

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

---

Université Hassiba Benbouali de Chlef



Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique

## ***PROJET DE FIN D'ETUDE***

*En vue de l'obtention du diplôme de Master*

*Filière : Electromécanique*

*Spécialité : Maintenance Industrielle*

---

### **THÈME**

---

## **Réalisation d'un moteur Stirling de type Gamma**

---

Présenté par :

Boucherrougui Ahmed Yassine

Bourenissa Abdelkadir

Dirigé par :

Dr. A. Mokhtar Didouche

**Promotion 2024**

## Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu Tout Puissant et aussi nous remercions notre encadreur **Mr A. Mokhtar Didouche** pour sa disponibilité et ses efforts incessants pour rendre ce travail complet.

Nos profonds remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

## **Dédicace**

Avant toute chose, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience durant la réalisation de ce modeste travail. Je dédie ce travail

A mes parents, frères et sœur, Merci pour votre amour, votre affection, vos encouragements, sacrifices...que Dieu vous garde.

A toutes les personnes qui me sont chères

A mes chers frères et ami(e)s qui m'ont beaucoup soutenu et encouragé.

**B. AEK**

## **Dédicace**

Avant toute chose, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience durant la réalisation de ce modeste travail. Je dédie ce travail

A mes parents, frères et sœur, Merci pour votre amour, votre affection, vos encouragements, sacrifices...que Dieu vous garde.

A toutes les personnes qui me sont chères

A mes chers frères et ami(e)s qui m'ont beaucoup soutenu et encouragé.

**B. Yassine**

## ملخص

تُعتبر محركات ستيرلينغ، التي اخترعها روبرت ستيرلينغ في عام 1816، من المحركات الحرارية التي تعمل على تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية من خلال الانضغاط والتمدد الدوري لسائل العمل. يتميز محرك ستيرلينغ من النوع جاما بتصميمه الذي يتضمن مكابس التحريك والمحرك مركبة في أسطوانات منفصلة، مما يجعله بسيطاً وفعالاً.

يمكن لهذه المحركات استخدام مصادر متنوعة للحرارة، بما في ذلك الطاقات المتجددة، مما يجعلها ملائمة في ظل الانتقال الحالي نحو مصادر طاقة أكثر استدامة. فإمكانية استغلالها للحرارة الشمسية والكتلة الحيوية والحرارة الصناعية الفائضة تبرز أهميتها التكنولوجية.

يهدف هذا المشروع إلى تصميم وتنفيذ محرك ستيرلينغ من النوع جاما، مع دراسة الجوانب النظرية والعملية لهذه التقنية. الهدف هو فهم كيفية عمل هذا المحرك، وإتقان تقنيات التصميم والتصنيع، وتقييم أدائه من حيث الكفاءة الطاقية والقدرة الميكانيكية.

تشمل عملية التنفيذ النمذجة الديناميكية الحرارية، التصميم الميكانيكي، اختيار المواد المناسبة، تصنيع المكونات، التجميع، واختبار المحرك. يهدف هذا المشروع إلى إثبات الجدوى التقنية والإمكانات الواعدة لمحركات ستيرلينغ من النوع جاما كحلول طاقة قابلة للتطبيق في المستقبل.

## Résumé

Les moteurs Stirling, inventés par Robert Stirling en 1816, convertissent l'énergie thermique en énergie mécanique via la compression et l'expansion cycliques d'un fluide. Le moteur Stirling de type gamma, caractérisé par des pistons de déplacement et moteur montés dans des cylindres séparés, est particulièrement notable pour sa simplicité et son efficacité potentielle.

Ces moteurs peuvent utiliser diverses sources de chaleur, y compris des énergies renouvelables, ce qui les rend pertinents dans le contexte actuel de transition énergétique vers des sources plus durables. Leur capacité à exploiter la chaleur solaire, la biomasse ou la chaleur résiduelle industrielle en fait une technologie prometteuse.

Le projet vise à concevoir et réaliser un moteur Stirling type gamma, en explorant ses aspects théoriques et pratiques. L'objectif est de comprendre son fonctionnement, de maîtriser les techniques de conception et de fabrication, et d'évaluer ses performances en termes d'efficacité énergétique et de puissance mécanique.

La réalisation comprendra la modélisation thermodynamique, la conception mécanique, la sélection des matériaux, la fabrication des composants, l'assemblage et les tests du moteur. Ce projet démontrera la faisabilité technique et le potentiel des moteurs Stirling type gamma comme solution énergétique viable pour l'avenir.

## **Abstract**

Stirling engines, invented by Robert Stirling in 1816, are thermal engines that convert thermal energy into mechanical energy through the cyclic compression and expansion of a working fluid. The gamma-type Stirling engine, characterized by having the displacer and power pistons in separate cylinders, is particularly notable for its simplicity and potential efficiency.

These engines can utilize a variety of heat sources, including renewable energies, making them relevant in the current transition towards more sustainable energy sources. Their ability to exploit solar heat, biomass, and industrial waste heat highlights their technological promise.

This project aims to design and construct a gamma-type Stirling engine, exploring both theoretical and practical aspects of this technology. The objective is to understand its operation, master design and manufacturing techniques, and evaluate its performance in terms of energy efficiency and mechanical power output.

The project will involve thermodynamic modeling, mechanical design, material selection, component manufacturing, assembly, and testing of the engine. This endeavor seeks to demonstrate the technical feasibility and promising potential of gamma-type Stirling engines as viable energy solutions for the future.

# Table des matières

|   |    |
|---|----|
| Liste des figures .....   | 1  |
| Liste des Tableaux.....   | 3  |
| Nomenclature .....  | 4  |
| Chapitre I: Généralités sur le moteur Stirling .....                  | 8  |
| I.2 Introduction .....  | 9  |
| I.3 Historique .....  | 9  |
| I.4 Principe de fonctionnement.....                                   | 10 |
| I.4.1 Les quatre phases élémentaires .....                            | 11 |
| I.5 Les types des moteurs de Stirling .....                           | 14 |
| I.5.1 Le moteur alpha.....  | 14 |
| I.5.2 Le moteur Beta.....   | 15 |
| I.5.3 Le moteur Gamma.....  | 16 |
| I.6 Application des moteur Stirling.....                              | 17 |
| I.6.1 Conversion de l'énergie solaire en électricité .....            | 17 |
| I.6.2 Domaine militaire.....  | 18 |
| I.6.3 Domaine de l'informatique .....                                 | 18 |
| I.6.4 Domaine de cogénération .....                                   | 20 |
| I.6.5 Domaine du transport : Voiture hybride .....                    | 20 |
| I.7 Avantages et inconvénients .....                                  | 21 |
| I.7.1 Avantages.....  | 21 |
| I.7.2 Inconvénients .....   | 22 |
| I.8 Conclusion.....   | 23 |
| Chapitre II : Dimensionnement du moteur .....                         | 25 |
| II.1 Choix du type de moteur.....                                     | 26 |
| II.2 Principe de fonctionnement du modèle a étudié .....              | 28 |
| II.2.1 Cycle thermodynamique de moteur Stirling théorique .....       | 28 |
| II.2.2 Etude thermodynamique.....                                     | 29 |
| II.2.3 Les formules thermodynamiques utilisées pour les calculs ..... | 29 |
| II.2.4 Les volumes .....  | 29 |
| II.2.5 Les chaleurs .....   | 32 |
| II.2.6 Les travaux : .....  | 33 |
| II.2.7 Le rendement .....   | 34 |

|   |    |
|---|----|
| II.3 Etude et dimensionnement .....   | 35 |
| II.3.1 Définitions des démentions .....   | 35 |
| II.3.2 Dimension et paramètre de calcul.....                                    | 36 |
| II.3.3 Calcul théorique du cycle de Stirling de la configuration proposée ..... | 36 |
| II.4 Conclusion .....   | 46 |
| Chapitre III : Réalisation du moteur Stirling .....                             | 47 |
| III.1 Introduction.....   | 48 |
| III.2 Présentation des différentes pièces de moteur Stirling .....              | 48 |
| III.2.1 Plaque grand et petit cylindre .....                                    | 49 |
| III.2.2 Plaque support vilebrequin.....   | 49 |
| III.2.3 Grand cylindre .....  | 50 |
| III.2.4 Déplaceur .....   | 50 |
| III.2.5 Tige du déplaceur .....   | 51 |
| III.2.6 Petit cylindre (Cylindre de travail) .....                              | 51 |
| III.2.7 Piston.....   | 52 |
| III.2.8 Tige de piston .....  | 52 |
| III.2.9 Cardan .....  | 53 |
| III.2.10 Tige de bielles.....   | 53 |
| III.2.11 Vilebrequin.....   | 54 |
| III.2.12 Volant d'inertie.....  | 54 |
| III.2.13 Boulons .....  | 55 |
| III.2.14 Roulement à rotule.....  | 55 |
| III.2.15 Roulement à aiguilles.....   | 56 |
| III.2.16 Pate métallique .....  | 56 |
| III.3 Tableau des pièces.....   | 57 |
| III.4 Assemblage des composants :.....  | 57 |
| III.4.1 Préparation de la Base et du Support : .....                            | 57 |
| III.4.2 Montage du Grand Cylindre et du Déplaceur : .....                       | 57 |
| III.4.3 Installation du Petit Cylindre et du Piston :.....                      | 58 |
| III.4.4 Fixation du Vilebrequin : .....   | 58 |
| III.4.5 Installation du Volant d'Inertie : .....                                | 58 |
| III.4.6 Montage du Système d'Échange de Chaleur : .....                         | 58 |
| III.4.7 Allumage et Mise en Marche : .....                                      | 58 |

|   |    |
|---|----|
| III.5 Résultats.....                              | 59 |
| III.5.1 Problèmes d'Étanchéité .....              | 59 |
| III.5.2 La source d'énergie (source chaude) ..... | 59 |
| III.5.3 Friction Excessive.....                   | 59 |
| III.5.1 Problème Conception ou d'Assemblage.....  | 59 |
| III.6 Conclusion .....                            | 59 |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Moteur stirling [5] .....  | 9  |
| Figure 2 : Phase de chauffage. [4].....   | 11 |
| Figure 3 : Phase de détente. [4].....   | 12 |
| Figure 4 : Phase de refroidissement. [4] .....  | 12 |
| Figure 5 : Phase de compression. [4].....   | 13 |
| Figure 6 : 1 <sup>ère</sup> phase de travail du déplaceur. [4] .....  | 13 |
| Figure 7 : 2 <sup>ème</sup> phase de travail du déplaceur. [4].....   | 13 |
| Figure 8 : 3 <sup>ème</sup> phase de travail du déplaceur. [4].....   | 14 |
| Figure 9 : 4 <sup>ème</sup> phase de travail du déplaceur[4].....   | 14 |
| Figure 10 : Schéma du moteur type ALPHA [5] .....   | 15 |
| Figure 11 : Schéma du moteur type BETA [5] .....  | 16 |
| Figure 12 : Schéma du Moteur type gamma [5] .....   | 17 |
| Figure 13 : La parabole Stirling solaire du projet EuroDish (Nepven et al. 2006).[11].....  | 18 |
| Figure 14 : Micro-processeur refroidi par moteur Stirling Le ventilateur de MSI.[10].....   | 19 |
| Figure 15 : Chaudière à bois Stirling (Stirling power model).[11] .....   | 20 |
| Figure 16 : Moteur Stirling d'une voiture hybride.[12].....   | 20 |
| Figure 17 Version (a).....  | 27 |
| Figure 18 Version (b) .....   | 27 |
| Figure 19 : Diagramme d'un moteur Stirling théorique [14].....  | 28 |
| Figure 20 : Diagramme d'entropie (T,S) d'un moteur Stirling .....   | 28 |
| Figure 21: Schémas représentatif de la dimension principale pour l'étude thermodynamique<br>d'un moteur Stirling type Gamma. .... | 35 |
| Figure 22 : L'influence de $T_c$ sur le rendement théorique .....   | 44 |
| Figure 23 : L'influence de $T_f$ sur le rendement théorique .....   | 45 |
| Figure 24 : L'influence de $T_f$ sur le rendement théorique .....   | 45 |
| Figure 25 : Moteur Stirling d'un type Gamma $\gamma$ .....  | 48 |
| Figure 26 : Plaque grand et petit cylindre.....   | 49 |
| Figure 27 : Plaque support vilebrequin.....   | 49 |
| Figure 28 : Grand cylindre.....   | 50 |
| Figure 29 : Déplaceur .....   | 50 |
| Figure 30 : Tige de déplaceur .....   | 51 |
| Figure 31 : Petit cylindre. ....  | 51 |
| Figure 32 : Piston .....  | 52 |
| Figure 33 : tige de piston .....  | 52 |
| Figure 34 : Chapeau.....  | 53 |
| Figure 35 : Les bielles .....   | 53 |
| Figure 36 : Vilebrequin.....  | 54 |
| Figure 37 : Volant d'inertie.....   | 54 |
| Figure 38 : Boulon.....   | 55 |
| Figure 39 : Roulement à rotule.....   | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 40 : Roulement à aiguilles KFL08 ..... | 56 |
| Figure 41 : Pate métallique .....             | 56 |

## **Liste des Tableaux**

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1 : Paramètres géométriques et thermiques. ....  | 36 |
| Tableau 2: Tableau récapitulatif des volumes.....  | 39 |
| Tableau 3: Tableau récapitulatif des pressions, volumes et températures.....                   | 41 |
| Tableau 4 : Tableau récapitulatif des paramètres caractéristique des évolutions du cycle ..... | 46 |
| Tableau 5 : Tableau des pièces.....  | 57 |

## Nomenclature

| Symboles     | Significations                              | Unité          |
|--------------|---|----------------|
| <b>P</b>     | Pression                                    | Pa             |
| <b>V</b>     | Volume                                      | m <sup>3</sup> |
| <b>n</b>     | Nombre de mole                              | Mole           |
| <b>R</b>     | Constante des gaz parfaits                  | J/mole. K      |
| <b>r</b>     | Constante des gaz parfaits                  | J/Kg. K        |
| <b>T</b>     | Température                                 | °C, K          |
| <b>D cyl</b> | Diamètre intérieur du cylindre du déplaceur | M              |
| <b>Dd</b>    | Diamètre de déplaceur                       | M              |
| <b>Dtd</b>   | Diamètre de la tige du déplaceur            | M              |
| <b>D pc</b>  | Diamètre du cylindre du piston de travail   | M              |
| <b>h cyl</b> | Hauteur du cylindre du déplaceur            | M              |
| <b>hd</b>    | Hauteur du déplaceur                        | M              |
| <b>h pc</b>  | Hauteur du cylindre du piston               | M              |
| <b>Tc</b>    | Température de la source chaude             | °C, K          |
| <b>Tf</b>    | Température de la source froide             | °C, K          |
| <b>Vd</b>    | Volume de déplaceur                         | m <sup>3</sup> |

|                        |  |                   |
|------------------------|--|-------------------|
| <b>V<sub>gc</sub></b>  | Volume de grand cylindre<br>sans déplaceur           | m <sup>3</sup>    |
| <b>V<sub>min</sub></b> | Volume de l'air emprisonné<br>dans le grand cylindre | m <sup>3</sup>    |
| <b>V<sub>td</sub></b>  | Volume de la tige du<br>déplaceur                    | m <sup>3</sup>    |
| <b>V<sub>pc</sub></b>  | Volume du cylindre du<br>piston de travail           | m <sup>3</sup>    |
| <b>V<sub>max</sub></b> | Volume maximal                                       | m <sup>3</sup>    |
| <b>m<sub>air</sub></b> | Masse de l'air                                       | Kg                |
| <b>ρ<sub>air</sub></b> | Masse volumique de l'air                             | Kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Q</b>               | Quantité de chaleur                                  | J                 |
| <b>W</b>               | Travail  | J                 |
| <b>η</b>               | Rendement  |                   |

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Afin de développer la technologie de production d'énergie, des recherches sur de nouvelles sources d'énergie ont été menées. Elles doivent préserver à la fois l'environnement et les combustibles fossiles. C'est une alternative de préfiguration. Le moteur Stirling est un moteur thermique qui utilise un gaz en circuit fermé pour fonctionner. Dans la plupart des versions actuelles de ce moteur, le gaz n'est rien d'autre que de l'air. Le principe de fonctionnement du moteur Stirling est suffisant mais son efficacité peut dépasser 40% ce qui est bon pour convertir la chaleur en travail.

L'efficacité des systèmes énergétiques peut améliorer en passant par deux voies. La première voie s'intéresse au moteur à combustion interne pour des plusieurs applications où une grande partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur qui est dissipé dans l'atmosphère. La deuxième s'intéresse au moteur à apport de chaleur comme le moteur Stirling qui utilise la chaleur comme une source d'énergie primaire.

L'ingénieur Robert Stirling découvre le moteur Stirling en 1816 comme une solution pour remplacer les moteurs à combustion interne source de bruit et de pollution. Le moteur Stirling fonctionne selon un cycle fermé en utilisons un gaz (air) chauffé par une source de chaleur extérieure. Il présente plusieurs avantages : moins de bruit (à cause de l'absence d'échappement et de soupapes), la diversité de sources de chaleur...etc.

L'objectif de ce projet de fin d'études est la réalisation du moteur Stirling , l'application dans l'énergie renouvelable et la récupération de l'énergie perdue , à maîtriser les méthodes de conception et de fabrication qui leur sont liées, et à évaluer les performances du moteur obtenu en termes d'efficacité énergétique et de puissance mécanique générée.

Un moteur Stirling type gamma sera construit en plusieurs étapes essentielles, telles que la modélisation thermodynamique, la conception mécanique, la sélection des matériaux adéquats, la fabrication des composants, ainsi que l'assemblage et les tests du moteur achevé.

**Chapitre I:**  
**Généralités sur le moteur**  
**Stirling**

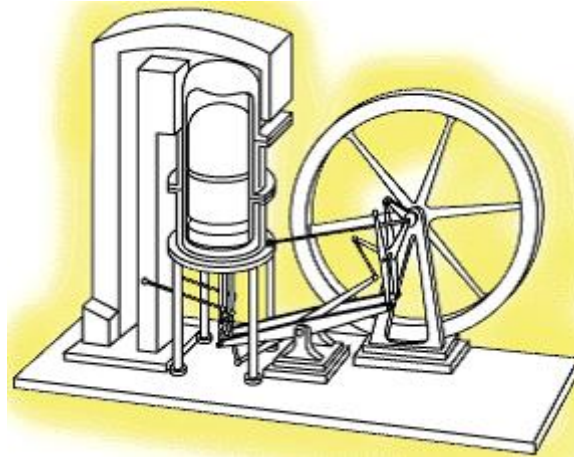
## I.1 Introduction

Les moteurs thermiques sont des appareils qui génèrent du travail mécanique en utilisant de la chaleur. Ces machines ont joué un rôle essentiel dans la révolution industrielle du 19<sup>e</sup> siècle, car elles ont favorisé l'expansion de l'industrie, en particulier les machines à laver.

Ensuite, à partir du 20<sup>e</sup> siècle, les moteurs à explosion ont été introduits. La grande importance de ces machines a engendré la branche de la physique appelée thermodynamique. L'un des objectifs essentiels est de découvrir et de saisir les quelques principes fondamentaux essentiels pour décrire le fonctionnement des machines thermiques, puis d'appliquer ces connaissances pour améliorer et optimiser les machines réelles. En raison des défis énergétiques actuels, la thermodynamique reste une discipline avec des enjeux essentiels.

## I.2 Historique

Afin de transformer l'énergie thermique, qu'elle provienne du soleil ou d'une autre source, en énergie mécanique, un moteur thermique est indispensable. Parmi les différents types existants, le moteur Stirling se distingue par sa conception simple et sa capacité à convertir directement la chaleur en mouvement de manière relativement efficace.



**Figure 1** : Moteur stirling [5]

Inventé en 1816 par Robert Stirling, un pasteur écossais, le moteur Stirling avait pour but initial de réduire les accidents liés aux machines à vapeur, alors en plein essor. En effet, ces dernières fonctionnaient grâce à des chaudières sous haute pression, ce qui représentait un risque important pour les utilisateurs. Le moteur Stirling constituait donc une innovation majeure en matière de sécurité. Ce moteur a été construit historiquement avant la formulation

des lois concernant le second principe de la thermodynamique (avant le cycle de Carnot). Cependant, le moteur ne réussit pas.

Espéré, puisque le moteur à explosion apparut et s'imposa facilement, et la découverte de Stirling fut oubliée. Il faut attendre 1938 pour que Philips investisse dans le projet, qui a ensuite été nommé «moteur de Stirling » ; à cette époque, une application importante dans le domaine de l'automobile avec un moteur de 200 chevaux et un rendement supérieur à 30 % a été développée [5].

En même temps, Robert Stirling a développé l'idée d'un régénérateur de chaleur afin d'améliorer le rendement global de l'endroit. Ce moteur fut industrialisé par son frère James en 1843 pour l'usine où il travaillait comme ingénieur.

Jusqu'en 1922, cette invention fut largement employée dans les fermes et les industries, notamment pour pomper de l'eau ou entraîner des machines. Cependant, à partir du début du 20 e siècle, ce moteur faisait face à une concurrence croissante des moteurs à combustion interne et des moteurs électriques. Au cours de la seconde moitié du 20 e siècle, divers moteurs, très pressurisés, à l'hélium ou à l'hydrogène, ont été développés et fabriqués.

Certains de ces moteurs présentent des performances globales exceptionnelles, par rapport aux moteurs à combustion interne de puissance similaire. Pour diverses raisons qui ne sont pas à l'ordre du jour, les moteurs Stirling ne sont pas encore connus. Actuellement, on assiste à une industrialisation à grande échelle. Robert Stirling n'est pas connu pour ce qu'il est. Il est possible qu'avec les défis liés à l'énergie et à l'écologie, ce genre de moteur se développera et que l'injustice subie par cet inventeur soit réparée [3].

### **I.3 Principe de fonctionnement**

Le moteur fonctionne dans la mesure où un fluide se détend à mesure que sa température augmente, ce qui pousse le piston. Dans le cas contraire, il se rétrécit et le piston revient à sa position initiale. Dans ce moteur, le gaz (air, hélium, hydrogène) présent dans le cylindre est chauffé et refroidi de manière alternée. Un moteur doit effectuer un tel cycle plus de 50 fois par seconde pour assurer son bon fonctionnement. Le fonctionnement peut être amélioré en permettant à une extrémité du moteur (cylindre) de maintenir une température élevée constante, tandis que l'autre extrémité reste à une température basse, le gaz devant se déplacer d'un côté à l'autre (source chaude/source froide). Ce qui est pratique, c'est l'utilisation d'un "déplaceur" en plus du piston qui effectue le travail. Le déplaceur est un élément mobile

qui facilite le déplacement du fluide et qui sépare la source chaude de la source froide. Le processus se divise en quatre étapes :

1. Le déplaceur est initialement situé à l'extrémité chaude du cylindre et le piston dans la partie froide. Dans la zone froide, le gaz est donc à sa pression la plus basse. Une légère dépression permet au piston de se déplacer.
2. Le déplacement du déplaceur vers le piston permet de faire circuler l'air froid dans la partie chaude.
3. On chauffe l'air et on augmente sa pression (le volume reste constant). Le piston est poussé par la pression de l'air (temps moteur).
4. Le déplaceur descend à sa position inférieure et déplace l'air vers la zone froide [2, 14, 15].

Un tel moteur présente l'avantage de fournir des conditions de combustion propres. Effectivement, un gaz identique est soumis à des transformations (sans rejets dans l'atmosphère) et il est possible d'alimenter la source chaude en continu à l'aide de diverses méthodes (résistances électriques chauffantes, panneaux solaires). Ce moteur pourrait constituer une option très attrayante en remplacement du moteur à combustion interne, étant donné que les réserves de pétrole ne pourront que diminuer dans les prochaines décennies

### I.3.1 Les quatre phases élémentaires

Dans son principe, le cycle thermodynamique du moteur Stirling est très simple : il se divise en 4 phases où le gaz utilisé subit les transformations suivantes :

#### I.3.1.1 Un chauffage isochore (à volume constant)

La source chaude (le brûleur) libère de l'énergie thermique. Il est facile d'imaginer que la pression et la température du gaz augmentent pendant cette étape.

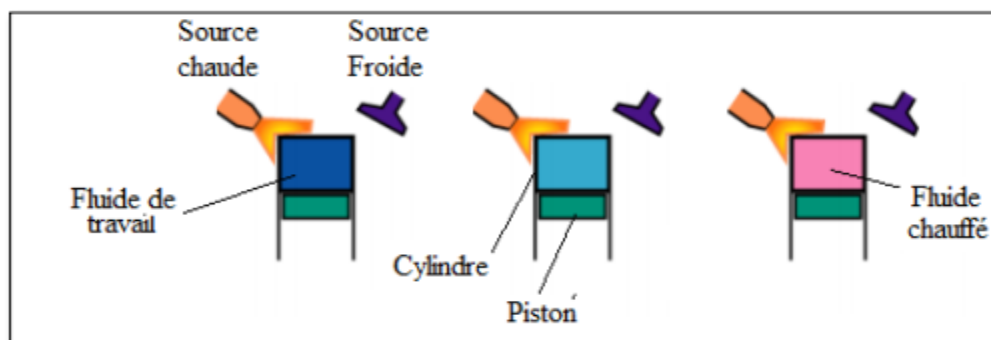


Figure 2 : Phase de chauffage. [4]

## I.3.1.2 Une détente isotherme (à température constante)

La pression diminue tandis que le volume augmente. C'est au cours de cette transformation que se produit l'énergie motrice.

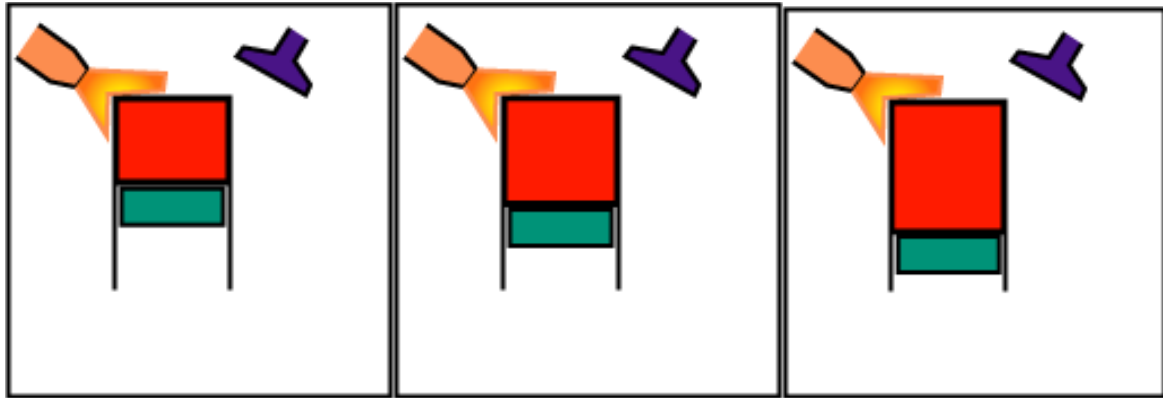


Figure 3 : Phase de détente. [4]

## I.3.1.3 Un refroidissement isochore

L'énergie thermique est récupérée par l'eau projetée (la source froide). Durant cette étape, la température et la pression diminuent.

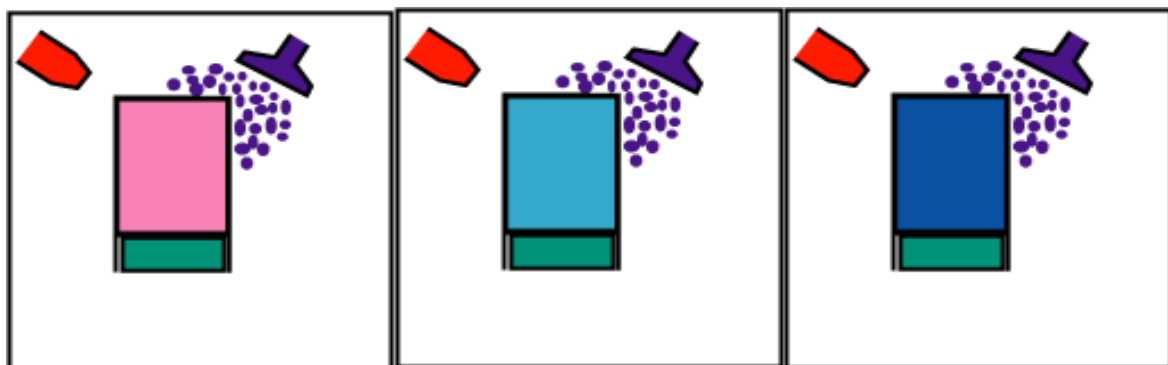


Figure 4 : Phase de refroidissement. [4]

## I.3.1.4 Une compression isothermique

La pression du gaz augmente avec la diminution de son volume. Il est nécessaire de fournir au gaz de l'énergie mécanique pendant cette période.

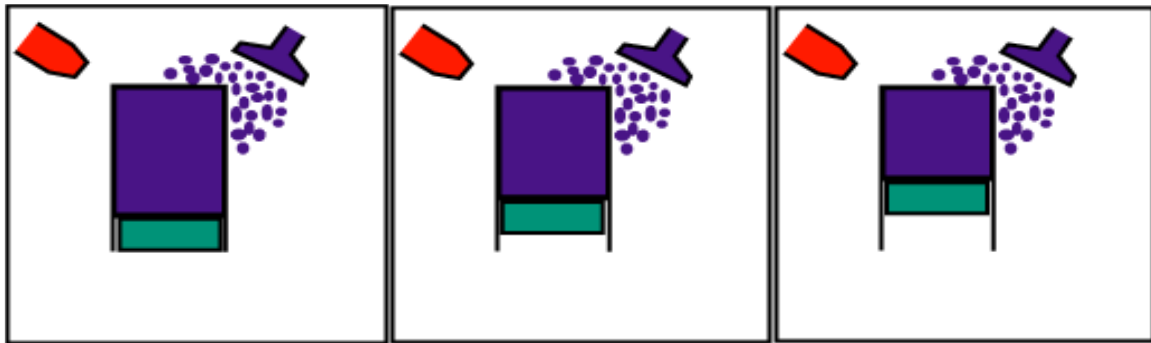


Figure 5 : Phase de compression. [4]

### I.3.1.5 Chauffage isochore

Le volume est inchangé, mais le déplaceur, en descendant, évacue le gaz de la partie inférieure (froide) vers la partie supérieure (chaude).

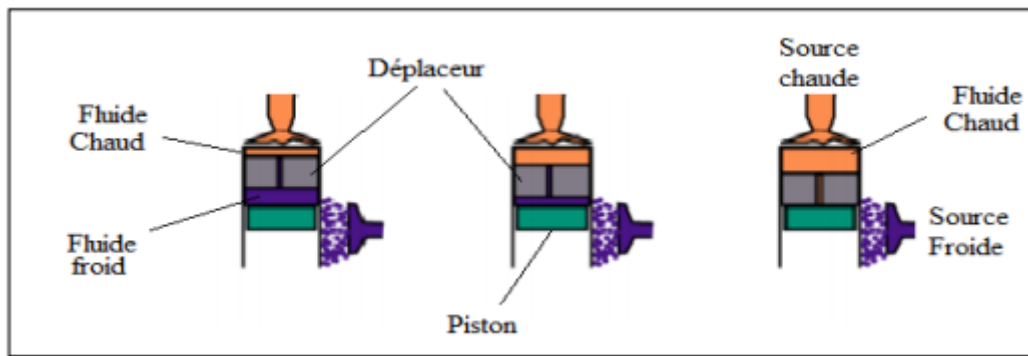


Figure 6 : 1ère phase de travail du déplaceur. [4]

### I.3.1.6 Détente isotherme

Au moment de la détente, le déplaceur suit le piston du moteur afin que le gaz ne reste en contact qu'avec la source chaude.



Figure 7 : 2ème phase de travail du déplaceur. [4]

## I.3.1.7 Refroidissement isochore

Le volume demeure constant, mais lorsque le déplaceur monte, le gaz passe de la partie supérieure (chaude) à la partie inférieure (froide).

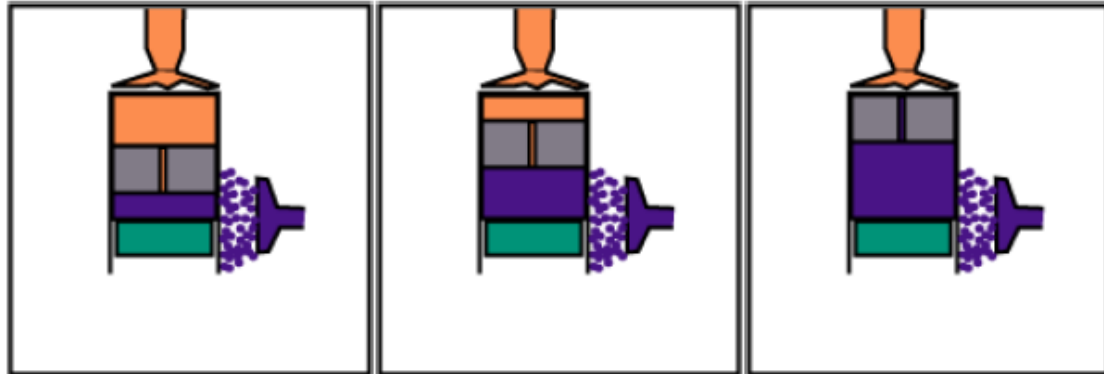


Figure 8 : 3ème phase de travail du déplaceur. [4]

## I.3.1.8 Compression isotherme

Lors de la compression, le déplaceur reste en position supérieure afin que le gaz ne soit en contact que avec la source froide.

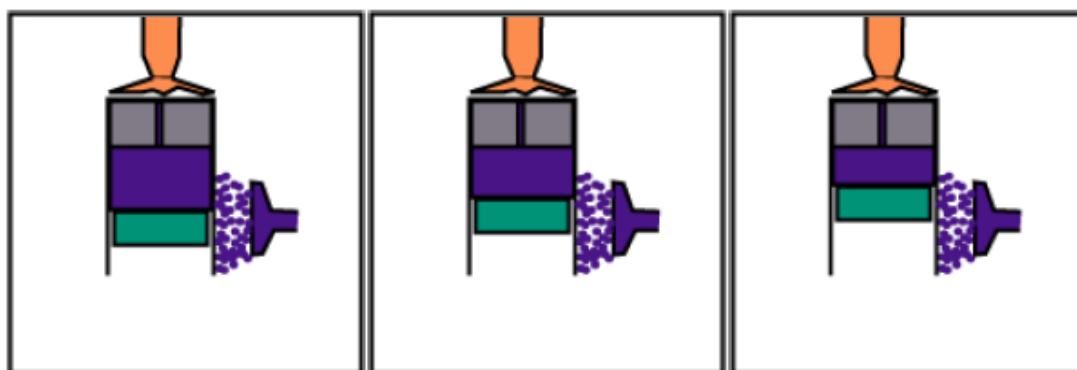


Figure 9 : 4ème phase de travail du déplaceur[4]

## I.4 Les types des moteurs de Stirling

Il y a une grande variété de motorisations Stirling. Ils sont généralement classés en fonction de leur structure géométrique. Trois principaux types de moteurs Stirling sont classés selon ce critère : le moteur alpha, le moteur bêta et le moteur gamma.

### I.4.1 Le moteur alpha

Le moteur Alpha est un moteur à deux cylindres avec deux pistons fonctionnant à la fois dans l'espace froid et dans l'espace chaud. Pendant le processus, le gaz de travail est

transféré d'un piston à un autre. Les pistons sont disposés de manière à ce que le piston de l'espace froid soit en retard de 1/4 de tour par rapport au piston de l'espace chaud.[8]

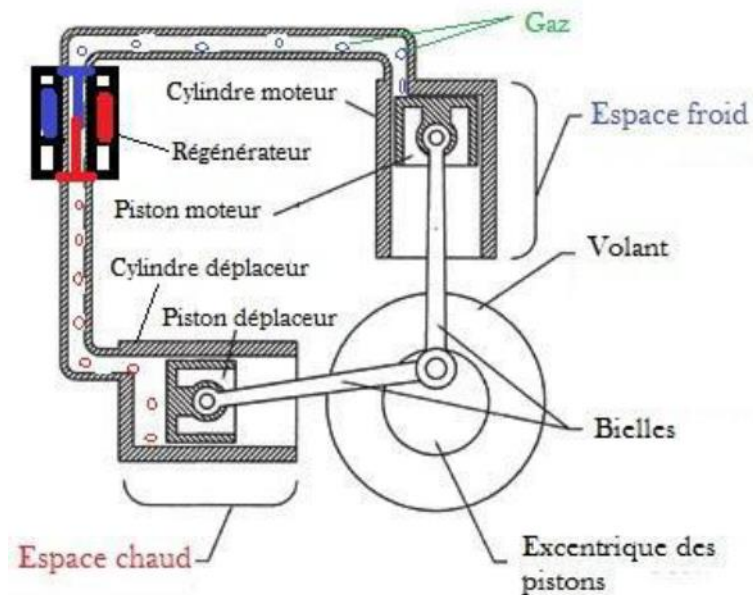
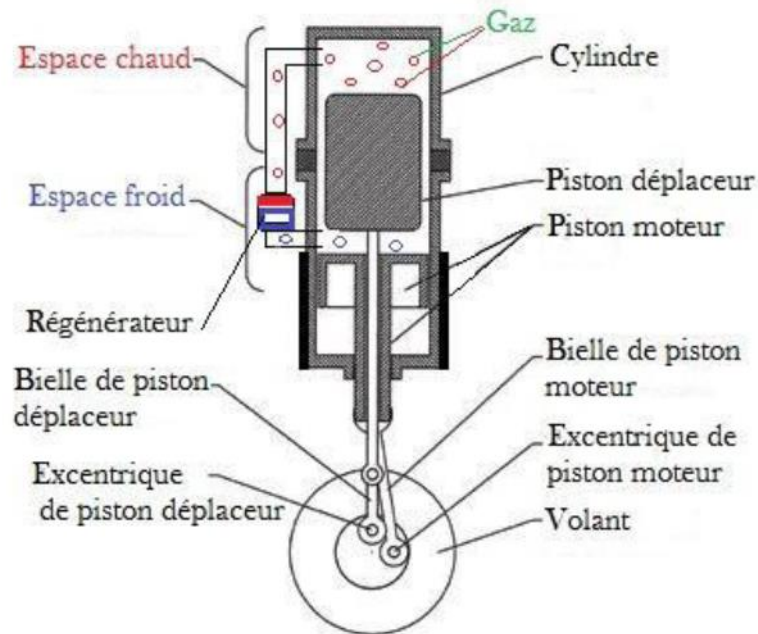


Figure 10 : Schéma du moteur type ALPHA [5]

Ce genre de moteur présente un excellent rapport puissance/volume, mais nécessite des températures assez élevées pour être mis en marche.

## I.4.2 Le moteur Beta

Le moteur Béta est radicalement différent du moteur Alpha. Il n'a qu'un cylindre qui combine l'espace chaud et l'espace froid. En outre, les deux pistons, le moteur et le déplaceur sont entièrement imperméables. Le mouvement relatif de ces pistons lors du changement de volume du gaz est combiné à un mouvement commun qui déplace ce volume de la partie chaude à la partie froide, et inversement.[8]



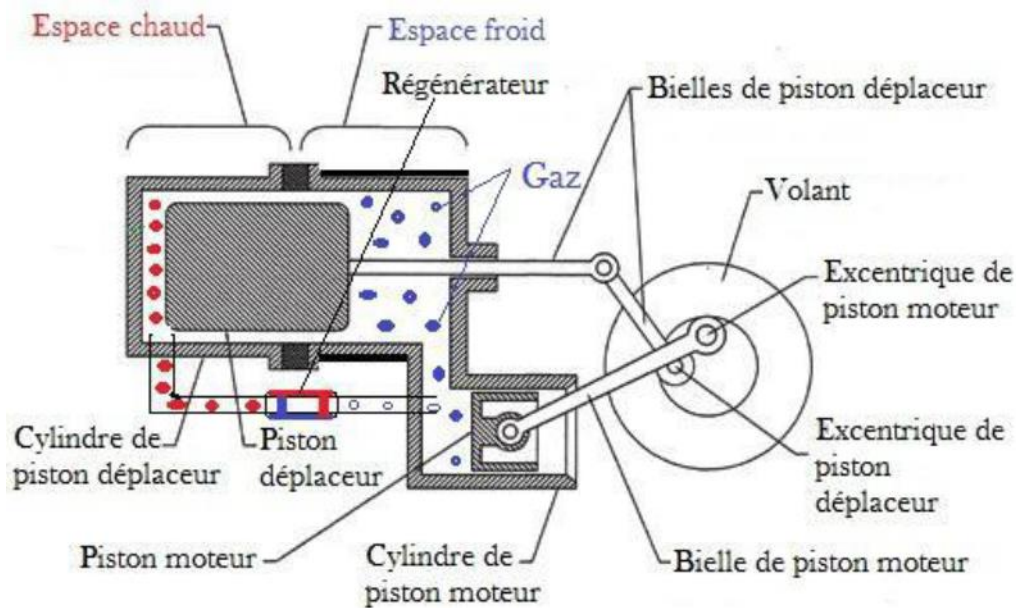
**Figure 11** : Schéma du moteur type BETA [5]

Ce type présente deux principaux atouts : sa petite taille et l'absence de perte aérodynamique lors du passage du gaz d'une partie à l'autre du cylindre. Toutefois, à l'intérieur de ce cylindre, il y a des transferts thermiques de conduction qui peuvent réduire la différence de température entre la zone chaude et la zone froide, ce qui entraîne une diminution légère de son efficacité. Étant donné que les pistons des moteurs bêta se trouvent tous deux dans le même cylindre, cela rend la construction plus complexe, mais cela permet de réduire considérablement l'espace mort entre le piston moteur et celui du déplacement en les plongeant dans un espace commun.[8]

### 1.4.3 Le moteur Gamma

Le Gamma est un hybride du moteur Alpha et du moteur Béta. Dans un cylindre, la fonction du piston déplaceur est remplie, tandis que dans l'autre, le piston moteur permet de modifier le volume global et de récupérer l'énergie. Il s'agit d'un moteur bicylindre avec un piston moteur et un piston déplaceur. Le gaz est déplacé d'une zone à une autre grâce au piston déplaceur.

Les fluctuations de température du gaz provoquent à leur tour des fluctuations de pression qui entraînent le déplacement du piston moteur. [8]



**Figure 12 :** Schéma du Moteur type gamma [5]

Les moteurs de ce genre sont relativement simples à élaborer en raison de leur mécanique simple. Certains de ces moteurs ont un rendement inférieur à celui des types mentionnés précédemment, mais ils peuvent fonctionner avec des écarts de température très faibles, ce qui signifie que certains de ces moteurs peuvent avoir un écart de seulement 5°C (certains de ces petits moteurs ne peuvent tourner que grâce à la chaleur d'une main humaine). [9]

## I.5 Application des moteur Stirling

Grâce à la variété des configurations des moteurs Stirling, leurs applications ont été étendues. Ces dernières couvrent divers secteurs dont nous mentionnons :

### I.5.1 Conversion de l'énergie solaire en électricité

Selon Maier et al. (2007), la technique de stirling solaire est considérée comme la méthode la plus performante pour convertir l'énergie solaire en électricité, avec une efficacité proche de deux fois supérieure à celle des autres technologies solaires alternatives. Cette méthode implique de regrouper l'ensemble des rayons solaires en utilisant une parabole au centre de laquelle un récepteur est installé. Cette méthode permet d'accroître la température d'un fluide de travail qui circule dans un moteur de type Stirling. Cette installation offre un taux de conversion solaire-électrique assez élevé et a un impact environnemental très faible. Les principaux éléments constitutifs de la parabole Stirling (Dish-Stirling) sont un miroir

parabolique, un moteur Stirling avec générateur, un capteur solaire ou récepteur et un système de suivi du soleil.[10]



**Figure 13** : La parabole Stirling solaire du projet EuroDish (Nepven et al. 2006).[11]

### I.5.2 Domaine militaire

De nombreux sous-marins ont été construits avec des moteurs Stirling. Les moteurs Stirling sont particulièrement prisés pour leur fonctionnement silencieux. En outre, il est possible de procéder à la combustion externe en utilisant du carburant et de l'oxygène déjà sous pression, et les gaz d'échappement peuvent être directement rejetés dans l'eau de mer sans être préalablement comprimés. Cela permet d'accroître l'autonomie lors de la plongée et en cas de manque d'électricité. Par exemple, le plus grand sous-marin commercial du monde (Sauzade et al. 1991) [12]: le SAGA (sous-marin d'Assistance à Grande Autonomie). Son moteur était constitué de deux moteurs Stirling de 75 kW chacun, mis en service au début des années 60.

### I.5.3 Domaine de l'informatique

Un ventilateur consomme de l'énergie à pure perte. Effectivement, avoir un processeur qui se prend pour un barbecue coréen est déjà assez peu économique sur le plan énergétique, mais ajouter des watts supplémentaires pour évacuer cette surconsommation calorifique ne fait qu'aggraver encore plus le problème.

Fort de ce constat, la société MSI a eu une idée bien sympathique. Pourquoi ne pas simplement utiliser cette énergie perdue sous forme de chaleur pour... refroidir le processeur ? Pas possible ? Mais si, mais si, grâce à un moteur Stirling [13]



**Figure 14 :** Micro-processeur refroidi par moteur Stirling Le ventilateur de MSI.[10]

Récemment, une utilisation très particulière du moteur Stirling a été mise en évidence pour refroidir un micro-processeur d'ordinateur.

La bonne idée de MSI consiste à utiliser un tel moteur en utilisant la zone chaude du processeur comme source d'énergie. Le processus de compression/décompression va donc entraîner l'activation d'un piston, ce qui va entraîner le déplacement d'un ventilateur.

L'énergie thermique dissipée par le microprocesseur est utilisée par ce micro-moteur Stirling. Un ventilateur est entraîné par ce petit moteur qui dissipe la chaleur restant évacuée par le micro-processeur. Cette fonction de refroidissement ne nécessite donc pas d'énergie électrique supplémentaire, contrairement à ce qui se passe sur un ordinateur « ordinaire ». La chaleur dissipée de cette manière est estimée à 70% par certains.

Il est évident que le ventilateur ne refroidit pas directement le processeur, mais plutôt deux caloducs (ou « heatpipes »). Juste pour vous informer, un caloduc est un tube fermé ne renfermant qu'un seul gaz. Le tube s'approche de la zone chaude du processeur d'un côté, tandis qu'il est fixé à plusieurs ailettes pour augmenter la surface de contact avec l'air de l'autre. Le gaz liquide en équilibre va se vaporiser lorsqu'il entre en contact avec la zone chaude, dégageant ainsi des calories. Avec une légèreté accrue, le gaz se dirige vers la partie « à ailettes ». Dans notre ventilateur "de Stirling", un air plus froid est soufflé, ce qui entraîne la condensation du gaz. De plus en plus liquide, ce qui rend notre gaz plus lourd, il retombe sur la zone chaude, et ainsi de suite. Simple et performant.

Cependant, le moteur de Stirling est déjà utilisé depuis longtemps dans le domaine industriel et militaire pour le refroidissement. Cependant, même si le prix et l'efficacité réelle de cette technologie ne sont pas encore connus, l'arrivée de cette technologie qui permet de

réduire la consommation d'énergie par nos consommateurs de watts est en soi une nouveauté qui mérite d'être mise en avant. [13]

### I.5.4 Domaine de cogénération

On peut trouver des systèmes de cogénération disponibles sur le marché, qui se composent d'une chaudière traditionnelle qui fournit la chaleur aux habitations et d'un moteur Stirling qui capture les pertes de chaleur (comme les fumées par exemple) afin de les convertir en électricité [14]. En ce moment, dans le cadre de l'économie des énergies, ce type d'installation pourrait constituer un marché prometteur pour le moteur Stirling.



**Figure 15 :** Chaudière à bois Stirling (Stirling power model).[11]

### I.5.5 Domaine du transport : Voiture hybride

Un véhicule électrique de démonstration « bioracer » a été développé par des Suédois de la société PRECER, dont les batteries sont rechargées par un moteur Stirling. En réalité, il s'agit d'une technologie que l'entreprise peut utiliser dans chacune de ses cinq industries : les voitures, le transport routier, les équipements mobiles, les équipements maritimes et les centrales de cogénération. Le principe fondamental consiste en un moteur Stirling alimenté par des granulés de bois, du bois déchiqueté ou toute autre biomasse solide. Le mouvement de ces granulés fait fonctionner un alternateur qui produit l'énergie électrique requise pour les moteurs des véhicules hybrides.[81]



**Figure 16 :** Moteur Stirling d'une voiture hybride.[12]

Le moteur Stirling est réversible, ce qui lui permet de générer du froid de manière industrielle et avec un rendement élevé. Quatre pistons à double action sont utilisés pour le transfert d'un gaz (hélium ou hydrogène) et la récupération d'énergie. Leur configuration axiale permet un encombrement réduit et une compacité adéquate de l'ensemble. La puissance de ce moteur (Figure 1) est de 30 kW et sa durée de vie sans entretien est de 60000 heures (7 ans sans interruption). Il y a une vitesse de rotation de 1800tr/mn en sortie et un rendement de 40% [15].

### I.6 Avantages et inconvénients

Il y a de nombreuses machines connues sous le nom de moteur Stirling. La diversité de ce moteur se manifeste donc dans son domaine d'utilisation : il peut être utilisé dans différentes applications, allant du cœur artificiel alimenté par un petit réacteur nucléaire implanté dans un corps humain au moteur de sous-marin, en passant par les installations de récupération des effluents gazeux à basse température ou les systèmes de conversion de l'énergie solaire.[2] Les moteurs Stirling modernes présentent des performances énergétiques similaires à celles des moteurs Diesel de même puissance, sans explosions ni combustion interne. Les bénéfices de ce moteur incluent les suivants :

#### I.6.1 Avantages

Les moteurs Stirling présentent plusieurs atouts par rapport à d'autres moteurs thermiques, parmi lesquels on peut mentionner les suivants :

- Étant donné que la combustion est externe, il est possible d'utiliser une variété de combustibles et d'améliorer son efficacité.
- En raison de l'absence d'explosion, de l'absence de valves qui s'ouvrent et se ferment, et de l'absence de gaz qui s'échappent, il produit peu de vibration. Cela le rend stable et diminue les contraintes mécaniques (absence d'explosions, de soupapes, de bruits d'échappement) [1] ;
- En plus de la diminution de la pollution sonore, l'absence d'échange de gaz avec l'environnement extérieur le rend pratique dans les environnements pollués ou dans les environnements où il est nécessaire d'éviter l'introduction de matière étrangère [4] ;
- En raison de son absence d'échange de matière avec son environnement et de l'absence de réaction chimique interne, ce moteur présente une détérioration moindre qu'un moteur à combustion interne.

- Il peut atteindre environ 40 % de rendement (soit 80 % du maximum du cycle de Carnot), tandis que les moteurs à explosion ont environ 35 % de rendement. Si la différence de 5 points semble minime, cela signifie néanmoins près de 15 % (5/35) d'énergie supplémentaire. Les moteurs électriques, bien qu'ils puissent atteindre un rendement de 95 %, ne sont pas comparables, car l'électricité est une source d'énergie difficile à stocker et à transporter, avec un rendement proche de 100 %, ce qui constitue une limite importante pour certaines utilités.
- Réversible. Le cycle de Stirling est réversible : un moteur Stirling entraîné par un autre moteur devient une pompe à chaleur qui peut refroidir à  $-200\text{ °C}$  ou chauffer à plus  $700\text{ °C}$ , en fonction du sens d'entraînement. Cela, sans utiliser de gaz présentant des caractéristiques particulières qui leur causent des désavantages pratiques ou chimiques (comme le fréon des machines frigorifiques d'anciennes générations, qui détruit la couche d'ozone). Dans la réalité, en effet, c'est la fonction de pompe à chaleur performante qui permet à certaines machines de survivre ;
- En raison de sa méthode de chauffe, ce moteur peut être alimenté par n'importe quelle source de chaleur (combustion d'un carburant quelconque, solaire, nucléaire, ou même chaleur humaine) ;
- La chaleur provenant de l'extérieur peut potentiellement être moins polluante grâce aux énergies non fossiles, ce qui permet de la fournir de manière moins polluante que dans de nombreux moteurs thermiques où la combustion est imparfaite [2, 4, 5, 6] ;

### I.6.2 Inconvénients

- Il est plus difficile de garantir l'étanchéité des pistons que dans un moteur à combustion interne, en raison des très fortes variations de température et de la nécessité, pour réduire les pertes par frottement (notamment dans le régénérateur), d'utiliser un gaz le moins visqueux possible. L'inconvénient réside dans le fait que le gaz le moins visqueux, comme l'hydrogène, est également celui qui se déplace le plus facilement ;
- Alors que les moteurs à combustion interne génèrent la chaleur directement dans le fluide, à une vitesse très rapide et de manière très homogène, un système Stirling repose sur des transferts thermiques entre le gaz et les échangeurs (les deux sources et le récupérateur), tandis que les gaz sont des isolants thermiques où les échanges sont très lents. En outre, il est essentiel de réduire au minimum le volume « mort » (qui renferme du fluide qui ne réalise pas le cycle et donc ne participe pas au rendement).

Cela engendre des difficultés dans la dynamique des fluides, des problèmes complexes à résoudre, tels que les problèmes liés aux échangeurs, au récupérateur, aux tuyaux ou au piston qui permettent le déplacement du gaz tout au long du cycle (problèmes de diamètre, de longueur, de turbulences à créer ou à éviter).

- Il est difficile de commander : l'un des désavantages réside dans son manque de réactivité. En général, pour ajuster la puissance du moteur, on modifie la puissance de chauffe. Cependant, en raison de l'inertie thermique élevée des échangeurs, l'augmentation de puissance est beaucoup plus lente que celle des moteurs à combustion interne courants.
- Il est difficile de modifier le régime de ce moteur, car il ne peut être effectué qu'en modifiant le taux de compression du fluide de travail, en augmentant la chaleur de la source chaude ou en diminuant celle de la source froide. Il est possible de corriger cet inconvénient en utilisant des méthodes comme une boîte de vitesses pour entraîner un arbre de transmission vers des roues ou un changement de pas pour entraîner une hélice. C'est la raison pour laquelle le moteur Stirling est perçu comme étant très limité en termes de puissance et de couple variable, un inconvénient considéré comme très crucial pour la propulsion automobile, en particulier, alors que c'est précisément cette application qui a fait la fortune du moteur à combustion interne. Mais ce désavantage pourrait être atténué dans le cas d'un "système hybride" (le moteur fonctionnant à régime constant, la modulation de puissance étant assurée par le système électrique), mais ils sont encore peu fréquents ;
- Prix élevé : n'ayant aujourd'hui que peu d'utilisations en grande série, contrairement au moteur à combustion interne, il est beaucoup plus coûteux ; de plus, pour la même raison, les industriels ne lui accordent pas le même intérêt en matière de recherche et développement, ce qui ne lui permet pas de rattraper son retard (en supposant que cela soit possible). Le développement des recherches sur la production d'énergie et plus particulièrement sur les énergies renouvelables pourrait apporter des améliorations à cette situation [2, 4, 5, 6].

### I.7 Conclusion

Le moteur Stirling est un moyen efficace de transformer directement l'énergie thermique en énergie mécanique. Le moteur Stirling, dans sa forme la plus simple, est composé d'un cylindre contenant du gaz et d'un piston qui absorbe l'énergie mécanique. La variation de la pression est due à la différence de température. On obtient l'énergie à

l'extérieur du cylindre, c'est pourquoi on peut lire parfois « moteur à air chaud » ou « moteur à combustion externe ».

Il y a trois types principaux de moteurs Stirling selon leur configuration géométrique : le moteur alpha, le moteur bêta et le moteur gamma.

Le moteur Stirling bénéficie d'un avantage dans certains secteurs d'utilisation (comme la production d'électricité par exemple).

le moteur Stirling suscite un vif intérêt, principalement en raison de son rendement théorique élevé, de sa faible pollution et de sa grande adaptabilité à différentes sources de chaleur. Il est à souligner que tous les modèles développés jusqu'à présent présentent des performances médiocres. Cela est principalement causé par les pertes thermiques et mécaniques, en particulier celles qui se produisent au niveau du régénérateur (pertes par conduction), ainsi que les pertes de charges dans le réchauffeur, le refroidisseur et le régénérateur.

# **Chapitre II :**

## **Dimensionnement du moteur**

### II.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 représentant celle du puits froid. Le deuxième modèle est le modèle adiabatique qui a été développée par Finkelstein (1961). Dans ce modèle, les espaces sont supposés adiabatiques, et la notion des températures conditionnelles causées par la discontinuité de celles entre les différents espaces de travail est introduite. Le troisième modèle, est le modèle quasi-stationnaire. La différence majeure 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). 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 Waals.

### II.2 Choix du type de moteur

En général, on utilise le moteur Stirling de type gamma pour réduire les variations de température entre la source froide et la source chaude. C'est pourquoi nous recevons des puissances très faibles (de l'ordre du watt).

Deux versions du moteur Stirling modèle gamma sont disponibles dans la pratique (voir figure ci-dessous) :

- Version (a) : Cylindres en contact direct. Le piston de travail est directement en contact avec le déplaceur en raison de sa forme de volume de cylindre.
- Version(b) : Des cylindres en contact indirect. Une conduite refroidie sépare les deux cylindres du déplaceur et de travail, permettant ainsi au fluide de travail de se déplacer entre les deux volumes.

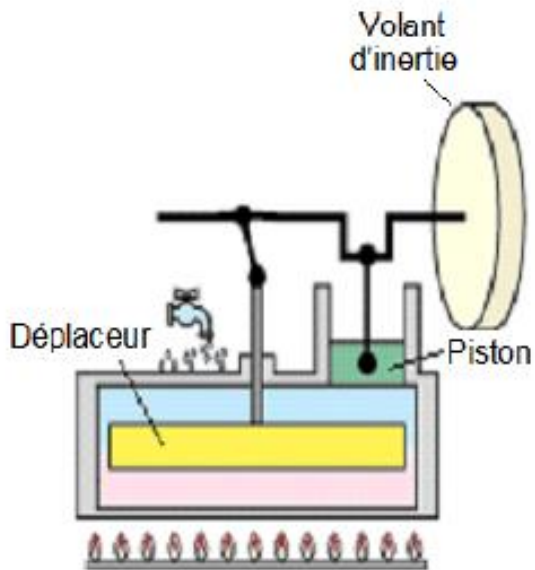


Figure 17 Version (a)

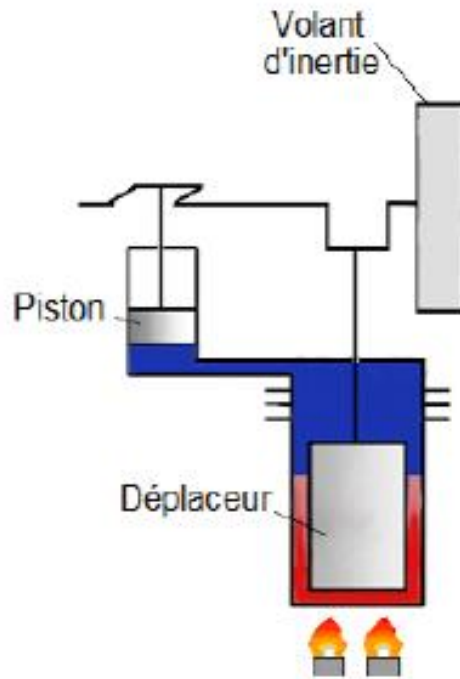


Figure 18 Version (b)

Pour notre projet de fin d'étude le model choisi pour l'étude et la réalisation c'est le Moteur Stirling modèle  $\gamma$  version (b)

II.3 Principe de fonctionnement du modèle a étudié

II.3.1 Cycle thermodynamique de moteur Stirling théorique

Le cycle est similaire à celui de la plupart des cycles thermiques, il se divise en quatre étapes : (1) Compression, (2) Chauffage, (3) Détente et (4) Chauffage. On peut observer clairement ces étapes dans la figure ci-dessous :

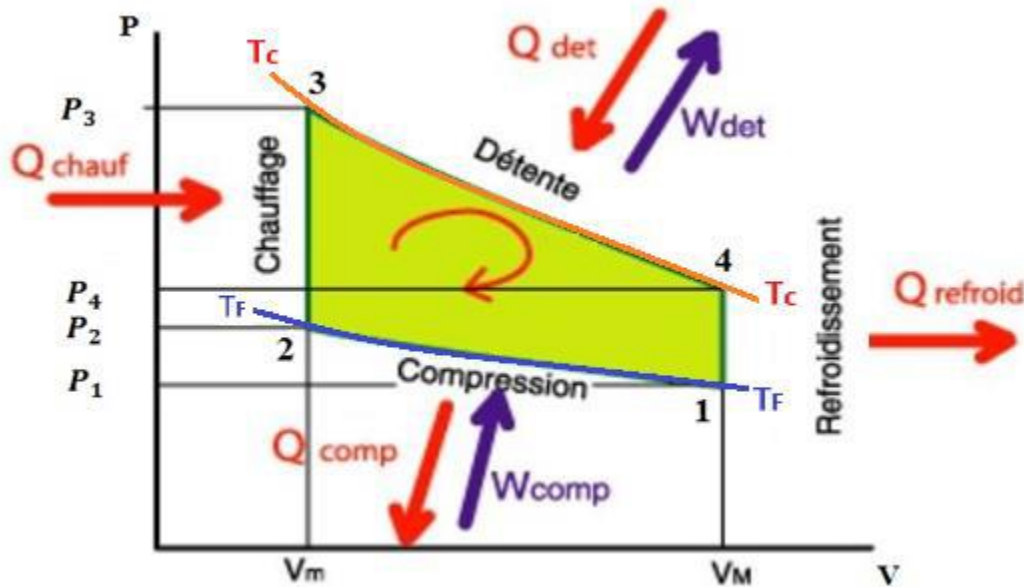


Figure 19 : Diagramme d'un moteur Stirling théorique [14]

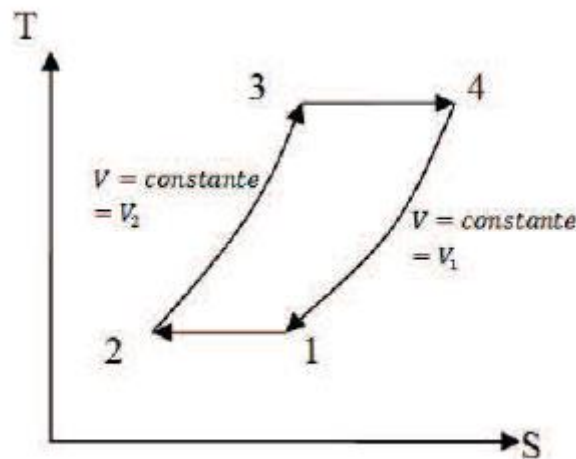


Figure 20 : Diagramme d'entropie (T,S) d'un moteur Stirling

- Point 3 à 4, relaxation à l'isolement. Le gaz est chauffé par l'extérieur dans la zone de détente, ce qui entraîne une détente isotherme.

- Refroidissement à volume constant (isochore) à partir du point 4 à 1. Dans le régénérateur, le gaz se refroidit en lui transférant sa chaleur qui sera utilisée pour le prochain cycle.
- Étapes 1 à 2, compression isothermique. Le gaz est soumis à une compression isotherme en zone de compression et de refroidissement.
- Les parties 2 à 3, le chauffage isochore. Le gaz ne se déplace pas à travers le régénérateur et accumule de la chaleur.

### II.3.2 Etude thermodynamique

Il est essentiel de connaître peu de choses pour comprendre le principe du fonctionnement du moteur Stirling. On considère que le gaz utilisé (air, hydrogène, hélium, azote...) est un gaz parfait,  $PV = nRT$ , où P est la pression du gaz, V son volume, n la quantité de gaz, R la constante moléculaire du gaz et T la température du gaz.

Selon le vieux principe , "rien ne se perd, rien ne se crée, toute se transforme". Par exemple, toute perte d'énergie calorifique pendant un cycle de Stirling est égale aux gains d'énergie mécanique pendant ce même cycle. En énergie mécanique,  $W_{det}$  est récupéré tandis que  $W_{comp}$  est fourni. Ainsi, le bilan global précise que l'énergie calorifique perdue a été complètement convertie en énergie mécanique [16].

### II.3.3 Les formules thermodynamiques utilisées pour les calculs

Le moteur Stirling suppose que le fluide de travail soit parfait et respecte l'équation des gaz parfaits :

$$PV = nRT = m \frac{R}{M} T = mrT \quad 1$$

### II.3.4 Les volumes

Prenons l'exemple où les volumes présents dans le réchauffeur et le refroidisseur sont mesurés en mètres cubes et sont respectivement représentés par :

➤ Le volume d'air contenu dans ce moteur  $V_{max}$  :

$$V_{max} = V_{gc} + V_{pc} \quad 2$$

D'où :

$V_{gc}$  : est le volume de grand cylindre

$V_{pc}$  :est le volume de petit cylindre

➤ Le volume de grand cylindre  $V_{gc}$  :

$$V_{gc} = V_{cyl} - V_d - V_{td} \quad 3$$

D'où :

$\left\{ \begin{array}{l} V_{cyl}: \text{ est le volume de cylindre} \\ V_d: \text{ est le volume de déplaceur} \\ V_{td}: \text{ est le volume de la tige de déplaceur} \end{array} \right.$

$$V_{cyl} = \pi \left( \frac{D_{cyl}}{2} \right)^2 \cdot h_{cyl} \quad 4$$

$$V_d = \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \cdot h_d \quad 5$$

$$V_{td} = \pi \left( \frac{D_{td}}{2} \right)^2 (h_{cyl} - h_d) \quad 6$$

Donc l'équation (3) devient:

$$V_{gc} = \pi \left( \frac{D_{cyl}}{2} \right)^2 \cdot h_{cyl} - \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \cdot h_d - \pi \left( \frac{D_{td}}{2} \right)^2 (h_{cyl} - h_d) \quad 7$$

➤ Le volume de petit cylindre  $V_{pc}$ :

$$V_{pc} = \pi \left( \frac{D_{pc}}{2} \right)^2 \cdot (h_{pc} - h_p) \quad 8$$

$h_p$ : est la hauteur de piston

On remplace les équations (7) et (8) dans l'équation (2) :

$$V_{max} = \pi \left( \frac{D_{cyl}}{2} \right)^2 \cdot h_{cyl} - \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \cdot h_d - \pi \left( \frac{D_{td}}{2} \right)^2 (h_{cyl} - h_d) + \pi \left( \frac{D_{pc}}{2} \right)^2 \cdot (h_{pe} - h_p) \quad 9$$

➤ Le volume minimal  $V_{min}$  :

$$V_{min} = V_{cyl} - V_d \quad 10$$

$$V_{min} = \pi \left( \frac{D_{cyl}}{2} \right)^2 \cdot h_{cyl} - \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \quad 11$$

- La masse de l'air  $m_{\text{air}}$  :

$m_{\text{air}}$  Correspond à la masse totale de l'air contenu dans le moteur en ( Kg ), elle est définie comme suit :

$$m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} V_{\text{air}} \quad 12$$

$$V_{\text{air}} = V_{\text{max}}$$

- **Les pressions :**

Les pressions son définie par l'unité de pascal, et chaque transformation est définie par:

- 1 → 2: Compression isotherm ( $V_1 = V_{\text{max}} \cdot T_1 = T_2 = T_f$ )

$$P_1 V_1 = m_{\text{air}} r T_1 \quad 13$$

Donc :

$$P_1 = \frac{m_{\text{air}} r T_1}{V_1} \quad 14$$

- 2 → 3: Chauffage isochore ( $V_2 = V_{\text{min}} \cdot T_2 = T_1$ )

$$P_2 V_2 = m_{\text{air}} r T_2 \quad 15$$

Donc :

$$P_2 = \frac{m_{\text{air}} r T_2}{V_2} \quad 16$$

- 3 → 4: Détente isotherme ( $V_3 = V_{\text{min}} \cdot T_3 = T_4 = T_c$ )

$$P_3 V_3 = m_{\text{air}} r T_3$$

Donc:

$$P_3 = \frac{m_{\text{air}} r T_3}{V_3} \quad 17$$

- 4 → 1: Refroidissement isochore ( $V_4 = V_{\text{max}} \cdot T_4 = T_c$ )

$$P_4 V_4 = m_{\text{air}} r T_4$$

Donc :

$$P_4 = \frac{m_{\text{air}} r T_4}{V_4} \quad 18$$

### II.3.5 Les chaleurs

Défini en joule (j), appliquant le premier principe de la thermodynamique pour chaque transformation du cycle on aura comme suit :

$$\Delta U = Q + W \quad 19$$

#### ➤ Chaleur $Q_{1-2}$

$$dU_{1-2} = \partial Q_{1-2} + \partial W_{1-2} = 0 \text{ (La température est constante)} \quad 20$$

Donc :

$$\partial Q_{1-2} = -\partial W_{1-2} = P dV \quad 21$$

or

$$P = \frac{m_{\text{air}} r T}{V} \quad 22$$

$$Q_{1-2} = m_{\text{air}} r T \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \quad 23$$

#### ➤ Chaleur $Q_{3-4}$

$$\text{De même pour } Q_{3-4} \text{ on trouve : } Q_{3-4} = m_{\text{air}} r T_c \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right) \quad 24$$

Pour  $Q_{2-3}$  et  $Q_{4-1}$  on a :

$$Q_{2-3} = m_{\text{air}} C_v (T_3 - T_2) \text{ et } Q_{4-1} = m_{\text{air}} C_v (T_1 - T_4) \quad 25$$

Alors :

$$Q_{4-1} = m_{\text{air}} C_v (T_f - T_c) \quad 26$$

Soit n moles d'un gaz parfait à pression P et à température T confinées dans un volume fixe V. Si on ajoute une quantité de chaleur  $Q_v$ , la température augmente de  $\Delta T$  et la pression de  $\Delta P$ .

D'après la 1<sup>ère</sup> loi de la thermo,  $\Delta U = Q_v - W = nC_v\Delta T - W$ .

Mais ici aucun travail ne s'effectue puisque  $\Delta V = 0$ . La chaleur ajoutée sert entièrement à accroître l'énergie interne. Ce qui donne :

$$C_v = \frac{1 \Delta U}{n \Delta T}$$

D'autre part l'énergie interne d'un gaz diatomique parfait est  $U = \frac{5}{2} nRT$

Donc  $\Delta U = \frac{5}{2} nR\Delta T$ .

On obtient ainsi :

$$C_v = \frac{1 \Delta U}{n \Delta T} = \frac{1 \frac{5}{2} nR\Delta T}{n \Delta T} = \frac{5}{2} R \tag{27}$$

Donc :  $C_v = \frac{5}{2} r$

$$Q_{2-3} = -Q_{4-1} = m_{\text{air}} \frac{5}{2} r(T_3 - T_2) \tag{28}$$

**Donc:**  $Q_{2-3} = -Q_{4-1} = m_{\text{air}} \frac{5}{2} r(T_c - T_f) \tag{29}$

**II.3.6 Les travaux :**

Est définie en joule (j). Correspond aux deux transformations isotherme  $W_{1-2}$  st  $W_{3-4}$  on peut l'exprimer comme suit:

$$\partial W_{1-2} = -\partial Q_{1-2} = -P dV \tag{30}$$

or  $P = \frac{m_{\text{air}} r T}{V}$

$$W_{1-2} = -m_{\text{air}} T_f \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = m_{\text{air}} r T_f \ln \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \tag{31}$$

$$W_{3-4} = -m_{\text{air}} r T_c \ln \left( \frac{V_4}{V_3} \right) = m_{\text{air}} r T_c \ln \left( \frac{V_3}{V_4} \right) \tag{32}$$

**$W_{2-3}$  et  $W_{4-1} = 0$  (Volume constant)**

Donc :

$$W = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} + W_{4-1} \quad 33$$

$$W = m_{\text{air}} r T_1 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) + m_{\text{air}} r T_c \ln\left(\frac{V_2}{V_4}\right) \quad n \quad 34$$

### II.3.7 Le rendement

$$\eta = \frac{|W|}{Q_c} \quad 35$$

D'où :

$\begin{cases} W = \text{sst l'énergie fournis sous forms de travail} \\ Q_c = \text{sst l'énergis thermique schangé par chaleur} \end{cases}$

$$W = m_{\text{air}} r (T_c - T_f) \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad 36$$

On peut considérer que l'énergie thermique échangée par chaleur  $Q_a$  n'est apportée au moteur que pendant la transformation 3-->4 et donc que  $Q_c = Q_{3-4}$

$$Q_{3-4} = m_{\text{air}} r T_c \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

et on a:  $V_4 = V_1$  et  $V_3 = V_2$  donc

$$Q_{3-4} = m_{\text{air}} r T_c \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

Notre rendement devient:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad 37$$

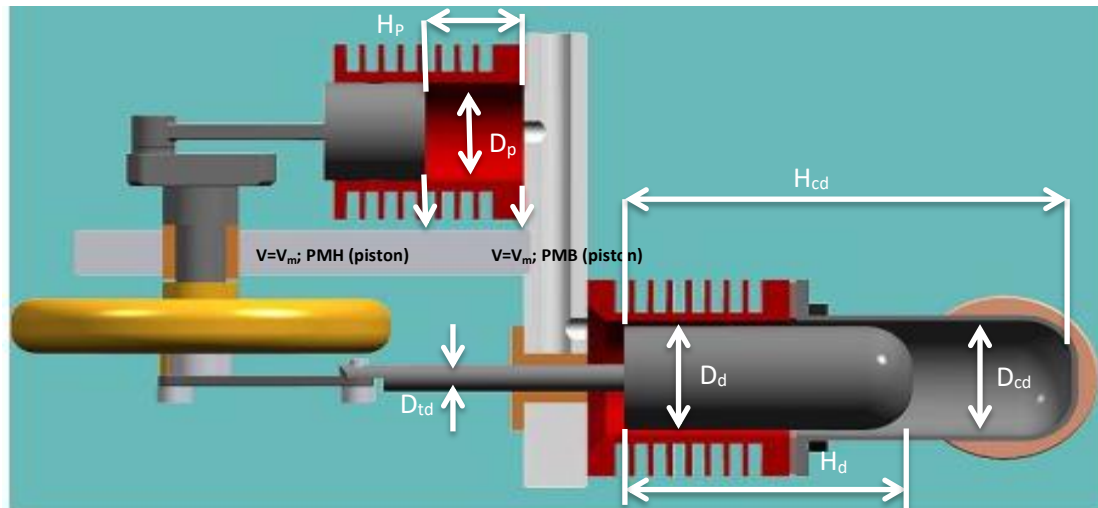
Selon la formule au-dessous, le rendement peut s'écrire en fonction des températures chaudes et froides :

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

on voit que le rendement théorique du moteur Stirling égale au rendement théorique de Carnot Donc en réalité le rendement réel du moteur Stirling ne doit pas dépasser la valeur qu'on va trouver dans les calculs.

## II.4 Etude et dimensionnement

Dans cette partie on s'intéresse à l'étude et le calcul des paramètres caractéristiques principaux du modèle choisit du moteur Stirling, à partir des données initiales géométrique et thermiques telle que : les dimensions des cylindres, pistons de travail et déplaceur, la température source chaude et froide [7] (Voir **Tableau 1**)



**Figure 21:** Schémas représentatif de la dimension principale pour l'étude thermodynamique d'un moteur Stirling type Gamma.

### II.4.1 Définitions des dimensions

- **Cylindre de déplaceur**
  - **D<sub>cd</sub>** : Diamètre intérieur du cylindre du déplaceur (grand cylindre).
  - **h<sub>cd</sub>** : Hauteur du cylindre du déplaceur (grand cylindre) = course de déplaceur.
  - **D<sub>d</sub>** : Diamètre du déplaceur.
  - **h<sub>d</sub>** : Hauteur du déplaceur.
  - **D<sub>td</sub>** : Diamètre de la tige du déplaceur.
- **Cylindre du piston de travail**
  - **D<sub>p</sub>** : Diamètre du cylindre du piston de travail (petit cylindre) = Diamètre extérieur du piston.
  - **h<sub>p</sub>** : Hauteur du cylindre du piston (grand cylindre) = course du déplaceur.

### II.4.2 Dimension et paramètre de calcul

Afin d'effectuer une étude énergétique détaillée du moteur Stirling type gamma et d'évaluer les paramètres caractéristiques de notre modèle variante (a), on a pris les dimensions géométriques et les paramètres thermiques suivantes :

**Tableau 1** : Paramètres géométriques et thermiques.

| Désignations                         | Symboles  | Unités | Valeurs |
|--------------------------------------|-----------|--------|---------|
| <b>Paramètres géométriques</b>       |           |        |         |
| Diamètre intérieur du grand cylindre | $D_{gc}$  | [mm]   | 76      |
| Hauteur du grand cylindre            | $h_{cyl}$ | [mm]   | 210     |
| Diamètre du déplaceur                | $D_d$     | [mm]   | 71      |
| Hauteur du déplaceur                 | $h_d$     | [mm]   | 61      |
| Diamètre de la tige du déplaceur     | $D_{td}$  | [mm]   | 7       |
| Hauteur de la tige du déplaceur      | $h_{td}$  | [mm]   | 139     |
| Diamètre intérieur de petit cylindre | $D_{pc}$  | [mm]   | 57      |
| Hauteur du petit cylindre            | $h_{pc}$  | [mm]   | 93      |
| Diamètre du piston de travail        | $D_p$     | [mm]   | 56.5    |
| Hauteur du piston de travail         | $h_p$     | [mm]   | 26      |
| <b>Paramètres thermiques :</b>       |           |        |         |
| Température de la source chaude      | $T_c$     | [K]    | 573     |
| Température de la source froide      | $T_f$     | [K]    | 303     |

### II.4.3 Calcul théorique du cycle de Stirling de la configuration proposée

Dans ce cas, nous allons calculer les pressions, les volumes, le travail, la chaleur et le rendement. Pour cet exemple, les paramètres initiaux de notre moteur sont représentés dans le tableau ci-dessus.

#### a) Calcul des volumes **V<sub>max</sub>** et **V<sub>min</sub>**

- Le volume Maximal **V<sub>ma</sub>** :

C'est le volume total de l'air emprisonné dans le cylindre du déplaceur plus le volume du cylindre du piston lorsque ce dernier se trouve au point mort haut PMH c.-à-d.

$$V_{\max} = V_{gc} + V_{pc}$$

On doit calculer:

➤ **Volume de l'air emprisonné dans le grand cylindre  $V_{gc}$**

Ce volume est égal au volume du cylindre  $V_{cyl}$  moins le volume du déplaceur  $V_d$  et le volume de la tige du déplaceur  $V_{td}$ .

$$V_{gc} = V_{cyl} - V_d - V_{td}$$

Tout d'abord on doit calculer :

- Volume de grand cylindre sans déplaceur  $V_{cyl}$

$$V_{cyl} = \pi \left( \frac{D_{cyl}}{2} \right)^2 \cdot h_{cyl}$$

AN:

$$V_{cyl} = 3.14 \times \left( \frac{0.076}{2} \right)^2 \times 0.21$$

$$V_{cyl} = 9.5217 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

- Volume de déplaceur  $V_d$

$$V_d = \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \cdot h_d$$

AN :

$$V_d = 3.14 \times \left( \frac{0.071}{2} \right)^2 \times 0.061$$

$$V_d = 2.4138 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

- Volume de la tige de déplaceur  $V_{td}$

$$V_{td} = \pi \left( \frac{D_{td}}{2} \right)^2 \cdot (h_{cyl} - h_d)$$

**AN :**

$$V_{td} = 3.14 \left( \frac{0.007}{2} \right)^2 \cdot (0.07 - 0.06)$$

$$\mathbf{V_{td} = 3.8465 \times 10^{-7} m^3}$$

Donc l'expression du volume  $V_{gc}$  sera :

$$V_{gc} = \pi \left( \frac{D_{cyl}}{2} \right)^2 \cdot h_{cyl} - \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \cdot h_d - \pi \left( \frac{D_{td}}{2} \right)^2 \cdot (h_{cyl} - h_d)$$

**AN :**

$$V_{gc} = (9.5217 \times 10^{-4}) - (2.4138 \times 10^{-4}) - (3.8465 \times 10^{-7})$$

$$\mathbf{V_{gc} = 7.1040 \times 10^{-4} m^3}$$

- Le volume de petit cylindre du piston de travail  $V_{pc}$

$$V_{pc} = \pi \left( \frac{D_{pc}}{2} \right)^2 \cdot (h_{pc} - h_p)$$

**AN:**

$$V_{pc} = 3,14 \times \left( \frac{0,057}{2} \right)^2 \times (0,093 - 0,026)$$

$$\mathbf{V_{pc} = 1,7088 \times 10^{-4} m^3}$$

Donc l'expression du volume  $V_{max}$  sera :

$$V_{max} = \frac{\pi}{4} \left[ (D_{cy})^2 \cdot h_{cyl} - (D_d)^2 \cdot h_d - (D_{ud})^2 (h_{cyl} - h_d) \right] + \pi \left( \frac{D_{pc}}{2} \right)^2 \cdot (h_{pc} - h_p)$$

**AN:**

$$V_{max} = 7.1040 \times 10^{-4} + 1,7088 \times 10^{-4} m^3$$

$$\mathbf{V_{max} = 8,8128 \times 10^{-4} m^3}$$

➤ Le volume minimal  $V_{\min}$

Ce volume est égal au volume du cylindre  $V_{Cy}$  moins le volume du déplaceur  $V_d$  -

$$V_{\min} = V_{cy1} - V_d$$

$$V_{\min} = \pi \left( \frac{D_{cy1}}{2} \right)^2 \cdot h_{cy1} - \pi \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 \cdot h_d$$

$$V_{\min} = (9.5217 \times 10^{-4}) - (2.4138 \times 10^{-4})$$

$$V_{\min} = 7,1079 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Tableau 2: Tableau récapitulatif des volumes

| Désignation                                      | Symbole    | Unité | Valeurs                 |
|--|------------|-------|-------------------------|
| <b>Paramètres géométriques calculés :</b>        |            |       |                         |
| <b>Volume du cylindre (sans déplaceur)</b>       | $V_{cyl}$  | $m^3$ | $9.5217 \times 10^{-4}$ |
| <b>Volume du déplaceur</b>                       | $V_d$      | $m^3$ | $2.4138 \times 10^{-4}$ |
| <b>Volume du petit cylindre</b>                  | $V_{pc}$   | $m^3$ | $1,7088 \times 10^{-4}$ |
| <b>Volume du grand cylindre (avec déplaceur)</b> | $V_{\min}$ | $m^3$ | $7,1079 \times 10^{-4}$ |
| <b>Volume maximal</b>                            | $V_{\max}$ | $m^3$ | $8,8128 \times 10^{-4}$ |

**b) Calcul des pressions dans chaque point de cycle**

On considère que l'air emprisonné dans les cylindres comme un gaz parfait

**1 → 2 : Compression isotherm ( $V_1 = V_{\max} \cdot T_1 = T_2 = T_0$ )**

$$P_1 V_1 = m_{\text{air}} T_1$$

Il faut calculer d'abord la masse de l'air :

Avec:

$$m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} V$$

On sait que la masse volumique de l'air dépend de la température dans notre cas. Source

Froide :  $T_f = 30^\circ\text{C}$  sa masse volumique  $\rho_{\text{air}} = 1.164 \text{ kg/m}^3$

Donc:

$$m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} V_{\text{max}}$$

AN:

$$m_{\text{air}} = 1,164 \times 8,8128 \times 10^{-4}$$

$$\mathbf{m_{\text{air}} = 1,0258 \times 10^{-3} \text{ Kg}}$$

$$P_1 V_1 = m_{\text{air}} I_1$$

Donc:

$$P_1 = \frac{m_{\text{air}} r T_1}{V_1}$$

AN:

$$P_1 = \frac{1,0258 \times 10^{-3} \times 287 \times 303}{8,8128 \times 10^{-4}}$$

$$\mathbf{P_1 = 1.0122 \times 10^5 \text{ Pa}}$$

➤ **2 → 3 : Chauffage isochore ( $V_2 = V_{\text{min}}$ ,  $T_2 = T_0$ )**

$$P_2 V_2 = m_{\text{air}} r T_2$$

Donc:

$$P_2 = \frac{m_{\text{air}} r T_2}{V_2}$$

AN :

$$P_2 = \frac{1,0258 \times 10^{-3} \times 287 \times 303}{7.1079 \times 10^{-4}}$$

$$P_2 = 1,255 \times 10^5 \text{ Pa}$$

➤ 3 → 4 : Détente isotherme ( $V_3 = V_{\min}$ ,  $T_3 = T_4 = T_c$ )

$$P_3 V_3 = m_{\text{air}} r T_3$$

Donc:

$$P_3 = \frac{m_{\text{air}} r T_3}{V_3}$$

AN :

$$P_3 = \frac{1,0258 \times 10^{-3} \times 287 \times 573}{7.1079 \times 10^{-4}}$$

$$P_3 = 2,3733 \times 10^5 \text{ Pa}$$

➤ 4 → 1: Refroidissement isochore ( $V_4 = V_{\max}$ ,  $T_4 = T_e$ )

$$P_4 V_4 = m_{\text{air}} r T_4$$

Donc:

$$P_4 = \frac{m_{\text{air}} r T_4}{V_4}$$

AN:

$$P_4 = \frac{1,0258 \times 10^{-3} \times 287 \times 573}{8,8128 \times 10^{-4}}$$

$$P_4 = 1.9141 \times 10^5 \text{ Pa}$$

**Tableau 3:** Tableau récapitulatif des pressions, volumes et températures

| Etat | Pression P [Pa]      | Volume V [ ]            | Température T [K] |
|------|----------------------|-------------------------|-------------------|
| 1    | $1,0122 \times 10^5$ | $8,8128 \times 10^{-4}$ | 303               |
| 2    | $1,255 \times 10^5$  | $7.1079 \times 10^{-4}$ | 303               |
| 3    | $2,3733 \times 10^5$ | $7.1079 \times 10^{-4}$ | 573               |
| 4    | $1,9141 \times 10^5$ | $8,8128 \times 10^{-4}$ | 573               |

c) Calcul des quantités de chaleur ( $Q_{1-2}, Q_{2-3}, Q_{3-4}, Q_{4-1}$ )

On applique le premier principe de thermodynamique

$$\Delta U = Q + W$$

➤ Chaleur  $Q_{1-2}$

$$dU_{1-2} = \partial Q_{1-2} + \partial W_{1-2} = 0 \text{ (La température est constante)}$$

$$\text{Donc: } \partial Q_{1-2} = -\partial W_{1-2} = PdV$$

$$\text{Or } P = \frac{m_{\text{air}} RT}{V}$$

$$\text{D'où: } \partial Q_{1-2} = -\partial W_{1-2} = PdV = \frac{m_{21r} T_r}{V} dV = m_{\text{air}} R T_1 \frac{dV}{V}$$

$$\text{Nous intégrons cette relation: } Q_{1-2} = m_{\text{air}} T_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

AN :

$$Q_{1-2} = 1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 303 \times \ln\left(\frac{7.1079 \times 10^{-4}}{8,8128 \times 10^{-4}}\right)$$

$$Q_{1-2} = -23.6136\text{J}$$

➤ Chaleur  $Q_{3-4}$

$$\text{De même pour } Q_{3-4} \text{ on trouve : } Q_{3-4} = m_{21r} T_c \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

AN:

$$Q_{3-4} = 1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 573 \times \ln\left(\frac{8,8128 \times 10^{-4}}{7,1079 \times 10^{-4}}\right)$$

$$Q_{3-4} = 44.6555 \text{ J}$$

★ Pour  $Q_{2-3}$  et  $Q_{4-1}$  on a :  $Q_{2-3} = m_{\text{air}} C_v (T_3 - T_2)$  et  $Q_{4-1} = m_{2ir} C_2 (T_1 - T_4)$

$$Q_{4-1} = m_{\text{air}} C_v (T_l - T_e)$$

L'air est assimilé à un gaz parfait, donc :  $C_v = \frac{5}{2} r$

$$\text{Alors : } Q_{2-3} = -Q_{4-1} = m_{\text{air}} \frac{5}{2} r (T_c - T_f)$$

AN:

$$Q_{2-3} = 1,263 \times 10^{-3} \times \frac{5}{2} \times 287 \times (573 - 303)$$

$$Q_{2-3} = 244,675 \text{ J}$$

$$\text{Donc: } Q_{4-1} = -Q_{2-3}$$

$$Q_{4-1} = -244,675 \text{ J}$$

d) Calcul des travaux ( $W_{1-2}, W_{2-3}, W_{3-4}, W_{4-1}$ )

On a:

$$\partial W_{1-2} = -\partial Q_{1-2} = -P \partial V$$

$$\text{or } P = \frac{m_{\text{air}} r T}{V}$$

$$\text{Donc: } \partial W_{1-2} = -\frac{m_{\text{air}} r T_l}{V} dV = -m_{\text{air}} r T_l \frac{dV}{V}$$

$$\text{Nous intégrons cette relation: } W_{1-2} = -m_{\text{air}} r T_l \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

AN :

$$W_{1-2} = -1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 303 \times \ln\left(\frac{7,1079 \times 10^{-4}}{8,8128 \times 10^{-4}}\right)$$

$$W_{1-2} = 23.6136 \text{ J}$$

$$\text{De même pour } W_{3-4} \text{ on trouve : } W_{3-4} = -m_{\text{air}} r T_c \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

AN:

$$W_{3-4} = -1,263 \times 10^{-3} \times 287 \times 573 \times \ln\left(\frac{8,8128 \times 10^{-4}}{7,1079 \times 10^{-4}}\right)$$

$$W_{3-4} = -44.6555 \text{ J}$$

$$W_{2-3} \text{ et } W_{4-1} = 0 \text{ (Volume constant)}$$

### e) Calcul de travail total W

$$W = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} + W_{4-1}$$

AN:

$$W = 23.6136 - 44.6555$$

$$W = -21.0419 \text{ J}$$

### f) Calcul de rendement théorique $\eta$

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

$$\text{AN : } \eta = 1 - \frac{303}{573} = 0.47$$

- L'influence de  $T_c$  sur le rendement théorique

On fixe la température  $T_f 30^\circ\text{C}$  et on trace la courbe  $\eta = f(T_c)$

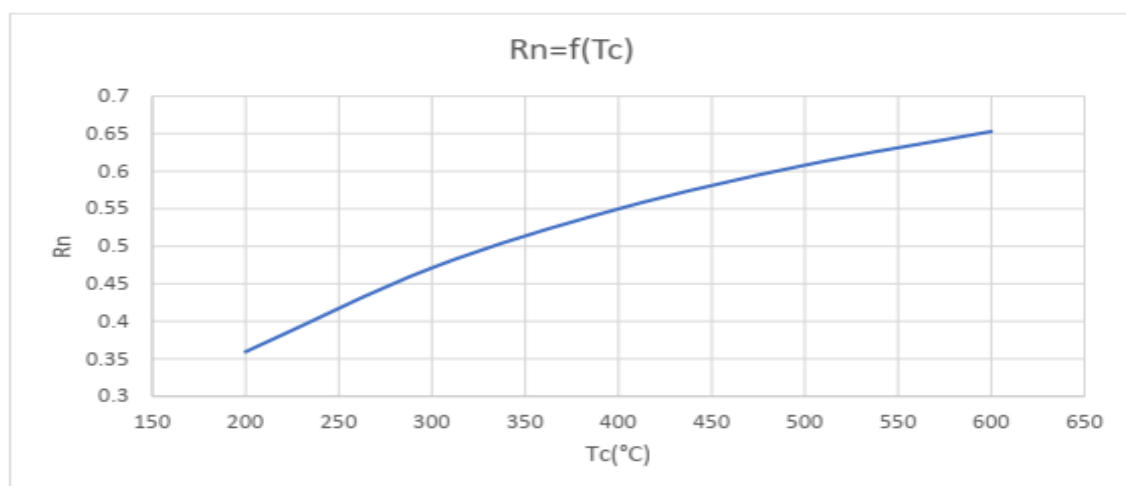


Figure 22 : L'influence de  $T_c$  sur le rendement théorique

- ❖ on voit que plus la température chaude est grande, plus le rendement théorique est élevé

• **L'influence de  $T_f$  sur le rendement théorique**

Maintenant on fixe la température  $T_c$  et on trace la courbe  $\eta = (T_f)$

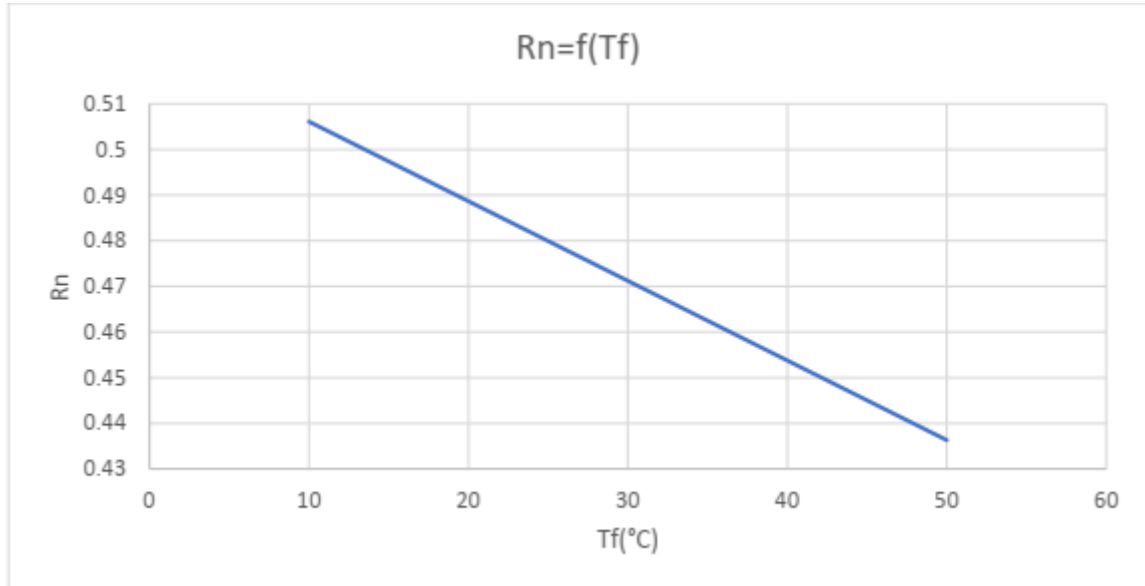


Figure 23 : L'influence de  $T_f$  sur le rendement théorique

- ❖ à chaque fois la température froide diminue le rendement théorique du moteur augmente Pour montrer bien l'influence de la température froide sur le rendement théorique, voici quelques courbes avec la même température chaude mais elles n'ont pas la même température froide.

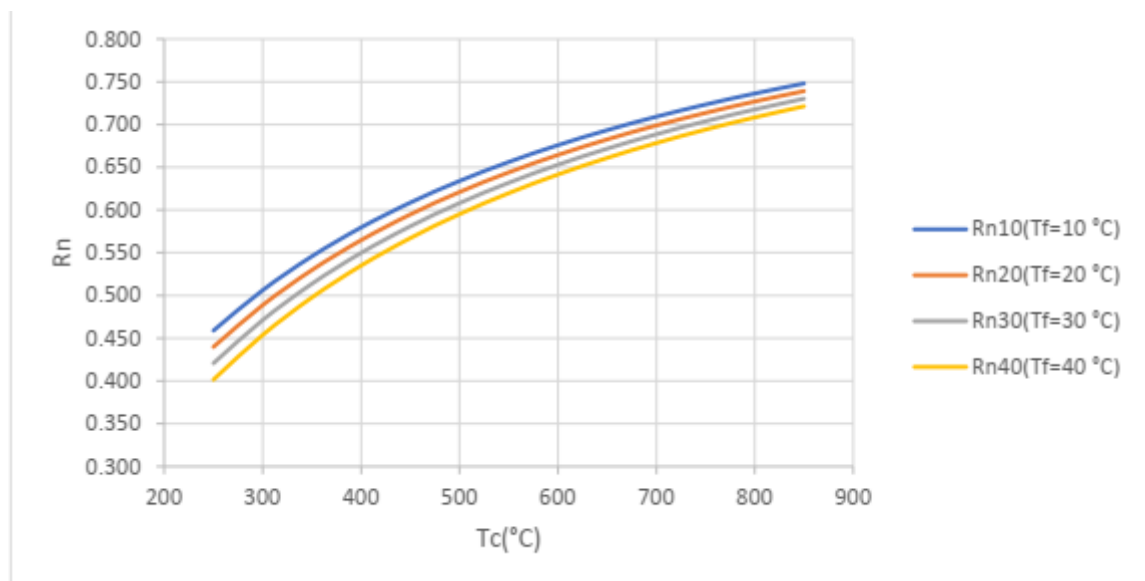


Figure 24 : L'influence de  $T_f$  sur le rendement théorique

**Tableau 4 :** Tableau récapitulatif des paramètres caractéristique des évolutions du cycle

| Etat              | 1→2                     | 2→3                     | 3→4                     | 4→1                     |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Température T [K] | 303                     | 303                     | 573                     | 573                     |
| Volume V [ ]      | $8,8128 \times 10^{-4}$ | $7.1079 \times 10^{-4}$ | $7.1079 \times 10^{-4}$ | $8,8128 \times 10^{-4}$ |
| Pression P [Pa]   | $1,0122 \times 10^5$    | $1,0122 \times 10^5$    | $1,0122 \times 10^5$    | $1,0122 \times 10^5$    |
| Chaleur Q [J]     | -23.6136                | 244,675                 | 44.6555                 | -244,675                |
| Travail W [J]     | 23.6136                 | 0                       | -44.6555                | 0                       |

### II.5 Conclusion

Le type gamma de moteur Stirling a été sélectionné dans ce chapitre en étudiant les volumes, les pressions, les chaleurs, les travaux et le rendement en se basant sur le cycle théorique du moteur Stirling.

Le rendement théorique n'est pas influencé par la géométrie du moteur et la valeur du rendement est déterminée uniquement par la température des parois (chaude et froide).

**Chapitre III :**  
**Réalisation du moteur**  
**Stirling**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous examinons la construction d'un moteur Stirling de type gamma, une réalisation remarquable en ingénierie thermique qui utilise un cycle thermodynamique fermé pour transformer la chaleur en mouvement mécanique. Nous examinerons les différentes étapes de production, allant de l'assemblage précis des éléments à la sélection des matériaux extrêmement performants. Ce moteur présente des perspectives prometteuses en raison de son design novateur des pistons et des cylindres, offrant ainsi une meilleure efficacité énergétique et une durabilité améliorée dans différentes applications industrielles et technologiques.

### III.2 Présentation des différentes pièces de moteur Stirling

Le moteur conçu dans cette étude est composé principalement d'un grand cylindre contenant un déplaceur, d'un petit cylindre, d'un piston, d'un vilebrequin, d'un volant d'inertie et des bielles.

La mise en marche de ce moteur consiste à allumer une bougie puis de mettre en rotation, manuellement, le volant d'inertie. Cela va chasser l'air contenu dans le petit cylindre vers le grand cylindre où il subira une compression qui provoquera le déplacement du déplaceur et le cycle se répétera indéfiniment (voir la figure suivante).



**Figure 25** : Moteur Stirling d'un type Gamma  $\gamma$

Dans ce qui suit, nous allons illustrer les différentes formes des pièces conçues, leurs rôles et leurs matériaux. Les dessins de définitions de chacun de ces composants ainsi que le dessin d'ensemble seront présentés en annexe.

### III.2.1 Plaque grand et petit cylindre

- **Nombre** : 1
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : Le déplaceur et le cylindre chaud sont soutenus par la plaque, tandis que le tuyau échangeur permet de transmettre la chaleur entre les différentes parties du moteur, ce qui améliore l'efficacité thermique globale du système.



Figure 26 : Plaque grand et petit cylindre

### III.2.2 Plaque support vilebrequin

- **Nombre** : 2
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : Dans un moteur Stirling, les deux plaques de support du vilebrequin sont indispensables pour stabiliser et guider le vilebrequin. Ces dispositifs garantissent un déplacement fluide et équilibré des pièces mobiles, ce qui favorise une conversion efficace de l'énergie thermique en énergie mécanique efficace.



Figure 27 : Plaque support vilebrequin

### III.2.3 Grand cylindre

- **Nombre** : 1
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : Le grand cylindre contient le déplaceur, qui déplace l'air entre les zones chaudes et froides du moteur, permettant la compression et la détente de l'air pour convertir l'énergie thermique en énergie mécanique.



Figure 28 : Grand cylindre

### III.2.4 Déplaceur

- **Nombre** : 1
- **Matière** : Inox
- **Rôle** : Crée le mouvement de translation dû à la compression de l'air et permet son déplacement entre les deux sources chaude/Froide.



Figure 29 : Déplaceur

### III.2.5 Tige du déplaceur

- **Nombre** : 1
- **Matière** : Acier;
- **Rôle** : C'est de fixer le déplaceur à la bielle via un chapeau



**Figure 30** : Tige de déplaceur

### III.2.6 Petit cylindre (Cylindre de travail)

- **Nombre** : 1
- **Matière** : Aluminium
- **Rôle** : assure le guidage du piston, la compression et le déplacement de l'air entre les deux sources chaude/Froide



**Figure 31** : Petit cylindre.

### III.2.7 Piston

- **Nombre** : 1
- **Matière** : Aluminium
- **Rôle** : Crée le mouvement de translation dû à la compression de l'air. Responsable à la création du travail mécanique.



Figure 32 : Piston

### III.2.8 Tige de piston

- **Nombre** : 1
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : C'est de fixer le déplaceur à la bielle via un chapeau



Figure 33 : tige de piston

### III.2.9 Cardan

- **Nombre** : 2
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : la liaison entre la bielle et la tige pour le piston ou le déplaceur.



**Figure 34** : Chapeau

### III.2.10 Tige de bielles

- **Nombre** : 2
- **Matière** : Aluminium,
- **Rôle** : transforme le mouvement de translation du déplaceur/piston en un mouvement de rotation du volant d'inertie



**Figure 35** : Les bielles

### III.2.11 Vilebrequin

- **Nombre :** 1
- **Matière :** Acier
- **Rôle :** transmettre le mouvement de translation du déplaceur au piston



**Figure 36 :** Vilebrequin

### III.2.12 Volant d'inertie

- **Nombre :** 1
- **Matière :** Acier
- **Rôle :** à un mouvement rotationnel, assure le fonctionnement du moteur



**Figure 37 :** Volant d'inertie

### III.2.13 Boulons

- **Nombre** : 16
- **Matière** : Acier
- **Rôle** : est de fixer ou serrer les pièces entre eux.



**Figure 38** : Boulon

### III.2.14 Roulement à rotule

- **Nombre** : 2
- **Matière** : Acier et aluminium
- **Rôle** : Roulement à rotule d'extrémité portant de tige



**Figure 39** : Roulement à rotule

### III.2.15 Roulement à aiguilles

- **Nombre** : 2
- **Matière** : Alliage de zinc et aluminium
- **Rôle** : Permet de régler le jeu de vilebrequin



**Figure 40** : Roulement à aiguilles KFL08

### III.2.16 Pâte métallique

- **Nombre** : 1
- **Matière** : Mélange de métaux et Colle Epoxy
- **Rôle** : La pâte métallique autour du piston air froid est utilisée pour assurer l'étanchéité. Elle remplit les petits espaces entre le piston et le cylindre, empêchant les fuites d'air et améliorant ainsi l'efficacité du moteur en maintenant une pression interne optimale.



**Figure 41** : Pâte métallique

### III.3 Tableau des pièces

Tableau 5 : Tableau des pièces

| Pièces | Nom de pièces                  | Matière                          | Quantité |
|--------|--------------------------------|----------------------------------|----------|
| 1      | Plaque grand et petit cylindre | Acier                            | 1        |
| 2      | Plaque support vilebrequin     | Acier                            | 2        |
| 3      | Grand cylindre                 | Acier                            | 1        |
| 4      | Déplaceur                      | Inox                             | 1        |
| 5      | Tige de déplaceur              | Acier                            | 1        |
| 6      | Petit cylindre                 | Aluminium                        | 1        |
| 7      | Piston                         | Aluminium                        | 1        |
| 8      | Tige de piston                 | Acier                            | 1        |
| 9      | Roulement à aiguilles          | Alliage de zinc et aluminium     | 2        |
| 10     | Bielle                         | Acier                            | 2        |
| 11     | Roulement à rotule             | Acier                            | 2        |
| 12     | Vilebrequin                    | Acier                            | 1        |
| 13     | Volant d'inertie               | Acier                            | 1        |
| 14     | Boulon                         | Acier                            | 16       |
| 15     | Cardan                         | Acier                            | 2        |
| 16     | Pate métallique                | Mélange de métaux et Colle Epoxy | 1        |

### III.4 Assemblage des composants :

L'assemblage d'un moteur Stirling nécessite une attention particulière aux détails pour assurer un fonctionnement optimal. Voici les étapes essentielles pour assembler les composants d'un moteur Stirling :

#### III.4.1 Préparation de la Base et du Support :

**Plaque de Base :** Fixez solidement la plaque de base sur une surface stable. Cette base servira de fondation pour tous les autres composants.

**Plaques de Support du Vilebrequin :** Montez les plaques de support sur la base. Ces plaques maintiendront le vilebrequin en place.

#### III.4.2 Montage du Grand Cylindre et du Déplaceur :

**Insertion du Déplaceur :** Insérez le déplaceur dans le grand cylindre. Le déplaceur doit pouvoir se déplacer librement à l'intérieur du cylindre sans obstruction.

**Fixation du Grand Cylindre :** Fixez le grand cylindre sur la base de manière à ce qu'il soit stable et bien aligné avec le reste du moteur.

### III.4.3 Installation du Petit Cylindre et du Piston :

**Insertion du Piston :** Placez le piston dans le petit cylindre. Utilisez de la pâte métallique autour du piston pour assurer une bonne étanchéité et minimiser les fuites d'air.

**Fixation du Petit Cylindre :** Montez le petit cylindre à proximité du grand cylindre sur la base. Assurez-vous que les deux cylindres sont alignés correctement.

### III.4.4 Fixation du Vilebrequin :

**Insertion du Vilebrequin :** Passez le vilebrequin à travers les plaques de support. Le vilebrequin doit tourner librement sans trop de friction.

**Connexion des Bielles :** Connectez une bielle entre le piston et le vilebrequin, et une autre bielle entre le déplaceur et le vilebrequin. Assurez-vous que les bielles permettent un mouvement fluide et sans entrave.

### III.4.5 Installation du Volant d'Inertie :

**Fixation du Volant d'Inertie :** Montez le volant d'inertie à l'une des extrémités du vilebrequin. Le volant d'inertie aide à stabiliser le mouvement du vilebrequin et stocke de l'énergie cinétique pour lisser le fonctionnement du moteur.

### III.4.6 Montage du Système d'Échange de Chaleur :

**Fixation du Tuyau Échangeur :** Installez le tuyau échangeur entre le grand cylindre et le petit cylindre. Ce tuyau facilite le transfert de chaleur entre les deux cylindres, augmentant ainsi l'efficacité du moteur.

### III.4.7 Allumage et Mise en Marche :

**Installation de la Bougie de Chauffe :** Placez la bougie de chauffe sous le grand cylindre. La chaleur de la bougie provoquera l'expansion de l'air à l'intérieur du cylindre.

**Mise en Rotation du Volant d'Inertie :** Tournez manuellement le volant d'inertie pour démarrer le cycle de fonctionnement. Ce mouvement initial est crucial pour chasser l'air entre les cylindres et initier le cycle de compression et de détente

### III.5 Résultats

Après avoir assemblé et mis en marche notre moteur Stirling, nous avons constaté qu'il ne démarre plus, malgré nos efforts initiaux. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ce problème :

#### III.5.1 Problèmes d'Étanchéité

Le problème rencontré dans notre système mécanique réside uniquement dans le cote de déplaceur et précisément entre la tige de déplaceur et le palier qui lui support.

#### III.5.2 La source d'énergie (source chaude)

Le moteur dépend de la source de chaleur , pour assurer un échauffement d'une manière stable représente un défis puisque la source chaude est variable tout dépend de ca nature .

#### III.5.3 Friction Excessive

Un frottement excessif entre les pièces mobiles comme le vilebrequin, les bielles ou le déplaceur peut limiter la rotation fluide du moteur, empêchant ainsi le bon fonctionnement du cycle.

#### III.5.1 Problème Conception ou d'Assemblage

L'assemblage des différentes pièces du moteur, réalisé avec une grande précision pour garantir leur compatibilité et leur fonctionnement harmonieux, inclut l'utilisation de roulements à rotule afin de dissimuler les défauts d'installation.

### III.6 Conclusion

Dans le chapitre 3, après avoir réalisé la construction du moteur Stirling, il devient évident qu'il ne démarre pas en raison d'un problème d'étanchéité au niveau du déplaceur. Ce dysfonctionnement compromet la capacité du moteur à maintenir les gradients de température nécessaires pour le cycle thermodynamique correct. Pour résoudre ce problème, il serait crucial de revisiter le mécanisme d'étanchéité du déplaceur, en examinant les joints et en s'assurant qu'ils sont suffisamment hermétiques pour préserver la pression interne requise et faciliter le mouvement fluide du déplaceur dans le cylindre.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

La conception du moteur Stirling est complexe, mais l'étude est riche : théoriquement l'un des moteurs ayant le meilleur rendement, ses défauts le rendent difficile à utiliser dans certains domaines, en particulier lorsqu'on le compare aux moteurs à explosion. Cependant, grâce à ses avantages (compatible avec toutes les sources d'énergie, peu bruyant, pompe à chaleur, etc.), le Stirling est un moteur avec de grandes ambitions : aujourd'hui, les défis énergétiques sont l'une des principales préoccupations de l'humanité, et les moteurs à explosion sont remis en question en raison de leur forte production de gaz à effet de serre. De son côté, le moteur Stirling ne présente pas ce souci et pourrait jouer un rôle crucial pour les générations futures en ce qui concerne la production d'énergie propre.

La connaissance approfondie du cycle thermodynamique d'un moteur Stirling permet de détecter les éléments essentiels pour améliorer ses performances, tels que maximiser la variation de température ou réduire, mais pas trop, le volume mort. Cela offre aussi la possibilité d'évaluer la puissance du moteur ainsi que ses besoins en calories.

Finalement, le moteur Stirling offre une véritable occasion dans la crise énergétique et environnementale que nous traversons, même si des améliorations sont encore indispensables.

# **Bibliographie**

### Bibliographie

- [1] pierre gras, le moteur Stirling et autres moteurs à air chaud, une solution aux problèmes énergétiques et environnementaux actuels, février 2011.
- [3] Sébastien bonnet, moteurs thermiques à apport de chaleur externe : étude d'un moteur Stirling et d'un moteur Ericsson, thèse pour obtenir le grade de docteur spécialité : énergétique, l'université de Pau et des pays de l'Adour école doctorale des sciences exactes et de leurs applications, novembre 2005.
- [3] [http://fr.wikipedia.org/wiki/moteur\\_stirling](http://fr.wikipedia.org/wiki/moteur_stirling).
- [4] boulang Anthony, Vivet Nicolas, le moteur de Stirling : conception et performances, université du maine (le mans), 2003.
- [5] Maier Christophe, Gil Arnaud, Aguilera Rafael, Shuang li, Yu Xue, stirling engine, university of Gävle, 11/11/2007.
- [6] Eléonore Hardy, Fiona corrals, Audrey magne, Marion Peyrezabes, Marion saint picq, « et pour quelques degrés de plus.... » : Étude d'un moteur Stirling solaire, lycée « sud des landes » saint -Vincent de tyrosse, xiii èmes olympiades de physique, Edition 2005/2006.
- [7] le moteur à air chaud, maison de la science, janvier 2004.
- [8] Mémoire de master du thème « ETUDE STATIQUE D'UN MOTEUR MODELE STIRLING », soutenu par RAKOTOMALALA Andrianiaina Julio Clark en septembre 2018.
- [9]. B. CHAKROUN, « Conception et fabrication d'un moteur Stirling type alfa en aluminium », 2010.
- [10]. Maier C., Gil A., Aguilera R., Shuang L., Yu X., Stirling engine, Gävle, Suède (2007).
- [11]. Mémoire de master du thème « Etude et réalisation d'un moteur Stirling couplé à un concentrateur solaire » soutenu par NOURENE Cherif et AMMAR Abdellatif en 2015.
- [12]. Sauzade D., ImbertG., Mollard J., The supporting technologies and sea trials of a long-range autonomous civilian submarine, Marine Technology Society Journa, 25, No. 2, 3-13 (1991).

[13]. Mémoire de master du thème « Le moteur Stirling et ses applications », soutenu par BEKRAOUI Amina et CHABANI Asma en décembre 2012

[14]. 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).

[15]. Boucher J., Moteur Stirling : application pour un drone, Rapport de Master, Université de Franche-Comté (2002).

[16]. Institut National des Sciences Appliquées « Projet de Physique P6-3 STPI/P6-3/2008 », page 16, réalisé par Tayeb M. Marouane B.