

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



LAVALEF

Département Génie Chimique

Diplôme de Master en génie chimique

Etude et dimensionnement d'un module de cogénération utilisant un moteur de Stirling

M^{lle}: Amira ZENNOUNE

Sous la direction de : M. Hocine BENNOUR

M. A. A à l'ENP

Mme. Saliha HADDOUM

M. C. B l'ENP

Présenté et soutenu publiquement le 21/06/2016

Composition du Jury :

Président	M. Rabah BOUARAB	Professeur à l'ENP
Rapporteurs/ Promoteurs	M. Hocine BENNOUR	M. A. A à l'ENP
	Mme. Saliha HADDOUM	M. C. B l'ENP
Examineurs	Mme. Farida MEZIANI	M. A. A à l'ENP
	Mme. Yamina TCHOULAK	M. A. A à l'ENP
Invité	M. Toudert AHMED ZAID	Professeur à l'ENP

ENP 2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



LA VALEF

Département Génie Chimique

Diplôme de Master en génie chimique

Etude et dimensionnement d'un module de cogénération utilisant un moteur de Stirling

M^{lle}: Amira ZENNOUNE

Sous la direction de : M. Hocine BENNOUR M. A. A à l'ENP

Mme. Saliha HADDOUM M. C. B l'ENP

Présenté et soutenu publiquement le 21/06/2016

Composition du Jury :

Président	M. Rabah BOUARAB	Professeur à l'ENP
Rapporteurs/ Promoteurs	M. Hocine BENNOUR	M. A. A à l'ENP
	Mme. Saliha HADDOUM	M. C. B l'ENP
Examineurs	Mme. Farida MEZIANI	M. A. A à l'ENP
	Mme. Yamina TCHOULAK	M. A. A à l'ENP
Invité	M. Toudert AHMED ZAID	Professeur à l'ENP

ملخص

في هذا العمل سنقوم بدراسة و تحليل نظام التوليد المشترك للطاقة باستعمال محرك ستيرلنج. حيث يملك هذا المحرك خاصية العمل بمستويات حرارية منخفضة مع احتمالية تعدد مصادر الطاقة (طاقة متحجرة المواد و المخلفات العضوية) بهدف تحقيق صناعة طاقوية صديقة للبيئة. هذا و يعتبر محرك ستيرلنج المحرك الأكثر فعالية في المجال الطاقوي

الكلمات الرئيسية

التوليد المشترك للطاقة المواد و المخلفات العضوية المائع العضوي

Abstract

In this paper, an analysis and calculus of generating heat and electricity systems with Stirling engine is made. Stirling engine has the ability to work at low temperatures, and can also use all fossil fuels and biomass, to realize an environmentally friendly energy production. Stirling engines are more appropriate for the micro -CHP systems having the best value for overall system efficiency and they are regarded as the most promising for further development in generating energy systems for local use.

Key- Words: Stirling engine, Generating heat and electricity system, m-CHP, Biomass

Résumé

Dans ce mémoire un calcul et une analyse d'un système cogénération avec moteur de Stirling a été faite. Ce moteur a la possibilité de fonctionner à de très basse température, comme il peut fonctionner avec toutes sortes de combustible (fossiles et biomasse), dans le but de réaliser une production énergétique respectueuse de l'environnement. Le moteur de Stirling est le plus approprié pour la micro-cogénération avec un rendement très important, et il est considéré comme un élément prometteur dans le développement des systèmes de génération de l'énergie.

Mots clés : moteur de Stirling, micro-cogénération, biomasse.

Dédicace

Les hommes se définissent par des rencontres.

D'abord celle de leurs parents. Puis celles qu'ils font au cours de leurs vies.

À ma mère, à mon père

À ma meilleure amie et très chère sœur : Iméne et son mari Loukman

À mes frères : Mohammed, Abdellah, Rafik, Amine, Omar

À mes deux nièces adorées : Amira Nour et Fatima Elzohra

À mon binôme et mon amie Bouchra, à mon amie Malia, à Ferhat

À tous mes proches

À tous mes amis et tous mes camarades

Je dédie ce modeste travail

Amira Samra ZAS

Remerciement

Louange à dieu qui nous a aidé à terminer ce travail et nous a donné le courage et la patience.

Nous exprimons toute notre gratitude à nos encadreurs Monsieur Hocine BENNOUR maitre-assistant classe A et madame Saliha HADDOUM maitre de conférence classe B à l'École Nationale Polytechnique, pour nous avoir proposé ce thème et de nous avoir guidé et conseillé tout au long de la préparation de ce mémoire, ainsi pour leur soutien permanent qu'ils ont manifesté.

Je remercie Monsieur Rabah BOUARAB professeur à l'ENP Alger, d'avoir accepté de présider le jury

Je remercie mesdames : Farida MEZIANI maitre-assistante classe A à l'École Nationale Polytechnique, Yamina TCHOULAK maitre-assistante classe A à l'École Nationale Polytechnique pour avoir accepté de participer au jury.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance à l'ensemble des membres du corps professoral du département de génie chimique pour tout le savoir qu'ils nous ont transmis ainsi que pour leur disponibilité et leur dévouement au cours de ces trois dernières années

Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale	9
CHAPITRE I : PRESENTATION DU MOTEUR DE STIRLING	10
1.1. Introduction	11
1.2. Historique	11
1.3. Fonctionnement d'un moteur de Stirling	12
1.4. Le régénérateur	14
1.5. Avantages et inconvénients d'un moteur de Stirling	16
1.5.1. Avantages	16
1.5.2. Inconvénients.....	16
1.6. Les différents types du moteur Stirling	17
1.6.1. Configuration alpha	17
1.6.2. Configuration bêta	19
1.6.3. Configuration gamma	21
1.7. Comparaison entre les différentes architectures	22
1.8. Exemples de réalisation et d'applications	23
1.8.1. Le ASC : un générateur électrique pour les sondes de la NASA	25
1.8.2. Le K508 : Un Stirling sur Mars	26
1.9. Choix du fluide de travail.....	26
CHAPITRE II : DIMENSIONNEMENT D'UN MOTEUR DE STIRLING	30
2.1. Introduction	31
2.2. Description d'un cycle de Stirling	31
2.3. Les volumes morts.....	32
2.4. Régénérateur.....	33
2.5. Equations d'état	34
2.5.1. La compression isotherme (1-2).....	35
2.5.2. Le chauffage isochore (2-3)	35
2.5.3. L'expansion isotherme (3-4)	36
2.5.4. Le refroidissement isochore (4-1).....	36
2.6. La chaleur totale ajoutée	37

2.7.	La chaleur totale rejetée	38
2.7.1.	Cas d'un régénérateur imparfait	38
2.7.2.	Cas d'un régénérateur idéal	38
2.7.3.	Cas d'absence du régénérateur	38
2.8.	Travail effectif	39
2.9.	Pression effective moyenne	40
2.10.	Rendement thermique	40
	CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	44
3.1.	Calcul des paramètres relatifs aux volumes morts et au régénérateur	45
3.1.1.	Données du moteur étudié	45
3.1.2.	Phase de remplissage	46
3.1.3.	Calcul des différentes transitions du cycle	47
3.1.4.	Chaleur de combustion	49
	Conclusion	52
	Référence	53

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Comparaison entre les différentes configurations d'un moteur Stirling.....	23
Tableau 3.1 : Caractéristiques du moteur Stirling.....	43
Tableau 3.2 : Volumes morts pour chaque zone du moteur Stirling.....	43
Tableau 3.2 : Résultats des quantités de chaleur mises en jeu lors des transformations.....	46

Liste des figures

Figure 1.1 : Principe général des machines thermiques.....	12
Figure 1.2 : Détails de fonctionnement d'un moteur de Stirling.....	13
Figure 1.3 : Compression isotherme.....	13
Figure 1.4 : Echauffement isochore.....	14
Figure 1.5 : Détente isotherme.....	14
Figure 1.6 : Refroidissement isochore.....	15
Figure 1.7 : Moteur Stirling de configuration alpha.....	17
Figure 1.8 : Moteur Stirling ayant une architecture alpha représenté au début des 4 temps de son cycle.....	18
Figure 1.9 : Moteur Stirling d'architecture de type beta.....	19
Figure 1.10 : Moteur Stirling de type beta.....	20
Figure 1.11 : Moteur Stirling ayant une architecture bêta représentée aux 4 temps de son cycle.....	21
Figure 1.12 : Moteur de Stirling d'architecture de type Gamma.....	22
Figure 1.13 : Le ASC de Sunpower.....	25
Figure 1.14 : un Stirling sur Mars K508.....	26
Figure 1.15 : Conductivités thermiques des fluides de travail en fonction de la température.....	27
Figure 1.16 :Chaleurs spécifiques des fluides de travail en fonction de la température.....	28
Figure 1.17 : Viscosités des fluides de travail en fonction de la température.....	28
Figure 1.18 : Densités des fluides de travail en fonction de la température.....	29
Figure 2.1 : Diagramme p-V correspondant à un cycle de Stirling.....	32
Figure 2.2 : Schéma d'un moteur de Stirling de type α	33
Figure 3.3 : Diagramme de Sankay représentant le bilan d'énergie du moteur Stirling.....	49

La micro-cogénération consiste en une production simultanée d'électricité et de chaleur pour de faibles puissances, inférieures à 50 kW en Union Européenne et inférieures à 36 kW en France. La micro-cogénération connaît depuis quelques années un important développement lié aux évolutions du contexte énergétique et environnemental. En effet, les ressources fossiles étant limitées et la consommation énergétique mondiale étant croissante, il s'avère nécessaire de favoriser la production d'énergie à partir de sources renouvelables et de promouvoir l'utilisation de systèmes énergétiques efficaces pour réduire la consommation d'énergie primaire tout en répondant aux besoins énergétiques accrus. Le constat des effets néfastes du réchauffement climatique incite à limiter les émissions de gaz à effet de serre, en majorité associées au secteur de la production d'énergie. (1)

Une utilisation plus efficace de l'énergie est fortement recommandée. Les états doivent avoir recours à des ressources énergétiques limitant l'impact carbone, telles que la biomasse. Les systèmes de micro-cogénération sont des solutions qui peuvent répondre à ces enjeux, en particulier concernant l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La valorisation de la chaleur rejetée lors de la production de l'électricité permet d'obtenir des rendements globaux élevés (ratio entre énergie récupérée et énergie primaire consommée). L'implantation d'un grand nombre de systèmes de micro-cogénération domestiques présente plusieurs avantages. Cela permet d'augmenter la puissance électrique installée à l'échelle nationale et d'effacer ainsi la pointe de consommation électrique hivernale en garantissant la disponibilité électrique à cette période. La décentralisation de la production électrique, positionnée à proximité du lieu de consommation, évite les pertes sur le réseau liées au transport d'électricité.

Les systèmes de micro cogénération sont constitués de trois éléments principaux : une source de chaleur, un convertisseur chaleur-électricité ou cogénérateur, et un élément de collecte de la chaleur qui permet d'alimenter à la fois le cogénérateur et un circuit de récupération de chaleur.

Le choix du type du cogénérateur dépend de plusieurs paramètres tels que : le combustible, la puissance et les performances de ce dernier etc. Pour notre étude nous allons nous pencher sur le moteur à air chaud de type Stirling ; un moteur à combustion externe appelé aussi moteurs à air chaud ou moteurs Stirling. Contrairement aux premiers, ces moteurs sont très appropriés à la valorisation de l'énergie renouvelable tel que le solaire, les déchets végétaux, et donc il répond à notre cas d'étude qui est l'utilisation d'un cogénérateur alimenté par la biomasse.

Le travail présenté ici a pour objectif de réaliser le calcul et le dimensionnement d'un moteur de Stirling alimentée en biomasse. Pour ce faire le travail a été scindé en trois parties, dans un premier lieu une étude bibliographique a été faite pour bien comprendre le fonctionnement et les différentes configurations de ce moteur.

La deuxième partie consiste en un dimensionnement d'un moteur de Stirling de type alpha suivi de la dernière partie qui tiendra compte des différents résultats obtenus et dont l'objet sera de les interpréter.

CHAPITRE 1 :
PRESENTATION
DU MOTEUR DE STIRLING

1.1. Introduction

De nos jours, l'augmentation accrue de la consommation énergétique et le développement technologique sont corrélés de façon à ce que l'une engendre l'autre. Donc nul ne peut ignorer les technologies qui sont en train de se développer afin de répondre à la demande croissante en énergie.

Parmi ces technologies un élément prometteur, qui date de 1816, mais qui a vu le jour, ces dernières années, grâce aux recherches faite à la NASA qu'est le moteur de Stirling.

Dans ce chapitre, nous allons détaillés la description de ce dernier, en mettant en évidence son fonctionnement, ainsi que les avantages qu'il présente

1.2. Historique

Les premiers moteurs qui ont été conçu sont les moteurs à vapeur, plus généralement les moteurs à combustion interne qui ont été largement répandus partout dans le monde, cependant ces derniers présentent certains inconvénients tels que la faible efficacité, qui a conduit à des systèmes mécanique et électronique de plus en plus compliqués.

Parmi les défis qui ont été relevé au XIXe siècle; est de faire face aux explosions fréquentes des chaudières des moteurs à vapeur. Ces incidents ont motivé le pasteur écossais Robert Stirling a inventé un moteur sans chaudière soumise à de trop fortes pressions.

Le moteur de Stirling a été inventé en 1816, cette invention fut fondée uniquement sur l'intuition, car à cette époque les lois de thermodynamiques étaient encore méconnues. Le moteur de Stirling fut ensuite développé pour répondre aux différents besoins cette invention fut beaucoup utilisée dans les fermes et les industries, par exemple pour pomper de l'eau ou entraîner des machines, Mais une utilisation à plus grande échelle échoua pour des motifs de rentabilité.

Vers la fin du XIXe siècle, le moteur Stirling trouva quelques applications aux Etats-Unis et en Europe, sous la dénomination de «*moteur à air chaud*». Au début du XXe siècle les moteurs à air chaud furent complètement supplantés par les moteurs à explosion et les moteurs électriques.

Ensuite, il a fallu attendre 1938 pour que la société Philips donne un coup de pouce à cette invention que l'on appelle désormais "moteur Stirling". Durant la seconde moitié du XXe siècle, différents moteurs, fortement pressurisés, et utilisant soit de l'hélium, soit de l'hydrogène, ont été conçus et réalisés.

Certains de ces moteurs ont des rendements globaux remarquables, en comparaison des moteurs à combustion interne de puissance comparable. Citons par exemple le moteur, cinématique USAB 4-275, d'une puissance de 50 kW, avec un rendement global de 42 %.(2)

1.3. Fonctionnement d'un moteur de Stirling

Comme tous les moteurs à combustion, le moteur de Stirling fonctionne selon un cycle thermodynamique décrivant la succession de quatre transformations. Ce moteur à combustion externe est caractérisé par un mouvement de piston engendrant un fluide appelé fluide de travail, permettant la conversion de l'énergie calorifique en énergie mécanique (voir la figure 1.2). On peut ainsi dissocier le moteur de Stirling en trois zones, qui ne sont rien que trois échangeurs : une zone froide, une zone chaude et un régénérateur situé entre les deux autres. La présence des deux zones, chaude et froide engendre un différentiel de température, quant au régénérateur, il permet la récupération de la chaleur cédée lors du refroidissement isochore qui sera intégralement utilisée pour le chauffage ; ce qui fait que le moteur de Stirling a un rendement très important, égal à celui du cycle de Carnot dans le cas d'un régénérateur parfait.

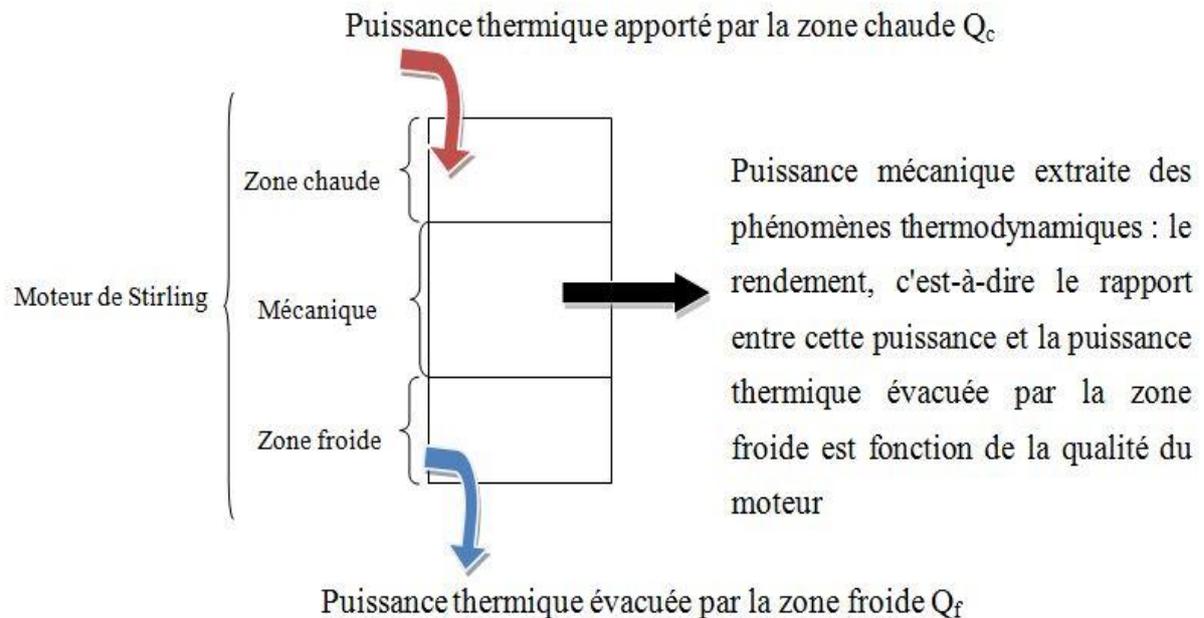


Figure 1.1 : Principe général des machines thermiques

Dans toutes les configurations du moteur de Stirling, le régénérateur est situé entre la zone froide et la zone chaude, ce dernier est un élément poreux permettant le passage du fluide d'une zone à une autre. Le gaz comprimé isothermiquement doit subir un chauffage isochore, le passage à travers le régénérateur lui permet de récupérer la chaleur cédée par le fluide de travail détendu lors de son passage par le régénérateur. Donc le régénérateur va récupérer l'énergie thermique libérée par le gaz pendant le refroidissement et la transmet au gaz pendant le réchauffage. Afin de bien décrire le fonctionnement d'un moteur de Stirling, nous prenons l'exemple d'un moteur monocylindrique, comme représenté sur la figure I.3 ou les éléments du moteur sont identifiés sur la partie gauche, et sur le graphique de droite, on voit l'évolution dans le temps du mouvement des 2 pistons. Les zones rouge (zone chaude = zone de détente) et bleue (zone froide = zone de compression) évoluent dans le temps, cela

implique le transvasement du gaz de travail d'une zone à l'autre et donc son passage dans un sens puis dans l'autre au travers du régénérateur sur un cycle.

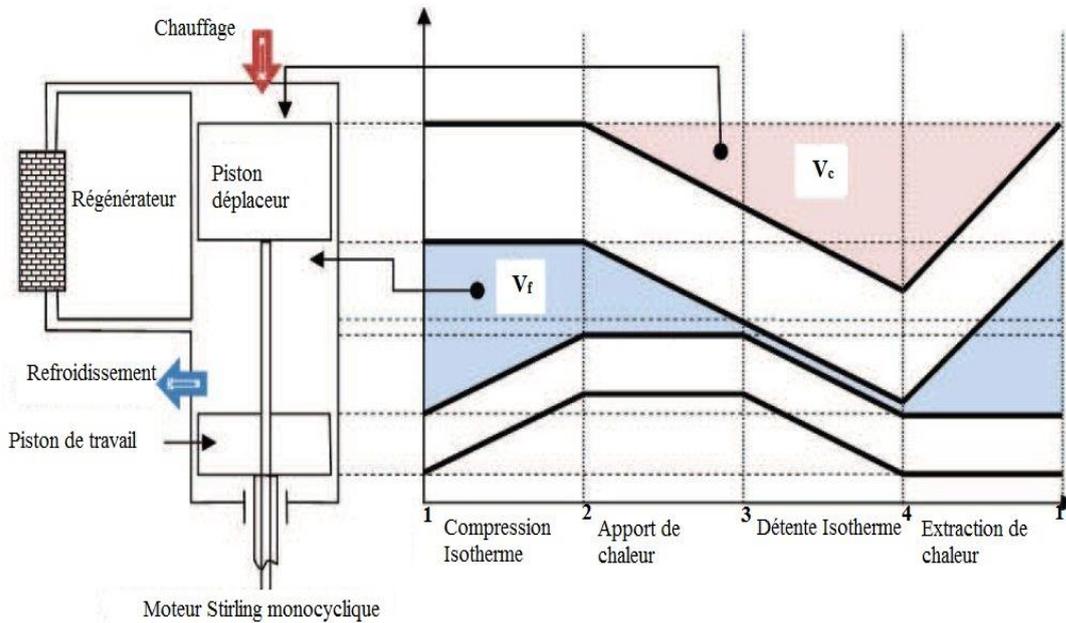


Figure 1.2 : Détails de fonctionnement d'un moteur de Stirling (3)

La Figure 1.2 nous permet de décrire le fonctionnement du moteur Stirling comme suit :

- a. Compression isotherme (1-2) : lors de la compression, le piston de travail, se déplace vers son point mort haut, et donc le fluide de travail est comprimé, tout en gardant sa température constante car la compression a lieu dans la zone froide. Quant au piston déplaceur reste stationnaire au niveau de la zone chaude. Cela augmente la pression du système à une température constante. C'est au niveau de cette partie du cycle ou le gaz échange de la chaleur avec la source froide.

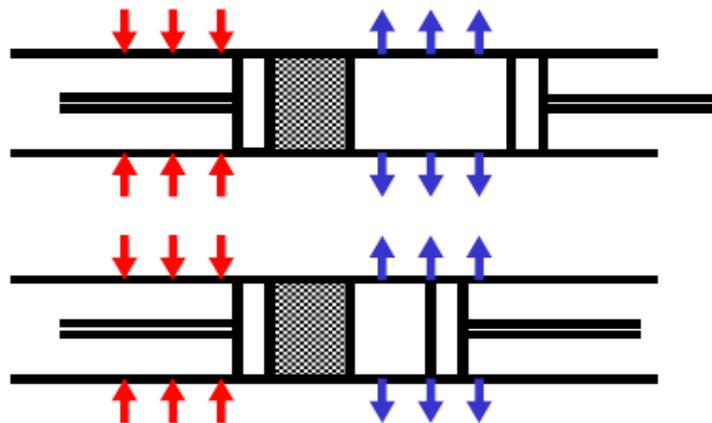


Figure 1.3 : Compression isotherme (4)

- b. Chauffage isochore (2-3) : Les deux pistons se déplacent simultanément et dans un sens opposé afin de transférer le fluide de travail de la chambre de compression vers la chambre de détente, ce déplacement permet la conservation d'un volume constant tout en augmentant la température du fluide de travail. Cette augmentation de température se fait grâce au régénérateur situé entre les deux zones et qui utilise la chaleur stockée à partir du processus (4-1). Le reste est fourni par une source de chaleur externe.

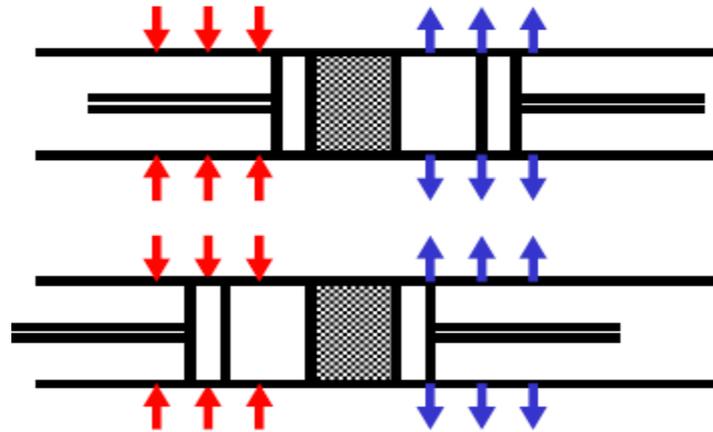


Figure 1.4 : Echauffement isochore(4)

- c. Détente isotherme (3-4) : Le piston de détente est déplacé par le volume d'expansion, qui est maintenu à une température constante grâce à une source de chaleur externe alors que le piston de compression reste immobile. A ce stade-là, le fluide de travail effectue un travail sur le piston en lui transmettant du travail qui sera traduit en énergie mécanique par le moteur. Comme le volume augmente à une température constante, la pression du fluide du travail dans le cylindre de détente diminue.

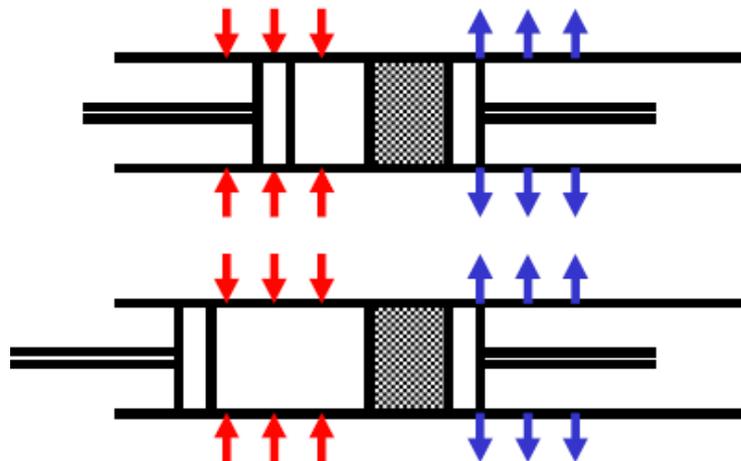


Figure 1.5 : Détente isotherme (4)

- d. Refroidissement isochore (4-1) : les deux pistons se déplacent simultanément de telle sorte à ce que le piston de compression descend vers son point mort bas, tandis que le piston de détente remonte vers son point mort haut, lors de ce double mouvement, le fluide de travail passe de la chambre d'expansion vers la chambre de compression. Le régénérateur absorbe la chaleur du fluide, ce qui réduit la température du fluide. Comme le volume du fluide de travail reste constant et que sa température diminue, la pression diminue.

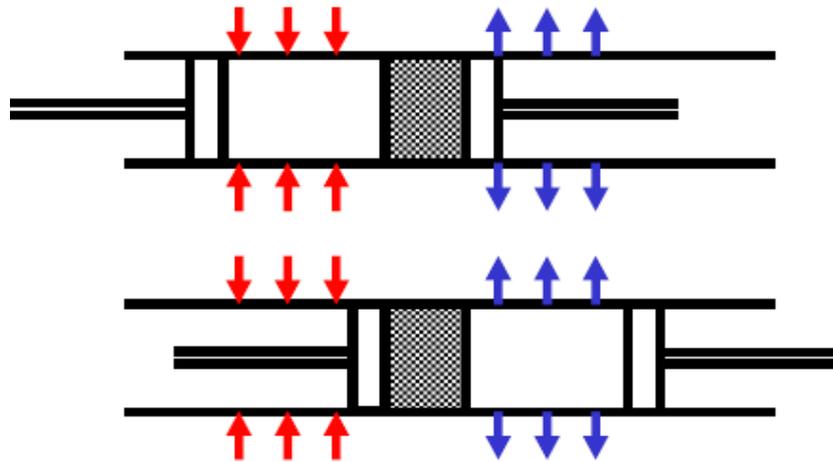


Figure 1.6 : Refroidissement isochore(4)

1.4. Le régénérateur

Un régénérateur se compose de disques métalliques, il est employé souvent dans des moteurs Stirling pour améliorer le rendement du moteur(5)

De l'énergie thermique est absorbée par le régénérateur quand le fluide de travail est déplacé de l'espace de détente à l'espace de compression. Pour cette raison le fluide de travail est refroidi avant d'arriver à l'espace de compression. De l'énergie thermique est transférée à partir du régénérateur au fluide de travail et pour cette raison il préchauffée quand le fluide de travail se déplace du l'espace de compression à l'espace de détente. Le régénérateur dans un moteur Stirling peut atteindre des rendements plus grands que de 98 %, ce qui indique le fluide de travail partira de la proximité du régénérateur à la température de l'espace qu'il occupe(6)

La présence d'un régénérateur offre au moteur une très bonne efficacité, tel que son rendement peut atteindre le rendement d'un cycle de Carnot dans le cas où le régénérateur soit parfait. Dans ce cas, la quantité de chaleur cédée pendant le refroidissement isochore est intégralement utilisé pour le chauffage isochore, dans ce cas on admet que le régénérateur est parfait et donc le seul transfert de chaleur entre le moteur et le milieu environnant est :

- ✓ L'apport de chaleur à la température de la source chaude T_c .
- ✓ Le rejet de chaleur à la température de la source froide T_f .

Cet apport et ce rejet de chaleur à températures constantes permettent au cycle de Stirling théorique d'avoir un rendement identique à celui du cycle de Carnot défini par :

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}}}$$

1.5. Avantages et inconvénients d'un moteur de Stirling

1.5.1. Avantages

Les moteurs à combustion externe présentent de nombreux avantages du à leur configuration, et à la présence d'un régénérateur :

- ✓ Contrairement aux moteurs à combustion interne et aux moteurs à explosion, le moteur de Stirling présente certains avantages :
 - Son fonctionnement est extrêmement silencieux et sans vibration ;
 - La durée de vie du moteur est très importante ;
 - Le lubrifiant n'est pas contaminé par des résidus de combustion, il n'est donc pas nécessaire de procéder à des vidanges périodiques ;
 - Les besoins en maintenance sont très réduits.
- ✓ Le moteur de Stirling est un moteur multi-combustible qui fonctionne avec plusieurs sources de chaleur :
 - La chaleur provenant de la combustion de toute sorte de combustible : solide, liquide, gazeux ou biomasse ;
 - L'énergie solaire ;
 - L'énergie nucléaire.
- ✓ Ces moteurs répondent aux exigences environnementales, grâce à la combustion externe qui permet de minimiser les rejets de gaz polluants tel que : l'oxyde d'azote ;
- ✓ Le moteur Stirling est un moteur très performant, ayant des performances énergétiques comparables à ceux des meilleurs moteurs Diesel de mêmes puissances ;
- ✓ Les coûts de fabrication en grande série sont plus faibles que les moteurs à combustion interne.

1.5.2. Inconvénients

- ✓ Les moteurs de Stirling présentent des problèmes d'étanchéité difficiles à résoudre surtout à haute pression ;
- ✓ Moteurs Stirling ont souvent une réponse plus lente à une augmentation ou une diminution de la charge.

1.6. Les différents types du moteur Stirling

La classification des moteurs de Stirling peut se faire selon plusieurs critères, ils sont le plus souvent classés en fonction de leur configuration géométrique. Selon ce critère, il y a trois types principaux de moteur Stirling : le moteur alpha, le moteur bêta et le moteur gamma.

1.6.1. Configuration alpha

Ces moteurs sont dit bicylindre et se distinguent des autres conceptions par le couplage cinématique des deux chambres : celle d'expansion et celle de compression permettant au fluide de passer d'un cylindre à l'autre en passant par un récupérateur de chaleur. Le type alpha présenté sur la figure I.7, est d'invention plus récente que les deux autres types.

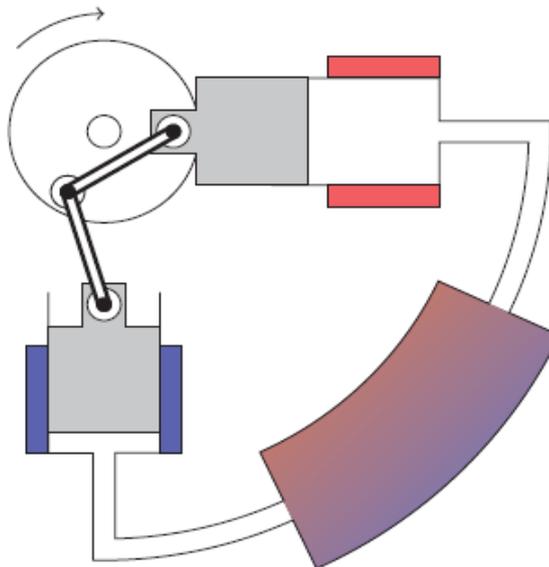


Figure 1.7: Moteur Stirling de configuration alpha(3)

Dans le cas de la configuration alpha, le fluide de travail effectue des allés et retours entre les deux cylindres (compression-détente), ce va-et-vient est engendré par le mouvement des deux pistons. Le gaz de travail, se déplace de façon répétitive entre la chambre de compression et la chambre de détente, en passant par le régénérateur, ce déplacement permet le réchauffement et le refroidissement cyclique du gaz ce qui produit de la puissance lorsqu'il se détend et exerce du travail sur les pistons.

On peut dénombrer plusieurs avantages d'un moteur alpha qui sont en relation avec sa configuration géométrique :

- ✓ Cette configuration permet une conception simple du moteur Stirling facile à travailler avec, car la séparation des deux chambres empêche les deux fluides chaud et froid de se mélanger.

- ✓ Avec un moteur de type alpha on obtient en général un ratio puissance-volume élevé comparativement aux deux autres architectures

Cependant, certains problèmes peuvent être rencontrés lors de la construction du moteur, parmi les plus grandes préoccupations ; la nécessité de connexions entre les deux pistons augmente le nombre requis des pièces, il en résulte une augmentation du risque de fuites autour des articulations et des connexions, il faut donc assurer un bon assemblage afin d'obtenir l'étanchéité du moteur.

Comme on vient de le voir avec les définitions, dans un moteur alpha seul le déplaceur est soumis aux fortes températures. Ainsi la nécessité de choisir des matériaux (acier en général) possédant une bonne tenue en pression et à température élevée pour les joints et le piston lui-même ne concerne que le déplaceur et le cylindre qui lui est associé. Sur la figure 1.7 un schéma de moteur Stirling alpha (rotation dans le sens horaire). (7)

Le fonctionnement d'un moteur Stirling alpha passe par quatre phases comme un moteur monocylindrique comme le montre la figure 1.8 :

Le couplage cinématique permet au gaz de travail de se déplacer entre les deux pistons en traversant un régénérateur. Ce régénérateur récupère l'énergie du gaz chaud lorsque cet air est expulsé vers la source froide et la transmet dans le trajet inverse. Ceci permet d'éviter les pertes calorifiques. Cependant, le rendement du moteur Stirling Alpha n'est que de 0.45 ce qui est inférieur au rendement théorique du moteur Stirling. Mais il reste supérieur aux moteurs à explosion.

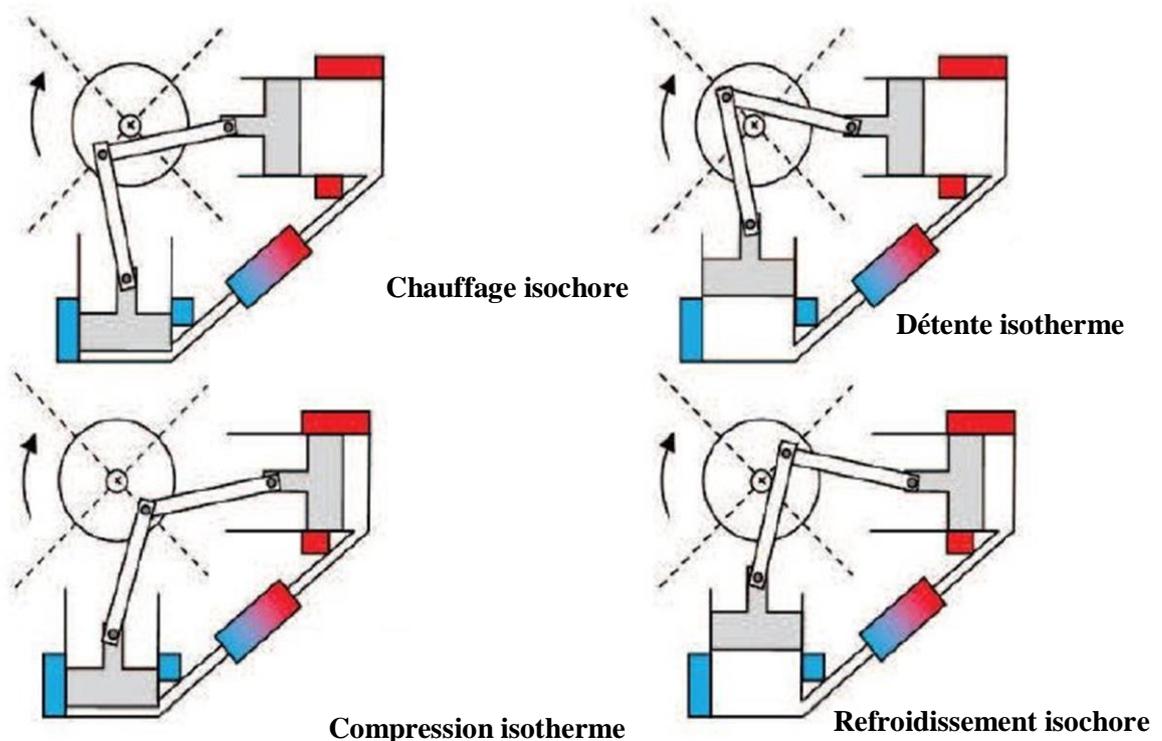


Figure 1.8 : Moteur Stirling ayant une architecture alpha représenté au début des 4 temps de son cycle(3)

1.6.2. Configuration bêta

Les moteurs de type bêta se distinguent des moteurs type alpha par l'absence de chambres séparant la chambre de compression de celle de détente. Dans un type bêta, l'expansion et les actions de compression sont réalisées dans le même cylindre avec un piston de travail et un déplaceur pour pouvoir tirer la puissance du moteur. La présence des deux pistons dans le même cylindre, rend le moteur de type bêta plus compact que le moteur alpha.

Le moteur bêta est un moteur monocylindre, son seul cylindre contient la chambre froide et la chambre chaude. Ce moteur est composé d'un piston moteur et d'un déplaceur qui déplace le volume du gaz de la partie froide à la partie chaude.

Un piston de travail : utile pour la compression et la détente,

- Un piston déplaceur : pour mettre successivement le gaz en contact avec la source froide puis la source chaude

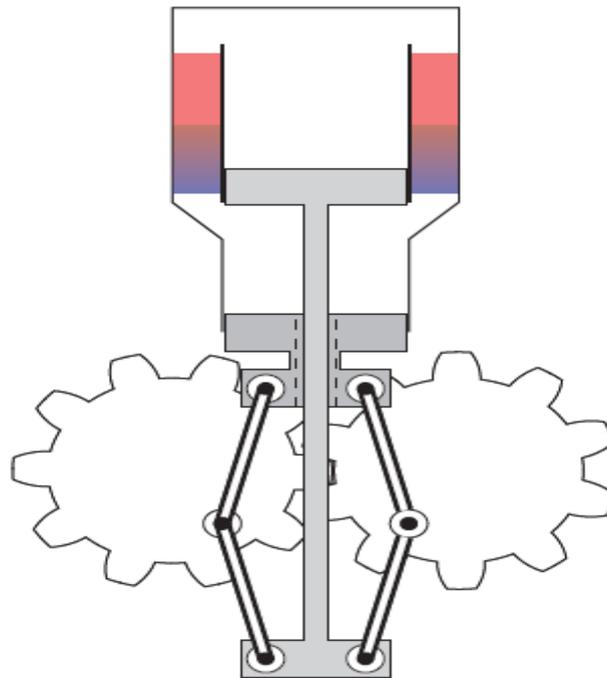


Figure 1.9 : Moteur Stirling d'architecture de type beta (3)

Par construction la bielle du déplaceur doit traverser le piston de travail ce qui rend les moteurs de type β plus délicats à concevoir. Cette architecture a une importance historique puisque c'est l'architecture choisie par le pasteur Stirling en 1816 pour son brevet et sa réalisation en 1818 comme on peut le voir sur la figure 1.10a. Cette figure montre un β avec un embiellement classique car sur la figure 1.9 le moteur a un embiellement rhombique. Elle montre également, et c'est ce que fit Stirling, la surface cylindrique du déplaceur, par son importance du fait de la longueur du piston, faite en métal, sert de fonction régénérative : il n'est pas nécessaire d'ajouter de régénérateur puisqu'il est déjà présent avec le déplaceur.

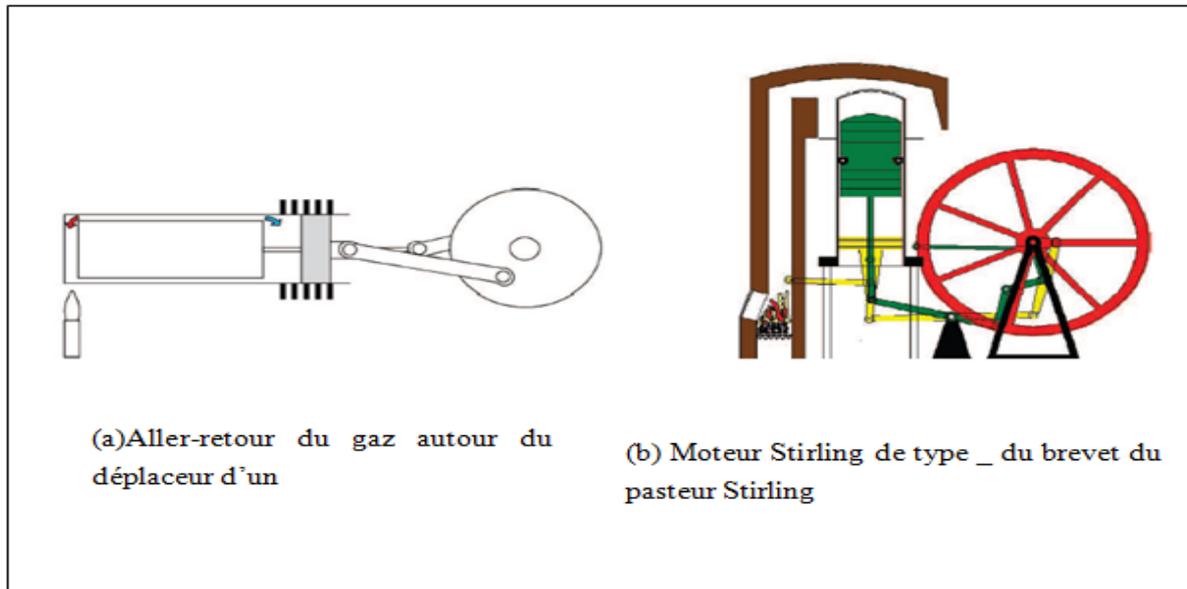


Figure 1.10 : Moteur Stirling de type beta (3)

Le piston de travail et le déplaceur sont donc ici coaxiaux, contrairement au moteur α où les 2 pistons sont des pistons de travail, dans un β , le déplaceur n'a que le rôle explicitement donné par son nom, il déplace le gaz. Le but du piston de travail est de générer de la puissance alors que celui du déplaceur est de déplacer le gaz de travail en va-et-vient au travers de la tête chaude, du régénérateur, et de la tête froide. Ainsi, le travail exercé par les forces de pression sur le déplaceur est très faible comparé à celui des forces agissantes sur le piston de travail.(3)

Le piston de travail, le déplaceur et la bielle de déplaceur sont rendus étanches par des joints au niveau de leurs axes pour éviter les fuites du gaz de travail. Le joint du déplaceur est placé à son extrémité la plus proche de l'espace de compression dans le but d'éviter son contact direct avec le gaz de travail chaud (dans la zone de détente). Ainsi il n'est pas nécessaire que ce joint soit résistant aux températures élevées. Il n'est pas non plus nécessaire que les joints entre la bielle du déplaceur et le piston de travail soient résistants en température puisqu'ils ne sont exposés qu'aux températures froides du moteur. Ils sont en effet du côté de l'espace de compression. (3)

Certes, ce moteur présente certains avantages par rapport aux autres configurations, cependant il a l'inconvénient de la difficulté de la conception du déplaceur. Il n'est, tout comme le régénérateur, pas seulement soumis aux températures élevées qui peuvent régner dans le moteur mais également à la température froide de l'espace de compression. Il nécessite l'utilisation de matériaux capables de supporter des contraintes thermomécaniques importantes.

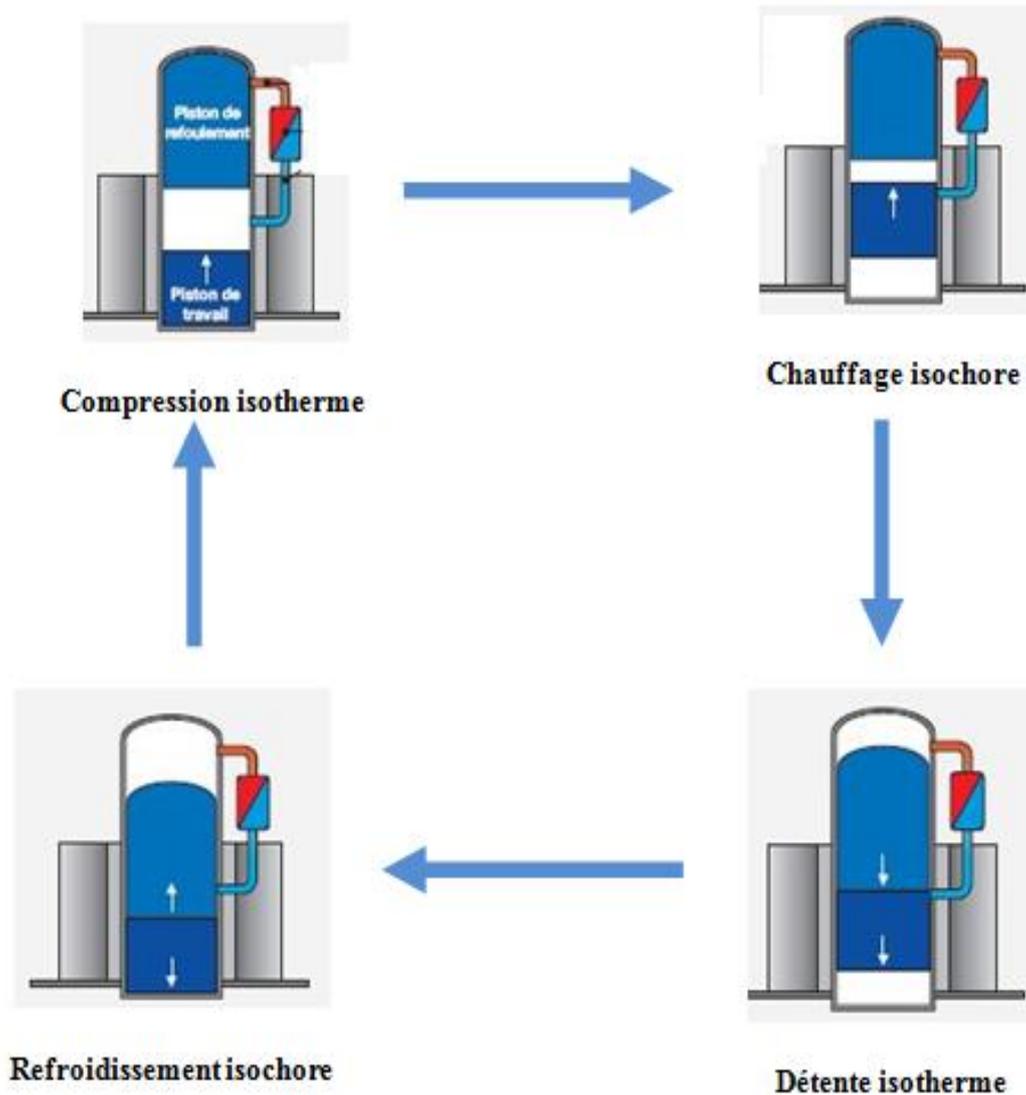


Figure 1.11 : Moteur Stirling ayant une architecture bêta représentée aux 4 temps de son cycle.(9)

1.6.3. Configuration gamma

Ce moteur est bicylindre, il est composé d'un piston et d'un déplaceur comme le montre la figure 1.12. Le déplaceur déplace le gaz d'une zone à l'autre. Le gaz subit des variations de températures qui engendrent à leur tour des variations de pression qui mettent en mouvement le piston moteur. Le fonctionnement de ce moteur ressemble à un moteur de configuration Beta, la seule différence c'est la présence de deux cylindres. Seul le piston moteur 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 températures que le gaz subit, engendrent des variations de pressions qui mettent en mouvement le piston moteur.

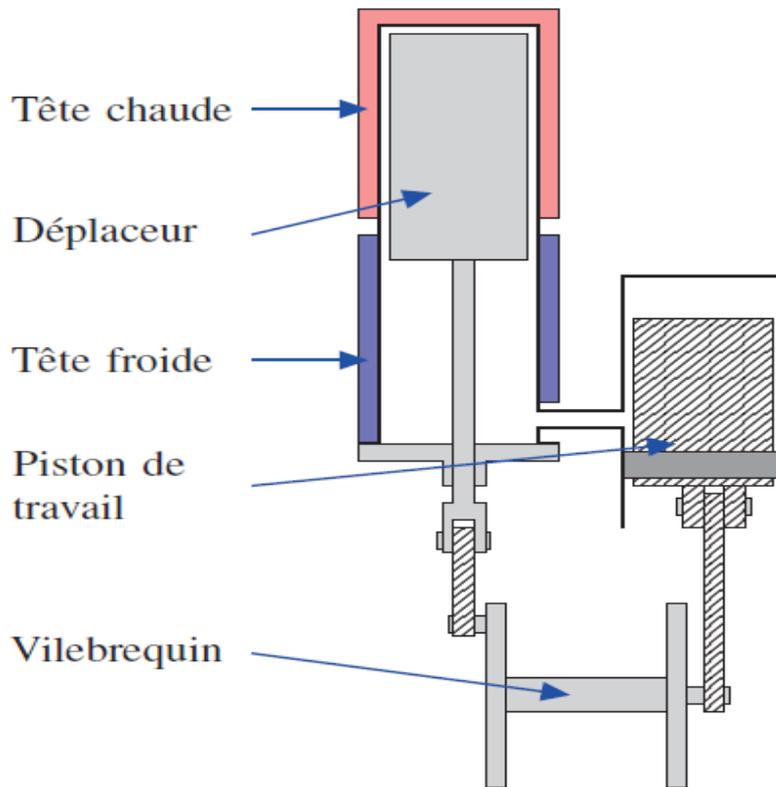


Figure 1.12 : Moteur de Stirling d'architecture de type Gamma (3)

a. Avantages

- ✓ Les deux pistons se situent dans des cylindres différents, ce qui pallie le problème d'étanchéité ;
- ✓ Il est plus facile de fabriquer l'embellage et les liaisons puisque le piston de travail et le déplaceur sont éloignés l'un de l'autre (au lieu d'être alignés dans le même cylindre).

b. Inconvénient

- ✓ Présence d'un volume mort assez important dans la chambre de compression;
- ✓ Cette configuration produit un taux de compression inférieur aux architectures alpha et beta et donc un rendement plus faible.

1.7. Comparaison entre les différentes architectures

Le choix du moteur à utiliser est une étape très importante, car le moteur choisit doit obéir aux exigences de puissance à produire et de la facilité de fabrication et de fonctionnement.

Tableau 1.1 : Comparaison entre les différentes configurations d'un moteur Stirling

Configurations	Avantages	Inconvénients
Alpha	✓ Taux de compression élevé ; ✓ Conception très simple.	✓ Problème d'étanchéité.
Beta	✓ Taux de compression moyen.	✓ Conception délicate.
Gamma	✓ Bonne étanchéité; ✓ Simple construction.	✓ Taux de compression lamentable.

La comparaison entre les 3 types d'architectures sera basée sur le taux de compression et donc sur la puissance produite par chaque configuration, cela nécessite une bref définition du taux de compression:

Le taux ou coefficient de compression k : est défini ici comme le rapport du volume maximal que le gaz de travail peut occuper dans le moteur au cours d'un cycle par le volume minimal qu'il occupera pendant ce même cycle : $k = \frac{V_{max}}{V_{min}}$

On a naturellement comme contrainte $k > 1$

La comparaison entre les deux configurations bêta et gamma, montre une grande ressemblance entre elles, du point de vue principe, cependant la conception du moteur γ est moins exigeante que celle de β . La contrepartie est qu'en général on extrait moins de puissance d'un moteur γ que d'un moteur β . La faible puissance produite par le moteur γ fait que celui-ci soit retenue pour les tests expérimentaux sans application pratique. A partir de ce qu'on vient de citer, on peut dire que l'architecture γ est peu intéressante si on veut obtenir de la puissance.

Pour des températures de source chaude et froide données, et pour des cylindrées identiques, les moteurs α ont des taux de compression plus élevés que ceux des moteurs de type β . Cela a pour conséquence de pouvoir extraire plus de puissance d'un moteur α car il tournera plus rapidement.

Le moteur choisis sera de configuration alpha, or il est très important de tenir compte de la difficulté de fabrication car ces moteurs exigent plus de rigueur de conception et de fabrication.

1.8. Exemples de réalisation et d'applications

Le moteur de Stirling étant un moteur qui date de très longtemps, mais qui n'est pas très utilisé ou très fabriqué. Malgré-cela, c'est un moteur très connu et qui connaît une

révolution, car il fait l'objet de plusieurs d'étude du aux avantages qu'il présente surtout ceux concernant son rendement qui est très important.

Voici un tour d'horizon des applications pour avoir une vue d'ensemble de ce qui a été fait avec un moteur Stirling depuis près de 2 siècles. Les moteurs Stirling sont utilisés dans beaucoup de domaines malgré la méconnaissance qu'en a le public. On peut ainsi répertorier les usages suivants :

1. Un ventilateur de marque Ky-Ko a été fabriqué au Pakistan jusqu'en 1997. Il fonctionnait avec un Stirling chauffé à l'essence.
2. Cryogénie : On utilise dans ce cas la réversibilité du moteur Stirling afin de produire du froid de façon industrielle. On utilise ce procédé pour liquéfier des gaz.
3. Groupe électrogène : Développé et commercialisé par la société Philips après la seconde guerre mondiale, ce groupe avait une puissance de 150 watts.
4. Motorisation automobile : dans la période 1940-1980 pendant laquelle la société Philips étudiait les applications possibles du moteur Stirling, une de celles-ci a consisté à équiper une Ford Torino, mais cette réalisation ne fut pas commercialisée et le projet a été abandonné.
5. Le modèle ST-5 de la Société « Stirling Technology » est une application très demandée dans les pays en voie de développement. On envisageait même la fabrication du moteur sur place.
6. Recherche et exploitation océanographique : le SAGA (Sous-marin d'Assistance à Grande Autonomie).
7. Sous-marin militaire suédois : le moteur sert de générateur auxiliaire. Il a été choisi pour son caractère silencieux. Le moteur Stirling a été intégré dans un système dit « AIP », le tout est développé par la société Kockums et est monté sur le sous-marin Nakem.
8. Applications solaires : parabole réfléchissante concentrant les rayons du soleil au foyer de la parabole où est installé le moteur Stirling.
9. Bateaux de plaisance : le moteur Stirling commercialisé par la Société Whispergen permet de faire de la cogénération (production d'électricité et d'eau chaude) à bord d'un bateau ce qui permet un plus grand confort par le fait que le Stirling génère moins de bruit et de vibration qu'un groupe avec un moteur à combustion interne.
10. Domaine spatial : (publication du projet fin 2009). La sonde Titan Mare Explorer (TiME) à l'étude depuis deux ans par la NASA voguerait sur " Ligeia Mare ", une vaste étendue de méthane liquide située au pôle nord du satellite de Saturne.

Lancement envisagé en janvier 2016 et amerrissage en juin 2023. TiME utilisera un générateur ASRG (Advanced Stirling Radioisotope Generator) utilisant du plutonium comme source d'énergie.

Étant dans un stade de développement, on peut bien dénombrer quelques applications de ce moteur dans le domaine spatial :

1.8.1. Le ASC : un générateur électrique pour les sondes de la NASA

La NASA a développé des moteurs Stirling pour différentes applications spatiales. Des études ont été menées avec un chauffage de la tête chaude du moteur au moyen d'un collecteur solaire mais aussi avec une source de plutonium. Ici on présente le moteur Advanced Stirling Converter (ASC) chauffé par une source de plutonium en tête chaude, partie supérieure sur la photo, la source n'est évidemment pas présente ici.



Figure 1.13: Le ASC de Sunpower (3)

Une étude sur l'ASC fabriqué par Sunpower et Rocketdyne. L'objectif de cette étude était d'augmenter la pression dans le moteur Stirling ainsi que la température de la tête chaude. Habituellement la tête chaude était faite en IN718 qui pouvait travailler à 650°C. Le matériau de remplacement envisagé était le MarM-247 à base nickel. Ce matériau a nécessité la mise au point de soudures par électrodéposition. Après des tests positifs cette étude a

permis un fonctionnement du moteur à 850°C avec la mise en service à partir de 2005 du Marm-247. Il faut noter que la tête chaude dont la paroi est de 1 mm a nécessité, pour la tenue thermomécanique, une optimisation de la taille des grains de l'alliage. (3)

1.8.2. Le K508 : Un Stirling sur Mars

Le Stirling présenté ici n'est pas un exemple de moteur mais de pompe à chaleur basse température (« cryocooler » en anglais), domaine où le Stirling dépasse souvent ses concurrents. Ce Stirling sert à maintenir une ambiance de fonctionnement d'un capteur placé sur un rover qui a atterri en 2012 pour une mission scientifique d'exploration planétaire.

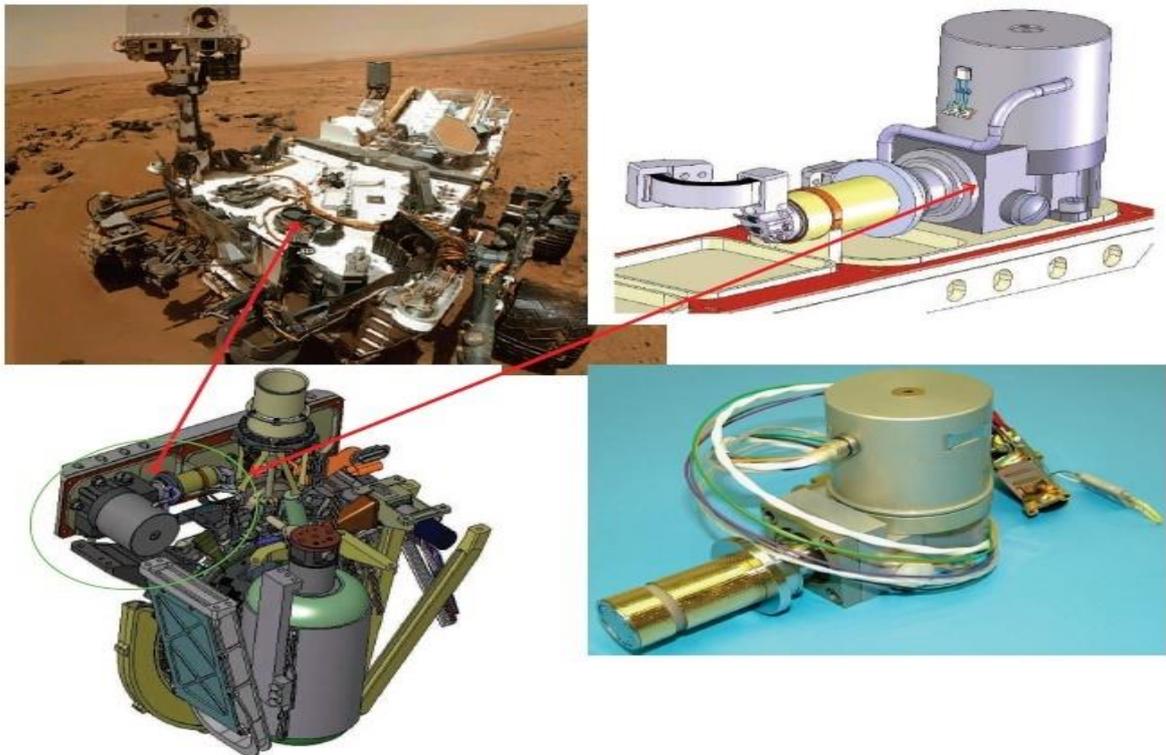


Figure 1.14: un Stirling sur Mars K508(3)

Le Rover Curiosity qui a atterri le 8 Août 2012 était équipé du système CheMin qui permet de détecter les substances chimiques ainsi que les minéraux présents dans le sol. Le système CheMin est refroidi par un système de réfrigération cryogénique, le model K508 de la société RICOR (10). Ce dernier est un système de type Stirling actionné par un moteur Brushless (c'est-à-dire sans « contact à charbon »).

1.9. Choix du fluide de travail

Les fluides de travail couramment utilisés dans des moteurs Stirling se composent de l'air, de l'hélium, ou de l'hydrogène. La sélection d'un fluide de travail particulier est basée sur les propriétés des fluides suivantes : conductivité thermique, chaleur spécifique, densité, et

viscosité. Le fluide possédant une plus grande conductivité thermique, une densité et une chaleur spécifique plus élevée permettent l'amélioration des capacités de transfert de chaleur du gaz et de l'efficacité des échangeurs de chaleur. Un fluide de travail avec une plus faible densité et une viscosité réduira la chute de pression à travers le régénérateur, l'aire de travail, et l'espace vide et il améliorera par conséquent le rendement du moteur.

Une simple comparaison entre les trois fluides, conduit à l'hydrogène et l'hélium car ils possèdent une plus grande conductivité thermique et une capacité thermique par rapport à l'air suivant les indications du figure 1.15 et figure 1.16 respectivement.

Chacun des quatre procédés de cycle de Stirling dure moins de 10 ms dans un moteur, ainsi le choix du fluide de travail dépend hautement de la conduction thermique du gaz (11). Une plus grande chaleur spécifique pour le fluide de travail améliore également l'efficacité de l'énergie de transfert vers le régénérateur.

L'hydrogène a le facteur le plus élevé pour le transfert thermique avec une valeur de $104 \text{ kJ}^{1.5}/(\text{kg}^{0.5} \cdot \text{K}^{1.5} \cdot \text{kmol})$, puis hélium avec 44, et finalement air à 29 (12). L'hydrogène devrait être le fluide de travail le plus effectif au transfert de chaleur, qui est supporté avec une comparaison des performances avec de l'hélium.

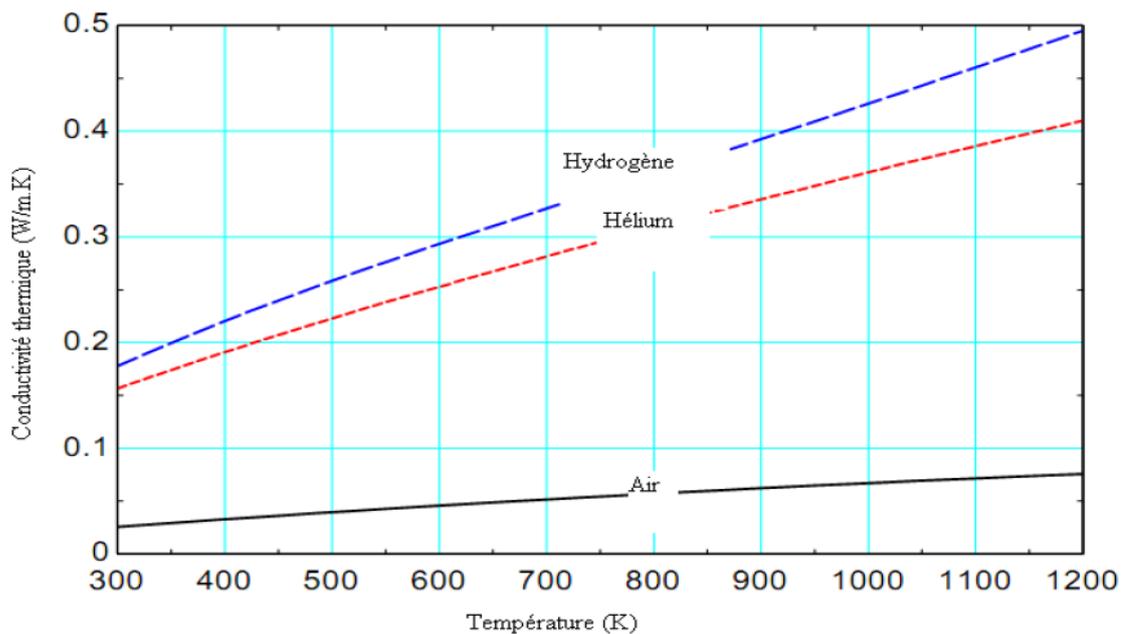


Figure 1.15 : Conductivités thermiques des fluides de travail en fonction de la température (13)

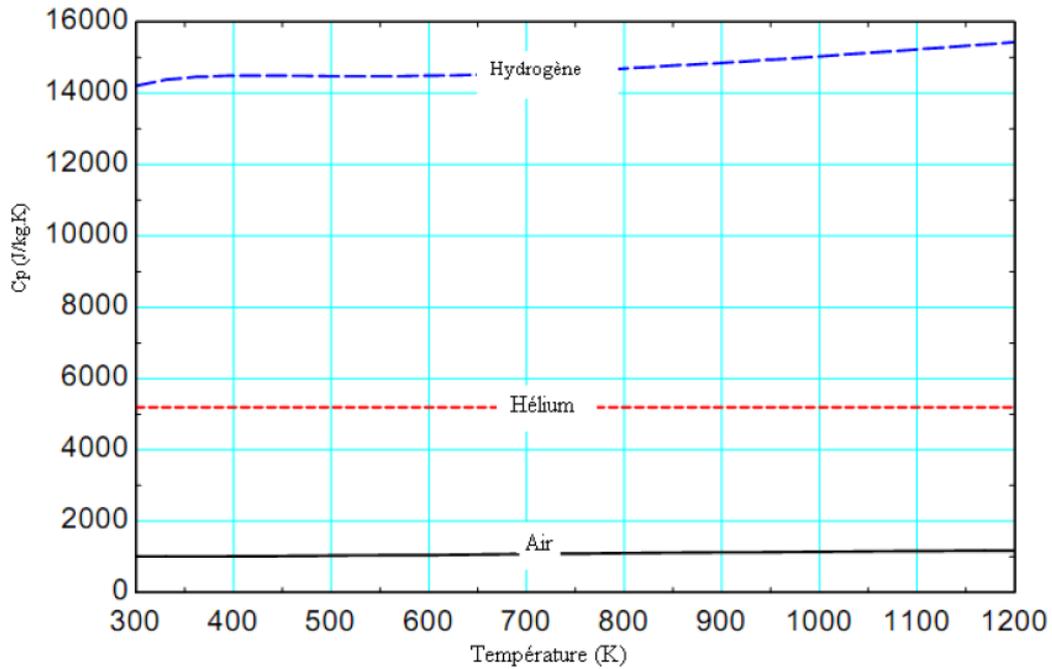


Figure 1.16: Chaleurs spécifiques des fluides de travail en fonction de la température(13)

Les pertes de pression dans les aires de travail et le régénérateur dépendent de la viscosité et de la densité du fluide de travail. Un fluide de travail avec une faible viscosité et une densité aura comme conséquence des gouttes de plus basse pression, améliorant principalement le rendement thermique. Une comparaison des viscosités et des densités pour les fluides de travail est donnée sur les figures 1.17 et 1.18 respectivement. (14)

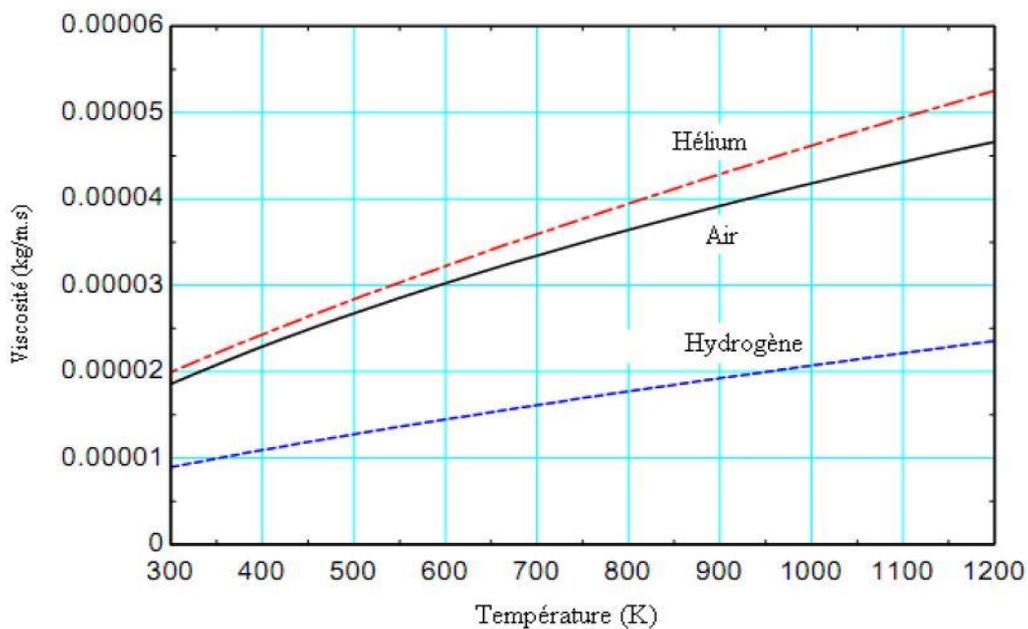


Figure 1.17: Viscosités des fluides de travail en fonction de la température(13)

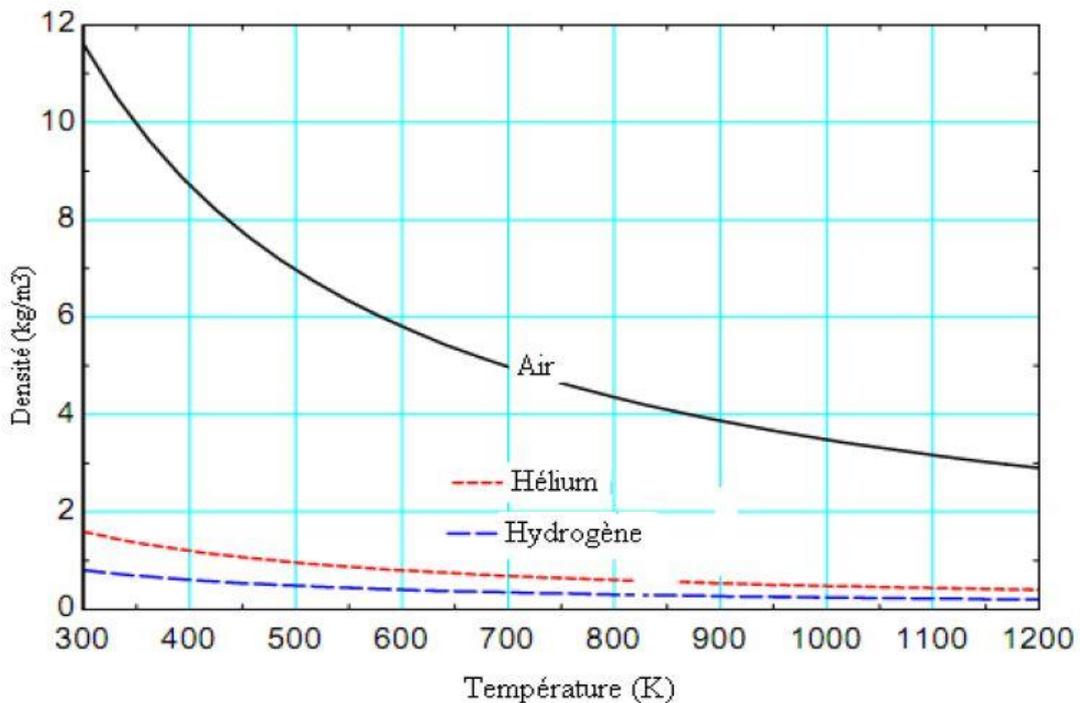


Figure 1.18: Densités des fluides de travail en fonction de la température (13)

L'hydrogène et l'hélium présentent beaucoup d'avantage qui font d'eux les meilleurs fluides pour un moteur de Stirling, mais ils présentent d'autres inconvénients tels que les pertes de sceau qui seront plus grandes et plus difficiles à contrôler.

L'hydrogène présente d'autres désavantages, car celui-ci peut absorber dans différents matériaux provoquant la fragilisation par l'hydrogène, et il est combustible quand il est en contact avec l'oxygène.

Pour des températures supérieures à 200°C (dans notre cas d'étude on a une température de 650°C) la fragilisation de l'hydrogène par décarburation peut survenir et s'accompagne de formation de méthane. On peut aussi avoir à des formations de soufflures pouvant conduire à des fissurations ce qui peut engendrer une augmentation de pression dans des poches à l'intérieur du métal. Une autre formes de fragilisation peut apparaitre est celle de la fragilisation de pièce sous contraintes par de l'hydrogène dissous, celle-ci est de loin la dangereuse car sa propagation est plus rapide.

Ainsi, dans notre perspective d'industrialisation et par mesure de sécurité et de protection du moteur, on s'est naturellement tourné vers l'utilisation de l'hélium, second gaz après l'hydrogène en termes de performance.

1.10. Conclusion

Après avoir défini le moteur ainsi que ses multiples avantages, nous passons maintenant à une étude de dimensionnement d'un cogénérateur à module de Stirling, afin de mettre en valeur notre choix de ce moteur.

CHAPITRE 2 :
DIMENSIONNEMENT D'UN
MOTEUR DE STIRLING

2.1. Introduction

Une fois la configuration du moteur et le type de fluide ont été choisis, nous nous permettons de lancer un calcul de dimensionnement afin de définir les caractéristiques de notre moteur Stirling.

2.2. Description d'un cycle de Stirling

Les moteurs de Stirling présentent les mêmes processus d'un moteur thermique: compression, chauffage, expansion et refroidissement. Ces derniers fonctionnent selon un cycle thermodynamique fermé, le gaz utilisé comme fluide de travail, subit des compressions et des expansions cycliques dans des chambres séparées avec variation du volume.

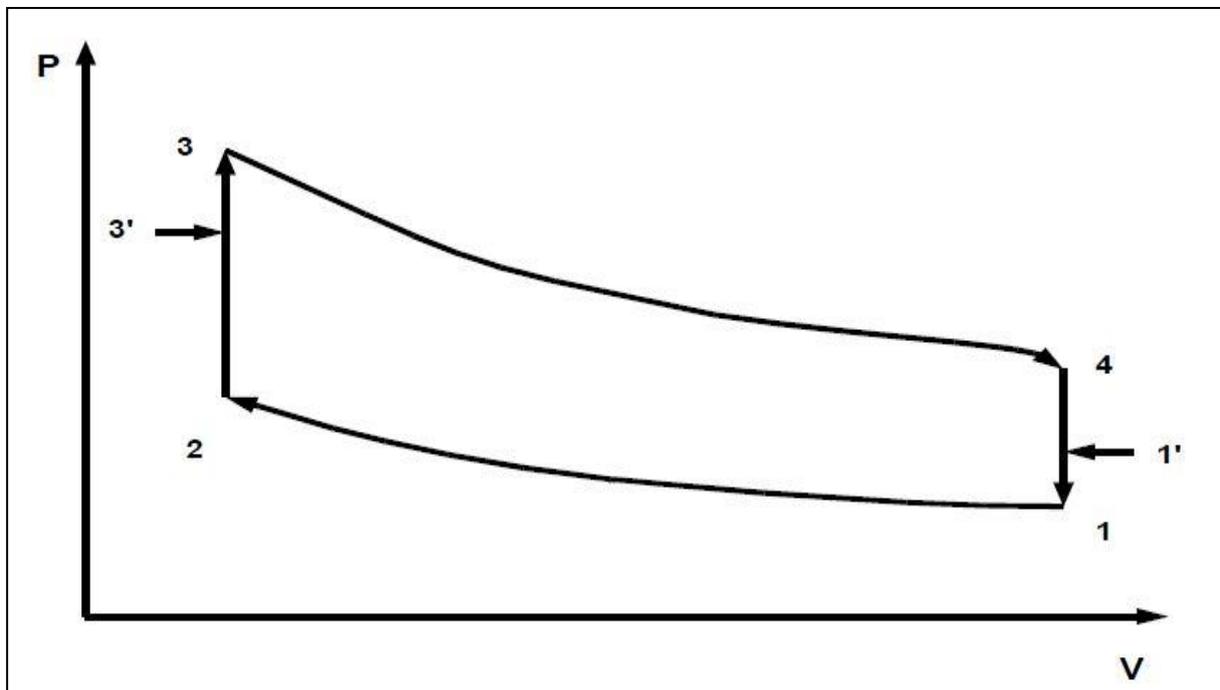


Figure 2.1 : Diagramme p-V correspondant à un cycle de Stirling

Le cycle thermodynamique de Stirling représenté sur la figure II.1 peut être décrit de la manière suivante :

- Compression isotherme (1-2): un piston comprime le fluide de travail à l'intérieur du volume de compression, tandis que l'autre piston est stationnaire. Cela augmente la pression du système à une température constante.
- Chauffage isochore (2-3) : Les deux pistons se déplacent en opposition afin de transférer le fluide de travail du volume de compression vers le volume d'expansion. Le régénérateur étant dans une situation idéale, fait augmenter la température du fluide à 3' en utilisant la chaleur stockée à partir processus 4-1. Le reste est fourni par la chaleur externe.

- c. Détente isotherme (3-4) : Le piston d'expansion est déplacé par le volume d'expansion, qui est maintenu à une température constante grâce à une source de chaleur externe. A ce stade-là, le fluide de travail effectue un travail sur le piston.
- d. Refroidissement isochore (4-1) : les deux pistons travaillent pour transférer le fluide de la zone d'expansion vers l'espace de compression. Le régénérateur absorbe la chaleur du fluide, ce qui réduit la température du fluide.

Pour un régénérateur imparfait, la température du fluide de travail à l'entrée et à la sortie du régénérateur correspond à T_1 et T_3 , respectivement. Des échangeurs externes doivent alors augmenter la température de T_3 à T_3 et la diminuer de T_1 vers T_1 . Le développeur de moteur Stirling doit pouvoir évaluer l'efficacité de son régénérateur et d'analyser cette imperfection pour calculer le rendement final de sa réalisation.

Le volume mort correspond à la somme des volumes du fluide de travail contenus dans les échangeurs, le régénérateur ainsi que dans les raccords entre ces différents éléments. Il est évident qu'un moteur Stirling contient des volumes morts irréductibles. En pratique, on trouve des moteurs avec un volume mort représentant 58% du volume total.

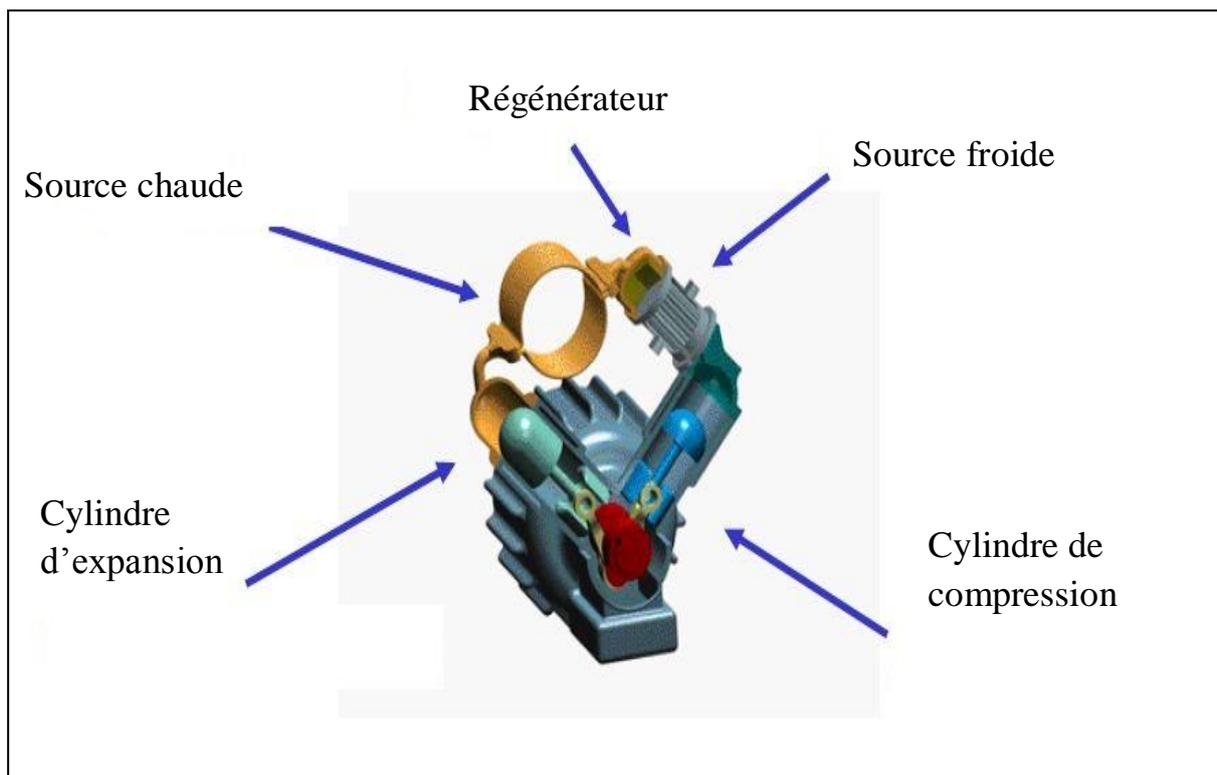


Figure 2.2 : Schéma d'un moteur de Stirling de type α (4)

2.3. Les volumes morts

Parmi les contraintes qui réduisent les performances d'un moteur de Stirling ; la présence de volumes morts qui sont des volumes non entraînés par les pistons et qui ne contribuent pas au fonctionnement de ces derniers.

Dans le cadre de cette étude, nous allons repérer trois zones qui peuvent contenir des volumes morts et qui sont pour un moteur de Stirling : le réchauffeur, le refroidisseur et le régénérateur représentés dans ce qui suit par V_{Mc} , V_{Mr} et V_{Mf} respectivement.

Le volume mort total s'exprime par :

$$V_{MT} = V_{Mc} + V_{Mr} + V_{Mf} = (k_{Mc} + k_{Mr} + k_{Mf}) * V_{MT} \quad (2.1)$$

Où :

- ✓ $k_{Mc} = \frac{V_{Mc}}{V_{MT}}$ Le rapport du volume mort chaud sur le volume mort total ;
- ✓ $k_{Mr} = \frac{V_{Mr}}{V_{MT}}$ Le rapport du volume mort du régénérateur sur le volume mort total ;
- ✓ $k_{Mf} = \frac{V_{Mf}}{V_{MT}}$ Le rapport du volume mort froid sur le volume mort total.

Il est important de connaître la proportion du volume mort d'un moteur, celle-ci est calculée par la relation suivante :

$$k_{MT} = \frac{V_{MT}}{V_T}$$

Et donc le volume mort peut être calculé ainsi :

$$V_{MT} = k_{MT} * V_T = (V_{MT} + V_D + V_P) * k_{MT} \quad (2.2)$$

Ou : V_D et V_P représentent les volumes en mètres cubes déplacés par le piston déplaceur et le piston de travail.

Le volume mort d'un moteur Stirling est souvent exprimé en référence au volume total de gaz déplacé, on définit alors un coefficient qui est le rapport entre le volume mort et le volume déplacé :

$$V_{MT} = k_{MDP} * (V_D + V_P) \quad (2.3)$$

On peut définir alors les relations suivantes :

$$k_{MDP} = \frac{k_{MT}}{1-k_{MT}} \quad \text{Et} \quad k_{MT} = \frac{k_{MDP}}{1+k_{MDP}} \quad (2.4)$$

2.4. Régénérateur

Une des particularités d'un moteur Stirling, l'addition d'un régénérateur qui améliore le rendement du moteur par un pré- refroidissement du fluide de travail lors de son déplacement

à partir de l'espace de dilatation de la chambre de compression, et le préchauffage du fluide de travail lors de son déplacement à partir de l'espace de compression dans l'espace d'expansion.

Le choix de ce régénérateur doit se baser sur son efficacité afin de maximiser le rendement du moteur, on définit par la suite un facteur e qui sera égal à 1; pour une efficacité de 100% dans le cas d'un régénérateur idéal, et aura la valeur zéro pour une absence totale du régénérateur, ce facteur dépend des différentes températures et s'exprime par :

$$e = \frac{T_3' - T_1}{T_3 - T_1} \quad (2.5)$$

La température du gaz de travail à la sortie du régénérateur peut être calculée à partir de l'efficacité de celui-ci. Cela nous donne alors:

$$T_3' = T_1 + e * (T_3 - T_1) \quad (2.5a)$$

En considérant, un régénérateur avec la même efficacité de chauffage et de refroidissement $Q_{2-3'} = Q_{4-1'}$ on aura une température d'entrée égale à :

$$T_1' = T_3 + e * (T_1 - T_3) = T_3 - e * (T_3 - T_1) \quad (2.6)$$

Pour un moteur Stirling contenant un volume mort notable, il est important d'avoir une température correcte du fluide de travail au niveau du régénérateur. La température effective du gaz contenu dans le volume mort du régénérateur peut être déterminée par une simple moyenne arithmétique:

$$T_R = \frac{T_3' + T_1'}{2} \quad (2.7)$$

En remplaçant T_3' et T_1' par leur expression, l'expression de T_R devient :

$$T_R = \frac{T_3 + T_1}{2} \quad (2.7a)$$

En utilisant la moyenne arithmétique, la température effective du régénérateur ne dépend que des deux températures celle de la source chaude et de la source froide.

2.5. Equations d'état

Les équations d'état que nous allons adopter sont celles qui correspondent à un gaz parfait pour les raisons suivantes :

- Le gaz de travail en question est l'Hélium qui est un gaz inerte;
- Les transformations se déroulent à basse pression et donc on peut bien négliger les interactions intermoléculaire;
- Les températures de la source froide et de la source chaude sont loin de la température critique de l'Hélium.

En tenant compte de toutes ces conditions, nous considérons l'Hélium comme un gaz parfait qui obéit à la loi des gaz parfaits.

Nous définissons les différents paramètres qui seront pris en considération aux calculs :

Nous avons les espaces chaud et froid, respectivement V_c et V_f ou les températures sont respectivement T_3 et T_1 on a aussi les différents volumes morts V_{Mc} , V_{Mf} et V_{Mr} et la température du régénérateur T_R le calcul de la masse du fluide nous donne :

$$P = \frac{mR}{\frac{V_c}{T_3} + \frac{V_{Mc}}{T_3} + \frac{V_{Mr}}{T_R} + \frac{V_{Mf}}{T_1} + \frac{V_f}{T_1}} = \frac{mR}{\frac{V_c}{T_3} + K + \frac{V_f}{T_1}} \quad (2.8)$$

Ou :

$$K = \frac{V_{Mc}}{T_3} + \frac{V_{Mr}}{T_R} + \frac{V_{Mf}}{T_1} = \frac{k_{Mc}}{T_3} + \frac{2*k_{Mr}}{T_3+T_1} + \frac{k_{Mf}}{T_1} \quad (2.9)$$

2.5.1. La compression isotherme (1-2)

Pendant cette phase, le fluide de travail subit une compression et passera du volume $V_{f1} = V_p + V_D$ au volume $V_{f2} = V_D$

Les indices (1 et 2) représentent les positions (1 et 2) sur le diagramme p-v.

Pendant ce processus une quantité de chaleur est rejetée, celle-ci est calculée en utilisant la première loi de la thermodynamique :

$$\begin{aligned} Q_{1-2} &= -W_{1-2} = \int_{V_{f1}}^{V_{f2}} p dV_f \\ &= mRT_1 \int_{V_{f1}}^{V_{f2}} \frac{dV_f}{V_f + KT_1} \\ &= mRT_1 \ln \frac{V_{f2} + KT_1}{V_{f1} + KT_1} \\ Q_{1-2} &= mRT_1 \ln \frac{V_D + KT_1}{V_p + V_D + KT_1} \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.5.2. Le chauffage isochore (2-3)

Durant cette phase se déroulant à volume constant, la quantité de chaleur consommée sera égal à :

$$\begin{aligned} Q_{2-3} &= mC_v(T_3 - T_2) \\ Q_{2-3} &= mC_v(T_3 - T_1) \end{aligned} \quad (2.11)$$

C_v La chaleur spécifique à volume constant (j/kg K) supposée être une constante

La chaleur mise en jeu est fonction de l'efficacité du régénérateur, on peut définir trois cas :

- Sans régénérateur, cet apport de chaleur est obtenu depuis une source externe ;
- Avec un régénérateur idéal, cet apport proviendrait uniquement de celui-ci ;
- Avec un régénérateur imparfait ayant une efficacité e telle qu'une partie de cette chaleur est restituée par le régénérateur, la chaleur qui manque sera apportée par une source externe.

On étudiera dans ce qui suit le troisième cas qui est le plus fréquent :

- ✓ La chaleur restituée par le régénérateur sera égale à :

$$\begin{aligned} Q_{2-3'} &= mC_v(T_3 - T_{3'}) \\ Q_{2-3'} &= emC_v(T_3 - T_1) \end{aligned} \quad (2.12)$$

- ✓ la chaleur apportée par la source externe pendant 3'-3 devient :

$$Q_{3-3'} = (1 - e)mC_v(T_3 - T_1) \quad (2.13)$$

Contrairement à la quantité de chaleur rejetée lors de la compression isotherme qui ne dépend que du coefficient K et donc des volumes morts, la chaleur apportée pour le chauffage isochore dépend de l'efficacité du régénérateur.

2.5.3. L'expansion isotherme (3-4)

Durant cette transformation le gaz sera déprimé isothermiquement, de telle sorte que le volume chaud contenant le gaz de travail varie de $V_{c3} = V_D$ Au volume $V_{c4} = V_D + V_P$

$$\begin{aligned} Q_{3-4} &= -W_{3-4} = \int_{V_{c3}}^{V_{c4}} p dV_c \\ &= mRT_3 \int_{V_{c3}}^{V_{c4}} \frac{dV_c}{V_c + KT_3} \\ &= mRT_3 \ln \frac{V_{c4} + KT_3}{V_{c3} + KT_3} \\ Q_{3-4} &= mRT_3 \ln \frac{V_P + V_D + KT_3}{V_D + KT_3} \end{aligned} \quad (2.14)$$

2.5.4. Le refroidissement isochore (4-1)

Pendant cette phase une quantité de chaleur est rejetée par le fluide lors de son refroidissement, elle est exprimée par :

$$\begin{aligned}
 Q_{4-1} &= mC_v(T_1 - T_4) \\
 Q_{4-1} &= -mC_v(T_3 - T_1)
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Cette quantité est liée à l'efficacité du régénérateur :

- Sans régénérateur, cette chaleur est dissipée dans le refroidisseur;
- Avec un régénérateur idéal, la chaleur serait complètement absorbée par celui-ci ;
- Avec une régénération imparfaite la chaleur absorbée par le régénérateur est alors exprimée par la formule suivante:

$$\begin{aligned}
 Q_{4-1'} &= mC_v(T_{1'} - T_4) \\
 Q_{4-1'} &= -emC_v(T_3 - T_1)
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

La chaleur rejetée pendant la transformation (1'-1)

$$\begin{aligned}
 Q_{1-1'} &= mC_v(T_1 - T_{1'}) \\
 Q_{1-1'} &= -(1 - e)mC_v(T_3 - T_1)
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

2.6. La chaleur totale ajoutée

Pour une régénération imparfaite, la chaleur totale ajoutée depuis une source extérieure dans le cycle est :

$$Q_e = Q_{3-3'} + Q_{3-4} \tag{2.18}$$

En remplaçant $Q_{3-3'}$ et Q_{3-4} par leurs expressions on obtient :

$$\begin{aligned}
 Q_e &= mC_v \left((T_3 - T_{3'}) + (\gamma - 1)T_3 \ln \frac{V_{c4} + KT_3}{V_{c3} + KT_3} \right) \\
 Q_e &= mC_v \left((1 - e)(T_3 - T_1) + (\gamma - 1)T_3 \ln \frac{V_P + V_D + KT_3}{V_D + KT_3} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.18a}$$

Tel que γ le rapport des chaleurs spécifique.

Sans régénération ou avec un régénérateur d'une efficacité nulle, la chaleur apportée au moteur depuis une source extérieure serait :

$$\begin{aligned}
 Q_e &= Q_{2-3} + Q_{3-4} \\
 Q_e &= mC_v \left((T_3 - T_1) + (\gamma - 1)T_3 \ln \frac{V_P + V_D + KT_3}{V_D + KT_3} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

Par contre avec un régénérateur parfait on aura :

$$Q_e = Q_{3-4} = mRT_3 \ln \frac{V_P + V_D + KT_3}{V_D + KT_3} \quad (2.20)$$

2.7. La chaleur totale rejetée

Dans ce cas on peut bien dénombrer trois cas de figure par rapport tout dépend fonctionnement du régénérateur :

2.7.1. Cas d'un régénérateur imparfait

Il est quasiment impossible d'avoir un régénérateur parfait qui nous permettra d'éviter les rejets de chaleur donc, au passage par celui-ci une partie quantité de chaleur sera réintégrer et l'autre sera rejetée et elle est égale à :

$$Q_s = Q_{1-1'} + Q_{1-2} \quad (2.21)$$

Cela donne :

$$Q_s = mC_v \left((T_1 - T_{1'}) + (\gamma - 1)T_1 \ln \frac{V_{f2} + KT_1}{V_{f1} + KT_1} \right)$$

$$Q_s = mC_v \left((1 - e)(T_3 - T_1) + (\gamma - 1)T_1 \ln \frac{V_D + KT_1}{V_D + V_P + KT_1} \right) \quad (2.21a)$$

2.7.2. Cas d'un régénérateur idéal

Dans ce cas, la quantité de chaleur rejetée est celle mise en jeu lors de la compression isotherme (la transformation (1-2)) cette quantité est exprimée par :

$$Q_s = Q_{1-2} = mRT_1 \ln \frac{V_D + KT_1}{V_P + V_D + KT_1} \quad (2.22)$$

2.7.3. Cas d'absence du régénérateur

Le troisième cas est celui d'un régénérateur avec une efficacité lamentable voire nulle, ce qui réduit de façon remarquable le rendement du moteur et donc des pertes en chaleur considérable, lors de la compression isotherme (la transformation (1-2)) et du chauffage isochore (la transformation (4-1)) cette quantité est :

$$Q_s = Q_{4-1} + Q_{1-2} \quad (2.23)$$

$$Q_s = mC_v \left((\gamma - 1)T_1 \ln \frac{V_D + KT_1}{V_D + V_P + KT_1} - (T_3 - T_1) \right) \quad (2.23a)$$

A partir des différentes expressions mentionnées ci-dessous concernant les quantités de chaleur extraite et ajoutée, nous avons remarqué une forte ressemblance entre ces dernières. Cette ressemblance réside dans le fait de la dépendance de ces phénomènes à la qualité du régénérateur et à la présence de volumes morts.

Il est maintenant plus clairs que la présence de volumes morts affecte de façon considérable le rendement du moteur, car ces volumes ne contribueront pas à son fonctionnement, et ne seront pas entraînés par le mouvement des pistons.

2.8. Travail effectif

Le surplus d'énergie des deux transformations isothermes (1-2) et (3-4) est transformé en travail mécanique utile. Ce travail, avec un moteur muni d'un régénérateur imparfait et comprenant des volumes morts peut être calculé comme ceci:

$$\begin{aligned}
 W_{net} &= \sum Q \\
 &= Q_e + Q_s \\
 &= Q_{3-3'} + Q_{3-4} + Q_{1-1'} + Q_{1-2} \\
 &= Q_{1-2} + Q_{3-4} \\
 &= mR(T_3 \ln(\frac{V_{c4}+KT_3}{V_{c3}+KT_3}) - T_1 \ln(\frac{V_{f2}+KT_1}{V_{f1}+KT_1})) \\
 W_{net} &= mR(T_3 \ln(\frac{V_P+V_D+KT_3}{V_D+KT_3}) - T_1 \ln(\frac{V_D+V_P+KT_1}{V_D+KT_1})) \quad (2.24)
 \end{aligned}$$

Le travail net d'un moteur doit être le plus important possible, afin de répondre aux exigences de l'utilisateur; donc il est primordial de jouer sur les volumes morts qui sont en relation directe avec la valeur du travail fourni par le moteur.

En cas d'absence totale des volumes morts, l'expression du travail net du moteur sera réduite à :

$$W_{net} = mR(T_3 - T_1) \ln(\frac{V_1}{V_2}) \quad (2.25)$$

Cette équation est la plus utilisée dans les ouvrages de thermodynamique, lors de l'étude du moteur de Stirling, conduisant à calculer le rendement théorique de celui-ci, il faut noter que cette expression est obtenue en négligeant la présence des volumes morts, dépendamment de l'efficacité du régénérateur.

2.9. Pression effective moyenne

Le travail mécanique peut être déterminé par la pression moyenne effective du cycle (P_m) et des changements de volumes qui se résument finalement au volume balayé par le piston de travail, le volume total ne varie pas, cependant la variation des volumes de chaque côté du moteur (chaud et froid) est constante et donc on peut écrire :

$$V_{c4} - V_{c3} = V_{f1} - V_{f2} = V_1 - V_2 = V_p$$

Le travail net sera égal à :

$$W_{net} = P_m * V_p \quad (2.26)$$

Avec l'équation exprimant le travail net on obtient :

$$P_m = \frac{mR}{V_p} \left(T_3 \ln\left(\frac{V_P+V_D+KT_3}{V_D+KT_3}\right) - T_1 \ln\left(\frac{V_D+V_P+KT_1}{V_D+KT_1}\right) \right) \quad (2.27)$$

En absence de volume mort, cette équation se réduit à :

Sachant que : $T_1 = T_2$ et $V_3 = V_2$

$$W_{net} = \frac{(P_3 - P_2)V_3}{V_1 - V_2} \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

$$W_{net} = \frac{(P_3 - P_2)}{\frac{V_1}{V_2} - 1} \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (2.28)$$

Une autre solution consiste à calculer la pression aux quatre « coins » du cycle et d'en faire la moyenne. Cette solution passe par le calcul de la densité du gaz par rapport au volume spécifique. C'est le principe adopté dans la mise en pratique exposée plus loin.

2.10. Rendement thermique

L'efficacité thermique d'un moteur Stirling E_t peut être vue sous la forme :

$$E_t = \frac{W_{net}}{Q_e} \quad (2.29)$$

En remplaçant chaque terme par son expression, on obtient l'expression suivante :

$$E_t = \frac{T_3 \ln\left(\frac{V_P+V_D+KT_3}{V_D+KT_3}\right) - T_1 \ln\left(\frac{V_D+V_P+KT_1}{V_D+KT_1}\right)}{T_3 \ln\left(\frac{V_P+V_D+KT_3}{V_D+KT_3}\right) + (T_3 - T_1) \frac{1-e}{\gamma-1}} \quad (2.29a)$$

On remarque à partir de l'équation (Son numéro) que plusieurs paramètres rentrent en jeu pour le calcul du rendement thermique tel que les volumes morts et l'efficacité du régénérateur ce qui fait sa complexité, donc il est recommandé de simplifier cette expression afin de pouvoir effectuer les différents calculs, la simplification ne peut se faire que si nous mettons en œuvre certaines hypothèses :

- ✓ L'élimination des volumes morts c'est-à-dire, on considère que tous les volumes seront entraînés par le piston du travail ;
- ✓ En considérant un régénérateur à une efficacité nulle $e=0$ ce cas représente le pire des cas pour un régénérateur d'un moteur de Stirling.

Cette expression sera réduite à :

$$E_t = \frac{T_3 - T_1}{T_3 + \frac{(T_3 - T_1)}{(\gamma - 1) \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}} \quad (2.30)$$

Un autre cas de figure peut se présenter, ce cas étant le plus rencontré dans les ouvrages thermodynamiques, considère un régénérateur idéal avec un rendement de $e = 1$; le rendement thermique peut très facilement se calculer grâce aux principes de la thermodynamique. Comme toute autre machine l'efficacité d'un moteur de Stirling s'écrit comme suit:

$$\eta = \frac{-W}{Q_{reçu}} \quad (2.31)$$

- W étant le travail reçu ;

- $Q_{reçu}$ la chaleur que le moteur reçoit de l'ensemble des sources chaudes le long de la transformation C-D. en considérant le fluide comme étant un gaz parfait, on a le long de cette transformation :

On obtient W en ajoutant la contribution de chaque transformation

$$W = W_{3-4} + W_{4-1} + W_{1-2} + W_{2-3} \quad (2.32)$$

Les transformations (1-4) et (2-3) étant isochore donc le travail est nul, donc le travail reçu par le système est celui de la transformation (1-2) donc la compression isotherme.

$$W_{1-2} = rT_f \ln \frac{T_1}{T_3}$$

$$W_{1-2} = -rT_3 \ln \frac{T_1}{T_3} \quad (2.33)$$

Comme le régénérateur est idéal on peut se permettre d'écrire la quantité de chaleur cédée pendant le refroidissement isochore est intégralement utilisé pour le chauffage

isochore, et donc on admet que le régénérateur est parfait et donc le seul transfert de chaleur entre le moteur et le milieu environnant est :

- l'apport de chaleur à la température de la source chaude T_c ;
- le rejet de chaleur à la température de la source froide T_f .

Et donc on écrit :

$$\begin{aligned}Q_{re\grave{c}ue} &= Q_{3-4} \\Q_{re\grave{c}ue} &= -W_{3-4} \\Q_{re\grave{c}ue} &= \int_3^4 p dv = rT_f \int_3^4 \frac{dv}{v} \\Q_{re\grave{c}ue} &= rT_c \ln \frac{v_3}{v_4}\end{aligned}\tag{2.34}$$

Au final, on obtient un rendement semblable à celui du cycle de Carnot fonctionnant entre les mêmes températures et ce grâce à la récupération de la chaleur :

$$\eta = \frac{-W}{Q_{re\grave{c}u}} = \frac{r(T_3 - T_1) \ln \frac{T_1}{T_3}}{rT_3 \ln \frac{T_1}{T_3}}\tag{2.35}$$

Cet apport et ce rejet de chaleur à températures constantes permettent au cycle de Stirling théorique d'avoir un rendement identique à celui du cycle de Carnot défini par :

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{T_3 - T_1}{T_3} \\ \eta &= 1 - \frac{T_{froid}}{T_{chaud}}\end{aligned}\tag{2.36}$$

Il est maintenant évident qu'en théorie, le moteur Stirling peut être une machine très rentable pour convertir de la chaleur en travail mécanique. L'efficacité d'une conception et d'une fabrication qui exclurait les volumes morts tout en incluant un régénérateur quasi-parfait équivaldrait à réaliser une machine de Carnot. Autrement dit ce serait la réalisation du moteur thermique le plus efficace qu'il soit en termes de rendement énergétique.

CHAPITRE 3 :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Calcul des paramètres relatifs aux volumes morts et au régénérateur

3.1.1. Données du moteur étudié

Afin de calculer les différentes fractions et rapports entre les volumes, ainsi que la température au niveau du régénérateur, les données du tableau 3.1 ci-dessous seront indispensables.

Tableau 3.1 : Caractéristiques du moteur Stirling

Caractéristiques	Exigences sur la caractéristique
Architecture	Type alpha
Source d'alimentation	Le moteur sera alimenté par la biomasse
Gaz de travail	Hélium
Pression de remplissage	2 bars
Tête chaude T_3	650°C
Tête froide T_1	65°C

Tableau 3.2 : Volumes morts pour chaque zone du moteur Stirling

Zone	Zone chaude	Zone froide	Piston déplaceur	Piston de travail
Volume mort (cm^3)	65	60	20500	7500

On a aussi les volumes entraînés par le piston de travail et le piston déplaceur :

$$V_P = 7500 \text{ cm}^3 \quad V_D = 20500 \text{ cm}^3$$

De l'équation (2.7a) et pour les températures $T_1 = 338K$ et $T_3 = 923K$ on calcule la température moyenne qui sera égale à la température au niveau du régénérateur :

$$T_R = 630K = 375.5^\circ C$$

Les volumes des cylindres seront :

$$V_{f1} = V_{c4} = V_D + V_P = 28000 \text{ cc} = 0.028 \text{ m}^3$$

$$V_{f2} = V_{c3} = V_D = 20500 \text{ cc} = 0,0205 \text{ m}^3$$

$$V_{c1} = V_{f4} = 0 \text{ (la totalité du gaz étant de l'autre côté)}$$

Les cylindres et le régénérateur sont occupés par le gaz, des volumes morts au niveau de chacun d'eux, ne pourront pas être évités :

$$V_{MT} = 200 \text{ cc} = 2 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

De l'équation (II.4) le rapport des volumes morts sur les volumes balayés est:

$$k_{MDP} = 7.143 * 10^{-3}$$

$$k_{MT} = 7.092 * 10^{-3}$$

Passons maintenant aux rapports des volumes morts sur le volume mort total :

$$\checkmark k_{Mc} = 0.325$$

$$\checkmark k_{Mr} = 0.375$$

$$\checkmark k_{Mf} = 0.3$$

De l'équation (2.9) le facteur K sera égal à :

$$K = 3.6685 * 10^{-7}$$

3.1.2. Phase de remplissage

Avant toute utilisation du moteur de Stirling, il faut assurer le remplissage du fluide de travail qui est dans notre cas d'étude l'Hélium à une pression supérieure à la pression atmosphérique, soit 2bars et une température de 20°C (293K). Comme il n'est pas établi de position de remplissage normalisée, nous choisissons de placer notre moteur en position 3. Le volume correspond alors au volume total maximum.

$$P_{Rem} = 2 * 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_{Rem} = 293 \text{ K}$$

$$R = 2078.6$$

Ainsi la masse de l'Hélium sera calculée par le biais de l'équation des gaz parfait :

$$m = 9.852 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

Pour les calculs qui suivent nous allons considérer l'efficacité du régénérateur égale à 75%

3.1.3. Calcul des différentes transitions du cycle

Il est bon de connaître maintenant les températures de sortie du régénérateur 1' et 3', dépendantes de l'efficacité du régénérateur « e ». Nous utilisons les formules (II.5a) et (II.6).

$$T_1 = 454.25 \text{ K}$$

$$T_3 = 776.75 \text{ K}$$

3.1.3.1. Compression isotherme

A partir de l'équation (2.10) :

$$Q_{1-2} = -2158.04 \text{ J}$$

3.1.3.2. chauffage isochore

Le chauffage isochore 2-3 est la somme de la quantité de chaleur apportée par le régénérateur et celle apportée par une source extérieure.

De l'équation (III.11) la chaleur totale apportée pendant cette transformation est:

$$Q_{2-3} = 17880.4 \text{ J}$$

De l'équation (III.13) la chaleur apportée depuis une source extérieure pendant la transformation 3'-3 est:

$$Q_{3-3'} = 4470.12 \text{ J}$$

3.1.3.3. Détente isotherme

A partir de l'équation (2.14) :

$$Q_{3-4} = 22624.4 \text{ J}$$

3.1.3.4. Refroidissement isochore

Le refroidissement isochore 4-1 est la somme de la chaleur transféré vers le régénérateur et celle évacuée vers le milieu extérieur.

L'équation (3.15) nous donne:

$$Q_{4-1} = -17880.4 \text{ J}$$

De l'équation (3.17), la chaleur rejetée vers l'extérieur pendant la transformation 1-1' est:

$$Q_{1-1'} = -4470.12 \text{ J}$$

En se basant sur les résultats obtenus ci-dessus et à l'aide de la formule (3.18) on obtient que l'énergie totale apportée correspond à :

$$Q_e = 10280.79 \text{ J}$$

Ainsi que l'énergie totale rejetée qui se calcule à l'aide de la formule (3.22) :

$$Q_s = -6617.01 \text{ J}$$

En considérant les volumes morts ainsi qu'une efficacité du régénérateur $e = 0.75$, on aura les résultats présentés au tableau 3.2 ci-dessous.

Tableau 3.2 : Résultats des quantités de chaleur mises en jeu lors des transformations

	Compression isotherme	Détente isotherme	Chauffage isochore	Refroidissement isochore
Travail W (J)	-2146.89	17880.4	0	0
Quantité de chaleur Q (J)	-2146.89	17880.4	-2158.04	-17880.4

3.1.4. Travail net

Nous savons que le travail fourni par le moteur est la somme de ceux mis en jeu lors des transformations isothermes. Les deux autres transformations nous servent à calculer le rendement énergétique de notre moteur :

$$W_{NET} = 3663.78 \text{ J}$$

Pour une vitesse de rotation de 250 tours/min on pourra calculer la puissance fournie par le moteur :

$$P = W_{NET} \frac{N}{60}$$

$$P = 15 \text{ kW}$$

La puissance fournie par notre moteur est relativement faible, cependant, elle est bonne par rapport à la puissance des différents moteurs de Stirling commercialisés ; donc la réalisation de notre moteur est possible.

3.1.5. Calcul du rendement thermique

Le rendement thermique de notre moteur s'obtient avec la formule (3.29)

$$E_t = 36\%$$

3.1.6. Calcul de la pression moyenne effective

La pression moyenne effective sera calculée par l'équation (3.26) :

$$P_m = 4.885\text{bars}$$

La PME semble être un peu élevée, donc un calcul de la pression au point 3 est nécessaire pour voir est ce qu'elle est trop élevée ou bien bonne pour le fonctionnement du moteur :

A partir de l'équation (3.6) on peut bien calculer la pression au point 3 :

$$P_3 = 9.07\text{bars}$$

On remarque bien, que la pression au point 3 est assez élevée, ce qui qui rend délicat le maintien de l'étanchéité à l'intérieur des cylindres du moteur Stirling, raison pour laquelle il est difficile de réaliser des puissances importantes avec ce moteur.

3.1.7. Puissance reçue et puissance produite

$$P = W_{NET} \frac{N}{60}$$

Maintenant nous calculons la puissance reçue par le moteur qui sera égale à (formule 2.22):

$$P_s = 27.57\text{kW}$$

La puissance produite est égale à (formule 2.18):

$$P_e = 42.83 \text{ kW}$$

3.1.8. Chaleur de combustion

Il est nécessaire de connaître la chaleur de combustion, pour calculer la quantité rejetée avec les fumées (25%), une partie de la chaleur des fumées sera récupérée par l'intermédiaire d'un échangeur d'une efficacité égale à 75%

Chaleur de combustion :

- ✓ Une partie de cette chaleur sera rejetée dans les fumées 25%, que l'on note $Q_{fumée}$;
- ✓ L'autre partie Q_e est celle mise en jeu pour produire l'énergie électrique et thermique, et elle représente 75% de la quantité de chaleur de combustion.

$$Q_{com} = \frac{Q_e}{0.75}$$

Donc la quantité de chaleur dans les fumées est :

$$Q_{fumée} = \frac{Q_e}{0.75} 0.25$$

En faisant passer les fumées par un échangeur d'une efficacité de 75%, nous récupérons une quantité de chaleur égale à :

$$Q_{récupérée} = \left(\frac{Q_e}{0.75} 0.25 \right) 0.75$$

Le rendement de cogénération du moteur sera calculé à l'aide de la relation suivante :

$$R_{moteur} = \frac{Q_{el} + Q_{th} + Q_{récupérée}}{Q_{com}}$$

Calculons la quantité de chaleur mise en jeu :

$$Q_{com} = 13707.72j$$

La quantité de chaleur dans les fumées :

$$Q_{fumée} = 3426.93j$$

Et donc la quantité de chaleur que nous pourrions récupérer à partir des fumées sera égale à :

$$Q_{récupérée} = 2570.2j$$

Le rendement de cogénération du moteur sera égal à :

$$R_{moteur} = 93\%$$

On remarque que le rendement du moteur est très élevé, cela peut être dû à la qualité du régénérateur, mais aussi à la présence d'un échangeur de chaleur performant au niveau de la sortie des fumées qui permettra de récupérer 75% de la chaleur de ces derniers.

Le bilan d'énergie du moteur est bien représenté ci-dessous par le diagramme de Sankay

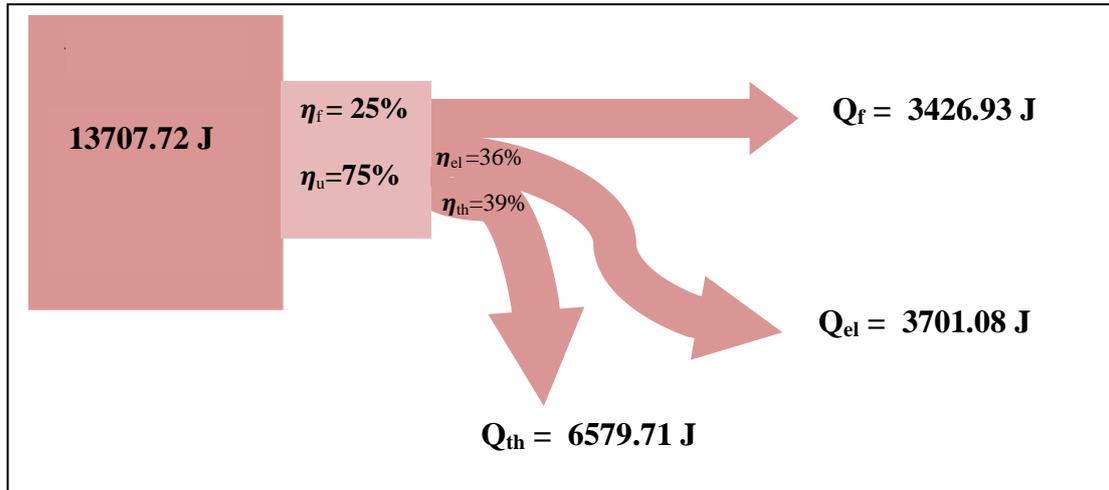


Figure 3.3: Diagramme de Sankay représentant le bilan d'énergie du moteur Stirling

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à la technologie de cogénération, basée sur le cogénérateur à moteur Stirling. Cette technologie qui date depuis 1816 est en pleine évolution. L'expérience et le savoir-faire dans cette technologie progressent donc rapidement, mais beaucoup reste à faire.

L'intérêt pour cette technologie est dû à sa conception simple, qui permet de réduire les coûts. Les applications vont de la grande échelle pour les projets de la NASA, à des installations de petite et moyenne puissances pour le bâtiment ou l'industrie, notamment en micro-cogénération. Nous nous sommes en particulier intéressés à un moteur de type alpha. Il est alors envisageable d'utiliser un moteur Stirling, qui fonctionne avec de l'hélium.

Nous avons analysé ce moteur imparfait en nous appuyant sur les lois de la thermodynamique classique et extraire des règles importantes qui nous guideront dans l'étude de notre futur moteur en contribuant ainsi à fournir l'énergie de demain.

Nous dimensionnons un moteur de Stirling fonctionnant entre des températures de 65°C et 650°C afin de définir ses performances et son rendement qui est généralement le plus élevé grâce à la présence d'un régénérateur.

Au cours de nos calculs, nous avons remarqué la présence de plusieurs contraintes qui réduisent de façon considérable le rendement ainsi que l'efficacité du moteur telles que la présence incontournable de volumes morts, et l'imperfection du régénérateur.

- ✓ Les volumes morts vont dégrader à la fois l'efficacité énergétique et augmenteront les apports de chaleurs externes. Notons que la construction d'un moteur Stirling entraîne fatalement la présence de volumes morts incontournables. Un faible travail mécanique peut quand même être obtenu si le moteur contient un taux de volumes morts importants.
- ✓ Pour atteindre de hautes performances, un moteur Stirling doit être équipé du régénérateur le plus efficace qu'il soit. Si ce n'était pas le cas, il vaut mieux ne pas avoir de régénérateur du tout. Ce qui nous fait l'économie de son volume mort.

Perspectives

L'intégration du moteur Stirling dans plusieurs activités industrielles visant à produire de l'électricité et de la chaleur ;

La performance des systèmes thermiques à l'aide des moteurs à cycle de Stirling au lieu de moteurs à combustion externe seraient d'une grande importance, surtout pour les faibles puissances.

La production en série du moteur de Stirling réduira de façon considérable les coûts de production et donc le prix de vente.

L'utilisation d'un mélange de fluide de travail hélium-hydrogène pourra contribuer à augmenter les performances de moteur, un tel mélange réunirait, peut-être, un peu des performances de l'hydrogène tout en préservant les propriétés des matériaux constituant le moteur.

1. **METZ.B, DAVIDSON. O.R, BOSCH.P.R, DAVE.R,MEYER. L.A (EDS).***Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, KSA : Climate Change 2007: Mitigation, 2007.
2. **STINE.W.B, DIVER.R.B.***A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology.* s.l. : Sandia National Laboratories, 1994. SAND93-7026 UC-236.
3. **LANCIAUX Nicolas.***Contribution au développement d'un moteur Stirling: De la cogénération dans le bâtiment à m'autonomie énergétique.* Essonne, France : Université d'EVRY-VAL D'ESSONNE, 2015.
4. **JEANMART Herve.***Cogénération état de la technique: le moteur Stirling, une nouvelle technologie?* Bruxelles : Institut of Mechanics, Materials and Civil Engineering: Ecole Polytechnique de Louvain, 2010.
5. **FINKELSTEIN Theodor.***Specific Performance of various Stirling Engine Designs.* Osnabruck, Germany : Proceedings of the 4th European Stirling Forum, 1998.
6. **URIELI David Berchowitz.** eds. *Stirling Cycle Engine Analysis.* First ed. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1984.
7. **LANCIAUX Nicolas.** *Thèse de doctorat « contribution au développement d'un moteur de Stirling : de la cogénération dans le bâtiment à l'autonomie énergétique ».* 2013
8. **ZAOUI Khalil, TALBI ALAMI Fayçal.** *L'application de l'énergie solaire au moteur Stirling ;* France. 2014-2015.
9. Moteur de Stirling. *Gaz naturel.ch.* [En ligne] Association Suisse de l'Industrie Gazière (ASIG), 2012. [Citation : 09 05 2016.]
10. **JOHNSON. D. L, CARROLL. B. C, LELAND. R. S.***MSL / CheMin cryocooler system requirements and characterization tests.* In Cryocoolers 15, Long Beach, California, USA. June 9-12 2008.
11. **STINE, WILLIAM. B, RAYMOND. W.** Harrigan, eds. *Solar Energy Fundamentals and Design with Computer Applications.* New York: Wiley-Interscience, 1985.
12. **WALKER G.** *Stirling Engines.* Oxford. 1980.
13. **MAMAHAN. A, KLEIN. S. A, REINDL. D. T.** *A Finite-Time Thermodynamic Framework for Optimizing Solar-Thermal Power Plants.* ASME J. Solar Energy Engineering, Vol. 129 p. 355, 2007.
14. **KADDOUR Abdelmadjid.** *Modélisation et simulation d'un concentrateur parabolique solaire à moteur Stirling en vue d'un rendement optimal janvier.* Université abou-bekr belkaid, Tlemcen. 2013.