

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



Département de Génie Mécanique

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master académique

**Etude, conception et réalisation d'un récepteur
trapézoïdal pour un système solaire à concentration
linéaire de Fresnel**

Jury :

Mr. S. BOUDAUD

Mr. S. FOUCHAINE

Présenté par :

Mr. ZIBOUCHE Sofiane

Mr. MEKAOUI Hamza

Proposé et dirigé par :

Mr. H. BELTAGY

Mr. H. BENDJEBBAS

Promotion 2020/2021

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour pouvoir franchir toutes les épreuves difficiles afin d'arriver à ce mémoire.

Ce travail a été effectué dans l'Unité de développement des équipements solaires (UDES), sous la direction de Monsieur M. ABBAS. On lui exprime particulièrement toute notre reconnaissance pour nous avoir mis à disposition toutes les ressources nécessaires pour l'achèvement de notre travail.

Nos remerciements s'adressent à Monsieur H. BENDJEBAS, d'avoir accepté de nous encadrer et de nous soutenir tout au long de stage, nous tenons à lui exprimer toute notre admiration et notre reconnaissance.

A Monsieur Z. BELGROUN de nous avoir aidé à intégrer le stage au sein de l'unité.

A Monsieur H. BELTAGY, pour son aide, ses nombreux conseils, sa motivation professionnelle et surtout sa patience et son soutien inconditionnel tout au long de notre mémoire. Ce fut un enchantement de travailler avec lui.

A monsieur le président de jury, qui nous a fait l'honneur de présider le jury, nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance.

A monsieur l'examineur le membre de jury pour le grand honneur qu'il nous a fait en acceptant de juger notre travail et assurer notre soutenance, nous les prions d'accepter tous nos remerciements et l'expression de notre haute considération.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à:

Mes très chers parents pour leurs aides précieuses et leurs sacrifices dont je suis reconnaissant et que j'ai les souhaite une longue vie pleine de santé et de bonheur.

Mes très chers et adorables frères.

Mes précieuses sœurs

Tous les membres de ma famille de près ou de loin, ainsi que mes amies.

Tous mes camarades de la promotion qu'avec j'ai passé des moments inoubliables.

Tous les gens qui m'ont aidé et soutenu dans la réalisation de ce présent travail.

Hamza

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail

*A mes chers parents, qui m'ont encouragé et soutenu durant toute
ma vie et dans ma scolarité.*

A mon frère et mes sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis qui m'ont aidé de prêt ou de loin.

Sofiane

Liste des abréviations

CDER : Centre de Développement des Energies renouvelables.

CFD : Computational Fluid Dynamic.

CLFR : Compact Linear Fresnel Reflector.

CPC : Concentrateur parabolique composé.

CSP : Concentrating Solar Power

E2848 : Essai 2848

LFR : Linear Fresnel Reflector.

LFSC : Linear Fresnel Solar Concentrator

NREL : National Renewable Energy Laboratory

SMS: multi-surface simultanée.

TSV : Temps solaire vrai.

UDES : Unité de développement des équipements solaire.

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.01: Maison solaire	4
Figure I.02: l'énergie éolienne	5
Figure I.03: l'énergie biomasse.....	6
Figure I.04: l'énergie hydraulique	6
Figure I.05: l'énergie géothermique.....	7
Figure I.06: l'énergie de mers	7
Figure I.07 : quatre principaux types de concentrateurs	8
Figure I.08 : Premier prototype de Concentrateur Linéaire de Fresnel, Marseille (France) 1963	10
Figure I. 09 : Les centrales solaires à miroir de Fresnel	10
Figure I.10 : La construction de l'assemblage du tube récepteur	13
Figure I.11 : Croquis des systèmes de suivi. a: Chaque miroir est couplé à un actionneur, permettant un contrôle total sur chaque rangée. b: Tous les miroirs couplés à un actionneur. c : groupes de miroirs reliés à un actionneur	14
Figure I.12 : le montage d'un Système pour suivre le soleil de LFR	14
Figure I.13 : Principe d'un concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel	16
Figure I.14 : Schéma d'un récepteur en V	17
Figure I.15: Concentrateur à récepteur en V	17
Figure 1.16 : Récepteur trapézoïdal	18
Figure I.17 : Récepteur trapézoïdal avec surface absorbante rectangulaire.....	18
Figure I.18 : Récepteur monotube sous vide	19
Figure I.19 : Concentrateur a récepteur plat horizontal	19
Figure I.20 : Concentrateur à récepteur vertical	19
Figure I.21 : Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel	20
Figure I.22 : Centrale électrique à réflecteur linéaire Fresnel (avec l'aimable autorisation du département des médias d'Ausra)	22

CHAPITRE II

Figure II.01 : Schématisation de la répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide	25
Figure II.02 : La divergence de l'énergie du soleil vers la Terre.....	26
Figure II.03 : L'héliographe de Campbell-Stockes	28
Figure II.04 : Mesure du rayonnement Global (A) et Diffus(B) avec un Pyranomètre.....	29
Figure II.05 : Mesure du rayonnement Directe avec un pyréliomètre.....	29
Figure II.06 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du soleil.....	30
Figure II.07 : Définition des coordonnées terrestre d'un lieu.....	31
Figure II.08 : Variation annuelle de la déclinaison solaire	32
Figure II.09 : Variation annuelle de la déclinaison solaire	33
Figure II.10 : Coordonnées horizontales.....	34
Figure II.11 : Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice.....	35
Figure II.12 : position du capteur solaire à midi solaire	37

CHAPITRE III

Figure III.01 : Absorption, transmission et réflexion.	38
Figure III.02 : Réflexion des rayons de la lumière à entre deux supports optiquement différents.....	39
Figure III.03 : Surfaces réfléchissantes courbées.	40
Figure III.04 : Surface lisse et surface rugueuse.	41
Figure III.05 : L'angle d'incidence doit être égal à l'angle de réflexion.....	41
Figure III.06 : Résultats des comportements des rayons sur un demi plan	43
Figure III.07 : Résultats de traçage de rayons pour un angle du réflecteur secondaire égal à 30°	44
Figure III.08 : Résultats de traçage de rayons pour un angle du réflecteur secondaire égal à 25°	44
Figure III.09 : Résultats de traçage de rayons pour un angle du réflecteur secondaire égal à 20°	45
Figure III.10 : Résultats de traçage de rayons pour un angle du réflecteur secondaire égal à 15°	45

Figure III.11 : Résultats de traçage de rayons pour un angle du réflecteur secondaire égal à 10°	46
Figure III.12 : l'angle optimale (9°)	47

CHAPITRE IV

Figure IV.01 : Unité de développement des équipements solaire.....	49
Figure IV.02 : Logiciel utilisé (Solide Edge).....	52
Figure IV.03 : Les étapes de la conception du récepteur sur solide Edge	53
Figure IV.04 : Montage des composants du système à concentration solaire sur solide Edge.	54
Figure IV.05 : Tronçonneuses (a : pour l'aluminium, b : pour le fer)	54
Figure IV.06 : Coupeuse	55
Figure IV.07 : Presse plieuse manuelle.....	55
Figure IV.08 : Encocheuse	56
Figure IV.09 : Support miroirs.....	57
Figure IV.10 : Différentes étapes pour la construction des lignes pour supporter les miroirs..	57
Figure IV.11 : système de poursuite solaire.....	58
Figure IV.12 : les six tubes récepteurs	59
Figure IV.13 : Les étapes de fabrication et la fixation de la plaque absorbante	59
Figure IV.14 : Absorbants secondaires	60
Figure IV.15 : préparation du revêtement sélectif sur les tubes et la plaque	61
Figure IV.16 : Emplacement des différents thermocouples.....	62
Figure IV.17 : l'isolation thermique	63
Figure IV.18 : Le réflecteur secondaire	64
Figure IV.19 : Le récepteur avec sa couverture transparente (vitrage).....	65
Figure IV.20 : les différentes dimensions du récepteur	66
Figure IV.21 : le bardage ou le casing	66
Figure IV.22 : la structure sans le récepteur et les réflecteurs	67
Figure IV.23 : réglage visuel de la focalisation	68
Figure IV.24 : mise en place du notre récepteur thermique.....	68

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Comparaison des fluides de travail pour la concentration linéaire	16
Tableau IV.1 : Dimensions des paramètres de champs solaire	58
Tableau IV.2 : matériaux et paramètres optiques	64
Tableau IV.3 : principaux paramètres de la géométrie du récepteur	65

Nomenclatures

H : Rayonnement incident

T : température (K)

(L) : Longitude ($^{\circ}$)

(Z) : L'altitude (m)

(M) : Méridien ($^{\circ}$)

n : Nombre de jours écoulés depuis le 1er Janvier

h_s : Hauteur angulaire du soleil ($^{\circ}$)

a_s : Azimut solaire ($^{\circ}$)

h_0 : Hauteur angulaire du plan ($^{\circ}$)

a_0 : Azimut du plan ($^{\circ}$)

h : Hauteur du soleil au vrai midi solaire ($^{\circ}$)

i : L'angle d'inclinaison du capteur plan ($^{\circ}$)

u : L'angle formé entre la normale du collecteur et les rayons solaires à midi solaire ($^{\circ}$)

I_D : Rayonnement direct sous un ciel clair

D_H : Le rayonnement diffus reçu par le plan horizontal dans le cas de conditions de ciel clair

G_H : Rayonnement total reçu par le plan horizontal

D(i) : Réceptions des rayonnements diffus et totaux par le plan collecteur incliné

T_0 : Durée de la journée (h)

T_0' : Période située (h)

W_0 : L'énergie reçue ($\text{KWh/m}^2 \cdot \text{j}$)

L : longueur du chemin (m)

l : longueur minimale du chemin (m)

P : point d'incidence

Q : l'Energie récupérée du soleil (kJ)

m_{eau} : masse d'eau (kg)

c_p : Capacité calorifique (kJ. kg⁻¹. K⁻¹)

T : différence de température des tubes (K)

: Facteur d'absorption

:Inclinaison du plan (°)

ρ : Facteur de réflexion

: longueur d'onde (m)

i : Angles incidence (°)

r : Angle de réflexion (°)

: Facteur de transmission

() : Latitude (°)

: Déclinaison du soleil

: Angle horaire (°)

Sommaire

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Nomenclatures

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

I.1 Introduction..... 3

I.2 Définition de l'énergie 4

I.3 sources des énergies renouvelables..... 4

I.3.1 L'énergie solaire 4

I.3.2 L'énergie éolienne..... 5

I.3.3 L'énergie biomasse 5

I.3.4 L'énergie hydraulique 6

I.3.5 L'énergie géothermique 6

I.3.6 L'énergie de mer ou énergie marine 7

I.4 Potentiel de l'énergie solaire..... 7

I.5 Les systèmes à concentration solaire 8

I.5.1 Historique..... 9

I.5.2 Description et technologie des systèmes (LFR).....	10
I.5.3 les composants d'un concentrateur à réflexion linéaire de Fresnel	11
I.5.4 types de récepteurs linéaires	16
I.6 principe de fonctionnement	20
I.7 Recherche et développement des systèmes à concentration linéaire de Fresnel	20
I.8 Conclusion	23

Chapitre II : Rayonnement solaire

II.1 Introduction	24
II.2 Notion sur le rayonnement	24
II.2.1 Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide	24
II.3 Le rayonnement solaire	25
II.3.1 La constante solaire	26
II.3.2 L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire	26
II.3.3 Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol	27
II.3.4 Appareils de mesures du rayonnement solaire	27
II.4 Rappel des données astronomiques	30
II.4.1 Mouvement de la terre	30
II.4.2 Repérage d'un site à la surface de la terre (coordonnées géographiques).....	30
II.4.3 Les coordonnées du soleil.....	31
II.4.3.1 Les coordonnées équatoriales	32
II.4.3.2 Les coordonnées horizontales.....	33
II.4.4 Eclairage d'un récepteur plan.....	34

II.4.4.1 Orientation d'un plan.....	34
II.4.4.2 L'angle d'incidence Θ_i sur un plan incliné de l'angle	34
II.5 Détermination du flux solaire par calcul	35
II.6 Conclusion	37

Chapitre III : Optique géométrique et optimisation de la forme du réflecteur secondaire

III.1 Introduction	38
III.2 La loi de réflexion	38
III.3 Optimisations de la géométrie des réflecteurs secondaire.....	43
III.4 Conclusion.....	47

Chapitre IV : Conception mécanique et réalisation du récepteur

IV.1 Introduction.....	48
IV.2 Optimisation des paramètres de conception.....	49
IV.2.1 Paramètres d'optimisation de la géométrie du récepteur	49
IV.3 Les pertes Optiques	51
IV.4 Les étapes de la conception du récepteur réalisé	51
IV.5 Machines et outil durant la réalisation	54
IV.6 Etapes de réalisation	56
IV.6.1 La structure ou le support des miroirs réflecteur	56
IV.6.2 Le récepteur.....	59
IV.7 Conclusion	69

Conclusion générale 70

Bibliographie.

Introduction Générale

Depuis l'aube de l'humanité, la production de l'énergie était basée en une grande partie sur les combustibles comme le bois, les fossiles (charbon, pétrole, gaz...), puis l'uranium. Mais le grand problème accompagnant l'utilisation abusive de ces matières est l'émission de gaz et les dégagements massifs de composés divers. Aujourd'hui la communauté scientifique reconnaît la responsabilité de cette consommation sur le réchauffement climatique qui risque d'avoir des effets dramatiques sur les équilibres physiques, économiques sociaux et politiques de notre planète. Les spécialistes ont opté pour la recherche de nouvelles origines énergétiques, telles que les énergies renouvelables (solaire, éolienne, biomasse et géothermie, etc.).

Les systèmes de production d'électricité à partir des énergies renouvelables affichent une tendance croissante en termes d'utilisation en raison de la réduction des émissions de gaz à effet de serre et des stratégies de diversification des sources d'énergie des pays. Les systèmes Solaires à Concentration (CSP), tels que les centrales à tour, le dish Stirling, les concentrateurs cylindro-paraboliques, les concentrateurs de Fresnel ont été utilisés pour produire de l'électricité solaire thermique un peu partout dans le monde.

Les concentrateurs solaires de Fresnel sont plus en plus intéressants pour la production d'électricité, les performances de ces derniers et leur bonne productibilité demandent encore à être étudiées.

L'objectif de ce mémoire est de réaliser une étude et une optimisation d'un récepteur solaire à concentrateur de type Fresnel afin de le réaliser et le surmonter sur un prototype à concentrateur de Fresnel situé à l'unité de développement des équipements solaires (UDES) située à Bou-Ismaïl wilaya de Tipaza, pour cela nous avons établis le plan de travail suivant

- Le premier chapitre est consacré à une 'étude bibliographique détaillées, où sont données quelques généralités sur les énergies renouvelables et leurs utilisations dans sa première partie, dans la deuxième partie les différentes technologies des centrales solaires thermodynamiques sont présentées, et dans la dernière partie un état de l'art et un état des lieux des concentrateurs linéaires de Fresnel et les différents types des récepteurs thermiques utilisés dans cette technologie sont présenté en détail.
- Le chapitre 2 est consacré à l'étude du rayonnement solaire, où sont données quelques rappelles astronomiques, les modèles d'estimations du rayonnement solaire pour l'étude du gisement.
- Les lois fondamentales de l'optique des concentrateurs, et le principe de la réflexion sont donnée dans la première partie de chapitre 3, dans la deuxième partie les étapes

Introduction Générale

suivies dans l'optimisation de notre réflecteurs secondaires sont bien décrites avec des illustrations de chaque étape.

- Le dernier chapitre est consacré à l'étude expérimentale où toutes les étapes de réalisation de notre récepteur sont décrites en détail avec des illustrations de chaque étape.

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 I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

I.1 Introduction

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité.

Une grande partie de l'énergie utilisée aujourd'hui dans le monde (plus de 80 %) provient de gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium. Ces gisements, ces stocks, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique, sont évidemment en quantité limitée : ils sont épuisables.

Par opposition, les énergies fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, la croissance des végétaux, les marées, la chaleur de la terre sont renouvelables. Toutes ces énergies renouvelables n'ont d'ailleurs en définitive que deux sources : le soleil (puisque celui-ci est à l'origine du vent, du cycle de l'eau, des marées, de la croissance des végétaux) et la terre (qui dégage de la chaleur).

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité.

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres :

- Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- Elles sont inépuisables ;
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ;
- Elles offrent une importante indépendance énergétique.

Ces énergies renouvelables sont présentées, ainsi que leurs modes de productions énergétiques dans les paragraphes suivants.

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

I.2 DEFINITION DE L'ENERGIE

Le mot « ENERGIE », d'usage très répandu, vient du mot Grec « ENERGIA » qui signifie « FORCE EN ACTION » [1]

I.3 SOURCES DES ENERGIES RENOUVELABLES

Comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain ! La source non renouvelable telle que les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés. Les sources Renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse [1].

I.3.1 L'ENERGIE SOLAIRE

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter ! Les technologies sont réparties entre actives et passives. Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique (figure I. 01), des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons, du chauffage et du refroidissement solaire, des concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines, et même des fours solaires. Les technologies passives consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter l'énergie solaire [1].



Figure I.01: Maison solaire [1].

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

I.3.2 L'ENERGIE EOLIENNE

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le transforment en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante (figure I.02) [1]



Figure I.02: l'énergie éolienne [1]

I.3.3 L'ENERGIE BIOMASSE

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments ! Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante, grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes ! La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets municipaux et industriels. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz [1].

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel



Figure I.03: l'énergie biomasse [1]

I.3.4 L'ENERGIE HYDRAULIQUE

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages (figure I.04), des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité [1]



Figure I.04: l'énergie hydraulique. [1].

I.3.5 L'ENERGIE GEOTHERMIQUE

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur, par exemple (figure I.05) [1]

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

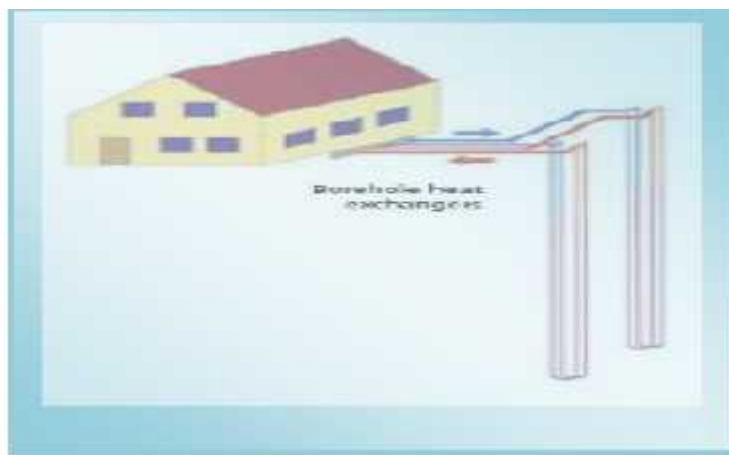


Figure I.05: l'énergie géothermique. [1].

I.3.6 L'ENERGIE DES MERS OU ENERGIE MARINE

C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'ici. Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil (figure I.06).

Les océans, qui couvrent presque 70 % de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie. Renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable [2].

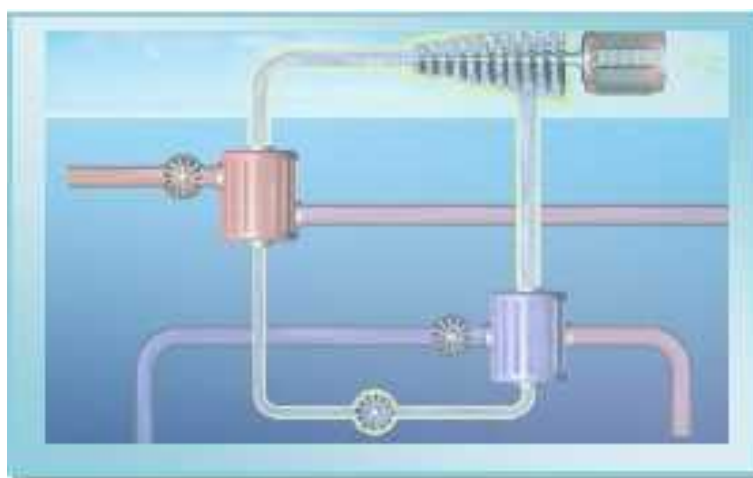


Figure I.06: l'énergie de mers [2]

I.4 POTENTIEL DE L'ENERGIE SOLAIRE

Soleil est le nom de l'étoile autour de laquelle gravitent les planètes qui composent le système où nous vivons, dit système solaire. Le soleil est une sphère de gaz chauds d'un diamètre de 1,39 millions de kilomètres. Il s'agit en réalité d'un immense réacteur à fusion nucléaire où l'hydrogène est transformé en hélium. La température au centre du soleil se situe entre 8 et 40 millions de Kelvins alors qu'elle est de 5762 Kelvins à sa surface. Le soleil émet une puissance de $3,8 \times 10^{26}$ MW sous forme de rayonnement. La terre, située à 150 millions de

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

kilomètres du soleil, reçoit ce rayonnement 8 minutes et 20 secondes après son départ du soleil. La Terre ne reçoit qu'une infime fraction de l'énergie solaire, soit 170 milliards de MW. Néanmoins, l'énergie solaire que la Terre intercepte en une demi-heure est égale à la demande énergétique mondiale d'une année entière [3]. La source commune de pratiquement toutes les énergies se trouvant sur Terre est notre étoile, le soleil. Que ce soit le pétrole, la biomasse, le vent, le débit des rivières qui coulent [4].

I.5 LES SYSTEMES A CONCENTRATION SOLAIRE

L'énergie solaire thermique à basse température pour les besoins du bâtiment ne demande qu'à être généralisée. L'énergie photovoltaïque est proche de la compétitivité pour la production d'électricité. La troisième famille de technologies est l'énergie solaire thermodynamique, qui fait appel à la concentration du rayonnement solaire [5]. L'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Actuellement les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation commerciale. Ces technologies se basent sur des collecteurs qui concentrent le rayonnement solaire sur des absorbeurs qui réchauffent à haute température un fluide caloporteur. Ce fluide peut ensuite être utilisé pour la génération d'électricité [6]. On distingue deux principaux types de concentrateurs :

- Les concentrateurs ponctuels (poursuite sur deux axes) : centrales à tours et dishes Stirling.
- Les concentrateurs linéaires (poursuite solaire sur un axe) : Concentrateurs cylindro-paraboliques et miroirs de Fresnel.

Les miroirs de Fresnel sont utilisés comme concentrateurs solaires offrent une série d'avantages par rapport aux autres technologies de concentration et en particulier au cylindro-parabolique le rendement optique élevé avec un poids minimum et un faible coût peuvent fonctionner sans grandes difficultés mécaniques

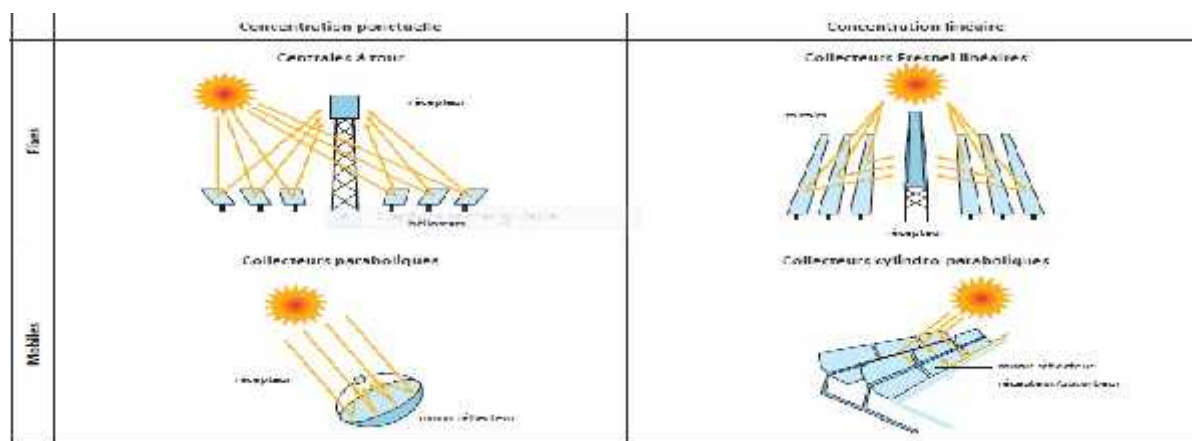


Figure I.07: quatre principaux types de concentrateurs [7].

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

I.5.1 Historique

Au XIXe siècle l'italien Alessandro Battaglia réalise des travaux pionniers sur les concentrateurs solaires. Ses brevets, sortis de l'oubli récemment, sont inventifs. Aucune mise en œuvre pratique de l'époque n'a cependant été retrouvée. Les travaux de Battaglia peuvent être vus comme l'origine de la technique de concentration par réflecteurs linéaires de Fresnel. Les travaux les plus significatifs ont été réalisés par (Giovanni Francia (1911-1980)), également Italien. Entre autres travaux scientifiques et techniques, il s'intéressa à l'énergie solaire. Au début des années 1960, il développa un système concentrateur linéaire de Fresnel à réflexion (LFR). Il a conçu et monté un premier prototype à Gènes en 1963. L'année suivante, il a construit et testé un prototype de LFR à Marseille. Francia était persuadé que l'énergie solaire ne pouvait se développer qu'avec une rentabilité économique et une technique simple. Ainsi les miroirs plans étaient un point clé décisif pour la percée du solaire à grande échelle.

Depuis les années 1990, David Mills, en Australie, développe un LFR. Il introduit le concept de réflecteur compact linéaire de Fresnel (CLFR). Il s'agit de disposer plusieurs lignes focales en parallèle. On peut ainsi optimiser l'utilisation des miroirs en choisissant vers quelle ligne focale chaque miroir réfléchit la lumière.

Ces travaux ont toujours été soutenus par le gouvernement australien. En Europe, la société Belge Solar Mundo, avait un projet ambitieux de centrale solaire à LFR. Un prototype a été monté à Liège en 2001 (2400m² de miroirs). Mais l'application à grande échelle n'a pas vu le jour. Les résultats escomptés n'étaient pas au rendez-vous. La réduction de coût n'était possible que sur des puissances importantes. On ne tirait manifestement pas encore le meilleur de cette technologie :

L'absorbeur à haute température sur le tube, le miroir secondaire, le système de suivi... Tous ces éléments restaient à développer et à mettre au point pour que la technologie LFR tienne ses promesses. La faisabilité restait quelque peu incertaine. [5]

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel



Figure I.08: Premier prototype de Concentrateur Linéaire de Fresnel, Marseille (France) 1963 [5].

I.5.2 Description et technologie des systèmes (LFR)

Le concept est simple et facile par rapport aux autres capteurs solaires à concentration de la même famille. Ils sont formés des miroirs plans et ils sont moins coûteux par rapport aux autres types des capteurs solaires à effet de concentration. Ce système met en œuvre des miroirs plans, des fois ils sont très légèrement courbés, disposés en lames parallèles qui s'inclinent par rotation de telle manière que la réflexion des rayons solaires soit toujours comprise dans le récepteur. Avec une performance optique inférieure de 30 ou 40 % par rapport aux capteurs solaires cylindro-parabolique [8]. Avec moins de poids et de volume de matériau par rapport à la conception de lentilles conventionnelles, les mécanismes de lavage automatiques sont facilement évolutifs [9].



Figure I. 09 : Les centrales solaires à miroir de Fresnel[9].

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

I.5.3 Les composants d'un concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel

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

– **du réflecteur ou miroir de Fresnel** : plusieurs bandes rectangulaires de miroirs réfléchissent et concentrent le rayonnement sur le récepteur. Les paramètres de conception les plus importants sont : la largeur des bandes, le nombre de lignes et les espaces entre deux miroirs consécutifs. Comparé au creux parabolique, le LFSC a plus de pertes optiques. Les collecteurs de Fresnel n'ont pas seulement des pertes longitudinales ; ils sont également affectés par les pertes de cosinus transversales car chaque miroir suit le soleil individuellement. Aux angles d'incidence transversaux élevés, les bandes des miroirs parallèles s'égrènent / se bloquent les unes les autres.

– **du récepteur** : positionné au-dessus du miroir de Fresnel, il intercepte le rayonnement concentré. Les principaux composants du récepteur sont : le tube absorbeur et le miroir secondaire. Le champ de miroir primaire seul ne peut pas accumuler seul la puissance requise. L'idée est d'augmenter l'efficacité sans générer plus de pertes thermiques. Il est nécessaire d'ajouter un miroir secondaire au-dessus du tube absorbeur pour atténuer cette imprécision optique et améliorer le facteur d'interception. De plus, il augmente la largeur de la surface de la cible sans affecter le tube absorbeur. La configuration du miroir secondaire doit être adaptée pour concentrer le rayonnement entrant dans le tube absorbeur

– **d'un réflecteur secondaire** : qui concentre encore d'un facteur 1 à 3 le rayonnement. Il permet de réduire la surface de l'absorbeur, ce qui limite les pertes, par rapport aux performances de concentration du miroir de Fresnel. Il peut aussi contribuer à l'homogénéité du flux de puissance collecté sur l'élément absorbeur. Il existe différents types de sur-concentrateurs. Ces dispositifs, ajoutés au récepteur, permettent d'augmenter le facteur de concentration du système. Ils rabattent le rayonnement sur l'absorbeur qui peut ainsi être plus petit. On limite donc, par là même, les pertes thermiques. Les sur-concentrateurs font partie de la famille des dispositifs optiques non-imageants. Par Opposition aux systèmes optiques pour l'astronomie ou la microscopie, nous n'avons pas besoin d'obtenir une image précise de la source observée. Pour la concentration, ce qui importe est que l'ensemble du flux soit collecté dans la zone de l'absorbeur. L'approche est donc différente, quand il s'agit de concevoir les sur-concentrateurs.

Il en existe de plusieurs sortes.

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

– **d'un élément absorbeur** : souvent un tube, mais parfois, plusieurs tubes, voire une surface plane. Cet élément joue le rôle d'échangeur : le fluide caloporteur collecte l'énergie du rayonnement sous forme d'énergie thermique. Le matériau constitutif doit avoir un coefficient d'absorption élevé et d'émission faible afin de limiter les pertes par rayonnement. On utilise donc la peinture sélective pour améliorer ses propriétés thermiques. [5]

Outre les performances optiques, les performances thermiques sont également de la plus importance. Les pertes thermiques de la tubulure réceptrice sont une source importante de perte d'énergie, juste derrière les pertes optiques annuelles. La perte de chaleur de l'absorbeur provient d'un mécanisme complexe qui comprend la conduction, la convection et le rayonnement et dépend de plusieurs facteurs tels que le rapport de concentration, les propriétés du matériau, la température de fonctionnement et la géométrie de l'absorbeur. Avec le tube de verre unique avec le vide, les récepteurs de cavité avec les tubes simples ou multi représentent les typologies dominantes de récepteur. L'absorbeur n'est pas tourné et il est stable, le fait rend l'opération plus facile [9].

Pour obtenir de bonnes performances de capteur, il est important que le rayonnement solaire atteigne autant que possible l'absorbeur ou l'ouverture du récepteur si nécessaire [10].

-Les pertes par convection dépendent principalement de la température de l'absorbeur et des conditions ambiantes. Par conséquent, l'absorbeur est protégé par une enveloppe de verre ou une plaque de verre, comme le montre la figure I.3. La température de fonctionnement de la surface de l'absorbeur dans les applications solaires varie entre 40 °C et 500 °C (313 K et 773 K). La température effective du soleil est d'environ 6000 K.

Dans les considérations de conception, il est important de savoir si un absorbant sélectif à faible émissivité est nécessaire pour l'application considérée. Une surface noire est beaucoup moins chère à produire, et la fabrication locale d'une variante low-tech est possible, alors que les surfaces sélectives nécessitent une production à haut volume et des procédés de fabrication spécialisés. Cette considération est soutenue par l'observation que les températures moyennes du récepteur sont beaucoup plus faibles que pour les capteurs utilisés dans la production d'énergie solaire thermique. Par conséquent, l'émission dépendant de la température de la puissance thermique (loi de Stefan-Boltzmann) est beaucoup plus petite.

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

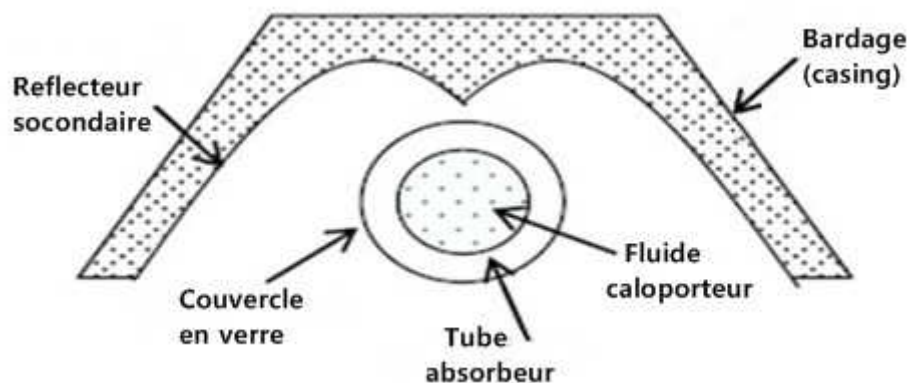


Figure I.10: La construction de l'assemblage du tube récepteur [11].

– **d'une vitre**, qui assure une limitation des pertes radiatives. Transparente à la lumière visible, le verre est opaque aux Infra-Rouge (IR). Le rayonnement solaire entre dans le récepteur, mais les émissions des surfaces chaudes sont en grande partie bloquées par la vitre. Les miroirs actuellement utilisés pour les champs solaires linéaires de Fresnel sont bon marché et durables. Il s'agit de miroirs en verre recuit, avec traitement de la surface arrière pour obtenir les propriétés réfléchissantes.

Les miroirs solaires doivent être de qualité supérieure : leurs propriétés optiques et leur tenue dans le temps ont un fort impact sur la rentabilité du système. Les recherches actuelles se concentrent donc sur l'amélioration de ces deux points.

Les miroirs doivent avoir une réflectivité importante et une spécularité la meilleure possible. Leur durée de vie est également un critère essentiel. Les miroirs sont soumis aux intempéries. Ils doivent résister à la grêle, aux tempêtes de vent violent, de sable. Le revêtement doit être stable aux ultraviolets, résister au nettoyage mécanique et tenir à haute température (surtout pour le récepteur secondaire éventuel). Malgré toutes ces agressions, le miroir doit conserver ses qualités optiques pendant 10 ans, 20 ans et plus si possible. La production de la centrale en dépend. Et l'investissement serait significativement alourdi s'il fallait remplacer tous les miroirs au cours de la vie de la centrale. La qualité et la durée de vie des miroirs sont donc primordiales à la rentabilité de la centrale solaire [5].

- **Systèmes de suivi** : LFR ont seulement un suivi d'axe unique. Le mouvement des bandes miroir parallèles dépend uniquement de la trajectoire du soleil et non de la position du miroir. Chaque miroir suit le soleil individuellement, à la même vitesse angulaire [12].

Le système de suivi est chargé de déplacer les miroirs du champ primaire. Il est généralement monté sur une structure de base. Il doit être précis et durable dans des conditions difficiles. La durée de vie attendue est comparable à celle du champ primaire (entre 20 et 25 ans). Le suivi du soleil est essentiel pour les concentrateurs solaires pour collecter l'énergie maximale du

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

soleil [13]. Idéalement, l'orientation du collecteur est nord-sud le long du plan longitudinal. Dans ce cas (Algérie), le système de suivi suit le mouvement apparent du soleil d'est en ouest. Le changement angulaire pour tous les miroirs est le même, ce qui signifie qu'un dispositif peut déplacer tous les miroirs dans le plan transversal. Le principe de conception est d'avoir un actionneur qui tourne tous les miroirs (dans le plan transversal) au moyen d'un couplage mécanique. Il existe des conceptions qui utilisent de nombreux actionneurs, permettant plus de flexibilité dans l'opération du collecteur (par exemple, certaines lignes peuvent être défocalisées pour mieux contrôler la température de sortie). La décision est un compromis coûts-avantages. La Figure I.11 montre un croquis de ces options.

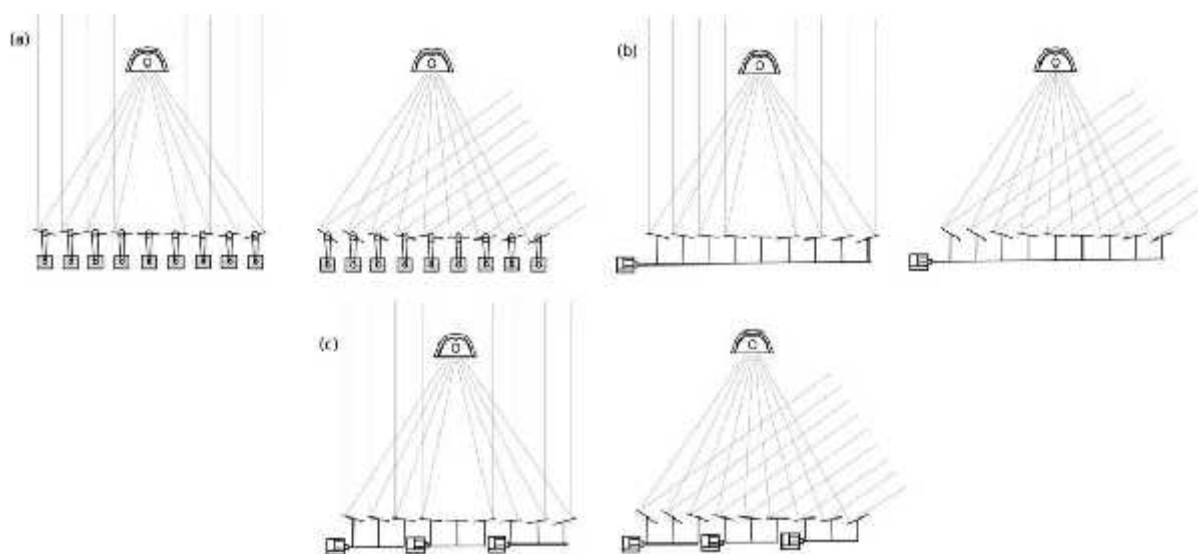


Figure I.11: Croquis des systèmes de suivi. **a:** Chaque miroir est couplé à un actionneur, permettant un contrôle total sur chaque rangée. **b:** Tous les miroirs couplés à un actionneur. **c:** groupes de miroirs reliés à un actionneur.

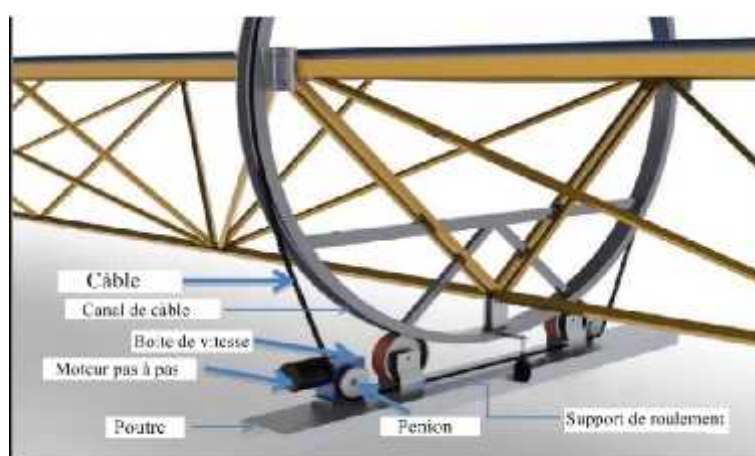


Figure I.12: Système de poursuite solaire [14].

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

-Fluides caloporteurs et fluides de travail : Dans les concentrateurs linéaires de Fresnel, le rayonnement solaire est réfléchi et concentré par un champ de miroirs de Fresnel dans un récepteur. Un tube dans le récepteur avec de l'eau en circulation reçoit ce rayonnement et de la vapeur est produite [15].

-Les fluides de travail les plus utilisés dans les collecteurs de Fresnel sont les huiles thermiques comme Therminol VP1, Dowtherm A, Syltherm 800, Sandotherm, etc., alors qu'il existe aussi des applications avec production directe de vapeur. Au cours des dernières années, beaucoup de recherches ont été axées sur l'utilisation des sels fondus dans les LFR, car ces fluides de travail peuvent également être utilisés comme milieux de stockage. De plus, les sels fondus peuvent fonctionner jusqu'à 550°C-600°C, ce qui donne la possibilité de meilleures performances de CSP, comparé aux huiles thermiques qui atteignent jusqu'à 400°C [5]. Cependant, l'opération avec des sels fondus exige une conception soignée en raison de problèmes tels que le danger de solidification à basse température. La prochaine génération de fluides de travail comprend du sodium liquide et du dioxyde de carbone supercritique deux fluides de travail capable de fonctionner à des températures extrêmement élevées. Le sodium liquide peut fonctionner jusqu'à 900°C son fonctionnement présente de nombreux dangers liés aux réactions du sodium avec l'eau et l'air. Cependant, les connaissances des sciences nucléaires doivent être exploitées pour concevoir des systèmes solaires avec du sodium liquide comme fluide de travail. L'utilisation de dioxyde de carbone supercritique donne la possibilité de fonctionner à des niveaux de température supérieurs à 1000°C si le capteur approprié existe. Mais, les niveaux de haute pression de 200 bars dans de nombreux modèles sont une tâche exigeante qui doit être prise en compte.

Dans ce dernier, nous concluons ce qui suit :

-L'eau et les huiles thermiques sont les fluides les plus utilisés actuellement. L'eau comme simple caloporteur montré ses limites : température peu élevée, échangeur-évaporateur pour produire la vapeur. Les huiles ont aussi leurs limites en température. Le risque de pollution conduit aussi à écarter les huiles thermiques. Les recherches se concentrent donc sur les alternatives les plus sérieuses : la génération directe de vapeur, l'air sous pression (ou autre gaz), les sels fondus [5].

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

Tableau I.1 : comparaison des fluides de travail pour la concentration linéaire [5]

	Avantages comparés aux huiles	Inconvénients comparés aux huiles
Génération directe de vapeur	- Système simple Température de travail plus élevée. - Risque nul de pollution ou incendie.	- Manque de système de stockage adapté. - Contrôle du champ solaire plus compliqué. - Champ solaire à plus haute pression
Gaz sous pression	- Température de travail plus élevée. - Amélioration du stockage thermique. - Risque nul de pollution ou incendie	- Mauvais échange thermique du récepteur. - Contrôle du champ solaire plus compliqué. - Champ solaire à plus haute pression
Sels fondus	- Stockage thermique plus efficace. - Température de travail plus élevée. - Risque nul de pollution ou incendie	- Pertes thermiques plus élevées la nuit. - Champ solaire plus compliqué. - consommation électrique plus élevée.

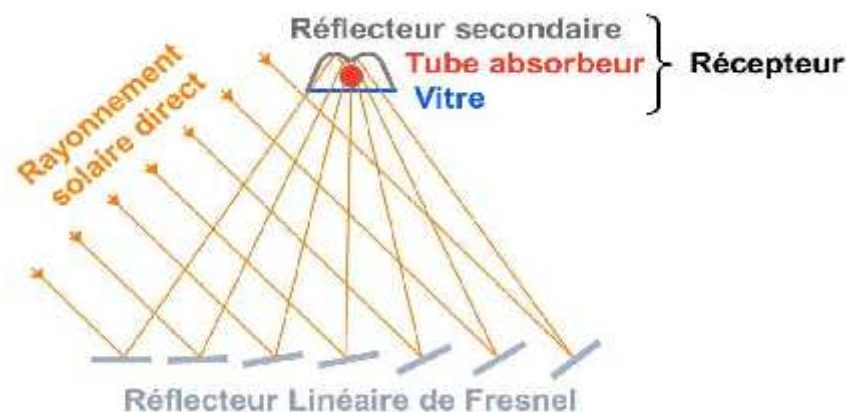


Figure I.13: Principe d'un concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel [5].

I.5.4 Types de récepteurs linéaires :

Il existe plusieurs types de récepteurs linéaires ; nous en dresserons une liste non exhaustive dans la partie suivante.

-Le récepteur en V

Dans ce récepteur, les tubes absorbeurs sont disposés suivant la configuration en forme de V d'où la nomenclature du récepteur en V (voir Figure I.14). Le récepteur en cavité V est constitué de 10 tubes de 10 mm de diamètre intérieur, 12 mm de diamètre extérieur et de longueur 6,2 m, l'ensemble est monté à 1,5 m de hauteur au-dessus des miroirs. Afin de minimiser les pertes par convection et par rayonnement, la surface extérieure des tubes a été

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

enduite par un revêtement en peinture de couleur noire avec un coefficient d'absorptivité de 0,9 et une réflectance de 0,1, recouvert en avant par une vitre de 2 mm d'épaisseur dont la réflectance est de 0,07 ; sa transmittance est de 0,92. Les propriétés optiques du réflecteur principal dont la valeur est de 0,03 pour l'absorptance et de 0,97 pour la réflectance. Les simulations numériques et des expériences pratiques ont été réalisées. Ce récepteur offre des meilleures options pour des températures moyennes de 90 °C à 150 °C [16].

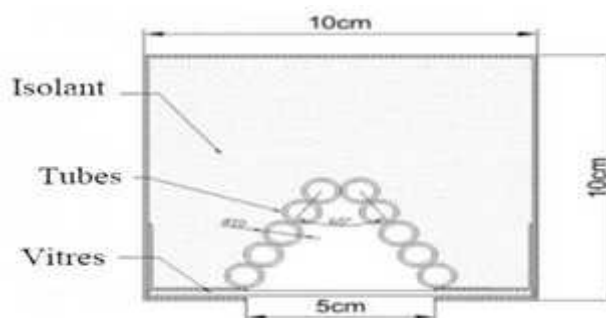


Figure I.14 : Schéma d'un récepteur en V [16].

Il existe d'autres configurations du récepteur en V. Dans cette technologie les tubes sont aussi disposés en formant un V. Le récepteur est situé sur l'axe focal des réflecteurs comme l'illustré par la Figure 1-15.

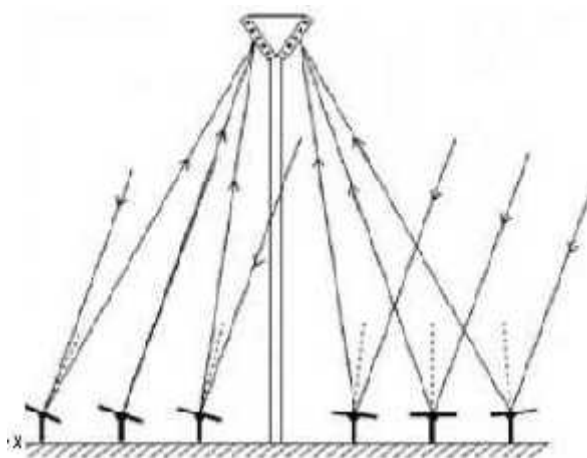


Figure I.15: Concentrateur à récepteur en V [16].

-Le récepteur trapézoïdal

Un récepteur trapézoïdal est défini par la géométrie de son réflecteur secondaire qui a une forme trapézoïdale comme le montre (Figure I.16).

Le récepteur trapézoïdal étudié par (S. Flores Larsen et al). Est un banc expérimental constitué de : 5 tubes de $D_i=25$ mm et $D_e=33$ mm recouvert d'une peinture noir d'émissivité 0,88 [16].

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

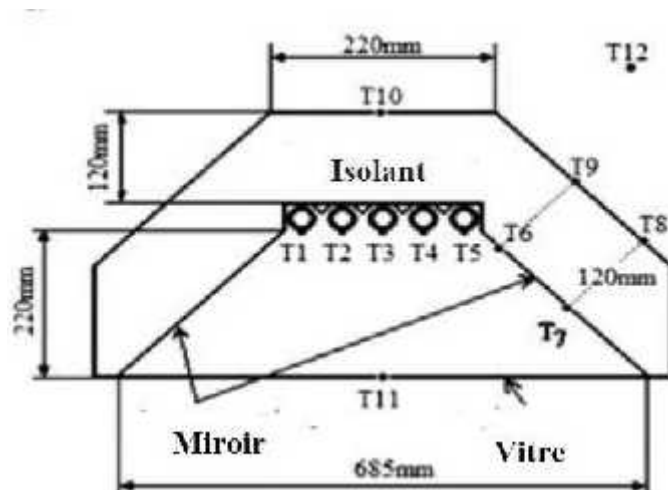


Figure 1.16 : Récepteur trapézoïdal [16].

Il existe aussi les récepteurs trapézoïdaux avec surface absorbante rectangulaire comme l'illustre la Figure I.17

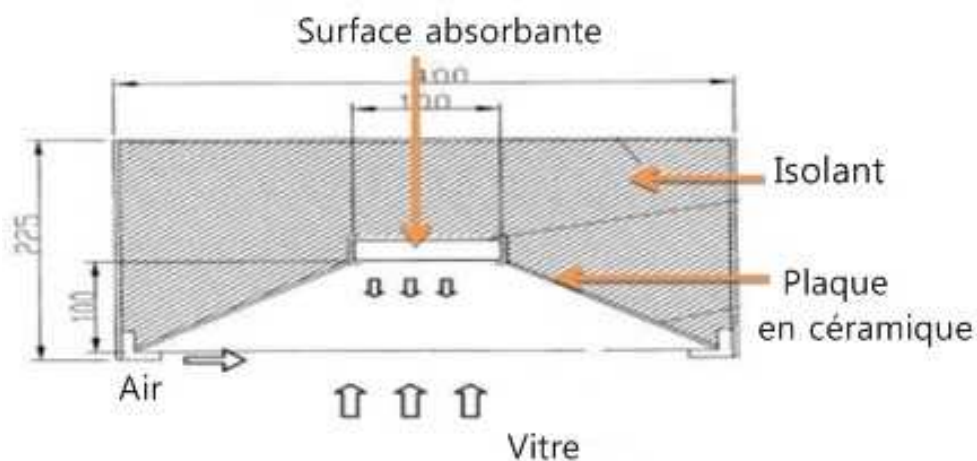


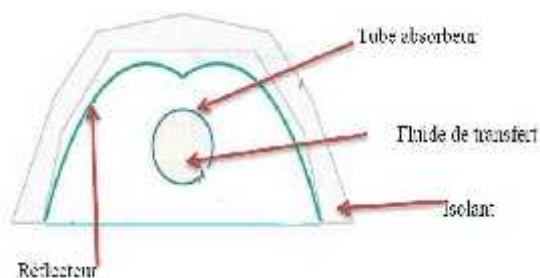
Figure I.17 : Récepteur trapézoïdal avec surface absorbante rectangulaire [16].

-Récepteur monotube sous-vide

Le récepteur est composé d'un tube absorbeur, d'une plaque en verre, d'un réflecteur secondaire. Les récepteurs monotubes sous vide sont utilisés principalement dans les centrales cylindro-paraboliques. Ils sont parfois utilisés dans les petites centrales de type de Fresnel. Le réflecteur secondaire a pour caractéristique d'accepter tous les rayons réfléchis par le concentrateur (voir Figure I.18) [16].

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel



-Concentrateur à récepteur horizontal

Dans cette technologie le récepteur est disposé horizontalement. Cette disposition permet de collecter le maximum illustré par le flux lumineux en provenance des miroirs (Figure I.19) [16].

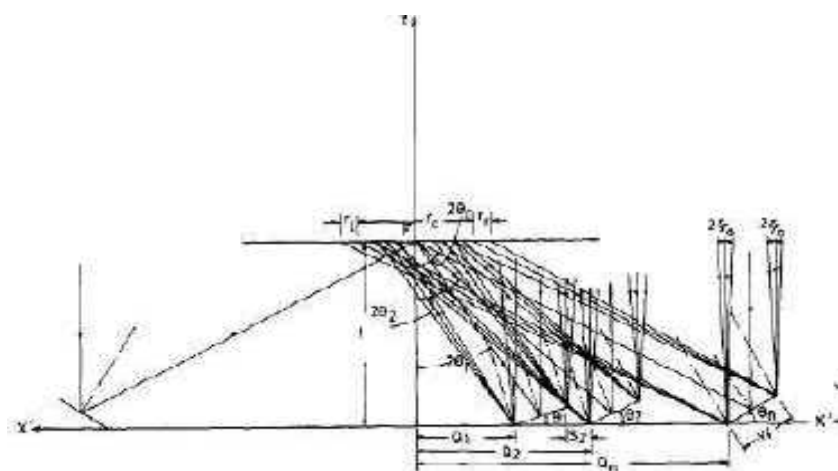


Figure I.19 : concentrateur à récepteur plat horizontal [16].

-Concentrateur à récepteur vertical

Le récepteur est disposé verticalement et reçoit le flux lumineux des réflecteurs. Les miroirs sont disposés à réfléchir le maximum de flux vers le récepteur (voir Figure I.20) [16].

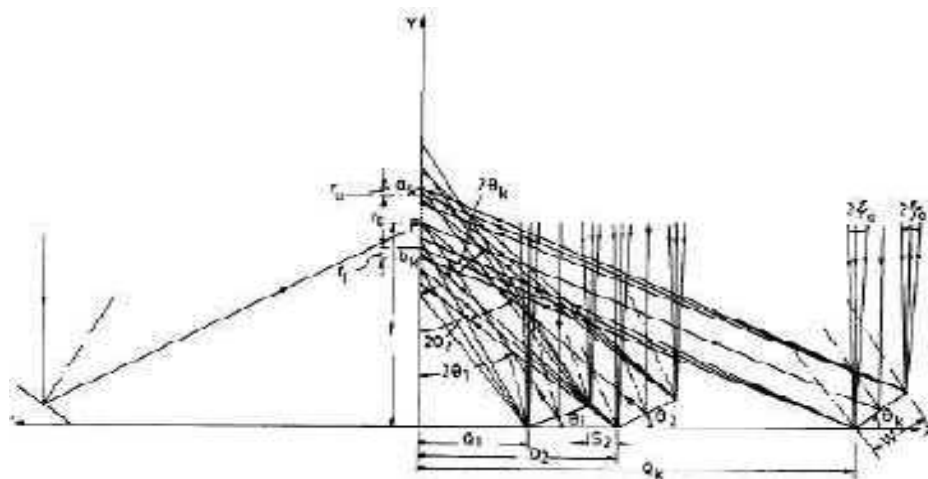


Figure I.20: Concentrateur à récepteur vertical [16].

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

I.6 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de ce type de capteur à concentration repose sur un système de miroirs plans, comme indiqué sur la figure I.21.

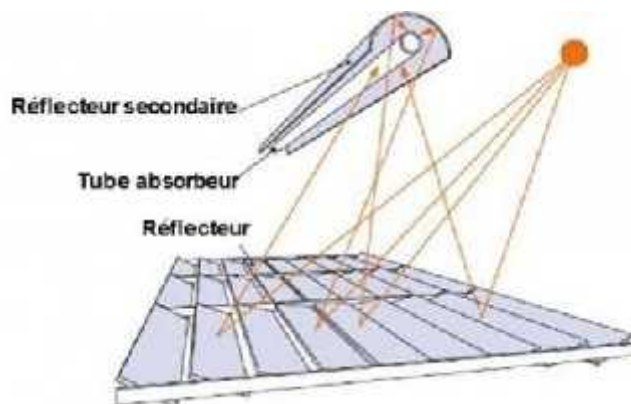


Figure I.21 : Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel [6]

Un premier étage de réflecteur est installé sur le sol. Le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur. Ce second étage de réflecteurs, en plus de réfléchir le rayonnement, joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur. Il est en effet recouvert d'une importante couche d'isolation en sa partie supérieure. La partie inférieure est quant à elle isolée par une vitre [6].

Dans ce principe du concentrateur de Fresnel, Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble des tubes récepteurs linéaires fixes. En circulant dans ce récepteur horizontal, le fluide thermodynamique peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500 °C. La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur [8].

I.7 Recherche et développement des systèmes a concentration linéaire de Fresnel :

Parallèlement au développement de centrales solaires de taille utilitaire au cours des dernières années, les normes d'essais d'acceptation de performance se construisent progressivement. D'une part, l'American Society for Testing and Materials (ASTM) a codifié une méthode d'essai standard E2848 pour les centrales photovoltaïques (PV) ,d'autre part les procédures d'essai des collecteurs solaires à chauffage par fluide sont définies par la norme ISO 9806-2013 pour les systèmes solaires thermiques .Dans le cadre de la tâche I de SolarPaces concernant les centrales à concentration d'énergie solaire (CSP),les directives d'essais fournies par le Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL)[17].Les centrales solaires

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

thermiques, en particulier les centrales solaires à concentration (CSP), ont fait l'objet de plusieurs programmes de recherche la dernière innovation est basée sur les usines des réflecteurs linéaires de Fresnel (Mills et Morrison (2000), où se concentrent de grands ensembles des réflecteurs modulaires. Rayonnement du faisceau vers un récepteur stationnaire à plusieurs mètres de hauteur (figure I.22), contenant un réflecteur de deuxième étage concentrant tous les rayons entrants à un absorbeur tubulaire, dû par l'eau ou un autre fluide de travail [18]. Mathur et al (1991) ont présenté des informations détaillées sur les conceptions optiques du concentrateur solaire LFR avec trois géométries différentes : des récepteurs horizontaux, plats verticaux et tubulaires. (Negi et Al., 1990) a été réalisée le rapport de concentration a été déterminé en utilisant une technique d'analyse et de tracé de rayons. Suite à cela, la conception optique et la performance d'un collecteur solaire LFR avec un récepteur vertical plat [19].

(P L. Singh et Al). Ont développé une simulation d'un prototype de capteur solaire linéaire de Fresnel avec un nombre variable de bandes réfléchissantes. L'efficacité globale de la conception optimisée a été étudiée. Ils ont évalué un LFSC avec 10, 15 et 20 miroirs. Les chercheurs ont constaté que l'augmentation du nombre de miroirs affecte directement le temps nécessaire pour atteindre la température stagnante. Néanmoins, l'efficacité globale du capteur diminue avec l'augmentation de la surface réfléchissante. L'étude montre que le nombre de miroirs optimal doit être compris entre 10 et 15 avec une largeur de miroir optimale entre 10 et 12 cm. Une autre étude réalisée par Sunrise of Solar Power inclut le développement d'un capteur solaire Linéaire Fresnel considéré pour le sel fondu direct qui est comparé à un collecteur cylindro- parabolique en utilisant le logiciel ASAP Ray-Tracing. [20]

Une nouvelle approche du LFSC à deux axes a été expérimentée et évaluée par (D.Chemisana et Al). Ils ont démontré que de nombreux facteurs de fabrication jouent un rôle important sur la qualité optique tels que : les contraintes de structure métallique, la torsion, la flexion et l'affaissement [12].

La technique de traçage a été utilisée pour étudier la distribution du rapport de concentration locale sur la surface du destinataire.

(Zhai2010) a estimé l'efficacité thermique et optique pour quatre types de récepteurs de cavité avec des lentilles linéaires de Fresnel comme concentrateurs [21].

(Panna Lal Singh et Al.2010) a été une étude comparative a été entreprise pour évaluer la performance thermique des quatre absorbeurs à cavité trapézoïdale identiques pour un dispositif solaire à réflexion de Fresnel linéaire [22].

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

(Martin Haagen (2012)) a présenté l'estimation de la possibilité de générer de la chaleur solaire pour les processus industriels avec des collecteurs linéaires de Fresnel [19].

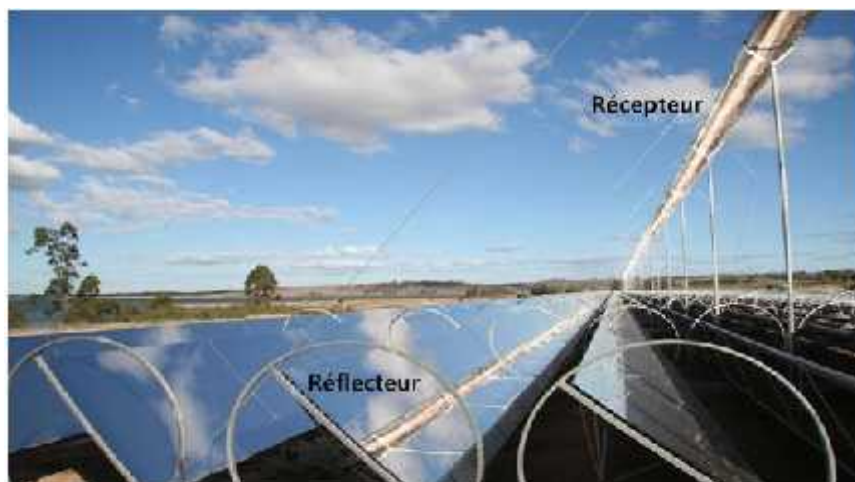


Figure I.22: Centrale électrique à réflecteur linéaire Fresnel (avec l'aimable autorisation du département des médias d'Ausra) [18].

Mais il y a encore un grand défi à relever pour améliorer l'efficacité thermique et optique.

À cet effet, plusieurs groupes de recherche ont étudié les variations de la géométrie du collecteur. Comme la forme du réflecteur secondaire est particulièrement critique pour déterminer la puissance solaire captée par le tube absorbeur.

(Hack et Al). Ont développé une nouvelle méthode adaptative pour optimiser la forme du réflecteur secondaire [23]. (Canavarro et Al) Ont utilisé la méthode multi-surface simultanée (SMS) pour étudier un nouveau concentrateur de Fresnel avec un récepteur tubulaire. Deux ans plus tard, le même groupe présentait un nouveau concentrateur de type elliptique composé avec un récepteur tubulaire qui pouvait être ajusté aux concentrateurs linéaires [9].

(Abbas et Al) a examiné les variables de conception du réflecteur LFC et un modèle de ray-tracing a étudié le flux de rayonnement obtenu dans le récepteur plat en utilisant différentes formes de réflecteurs primaires et analysé chaque variation le long de l'année. Sur la base d'une propriété optique nouvellement formulée, une nouvelle approche a été développée pour optimiser les réseaux de Fresnel et une nouvelle disposition des réflecteurs primaires visant à maintenir l'uniformité du rayonnement atteignant le récepteur [24].

(Osorio et al) Ont présenté des résultats de la comparaison d'outils logiciels de tracé de rayons sous une conception commune d'un collecteur linéaire de Fresnel avec des réflecteurs primaires incurvés, un réflecteur secondaire CPC et un récepteur de tube à vide [25].

(Heimsath et Al) Ont publié les résultats d'un collecteur linéaire de Fresnel quantifiant les

CHAPITRE I

Généralité et état de l'art sur les systèmes solaires à concentration linéaire de Fresnel

perdes optiques géométriques et matérielles du cœur(absorbeur) [26].

(Zhu) a présenté une méthode optique analytique améliorée par le retour d'expérience des mesures en laboratoire. Cette approche intègre l'erreur de pente des réflecteurs, l'erreur de position du récepteur et l'erreur de suivi du collecteur en tant que modifications géométriques du collecteur [27].

Plus récemment, (Moghimi et Al). Ont utilisé la méthode des volumes finis dans le CFD pour effectuer à la fois le modelage par rayons et le transfert de chaleur d'un LFR. Il a été démontré que la méthode des ordonnées discrètes peut également fournir une solution précise. La précision de cette méthode a été évaluée dans le cadre d'une simulation de lancer de rayon de Monte Carlo et une bonne corrélation a été obtenue [28].

(Craig et Al) Ont modélisé le récepteur en utilisant le CFD, à travers le traitement en volume fini de l'équation de transfert radiatif et une approche par spectre en bandes. La validation de cette méthode a été mise en œuvre à travers des cas de tests issus de la littérature et du ray-tracing et un bon accord a également été trouvé [9].

I.8 Conclusion

Bien que l'idée de concentration Linéaire de Fresnel ait plus d'un siècle, la technologie est encore jeune. Mais la recherche est en pleine effervescence. Et les premières applications commerciales commencent à apparaître. De nombreux acteurs s'intéressent à la technologie et développent des solutions techniques.

La technologie linéaire de Fresnel se distingue des concentrateurs paraboliques par sa simplicité, qui permet de réduire les coûts. Les performances cependant inférieures ne permettent pas d'affirmer avec certitude quelle technologie sera la meilleure à l'avenir. En cette période où l'investissement est difficile, l'avantage irait plutôt aux technologies qui limitent l'investissement. Pour un même coût d'électricité produite, on préférera la technologie la moins chère à l'investissement.

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

II.1 Introduction

L'objectif de présent chapitre est de présenter les notions de base du rayonnement solaire qui est l'acteur principale de notre travail, on va présenter les transformations que va subir le rayonnement solaire dès que son arrivé : absorption, réflexion et transmission, comme aussi on va définir et décrire les paramètres astronomiques qui influent sur le rayonnement solaire à savoir : les coordonnées géographiques utilisées pour le repérage d'un site, les coordonnées horizontales utilisées pour le repérage du soleil et les coordonnées horaires, ainsi que les différents composants du rayonnement solaire et ses instruments de mesures.

II.2 Notion sur le rayonnement :

Tout corps chauffé à une certaine température quel que soit leur état : solide, liquide ou gazeux - émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur. Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière. Il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde comme l'a démontré l'expérience de W. Herschell [29].

II.2.1 Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide :

Le rayonnement incident H sur une surface à une incidence normale (figure II.01) est donné par :

$$H = \alpha + \rho + \tau \quad : \quad \alpha + \rho + \tau = 1 \quad (\text{II.1})$$

• Absorptivité moyenne : $\alpha = H_{\text{abs}}/H$ (II.2)

• Réflectivité moyenne : $\rho = H_{\text{ref}}/H$ (II.3)

• Transmissivité moyenne : $\tau = H_{\text{tr}}/H$ (II.4)

On définit ainsi l'énergie incidente sur tout le spectre des longueurs d'onde. On obtient les pouvoirs réfléchissant, absorbant et transmittant (filtrant) qui sont en fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température T , de la longueur d'onde, du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

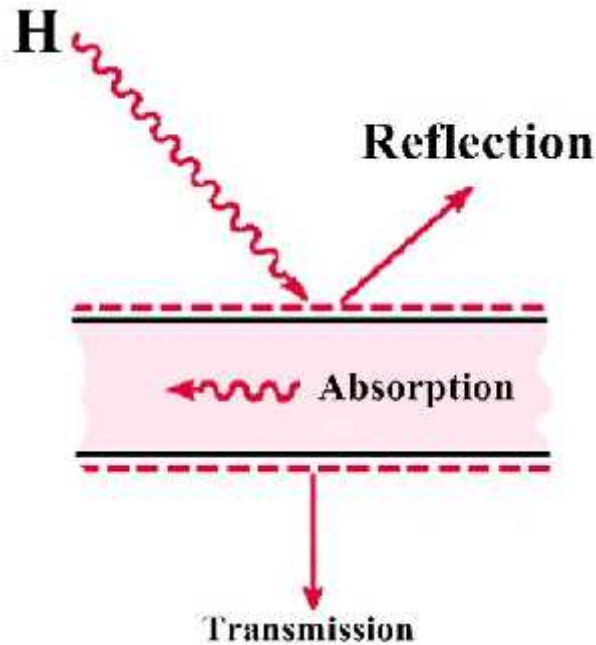


Figure II.01 : Schématisation de la répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide

Cas particuliers :

) **Corps noir :**

C'est un corps qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident. Il est défini par : $\alpha = 1 \Rightarrow \rho = \tau = 0$

Une surface enduite de noir de fumée est approximativement un corps noir.

Propriétés du corps noir :

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

- pour une surface réfléchissante : $\alpha = 1 \Rightarrow \rho = \tau = 0$

- pour une surface opaque : $\alpha = 0 \Rightarrow \rho + \tau = 1$

II.3 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous forme d'ondes électromagnétiques.

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

II.3.1 La Constante solaire :

Le flux du rayonnement à la surface du soleil est d'environ $6.33 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$. Une surface plane, d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire, située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée en fonction de la distance Soleil-Terre ($149\,597\,870.103 \text{ m}$ ou 1UA représente la distance moyenne Soleil-Terre). Cette distance à une faible variation au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre qui est d'environ 1,7% [30]. La constante solaire est une valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à 1367 W/m^2 (Fröhlich et Brusa, 1981, et Iqbal, 1983) [31]. La représentation schématique du système Soleil-Terre est indiquée dans la Figure II.03 [32].

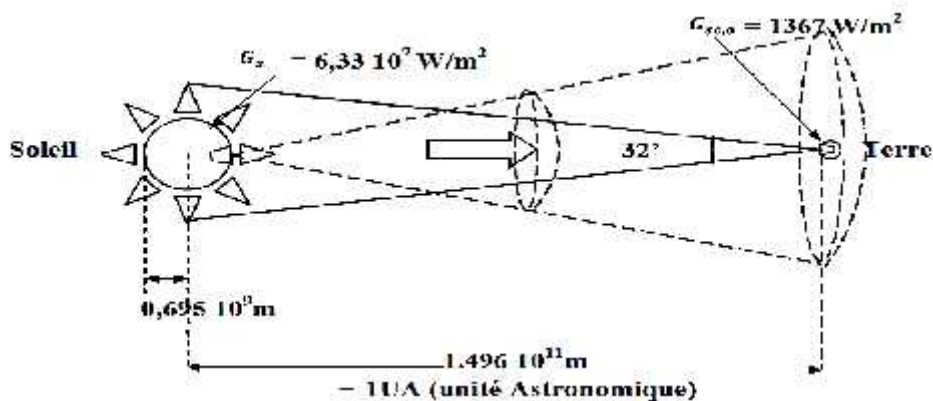


Figure II.02 : la divergence de l'énergie du soleil vers la Terre

II.3.2 L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire :

Lors de son trajet à travers l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses influences :

-) Diffusion par les molécules composant les gaz atmosphériques (diffusion de Rayleigh, Mie), elle affecte les courtes longueurs d'onde du spectre solaire (loi de variation en λ^{-4}), ceci explique la couleur bleue du ciel ;
-) Absorption par les gaz atmosphériques (oxygène, O_3) dans le domaine des courtes longueurs d'ondes (vapeur d'eau...) et dans celui des grandes longueurs d'onde (gaz carbonique...);

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

) Diffusion par les aérosols est les microparticules en suspension dans l'atmosphère, ainsi que par les microcristaux et les gouttelettes constituant les nuages. Là, toutes les longueurs d'ondes sont affectées, ce qui cause parfois des troubles atmosphériques

II.3.3 Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol :

L'atmosphère terrestre perturbe grandement, par des processus variés, le flux de photons issu du soleil. Donc, après sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire peut être considéré comme la somme de deux composantes [30,33].

) Le rayonnement direct

Le rayonnement qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère.

) Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et est diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

) Le rayonnement global

Le rayonnement global reçu sur une surface horizontale provient du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

II.3.4 Appareils de mesures du rayonnement solaire :

) L'héliographe de Campbell-Stockes

Le principe consiste à focaliser les rayons solaires (grâce à la sphère en verre centrale) sur le diagramme sans que ce dernier ne s'enflamme. Une règle transparente permet ensuite d'apprécier la longueur de la trace de brûlure avec une résolution permettant de mesurer la durée d'insolation à 6 minutes près.

Un héliographe plus récent mesure automatiquement l'insolation, c'est l'héliographe à fibreoptique[34].

CHAPITRE II

Rayonnement solaire



Figure II.03 : L'héliographe de Campbell-Stockes [34].

) **Le Pyranomètre :**

C'est le capteur le plus fréquemment utilisé pour mesurer le rayonnement global ou diffus. Il se compose d'une thermopile composée d'une série de thermocouples avec alternance des soudures chaudes et soudures froides.

Les soudures chaudes sont en contact thermique avec la surface absorbante « noire » avec une capacité thermique faible.

Les soudures froides sont en contact avec un matériau ayant une capacité thermique relativement élevée et reste à la température ambiante.

Lorsque le rayonnement solaire tombe sur la surface absorbante (noire) la quasi-totalité du rayonnement incident est absorbé. Il en résulte une augmentation de la température à la « jonction chaude » proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Une tension est alors générée par la thermopile, qui est proportionnelle à la différence de température entre « chaud » et « froid ».

Cette tension de sortie est convertie en W/m^2 par l'utilisation d'un facteur de sensibilité. Les Pyranomètres ont une réponse spectrale comprise entre 335 et 2200nm du spectre solaire qui inclut la bande de longueurs d'ondes visibles. Pour la mesure du rayonnement réfléchi par le sol on utilise un Pyranomètre inversé et pour le rayonnement diffus on utilise un Pyranomètre plus un pare-soleil (voir Figure II.04).

CHAPITRE II

Rayonnement solaire



Figure II.04 : Mesure du rayonnement Global (A) et Diffus(B) avec unPyranomètre [34].

) Le Pyrhéliomètre

C'est un instrument destiné à la mesure de l'intensité du rayonnement solaire direct. Il comporte une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale au rayonnement par un système de poursuite automatique. La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à 5.7° (le diamètre apparent du soleil est de 0.5°). Le tube est fixé sur une monture équatoriale. On mesure la température du disque d'argent à des intervalles réguliers en ouvrant et en occultant alternativement l'entrée de l'appareil.

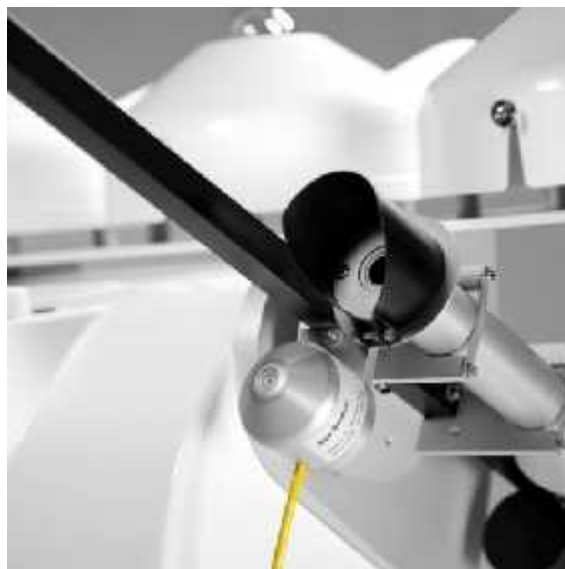


Figure II.05 : Mesure du rayonnement Directe avec un pyrhéliomètre [35].

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

II.4 Rappel des données astronomiques

II.4.1 Mouvement de la Terre :

La trajectoire de la Terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'**écliptique**.

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de $\pm 1.7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de **149 675 106 Km** [30]. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'**équateur**.

L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé **déclinaison** qui vaut $23^{\circ}27'$. Les mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil sont schématisés sur la Figure II.06.

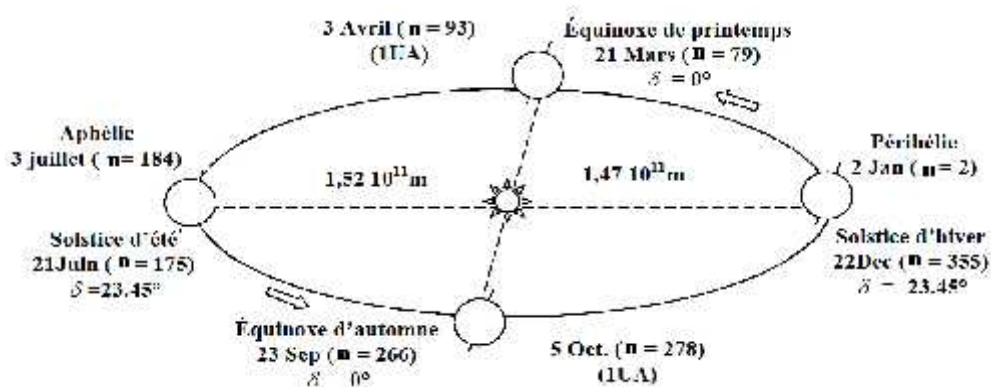


Figure II.06 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du soleil [29].

II.4.2 Repérage d'un site à la surface de la Terre (coordonnées Géographiques)

Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes :

) **Latitude ϕ :**

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord, et est négative dans l'hémisphère sud [36].

) **Longitude (L) :**

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich.

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

Sa valeur est positive à l'ouest et est négative à l'est de la méridienne origine [36]. Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360°), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donc chaque degré de longitude représente 4 minutes.

) L'altitude (Z) :

C'est la distance verticale exprimée en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer pris comme surface de référence.

) Méridien (M):

Grand cercle de la terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude ; le méridien pris pour origine (0°) des longitudes est celui de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles ; sa trace au sol est parfois dénommée : méridienne. Le temps solaire vrai est identique, à un instant donné, pour tous les points d'un même méridien [36].

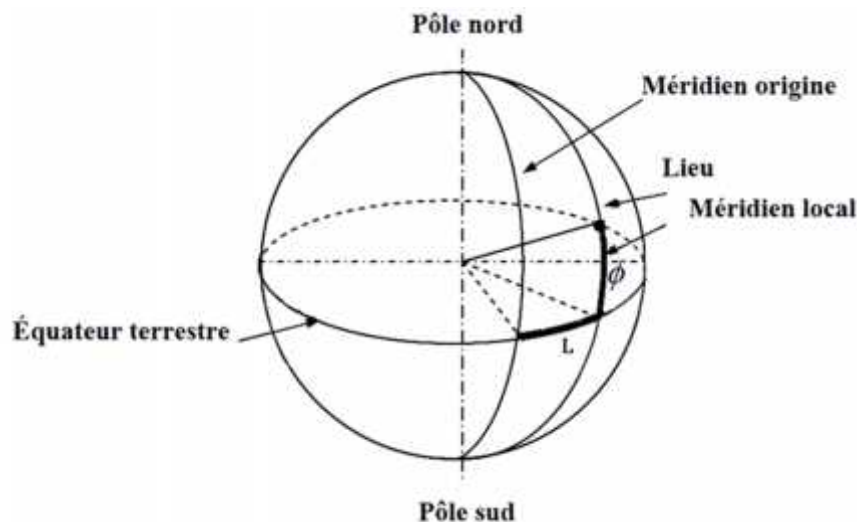


Figure II.07 : Définition des coordonnées terrestre d'un lieu [37].

II.4.3 Les coordonnées du soleil

Pour un lieu donné la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents :

-) Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
-) Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

II.4.3.1 Les coordonnées équatoriales

Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure d'observation [37].

La position du soleil est exprimée par deux angles qui sont :

) La déclinaison δ :

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année : elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'hiver (-23.45°) et au solstice d'été (23.45°).

Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisé par COOPER [38].

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(360^\circ \frac{2}{3} + n\right) \quad (\text{II.5})$$

Avec n nombre de jours écoulés depuis le 1er Janvier.

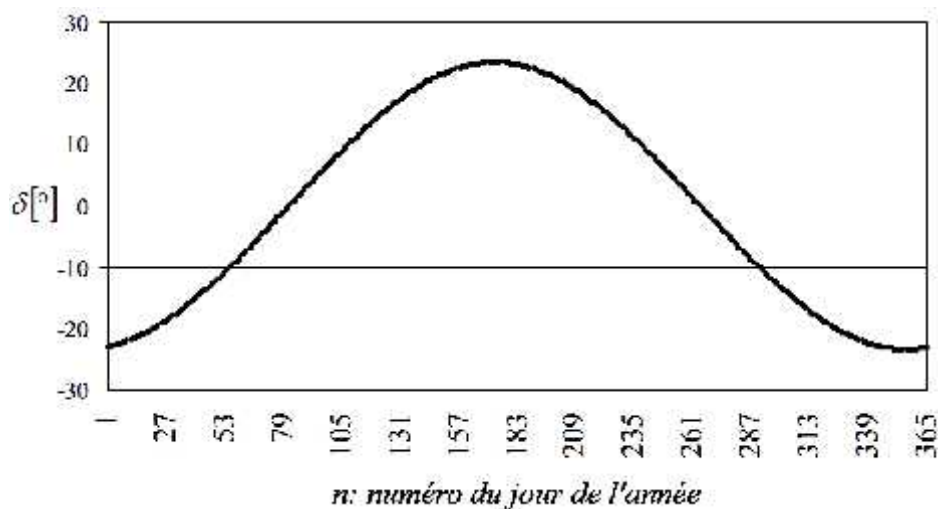


Figure II.08 : Variation annuelle de la déclinaison solaire[38].

) L'angle horaire ω :

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du soleil sur ce même plan au midi vrai.

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

L'angle horaire est donné par la relation suivante[39] :

$$\omega = 15 (\text{TSV} - 12) \quad (\text{II.6})$$

Avec TSV (temps solaire vrai) en heures et ω en degrés [33].

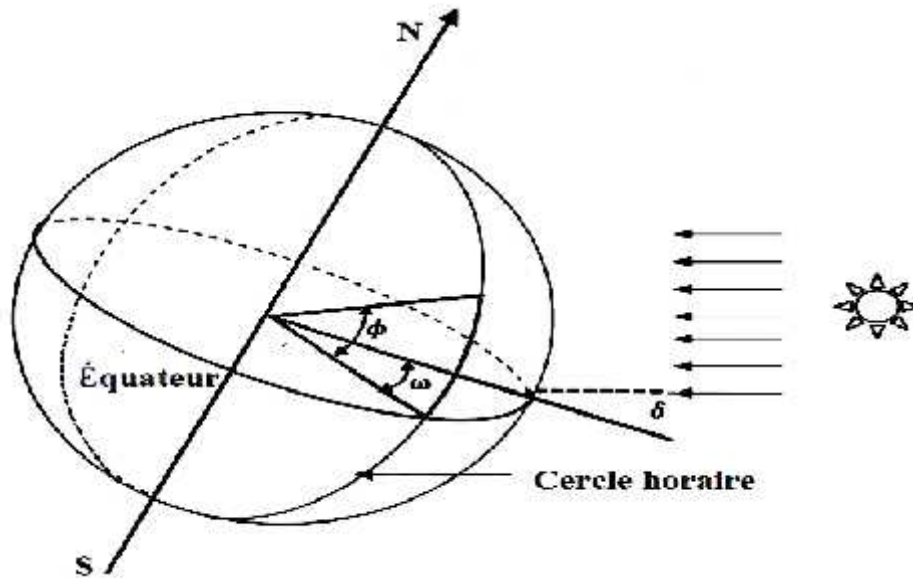


Figure II.09 : Variation annuelle de la déclinaison solaire[39].

II.4.3.2 Les coordonnées horizontales [40] :

Le soleil est repéré par les grandeurs suivantes :

) **La hauteur angulaire du soleil (h_s):**

C'est l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan horizontal (c'est-à-dire tangent au sol). Elle varie au cours de la journée en fonction de la déclinaison δ de l'angle horaire ω , et de la latitude ϕ .

Elle est donnée par la formule :

$$\sin(h_s) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (\text{II.7})$$

) **Azimut solaire (a_s) :**

C'est l'angle que fait le plan de méridien local avec le plan vertical passant par le soleil. L'azimut est compté négativement vers l'est, positivement vers l'ouest. Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a_s) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h_s)} \quad (\text{II.8})$$

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

Avec δ : déclinaison du soleil, ω : l'angle horaire, h_s : hauteur angulaire du soleil

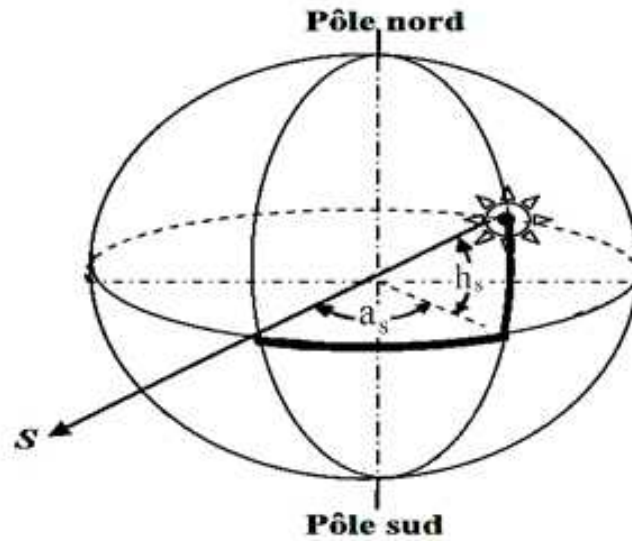


Figure II.10 : Coordonnées horizontales [37].

II.4.4 Eclairage d'un récepteur plan

II.4.4.1 Orientation d'un plan

Un plan quelconque est défini par deux angles (a_0 , h_0)

) h_0 : Hauteur angulaire du plan,

C'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal.

) a_0 : azimut du plan,

C'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

L'inclinaison du plan par rapport au plan horizontal est donnée par [41] :

$$\beta = 90 - h_0 \quad (\text{II.9})$$

avec: h_0 : la hauteur angulaire du plan

II.4.4.2 L'angle d'incidence θ_i sur un plan incliné de l'angle β [40].

L'angle d'incidence θ_i est l'angle entre la direction du soleil et la normale du plan. Cet angle est déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident et la normale en coordonnées horizontales.

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

$$\begin{aligned} \cos(\theta_i) = & \sin(\Omega) \sin(\delta) \cos(\varphi) - \sin(\Omega) \cos(\delta) \sin(\varphi) \cos(a_0) + \\ & \cos(\delta) \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\epsilon) + \cos(\Omega) \sin(\delta) \sin(\varphi) \cos(a_0) \cos(\epsilon) + \\ & \cos(\Omega) \sin(\varphi) \sin(a_0) \sin(\epsilon) \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

Avec θ_i : angles incidence, δ : déclinaison du soleil, φ : l'inclinaison du plan, Ω : l'angle horaire
 a_0 : l'azimut du plan

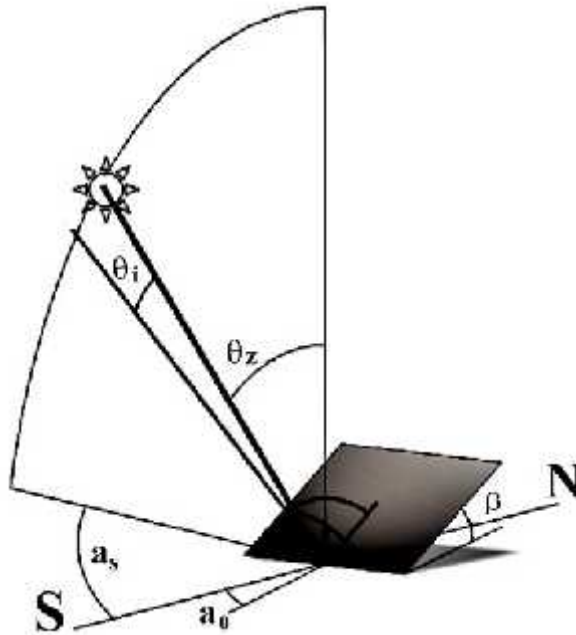


Figure II.11 : Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice [40].

II.5 Détermination du flux solaire par calcul [42,43]

Il est possible de calculer l'énergie solaire reçue par un capteur solaire, dans des conditions de ciel clair, à un moment donné de la journée, à une date et dans un lieu.

Pour connaître l'énergie solaire, en kWh/m²/j reçue par un capteur plan incliné d'un angle « i » par rapport à l'horizontale (Figure II.12), on calcule successivement [44] :

1) La hauteur du soleil au vrai midi solaire

$$h = 90 - i + \delta(t) \quad (\text{II.11})$$

Avec i : l'angle d'inclinaison du capteur plan

La déclinaison du soleil $\delta(t)$ est égale à la latitude du lieu situé entre les tropiques et pour lequel les rayons solaires sont perpendiculaires au plan horizontal à midi solaire.

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

) **-L'angle « u » formé entre la normale du collecteur et les rayons solaires à midi solaire :**

$$u = 90 - (1 + h) \quad (\text{II.12})$$

) **-Le rayonnement direct sous un ciel clair :**

$$I_D = 1230 \cdot \exp\left(\frac{-1}{3.85 (h+1.6)}\right) \quad (\text{II.13})$$

) **-Le rayonnement diffus (émis ou réfléchi par l'atmosphère, les nuages ...) reçu par le plan horizontal dans le cas de conditions de ciel clair :**

$$D_H = 125(\sin(h))^{0.4} \quad (\text{II.14})$$

) **-Le rayonnement total reçu par le plan horizontal :**

$$G_H = D_H + I_D \cdot \sin(h) \quad (\text{II.15})$$

) **-Réceptions des rayonnements diffus et totaux par le plan collecteur incliné :**

$$D(i) = \frac{1+\rho}{2} \cdot D_H + \frac{1-\rho}{2} \cdot G_H \cdot \alpha \quad (\text{II.16})$$

$$G(i) = I_D \cdot \cos(u) + D(i) \quad (\text{II.17})$$

u: L'angle formé entre la normale du collecteur et les rayons solaires à midi solaire.

L'albédo est le coefficient de réflexion du sol situé devant le collecteur (habituellement pris égal à 0,2).

) **-Durée de la journée :**

$$\Delta T_{\square} = \frac{2}{1} \cdot \arccos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)) \quad (\text{II.18})$$

Pour un capteur solaire orienté en permanence vers le sud, et pour la période située entre le 21/3 et le 22/9, la durée de captage est à corriger par :

$$\Delta T_{\square}' = 12 + \frac{\Delta T_{\square} - 1}{7} \quad (\text{II.19})$$

) **L'énergie reçue :**

$$W_{\square} = \frac{2}{\pi} \cdot G(i) \cdot \Delta T_{\square} \text{ ou } \Delta T_{\square}' \quad (\text{II.20})$$

CHAPITRE II

Rayonnement solaire

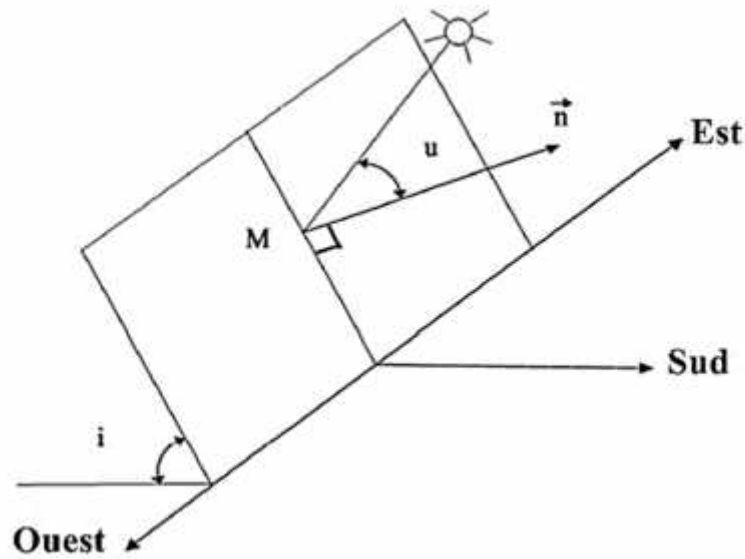


Figure II.12 : Position du capteur solaire à midi solaire.

II.6 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 notamment le solaire thermique à concentration, ce dernier nécessite des études approfondies du gisement solaire afin de prendre une décision d'installer une centrale CSP ou pas.

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 III

**Optique géométrique et
optimisation de la forme du
réflecteur secondaire**

CHAPITRE III

Optique géométrique et optimisation de la forme du réflecteur secondaire

III.1. Introduction

L'objectif principale de ce chapitre est d'étudier en détail les lois de réflexion du rayonnement solaire appliquées dans les systèmes à concentrations. La deuxième partie est consacrée à l'optimisation de la géométrie du réflecteur secondaire, ce dernier joue un rôle très important dans les performances de notre récepteur car il permet de récupérer les rayons solaires perdus par débordements.

III.2 La loi de réflexion [45] :

Lorsqu'un faisceau étroit de lumière frappe l'interface entre deux milieux optiquement différents, au moins une partie de celui-ci change de direction de propagation en continuant à voyager dans le même support. Ce phénomène est appelé réflexion, et le rayon lumineux est dit être reflété. Le reste du rayon peut être soit absorbé par le second milieu ou, s'il est transparent, comme le verre ou l'eau, il peut être transmis à travers ce milieu (Figure III.01). Dans le cas de la transmission, le rayon lumineux traverse le matériau du second milieu et sort de l'autre côté. Pour un matériau transparent, les rayons lumineux transmis sont ralentis et courbés. Pour un matériau qui n'est pas transparent (un matériau translucide), les rayons lumineux se dispersent dans diverses directions.

Dans le cas de l'absorption, l'énergie est absorbée par le matériau et transformée en énergie thermique, car la lumière est piégée. Dans le troisième cas, réflexion, la lumière est déviée de la surface. Pour un objet brillant très lisse comme un miroir argenté, plus de 95% de la lumière peut être réfléchi.

Habituellement, les trois phénomènes, transmission, absorption et réflexion, se produisent simultanément. La quantité d'énergie divisée entre eux dépend de nombreux facteurs, tels que l'angle d'approche, la longueur d'onde et les différences entre les deux matériaux adjacents.

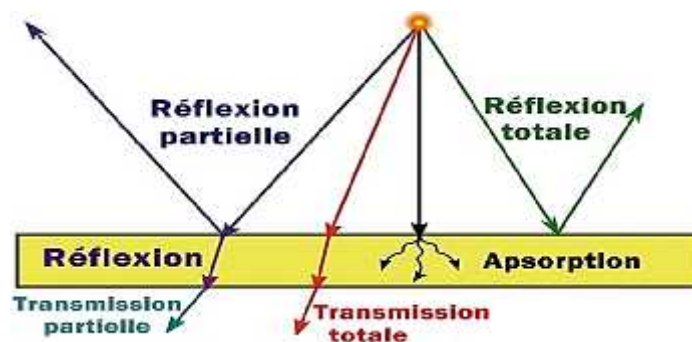


Figure III.01. Absorption, transmission et réflexion [45].

CHAPITRE III

Optique géométrique et optimisation de la forme du réflecteur secondaire

Nous définissons l'angle d'incidence, θ_i , comme étant l'angle incident (ou entrant) du rayon incident fait avec la normale (perpendiculaire) à la surface, et l'angle de réflexion, θ_r , pour être l'angle que le rayon réfléchi (ou sortant) fait avec la même normale (Figure III.02). On constate que les rayons incidents et réfléchis se situent sur le même plan avec la normale à la surface et que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

$$\theta_i = \theta_r \quad (\text{III.1})$$

C'est la loi de la réflexion. Il est illustré à la Figure III.02. [45]

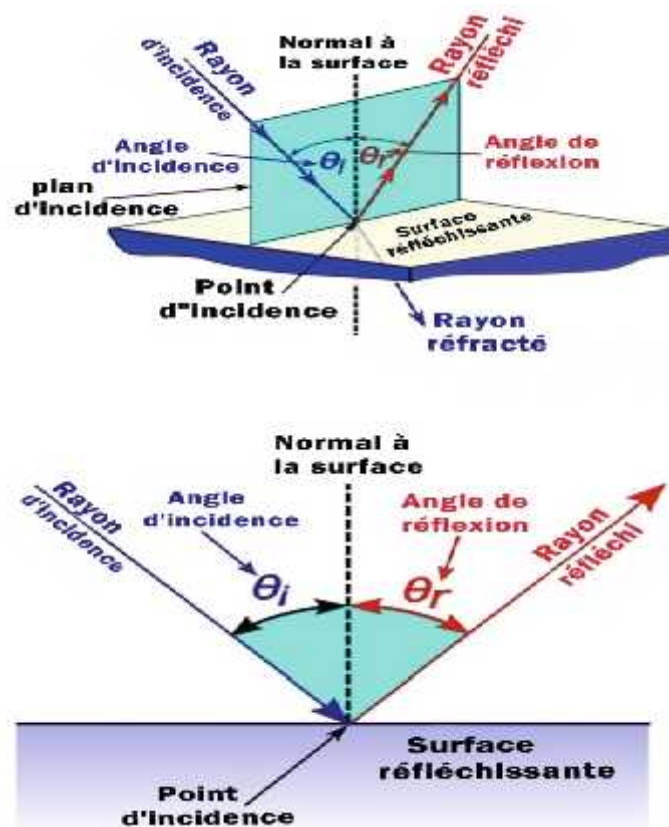


Figure III.02 : Réflexion des rayons de la lumière qui est entre deux supports optiquement différents. [45]

La loi de la réflexion s'applique à tous les types de surfaces réfléchissantes. Elle est donc applicable aux surfaces planes, comme les miroirs ordinaires dans les chambres et les salles de bains ainsi qu'aux surfaces sphériques et paraboliques, même à toute autre forme de surface.

La surface réfléchissante la plus simple est le miroir plan, tandis que la plus courbée couramment utilisé est le miroir sphérique, où la surface fait partie de la surface d'une sphère.

CHAPITRE III

Optique géométrique et optimisation de la forme du réflecteur secondaire

Pour le cas des surfaces réfléchissantes courbées, la normale est tracée perpendiculairement au plan tangent à la surface courbe au point d'incidence (le point où le rayon incident frappe la surface Figure III.03). Le plan d'incidence est le plan formé par le rayon incident et la normale au miroir au point d'incidence.

Toute surface réfléchit au moins une partie de la lumière qui lui tombe dessus, alors qu'une surface hautement polie, comme les miroirs, reflète la plupart de la lumière tombante. Les miroirs sont faits de certaines surfaces métalliques hautement polies, ou de films métalliques ou diélectriques déposés sur un substrat tel que le verre.

Lorsque la lumière rencontre une surface rugueuse, même microscopiquement rugueuse, comme un morceau de papier, il se reflète dans de nombreuses directions, comme illustré à la Figure III.04. C'est ce qu'on appelle la réflexion diffuse. La loi de la réflexion s'applique toujours à de petites sections de la surface. Parce que la lumière frappe différentes parties de la surface sous différents angles, il se reflète dans des directions différentes. La lumière réfléchie ne conserve plus sa régularité spatiale, et on dit qu'il subit une réflexion diffuse (Figure III.4b). Bien que la plupart des objets aient des surfaces rugueuses, un miroir a une surface lisse (par rapport à la longueur d'onde de la lumière) et réfléchit la lumière à des angles spécifiques.

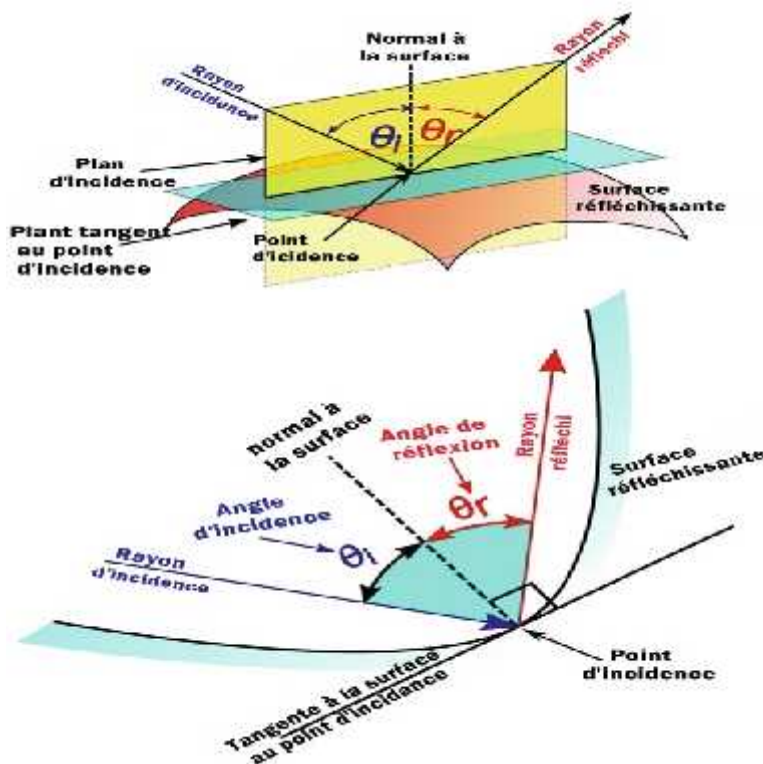
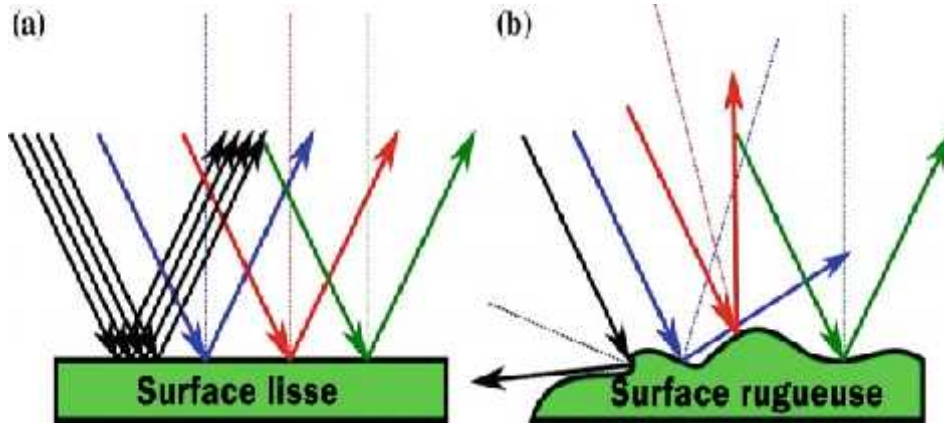


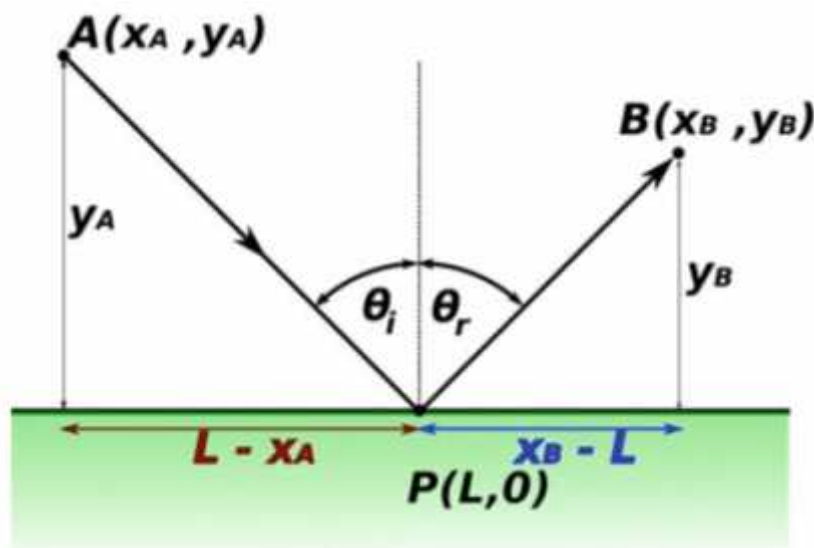
Figure III.03. Surfaces réfléchissantes courbées. [45]

CHAPITRE III

Optique géométrique et optimisation de la forme du réflecteur secondaire



La loi de la réflexion peut être dérivée du principe de Fermat. Après réflexion, le rayon lumineux sortant est sur le même plan que le rayon entrant et la normale au point d'incidence. Soit **A** le point de départ et **B** le point final du rayon lumineux (Figure III.05). Nous supposons un milieu homogène au-dessus du miroir avec indice de réfraction n^* , et puisque la lumière se déplace en lignes droites dans un matériau uniforme, nous pouvons suivre son chemin dans ce milieu en traçant des rayons rectilignes représentatifs du faisceau de lumière. Les coordonnées cartésiennes des points **A** et **B** dans un système de coordonnées arbitraires sont (x_A, y_A) et (x_B, y_B) , respectivement. Lorsque la lumière se déplace entre les points **A** et **B** dans le temps le plus court, on veut trouver le point **P** pour lequel le temps, t , requis pour la lumière pour aller de **A** à **B**, est le moindre, ou, parce que l'indice de réfraction n du milieu est constante, et donc la vitesse de la lumière, la longueur du chemin, L , est le minimum.



CHAPITRE III

Optique géométrique et optimisation de la forme du réflecteur secondaire

On suppose que le plan de la surface réfléchissante est pris perpendiculaire à l'axe des y. Ainsi, les coordonnées cartésiennes du point P sont (L, 0). La longueur, L, du trajet lumineux APB est (Figure III.05) :

$$L = A + P \quad (\text{III.2})$$

$$L = \sqrt{(L - x_A)^2 + y_A^2} + \sqrt{(x_B - L)^2 + y_B^2} \quad (\text{III.3})$$

Pour minimiser la longueur du chemin, l, nous la différencions par rapport à la coordonnée x du point P, L, (dl/dL) et égaliser la quantité résultante avec 0 (dl/dL = 0). Nous pouvons, donc, trouver la longueur minimale du chemin, l, et par la suite le point P.

$$\frac{dl}{dL} = \frac{L - x_A}{\sqrt{(L - x_A)^2 + y_A^2}} - \frac{x_B - L}{\sqrt{(x_B - L)^2 + y_B^2}} = 0 \quad (\text{III.4})$$

$$\frac{dl}{dL} = \frac{L - x_A}{\sqrt{(L - x_A)^2 + y_A^2}} = \frac{x_B - L}{\sqrt{(x_B - L)^2 + y_B^2}} \quad (\text{III.5})$$

En utilisant les définitions de $\sin \theta_i$ et $\sin \theta_r$,

$$\frac{L - x_A}{A} = \frac{x_B - L}{P} \quad (\text{III.6})$$

$$\sin \theta_i = \sin \theta_r \quad (\text{III.7})$$

$$\theta_i = \theta_r \quad (\text{III.1})$$

De cette façon, nous sommes arrivés à la loi de réflexion pour les rayons lumineux, où θ_i et θ_r sont respectivement l'angle d'incidence et l'angle de réflexion.

CHAPITRE III

Optique géométrique et optimisation de la forme du réflecteur secondaire

III.3 Optimisation de la géométrie des réflecteurs secondaires :

Pour trouver une géométrie optimale de notre réflecteur secondaire qui va permettre de collecter un maximum du flux solaire réfléchi par les miroirs, nous avons optimisé la géométrie de ce dernier à l'aide de la technique ray-tracing (traçage de rayons), cette dernière a été réalisée à l'aide d'un logiciel DAO : Solide Edge.

Nous avons testé cinq angles différents : 30° , 25° , 20° , 15° , 10° et 9° . Chaque angle contient trois points d'incidences sur le réflecteur secondaire. Le choix de ces angles a été pris selon les dimensions de notre récepteur.

Il est à noter que tous les comportements des rayons détectés par un demi plan de notre champ solaire est applicable pour l'autre demi plan (symétrie)

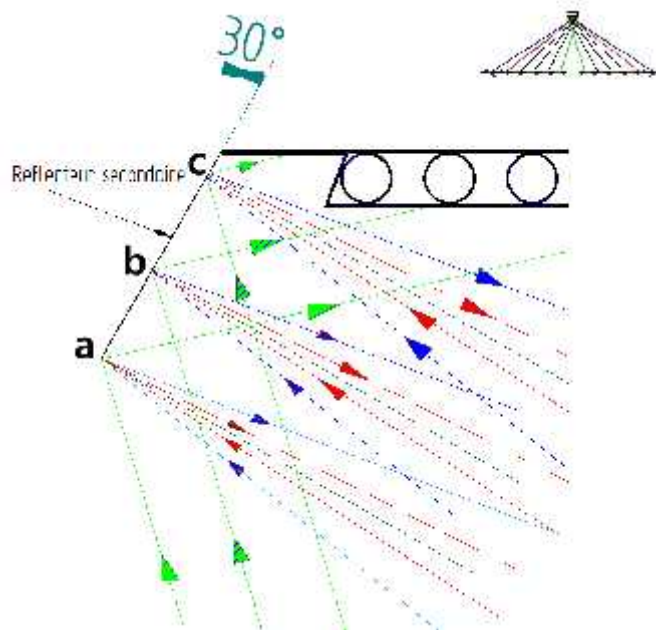


Figure III.06 : Résultats des comportements des rayons sur un demi plan

CHAPITRE III

Optique géométrique et optimisation de la forme du réflecteur secondaire

Le test de rayons pour un angle égal à 30° a donné les résultats suivants :

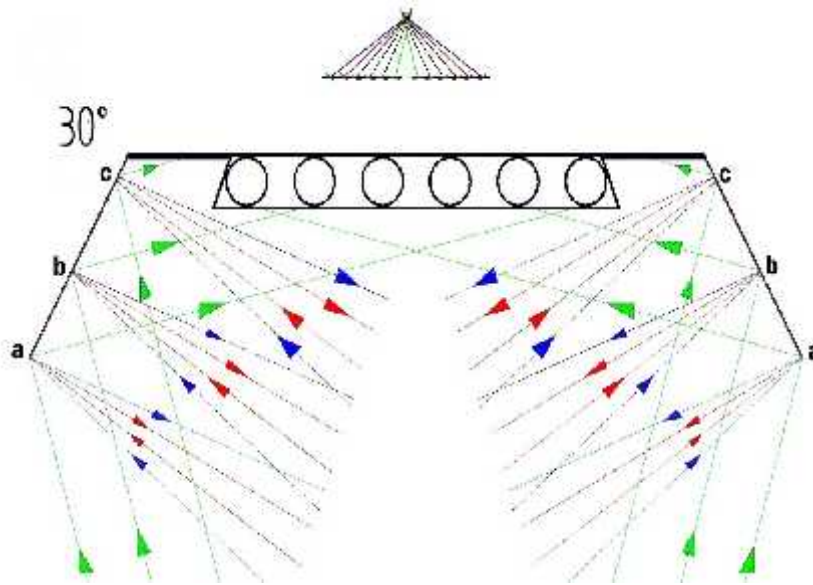


Figure III.07 : Résultats de traçage de rayons pour un angle du réflecteur secondaire égal à 30°

Les résultats ont montré que seuls les deux miroirs les plus proches du récepteur qui ont réfléchis vers la plaque absorbante, sinon les rayons réfléchis par les autres miroirs atteignent le réflecteur secondaire mais n'atteint pas l'absorbeur, pour cette raison nous n'avons pas pris cet angle comme étant optimal dans la réalisation du réflecteur secondaire.

Le même comportement a été détecté pour un angle égal à 25° comme le montre la figure suivante :

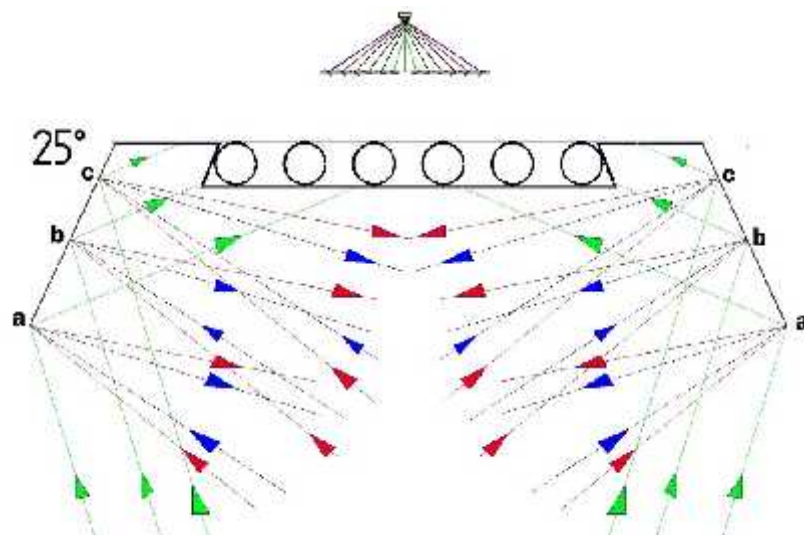


Figure III.08 : Résultats de traçage de rayons pour un angle du réflecteur secondaire égal à 25°

Pour le troisième test (angle égale à 20°), tous les rayons incidents qui arrivent au point (c) atteient l'absorbeur, mais les rayons qui arrivent aux deux autres points (a et b) on remarque

CHAPITRE III

Optique géométrique et optimisation de la forme du réflecteur secondaire

que seuls les rayons provenant des deux miroirs les plus proches du récepteur qui atteignent la plaque absorbante après avoir réfléchi par les points (a) et (b). (Figure II.09)

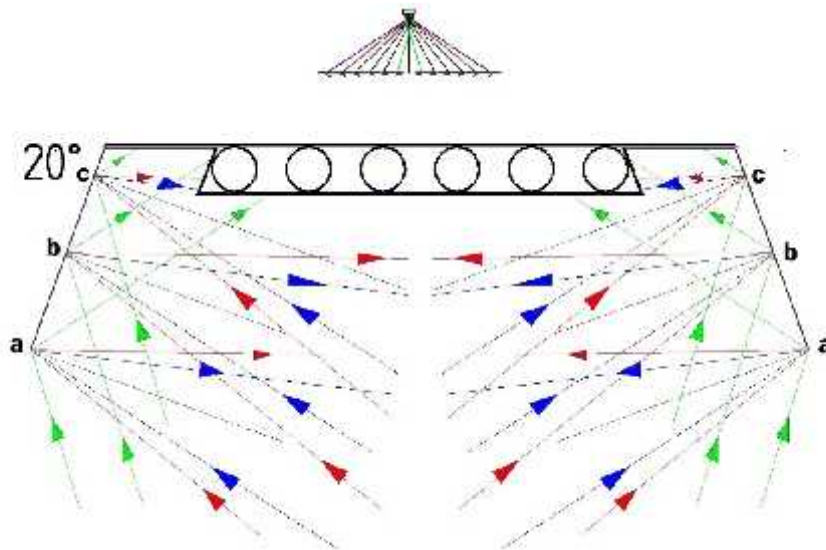


Figure III.09 : Résultats de traçage de rayons pour un angle du réflecteur secondaire égal à 20°

Les résultats trouvés ci-dessus nous ont mené de tester d'autres angles afin de trouver une configuration optimale de notre réflecteur secondaire. L'autre angle testé est égale à 15° . Les résultats de traçage de rayons obtenus sont présentés dans la figure ci-dessous :

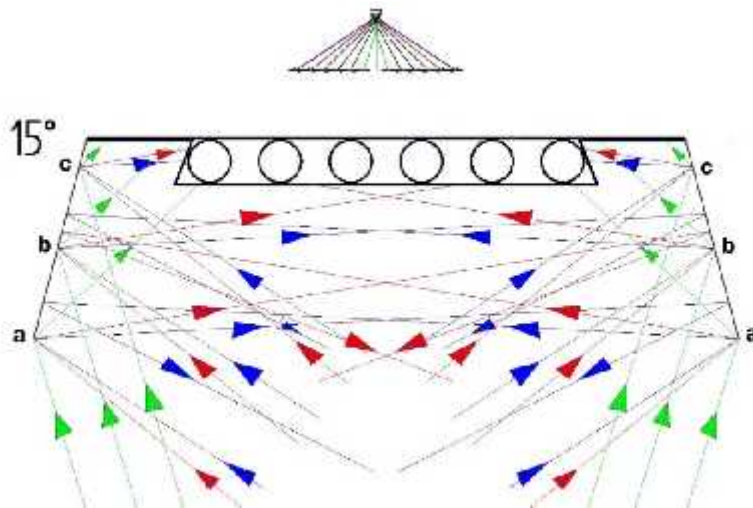


Figure III.10: Résultats de traçage de rayons pour un angle du réflecteur secondaire égal à 15°

Pour cet angle, nous avons remarqué qu'une totalité des rayons provenant des miroirs sont absorbés par les tubes absorbeurs après avoir réfléchi par le réflecteur secondaire à l'exception du rayon qui arrive au point (b) provenant de miroir le plus éloigné, mais au point (a) sauf le miroir le plus proche du récepteur qui réfléchit vers l'absorbeur.

CHAPITRE III

Optique géométrique et optimisation de la forme du réflecteur secondaire

Nous avons continué les tests pour obtenir une géométrie qui va permettre aux rayons provenant du miroir le plus éloigné de réfléchir vers l'absorbeur, cela nous a conduits de tester un angle du réflecteur secondaire égal à 10° , les résultats obtenus sont présentés dans la figure ci-dessous :

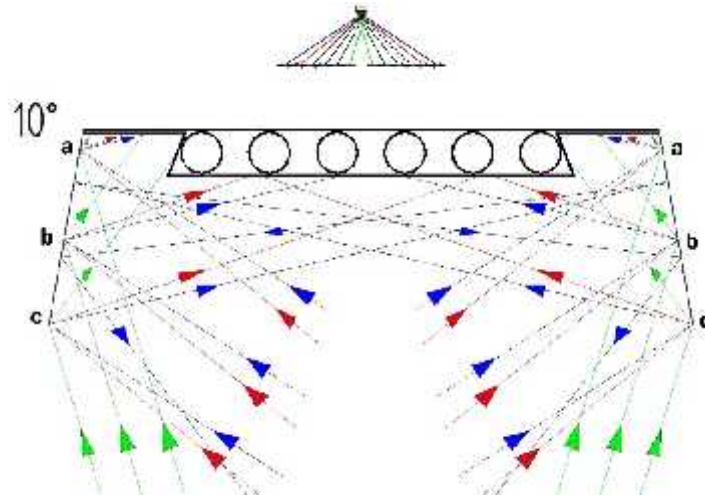


Figure III.11 : Résultats de traçage de rayons pour un angle du réflecteur secondaire égal à 10°

En analysant ces résultats, nous avons remarqué presque la même chose avec un angle égale à 15° : la totalité des rayons provenant des miroirs sont absorbés par les tubes absorbeurs après avoir réfléchi par le réflecteur secondaire à l'exception du rayon qui arrive au point (a) provenant du miroir le plus éloigné.

Dans les étapes d'optimisation précédentes, nous avons fait varier l'angle du réflecteurs secondaire avec un pas de 5° , mais cette fois ci dans l'objectif d'obtenir une géométrie qui vas donner une collecte totale du flux réfléchi par les miroirs, nous avons varié le pas de 1° , la seule contrainte qui reste est le miroir qui est situé aux extrémités de champ, pour cette raison on va essayer avec un angle de 9° , les résultats obtenus ont montré une absorption totale du flux réfléchis provenant de tous les miroirs, soit absorption direct (miroirs-absorbeur) ou indirecte ça veut dire que le rayon va être réfléchi par le réflecteur secondaire et puis atteint la plaque. Pour cette raison nous avons pris un angle égal à 9° comme étant une géométrie optimale de notre réflecteur secondaire. La géométrie finale avec le test de rayons est illustrée dans la figure suivante :

CHAPITRE III

Optique géométrique et optimisation de la forme du réflecteur secondaire

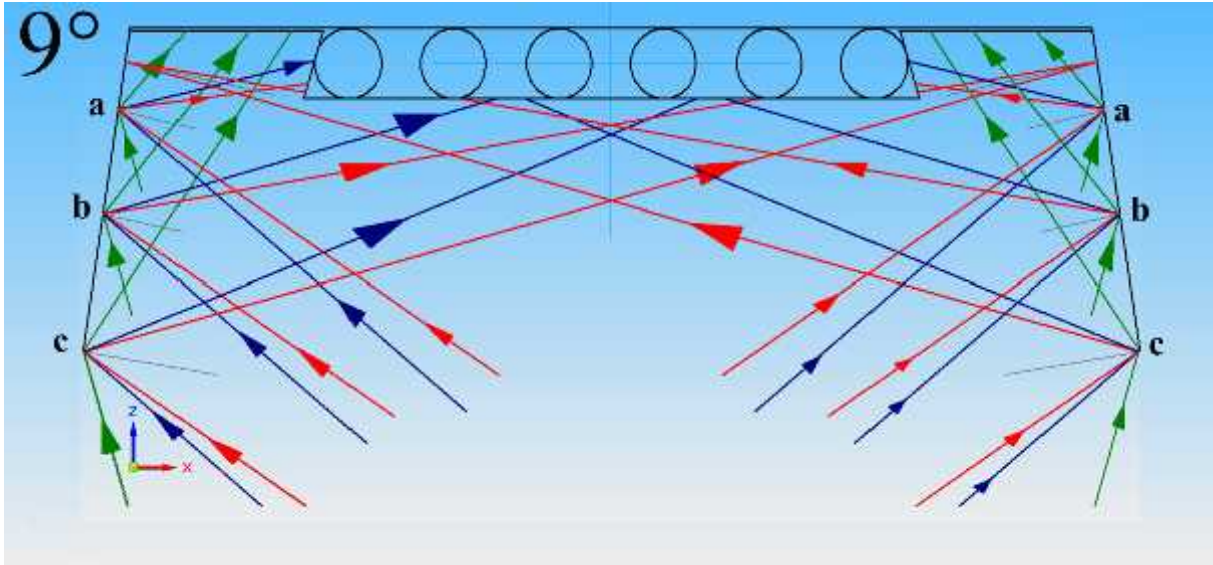


Figure III.12 : l'angle optimale (9°)

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons déterminé la configuration optimale de notre réflecteur secondaire, cette dernière donne de très bons résultats avec un rendement optique qui atteint les 100 % (tous les rayons qui traversent la vitre vont être absorbés par les tubes absorbeurs), ce qui va influencer sur les performances thermiques du récepteur.

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

IV.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de décrire les différentes étapes de réalisation d'un récepteur à cavité trapézoïdale pour un capteur solaire à concentration linéaire de Fresnel. Ce dernier a été étudié pour être réalisé et monté dans un prototype de 27 m² de surface à l'Unité de développement des équipements solaire (UDES). Le récepteur en question est composé de 06 tubes et avec un réflecteur secondaire trapézoïdal et un vitrage en verre de 3,35m de longueur et de 50 cm de largeur. La forme de cette cavité doit être optimale afin que le maximum de rayons solaires soit réfléchi sur les tubes absorbants. L'isolation de l'absorbeur est aussi étudiée pour assurer le minimum de pertes thermiques.

Présentation de l'UDES

L'Unité de Développement des Équipements 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 Équipements 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 IV.01 : Unité de développement des équipements solaire

IV.2 Optimisation des paramètres de conception :

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

IV.2.1 Paramètres d'optimisation de la géométrie du récepteur

L'optimisation géométrique du récepteur est primordiale. Cependant, lors de la conception, il faut 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 ;

IV.2.1.1 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 sera prise en compte pour la conception du récepteur.

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

IV.2.1.2. La longueur du récepteur

Au cours de l'exploitation, la longueur 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 récepteur, nous avons rencontré un petit souci qui est la position du soleil au mois de Novembre, dans la saison hivernale le soleil est bas sur l'horizon, pour cette raison nous avons décidé de rendre la structure qui porte les miroirs réflecteurs mobile ; en effet, permettre d'avoir une focalisation importante au niveau du récepteur. Des rails supplémentaires ont été ajoutée sur le support afin de faire coulisser la structure et intercepter au mieux les rayons réfléchis.

IV.2.1.3. 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 le plus petit possible afin de limiter les pertes thermiques.

Il est important donc de faire une étude d'analyse de la répartition de flux de manière homogène sur l'ensemble du récepteur. Les points les plus chauds doivent être réduits afin de minimiser le risque de destruction de matériaux sélectifs. Le récepteur retenu est de type trapézoïdal et sera 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 il fallait dimensionner le récepteur 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

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

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

IV.3 Les pertes optiques

IV.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 à 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

VI.3.2 Pertes par blocage

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.

IV.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 2.4m afin de maximiser la production thermique de notre récepteur.

IV.4 Les étapes de la conception du récepteur réalisé

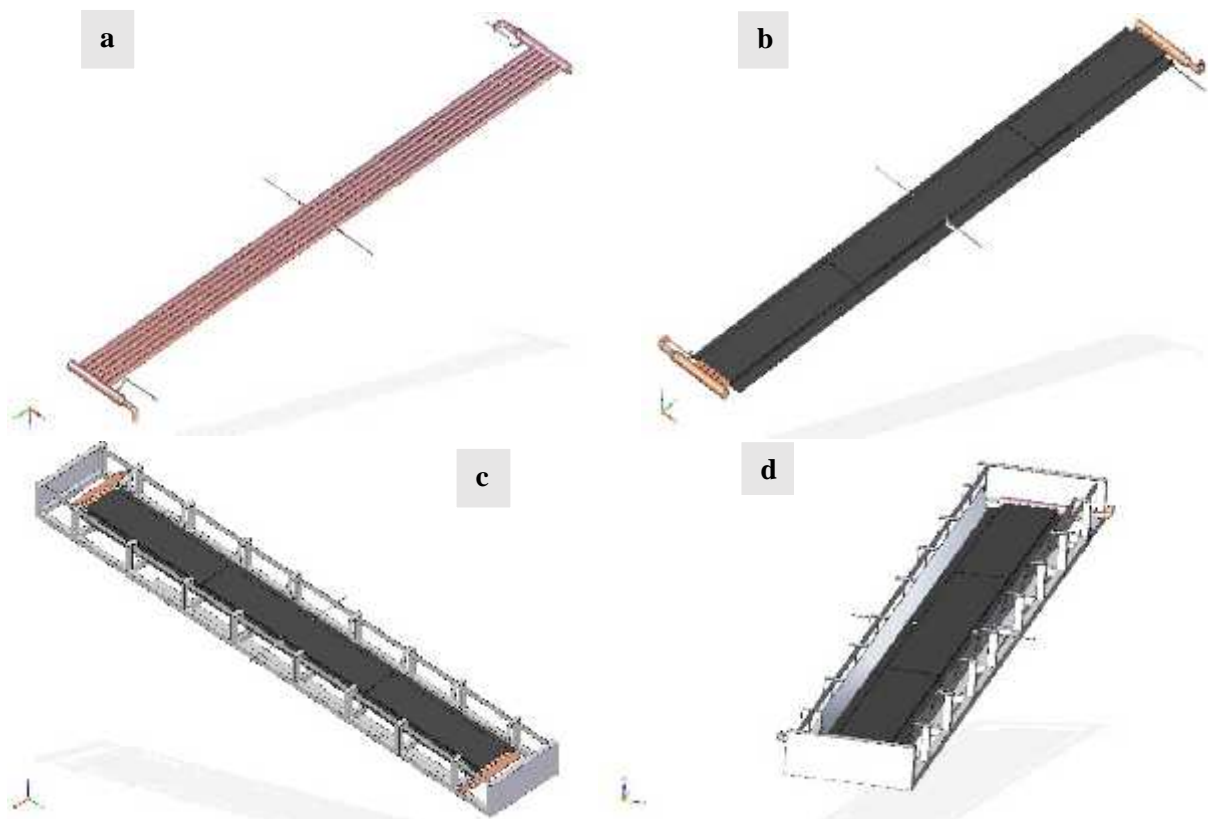
Avant de passé à la réalisation sur le site, nous avons effectués une conception mécanique des différents éléments de notre récepteur thermique. On utilise un outil DAO : Solide Edge

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur



Figure IV.02 : Logiciel utilisé (Solide Edge).



Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

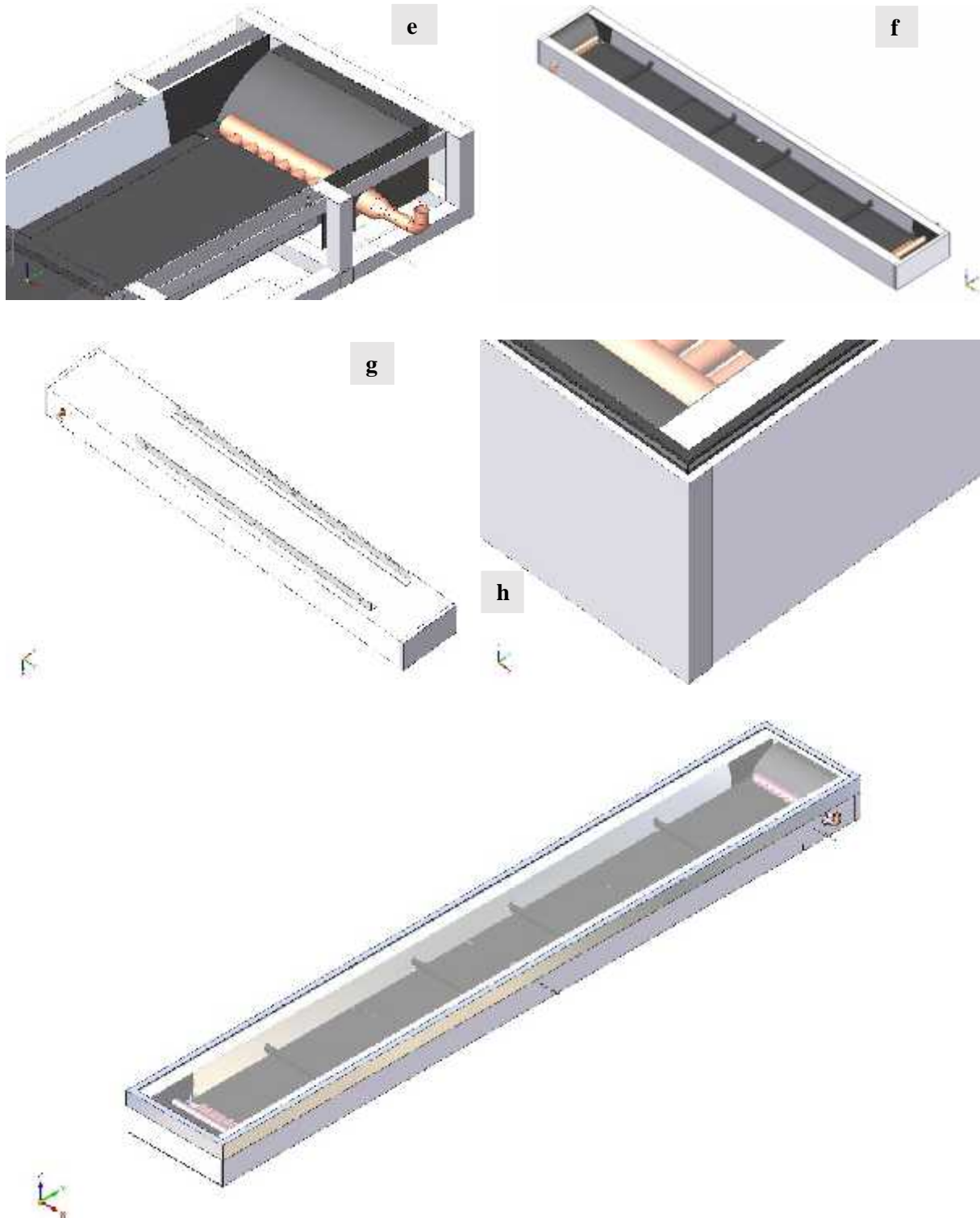


Figure IV.03 : les étapes de la conception du récepteur sur solide Edge.

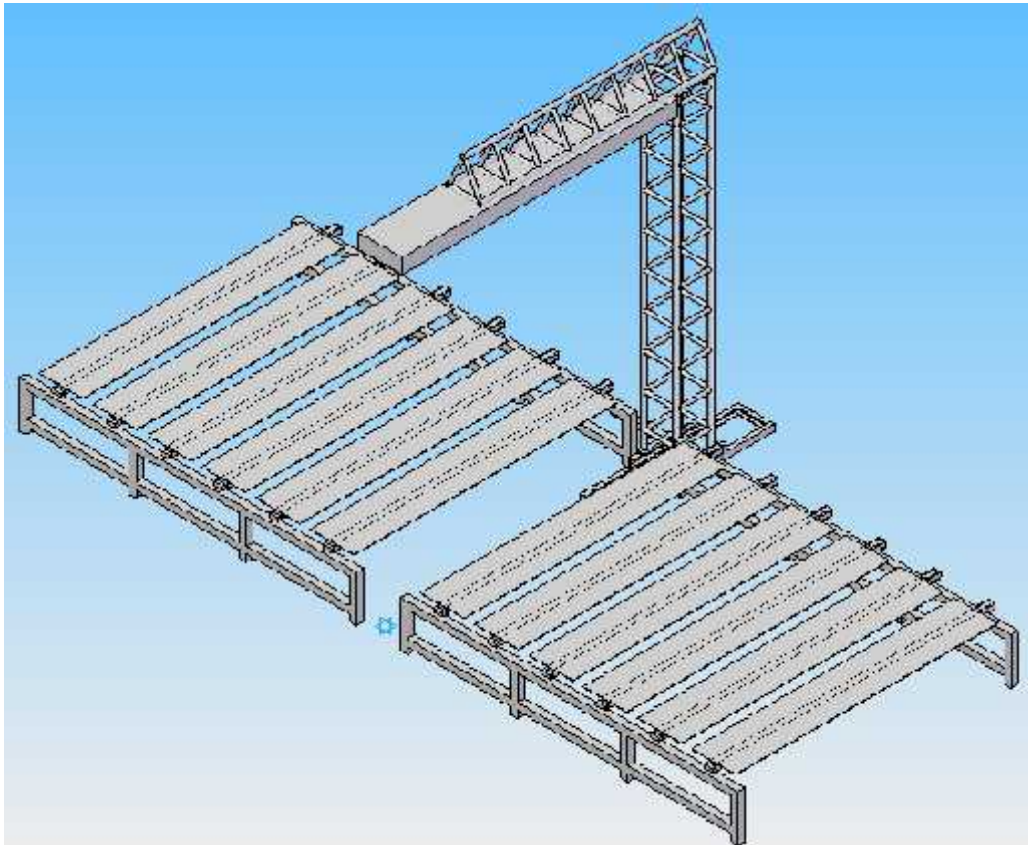


Figure IV.04 : Montage des composants du système à concentration solaire sur solide Edge.

IV.5 Machines et outils utilisées durant la réalisation :

Pour la réalisation de la structure des réflecteurs et du récepteur nous avons utilisés diverses machines et outils qui sont illustrées et présentées ci-dessous :



Figure IV.05 : Tronçonneuses (a : pour l'aluminium, b : pour le fer)

La figure IV.05 illustre les deux tronçonneuses utilisées pendant la réalisation, l'une pour l'aluminium qui a été utilisée pour le découpage de la structure des réflecteurs primaires

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

(champ de miroirs), et l'autre pour le fer qui a été utilisée pour le découpage de la structure interne du récepteur.



Figure IV.06 : coupeuse

La figure IV.06 illustre les deux coupeuses, l'une est électrique qui a été utilisée pour découper le réflecteur secondaire et le bardage, elle est spécifique pour les plaques de grandes dimensions et des épaisseurs importantes, par contre la coupeuse manuelle, elle a été utilisée pour des plaques de petites dimensions et de faibles épaisseurs.



Figure IV.07 : Presse plieuse manuelle

La figure IV.07 illustre la plieuse manuelle qui a été utilisée pour le pliage du réflecteur secondaire, de la plaque absorbante, et du bardage.

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur



Figure IV.08 : Encocheuse

La figure IV.08 illustre l'encocheuse qui a été utilisée pour découper les supports sur lesquels ont été posés les réflecteurs primaires.

IV.6 Etapes de réalisation

Après avoir dimensionné et optimisé tous les paramètres de conception de notre prototype et plus précisément notre récepteur thermique, nous allons par la suite décrire en détails toutes les étapes de conception et de réalisation de notre récepteur solaire.

L'UDES développe depuis deux ans un prototype solaire à concentration de Fresnel pour production de la vapeur dans la ligne focale, les activités de l'unité sont diverses et variées, mais le CSP est nouveau au sein de cette dernière. Grâce à ses compétences dans divers domaines, elle a su dimensionner et étudier le prototype de Fresnel dans son ensemble. Notre mission principale lors d'un stage pratique au sein de l'UDES dans le cadre d'un PFE est la réalisation du récepteur thermique à cavité trapézoïdale muni de six tubes

La structure, les composants mécaniques, le control commande ont été développés par l'unité.

IV.6.1. La structure ou le support des miroirs réflecteur

Pour supporter les miroirs, on utilise une structure en aluminium, cette structure contient 12 réflecteurs.

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur



Figure IV.09 : Support miroirs

Par la suite nous avons construit les autres lignes de la structure, nous présentons les étapes de constructions dans les images ci-dessous :



Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur



Figure IV.10 : Différentes étapes pour la construction des lignes pour supporter les miroirs

Des moteurs électriques sont placés sur l'axe de rotation des lignes afin d'assurer une poursuite du soleil toute au long de la journée.



Figure IV.11 : système de poursuite solaire

Les dimensions des paramètres de champ solaire sont présentées dans le tableau ci-dessous

Tableau IV.1: Dimensions des paramètres de champs solaire

Désignation du paramètre	Valeur (m)
Longueur d'un miroir	1.55
Largeur d'un miroir	0.50
Longueur du champ	8.18
Largeur du champ	3.30
Hauteur récepteur/miroirs	2.40

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

IV.6.2 Le récepteur

Les miroirs renvoient les rayons du soleil sur six tubes dans lesquels circule de l'eau, les tubes sont en cuivre, le tube fait 22mm de diamètre, et 1mm d'épaisseur.



Figure IV.12 : les six tubes récepteurs

Afin de maximiser le flux solaire réfléchis par les miroirs et produire un maximum d'énergie thermique, une plaque absorbante en Aluminium a été ajoutée au-dessous des tubes, elle a été soudée et jointée de tel sorte favoriser la conduction entre les tubes et cette dernière.



Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur



Figure IV.13 : Les étapes de fabrication et la fixation de la plaque absorbante

Pour bien assuré une absorption maximale de flux solaire réfléchi par les miroirs, deux autres plaques absorbantes ont été ajoutées dans les deux extrémités du récepteur, qui sont en contact direct avec les tubes

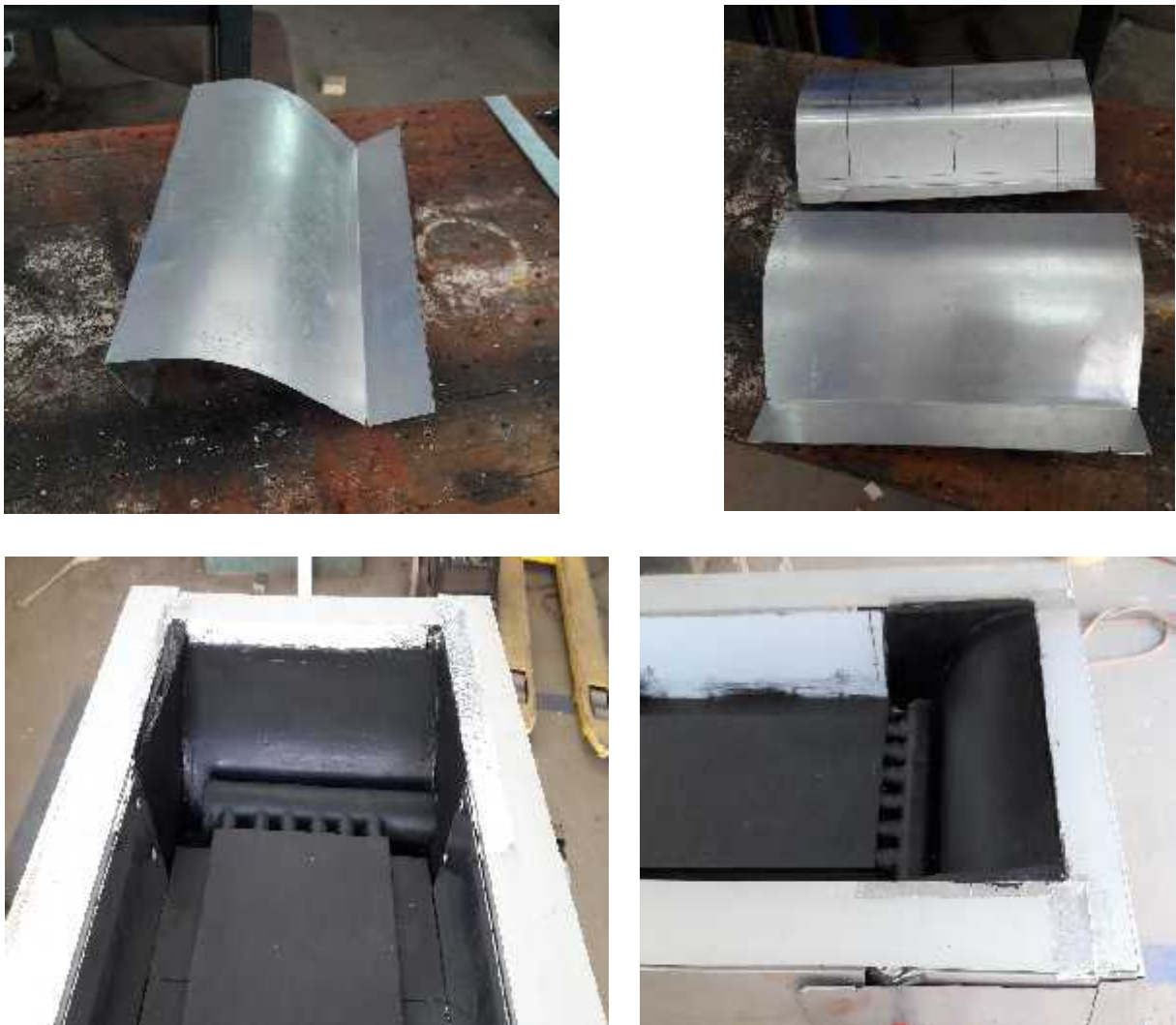


Figure IV.14 : Absorbants secondaires

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

La principale qualité recherchée pour ces tubes est une absorptivité dans le spectre solaire, alors une surface sélective a été créée sur les tubes et les plaques afin de maximiser l'absorption du flux solaire.

Un revêtement sélectif est un revêtement spécial de la surface absorbante, qui permet d'absorber entièrement le rayonnement solaire incident (bande du visible) auquel il est exposé. Le revêtement permet de réduire les pertes par rayonnement qui augmentent avec la température, et qui sont causées par la réflexion (émission) du rayonnement thermique (infra-rouge). Le revêtement sélectif serait donc plus intéressant pour les récepteurs à basse température (50 °C à 150 °C) et à moyenne température (250 °C à 400°C) afin d'accroître les échanges thermiques de la surface absorbante. Pour minimiser les pertes par rayonnement il faut tenir compte des paramètres suivants :

- La diminution de l'émissivité de cette surface en réalisant un revêtement sélectif ;
- La disposition d'une ou de plusieurs vitres au-dessus de la surface.

Afin de minimiser les pertes par convection et par rayonnement, la surface extérieure des tubes a été enduite par un revêtement en peinture de couleur noire mat avec une bonne absorptivité et une faible réflectivité, alors Ce revêtement à un double rôle :

- Il maximise l'absorption du rayonnement solaire concentré,
- Il réduit les pertes thermiques du tube chauffé en réduisant l'émissivité du tube dans l'infra-rouge.



Figure IV.15 : préparation du revêtement sélectif sur les tubes et la plaque

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

Afin d'évaluer la puissance thermique absorbée par l'eau ainsi que les pertes thermiques au niveau de notre récepteur solaire, quatre thermocouples de type K ont été introduit : l'un à l'entrée pour mesurer la température de l'eau à l'entrée des tubes, le deuxième à la sortie afin de mesurer la température de l'eau à la sortie. Les deux autres ont été introduits au milieu du récepteur pour estimer les pertes thermiques au niveau de ce dernier



Figure IV.16 : Emplacement des différents thermocouples

Connaissant la surface totale des miroirs, on peut calculer la puissance en entrée. Pour calculer la puissance en sortie, on va devoir distinguer deux phases de fonctionnement. La première phase sera la montée en température, et donc en pression, du récepteur, et la seconde sera la production de vapeur. Lors de la montée en température, l'eau circule en boucle fermée, et l'énergie récupérée du soleil équivaut à :

$$Q = m_{\text{eau}} * C_p * \Delta T_{\text{tubes récepteurs}} \quad (\text{IV.1})$$

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

Avec : Q : l'Energie récupérée du soleil, m_{eau} : masse d'eau.

cp : capacité calorifique, T : différence de température des tubes.

Pour ces mesures, on doit introduire sur le prototype un débitmètre sur la boucle de circulation, et d'un capteur de température en entrée et en sortie des tubes récepteurs.

Pour réduire au maximum les pertes thermiques au niveau de notre récepteur, deux types d'isolants thermiques ont été utilisés à savoir : la laine de verre et les panneaux sandwich. Les pertes sont généralement radiatives et convectives. L'isolant a été introduite entre la tôle protectrice (bardage), le réflecteur secondaire et au-dessus de l'absorbeur.



Figure IV.17 : l'isolation thermique

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

Les différents matériaux et paramètres optiques sont définis dans le tableau ci-dessous

Tableau IV.2 : matériaux et paramètres optiques

Paramètres	Matériaux	Réflectivité	Absorptivité	Transmittivité
Champ de miroir	Miroirs ordinaire	87%		
Tubes absorbeurs	cuivre		85%	45%
Réflecteur secondaire	Inox	83%		
Couverture transparente	vitre ordinaire	5%		91%

Un réflecteur secondaire a été introduit dans notre récepteur, son rôle est renvoyé sur le tube les rayons qui aurait raté le tube. C'est une tôle mince en Inox, dont sa géométrie a été optimisée d'une manière très précise (technique de Ray-Tracing ou traçage de rayons) où les étapes de l'optimisation de sa géométrie ont été détaillées dans le chapitre précédent.



Figure IV.18 : Le réflecteur secondaire

Une couverture transparente a été placée au-dessous des tubes, elle permet d'isoler le récepteur de l'extérieur, et ainsi diminuer les pertes thermiques dans l'infrarouge, tout en laissant passer au mieux les rayons provenant des miroirs. En enfermant l'absorbeur dans une enceinte recouverte de verre, on réduit les pertes radiatives pour cette gamme de température. De plus,

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

l'utilisation du verre permet de créer un environnement clos ce qui permet également de limiter les pertes convectives.



Figure IV.19 : Le récepteur avec sa couverture transparente (vitrage)

le tableau rassemble les principaux paramètres de la géométrie du récepteur

Tableau IV.3 : principaux paramètres de la géométrie du récepteur

Désignation du paramètre	Valeur (m)
Longueur du récepteur	3.35
Largeur du récepteur	0.5
Largeur du réflecteur secondaire	0.1
Epaisseur de la vitre	0.005
Diamètre d'un tube	0.022

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

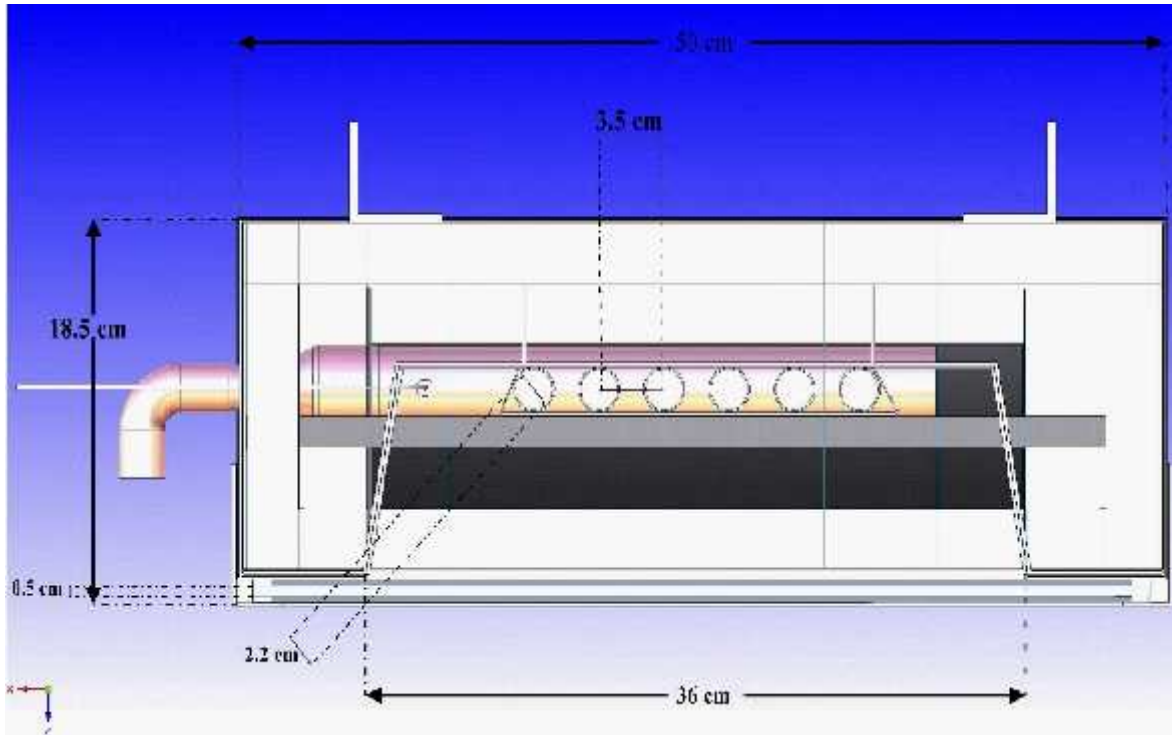


Figure IV.20 : les différentes dimensions du récepteur

La partie haute du récepteur est constituée du carénage en aluminium, qui assure la rigidité du récepteur, en protégeant l'isolation thermique, le vitrage, les tubes, ainsi que les réflecteurs secondaires.



Figure IV.21 : le bardage ou le casing

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

Après avoir finalisé notre récepteur thermique en lui plaçant tous les éléments nécessaires, nous l'avons déplacé à la plateforme des tests et le déposer sur la structure.



Figure IV.22: la structure sans le récepteur et les réflecteurs

Afin de bien positionner notre récepteur, nous avons en premier lieu testé la focalisation en effectuant des mouvements manuels des réflecteurs en visualisant l'image produite par le soleil au niveau du récepteur. Pour le moment nous avons uniquement testé une seule ligne, cette dernière contient deux modules, nous avons en premier lieu utilisé des miroirs ordinaires d'une réflectivité 87%, vu que les miroirs traités qui sont utilisés spécialement dans le domaine du solaire ne sont pas disponibles actuellement.

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur



Figure IV.23 : réglage visuel de la focalisation

Enfin, après avoir très bien positionné la structure du récepteur, nous l'avons placé et fixé sa structure, toute en gardant la structure mobile comme expliqué au début de chapitre.



Figure IV.24 : mise en place du notre récepteur thermique

Chapitre IV

Conception mécanique et réalisation du récepteur

IV.7 Conclusion

La construction du récepteur thermique pour système à concentrateur linéaire de Fresnel s'est très bien déroulée et sans trop de difficultés, et cela grâce aux facilités que nous avons rencontrés au niveau de l'UDES, ainsi que la grande aide assurée par notre tuteur de stage au niveau de cette dernière.

Nous avons décrit et présenté toutes les étapes de construction de notre récepteur, cette description est illustrée par des images réelles et des conceptions DAO.

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

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude, optimisation et réalisation d'un récepteur solaire pour un prototype solaire à concentrateur linéaire de Fresnel situé à l'unité de développement des équipements solaire (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 le principe du solaire thermodynamique a été présenté, et dans la dernière partie du chapitre nous avons présenté un état de l'art et un état des lieux des concentrateurs linéaires de Fresnel, et plus précisément les récepteurs thermiques où nous avons discuté toutes les configurations existantes et leurs performances. A travers cette étude approfondie effectuée on a constaté que plusieurs chercheurs et entreprises s'intéressent à cette technologie, vu à ses avantages, et son aptitude à être une excellente alternative des centrales solaire conventionnelles.

Le rayonnement solaire l'acteur principal du travail, a fait l'objet du deuxième chapitre, où nous avons donné quelques définitions des paramètres astronomiques, ainsi que les différents paramètres qui influent sur le rayonnement solaire.

Dans le chapitre 3, dans la première partie quelques notions de bases sur les lois de l'optique des concentrateurs solaires ont été données, dans la seconde partie, nous avons présenté les étapes suivis pour optimiser la forme de notre réflecteur secondaire. Ce dernier joue un rôle primordial dans les performances de notre installation, où nous sommes arrivés à optimiser la forme du réflecteur secondaire avec un rendement optique de notre récepteur thermique qui atteint les 100 %.

Après avoir étudié, dimensionné et optimisé les paramètres de notre récepteur, nous sommes arrivés à l'étape de la réalisation, où nous avons très bien expliqué tous ces étapes dans le chapitre 4 avec des photos illustratives prise à chaque étape. Nous sommes arrivées à un récepteur thermique qui peut atteindre le changement de phase très facilement, vu à la très bonne conception des tubes et de la plaque qui a permet de favoriser l'absorption et atteindre des températures importantes. Sur la base de cette étude, on peut conclure que :

- La réalisation des systèmes à concentration est un peu compliquée, nous avons rencontré quelques problèmes, en particulier le réglage des concentrateurs pour obtenir

l'image sur la ligne focale du récepteur, et cela à cause de la position du soleil dans la saison hivernale, où le soleil est bas sur l'horizon.

- 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 voie sensibles).

Notre objectif principal dans ce travail était uniquement pour l'étude, l'optimisation et la réalisation du récepteur, ce travail a duré quatre mois pour obtenir un récepteur très bien réalisé et très performant, qui est très bien isolé thermiquement, et son rendement thermique très élevé. On voulait effectuer des tests afin d'évaluer l'énergie utile du récepteur en mesurant la température d'entrée et celle de sortie, ainsi que le débit d'eau qui entre, et bien sûr avec une évaluation du rendement thermique de ce dernier, mais nous avons rencontré une contrainte qui est les conditions météorologiques qui étaient défavorables durant une quinzaine de jours du mois de Décembre dernier. Pour cette raison nous proposons comme perspectives dans des futurs projets de recherche afin d'améliorer les performances de notre prototype solaire :

- Effectuer des tests sur afin d'évaluer les différentes performances du récepteur
- 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)
- 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 lisser la production fonctionnelle même pendant la nuit.

Références

- [1] James P.Dorian, Herman T.Franssen, Dale R.Simbeck. Global challenges in energy. Energy Policy.34 (2006).
- [2] Jan Kjarstad, FilipJohnsson. Resources and future supply of oil. Energy Policy. 37 (2009) 441–446.
- [3] Tara C. Kandpal, Lars Broman. Renewable energy education: A global status review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. (2014).
- [4] Noam Lior. Energy resources and use: The present situation and possible paths to the future. Energy. (2008).
- [5] François Veynandt, Cogénération hélio-thermodynamique avec concentrateur linéaire de Fresnel : modélisation de l'ensemble du procédé Thèse, 1er Décembre 2011.
- [6] Quoilin Sylvain, Les Centrales Solaires à Concentration, Mémoire, Mai 2007.
- [7] Pye, J.D., Morrison, G., Behnia. M., 2003. Transient modeling of cavity receiver heat transfer for the compact linear Fresnel reflector. In: Proceedings of ANZSES Solar 2003. Melbourne, Australia.
- [8] Housseyn KAROUA, Etude des performances thermiques d'un capteur solaire avec effet de concentration de type Fresnel, Mémoire, Octobre 2011.
- [9] P. Tsekouras, C. Tzivanidis, K. Antonopoulos, Optical and thermal investigation of a linear Fresnel collector with trapezoidal cavity receiver, Memoir, February 2018.
- [10] Imad Eddine Meriche, Simulation et Modélisation d'Installation de Type Solaire thermodynamique Hybride, THÈSE, 2017.
- [11] Mohamed H. Ahmed and Amr M. A. Amin, Thermal Analysis of the Performance of Linear Fresnel Solar Concentrator, Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 4, No. 5, September 2016.
- [12] F. Eddhibi¹, M. Ben Amara¹, M. Balghouthi¹, A.A. Guizani¹, Analytic optical design of a Linear Fresnel solar collector with variable parameters, article, 2017.
- [13] Fresnel lens theoretical analysis, Article, Chapter 2

Références

- [14] Anthro Power, Linear Fresnel Reflector based Solar System Operations & Maintenance Manual, UNDP-GEF Project on Concentrated Solar Heat Ministry of New & Renewable Energy Government of India, November, 2014.
- [15] F. Harouadi, B. Mahmah, M. Belhamel, S. Chader, A. M’Raoui et C. Etievant Les potentialités d’exploitation d’hydrogène solaire en Algérie dans un cadre euro – maghrébin Partie : Phase d’étude d’opportunité et de faisabilité, article 2007.
- [16] RAMADJI Frederick, contribution à la conception et dimensionnement d’un récepteur linéaire pour un concentrateur solaire de type linéaire Fresnel, Mémoire, Octobre 2015.
- [17] F.Yanga, D.Itskhokinea, S.Benmarrazea, M.Benmarrazea, Acceptance testing procedure for Linear Fresnel Reflector solar systems in utility-scale solar thermal power plants, article (2015).
- [18] Gianni Ferretti Giambattista Grusso Gianantonio Magnani Manuele Redaelli Paolo Rocco Guido Guardabassi, Mechatronic Design of the Sun Tracking System of a Linear Fresnel Reflector Solar Plant, article, 2010.
- [19] Mills, D.R., Morrison, G.L., 2000. Compact linear Fresnel reflector solar thermal power plants. *Solar Energy* 8,263–283.
- [20] P.L. Singh, S. Ganesan, G.C. Yàdav, Performance study of a linear Fresnel concentrating solar device, *Renewable Energy*, Volume 18, Issue 3,1999, Pages 409-416,ISSN 0960-1481, [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00805-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00805-2).
- [21] H. Zhai, Y.J. Dai, J.Y. Wu, R.Z. Wang, L.Y. Zhang, Experimental investigation and analysis on a concentrating solar collector using linear Fresnel lens, *Energy Conversion and Management*, Volume 51, Issue 1, 2010,Pages 48-55, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.018>.
- [22] Panna Lal Singh, R.M. Sarviya, J.L. Bhagoria, Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers, *Applied Energy*,Volume 87, Issue 2, 2010, Pages 541-550, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.019>.
- [23] Madeline Hack, Guangdong Zhu, Tim Wendelin, Evaluation and comparison of an adaptive method technique for improved performance of linear Fresnel secondary

Références

designs, *Applied Energy*, Volume 208, 2017, Pages 1441-1451, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.009>.

[24] Seyed Abbas Taher, Masoud Hajiakbari Fini, Saber Falahati Aliabadi, Fractional order PID controller design for LFC in electric power systems using imperialist competitive algorithm, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 5, Issue 1, 2014, Pages 121-135, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.07.006>.

[25] T. Osório, P. Horta, M. Collares-Pereira, Method for customized design of a quasi-stationary CPC-type solar collector to minimize the energy cost, *Renewable Energy*, Volume 133, 2019, Pages 1086-1098, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.110>.

[26] A. Heimsath, G. Bern, D. van Rooyen, P. Nitz, Quantifying Optical Loss Factors of Small Linear Concentrating Collectors for Process Heat Application, *Energy Procedia*, Volume 48, 2014, Pages 77-86, ISSN 1876 6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.010>.

[27] Guangdong Zhu, New adaptive method to optimize the secondary reflector of linear Fresnel collectors, *Solar Energy*, Volume 144, 2017, Pages 117-126, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.005>.

[28] M.A. Moghimi, K.J. Craig, J.P. Meyer, A novel computational approach to combine the optical and thermal modelling of Linear Fresnel Collectors using the finite volume method, *Solar Energy*, Volume 116, 2015, Pages 407-427, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.014>.

[29] YVES JANNOT « thermique solaire » janvier 2007 et octobre 2003.

[30]. J.A. Duffie, J.W. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, s.l : Inc, 1991.

[31]. M. Iqbal. *An Introduction to solar Radiation*, Toronto: Academic Press, 1983.

[32]. M. Geyer, and, W.B. Stine, *Power From the Sun*. s.l. : J.T. Lyle , 2001.

[33]. J.M Chassériau. *Conversion thermique du rayonnement solaire*. s.l. : Dunod, 1984.

[34]. [En ligne] [Citation : 28 4 2015.]

<http://fr.academic.ru/pictures/frwiki/72/HelioCampbell.jpg>.

Références

[35]. [En ligne] [Citation : 1 04 2015.]

http://www.kippzonen.fr/data/uploads/product/04_Sun_Trackers_01_SOLYS_2_04_Detail_2.jpg.

[36]. C.Vauge, C.P.de Brichaumbot et. Le gisement solaire. Paris : Tech. & Doc., 1982.

[37]. Bernard, J. Energie solaire Calculs et optimisation. s.l. : ellipses, 2004.

[38]. P.I.COOPER. The absorption of solar radiation in solar stills. 1969.

[39]. A.ZEROUAL. Contribution à l'étude statistique des données solaires au site de Marrakech. Université CADI AYYAD. 1988. Diplôme d'études supérieures de 3eme cycle sciences physique, spécialité traitement de signal.

[40]. A.SMAILI. Solaire basses températures, Cours master 2ème année G.M Energétique, ENP, Alger : s.n., 2013/2014.

[41]. BEKKOUCHE, S.M.A. Modélisation du Comportement Thermique de. Electronique et Modélisation, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAÏD. TELEMEN : s.n., 2009.

[42] R. B. Slama, « Mesure et calcul du rayonnement solaire », Journal tunisien de l'énergie, vol. 44, 1997, p. 37-43.

[43] R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, « The Solar Radiation, Thermal Conversion and Applications », 2e édition, Technique et documentation, Paris, 1980.

[44] Y. Tripanagnotopoulos et M. Souliotis, « ICS Solar Systems with Two Water Tanks », Renewable Energy, Vol. 31, n° 11, 2006, p. 1698-1717. doi:10.1016/j.renene.2005.08.028.

[45] Stavros Karathanasis, Linear Fresnel Reflector Systems for Solar Radiation Concentration Theoretical Analysis, Mathematical Formulation and Geometric Optics Parameters' Computation using MATLAB, Springer Nature Switzerland AG 2019.

Résumé

Le présent travail consiste à étudier et à réaliser un récepteur à cavité trapézoïdale pour un capteur solaire à concentration linéaire de Fresnel, ce dernier est monté sur un prototype de 27 m² de surface. Le récepteur en question est composé de 06 tubes surmontés d'un réflecteur secondaire trapézoïdal et un vitrage en verre trompé de 3m de longueur et de 45 cm de largeur. La forme de ce réflecteur secondaire est optimisée, ce qui a permis d'avoir une absorption maximale du flux réfléchi par les miroirs sur les tubes absorbeur. L'isolation de l'absorbeur est aussi étudiée pour assurer le minimum de pertes thermiques.

Mots clés : énergie solaire, concentration solaire, concentrateur linéaire de Fresnel, récepteur solaire, focalisation, pertes optiques, pertes thermiques.

Abstract

The present work consists in characterizing to study and realize a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar concentrator, the latter is mounted on a prototype of 27 m² of surface. The receiver is composed of 06 tubes surmounted by a trapezoidal secondary reflector and a glass trumpet of 3m in length and 45 cm in width. The shape of this secondary reflector is optimized, which allows having a maximum absorption of the flux reflected by the mirrors on the absorber tubes. The insulation of the absorber is also studied to ensure the minimum of thermal losses.

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

تهدف هذه المذكرة الى دراسة وتصميم مستقبل شمسي ذو تجويف شبه منحرف من نوع فريزل، هذا المستقبل صمم من أجل تثبيته على نموذج أولي ذو مساحة 27².

المستقبل المدروس مكون من ستة أنابيب، زيادة على ذلك يتكون من عاكس ثانوي ذو تجويف شبه منحرف أيضا، وزجاجة تستعمل خصيصا.

تصميم العاكس الثانوي قد درس نظرية دقيقة جدا وهذا ما سمح بامتصاص أكبر قدر من الاشعاع المنعكس من طرف الأنابيب المستقبلية.

كما قمنا أيضا بدراسة وادماج مواد عازلة للحرارة وهذا من أجل التقليل لأكبر قدر ممكن من الضياع الحراري للم.

الكلمات المفتاحية: طاقة شمسية، تركيز شمسي، مركز شمسي من نوع فريزل، مستقبل شمسي، ضياع بصري، ضياع حراري، تركيز.