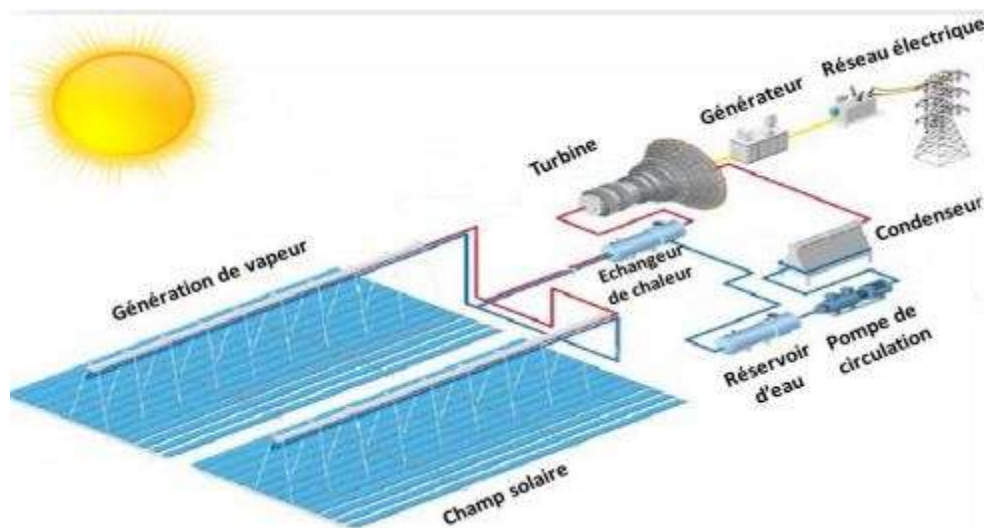


Figure III.13 : Schéma de principe d'une centrale solaire à concentrateur linéaire de Fresnel avec mode ISG

III.10 Les installations de type linéaire de Fresnel dans le monde :

➤ Centrale Llo en France :

Démarrée en 2016, la centrale a été mise en service fin 2018, pour un budget total de 60 millions d'euros. Elle a été construite par la société CNIM, détenue majoritairement par la SUNCNIM, filiale dédiée aux applications solaires de la CNIM (un groupe français internationale, actif notamment dans le domaine de l'énergie).

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

La centrale de Llo s'appuie sur la technologie des miroirs de Fresnel, cette dernière déploie 95 200 miroirs sur une surface de 33 hectares, séparé en deux champs (Est et Ouest), pour une puissance de 9MW : « Le site est divisé en 170 modules comprenant 10 rangées de 14 miroirs chacun. Chaque module est géré par un système de vérins codeurs, des trackers, qui positionnent les miroirs par rapport au soleil ». 12 kilomètres de tubes courent entre ces miroirs, remplis d'une eau qui peut être chauffée à 286°C et transformée en vapeur à 70 bars de pression.[29]

Dans le détail, la centrale est équipée de 9 cuves de 120 m³ chacune : Elles peuvent stocker jusqu'à 80 bars de pression, correspondant à 4 heures de fonctionnement de l'installation. Le soir, quand le soleil se couche, le système de stockage prend le relai et continue d'alimenter la turbine pendant 4 heures pour répondre au pic de consommation du soir. [29]



Figure III.14 : Centrale Llo en France.

➤ Centrale solaire thermodynamique PuertoErrado 2 :

Cette centrale solaire thermodynamique, située à Calasparra (Murcie), développée par NovatecSolar le 26 Mars 2012 utilise la technologie de miroirs de Fresnel.

Elle se compose de 28 rangées de miroirs, 940,8 mètres de longueur avec une surface d'ouverture de 301056 mètres carrés. Deux boucles identiques de 15 MW. Chacune d'elles dispose d'un champ solaire et d'un système d'alimentation qui peut s'ajouter au champ solaire

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

de l'autre unité, afin d'améliorer les performances de la turbine en période de faible ensoleillement. [30]



Figure III.15 : PuertoErrado 2, Calasparra (Murcie).

Le tableau ci-dessous présente quelques centrales commercialisées dans le domaine des LFR

Tableau III.01: principales caractéristiques des centrales solaires à réflecteurs linéaires de Fresnel existants .[31]

Nom du projet/fabricant ou centre de recherche	Lieu	Fluide caloporteur / gammes de températures	Stockage	Surface d'ouverture	Puissance
Dachendg	Chine	Sels fondus	2-reservoirs directs, 13 heures	-	50 MW
Dhursar	Inde	Vapeur d'eau	Sans stockage	-	125 MW

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

Dadri ISCC plant	Inde	Eau 250°C	Sans stockage	33,000m ²	-
Projet solaire thermique eCare	Maroc	Eau 160°C/280°C	2 heures (réservoir vapeur)	10,000 m ²	1 MW
Boost solaire de Kogan creek (kogan creek)	Australie	Eau /vapeur 186°C/370°C	Sans stockage	-	44 MW
Kimberlina Solar Thermal Power Plant	Angleterre	Eau 300°C	Sans stockage	26,000 m ²	5 MW
Puerto Errado 1 Thermosolar Power Plant (PE1)	Espagne	Eau 140°C/270°C	Thermocline à réservoir unique	-	1.4 MW
Puerto Errado 2 Thermosolar Power Plant (PE2)	Espagne	Eau 140°C/270°C	Thermocline à réservoir unique/ 0.5 heures	302,000 m ²	30 MW
Fres Demos, Solar Power Group	Espagne	Eau	Sans stockage	1433 m ²	0.8 MWth
Centrale électrique de Liddell	Australie	Eau /vapeur 140°C/270°C	Sans stockage	18,490 m ²	3 MW
Timberlina Areva-Solar	Angleterre	Vapeur d'eau	Sans stockage	26,000 m ²	25 MWth
Projet solaire thermique Llo (Llo CNIM)	France	Eau 190°C/285°C	4 heures (réservoir vapeur)	153,000 m ²	9 MW
CNIM	Prototype de CNIM	Eau	Sans stockage	720m ²	0.5 MWth

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

III.11 Quelques travaux de recherche publiés dans le domaine des LFR :

Parmi les travaux de recherche publiés dans le domaine des LFR, on trouve une publication qui s'est intéressé à l'évaluation du potentiel de la génération directe de vapeur dans les centrales LFR comme le concept Supernova proposé par Novatec.[32] les recherches menées par CNIM et Areva Solar.

Une autre étude qui se base sur l'effet de la contrainte thermique sur les tubes récepteurs pendant les différentes étapes de la production directe de vapeur dans les centrales LFR a été menée.[33] Afin d'obtenir une production directe de vapeur, un certain nombre de conditions de fonctionnement et de caractérisation de la centrale doivent être conçues. La production de vapeur surchauffée nécessite des températures et des pressions élevées. Les pressions plus élevées sont plus faciles à obtenir dans les centrales LFR par rapport aux centrales paraboliques et cylindro-paraboliques.

D'autres travaux se sont intéressés à l'étude optique du LFR, parmi ces travaux on peut citer celui de Guangdong Zhu [34] qui a développé une méthode optique analytique pour les collecteurs de Fresnel (FirstOPTIC), cette dernière traite l'erreur de pente du miroir, l'erreur de position du récepteur et celle de suivi du collecteur, comme des modifications géométriques du collecteur. Le calcul des facteurs d'interception est dérivé analytiquement à l'aide d'un modèle mathématique rigoureux. Il a été démontré à travers des cas de test que FirstOPTIC peut fournir un calcul précis et rapide des facteurs d'interception du collecteur en fonction de l'angle d'incidence. Enfin, FirstOPTIC est utilisé pour effectuer une analyse sur le modificateur d'angle d'incidence.

L'approche FirstOPTIC a été validée et vérifiée et démontré que cette dernière peut fournir un calcul précis du facteur d'interception et présenter des avantages exceptionnels en termes de vitesse de calcul par rapport à une approche de traçage de rayons. FirstOPTIC est particulièrement adapté à la conception et à l'optimisation de la technologie de Fresnel impliquant un grand nombre d'options de conception de collecteur. En outre, il a été également conçu pour une analyse optique détaillée impliquant un grand volume de données de caractérisation optique peut également être un outil très précieux dans l'étape de prototypage du collecteur.

Jacques Bezain et Al [35] ont mis au point un procédé innovant permettant de capter et de concentrer l'énergie solaire à un niveau de température suffisant jusqu'à 300°C destiné pour

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

des procédés de rafraîchissement solaire, avec des efficacités énergétiques faibles, pour une journée. Autrement, le prix de revient est modique pour une technologie récente et une conception simplifiée intégrable dans les toitures des bâtiments.

Une autre étude expérimentale d'un concentrateur linéaire de Fresnel a été réalisée par Alexandre Bittencourt de Sà et Al [36]. Les auteurs se sont intéressés à la caractérisation des pertes optiques et thermiques, les outils de modélisation utilisés pour cette étude sont Matlab et EES (Engineering Equation Solver), ces derniers ont été utilisés pour caractériser expérimentalement les pertes optiques et thermiques d'un concentrateur de Fresnel linéaire à petite échelle. Cette modélisation a été créée pour un prototype conçu et construit pour la génération directe de vapeur. Deux ensembles différents de données expérimentales ont été considérés. Tout d'abord, le fluide caloporteur était à la température la plus basse pouvant être atteinte en utilisant la configuration expérimentale disponible et a été utilisé pour obtenir l'efficacité du pic optique et l'angle d'incidence modifié. Le deuxième ensemble, avec une plage plus large de températures de fluide, a été utilisé pour trouver les pertes de chaleur. L'efficacité optique maximale variait de 47 à 52 %. La méthode de Ray-Tracing de Monte Carlo a été utilisée pour obtenir l'IAM. Les valeurs obtenues, à partir de données expérimentales, pour les principaux paramètres du prototype étudié se situaient dans la plage attendue pour ce type de concentrateur solaire. Cela prouve que le prototype est performant et peut fournir des données expérimentales précieuses. Les pertes thermiques ont été étudiées pour une température de sortie de fluide allant jusqu'à 130 °C. Cette méthode itérative peut être adaptée pour déterminer la perte de chaleur et l'efficacité optique dans n'importe quel concentrateur solaire de Fresnel si des données expérimentales adéquates sont disponibles.

Une autre étude, menée par Izuchukwu Francis Okafor et Al [37] a passé en revue les conceptions optiques et les études de performances de simulation d'un capteur solaire thermique linéaire de Fresnel mettant en évidence les domaines d'amélioration possibles. Elle a mené des études expérimentales et numériques sur les performances optiques d'un système de capteur solaire thermique de Fresnel. Les conceptions optiques et les résultats des simulations de traçage de rayons ont indiqué des distributions de flux solaire non uniformes sur la surface de l'absorbeur. L'amélioration des rendements optiques d'un LFR attire actuellement l'attention dans les domaines de la conception structurelle et des performances et de la durabilité des matériaux de réflecteur.

ETAT DE L'ART DES COLLECTEURS LINEAIRES DE FRESNEL

Une autre étude très importante dans le domaine des LFR est celle publiée par Diego Pulido-Iparraguirre et Al [38] où ils ont étudié les applications de chauffage solaire ; les auteurs ont présenté un outil d'optimisation basé sur la technique de traçage de rayons afin de déterminer les performances optiques du concentrateur. L'analyse optique a été réalisée à travers une optimisation des différentes géométries du récepteur et l'adapter à deux formes différentes de réflecteurs (plans et courbés). Les résultats trouvés ont montré que les performances optiques d'un champ solaire avec miroirs courbés sont meilleures par rapport aux champs solaires avec miroirs plans (variant de 2% jusqu'à 61%)

La configuration dans cette analyse comprend différentes modifications géométriques. Tout d'abord, la forme des miroirs primaires a été établie comme courbés. Cela implique un rapport de concentration plus élevé par rapport aux miroirs plats, Il a été prouvé qu'une inclinaison du récepteur et du concentrateur améliore les performances optiques liées à l'influence de l'angle d'incidence. Une inclinaison appropriée a été trouvée, en tenant compte d'une valeur optimale et de certaines contraintes techniques. Une autre innovation réside dans le système de poursuite du concentrateur dans la direction Est-Ouest, qui améliore l'efficacité optique car les effets d'ombres et de blocages sont réduits. Par rapport au récepteur, le choix d'une cavité trapézoïdale avec une configuration d'absorbeur multitube a été faite. La hauteur optimale du récepteur qui maximise la puissance accumulée a été trouvée, enfin l'ensemble des modifications proposées dans ce travail se traduisent par une augmentation importante des performances optiques du collecteur tout au long de l'année.

Conclusion :

Dans cette partie nous avons passé en revue l'état de l'art de la technologie des concentrateurs linéaire de Fresnel, cette dernière a connu une évolution depuis les premiers essais et tests menés en 1963 jusqu'aux récentes centrales de Fresnel qui sont en cours de construction, la technologie a beaucoup évolué et donne de meilleures performances avec des coûts d'investissements moyens. Elle représente une excellente alternative aux centrales cylindro-parabolique et même aux centrales conventionnelles.

Chapitre IV : Modélisation du système

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons faire une étude optique dans laquelle on va déterminer les performances optiques du réflecteur, nous allons faire un dimensionnement de notre centrale, on va donc déterminer l'inclinaison de chaque miroir, la position et le décalage entre un miroir et un autre. Également nous allons évaluer la concentration solaire et l'influence du nombre de miroirs sur cette dernière, puis on va faire un calcul d'optimisation pour savoir quel est le nombre optimal de miroir pour notre centrale.

Calcul des performances optiques :

IV.2 Méthodologie :

Pour bien détailler la théorie de conception du concentrateur de Fresnel, nous avons utilisé les travaux réalisés par [39,40], qui ont développé des équations en considérant certaines hypothèses essentielles pour déterminer l'énergie solaire concentrée.

- Le concentrateur doit poursuivre le soleil parfaitement pendant sa course de l'est à l'ouest.
- Les miroirs doivent être parfaitement réfléchissants.
- On prend en considération seule la composante directe du rayonnement solaire.

Il est important d'étudier l'effet de divers paramètres de conception de l'absorbeur à cavité trapézoïdale pour le capteur solaire à concentration de Fresnel, par conséquent une étude a été effectuée pour étudier l'effet de facteur de concentration et de nombre de miroirs ainsi l'influence de ce dernier sur la concentration solaire totale.

La figure IV.01 montre le schéma de principe en coupe linéaire d'un capteur de Fresnel avec un système réflecteur et absorbeur de forme de cavité, dont la largeur (W) est constante pour chaque miroir [41].

L'inclinaison de chaque miroir a été calculée de telle sorte que le rayonnement solaire soit incident sur le plan d'ouverture.

D'autre part, une distance appropriée a été maintenue entre deux miroirs consécutifs pour que chaque miroir ne fasse pas d'ombre par rapport au miroir adjacent.

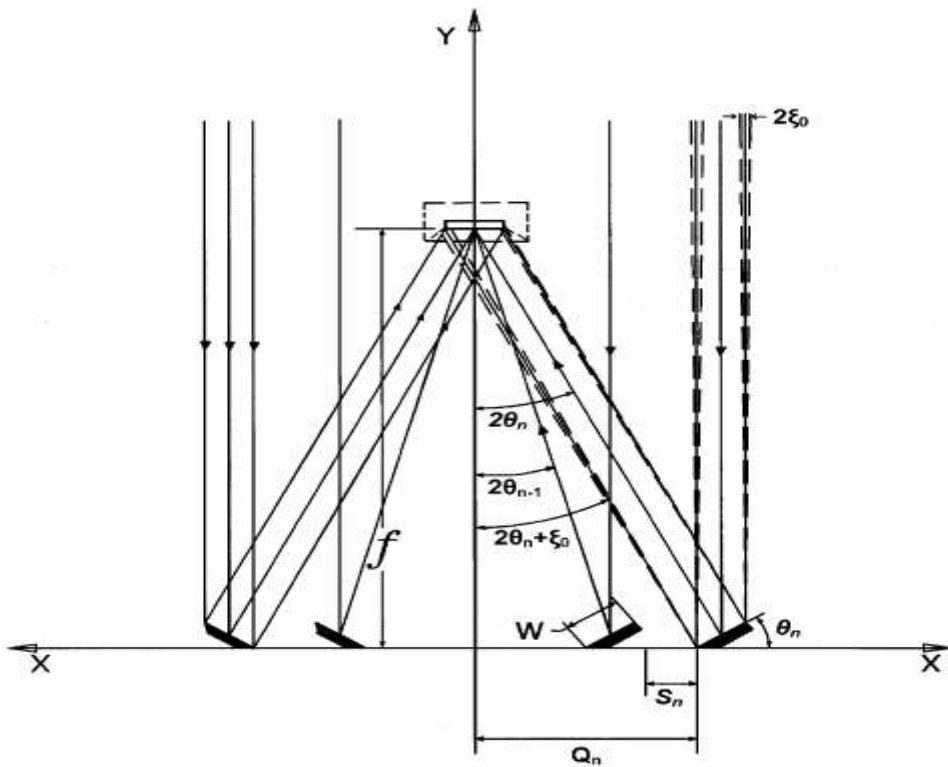


Figure IV.01: Concentrateur solaire de Fresnel avec une cavité trapézoïdale.

IV.3 Les paramètres d'un miroir :

Chaque miroir est caractérisé par trois paramètres nommés :

- La position (Q_n).
- L'angle d'inclinaison (θ_n).
- Le décalage (S_n).

Les expressions suivantes ont été utilisées pour obtenir ces paramètres en utilisant de simples relations optiques géométriques [41].

$$\theta_n = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{Q_n + \left(\frac{W}{2}\right) \cdot \cos(\theta_{n-1})}{f - \left(\frac{W}{2}\right) \cdot \sin(\theta_{n-1})} \right] \quad (1)$$

$$S_n = W \cdot \sin \theta_{n-1} \cdot \tan(2\theta_n + \zeta_0) \quad (2)$$

$$Q_n = Q_{n-1} + W \cdot \cos \theta_{n-1} + S_n \quad (3)$$

Avec : W est la largeur des miroirs.

f est la distance focale.

MODELISATION DU SYSTEME

D'où :

W est la largeur de chaque miroir plan, $W=100\text{mm}$.

ζ_0 est la moitié de la distance angulaire du soleil en un point quelconque sur terre. ($\zeta_0=16'=0.26^\circ$)[41].

$f=1300\text{mm}$.

Les conditions initiales sont les suivantes : $\theta_0=0, S_0=0, Q_0 =-W/2, Q_1=W/2$.

Les conditions initiales des itérations de $n=1, 2, 3, \dots, m$, ou m est le nombre total des miroirs placés dans chaque demi plan du collecteur par rapport à l'axe central.

Pour positionner les miroirs dans la structure du concentrateur de Fresnel, il faut résoudre les équations (1, 2 et 3) et calculer les différents paramètres comme la position (Q), l'inclinaison (θ), et la distance entre les miroirs (S) du miroir primaire centrale jusqu'au dernier miroir.

Si le nombre de miroir est paire alors : $n= (n-1)/2$ sinon $n=n/2$.

Dans notre étude nous avons retenu 15 miroirs réflecteurs (le miroir centrale primaire +7 miroirs à droite et 7 à gauche). Il suffit de faire les calculs d'un demi-plan de miroir parce que l'autre demi-plan est symétrique par rapport au miroir central primaire.

Remarque : $n=0$ correspond au miroir central primaire.

Après résolution des équations (1, 2, et 3) nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau IV.01: Nombre de miroirs en fonction des paramètres de position θ_n, Q_n, S_n .

n (nombre de miroirs)	θ_n (°)	Q_n (mm)	S_n (mm)
n=0	0	-50	0
n=1	2,199	50	0
n=2	4,390	150,536	0,610
n=3	6,556	252,063	1,819
n=4	8,681	355,036	3,627

MODELISATION DU SYSTEME

n=5	10,754	459,918	6,028
n=6	12,762	567,176	9,014
n=7	14,695	677,281	12,575

IV.4 La concentration solaire totale (CR) :

La concentration (CR) du collecteur de Fresnel expérimentale a été obtenue en additionnant toutes les concentrations solaires élémentaires (Cl_n) des miroirs donnés par les expressions suivantes [41].

$$CR = 2 \sum_{n=1}^{n=m} Cl_n \quad (4)$$

$$Cl_n = \frac{w \cdot \cos \theta_n}{U_n + D_n + l_n} \quad (5)$$

Où : U_n D_n l_n sont les valeurs des rayons solaires réfléchis sur l'absorbeur et calculés par les expressions suivantes [41].

$$U_n = \frac{(f - W \sin \theta_n) \cdot \sec 2\theta \cdot \sin \zeta_0}{\cos(2\theta_n - \zeta_0)} \quad (6)$$

$$D_n = W \cdot \cos \theta_n \cdot \sec 2\theta \quad (7)$$

$$l_n = \frac{f \cdot \sec 2\theta \cdot \sin \zeta}{\cos 2\theta_0 + \zeta_0} \quad (8)$$

Remarque :

$\sec(a) = 1/\cos(a)$ (la sécante de (a) notée $\sec(a)$: elle représente l'inverse du cosinus de (a)), $1/\cos(a)$ c'est-à-dire le rapport de la longueur de l'hypoténuse par la longueur du côté adjacent.

Alors à l'aide des équations (4) et (8) nous pouvons estimer la concentration (CR) du collecteur de Fresnel pour différents jeux des miroirs réfléchissants.

Pour le calcul de U_n , D_n , l_n les résultats obtenus sont les suivants :

MODELISATION DU SYSTEME

Tableau IV.02: Configuration de sept miroirs en fonction de U_n , D_n , l_n pour $n=7$

n (nombre de miroirs)	U_n	D_n	l_n	$U_n + D_n + l_n$	Cl_n
n=1	5.91	100.22	5.93	112.06	0.89
n=2	6	100.88	6.04	112.92	0.88
n=3	6.15	102	6.22	114.37	0.86
n=4	6.39	103.57	6.48	116.44	0.84
n=5	6.70	105.59	6.82	119.11	0.82
n=6	7.10	108.07	7.25	122.42	0.79
n=7	7.59	111.01	7.78	126.38	0.76

Le calcul de la concentration solaire total du collecteur se fait comme suit :

La concentration solaire totale sans le miroir central ($n=0$) est donc :

$CR = [0.89+0.88+0.86+0.84+0.82+0.79+0.76]=5.84$; pour le premier demi plan.

On multiplie par 2 car il y a deux demis plans symétriques par rapport au miroir central.

$CR = 2*[0.89+0.88+0.86+0.84+0.82+0.79+0.76]=5.84*2=11.68$; pour les deux demis plan c'est-à-dire pour les 14 miroirs.

CR=11.68 : c'est la concentration solaire totale des 14 miroirs.

Le Cl_0 du miroir central primaire ($n=0$)=1.

Donc : le Cl_n total des 15 miroirs est égale à : $11.68+1=12.68$.

Explication : ($Cl_0=1$)

On a : $\cos 0=1$, $\sec 0=1$ et $\sin 0=0$.

Pour le miroir central primaire ($n=0$), le Cl_0 est calculé à l'aide de la relation (5), ce dernier est en fonction de θ_0 qui est égale à 0 et U_0 , D_0 , l_0 sont tirés des relations (6, 7,8).

MODELISATION DU SYSTEME

Exemple de calcul :

Calcul de U_0, D_0, l_0 :

$$l_0 = \{1300 \cdot \sec 2.0 \cdot \sin 0.26\} / \cos\{2.0 + 0.26\}$$

$$l_0 = 5.89$$

$$D_0 = [100 \cdot \cos 0 \cdot \sec 0]$$

$$D_0 = 100$$

$$U_0 = [(1300 - 100 \cdot \sin 0) \cdot \sec 0 \cdot \sin 0.26] / [\cos(0 - 0.26)]$$

$$U_0 = -5.89$$

D'où :

$$Cl_0 = 100 \cdot \cos 0 / (-5.899 + 100 + 5.899)$$

Donc : $Cl_0 = 100 / 100 = 1$.

$$Cl_0 = 1$$

Sommant tous les Cl_n et multipliant par 2 et on trouve la concentration solaire totale CR :

$$CR = 12.68$$

IV.5 La puissance solaire :

L'énergie solaire disponible sur l'absorbeur (E_f) aux différentes concentrations solaires du réflecteur de Fresnel est estimée par les divers paramètres radiatifs de l'absorbeur pris en considération.

Cette énergie disponible est calculée à l'aide de l'équation (9),

$$E_f = A I \rho \gamma \tau \alpha \quad (9)$$

Avec : A est la surface collectrice totale (m^2).

I est l'éclairement solaire direct.

ρ est la réflectivité de miroir.

γ est le facteur d'interception.

τ est la transmittivité de la couverture en verre.

MODELISATION DU SYSTEME

α est l'absorptivité de la surface de récepteur.

IV.6 Calcul des performances :

IV.6.1 La relation entre la concentration solaire totale et le nombre de miroir :

Dans les systèmes à concentration, l'utilisation des concentrateurs solaires permet d'augmenter en un point le rayonnement solaire reçu.

Cette technologie dépend le plus souvent des systèmes de poursuite de rayonnement solaire afin de minimiser les pertes optiques.

La concentration du rayonnement solaire permet une élévation de température.

Dans notre étude concernant le réflecteur linéaire de Fresnel on va montrer l'importance de cette dernière par l'utilisation des miroirs plans.

Et aussi on va voir l'influence du nombre de miroir sur la concentration solaire totale en combinant tous les cas possibles.

Tableau IV.03: La variation de la concentration solaire en fonction du nombre de miroirs pour $n=7$

		0		1
		(0, 1,1)		2.78
		(0, 1,1,2,2)		4.54
		(0,1,1,2,2,3,3)		6.26
		(0,1,1,2,2,3,3,4,4)		7.94
Les	\sum_n	(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5)	CR	9.58
		(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6)		11.16
		(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7)		12.68

Les valeurs de tableaux ci-dessus sont obtenues comme suit :

MODELISATION DU SYSTEME

IV.6.2 Les nombres de miroirs :

La valeur **0** correspond au miroir central.

La combinaison **(0, 1,1)** correspond au miroir central + le miroir n°1 de côté droit +le miroir n°1 de côté gauche.

La combinaison **(0, 1,1,2,2)** correspond au miroir central + les miroirs n°1et n°2 de côté droit+les miroirs n°1et n°2 de côté gauche. Et ainsi de suite.

IV.6.3 La concentration solaire :

La valeur **1** correspond au miroir central (0), comme mentionné dans la partie précédente.

La valeur **2.78** correspond au (Cl) du miroir central + le (Cl) du miroir n°1 de côté droit + le (Cl) du miroir n°1 de côté gauche.

La valeur **4.54** correspond au Cl du miroir central +les Cl des miroirs n°1 et n°2 de côté droit + les Cl des miroirs n°1 et n°2 de côté gauche. Et ainsi de suite.

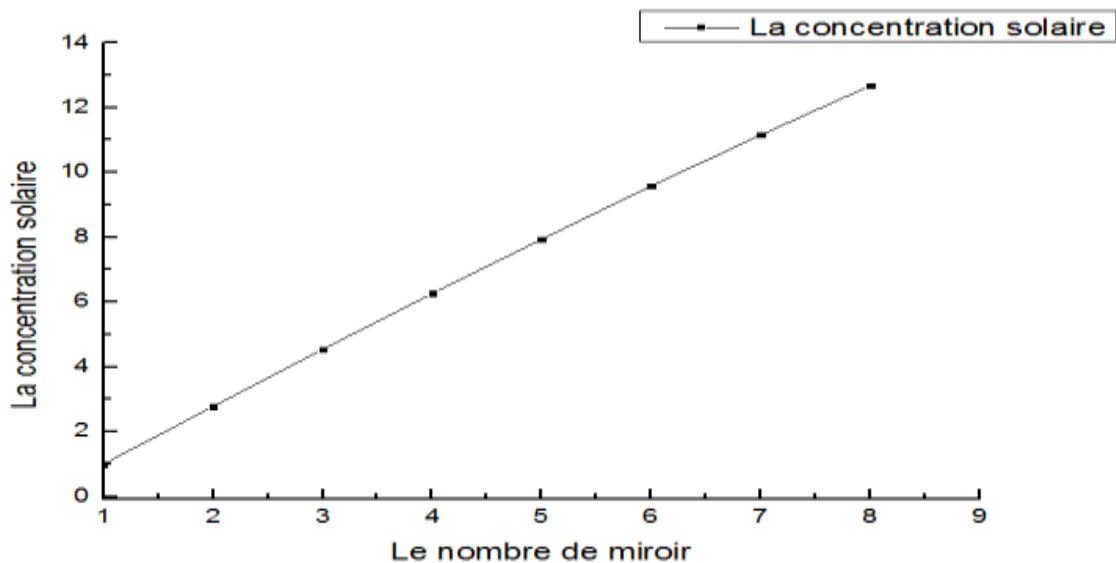


Figure IV.02: La relation entre la concentration solaire et le nombre des miroirs dans le réflecteur solaire de Fresnel pour $n=7$.

L'allure de ce graphe peut être assimilée à une droite, son équation : $y=a*x+b$, avec $y=CR$, x est le nombre de miroirs, $a=1.78$ est la pente du graphe, $b=1$ est l'intersection avec l'axe y .

MODELISATION DU SYSTEME

D'après le graphe on remarque que si on augmente le nombre de miroirs (la surface collectrice) la concentration solaire augmente, donc la concentration solaire est proportionnelle aux nombres de miroirs, et cela est dû à la grande quantité de rayonnement solaire capté par les collecteurs.

D'une autre part d'après la relation (4) la concentration solaire totale est la somme de toutes les concentrations solaires élémentaires de chaque miroir.

La variation de la concentration solaire en fonction de nombre de miroirs n'est pas toujours linéaire, à un certain nombre de miroir, elle décline avec l'augmentation de nombres de miroir, dans notre étude puisque nous avons choisi 15 miroirs réflecteurs nous n'avons pas pu l'observer.

Si on augmente le nombre de miroir transversalement, il y aura certainement des miroirs qui ne contribuent pas à la réflexion, cela est dû à l'effet cosinus et à l'effet d'ombre entre les miroirs, et aussi à l'effet de blockage, d'où il y'aura une valeur optimal de nombres de miroirs qu'on va déterminer dans ce qui suit.

IV.7 Optimisation de la centrale :

Pour optimiser notre centrale et pour obtenir le nombre optimum de miroirs, nous proposons d'augmenter le nombre de miroir jusqu'à observation d'une stabilité de la concentration ou une diminution de cette dernière. Pour le dimensionnement de notre concentrateur il faut évaluer le nombre optimum des miroirs.

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.04: Nombre de miroirs en fonction des paramètres de position θ_n , Q_n , S_n pour $n=25$

n (nombre de miroirs)	θ_n (°)	Q_n (mm)	S_n (mm)
n=0	0	-50	0
n=1	2,199	50	0
n=2	4,390	150,536	0,610

MODELISATION DU SYSTEME

n=3	6,556	252,063	1,819
n=4	8,681	355,036	3,627
n=5	10,754	459,918	6,028
n=6	12,762	567,176	9,014
n=7	14,695	677,281	12,575
n=8	16.554	790.718	16.708
n=9	18.320	907.967	21.394
n=10	20	1029.513	26.615
n=11	21.583	1155.853	32.369
n=12	23.078	1287.494	38.652
n=13	24.485	1424.955	45.463
n=14	25.806	1568.768	52.806
n=15	27.043	1719.483	60.688
n=16	28.201	1877.669	69.12
n=17	29.256	2040.792	75
n=18	30.29	2218.56	78.08
n=19	31.23	2402.77	87.66
n=20	32.11	2596.77	97.86
n=21	32.94	2801.88	108.69
n=22	33.70	3018.23	120.20
n=23	34.42	3246.82	132.42
n=24	35.09	3488.47	145.39
n=25	35.71	3744.07	159.16

MODELISATION DU SYSTEME

Les valeurs des rayons solaires réfléchis sur l'absorbeur U_n , D_n , I_n sont représentées dans le tableau ci-dessous

Tableau IV.05: Configuration des miroirs en fonction de U_n , D_n , I_n pour $n=25$

n (nombre de miroirs)	U_n	D_n	I_n	$U_n + D_n + I_n$	Cl_n
n=1	5.91	100.22	5.93	112.06	0.89
n=2	6	100.88	6.04	112.92	0.88
n=3	6.15	102	6.22	114.37	0.86
n=4	6.39	103.57	6.48	116.44	0.84
n=5	6.70	105.59	6.82	119.11	0.82
n=6	7.10	108.07	7.25	122.42	0.79
n=7	7.59	111.01	7.78	126.38	0.76
n=8	8.19	114.43	7.04	129.66	0.73
n=9	8.93	118.30	7.35	134.58	0.7
n=10	9.75	122.66	7.7	140.11	0.67
n=11	10.73	127.49	8.08	146.3	0.63
n=12	11.86	132.81	8.51	153.18	0.6
n=13	13.18	138.63	8.98	160.79	0.56
n=14	14.69	144.97	9.51	169.17	0.53
n=15	16.44	151.84	10.51	178.33	0.43
n=16	18.43	159.26	10.66	188.35	0.46
n=17	20.65	167.07	11.29	198.97	0.43
n=18	12.14	184.95	12.65	209.74	0.40
n=19	12.90	194.8	13.45	221.15	0.38

MODELISATION DU SYSTEME

n=20	13.71	205.36	14.31	233.38	0.35
n=21	14.58	216.59	15.23	246.4	0.33
n=22	15.44	227.76	16.14	259.34	0.31
n=23	16.48	241.28	17.24	275	0.29
n=24	15.54	254.83	18.36	288.73	0.27
n=25	18.65	269.42	19.55	307.62	0.26

Pour la concentration solaire totale, nous combinons tous les cas possibles de miroirs, puisque on a deux demi-plans symétriques par rapport au miroir central primaire. Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau IV.06: La variation de la concentration solaire en fonction du nombre de miroirs pour $n= 25$

\sum_n	0	CR	1
	(0, 1,1)		2.78
	(0, 1,1,2,2)		4.54
	(0,1,1,2,2,3,3)		6.26
	(0,1,1,2,2,3,3,4,4)		7.94
	(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5)		9.58
	(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6)		11.16
	(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7)		12.68
	(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8)		14.14
	(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9)		15.54
	(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10)		16.88
	(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11)		18.14

MODELISATION DU SYSTEME

(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12)	19.34
(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,13,13)	20.46
(0,1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,13,13,14,14)	21.52
Le miroir n°15	22.5
Le miroir n°16	23.42
Le miroir n°17	24.28
Le miroir n°18	25.46
Le miroir n°19	26.26
Le miroir n°20	27.7
Le miroir n°21	28.3
Le miroir n°22	28.9
Le miroir n°23	29.9
Le miroir n°24	29.94
Le miroir n°25	30.46

La figure montre la variation de la concentration solaire en fonction de nombre de miroirs.

Nous avons arrêté les calculs dès l'observation d'une stabilité de la concentration ou la diminution de cette dernière.

MODELISATION DU SYSTEME

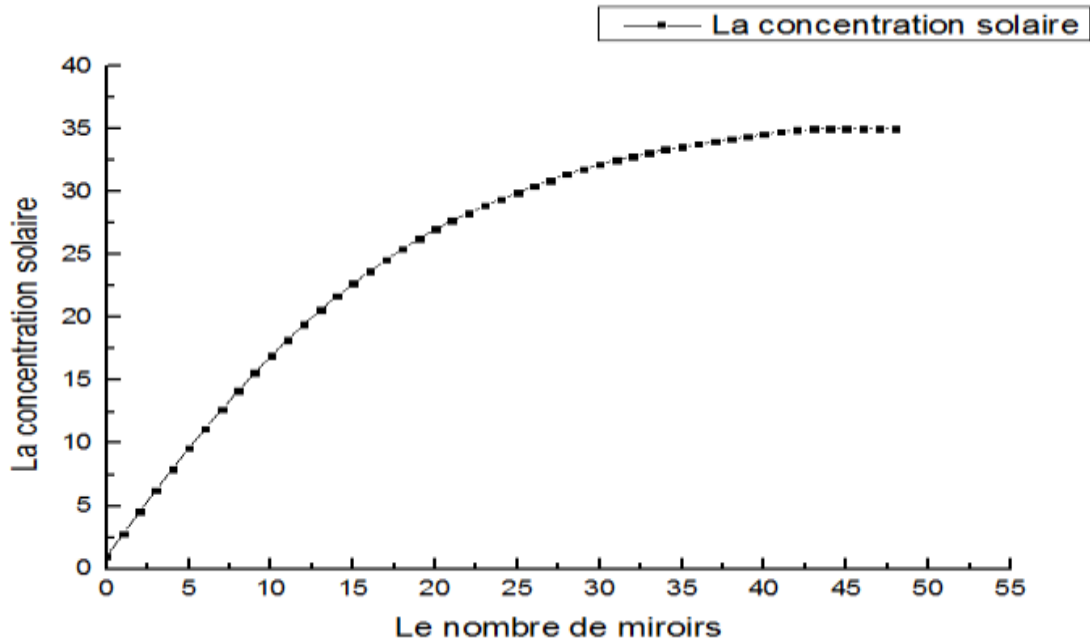


Figure IV.03: La relation entre la concentration solaire et le nombre des miroirs dans le réflecteur solaire de Fresnel pour $n=48$.

D'après la figure on remarque que si on augmente le nombre de miroirs (la surface collectrice) la concentration solaire augmente, donc la concentration solaire est proportionnelle au nombre de miroirs, et cela est dû à la grande quantité de rayonnement solaire capté par les collecteurs.

Mais à un certain nombre de miroir appelé nombre optimal, la concentration solaire ne varie pas proportionnellement avec le nombre de miroir, il y aura certainement des miroirs qui ne contribuent pas dans la concentration, et cela est dû principalement à l'effet d'ombre entre les miroirs, et aussi au système de poursuite (la poursuite n'est pas intégrale, elle est à une seule direction, contrairement aux autres systèmes de poursuites qui fonctionnent à deux directions).

L'augmentation du nombre de miroirs dit l'augmentation de champ va certainement influencer sur le rayonnement réfléchi qui va être absorbé par l'absorbeur et c'est ce qu'on appelle les pertes par atténuations atmosphériques car si la distance entre l'absorbeur et le réflecteurs augmente les pertes optiques augmentent aussi.

D'après la même figure, on voit que la concentration solaire commence à se stabiliser à un nombre de miroir égal à 40.

MODELISATION DU SYSTEME

Le nombre optimal de miroirs est égal à 40 miroirs, au-delà de cette valeur il sera inutile de rajouter des miroirs parce que ces derniers ne vont pas contribuer à améliorer les performances du système.

Pour le dimensionnement d'un concentrateur de Fresnel il faut s'intéresser aux équations (1),(2), (3), (4), (5), (6), (7) et ,(8) que nous avons étudié ci-dessus.

Conclusion :

Dans notre cas et d'après la résolution de ces équations la valeur optimale des miroirs qu'on ne doit pas dépasser est de 40 miroirs réflecteurs (20 miroirs dans le demi-plan droit et 20 dans le demi-plan gauche).

Donc notre centrale contient un nombre optimal de 41 miroirs (le miroir centrale principale +20 miroirs dans le demi-plan droit et 20 dans le demi-plan gauche).

Chapitre V : Etude expérimentale

V.1 Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de décrire le déroulement du processus expérimental, cette description a été faite à travers une étude préliminaire de notre prototype solaire de Fresnel. Ce travail est la suite d'un travail déjà réalisé par des étudiants du département de génie mécanique qui consistait à la réalisation d'un récepteur solaire à cavité trapézoïdale pour un capteur solaire à concentration linéaire de Fresnel.

L'objectif de ces tests est de déterminer les performances de notre prototype solaire afin de valider la géométrie. Les performances de ce dernier sont évaluées et testées expérimentalement elles concernent l'ensoleillement et le récepteur.

Présentation de l'UDES :

L'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) est un centre de recherche spécialisé dans le domaine des énergies renouvelables, elle a été créée le 9 Janvier 1988, qui se situe à Bou-Ismaïl wilaya de Tipaza. L'UDES fait partie du CDER : Centre de Développement des Énergies Renouvelables.

Les missions principales de l'Unité de Développement des Equipements Solaires sont de :

- Réaliser des travaux de conception, de dimensionnement et d'optimisation des équipements en énergies renouvelables pour la production de la chaleur, l'électricité, le froid et le traitement des eaux ;
- Mettre en œuvre toutes études et recherches de développement de procédés technologiques de fabrication de prototypes, équipements et des préséries ;
- Etablir des études technico-économiques, d'engineering pour mettre en place des installations pilotes en vue d'assurer le transfert et la maîtrise de nouvelles technologies ;
- Mettre en place les techniques de caractérisation, de tests, de contrôles qualité et de conformité, en vue d'assurer la qualification, l'homologation et la certification des équipements développés.



Figure V.01 : Unité de développement des équipements solaire.

V.2 Description physique de chaque étape :

V.2.1 Optimisation des paramètres de conception :

Pour optimiser le récepteur, plusieurs paramètres sont à prendre en compte au cours de sa conception. Nous avons dans un premier temps détaillé l'ensemble des paramètres d'optimisation à prendre en compte.

V.2.2 Paramètres d'optimisation de la géométrie du récepteur :

L'optimisation géométrique du récepteur est primordiale. Cependant, lors de la conception, il fallait également tenir compte de paramètres technico-économiques pour le choix des différents éléments. Pour mener à bien la conception les grandeurs à prendre en compte sont :

La hauteur du récepteur, la longueur du récepteur, la largeur du récepteur, l'ouverture du récepteur, et le diamètre des tubes.

Mais avant ça une autre étape très importante doit être faite c'est l'optimisation des paramètres de champ solaire (la partir optique) :

La longueur du module, la largeur du module, l'espacement entre les miroirs, le décalage et l'angle d'inclinaison.

Ces grandeurs sont incontournables et affecte directement le rendement global du système.

V.2.3. La hauteur du récepteur :

La hauteur optimale du récepteur est corrélée à la largeur du réflecteur. Le champ disponible à l'UDES est constitué de 27 m² de miroirs avec une largeur totale de 3.30 m, c'est cette largeur qui est prise en compte pour la conception du récepteur.

ETUDE EXPERIMENTALE

Au cours de l'exploitation, la hauteur du récepteur joue un rôle important. En effet, tout le flux solaire doit être absorbé par le récepteur.

Afin de mener les tests de caractérisation de notre prototype, nous avons rencontré un petit souci qui est la perte d'image au niveau du récepteur (perte au bout d'une ligne) , en effet nous avons remarqué une partie importante de notre récepteur qui n'est pas éclairée même aux alentours de midi, pour cette raison nous avons constaté que la hauteur actuelle de notre récepteur n'est pas optimale .

V.2.4 La largeur du récepteur :

Le choix de largeur optimale du récepteur permet de minimiser les phénomènes d'ombrage sur le champ du miroir. L'ombrage dépend de l'heure, de la journée et de la date dans l'année ; ce qui rend difficile sa prise en compte. L'efficacité du récepteur est faible au début et à la fin de la journée. Le champ que nous disposons à une largeur de 3.30 m, la largeur du récepteur doit être la plus petite possible afin de limiter les pertes thermiques.

Pour cette raison nous avons effectué une étude d'analyse de la répartition de flux de manière homogène sur l'ensemble du récepteur. Les points les plus chauds sont réduits afin de minimiser le risque de destruction de matériaux sélectifs. Le récepteur utilisé est de type trapézoïdal et est testé à différents niveaux afin d'évaluer son efficacité.

Notre récepteur thermique est dimensionné selon le champ solaire disponible à l'UDES, ce dernier se compose de miroirs plans, alors dimensionnement du récepteur a été fait en prenant en considération les paramètres suivants :

- La forme des miroirs
- La largeur des miroirs
- La hauteur qui sépare le champ du récepteur

Pour cette raison, lors de dimensionnement de notre récepteur, nous avons pris une ouverture égale à 0.36 m, le choix de cette ouverture a été choisi selon la largeur de module que nous disposons qui est 0.5 m, donc il fallait trouver un compromis entre ces deux dernières et la hauteur afin d'éviter des pertes très importantes par débordement. Alors, d'après la hauteur optimale que nous avons, la largeur du récepteur doit être inférieure ou égale à la largeur des miroirs, ce choix a été imposé par la forme des miroirs qui est plane. Par contre, si nous avons par exemple un champ solaire à miroirs courbés, l'ouverture du récepteur doit être forcément inférieur à la largeur d'un module, et cette dernière doit être supérieure à l'ouverture, bien sur

ETUDE EXPERIMENTALE

ces deux dimensions doivent être optimisées selon la surface totale de champ solaire, et la hauteur du récepteur. Tout ça pour minimiser les différentes pertes optiques.

V.3 Les pertes optiques :

V.3.1 Pertes dû à l'ombre des miroirs :

Lorsque le récepteur n'est pas à une hauteur optimale, la puissance collectée par le tube diminue considérablement. Cette diminution a pour cause l'effet d'ombre créé par les miroirs dû à leur grande inclinaison et empêchant les autres miroirs de réfléchir vers le récepteur.

Un autre facteur est que plus le récepteur est bas, plus il crée de l'ombre sur les miroirs. Donc il faut trouver une hauteur optimale afin de minimiser ce phénomène

V.3.2 Pertes par blockage :

Lorsque l'espace entre les miroirs est trop petit, certains miroirs bloquent les rayonnements réfléchis par les miroirs voisins. Pour résoudre ce problème il suffit juste de mettre le récepteur plus en hauteur, donc il faut trouver un compromis entre l'espacement des miroirs et la hauteur optimale.

V.3.3 Pertes par débordement de rayon réfléchis :

On parle de pertes par débordement lorsque les rayons réfléchis manquent la cible. Il y a deux cas qui se présentent :

- Lorsque le rayon réfléchi vers le récepteur manque le réflecteur secondaire, ce type de débordement diminue avec la hauteur.
- Lorsque le rayon réfléchi par les miroirs secondaires rate le tube absorbeur.

Il est recommandé de bien respecter la condition sur la hauteur. Plus le récepteur est haut, plus on crée de pertes de même que lorsqu'il est plus bas. Le meilleur c'est de rester dans la fourchette optimale. Dans notre cas pour des mesures expérimentales et en fonction de prototype disponible à l'UDES, nous avons une hauteur optimale de 2.4 m afin de maximiser la production thermique de notre récepteur.

V.4 Les pertes thermiques :

Dans la nature il existe trois modes de transfert thermique, le transfert thermique par conduction, par convection (naturelle et/ou forcée) et par rayonnement.

ETUDE EXPERIMENTALE

À partir de ces trois modes de transfert résulte trois types de pertes thermiques : pertes thermiques par conduction, par convection et finalement par rayonnement.

Généralement dans le concentrateur de Fresnel on s'intéresse principalement aux pertes par convection dues à l'air qui circule au-dessous de l'absorbeur (une relation avec la température ambiante et la vitesse du vent) et celles par rayonnement due à l'émissivité de l'absorbeur.

Pour les pertes par conduction, il suffit d'assurer une bonne isolation.

Les constructeurs des réflecteurs linéaires de Fresnel prennent en considération l'isolation des tubes absorbeurs par le vide qui se fait à l'aide des tubes secondaires entourant les tubes absorbants, cette dernière diminue avec une grande valeur les pertes thermiques par convection.

V.5 Déroulement du processus expérimental :

Ce travail rentre dans le cadre d'un stage de courte durée à l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES), les tâches principales de notre mission sont :

- La mise en place des miroirs réflecteurs (récepteurs) sur la structure
- L'emplacement et la vérification du système de poursuite pour chaque ligne (moteurs électriques)
- Test de la focalisation de chaque ligne de miroir
- Fabrication et mise en place d'un système de poursuite manuel
- Le raccord entre les thermocouples et l'acquisition de mesure
- Réalisation des différents tests.

V.5.1 Mise en place des miroirs réflecteurs sur la structure :

Après notre arrivée à l'UDES, nous avons commencé par la mise en place des miroirs réflecteurs sur la structure, au début pour bien tester la fiabilité de notre prototype nous avons commencé des tests en utilisant 50% du champ solaire, la première étape c'est le test de focalisation des miroirs réflecteurs sur le récepteur (l'image produite des miroirs sur le récepteur).

Les figures ci-dessous illustrent les étapes de la mise en place des miroirs réflecteurs sur la structure

Etat du prototype avant le début des tests :



Figure V.02 : photo de la structure et du récepteur thermique.

V.5.2 Mise en place des supports miroirs :

Dans cette étape nous avons placé pour chaque ligne son support miroir et un palier roulement pour le fixer.



Figure V.03 : support miroir et palier roulement.



Image produite par le réflecteur sur le receptr

Figure V.04 : Test de focalisation.

V.6 L'emplacement des moteurs électriques :

Afin d'assurer le suivi du soleil tout au long de la journée nous avons utilisé des moteurs électriques pas à pas (Figure V.05), puis effectués des tests sur ces moteurs on utilisant un automate programmable qui calcul en fonction des cordonné GPS du site la position de soleil, l'aide de ce programme nous avons testé la poursuite de concentrateur qui donne un excellent aperçus (l'image produite sur la ligne focale).



Figure V.05 : Moteur électrique pas à pas.

ETUDE EXPERIMENTALE

V.6.1 Matériels utilisés :

L'automatisation du système de suivi permet de créer une interface de communication homme-machine par la baie des instructions de base et les codes de programmation. Ce système fonctionne d'une manière autonome et continue. La partie commande est composée de :

- Une carte de commande de modèle ARDUINO Mega 2560.
- Afficheur LCD
- Moteurs pas à pas
- Driver moteurs pas-à-pas DM556D
- Alimentation

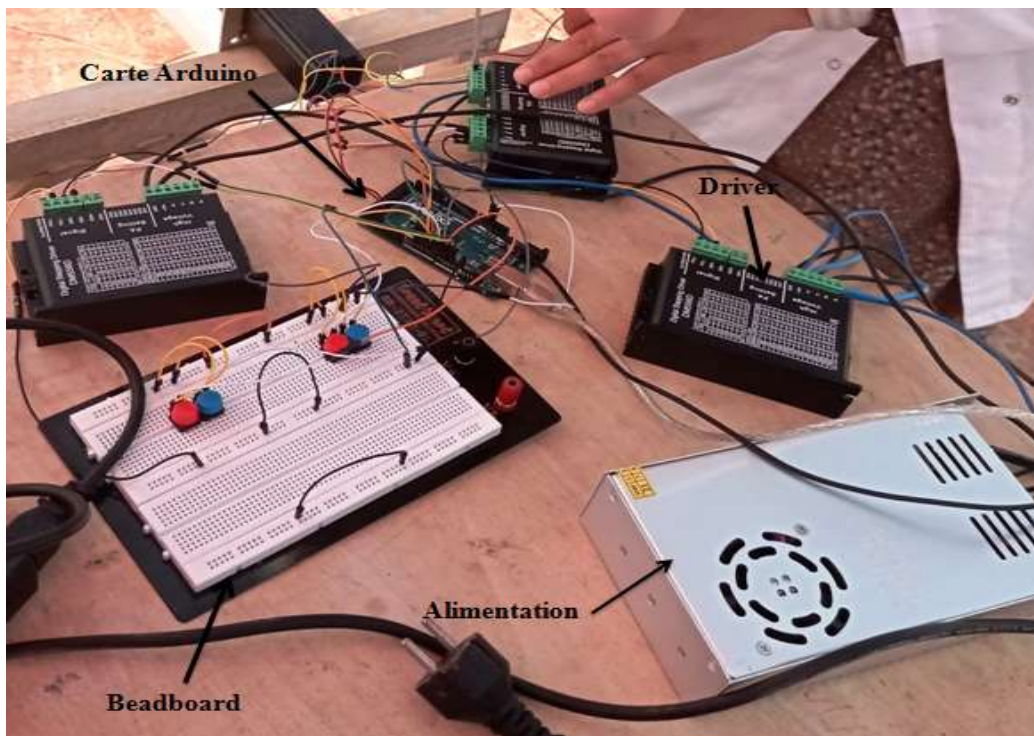


Figure V.06 : Matériels utilisés pour les systèmes de poursuite électrique.

Par faute de temps, nous avons opté pour une poursuite manuelle, les images ci-dessus illustrent les étapes de réalisation de cette dernière.

ETUDE EXPERIMENTALE



Figure V.07 : Les étapes de réalisation d'un système de poursuite manuelle.



Figure V.08 : système de poursuite manuelle mis en place sur les concentrateurs.

ETUDE EXPERIMENTALE

La figure suivante montre l'état final de l'installation obtenu sur la quelle on a effectué les différents tests et mesures :



Figure V.09 : l'état final de l'installation obtenue.

Avant d'entamer les mesures nous avons accordé les différents thermocouples de type K avec le système d'acquisition situé dans la chambre d'acquisition qui dispose d'un DATA Logger qui possède une interface permettant de connecter un PC, qui grâce a un logiciel de lecture nous donne l'affichage des données (Température à l'entrée, milieu et sortie,.....).

ETUDE EXPERIMENTALE



Figure V.10 : Acquisition de mesures.

Afin d'évaluer la ressource solaire, l'UDES dispose d'une station de mesure qui permet de donner les différentes données météorologiques à savoir : le DNI (les irradiations normales directes), l'humidité relative, température ambiante, la vitesse du vent.

Les figures ci-dessous illustrent la variation de l'éclairement direct durant les journées de tests, les valeurs obtenues sont très importantes et sont toutes favorables pour effectuer les tests de performance de notre prototype solaire ou les valeurs maximales sont obtenues entre 11h et 13h où l'éclairement peut atteindre des valeurs qui dépassent les 900 W/m^2 ce qui est très favorable pour les installations solaires thermiques à concentration. (Figure V.11).

ETUDE EXPERIMENTALE

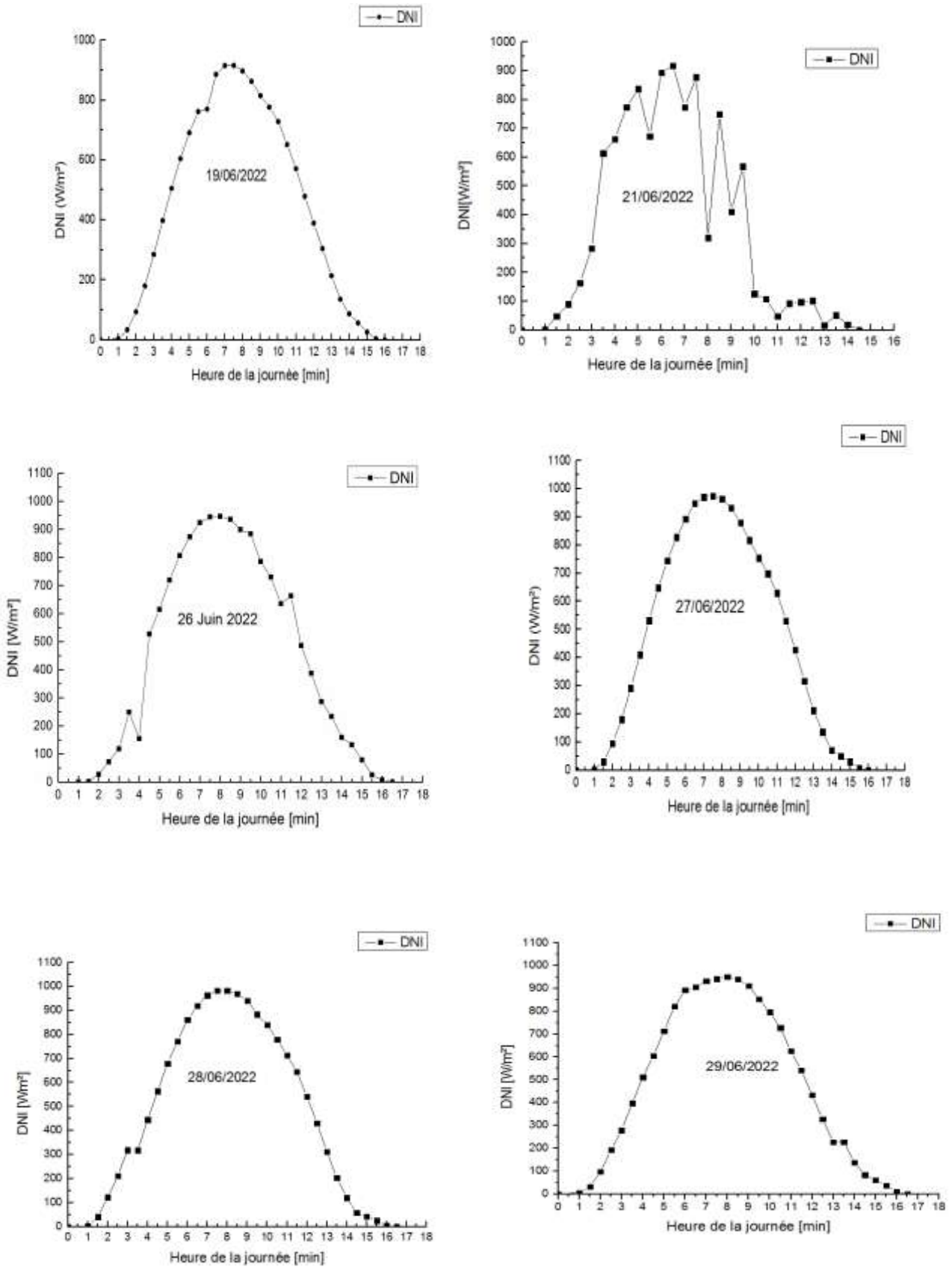


Figure V.11 : la variation de l'éclairement direct durant quelques journées de tests.

ETUDE EXPERIMENTALE

Remarque :

Durant les mesures de DNI nous avons commencé à 6h:00 jusqu'à 20h:00 .

Avec un pas de 30 minutes.

1 —————> 6h:00

1.5 —————> 6h:30

2 —————> 7h:00

V.7 Présentation des résultats :

Après avoir testé la focalisation et déterminé l'emplacement optimal de chaque ligne, nous avons commencé les différentes mesures à savoir : la température d'entrée, milieu et sortie, l'angle d'inclinaison, le blockage, l'ombrage ainsi que les pertes au bout d'une ligne.

Afin de voir la fiabilité et la rentabilité de notre prototype solaire nous avons en premier lieu testé les comportements optiques de notre installation : mesurer l'inclinaison optimale du blockage, l'ombrage, tel que montré dans les (Figure V.12 et Figure V.13).

On a déterminé l'inclinaison optimale de telle sorte à avoir un minimum de pertes dues au blockage et à l'ombrage pour avoir un maximum de collecte de l'énergie solaire.

Nous avons présenté les mesures sous forme de tableaux pour les 12 lignes de miroirs où nous avons détecté le comportement de chaque miroir adjacent (avant ou derrière). concernant le blockage nous avons déterminé la largeur de l'image causée par le miroir situé derrière , par contre l'ombrage il consiste a mesurer l'ombre que projette un miroir avant l'autre, ce dernier est nul pour toutes les lignes donc c'est un signe de très bonne conception de notre prototype solaire , ainsi que l'optimisation des différents paramètres ont été bien déterminés , les paramètres optimaux concernés sont : l'espacement, le décalage, l'angle d'inclinaison, la hauteur que sépare le champ du récepteur cela donne un excellent aperçu pour notre projet ce qui va améliorer les performances thermiques . Par contre le blockage est inévitable dans ce genre d'installation mais on peut le réduire en trouvant un compromis entre l'espacement la hauteur et l'angle d'inclinaison.

Les résultats que nous avons déterminé montrent que le blockage est très bien maîtrisé cela est apparent dans les mesures effectuées.

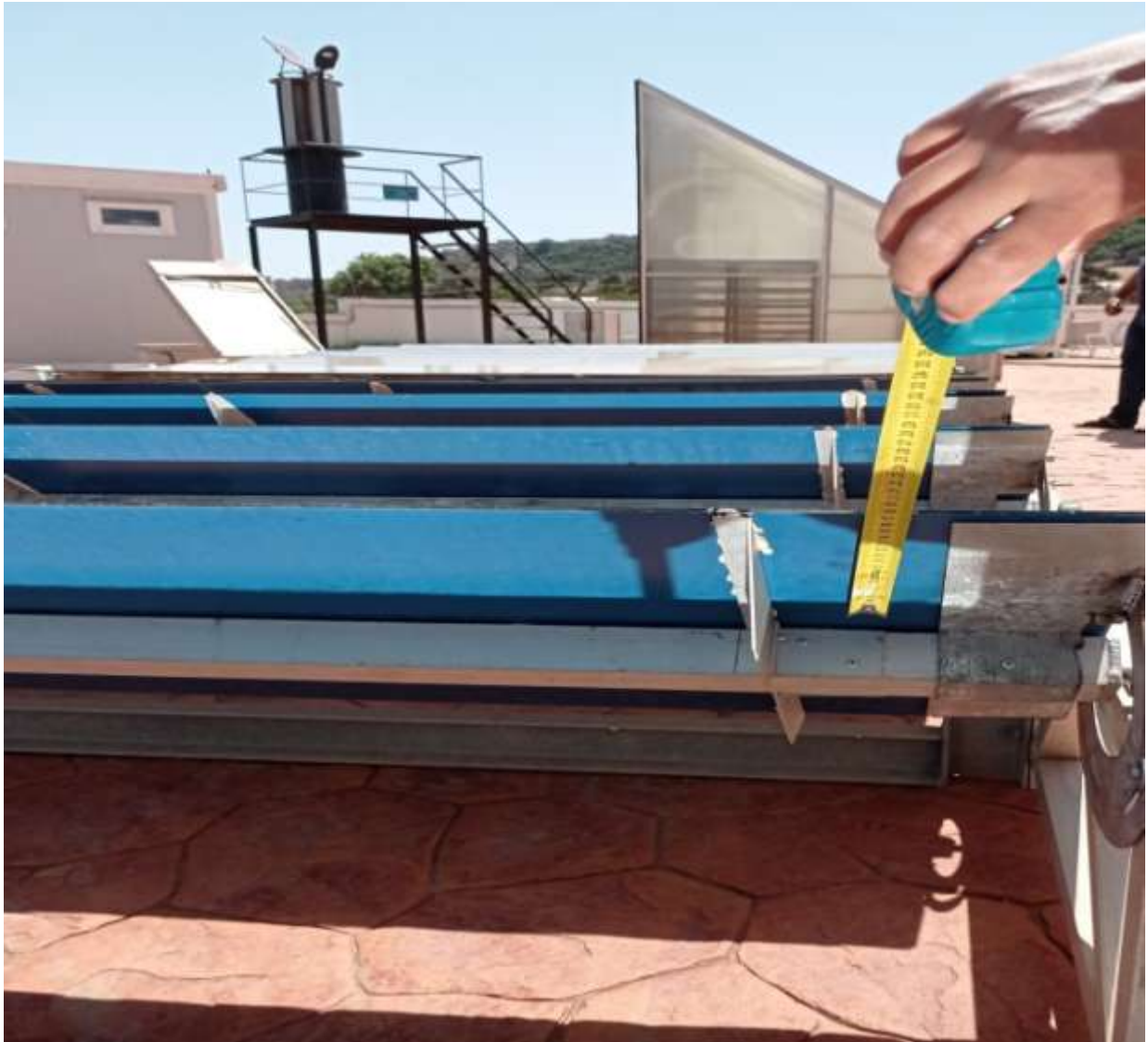


Figure V.12 : mesure du blockage.



Figure V.13 : mesure de l'angle d'inclinaison.

ETUDE EXPERIMENTALE

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats obtenus des paramètres cités ci-dessus :

Tableau V.01 : Valeurs mesurées de l'angle d'inclinaison optimale de chaque miroir pour la
journée de 26/06/2022

Miroirs heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10h15	60°	59°	55°	52°	48°	42°	23°	11°	18°	-5°	-11°	-12°
10h30	52°	53°	52°	48°	40°	30°	21°	12°	-8°	-19°	-24°	-18°
10h45	53°	54°	50°	40°	39°	25°	16°	-5°	-10°	-13°	-18°	-19°
11h00	49°	55°	48°	41°	30°	27°	10°	4°	-10°	-14°	-17°	-22°
11h15	58°	50°	52°	42°	44°	32°	17°	10°	-13°	-19°	-20°	-19°
11h30	50°	53°	44°	40°	33°	24°	15°	-9°	-13°	-18°	-15°	-14°
11h45	50°	50°	40°	40°	34°	20°	18°	11°	-22°	-18°	-23°	-26°
12h00	41°	43°	48°	51°	24°	18°	9°	-8°	-9°	-14°	-16°	-23°
12h15	43°	47°	41°	44°	35°	20°	-7°	11°	-22°	-24°	-29°	-30°
12h30	44°	40°	43°	34°	22°	20°	-2°	-2°	-11°	-15°	-28°	-20°
12h45	34°	32°	31°	32°	23°	15°	-7°	-10°	-14°	-29°	-35°	-39°
13h00	32°	34°	32°	30°	24°	10°	-8°	-15°	-18°	-40°	-38°	-45°
13h15	32°	34°	32°	30°	24°	10°	-20°	-25°	-28°	-24°	-41°	-44°
13h30	30°	33°	29°	29°	15°	13°	-13°	-24°	-28°	-29°	-37°	-40°
13h45	33°	35°	30°	27°	17°	13°	-22°	29°	-36°	-39°	-39°	-52°
14h00	25°	27°	23°	28°	22°	11°	-19°	-27°	-34°	-38°	-39°	-42°
14h15	28°	25°	26°	19°	13°	5°	-29°	-33°	-32°	-32°	-40°	-46°
14h30	33°	22°	20°	18°	8°	-4°	-20°	-30°	-30°	-40°	-43°	-44°
14h 45	36°	18°	15°	14°	7°	-9°	-16°	-26°	-35°	-43°	-46°	-46°
15h 00	21°	23°	20°	12°	7°	-14°	-28°	-34°	-35°	-51°	-50°	-51°

ETUDE EXPERIMENTALE

Tableau V.02 : Valeurs mesurées de l'angle d'inclinaison optimale de chaque miroir pour la journée de 29/06/2022

Miroirs heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10h15	48°	47°	44°	40°	32°	27°	16°	3°	-3°	-7°	-12°	-13°
10h30	46°	42°	41°	36°	31°	25°	10°	-1°	-4°	-10°	-14°	-15°
10h45	46°	45°	41°	38°	32°	24°	7°	0°	-5°	-11°	-15°	-16°
11h00	35°	42°	36°	36°	29°	21°	6°	0°	-6°	-11°	-15°	-16°
11h15	43°	41°	38°	34°	28°	21°	4°	-4°	-9°	-14°	-18°	-20°
11h30	41°	40°	36°	33°	26°	20°	-3°	-4°	-10°	-15°	-20°	-21°
11h45	40°	38°	34°	31°	24°	18°	1°	-5°	-12°	-16°	-20°	-21°
12h00	38°	36°	33°	29°	23°	15°	0°	-8°	-15°	-19°	-23°	-25°
12h15	32°	30°	27°	24°	17°	8°	-7°	-13°	-20°	-24°	-28°	-30°
12h30	32°	30°	26°	24°	17°	8°	-8°	-15°	-21°	-24°	-29°	-30°
12h45	31°	30°	25°	24°	16°	8°	-8°	-17°	-21°	-25°	-30°	-32°
13h00	31°	30°	25°	24°	16°	9°	-8°	-17°	-22°	-27°	-31°	-33°
13h15	29°	28°	23°	20°	14°	7°	-10°	-16°	-23°	-28°	-31°	-33°
13h30	27°	25°	22°	21°	13°	5°	-10°	-18°	-25°	-31°	-34°	-35°
13h45	27°	23°	21°	21°	11°	4°	-14°	-21°	-27°	-31°	-35°	-37°
14h00	22°	21°	17°	14°	7°	1°	-16°	-23°	-29°	-34°	-37°	-39°
14h15	22°	20°	17°	14°	7°	1°	-16°	-23°	-29°	-35°	-38°	-41°
14h30	20°	18°	15°	13°	4°	-3°	-21°	-27°	-32°	-37°	-40°	-44°
14h45	19°	16°	13°	12°	2°	-5°	-10°	-28°	-34°	-39°	-42°	-45°
15h00	17°	16°	12°	8°	1°	-6°	21°	-29°	-35°	-40°	-43°	-46°

ETUDE EXPERIMENTALE

Tableau V.03 : Valeurs mesurées du blockage (cm) de la journée du 26/06/2022

miroirs heure	2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
10h15	21.55	16.5	9	0.5	0	0	0	0	0	0
10h30	17.5	14	9.5	1	0	0	0	0	0	0
10h45	17.5	12	8	4	0	0	0	0	0	0
11h00	22	13	8.5	0	0	0	0	0	0	2
11h15	15	13	8	0	0	0	0	0	0	4
11h30	16	11.5	6.5	0	0	0	0	0	5	1
11h45	17.5	16	5.5	0	0	0	0	0	3	6
12h00	16	14.5	5	0	0	0	0	0	2	5
12h15	16.5	9	6	0	0	0	0	0	0	0
12h30	15	8	5	0	0	0	0	0	0	0
12h45	15.5	6	5	0	0	0	0	0	0	0
13h00	14.5	6	1	0	0	0	0	9	8	10.5
13h15	14	6	1	0	0	0	0	0	9	11
13h30	11	6	5	0	0	0	0	0.5	8	11
13h45	10	3	6	0.5	0	0	0	0.5	9	13.5
14h00	10	3	0	0	0	0	0	2	15	11.5
14h15	8	0.4	0	0	0	0	0.5	4	10	14
14h30	7	0	0	0	0	0	4	0	13	13
14h45	5.5	0	0	0	0	0	4	4	11	13
15h00	4	0	0	0	0	0	0	4.5	11	13

ETUDE EXPERIMENTALE

Tableau V.04 : Valeurs mesurées du blockage de la journée du 29/06/2022

Miroirs Heure	2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
10h15	18	17.5	9	2	0	0	0	0	0	0
10h30	18.5	14	8	2	0	0	0	0	0	0
10h45	20	16	11	8	0	0	0	0	0	0
11h00	17	16	8	1	0	0	0	0	0	0
11h15	19.5	13.5	10	2	0	0	0	0	0	0
11h30	19	13.5	9	1	0	0	0	0	0	5
11h45	18	13	8	1	0	0	0	0	0	4
12h00	18	12	7	0	0	0	0	0	0	3
12h15	18.5	13	8	1	0	0	0	0	4	6
12h30	16	10	6	0	0	0	0	0	1	5
12h45	16	12	8	0	0	0	0	0	3	5.5
13h00	16	9	4	0	0	0	0	0	5	9
13h15	17	11	6	0	0	0	0	0	7	10
13h30	17.5	10	4.5	0	0	0	0	0	0	9
13h45	14.5	10	3	0	0	0	0	0	8	10
14h00	17	11	3	0	0	0	0	2	10	12
14h15	11	6	1	0	0	0	0	2	10	14
14h30	16	6	3	0	0	0	0	0	9	11
14h45	9	4	0	0	0	0	0	3	10.5	13
15h00	8	1	0	0	0	0	0	4	12	14

D'après les mesures effectuées il est clair que le blockage est important au début et en fin de journée à cause de la position du soleil et du rayonnement rasant, tel que montré dans le (Tableau V.04), comme il est important aussi pour les miroirs situés aux extrémités du champ à cause de l'inclinaison qui est grande , comme représentée dans (Tableau V.01) , cela peut causer des pertes importantes par ce phénomène, en s'éloignant des extrémités du champ le blockage diminue et s'annule cela est due a l'angle d'inclinaison qui diminue lorsqu'on s'approche des miroirs centraux .

V.8 Mesure des températures :

Après avoir validé le fonctionnement de notre prototype solaire notamment la partie optique (une bonne focalisation avec un minimum de pertes), nous sommes passés aux tests de performances, à savoir la température d'entrée et sortie. Afin d'estimer les pertes thermiques de notre récepteur nous avons ajouté une mesure de température au milieu de ce dernier. Ces mesures vont servir pour la détermination des performances de notre champ solaire à savoir l'énergie utile et le rendement optique et le rendement thermique.

Il est à noter que pendant la réalisation de notre récepteur, nous avons utilisé un vitrage ordinaire au lieu d'un vitrage traité qui résiste aux hautes températures, pendant les débuts de test nous nous n'avons détecté aucun problème puis malheureusement la vitre n'a pas supporté le flux important envoyé par les miroirs où la température est très élevée, cela nous a mené à étudier l'influence de la vitre sur les performances thermiques de notre récepteur.

Les figures ci-dessous illustrent les profils de température au cours des journées de test avec et sans vitrage :

Remarque :

Durant les mesures de température nous avons commencé à 10h:00.

Avec un pas de 5 minutes.

0.0 —————> 10h:00

0.05 —————> 10h:05

0.5 —————> 10h :50

ETUDE EXPERIMENTALE

- profils des températures avec vitrage :

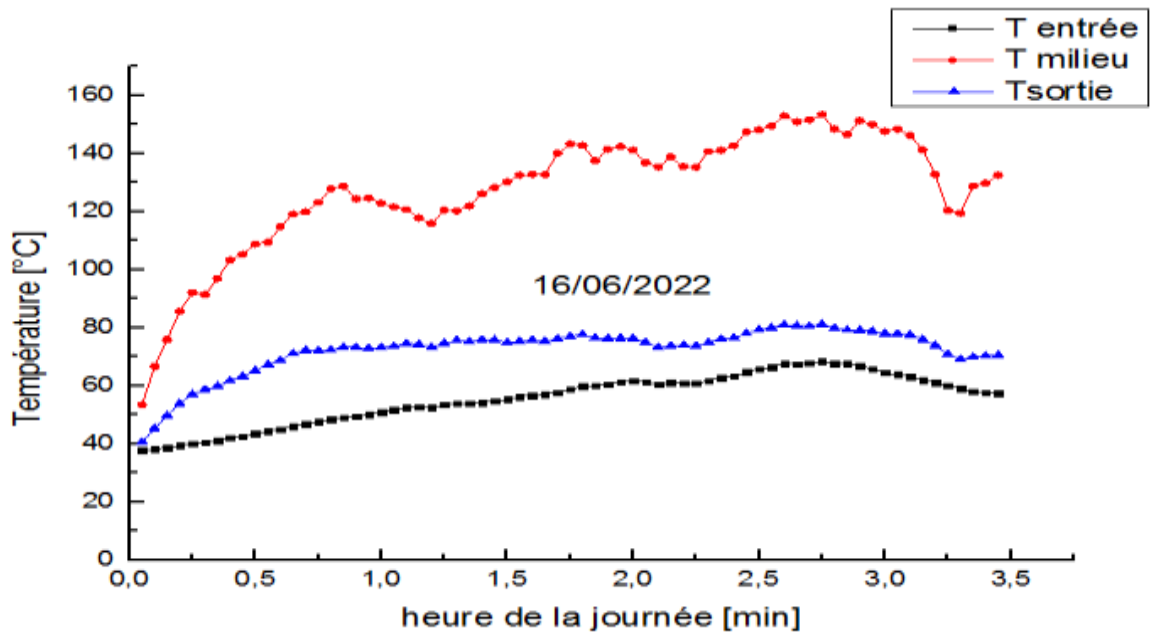


Figure V.14 : Profil des températures pour la journée du 16/06/2022 avec 50% du champ.

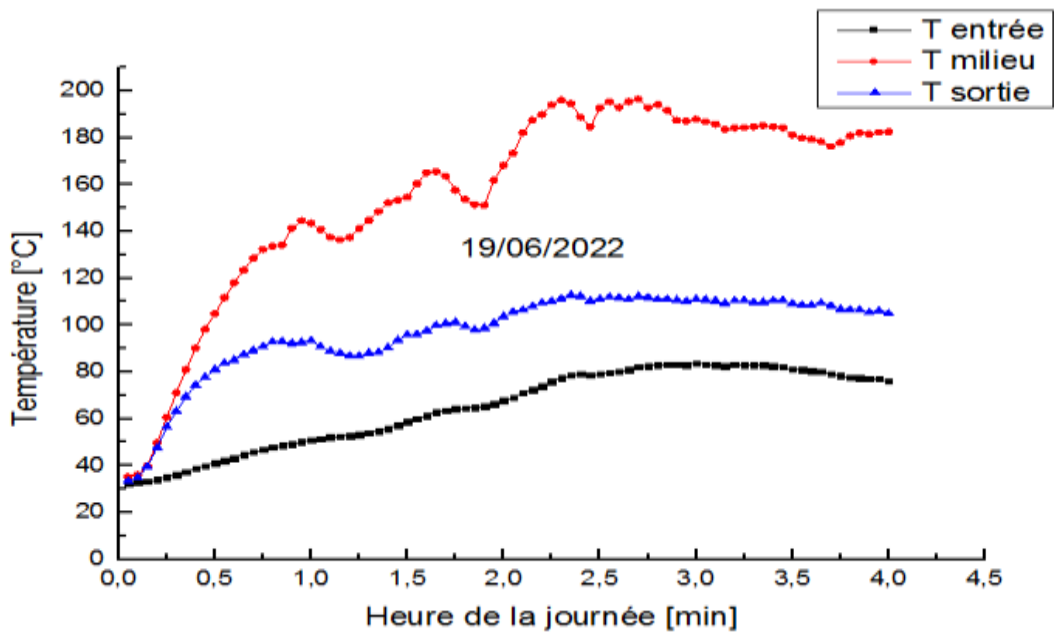


Figure V.15 : Profil des températures pour la journée du 19/06/2022.

ETUDE EXPERIMENTALE

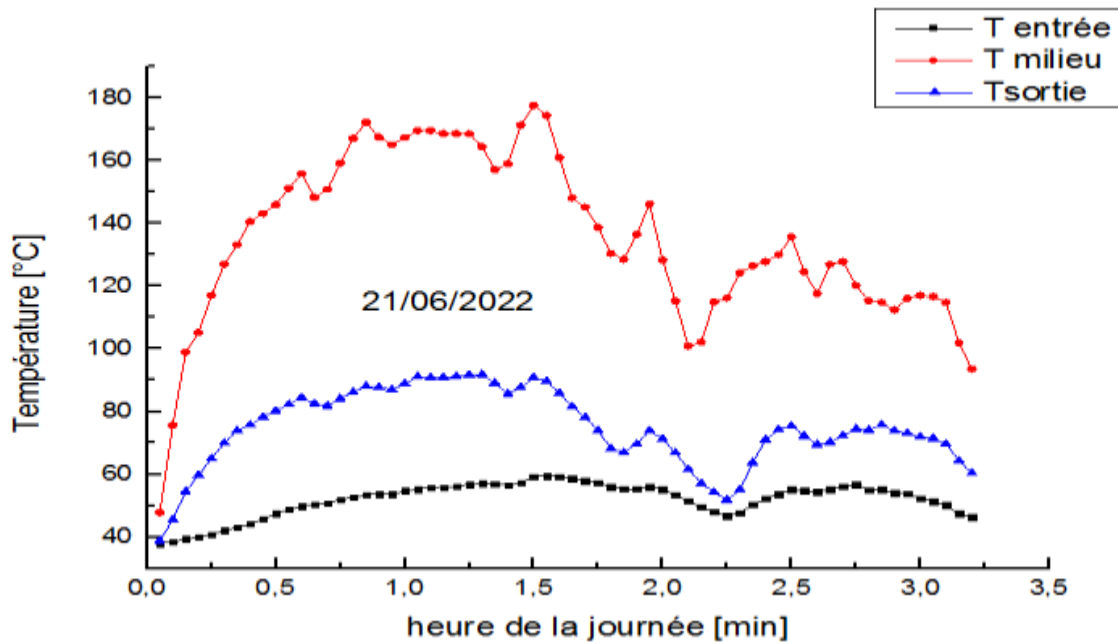


Figure V.16 : Profil des températures pour la journée du 21/06/2022.

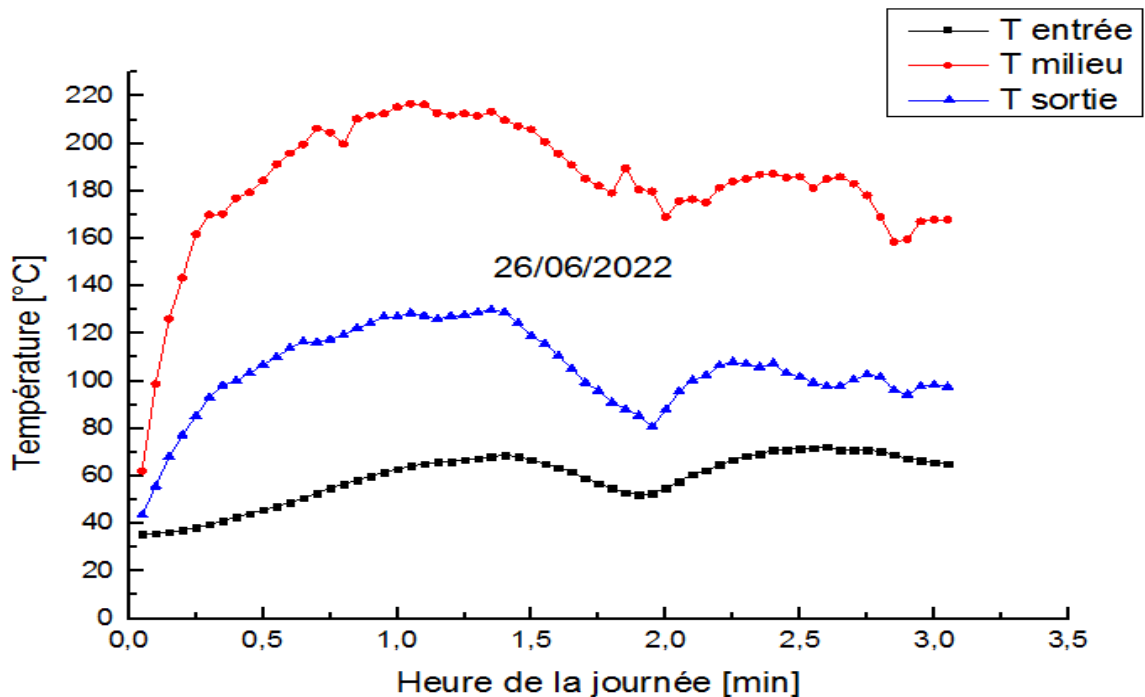


Figure V.17 : Profil des températures pour la journée du 26/06/2022.

D'après les profils des températures obtenues nous avons détecté le même comportement pour toutes les mesures : la température la plus haute est celle du milieu, la moyenne c'est celle de la sortie et la plus faible est celle de l'entrée, cela est due aux pertes au bout d'une ligne (end

ETUDE EXPERIMENTALE

losses) et tous les rayons réfléchis par les miroirs se focalisent au milieu du récepteur c'est pour ces raisons que nous avons la température la plus haute se situe au milieu du récepteur, et concernant l'écart de températures important enregistré entre l'entrée et la sortie, il est due à la perte importante au bout d'une ligne à l'entrée du récepteur et aux pertes par débordement (les rayons réfléchis ratent la cible (Figure V.18), cette dernière est toujours présente durant toute la journée ce qui n'est pas conforme avec les exigences des installations solaires à concentration : aux alentours de midi il faut avoir un minimum de pertes par débordement et pertes au bout d'une ligne pour que le rendement optique du récepteur soit égale à 100%. Nous avons constaté et confirmé que la hauteur qui sépare le champ solaire du récepteur n'est pas optimal et il est fortement recommandé de corriger cette hauteur dans l'avenir pour avoir de meilleurs résultats.



Figure V.18 : Pertes au bout d'une ligne du récepteur.

D'après les profils de température obtenu il est très claire que ces profils varie proportionnellement les profils de DNI ,avec 50% de champs les température enregistré sont un peu faible (ne dépasse pas 140°C) pendant les tests avec 50% du champ solaire la vitre a

ETUDE EXPERIMENTALE

résisté a cette gamme de température (de 57 à 140 °C) alors avec 50% du champ solaire notre récepteur thermique atteint une température maximale est de 140°C ce qui est énorme par rapport aux dimension de notre champ de miroirs.

Après avoir finalisé la construction et la mise en place de notre champ de miroirs nous avons commencé les tests de performance avec un champ solaire fonctionnent à 100% ; dès que le prototype est en fonctionnement nous avons enregistré des températures supérieur a celle des tests précédent et que la vitre n'a pas résisté à ce flux important envoyer par les miroirs (la vitre à fissuré à une température de 180°C).



Figure V.19 : Etats du récepteur durant les tests.

D'après ces résultats on peut constater que le récepteur que nous avons réalisé est très rentable pour une telle application et que les pertes thermiques sont très bien métrisées, dans la journée la plus favorable nous avons une gamme de fonctionnement de notre récepteur allant de 65 jusqu'à 221°C ,ce qui est énorme pour un petit champ solaire comme le notre , la seule chose à signaler est que la vitre doit être remplacée par une vitre trempé.

ETUDE EXPERIMENTALE

- Les profils de températures sans vitrage :

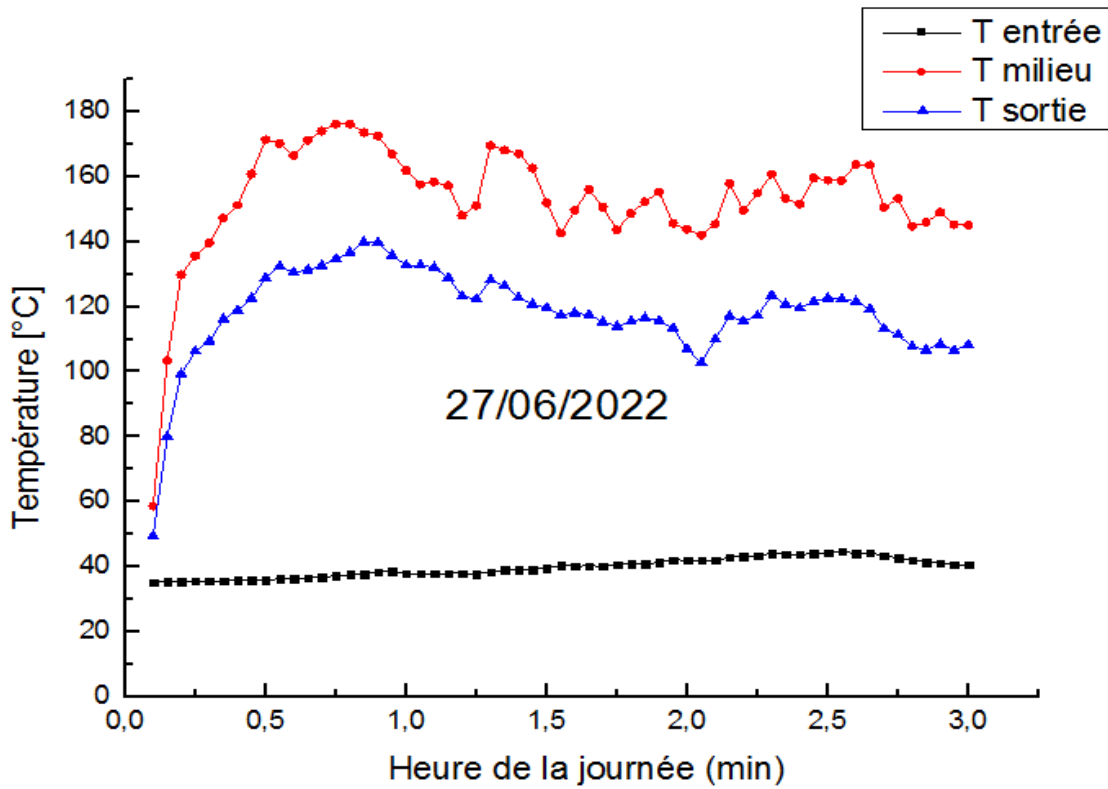
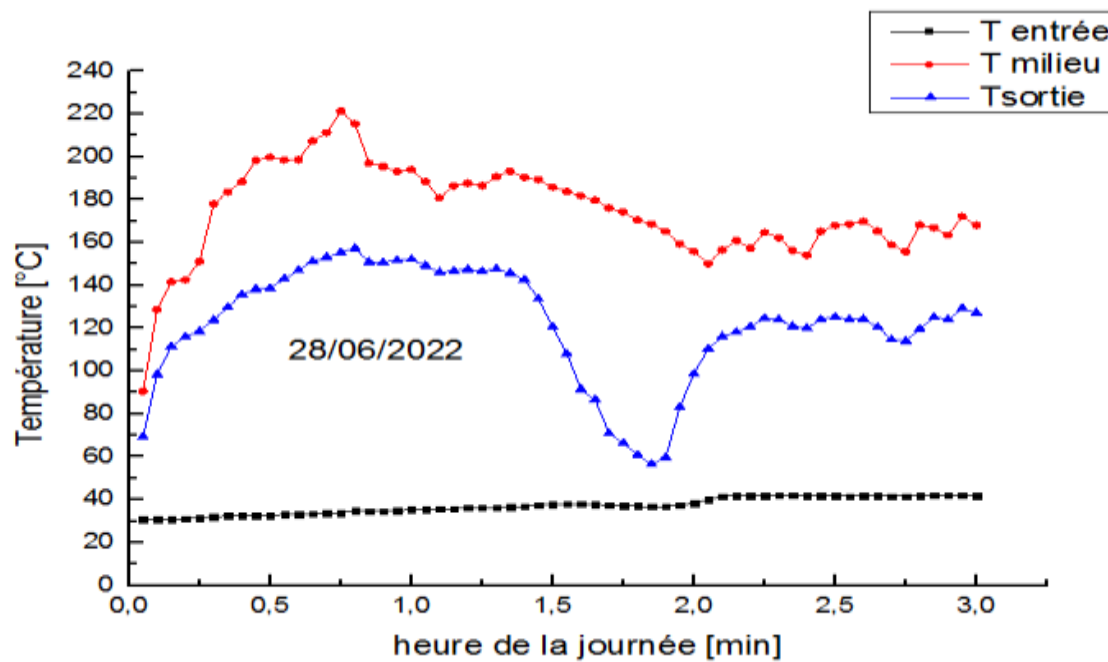


Figure V.20 : Profil des températures pour la journée du 27/06/2022.



ETUDE EXPERIMENTALE

Figure V.21 : Profil des températures pour la journée du 28/06/2022.

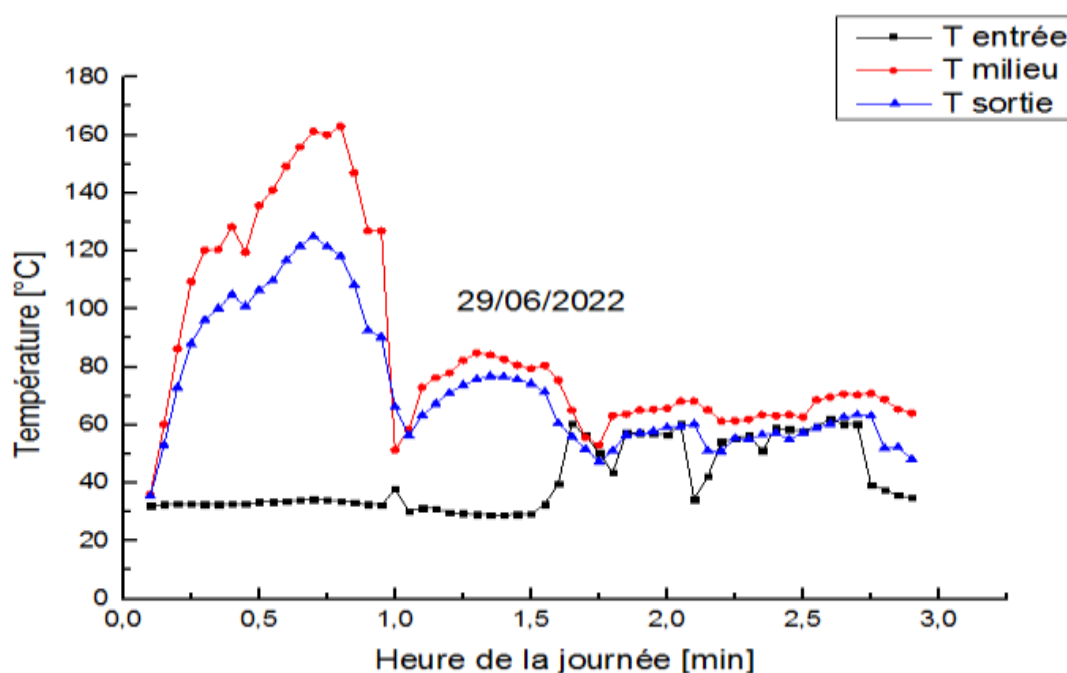


Figure V.22 : Profil des températures pour la journée du 29/06/2022.

D'après les mesures effectuées pour un récepteur sans vitrage nous avons détecté une chute de température par rapport aux mesures effectuées avec vitrage, à l'exception de la journée du 28/06/2022 où la température enregistrée atteint 220°C cela est justifié par des conditions météorologiques favorables, cette chute est de l'ordre de 61°C, ici on voit l'importance d'utiliser une couverture transparente pour le récepteur thermique des concentrateurs linéaires de Fresnel, cette dernière est importante pour créer l'effet de serre car elle est transparente au rayonnement visible (rayonnement réfléchis par les miroirs) et elle est opaque au rayonnement infrarouge, pour cette raison que nous avons détecté cette chute importante de température donc il est fortement recommandé d'utiliser un récepteur thermique avec vitrage dans notre prototype solaire.

ETUDE EXPERIMENTALE

V.9 Les pertes au bout d'une ligne :

Tableau V.05 : mesure des pertes au bout d'une ligne du récepteur durant ces journées.

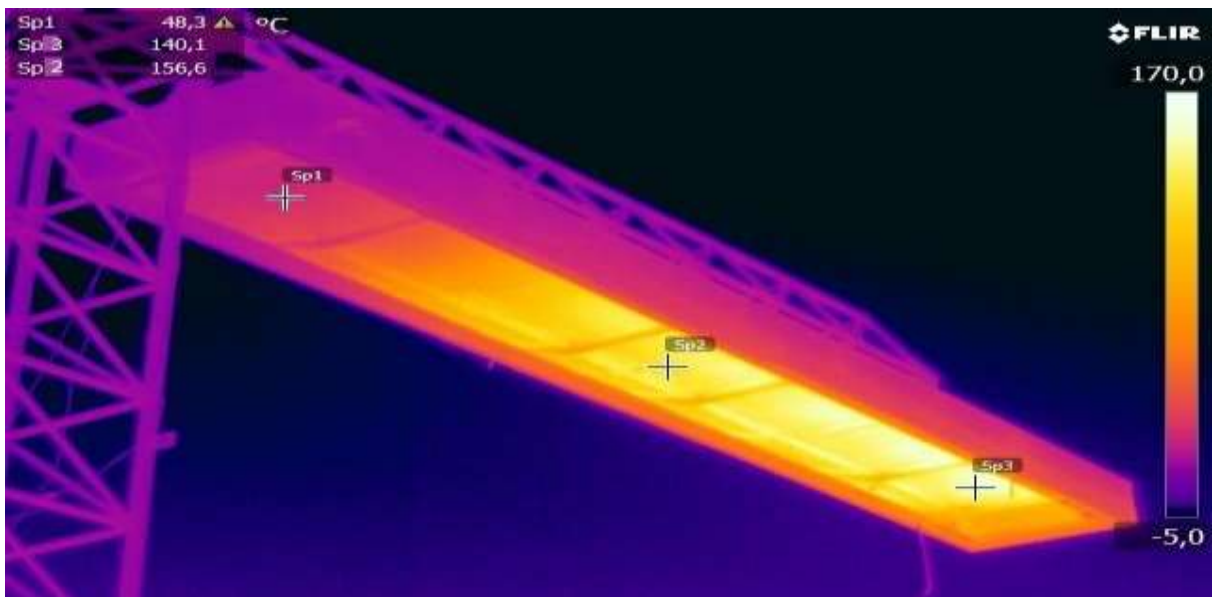
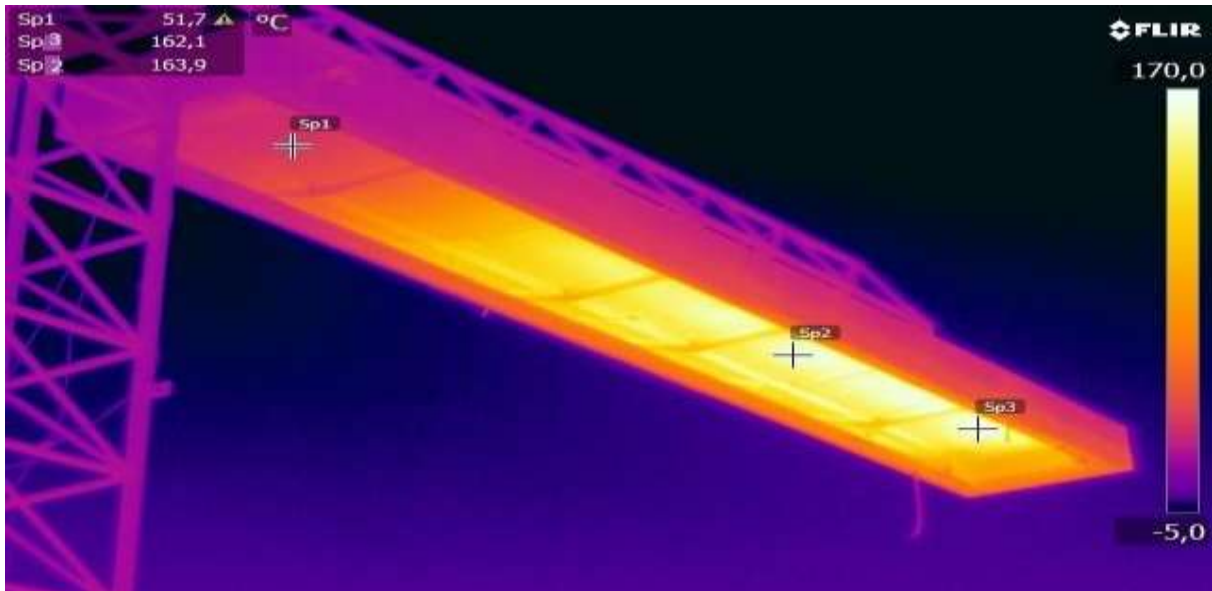
Journée \ Heure	28/06/2022	29/06/2022
10h10	143 cm	110 cm
10h40	104 cm	95 cm
11h10	89 cm	85 cm
11h40	65 cm	50 cm
13h00	30 cm	45 cm
13h30	36 cm	
14h00	49 cm	
14h30	41 cm	
15h00	36 cm	

Le tableau ci-dessus montre les mesures de la perte au niveau du récepteur due à la défocalisation au niveau de ce dernier, il est bien apparent que la tache solaire au début et au fin de journée est faible à cause de l'inclinaison importante des miroirs et à la position du soleil dans ces périodes, par contre elle est faible lorsque le soleil est au zénith et l'inclinaison des miroirs est faible. Dans les installations solaires thermiques très bien optimisées et dimensionnées la tâche solaire aux alentours de midi doit être maximale (le récepteur est totalement éclairé), dans notre cas les pertes toujours sont présentes, cela nous a confirmé que notre installation doit être redimensionnée et revoir l'optimisation des différents paramètres (à 13h la perte au bout d'une ligne égale à 30 et 45 cm pour les journées sélectionnées).

Pour bien enrichir notre travail et mettre en valeur les résultats obtenus nous avons utilisé une caméra infrarouge pour vérifier les résultats obtenus avec le système d'acquisition, les mêmes comportements sont détectés : la température la plus haute est celle du milieu, la moyenne

ETUDE EXPERIMENTALE

c'est celle de la sortie et la plus faible est celle de l'entrée, alors on peut valider et confirmer la fiabilité des résultats du système d'acquisition. (Figure V.22).



ETUDE EXPERIMENTALE



Figure V.23 : Niveau des températures enregistrées à l'aide de la camera thermique.

Conclusion :

La mise en place du champ solaire et les différents tests se sont très bien déroulés et sans trop de difficultés, et cela grâce aux facilités que nous avons rencontrées au niveau de l'UDES, ainsi que la grande aide assurée par notre tuteur de stage et son équipe au niveau de cette dernière.

Nous avons décrit et présenté toutes les étapes de construction de notre prototype, cette description est illustrée par des images réelles et des conceptions DAO, comme nous avons présenté les différents tests d'optimisations et de performances, des résultats très concluants ont été trouvés, ce qui donne un excellent aperçu à notre dispositif expérimental développé.

L'UDES envisage de compléter et d'améliorer le prototype pour pouvoir produire de l'électricité grâce à un groupe ORC couplé avec le champ solaire, et de faire des essais de production de vapeur surchauffée.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude expérimentale des performances optiques et thermiques d'un prototype solaire à concentrateur linéaire de Fresnel situé à l'unité de développement des équipements solaires (UDES) à Bou-Ismaïl wilaya de Tipaza.

Pour atteindre cet objectif, nous avons suivis les démarches suivantes :

Pour le premier chapitre, dans la première partie quelques généralités sur les énergies renouvelables et leurs applications ont été présentées, dans la deuxième partie les notions de base sur le gisement et le potentiel solaire ont été présentées.

Le chapitre 2 présente le principe du solaire thermodynamique, où les quatre technologies des CSP ont été décrites et définies, les techniques permettant de compenser le caractère intermittent de l'énergie solaire ont été présentées en détail à savoir l'hybridation et le stockage thermique

Dans le troisième chapitre nous avons présenté un état de l'art et un état des lieux des concentrateurs linéaires de Fresnel, et plus précisément les deux parties optique et thermique où nous avons discuté toutes les configurations existantes et leurs performances, nous avons aussi présenté des travaux de recherche publiés dans ce domaine. A travers cette étude approfondie effectuée on a constaté que plusieurs chercheurs et entreprises s'intéressent à cette technologie, vu ses avantages, et son aptitude à être une excellente alternative des centrales solaire conventionnelles.

Dans le chapitre 4, nous avons fait une modélisation optique et thermique, cette dernière permet de prédire le comportement optique et thermique du concentrateur de Fresnel, cela nous a permis de faire une étude de dimensionnement, d'optimisation, et une étude paramétrique, en faisant varier les divers paramètres pertinents qui peuvent avoir une grande influence sur le rendement optique, thermique, et le rendement global de la centrale.

Le dernier chapitre a fait l'objet d'une description des étapes de déroulement du processus expérimental pendant les journées de tests décrites avec des photos illustratives prises à chaque étape, puis effectuer des tests, l'objectif de ces tests était de déterminer les performances de notre prototype solaire afin de valider sa géométrie et son fonctionnement, plusieurs paramètres ont été présentés à savoir le DNI, les températures à l'entrée, sortie et milieu du récepteur, l'angle d'inclinaison optimal, le blockage ainsi que l'ombrage.

CONCLUSION GENERALE

Sur la base de cette étude, on peut conclure que :

- La conception du récepteur a été bien maîtrisée en vue des résultats assez satisfaisants obtenus (niveau de température très élevés par rapport aux dimensions du champ solaire qui est moyenne).
- La conception du champ de miroirs a été bien maîtrisée cela est bien apparent aux valeurs de pertes optiques très faibles (ombrage nul pendant toute la journée et pour toutes les lignes de miroirs, blockage très faible). Nous avons juste une petite contrainte à signaler qui est les pertes par débordement et au bout d'une ligne un peu élevée cela est due à une hauteur qui sépare le champ solaire du récepteur qui n'est pas optimale (à peu près 30 cm) alors il est fortement recommandé de corriger cette distance dans les projets futurs
- Le vitrage est un élément très important dans les applications thermiques de Fresnel car il permet d'atteindre des températures très importantes par la création de l'effet de serre il joue le rôle d'un isolant thermique (émissivité de l'absorbeur dans l'infrarouge).
- Le système de poursuite automatique est beaucoup meilleur par rapport au système de poursuite manuelle car la poursuite automatique assure un fonctionnement du prototype en permanence par contre l'autre système reste limité (à chaque fois il faut positionner les miroirs).

Notre objectif principal dans ce travail était d'étudier les performances de notre prototype solaire, nous avons effectué des tests afin d'évaluer l'énergie utile du récepteur en mesurant la température d'entrée, milieu et celle de sortie, et bien sûr avec une évaluation du rendement thermique de ce dernier, nous proposons comme perspectives dans des futurs projets de recherche afin d'améliorer les performances de notre prototype solaire :

- Le caractère intermittent de l'énergie solaire nous mène toujours à associer nos installations solaires thermodynamiques à d'autres sources d'énergie (hybridation), ou bien intégrer des systèmes de stockage thermiques (généralement un stockage par chaleur sensibles).
- Installer sur le prototype un système de préchauffage de l'eau afin d'éliminer le circulateur, le système de préchauffage va permettre à l'eau de monter vers le récepteur par effet thermosiphon (convection naturelle par différence de densité).

CONCLUSION GENERALE

- Faire une extension de champ de miroirs toute en installant une valorisation énergétique en couplant le champ solaire avec une turbine ORC (Organic Rankine Cycle).
- Installer sur le prototype solaire un stockage de chaleur sous forme d'eau chaude, ceci permettra de laisser la production fonctionnelle même pendant la nuit.

Il est également prévu, lorsque les essais en vapeur saturée seront finis, de faire des essais en vapeur surchauffée ; Sur une future centrale, une part des modules Fresnel serviront à créer de la vapeur saturée, et une autre partie servira à surchauffer cette vapeur. Pour rester dans ces conditions, l'idéal sera de directement injecter de la vapeur saturée en entrée de tube récepteur, pour analyser la surchauffe sur les tubes. Cela n'est pour l'instant pas possible avec l'équipement actuel (le revêtement sélectif se détériorera dès 300-350°C)

Références bibliographiques

- [1] https://climate.selectra.com/fr/comprendre/energie-renouvelable?fbclid=IwAR2T1OxX-SsootR8EyRf-do_2kIGssGbwz68xUqZcNH5lqvV0RCPz8mcak consulté en Juin 2022.
- [2] H, BELTAGY. Cours Master 2 (2021). Transition Energétique, faculté du genie de la construction, département genie mécanique, UMMTO.
- [3] <https://www.lenergiesoutcompris.fr/actualites-conseils/quelle-est-la-source-d-energie-de-la-geothermie-48512> consulté en Juin 2022.
- [4] <https://www.xpair.com/lexique/definition/energie-solaire.htm> consulté en Juin 2022.
- [5] François Nepveu, “Production décentralisée d’électricité et de chaleur par système parabole Stirling : Application au système EURODISH”, Thèse de doctorat, université de Perpignan, 2008.
- [6] <https://www.connaissancedesenergies.org/?fbclid=IwAR1zikRIGxVsw78zmHKCpf2kAx7bqb7HcQEwGe2XTvt1odxh60uQDsSzup8> consulté en Juin 2022.
- [7] Pierre GARCIA, “Outils d’évaluation technico-économique et d’aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur”, Thèse de doctorat, université de Perpignan, 2007.
- [8] Taib Ajzoul , cour M2 Energétique département de physique (FS de Tétouan)
- [9] Jacques BERNARD. 2011. Energie solaire calculs et optimisations. Toulouse, France, 913p
- [10] Système CSP intro Syndicat des énergies renouvelables 13-15, rue de la Baume 75008 Paris, dernière révision du document : juin 2012.
- [11] L'un des avantages de cette technologie : Rémi Chauvin : Évaluation de la ressource solaire pour la gestion optimisée de centrales CSP. Perpignan: France, 2016
- [12] IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2014. International Renewable Energy Agency, 2015.
- [13] Rémi Chauvin : Évaluation de la ressource solaire pour la gestion optimisée de centrales CSP. Perpignan: France, 2016
- [14] IEA. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy – 2014 edition. International Energy Agency, 2014

- [15] BOUDOIR, M. Cours Master 2 (2013). Introduction à l'énergie solaire à concentration.
- [16] Kalogirou, S.A. (2009). Solar Energy Engineering: Processes and Systems, 1st ed., Academic Press 2009.
- [17] Jean-François Hoffmann. Stockage thermique pour centrale solaire thermodynamique à concentration mettant en œuvre des matériaux céramiques naturels ou recyclés. Genie des procédés. Université de Perpignan, 2015. France
- [18] Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lázaro, P. Dolado, B. Zalba, and L. F. Cabeza, "State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 Concepts, materials and modellization," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 31–55 (2010)
- [19] D. Laing, W.-D. Steinmann, R. Tamme, and C. Richter, "Solid media thermal storage for parabolic trough power plants," Solar Energy, 80, 1283–1289 (2006)
- [20] moodle.univ-Quargla.dz/pluginfile.php/19/45/course/summary/Technologie
- [21] LAISSAOUI Mohammed : Etude et optimisation de l'hybridation solaire des installations des turbines à gaz et turbines à vapeur utilisés pour le dessalement d'eau. Mostaganem: Algérie, 2018
- [22] European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA). <http://estelasolar.org>; May 2016.
- [23] Contribution à la détermination des performances optiques et thermiques d'une centrale solaire à concentrateur linéaire de Fresnel, thèse de doctorat université de Blida, Décembre 2017
- [24] Étude de la possibilité d'intégration de l'énergie solaire dans la production d'électricité à des fins industrielles dans la région de M'Sila, thèse de doctorat Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2022
- [25] Guangdong Zhu, Tim Wendelin, Michael J. Wagner, Chuck Kutscher, "History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors" Solar Energy 103 (2014) 639–652
- [26] Étude et modélisation dynamique d'un concentrateur à miroir linéaire de Fresnel thèse de doctorat en cotutelle 2019

- [27] S. S. Sahoo, S. Singh, and R. Banerjee, “Analysis of heat losses from a trapezoidal cavity used for Linear Fresnel Reflector system,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 1313–1322, 2012.
- [28] Valenzuela, L., Zarza, E., Berenguel, M., Camacho, E.F. (2005). Control concept for direct steam generation in parabolic troughs. *Solar Energy*, 78(2), 301-311
- [29] Centrale Llo <https://les-smartgrids.fr/solaire-thermodynamique-llo/>
- [30] Puerto 2 <https://ohla-group.com/en/portfolio-item/30-mw-puerto-errado-2-thermosolar-plant/>
- [31] Hani Beltagy, “The effect of glass on the receiver and the use of two absorber tubes on optical performance of linear Fresnel solar concentrators”. *Energy* 224 (2021) 120111
- [32] Alliotte, R. “Superheated direct steam generation: alternative configuration for CLFR solar plants.” *Solarpaces*. Andalusia, 2011
- [33] Eck, M, R Uhlig, M Mertins, A Häberle, and H Lerchenmüller. “Thermal load of direct steam generating absorber tubes with large diameter in horizontal linear Fresnel collectors.” *Heat Transfer Engineering* 28, no. 1 (2007): 42-48.
- [34] Guangdong Zhu, “Development of an analytical optical method for linear Fresnel collectors”. *Solar Energy* 94 (2013) 240–252
- [35] Jean Jacques BEZAIN et Llireñç SUREDA TRUYOLS. "Etude d'un concentrateur solaire linéique fixe intégré en toiture de bâtiment". Albi: 12^{ème} journées Internationales de Thermique, 2005
- [36] Alexandre Bittencourt de Sà, Victor César Pigozzo Filho, Lounès Tadrist, Júlio César Passos. ” Experimental study of a linear Fresnel concentrator: A new procedure for optical and heat losses characterization”. *Energy* 232 (2021) 121019
- [37] Izuchukwu Francis Okafor, “Optical Design and Performance Analysis of Linear Focusing Solar Thermal Collectors”. *International Journal of Systems Engineering* 2019; 3(1): 9-16
- [38] Diego Pulido-Iparraguirre, Loreto Valenzuela, Juan-José Serrano-Aguilera, Arànzazu Fernández-García. “Optimized design of a Linear Fresnel reflector for solar process heat applications”. *Renewable Energy* 131 (2019) 1089-1106

[39] Negi B S, Mathur S S, etKandpal T C. "Optical and thermal performance evaluation of linear Fresnel reflector solar concentrator". Solar and Wind Technology, Volume 6, pages 589-593. 1989.

[40] Bliss R et Whillier. "The derivation of several, plate efficiency factors, useful in the design of the flat plat solar heat collector". Solar Energy. Vol 4. Pages 55-64. 1959.

[41] Panna L S, Sarvia R M etBhagoria J L. "Thermal perforance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers". Applied Energy, Volum 87, September 2009, Pages 541-550.

Annexe

Tableau 1 : résultats du blockage obtenus pour la Journée du 21/06/2022

Blockage Heure	2-1 (cm)	3-2 (cm)	4-3 (cm)	5-4 (cm)	6-5 (cm)	7-8 (cm)	8-9 (cm)	9-10 (cm)	10-11 (cm)	11-12 (cm)
10h15	19	13	12	0.5	0	0	0	0	0	0
10h30	18	17	10	0	0	0	0	0	0	0
10h45	18	17.5	8	0	0	0	0	0	0	0
11h00	22.5	22	8.5	0.5	0	0	0	0	0	0
11h15	17	16	8	0	0	0	0	0	0	0
11h30	16.5	13.5	6	0	0	0	0	0	0	0
11h45	15.5	12.5	6	0	0	0	0	0	0	0
12h00	16.5	11	5	0	0	0	0	0	0	0
12h15	17	9	6	0	0	0	0	0	0	0
12h30	15	8	5	0	0	0	0	0	0	0
12h45	15.5	8	5	0	0	0	0	0	0	0
13h00	16	8.5	4	0	0	0	0	0	0	0
13h15	16	9	5	0	0	0	0	0	0	0
13h30	16.5	9	5	0	0	0	0	0	0	0
13h45	9.5	0	6	0.5	0	0	0	0	0	0
14h00	9	3	0	0	0	0	0	6.5	9.2	13
14h15	12	4	0	0	0	0	0.5	4	13	19
14h30	8	0	0	0	0	0	4	0	13	13
14h45	7	0	0	0	0	0	4	0	13	13
15h00	0	0	0	0	0	0	0	4	7.5	14.5

Tableau 2 : résultats du blockage obtenus pour la Journée du 27/06/2022

Blockage Heure	2-1 (cm)	3-2 (cm)	4-3 (cm)	5-4 (cm)	6-5 (cm)	7-8 (cm)	8-9 (cm)	9-10 (cm)	10-11 (cm)	11-12 (cm)
10h15	19	12.5	9	0.5	0	0	0	0	0	0
10h30	17	14	9	0	0	0	0	0	0	0
10h45	17.5	15	7.5	0.5	0	0	0	0	0	0
11h00	16.5	11.5	6	0.5	0	0	0	0	0	4
11h15	16	13	7	0	0	0	0	0	0	4
11h30	16	14	6.5	0	0	0	0	0	5	5
11h45	17	14	8	0	0	0	0	0	2	7
12h00	14	10	4.5	0	0	0	0	0	4.5	7.5
12h15	16.5	9	5	0	0	0	0	0	0	0
12h30	16	8.5	5	0	0	0	0	0	0	0
12h45	15.5	8.5	6	0	0	0	0	0	5	10
13h00	15	8	2	0	0	0	0	9	8	16
13h15	13.5	5	1	0	0	0	0	0	9	11
13h30	8	4.5	0.5	0	0	0	0	1.5	10	14
13h45	9	5	0	0	0	0	0	4	9.5	12.5
14h00	9	4	0	0	0	0	0	1.5	10	14
14h15	8	1	0	0	0	0	0.5	7	10	12.5
14h30	5	0	0	0	0	0	0	6	12.5	15
14h45	2	0	0	0	0	0	0	4	13	14.5
15h00	3	0	0	0	0	0	0	4	13	15

Tableau 3 : résultats de l'angle d'inclinaison obtenus pour la Journée du 21/06/2022

Miroirs Heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10h15	60°	59°	55°	52°	48°	42°	23°	11°	18°	-5°	-11°	-12°
10h30	52°	53°	52°	48°	40°	30°	21°	12°	-8°	-19°	-24°	-18°
10h45	53°	54°	50°	40°	39°	25°	16°	-5°	-10°	-13°	-18°	-19°
11h00	49°	55°	48°	41°	30°	27°	10°	4°	-10°	-14°	-17°	-22°
11h15	58°	50°	52°	42°	44°	32°	17°	10°	-13°	-19°	-20°	-19°
11h30	50°	53°	44°	40°	33°	24°	15°	-9°	-13°	-18°	-15°	-14°
11h45	50°	50°	40°	40°	34°	20°	18°	11°	-22°	-18°	-23°	-26°
12h00	41°	43°	48°	51°	24°	18°	9°	-8°	-9°	-14°	-16°	-23°
12h15	43°	47°	41°	44°	35°	20°	-7°	11°	-22°	-24°	-29°	-30°
12h30	44°	40°	43°	34°	22°	20°	-2°	-2°	-11°	-15°	-28°	-20°
12h45	34°	32°	31°	32°	23°	15°	-7°	-10°	-14°	-29°	-35°	-39°
13h00	32°	34°	32°	30°	24°	10°	-8°	-15°	-18°	-40°	-38°	-45°
13h15	32°	34°	32°	30°	24°	10°	-20°	-25°	-28°	-24°	-41°	-44°
13h30	30°	33°	29°	29°	15°	13°	-13°	-24°	-28°	-29°	-37°	-40°
13h45	33°	35°	30°	27°	17°	13°	-22°	29°	-36°	-39°	-39°	-52°
14h00	25°	27°	23°	28°	22°	11°	-19°	-27°	-34°	-38°	-39°	-42°
14h15	28°	25°	26°	19°	13°	5°	-29°	-33°	-32°	-32°	-40°	-46°
14h30	33°	22°	20°	18°	8°	-4°	-20°	-30°	-30°	-40°	-43°	-44°
14h45	36°	18°	15°	14°	7°	-9°	-16°	-26°	-35°	-43°	-46°	-46°
15h00	21°	23°	20°	12°	7°	-14°	-28°	-34°	-35°	-51°	-50°	-51°

Tableau 4 : résultats de l'angle d'inclinaison obtenus pour la Journée du 27/06/2022

Miroirs Heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10h15	50°	48°	44°	41°	33°	26°	12°	4°	1°	-6°	-10°	-12°
10h30	49°	48°	44°	42°	31°	27°	10°	2°	-4°	-9°	-13°	-14°
10h45	48°	47°	43°	39°	30°	24°	10°	2°	-4°	-10°	-14°	-15°
11h00	46°	45°	42°	39°	26°	24°	9°	2°	-3°	-10°	-14°	-16°
11h15	45°	42°	49°	35°	27°	22°	5°	1°	-7°	-14°	-16°	-18°
11h30	43°	43°	39°	34°	30°	21°	5°	-3°	-8°	-13°	-17°	-19°
11h45	40°	39°	36°	32°	26°	19°	4°	-4°	-12°	-16°	-19°	-21°
12h00	39°	38°	35°	32°	25°	17°	1°	-6°	-12°	-21°	-21°	-22°
12h15	38°	37°	32°	29°	22°	16°	-2°	-9°	-14°	-20°	-22°	-24°
12h30	29°	28°	24°	21°	13°	12°	-8°	-17°	-22°	-27°	-30°	-32°
12h45	27°	25°	22°	18°	12°	4°	-11°	-19°	-25°	-32°	-33°	-34°
13h00	26°	24°	20°	17°	11°	3°	-12°	-20°	-26°	-30°	-33°	-35°
13h15	25°	24°	19°	17°	11°	2°	-14°	-21°	-27°	-31°	-35°	-37°
13h30	23°	21°	18°	14°	8°	-2°	-14°	-22°	-28°	-32°	-35°	-38°
13h45	21°	20°	16°	13°	17°	0°	-15°	-23°	-29°	-34°	-37°	-39°
14h00	21°	19°	16°	13°	6°	1°	-18°	-25°	-31°	-36°	-39°	-41°
14h15	20°	18°	15°	10°	8°	2°	-17°	-26°	-31°	-37°	-40°	-42°
14h30	19°	17°	14°	11°	7°	1°	-18°	-27°	-32°	-38°	-42°	-43°
14h45	17°	15°	12°	10°	2°	-5°	-19°	-27°	-34°	-39°	-43°	-44°
15h00	17°	16°	12°	8°	1°	-6°	21°	-29°	-35°	-40°	-43°	-46°