

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

Mémoire du Projet de fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de
Master 2 en génie mécanique
Option : Energétique

**Etude et réalisation d'un moteur Stirling
couplé à un concentrateur solaire**

Réalisé par :

- ✓ NOURENE Cherif
- ✓ AMMAR Abdellatif

Encadré par : Pr. LOUNIS Mourad

Soutenu le 23/06/2015 devant le jury :

Président : Dr. KELLACI Ahmed

Promoteur : Pr. LOUNIS Mourad

Examineur : Dr. HEMIS Mohamed

Année Universitaire 2014/2015

Remerciements

Louange à Allah ! Le Tout Miséricordieux, à Toi que nous venions, à Toi que nous retournerions et c'est Toi dont nous implorons secours.

Nos remerciements viennent d'emblée à Toi le Tout puissant d'avoir fait durant notre parcours de volonté, de force et de succès jusqu'aujourd'hui à la réalisation de ce travail si remarquable.

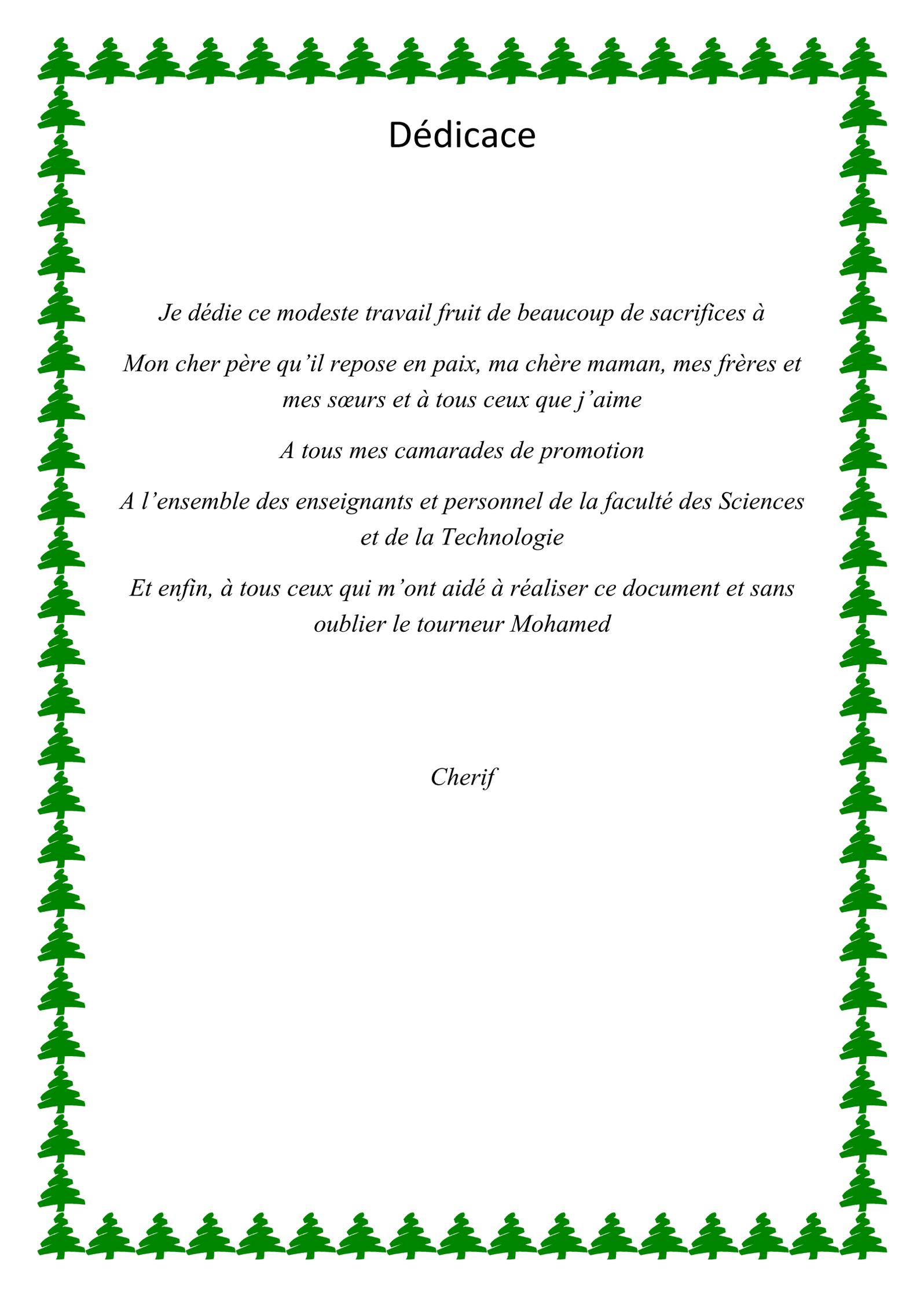
Ce modeste travail ne verra pas le jour sans la personne à qui nous tenons à la remercier infiniment et que seul le bon Dieu lui accorde sa bénédiction et la bienfaisance ainsi que toute sa famille. Il s'agit de l'homme qui nous a montré plus qu'un promoteur puisse faire à l'égard de ses étudiants par sa présence permanente, son dynamisme, sa bonne volonté, ses encouragements, ses conseils et son soutien éthique, pédagogique, scientifique. Retrouvez entre ces lignes Monsieur le professeur LOUNIS Mourad, l'expression de cette gratitude si profonde.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre Doyen Monsieur le Docteur KELLACI Ahmed pour ses précieux conseils tout au long de notre travail.

A tous les enseignants et enseignantes de la faculté des Sciences et de la Technologie qu'avec leur encadrement si qualifié dans ce domaine, nous avons bénéficié cette formation aussi importante.

Aux membres de jury, particulièrement monsieur le président de jury Monsieur Dr. KELLACI Ahmed et l'examineur Monsieur Dr. HAMIS Mohamed d'avoir accepté d'évaluer ce travail et que tous les mérites et honneurs vous reviennent. Nous vous remercions profondément pour cette formation.

Nos remerciements vont droit au tourneur BENAMMER Kerfah Mohamed qui a contribué techniquement à la réalisation des cinq moteurs Stirling, nous ne t'oublierons jamais.



Dédicace

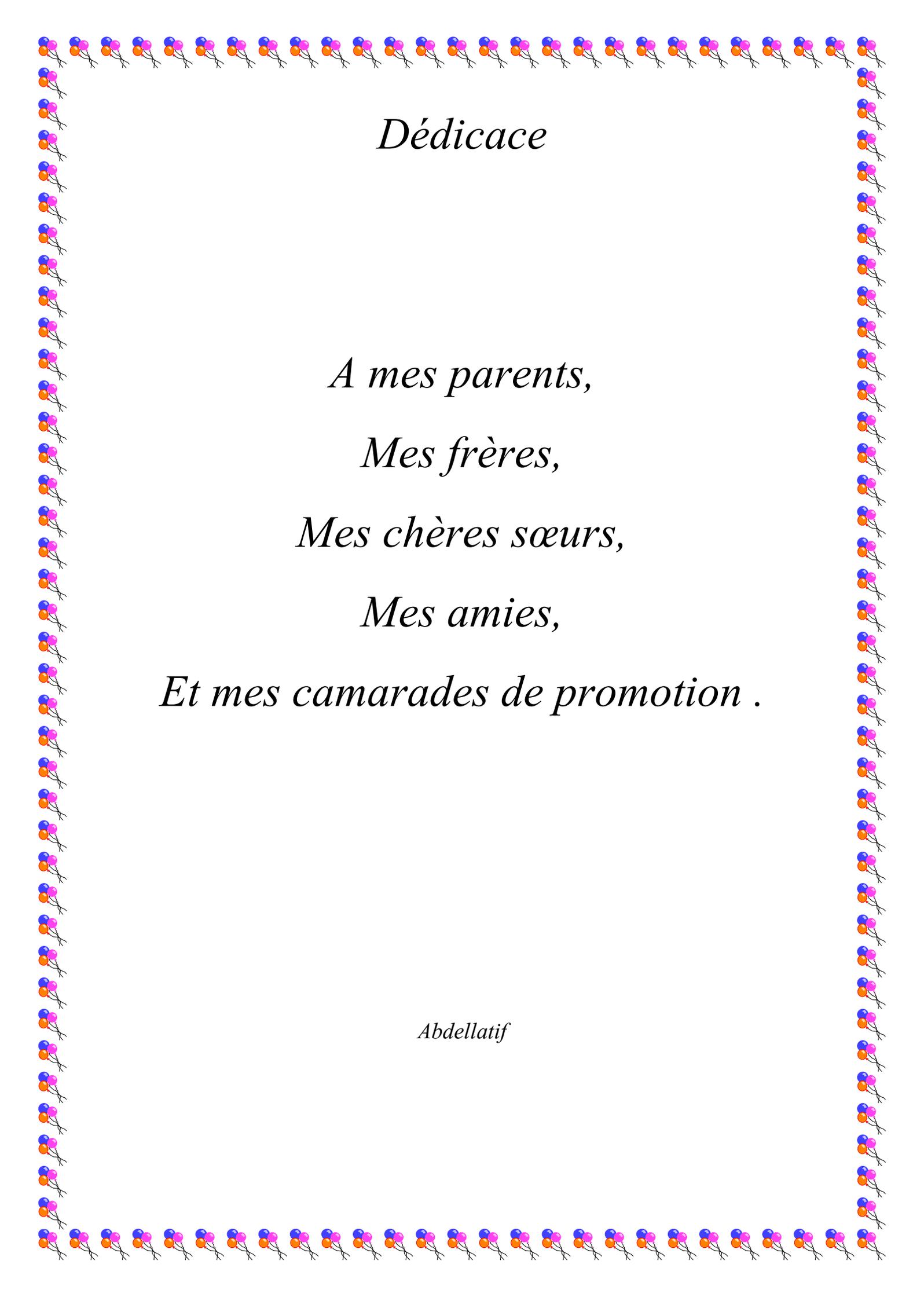
*Je dédie ce modeste travail fruit de beaucoup de sacrifices à
Mon cher père qu'il repose en paix, ma chère maman, mes frères et
mes sœurs et à tous ceux que j'aime*

A tous mes camarades de promotion

*A l'ensemble des enseignants et personnel de la faculté des Sciences
et de la Technologie*

*Et enfin, à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce document et sans
oublier le tourneur Mohamed*

Cherif

A decorative border of colorful balloons (blue, pink, orange) with black strings, arranged in a rectangular frame around the text.

Dédicace

*A mes parents,
Mes frères,
Mes chères sœurs,
Mes amies,
Et mes camarades de promotion .*

Abdellatif

RESUME:

Dans le contexte énergétique actuel, nous assistons au développement de technologies de production d'énergie "propre". Ainsi, de nouvelles perspectives comme la conversion thermodynamique de l'énergie solaire ou la valorisation des déchets sont offertes à la recherche sur les "énergies renouvelables". Dans ce cadre, nous nous intéressons aux moteurs thermiques à apport de chaleur externe : le moteur Stirling

Une machine thermique fonctionnant suivant le cycle de Stirling constitue une alternative pour profiter des radiations solaires, puisque ces machines sont des machines à combustion externe.

Ce Mémoire présente la réalisation des moteurs Stirling solaire de type Alpha et Gamma inventé par le pasteur écossais Robert STIRLING au début du XIX siècle (1816), Bien avant les moteurs à combustion interne.

SUMMARY:

In the current energy and ecological context, the use of renewable energy, particularly solar energy, succession of great importance. A heat engine operating according to the Sterling cycle is an alternative to take advantage of solar radiation, since these machines are external combustion engines. This memory has the manufacturing of Alpha type Sterling Solar and Gamma engines invented by the Scottish clergyman Robert STIRLING in the early nineteenth century (1816), well before internal combustion engines.

Liste des figures :

Figure 1.1: Robert STIRLING	7
Figure 1.2 : Cycle Stirling théorique : Digramme PV et Diagramme TS.....	9
Figure1. 3 : Classification générale des moteurs Stirling.....	11
Figure 1.4 : Forme des moteurs Stirling simple et double effet.....	12
Figure 1.5 : moteur Stirling de configuration alpha	13
Figure1. 6 : Moteur Stirling de configuration beta	14
Figure 1.7 : Moteur Stirling de configuration Gamma.....	14
Figure 1.8 : La parabole Stirling solaire du projet EuroDish	15
Figure1. 9 : Photo de la fusée saturn v.....	16
Figure 1.10 : Microprocesseur refroidi par moteur Stirling	17
Figure 1. 11: Chaudière a bois Sterling.....	18
Figure 1. 12: Moteur Stirling type STM 4-120	19
Figure 1.13 : Relation entre le volume mort et la puissance de moteur Stirling.....	22
Figure 1.14 : Nouvelle conception de l'échangeur de chaleur (124 tubes).....	22
Figure 2.1 Schématisation des différents compartiments du moteur Stirling	26
Figure 3.1 : Ressources thermique.....	45
Figure 3.2 : Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide.....	46
Figure 3.3 : Les trois centrales solaire à concentration.....	48
Figure 3.4 : Système Dish-Stirling	49
Figure 4.1 : Photo de la Tour à charioter et fileter.....	53
Figure 4.2 : Photo de l'acier rapide HSS.....	54
Figure 4.3 : Photo de l'outil à aléser	54
Figure 4.4 : Photo de la machine perceuse	55
Figure 4.5 : Photo de la machine scieuse	55
Figure 4.6: Photo de la presse hydraulique.....	56
Figure 4.7:Photo du lingot d'aluminium.....	58
Figure 4.8 : Photo de la fabrication du radiateur.....	59
Figure 4.9 : Photo du radiateur du moteur Stirling Gamma	59
Figure 4.10 : Photo de l'ailette avant la réalisation	60
Figure 4.11 : Photo de L'ailette de refroidissement	60
Figure 4.12 : Photo du piston moteur au tour.....	61
Figure 4.13 : Photo du piston moteur	61
Figure 4.14 : Photo du piston deplaceur.....	61

Figure 4.15 : Photo du Cylindre du piston deplaceur	62
Figure 4.16 : Photo de la Bielle du piston deplaceur	62
Figure 4.17 : Photo du Piston du moteur	63
Figure 4.18 : Photo de la roue motrice	63
Figure 4.19 : Photo du Vilebrequin.....	64
Figure 4.20 : Photo du coussinet réducteur des frottements	65
Figure 4.21 : Photo des pièces assemblées du type Gamma N°1	65
Figure 4.22 : Photo des pièces assemblées du type Gamma N°2.....	66
Figure 4.23 : Photo des pièces assemblées pièces réalisé du moteur Gamma N°3.....	66
Figure 4.24 : Pièces assemble du moteur Alpha N°1	66
Figure 4.25 : Fissures causé par les hautes températures.....	67

Liste des tableaux :

- Tableau 1.1 : Chaleur transférée par certains fluides de travail.....20
- Tableau 2.1 : Coefficients a et b pour O₂, N₂ et l'air selon Weast (1980).....27
- Tableau 4.1 : Dimensions géométrique du Moteur Gamma.....51
- Tableau 4.2 : Dimensions géométrique du moteur Alpha.....51

Table de matière

INTRODUCTION GENERALE.....	4
CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
1.1.Introduction	6
1.2. Historique des moteurs Stirling.	7
1.3. Principe de fonctionnement	9
1.5. Classification des moteurs Stirling selon le mode de fonctionnement	10
1.5.1 Simple ou double effet	11
1.5.2 Mono ou multiphasique.....	12
1.5.3 Résonnant ou non résonnant	12
1.6. Classification selon l'agencement des cylindres	13
1.6.1. La configuration Alpha.....	13
1.6.2. La configuration Bêta.....	13
1.6.3. La configuration Gamma.....	14
1.7. Application des moteur Stirling	15
1.7.1. Conversion de l'énergie solaire en électricité	15
1.7.2. Domaine spatial.....	16
1.7.3. Domaine militaire	17
1.7.4. Domaine de l'informatique	17
1.7.5. Domaine de cogénération	18
1.7.6. Domaine du transport : Voiture hybride	18
1.7.7. Domaine industriel	19
1.8. Paramètres d'optimisation d'un moteur Stirling	19
1.8.1. Fluide de travail	19
1.8.2 Taux de compression.....	20
1.8.3 Déphasage entre le mouvement des pistons.....	21
1.8.4 Nature du mouvement des pistons	21
1.8.5 Volume mort dans le moteur	21
1.8.6 Géométrie du réchauffeur et du refroidisseur	22
1.9. Paramètres de fonctionnement du moteur	23
1.9.1. Températures des sources de chaleur.....	23
1.9.2 Vitesse de rotation	23
1.9.3 Pression initiale de charge	23

1.10. Conclusion	24
CHAPITRE 2 : ETUDE THERMODYNAMIQUE DES MOTEUR STIRLING	
2.1 Introduction	25
2.2. Modèle adiabatique avec l'hypothèse simplificatrice d'un gaz réel	25
2.2.1 Détermination des capacités calorifiques pour un gaz réel	27
2.3. L'évolution de la masse et de la pression dans un moteur Stirling	29
2.3.1. Évolution de masse dans les échangeurs de chaleur	29
2.3.2. Évolution de la masse dans les espaces de travail	30
2.3.3. Évolution de la pression dans un moteur Stirling	33
2.4. Évolution du débit massique aux différentes interfaces d'un moteur Stirling	33
2.5. Évolution des flux de chaleur et des températures dans les différents compartiments	35
2.6. Modèle quasi-stationnaire pour un gaz réel	36
2.6.1. Hypothèse adoptées	36
2.6.2. Variation de la température des parois du régénérateur	37
2.6.3 Variations des flux de chaleur dans les différents compartiments du moteur	38
2.6.4. Variation de la pression dans le moteur	40
2.6.5. Variation des flux de masse dans le moteur	41
2.6.6. Variation des températures dans les différents compartiments	42
2.7 Méthode de résolution	43
2.8. Conclusion	43
CHAPITRE 3 : LES CONCENTRATEURS SOLAIRES	
3. Introduction	44
3.1.Historique et perspectives	44
3.2 Aperçu de la technologie	44
3.2.1.L'énergie solaire	45
3.3 La concentration	46
3.4 Les différents types de centrales solaires à concentration	47
3.5 Avantage de la filière solaire thermodynamique	48
3.6 Le système Parabole/Stirling :	48
3.7 Conclusion	50

CHAPITRE 4 : REALISATION DU MOTEUR STIRLING

4.1 Introduction	50
4.2 Dimensions géométriques du moteur Stirling	51
4.3 Tournage mécanique	52
4.3.1 Les différents types d’opération	52
4.4 Les appareils utilisés	53
4.4.1 Tour à charioter et fileter	53
4.4.2 Les outils de l’usinage	54
4.4.3.La perceuse	55
4.4.4 La Scieuse	55
4.4.5 La presseuse hydraulique	56
4.4.6 Tronçonneuse a disque	56
4.5 Réalisation des pièces	57
4.5.1 Le moteur du type gamma	57
4.5.2 Etapes d'usinage	57
4.5.3 Fabrication du radiateur	58
4.5.4 Usinage de l’ailette de refroidissement	60
4.5.5 Réalisation du piston moteur	61
4.5.6. Réalisation du piston deplaceur	61
4.5.7 Cylindre du piston deplaceur	62
4.5.8 Préparation des bielles motrice du piston deplaceur	62
4.5.8.1 Bielle motrice du piston moteur	63
4.5.9 Roues motrices	63
4.5.10 Réalisation du vilebrequin	64
4.5.11 Fabrications du coussinet	65
4.6.Assemblage des pièces des moteurs	65
4.7.Difficultés rencontrées	67
4.8.Conclusion	68

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 nombreux, et ont des niveaux d'avancement technique et de performances très variés.

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 par échangeur, avec ou sans échangeur récupérateur, à machines de compression et de détente alternatives distinctes, à cycle monophasique ouvert ou fermé, avec ou sans soupapes, sont en revanche très appropriés à la valorisation d'énergie renouvelable.

Nous nous intéressons donc à l'étude et à la réalisation du moteur thermique à apport de chaleur externe qui est le moteur Stirling, inventé par le Pasteur Robert Stirling (figure 1.1) 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 détentes entre deux niveaux différents de température.

Pour cela, notre travail est structuré comme suit :

- Le premier chapitre de ce mémoire d'écrit l'historique du moteurs Stirling, leur principe de fonctionnement, leurs configurations, leurs applications ainsi que les principaux travaux qui ont été réalisés sur ce genre de moteur ;

- Le second chapitre décrira la formulation mathématique des problèmes thermo- physiques qui régissent les moteurs Stirling et le les deux modèles thermodynamiques ; à savoir le modèle adiabatique et le modèle quasi-stationnaire ;

- Dans le troisième chapitre, nous allons parler sur les centrales solaire ;

- le quatrième et dernier chapitre présente les résultats de la réalisation de toutes les pièces du moteur Stirling.

Chapitre 1

Chapitre 1 : Revue bibliographique

1.1 Introduction

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 (figure 1.2).

Le moteur Stirling a été inventé par le pasteur écossais Robert Stirling au début du 19^{ème} siècle. Il a connu un succès commercial très important jusqu'au début du 20^{ème} siècle puisqu'il constituait, avec la machine à vapeur, quasiment la seule possibilité de convertir l'énergie calorifique en énergie mécanique. Cependant, à la fin du 19^{ème} siècle, il fut détrôné par les moteurs à combustion interne et les moteurs électriques, qui souffraient moins des difficultés technologiques liées à la lubrification, à l'étanchéité ou à la tenue des matériaux à hautes températures. 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.

- ❖ La troisième catégorie de machines Stirling correspond à celle des machines couplées, lesquelles utilisent 2 systèmes thermiques Stirling, l'un moteur, entraînant l'autre, récepteur.

Dans l'optique du développement durable, le moteur Stirling constitue une alternative à prendre en compte pour la conversion des énergies renouvelables en travail, avec un rendement théorique égal à celui de Carnot et une grande adaptabilité à des sources variées de chaleur (combustion, récupération, solaire) à haut ou bas niveau de température.

1.2. Historique des moteurs Stirling.

Au début du XIX^e 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 1.1: 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'obtint 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 XIX^e 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 prérefroidit 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.

1.3. 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))[1].

1.4. Cycle Sterling 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 :

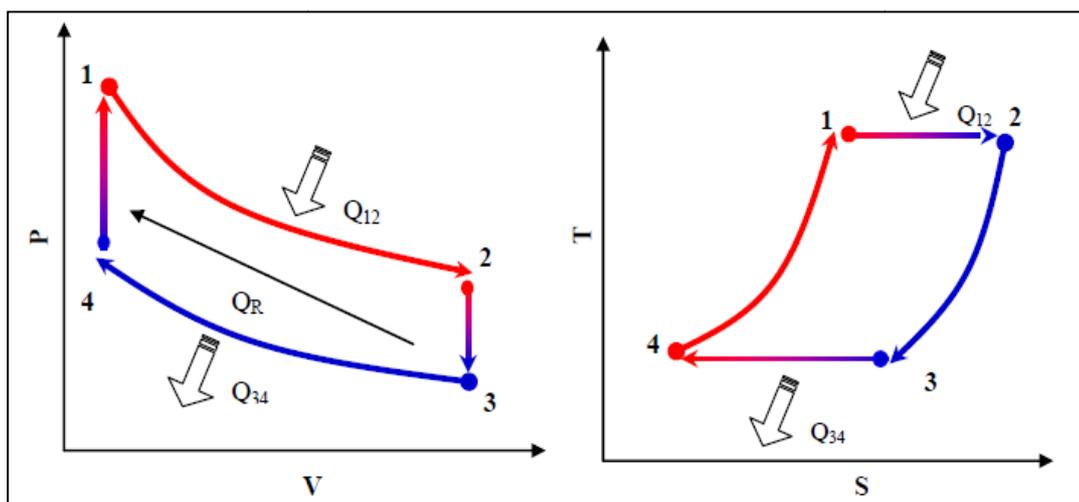


Figure 1.2 : Cycle Stirling théorique : Diagramme PV et Diagramme TS

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 isothermiquement 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.

1.5. Classification des moteurs Stirling selon le mode de fonctionnement

Depuis leur invention, les moteurs Stirling ont subi plusieurs transformations. La figure (1.3) (Lemrani et Stouffs (1994)) [2] présente une schématisation des différentes configurations des moteurs Stirling rencontrées.

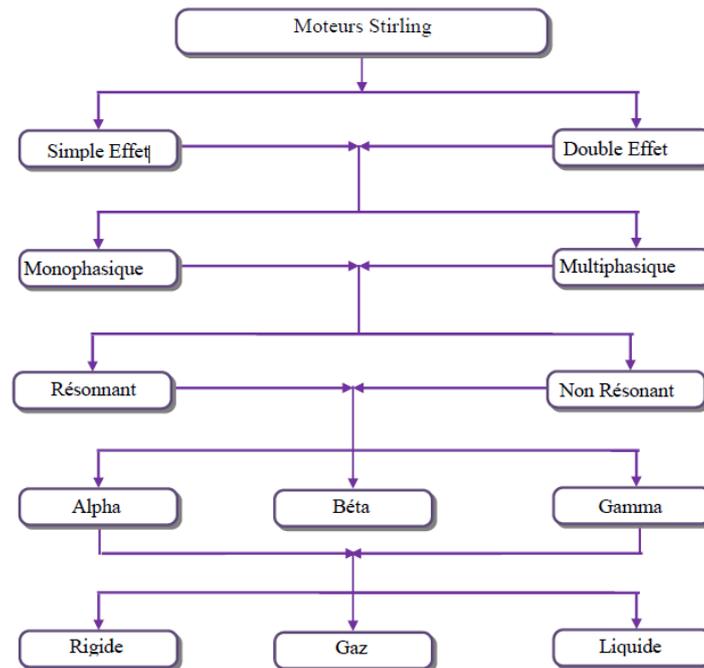


Figure 1. 3 : Classification générale des moteurs Stirling [2]

Trois niveaux de catégorisation sont généralement utilisés:

- ❖ Le mode de fonctionnement,
- ❖ L'agencement des cylindres,
- ❖ Le couplage des pistons.

1.5.1 Simple ou double effet

Une schématisation des moteurs Stirling simple effet et double effet est présentée sur la figure 1.4 (Descombes et Magnet (1997)) [3]. Les moteurs Stirling à simple effet sont constitués d'un piston et d'un déplaceur, qui peuvent être réunis dans un même cylindre ou séparés en deux cylindres distincts. Les espaces de compression et de détente sont en communication à travers un régénérateur.

Les moteurs à double effet sont des moteurs constitués généralement de deux ou plusieurs pistons qui jouent chacun le rôle de déplaceur les uns vis-à-vis des autres. Dans ces moteurs, chaque piston joue le rôle de déplaceur pour le piston à son voisinage. Le grand avantage de ce genre d'arrangement est que le nombre de pistons est divisé par deux ce qui réduit considérablement le coût d'une telle machine.

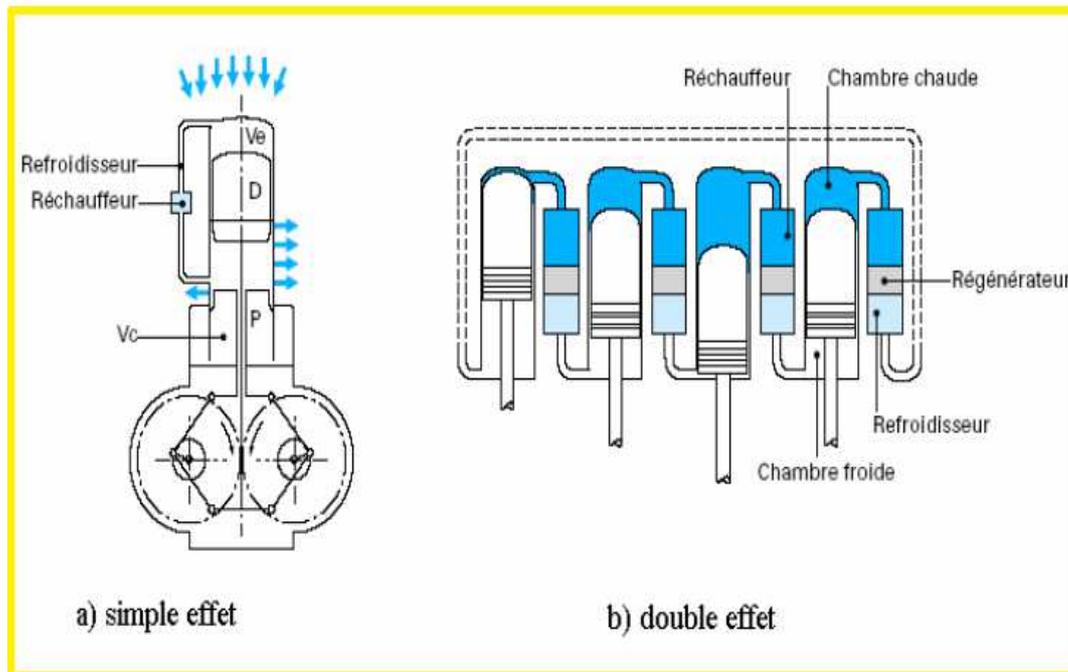


Figure 1.4 : Forme des moteurs Stirling simple et double effet [3]

1.5.2 Mono ou multiphasique

La classification mono ou multiphasique des moteurs Stirling est obtenue selon l'état thermodynamique du fluide, qui peut être diphasique par exemple dans les fluidynes. Le principe de fonctionnement d'une pompe fluidyne repose sur l'oscillation de relaxation d'une colonne liquide dont l'énergie est fournie par une source de chaleur externe, telle que le solaire par exemple (Lanzetta et al, 2004) [4].

1.5.3 Résonnant ou non résonnant

Cette distinction n'est pertinente que pour les moteurs à piston libre et les fluidynes. Le mode de fonctionnement résonnant correspond aux machines dont le déplacementur et le piston se déplacent de façon continue et, dans la plupart des cas, de façon sinusoïdale. Le mode non résonnant ou surexcité ("over driven") correspond à un fonctionnement pour lequel le mouvement du déplacementur et/ou celui du piston sont discontinus.

1.6. 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) [5].

1.6.1. La configuration Alpha

C'est la configuration (figure 1.5) 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.

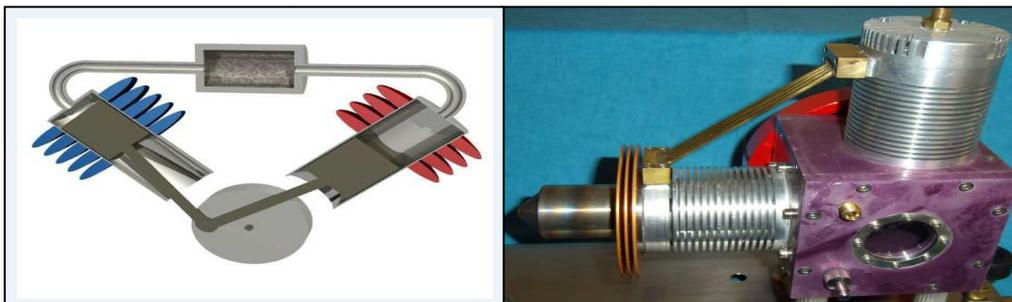


Figure 1.5 : moteur Stirling de configuration alpha (Article de bonnet, S (2005))

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 (voir figure 1.2)

1.6.2. La configuration Bêta

Le moteur bêta (figure 1.6) 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. 6 : Moteur Stirling de configuration beta (Article de Bonnets,S (2005))

1.6.3. La configuration Gamma

C'est la configuration (Figure 1.7) 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 coaxialement 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.

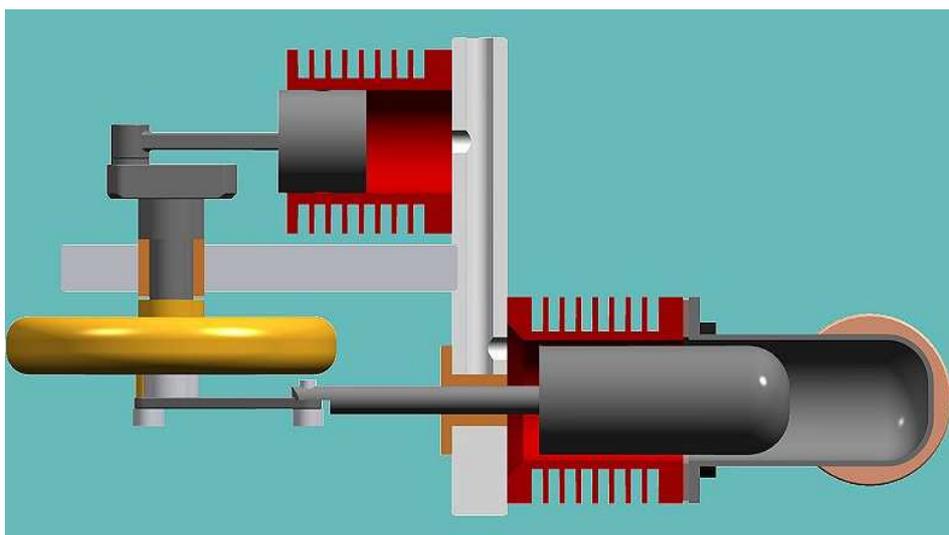


Figure 1.7 : Moteur Stirling de configuration Gamma (Stirling engine plan)

1.7. Application des moteur Stirling

La diversité des configurations de moteurs Stirling a permis d'élargir leurs champs d'applications. Ces dernières s'étalent sur plusieurs domaines dont nous citons :

1.7.1. Conversion de l'énergie solaire en électricité

La technique Stirling solaire est considérée comme la plus efficace des méthodes de conversion de l'énergie solaire en électricité, environ deux fois plus efficace que les autres technologies solaires alternatives (Maier et al. 2007) [6]. Cette technique consiste à concentrer le maximum des rayons solaire grâce à une parabole au centre duquel un récepteur est placé. Ce dernier permet d'augmenter la température d'un fluide de travail qui circule dans un moteur Stirling. Cette installation présente un rendement de conversion solaire-électrique assez élevé et présente un très faible impact sur l'environnement. La parabole Stirling (Dish-Stirling) est composée principalement des éléments suivants : un miroir parabolique, un moteur Stirling avec générateur, un capteur solaire ou récepteur et un système de poursuite du soleil.



Figure 1.8 : La parabole Stirling solaire du projet EuroDish (Nepveu et al. 2006)

1.7.2. Domaine spatial

Les satellites artificiels sont de plus en plus consommateurs d'électricité, le moteur Stirling demeure une solution intéressante grâce à ses bonnes performances énergétiques. Les cellules photovoltaïques, qui constituent son principal concurrent possèdent un rendement de conversion d'énergie inférieur à 10%, et nécessitent l'emploi de très grands panneaux solaires (Abdulla et al. 2005) [8]. Pour cette application, le rendement du moteur Stirling est particulièrement élevé, vu les grandes différences de température disponibles dans l'espace.

La NASA a développé un moteur Stirling connu comme le générateur Stirling à radio-isotope (SRG) (Schmidt et al. 2003) [9] conçu pour produire l'électricité dans l'espace. La source de chaleur est une limace sèche solide du combustible nucléaire et la source froide est l'espace lui-même.

Certains satellites se procurent de l'énergie grâce à un moteur Stirling. Le rendement est particulièrement élevé vu les grandes différences de température disponibles. La source chaude est constituée par des radio-isotopes. L'utilisation de corps radioactifs n'est pas très écologique et présente des risques au moment de l'envol de la fusée. Sa justification vient du fait que des panneaux solaires peuvent se salir ou être détruits dans certaines zones de l'espace, comme à proximité de Mars.



Figure 1. 9 : Photo de la fusée saturn v (Article rédigé par UNIVERS439)

1.7.3. Domaine militaire

Plusieurs sous-marins propulsés par des moteurs Stirling ont été fabriqués. Le fonctionnement silencieux des moteurs Stirling est particulièrement apprécié. De plus, la combustion externe peut être réalisée avec du fuel et de l'oxygène déjà sous pression et les gaz d'échappements peuvent être directement rejetés dans l'eau de mer sans être comprimés au préalable, ce qui augmente l'autonomie en plongée et aussi dans un lieu isolé au manque d'électricité elle peut servir au militaire de passer le message radio

À titre d'exemple, le plus grand sous marin commercial du monde (Sauzade et al. 1991) [10] : le SAGA (Sous-marin d'Assistance à Grande Autonomie). Il a été propulsé par deux moteurs Stirling de puissance 75 kW chacun, il fût mis en service au début des années 60

1.7.4. Domaine de l'informatique

On a vu apparaître, récemment, une utilisation très spécifique du moteur Stirling pour refroidir un micro-processeur d'ordinateur. Il s'agit d'un micromoteur Stirling qui utilise l'énergie thermique dissipée par le micro-processeur. Ce petit moteur entraîne un ventilateur qui dissipe le restant de chaleur évacué par le micro-processeur.



Figure 1.10 : Microprocesseur refroidi par moteur Stirling (MSI employs Stirling Engine)

Il n'y a donc pas besoin d'énergie électrique supplémentaire pour assurer cette fonction de refroidissement contrairement à ce qui se passe sur un ordinateur "usuel". Certains évaluent à 70% la chaleur dissipée de la sorte

1.7.5. Domaine de cogénération

Des systèmes de cogénération sont commercialisés, ils sont composés d'une chaudière classique qui fournit la chaleur aux habitations et un moteur Stirling couplé à cette dernière qui récupère les pertes de chaleur (dans les fumées par exemple) pour les convertir en électricité [11]. Dans le contexte actuel d'économie des énergies, ce genre d'installation pourrait représenter un bon débouché pour le moteur Stirling.



Figure1. 11: Chaudière à bois Sterling (sterling power model)

1.7.6. Domaine du transport : Voiture hybride

Le moteur Stirling est une alternative intéressante à la turbine à gaz pour la production d'électricité dans les voitures hybrides et ceci grâce à son faible niveau de pollution et son excellent rendement. Pour cette application le moteur Stirling est utilisé pour charger continuellement et peu à peu les batteries de véhicules électriques ; ce qui permet d'augmenter leurs autonomies.

Des suédois de la société PRECER ont conçu un véhicule électrique de démonstration « Bioracer » dont les batteries se rechargent à l'aide d'un moteur Stirling. Il s'agit en fait d'une technologie que la société peut décliner dans chacune de ses 5 branches d'activité :

Automobiles, transport routier, équipements mobiles, équipements maritimes et centrales de cogénération domestiques. Le principe de base : un moteur Stirling qui peut être alimenté aux granulés de bois, au bois déchiqueté ou toute autre biomasse solide, dont le mouvement fait fonctionner un alternateur qui génère l'énergie électrique nécessaire aux moteurs de véhicules hybride.

1.7.7. Domaine industriel

La réversibilité du moteur Stirling permet de produire du froid d'une façon industrielle et avec un rendement appréciable. Quatre pistons à double action transfèrent un gaz (hélium ou hydrogène) et récupèrent l'énergie. Leur disposition axiale autorise un faible encombrement et une bonne compacité de l'ensemble. Ce moteur (Figure 1.12) peut délivrer 30 kW et a une durée de vie sans entretien de 60000 heures (7 ans sans interruption). La vitesse de rotation en sortie est de 1800 tr/mn et le rendement atteint 40% [12].

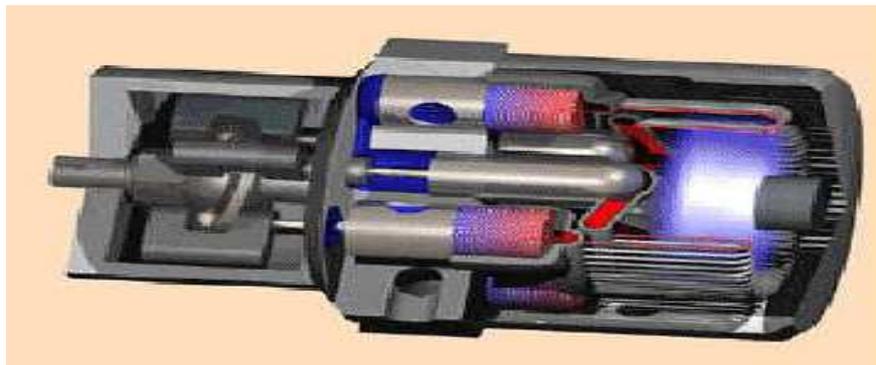


Figure 1. 12: Moteur Stirling type STM 4-120 (boucher, 2002)

1.8. Paramètres d'optimisation d'un moteur Stirling

Vu la complexité de la conception des moteurs Stirling et des phénomènes thermo-physiques qui régissent ce genre de moteur, ce dernier est très sensible à la variation de tous les paramètres qui le touchent de près ou de loin. Ainsi, pour aboutir à un fonctionnement optimisé de ce type de moteur, la connaissance et la maîtrise de tous ses paramètres est primordiale. Les principaux paramètres qui influencent les moteurs Stirling seront présentés. Ces paramètres seront classés selon quatre groupes : le fluide de travail, les paramètres géométriques, les paramètres de fonctionnement et les paramètres du régénérateur.

1.8.1. Fluide de travail

Walker (1980) [13] a montré que la chaleur transférée par le fluide de travail vers l'espace de compression et de détente dépend de la nature du fluide de travail dans un moteur Stirling. Les caractéristiques des différents fluides de travail utilisés dans le moteur Stirling (hydrogène, hélium, air, dioxyde de carbone) ont été données par Meijer (1987) [14].

Tableau1. 1. Chaleur transférée par certains fluides de travail

Fluide de travail	Cp (J/kg.k)	Cv(J/kg.k)	Chaleur échangée (kJ/kg)	γ
Hydrogène	14300	10140	104	1,61
Hélium	5250	3160	44	1,66
Vapeur d'eau	1850	1410	44	1,32
Dioxyde de carbone	839	650	31	1,30
Air	1005	710	29	1,9

L'hydrogène assure la plus grande quantité de chaleur échangée et l'air assure la plus petite quantité de chaleur échangée. L'hydrogène présente des risques d'inflammations. La vapeur d'eau est utilisée uniquement pour les petites pressions. L'hélium est donc plus avantageux par rapport au autres gaz. Les performances peuvent être améliorées en utilisant un fluide de travail de conductivité thermique élevée, tel que l'hélium ou l'hydrogène (Cinar et al, 2005(1)) [15].

1.8.2 Taux de compression

Le rapport géométrique de compression est défini par le rapport du volume de compression V_{com} par le volume d'expansion V_{det} ,

$$\tau_{com} = \frac{V_{com}}{V_{det}} \quad (eq. 1.1)$$

La puissance adimensionnelle est définie par le rapport du travail (w) produit par la Pression maximale (P_{max}) et le volume total balayé :

Walker (1980) a montre que la puissance adimensionnelle du moteur Stirling dépend du de compression. Pour un rapport de température $\frac{T_{com}}{T_{det}}$ de l'ordre de 0,2, la puissance adimensionnelle est maximale pour $\tau = 0,75$. Pour un rapport de température de 0,5, la

puissance adimensionnelle est maximale pour $\tau = 1$. Ce qui justifie que La valeur optimale du taux de compression varie avec la température.

1.8.3 Déphasage entre le mouvement des pistons

Le piston de déplacement et le piston moteur sont liés par un mécanisme de transformation de mouvement, l'angle de déphasage entre ces pistons n'est pas arbitraire (Iwamoto et al., 1997 et Walker, 1980) [16]. Pour un rapport de température entre 0,35 et 0,5, la puissance adimensionnelle est maximale pour un angle de déphasage compris entre 90° et 115° .

1.8.4 Nature du mouvement des pistons

Les prototypes de moteur Stirling proposés, ont des mouvements sinusoïdaux des pistons qui sont différents du mouvement théorique discontinu. Kolín (1991(1)) [17] a montré que dans le cas d'un mouvement sinusoïdal du piston déplaceur, la surface du cycle est plus petite que celle prévue dans la théorie. La surface du cycle peut être augmentée par l'utilisation de mouvement discontinu des pistons. En effet pour ce type de mouvement, le fluide de travail séjourne plus de temps dans les échangeurs de chaleur, ce qui se traduit par une amélioration des échanges de chaleur et des performances du moteur (Tlili, 2010) [18]. Plusieurs systèmes de transmission de mouvement sont montés sur les moteurs Stirling citant : mécanisme à bielle manivelle, mécanisme bielle manivelle crémaillère et le mécanisme à came à profil extérieur (Timoumi et al., 2000) [19]. Kolin (1991(1), 1991(2)) [20] a montré qu'il est possible d'augmenter la surface réelle du cycle en choisissant le mécanisme d'entraînement adéquat.

1.8.5 Volume mort dans le moteur

Le volume mort dans un moteur Stirling est représenté par le volume qui n'est pas balayé par les pistons : espace mort des deux cylindres de travail et les volumes des échangeurs de chaleur.

. Schmidt a défini un facteur F_s (facteur de Schmidt) qui représente le rapport de la surface réelle par la surface théorique du cycle de Stirling (V_0).

$$F_s = 74 - 0.68V_0 \quad (eq. 1.2)$$

Cette formule montre que pour $V_0 = 0$, le facteur de Schmidt reste égale à 74% [18] ont étudié l'influence du volume mort sur la puissance d'un moteur Stirling Yoke Ross pour une fréquence de 75 Hz. Ils ont conclu que l'augmentation du volume mort entraîne une chute exponentielle de la puissance d'un moteur Stirling (Figure 1.14)

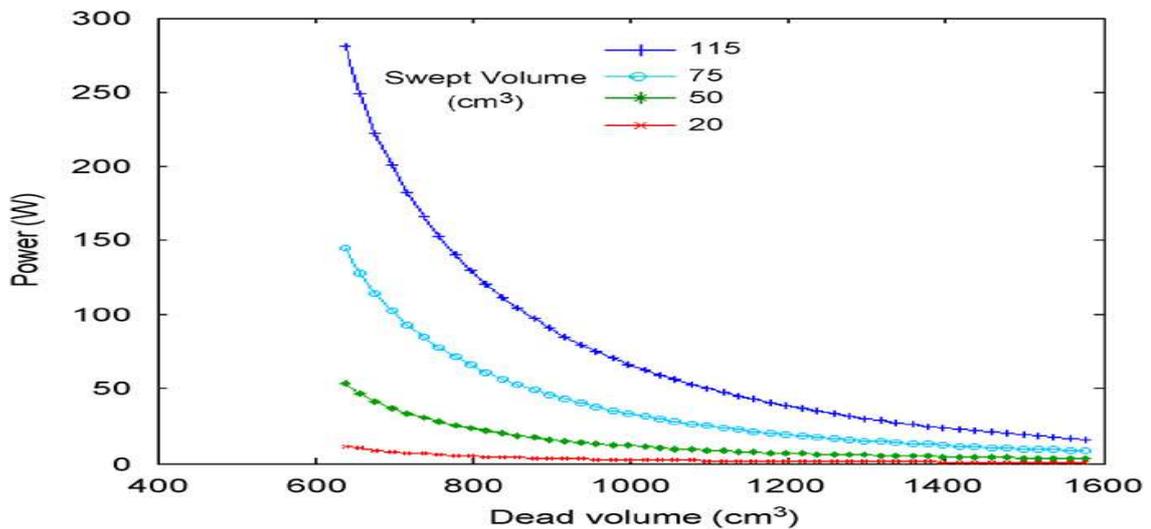


Figure 1.13 : Relation entre le volume mort et la puissance de moteur Stirling [18]

1.8.6 Géométrie du réchauffeur et du refroidisseur

Les moteurs Stirling Gamma et Alpha sont généralement composés de deux cylindres et les processus de réchauffement et de refroidissement sont effectués à travers les parois de ces cylindres. Pour augmenter la surface d'échange avec le fluide de travail. El-hwany et al. (2011) [21] ont proposé une nouvelle conception du refroidisseur et du réchauffeur.

Leurs conceptions sont formées par un grand nombre de tube en parallèle sans déviation ni coude. Ces nouvelles conceptions leurs ont permis d'augmenter la puissance.

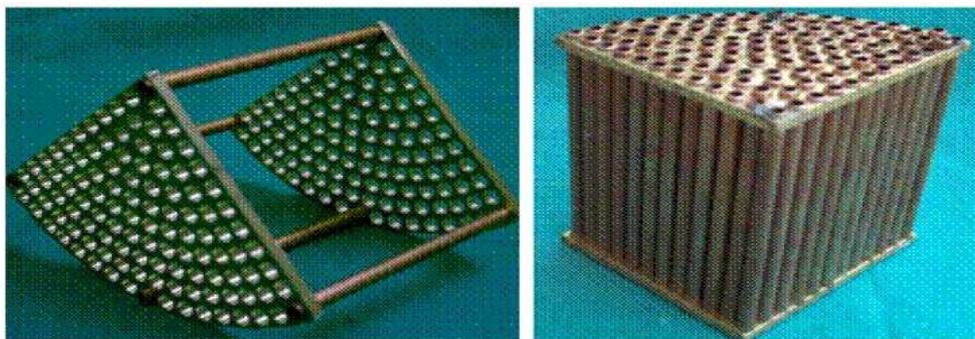


Figure 1.14 : Nouvelle conception de l'échangeur de chaleur (124 tubes) [21]

1.9. Paramètres de fonctionnement du moteur

Les paramètres de fonctionnement d'un moteur Stirling sont définis comme les paramètres qui sont fixés avant ou lors du fonctionnement du moteur. Seuls les trois paramètres pertinents seront étudiés dans cette partie et qui sont : températures des sources de chaleur, vitesse de rotation du moteur et pression initiale de charge.

1.9.1. Températures des sources de chaleur

Les expériences de Walker (1980) [13] montrent que la puissance adimensionnelle du moteur Stirling (Eq. 1-2) dépend de la température de détente. La puissance adimensionnelle croît progressivement pour des valeurs de température de l'espace de détente de plus en plus grande.

La puissance et le couple du moteur augmentent avec la température de la source chaude. L'augmentation du gradient de température entre les deux sources de chaleur provoque l'augmentation de l'écart de température entre les deux extrémités du déplaceur, ce qui conduit à l'augmentation de la perte par effet Navette.

1.9.2 Vitesse de rotation

Les essais expérimentaux effectués par Cinar et al. (2005(1)) [15] montrent que pour une vitesse de rotation entre 120 et 190 tr/mn, la puissance est maximale pour une valeur de l'ordre de 150 tr/mn et ceci pour une température de chauffage de 800 °C. En effet, plus la vitesse de rotation du moteur augmente, plus sa puissance n'est importante. Pour les moteurs Stirling à grande différence de température, Iwamoto et Hirata (1997) [16] ont montré que la puissance augmente continuellement en fonction de la vitesse de rotation sans atteindre un maximum. Ils ont aussi montré que pour des moteurs Stirling à haute et basse température la puissance atteint son maximum pour une vitesse de rotation de 143tr/mn.

1.9.3 Pression initiale de charge

L'augmentation de la pression initiale de charge dans un moteur Stirling induit un premier temps l'augmentation de la pression de compression et de détente et par conséquent l'augmentation du travail produit par le moteur Stirling. Certes, l'augmentation de la pression de charge initiale augmente les performances, mais elle augmente aussi la chute de pression à travers les singularités et le régénérateur du moteur.

1.10. Conclusion

Nous avons donné un aperçu sur le moteur Stirling dans cette première partie. Il est à noter que les technologies Stirling sont une solution prometteuse pour faire face aux problèmes d'énergies fossiles. Ces moteurs ont l'aptitude d'utiliser une multitude de sources de chaleur (énergie solaire, biomasse, etc.).

Chapitre II

Chapitre 2 : Etude thermodynamique des moteur Stirling

2.1 Introduction

Le premier modèle mathématique modélisant un moteur Stirling a été développé cinquante ans après l'invention du moteur lui même. La principale hypothèse de ce modèle est que le réchauffeur et l'espace de détente sont à la même température qui est celle de la source chaude, et le refroidisseur ainsi que l'espace de compression sont également à la même température.

Le deuxième modèle est le modèle adiabatique qui a été développée par Finkelstein (1961) [22]. Dans ce modèle, les espaces sont supposés adiabatiques, et la notion des températures conditionnelles causées entre les différents espaces de travail est introduite.

Le troisième modèle, est le modèle quasi-stationnaire. La différence majeur entre ce modèle et le modèle adiabatique est que la température du gaz n'est ni égale à la température des parois de l'échangeur associé, ni constante durant un cycle. Les échangeurs sont aussi considérés non idéaux.

Dans notre travail, nous avons adoptés le modèle adiabatique (analyse découplée sans pertes) et le modèle quasi-stationnaire (analyse découplée avec pertes) initialement développé par Urieli et Berchowitz (1984) [23].

<<Dans ces modèles thermodynamiques, l'hypothèse d'un gaz parfait a été remplacée par celle d'un gaz réel obéissant à l'équation d'état de van der Waal. >>

2.2. Modèle adiabatique avec l'hypothèse simplificatrice d'un gaz réel

Le moteur Stirling est divisé en cinq compartiments élémentaires connectés en séries (Fig. 2.1). Plusieurs hypothèses sont considérées pour simplifier la mise en équation de ce moteur .

Le fluide de travail dans le moteur Stirling est supposé réel et obéissant à l'équation d'état de Van der Waals :

$$\left[P + \frac{n^2 a}{V^2} \right] (V - nb) = nRT \quad (\text{eq. 2.1})$$

- ❖ Le gaz dans le refroidisseur et dans le réchauffeur est maintenu à des températures constantes respectivement T_h et T_k .
- ❖ La température dans le régénérateur varie linéairement.
 - ❖ L'interface régénérateur/refroidisseur est maintenue à la température du refroidisseur T_k et l'interface régénérateur/réchauffeur est maintenue à la température du réchauffeur T_h . Les températures T_c du cylindre de compression et T_e du cylindre de détente varient au cours d'un cycle.
- ❖ Les températures T_c du cylindre de compression et T_e du cylindre de détente varient au cours d'un cycle.
- ❖ Les échangeurs de chaleur sont supposés parfaits.

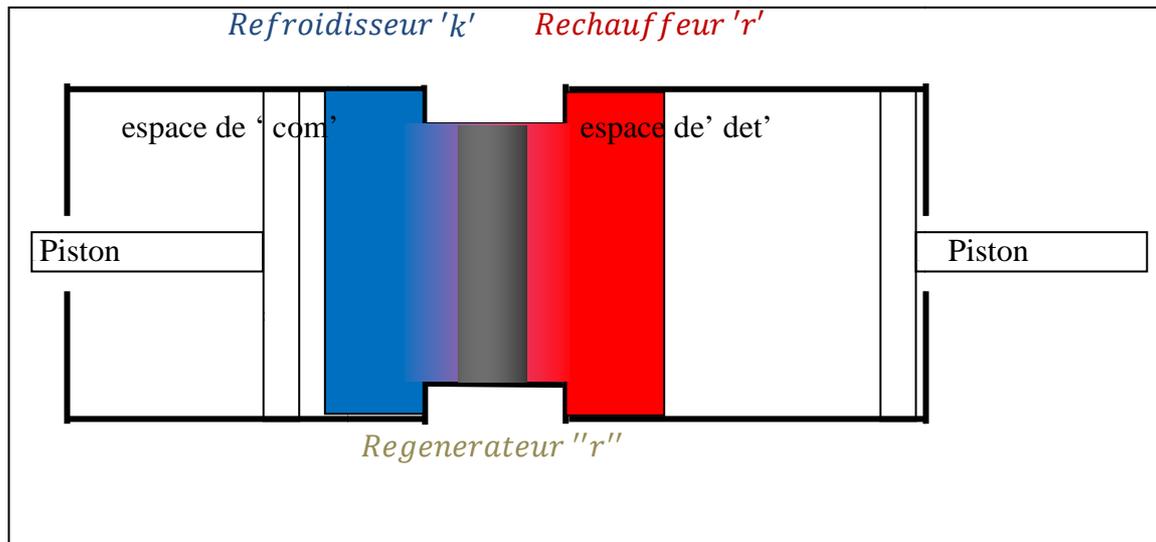


Figure 2.1 Schématisation des différents compartiments du moteur Stirling

Dans le modèle adiabatique, quatre interfaces entre les compartiments à travers lesquelles l'enthalpie est transportée par le flux de masse f_m sont considérées. La direction positive de l'écoulement est arbitrairement définie de l'espace de compression vers l'espace de détente.

Le transfert de chaleur avec le milieu extérieur se déroule respectivement à la température T_h et la température T_k au niveau des sources chaude et froide.

Le travail est effectué en vertu de la variation des volumes dans les espaces de travail V_{det} et V_{com} , et les quantités de chaleur Q_{det} et Q_{com} sont transférées à partir de l'environnement externe au fluide de travail dans les cellules du refroidisseur et du réchauffeur, respectivement. Le régénérateur est extérieurement adiabatique, la chaleur étant transférée intérieurement à partir de la matrice solide au fluide traversant le volume libre du régénérateur pendant un demi cycle, et du fluide vers la matrice pendant le deuxième demi cycle (Stouffs, 2000) [24].

2.2.1 Détermination des capacités calorifiques pour un gaz réel

Le gaz à l'intérieur du moteur Stirling est supposé réel et obéissant à l'équation de Van Der Waal :

$$\left[P + \frac{n^2}{V^2} \right] (V - nb) = nRT = m \frac{R}{M} T = mrT \quad (eq. 2.2)$$

Les termes a et b représentent respectivement les termes de corrections de pression et de volume (covolume) dans les proportions suivantes : 21 % d'oxygène et 79% de dioxyde d'azote comme nous montre le tableau 2.1 les coefficients a et b de l'air selon Weast (1980) [25],

Tableau 2.1. Coefficients a et b pour O₂, N₂ et l'air selon Weast (1980)

	a [l ² .atm/mol ²]	b [l/mole]	a [m ⁶ .Pa/mol ²]	b [m ³ /mole]
O ₂	1,36	0,03183	0,137768	0,0032243
N ₂	1,39	0,03913	0,140807	0,0039638
air	1,3565	0,03696	0,137413	3,70E-05

Pour un gaz réel, l'expression des capacités calorifiques à pression constante et à volume constant s'écrivent comme suit :

$$C_p - C_v = \frac{\bar{C}_p - \bar{C}_v}{M} = \frac{T}{M} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (eq. 2.3)$$

Avec :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{\bar{C}_p}{\bar{C}_v} \quad (eq. 2.4)$$

Où γ est le rapport des capacités calorifiques à pression et volume constants de l'air (Coefficient adiabatique).

En dérivant l'équation (2-2) par rapport à la pression et à la température, nous obtenons les équations suivantes :

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v = \frac{mr}{\left(V - \frac{m}{M} \right)} b \quad (eq. 2.5)$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{mr}{P - \frac{m^2 a}{M^2 V^2} + \frac{2m^3 ab}{M^3 V^3}} \quad (eq. 2.6)$$

On combine les 4 équations précédentes pour la détermination de l'expression des capacités calorifiques à pression constante et à volume constant pour un gaz réel obéissant à l'équation de van der Waal

$$\bar{C}_p = \frac{r\gamma}{(\gamma - 1)} \frac{P + \frac{m^2}{M^2}}{P - \frac{m^2 a}{M^2 V^2} + \frac{2m^3 ab}{M^3 V^3}} \quad (eq. 2.7)$$

$$\bar{C}_v = \frac{r}{(\gamma - 1)} \frac{P + \frac{m^2}{M^2}}{P - \frac{m^2 a}{M^2 V^2} + \frac{2m^3 ab}{M^3 V^3}} \quad (eq. 2.8)$$

2.3. L'évolution de la masse et de la pression dans un moteur Stirling

2.3.1. Évolution de masse dans les échangeurs de chaleur

En prenant le logarithme des deux membres de l'équation (2-2) et en différenciant, on trouve :

$$dm \left[\frac{1}{m} + \frac{b}{MV - mb} - \frac{2ma}{M^2V^2 \left(P + \frac{m^2}{M^2V^2} \right)} \right] + \frac{dT}{T} = dP \left[\frac{M^2V^2}{PM^2V^2 + m^2a} \right] \quad (eq. 2.9)$$

$$+ dV \left[\frac{M}{MV - mb} - \frac{2m^2a}{PM^2V^3 + M^2Va} \right]$$

Le bilan de masse appliqué aux échangeurs de chaleur et aux deux espaces de travail d'un moteur Stirling s'écrit comme suit :

$$m = \sum_{i=1}^n m_i + \sum_{j=1}^n m_j \quad (eq. 2.10)$$

Où $i = \{h, k, r\}$ et $j = \{com, det\}$

La masse totale du gaz dans le moteur est constante : $dm = 0$

D'où :

$$dm = \sum_{i=1}^n m_i + \sum_{j=1}^{n-1} m_j = 0 \quad (eq. 2.11)$$

Pour déterminer la variation de la masse dm_i dans les échangeurs de chaleur, nous allons supposer que les températures et les volumes de ces derniers sont constants.

$$dV_i = 0 \quad (eq. 2.12)$$

$$dT_i = 0 \quad (eq. 2.13)$$

En réécrivant l'équation (2-11), et en prenant en considération les deux équations (2-12) et (2-13), la variation de la masse dans les échangeurs de chaleur d'un moteur Stirling s'écrit comme suit :

$$\sum_{i=1}^n dm_i = \frac{dP \sum_{i=1}^n \left[\frac{M^2 V_i^2}{PM^2 V_i^2 + m_i^2 a} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{m_i} + \frac{b}{MV_i - m_i b} - \frac{2m_i a}{M^2 V_i^2 P + m_i^2 a} \right]} \quad (eq. 2.14)$$

L'équation (2-14) peut être écrite d'une façon simplifiée sous la forme :

$$\sum_{i=1}^n dm_i = \frac{dP \sum_{i=1}^n D_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (eq. 2.15)$$

$$avec : \begin{cases} D_i = \left(\frac{M^2 V_i^2}{PM^2 V_i^2 + m_i^2 a} \right) \\ E_i = \left(\frac{1}{M_i} + \frac{b}{mV_i - m_i b} - \frac{2ma}{M^2 V_i^2 P + m_i^2 a} \right) \end{cases} \quad (eq. 2.16)$$

2.3.2. Évolution de la masse dans les espaces de travail

Pour un système ouvert avec transvasement, le premier principe de la thermodynamique s'exprime de la manière suivante :

$$\delta Q + \bar{C}_P (T_e f m_e - T_s f m_s) = \delta W + \bar{C}_V d(mT) + \frac{m_c^2 a dV_{com}}{M^2 V_{com}^2} \quad (eq. 2.17)$$

Les moteurs Stirling modernes fonctionnent à des vitesses de rotation relativement élevées. Cela a pour conséquence de rendre négligeable la quantité de chaleur transférée par cycle à travers les parois des cylindres par rapport à celle transférée au niveau des échangeurs de chaleur. Étant donné que l'espace de compression est adiabatique, nous aurons alors :

$$\delta Q_m = 0 \quad (eq. 2.18)$$

Le travail produit par l'espace de compression est en fonction de la pression et de la variation de volume. Par définition, celui-ci s'écrit :

$$\delta W_{com} = -PdV_{com} \quad (eq. 2.19)$$

Ainsi, l'équation (2-16) appliquée à l'espace de compression s'écrit sous la forme :

$$\delta Q_{com} - \bar{C}_P T_{comk} u A_{comk} = \delta W_{com} + \bar{C}_V d(m_{com} T_{com}) + \frac{m_{com}^2 a dV_{com}}{M^2 V_{com}^2} \quad (eq. 2.20)$$

En se basant sur le bilan de masse, le débit massique dans l'espace de compression s'écrit :

$$dm_{com} = -f m_{comk} \quad (eq. 2.21)$$

D'où l'équation (2-16) devient :

$$\bar{C}_P T_{comk} dm_{com} = PdV_{com} + \bar{C}_V d(m_{com} T_{com}) + \frac{m_{com}^2 a dV_{com}}{M^2 V_{com}^2} \quad (eq. 2.22)$$

En prenant en considération l'équation (2-2), et en dérivant la relation ainsi obtenue, la variation de la masse dans l'espace de compression peut s'écrire de la façon suivante :

$$dm_{com} = \frac{dP \left(\frac{\bar{C}_V V_{com}}{r} - \frac{\bar{C}_V m_{com} b}{Mr} \right) + dV_{com} \left(P + \frac{\bar{C}_V P}{r} + \frac{2\bar{C}_V a b m_{com}^3}{M^3 V_{com}^3 r} + \frac{a m_{com}^3}{M^2 V_{com}^2} \left(1 - \frac{\bar{C}_V}{r} \right) \right)}{\bar{C}_P T_{comk} + \frac{\bar{C}_V P b}{rM} - \frac{2\bar{C}_V a m_{com}}{M^2 V_{com} r} + \frac{3\bar{C}_V a b m_{com}^2}{M^3 V_{com}^2 r}} \quad (eq. 2.23)$$

La variation de la masse dans l'espace de détente est aussi déterminée de la même manière précédente (équation 2.22) :

$$dm_{det} = \frac{dP \left(\frac{\bar{C}_V V_{det}}{r} - \frac{\bar{C}_V m_{det} b}{Mr} \right) + dV_{det} \left(P + \frac{\bar{C}_V P}{r} + \frac{2\bar{C}_V a b m_{det}^3}{M^3 V_{det}^3 r} + \frac{a m_{det}^3}{M^2 V_{det}^2} \left(1 - \frac{\bar{C}_V}{r} \right) \right)}{\bar{C}_P T_{detk} + \frac{\bar{C}_V P b}{rM} - \frac{2\bar{C}_V a m_{det}}{M^2 V_{det} r} + \frac{3\bar{C}_V a b m_{det}^2}{M^3 V_{det}^2 r}} \quad (eq. 2.24)$$

En utilisant les équations (2-22) et (2-23), nous obtenons :

$$\sum_{j=1}^n dm_j = dm_{com} + dm_{det} \quad (eq. 2.25)$$

$$= \frac{dP \sum_{j=1}^n \left(\frac{\bar{C}_V V_i}{r} - \frac{\bar{C}_V m_i b}{Mr} \right) + dV_i \sum_{j=1}^n \left(P + \frac{\bar{C}_V P}{r} + \frac{2\bar{C}_V abm^3_i}{M^3 V^3_i r} + \frac{am^3_i}{M^2 V^2_i} \left(1 - \frac{\bar{C}_V}{r} \right) \right)}{\sum_{j=1}^n \left(\bar{C}_P T_z + \frac{\bar{C}_V P b}{rM} - \frac{2\bar{C}_V am_i}{M^2 V_i r} + \frac{3\bar{C}_V abm^2_i}{M^3 V^3_i r} \right)}$$

$$avec : \begin{cases} z = ck & si j = 1 \\ z = eh & si j = 2 \end{cases}$$

D'une façon simplifiée, l'équation précédente s'écrit ainsi :

$$\sum_{j=1}^n dm_j = \frac{dP \sum_{j=1}^n F_j + dV_i \sum_{j=1}^n H_j}{\sum_{j=1}^n L_j} \quad (eq. 2.26)$$

$$avec : \begin{cases} F_j = \left\{ \left(\frac{\bar{C}_V V_i}{r} - \frac{\bar{C}_V m_i b}{Mr} \right) \right\} \\ H_j = \left\{ \left(P + \frac{\bar{C}_V P}{r} + \frac{2\bar{C}_V abm^3_i}{M^3 V^3_i r} + \frac{am^3_i}{M^2 V^2_i} \left(1 - \frac{\bar{C}_V}{r} \right) \right) \right\} \\ L_j = \left\{ \left(\bar{C}_P T_z + \frac{\bar{C}_V P b}{rM} - \frac{2\bar{C}_V am_i}{M^2 V_i r} + \frac{3\bar{C}_V abm^2_i}{M^3 V^3_i r} \right) \right\} \end{cases}$$

2.3.3. Évolution de la pression dans un moteur Stirling

Le calcul de la pression nécessite la connaissance des volumes, des températures ainsi que les masses du fluide de travail dans les différents compartiments du moteur Stirling. Le point de départ de l'analyse est que la masse totale du gaz dans le moteur reste constante.

Ainsi, en remplaçant les équations (2-15) et (2-25) dans l'équation (2-12) :

$$dm = \sum_{j=1}^n dm_i + \sum_{j=1}^{n-1} dm_j = \frac{dP \sum_{j=1}^n D_i}{\sum_{i=1}^n E_i} + \frac{dP \sum_{j=1}^n F_j + dV_i \sum_{i=1}^n H_j}{\sum_{j=1}^n L_j} \quad (\text{eq. 2.27})$$

$$\text{ou: } \begin{cases} D_i = \left(\frac{M^2 V_i^2}{PM^2 V_i^2 + m_i^2 a} \right) \\ E_i = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{b}{m V_i - m_i b} - \frac{2ma}{M^2 V_i^2 P + m_i^2 a} \right) \end{cases}$$

En arrangeant l'équation (2-26), nous pouvons déduire l'équation de variation de la pression dans un moteur Stirling en considérant que son fluide de travail est un gaz réel :

$$dP = \frac{-dV_i \sum_{j=1}^{n-1} \frac{H_j}{L_j}}{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{F_j}{L_j} + \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{E_i}} \quad (\text{eq. 2.28})$$

2.4. Évolution du débit massique aux différentes interfaces d'un moteur Stirling

La connaissance des débits massiques dans chacun des sept espaces élémentaires définis précédemment est nécessaire, entre autre, pour calculer les transferts de chaleurs dans les échangeurs de chaleur d'un moteur Stirling.

En ce qui concerne les espaces de compression et de détente, nous pouvons approximer le débit massique à la variation instantanée de la masse contenue dans ces volumes. En effet, ces deux volumes ne communiquent avec les autres espaces du moteur que d'un seul côté. Pour les autres compartiments du moteur, le fluide de travail peut entrer ou sortir de deux côtés différents.

De plus, le fluide de travail peut pénétrer dans un compartiment, ou en sortir, des deux côtés à la fois. Il suffit pour cela d'examiner les mouvements mécaniquement imposés des pistons, et de se rendre compte que le déphasage entre eux implique la situation particulière que nous venons de décrire.

Pour calculer ces différents débits, la méthode proposée par Martini (Lamrani, 1994) est adoptée. Elle consiste à calculer, dans un premier temps, le débit à l'interface entre chacun des volumes de contrôle.

Soient $\frac{dm_{i,i+1}}{dt}$ le débit de la i^{eme} interface et $m_{i,i+1}$ la masse contenue dans le volume compris entre l'interface i et l'interface $i+1$. L'équation du bilan massique est donnée par (Ercan Ataer et al. 2004)

$$\dot{m}_{i+1} = \dot{m}_i - \frac{d(m_{i,i+1})}{dt} \quad (eq. 2.29)$$

En considérant la convention de signe que nous avons choisie pour le débit positif lorsque le fluide s'écoule du cylindre de compression vers celui de détente.

Appliquons maintenant cette équation pour chacune des quatre interfaces :

❖ l'interface entre l'espace de compression et le refroidisseur :

$$\dot{m}_{comk} = -d(m_{com}) \quad (eq. 2.30)$$

❖ l'interface entre le refroidisseur et le régénérateur (élément1) :

$$\dot{m}_{kr} = \dot{m}_{ck} + d(m_k) \quad (eq. 2.31)$$

❖ l'interface entre le régénérateur (section 2) et le réchauffeur :

$$\dot{m}_{rh} = \dot{m}_{he} + d(m_h) \quad (eq. 2.32)$$

❖ l'interface entre le réchauffeur et l'espace d'expansion

$$m_{he} = (dm_e) \quad (eq. 2.33)$$

2.5. Évolution des flux de chaleur et des températures dans les différents compartiments

Après réarrangement, l'équation (2-16) peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} \delta Q + C_p T_e f m_e + C_p T_s f m_s \\ = V_c DP + V_e DP + C_V \left(\frac{PdV + VdP - \frac{am^2 dV}{M^2 V^2} + \frac{2am^3 b}{M^3 V^3}}{r} \right) \end{aligned} \quad (eq. 2.34)$$

Les volumes des échangeurs de chaleur sont constants alors qu'aucun travail n'est produit. En appliquant l'équation précédente aux trois échangeurs de chaleur du moteur Stirling, nous obtenons :

$$\delta Q_k = -C_p (T_{ck} f m_{ck} + T_{kr} f m_{kr}) + \frac{C_V}{r} \left(\frac{2abm_k^3}{M^2 V_k^3} + V_k dP \right) \quad (eq. 2.35)$$

$$\delta Q_k = -C_p (T_{kr} f m_{kr} + T_{rh} f m_{rh}) + \frac{C_V}{r} \left(\frac{2abm_k^3}{M^2 V_k^3} + V_r dP \right) \quad (eq. 2.36)$$

$$\delta Q_h = -C_p (T_{rh} f m_{rh} + T_{he} f m_{he}) + \frac{C_V}{r} \left(\frac{2abm_h^3}{M^2 V_h^3} + V_h dP \right) \quad (eq. 2.37)$$

Nous supposons que les températures aux interfaces refroidisseur-régénérateur et régénérateur-réchauffeur sont respectivement égales aux températures du refroidisseur et du réchauffeur :

$$T_{kr} = T_k \quad (eq. 2.38)$$

$$T_{hr} = T_h \quad (eq. 2.39)$$

Les températures dans l'espace de compression et celui de détente (T_c et T_e) ne sont pas constantes, mais changent sur le cycle suivant les transformations qui se produisent dans les deux espaces de travail. Ainsi, les enthalpies s'écoulant à travers les interfaces (ck et he) portent les températures ascendantes adjacentes des éléments respectifs. Par conséquent, les températures qui dépendent de la direction de l'écoulement, sont définies algorithmiquement comme suit :

$$si uA_{ck} > 0 \text{ alors } T_{ck} \rightarrow T_c \text{ sinon } T_{ck} \rightarrow T_k \quad (eq. 2.40)$$

$$si uA_{he} > 0 \text{ alors } T_{he} \rightarrow T_h \text{ sinon } T_{he} \rightarrow T_e \quad (eq. 2.41)$$

2.6. Modèle quasi-stationnaire pour un gaz réel

2.6.1. Hypothèse adoptées

Le modèle "Quasi-stationnaire" se base sur l'analyse proposée par Urieli et Berchowitz (1984) [23]. Pour ce modèle, nous avons adopté aussi certaines hypothèses simplificatrices :

- ❖ Le fluide de travail dans le moteur Stirling est supposé réel et obéissant à l'équation d'état de Van Der Waals (Eq. 2-1).
- ❖ La température des parois du réchauffeur et du refroidisseur sont maintenues constantes, et sont nommées respectivement T_{Wh} et T_{Wk}
- ❖ Nous considérerons que la température du gaz dans les échangeurs n'est pas exactement égale à celle des parois de l'échangeur considéré.
- ❖ La température du gaz dans les échangeurs peut varier, et n'est donc pas connue comme celle des interfaces.
- ❖ La température du gaz dans le réchauffeur et dans le refroidisseur est représentée par sa moyenne T_h et T_k

- ❖ Dans ce modèle, le régénérateur est constitué de deux sections. Le gradient de température est considéré linéaire dans le régénérateur. Si nous appelons T_{r_1} et T_{r_2} les températures moyennes du fluide dans chacun des deux éléments, et $T_{intr_1r_2}$ la température à l'interface entre ces deux éléments, l'hypothèse de linéarité de température conduit à écrire les relations suivantes :

$$T_{kr} = \frac{3T_{r_1} - T_{r_2}}{2} \quad (\text{eq. 2.42})$$

$$T_{rh} = \frac{3T_{r_2} - T_{r_1}}{2} \quad (\text{eq. 2.43})$$

La température à l'interface des deux sous-volumes r_1 et r_2 vaut :

$$T_{intr_1r_2} = \frac{T_{r_1} + T_{r_2}}{2} \quad (\text{eq. 2.44})$$

2.6.2. Variation de la température des parois du régénérateur

Nous supposons que les températures des parois du refroidisseur et du réchauffeur sont constantes. En revanche, la température de paroi du régénérateur varie et dépend de l'énergie échangée. La vitesse de variation de cette température dépend de la capacité calorifique du régénérateur :

$$dT_{Wr_1} = \frac{dQ_{r_1}}{cmr} \quad (\text{eq. 2.45})$$

$$dT_{Wr_2} = \frac{dQ_{r_2}}{cmr} \quad (\text{eq. 2.46})$$

Où cmr est la capacité calorifique de chaque compartiment du régénérateur.

2.6.3 Variations des flux de chaleur dans les différents compartiments du moteur

Le modèle quasi-stationnaire prend en considération les forces de frottement qui font augmenter les pertes de charge. La distribution de la pression résultante est représentée dans la Figure 5. Ces pertes de charge font réduire le travail produit. Dans notre modèle quasi-stationnaire, la force de frottement doit être égale à l'opposé de la force de pression, et nous n'avons aucune accélération du gaz moteur ; ce qui donne :

$$F_{fro} + \Delta PA = 0 \quad (eq.2.47)$$

Où F_{fro} est la force de frottement, ΔP est la perte de charge et A est la surface libre du compartiment étudié.

La dissipation visqueuse $diss$ représente la génération interne de la chaleur lorsque le gaz est forcé à s'écouler en subissant un frottement :

$$diss = F_{fro} \cdot U \quad (eq.2.48)$$

Où U est la vitesse de l'écoulement du gaz.

En écrivant U en fonction de la densité du flux massique u et la densité ρ , et en substituant l'équation (2.35) dans (2.54), on obtient :

$$diss = \frac{\Delta P u A}{\rho} \quad (eq.2.49)$$

En prenant en considération les flux de dissipation d'énergie dans le moteur Stirling, et sachant que $\delta W = -P\Delta V$, l'équation (2-16) devient :

$$\delta Q + \bar{C}_p(T_e f m_e - T_s f m_s) - diss = -PdV + \frac{\bar{C}_V}{R} \left(PdV + VdP - nbdP - \frac{n^2 adV}{V^2} + \frac{2abn^3 dV}{V^3} \right) \quad (eq.2.50)$$

Appliquant l'équation 2.50 aux différents compartiments du moteur Stirling :

❖ Espace de compression (supposé adiabatique) : $\delta Q_c = 0$

$$-\bar{C}_P T_{ck} f m_{ck} - diss_c = P_c dV_c + \frac{\bar{C}_V}{r} \left(P_c dV_c + V_c dP_c - n_c b dP_c - \frac{n_c^2 a dV_c}{V_c^2} + \frac{2abn_c^3 dV_c}{V_c^3} \right) + \frac{n_c^2 a dV_c}{V_c^2}$$

(eq.2.51)

❖ refroidisseur (le volume du refroidisseur est fixe) : $dV_k = 0$

$$\delta Q_k - diss_k + \bar{C}_P (T_{ck} f m_{ck} - T_{kr_1} f m_{kr_1}) = \frac{\bar{C}_V}{r} (V_k dP_c - n_k b dP_c)$$

(eq. 2.52)

❖ Réchauffeur (le volume du réchauffeur est aussi fixe) : $dV_h = 0$

$$\delta Q_h - diss_h + \bar{C}_P (T_{kr_1} f m_{ck} - T_{intr_1 r_2} f m_{intr_1 r_2}) = \frac{\bar{C}_V}{r} (V_h dP_c - n_h b dP_c)$$

(eq. 2.53)

❖ Compartiment 1 du régénérateur :

$$\delta Q_{r_1} - diss_{r_1} + \bar{C}_P (T_{intr_1} f m_{intr_1 r_2} - T_{r_2 h} f m_{r_2 h}) = \frac{\bar{C}_V}{r} (V_{r_1} dP_c - n_{r_1} b dP_c)$$

(eq. 2.54)

❖ Compartiment 2 du régénérateur :

$$\delta Q_{r_2} - diss_{r_2} + \bar{C}_P (T_{r_2 h} f m_{r_2 h} - T_{he} f m_{he}) = \frac{\bar{C}_V}{r} (V_{r_2} dP_c - n_{r_2} b dP_c)$$

(eq. 2.55)

❖ Espace de détente (supposé adiabatique) : $\delta Q_e = 0$

$$\bar{C}_P T_{he} f m_{he} - diss_e = P_e dV_e + \frac{\bar{C}_V}{r} \left(P_e dV_e + V_e dP_c - V_e dP_c - n_e b dP_c - \frac{n_e^2 a dV_e}{V_e^2} + \frac{2abn_e^3 dV_e}{V_e^3} + \frac{n_e^2 a dV_e}{V_e^2} \right)$$

(eq.2.56)

2.6.4. Variation de la pression dans le moteur

En faisant la somme des 6 équations précédentes, et en prenant en considération les équations de (2-57) à (2-61), nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned} \delta Q = \delta W \left(1 + \frac{\bar{C}_V}{r} \right) + dP_c \left(-\frac{\bar{C}_V}{r} \frac{m_{tot} b dP_c}{M} + \frac{\bar{C}_V}{r} V_{tot} \right) \\ + dV_c \left(-\frac{\bar{C}_V}{r} \frac{m_c^2 a}{M^2 V_c^2} + \frac{m_c^2 a}{M^2 V_c^2} + \frac{\bar{C}_V}{r} \frac{2abm_c^3}{M^3 V_c^3} \right) - Diss \\ + dV_e \left(-\frac{\bar{C}_V}{r} \frac{m_e^2 a}{M^2 V_e^2} + \frac{m_e^2 a}{M^2 V_e^2} + \frac{\bar{C}_V}{r} \frac{2abm_e^2}{M^3 V_e^3} \right) \end{aligned} \quad (eq.2.57)$$

Avec :

$$\delta Q = \delta Q_c + \delta Q_k + \delta Q_h + \delta Q_{r_1} + \delta Q_{r_2} + \delta Q_e \quad (eq.2.58)$$

$$Diss = diss_c + diss_k + diss_h + diss_{r_1} + diss_{r_2} + diss_e \quad (eq.2.59)$$

$$V_{tot} = V_c + V_k + V_h + V_{r_1} + V_{r_2} + V_e \quad (eq.2.60)$$

$$dW = -(P_c dV_c + P_e dV_e) \quad (eq.2.61)$$

$$m_{tot} = m_c + m_k + m_h + m_{r_1} + m_{r_2} + m_e \quad (eq.2.62)$$

Ainsi, nous pouvons déduire la variation de la pression dans un moteur Stirling

$$dP_c = \frac{-DQ - Diss - DW \left(1 + \frac{\bar{C}_V}{r} \right) + an_c^2 \frac{dV_c}{V_c^2} \left(1 + \frac{\bar{C}_V}{r} \left(\frac{2bn_c^2}{V_e} - 1 \right) \right) + an_e^2 \frac{dV_e}{V_e^2} \left(1 + \frac{\bar{C}_V}{r} \left(\frac{2bn_e^2}{V_e} - 1 \right) \right)}{\frac{\bar{C}_V}{r} (V_{tot} - bdP_c n)} \quad (eq.2.63)$$

2.6.5. Variation des flux de masse dans le moteur

Cherchons la variation des masses dans le moteur, et commençant par la variation de la masse dans l'espace de compression :

$$dm_c = \frac{P_c dV_c + \frac{\bar{C}_V}{r} \left(P_c dV_c + V_c dP_c - \frac{m_c}{M} b dP_c - \frac{m_c^2 a dV_c}{M^2 V_c^2} + \frac{2abm_c^3 dV_c}{M^3 V_c^3} \right) + \frac{m_c^2 a dV_c}{M^2 V_c^2}}{-\bar{C}_P T_{ck}} \quad (eq.2.64)$$

Afin de déterminer la masse dans les différents sous-volumes autres que l'espace de compression, nous allons utiliser la conservation de la masse :

$$dm = (\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sort}) dt \quad (eq.2.65)$$

En appliquant cette relation aux autres sous-volumes, nous obtenons :

$$dm_k = (fm_{ck} - fm_{kr_1}) dt \quad (eq.2.66)$$

$$dm_{r_1} = (fm_{kr_1} - fm_{intr_1 r_2}) dt \quad (eq.2.67)$$

$$dm_{r_2} = (fm_{intr_1 r_2} - fm_{r_2 h}) dt \quad (eq.2.68)$$

$$dm_h = (fm_{r_2 h} - fm_{he}) dt \quad (eq.2.69)$$

Alors les flux de masse dans les différents compartiments du moteur s'écrivent comme suit :

$$fm_{ck} = -Dm_c \quad (eq.2.70)$$

$$fm_{kr_1} = \frac{\delta Q_k + \bar{C}_P T_{ck} fm_{ck} - \frac{\bar{C}_V}{r} \left(V_k dP_c - \frac{m_k}{M} b dP_c \right)}{\bar{C}_P T_{intr_1 r_2}} \quad (eq.2.71)$$

$$fm_{intr_1r_2} = \frac{\delta Q_h + \bar{C}_p T_{kr_1} fm_{kr_1} - \frac{\bar{C}_v}{r} \left(V_h dP_c - \frac{m_h}{M} bdP_c \right)}{\bar{C}_p T_{intr_1r_2}} \quad (eq. 2.72)$$

$$fm_{r_2h} = \frac{\delta Q_{r_1} + \bar{C}_p T_{intr_1r_2} fm_{intr_1r_2} - \frac{\bar{C}_v}{r} \left(V_{r_1} dP_c - \frac{m_{r_1}}{M} bdP_c \right)}{\bar{C}_p T_{r_2h}} \quad (eq. 2.73)$$

$$fm_{he} = \frac{\delta Q_{r_2} + \bar{C}_p T_{r_2h} fm_{r_2h} - \frac{\bar{C}_v}{r} \left(V_{r_2} dP_c - \frac{m_{r_2}}{M} bdP_c \right)}{\bar{C}_p T_{he}} \quad (eq. 2.74)$$

Comme la masse totale du fluide est constante et vaut m , nous avons alors :

$$me = M - (m_c + m_k + m_{r_1} + m_{r_2} + m_h) \quad (eq. 2.75)$$

2.6.6. Variation des températures dans les différents compartiments

Enfin, pour connaître la température du fluide dans chaque sous-volume, nous appliquerons (eq : (2.2)) l'équation de van der Waals pour un gaz réel :

$$T_c = \frac{\left[P + \frac{n_c^2 a}{V_c^2} \right] (V - n_c b)}{r m_c} \quad (eq. 2.76)$$

$$T_k = \frac{\left[P + \frac{n_k^2 a}{V_k^2} \right] (V - n_k b)}{r m_k} \quad (eq. 2.77)$$

$$T_{r_1} = \frac{\left[P + \frac{n_{r_1}^2 a}{V_{r_1}^2} \right] (V - n_{r_1} b)}{r m_{r_1}} \quad (eq. 2.78)$$

$$T_{r_2} = \frac{\left[P + \frac{n_{r_2}^2 a}{V_{r_2}^2} \right] (V - n_{r_2} b)}{r m_{r_2}} \quad (eq. 2.79)$$

$$T_h = \frac{\left[P + \frac{n_h^2 a}{V_h} \right] (V - n_h b)}{r m_h} \quad (\text{eq. 2.80})$$

$$T_e = \frac{\left[P + \frac{n_e^2 a}{V_e} \right] (V - n_e b)}{r m_e} \quad (\text{eq. 2.81})$$

2.7 Méthode de résolution

Pour les modèles adiabatique et quasi-stationnaire, et à cause de la non-linéarité des équations (spécialement les températures conditionnelles), une résolution numérique des différentes équations développées sera la mieux adaptée. Le moteur Stirling est défini par ses propriétés géométriques V_c , V_e , dV_c et dV_e comme solution analytique de l'angle de variation de la manivelle. Les échangeurs de chaleur sont considérés comme des volumes morts V_k, V_r, V_h . Les températures de fonctionnement sont T_h et T_e et la moyenne logarithmique pour la température du régénérateur.

En plus des paramètres constants spécifiés ci dessus, il y a plusieurs variables et paramètres dérivés qui seront résolus sur un cycle complet ($\theta = [0, 2\pi]$).

Pour le cas du modèle quasi-stationnaire, après chaque intégration du système, les 4 flux de masses $f m_{ck}, f m_{kr}, f m_{rh}, f m_{he}$, restent constants, donc le problème revient à résoudre sept équations différentielles ordinaires simultanément. La meilleure méthode pour résoudre ce système d'équations est de formuler un problème à valeurs initiales connues, alors les équations seront intégrées à partir des conditions initiales sur tout un cycle par la méthode classique de type Runge-Kutta de quatrième ordre (Urieli et Berchowitz, 1984) [23].

2.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles thermodynamiques permettant de calculer les différents paramètres d'un moteur Stirling. Le modèle adiabatique et le modèle quasi-stationnaire développés par Urieli et Berchowitz (1984) [23]. Ces deux modèles ont été adoptés puisqu'ils sont les deux modèles les plus complets de la bibliographie.

Dans ces deux modèles, seul le gaz est considéré réel et obéissant à l'équation de Van der Waals (eq. (2.2)).

Chapitre III

Chapitre 3 : les concentrateurs solaires

3. Introduction

Le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique et le développement industriel ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'importation de source d'énergies fossiles, motivée par des considérations économiques. D'autres facteurs comme les émissions de CO₂, le caractère limité de nos réserves fossiles, et l'indépendance énergétique n'ont pas été pris en compte.

3.1 Historique et perspectives.

La crise pétrolière de 1973 ainsi que l'augmentation du prix du pétrole ont poussé les pays industrialisés à chercher des sources d'énergies alternatives.

Parmi les axes de recherche développés, on peut citer celui des centrales solaires thermodynamiques, en effet depuis les années 80, des études ont conduit à la réalisation des plateformes expérimentales en France, en Italie, en Espagne, aux Etats Unis, etc.

Les efforts de recherche dans ce domaine se sont accrus au début du XXIème siècle en raison du changement climatique (accords de Kyoto en 1997) et l'incertitude sur l'approvisionnement en énergies fossiles. Ainsi la production d'énergie faisant appel aux technologies solaires à concentration est sérieusement envisagée en raison du facteur émission de CO₂.

3.2 Aperçu de la technologie

Les centrales solaires sont une technologie relativement récente, possédant un important potentiel de développement qui offre une opportunité aux pays ensoleillés.

Les endroits les plus prometteurs pour l'implantation de ces technologies sont ceux du sud-ouest des États Unis, l'Amérique du Sud, une grande partie de l'Afrique, les pays méditerranéens et du Moyen Orient, les plaines désertiques d'Inde et du Pakistan, la Chine, L'Australie, etc.

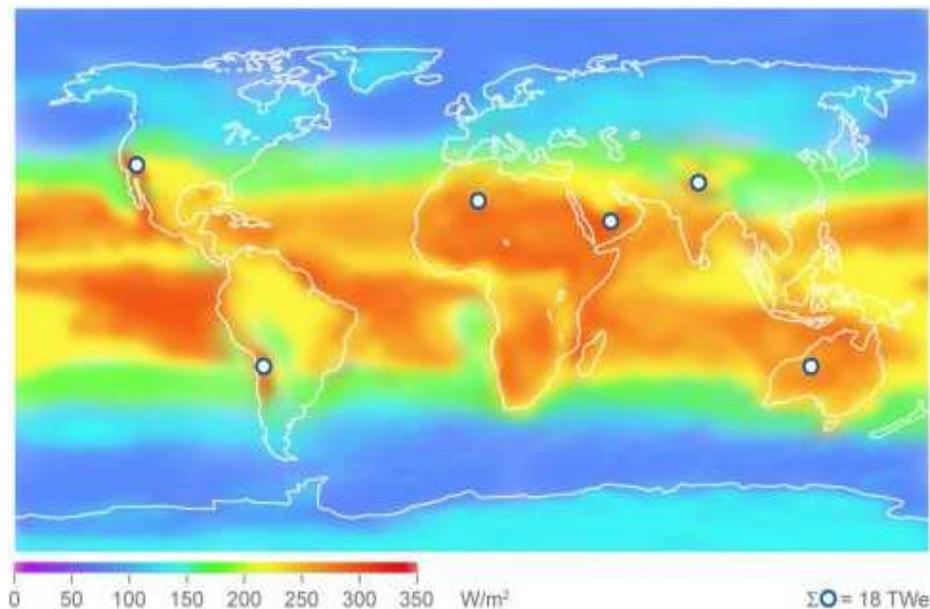


Figure 3.1 : Ressources thermique

3.2.1 L'énergie solaire

Technologiquement, deux voies sont pratiquées dans l'utilisation directe de l'énergie solaire, il s'agit du solaire thermique et le solaire photovoltaïque :

- ❖ En ce qui concerne le solaire thermique, c'est un système qui utilise l'énergie solaire pour produire la chaleur en chauffant un fluide à plus ou moins haute température. On peut ainsi produire de l'électricité comme dans les centrales thermiques classiques. On parle dans ce cas des centrales solaires thermodynamiques.
- ❖ Quant au solaire photovoltaïque, c'est un système solaire composé de cellules photovoltaïques. Il convertit directement une partie du rayonnement solaire en électricité par effet photovoltaïque.

3.3 La concentration

Lorsqu'un rayonnement solaire incident frappe une surface S d'un matériau (voir figure 1.2), une fraction du rayonnement incident est réfléchi, une autre est transmise, le reste est absorbé. Il est converti en chaleur et la température moyenne du matériau augmente pour atteindre un équilibre.

Cet équilibre dépend de l'intensité du rayonnement solaire, du coefficient d'absorption du matériau et des pertes thermiques par convection et rayonnement thermique.

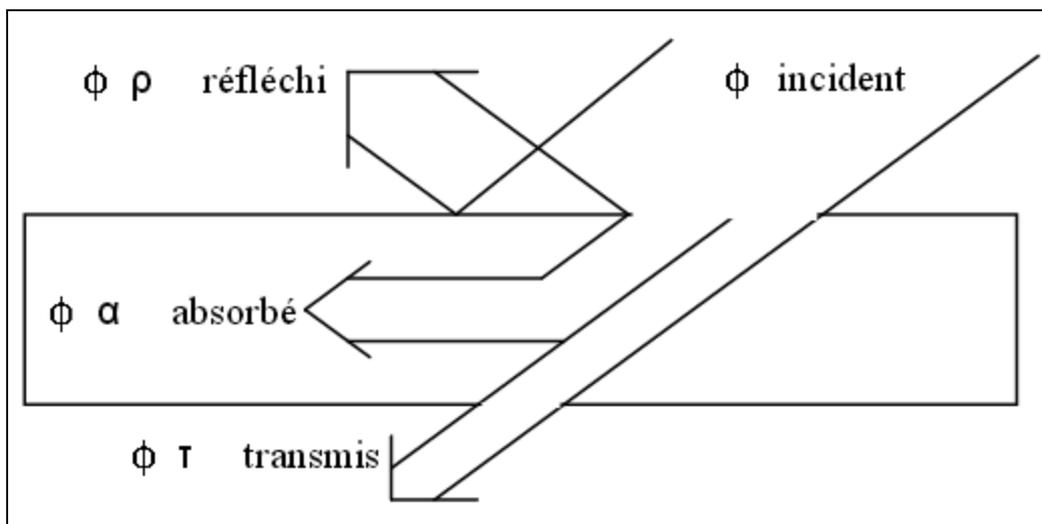


Figure 3.2 : Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide

Soit une surface noire S de $1m^2$. Cette surface est éclairée par flux solaire φ de $1000 W/m^2$.

L'équation de transfert de chaleur traduisant l'échange entre la plaque et le milieu environnant supposé à la température ambiante (T_{amb}), résultant du rayonnement du corps noir (loi de Stephan) et des pertes par convection, est :

$$\varphi S = \sigma S (T_{eq}^4 - T_{amb}^4) + hS (T_{eq} - T_{amb}) \quad (eq. 3.1)$$

Avec :

h Le coefficient de transfert de chaleur par convection et rayonnement ; σ est la constante de Stéphan Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$).

En prenant un coefficient d'échange par convection $h = 10 \text{ W/m}^2/\text{°C}$, et pour une température ambiante (T_{amb}) supposée égale à 20 °C on trouve une température d'équilibre T_{eq} voisine de 55 °C , en résolvant graphiquement l'équation du 4^{ème} degré.

Une telle température ne peut faire fonctionner un cycle thermodynamique avec une bonne efficacité. Les technologies solaires thermiques sans concentration (donc à basse température) sont surtout réservées à la production d'eau chaude et à la climatisation de l'habitat.

Pour augmenter la température d'équilibre, il faut concentrer le rayonnement solaire en faisant appel à des technologies sophistiquées, ainsi, l'équation (3.1) s'écrira :

$$\varphi CS = \sigma S(T_{eq}^4 - T_{amb}^4) + hS(T_{eq} - T_{amb}) \quad (eq. 3.2)$$

Où C est le facteur de concentration moyenne du rayonnement sur la surface éclairée.

Avec une concentration $C = 100$, on peut obtenir une température d'équilibre de plusieurs centaines de degré Celsius.

3.4 Les différents types de centrales solaires à concentration

Il existe trois grandes familles de centrales solaires à concentration qui se distinguent par leurs dispositifs à concentration, leurs dimensions géométriques et leurs couts (voir figure 1.3 ci- dessous) :

- ❖ Les centrales à tour,
- ❖ Les centrales à concentrateurs linéaires,
- ❖ Paraboles/Stirling.

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.

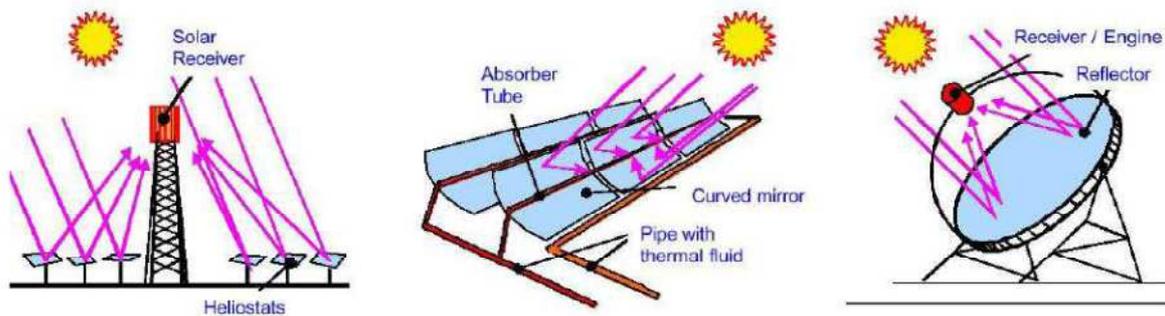


Figure 3.3 : Les trois centrales solaires à concentration (solar two en Californie)

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.

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.

3.5 Avantage de la filière solaire thermodynamique

Comme dans toutes les autres sources d'énergies renouvelables, cette filière permet la réduction des émissions de CO₂ et d'autres polluants dans l'atmosphère pendant le fonctionnement. Par ailleurs, les premières analyses du cycle de vie sont excellentes (15 g/kwh_e) du taux d'émission de CO₂ pour une centrale cylindro-parabolique, il est comparable à celui trouvé pour les centrales hydrauliques ou éoliennes (10 g/kwh_e) et largement inférieur à celui de l'électricité issue de la combustion du pétrole ou du charbon (+700 g/kwh_e). Les systèmes solaires thermodynamiques ont un avantage capital par rapport aux systèmes éoliens et photovoltaïques. Cet avantage réside dans le stockage d'énergie, en effet dans les deux derniers systèmes, le stockage d'énergie ne peut se faire que sous forme électrique.

Enfin cette filière présente un grand intérêt en raison du rendement énergétique particulièrement élevé (entre 20 % et 30 %).

3.6 Le système Parabole/Stirling :

Une voie à ne pas négliger dans le développement du solaire thermodynamique (permettant la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique) est celle de l'utilisation du module Parabole/Stirling pour les faibles puissances. Cette application permet le fonctionnement à proximité du consommateur. Elle constitue une production décentralisée et offre le meilleur rendement.



Figure 3.4 : Système Dish-Stirling (EuroDish à Odeillo (66))

Dans ce système on utilise le concentrateur parabolique. Une surface réfléchissante concentre les rayons lumineux provenant du soleil dans une zone appelée foyer. Pour un rendement maximal, la parabole doit être constamment dirigée vers le soleil.

Les miroirs réfléchissants des paraboles sont de trois types :

- ❖ Plaques de verre sur lesquelles sont déposés des dépôts d'argent ou d'aluminium (concept des miroirs domestiques traditionnels). La réflectivité peut atteindre 95 %.
- ❖ La plaque de verre est remplacée par un film plastique flexible et pas cher. Sa durée de vie est limitée en raison des rayons ultraviolets.
- ❖ Feuilles d'aluminium polies. Elles sont peu chères mais ont une faible réflectivité.

3.7 Conclusion

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.

L'énergie solaire thermodynamique est encore à ses débuts. Beaucoup d'études se font à son sujet dans l'optique de la production d'électricité, l'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Actuellement les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour la production d'électricité. Ces technologies se basent sur des collecteurs qui concentrent la radiation solaire et réchauffent à haute température un fluide caloporteur. Ce fluide peut ensuite être utilisé pour la génération d'électricité.

Chapitre IV

Chapitre 4 : Réalisation du moteur Stirling

4.1 Introduction

Nous avons vu qu'il y'a trois types de moteurs, nous avons choisis pour notre étude le moteur Alpha et le moteur Gamma.

Le moteur bicylindre ou alpha (figurer2.7) 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.

Pour le type de moteur Gamma, la conception mécanique varie d'un concepteur à l'autre. Nous nous sommes basés sur celle de TANGUY [SW2].

Le moteur du type Gamma est doté d'un piston de refoulement et d'un piston moteur qui dispose d'un système d'étanchéité.

Le piston de déplacement occupe successivement la zone chaude et la zone froide, chassant à chaque fois le gaz vers la zone opposée. Les variations de température que le gaz subit alors engendrent des variations de pression qui mettent en mouvement le piston moteur.

D'un point de vue plus pratique, le choix des pièces et les solutions techniques choisies pour les lier et la manière de gérer les contraintes qu'elles entraînent ont été une partie importante de notre réalisation.

Nous avons réalises notre moteur dans un atelier de tournage mécanique ou ont été réalisé toutes les pièces du moteur, possédant des machines et outils de tournage nécessaire a la fabrication du moteur Stirling car l'usinage par enlèvement de matière est le moyen le plus efficace.

4.2 Dimensions géométriques du moteur Stirling

Le tableau 4.1 montre les mesures des pièces du moteur Stirling transparent 04372.00 qui est au laboratoire de génie climatique à l'université de Djilali Bounaama .

Tableau 4.1 : Dimensions géométriques du Moteur Gamma

Diamètre du piston deplaceur	35 mm
Hauteur du piston deplaceur	100 mm
Longueur du cylindre deplaceur	170 mm
Diamètre intérieur du cylindre deplaceur	36 mm
Course du piston deplaceur	140 ,145 ou150 mm
Diametre du piston moteur	24 mm
longueur du piston moteur	28 mm
Longueur du cylindre moteur	58 mm
Course du piston moteur	56 mm

Tableau 4.2 : Dimensions géométriques du moteur Alpha

Diamètre du piston 1	35.9 mm
Hauteur du piston 1	50 mm
Longueur du cylindre 1	150mm
Diamètre intérieur du cylindre 1	36 mm
Diamètre du piston 2	35.9 mm
Hauteur du piston 2	50 mm
Longueur du cylindre 2	150 mm
Diamètre intérieur du cylindre 2	36 mm

Pour la réalisation de toutes les pièces des moteurs Stirling on a utilisé des brutes « des pièces qu'on prend avec des mensuration ce qui veut dire longueur, largeur, et diamètre pour les pièces cylindrique plus grandes de celle qu'on a besoin pour les pièces finies » en aluminium sur lesquels on a effectué des multiples opérations de tournage , coupage et de perçage avec une précision qui peut aller au centième de millimètre près .

4.3 Tournage mécanique

Le tournage mécanique est un procédé d'usinage par enlèvement de matière qui consiste en l'obtention de pièces de forme cylindrique ou conique à l'aide d'outils coupants sur des machines appelées tourniquet. La pièce à usiner est fixée dans une pince, dans un mandrin, ou entre pointes. Il est également possible de percer sur un tour, même si ce n'est pas sa fonction première.

4.3.1 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.

4.4 Les appareils utilisés

4.4.1 Tour à charioter et fileter

Les tour a charioter qui sont destinés à réaliser tous les travaux essentiels de tournage, y compris le filetage à l'outil à l'aide de la vis-mère ; ces tours sont les plus répandus.

À l'aide de cette machine de tournage, toutes la fabrication des pièces des moteurs Stirling ont été réalisées avec succès.

En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin ou dans une pince spécifique, 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.



Figure 4.1 : Photo de la Tour à charioter et fileter

Un tour permet de fabriquer principalement des pièces de révolution même si certaines machines peuvent réaliser des formes très complexes :

- métalliques ou en plastique (tour mécanique) ;
- En bois (tour à bois)
- En terre (tour vertical de potier)

Bien que la cinématique du procédé et les outils soient assez simples, ce procédé a fait l'objet d'une grande optimisation à cause de l'importance de ses applications.

4.4.2 Les outils de l'usinage

- L'acier rapide (HSS - High Speed Steel) Figure 4.2, qui est un acier fortement allié, est très employé pour la production d'outils de coupe. Les caractéristiques qui le rendent intéressant sont sa dureté d'environ 65 HRC et sa ténacité qui lui confère une bonne longévité.



Figure 4.2 : Photo de l'acier rapide HSS

- Outil à aléser: Cet outil permet de faire, à partir d'un trou, de l'alésage (cylindre ou cône).



Figure 4.3 : Photo de l'outil à aléser

- Pied à coulisse :

Lors de la fabrication des toutes les pièces détachées du moteur, on a accordé la plus grande attention au marquage précis avec un pied à coulisse

4.4.3 La perceuse

Le perçage est l'opération la plus simple car après la réalisation du profil et les cotes voulues sur les pièces, la fraiseuse marque les centres des trous avec les distances et le parallélisme souhaités.

Donc il suffit de:

- 1- Fixer le foret avec le bon diamètre.
- 2- Confondre la pointe du foret avec le centre du trou voulu.
- 3- mettre en marche la perceuse.
- 4-Descendre lentement afin de permettre aux copeaux de se dégager et de ne pas endommager le foret



Figure 4.4 : Photo de la machine perceuse

4.4.4 La Scieuse

La scieuse est un appareil équipé d'un scie a métaux avec étrier métallique a pour rôle pour les coupes droites, elle nous a servis pour la réalisation de la bâti droite et latéral du moteur (voir figure 4.1)



Figure 4.5 : Photo de la machine scieuse

Remarque : Serrer la lame de scie avec la denture vers l'avant. Ne peser sur la lame que lorsqu'elle est en mouvement

4.4.5 La presseuse hydraulique

Une presse hydraulique est une machine avec un circuit hydraulique qui fournit une grande force de compression. Elle permet de transmettre un effort démultiplié et un déplacement, servant à écraser, déformer un objet ou soulever une pièce lourde.



Figure 4.6: Photo de la presse hydraulique

L'intérêt de la transmission avec la presse hydraulique réside à la facilité d'implantation des roulements dans les supports, implantation du cylindre mécanique de la piston moteur (voir photo 4.6, implantation du palier du chambre bien étanchéité

4.4.6 Tronçonneuse a disque

Une Tronçonneuse ou meuleuse d'angle, est un outil électrique portatif sur lequel est monté un disque abrasif. Cet outil nous a servis en meulant les pièces (tige piston, les bielles, et support) une fois fini et tronçonner certains pièces matériaux selon le disque. Le disque est entraîné en rotation par l'intermédiaire d'un renvoi d'angle (couple de pignons coniques), d'où la dénomination meuleuse d'angle.

4.5 Réalisation des pièces

4.5.1 Le moteur du type gamma

Le moteur Stirling du type gamma est un moteur Stirling doté d'un piston de puissance et d'un piston jouant à lui seul le rôle de déplaceur. Seul le piston deplaceur dispose d'un système d'étanchéité.

Le déplaceur occupe successivement la zone chaude et la zone froide, chassant à chaque fois le gaz vers la zone opposée. Les variations de température que le gaz subit alors engendrent des variations de pression qui mettent en mouvement le piston moteur.

Le volume balayé par le piston de déplacement est important face à celui balayé par le piston moteur, c'est pourquoi le moteur Gamma ne peut pas atteindre des rapports de compression élevés, ce qui est son rendement. Mais d'un autre côté, sa simplicité mécanique en fait un système largement utilisé. Enfin, sa réputation de moteur Stirling à faible écart de température lui faisant un système intéressant.

4.5.2 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

4.5.3 Fabrication du radiateur

Afin de réaliser le moteur Stirling de type gamma, nous avons fait de recherche sur le site du moteur sterling on a eu quelque notion servant comme kit contenant des pièces prés 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 sélectionné 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 4.7 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 gamma, elle représente l'état du radiateur avant l'usinage



Figure 4.7:Photo du 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 4.8 d'écrit 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 4.8 : Photo de 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.

Vue intérieur du radiateur



Vue extérieur du radiateur



Figure 4.9 : Photo du radiateur du moteur Stirling Gamma

Ainsi que le perçage et l'alésage on été faite avec une extrême perfection qui nous a conduit a l'obtention d'un radiateur bien usinée et qui répond à la norme conçus pour la fabrication (voir la Figure 4.9) qui représente l'état final du radiateur.

4.5.4 Usinage de l'ailette de refroidissement

Une ailette est un dispositif thermique visant à augmenter la surface de contact avec un fluide extérieur pour augmenter les échanges convectifs, et donc le transfert de chaleur. L'ailette est en contact avec le corps chaud, la chaleur se propage par conduction à travers l'ailette qui est refroidi par convection par le fluide environnant.

La réalisation de l'ailette de refroidissement est très simple une fois les dimensions a été donné au tourneur il nous a réalisé en un moindre de temps comme sorti de l'usine a l'échelle international.

La figure 4.10 et 4.11 montre l'état de l'ailette avant et après la réalisation, elle est conçue pour le premier moteur du type Gamma.



Figure 4.10 : Photo de l'ailette avant la réalisation

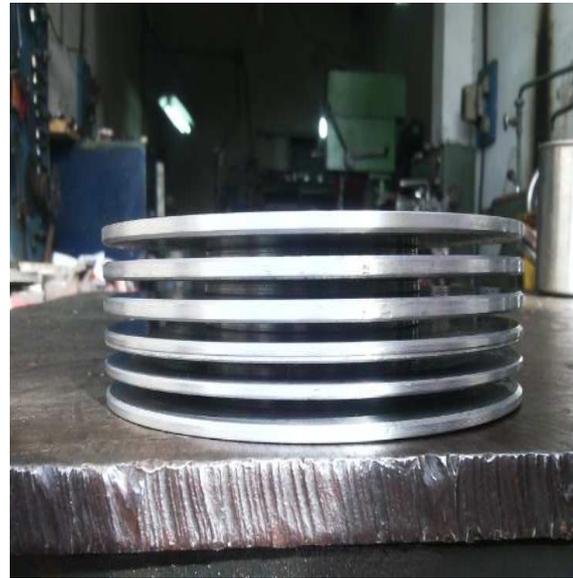


Figure 4.11 : Photo de L'ailette de refroidissement

Dans un moteur Stirling les ailettes servent à orienter le flux d'air froid de manière à refroidir le flux d'air chaud qui circule à l'intérieur du cylindre du piston deplaceur avec le meilleur rendement du moteur.

4.5.5 Réalisation du piston moteur

Le piston moteur sera lui soumis à des frottements et doit donc être résistant à l'usure. Il sera donc réalisé en laiton (voir figure 4.12 et 4.13) puisque ce matériau est résistant à l'usure et facile à usiner.



Figure 4.12 : Photo du piston moteur au tour



Figure 4.13 : Photo du piston moteur

4.5.6. Réalisation du piston deplaceur

La réalisation du piston deplaceur demande une perfection, un piston deplaceur est de déplacer l'air chaud et l'air froid (ou autre fluide caloporteur). Une face de la cavité du piston deplaceur est chauffée tandis que l'autre face est maintenue à une température froide, ce piston occupe donc successivement la zone chaude et la zone froide.



Figure 4.14 : Photo du piston deplaceur

Le gaz subit donc des changements de température, ce qui engendre des variations de pression qui permettent la mise en mouvement du piston moteur. Elle aussi sera lui soumis à des frottements et doit donc être résistant à l'usure, il sera réaliser en aluminium.

La réalisation du piston deplaceur demande beaucoup de perfection, une fois serrée entre les mors du mandrin, l'alésage et l'enlèvement de matière sous forme de copeaux demande une suivie et patience, car l'aluminium est très sensible au coupe.

4.5.7 Cylindre du piston deplaceur

Issu d'une automobile, Le cylindre du piston deplaceur est en inox (voir la figure 4.15), il a été choisi en raison de sa conductibilité thermique et de son inoxydabilité.



Figure 4.15 : Photo du Cylindre du piston deplaceur

4.5.8 Préparation des bielles motrice du piston deplaceur

Une bielle est une pièce mécanique reliant deux articulations d'axes mobiles et donnant la possibilité de la transmission d'une force. On l'associe à la manivelle dans le dispositif bielle manivelle qui permet la transformation d'un mouvement de rotation continue en mouvement alternatif de rotation.



Figure 4.16 : Photo de la Bielle du piston deplaceur

L'utilisation de l'acier comme matériau est discutable dans le cas des bielles. En effet, d'une côté ce sont les pièces les plus sollicitées lors du fonctionnement du moteur, elles doivent donc être suffisamment solides pour résister à une utilisation prolongée.

4.5.8.1 Bielle motrice du piston moteur

Pour la bielle motrice du piston moteur on a fait ressorti de la tronçonneuse (HYLTY SENOR) car son design correspond précisément avec notre piston moteur.



Figure 4.17 : Photo du Piston du moteur

4.5.9 Roues motrices

Les roues sont en acier percé pour mieux observer la vitesse à laquelle le moteur tourne. L'acier plus lourd que l'aluminium permet de créer plus facilement un effet d'inertie lors du démarrage du moteur



Figure 4.18 : Photo de la roue motrice

Concernant les roues, il fallait utiliser un support adapté afin de fixer efficacement les pièces dans l'étau et ne pas les déformées.

Pour ces pièces, les perçages sur la plus grande surface étaient optionnels car cela n'affectait apparemment pas le bon fonctionnement du moteur. Nous avons cependant pris la décision de les réaliser afin d'aider le plus possible le moteur car ces roues sont en acier, un métal beaucoup plus lourd que l'aluminium. Il a donc fallu être prudent et patients dans l'usinage de ces pièces en procédant à plusieurs étapes de perçage afin de ne pas casser les forets. L'acier est en effet plus résistant que l'aluminium.

4.5.10 Réalisation du vilebrequin

Le vilebrequin est un dispositif mécanique qui permet la transformation d'un mouvement linéaire rectiligne uniforme (pistons) en un mouvement continu de rotation et vice-versa. Présent notamment sur les moteurs thermiques il assure la transmission de l'énergie générée par la combustion externe. C'est l'élément principal du système bielle-manivelle.



Figure 4.19 : Photo du Vilebrequin

Dans un moteur à pistons, le vilebrequin constitue l'arbre moteur qui entraîne la transmission primaire, l'alternateur, les pompes, ou les contre-arbres d'équilibrage, etc.

4.5.11 Fabrications du coussinet

En mécanique, un coussinet est un dispositif en étoffe rembourrée, en cuir, en bois ou en métal, etc., destiné à éviter des frottements ou à favoriser un glissement.



Figure 4.20 : Photo du coussinet réducteur des frottements

4.6 Assemblage des pièces des moteurs

Avant l'assemblage du moteur, nous avons procédé à la vérification des pièces, nous avons mesuré en particulier, les cotes fonctionnelles à savoir le diamètre du piston moteur et son alésage de façon à s'assurer qu'il n'y a pas beaucoup de jeux entre les deux pièces. Un jeu important réduit la performance du moteur. Les figures ci-dessous montrent les différentes pièces des moteurs Stirling réalisées.

❖ Moteurs réalisés du type Gamma :



Figure 4.21 : Photo des pièces assemblées du type Gamma N°1



Figure 4.22 : Photo des pièces assemblées du type Gamma N°2



Figure 4.23 : Photo des pièces assemblées pièces réalisé du moteur Gamma N°3

❖ Moteurs réalisé du Type Alpha



Figure 4.24 : Pièces assemble du moteur Alpha N°1

4.7 Difficultés rencontrées

Nous avons rencontrés quelque problème durant la réalisation du moteurs Stirling :

- Premièrement la recherche d'un atelier de tournage qui a les matériaux bruts et les machines pour la réalisation des pièces du moteur ;
- Lors de la réalisation de la bielle, la plaque en métal que nous avions à notre disposition étaient en acier ce qui a rendu leur usinage très difficile. Pour transformer la plaque en une bielle proprement dite, un tracé du contour a été fait par pointage. Cependant les trous devaient avoir un petit diamètre et lorsqu'il a fallu percer, le foret nous a posé problème, il avait tendance à glisser dans le trou adjacent et plusieurs forets se sont retrouvés brisés ;
- Au taraudage du piston , l'aluminium ne supporte pas l'acier elle est très sensible au taraudage, elle nous a fait détruire trois piston a trois essaie différente, a la fin on a compris que l'aluminium ne supporte pas l'acier d'où on a décidé de percer et tarauder la tige d'acier et le faire rentrer dans le piston jusqu'à l'autre extrémité du piston et le faire visser ;
- L'assemblage des pièces du moteur gamma et alpha ;
- Lorsque nous avons monté toutes les pièces des moteurs, au essaie on 'a trouver certain difficultés due au problème de l'étanchéité, frottement du piston deplaceur, et la dilatation de l'aluminium ne supporte pas les hautes températures (voir Figure4.29). Mais on a pu résoudre le problème de l'étanchéité en fabricant un coussinet avec deux joint torique aux deux extrémités du coussinet ou laisse glisser la tige sans fuiter et assure en même temps le problème du frottement.



Figure 4.25 : Fissures causé par les hautes températures

4.8 Conclusion

Les moteurs Stirling Alpha et Gamma sont des machines fascinantes de complexité mais aussi de simplicité et une efficacité impressionnante. Ils peuvent être utilisés dans bon nombre de domaines, sa réalisation dans le cadre d'un projet de fin d'étude était donc une tâche idéale dans notre initiation au monde de la fine mécanique énergétique.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le besoin affiché par la communauté industrielle en matière d'énergie exige une 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 concentrateurs cylindro-paraboliques représentent l'un des moyens les plus utilisés dans les procédés de concentration.

Ce travail concerne l'étude théorique et pratique des moteurs Stirling. Dans cette étude, deux moteurs Stirling de différentes configurations (Alpha et Gamma), ont été choisis. Dans un premier temps, une étude bibliographique complet nous a permis de présenter le cycle de Stirling ainsi que le principe de fonctionnement de ce genre de machine thermique quelque soit sa configuration.

Pour cela, nous avons aussi passé en revue les avantages, les inconvénients, les domaines d'applications de ce genre de moteur en s'appuyant sur les travaux les plus pertinents et les plus récents qui ont été réalisés sur les moteurs Stirling.

Le moteur Stirling Alpha et Gamma sont des machines fascinantes de complexité mais aussi de simplicité à la fois. Avec une efficacité impressionnante, ils peuvent être utilisé dans bon nombre d'industries, sa réalisation dans le cadre d'un projet était donc une tache idéale dans notre initiation au monde de la fine mécanique.

Ces prototypes nous ont permis de mieux comprendre les cycles thermodynamiques et le détail de fonctionnement de ce moteur.

Ce projet a été surtout l'occasion de travailler au côté de notre encadreur, de participer à sa démarche, et d'apprendre à ses côtés dans le but de réaliser un moteur Stirling, pour cela, il fallait au préalable mener une étude pour savoir comment nous allions le créer : déterminer les différentes pièces, les dimensionner, trouver les matériaux adaptés, analyser les contraintes et trouver les moyens de créer un assemblage.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]. Lemrani H., Modélisation énergétique des moteurs Stirling, *Thèse de Doctorat, École des Mines de Nantes, France* (1995).
- [2]. Lemrani H., Stouffs P., Dynamic Simulation of kinematics Stirling engines applied to power control, *Imp. by the American Institute of Aeronautics and Astronautics* (1994).
- [3]. Descombes G., Magnet J. L., Moteur non conventionnels, *Techniques de l'Ingénieur, BM 2 593*, 1-34 (1997).
- [4]. Lanzetta F., Boucher J., Nika, P., Étude et réalisation d'une pompe à eau Fluidyne, *Journée SFT : Machines thermiques exotiques* (2004).
- [5]. 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).
- [6]. Maier C., Gil A., Aguilera R., Shuang L., Yu X., Stirling engine, *Gävle, Suède* (2007).
- [7]. Nepveu F., Ferriere A., Daumas-Bataille F., Verdier I., Lefevre P., Parabole-Stirling, Production d'électricité par système, *Revue Internationale D'Helio-technologie Energie - Environnement*, 34, 18-19 (2006).
- [8]. 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).
- [9]. Schmidt G., Wiley R., Furlong R., Radioisotope Power Systems (RPS) for New Frontiers Applications, *Presentation to New Frontiers Program Pre-proposal Conference* (2003).
- [10]. Sauzade D., Imbert G., Mollard J., The supporting technologies and sea trials of a long-range autonomous civilian submarine, *Marine Technology Society Journal*, 25, No. 2, 3-13 (1991)
- [11]. Lanzetta F., Étude des transferts de chaleur instationnaires au sein d'une machine frigorifique de Stirling, *Thèse de Doctorat, Université de Franche Comte, France* (1997).
- [12]. Boucher J., Moteur Stirling : application pour un drone, *Rapport de Master, Université de Franche-comté* (2002).
- [13]. Walker G., Stirling Engines, *Clarendon Press Oxford* (1980).

- [14]. Meijer R.J., STM4-120, Stirling engine for solar application, *Abs I.S.E.S, Solar world Congress*, 13-16 (1987).
- [15]. Cinar C., Yucesu S., Topgul T., Okur M., Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure, *Applied Energy*, 81, 351-357 (2005(1)).
- [16]. 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).
- [17]. kolin I., *The stirling motor : History - Theory - Practice*, International University Center, Dubrovnik, (1991(1)).
- [18]. TLili I., Modélisation des moteurs Stirling, *Thèse de Doctorat, ENIM, Université de Monastir, Tunisie* (2010).
- [19]. Timoumi Y., Ben Nasrallah S., Bettaieb H., Analyse des mécanismes des moteurs Stirling, *Journées Scientifiques, Borj El Amri, Tunis* (2000).
- [20]. kolin I., *The stirling motor : History - Theory - Practice*, International University Center, Dubrovnik, (1991(1)).
- [21]. El-Ehwany A.A., Hennes G.M., Eid E.I., El-Kenany E.A., Development of the performance of an alpha-type heat engine by using elbow-bend transposed-fluids heat exchanger as a heater and a cooler, *Energy Conversion and Management*, 52, 1010-1019 (2011).
- [22]. Finkelstein T., Cyclic processes in closedn regenerative gas machines analyzed by digital computer simulating a differential analyzer, *J. Engng. for Industry, Trans. ASME, Paper 61-SA-21* (1961).
- [23]. Urieli I., Berchowitz D.M., Stirling cycle engine analysis, *Techno House, Radcliffe Way, Bristol*, A. Hilger, Bristol, ISBN 0-85274-435-8 (1984).
- [24]. Stouffs P., Dimensionnement Optimal des Volumes de Compression et de Détente des Moteurs Stirling, *Congrès Français de Thermique, SFT 2000*, 15-17 (2000).
- [25]. Weast R.C., Handbook of chemistry and physics, *Chemical Rubber Publishing Company, p-p D-194, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida 33431, USA, ISBN-0-8494-0460-8* (1980).

Source internet:

[SW1] <http://www.moteurstirling.com>

[SW2] <http://ptanguy86.free.fr/>

[SW] <http://perso.mines-albi.fr/>

[SW] <http://www.ez2c.de/ml/solar>

Lettres romaines

a		: Coefficient de correction de la pression
b		: Coefficient de correction de volume
\bar{C}_p	$J.kg^{-1}.K^{-1}$: Capacité calorifique a pression constant
\bar{C}_v	$J.kg^{-1}.K^{-1}$: Capacité calorifique a volume constant
$Diss$: Dissipation visqueuse dans le moteur
fm	kg	: Flux de masse
h	$W.m^{-2}.K^{-1}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection
m	kg	: Masse du fluide de travail
M	$kg.mol^{-1}$: Masse molaire de l'air
n	mol	: Nombre de mole
\dot{m}	$kg.s^{-1}$: Débit massique
P	Pa	: Pression
P_u	$Watt$: Puissance du moteur
Q	J	: Quantité de chaleur
r	$J.kg^{-1}.K^{-1}$: Constant du gaz parfait
T	K	: Température
u	$m.s^{-1}$: Vitesse du gaz
V	m^3	: Volume
W	J	: Travail produit

Lettres grecques

τ		: Taux de compression
γ		: Coefficient adiabatique de l'air
λ	$W.m^{-1}.K^{-1}$: Conductivité thermique
ρ	$kg.m^{-3}$: Masse volumique
ΔT	K	: Différence de Température
ΔV	m^3	: Variation de volume
ΔP	Pa	: Variation de pression
θ	<i>degre</i>	: Angle

Indices

Chaud	: Variable relative à l'espace chaud
Com	: espace de compression
Det	: Espace de détente
Froid	: Variable relative l'espace froid
k	: Refroidisseur
h	: Réchauffeur
r	: Régénérateur
int	: Interface
r_1	: Section N° 1 du régénérateur
r_2	: Section N°2 du régénérateur
Réel	: Gaz réel
T	: Total