



Université Saâd Dahlab, Blida-1
Faculté de Technologie
Département des Énergies Renouvelables

Par BELHADJ Hichem

Pour l'obtention du diplôme :
MASTER en Énergies Renouvelables
Option : Conversion Thermique

Thème :

Etude et réalisation d'un moteur de stirling

Soutenu devant le jury composé par :

Dr N.KASBADJI	Directrice des recherches	UDES	Président
Pr M.MERZOUK	Professeur	USDB1	Promoteur
Mme S.CHAOUCHI	MAA	USDB1	Examinatrice
Mr K.KACI	MAA	USDB1	Examineur

Juin 2018

Remerciement

*Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation d'un mémoire de master en Energies Renouvelables, option Conversion Photovoltaïque au sein du Département des Energies Renouvelables sous la responsabilité du Mr. MEGUENNI Hakim sous la direction du **Pr. MERZOUK Mustapha** que je remercie vivement pour toute l'aide qu'il m'a apportée durant toute la durée de préparation du présent mémoire.*

Je remercie les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Je réserve une pensée toute particulière à mes chers parents ma chère sœur et mes chers frères qui m'ont toujours soutenu et guidé tout au long de mes études. Qu'ils trouvent, en ce mémoire, le modeste témoignage de ma profonde reconnaissance. Enfin, j'aimerais remercier ma famille, ainsi que mes amis et mes collègues qui m'ont aidé et encouragé tout au long de mon travail.

Résumé

Les paraboloïdes de révolutions sont une technologie de production d'électricité, ils se composent d'un moteur de Stirling couplés à un concentrateur parabolique qui fait la conversion de l'éclairement solaire direct en travail mécanique puis en électricité à l'aide d'une génératrice placée en bout d'arbre.

Le présent travail porte sur l'étude et la réalisation d'un moteur de type alpha, Après l'étude du principe, les plans de définition des différents composants ont été établis. La réalisation a été confiée à un atelier spécialisé après spécification des matériaux.

Une fois réalisé, le prototype a été testé. Ses performances expérimentales ont été déterminées et comparées aux résultats théoriques.

Mots clés : paraboloïde de révolution – moteur de Stirling – concentrateur parabolique

ملخص

الأطباق الدوارة هي تقنية لتوليد الطاقة ، وهي تتكون من محرك ستيرلنج إلى مركز مكافئ يعمل على تحويل ضوء الشمس المباشر إلى عمل ميكانيكي ثم إلى كهرباء باستخدام مولد وضعت في نهاية رمح. يتناول هذا العمل دراسة وإدراك محرك من نوع ألفا، وبعد دراسة هذا المبدأ، تم وضع خطط تعريف المكونات المختلفة. وعهد التحقيق إلى ورشة عمل متخصصة بعد تحديد المواد. بمجرد تحقيقه، تم اختبار النموذج الأولي. تم تحديد أدائها التجريبي ومقارنتها بالنتائج النظرية.

Abstract

Revolving dishes are a power generation technology, they consist of a Stirling engine coupled to a parabolic concentrator that converts direct sunlight into mechanical work and then into electricity using a generator placed at the end of a shaft.

The present work deals with the study and the realization of an alpha type engine. After the study of the principle, the plans of definition of the different components have been established. The realization was entrusted to a specialized workshop after specification of the materials.

Once realized, the prototype has been tested. Its experimental performances were determined and compared to the theoretical results.

Sommaire

Introduction général

Chapitre 1 : Revue Bibliographique

1. Introduction	1
2. Eclairage solaire	1
2.1. L'éclairage direct normal hors atmosphère	1
2.2. Atténuation de l'éclairage Solaire	1
2.3. Estimation du rayonnement par ciel clair	2
2.3.1. Estimation de l'éclairage solaire direct normal par ciel clair	2
2.3.2. Estimation de l'éclairage solaire par ciel variable	5
2.4. Estimation de la température ambiante	5
3. La conversion de l'éclairage solaire	6
3.1. Les concentrateurs solaires	6
3.1.1. Les différents types de concentration solaires	6
3.2. Paraboloïdes de révolution	7
3.2.1. Le concentrateur	9
3.2.2. Le Récepteur	12
3.2.3 : Le moteur Stirling	14
4. Conclusion	20

Chapitre 2 : Etude du paraboloïde de révolution

1. INTRODUCTION.....	21
2. Le concentrateur : (la parabole).....	22
2.1. Définition.....	22
2.2. Grandeurs Caractéristiques.....	23
2.3. Paramètres Géométriques.....	23
2.4. Coefficient de Concentration géométrique.....	25
2.4.1. Taille d'une parabole.....	25
2.4.2. Surface d'une parabole.....	25
2.4.3. Système optique d'une surface parabolique.....	25
2.4.4. Surfaces réfléchissantes.....	26

2.4.5. Récepteur (absorbeur / chaudière).....	27
2.5. Efficacité du concentrateur.....	28
3. Moteur Stirling.....	29
3.1. Configuration Alpha.....	29
3.1.1. Le cycle théorique.....	29
3.1.2. Régénérateur.....	32
3.1.3. Fluides de travail du moteur Stirling.....	32
3.2. Analyse idéale du moteur Stirling.....	35
3.3. Calculs thermodynamiques.....	35
4. Conclusion.....	36

Chapitre 3 : Réalisation et tests

1. Introduction	37
2. Le moteur Stirling du type alpha	37
3. Les différents types d'opération	40
4. Etapes d'usinage	41
4.1. Fabrication du radiateur.....	41
5. Déroulements des tests.....	43
6. Résultats des tests	43
7. Conclusion.....	45

Conclusion général

Références

Liste de figure

Figure 1.1: Les différents types de concentration solaires.....	7
Figure 1.2: Capteur parabolique avec moteur Stirling	8
Figure 1.3 : Schéma du concentrateur parabolique à moteur Stirling	9
Figure 1.4 : Héliodyne	11
Figure 1.5: Visualisation du miroir	12
Figure 1.7: Cascade d'énergie pour le système SBP.....	14
Figure 1.8: Robert STIRLING	15
Figure 1.9 : Cycle Stirling théorique : Digramme PV et Diagramme TS	17
Figure 1.10 : Moteur Stirling de configuration alpha	19
Figure 1.11 : Moteur Stirling de configuration beta	19
Figure 1.12 : Moteur Stirling de configuration Gamma.....	20
Figure 2.1 Différents montages des Concentrateurs de Révolution.....	21
Figure 2.2 : Centrale Solaire de Maricopa.....	21
Figure 2.3 : Concentrateur parabolique.....	22
Figure 2.4 : Caractéristiques d'une parabole.....	23
Figure 2.5 : Section d'une parabole possédant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture d	24
Figure 2.6 : Distance focale en fonction de l'angle d'ouverture d'une parabole d =1m.....	24
Figure 2.7 : Système optique d'une surface parabolique	26
Figure 2.8 : Revêtement multicouche du miroir.....	27
Figure 2.9: Diagrammes du cycle Stirling Idéal.....	29

Figure 2.10 : Phase de compression du moteur Alpha.....	30
Figure 2.11 : Transfert de chaleur du moteur alpha du régénérateur au fluide de travail.....	30
Figure 2.12 : Phase de détente du moteur Alpha	31
Figure 2.13: Transfert de chaleur du moteur alpha du fluide de travail vers le régénérateur...	32
Figure 2.14: Conductivités thermiques des fluides de travail en fonction de la température...	33
Figure 2.15 : Chaleurs spécifiques des fluides de travail en fonction de la température.....	33
Figure 2.16 : Viscosités des fluides de travail en fonction de la température.....	34
Figure 2.17 : Densités des fluides de travail en fonction de la température	34
Figure 3.1 : Le moteur Stirling alpha	37
Figure 3.2 : Dessin d'assemblage des pièces de notre moteur	38
Figure 3.3 : Lingot d'aluminium.....	42
Figure 3.4 : La fabrication du radiateur	42
Figure 3.5 : La variation du rendement en fonction de la température de la source chaude.....	44

Liste de tableau

Tableau 1.1 : Coefficients de Hottel	3
Tableau 2.1 : Spécificités du système de concentrateur pour plusieurs fabricants	28
Tableau 3.1 Dimensions géométriques du moteur Alpha.....	39

Nomenclature

A_a : Surface de l'absorbeur [m^2].

B : Coefficient d'atténuation atmosphérique.

C : Coefficient de concentration géométrique.

C_n : Indice de clarté.

d : Diamètre d'ouverture [m]

I_0 : Eclairement hors atmosphère [w / m^2].

I_a : Eclairement reçu par l'absorbeur [w / m^2].

I_b : Eclairement direct [w / m^2].

I_n : Eclairement direct normale [w / m^2].

I_{sc} : Constante solaire [w / m^2].

m_A : Masse d'air.

Q : Quantité de chaleur [J]

r : Rayon d'ouverture. [m]

T_a : Température ambiante [$^{\circ}C$ ou K]

T_c : Température source chaude [$^{\circ}C$ ou K]

T_f : Température source froide [$^{\circ}C$ ou K]

T_{LK} : Facteur de trouble atmosphérique de linke.

W : Le travail [J]

Symboles :

δ_R : Epaisseur optique de Rayleigh.

θ : angle d'ouverture [degré]

φ : Demi-angle d'ouverture. [degré]

\mathcal{E} : Angle sous laquelle un observateur voit le soleil.[degré]

η : Rendement

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Dans les conjonctures énergétique et environnemental actuels l'intérêt de développer des technologies de production d'énergie propre est relancé. Ainsi, de nouvelles perspectives comme le solaire ou la valorisation des déchets sont procurées à la recherche sur l'énergie renouvelable qui sont une sérieuse solution. En effet, elles n'engendrent pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes, participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales. Le solaire (solaire photovoltaïque, solaire thermique), l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont des énergies à flux inépuisables. Les techniques ainsi que les procédés utilisant les énergies renouvelables sont très nombreuses, et ont des niveaux d'avancement technique et de performances très variés comme les paraboloïdes de révolutions.

Il existe plusieurs types de moteurs capables de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique. Les moteurs thermiques utilisés le plus fréquemment sont les moteurs alternatifs à combustion interne, les turbines à gaz et les installations à cycle de Rankine à vapeur d'eau.

Malheureusement, aucun de ces systèmes n'est bien adapté à la valorisation de certains types de source chaude (énergie solaire, biomasse, effluents gazeux à haute température).

Les moteurs à air chaud, à apport de chaleur externe, à machines de compression et de détente alternatives distinctes, sa source de chaleur et apporter par l'éclairement direct reçu par le concentrateur qui le convertie en énergie thermique, le moteur à son tour produit du travail mécanique et à la sortie de arbre se trouve une génératrice qui produit de l'électricité.

Nous nous intéressons donc à l'étude et à la réalisation du moteur thermique à apport de chaleur externe qui est le moteur de Stirling de type alpha, inventé par le Pasteur Robert Stirling, est une machine productrice d'énergie mécanique, dans laquelle une masse de gaz subit une série de compressions et de détentes entre deux niveaux différents de température.

Chapitre 1

1. Introduction

La conversion de l'énergie solaire en énergie thermique et /ou en énergie électrique passe entre autres à travers un système de concentration. Le concentrateur est composé de plusieurs éléments qui permettent la conversion de l'énergie solaire incidente en chaleur à haute ou moyenne température.

Ce chapitre présente un état de l'art d'un paraboloïde de révolution. La première partie sera consacrée à l'étude bibliographique des différents concepts et de l'éclairement solaire, ensuite les différents systèmes de conversion de solaire thermique à concentration et plus particulièrement, les concentrateurs paraboliques à moteur Stirling sont abordé avec la présentation des quelques travaux cités par la littérature qui soit en relation avec l'objectif de ce travail.

2. Eclairement solaire

L'éclairement correspond à la puissance solaire reçue par une surface plane élémentaire, appelée capteur en traversant l'atmosphère [1]. Donc l'éclairement (ou l'irradiation horaire) est une donnée de base pour toutes les études de simulation des systèmes solaires. A défaut de mesures, il faut donc passer par l'une des méthodes d'estimation ou de reconstitution [2].

Le rayonnement solaire arrivant au sol est formé du rayonnement direct et du rayonnement diffus dont l'ensemble forme le rayonnement global [3]. A l'inverse des autres convertisseurs d'énergie solaire qui utilisent le rayonnement diffus et global provenant du ciel et du sol, les concentrateurs n'utilisent que le rayonnement direct.

2.1. L'éclairement direct normal hors atmosphère

Hors atmosphère, à la distance solaire moyenne, l'éclairement direct normal est l'énergie du soleil par unité de temps reçue sur une surface d'un mètre carré perpendiculaire à la direction du soleil. Il est également connu sous le nom de la constante solaire I_{cs} , dont la valeur est de 1367 W/m² selon les dernières estimations de l'OMM avec une incertitude de 1% [3].

2.2. Atténuation de l'éclairement Solaire

Lors de la traversée de l'atmosphère, les rayons solaires subissent une série d'altérations par absorption, réflexion par la vapeur d'eau, les divers gaz et les particules en suspension. Ainsi une part importante de l'irradiation solaire est réfléchi par l'atmosphère vers l'espace. Par ciel clair, cette atténuation est de l'ordre de 30%. Atténuation à laquelle il faut ajouter l'effet de la couverture nuageuse.

Ainsi l'atténuation (extinction) du rayonnement solaire est due à :

- L'écran pour les UV constitué par l'ozone,
- La diffusion (réflexion) par les gaz, la vapeur d'eau et les particules en suspension,
- L'absorption par l'oxygène (dans le visible), le CO₂ (IR) et la vapeur d'eau (IR).

➤ **L'éclairement direct normal au niveau du sol**

Au niveau du sol et en absence de mesures, on est amené à utiliser :

- Soit les estimations tabulées selon le lieu, la date et le type de ciel considéré. Ces estimations ou « Atlas Solaires » sont disponibles pour la plupart des pays. (« L'Atlas Solaires pour l'Algérie » publié par Capderou en 1987 a suscité nombre de réserves du fait de la pauvreté des données).
- Soit un des modèles établis pour l'estimation de l'éclairement solaire globale ou de l'une de ses composantes. Etablis sur la base des mesures enregistrées par les stations radiométriques sur un minimum de 10 années, ces ont une portée souvent limitée au pays considéré [2].

2.3. Estimation du rayonnement par ciel clair

2.3.1. Estimation de l'éclairement solaire direct normal par ciel clair

2.3.1.1. Modèle de Hottel

Le modèle proposé par Hottel [5], pour l'estimation de l'éclairement direct normale s'écrit simplement :

$$I_b = I_0 \cdot \tau_b \dots\dots\dots (1.1)$$

Avec:

I_0 : Eclairement hors atmosphère.

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp(-a_2 / \sin h) \dots\dots\dots (1.2)$$

Les coefficients a_0 , a_1 et a_3 ont été établis pour des visibilitées de 23 et 5 km, tel que :

$$a_i = a + b (c-z)^2, i = 0, 1, 2.$$

Avec :

z : altitude du lieu, exprimée en km.

Tableau 1.1 : Coefficients de Hottel

visibilité	a_0			a_1			a_2		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
23 km	0.4237	-0.0082	6	0.5055	0.00595	2.5	0.2711	0.01858	6.5
5 km	0.2538	-0.0063	6	0.7678	0.001	2.5	0.249	0.081	6.5

2.3.1.2. Modèle C d'Iqbal

L'éclairement direct normale proposé par Iqbal [6], dans le modèle C est donné par:

$$I_n = 0.9751 \cdot E_0 I_{sc} \tau_r \tau_o \tau_w \tau_a \dots \dots \dots (1.3)$$

Avec :

E_0 : Correction de la distance terre soleil.

I_{sc} : Constante solaire.

$\tau_r \tau_o \tau_w \tau_a$: Coefficient de transmission, Rayleigh, ozone, gaz, vapeur d'eau et aérosols.

2.3.1.3. Modèle d'ASHRAE

L'éclairement direct normale proposé par ASHRAE [7] est donné par :

$$I_n = C_n \cdot A \cdot e^{(B/\sec \theta_z)} \dots \dots \dots (1.4)$$

Avec :

A : Eclairement extraterrestre.

B : Coefficient d'atténuation atmosphérique.

C_n : Indice de clarté.

$\sec \theta_z$: Approximation de la masse d'air.

2.3.1.4. Modèle de Perrin de Brichambaut

Perrin de Brichambaut [8] propose pour l'éclairement direct normal :

$$I_n = A \cdot \exp \left[- C \sin \left(h + \frac{4\pi}{180} \right)^{-1} \right] \dots \dots \dots (1.5)$$

Tel que :

h : Hauteur apparente du soleil.

A et C : Coefficients dépendent de la qualité du ciel.

A = 1300	et	C = 6	ciel très pure
= 1230		= 4	ciel moyen
= 1200		= 2.5	ciel polluée

2.3.1.5. Modèle R.sun

Pour le modèle R.sun [9], l'éclairement direct normal est donné par :

$$I_n = I_0 \cdot \exp(0.8662 \cdot T_{LK} \cdot m_A \cdot \delta_R) \dots \dots \dots (1.6)$$

Avec :

m_A : Masse d'air.

T_{LK} : Facteur de trouble atmosphérique de linke.

δ_R : Epaisseur optique de Rayleigh.

Kasten et al [10] donnent une expression pour m_A qui devenue largement utilisée. Le modèle R.sun utilise cette formule avec une légère correction de la hauteur du soleil.

$$m_A = (P/P_0) / [\text{Sin } h_0^{\text{ref}} + 0.507 \cdot (h_0 + 607995)^{-1.6364}] \dots \dots \dots (1.7)$$

Avec :

$$P/P_0 = \exp(-z / 8434.5)$$

$$h_0^{\text{ref}} = h_0 + \Delta h_0^{\text{ref}}$$

$$\Delta h_0^{\text{ref}} = 0.061359 (0.1594 + 1.123 h_0 + 0.065656 h_0^2 (1 + 28.9344 h_0 + 277.3971 h_0^2))$$

Tel que :

h_0 : Hauteur du soleil.

h_0^{ref} : Correction de la hauteur du soleil.

z : Altitude de lieu.

Le modèle R.sun a exploité la formule ajustée de Kasten [11] pour une masse d'air inférieure à 20 et calcule δ_R avec l'expression ajustée pour une masse d'air supérieur à 20.

Pour $m_A \leq 20$

$$\delta_R = 1 / (6.6296 + 1.7513 m_A - 0.1202 m_A^2 + 0.0065 m_A^3 - 0.0013 m_A^4) \dots \dots \dots (1.8)$$

Et pour $m_A \geq 20$

$$\delta_R = 1 / (10.4 + 0.718 m_A) \dots \dots \dots (1.9)$$

En Algérie plusieurs études d'adaptation ont été élaborées pour ces modèles. Pour les modèles Capderou et R-Sun Yettou et al [12] ont montré que le modèle R-Sun représente une meilleure estimation de la composante directe sur les deux sites Bouzaréah par rapport au modèle Capderou. Pour le modèle Ashrae Koussa et al [13] ont trouvé que ce modèle conduit à des valeurs qui sont nettement supérieures aux valeurs mesurées sur le même site Bouzaréah.

2.3.2. Estimation de l'éclairement solaire par ciel variable

Par ciel variable les relations établies portent sur l'estimation de l'irradiation moyenne en fonction de la fraction d'insolation ou de l'indice de clarté [2].

2.4. Estimation de la température ambiante

La température ambiante est l'une des variables essentielles qui influe sur les systèmes thermiques. Les pertes à l'extérieur par rayonnement sont calculées à l'aide de la température effective de ciel, [14], cette température est donnée par la formule suivante [15] :

$$T_{ciel} = 0.0552 \cdot T_a^{1.5} \dots\dots\dots (1.10)$$

Avec :

T_a: Température ambiante.

De plus la température ambiante influe sur le coefficient de perte de chaleur par convection à l'extérieur, parce que les propriétés physiques de l'air extérieur varient en fonction de la température ambiante. Une simple formule semi empirique est choisie pour calculer l'évolution horaire de la température ambiante, cette formule est basée sur la température maximale et minimale journalière [16] [17] :

$$T_a(t) = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cos \left[\frac{\pi(14 - TSV)}{12} \right] \dots\dots\dots (1.11)$$

Tel que :

TSV : Temps solaire vrai.

T_{max} et *T_{min}*: Température ambiante maximale et minimale journalière.

3. La conversion de l'éclairage solaire

La conversion de l'énergie solaire en chaleur thermique ou en énergie électrique pour l'alimentation des réseaux est obtenue par des techniques différentes en fonction des besoins.

La technologie choisie peut être :

➤ Systèmes sans concentration, limité en température mais utilisant la totalité de l'éclairage incident:

- Les capteurs solaires plans.
- Les Capteurs sous vide.

➤ Systèmes à concentration, plus performant mais limité à la collection du rayonnement direct :

- Les concentrateurs solaires.

3.1. Les concentrateurs solaires

Les concentrateurs solaires focalisent les rayons du soleil en un "point" comme la tour solaire et le concentrateur parabolique des concentrateurs ponctuels, ou dans une ligne comme le concentrateur cylindro-parabolique et les miroirs de Fresnel des concentrateurs linéaires. Les concentrateurs linéaires possèdent généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels, ce facteur caractérise la géométrie générale d'un concentrateur. Les systèmes utilisant les concentrateurs solaires sont capables de générer des températures au voisinage de 1000°C, ces systèmes ont été initialement développés pour la production d'électricité [18].

3.1.1. Les différents types de concentration solaires

Il existe deux types de concentrations solaires :

a. Concentration linéaire

➤ Les cylindro-paraboliques

Dans les concentrateurs linéaires qui sont de forme cylindro-parabolique ils concentrent le rayonnement solaire sur une focale linéaire. Au niveau de cette focale est placé un tube dans lequel circule le fluide caloporteur.

➤ Les miroirs de Fresnel

Miroirs de Fresnel à focalisation linéaire. L'idée est d'approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans.

b. Concentration ponctuel

➤ Les centrales à tour

Dans une centrale à tour, un système permet l'orientation du champ de miroir vers le soleil. Un récepteur placé au sommet de la tour permet de convertir le rayonnement solaire en chaleur.

➤ Paraboles/Stirling

Dans le système Parabole/Stirling, la parabole suit le soleil pour concentrer le rayonnement direct sur un récepteur solaire placé à la focale et servant de source chaude au moteur Stirling

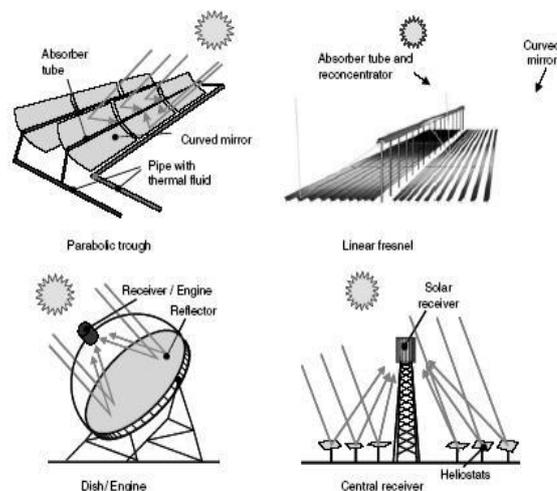


Figure 1.1: Les différents types de concentration solaires

3.2. Paraboloïdes de révolutions

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

De toutes les technologies solaires, les concentrateurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité (29.4%). [19]

Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique.

Ils possèdent donc également un important potentiel de développement, particulièrement dans des régions peu peuplées de certaines régions du sud.



Figure 1.2: Capteur parabolique avec moteur Stirling

Le système convertit l'énergie thermique due aux éclaircements solaires en énergie électrique. Le système possède trois principaux éléments :

- Le concentrateur parabolique
- Le récepteur solaire
- Le moteur Stirling

A la parabole s'ajoute un système de contrôle, permettant le suivi de la course du soleil.

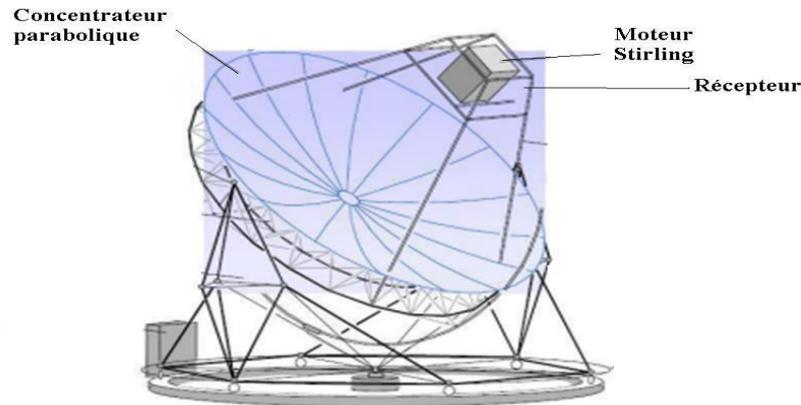


Figure 1.3 : Schéma du concentrateur parabolique à moteur Stirling [23]

3.2.1. Le concentrateur

Le concentrateur est de type parabolique concentrant les rayons du soleil vers la zone appelée foyer (zone se situant juste avant le moteur Stirling) grâce à sa surface réfléchissante avec un coefficient de réflexion aussi grand que possible.

La grande difficulté est de positionner la parabole dans la direction du soleil toute la journée. C'est pourquoi le système est monté sur un système de contrôle poursuivant le soleil sur deux degrés de liberté afin que la poursuite soit optimale. Le suivi se fait de façon autonome par le biais de pyrhéliomètres qui est un appareil de mesure de l'éclairement direct.

L'Algérie possède le plus grand concentrateur parabolique qui est appelé « Héliodyne » ou « le four solaire ».

Le four solaire de Bouzareah, baptisé "Héliodyne", se situe dans l'enceinte de l'Observatoire d'Alger, sur le site actuel du Centre de Développement des Energies Renouvelables.

Cette réalisation prestigieuse de plus de 40 tonnes et dont la hauteur atteint près de 9 mètres, a été étudiée et construite par la Société des Anciens Etablissements Sautter Harle (1952-1954) pour répondre à des caractéristiques remarquables qui lui ont valu le titre du plus puissant four solaire au monde. En effet l'Héliodyne de Bouzareah se distingue par :

Un miroir parabolique de 8,40 m de diamètre, monté sur charpente treillis en aluminium AG-5, avec tendeurs de précontraintes afin de réduire au maximum les

déformations soit au cours des mouvements, soit sous l'effet d'un vent pouvant souffler à 200 km/h.

Une distance focale de 3,14 m, monture équatoriale. La concentration dans le plan focal dépasse les 21.000 soleils, ce qui donne la plus forte concentration de rayons ultraviolets obtenue jusqu'alors dans le monde. Le facteur de réflexion d'un tel miroir est de l'ordre de 0.80, à peu près dans tout le spectre. Les miroirs élémentaires, au nombre de 144, sont disposés suivant leur concavité et leur dimension en forme de coupole renversée, chaque élément étant monté sur des rotules permettant un réglage fin et tout l'ensemble guidé par des cellules avec la précision d'un télescope. Ce dispositif permet d'obtenir une image solaire d'une dizaine de centimètres. Et ainsi, pour une surface de la parabole de 50 mètres carrés, on arrivait à des températures de plusieurs milliers de degrés. Mais, le plus remarquable dans ce four c'est sans doute la précision du mécanisme de poursuite du soleil: 4 cent millièmes, soit une erreur de 4 m pour un observateur placé à 100 km. Les réducteurs d'entraînement pouvaient être soumis à des couples énormes dus aux coups de vent (soit 10.000 m/kg) sans que cette précision en souffre.

Le mouvement d'orientation de l'appareil n'était pas commandé, comme cela se fait d'habitude par cellules photoélectriques (ou photorésistances), mais par l'horloge de l'observatoire elle-même. L'Héliodyne se comportait, en somme, comme une horloge fille dont l'horloge mère était celle qui donnait l'heure astronomique: l'intérêt d'un tel dispositif était de rendre la régulation indépendante de la nébulosité. Pour terminer si on sait que sa puissance théorique utilisable à 3000 °k dépasse les 32KW, on comprend pourquoi l'Héliodyne de Bouzareah est considéré comme le premier four solaire au monde de cette importance. [BOULEMTAFES Amel 07/2008 CDER]

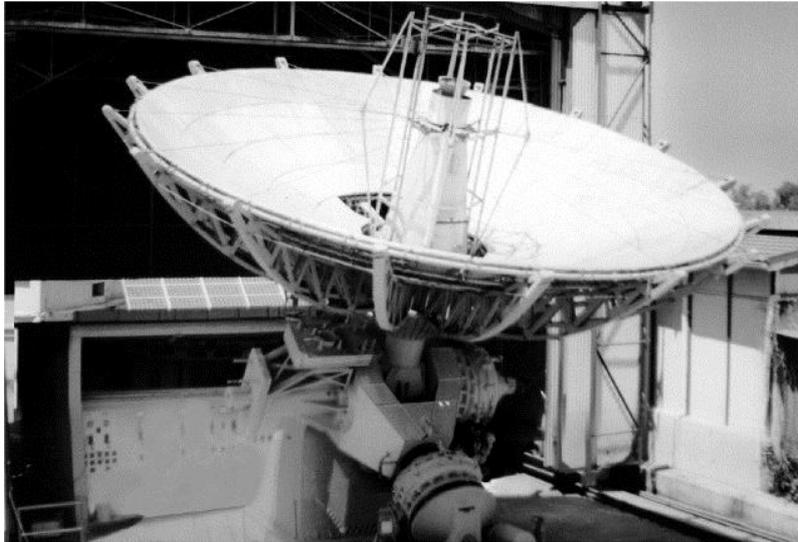


Figure 1.4 : Héliodyne [www.portail.cder.dz]

3.2.1.1. Le miroir

Il est basé sur le même principe que les miroirs traditionnels, qui consistent en un dépôt d'argent ou d'aluminium à l'arrière d'une plaque de verre. Toutefois, pour améliorer la réflectivité du concentrateur parabolique l'épaisseur de la couche de verre doit être fine. Elle doit être inférieure au millimètre (0.8 mm) ce qui augmente le taux de réflexion du miroir jusqu'à 94%. [20]



Figure 1.5: Visualisation du miroir [23]

3.2.1.2 La structure

La parabole est montée sur une structure métallique pouvant tourner grâce au système de contrôle sur deux axes de rotation.

3.2.1.3 la Poursuite

La poursuite du soleil se fait selon 2 axes (et donc 2 moteurs) de façon à ce que les rayons du soleil soient, en permanence, parallèles à l'axe optique de la parabole.

Les paraboles peuvent être équipées d'une monture :

- Equatoriale et dans ce cas la poursuite se fait en déclinaison et angle horaire,
- Altazimutale et dans ce cas la poursuite se fait en hauteur et en azimut.

La poursuite étant fonction de la position du soleil, elle pourra être :

- Aveugle (le repérage de la position du soleil se fait à l'aide de calculs d'astronomie),
- Sensible à l'aide de photopiles.

Compte tenu des inconvénients réciproques on associe généralement les 2 systèmes.

3.2.2. Le Récepteur

Le récepteur est le lien entre le concentrateur et le moteur Stirling appartenant à la boîte de protection du moteur .Il a pour but de récupérer le rayonnement provenant directement du concentrateur et de transférer la chaleur au fluide de travail du moteur. Ainsi le récepteur atteindra des températures importantes d'environ 650 °C. Pour être un bon récepteur, celui-ci doit transférer le maximum de puissance radiative incidente au fluide caloporteur du moteur. L'élément qui permet le transfert de chaleur est appelé absorbeur et il est placé au fond de la cavité, dont elle permet de diminuer au maximum les réflexions et les pertes par convection.

Le récepteur est constitué de plusieurs petits tubes où circule le fluide de travail. Le transfert thermique se fait à 90%.

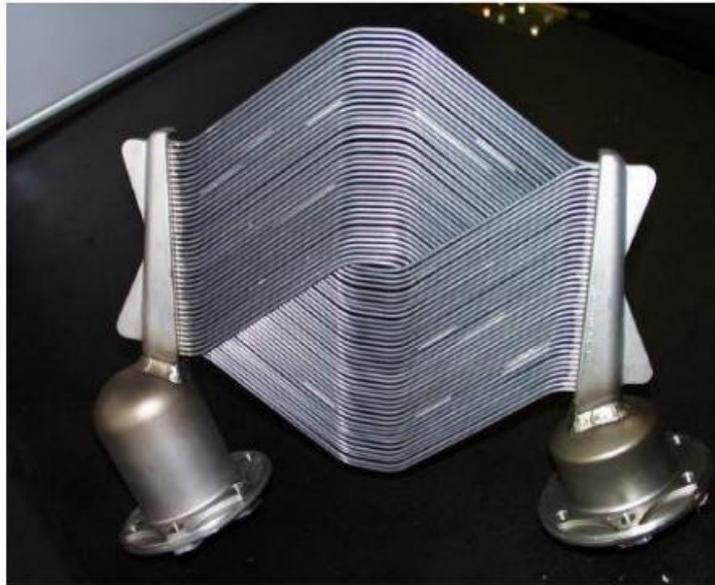


Figure 1.6: Récepteur solaire de type SBP/SOLO V-160/161 [23]

Les récepteurs DIR emploient un côté des tubes pour chauffer directement le fluide de travail dans le moteur Stirling en utilisant le rayonnement solaire qui est absorbé sur la surface externe des tubes. Le fluide de travail est l'hydrogène ou l'hélium, qui peut absorber un flux solaire d'environ 75 W/cm^2 dus aux capacités élevées de transfert thermique de ces gaz aux vitesses élevées et aux pressions jusqu'à 20 MPa [21].

3.2.2.1 Pertes de récepteur

Le récepteur d'un système parabolique Stirling est responsable de la majorité des pertes thermiques qui se produisent avant que l'énergie soit convertie en électricité dans le moteur Stirling. Les pertes du collecteur dues à la réflectivité de miroir comportent de 37 % et de 24 % des pertes thermiques pour les collecteurs de SES et de WGA respectivement, les pertes d'interception de récepteur représentent 12 % et 0 % de toutes les pertes thermiques pour les systèmes de SES et de WGA, et les pertes thermiques de récepteur (conduction, convection, rayonnement) se composent de 51 % et de 76 % de toutes les pertes thermiques pour les systèmes de SES et de WGA respectivement [22].

Une répartition des pertes dans un système parabolique Stirling est présentée sur le schéma suivant :

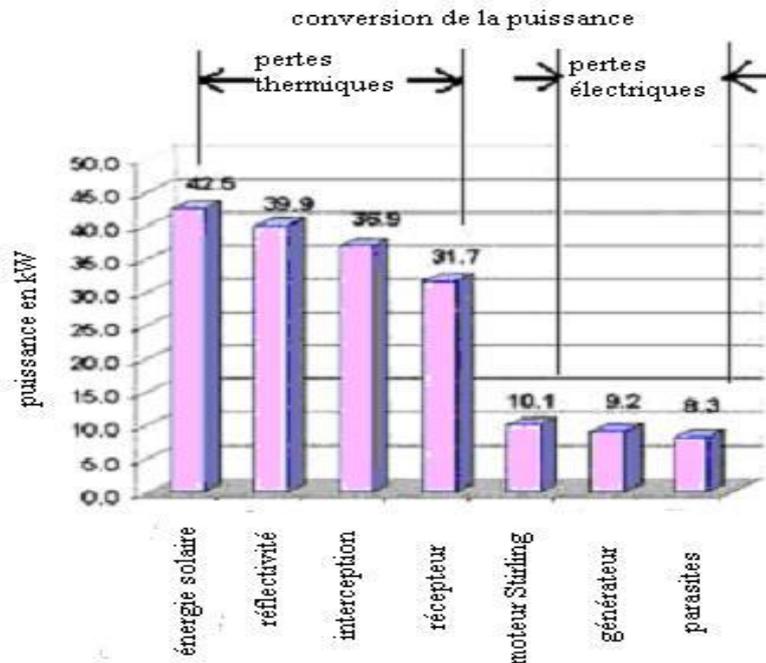


Figure 1.7: Cascade d'énergie pour le système SBP à $1000 [W/m^2]$: niveau de l'insolation [22]

3.2.3 : Le moteur Stirling

Une machine Stirling est une machine productrice d'énergie mécanique, de froid ou de chaleur dans laquelle une masse de gaz subit une série de compressions et de détente entre deux niveaux différents de température. Elle a la particularité de présenter une communication permanente entre les différents volumes et, donc, de ne pas nécessiter d'organes séparateurs (soupapes, clapets,...). Ce type de machine peut contenir un échangeur de chaleur particulier : le régénérateur.

Sa fonction est d'accumuler puis de restituer la chaleur fournie et absorbée au gaz de travail le traversant du volume chaud vers le volume froid et inversement. Une partie de l'énergie transférée est ainsi récupérée à chaque cycle.

Le fluide de travail est souvent de l'hydrogène, qui est chauffé à plus de $700^\circ C$ à une pression maximale autour de 20 MPa ce qui donne un rendement thermique-mécanique d'environ 40% [24]. La chambre de compression est refroidie par une boucle de fluide réfrigérant qui circule un fluide secondaire à travers un radiateur commun automobile avec refroidissement à air pulsé fourni par un ventilateur.

Les machines Stirling sont rangées en 2 catégories principales : les machines motrices et les machines réceptrices.

- Les moteurs, ou les machines motrices, absorbent de l'énergie thermique fournie par une source chaude et la convertissent en énergie mécanique.
- Les réfrigérateurs et les pompes à chaleur (machines réceptrices) absorbent de l'énergie mécanique et la convertissent en énergie thermique dont une partie est absorbée au réservoir froid, tandis qu'une autre est rejetée au réservoir chaud.

3.2.3.1. Historique du moteur Stirling [25]

Au début du XIXe siècle, les chaudières à vapeur n'étaient pas très performantes et explosaient souvent. Pour répondre à ce problème, Robert Stirling, un pasteur, inventa un moteur sans chaudière (la chaudière étant soumise à de trop fortes pressions). La chaleur est apportée de l'extérieur de la machine, ce qui réduit les risques d'explosions, car il est inutile de faire chauffer l'eau dans une chaudière à haute pression, puisque chauffer l'air ambiant par combustion suffit pour alimenter ce moteur en énergie. C'est ainsi que Stirling déposa son brevet le 27 septembre 1816. La mise en place d'un régénérateur dans la tuyauterie du moteur a permis d'éviter trop de pertes d'énergie, améliorant son rendement.



Figure 1.8: Robert STIRLING (Article de Bertrand Gille (1978))

En 1843, son frère James Stirling ; industrialisa ce moteur, pour une utilisation dans l'usine où il était ingénieur. Toutefois, en raison d'une puissance trop faible par rapport à la machine à vapeur et, plus tard, au moteur à combustion interne, le moteur à air chaud de Stirling n'obtient pas le succès escompté. Le moteur Stirling ne fut alors plus qu'un objet d'étude pour les physiciens, qui comprendront le fonctionnement du moteur Stirling, bien après son invention, avec l'avènement de la thermodynamique.

En 1871, les progrès de la thermodynamique accomplis au XIXe siècle permettent à Gustav Schmidt de décrire mathématiquement le cycle de Stirling. C'est toutefois dans les années 1930, grâce aux recherches de la compagnie Philips, que le moteur Stirling fut de nouveau étudié sérieusement et que son application dans toutes sortes de technologies soit testée.

En 1938, un moteur Stirling de plus de 200 chevaux, et dont le rendement était supérieur à 30 % (comparable aux moteurs à essence actuels), y est créé. Cependant, cette technologie n'a des applications qu'en cryogénie.

Ce n'est que dans les dernières décennies que les développements du moteur ont commencé à être intéressants pour l'industrie, à cause du besoin sociétal croissant pour les sources d'énergie alternatives. Effectivement, ce n'est pas parce que Robert Stirling utilisait la combustion pour alimenter son moteur en énergie thermique qu'il n'est pas possible d'utiliser d'autres sources d'énergie : énergie solaire, énergie géothermique, énergie nucléaire, chaleur rejetée par les usines, etc. Dans une perspective écologique, c'est extrêmement intéressant, d'autant plus que le régénérateur, parce qu'il préchauffe et pré-refroidi le gaz, permet littéralement de recycler de l'énergie. Ainsi, les avancées en sciences des matériaux permettent maintenant d'utiliser des matériaux qui supportent des écarts de température très importants et des composites qui améliorent le transfert de chaleur au sein du régénérateur. La situation est telle que les moteurs Stirling sont couplés avec des paraboles solaires géantes et utilisent l'énergie solaire avec un rendement supérieur aux cellules photovoltaïques, à un prix toutefois élevé. Il a d'ailleurs battu, en 2008, le record de conversion de l'énergie solaire, avec un taux de conversion de 31,25 %, grâce à l'utilisation de miroirs paraboliques comme concentrateurs solaires.

Aujourd'hui, le moteur Stirling fait l'objet de nombreuses expérimentations autant par les amateurs que par des entreprises spécialisées en énergie ou par la NASA.

3.2.3.2. Principe de fonctionnement

Dans sa configuration la plus simple, le moteur Stirling est constitué d'un cylindre contenant une masse constante de gaz (air, hélium, hydrogène). L'une des extrémités de ce cylindre est chauffée par une source chaude extérieure et l'autre extrémité est en contact avec un puits froid qui est généralement le milieu ambiant ou un circuit d'eau de refroidissement, à l'intérieur du cylindre glisse un déplaceur au-dessous duquel se trouve un piston glissant le long de la tige actionnant le déplaceur et coulissant sur la paroi intérieure du cylindre.

Le déplaceur est un élément qui ne modifie ni la pression, ni le volume du gaz, mais l’oblige à migrer soit vers la source chaude soit vers la source froide.

Un régénérateur est très souvent utilisé dans les moteurs Stirling : c’est une chicane, un tampon de paille de fer, ou autre milieu poreux, devant posséder une mauvaise conductivité thermique dans la direction axiale et jouer le rôle d’un réservoir thermique temporaire (Lemrani (1995)) [26].

3.2.3.3. Cycle Stirling théorique

Le moteur Stirling fonctionne selon le cycle Stirling. C’est un cycle fermé basé sur le processus de régénération à volume constant et sur des transformations de compression et de détente isothermes. Le cycle thermodynamique d’un moteur Stirling est composé de 4 processus de transfert de chaleur :

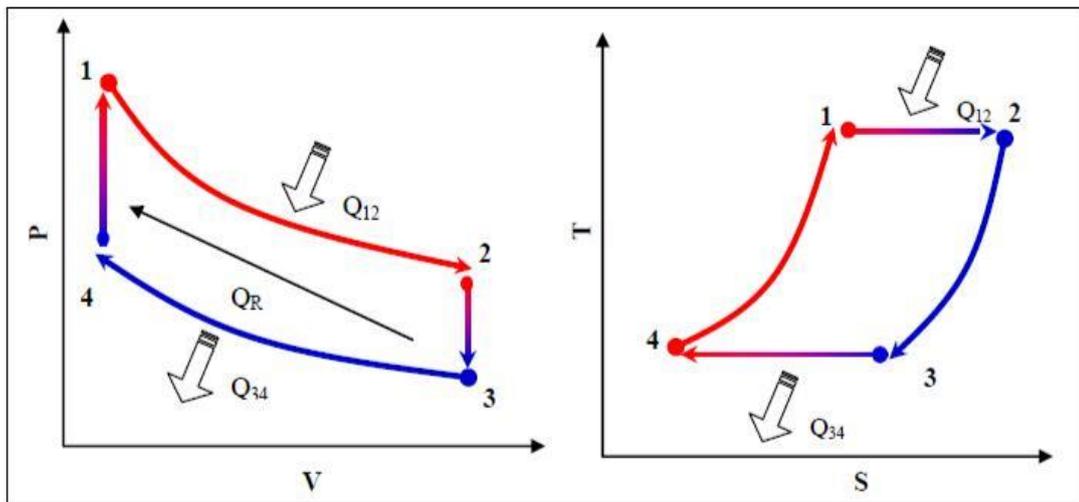


Figure 1.9 : Cycle Stirling théorique : Diagramme PV et Diagramme TS

4→ 1 Compression isochore : Le piston de déplacement transfère tout le gaz à travers le régénérateur vers la partie chaude. La chaleur est livrée au gaz à partir du régénérateur, de ce fait sa température augmente et atteint celle de l’espace chaud. Comme la température s’élève, la pression de gaz augmente de manière significative et le système revient à ses conditions initiales.

1→ 2 Détente isotherme : Le gaz fonctionnant à haute température, absorbe la chaleur de l’espace chaud et augmente iso-thermiquement en volume exerçant ainsi un travail sur le piston de puissance ; le moteur produit le travail utile du cycle.

2→ 3 Détente isochore : Le piston de déplacement transfère tout le gaz à travers le régénérateur vers la partie froide. La chaleur est absorbée du gaz pendant qu'il traverse le régénérateur, abaissant ainsi sa température jusqu'à celle de la partie froide. Ainsi, la température diminue accompagnée d'une diminution considérable de la pression.

3→ 4 Compression isotherme : Le piston de puissance comprime le gaz à la température froide, par conséquent rejette la chaleur à l'espace froid. Puisque le travail effectué est à la basse pression, moins de travail est exigé pour la compression que celui obtenu à partir de l'expansion (1 → 2).

4→ 1 Compression isochore : Le piston de déplacement transfère tout le gaz à travers le régénérateur vers la partie chaude. La chaleur est livrée au gaz à partir du régénérateur, de ce fait sa température augmente et atteint celle de l'espace chaud. Comme la température s'élève, la pression de gaz augmente de manière significative et le système revient à ses conditions initiales.

3.2.3.4. Types des moteurs Stirling

Il y a deux types courants de moteurs Stirling qui ont été utilisés pour la production d'énergie : cinématique et le moteur à pistons libres.

Les moteurs cinématiques ont le piston de pouvoir branché au vilebrequin par une bielle, qui est fixée à un croisillon pour éliminer les forces latérales contre les parois du cylindre [27]. Un sceau linéaire est utilisé entre le croisillon et le piston pour sceller la région entre les pressions élevées et plus basses de permettre aux surfaces d'appui de rester lubrifié dans l'endroit à basse pression tout en prévenant l'encrassement de la surface d'échangeur de chaleur dans région à haute pression. Les moteurs cinématiques de Stirling sont actuellement utilisés dans les systèmes paraboliques Stirling par tous les principaux constructeurs.

Un système du moteur à pistons libres de 6 kilowatts Stirling a été vérifié par la production d'électricité de Cummins et Sunpower pour avoir un 28 % a expliqué l'opération de rendement avec une température de l'espace de l'expansion 629°C [28]. Le système à pistons libres d'un système parabolique Stirling par Sunpower a eu un rendement net comparable au système du moteur cinématique de SBP.

3.2.3.5. Classification selon l'agencement des cylindres

Pour les moteurs Stirling cinématiques, trois configurations existent et sont classées selon la disposition des cylindres dans le moteur (Kongtragool et Wongwises, 2003)[29].

3.2.3.5.1. La configuration Alpha

C'est la Contient deux pistons de puissance séparés, un piston « chaud », et un piston « froid ». Le piston chaud est situé près de l'échangeur à la plus haute température, et le piston froid est situé près du point d'échange de température la plus basse. Cette configuration a un ratio puissance- volume très élevé, mais a des problèmes techniques, liés fréquemment aux températures trop élevées du piston chaud pour ses joints et aux frottements et à son étanchéité.



Figure 1.10 : moteur Stirling de configuration alpha (Article de bonneet, S (2005))

Le couplage cinématique des deux pistons permet au fluide de passer d'un cylindre à l'autre tout en traversant un récupérateur d'énergie (régénérateur) et de faire varier le volume selon les phases s'approchant de celles décrites dans le diagramme indicateur théorique de Stirling

3.2.3.5.2. La configuration Bêta

Le moteur bêta est un moteur monocylindre constitué de deux pistons :

- Un piston de travail (gris foncé) utile pour la compression et la détente,
- Un piston 'déplaceur' (gris clair) pour mettre successivement le gaz en contact avec la source froide puis la source chaude.

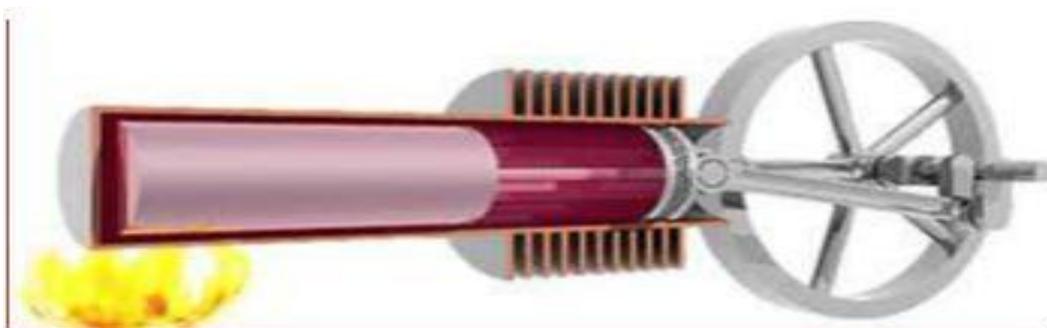


Figure 1.11 : Moteur Stirling de configuration beta (Article de Bonnetts, S (2005))

3.2.3.5.3. La configuration Gamma

C'est la configuration la plus ancienne et la plus encombrante. Elle possède l'espace mort le plus important, ce qui réduit sensiblement la puissance. En effet, c'est un moteur Stirling de configuration Bêta, sur lequel le piston de puissance, n'est pas monté Co-axialement avec le piston de déplacement. Cette configuration produit un rapport de compression plus faible, mais elle est généralement plus simple mécaniquement et elle est souvent utilisée dans les moteurs Stirling à plusieurs cylindres.

Ce moteur ressemble beaucoup au type bêta car il a aussi un piston de moteur et un piston déplaceur. La seule différence réside dans le fait que les deux pistons se déplacent dans des cylindres distincts.

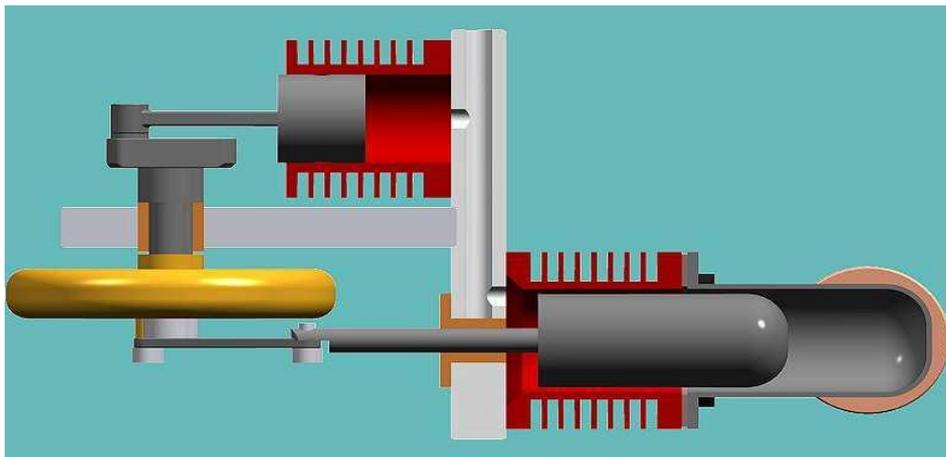


Figure 1.12 : Moteur Stirling de configuration Gamma (Stirling engine plan)

4. Conclusion

Dans ce chapitre on a revu quelques notions sur le calcul de l'éclairement direct et sa conversion à partir d'un système de concentration, dans notre cas le système est un paraboloïde de révolution (parabole/Stirling) qu'on peut donner des définitions et des revues des littératures.

Dans le chapitre suivant on va détailler un peu plus notre système.

Chapitre 2

1. INTRODUCTION

Les capteurs de révolution sont destinés aux applications à faibles puissances (à savoir entre 2 et 25 kW). La boucle thermodynamique de conversion du rayonnement solaire en énergie mécanique, puis électrique, se trouve au niveau du foyer avec la chaudière. La conversion se fait généralement avec un cycle de Stirling.

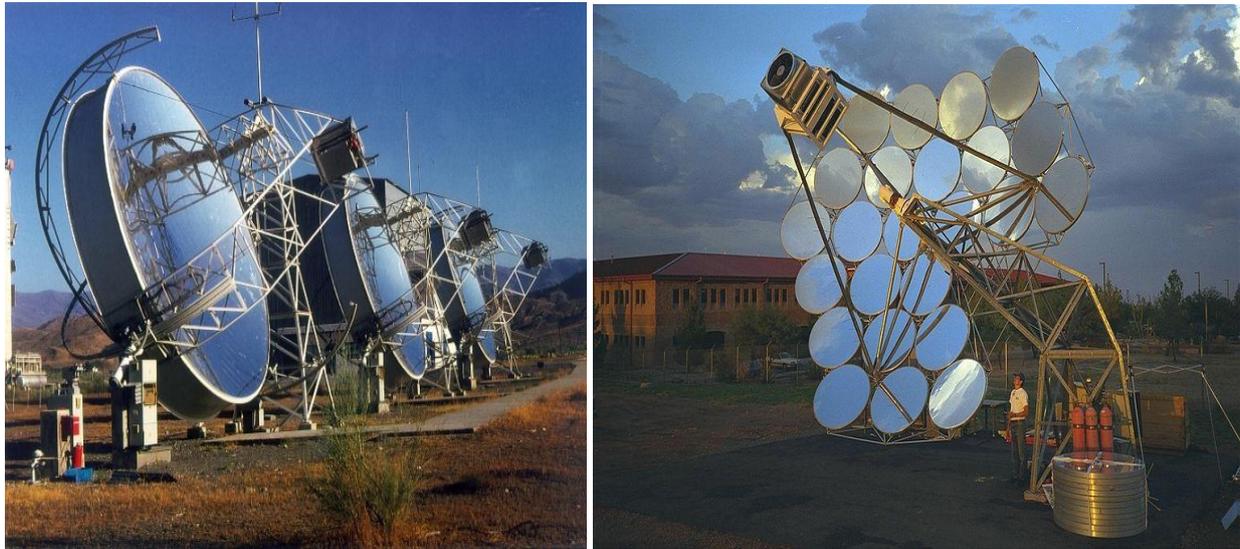


Figure 2.1 Différents montages des Concentrateurs de Révolution [30]

A ce jour, la plus grande centrale solaire à base de paraboloïdes de révolution se trouve en Arizona. Elle est composée de 60 capteurs distribués d'une puissance unitaire de 25 kW délivrée par un moteur Stirling. [30]

Principaux repères :

- Les premières applications de la Concentration solaire ont été faite avec des paraboles de révolution.
- La 1ère application paraboloïde
- Moteur Stirling a été réalisée par John Ericsson en 1872.
- Les 1ers paraboloïdes avec moteur Stirling ont été commercialisés dès 1970.



Figure 2.2 : Centrale Solaire de Maricopa (1.5 MW) Peoria/Arizona (2010)

2. Le concentrateur : (le parabol)

2.1. Définition

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

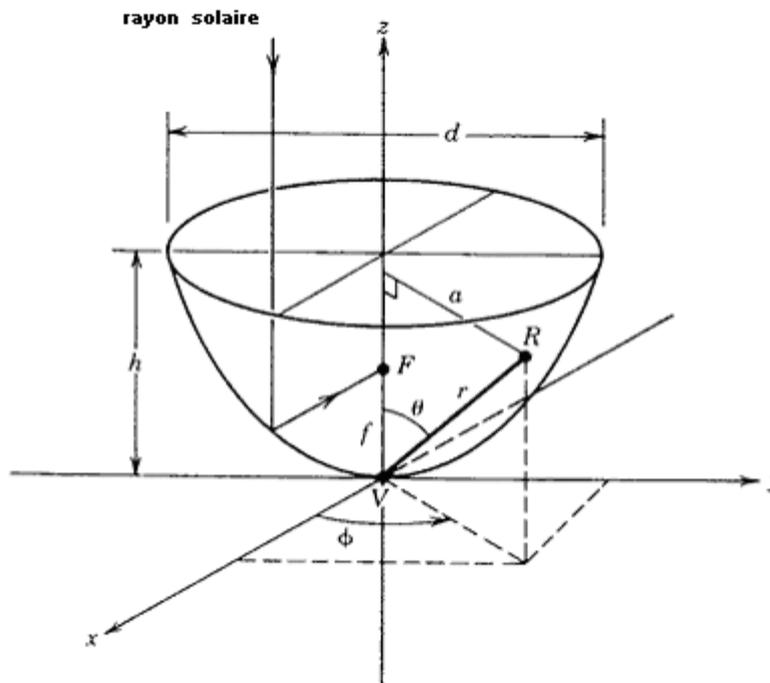


Figure 2.3: Concentrateur paraboloïde

On obtient un paraboloïde par rotation de la parabole autour de son axe.

L'équation pour le paraboloïde de révolution en coordonnées rectangulaires avec l'axe (Z) comme axe de symétrie est [31], [32] :

$$X^2 + Y^2 = 4 \cdot f \cdot Z \dots\dots\dots (2.1)$$

$$Z = \frac{a^2}{4f} \dots\dots\dots (2.2)$$

f : la distance focale (FV)

2.2. Grandeurs Caractéristiques

Largeur de l'image au Foyer :

Considérons un concentrateur parabolique à 2 dimensions (La longueur est supposée infinie). Les rayons solaires directs faisant un angle égal à ε (angle sous lequel on voit le soleil) la largeur de l'image sur le plan focal est donnée par :

$$b = 2.r.tg(\varepsilon/2) / \cos(\varphi) \dots\dots\dots (2.3)$$

Pour des rayons paraxiaux ($\varphi=0$), la largeur de l'image devient :

$$b = 2.r.tg(\varepsilon/2) = f \varepsilon \dots\dots\dots (2.4)$$

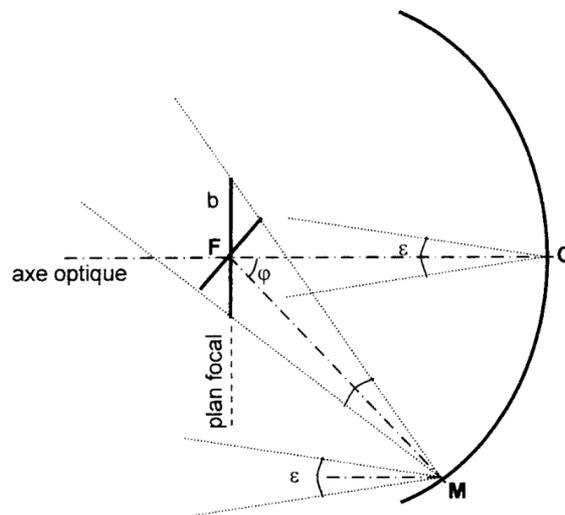


Figure 2.4 : caractéristiques d'une parabole [30]

2.3. Paramètres Géométriques

Pour définir complètement la section d'une parabole de révolution, il suffit de fixer 2 des 3 paramètres suivants :

- Angle d'ouverture « θ »,
- Distance focale « f »,
- Ouverture.

L'angle d'ouverture, la largeur de l'ouverture et la distance focale sont reliés par les expressions, suivantes :

$$tg\theta = \frac{a/f}{2 - (\frac{1}{8})(\frac{d}{f})^2} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$(d/f) = - (4/tg \theta) + \sqrt{(16/tg^2 \theta) + 16} \dots\dots\dots (2.6)$$

Avec d : diamètre d'ouverture.

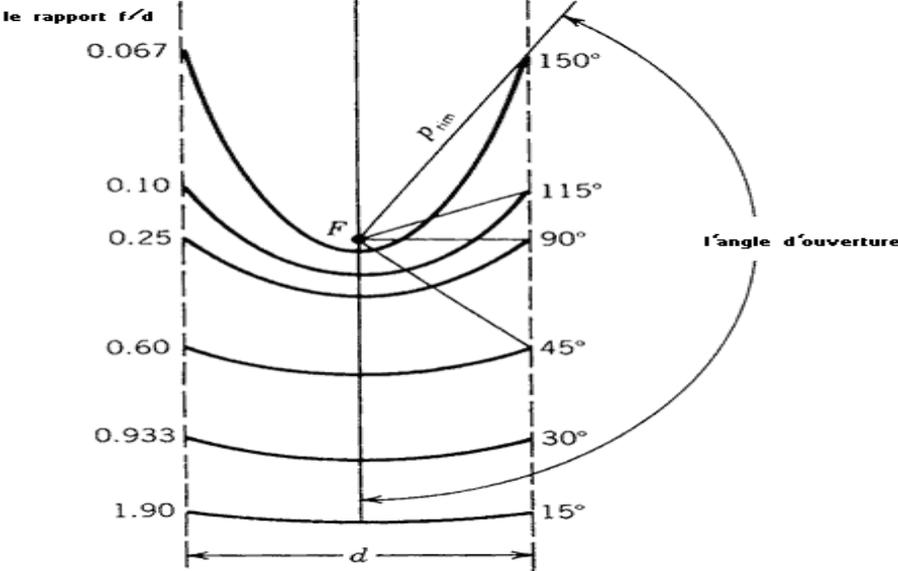


Figure 2.5 : Section d'une parabole possédant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture d . [33]

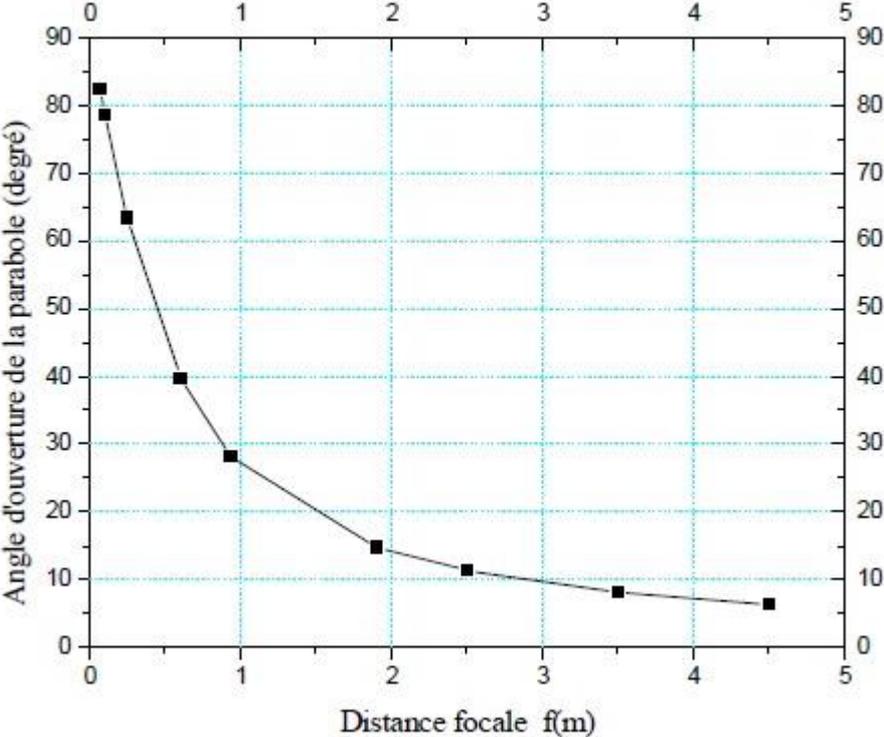


Figure 2.6 Distance focale en fonction de l'angle d'ouverture d'une parabole $d = 1m$ [33]

On peut voir qu'une parabole avec un petit angle d'ouverture est relativement plate. L'augmentation de l'angle d'ouverture de la parabole fait diminuer la distance focale.

2.4.Coefficient de Concentration géométrique

En négligeant les ombres projetées par le receveur et ses supports, le coefficient de concentration géométrique est donné par :

$$C = \frac{S_0}{S_R} = \frac{\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\epsilon}{2}\right)} \dots\dots\dots (2.7)$$

S_0 : Ouverture

S_R : Surface de l'Image sur le plan focal

2.4.1. 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] :

$$h = \frac{d^2}{16f} \dots\dots\dots (2.8)$$

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

$$\text{tg}\theta = \frac{1}{\frac{d}{8h} - \frac{d}{d}} \dots\dots\dots (2.9)$$

2.4.2. Surface d'une parabole

C'est l'espace inclus entre une parabole et une ligne à travers son ouverture, elle est indiquée par [34] :

$$S_p = \frac{2}{3} \cdot d \cdot h \dots\dots\dots (2.10)$$

2.4.3. Système optique d'une surface parabolique

L'idée d'utiliser une surface parabolique vient du fait qu'elle est stigmatique pour les points à l'infini situé sur son axe. D'après les lois de réflexion, tout rayon lumineux parallèle à l'axe de la parabole est réfléchi par la parabole suivant une droite passant par le foyer. Donc la parabole focalise tous les rayons réfléchis en un point appelé «foyer» [35].

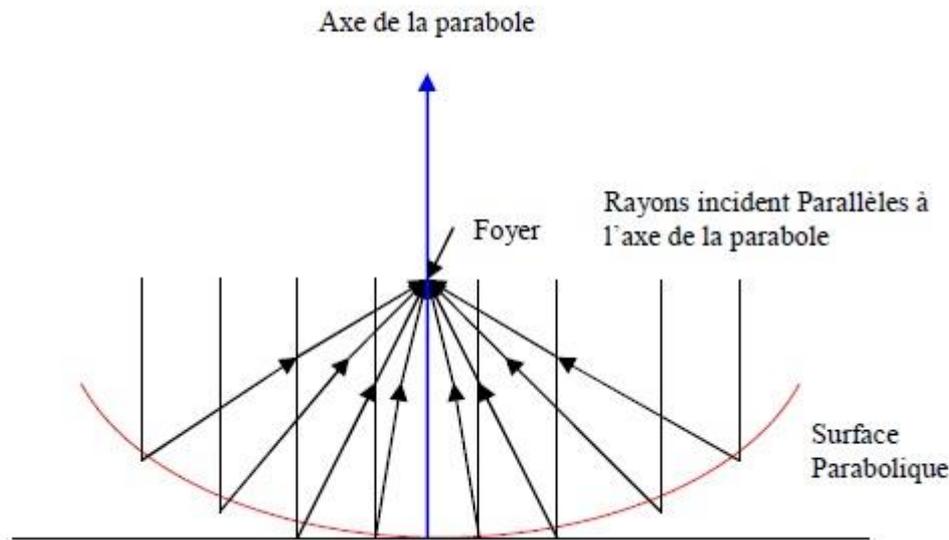


Figure 2.7 : Système optique d'une surface parabolique [33]

2.4.4. Surfaces réfléchissantes

➤ Miroirs en verre avec revêtement d'argent

Aujourd'hui, les miroirs paraboliques les plus courants sont constitués de miroirs de verre revêtu d'argent. En effet, ce type de miroirs équipe toutes les centrales paraboliques en activité.

Ces miroirs ont prouvé leur résistance au temps révélés être durable avec une diminution de la réflectivité spéculaire à peine perceptible après plus de dix années de fonctionnement.

Les miroirs ont une structure multicouche. La première couche en dessous du verre est la couche réfléchissante, à savoir la couche d'argent. Le schéma suivant montre la réflectivité élevée de l'argent dans la gamme du spectre solaire.

Une couche protectrice de cuivre est appliquée sous la couche d'argent, sur lequel trois vernis époxy sont ajoutés: une couche d'apprêt, couche de finition intermédiaire et de protection. Dans la plupart des miroirs solaires qui ont été utilisés jusqu'à présent la première et la deuxième couche contiennent un certain pourcentage de plomb, mais des couches de protection sans cuivre et le plomb sont en cours de développement. L'épaisseur du miroir complet est de 4 à 5 mm. La structure multicouche est représentée en figure ci-dessous. [30]

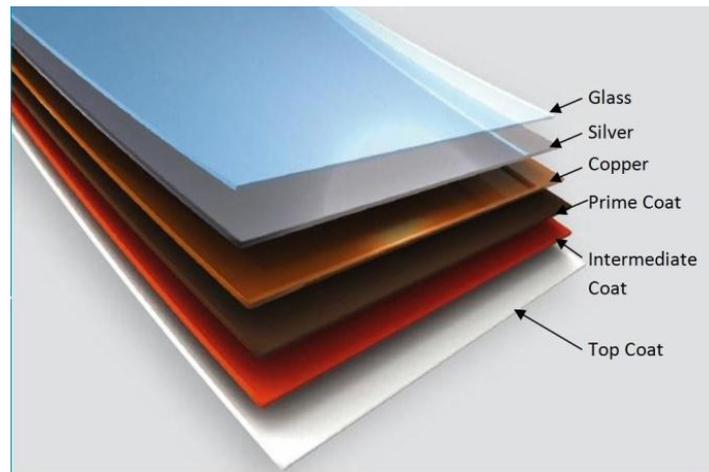


Figure 2.8 : Revêtement multicouche du miroir [30]

➤ Autres Types de Miroirs

Compte tenu des coûts de fabrication des miroirs en verre et leurs conséquences sur le coût global de l'installation des efforts sont entrepris pour développer des miroirs de substitution moins onéreux.

A ce titre on peut citer

- Les films de polymère avec revêtement en argent,
- Les miroirs en aluminium.

2.4.5. Récepteur (absorbeur / chaudière)

C'est la partie où le moteur va être placé. Le récepteur doit absorber autant de flux solaire concentré possible, et le convertir en énergie thermique, cette chaleur est transférée dans un fluide d'un certain type (liquide ou gaz).

En fonction de leur surface de transfert et l'angle d'ouverture, on classe les récepteurs solaires en 2 catégories :

1- Surface externe : Il y a plusieurs configurations possibles : plane, cylindrique, conique ou sphérique, dépendantes de la répartition, de l'intensité du flux, de la température et de l'application. Ce genre de récepteur s'applique généralement dans la gamme température de l'ordre 300-400°C maximum.

2- Surface interne ou cavité : Ce type de récepteur est bien adapté pour le cas où l'intensité du flux et la température de travail sont élevées. Le flux énergétique concentré entre dans le récepteur par l'ouverture dont la surface est généralement 5 à 10 fois inférieure à celle de la surface de transfert dans la cavité. C'est un moyen efficace pour augmenter le coefficient d'absorption et diminuer les pertes [36].

La surface du récepteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une bonne conductivité et diffusion thermique,
- Une bonne résistance chimique vis à vis du fluide utilisé.

Il est important que le récepteur soit métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre : 360 w/m.K, aluminium : 200 w/m.K, acier 60 w/m.k) [37]. Plus le coefficient de conduction est faible et plus l'absorbeur doit être épais, ce qui augmente le prix et l'inertie de l'absorbeur.

2.5.Efficacité du concentrateur

La mesure des performances d'un collecteur solaire est une étape importante et nécessaire pour la compréhension du fonctionnement du système.

Cette efficacité se définit comme le rapport de l'énergie thermique absorbée par le récepteur à l'énergie reçue à l'ouverture du concentrateur [38].

$$\eta = \frac{Q_u}{I_a A_a} \dots\dots\dots (2.11)$$

Tableau 2.1 : Spécificités du système de concentrateur pour plusieurs fabricants [39]

Concentrateur	SAIC	SBP	SES	WGA(Mod2)
Surface vitrée (m ²)	117.2	60	91	42.9
Surface projetée (m ²)	113.5	56.7	87.7	41.2
Réflectivité	0.95	0.94	0.91	0.94
Longueur focal (m)	12.0	4.5	7.45	5.45
Angle seuil (degrés)	29	52	40	37
Concentration maximale (suns)	2500	12730	7500	> 13000

3. Moteur Stirling

Dans notre travail on va étudier un moteur Stirling du type alpha.

3.1. Configuration Alpha

Un moteur Stirling de configuration alpha utilise un cylindre séparé pour l'expansion et l'espace de compression et il a deux pistons [40].

Des configurations multiples de cylindre pour permettre une haute puissance de sortie particulière [41]. Il y a quatre processus dans le cycle de Stirling qui seront décrits pour la configuration alpha.

3.1.1. Le cycle théorique

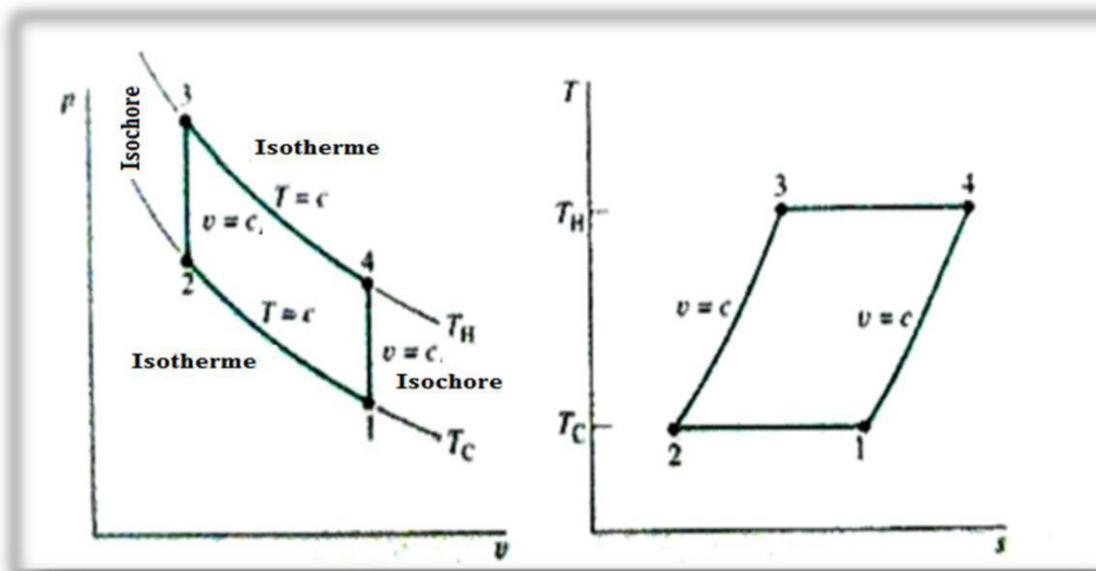


Figure 2.9: Diagrammes du cycle Stirling idéal [42]

Processus 1-2 : Compression

La majeure partie du gaz expansé est dans le cylindre de compression et le gaz se refroidit en transfère la chaleur au dissipateur externe. Le fluide de travail se contracte pendant qu'il refroidit et écarte les deux pistons du vilebrequin comme indiqué dans la figure 2.10.

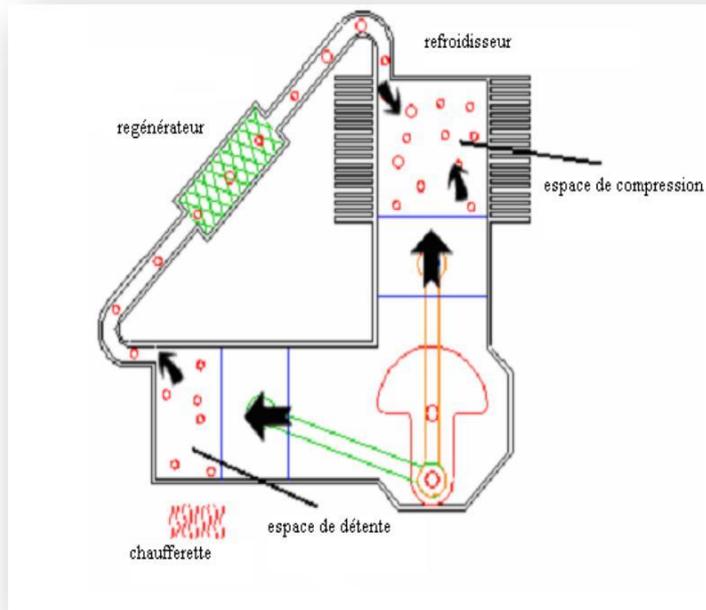


Figure 2.10 : Phase de compression du moteur Alpha [43]

Processus 2-3 : Transfert de la chaleur à partir du régénérateur au fluide de travail

La majeure partie du gaz contracté est toujours dans le cylindre de compression suivant les indications de la figure 2.11. L'élan du volant continue à faire tourner le vilebrequin par 90 degrés supplémentaires pendant que le fluide de travail est transféré de nouveau dans le cylindre d'expansion. Tandis que le gaz se déplace par le régénérateur, il absorbe l'énergie thermique

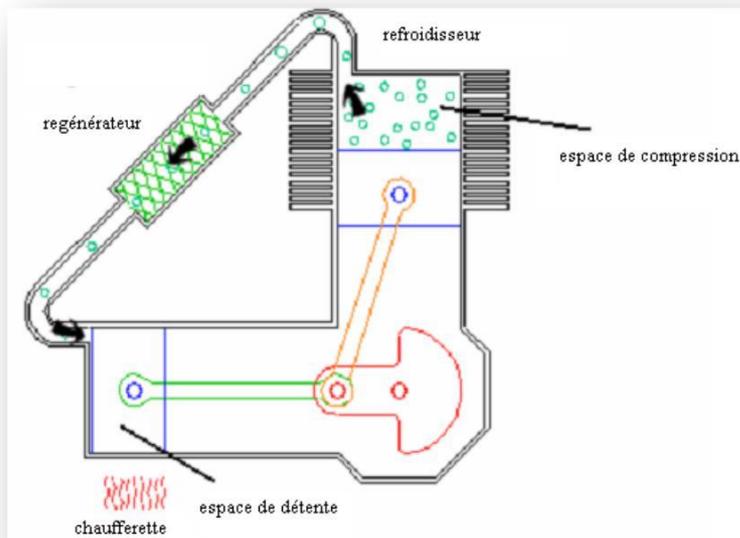


Figure 2.11 : Transfert de chaleur du moteur alpha du régénérateur au fluide de travail [43]

Processus 3-4 : Détente

La majeure partie du liquide de fonctionnement est dans l'espace d'expansion où elle est chauffée d'une source externe telle que l'énergie solaire ou la biomasse. Le gaz se dilate dans l'espace de détente et par le régénérateur tout en conduisant les deux pistons vers l'intérieur comme indiqué sur la figure 2.12 :

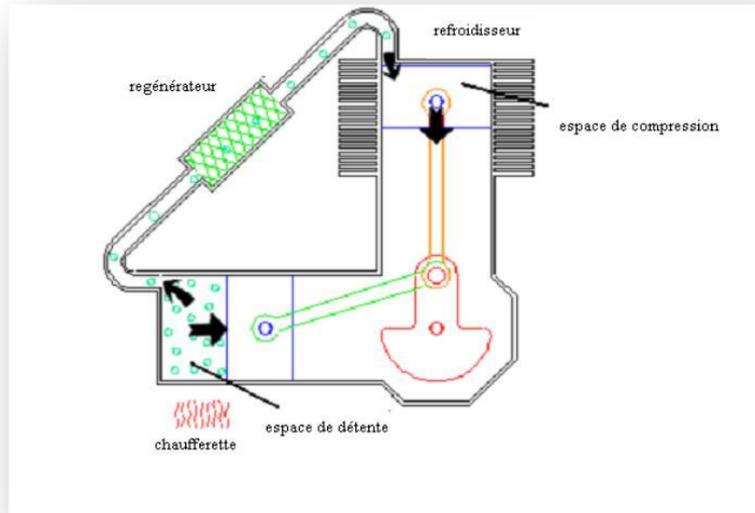


Figure 2.12 : Phase de détente du moteur Alpha [43]

Processus 4-1 : Transfert thermique à partir du fluide de travail au régénérateur

La plupart du gaz est toujours dans l'espace d'expansion que l'élan volant tourne le vilebrequin d'un 90 degrés supplémentaires. Cela provoquant le gaz resté poussé à travers le régénérateur dans l'espace de compression comme présenté sur la figure 2.13. La chaleur est transférée à partir du fluide de travail vers le régénérateur dans cette étape.

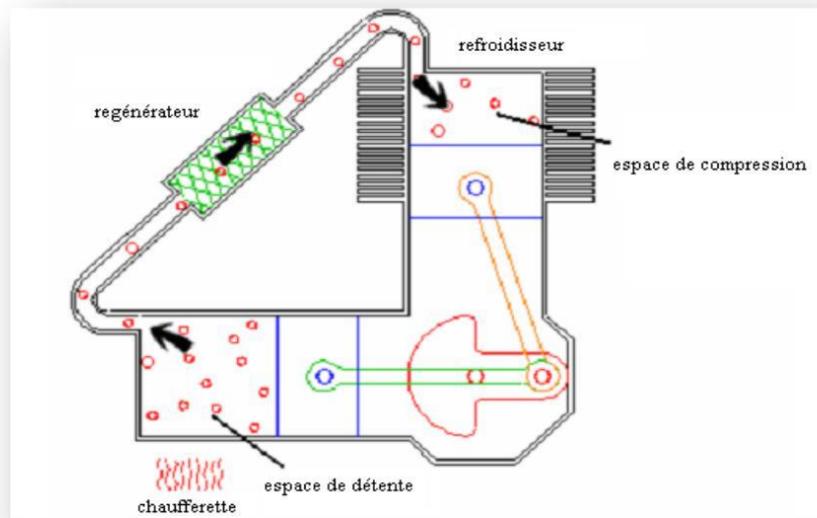


Figure 2.13: Transfert de chaleur du moteur alpha du fluide de travail vers le régénérateur [43]

3.1.2. Régénérateur

Un régénérateur est un échangeur de chaleur, il est employé souvent dans des moteurs Stirling pour améliorer le rendement du moteur [44].

De l'énergie thermique est absorbée par le régénérateur quand le fluide de travail est déplacé de l'espace de détente à l'espace de compression. Pour cette raison le fluide de travail est refroidi avant d'arriver à l'espace de compression. De l'énergie thermique est transférée à partir du régénérateur au fluide de travail et pour cette raison il est préchauffé quand le fluide de travail se déplace de l'espace de compression à l'espace de détente. Le régénérateur dans un moteur Stirling peut atteindre des rendements supérieurs à 98 %, ce qui indique le fluide de travail partira de la proximité du régénérateur à la température de l'espace qu'il occupe [41].

3.1.3. Fluides de travail du moteur Stirling

Les fluides de travail couramment utilisés dans des moteurs Stirling se composent de l'air, de l'hélium, ou de l'hydrogène. La sélection d'un fluide de travail particulier est basée sur les propriétés des fluides suivantes : conductivité thermique, chaleur spécifique, densité, et viscosité. Un fluide de travail avec une plus grande conductivité thermique, une densité et une chaleur spécifique plus élevée permettra d'améliorer les capacités de transfert de chaleur du gaz et l'efficacité des échangeurs de chaleur. Un fluide de travail avec une plus faible densité et une viscosité réduira la chute de pression à travers le régénérateur, l'aire de travail, et l'espace vide et il améliorera par conséquent le rendement du moteur.

Chacun des quatre tours de cycle de Stirling dure moins de 10 ms dans un moteur, ainsi le choix du fluide de travail dépend hautement de la conduction thermique du gaz [45]. Une plus grande chaleur spécifique pour le fluide de travail améliore également l'efficacité de l'énergie de transfert vers le régénérateur.

Le fluide de travail pour des moteurs Stirling d'une haute performance est souvent l'hydrogène ou l'hélium puisqu'ils ont une plus grande conductivité thermique et une capacité thermique par rapport à l'air suivant les indications du schéma (2.14) et schéma (2.15) respectivement.

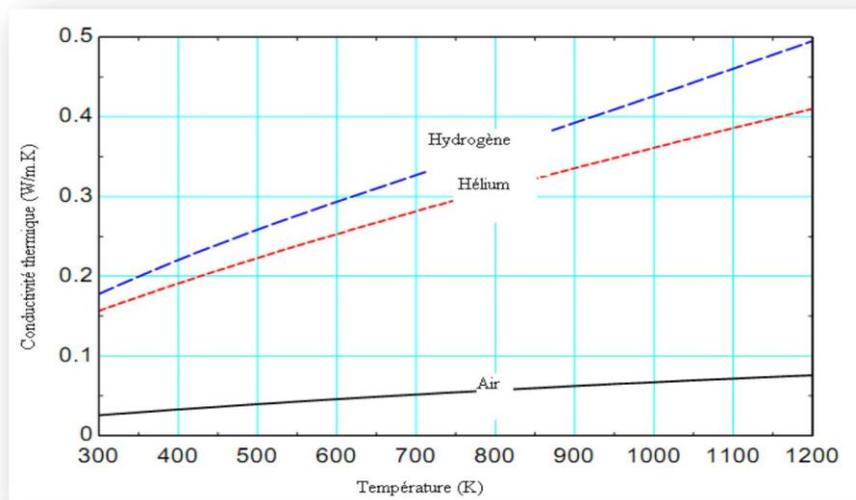


Figure 2.14: Conductivités thermiques des fluides de travail en fonction de la température [46]

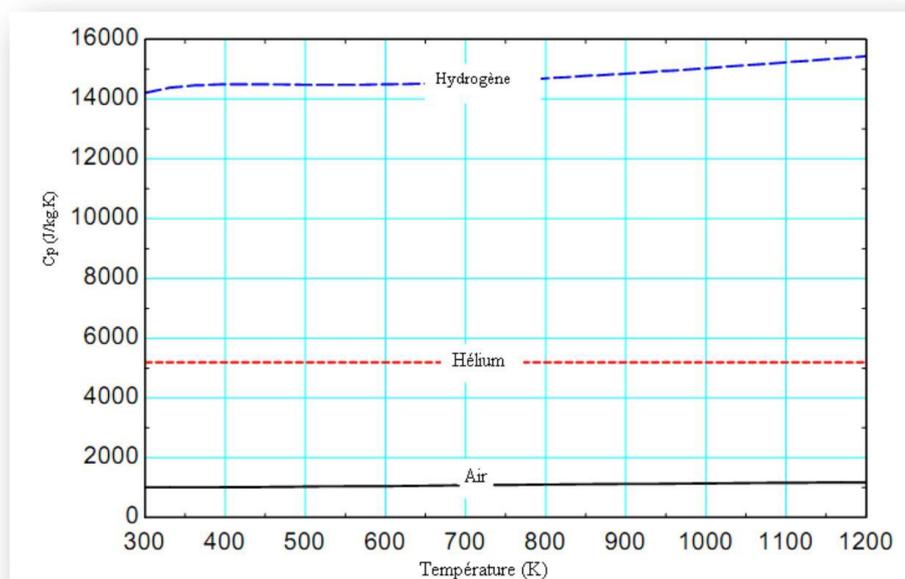


Figure 2.15: Chaleurs spécifiques des fluides de travail en fonction de la température [46]

Les pertes de pression dans les aires de travail et le régénérateur dépendent de la viscosité et de la densité du fluide de travail. Un fluide de travail avec une faible viscosité et une densité aura comme conséquence des gouttes de plus basse pression, améliorant principalement le rendement thermique. Une comparaison des viscosités et des densités pour les fluides de travail est donnée sur les figures (2.16) et (2.17) respectivement.

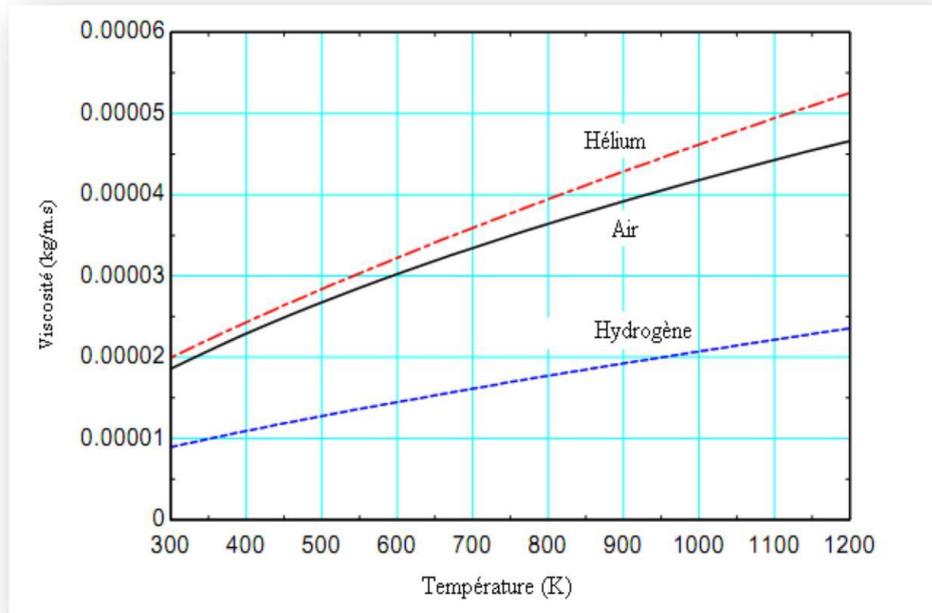


Figure 2.16 : Viscosités des fluides de travail en fonction de la température [46]

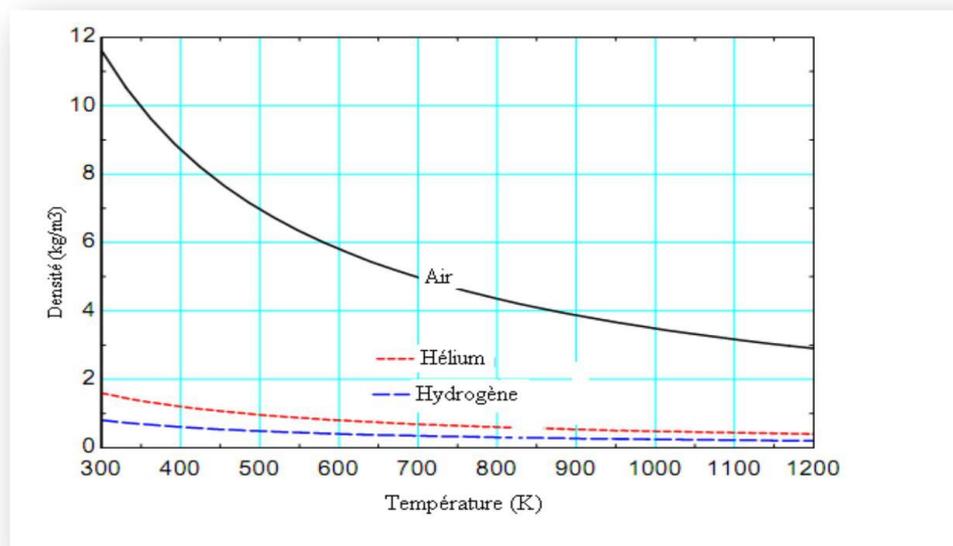


Figure 2.17 : Densités des fluides de travail en fonction de la température [46]

3.2. Analyse idéale du moteur Stirling

Le cycle de Stirling idéal se compose de quatre processus réversibles à l'intérieur comme le montre la Figure 2.9 [42].

Processus 1-2: compression isotherme à une température T_f pendant le transfert de la chaleur du fluide de travail à un dissipateur externe.

Processus 2-3 : chauffage isochore de fluide de travail par le régénérateur.

Processus 3-4 : Détente isotherme à une température de T_c , transfert thermique externe au fluide de travail.

Processus 4-1 : Refroidissement isochore, transfert de chaleur à partir du fluide de travail au régénérateur.

Un régénérateur avec une efficacité théorique de 100 % stocke une partie de l'énergie rejetée dans le processus 4-1 et l'utilise dans le processus de l'apport de chaleur 2-3. La chaleur à une température T_H est alimentée extérieurement dans le processus 3-4, le rejet de l'énergie à partir du système à la température T_C produisant dans le processus 1-2.

La chaleur Q_{1-2} produite par la compression est absorbée par la source froide (T_f). Q_{3-4} provenant de la source de chaude (T_c) permet la dilatation du gaz et donc un travail fourni vers l'extérieur.

Les chaleurs Q_{2-3} et Q_{4-1} n'absorbent ni ne produisent de travail. Elles sont produites par les transformations à volume constant. (En utilisant un régénérateur on peut compenser ces pertes de chaleur).

- La compression isotherme 1-2 absorbe le travail W_{1-2} ,
- La dilatation isotherme 3-4 fournit le travail W_{3-4} ,
- La condition pour que la machine soit motrice est $W_{3-4} > W_{1-2}$.

3.3.Calculs thermodynamiques

Travail net du cycle: $W = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} + W_{4-1} \dots \dots \dots (2.11)$

Or les étapes 2-3 et 4-1 se vont à volume constants donc $W_{2-3} = W_{4-1} = 0 \dots \dots \dots (2.12)$

$W_{1-2} = R T_f \text{Ln} (v_1/v_2) \dots \dots \dots (2.13)$

$W_{3-4} = R T_c \text{Ln} (V_3/V_4) = -R T_c \text{Ln} (V_1/V_2) \dots \dots \dots (2.14)$

Car $V_1 = V_4$ et $V_2 = V_3$

$W = -R (T_c - T_f) \text{Ln} (V_1/V_2) < 0 \dots \dots \dots (2.15)$

$\eta = \frac{\text{energieutile}}{\text{energie dépensée}} = \left| \frac{W_{tot}}{Q_{source}} \right| = \frac{-W}{Q_{3-4}} \dots \dots \dots (2.16)$

L'apport d 'énergie s'effectue au moment de la détente (3-4)

Au cours de l'étape 3-4 la température reste constante : $dU = n C_v dT = 0 \dots \dots \dots (2.17)$

$\Delta U_{3-4} = 0 = W_{3-4} + Q_{3-4} \dots \dots \dots (2.18)$

$Q_{3-4} = - W_{3-4} = R T_c \text{Ln} (v_1/v_2) \dots \dots \dots (2.19)$

$\eta = \frac{R (T_c - T_f) \text{Ln} (\frac{v_1}{v_2})}{R T_c \text{Ln} (\frac{v_1}{v_2})} = \frac{T_c - T_f}{T_c} = 1 - \frac{T_c}{T_f} \dots \dots \dots (2.20)$

Ce rendement est identique à celui de Carnot : $\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_c}{T_f} \dots \dots \dots (2.21)$

4. Conclusion

Dans ce chapitre on a pu voir les modèles théoriques du concentrateur ainsi les différentes caractéristiques et paramètres.

Pour le moteur on a déterminé et détaillé le cycle thermodynamique théorique et ces différentes équations pour on arriver au rendement du model de notre moteur de type alpha qui sera présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

1. Introduction

Dans ce chapitre on va entamer la partie réalisation du moteur Stirling de type alpha « montage en V » et par la suite on va faire quelques mesures durant le déroulement du test sur ce dernier.

Et pour finir on va définir les performances de notre moteur et calculer son rendement réel et le comparer avec le rendement théorique qui a été définie dans le chapitre précédent.

Le moteur bicylindre ou alpha est un moteur dans lequel un cylindre est associé à la source froide et un autre est associé à la source chaude tous les deux doté d'un piston, Le couplage cinématique des deux pistons permet au fluide de passer d'un cylindre à l'autre.

2. Le moteur Stirling du type alpha

On a réalisé un prototype d'un moteur Stirling de type alpha avec un montage en « V » de ces deux pistons :

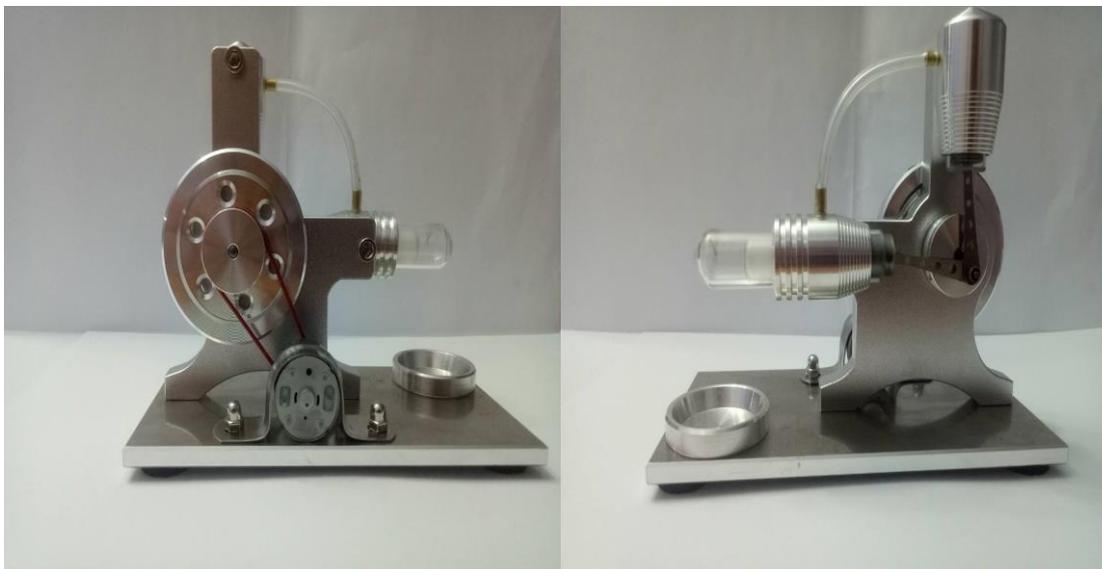


Figure 3.1 le moteur Stirling alpha

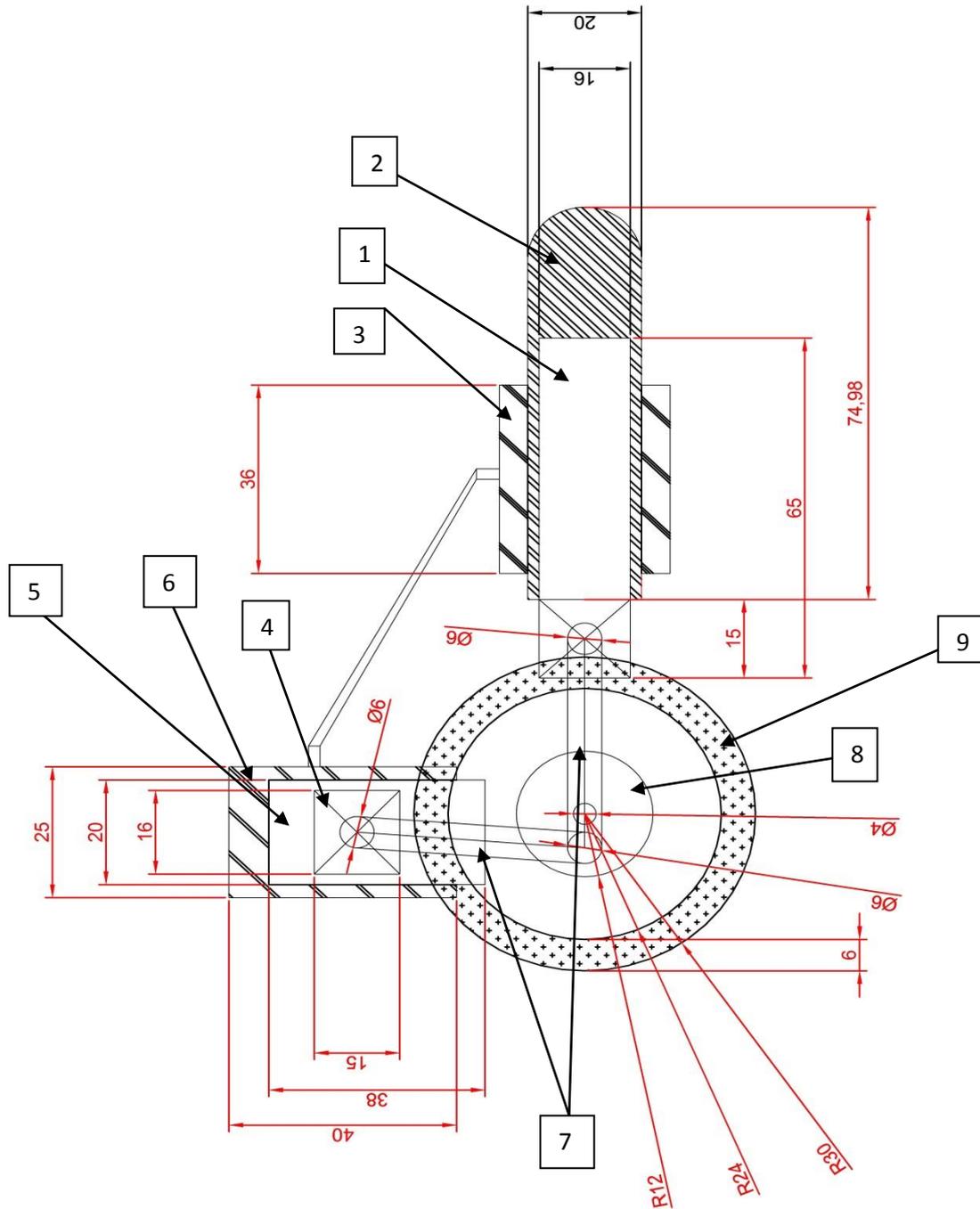


Figure 3.2 dessin d'assemblage des pièces de notre moteur (en mm)

Tableau 3.1 Dimensions géométriques du moteur Alpha

N°	Nom de la pièce	Matériaux	Géométrie	Longueur	Diamètre	course
1	Piston déplaceur	Aluminium	cylindrique	55mm	18mm	20mm
2	Cylindre du piston déplaceur	Verre épais	cylindrique	70mm	20mm	/
3	radiateur du cylindre de piston déplaceur	Aluminium	cylindrique	36mm	22mm	/
4	Piston moteur	Aluminium	cylindrique	20mm	18mm	5mm
5	Cylindre du piston moteur	Verre épais	cylindrique	39mm	20mm	/
6	radiateur du cylindre de piston moteur	Aluminium	cylindrique	45mm	22mm	/
7	Les bielles	Aluminium	/	40 mm		/
8	Roue de transmission	Aluminium	circulaire	/	25 mm	
9	volant	Aluminium	circulaire	/	60 mm	/
	Support moteur	Acier inoxydable	/	/	/	/

3. Les différents types d'opération

❖ Tour extérieur

On a :

- Tournage longitudinal (chariotage, axe z), réalisation d'un **diamètre** ;
- Tournage transversal (opération de dressage, axe x), réalisation d'une face, d'un épaulement ;
- Tournage par profilage, réalisé par copiage ou utilisation d'une commande numérique ;
- Tournage de gorges, dégagements ;
- Filetage, réalisation d'un pas de vis ;
- Tronçonnage

❖ Tournage intérieur

On a :

- Alésage ;
- Dressage ;
- Tournage intérieur par contournage ;
- Tournage de dégagement, gorges ;
- Taraudage, réalisation d'un filetage intérieur ;
- Cambrages ;

❖ Tournage de pièce métallique

Le chariotage d'une pièce métallique brute en tournage conventionnel se fait typiquement en cinq opérations :

1. Écroûtage du brut : on enlève la couche extérieure, qui a un mauvais état de surface et contient de nombreux défauts (calamine, corrosion, fissures, inclusions, écrouissage important, ...) ; il s'agit d'une passe d'environ 0,5 à 1 mm.
2. Contrôle du diamètre obtenu (au pied à coulisse voire au micromètre), ce qui permet de déterminer combien il faut enlever de matière pour arriver à la cote visée.
3. Passes d'ébauche d'une profondeur de plusieurs mm, pour enlever la matière.
4. Contrôle du diamètre avant finition.

5. Passe de finition, d'une profondeur inférieure à 0,5 mm mais supérieure au copeau minimum, afin d'avoir une bonne tolérance dimensionnelle et un bon état de surface.

4. Etapes d'usinage

Nous avons découvert la liste des usinages et immédiatement commencé les opérations.

La première pièce à usiner était le support en acier. Cela nous paraissait évident de commencer par cette pièce car c'est une pièce plane en acier donc une des plus faciles à percer, et cela nous permettait de découvrir notre outil principal : la perceuse à colonne.

Comme pour tous les perçages à réaliser, nous procédions de la même façon :

- ✓ On commençait par prendre les côtes et tracer l'emplacement du perçage grâce à une pointe à graver.
- ✓ On procédait ensuite à un marquage pour guider le futur perçage.
- ✓ On perçait d'abord à un diamètre inférieur et on augmentait par pas de 1 à 2 mm jusqu'au diamètre définitif
- ✓ Il restait ensuite à ébarber les surfaces percées

Dans ce qui suit-on vas donner un exemple d'une pièce qu'on a réalisé.

4.1.Fabrication du radiateur

Afin de réaliser le moteur Stirling de type alpha, nous avons fait de recherche sur le site du moteur sterling on a eu quelque notion servant comme kit contenant des pièces prés a usinées alors le choix des matériaux est dans la plupart des cas directement lié à la fonction accordée aux pièces du moteur, on y retrouve de l'acier, de l'aluminium mais aussi du laiton ou encore du verre. Les matériaux ont donc été sélectionnés pour leurs propriétés physique ou mécanique, mais aussi pour des raisons économique voir même esthétique.

Ainsi il existe différents critères d'utilisation pour les matériaux. Pour notre cas par exemple, les principaux critères doivent être une résistance à l'usure élevée, avoir une bonne résistance aux variations de température, un coût de production moyenne, une grande facilité de production ou encore être compatible avec l'environnement.

La figure 3.3 ci – dessous est un lingot d'aluminium que nous allons transformer dans le but d'obtenir un radiateur qui doit assurer des échanges thermiques pour le moteur Stirling de la configuration alpha, elle représente l'état du radiateur avant l'usinage



Figure 3.3 : lingot d'aluminium

Pour obtenir un radiateur efficace, qui permet de bons échanges thermiques, on va donc le concevoir à partir d'aluminium. En effet, l'aluminium est un bon conducteur thermique, très léger mais aussi résistant. En plus, vu que le métal peut être usiné on obtient aisément un radiateur ayant une grande surface de contact pour maximiser les échanges d'énergie.

La Figure 3.4 décrit l'état de la réalisation du radiateur au tour, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin.



Figure 3.4 : la fabrication du radiateur

Tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil coupant. La combinaison de ces deux mouvements permet l'enlèvement de matière sous forme de copeaux.

5. Déroulements des tests

- ✚ Après l'usinage de l'ensemble des pièces, on a fait le montage du moteur et par la suite on a fait quelque test pour s'assurer qu'il marche.
- ✚ Après avoir allumé notre source chaude, on a attendu quelques instants et on a donné une vitesse initiale à notre volant pour qu'il démarre.
- ✚ A 40 °C notre moteur à commencer à tourner à petite vitesse, donc on a définis la température de démarrage.
- ✚ Après plusieurs tests on est arrivé à mesurer quelques températures, qui nous permettrons de déterminer le rendement réel de notre engin.
- ✚ Pour mesuré les températures on a utilisé un thermocouple du type « k ».
- ✚ Le moteur a pu arriver à une grande vitesse au bout de quelques minutes de démarrage seulement « 4 minute ».
- ✚ On a ajouté une petite génératrice a notre moteur pour voir le coté production électrique à petit échelle pour montrer la production d'électricité.
- ✚ Avec l'appareil metrix « MX 435D » on a mesuré la tension et le courant de la génératrice.

6. Résultats des tests

A la même température ambiante qui est notre température de source froide $T_f = 25\text{ °C}$ et l'augmentation de la température de la source chaude T_c . Puis on a calculé les rendements pour différentes températures de la source chaude, on a affiché nos résultats :

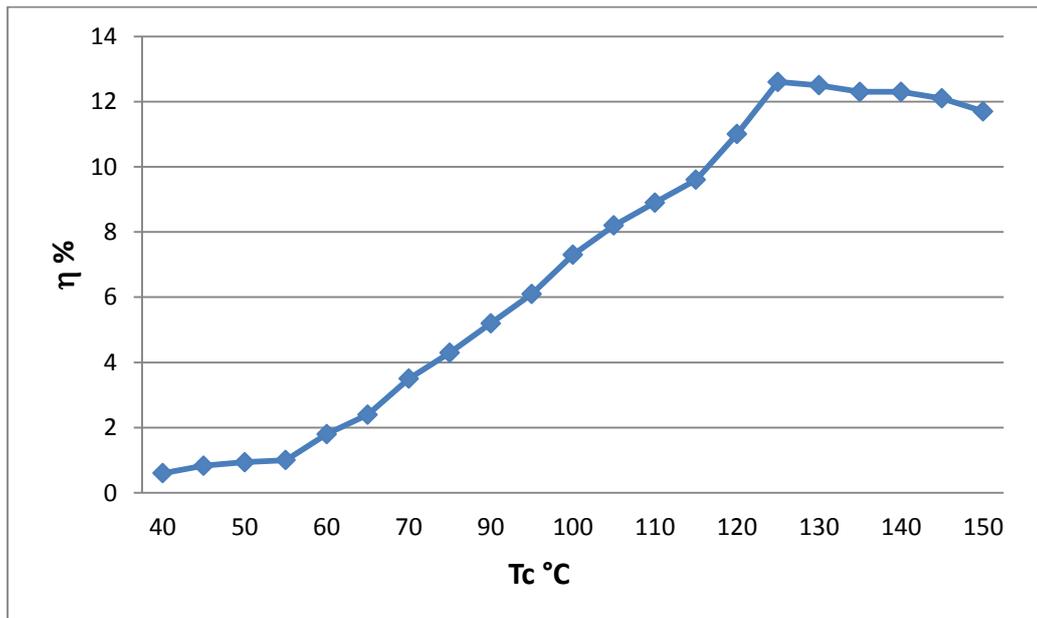


Figure 3.5 La variation du rendement en fonction de la température de la source chaude

On voit que le rendement de notre moteur croît avec l'augmentation de la température de la source chaude jusqu'à 125 °C où il atteint son sommet puis il commence à redescendre, donc on peut dire que à $T_c = 125^\circ\text{C}$ le rendement est optimal.

Pour la même température on a calculé le rendement théorique du cycle qui est identique à celui de Carnot qu'on a mentionné à la fin du précédent chapitre :

$$\eta_{\text{théorique idéal}} = \eta_{\text{carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_c} = 0.2512 = 25.12\%$$

Approche exérgétique donne le rendement max :

$$\eta_{\text{Max}} = 1 - \sqrt{\frac{T_f}{T_c}} = 0.1347 = 13.47\%$$

Puissance de la génératrice :

$$I_{\text{mesuré}} = 1.7 \text{ A}$$

$$U_{\text{mesuré}} = 7 \text{ V}$$

$$P_{\text{calculé}} = I_{\text{mesuré}} \cdot U_{\text{mesuré}} = 11.9 \text{ watts}$$

7. Conclusion

Le moteur Stirling Alpha est une machine fascinante de complexité mais aussi de simplicité et une efficacité impressionnante. Ils peuvent être utilisés dans bon nombre de domaines, sa réalisation n'était pas facile mais pas impossible, pour conclure ce chapitre on peut dire qu'on a pu démontrer le phénomène physique du moteur Stirling et sa faisabilité mais il reste que son rendement réel est bien loin du rendement théorique mais beaucoup plus proche de l'approche exergetique avec une puissance générée de 11.9 watts.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de satisfaire les besoins de la communauté en matière d'énergie une exigence de maîtrise rationnelle des différentes sources énergétiques disponibles visant à rentabiliser leurs exploitations. Dans cette optique des travaux d'investigation et de recherche ont été entamés dans le souci de substituer les sources chaudes traditionnelles utilisées dans les installations thermoélectrique, par des sources chaudes issues du solaire thermique converti par le biais des différents procédé de concentration solaire. Les paraboloïdes de révolutions et l'une des solutions qui fera avancer le domaine de la production d'électricité à partir des énergies renouvelables et durables.

Les paraboloïdes de révolutions ce compose d'un concentrateur parabolique et un moteur de Stirling ; notre travail concerne l'étude théorique et pratique du moteur de Stirling. Dans cette étude, un moteurs de type alpha a été réaliser afin de pourvoir démontrer la faisabilité du phénomène physique en premier lieu puis lui faire passer quelques tests pour vérifier son fonctionnement et prendre quelques mesure qui nous ont aidés par la suite à faire nos calculs concernant le rendement réel qui a été comparé au théorique ou on a pu remarquer qu'il une différence inexigible entre le rendement réel et théorique, mais par port a l'approche énergetique la différence n'était pas aussi grande.

Notre moteur a bien vu le jour après plusieurs étapes par les quelles on est passé pour le réalisé, après les mesures et calculs on a trouvé :

$\eta_{\text{réel}}=12.6\%$ à une température optimale de la source chaude de $T_c=125^\circ\text{C}$, qui a généré une puissance électrique de $P_{\text{Génératrice}}=11.9$ watts.

C'était des résultats satisfaisants par rapport à la taille du prototype.

On peut dire qu'on a réussi à atteindre notre objectif du début qui était la réalisation d'un prototype du moteur de Stirling dans le but de démontrer la faisabilité du phénomène physique et son fonctionnement.

Références bibliographiques

- [1] Jacques. Bernard, Energie solaire calculs et optimisations, édition : ellipses, 2004.
- [2] Mustapha Merzouk. Contribution à la détermination des performances théoriques et expérimentales des capteurs solaires à tube sous vide en régime transitoire.
Thèse de doctorat, Université de AboubakarBelkaid de Tlemcen, 2004.
- [3] R.Bernard, G.Menguy et M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et application, 2ème édition, Paris, 1980
- [4] John A. Duffie et William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Canada, 2013
- [5] Hottel.H.C. , A simple Method For Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation Through Clear Atmospheres, SolarEnergy, vol 18, pp129, Progamon Press 1976.
- [6] Iqbal M. An introduction to solar radiation.Tronto : Academic press,1983.
- [7]ASHRAE handbook: HVAC application. Atlanta (GA): ASHRAE ,1999.
- [8] Brichambraut P.et C.Vaugue,Le Gisement Solaire, Evaluation de la Resource Energétique, Technique et Documentation, Paris 1982
- [9] J. Hofierka and M. Sùri, ‘The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications’, Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference, Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [10] F. Kasten and A.T. Young, ‘Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula’, Applied Optics, Vol. 28, N°22, pp. 4735 - 4738, 1989.
- [11] F. Kasten, ‘The Linke Turbidity Factor Based on Improved Values of the Integral Rayleigh Optical Thickness’, Solar Energy, Vol. 56, N°3, pp. 239 – 244, 1996.
- [12]F. Yettou1, A. Malek, M. Haddadi et A. Gama1, ‘Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie’, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 (2009) 331 – 346
- [13] M. Koussa, A. Malek et M. Haddadi, ‘ Validation de quelques modèles de reconstitution des éclaircissements dus au rayonnement solaire direct, diffus et global par ciel clair’, Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°4 (2006) 307 – 332
- [14] Garcia-Valladares, O, Velazquez. N, 2009. Numerical simulation of parabolic trough collector: improvement using counter flow concentric circular heat exchangers.
- [15] Duffie, J A etW.A.Beckman, Solar Engineering of Thermal Prcesses

Edition J. Wiley & Sons, USA 1991

[16] Reicosky.D.C, Winkelman.L.J, Baker J.M and Baker.D.G, 1989.

Accuracy of hourly air temperatures calculated from daily minima and maxima. *Agricultural and Forest Meteorology* 46, 193-209.

[17] Belghit.A, Belahmidi .M, Bennis.A, Boutaleb.B, Benet.S, 1997. Etude numerique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée. *RevGénTherm* 36, 837-850.

[18]MARIF Yacine. Caractérisation d'un concentrateur cylindroparabolique de dimensions réelles au sud de l'Algérie: Région d'Ouargla. Thèse de Doctorat, Université KasdiMerbah Ouargla,2015.

[19] Walker, G. (1980). *Stirling Engines*. Oxford.

[20]Sébastien, R. Théorie du Concentrateur Solaire et du Rayonnement Solaire sur l'île de la Réunionp.p (6/42).

[21]Duffie, John A., and William A. Beckman.*Solar Engineering of Thermal Processes*. Third ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

[22]Mancini, Thomas, et al. "Dish-Stirling Systems: An Overview of Development and Status." *Journal of Solar Energy Engineering* 125 (May 2003).

[23]"Ministerio De Educación Y CienciaWebsite."

<http://www.psa.es/webeng/instalaciones/discos.html>. Consulté le 20 Décembre

2011.[24]Teagan, Peter W. Review: Status of Markets for Solar Thermal Power Systems, May 2001.<<http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/pdfs/adlitt1.pdf>>.

[25] site officiel [www.moteurstirling.com] historique du moteur Stirling ajouté en 2008.

[26]Lemrani H., Modélisation énergétique des moteurs Stirling, Thèse de Doctorat, École des Mines de Nantes, France (1995).

[27] Cinar C., Yucesu S., Topgul T., Okur M., Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure, *Applied Energy*, 81, 351-357 (2005(1)).

[28] Iwamoto S., Toda F., Hirata K., Takeuchi M., Yamamoto T., Comparison of low and high temperature differential Stirling engine, *Proceeding 31st IECEC*, 1259-1264 (1997).

[29] Kongtragool B., Wongwiset B., A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engine, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 7, 131-154 (2003).

[30] Pr.Merzouk ,support de cours de Concentration Solaire Théorie et Systèmes,master 2,option conversion thermique, département des énergies renouvelables ,USDB , (2018)

[31] B.Stine ,Michael Geyer, *Power from the sun*, Lyle centre for regenerative studies 2001.

- [32] M.Srinivasan, L.V.Kulkarni, A simple technique of fabrication of parabolic concentrators. Solar energy, volume 22, pp 463-465. Novembre 1978.
- [33] Zeghib Ilhem, memoir pour un diplôme de Magister en physique énergétique intitulé « Etude et réalisation d'un concentrateur parabolique » (juin 2005)
- [34] Dan dye, Byard Wood, 'Non-imaging devices for uniform irradiation on Planar Surface For parabolic Concentrators ', Semi-Annual Technical Progress Report August 2002-April 2003. Nevada. Report 41164R03.
- [35] U.H.Kurzweg ,J.P.Benson , 'Iso-Intensity absorber Configurations For parabolic Concentrators ', Solar energy .Vol.29,No.2,pp167-174,1982.
- [36] Vudichai Neeranartvong, Etude d'un concentrateur solaire a simple réflexion. Thèse de Docteur Ingenieur, Institut national polytechnique de Toulouse. juillet 1983.
- [37] Paul De Neyer, Energie solaire thermique, Guide des Energies Renouvelables, mai 2003.
- [38] J.E .Braun et J.C .Mitchell, Solar geometry for fixed and tracking surface. Solar Energy, vol.31.N°.pp394-444 ,(1983).
- [39] Sauzade D., ImbertG., Mollard J., The supporting technologies and sea trials of a long-range autonomous civilian submarine, Marine Technology Society Journa, 25, No. 2, 3-13 (1991)
- [40] Cinar C., Yucesu S., Topgul T., Okur M., Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure, Applied Energy, 81, 351-357 (2005(1)).
- [41] Meijer R.J., STM4-120, Stirling engine for solar application, Abs I.S.E.S, Solar world Congress, 13-16 (1987).
- [42] kolin I.,The stirling motor : History - Theory - Practice, International University Center, Dubrovnik, (1991(1)).
- [43] TLili I., Modélisation des moteurs Stirling, Thèse de Doctorat, ENIM, Université de Monastir, Tunisie (2010).
- [44] Iwamoto S., Toda F., Hirata K., Takeuchi M., Yamamoto T., Comparison of low and high temperature differential Stirling engine, Proceeding 31st IECEC, 1259-1264 (1997).
- [45] Abdulla S., Yousif B.-F., Sopian K., Design consideration of low temperature differential double acting Stirling engine for solar application, Renewable Energy, 30 1923-1941 (2005).
- [46] Timoumi Y., Ben Nasrallah S., Bettaieb H., Analyse des mécanismes des moteurs Stirling, Journées Scientifiques, Borj El Amri, Tunis (2000).