

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologie*

Filière : **Energies renouvelables**

Spécialité : *Energies renouvelables en électrotechnique*

Par : KHAREF Zaidane, ZEGHBACHE Yazid

Thème

**Etude et Réalisation d'un Moteur Stirling avec Concentrateur
Solaire**

Soutenu publiquement le : 24 /06 /2018

Devant le jury :

ZITANI Brahim	Maître Assistant B	Univ. Ghardaïa	Président
YETTOU Fatiha	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	Examineur
AKERMI Faouzi	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	Examineur
GAMA Amor	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2017/2018

Remerciement

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH, le tout puissant et miséricordieux qui nous aide et qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, conscients, d'un grand nombre de personnes.

Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement Dr. GAMA Amor qui nous a permis de bénéficier de son encadrement. Les conseils qu'il nous a prodigués, la patience, la confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail de recherche.

Nous remercierons également le Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa), Dr DJAFER Djelloul ; qui nous a permis de réaliser ce travail au sein de l'URAER ainsi que pour son bon accueil.

Nous remercions également toute l'équipe mini centrale thermodynamique de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa pour leur accueil, leur esprit d'équipe et en particulier Dr YETTOU, Dr KHKIFI, Mr GHRICI, Mr BEZZA, qui nous ont beaucoup aidés à comprendre la problématique de notre sujet.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants et enseignantes de la faculté des Sciences et Technologies qui nous ont enseignés et qui par leurs compétences nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à Mr. KHEREF Mohamed et aux tourneurs Mr. BEN KHLIFI Ammar et Mr Jamal pour le matériel qu'ils ont mis à nos dispositions pour la réalisation du concentrateur solaire et le moteur Stirling.

Enfin, nous n'oserions oublier de remercier nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère et mon noble père, dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont permis de vivre ce jour.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois l'amour et de la reconnaissance :

A mon frère WALID et à ma sœur NOUR ELHODA

A tous les membres de CAST et mes amis sans exception « Merci pour tous les bons moments qu'on a passé ensemble ».

Et en particulier je dédie ce modeste mémoire à mon frère et mon binôme KHAREF Zidane.

ZEGHBACHE Yazid.

DEZ #

Je dédie ce mémoire :

A mes parents :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et il trouvera ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

A mes frères *MOKHTAR et SADAK* et mes sœurs *ROKIA et MABROKA* qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A tous les membres de CAST et mes amis sans exception.

Et en particulier je dédie ce modeste mémoire à mon frère et mon binôme ZEGHBACHE Yazid.

KHAREF Zidane

RESUME

La conversion indirecte de l'énergie solaire en énergie électrique exploite l'effet thermique des rayons solaires, l'énergie solaire est transformée en énergie mécanique utilisant les cycles thermodynamiques. Le moteur Stirling est l'un des meilleurs systèmes de conversion d'énergie solaire thermique. Dans ce travail, nous avons proposé de réaliser un moteur Stirling solaire. Nous avons commencé par la réalisation d'un concentrateur parabolique doté d'un système de poursuite solaire à deux axes de rotations, la commande de ce système est assurée par une carte électronique à base d'Arduino Uno est réalisée à cet effet, un moteur Stirling est également réalisé et placé sur le foyer du concentrateur parabolique. Des tests sont effectués sur le moteur Stirling et sur le concentrateur parabolique. Le système a montré une efficacité et fiabilité remarquable, il est capable de fonctionner sous notre climat. En perspective, on compte améliorer et développer ce dispositif avec de nouvelles idées.

Mots clés : Moteur Stirling, Concentrateur parabolique, Système de poursuite solaire, Carte Arduino, Solaire thermique.

ABSTRACT

The indirect conversion of solar energy into electrical energy exploits the thermal solar rays effect, solar energy is transformed into mechanical energy using thermodynamic cycles. The Stirling engine is one of the best solar thermal energy conversion systems. In this work, we proposed to realize a solar Stirling engine. We began by realizing a parabolic concentrator equipped by a solar tracking system with two rotation axis, the system control is provided by an electronic board based on Arduino Uno, an engine Stirling is also made and placed on the focus of the parabolic concentrator. Tests are done on the Stirling engine and the parabolic concentrator. The system has shown remarkable efficiency and reliability, and it is able to operate under our climate. In perspective, we plan to improve and develop this device with new ideas.

Key words: Stirling engine, Parabolic Concentrator, sun tracking system, Arduino board, Solar thermal.

ملخص

إن التحويل غير المباشر للطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية يستغل تأثير الأشعة الشمسية الحرارية، حيث يتم تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة ميكانيكية باستخدام دورات ديناميكية حرارية. يعتبر محرك ستيرلينغ واحدًا من أفضل أنظمة تحويل الطاقة الحرارية الشمسية. في هذا العمل ، اقترحنا صناعة محرك ستيرلينغ يشتغل بالطاقة الشمسية. لقد بدأنا من خلال صناعة مركز شمسي مجهز بنظام تتبع شمسي مع محورين دوران ، يتم التحكم في هذا النظام من خلال لوحة إلكترونية مبنية على اساس Arduino Uno ، كما تمت صناعة محرك Stirling وتركيبه على المركز الشمسي. كذلك تم إجراء بعض الاختبارات على المحرك ستيرلينغ والمركز الشمسي. حيث أظهر النظام كفاءة وموثوقية ملحوظة ، وهو قادر على العمل في ظل مناخنا. في المستقبل ، نخطط لتحسين وتطوير هذا الجهاز بأفكار جديدة.

كلمات مفتاحية: محرك ستيرلينغ, مركز شمسي, نظام تتبع الشمس, بطاقة اردوينو, الطاقة الشمسية الحرارية.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	i
LISTE DES TABLEAUX	iv
NOMENCLATURES	v
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1 : Généralité sur le Solaire Thermodynamique	3
1.1 Introduction	3
1.2 Energie solaire.....	4
1.2.1 Le Soleil.....	4
1.2.2 Rayonnement solaire	4
1.2.3 Le potentiel solaire dans le monde	5
1.2.4 Ressource solaire de l'Algérie.....	7
1.3 Historique du solaire thermodynamique	8
1.4 Solaire thermodynamique à concentration.....	11
1.4.1 Concentrateurs cylindo-parabolique.....	12
1.4.2 Centrale à tour	12
1.4.3 Linéaire de Fresnel	13
1.4.4 Concentrateurs paraboliques / Stirling.	14
1.5 Cycles thermodynamiques utilisés dans les centrales thermiques	14
1.5.1 Cycle BRAYTON	14
1.5.2 Cycle à vapeur	15
1.5.3 Cycle RANKINE.....	16
1.5.4 Cycle combiné	16
1.5.5 Cycle de STIRLING.....	17
1.6 Conclusion.....	18
Chapitre 2: Etude théorique du moteur Stirling	20
2.1 Introduction	20
2.2 Le Moteur Stirling.....	20
2.2.1 Histoire des moteurs à cycle de Stirling	21
2.3 Principe de fonctionnement du moteur Stirling	24
2.4 Types des moteurs Stirling.....	24
2.4.1 Moteur Stirling BETA.....	24
2.4.2 Moteur Stirling GAMMA.....	25

2.4.3 Moteur Stirling ALPHA	26
2.5 Cycle Stirling	27
2.5.1 Cycle Stirling idéal	27
2.5.2 Cycle Stirling réel	31
2.5.2.1 Pistons oscillants	32
2.5.2.2 Volumes morts	32
2.5.2.3 Chambres non isothermes	32
2.6 Analyse de Schmidt	32
2.7 Application de moteur Stirling	37
2.8 Conclusion	38
Chapitre 3 : Etude Théorique du concentrateur solaire parabolique	40
3.1 Introduction	40
3.2 Technologies solaires à concentration	40
3.3 Etude théorique du concentrateur parabolique	42
3.3.1 La géométrie parabolique	42
3.3.1.1- Définition	42
3.3.1.2 Angle d'ouverture d'une parabole	43
3.3.1.3 Taille d'une parabole	44
3.3.1.4 Surface d'une parabole	44
3.3.1.5 Longueur d'une parabole	45
3.3.2 Facteurs de concentration	45
3.4 Système de poursuite solaire	46
3.4.1 Aspects géométriques	46
3.4.1.1 La longitude λ	46
3.4.1.2 La latitude φ	46
3.4.1.3 La déclinaison solaire δ	46
3.4.1.4 L'angle horaire ω	47
3.4.1.5 Hauteur angulaire h	47
3.4.1.6 Azimut a	48
3.4.2 Les coordonnées horaires	48
3.4.3 Les différents types de suiveur solaire	49
3.4.3.1. Suiveur solaire à un seul axe	50
3.4.3.2 Suiveur solaire à deux axes	50

3.4.4 Mécanisme et plateforme d'un système de poursuite solaire.....	51
3.4.5 Méthodes du suivi de poursuite solaire.....	53
3.4.5.1 Méthode du suivi avec Capture LDR.....	53
3.4.5.2 Méthode de la poursuite automatique (suivi aveugle).....	53
3.5 Conclusion.....	55
Chapitre 4 : Réalisation du Moteur Stirling et Concentrateur Parabolique	57
4.1 Introduction.....	57
4.2 Dimensionnement et conception mécanique du moteur Stirling Alpha.....	57
4.2.1 Dimensionnement du moteur Stirling Alpha.....	57
4.2.1.1 Volume balayé par le déplaceur <i>VSE</i> , et le piston <i>VSC</i>	58
4.2.1.2 Volumes morts <i>VD</i>	59
4.2.2 Conception mécanique du moteur Stirling Alpha.....	59
4.2.3 Réalisation du moteur Stirling Alpha.....	60
4.2.3.1 Chemise de piston.....	61
4.2.3.2 Cylindres de déplaceur.....	61
4.2.3.3 Vilebrequin.....	62
4.2.4 Assemblage de moteur Stirling Alpha.....	63
4.3 Réalisation du concentrateur parabolique avec système de poursuite solaire.....	64
4.3.1 Mécanismes et structure porteuse.....	64
4.3.2.1 Réflecteur parabolique.....	67
4.3.2 Système de poursuite solaire.....	68
4.3.2.1 Capteur LDR.....	68
4.3.2.2 Partie de commande.....	69
4.4 Tests et Résultats.....	72
4.5 Conclusion.....	76
CONCLUSION GENERALE	78
BIBLIOGRAPHIE	81

LISTE DES FIGURES

Figure.1.1	Distribution spectrale du rayonnement solaire, en dehors de l'atmosphère et au sol.....	05
Figure.1.2	Ressources annuelles d'énergie solaire.....	06
Figure.1.3	Représentation des surfaces qu'occuperaient des centrales Thermo solaires dans le Sahara.....	06
Figure.1.4	Le potentiel solaire en l'Algérie.....	07
Figure.1.5	La controverse des miroirs ardents.....	08
Figure.1.6	Pompe à feu de <i>Thomas Savery</i>	09
Figure.1.7	Miroir composé de <i>Buffon</i>	09
Figure.1.8	Four solaire de <i>Lavoisier</i>	10
Figure.1.9	Premier moteur <i>Stirling</i>	10
Figure.1.10	Pompe solaire de <i>Mouchot</i> (Alger, 1879).....	11
Figure.1.11	Centrale cylindo-parabolique.....	12
Figure.1.12	Centrale à tour.....	13
Figure.1.13	Centrale à Linéaire de Fresnel.....	13
Figure.1.14	Centrale parabolique à moteur <i>Stirling</i>	14
Figure.1.15	Cycle <i>Brayton</i>	15
Figure.1.16	Cycle à vapeur.....	15
Figure.1.17	Cycle <i>Rankine</i>	16
Figure.1.18	Cycle combiné.....	17
Figure.1.19	Cycle de STIRLING.....	17
Figure.2.1	Moteur Stirling Béta.....	25
Figure.2.2	Moteur Stirling Gamma.....	26
Figure.2.3	Moteur Stirling Alpha.....	27
Figure.2.4	Diagramme thermodynamique d'un moteur Stirling.....	27
Figure.2.5	Cycle Stirling, disposition des pistons et diagramme de déplacement.....	28
Figure.2.6	Cycle Stirling réel.....	31
Figure.2.7	Variations dans les espaces d'expansion et de compression.....	33
Figure.3.1	Les principales filières solaires à concentration.....	41
Figure.3.2	Propriétés géométriques de la parabole.....	43

Figure.3.3	Section d'une parabole possédant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture d	44
Figure.3.4	Schématisme des mouvements de la Terre autour du Soleil.....	46
Figure.3.5	Angle horaire ω du soleil.....	47
Figure.3.6	Hauteur angulaire h et azimut a du soleil.....	48
Figure.3.7	Système de poursuite solaire a deux axes utilisant des actionneurs indépendants dans diverses configurations.....	52
Figure.3.8	Système de poursuite solaire du concentrateur de McDonnell Douglas avec une plate-forme de type contre balance.....	52
Figure.3.9	Capteur de positionnement LDR.....	53
Figure.3.10	Système de poursuite automatique.....	54
Figure.3.11	Organigramme de commande de système de poursuite solaire aveugle.....	54
Figure.4.1	Les valeurs proportionnelles de moteur Stirling.....	58
Figure.4.2	Pièces des moteurs Stirling en 3D.....	60
Figure.4.3	Assemblage de moteur Stirling en 3D.....	60
Figure.4.4	Chemise de piston réalisé.....	61
Figure.4.5	Cylindre de déplaceur réalisé	62
Figure.4.6	Vilebrequin du moteur Stirling.....	63
Figure.4.7	Assemblage finale de moteur Stirling Alpha.....	64
Figure.4.8	Conception mécanique du concentrateur sur SolidWorks.....	65
Figure.4.9	Différentes parties du système à concentration.....	66
Figure.4.10	L'emplacement des vérins dans notre système.....	67
Figure.4.11	Les étapes de réalisation du réflecteur parabolique.....	67
Figure.4.12	Dimensionnement de la tige avec l'emplacement des capteurs LDR.....	69
Figure.4.13	Simulation de la carte électronique du système de poursuite.....	70
Figure.4.14	Carte de commande du système de poursuite.....	70
Figure.4.15	Organigramme de poursuite solaire.....	71
Figure.4.16	premier test qui a été réalisé.....	72
Figure.4.17	Variation de la température en fonction du temps, de la journée 24/05/2018.....	73
Figure.4.18	Variation de la température en fonction du temps, de la journée 28/05/2018.....	74

Figure.4.19	Rayonnement solaire direct normal du 28/05/2018.....	74
Figure.4.20	Plaque réceptrice au niveau du foyer du concentrateur parabolique.....	75
Figure.4.21	Variation de la température en fonction du temps du 30/05/2018.....	75
Figure.4.22	Rayonnement solaire direct normal du 30/05/2018.....	76

LISTE DES TABLEAUX

Tab.1.1	Différents types des ondes.....	05
Tab.2.1	Diverses transformations majeures de moteur Stirling.....	22
Tab.3.1	Caractéristiques des dispositifs à concentration.....	42
Tab.4.1	Spécifications de la parabole réalisé.....	68
Tab.4.2	Caractéristiques de la plaque d'acier [10c45e70].....	73

NOMENCLATURES

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>unité</i>
p_1	Pression du gaz de travail dans l'espace froid	N/m^2
p_2	Pression du gaz de travail à l'entrée du régénérateur	N/m^2
p_3	Pression du gaz de travail dans l'espace chaud	N/m^2
p_4	Pression du gaz de travail à la sortie du régénérateur	N/m^2
Q_{1-2}	Quantité de chaleur sur la Processus 1-2 (compression isotherme)	j
Q_{2-3}	Quantité de chaleur sur la Processus 2-3 (chauffage isochore)	j
Q_{3-4}	Quantité de chaleur sur la Processus 3-4 (détente isotherme)	j
Q_{4-1}	Quantité de chaleur sur la Processus 4-1 (refroidissement isochore)	j
W_{1-2}	Travail sur la Processus 1-2 (compression isotherme)	j
W_{2-3}	Travail sur la Processus 2-3 (chauffage isochore)	j
W_{3-4}	Travail sur la Processus 3-4 (détente isotherme)	j
W_{4-1}	Travail sur la Processus 4-1 (refroidissement isochore)	j
U	Energie interne	j
T_{min}	Température minimal	K
T_{max}	Température maximale	K
V_1	Volume du gaz de travail dans l'espace froid	cc
V_2	Volume du gaz de travail à l'entrée du régénérateur	cc
V_3	Volume du gaz de travail dans l'espace chaud.	cc
V_4	Volume du gaz de travail à la sortie du régénérateur	cc
T_1	Température du gaz de travail dans l'espace froid	K
T_2	Température du gaz de travail à l'entrée du régénérateur	K
T_3	Température du gaz de travail dans l'espace chaud.	K
T_4	Température du gaz de travail à la sortie du régénérateur	K
r_v	Rapport de volume	--
R	Constatent universelle des gaz parfaites	$j/kg.K$
n	Nombre de mole	Mol
τ	Rapport de température	--
C_v	Gaz parfait diatomique	--
η	Efficacité thermodynamique du cycle de Stirling	%
V_{SE}	Volume balayé par le piston	cm^3
V_{SC}	Volume balayé par le déplaceur	cm^3

V_E	Volume de l'espace d'expansion	cm^3
V_C	Volume de l'espace de compression	cm^3
B_{dp}	Diamètre de déplaceur	mm
B_{pp}	Diamètre de piston	mm
S_{dp}	La course de déplaceur	mm
S_{pp}	La course de piston	mm
φ	Angle de phase	$^\circ$
α	Angle de vilebrequin	$^\circ$
v	Rapporte de volume	--
V_{DE}	Volume morte de l'espace d'expansion	cm^3
V_{DC}	Volume mort de l'espace de compression	cm^3
V_R	Volume de de Régénérateur	cm^3
m	Masse de fluide de travail	kg
T_E	Température de l'espace d'expansion	K
T_R	Température de de l'espace de compression	K
T_C	Température de de Régénérateur	K
t	Rapporte de température	--
m_i	Masse totale du fluide contenu dans le moteur	kg
m_E	masse de l'espace de détente	kg
m_C	masse de l'espace de compression	kg
m_R	masse de Régénérateur	kg
X_D	Rapporte de volume mort	--
Ψ	Angle d'ouverture	$^\circ$
p	Rayon parabolique	m
d	Diamètre d'ouverture	m
F	distance focale FV	m
d	Diamètre de l'ouverture de la parabole	m
h	Taille de la courbe parabolique	m
A_x	Surface d'une parabole	m^2
s_p	Longueur d'une parabole	m
C_G idéal	Facteur de concentration idéal	--
C_G	Facteurs de concentration	--
A_a	Surface d'ouverture	m^2
S_G	Surface de l'image de Gauss du soleil	m^2
S_*	Surface de l'image réelle du soleil dans le plan focal	m^2

C^*	Facteur de concentration énergétique	--
Q_g^*	Rayonnement moyen par unité de surface de l'image de Gauss du soleil	W/m^2
I_h^*	Rayonnement direct par unité de surface de la section d'ouverture du concentrateur	W/m^2

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le développement des pays est lié à leurs capacités de produire et de maîtrise d'énergies. L'énergie renouvelable est devenue un facteur énergétique très important vu sa durabilité, propreté et contribution à la protection de l'environnement. On peut classer l'énergie solaire selon le système de conversion adopté, le solaire photovoltaïque reste toujours la meilleure solution pour les petites et moyennes centrales malgré son rendement médiocre 14%. Le solaire thermodynamique est la meilleure solution vu son meilleur rendement 60%, le moteur Stirling fait partie de ce domaine, il est considéré parmi les meilleurs cycles est dispositifs de conversions des rayons solaires concentrés en énergie mécanique.

Dans ce travail nous avons proposé de réaliser un moteur Stirling avec un concentrateur solaire parabolique, nous avons commencé par l'étude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique avec une surface d'ouverture de 0.929 m^2 , le concentrateur est muni d'un système de poursuite solaire à deux axes de rotation. Egalement une carte électronique à base d'Arduino a été réalisée pour la commande instantanée du système de poursuite solaire. La deuxième partie de ce travail consiste à l'étude, dimensionnement, conception mécanique utilisant SOLIDWORKS et réalisation d'un moteur Stirling pour la conversion de l'énergie solaire collectée et concentrée par le réflecteur parabolique.

Ce document est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre décrit le rayonnement solaire dans le monde et le potentiel de l'énergie solaire en Algérie, expose l'histoire du solaire thermodynamique, classifie les différents systèmes de conversion thermodynamique et donne les différents cycles thermodynamiques qui sont utilisés dans les centrales thermiques. Le deuxième chapitre donne quelques généralités sur les moteurs Stirling, leurs diverses transformations majeures ainsi que leurs principes de fonctionnement, cite les différents types de moteurs Stirling, et détaille le cycle thermodynamique (Stirling) et ses différentes applications. Le chapitre trois présente la partie théorique du concentrateur parabolique et les systèmes de poursuite correspondent à ces concentrateurs. Le quatrième chapitre dédié à la partie conception et réalisation pratique du moteur Stirling et aussi le concentrateur parabolique avec sa structure porteuse et ces articulations mécaniques. L'étude et réalisation de la carte électronique de commande de système de poursuite solaire, quelques tests ont été réalisés afin de déduire l'efficacité du système réalisé.

Chapitre 1 : Généralités sur le Solaire
Thermodynamique

Chapitre 1 : Généralités sur le Solaire Thermodynamique

1.1 Introduction

De nos jours, la croissance de la demande énergétique mondiale et l'épuisement des ressources fossiles ont conduit à la recherche et au développement de l'exploitation d'autres sources d'énergie moins chères et non polluantes.

Comme l'énergie solaire est disponible naturellement et utilisable dans différentes applications, elle peut être présentée comme une alternative face à la crise mondiale d'énergie. De ce fait, des recherches ont été menées sur les procédés solaires tels que les technologies solaires à concentration qui sont caractérisées par des rendements énergétiques très importants. C'est pour cette raison, que l'augmentation de l'efficacité énergétique des procédés de concentration est devenue l'un des soucis de la plupart des chercheurs dans ce domaine.

La concentration solaire est actuellement utilisée pour produire de l'électricité. Il est donc pertinent d'envisager que ces technologies contribueront à moyen ou à long terme à offrir une véritable alternative à la consommation de ressources fossiles.

Dans ce chapitre nous allons décrire le rayonnement solaire dans le monde et le potentiel de l'énergie solaire en Algérie et nous exposerons l'historique du solaire thermodynamique, Ensuite, nous classerons les différents systèmes de conversion thermodynamique, et en dernier lieu nous allons expliquer les différents cycles thermodynamiques qui sont utilisés dans les centrales thermiques.

1.2 Energie solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable propre et inépuisable à l'échelle humaine. Elle présente plusieurs avantages non négligeables sur les autres sources énergétiques. Elle est locale, gratuite, propre, silencieuse et durable. 30% du rayonnement direct du soleil est réfléchi vers l'espace par l'atmosphère terrestre, et seulement 70% traversent l'atmosphère, et atteignent la terre. L'énergie solaire peut être utilisée sur toute la surface de la terre ou presque, il suffit donc de capter celle-ci et de l'utiliser. [1]

1.2.1 Le Soleil

Le Soleil, cet astre incandescent dont la température de surface est voisine de 5500°C , nous dispense chaleur et lumière. La distance de la Terre au Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000km/s ; les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir.

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m^2 (bien qu'elle varie de quelques % dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil). [2]

1.2.2 Rayonnement solaire

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie de $0.22\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$. Figure.1.1 représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement. Sur ce graphe on constate que pour $\lambda \leq 0.3\mu\text{m}$ et $\lambda \geq 1.5\mu\text{m}$ le rayonnement est négligeable alors que pour la partie visible du rayonnement, pour des valeurs entre 0.3 et $0.7\mu\text{m}$ l'absorption par l'atmosphère est faible. [03]

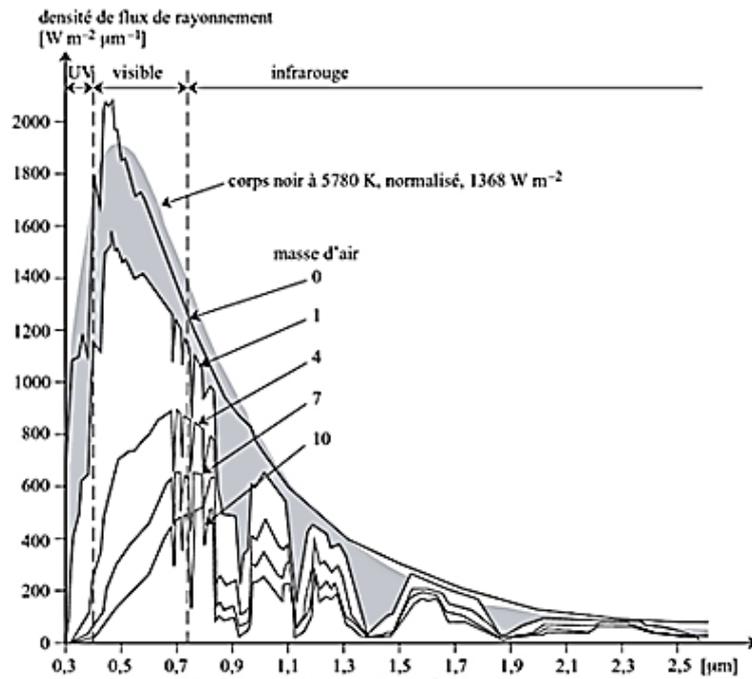


Fig1.1. Distribution spectrale du rayonnement solaire, en dehors de l'atmosphère et au sol [3]

Le tableau ci-dessous représente les principales ondes connues avec leurs longueurs d'onde, leurs fréquences et leurs usages [2].

Tab.1.1 Différents types des ondes

Type d'onde	Longueur d'onde	Fréquence	Usages
Ondes radio	$> 1 \mu\text{m}$	$< 3 \times 10^{11} \text{ Hz}$	Radio, TV, radars
Infrarouge	$1 \mu\text{m} \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$	$< 3 \times 10^{11} \text{ à } 4 \times 10^{14} \text{ Hz}$	Vision nocturne, télécommandes
Lumière visible	$0,8 \text{ à } 0,4 \mu\text{m}$	$3,7 \times 10^{14} \text{ à } 7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$	Vision diurne, photosynthèse
Ultraviolet	$0,4 \text{ à } 0,05 \mu\text{m}$	$7,5 \times 10^{14} \text{ à } 6 \times 10^{15} \text{ Hz}$	Purification de l'eau
Rayons X	$0,05 \mu\text{m} \text{ à } 10^{-2} \text{ \AA}$	$6 \times 10^{13} \text{ à } 3 \times 10^{20} \text{ Hz}$	Radiographie
Rayons gamma	$< 10^{-2} \text{ \AA}$	$> 3 \times 10^{20} \text{ Hz}$	-

1.2.3 Le potentiel solaire dans le monde

Les technologies solaires utilisant les systèmes à concentration pour la production électrique exigent l'ensoleillement normal direct. En conséquence, les endroits d'exploitation appropriés (Figure.1.2) sont situés dans les régions arides ou semi-arides de notre planète [03]. Les sources d'énergie renouvelables dans les pays au bord de la méditerranée à elles seules peuvent faire face à la demande énergétique mondiale croissante.

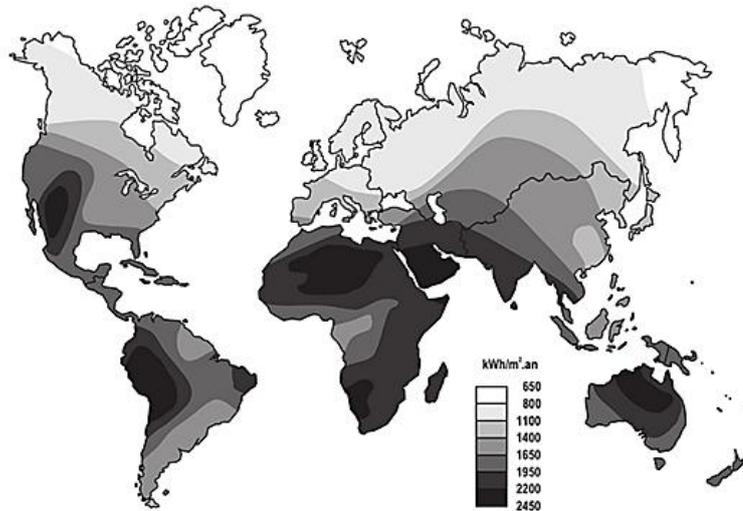


Fig.1.2. Ressources annuelles d'énergie solaire [03]

Il est aujourd'hui reconnu que "la plus grande ressource d'énergie techniquement accessible sur la planète est disponible dans les régions désertiques autour de l'équateur", d'une manière générale l'énergie solaire est la seule ressource énergétique renouvelable capable de pourvoir à la totalité de la demande énergétique mondiale sur le très long terme. Il est estimé que 1% de la surface des régions arides et semi-arides de la ceinture solaire terrestre (Figure.1.3) couverte de centrales solaires thermiques à concentration, en considérant 10 à 15 % de pertes en ligne, serait théoriquement suffisant pour fournir la demande actuelle mondiale en électricité. [04]

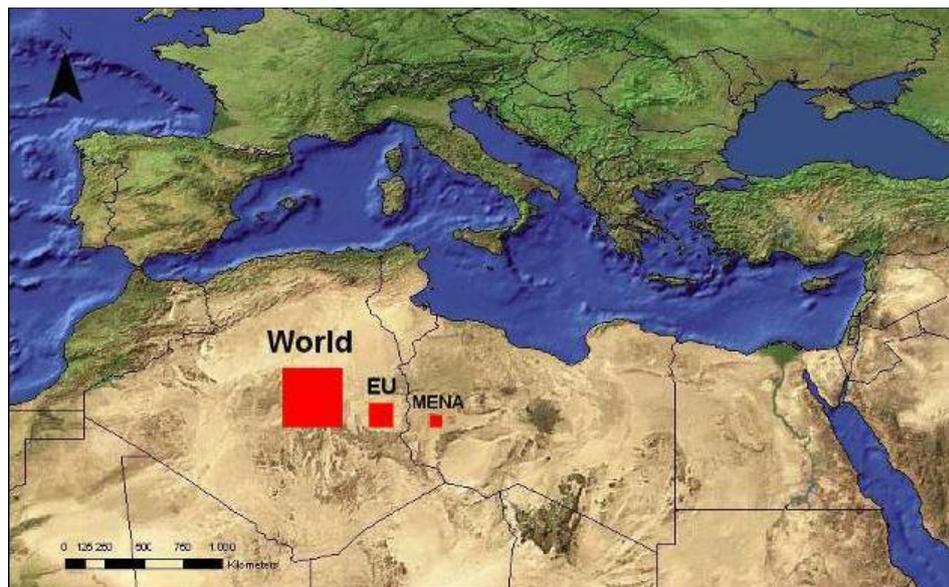


Fig.1.3. Représentation des surfaces qu'occuperaient des centrales Thermo solaires dans le Sahara [04]

Chapitre 1 : Généralités sur le Solaire Thermodynamique

Le projet DESERTEC-EUMENA estime possible d'ici à 2050 la construction au Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA : Middle East and North Africa) des centrales suffisantes, outre à fournir la demande locale, pour exporter 200GWe à 300GWe, vers l'Europe via des lignes à courant continu sous haute tension (ou HDVC: High-Voltage-Direct-Current), soit une capacité de 700TWh/an, autrement dit l'équivalent de la production d'électricité d'origine nucléaire de toute l'Europe en 2012. [04]

1.2.4 Ressource solaire de l'Algérie

L'Algérie est considérée comme l'un des pays les plus riches en matière d'énergie renouvelable (énergie solaire en particulier), le fait qu'elle se situe dans l'une des six régions les plus ensoleillées au monde. En plus, La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au sud du pays [5]. (Figure.1.4)

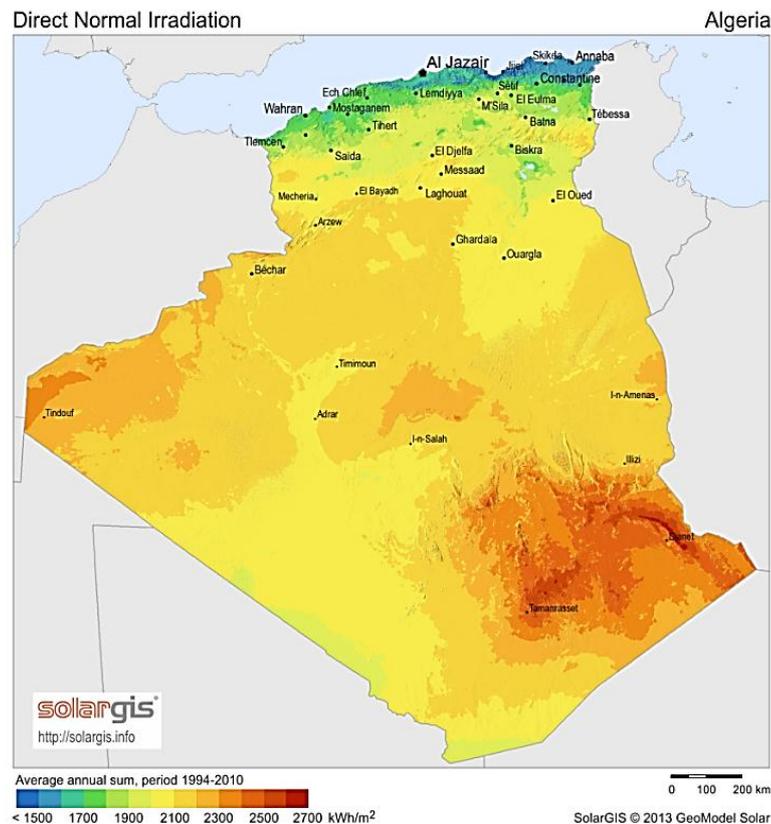


Fig.1.4. Le potentiel solaire en l'Algérie [5]

1.3 Historique du solaire thermodynamique

La connaissance empirique de l'énergie solaire remonte à la nuit des temps. Les égyptiens connaissaient le phénomène d'effet de serre depuis 3500 av.J.C (avant Jésus-Christ). *Socrate* a décrit les utilisations courantes du solaire passif au IV^eS av.J.C. [04]

Une légende de l'iniquité attribuée à *Archimède*, en (214-212 av. J.-C.), *Archimède* a détruit les navires ennemis avec les rayons solaires concentrés. Des siècles plus tard, *Anthemius* de Tralles mentionne des lunettes brûlantes comme l'arme d'*Archimède*. Le dispositif, parfois appelé le « rayon de chaleur d'*Archimède* », a été utilisé pour concentrer la lumière du soleil sur les navires qui approchent, les obligeant à prendre feu. Il a été suggéré qu'un large éventail de boucliers en bronze ou en cuivre très poli agissant comme des miroirs auraient pu être utilisés pour concentrer la lumière du soleil sur un navire (Figure.1.5). Il s'agirait du principe du réflecteur parabolique d'une manière similaire à un four solaire. [06]



Fig.1.5. La controverse des miroirs ardents [06]

En 1698 *Thomas Savery*, avait déjà obtenu un brevet, pour l'invention d'une « pompe à feu », qui est une pompe dont le fonctionnement est assuré par la vapeur d'eau (Figure.1.6). Cette pompe à feu sera utilisée dans certains charbonnages anglais pour effectuer l'exhaure, c'est-à-dire pour évacuer l'eau qui constamment menace les mines profondes d'inondation. En somme, par l'intermédiaire de la vapeur d'eau, *Savery* était parvenu à transformer la chaleur du charbon (dont la combustion est nécessaire pour vaporiser l'eau) en mouvement de l'eau extraite de la mine. L'engin de Savery eut un réel succès, mais il consommait vraiment beaucoup de charbon. [07]

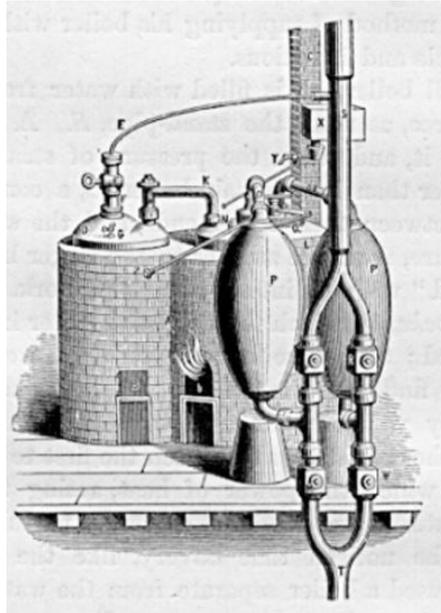


Fig.1.6. Pompe à feu de *Thomas Savery* [07]

En 1747, Buffon fit construire un miroir composé de 168 glaces planes de fixe de largeur sur huit de hauteur, avec lequel il a brûlé du bois jusqu'à 200 pied de distance, fondu l'étain à 150 pieds, le plomb à 130 (Figure.1.7). [08]

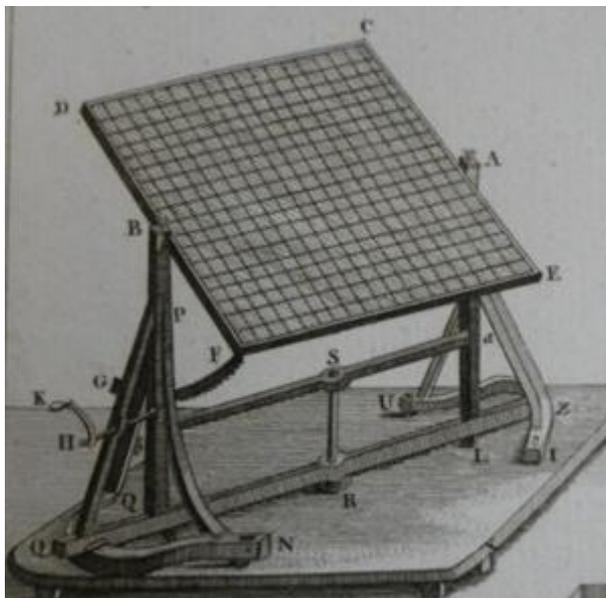


Fig.1.7. Miroir composé de *Buffon* [08]

En 1773, *Antoine Laurent de Lavoisier*, chimiste, inventa un four solaire (Figure.1.8), utilisant des lentilles convergentes, à l'aide d'une lentille à liquide, afin de fondre des métaux sans la pollution des combustibles.

Chapitre 1 : Généralités sur le Solaire Thermodynamique

Horace Bénédicte de Saussure, physicien suisse, invente la « Boîte chaude » en 1767 afin de démontrer l'effet de serre. Il est considéré comme le précurseur du capteur solaire plan. [09]

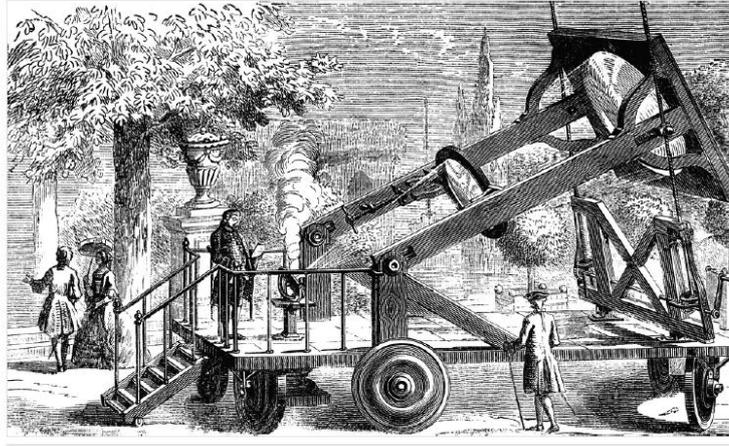


Fig.1.8. Four solaire de *Lavoisier* [09]

En 1816, *Robert Stirling* eut une idée autrement intéressante: Son brevet décrit non seulement un moteur à gaz à cycle fermé, sans clapet ni soupapes, qui supprime le problème de l'encrassement de la chambre de détente, mais a également l'idée révolutionnaire de "l'économiseur", que nous appelons aujourd'hui régénérateur, dispositif permettant de stocker puis récupérer de la chaleur sensible lors des allers et retours du gaz de travail depuis la chambre de détente vers la chambre de compression, améliorant ainsi le rendement. Si les premières machines de Stirling étaient relativement peu puissantes et efficaces, simplicité et fiabilité leur valurent d'être les premiers moteurs à gaz à être fabriqués industriellement. (Figure.1.9) [10]

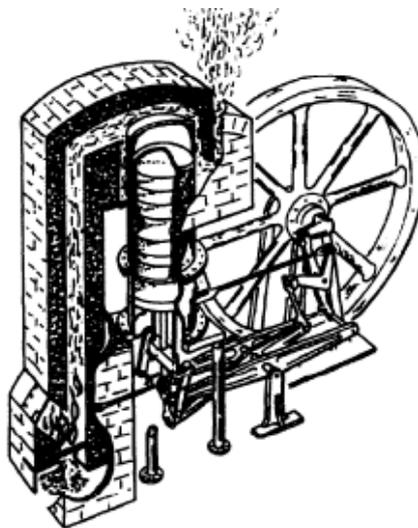


Fig.1.9. Premier moteur *Stirling* [10]

Chapitre 1 : Généralités sur le Solaire Thermodynamique

En 1860, *Augustin Mouchot* construisant un cuiseur solaire, prolongeant ainsi les travaux d'Horace-Bénédict de Saussure et de Claude Pouillet. Son idée directrice était de trouver une source d'énergie alternative au charbon dont il prévoyait l'épuisement des mines.

En 1866, il invente le premier moteur solaire avec un réflecteur parabolique et une chaudière cylindrique en verre alimentant une petite machine à vapeur. Cette machine est présentée à Napoléon III, puis exposée, jusqu'au siège de Paris, au cours duquel elle disparaît.

En 1871, une subvention du conseil général de Tours lui permet de travailler à plein temps pour construire un four solaire d'une surface de 4 m^2 qu'il présente à l'Académie des sciences en octobre 1875.

En 1877, une subvention du conseil général d'Alger lui permet de construire sur le même principe un « grand appareil de 20 m^2 » qui reçoit une médaille d'or à l'Exposition universelle de 1878 à Paris [11]. Une année plus tard, le même inventeur utilisait à Alger une machine semblable pour pomper de l'eau jusqu'à une hauteur de 1m avec un débit de 1 m^3 par heure comme on peut le voir sur la (Figure.1.10). [13]

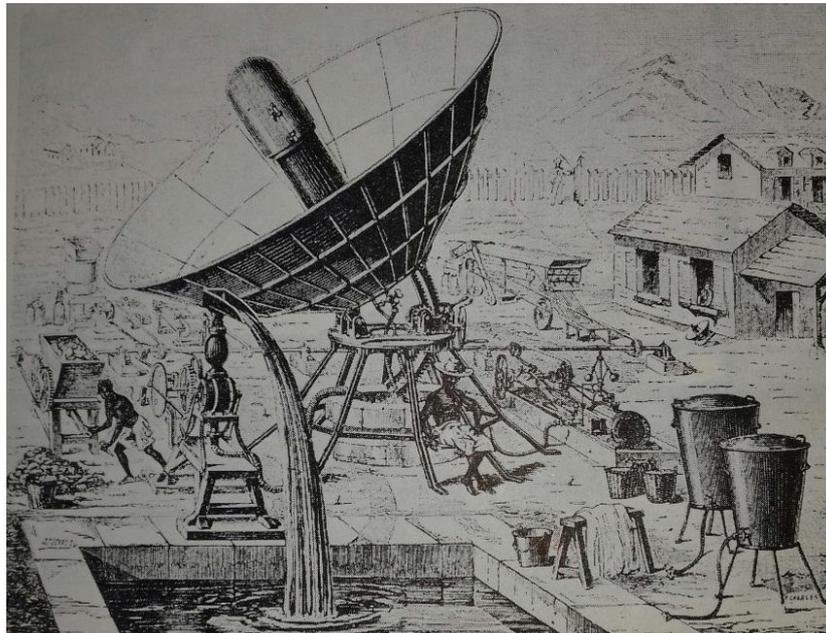


Fig.1.10. Pompe solaire de *Mouchot* (Alger, 1879). [13]

1.4 Solaire thermodynamique à concentration

Les systèmes à concentration solaire consistent à concentrer les rayons du soleil pour chauffer un récepteur (fluide ou moteur Stirling) à certaine température, la chaleur transmise à l'eau, produit une vapeur surchauffer qui fait ensuite tourner une turbine, c'est-à-dire

transférée la chaleur directement en énergie mécanique utilisant un cycle thermodynamique par exemple le cycle Stirling, et produire l'électricité en associant la turbine ou le moteur Stirling à une génératrice. [14]

Les différents types des systèmes à concentrations :

1.4.1 Concentrateurs cylindo-paraboliques

Un système à miroir cylindo-parabolique est un capteur solaire linéaire dont la section, comme le nom l'indique, est de forme parabolique. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal, dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température atteint en général 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine liée à un générateur électrique, les miroirs sont fabriqués en verre seulement ou constitué d'une ossature métallique recouverte d'un matériau réfléchissant peuvent atteindre 2.4 mètres de largeur et 6 mètres de longueur. (Figure.1.11) [13]



Fig.1.11. Centrale cylindo-parabolique.[45]

1.4.2 Centrale à tour

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers un absorbeur situé au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600°C à 1000°C. (Figure.1.12).

L'énergie concentrée sur le récepteur est ensuite soit directement transférée au fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines. Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité. [15]



Fig.1.12. Centrale à tour. [46]

1.4.3 Linéaire de Fresnel

Le concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel est généralement composé d'un réflecteur ou miroir de Fresnel, plusieurs bandes de miroirs réfléchissent et concentrent les rayons solaires sur un récepteur (tube).

En circulant dans ce récepteur, un fluide caloporteur qui collecte l'énergie du rayonnement sous forme d'énergie thermique. (Figure.1.13) [16]



Fig.1.13. Centrale à Linéaire de Fresnel. [47]

1.4.4 Concentrateurs paraboliques / Stirling.

Un système à miroir parabolique est un dispositif qui focalise les rayons solaires en un point, en s'orientant par rapport au soleil selon deux axes. Un tel système utilise un système de poursuite solaire pour suivre les mouvements du soleil et concentrer les rayons du soleil sur un récepteur situé au foyer. Les miroirs paraboliques sont les plus efficaces des systèmes à concentrations. Leur facteur de concentration atteint des valeurs élevées, typiquement de l'ordre de 600 à 2000 et leur température peut monter jusqu'à 1700 °C, ce qui conduit à des systèmes de conversion de l'énergie solaire en électricité d'une façon efficace et optimale. Les installations dites Dish-Stirling (Figure.1.14.) sont constituées de plusieurs miroirs d'un diamètre de quelques mètres, orientés de manière à suivre la course du soleil et concentrant le rayonnement solaire en un point (foyer), point où se trouve un moteur Stirling. Ce type de moteur transforme directement la chaleur en énergie mécanique, puis transformée l'énergie mécanique de moteur Stirling à énergie électrique à partir de la génératrice qui est raccordée avec le moteur Stirling. [03]



Fig.1.14. Centrale parabolique à moteur *Stirling*. [48]

1.5 Cycles thermodynamiques utilisés dans les centrales thermiques

1.5.1 Cycle BRAYTON

C'est un cycle thermodynamique constitué de deux adiabatiques (1-2 et 3-4) et deux isobares (2-3 et 4-1), utilisé dans les turbines à gaz, notamment dans les centrales thermiques et nucléaires. On l'appelle aussi cycle de Joule.

Ce cycle fut introduit en 1791 par John Barber (1731-1801) et développé par Georges Brayton (1830-1892). [17]

Le schéma d'intégration du cycle de Brayton et représenté à la (Figure.1.15):

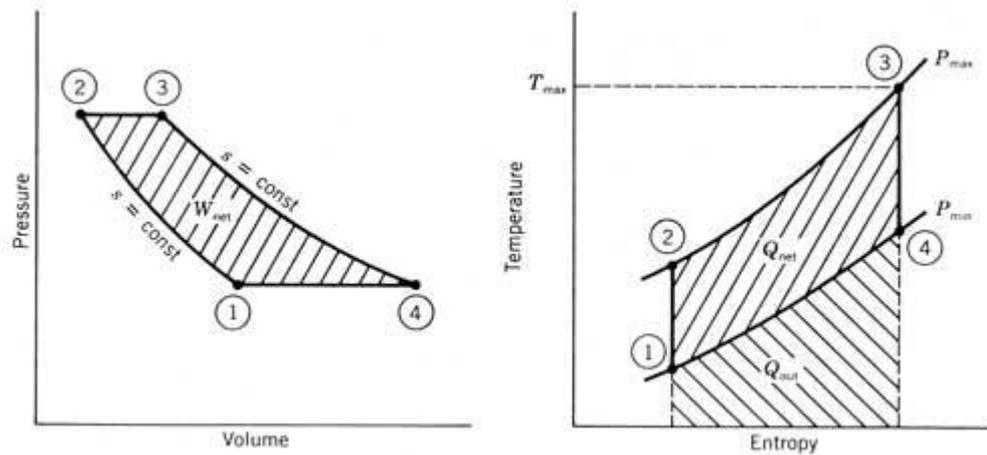


Fig.1.15. Cycle *Brayton* [49]

1.5.2 Cycle à vapeur

Ce cycle qui, en eau, est limitée en température haute à 565°C (au-delà, des problèmes d'incompatibilité chimique apparaissent entre la vapeur et les aciers), est néanmoins capable d'excellents rendements. C'est certainement le transformateur thermomécanique le mieux connu parce que le plus anciennement mis en œuvre par l'industrie moderne. Il a été utilisé exclusivement dans les systèmes de conversion dans les centrales à tour et cylindro-parabolique. (Figure.1.16) [18]

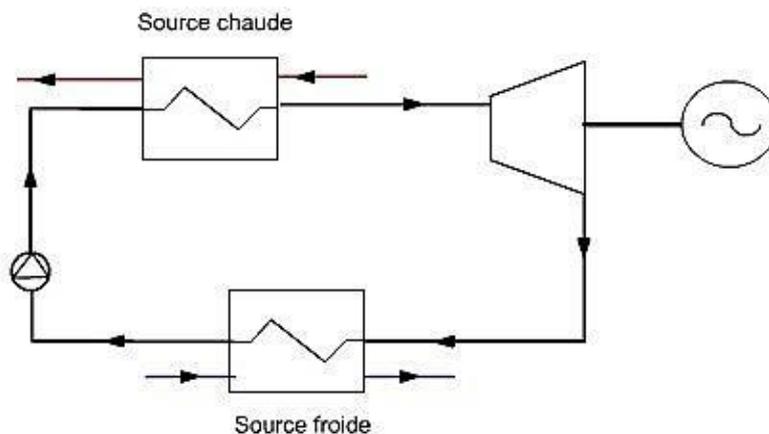


Fig.1.16. Cycle à vapeur

1.5.3 Cycle RANKINE

Cycle thermodynamique proposé en 1859 par William Rankine (1820-1872) pour améliorer les performances des machines à vapeur. Dans le cycle de Carnot sur lequel s'est appuyé Rankine, la condensation de la vapeur en fin de cycle n'est que partielle, si bien que le compresseur doit comprimer un mélange eau-vapeur. Ceci pose un problème d'usure du compresseur et de performance du cycle. Rankine eut l'idée de condenser totalement la vapeur, ce qui permet d'utiliser ensuite moins de travail pour comprimer le fluide (l'eau étant moins compressible, une très faible diminution de volume conduit à une augmentation de pression importante). Ce travail étant pris, dans le cas de Carnot, sur celui fourni par le cycle, l'amélioration apportée par Rankine augmente donc ce dernier. En contrepartie, l'eau liquide doit être chauffée davantage en début de cycle, et le rendement est moindre que dans le cas du cycle de Carnot, conformément aux lois générales de la thermodynamique. (Figure.1.17) [17]

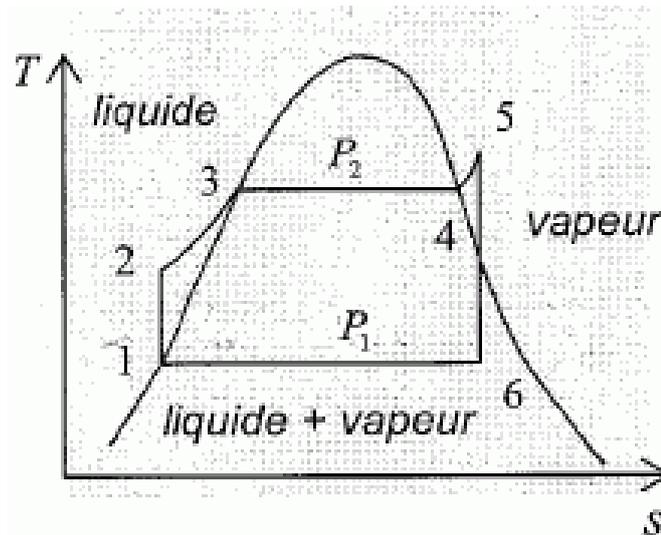


Fig.1.17. Cycle Rankine [49]

1.5.4 Cycle combiné

Le cycle combiné est constitué par une cascade des deux cycles suivants (Figure.1.18) [18]:

- Un cycle à gaz (cycle de *Brayton*) qui épuise les calories du caloporteur entre la température maximum, supposée élevée, et une température intermédiaire compatible avec les exigences du cycle suivant,
- Un cycle à vapeur apte à épuiser au mieux les calories restantes en même temps que de recycler les pertes du cycle de tête.

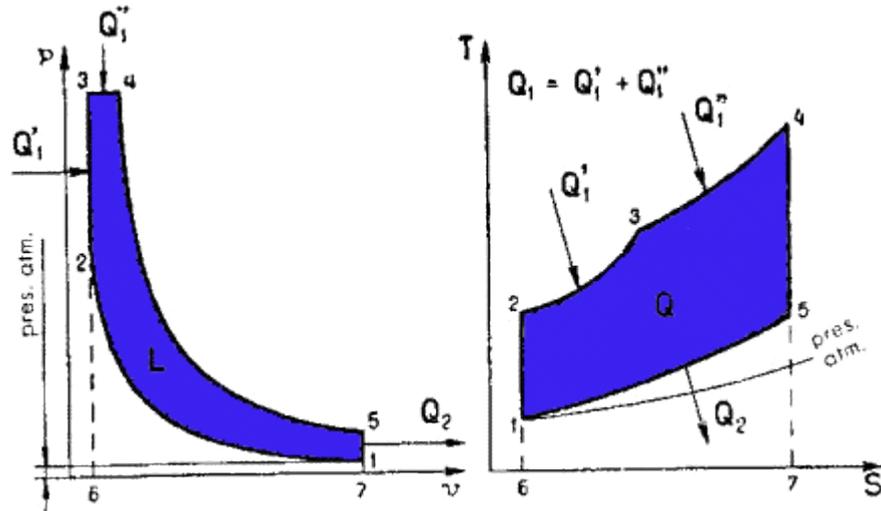


Fig.1.18. Cycle combiné.[50]

1.5.5 Cycle de STIRLING

Le transformateur thermomécanique est considéré depuis plus d'un siècle comme le meilleur des moteurs thermiques puisque son rendement théorique est élevé. Il s'agit d'un moteur à piston à chauffage externe basé sur le cycle *Stirling* (Figure.1.19), utilisant couramment l'hélium ou hydrogène comme fluide thermodynamique. Dans la pratique, ce générateur a l'avantage de pouvoir être réalisé en petite taille sans trop perdre en rendement. C'est ce qui le rend idéal pour l'exploitation des calories récoltées avec une excellente efficacité.

On le trouve souvent utilisé dans les concentrateurs paraboliques vu sa simplicité d'installation. [12]

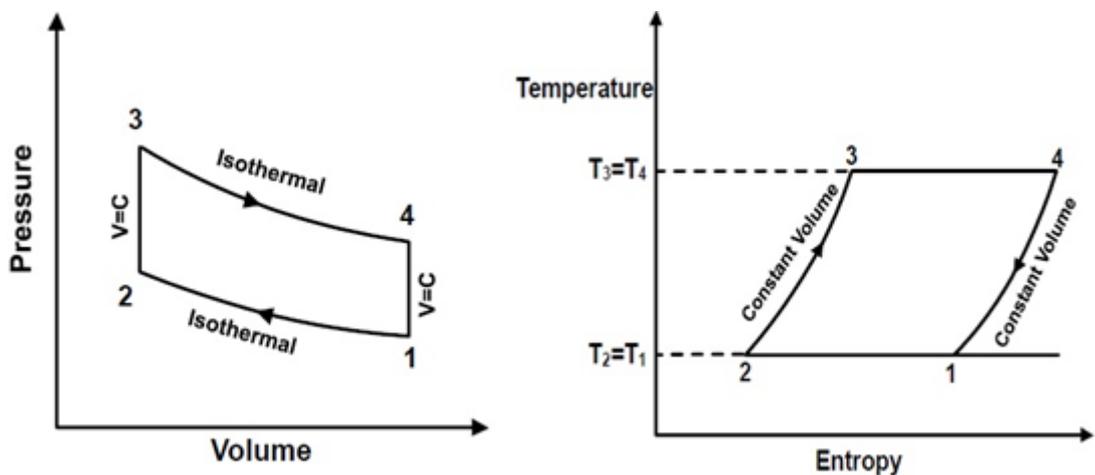


Fig.1.19. Cycle de STIRLING [12]

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par analyser le potentiel mondial en énergie solaire suivi par le potentiel solaire de l'Algérie qui est considéré comme très important surtout dans le sud, ensuite nous avons dédié une partie pour expliquer les différents systèmes à concentration, et les cycles thermodynamiques utilisés dans les centrales solaire thermiques.

Notre étude est consacrée aux systèmes paraboliques à moteur Stirling qui apparaît plus innovants par rapport aux autres systèmes et simple à réalisés. Dans ce contexte, le prochain chapitre sera dédié aux moteurs Stirling, qui va être analysés en détail.

Chapitre 2: Etude théorique du moteur
Stirling

Chapitre 2: Etude théorique du moteur Stirling

2.1 Introduction

Le moteur Stirling présente une alternative très intéressante pour la conversion des énergies renouvelables en travail, avec un rendement théorique égal à celui de cycle de Carnot et une grande adaptabilité à des sources variées de chaleur (combustion, récupération, solaire) à haut ou bas niveau de température.

Dans ce chapitre nous allons donner quelques généralités sur les moteurs Stirling, leurs diverses transformations majeures ainsi que leurs principes de fonctionnement.

Ensuite nous donnons les différents types de moteurs Stirling (BETA, GAMMA et ALPHA), après nous allons détailler le cycle thermodynamique (Stirling), et Enfin nous terminerons par ses différentes applications.

2.2 Le Moteur Stirling

Le moteur Stirling est un moteur à énergie externe. Le fluide principal est un gaz soumis à un cycle comprenant quatre phases : chauffage isochore (à volume constant), détente isotherme (à température constante), refroidissement isochore puis compression isotherme. On l'appelait au début « moteur à air chaud », mais ce nom a vite été abandonné car il existe un autre moteur à air chaud.

Robert Stirling a inventé en 1816 le moteur à air chaud mais, pour améliorer son efficacité, il l'a muni d'une modification suffisamment importante pour lui donner un réel développement, un régénérateur entre les deux pistons qui a considérablement amélioré sa performance. [19]

2.2.1 Histoire des moteurs à cycle de Stirling

Le cycle de Stirling a ses origines en 1816, d'abord décrit dans un brevet accordé cette année à un ministre écossais, révérend Dr. Robert Stirling, Une partie de ces dessins de brevets originaux, modifiée pour plus de clarté par Finkelstein. Le moteur Stirling est le deuxième moteur thermique le plus ancien, tandis que le plus ancien est le moteur à vapeur. À une époque où les chaudières explosaient très souvent, Stirling voulait rendre le travail dans les carrières et les mines de charbon plus sûr.

C'était sans doute l'une des inventions les plus étonnantes de son genre, bien en avance sur toutes les connaissances scientifiques pertinentes de l'époque. Dans ce contexte, il convient de rappeler que Sadi Carnot a publié ses « Réflexions sur le pouvoir moteur du feu » en 1824, tandis que Joule établit l'équivalent mécanique de la chaleur, jetant ainsi les bases de la première loi de la thermodynamique en 1849 - plus de 30 ans après l'invention du moteur Stirling.

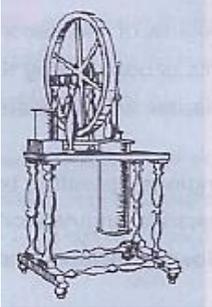
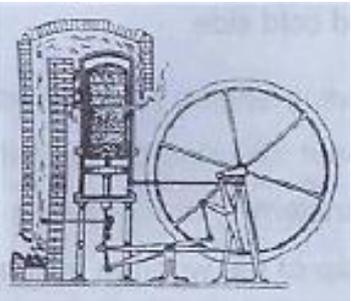
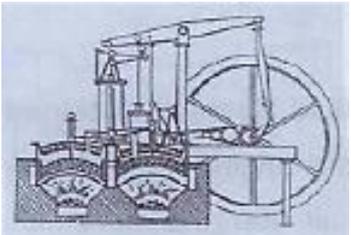
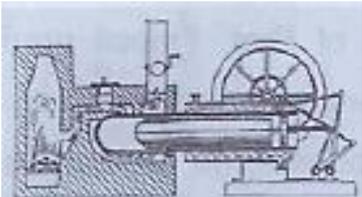
Plusieurs aspects de l'invention de Stirling sont uniques par rapport à d'autres moteurs principaux alternatifs de ce temps et pendant un temps considérable par la suite :

- Il n'a pas utilisé de soupapes ou d'ouvertures d'orifice à piston.
- Il fonctionnait en cycle fermé, de sorte que le gaz de travail est utilisé encore et encore. Ceci permet à la pression du cycle minimum d'être élevée au-dessus de celle de l'atmosphère, augmentant ainsi proportionnellement la production de travail spécifique.
- Le piston de puissance était entièrement situé dans la zone froide du moteur.
- Stirling a introduit un « économiseur » (maintenant connu sous le nom de régénérateur) pour stocker la chaleur pendant une partie du cycle pour la réutiliser pendant une autre partie.

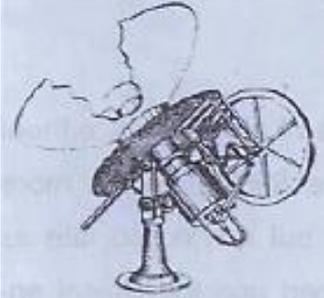
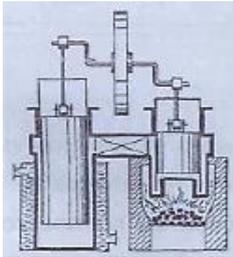
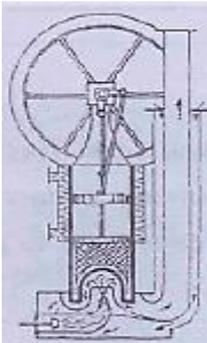
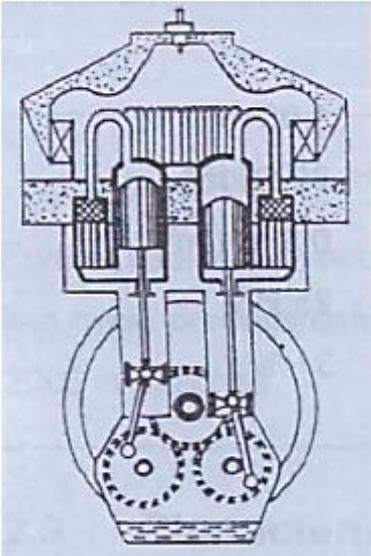
Au début du 20ème siècle, il y avait environ 250000 machines Stirling utilisées dans le monde entier pour les ventilateurs de table, les pompes à eau et les moteurs pour petites machines. Ils ont fourni aux maisons et aux petites entreprises de l'énergie électrique et mécanique. [20]

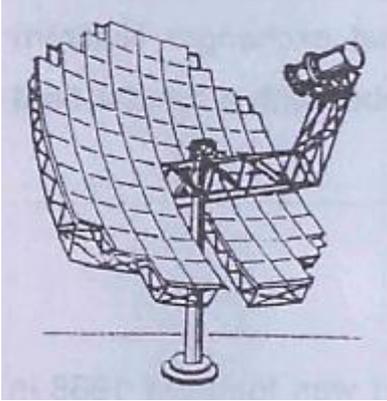
Chapitre 2 : Etude théorique du moteur Stirling

Table.2.1 Diverses transformations majeures de moteur Stirling. [20]

Inventeur (année)		Description
<p>1 – Stirling - 1815</p> 	<p>Deux cylindres séparés</p>	<p>C'est le premier moteur Stirling jamais construit. Aujourd'hui c'est à l'université d'Edimbourg. Il a été inventé en 1815, un an avant le premier brevet. Il s'agit d'un moteur de type gamma. Contrairement à un type gamma typique, comme celui de Heinrich, il est refroidi par l'air et non par l'eau.</p>
<p>2 - Stirling - 1816</p> 	<p>Deux pistons dans un cylindre</p>	<p>L'utilisation de deux pistons dans un seul cylindre présente l'avantage d'éviter le volume mort et la perte de charge d'écoulement provoquée par le tuyau de raccordement. Il y a quelques problèmes avec ce concept - la bielle du plongeur doit être conduite à travers le piston de travail et scellé. C'est le moteur typique de type bêta breveté en 1816.</p>
<p>3 - Stirling - 1827</p> 	<p>Premier moteur avec régénérateur</p>	<p>Deux améliorations ont été réalisées dans ce concept, appelé la méthode Stirling. Le premier consistait à placer des plaques minces dans le piston du plongeur pour stocker la chaleur et chauffer le gaz de travail lorsqu'il entre dans le réchauffeur. La seconde consistait à combiner deux ou plusieurs de ces déplaceurs avec un piston de travail pour rendre le mouvement du moteur plus régulier.</p>
<p>4 - Lehmann - 1866</p> 	<p>Moteur Bêta refroidis à l'eau</p>	<p>Contrairement aux autres moteurs, cette machine est refroidie à l'eau. Le moteur Lehmann représente mieux le type bêta que le design de Stirling. Les expériences sur ce moteur et les commentaires de Delabar ont été la base de la théorie du professeur Gustav</p>

Chapitre 2 : Etude théorique du moteur Stirling

		Schmidt (1871) concernant les moteurs Stirling.
<p style="text-align: center;">5 - Ericsson – 1870</p> 	<p style="text-align: center;">La première unité Dish / Stirling</p>	<p style="text-align: center;">Ce premier moteur solaire a été construit à New York. Ce moteur produisant 1CH avait besoin d'une surface de concentration d'environ 10 pieds carrés. Ce concept a été développé pour produire de l'énergie là où le charbon n'était pas disponible.</p>
<p style="text-align: center;">6 - Rider – 1875</p> 	<p style="text-align: center;">Premier moteur alpha</p>	<p style="text-align: center;">Le moteur alpha ou le moteur Rider, construit par M.H.T. à Londres travaillé jusqu'à 15 ans sans interruption. Des centaines de ces moteurs ont été vendus dans le monde entier. Le moteur a si bien fonctionné que l'on a peu réfléchi à l'amélioration.</p>
<p style="text-align: center;">7 - Robinson - 1880</p> 	<p style="text-align: center;">Préchauffeur d'air</p>	<p style="text-align: center;">Cette invention a triplé la performance des moteurs à air sans la complexifier. Il rendait le moteur Stirling plus efficace que la meilleure machine à vapeur, mais il était trop tard car le moteur Otto était déjà introduit et le moteur Diesel venait d'être inventé.</p>
<p style="text-align: center;">8 - Royaume-Uni - 1978</p> 	<p style="text-align: center;">Préchauffeur de tuyau agrandi</p>	<p style="text-align: center;">La société suédoise United Stirling a été fondée en 1968 à Malmö dans le cadre du département suédois de la défense. Peu de temps après, il est devenu une partie de la société Philips. L'une des dernières inventions était un moteur Stirling à double effet à quatre cylindres. Les cylindres parallèles nécessitaient un mécanisme de travail complexe mais grâce à l'assemblage compact, l'utilisation d'un chauffage en combinaison avec un préchauffeur était possible.</p>

<p>9- Mc Donnell Douglas - 1985</p> 	<p>Un énorme moteur solaire</p>	<p>Mc Donnell Douglas a utilisé le moteur d'United Stirling et l'a monté sur un miroir parabolique d'un diamètre de 11m.</p> <p>Utilisant un entraînement kardanique exocentrique, il suit le soleil très précisément dans le sens horizontal et azimutal. Au centre du moteur, 1430°C peuvent être produits. Certaines données techniques sont les suivantes :</p> <p>Surface de 1 miroir : 1,08 m² Surface de 82 miroirs : 88,56 m² Irradiation : 0,9 kW / m² Puissance électrique : 25 kW Efficacité totale 31%</p>
---	-------------------------------------	---

2.3 Principe de fonctionnement du moteur Stirling

Un moteur Stirling est un mécanisme qui fonctionne selon un cycle thermodynamique fermé et régénératif. Malgré ces deux particularités il permet, comme toute machine thermique, de convertir l'énergie calorifique en énergie mécanique.

Comme pour toute machine thermique, la conversion est basée sur un différentiel de température : au sein du moteur, en deux zones distinctes on impose une température dite chaude et une température dite froide. On conviendra ici d'appeler ces zones respectivement la « tête chaude » et la « tête froide » du moteur. Ce sont deux des trois échangeurs qui interviennent dans la constitution d'un moteur Stirling. Le troisième échangeur est particulier, il est nommé régénérateur. [21]

2.4 Types des moteurs Stirling

2.4.1 Moteur Stirling BETA

Le moteur Beta, est le plus efficace et l'un des premiers moteurs du révérend Robert Stirling. Le déplaceur et le piston sont tous les deux dans le même cylindre. Le déplaceur est actionné par la tige de déplacement, qui traverse un presse-étoupe ou une bague à travers le milieu du piston. Le déplaceur tourne à l'extrémité du chapeau chaud du cylindre et le piston à ou au-delà de l'extrémité froide. (Figure.2.1)

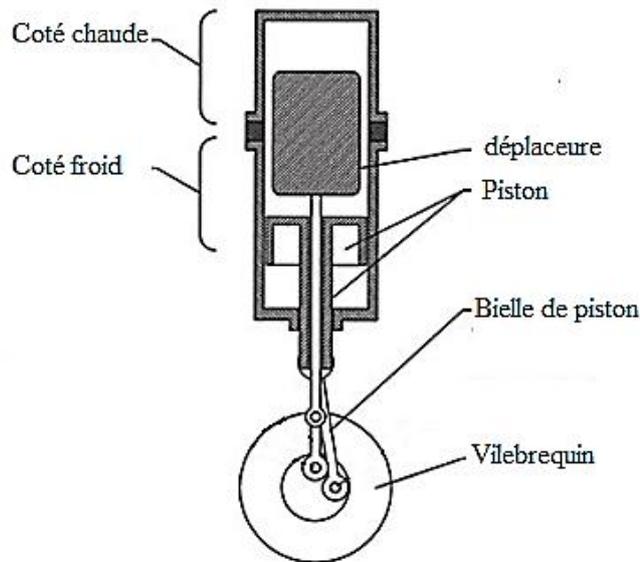


Fig.2.1. Moteur Stirling Béta.

Les moteurs Stirling Béta sont relativement compacts par rapport aux autres types de moteurs Stirling, ils sont donc utilisés pour des applications où il y a des limitations d'espace. La puissance de sortie pour un volume donné est inférieure à celle des autres moteurs.

L'incorporation d'un régénérateur est un peu difficile et puisqu'il n'y a pas d'isolation adéquate entre l'extrémité chaude et froide, l'efficacité du moteur diminue au fur et à mesure que le moteur chauffe. Cela est dû à la conduction de la chaleur de l'extrémité chaude à l'extrémité froide et il y aura une baisse de la vitesse du moteur, donc une baisse de sa puissance de sortie. [23]

2.4.2 Moteur Stirling GAMMA

La majorité des modèles de moteurs sont de la configuration Gamma. Ce type a deux cylindres séparés, un cylindre de déplacement et un cylindre de puissance, réunis par un tuyau ou une fente dans la pièce coulée. Les deux cylindres peuvent être vissés à une base ou un cadre et peuvent être connectés à une seule manivelle et volant. C'est un moteur très simple et idéal pour les modélistes qui font leur premier moteur. L'inconvénient de ce type de moteur, est qu'il contient un espace mort dans le tuyau de Connections, ce qui conduit à l'inefficacité. (Figure.2.2) [22]

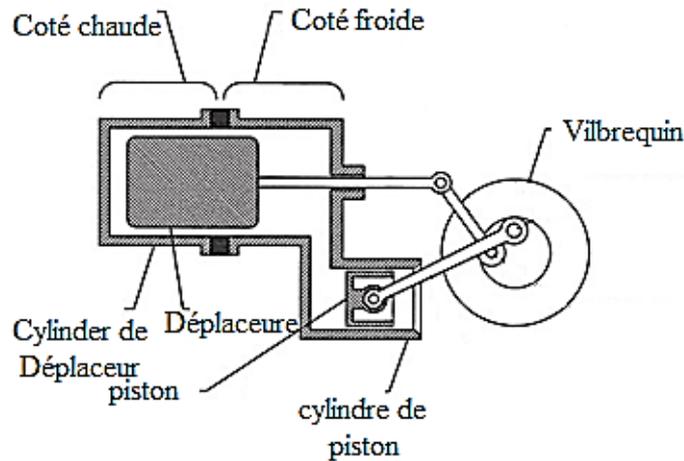


Fig.2.2. Moteur Stirling Gamma.

En revanche, les moteurs Gamma ont la puissance la moins spécifique parmi les trois types de moteurs Stirling, car tout le fluide de travail n'atteint pas la zone chaude pendant le processus de détente (certains restent dans l'espace de compression). En conséquence, une partie de l'expansion doit avoir lieu dans l'espace de compression, entraînant une réduction de la puissance spécifique. De plus, les taux de compression sont inférieurs par rapport aux autres types. [23]

2.4.3 Moteur Stirling ALPHA

Nommé d'après Rider, qui a d'abord fabriqué ce type de moteur, cette configuration a deux cylindres séparés. L'un est le cylindre chaud et l'autre le cylindre froid. Il y a un piston dans le côté froid. Dans le côté chaud il y a aussi un déplaceur. Les deux pistons ont un tube adjacent. Les ailettes de refroidissement se trouvent généralement sur le cylindre froid. (Figure.2.3)

Un avantage est que le moteur se prête à la régénération. Les deux cylindres peuvent être montés dans un « V » à 90 degrés l'un de l'autre. Chaque bielle est couplée à un seul vilebrequin. Le tuyau de raccordement, bien que l'espace mort, peut être rempli de matériau régénératif tel que de la gaze d'acier inoxydable ou des billes de céramique, créant un régénérateur externe construit entre les deux cylindres. L'espace mort peut être réduit avec succès en utilisant cette technique. [22]

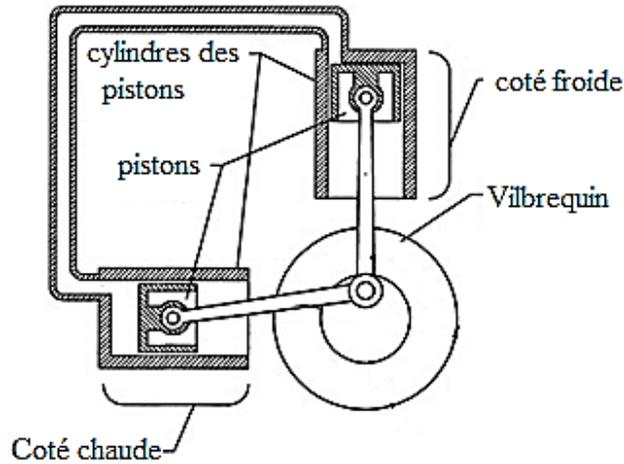


Fig.2.3. Moteur Stirling Alpha

La puissance développée pour un volume donné est la plus élevée dans le cas des moteurs Stirling Alpha Par rapport aux autres types de moteurs Stirling. [23]

2.5 Cycle Stirling

2.5.1 Cycle Stirling idéal

Le cycle de Stirling théorique est un cycle à gaz, composé de deux isothermes et de deux isochores, comme indiqué sur la (Figure.2.4.)

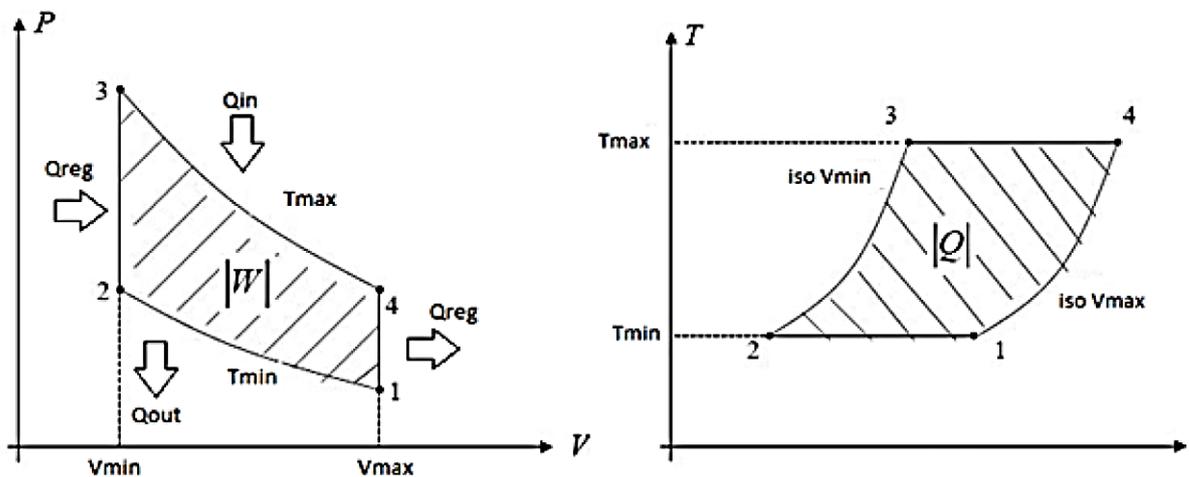


Fig.2.4. Diagramme thermodynamique d'un moteur Stirling [24]

Nous supposons que le piston de l'espace de compression est dans le point mort externe (extrémité droite), et le piston de l'espace d'expansion est à côté du régénérateur. Dans ce cas, tout le fluide se trouve dans la zone froide de l'espace de compression, et le volume de

compression est maximal et la pression et la température sont dans leurs valeurs minimales ; ce moment est représenté par le point 1 dans les diagrammes. (Figure.2.5.)

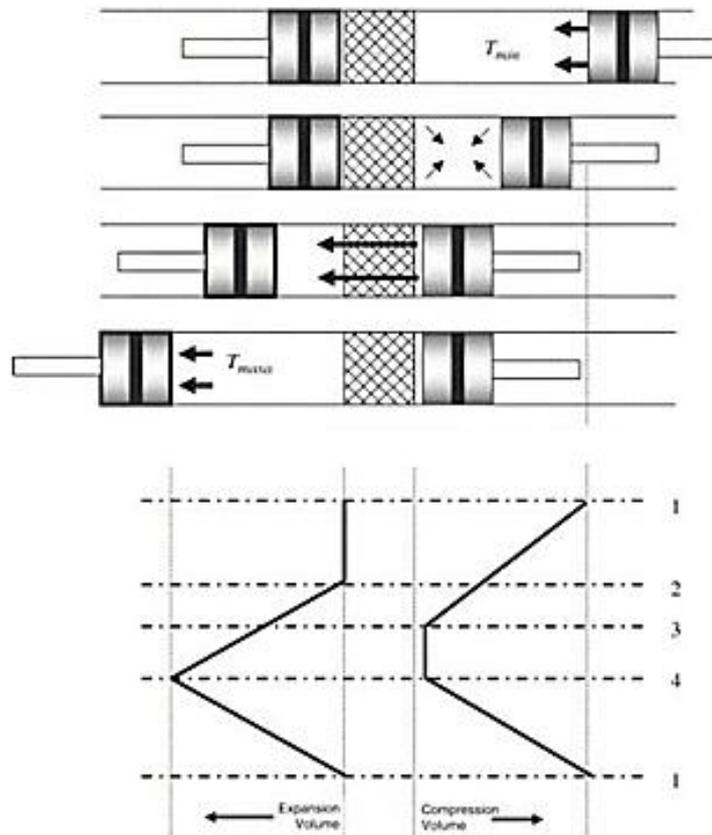


Fig.2.5. Cycle Stirling, disposition des pistons et diagramme de déplacement. [24]

Processus 1-2, compression isotherme. Pendant le processus de compression de 1 à 2, le piston de compression se déplace vers le régénérateur, tandis que le piston de détente reste immobile. Le fluide de travail est comprimé dans l'espace de compression. [24]

- La pression augmente de p_1 à p_2 .
- La température reste constante en raison du flux de chaleur de l'espace froid dans les environs $T = ct$.
- Le travail sur le fluide est de la même ampleur que la chaleur extraite du cycle $Q = W$.
- Il n'y a pas de changement dans l'énergie interne $U = ct$.
- La compression isotherme du fluide de travail entraîne un transfert de chaleur de le fluide à un puits externe à T_{min} .

$$p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} = p_1 r_v \quad (2.1)$$

Chapitre 2 : Etude théorique du moteur Stirling

$$T_1 = T_2 = T_{min} \quad (2.2)$$

$$Q_{1-2} = W_{1-2} \quad (2.3)$$

$$Q_{1-2} = W_{1-2} = p_1 V_1 \ln\left(\frac{1}{r_v}\right) = nRT_1 \ln\left(\frac{1}{r_v}\right) \quad (2.4)$$

Processus 2-3, transfert de chaleur régénérative à volume constant. Pendant ce processus, les deux pistons se déplacent simultanément, c'est-à-dire le piston de compression vers le régénérateur et l'expansion s'éloignant de celui-ci, et c'est pourquoi le volume entre eux reste constant. Le fluide de travail est transféré de l'espace de compression à l'espace d'expansion à travers le maillage poreux du régénérateur.

- La température du fluide de travail augmente de T_{min} à T_{max} , en raison du transfert de chaleur du régénérateur vers le fluide.
- Cette augmentation progressive de la température du fluide de travail en passant par le régénérateur provoque une augmentation de la pression de p_2 à p_3 .
- Dans ce processus, aucun travail n'est effectué $W = 0$.
- Nous avons donc un transfert de chaleur isochore de la matrice du régénérateur vers le fluide de travail.

$$p_3 = \frac{p_2 T_3}{T_2} = \frac{p_2}{\tau} \quad (2.5)$$

Avec : $\tau = \frac{T_2}{T_3}$

$$V_2 = V_3 \quad (2.6)$$

$$Q_{2-3} = C_v(T_3 - T_2) \quad (2.7)$$

$$W_{2-3} = 0 \quad (2.8)$$

Processus 3-4, expansion isotherme. Pendant ce processus, le piston de détente continue à s'éloigner du régénérateur vers le point mort externe, tandis que le piston de compression reste immobile dans le point mort interne, à côté du régénérateur.

- Pendant l'expansion, la pression diminue de p_3 à p_4 .
- Le volume augmente de V_3 à V_4 .
- La température reste constante grâce à l'apport de chaleur d'un évier externe à T_{max} ,

$$T_3 = T_4 = T_{max} \quad (2.9)$$

Chapitre 2 : Etude théorique du moteur Stirling

- Le travail est effectué par le fluide de travail sur le piston dans la même ampleur comme la chaleur appliquée $Q = W$.
- Il n'y a pas de changement dans l'énergie interne $U = ct$.
- Il y a une augmentation de l'entropie du fluide de travail.

$$p_4 = \frac{p_3 V_3}{V_4} = \frac{p_3}{r_v} \quad (2.10)$$

$$T_3 = T_4 = T_{max} \quad (2.11)$$

$$Q_{3-4} = W_{3-4} \quad (2.12)$$

$$Q_{3-4} = W_{3-4} = p_3 V_3 \ln(r_v) = nRT_3 \ln(r_v) \quad (2.13)$$

Processus 4-1, transfert de chaleur régénérative à volume constant. Dans ce processus, les deux pistons se déplacent simultanément, pour transférer le fluide de travail de l'espace d'expansion à celui de compression à travers le régénérateur à volume constant.

- Pendant l'écoulement du fluide de travail à travers le régénérateur, la chaleur transférée du fluide à la matrice provoque une réduction de la température du fluide de travail jusqu'à T_{min} .
- Aucun travail effectué $W = 0$.
- Diminution de l'énergie interne et de l'entropie.

$$p_1 = \frac{p_4 T_1}{T_4} = p_4 \tau \quad (2.14)$$

$$\text{Avec: } \tau = \frac{T_2}{T_3}$$

$$V_4 = V_1 \quad (2.15)$$

$$Q_{4-1} = C_v(T_1 - T_4) \quad (2.16)$$

$$W_{4-1} = 0 \quad (2.17)$$

Pour un cycle hautement idéalisé, composé de deux processus isothermes, de deux processus à volume constant et également considéré comme un cycle thermodynamique réversible. Ces hypothèses ont plusieurs implications, impossibles à réaliser dans un moteur réel.

- Si l'on considère que le rapport de volume r_v :

$$r_v = \frac{v_4}{v_3} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.18)$$

- Exprimer la chaleur appliquée comme :

$$Q = nRT_3 \ln(r_v) \quad (2.19)$$

- Et la chaleur extraite :

$$Q = nRT_1 \ln\left(\frac{1}{r_v}\right) \quad (2.20)$$

- L'efficacité peut être écrite par l'équation suivant :

$$\eta = \frac{W_{output}}{Q_{input}} = \frac{W_{1-2} + W_{3-4}}{Q_{3-4}} = \frac{nRT_3 \ln(r_v) + nRT_1 \ln\left(\frac{1}{r_v}\right)}{nRT_3 \ln(r_v)} = \frac{nRT_3 \ln(r_v) - nRT_1 \ln(r_v)}{nRT_3 \ln(r_v)}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \tau \quad (2.21)$$

2.5.2 Cycle Stirling réel

Un moteur réel se différencie du moteur idéal sur les principaux points suivants :

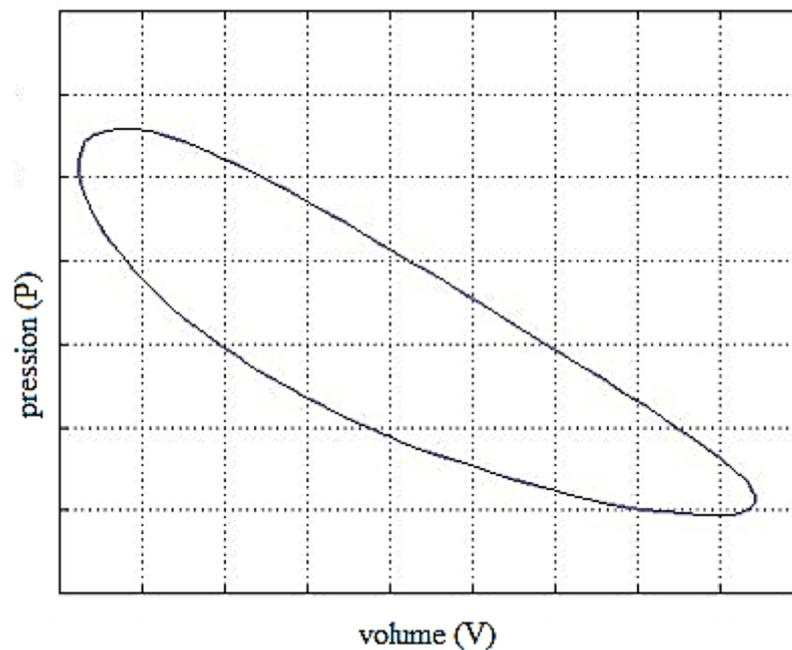


Fig.2.6. Cycle Stirling réel [26]

2.5.2.1 Pistons oscillants

Les mouvements imaginés à la figure 2.6 ne sont pas compatibles avec une mécanique simple. Dans la pratique, les mouvements des pistons et déplaceur sont de type oscillant, pratiquement sinusoïdal, qu'ils soient libres ou entraînés par un système bielle-manivelle.

2.5.2.2 Volumes morts

Dans la pratique, les volumes autres que ceux balayés par les pistons, c'est-à-dire les volumes des trois échangeurs et des conduites de raccordement et les volumes résiduels des chambres en fin de course des pistons, représentent plus de 50 % du volume total.

2.5.2.3 Chambres non isothermes

L'isotherme des chambres est pratiquement irréalisable, compte tenu des mauvais échanges thermiques entre le gaz et les parois. Lorsqu'elles sont de grandes dimensions, la détente et la compression dans les chambres sont quasiment adiabatiques. En conséquence, lorsque le gaz pénètre dans une des chambres à la température de la source correspondante, il n'est en général pas à la température du gaz de la chambre.

Il va donc y avoir des pertes d'entropie par mélange. Le rendement, même en considérant les échangeurs et le régénérateur parfaits, est inférieur à celui de Carnot. [27]

2.6 Analyse de Schmidt

La simplicité conceptuelle apparente du moteur Stirling cache son analyse mathématique compliquée. La difficulté à décrire des modèles même idéalisés du moteur en termes d'équations simples et fermées est l'une des principales raisons du scepticisme répandu et du manque de compréhension qui existe encore aujourd'hui. 55 ans après l'invention du moteur à cycle de Stirling, Schmidt a fait une analyse du cycle en 1871, connue sous le nom d'analyse classique. Cette analyse a été réalisée pour 3 différents types de pratique paramètres : alpha, bêta et gamma.

Schmidt a obtenu une théorie proche du connu, qui a montré des variations sinusoïdales du volume de travail dans les moteurs alternatifs. La théorie garde les hypothèses les plus importantes des isothermes de compression et d'expansion et de régénération parfaite. Par conséquent, nous voyons que le cycle est encore idéalisé, mais malgré cela, il est beaucoup plus réaliste que le cycle idéal de Stirling. Les configurations considérées dans

l'analyse classique SCE (Stirling Classique Engine) sont montrées sur la figure.2.7 suivante.
[24]

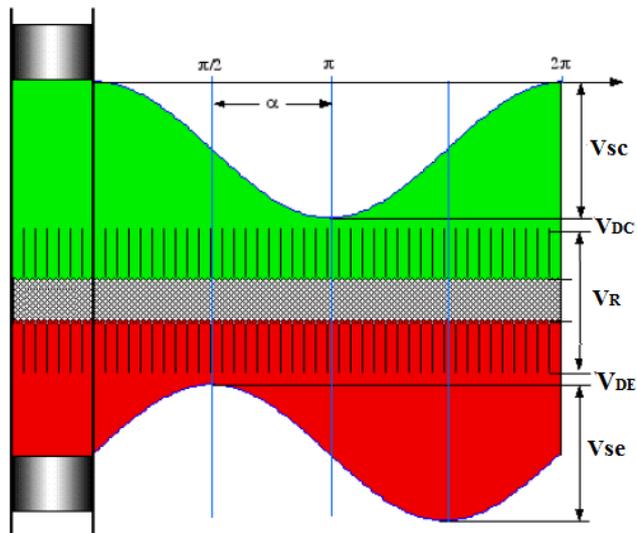


Fig.2.7. Variations dans les espaces d'expansion et de compression [28]

Les principales hypothèses de l'analyse de Schmidt pour SCE (Stirling Classique Engine) [29] :

- Tous les processus sont réversibles.
- La régénération est un processus parfait.
- Le fluide de travail suit la loi des gaz parfaits: $PV = nRT$.
- La masse d'air dans le système reste constante, aucune fuite dans le système.
- Les changements de volume dans l'espace de travail sont sinusoïdaux.
- Il n'y a pas de gradient de température dans l'échangeur de chaleur.
- Les températures du piston et de la paroi du cylindre sont constantes.
- La vitesse de la machine est constante.
- Conditions de continuité établies.
- Aucune perte de débit et donc aucune perte de pression.
- Aucune fuite du gaz de travail.
- La température dans le réchauffeur et l'espace d'expansion est isotherme.
- La température dans le refroidisseur et l'espace de compression est isotherme.
- La température dans la zone morte et donc dans l'espace du régénérateur est constante.

[24]

1) Volume balayé du déplaceur, V_{SE} , et le piston de puissance, V_{SC}

Le volume balayé du déplaceur et le piston de puissance peut être calculé en utilisant les équations (2.22) et (2.23) respectivement

$$V_{SE} = \frac{\pi}{4} \cdot (B_{dp})^2 \cdot S_{dp} \quad (2.22)$$

$$V_{SC} = \frac{\pi}{4} \cdot (B_{pp})^2 \cdot S_{pp} \quad (2.23)$$

B_{dp} Et B_{pp} dans les équations (2.22) et (2.23) sont les diamètres du piston et du déplaceur appelé alésage, respectivement. Pour le S_{dp} et S_{pp} , c'est la distance dans laquelle le piston se déplace du PMH (Point Mort Haut) au PMB (Point Mort Bas) connu sous le nom de course. Le déplaceur et le piston de puissance ont chacun leur propre alésage et course.

2) Volume de l'espace d'expansion, V_E

Volume d'expansion V_E , est le volume situé à l'intérieur de l'espace d'expansion. Ce volume représente par l'équation (2.24).

$$V_E(\alpha) = \frac{V_{SE}}{2} \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (2.24)$$

3) Volume de l'espace de compression, V_C

L'espace de compression est défini comme l'espace entre le piston de puissance et le déplaceur. Ainsi, pour le calcul du volume d'espace de compression V_C , il comprendra le volume balayé par le déplaceur V_{SE} .

$$V_C(\alpha) = \frac{V_{SE}}{2} \cdot (1 + \cos \alpha) + \frac{V_{SC}}{2} \cdot (1 - \cos(\alpha - \varphi)) \quad (2.25)$$

Le volume balayé par le déplaceur V_{SE} et le piston de puissance V_{SC} , qui peut être obtenu dans les équations (2.24) et (2.25), respectivement.

4) Angle de vilebrequin α et angle de phase φ

Angle de vilebrequin α , sera utilisé pour déterminer le volume de dilatation et de compression pendant différent angle α . [24]

$$\alpha = 0^\circ \text{ à } 360^\circ \quad (2.26)$$

Chapitre 2 : Etude théorique du moteur Stirling

En ce qui concerne l'angle de phase φ , c'est la différence d'angle entre le déplaceur et le piston de puissance. Cet angle de phase sera toujours de 90° , ce qui signifie que le déplaceur et le piston de puissance se déplaceront de manière sinusoïdale l'un par rapport à l'autre.

$$\varphi = 90^\circ \quad (2.27)$$

5) Volume total, V

Le volume total V , à un certain angle de vilebrequin, est déterminé par l'équation (2.29).

$$V(\alpha) = V_E + V_D + V_C \quad (2.28)$$

6) Volume mort total V_D

L'équation (2.29) montre la masse de fluide de travail en ce qui concerne volume mort. En utilisant les équations (2.30) et (2.31), le volume et la température de l'espace mort peuvent être déterminés, respectivement

$$m = \frac{p}{R} \cdot \left[\frac{V_{DE}}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_{DC}}{T_C} \right] = \frac{p}{R} \cdot \frac{V_D}{T_D} \quad (2.29)$$

$$V_D = V_{DE} + V_R + V_{DC} \quad (2.30)$$

$$T_D = \frac{V_{DE} + V_R + V_{DC}}{\frac{V_{DE}}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_{DC}}{T_C}} \quad (2.31)$$

7) Régénérateur

Pour obtenir la température du régénérateur, en utilisant l'équation (2.32).

$$T_R = \frac{T_E - T_C}{\ln\left(\frac{T_E}{T_C}\right)} \quad (2.32)$$

8) Masse totale de fluide de travail, m

Les équations (2.33) et (2.34) montrent la masse totale du fluide de travail par rapport à la masse de l'espace de détente, de compression et de régénération, respectivement. [24]

$$m = \sum m_i = m_E + m_R + m_C \quad (2.33)$$

$$m = \frac{p}{R} \cdot \left[\frac{V_E}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_C}{T_C} \right] \quad (2.34)$$

Chapitre 2 : Etude théorique du moteur Stirling

Les équations (2.35) jusqu'à l'équation (2.41) sont substituées dans l'équation (2.34) pour former une nouvelle équation pour la masse de fluide de travail m .

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (2.35)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (2.36)$$

$$X_D = \frac{V_D}{V_{SE}} \quad (2.37)$$

$$s = \frac{V_D}{V_{SE}} \cdot \frac{T_C}{T_D} \quad (2.38)$$

$$B = t + 1 + v + 2 \cdot s \quad (2.39)$$

$$A = \sqrt{t^2 - 2 \cdot t + 1 + 2 \cdot (t - 1) \cdot v \cdot \cos \varphi + v^2} \quad (2.40)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{v \cdot \sin \varphi}{t - 1 + v \cdot \cos \varphi} \right) \pm (0; \pi; 2\pi; 3\pi; \dots) \quad (2.41)$$

Ainsi, la masse de fluide de travail, m est donnée par :

$$m = \frac{p \cdot V_{SE}}{2 \cdot R \cdot T_C} \cdot [B - A \cdot \cos(\alpha - \delta)] \quad (2.42)$$

9) Pression du moteur, p

L'équation (2.43) pour calculer la pression du moteur est obtenue à base de l'équation (2.42).

$$p = \frac{2 \cdot m \cdot R \cdot T_C}{V_{SE} \cdot [B - A \cdot \cos(\alpha - \delta)]} \quad (2.43)$$

En remplaçant l'équation (2.44) par l'équation (2.43), on obtient une nouvelle équation (2.45) pour le calcul de la pression.

$$c = \frac{A}{B} \quad (2.44)$$

$$p = \frac{2 \cdot m \cdot R \cdot T_C}{V_{SE} B \cdot [1 - c \cdot \cos(\alpha - \delta)]} \quad (2.45)$$

10) Pression moyenne, p_m

$$p_m = \frac{2 \cdot m \cdot R \cdot T_C}{V_{SE} B \cdot \sqrt{1 - c^2}} \quad (2.46)$$

L'équation (2.46) représente la pression moyenne, pour le moteur. L'équation (2.46) est le substitut de l'équation (2.45) pour obtenir l'équation (2.47) de pression, par rapport à la pression moyenne, p_m

$$p = \frac{p_m \cdot \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(\alpha - \delta)} \quad (2.47)$$

11) Pression minimale et Maximum du moteur, p_{min} , p_{max}

La pression maximale et minimale peut être obtenue en utilisant les équations (2.48) et (2.49) par rapport à la pression moyenne, p_m , respectivement. [24]

$$p_{max} = p_m \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \quad (2.48)$$

$$p_{min} = p_m \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (2.49)$$

2.7 Application de moteur Stirling

Les moteurs Stirling sont utilisés dans beaucoup de domaines. On peut répertorier les usages suivants [21] :

- Un ventilateur de marque Ky-Ko a été fabriqué au Pakistan jusqu'en 1997. Il fonctionnait avec un Stirling chauffé à l'essence.
- Cryogénie : On utilise dans ce cas la réversibilité du moteur Stirling afin de produire du froid de façon industrielle. On utilise ce procédé pour liquéfier des gaz.
- Groupe électrogène : Développé et commercialisé par la société Philips après la seconde guerre mondiale, ce groupe avait une puissance de 150 watts.
- Motorisation automobile : dans la période 1940-1980 pendant laquelle la société Philips étudiait les applications possibles du moteur Stirling, une de celles-ci a consisté à équiper une Ford Torino, mais cette réalisation ne fut pas commercialisée et le projet a été abandonné.
- Recherche et exploitation océanographique : le SAGA (Sous-marin d'Assistance à Grande Autonomie).

- Sous-marin militaire suédois : le moteur sert de générateur auxiliaire. Il a été choisi pour son caractère silencieux.
- Bateaux de plaisance : le moteur Stirling commercialisé par la Société Whispergen permet de faire de la cogénération (production d'électricité et d'eau chaude) à bord d'un bateau ce qui permet un plus grand confort par le fait que le Stirling génère moins de bruit et de vibration qu'un groupe avec un moteur à combustion interne.
- Applications solaires : parabole réfléchissante concentrant les rayons du soleil au foyer de la parabole où est installé le moteur Stirling.
- Cogénération : fourniture d'électricité et de chauffage dans l'habitat individuel.
- Recherches universitaires : une dizaine d'universités dans le monde ont un banc de test pour étudier le Stirling en ayant développé leur propre moteur.
- Domaine spatial : (publication du projet fin 2009). La sonde Titan Mare Explorer (TiME) à l'étude depuis deux ans par la NASA voguerait sur " Ligeia Mare ". TiME utilisera un générateur ASRG (Advanced Stirling Radioisotope Generator) utilisant du plutonium comme source d'énergie.
- Le moteur Stirling a aussi servi de pompe à eau en agriculture et dans l'industrie, le premier moteur Stirling fabriqué, d'ailleurs selon les plans de Stirling lui-même a servi à cela.

2.8 Conclusion

Nous avons donné un aperçu sur le moteur Stirling dans ce deuxième chapitre. Il est à noter que les technologies Stirling sont une solution prometteuse pour la conversion d'énergie renouvelable en travail. Ces moteurs ont l'aptitude d'utiliser une multitude de sources de chaleur (énergie solaire, biomasse, etc.).

En outre, Ce moteur a été utilisé avec succès pour la conversion de l'énergie solaire en électricité en utilisant la technologie dite: 'Dish Stirling System' qui utilise un moteur Stirling placé au foyer d'un concentrateur parabolique.

Dans le chapitre suivant, nous donnons une approche intégrale sur le système de concentration solaire et les systèmes de poursuite solaires.

Chapitre 3 : Etude Théorique du concentrateur solaire parabolique

Chapitre 3 : Etude Théorique du concentrateur solaire parabolique

3.1 Introduction

Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis à convertir cette chaleur en énergie électrique. Selon le mode de concentration du rayonnement solaire.

La concentration solaire est la solution la plus rentable dans le domaine des énergies renouvelables, actuellement plusieurs pays ont lancé divers projet d'investissement dans ce domaine, l'Algérie avec son potentiel solaire important fait partie de ces pays avec la réalisation d'une centrale de 150 MW à Hassi Rmel et d'autres centrales programmées dans un future proche.

Dans ce deuxième chapitre, nous nous intéressons essentiellement à la partie théorique du concentrateur parabolique et les systèmes de poursuite correspondent à ces concentrateurs.

3.2 Technologies solaires à concentration

Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200°C et 2000°C, avec un rendement supérieur à 70%. Cette chaleur primaire peut ensuite être utilisée dans des procédés de transformation ou de synthèse de matériaux ou bien être convertie en vecteur énergétique comme l'électricité ou l'hydrogène.

Les principaux dispositifs optiques qui permettent de concentrer l'énergie solaire mettent en œuvre des surfaces réfléchissantes (Miroirs). La forme géométrique qui donne la meilleure concentration est la parabole. On rencontre typiquement 3 filières : les paraboles à foyer mobile (Dish), les collecteurs cylindro-paraboliques à foyer linéaire, les systèmes à tour à récepteur central (champ d'héliostats-tour). (Figure.3.1)

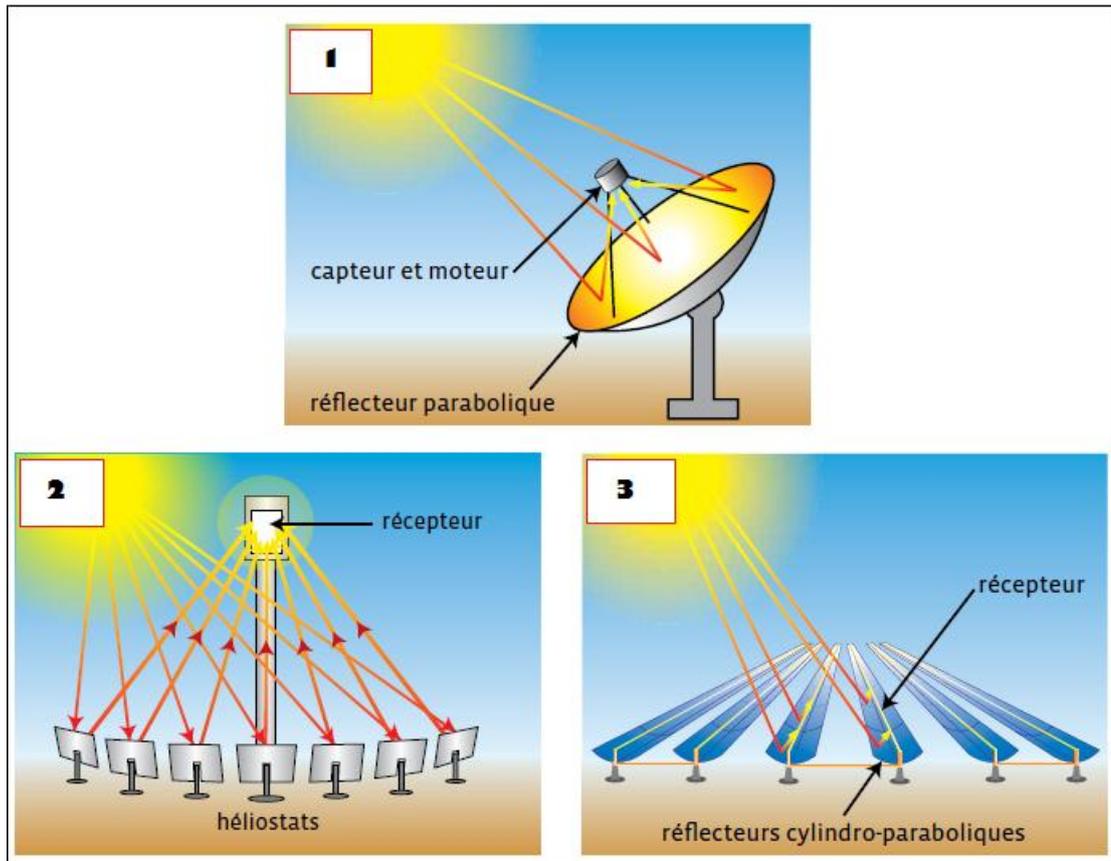


Fig.3.1. Les principales filières solaires à concentration.

Les fours solaires sont des variantes de la parabole à foyer mobile, et à foyer fixe qui nécessite une double réflexion de type héliostat plan-parabole. Les collecteurs linéaires de Fresnel offrent une solution alternative meilleur marché mais moins performante en terme de concentration. Les filières se distinguent par leurs dimensions élémentaires (donc leur puissance), leurs performances optiques et thermiques, et leur prix.

La capacité de production solaire pourrait être augmentée à court terme de 403 MWe: 50MWe au Nevada, 40MWe au Mexique, 33MWe en Egypte, 30MWe en Jordanie, 110MWe en Espagne, 40MWe en Inde, 100MWe en Afrique du Sud. [30]

Chapitre 3 : Etude Théorique du concentrateur solaire parabolique

Table.3.1. Caractéristiques des dispositifs à concentration [30]

Technologie	Cylindro-parabolique	Tour	Parabole	Four solaire
Rendement thermique nominal	70%	73%	75%	70%
Rendement maximum de conversion solaire-électricité	21%	23%	30%	--
Puissance des installations	80 - 300 MW	10 – 100 MW	1 – 100 KW	1 – 1000 KW
Concentration	400 – 800	700 – 1200	6000 – 10000	8000 – 20000
Température de travail	270 – 550 °C	550 – 1000 °C	600 – 1200 °C	1000 – 3000 °C
Prix du champ solaire	210 – 250 €/m ²	140 – 220 €/m ²	~150 €/m ²	~300 €/m ²

3.3 Etude théorique du concentrateur parabolique

3.3.1 La géométrie parabolique

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbteurs) qui capte la chaleur solaire ainsi concentrée. Pratiquement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil.

Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500°) sur le récepteur. [31]

3.3.1.1- Définition

Une parabole est l'ensemble des points situées à égale distance d'une droite fixe (D) appelée directrice, et un point fixe (F) appelé foyer. L'intersection de la parabole et de son axe est le sommet (V) qui est exactement intermédiaire entre le foyer et la directrice. (Figure.3.2) [31]

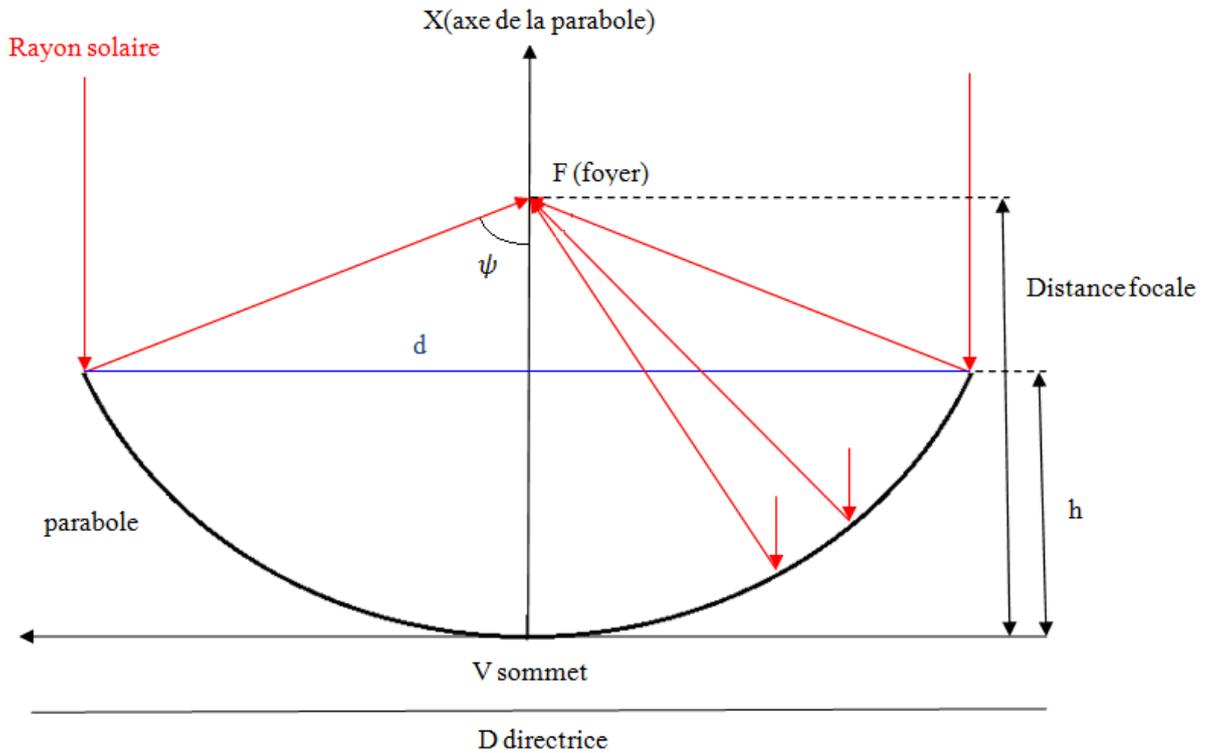


Fig.3.2. Propriétés géométriques de la parabole.

- L'équation de la courbe de parabole est [33] :

$$Y = \frac{1}{4 \cdot F} \cdot x^2 \quad (3.1)$$

- Rayon parabolique p [31] :

$$p = \frac{2F}{1 + \cos \Psi} \quad (3.2)$$

p : Rayon parabolique.

ψ : Angle d'ouverture

3.3.1.2 Angle d'ouverture d'une parabole

L'angle d'ouverture d'une parabole est calculé selon l'équation suivante (Figure.3.3):

$$\tan \Psi = \frac{(F/d)}{2(F/d)^2 - \frac{1}{8}} \quad (3.3)$$

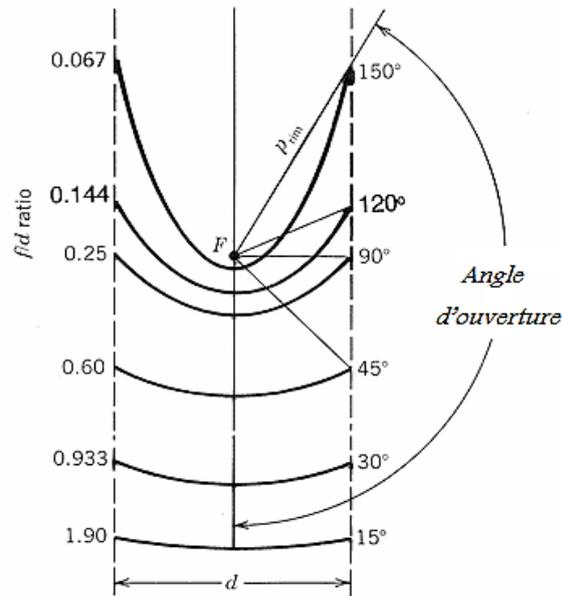


Fig.3.3. Section d'une parabole possédant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture d .

3.3.1.3 Taille d'une parabole

La taille de la courbe parabolique h peut être définie comme la distance maximale du sommet à une ligne tracée à travers l'ouverture de la parabole, elle est définie par [32]:

$$h = \frac{d^2}{16F} \quad (3.4)$$

De façon semblable, l'angle d'ouverture peut être trouvé en fonction des dimensions d'une parabole :

$$\tan \Psi = \frac{1}{\left(\frac{d}{8h}\right) - \left(\frac{2h}{d}\right)} \quad (3.5)$$

3.3.1.4 Surface d'une parabole

C'est l'espace incluse entre une parabole et une ligne à travers son ouverture, elle est indiquée par [31]:

$$A_x = \frac{2}{3} \cdot d \cdot h \quad (3.6)$$

3.3.1.5 Longueur d'une parabole

La longueur d'arc d'une parabole peut être trouvée en intégrant une surface différentielle de la courbe d'Angle de zénith, en appliquant les limites $X = h$ et $Y = d/2$ comme décrit sur la figure.3.2, on trouve [32]:

$$s_p = \left[\frac{d}{2} \sqrt{\left[\frac{4h}{d} \right]^2 + 1} \right] + 2f \ln \left[\frac{4h}{d} + \sqrt{\left[\frac{4h}{d} \right]^2 + 1} \right] \quad (3.7)$$

3.3.2 Facteurs de concentration

Les capteurs à concentration sont caractérisés par des différentes grandeurs géométriques [34] :

- Le facteur de concentration idéal est donné par :

$$C_{G \text{ idéal}} = \frac{A_a}{S_G} \quad (3.8)$$

Le facteur de concentration idéal c'est l'image nette du soleil dans le plan focal donnée par des rayons proches de l'axe optique.

- Le facteur de concentration géométrique est donné par :

$$C_G = \frac{A_a}{S_*} \quad (3.9)$$

- Le facteur de concentration énergétique est donné par :

$$C^* = \frac{Q_g^*}{I_h^*} \quad (3.10)$$

Q_g^* est le flux moyen par unité de surface de l'image de Gauss du soleil et I_h^* est le flux direct par unité de surface de la section d'ouverture du concentrateur.

3.4 Système de poursuite solaire

3.4.1 Aspects géométriques

Nous allons nous intéresser ici aux aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la Terre dans le but ultérieur de calculer les coordonnées du soleil.[36]

3.4.1.1 La longitude λ

Un point à la surface de la terre est repéré par deux coordonnées angulaires: la latitude φ et la longitude λ . C'est la mesure de l'angle entre le méridien du lieu et la méridienne origine des longitudes (Greenwich en Angleterre).

3.4.1.2 La latitude φ

La latitude φ permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de 0° à l'équateur à 90° au pôle Nord.

3.4.1.3 La déclinaison solaire δ

La déclinaison solaire δ est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons. La figure 3.4 en donne les valeurs remarquables.

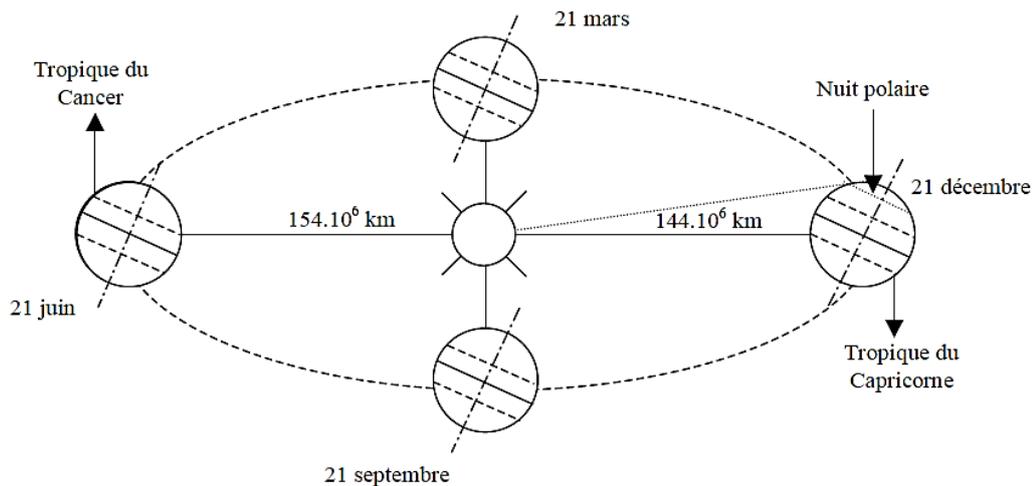


Fig.3.4. Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

Entre ces 4 points remarquables, δ prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par la relation :

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (3.11)$$

Avec n : nombre de jours écoulés depuis le premier Janvier

3.4.1.4 L'angle horaire ω

L'angle horaire ω (Figure.3.5) du soleil est déterminé par la rotation journalière de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Exprimé en ° d'angle,

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (3.12)$$

Où TSV est le Temps Solaire Vrai exprimé en heures.

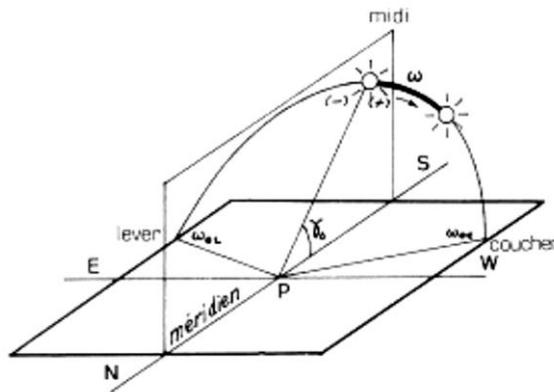


Fig.3.5. Angle horaire ω du soleil.

A chaque heure qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaire de 15° , soit encore 4mn de temps par 1° de longitude.

3.4.1.5 Hauteur angulaire h

C'est l'angle h formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil.

Il est donné par la relation :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (3.13)$$

On peut déduire les heures de lever et de coucher de soleil. On trouve, en faisant $h = 0$,

$$\cos \omega_0 = -\tan \varphi \tan \delta \quad (3.14)$$

et la durée astronomique du jour s'obtient tout aussi facilement en faisant :

$$D_0 = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (3.15)$$

3.4.1.6 Azimut a

C'est l'angle a (Figure.3.6) compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. L'origine des azimuts correspond à la direction du Sud dans l'hémisphère Nord. L'angle d'azimut est compté positivement vers l'Ouest. [36]

L'azimut est relié à l'angle horaire, la hauteur et la déclinaison par la relation:

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (3.16)$$

Et si l'on souhaite exprimer l'azimut indépendamment de la hauteur h , on peut utiliser la formule :

$$\tan a = \frac{\sin \omega}{\sin \varphi \cos \omega - \cos \varphi \tan \delta} \quad (3.17)$$

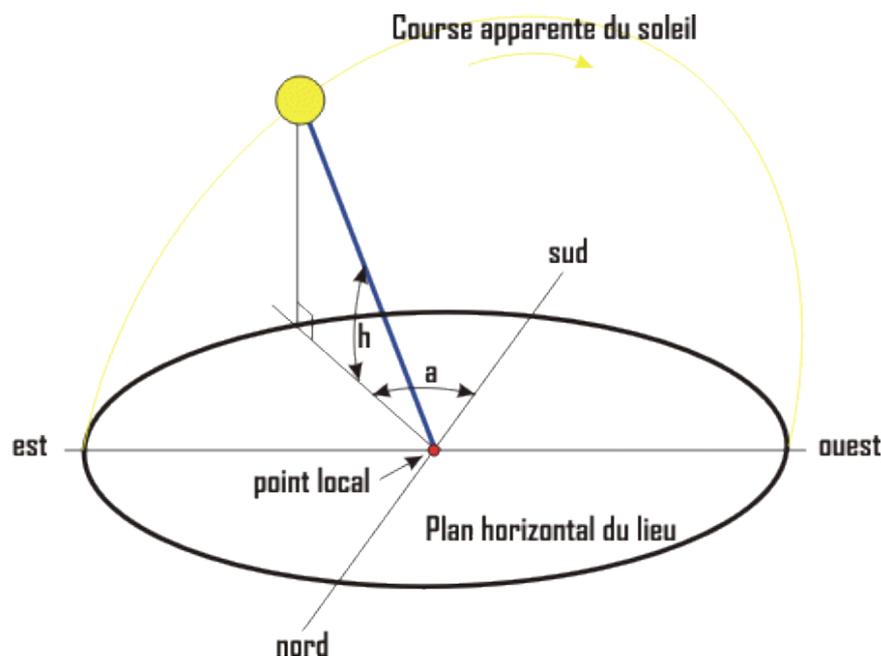


Fig.3.6. Hauteur angulaire h et azimut a du soleil [39]

3.4.2 Les coordonnées horaire

- **Temps Universel TU**

Le temps universel (TU) est défini par l'heure de passage du soleil à la méridienne origine, Il est donné par la relation :

$$TU = GMT + 12 \text{ (heures)} \quad (3.18)$$

Chapitre 3 : Etude Théorique du concentrateur solaire parabolique

Lorsque le soleil passe au méridien de Greenwich il est 12H00 en temps universel. [37].

- **Temps solaire local TSL**

La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude.

La correction de longitude est donnée par la formule: [36]

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15} \quad (3.19)$$

- **Equation du temps**

La mesure du temps était basée sur la rotation de la Terre : le jour était défini comme l'intervalle de temps entre deux passages du soleil par le même méridien. Toutefois, les jours solaires ne sont pas égaux, car l'angle horaire (ω) que fait le soleil avec le méridien du lieu ne correspond pas exactement au temps solaire local bien que la terre tourne régulièrement sur elle-même ; en effet, l'expérience montre que les passages du soleil dans le plan méridien d'un lieu donné ne se succèdent pas avec exactement 24h d'intervalle et le midi vrai peut atteindre une avance de 16mn ou un retard de 14mn par rapport à 12h. Selon l'époque de l'année. [36]

$$E = 229.2. (0.000075 + 0.001868. \cos B - 0.032077. \sin B - 0.014615. \cos 2B - 0.04089. \sin 2B) \quad (3.20)$$

Avec : $B = (n - 1) \frac{360}{365}$

- **Temps solaire vrai TSV**

C'est le temps solaire local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil [36] :

$$TSV = TSL + \Delta t \quad (3.21)$$

$$\Delta t = \frac{E}{60} \quad (3.22)$$

$$\omega = 15. \left(TU + \frac{\lambda}{15} + \Delta t - 12 \right) \quad (3.23)$$

3.4.3 Les différents types de suiveur solaire

Nous pouvons classer les suiveurs solaires de deux façons [34]:

- Selon le nombre des axes de suivi, on distingue le suiveur solaire à un seul axe, le suiveur solaire à deux axes et le suiveur solaire à trois axes qui est très peu utilisé.
- Selon le type de suiveur solaire passif, actif ou à boucle ouverte.

3.4.3.1. Suiveur solaire à un seul axe

Ce type de suiveur peut avoir un axe horizontal ou un axe vertical. Le type horizontal est utilisé dans les régions tropiques où l'élévation du soleil est très haute à midi et les jours sont courts. Le type vertical est utilisé dans les régions à haute latitude où le soleil n'est pas très haut mais les jours d'été peuvent être très longs.

Pour ce système l'angle d'inclinaison est réglable manuellement et la poursuite du soleil est suivie automatiquement d'Est à l'Ouest, à la nuit les suiveurs prennent la position horizontale.

- **Suivi à un axe continu :**

Le principe repose sur l'orientation à chaque instant du plan récepteur par rotation autour d'un axe (par exemple l'azimut), de telle façon que la normale de ce plan soit constamment dans le plan de la direction du soleil.

Dans ce cas de suivi, on peut citer celui à axe parallèle à l'axe de rotation de la terre, appelée montage polaire. L'axe fait un angle égal à la latitude avec l'horizontal et est dans le plan méridien et on aura ainsi : l'angle d'incidence du rayonnement égal à l'angle de déclinaison du soleil.

- **Axe horizontal orienté Est Ouest :**

Dans ce cas l'ajustement est quotidien et l'inclinaison du plan est telle que le rayonnement soit maximal durant toute la journée. Il y a lieu de calculer l'angle optimum du plan pour le maximum d'énergie et cela pour chaque jour.

- **Suivi à un axe quotidien :**

Dans ce cas, on est conduit à ajuster quotidiennement le plan récepteur. Ce type de suivi peut être étendu au suivi mensuel, en considérant pour le mois, la déclinaison moyenne (ou du jour type de chaque mois).

3.4.3.2 Suiveur solaire à deux axes

Ce type de suiveur à deux axes horizontal et vertical. Il y a beaucoup de logiciels permettant de prédire automatiquement et suivre le mouvement du soleil à travers le ciel. La majorité des technologies à concentration et spécialement les concentrateurs solaires paraboliques nécessitent des systèmes de poursuite solaire à deux axes. [34]

3.4.4 Mécanisme et plateforme d'un système de poursuite solaire

D'après l'aspect géométrique du mouvement de soleil on a montré que la quantité d'énergie solaire captée dépend de l'orientation du capteur solaire. La récupération efficace de l'énergie solaire ne peut donc se faire qu'à l'aide d'un système de poursuite solaire. Cette partie traite la plate-forme de mobilité qui assure le mouvement du système de capteurs solaires pour suivre le soleil afin de récolter l'énergie solaire pendant la journée.

La plate-forme de mobilité par poursuite solaire joue un rôle crucial dans le développement des applications de l'énergie solaire, en particulier dans les systèmes de concentration solaire à haute température qui convertissent directement l'énergie solaire en énergie thermique ou électrique. Dans ces systèmes, un système de poursuite de haute précision est nécessaire pour s'assurer que le capteur solaire est capable d'exploiter la quantité maximale d'énergie solaire tout au long de la journée. Afin de maintenir des niveaux élevés de puissance.

Les mécanismes de suivi solaire à deux axes entraînent des mouvements d'altitude et d'azimut indépendants les uns des autres. Des exemples de tels mécanismes d'entraînement de concentrateur solaire indépendants sont représentés sur la figure 3.7 en utilisant diverses configurations d'emplacement d'actionneur. Sur cette figure, le dessin (a) montre comment le mouvement d'élévation de la parabole pivote devant la parabole, et sur le dessin (b), le point de pivotement du mouvement d'élévation est situé derrière la parabole. Un problème avec les systèmes de suivi solaire conduits derrière la parabole est qu'il y a une forte polarisation de charge sur le devant de la parabole en raison de l'effet de levier du récepteur solaire (habituellement comme générateur de courant Stirling). Cela nécessite des entraînements de poursuite importants et trop coûteux pour surmonter la charge suspendue de l'unité de conversion de puissance sur les lecteurs d'azimut et d'angle d'élévation. De grands contrepoids sont souvent employés pour réduire la charge du récepteur solaire, mais cela augmente le poids total du système et augmente le potentiel d'instabilité du système. Un poids supplémentaire accru (sans avantage physique) nécessite des roulements plus grands et plus coûteux ainsi qu'un châssis de piédestal plus fort et plus coûteux. [38]

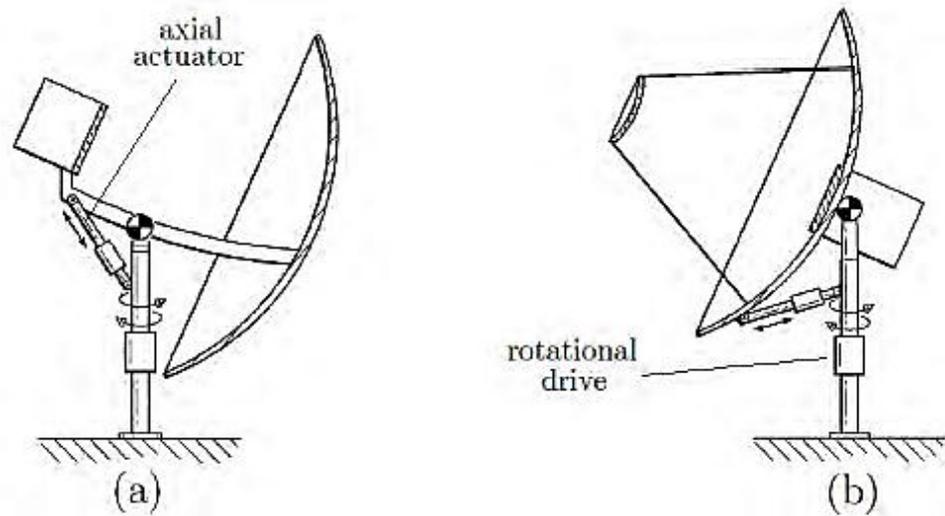


Fig.3.7. Système de poursuite solaire a deux axes utilisant des actionneurs indépendants dans diverses configurations. [38]

Mc, Donnell Douglas a proposé un nouveau système de poursuite solaire parabolique à focalisation ponctuelle avec des capacités de poursuite complètes sur un axe d'élévation sur azimut. Le réflecteur parabolique a été développé pour répondre aux exigences commerciales dans les applications connectées au réseau électrique et à distance (hors réseau). (Figure.3.8) [38]

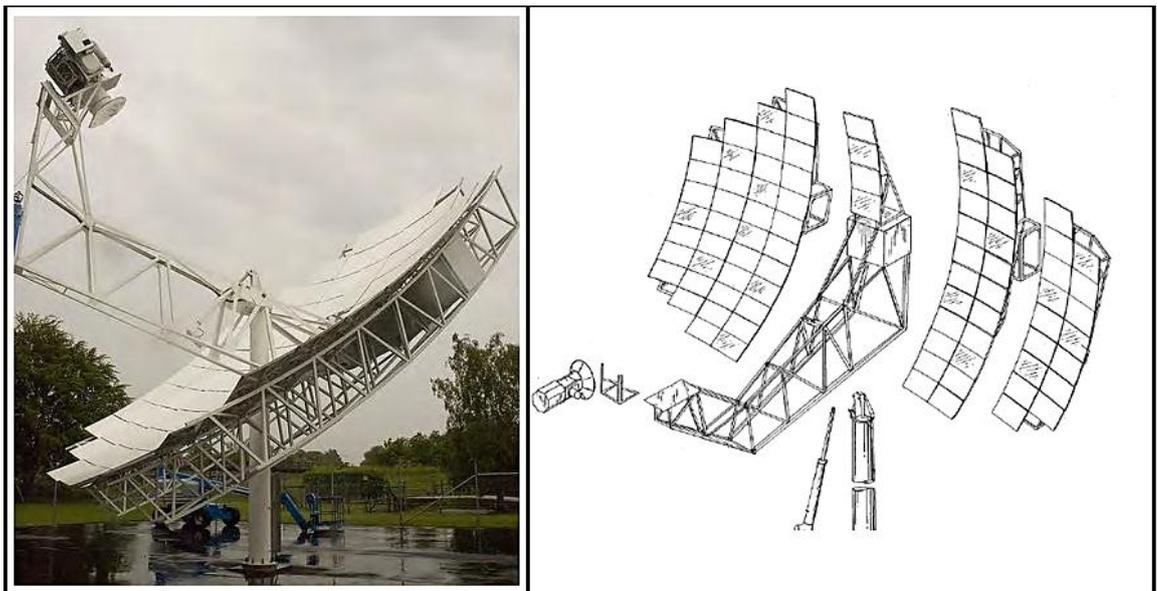


Fig.3.8. Système de poursuite solaire du concentrateur de Mc Donnell Douglas avec une plate-forme de type contre balance.

3.4.5 Méthodes du suivi de poursuit solaire

3.4.5.1 Méthode du suivi avec Capture LDR

Cette méthode c'est la plus simple et fonctionner en mode boucle fermée. Le principe utilisé pour la poursuite du soleil à deux axes repose sur l'exploitation du déséquilibre créé entre deux résistances LDR séparées par une paroi opaque au rayonnement solaire. Le circuit à LDR est solidaire avec le concentrateur. En fonction de la valeur du déséquilibre et de son sens le moteur est actionné. Le même principe s'applique à la poursuite horizontale, qu'à la poursuite verticale. La mise en rotation des deux moteurs (vertical et horizontal) sera commandée par un circuit de commande (Figure.3.9).

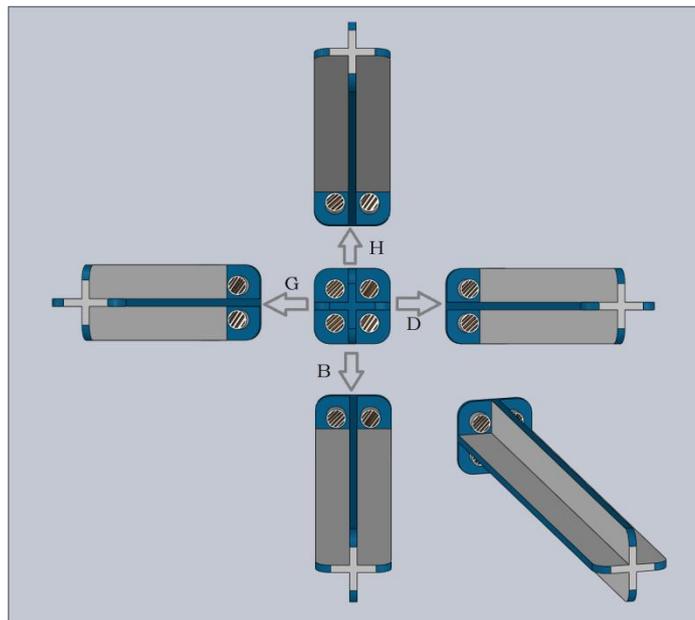


Fig.3.9. Capteur de positionnement LDR.

3.4.5.2 Méthode de la poursuite automatique (suivi aveugle)

La méthode de poursuite aveugle permet de déterminer la position du soleil à partir du calcul des angles solaires (l'angle d'élévation et l'angle azimut). En effet, à chaque période le suiveur tourne automatiquement à la position voulu quelques soit les conditions climatiques. Cette méthode permet d'avoir un rendement énergétique constant au cours de la journée. (Figure.3.10)

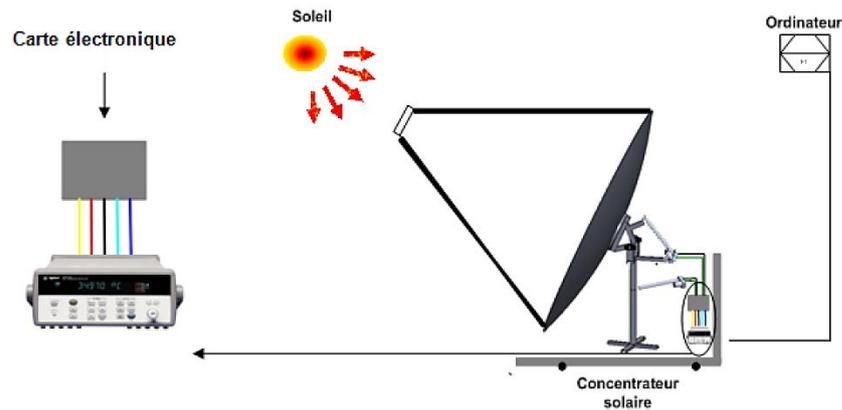


Fig.3.10. Système de poursuit automatique.

Les angles solaires peuvent être calculés pour chaque jour de l'année et au cours du temps à partir du lever jusqu'au coucher du soleil (Equation 3.13, Equation 3.16). La commande de ce genre de poursuite est basée sur l'organigramme présenté sur la figure.3.11. [34]

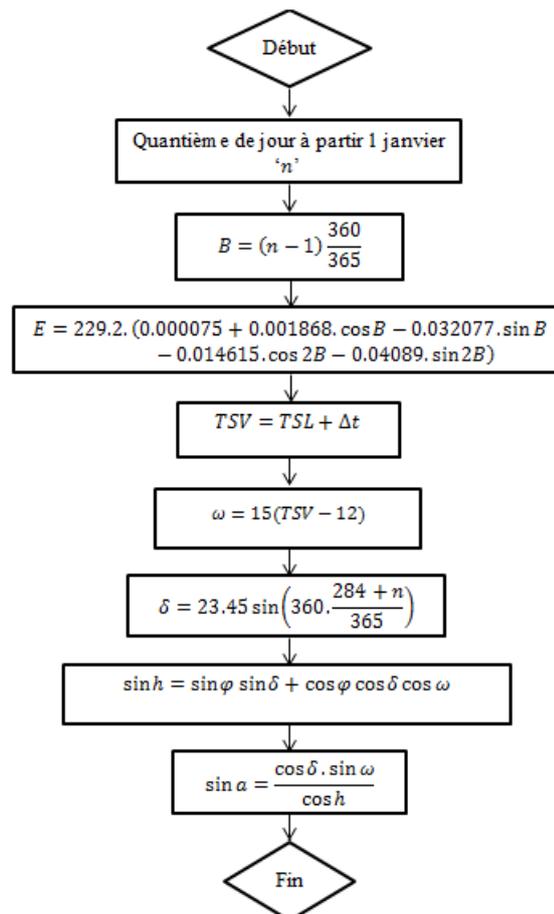


Fig.3.11. Organigramme de commande de système de poursuite solaire aveugle.

3.5 Conclusion

Les concentrateurs paraboliques utilisent le moteur Stirling pour la conversion d'énergies solaire en énergie mécanique, les systèmes à concentrations ont un rendement remarquable par rapport les systèmes photovoltaïques. L'utilisation d'un système de poursuite solaire est nécessaire pour le fonctionnement de ces systèmes.

Dans le prochain chapitre nous allons présenter en détail les différentes étapes de réalisation d'un concentrateur parabolique, un système de poursuite solaire a deux axes de rotation et la réalisation d'un moteur Stirling pour la conversion de l'énergie solaire concentrée en travail.

**Chapitre 4 : Réalisation du Moteur
Stirling et Concentrateur Parabolique**

Chapitre 4 : Réalisation du Moteur Stirling et Concentrateur Parabolique

4.1 Introduction

La réalisation d'un moteur Stirling avec concentrateur solaire semble très intéressante surtout si on le test sur le site de Ghardaïa, dans le but de maîtriser cette technologie et d'avoir une idée sur le comportement de ce moteur sous le climat de la zone de Ghardaïa.

Dans ce chapitre nous allons détailler la conception et la réalisation pratique du moteur Stirling, et nous donnons la partie conception et réalisation du concentrateur parabolique avec sa structure porteuse et ces articulations mécaniques. Nous donnons également l'étude et réalisation de la carte électronique de commande de système de poursuite solaire, et on termine par quelques tests qui ont été réalisés afin de déduire l'efficacité du système réalisé.

4.2 Dimensionnement et conception mécanique du moteur Stirling Alpha

4.2.1 Dimensionnement du moteur Stirling Alpha

Dans cette partie on va dimensionner le moteur Stirling selon les conditions thermiques de fonctionnement [40] :

Le cylindre du déplaceur est idéalement divisé en deux parties :

La longueur de la partie chaude = $2/3$ de la longueur totale.

La longueur de la partie froide = $1/3$ (Le refroidissement par ailettes).

La course = le diamètre de piston.

La longueur de cylindre du déplaceur = $3 \times$ diamètre de déplaceur.

Chapitre 4 : Réalisation du Moteur Stirling et Concentrateur Parabolique

- **Déplaceur :**

La longueur = 2/3 de la longueur totale du cylindre de déplaceur.

Le diamètre = diamètre du cylindre de déplaceur moins de 1 jusqu'à 1,6 mm.

- **Piston :**

Le diamètre = la course.

- **Rapport de volume v**

$$v = \frac{\text{Volume balayé par le déplaceur}}{\text{volume balayé par le piston}}$$

Volume balayé par le déplaceur = entre 1 à 1,5 x le volume balayé par le piston.

Le ratio entre 1 à 1,5 donne un bon compromis puissance / vitesse (Figure.4.1).

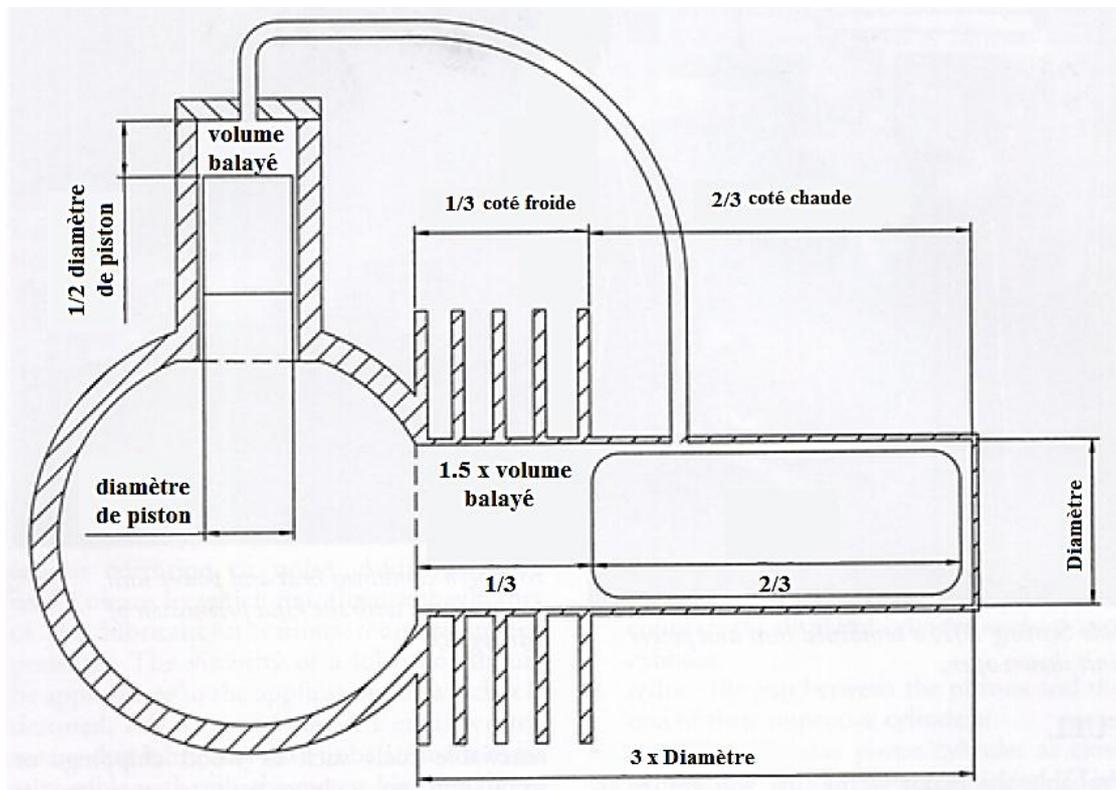


Fig.4.1 Les valeurs proportionnelles de moteur Stirling. [41]

4.2.1.1 Volume balayé par le déplaceur V_{SE} , et le piston V_{SC}

Appliquant l'analyse de Schmidt, nous avons choisi le diamètre de déplaceur :

$$d = 48.85 \text{ mm}$$

$$B_{dp} = d + 1,5 = 50,3 \text{ mm}$$

$$V_{SE} = \frac{\pi}{4} \cdot (50.3)^2 \cdot 40 = 79,48512 \text{ cc} \quad (\text{cm}^3)$$

Chapitre 4 : Réalisation du Moteur Stirling et Concentrateur Parabolique

On a: $v = \frac{V_{SE}}{V_{SC}} = 1,5$

$$V_{SC} = \frac{V_{SE}}{1,5} = 52,99008 \text{ cc}$$

Calcul de diamètre de piston :

$$B_{pp} = \sqrt{\frac{V_{SC} \cdot 4}{\pi \cdot 40}} = 41,06 \text{ mm}$$

Le diamètre de piston est $B_{pp} = 41,06$, pour des raisons de matériaux utilisée pour la réalisation des pistons on a opté à acheter ce piston, mais sur le marché on n'a pas trouver un piston avec ce diamètre, nous avons choisi un autre piston avec diamètre de $B_{pp}' = 40,07 \text{ mm}$.

Donc, les paramètres déjà calculés vont être changés :

$$V_{SC}' = \frac{\pi}{4} \cdot (40,07)^2 \cdot 40 = 50,44156 \text{ cc}$$

$$v' = \frac{V_{SE}}{V_{SC}'} = \frac{79,48512}{50,44156} \approx 1,57$$

4.2.1.2 Volumes morts V_D

On a :

$$V_{DE} = 1,88 \text{ cc} ; V_{DC} = 1,21 \text{ cc} ; V_R = 4,24 \text{ cc}$$

$$V_D = V_{DE} + V_R + V_{DC} = 7,33 \text{ cc}$$

4.2.2 Conception mécanique du moteur Stirling Alpha

Avant la conception mécanique de moteur Stirling. On a appliqué l'analyse de Schmidt sur notre moteur Stirling, après Nous avons commencé par fait la conception mécanique de toutes les pièces de moteur Stirling (24 pièces) utilisant le logiciel SolidWorks. Pour cela, le logiciel met à notre disposition de nombreux outils. Il permet de dessiner toute les pièces du moteur en 3D (Figure.4.2), puis il offre la possibilité de faire l'assemblage de toutes ces pièces (Figure.4.3), et bien sûr on peut faire l'animation pour une étude des mouvements de notre moteur.

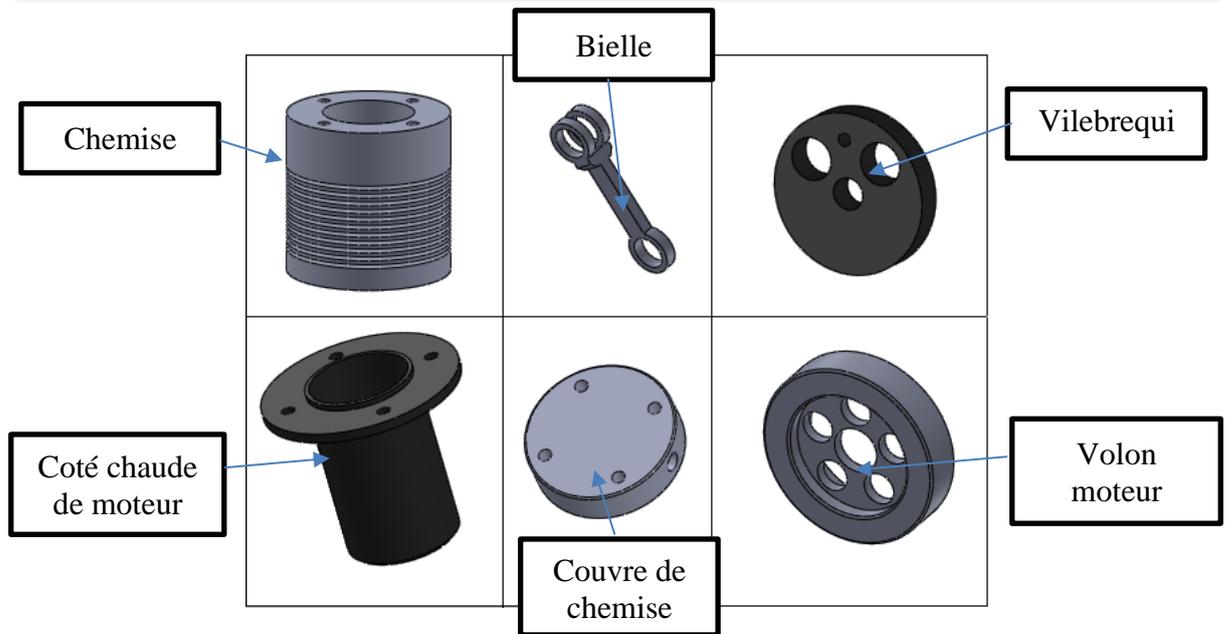


Fig.4.2. Pièces des moteurs Stirling en 3D

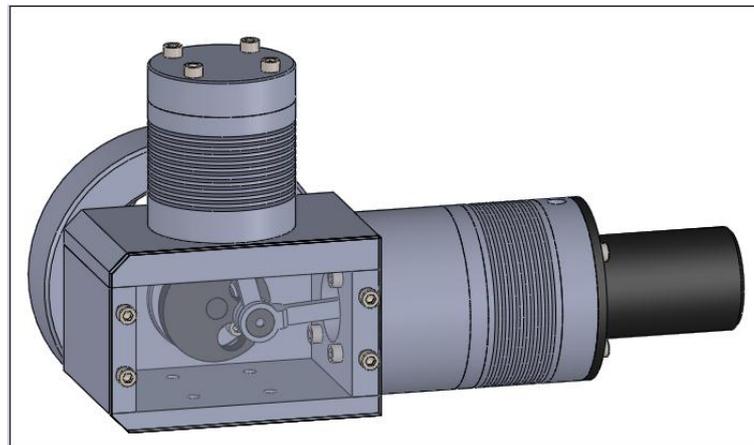


Fig.4.3. Assemblage de moteur Stirling en 3D.

L'étape de dessin sur ordinateur est donc indispensable afin de vérifier la cohérence des croquis initiaux et pour obtenir des plans clairs et propres.

Enfin, nous avons fait la mise en plan de chaque pièce. Comme les pièces étaient déjà dessinées en 3D, le passage à la mise en plan est très rapide grâce outils de SolidWorks.

4.2.3 Réalisation du moteur Stirling Alpha

Avant de réaliser le moteur Stirling Alpha, nous avons choisis le matériau selon les caractéristiques physiques et mécaniques de chaque pièce, Mais aussi pour des raisons économiques et la disponibilité des matériaux sur le marché Algérien.

4.2.3.1 Chemise de piston

La Figure.4.4. Représente la chemise de piston, c'est la pièce le plus important, elle est composée de deux pièces de différent matériaux :

- À l'extérieur on a utilisé l'aluminium pour assurer le refroidissement de la chemise, et nous avons créé à l'extrémité de chemise 6 ailettes.
- Dans le coté intérieur, nous avons utilisé la fonte à cause de sa vitesse de refroidissement, la résistivité contre la dilatation et la dureté, cette partie elle a été rectifiée pour faciliter le déplacement de piston, avec moins de frottement possible.



Fig.4.4. Chemise de piston réalisé.

4.2.3.2 Cylindres de déplaceur

C'est la partie qui initie le processus qui permet à l'énergie sous la forme d'un différentiel de chaleur d'être convertie en puissance mécanique. Et décomposé sur deux parties (Figure.4.5):

- Le récepteur de chaleur, c'est le côté chaud du moteur Stirling Alpha la température atteint les 600°, généralement il est fabriqué en acier, Pour garder le maximum de chaleur. Dans notre projet on a utilisé l'acier XC48 à cause l'usinabilité et la dureté de ce matériaux.
- L'autre côté (chemise de déplaceur) on a utilisé l'aluminium. Afin d'assurer le refroidissement de la chemise de déplaceur.



Fig.4.5. Cylindre de déplaceur réalisé

4.2.3.3 Vilebrequin

La fonction de vilebrequin d'un moteur à piston est d'achever la transformation de l'effort moteur alternatif en un mouvement rotatif fournissant un couple utile.

Le vilebrequin de moteur Stirling est composé d'un seul tourillon aligné à l'axe central en rotation par l'intermédiaire de palie. Entre ce palier se trouve la manivelle équipée de maneton excentrés sur lesquels sont montées les bielles (Figure.4.6).

L'excentricité E_{vilb} , est la distance entre l'axe du maneton et l'axe du tourillon, définit la course C du piston. Cette distance détermine en partie la cylindrée de moteur Stirling [43] :

$$S_{pp} = E_{vilb} \cdot 2$$

Dans notre projet on a étudié la course de piston par rapport le fonctionnement de moteur Stirling, en particulier le volume balayé de piston. Et on a conclu que la longueur de la course est : $S_{pp} = 40 \text{ mm}$

Après l'étude de vilebrequin, nous avons choisi l'acier XC48 qui est connu par sa dureté. Puisque tous les efforts de moteur Stirling sont concentrés sur le vilebrequin.



Fig.4.6. Vilebrequin du moteur Stirling.

4.2.4 Assemblage de moteur Stirling Alpha

Après la réalisation de toutes les pièces, nous avons commencé l'assemblage des différentes pièces (Figure.4.7) comme la chemise de piston et cylindre de déplaceur, après nous avons lubrifié tous les articulations, la chemise et le vilebrequin, on va présenter dans ce qui suite les différentes étapes de l'assemblage :

- Tout d'abord, on fixe le côté intérieur de la chemise et le côté extérieur de la chemise.
- On scelle à la presse le déplaceur et les bouchons de déplaceur par ajustement serré. Et On visse Le déplaceur sur la partie fileté de la tige du déplaceur.
- On fixe par ajustement serré l'axe de vilebrequin, le vilebrequin et l'axe du maneton.
- On relie la bielle du déplaceur ou tête du déplaceur avec un axe
- On visse l'axe de déplaceur avec la tête de déplaceur.
- On place également dans la chemise le piston avec un peu de jeu (H7 g6) pour qu'il ait une mobilité verticale.
- On fixe les roulements sur les bielles de déplaceur et piston, et les roulements de vilebrequin sur les palies.
- Enfin on relie les bielles de piston et déplaceur sur le vilebrequin

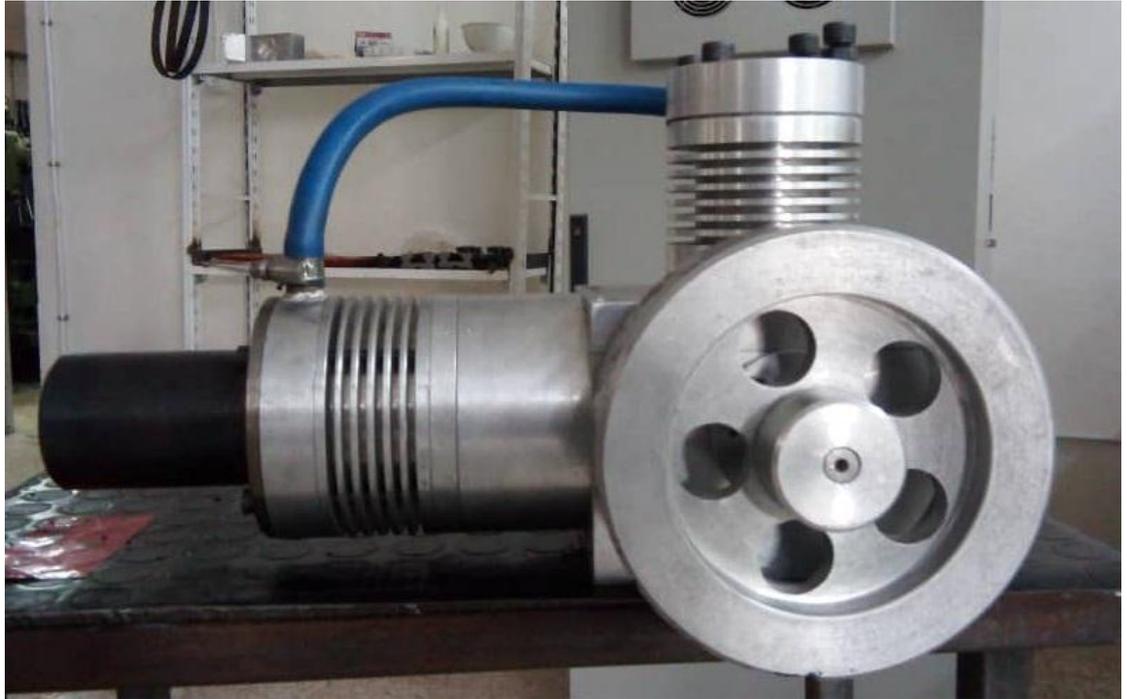


Fig.4.7. Assemblage finale de moteur Stirling Alpha.

4.3 Réalisation du concentrateur parabolique avec système de poursuite solaire

Dans cette partie nous allons présenter les différentes étapes de la réalisation du concentrateur solaire parabolique avec leur système de poursuite solaire conçu conformément au modèle théorique étudié au chapitre précédent. Notre travail a été réalisé au niveau de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, Algérie.

Notre réalisation est formée principalement par trois parties :

- Mécanismes et structure porteuse.
- Réflecteur parabolique.
- Système de poursuite solaire (Carte Arduino).

4.3.1 Mécanismes et structure porteuse

Le système de concentration a été confectionnée utilisant le logiciel de conception mécanique SolidWorks, en modélisant chaque pièce à part, puis les assembler en se basant sur les contraintes données afin d'obtenir le mécanisme souhaité. (Figure.4.8)



Fig.4.8. Conception mécanique du concentrateur sur SolidWorks.

Après la conception, on va présenter dans ce qui suit les différentes pièces réalisées et leur rôle :

- **Axe principale**

C'est l'élément pilier dans cette réalisation dont il supporte tout le poids (les efforts) du mécanisme tel que la parabole et le moteur. Dans cet Axe nous avons monté le vérin qui assure la rotation du système. (Figure.4.9)

- **Support de parabole et de moteur Stirling**

Vue les modifications apportées sur la parabole nous avons réalisé un support pour fixer la parabole avec le moteur Stirling et assuré l'équilibre entre les deux, sachant que le support est relié au vérin d'élévation (pour assurer l'inclinaison du système). (Figure.4.9)



Fig.4.9. Différentes parties du système à concentration.

Généralement la meilleure solution pour une poursuite solaire est l'utilisation des moteurs pas à pas, qui assurent une très grande précision et un freinage du système très rapide. Dans notre prototype nous avons choisi des vérins électriques destinés aux antennes paraboliques, ce choix étant basé sur les critères suivants : la puissance, le fonctionnement en milieu hostile, moteur à courant continu, les butées de fin de course...etc.

Leur principe de fonctionnement est simple, le mouvement de rotation du moteur est transmis à l'aide des engrenages au tige filetée qui transforment le mouvement de rotation en un mouvement de translation à l'aide de l'écrou solidaire au tube. Pour inverser des translations il suffit d'inverser le courant et cela en appliquant une tension inverse aux bornes du moteur.

Chaque vérin de notre système est monté sur un support qui est conçu et construit dans le but de tourner le concentrateur solaire, Le premier vérin assure le suivi de l'angle d'azimut qui construit un angle varie entre 0 et 120°, et l'autre assure le suivi de l'angle de l'élévation de soleil avec un angle varie entre 0 et 90°. (Figure.4.10)

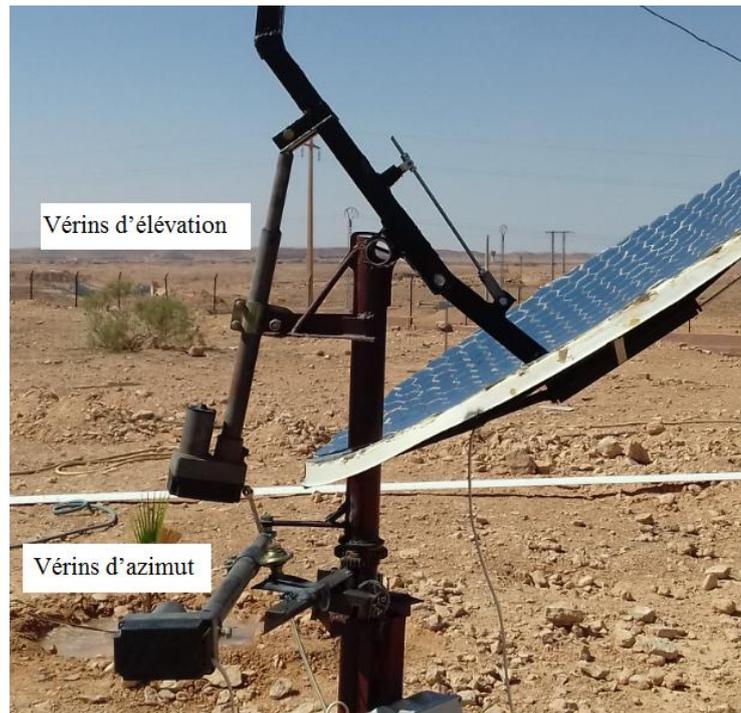


Fig.4.10. L'emplacement des vérins dans notre système.

4.3.2.1 Réflecteur parabolique

Notre système de captation constitué d'une parabole du récepteur satellitaire couverte avec des miroirs, D'abord, nous avons coupé 556 pièces des miroirs sous forme hexagonal d'une surface de $0,001624 \text{ m}^2$, après nous avons collé les miroirs sur la parabole d'une façon d'incurver la lumière réfléchir au foyer. (Figure.4.11)

Le coefficient de réflexion du miroir est entre 0,85 et 0,92



Fig.4.11. Les étapes de réalisation du réflecteur parabolique.

Chapitre 4 : Réalisation du Moteur Stirling et Concentrateur Parabolique

Le tableau.4.1 donne les spécifications de la parabole réalisé :

Tab.4.1. Spécifications de la parabole réalisé.

Paramètre géométrique	Valeur
Diamètre de l'ouverture	$d = 1,12 \text{ m}$
Surface totale	$S_{pt} = 0,9852 \text{ m}^2$
Surface utilisé	$S_{pu} = 0,9292 \text{ m}^2$
Distance focale	$F = 0,8 \text{ m}$
L'angle d'ouverture	$\psi_p = 30,80^\circ$

La concentration géométrique:

$$C = \frac{A_a}{S_G} = \frac{0,9292}{0,005026} \approx 185$$

4.3.2 Système de poursuite solaire

Puisque la position apparente du soleil est variable par rapport à un point de captation au cours d'une journée, nous serons donc obligés de réaliser un système de poursuite a un support motorisé par deux vérins électriques, ayant pour fonction d'orienter et aligner notre parabole face au soleil tout au long de la journée.

Ce système est basé sur la détection de la lumière reçue sur 4 photos résistances montées sur les coté d'une barre carrée, la différence de tension de celles-ci est utilisée pour la commande des nôtres moteurs.

4.3.2.1 Capteur LDR

Une photo résistance LDR (Light Dependent Resistor) est un composant de mesure de l'intensité lumineuse. Les matériaux les plus souvent utilisés dans les photorésistances sont du sulfure ou de cadmium qui se comporte comme des semi-conducteurs [38]. Les capteurs LDR sont caractérisés par un temps de réponse très court pour cette raison nous l'avons choisi pour notre application. On a séparé les 4 capteurs (Haut, Bas, Gauche, Droit) par une tige carré opaque.

Pour améliorer la précision de notre system on a calculé la longueur de la tige chaque $\theta' = 0,5^\circ$ on trouve que la longueur $l = 30 \text{ cm}$ avec un temps de réponse 2 min , celle-ci est mieux pour obtenue une bonne précision de localisation ; enfin nous placerons cette tige sur le côté haut du concentrateur parabolique. (Figure.4.12)

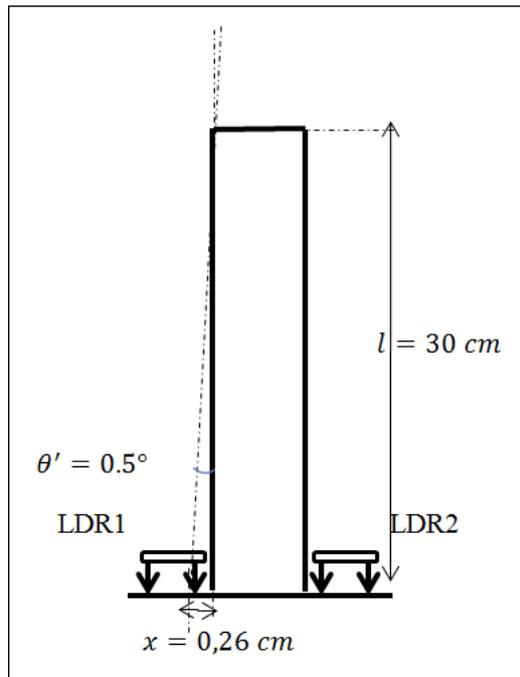


Fig.4.12. Dimensionnement de la tige avec l'emplacement des capteurs LDR.

4.3.2.2 Partie de commande

La partie commande est le centre de décision qui donne des ordres à la partie opérative. Dans notre cas on a utilisé la carte (Arduino Uno) comme une carte de commande.

Cette carte est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation. Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électrotechnique industrielle et les systèmes embarqués, Chaque module d'Arduino possède un régulateur de tension +5 V et un oscillateur à quartz 16 MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles) [44].

Pour programmer cette carte, on utilise l'logiciel IDE Arduino qui sert d'éditeur de code (langage proche du C). Une fois, le programme tapé ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte à travers la liaison USB.

Tan que le circuit de contrôle et de commande assure la fonction de comparaison des signaux émis par les capteurs vers l'Arduino, ce dernier calcule leur différence puis renvoie des impulsions aux vérins pour repositionner la parabole perpendiculairement au rayon solaire.

Pour assurer le bon fonctionnement de la carte de la commande, nous avons simulé notre système sur logiciel proteus-ISIS comme il est montré dans la figure.4.13

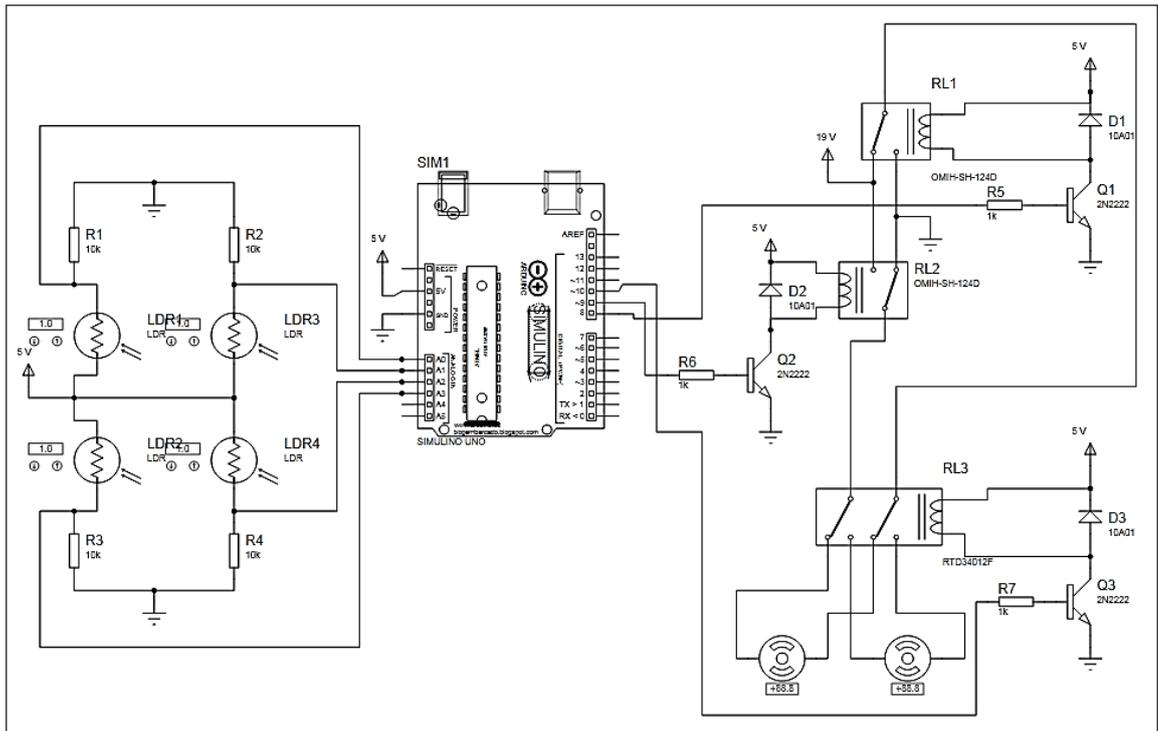


Fig.4.13. Simulation de la carte électronique du système de poursuite.

Après la simulation de notre système sur logiciel Proteus ISIS, et la vérification du fonctionnement de ce système, nous avons réalisé la carte de commande et le capteur LDR. (Figure.4.14)

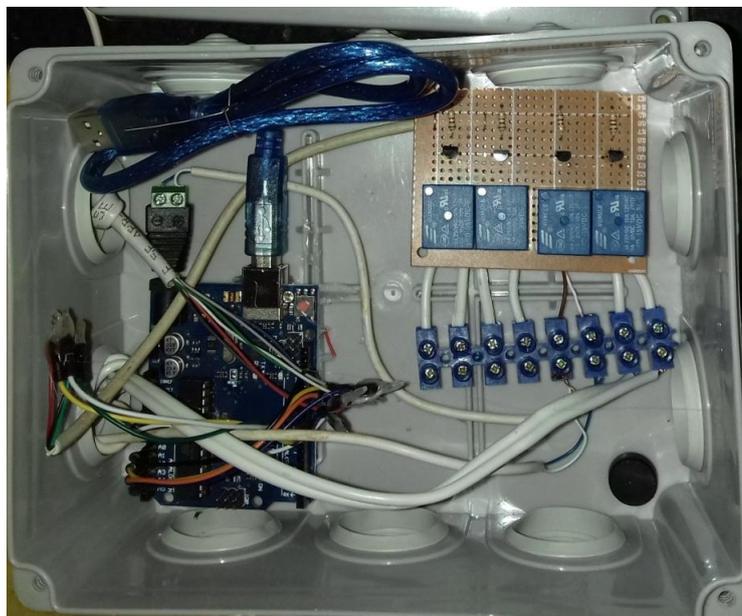


Fig.4.14. Carte de commande du système de poursuite.

Pour bien présenter le programme développé nous avons fait un organigramme qui explique le fonctionnement du programme de poursuite solaire. (Figure.4.15)

Chapitre 4 : Réalisation du Moteur Stirling et Concentrateur Parabolique

Le premier pas de notre système est détectée la valeurs de tension au borne des résistances LDR (H, B, G, D), ensuite il calcul la différence entre la tension de D et G ($\text{Horiz} = G - D$) pour orienter le système ver l'Est ou l'Oust jusqu'à ce que la valeur $\text{Horiz} = 0$, après il passe à la deuxième condition et calcul la différence entre les valeurs H et B ($\text{Verti} = H - B$) pour incliné le système vers le haut ou le bas jusqu'à ce que la valeur $\text{Verti} = 0$, le système est arrêté automatiquement, on a ajouté un intervalle de tolérance pour stabiliser le système.

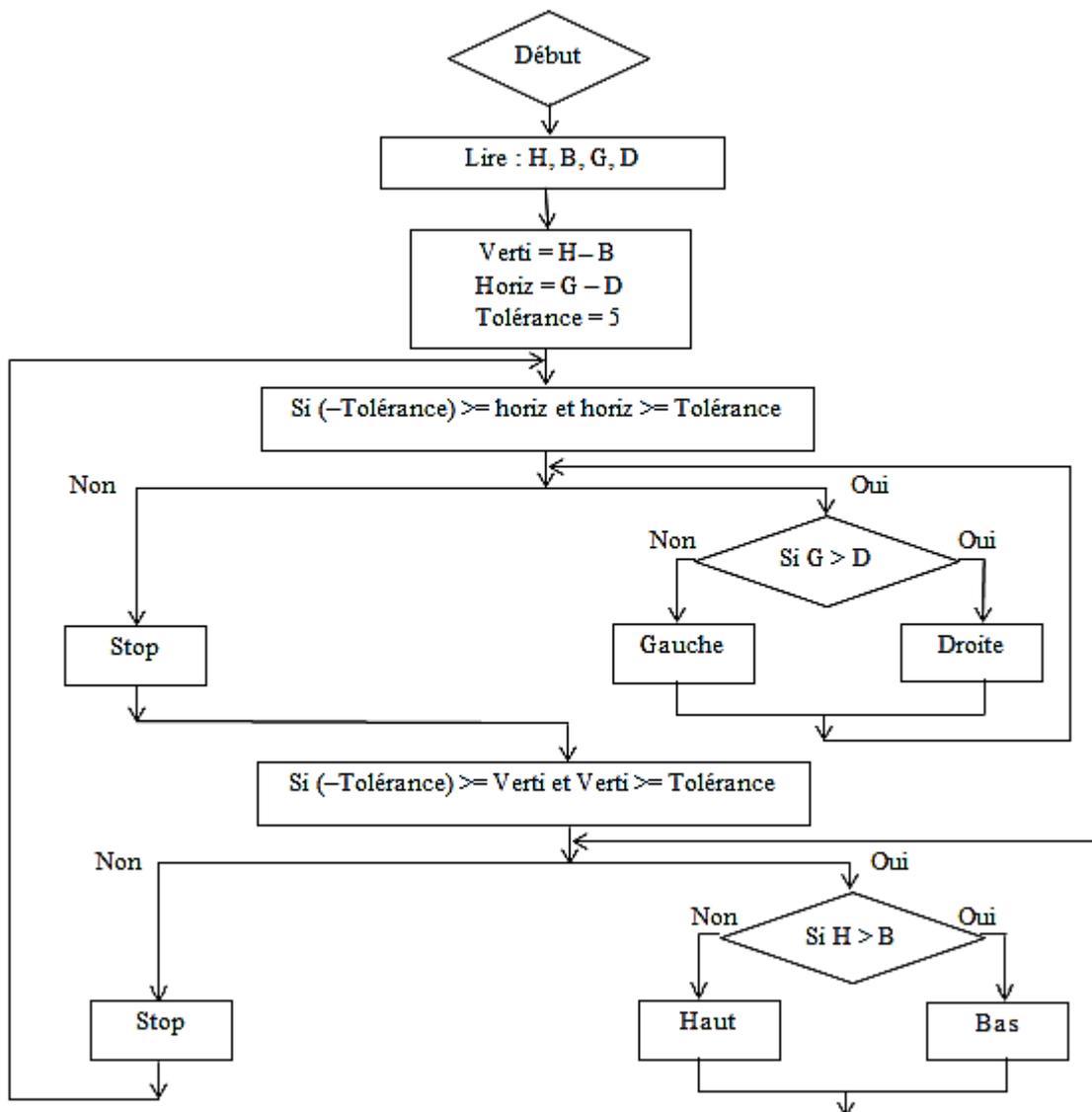


Fig.4.15. Organigramme de poursuite solaire.

Chapitre 4 : Réalisation du Moteur Stirling et Concentrateur Parabolique

4.4 Tests et Résultats

Après avoir réalisé le système moteur Stirling - concentrateur parabolique, nous avons effectué quelques tests afin de prouver son efficacité.

Le premier test a été réalisé le 24/05/2018 à partir de 11h58 du matin jusqu'à 13h23 pour un ensoleillement de 827 W/m^2 , avec une température ambiante de 37°C , un léger vent intermittent se faisait sentir. Dans ce cas nous avons placé un thermocouple au niveau du foyer. (Figure.4.16)



Fig.4.16 premier test qui a été réalisé

La figure.4.17 illustre la variation de la température au niveau du foyer de concentrateur en fonction du temps.

En 1 min 40 secondes, la température a augmenté rapidement de 37°C jusqu'à 511°C .

La température au niveau de foyer varie entre 500°C et 600°C avec une fluctuation apparente due au vent faible durant le test.

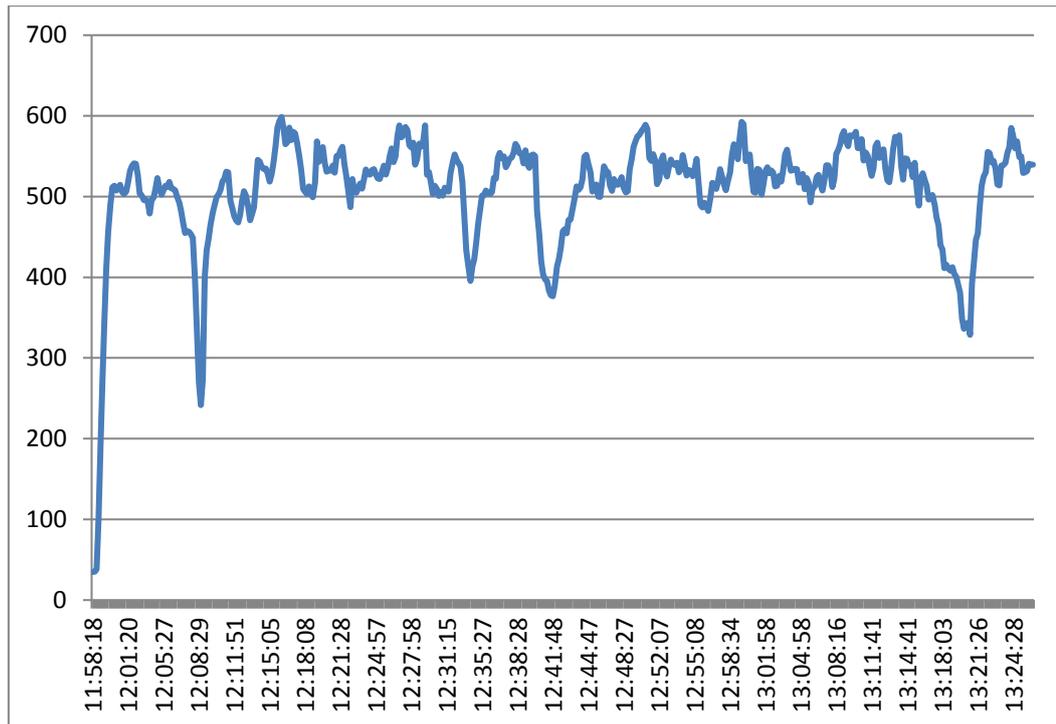


Fig.4.17. Variation de la température au niveau du foyer en fonction du temps, de la journée 24/05/2018.

Pour le deuxième test, nous avons utilisé une plaque d'acier, ces caractéristiques sont regroupées sur le Tableau 4.2.

Tab.4.2. Caractéristiques de la plaque d'acier [10c45e70]

Plaque d'acier XC48 (C45E)	
Densité	7,85 Kg/dm ³
La capacité thermique spécifique	460 J/ (Kg.K)
La conductivité thermique	50 W/ (m.K)
Diamètre	0,8 m
Epaisseur	10 mm
Surface	0.00503 m ²
Masse	0, 390 g

Le test a été effectué le 28/05/2018 de 10h03 du matin jusqu'à 11h12 pour un ensoleillement qui varie entre 328 W/m² et 809 W/m². Un thermocouple est fixé dans la plaque pour mesurer la température pour chaque intervalle de temps.

Chapitre 4 : Réalisation du Moteur Stirling et Concentrateur Parabolique

La figure 4.18 illustre la variation de la température en fonction du temps au niveau de la plaque d'acier placée au foyer du concentrateur. Nous constatons que la température de la plaque augmente lentement au cours du temps (43 minutes) pour atteindre une valeur maximale égale à 426°C. On peut constater que la température n'est pas vraiment stable au long du test due à la fluctuation de l'éclairement du au passage nuageux, comme montré dans la figure.4.19.

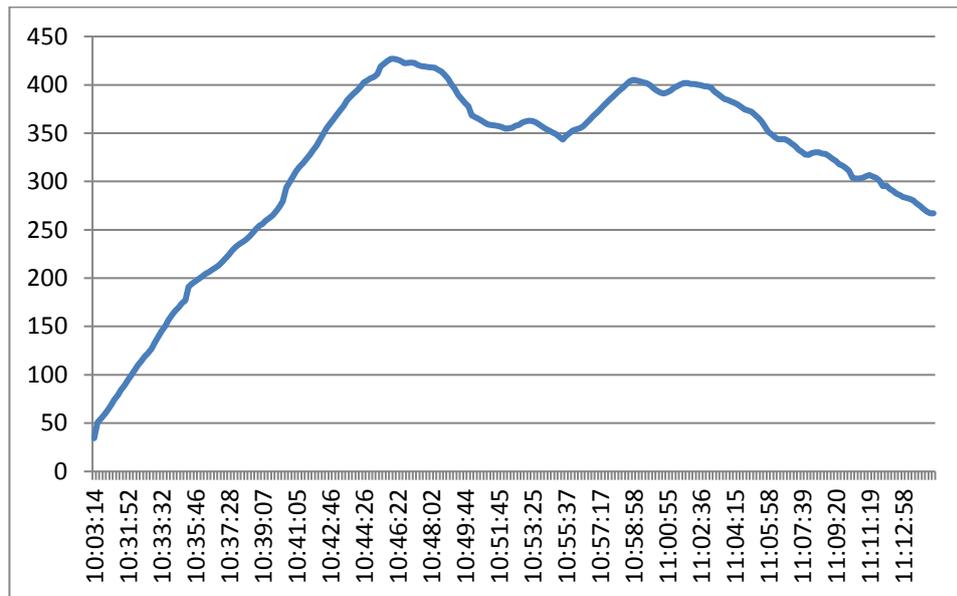


Fig.4.18. Variation de la température au niveau du foyer en fonction du temps, de la journée 28/05/2018.

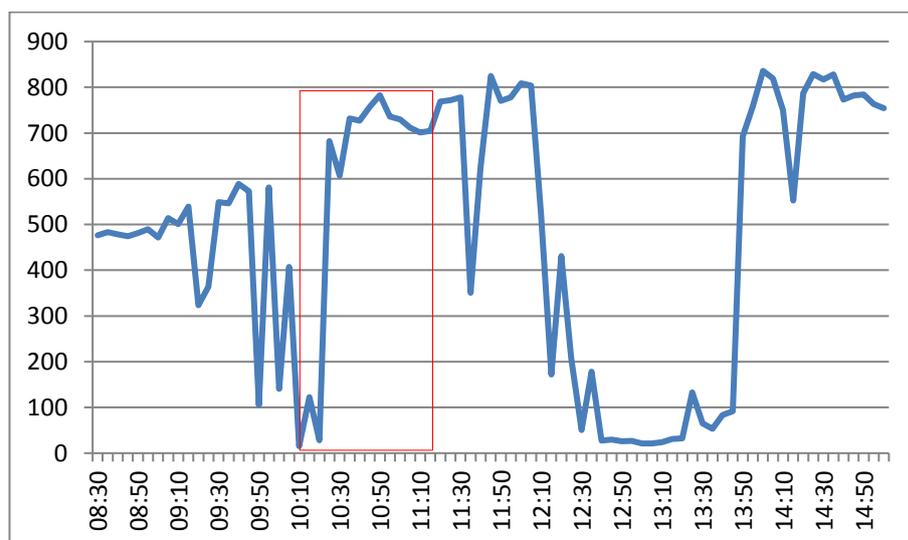


Fig.4.19. Rayonnement solaire direct normal du 28/05/2018.

Chapitre 4 : Réalisation du Moteur Stirling et Concentrateur Parabolique

Le troisième test a été effectué le 30/05/2018 de 12h20 du matin jusqu'à 13h12, cette fois on a peint la surface réceptrice de la plaque avec une peinture noire pour augmenter le coefficient d'absorption, donc capté le maximum des rayons solaires concentré. (Figure 4.20)



Fig.4.20. Plaque réceptrice au niveau du foyer du concentrateur parabolique.

Nous remarquons que la température est stable par rapport au deuxième test, elle atteint une valeur maximale égale à 450°C seulement en 7 minutes. (Figure.4.21)

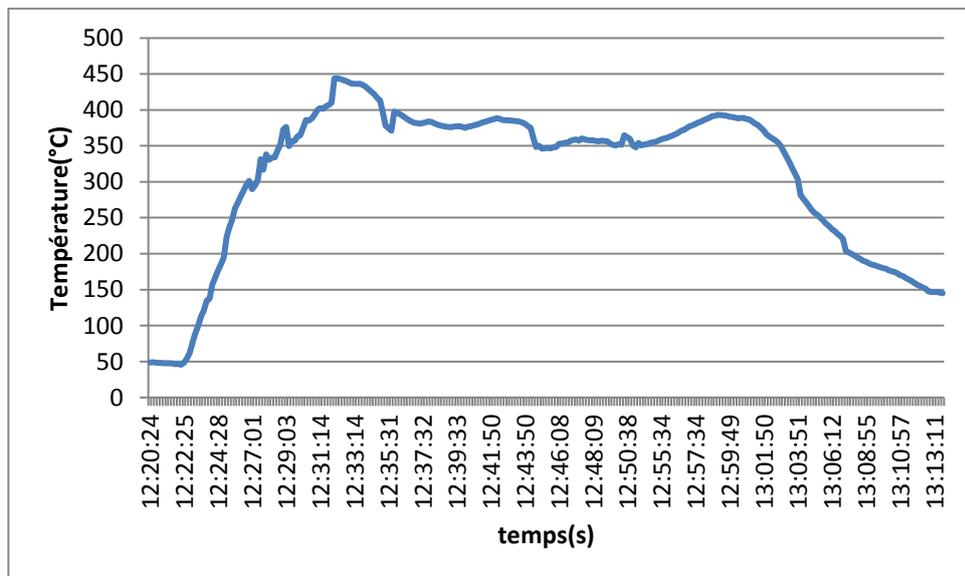


Fig.4.21. Variation de la température au niveau du foyer en fonction du temps du 30/05/2018.

A l'instant 13h02, nous remarquons que la température a baissé jusqu'à 150°C à cause d'une chute de rayonnement due au passage nuageux qui est visible sur le graphe du

Chapitre 4 : Réalisation du Moteur Stirling et Concentrateur Parabolique

rayonnement (Figure 4.22). Après 45 minutes de test la peinture noire utilisée sur la plaque a été brûlée et a changé de nature et de couleur (blanc), ou son rôle a été inverser pour être un isolant qui empêche la plaque de se chauffer.

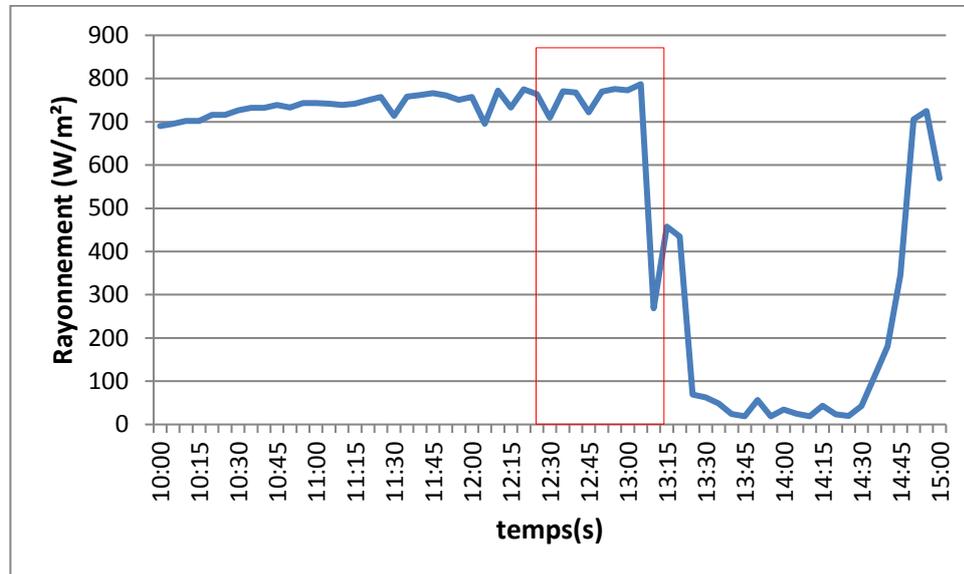


Fig.4.22. Rayonnement solaire direct normal du 30/05/2018.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté toutes les étapes de notre réalisation pratique, commençant par la conception mécanique du moteur Stirling et sa réalisation, passant à la conception et réalisation du système de concentration solaire, terminant par la réalisation de la carte de poursuite solaire à base de la carte de commande Arduino Uno. Des tests sont également réalisés afin de prouver l'efficacité du réflecteur et le moteur réalisé.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La réalisation de n'importe quel dispositif passe sur plusieurs étapes, commençant par l'étude théorique, simulation numérique, conception mécanique et réalisation pratique. Dans ce projet, nous avons réalisé un moteur Stirling solaire avec un concentrateur parabolique dans le but de maîtriser cette technologie et de tester ce genre de système sous notre climat (Climat Saharien, Ghardaïa).

Nous avons commencé par une étude détaillée sur les moteur Stirling, un historique, principe de fonctionnement, model de calcul et les différentes applications de ce dernier. Après nous avons utilisé un ensemble d'équations pour la détermination de différentes dimensions, des différentes parties du moteur. Utilisant le logiciel Solidworks, nous avons proposé une conception mécanique du moteur basée sur les dimensions déjà calculées. Après une étude du mouvement sur le logiciel Solidworks nous avons imprimé les plans de chaque pièce et commencer la réalisation du moteur.

La deuxième partie du projet c'est l'étude et réalisation d'un concentrateur parabolique, utilisant des morceaux du miroirs de quelques centimètres collés sur une antenne parabolique. Une structure porteuse avec des articulations a été réalisée pour donner à la parabole deux degrés de liberté dédiés au système de poursuite solaire. Un support du moteur est également réalisé pour assurer le positionnement du côté chaud du moteur au foyer du concentrateur parabolique.

Pour la commande du système de poursuite solaire, nous avons réalisé une carte électronique à base de la carte Arduino Uno, une lunette à base de quatre LDR a été également réalisée pour détecter la position du soleil afin d'orienter le concentrateur parabolique vers le soleil. Une stratégie de poursuite a été développée et implémentée dans la carte Arduino.

Des tests ont été réalisés pour avoir une idée sur le comportement et efficacité du système réalisé. Une chaine d'acquisition à base d'une unité d'acquisition et thermocouple a été montée à cet effet. Les résultats ont montrés une efficacité remarquable et encourageante pour travailler sur ce genre de technologies et les appliquer ici en Algérie.

En perspective en compte améliorer ce moteur en appliquant plusieurs idées, et travailler sur le stockage d'énergie afin d'assurer un fonctionnement du moteur jour et nuit.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [01] Henri Procaccia, L'énergie nucléaire, les énergies fissiles et renouvelables, Paris, page 290. 2014.
- [02] A. Labouret, P. Cumunel, J. Braun, B. Faraggi, Cellules Solaires. Les bases de l'énergie, photovoltaïque, DUNOD, paris, pages 18-19-22.
- [03] G.Sarlos et P. Haldi et P.Verstraete, Systèmes énergétiques : offre et demande d'énergie, Presses polytechniques et universitaires romandes, cop. 2003, pages 287-288-612-613.
- [04] A, MATHIEU, Contribution à la conception et à l'optimisation thermodynamique d'une Microcentrale Solaire Thermo-électrique, université de Lorraine, 2012.
- [5] Guide des Energies Renouvelables, Ministère de l'Energie et des Mines, Edition 2007, page 39.
- [06] P. Zweiackeret A. Vos, Morts pour la science, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes,page 62 .2008.
- [07] Jean C. Baudet, Les plus grandes inventions, La Boîte à Pandore, France, 2015.
- [08] P. Massue, Éléments De La Philosophie Moderne: Qui Contiennent La Pneumatique, La Métaphysique, volume 2, page 558, 1752.
- [09] B. Andrieu, L'écologie corporelle: Tome 2, Emersion vivante et techniques écologiques, paris, page 29. 2016.
- [10] Walker, Graham, Stirling Engines,université Press, Oxford, page i.1980.
- [11] Site Internet: https://fr.wikipedia.org/wiki/Augustin_Mouchot , 2/12/2017.
- [12] G. Amor, Optimisation des Dispositifs de Poursuite Solaire dans les systèmes à concentrations, Ecole nationale de polytechnique(ENP) Batna, 2013.
- [13] W. Palz, L'électricité solaire, DUNOD, page 185.
- [14] Y. Kerorguen, Energoscope: guide de toutes les énergies, paris, Page 55. 2009.
- [15] H. Abderrezzak, B. Seddik, Simulation d'un système CSP (cylindro-parabolique) à production d'électricité, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [16] Site Internet : <http://www.new.areva.com/FR/activites-3641/la-technologie-clfr-rflecteur-miroirs-de-fresnel-linaires.html>. 1/12/2017.
- [17] P. Fevre, R. Taillet, L. Villain, Dictionnaire de physique, pages 164-165-166.
- [18] B. Rivoire, responsable du « groupe d'évaluation scientifique Thémis » de 1982 à 1987, actuellement ingénieur de recherche à l'IMP, un laboratoire propre du CNRS (site d'Odeillo), membre de l'AEPN.

- [19] Site internet : https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling, 7/02/2018
- [20] A. Wagner, Calculations and experiments on y-type Stirling engines, University of Wales, Cardiff, 2008, pages 14-23.
- [21] N, Lanciaux, Contribution au développement d'un moteur Stirling: De la cogénération. dans le bâtiment à l'autonomie énergétique, l'université d'évry-val d'essonne, 2015, pages 4-23-24.
- [22] R. Darlington, K. Strong, Stirling and Hot Air engines, Ramsbury crowood, 2005, pages 31,32.
- [23] C, S, Vineeth, Stirling Engines: A Beginners Guide, 2011, pages 19, 30, 38.
- [24] A, Jiménez Abete, Testing and Optimization of the performance of a Stirling engine, hochschule osnabrück, Allemande, 2013, pages 16,17,37-40, 47.
- [25] D. Vuillamy, Étude des mécanismes piston/bielle/vilebrequin des moteurs à combustion interne ou externe, insa rouen, France, 2012, pages 15,16.
- [26] Site internet : https://en.m.wikipedia.org/wiki/Stirling_cycle.
- [27] M. Dancette, G. Wintrebert, Etude et Réalisation d'un Modelé sur Table de Moteur Stirling de 3 KW Scelle a Sortie Electrique, Brussels - Luxembourg, 1985, pages 8,11-14.
- [28] Site internet : https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/isothermal/Schm_summary.html.
- [29] M. Dawi, M. Othman, I. Musirin, A. Mohd Kamaruzaman, A. Arriffin, N. Salim, Gamma Stirling Engine for a Small Design of Renewable Resource Model, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2017, pages 351-354.
- [30] A. FERRIERE, G FLAMANT, Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration, 2005.
- [31] M. Bensafi, S. Zegnoun, B. Draoui, Etude Expérimentale Et Modélisation D'un Concentrateur Parabolique Solaire Dans La Région De Béchar, Université de Béchar, 2013, Pages 44-45.
- [32] Z. Ilhem, Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire Parabolique, UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE, 2005, pages 42-44.
- [33] A. Gama, M. Haddadi et A. Malek, Etude et réalisation d'un concentrateur cylindro parabolique avec poursuite solaire aveugle, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, 2008 page 442.
- [34] S. SKOURI, Contribution à l'Étude des Concentrateurs Solaires, Université de Monastir, 2016 pages 20, 62-64, 66,72.

- [35] F. Hénault, Optique et concentration de l'énergie solaire, Université Grenoble-Alpes-france, 2018 pages 55 - 56.
- [36] A. Ricaud, Gisement solaire et transferts énergétiques, Université de CERGY-PONTOISE, Jan 2011, Pages 25 - 31.
- [37] R. RAUD, Capteur solaire et production de vapeur, Association SOLEIL & VAPEUR. Mars 2012 page 12.
- [38] G. Prinsloo, R. Dobson, SOLAR TRACKING, 2015, ISBN: 978-0-620-61576-1, pages 27 – 28,100.
- [39] site internet : <http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/solaire.htm> 10/05/2018.
- [40] Site internet :
http://ridders.nu/Webpaginas/pagina_ervaringen_tips_stirlings/ervaringenstirlings_frametekst_engels.htm, 25.05.2018.
- [41] R.darlington, K.strong, Stirling and hot air engine, 1985, page 30.
- [42] Site internet : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonte_\(m%C3%A9tallurgie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonte_(m%C3%A9tallurgie)), 25.05.2018.
- [43] R.brun, science et technique du moteur Diesel industriel et de transport, TOME 2, 4^e édition,France, 1984, page 337.
- [44] H. Weisslinger, S. Landrault, Arduino : Premiers pas en informatique embarquée, 2014, page 35.
- [45] Site internet :
<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSpeZgMqcJSQ4eCuwpI41s89H-hrHL1rb-uwYrVFoqUdrj0A0fSsQ> 01/07/2018.
- [46] Site internet :<http://www.enerzine.com/UserFiles/Image/breve14666b.jpg> 01/07/2018.
- [48] Site internet :
https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/dish_stirling_0_zoom.jpg
01.07.2018.
- [47] Site internet :https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ-QPsTBubCYQFdCyh0cB5_FHNVIQLxvxbn3kOTCQPSzRDp5kP8aA 02.08.2018.
- [46]Site internet :<http://www.enerzine.com/UserFiles/Image/breve14666b.jpg> 01/07/2018.
- [49] Site internet : <http://tamagozilla.blogspot.com/2009/12/mo-memoir-sunday-27-december-2552.html> 04/07/2018.
- [50] Site ineternet : <https://fr.demotor.net/cycles-theoriques/mixte-sabathe.html> 04/07/2018.