

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie Mécanique

Option: Conception Mécanique et productivité

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de:

MASTER

Thème

***Etude D'un Moteur à AIR Chaud
(Stirling), Application à La Conversion De
L'énergie Théorique Solair***

Présenté par:

MAAMRI WALID

Proposé et dirigé par:

Dr :AOUES KAME

Promotion : Juin 2013

Dédicaces

voilà une finalité naturelle d'un long parcours d'études intenses et laborieuses nécessitant beaucoup de sacrifices mais contribuant finalement à un résultat bénéfique et méritoire.

Je dédie ce modeste travail tout d'abord à la mémoire d'être parmi nous père et à mère que par le soutien et sacrifices, sa compréhension et affection qui m'ont permis d'être ce que je suis et d'arriver à cette étape finale .

A mes frères Brahim, Soufaine, Toufik, Amal, Nasira, Abdllah, Ftima Zohra ainsi leurs familles.

A mes adorables sœurs : Ali, Basset, Mouhmed, Amani toujours présente à mes côtés par ses bénéfiques conseils et son soutien moral et à mon neveu Djamel.

Avec une spéciale dédicace à la personne la plus chère pour moi, avec qui j'ai partagé ma joie et mes peines, au chère Chourouk ghecham qui m'a toujours encouragé, qui était et qui reste toujours présent pour me soutenir et à qui je souhaite un bon courage.

A vous mes meilleures amies tarek

Foufou, Abdllah, Tarke, Hosam, Didi, Rafike, Faisal, Walid mansori, Walid mirimi, Jaba, sh mostafha qui m'ont toujours soutenu, je vous aime et je vous remercie.

En fin à mes partenaires qui m'ont partagé les souffrances de ce travail : Dr Aoues Kamel encadreur

A tous les étudiants de génie mécanique en particulier ceux de la promotion 2013.

A toutes les personnes dont j'ai une place dans leurs cœurs.

** Maamri Walid**

Symboles utilisés :

Préfixes et suffixes :

Q : représente l'énergie thermique, exprimée en Joules

V : représente un volume exprimé en mètres cubes.

T : représente une température exprimée en Kelvin.

W : représente un travail exprimé en Joule.

P : représente une valeur de pression exprimée en Newton par m²

C_v : Chaleur spécifique à volume constant (J/Kg K)

K : Facteur défini par l'équation

K_{mc} : Rapport du volume mort « chaud » sur le volume mort total

K_{mf} : Rapport du volume mort « froid » sur le volume mort total.

K_{mt} : Rapport des volumes morts sur le volume total.

K_{MDP} : Rapport des volumes morts sur les volumes balayés.

m : Masse totale du fluide contenu dans le moteur (Kg).

P : Pression absolue (N/m²).

p_m : Pression moyenne effective du cycle complet.(N/m²)

Q_e : Pression moyenne effective du cycle complet.(N/m²)

Q_s : Chaleur rejetée vers l'extérieur par le cycle.(N/m²)

R : Constante du gaz de travail.(J/kg K)

T₃ : Température du gaz de travail dans l'espace chaud. (K)

T₁ : Température du gaz de travail dans l'espace froid. (K)

V_P : Volume balayé par le piston de travail.(m³)

V_P : Volume balayé par le piston de travail.(m³)

V_{MC} : Volume mort chaud (réchauffeur, liaisons, cylindre).(m³)

V_{MT} : Total des volumes morts.(m³)

W_{net} : Puissance nette du moteur. (Joules)

E_T : Efficacité thermique du moteur Stirling.

Liste des figures

Chapitre 1 :

Fig.1.1. Moteur Stirling [1].

Fig.1.2. John Ericsson [2].

Fig.1.4. Moteur Manson [3].

Fig.1.3. Moteur à vapeur [4].

Chapitre 2 :

Fig.2.1. Robert Stirling [5].

Fig.2.2.Phase de chauffage[6].

Fig.2.2.Phase de détente[6].

Fig.2.2.Phase de refroidissement[6].

Fig.2.2.Pahase de compression[6].

Fig.2.3.1ère Phase de travail du déplaceur[6].

Fig.2.3.1em Phase de travail du déplaceur[6].

Fig.2.3.2em Phase de travail du déplaceur[6].

Fig.2.3.3em Phase de travail du déplaceur[6].

Fig.2.4.Diagramme indicateur d'un moteur STIRLING théorique [7].

Fig2.5.Diagramme indicateur d'un moteur STIRLING réel [8]

Fig.2.7.Moteur Stirling de type alpha[9]. .

Fig.2.7.Coupe d'un moteur Stirling de type bêta[9].

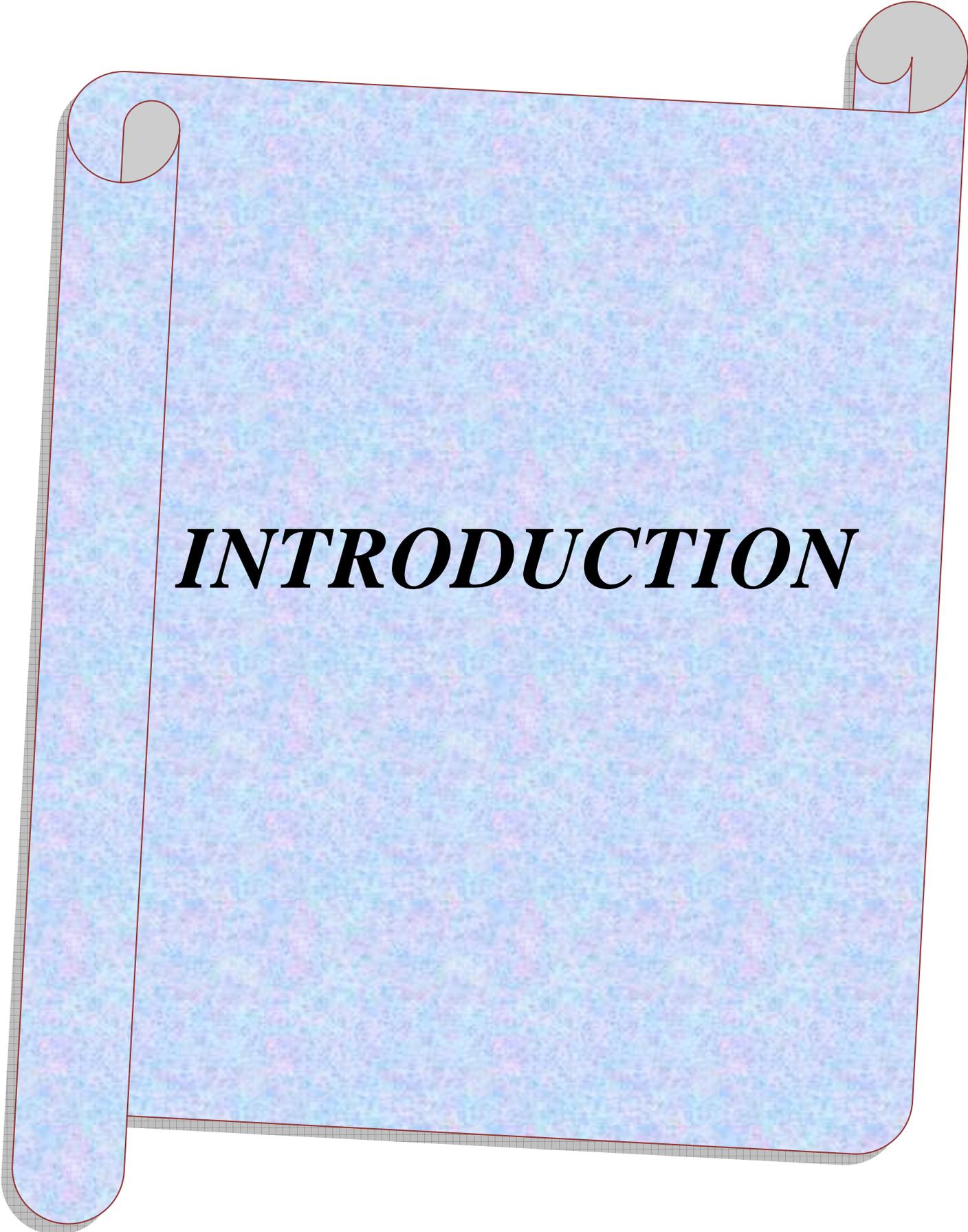
Fig.2.7.Moteur STIRLING, type gamma [9].

Chapitre 3 :

Fig.3.1.schéma de fonctionnement du moteur stirling [10].

Fig.3.2.position des pistons[10].

Fig3.3.schéma cycle de string[11].

A blue textured scroll with a dark blue border and a light blue background. The scroll is unrolled, showing a central area with the word "INTRODUCTION" written in bold, black, italicized capital letters. The scroll has three visible rolls at the top and bottom edges, and a small tab at the bottom left.

INTRODUCTION

Introduction générales

Dans les contextes énergétique et environnemental actuels (tension sur les marchés énergétiques, effet de serre, pollution, . . .), l'intérêt de développer des technologies de production d'énergie "propre" est relancé. Ainsi, de nouvelles perspectives comme le solaire ou la valorisation des déchets sont offertes à la recherche sur les "énergies renouvelables".

Il existe plusieurs types de moteurs capables de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique. Les moteurs thermiques utilisés le plus fréquemment sont les moteurs alternatifs à combustion interne, les turbines à gaz et les installations à cycle de Rankine à vapeur d'eau. Malheureusement, aucun de ces systèmes n'est bien adapté à la valorisation de certains types de "source chaude" (énergie solaire, biomasse, effluents gazeux à haute température, . . .).

Les moteurs à air chaud, à apport de chaleur externe par échangeur, avec ou sans échangeur récupérateur, à machines de compression et de détente alternatives distinctes, à cycle monophasique ouvert ou fermé, avec ou sans soupapes ou clapets, sont en revanche très appropriés à la valorisation d'énergie renouvelable. En effet, l'apport de chaleur peut être d'origine diverse comme le solaire, le bois, . . .

Par ailleurs, dans le domaine des faibles puissances électriques (500 W e . . . 50 kW e), la cogénération ne semble pas avoir le même développement que pour les grandes puissances. Ce manque de succès, alors que le domaine résidentiel et tertiaire pourrait être porteur, est dû au manque de systèmes adaptés à ce créneau : pour ces niveaux de puissance, les machines les plus utilisées sont les moteurs à combustion interne qui génèrent beaucoup de bruit et de vibrations. Peu de particuliers sont prêts à installer un moteur à combustion interne chez eux en lieu et place de leur chaudière à gaz, même si certains constructeurs proposent des systèmes de cogénération domestique bien isolés du point de vue phonique et vibratoire. Le marché semble donc plus prometteur pour les systèmes basés sur des moteurs thermiques à combustion externe. Parmi ces derniers, les systèmes de cogénération basés sur des moteurs Stirling cinématiques ou à pistons libres font l'objet de nombreux développements, voire sont, pour certains d'entre eux, déjà commercialisés.

Dans ce présent travail, nous nous intéressons au moteur thermique à apport de chaleur externe tel que le moteur STIRLING (1816).

Introduction générales

Pour cela, nous avons partagé ce travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous abordons tous les moteurs à apport de chaleur externe. Les différents types des moteurs à air chaud leurs avantages et inconvénients.

Le second chapitre est consacré au moteur STIRLING sujet de ce travail. Nous verrons son principe de fonctionnement, ces différents types et leurs applications.

Au troisième chapitre, nous essayons de voir les formules et équations caractérisant ce genre de moteur thermique. Nous prenons l'exemple d'un moteur STIRLING du type gamma dont nous déterminons ces performances thermiques.

En fin, nous entamons ce travail par une conclusion générale.

1.1. Historique :

Ce moteur est une machine thermique à combustion externe. Le brevet de ce moteur a été déposé en 1816 par le pasteur protestant écossais Robert Stirling. Les inventions du moteur à gaz et du moteur Diesel l'ont fait retomber dans l'oubli. En 1936, Philips développa de nouveau le moteur Stirling. Il sert aujourd'hui à la propulsion des sous-marins, comme moteur de groupe électrogène (production d'électricité à partir d'énergie solaire).

Entraîné mécaniquement, il sert de pompe à chaleur.

Ce moteur a comme avantage d'être :

- moins polluant (combustion externe d'où production de gaz carbonique et vapeur d'eau uniquement).
- moins bruyant : le fluide actif (l'air ou l'hélium) travaille en circuit fermé et ne s'échappe pas dans l'atmosphère (pas de bruit d'échappement).
- Multi-carburant : le moteur peut être alimenté par n'importe quelle source de chaleur (charbon, alcool, soleil,...).
- Rendement supérieur à 40%. Utilisé en sens inverse, le cycle Stirling sert de pompe à chaleur. Dans ce cas, il peut notamment être utilisé pour liquéfier des gaz tels que l'air.

1.2. Les types de moteur :

Les différents types de moteurs à air chaud ou moteurs à combustion externe sont :

1.2.1. Moteur de Stirling :

Le Pasteur Robert Stirling est né le 25 octobre 1790, à Gloag dans le comté de Perthshire en Ecosse. Il est mort le 6 juin 1878 à Galston, ville située à 30 km environ au sud de Glasgow.

Il était le troisième enfant d'une famille en comprenant huit. Son grand-père paternel fabriquait des batteuses, son grand-père maternel était agriculteur. Il poursuivit de brillantes études à l'université d'Edimbourg de 1805 à 1808. Ensuite, il se tourna vers des études de théologie à l'université de Glasgow pour devenir pasteur. Il se maria le 10 juillet 1819 avec Jean Rankin. Ils eurent sept enfants. Quatre garçons devinrent ingénieurs dans les chemins de fer (Patrick, William, Robert et James), un autre choisit de devenir à son tour pasteur (David). Quant aux deux filles, l'une fit profiter ses frères de ses idées (Jane) et l'autre se consacra au métier d'artiste (Agnes).

La vie de Robert Stirling se déroule durant le dix-neuvième siècle qui voit de nombreuses découvertes scientifiques et techniques. C'est probablement ce bouillonnement d'idées, sa curiosité naturelle et son pragmatisme qui pousseront Robert Stirling à inventer "le moteur à air chaud". Le brevet fut déposé le 27 septembre 1816 et fut effectif le 20 janvier 1817.

A cette époque, il arrivait fréquemment que des chaudières à vapeur explosent et fassent des victimes. Les problèmes de conception, la qualité encore médiocre des matériaux, une quasi-absence de règles d'utilisation et de maintenance sont à l'origine de ces sinistres.

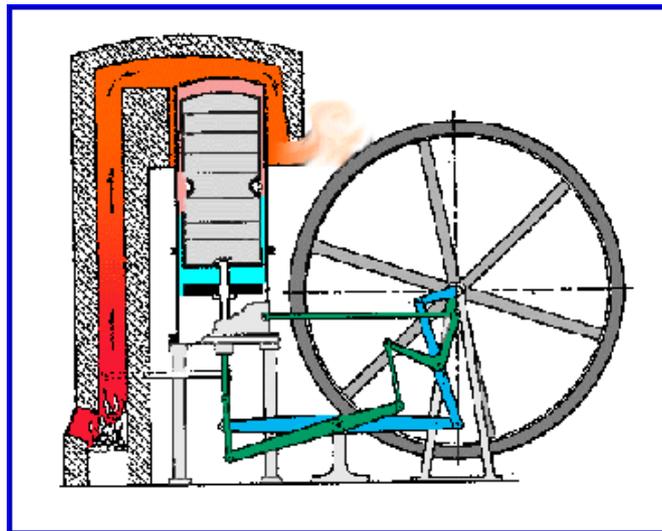


Fig.1.1.Moteur Stirling [1].

a. Les avantages :

- le silence de fonctionnement : il n'y a pas de détente à l'atmosphère comme dans le cas d'un moteur à combustion interne, la combustion est continue à l'extérieur du ou des cylindres. De plus, sa conception est telle que le moteur est facile à équilibrer et engendre peu de vibrations.
- le rendement élevé : fonction, il est vrai, des températures des sources chaudes et froides. Comme il est possible de le faire fonctionner en cogénération (puissances mécanique et calorifique), le rendement global peut être très élevé.
- les utilisations très diverses du fait de son autonomie et son adaptabilité au besoin et à la nature de la source chaude (du mW au MW).

b. Les inconvénients :

- le prix : le frein à son développement est aujourd'hui probablement son coût, non encore compétitif par rapport aux autres moyens bien implantés.
- Une généralisation de son emploi devrait pallier ce problème inhérent à toute nouveauté.
- la variété des modèles empêche une standardisation et par conséquent une baisse des prix.
- les problèmes d'étanchéité sont difficiles à résoudre dès qu'on souhaite avoir des pressions de fonctionnement élevées. Le choix du gaz "idéal", à savoir l'hydrogène pour sa légèreté et sa capacité à absorber les calories, se heurte à sa faculté de diffuser au travers des matériaux.

1.2.2. Moteur d'Ericsson :

John Ericsson est né en 1803 en Suède, à Langban dans le Värmland. Très tôt, à l'âge de 12 ans, il travailla comme géomètre sur l'important chantier suédois du canal Göta. Puis il fit une courte carrière dans l'armée. Il inventa alors son premier "caloric engine" qui fit l'objet d'un brevet déposé en Suède en 1826, année de son départ pour l'Angleterre.



Fig.1.2. John Ericsson [2].

Toujours passionné de mécanique, il inventa différents moteurs à air chaud ou à vapeur. Dans ce cadre, il développa le premier condenseur de vapeur tubulaire puis un régénérateur de sa conception. Cependant, la réussite financière ne fut vraiment pas au rendez-vous.

Il breveta en 1833, un moteur à air chaud utilisant le cycle thermodynamique de Brayton-Joule. Aujourd'hui, ce principe est utilisé dans les turbines à gaz comprenant un étage de compression puis un étage de détente.

John Ericsson partit pour les USA en 1839 à l'invitation de Robert Stockton suite à ses études sur l'hélice de bateau. Cette invention est parfois attribuée à John Ericsson. En France, on avance que Frédéric Sauvage en est le véritable inventeur. Pour les tchèques, il s'agit de Josef Ressel... Pour mettre tout le monde d'accord, on dira que le premier à l'avoir décrite, et pas forcément inventée, est Archimède ! Et ce, quelques deux mille ans auparavant. Il travailla sur différents modèles de bateaux propulsés par l'hélice de son invention, en particulier l'USS Princeton, bateau à vapeur construit par l'US Navy.

En 1851, il déposa un nouveau brevet de moteur à air chaud. C'est le moteur Ericsson étudié sur ce site et utilisant le cycle thermodynamique du même nom. Ce moteur équipa le bateau Ericsson. Faute de performances équivalentes à celles des bateaux à vapeur classiques, l'Ericsson fut modifié pour recevoir un moteur à vapeur !.

John Ericsson mourut le 8 mars 1889.

a. Avantages du moteur Ericsson :

- la multitude de "sources chaudes" possibles : combustion de gaz divers, de bois, sciure, déchets, énergie solaire ou géothermique...
- l'aptitude écologique à répondre le mieux possible aux exigences environnementales en matière de pollution atmosphérique. Il est plus facile de réaliser dans ce type de moteur une combustion complète des carburants.
- la fiabilité et la maintenance aisée : la relative simplicité technologique permet d'avoir des moteurs d'une très grande fiabilité et nécessitant peu de maintenance.
- la durée de vie importante du fait de sa "rusticité".
- les utilisations très diverses du fait de son autonomie et son adaptabilité au besoin et à la nature de la source chaude.

- le rendement intéressant : fonction, il est vrai, des températures des sources chaudes et froides. Il paraît judicieux de le faire fonctionner en cogénération (puissances mécanique et calorique) en récupérant les calories rejetées à l'échappement du moteur. Le rendement global est alors élevé.

b. Inconvénients du moteur Ericsson :

- le prix : le frein à son développement est aujourd'hui probablement son coût, non encore compétitif par rapport aux autres moyens bien implantés. Une généralisation de son emploi devrait pallier ce problème inhérent à toute nouveauté.
- la méconnaissance de ce type de moteur par le grand public. Il faut donc en faire la promotion.
- les échanges de chaleur avec un gaz sont délicats et nécessitent souvent des appareils volumineux.
- le manque de souplesse : les variations rapides et efficaces de puissance sont probablement difficiles à obtenir avec un moteur Ericsson. Celui-ci est plus apte à marcher à puissance nominale constante.
- le bruit lié à son fonctionnement : le rejet à l'atmosphère de l'air chaud après détente peut provoquer un bruit gênant.

1.2.3. Machine à vapeur :

La machine à vapeur est une invention dont les évolutions les plus significatives datent du 18^{ème} siècle. En 1690 un français Denis Papin, découvre le principe de la machine à vapeur. Après diverses améliorations techniques (par James Watt notamment), la machine à vapeur s'imposera comme l'une des principales techniques de la révolution industrielle aux 18^{ème} et 19^{ème} siècles. Elle participera au développement économique et entraînera de nouvelles pratiques (trains, bateaux, machines, etc.).

Comme première source d'énergie mécanique constructible et maîtrisable par l'Homme (contrairement à l'énergie de l'eau des marées ou du vent, qui nécessitent des sites spéciaux et que l'on ne peut actionner facilement à la demande), elle a eu une importance majeure lors de la Révolution industrielle. Mais au 20^{ème} siècle la machine à vapeur « alternative » a été

supplantee par la turbine à vapeur. Le moteur électrique et le moteur à explosion l'ont aussi remplacée dans la mise à disposition d'énergie mécanique.

Aujourd'hui, les trains à vapeur ont été remplacés par des modèles électriques. Pourtant, une grande partie de l'électricité qui les fait avancer est produite dans des centrales utilisant des turbines à vapeur.

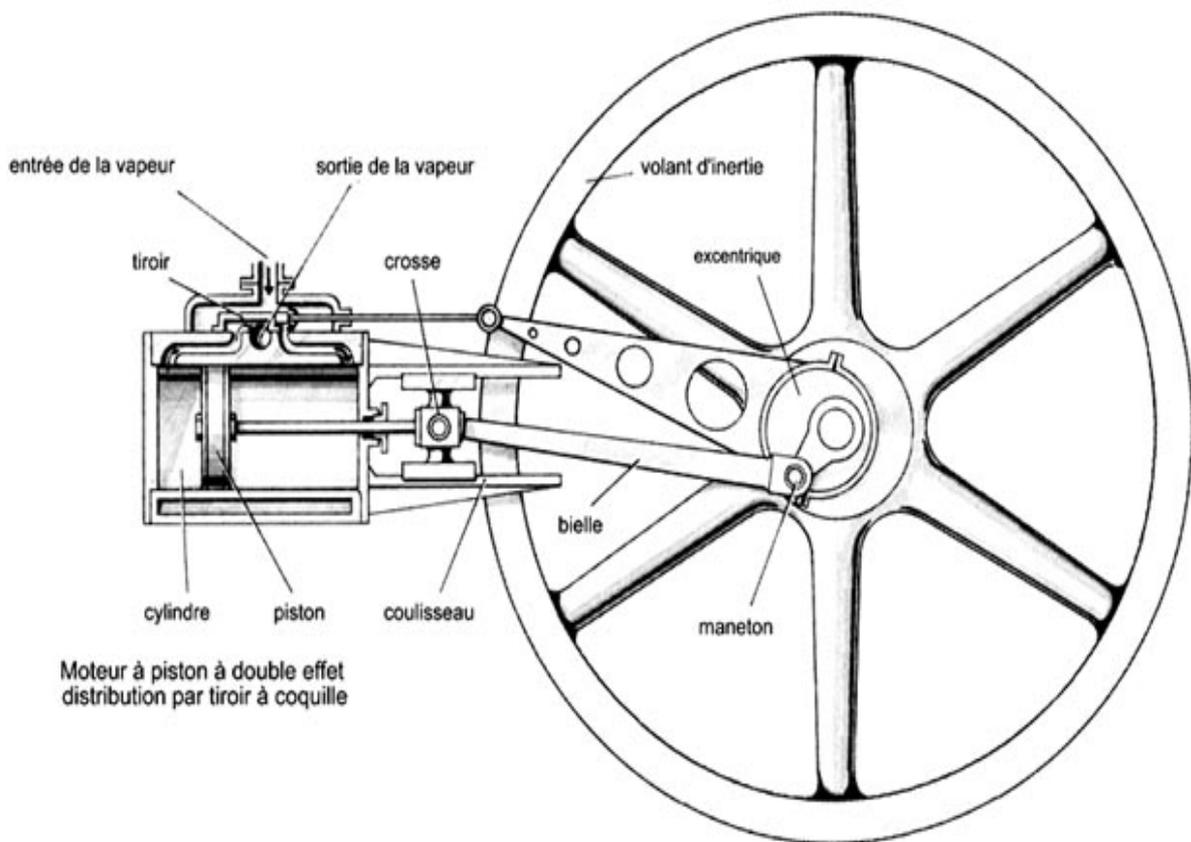


Fig. 1.3. Moteur à vapeur [3].

- Les avantages et les inconvénients:

La machine à vapeur a permis de découpler les forces dont disposait les hommes pour voyager, produire, cultiver, etc. Si aujourd'hui elle a été remplacée pour les transports par le moteur à explosion, elle reste une technologie moderne puisque l'utilisation de turbines à vapeur permet de produire la majeure partie de l'électricité dans le monde.

L'utilisation des machines à vapeur a été à l'origine du recours massif aux énergies non renouvelables (qui peuvent s'épuiser et sont très polluantes : charbon, pétrole, gaz naturel,

uranium). Cependant, le rendement des machines à vapeur est faible. En effet, seul 30% de l'énergie contenue dans le combustible de départ se retrouve finalement sous forme de mouvement (énergie mécanique) ou d'électricité. Il s'agit donc d'une technologie qui utilise de façon peu efficace une part non négligeable de nos ressources.

1.2.4 Moteur Manson :

AD Manson a inventé un moteur original portant son nom. Ce dernier a fait l'objet d'une publication dans la revue britannique "Newnes Practical Mechanics", en mars 1952.

Pour ceux qui connaissent les moteurs à air chaud ou à combustion externe, par exemple le moteur Stirling, ils retrouveront des similitudes de fonctionnement.

On a l'impression que AD Manson a cherché à faire un moteur dépouillé, avec le moins de pièces possibles. Il a réussi. Mais, dans le même temps, des inconvénients apparaissent. En particulier, la valeur de la pression interne du moteur varie autour de celle de la pression atmosphérique.

A chaque moteur d'avoir sa plage d'utilisation, sa possibilité d'être adapté à des situations particulières et sa capacité d'être réalisé par des amateurs ou des experts.

Actuellement, l'auteur de cette page ne connaît pas d'application concrète de ce moteur. Quelles en sont les raisons ? Un manque de notoriété ? Si c'est le cas, ce site peut être une façon d'y pallier.

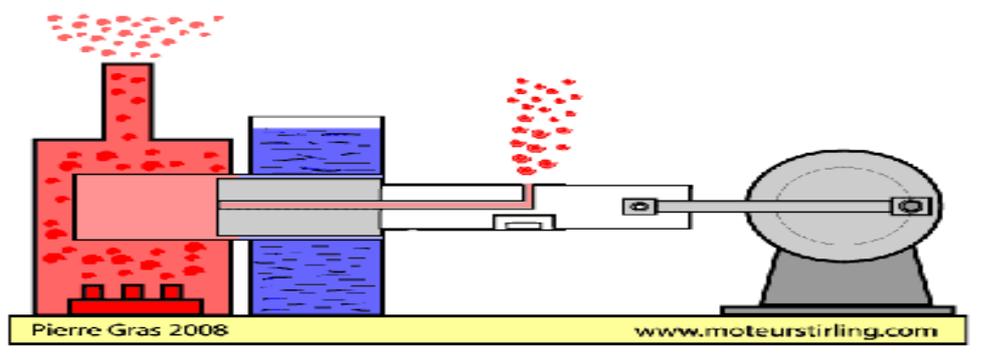


Fig.1.4.Moteur Manson [4].

a. Avantages escomptés :

- une relative facilité de conception et réalisation : il y a peu de pièces. Chacune d'entre elles est de réalisation aisée et ne nécessite pas de moyens d'usinage complexes et coûteux.
- une multitude de "sources chaudes" sont envisageables : combustion de gaz divers, de bois, sciure, déchets, énergie solaire... On peut supposer que ces sources de chaleur doivent avoir une forte température pour être exploitables par un tel moteur.
- une aptitude écologique à répondre le mieux possible aux exigences environnementales en matière de pollution atmosphérique. Il semble plus facile de réaliser dans ce type de moteur un combustion complète des carburants.
- une fiabilité et une maintenance aisée : la relative rusticité technologique permet d'avoir un moteur d'une très grande fiabilité et nécessitant peu de maintenance.
- une durée de vie importante du fait de ce qui précède.
- une utilisations très variée du fait de son adaptabilité au besoin et à la nature de sa source chaude.

B . Inconvénients possibles :

- un rendement médiocre : ce moteur a la fâcheuse caractéristique de rejeter l'air chaud et sous pression à l'atmosphère. Il est dommage de ne pas profiter pleinement d'une détente complète jusqu'à la pression atmosphérique. Ce point n'est pas gênant pour une maquette, mais important si on voulait réaliser un moteur de puissance économe en énergie.
- un fonctionnement bruyant : en effet, le rejet d'air en pression et température peut présenter un risque sonore à l'instar des moteurs à combustion interne. L'aspiration d'air frais doit, elle aussi, être source de bruit.
- un prix élevé : c'est le tribut de toute nouveauté avant un développement en série.
- une totale ignorance du grand public pour ce moteur : ceci représente un frein à son adoption.
- les échanges de chaleur en milieu gazeux sont délicats et nécessitent souvent des appareils volumineux.

- un manque de souplesse probable : il faut probablement envisager un fonctionnement à puissance constante pour ce type de moteur.

2.1. Historique du moteur Stirling :

Robert Stirling (né le 25 octobre 1790, décédé le 6 juin 1878, figure 2.1) était un pasteur mécanicien et métallurgiste écossais, né à Gloag, dans le Perthshire, et mort à Galston, au sud de Glasgow. Il est connu pour être l'inventeur du « moteur à air chaud » (1816) ou moteur à combustion externe communément appelé moteur Stirling.



Fig.2.1.Robert Stirling[5].

Son vrai nom est Robert Mac Gregor, "Stirling" était en fait le nom de l'employeur du père de Robert. Son grand-père paternel fabriquait de l'équipement agricole et son grand-père maternel était agriculteur. Robert Stirling était le troisième d'une famille de huit enfants. Il poursuivit ses études de 1805 à 1808 à l'Université d'Édimbourg, puis alla à Glasgow étudier la théologie. Il se maria le 10 juillet 1819 avec Jean Rankin. De cette union, il eut sept enfants : Patrick, William, Robert, James (tous ingénieurs), David (pasteur), Jane et Agnes (artiste).

La légende veut que, catastropher par les accidents récurrents des chaudières à vapeurs décimant ses paroissiens, liés à l'absence de normalisation des matériaux, le pasteur Stirling, mit toute son énergie à améliorer les machines à vapeur, alors indispensables, pour créer le moteur à combustion externe portant depuis son «patronyme». Sa machine utilisait une nouvelle invention de son cru, un régénérateur, qu'il appela économiseur. En 1843, son frère James fit installer le moteur à air chaud inventé par Robert dans l'usine où il travaillait, qui furent plus tard remplacées, à cause de bris, par des machines à vapeur plus performantes.

Dans le contexte d'évolution des techniques métallurgiques du 19e siècle, combustibles, foyer et chaleur étaient des éléments essentiels car l'acier et le fer ont des températures de fusion élevée.

Wilhelm Siemens reprit l'idée de Robert Stirling brevetée en 1816, puis Friedrich Siemens prit un brevet en 1856 pour un appareil de régénération de la chaleur qui permit le réchauffage de l'air soufflé dans les fourneaux en utilisant les gaz récupérés du gueulard.

2.2. Principe de fonctionnement :

Le moteur de Stirling fonctionne grâce à 4 phases élémentaires inspirées du cycle de Carnot, pendant lesquelles le gaz utilisé subit des compressions décompressions en faisant varier la température. Ces phases expliquent son fonctionnement et restent globalement les mêmes quels que soient les types de moteurs de Stirling.

2.2.1.Phase 1 : Le chauffage « isochore » :

Cette étape comprime le gaz ou le fluide utilisé pour pousser le piston. Pour cela, on élève sa température avec une source chaude (soleil, combustion, nucléaire, ...).

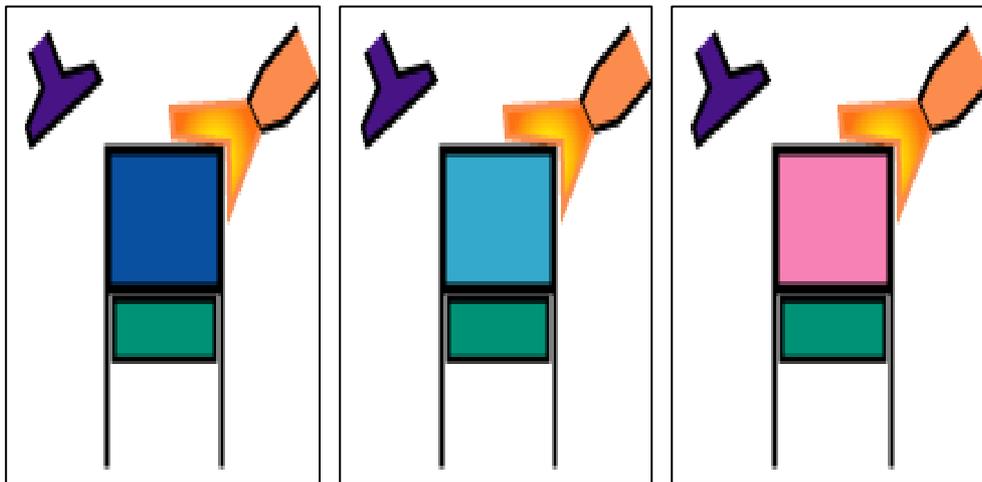


Fig.2. 2.Phase de chauffage[6].

2.2.2.Phase 2 : Une détente isotherme :

Le gaz comprimé exerce une pression sur le piston. De ce fait, son volume s'accroît et sa pression diminue. C'est pendant cette étape que l'on peut récupérer de l'énergie mécanique.

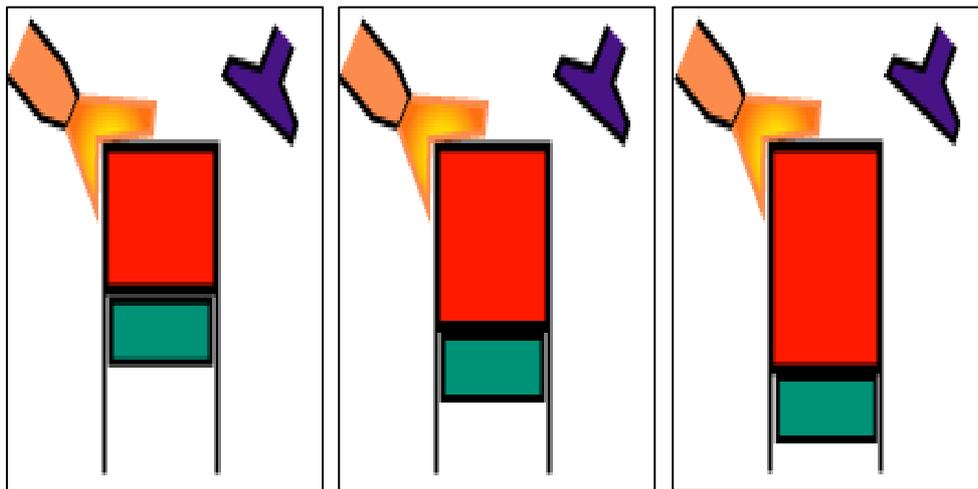


Fig.2.2.Phase de détente[6].

2.2.3.Phase 3 : Un refroidissement isochore :

La source froide (air, eau ou liquide de refroidissement) récupère l'énergie thermique restante. La température et la pression du gaz diminuent.

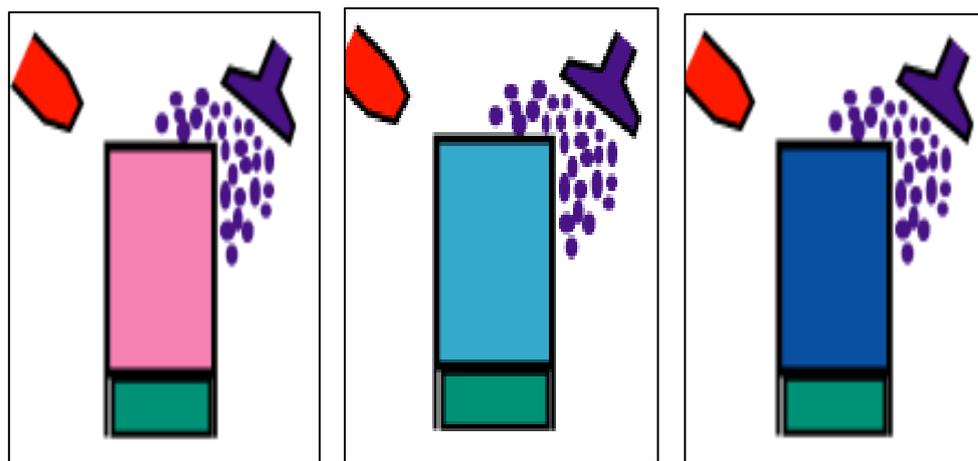


Fig.2.2.Phas de refroidissement[6].

2.2.4.Phase 4 : Une compression isothermique :

Pendant cette étape, le piston revient à sa place initiale, ce qui recomprime légèrement le gaz en diminuant son volume.

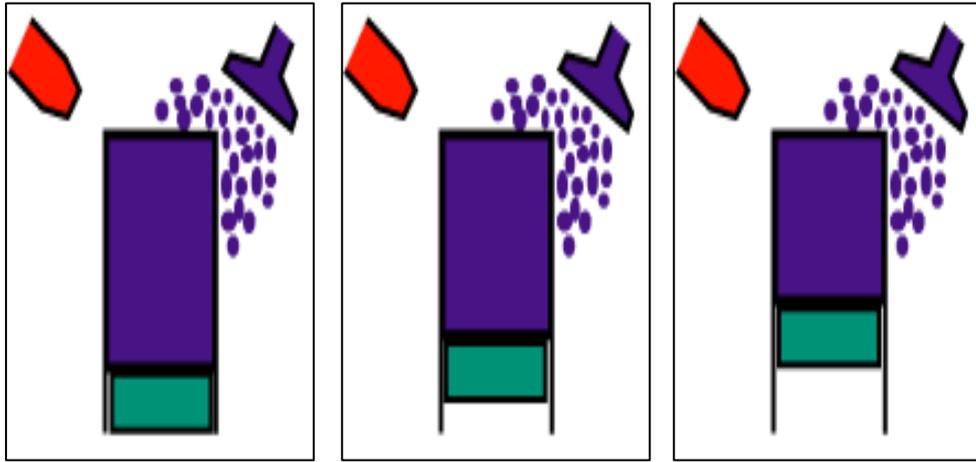


Fig .2.2.Pahase de compression[6].

On peut réutiliser une partie de l'énergie mécanique libérée à l'étape 2 pour repousser le piston à l'étape 4.

2 .3 .Le rôle du déplaceur :

La réalisation d'un moteur tel que celui décrit ci-dessus poserait des difficultés : allumer le brûleur, l'éteindre, asperger puis arrêter le refroidissement, chocs thermiques successifs....

C'est pourquoi on va introduire un artifice apportant des solutions à ces problèmes : le déplaceur. Ce dernier ne modifie ni la pression ni le volume du gaz, mais l'oblige à se situer soit vers la source chaude, soit vers la source froide (qui peuvent alors fonctionner en continu).

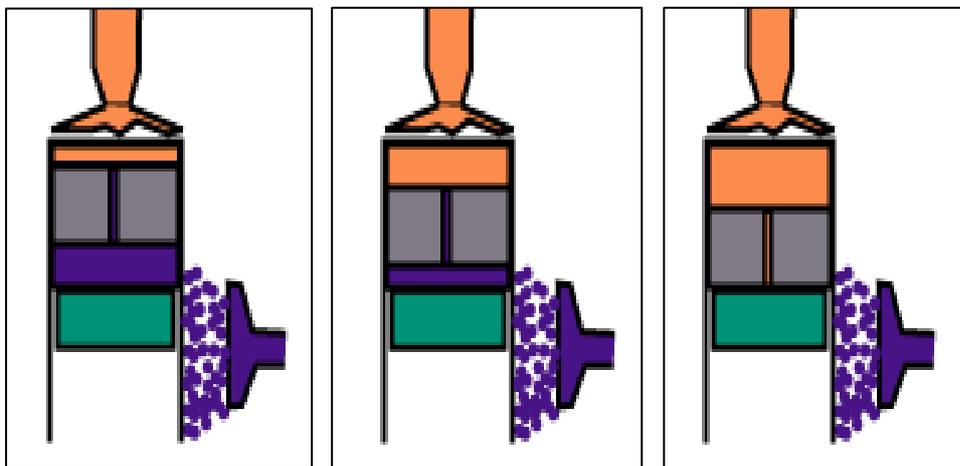


Fig.2.3. 1^{ère}Phase de travail du déplaceur[6].

Le volume reste constant, mais le déplaceur fait passer le gaz de la partie basse (froide) à la partie haute (chaude).

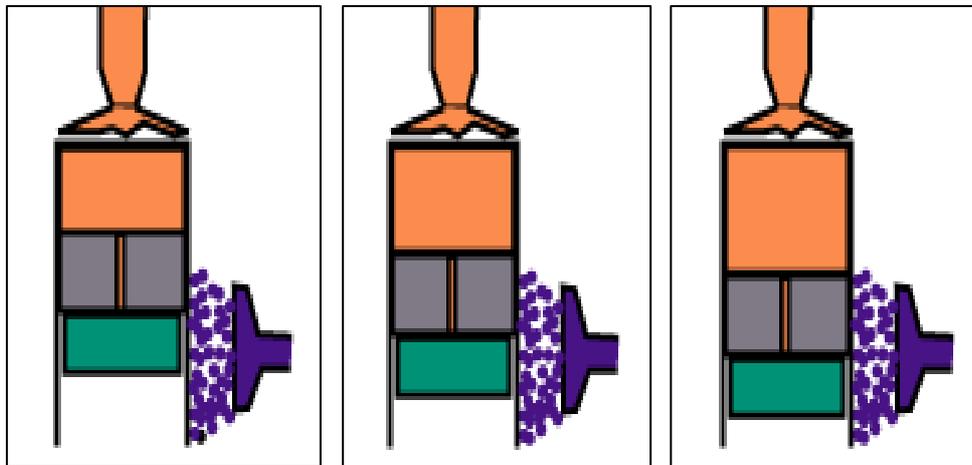


Fig.2.3.1^{em}Phase de travail du déplaceur[6].

Le déplaceur suit le piston moteur au cours de la détente pour que le gaz reste en contact uniquement avec la source chaude.

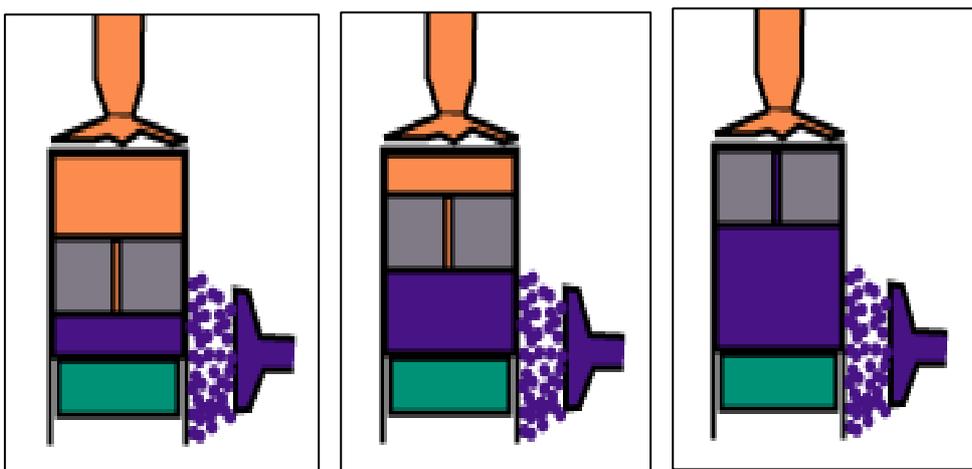


Fig.2.3.2^{em}Phase de travail du déplaceur[6].

Le volume reste constant, mais le déplaceur fait passer le gaz de la partie haute (chaude) à la partie basse (froide).

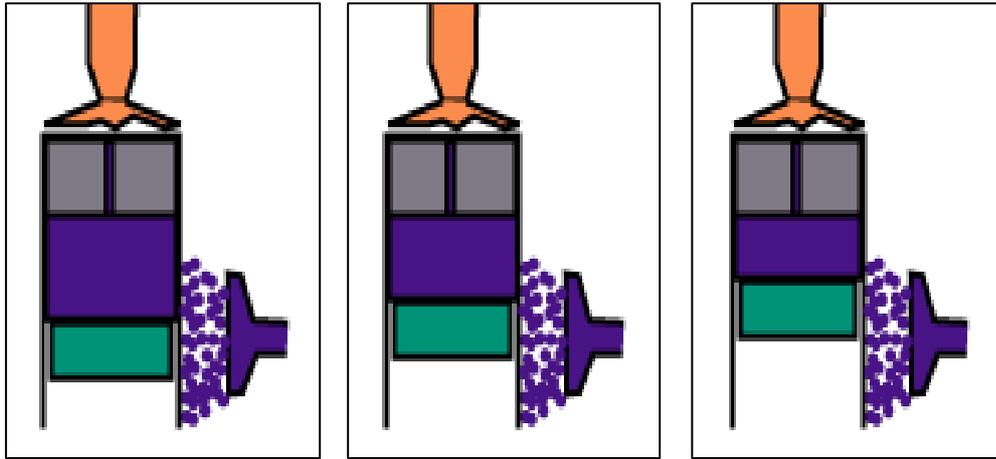


Fig.2.3.3^{em}Phase de travail du déplaceur[6].

Le déplaceur, au cours de la compression, reste en partie supérieur pour que le gaz reste en contact uniquement avec la source froide.

2.4.Cycle thermodynamique ou de Stirling théorique :

Le cycle est le même que la plupart des cycles thermiques et comprend quatre phases ; 1. Compression, 2. Chauffage, 3. Détente, 4. Refroidissement .Le cycle de Stirling théorique comprend quatre phases :

- Points A à B, détente isotherme. La zone de détente est chauffée par l'extérieur, ainsi le gaz suit une détente isotherme.
- Points B à C, refroidissement à volume constant (isochore). Le gaz passe dans le régénérateur, se refroidit en lui transférant sa chaleur qui sera utilisée pour le cycle suivant.
- Points C à D, compression isotherme. La zone de compression est refroidie, ainsi le gaz suit une compression isotherme.
- Points D à A, chauffage isochore. Le gaz circule dans le régénérateur et prélève de la chaleur.

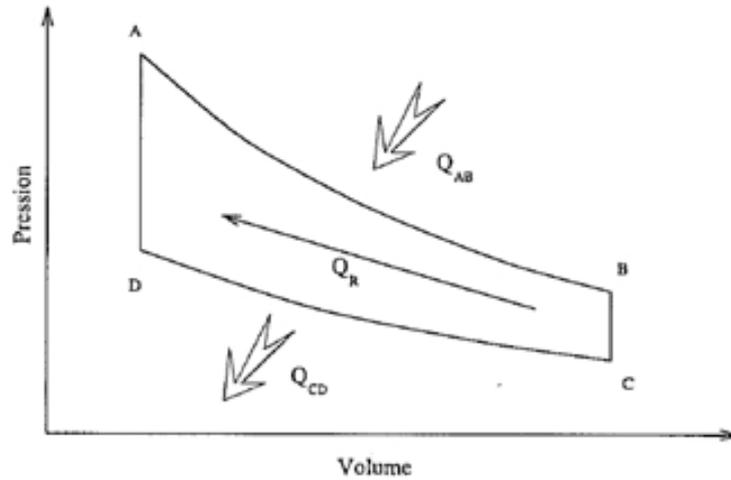


Fig.2.4. Diagramme indicateur d'un moteur STIRLING théorique [7].

2.5. Cycle de Stirling réel :

En réalité, le diagramme indicateur relevé expérimentalement sur un moteur Stirling (figure 2.5) sera très sensiblement différent du diagramme théorique présenté précédemment. Il a une forme plus arrondie que ce dernier. Ceci est dû essentiellement aux mouvements continus des pistons, différents des mouvements théoriques, aux grandes hétérogénéités de température instantanée dans le moteur et aux nombreuses irréversibilités présentes lors du fonctionnement du moteur [5]. Du fait de la non uniformité du champ de température instantanée dans un moteur Stirling réel, on ne peut pas parler d'un cycle thermodynamique réel.

Le travail mécanique produit résulte d'une infinité de cycles thermodynamiques différents subis par les particules fluides présentes dans le moteur. On remarque que l'aire du diagramme indicateur réel est plus petite que celle du diagramme indicateur théorique. Cette diminution a pour conséquence de réduire la puissance fournie par le moteur car le travail est représenté par l'aire du diagramme fermé.

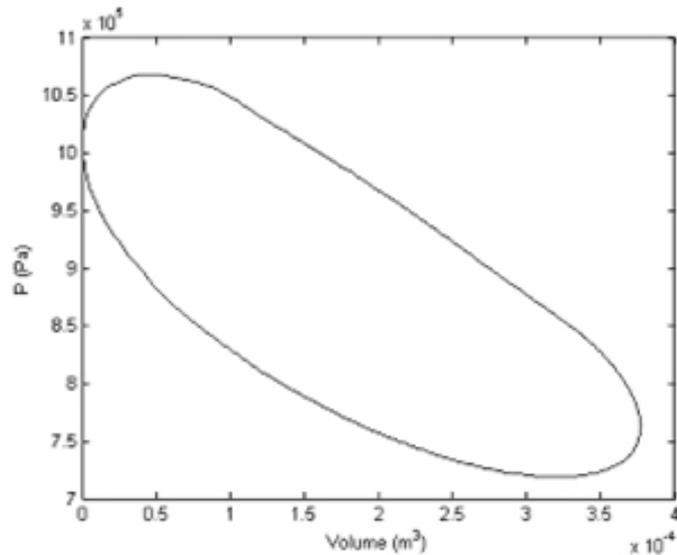


Fig.2.5. Diagramme indicateur d'un moteur STIRLING réel [8].

2.6. Avantages et inconvénients :

A . Avantages :

- Produisant peu de vibration grâce à l'absence d'explosion, l'absence de valves qui s'ouvrent et se ferment, l'absence de gaz qui s'échappent. Cela le rend silencieux et réduit les contraintes mécaniques,
- En plus de la pollution sonore réduite, l'absence d'échange de gaz avec le milieu extérieur le rend utile dans les milieux pollués, ou les milieux où il ne faut pas amener de matière étrangère,
- Entretien facile : du fait de son absence d'échange de matière avec son environnement et l'absence de réaction chimique interne, ce moteur se détériore moins qu'un moteur à combustion interne,
- Bon rendement : il peut avoisiner les 40 % (soit 80 % du maximum du cycle de Carnot), contre environ 35 % pour les moteurs à explosion : si la différence de 5 points paraît faible, elle signifie quand même près de 15 % (5/35) d'énergie supplémentaire. Les moteurs électriques, dont le rendement peut certes atteindre 95 %, ne sont pas comparables, car l'électricité est une forme d'énergie difficile à stocker et à transporter avec un rendement proche de 100 %, ce qui est une limite forte pour certaines applications,

- Inversible. Le cycle de Stirling est inversible : un moteur Stirling entraîné par un autre moteur devient une pompe à chaleur capable de refroidir à -200 °C ou de chauffer à plus 700 °C , selon le sens d'entraînement. Ceci, sans employer de gaz avec des propriétés spéciales qui leur confèrent des inconvénients pratiques ou chimiques (comme le fréon des machines frigorifiques d'anciennes générations, destructeur de la couche d'ozone). En pratique, d'ailleurs, c'est la fonction de pompe à chaleur efficace qui permet à quelques machines d'exister,
- Multi-source ; du fait de son mode d'alimentation en chaleur ce moteur peut fonctionner à partir de n'importe quelle source de chaleur (combustion d'un carburant quelconque, solaire, nucléaire, ou encore chaleur humaine),
- Pollution potentiellement plus faible. La chaleur venant de l'extérieur, il est possible, grâce aux énergies non fossiles, de la fournir de façon moins polluante que dans bien des moteurs thermiques dans lesquels la combustion est imparfaite.

b. Inconvénients :

- L'étanchéité des pistons est plus importante que dans un moteur à combustion interne et est plus difficile à réaliser à cause des très fortes variations de température et de la nécessité, afin de minimiser les pertes par frottement (en particulier dans le régénérateur), d'utiliser un gaz le moins visqueux possible. Avec cet inconvénient que le gaz le moins visqueux, par exemple l'hydrogène, est aussi celui qui fuit le plus facilement.
- Conception délicate : alors que les moteurs à combustion interne produisent la chaleur directement au sein du fluide, très vite et de façon très homogène, un système Stirling repose sur des transferts thermiques entre le gaz et les échangeurs (les deux sources, le récupérateur), alors que les gaz sont des isolants thermiques où les échanges sont très lents. De plus, il faut minimiser le volume « mort » (contenant du fluide qui n'accomplit pas le cycle et donc ne contribue pas au rendement). Tout cela pose des problèmes de dynamique des fluides, problèmes difficiles à résoudre, au niveau des échangeurs, du récupérateur, des tuyaux ou du piston qui permettent le déplacement du gaz au cours du cycle (problèmes de diamètre, de longueur, de turbulences à créer ou éviter, etc.).

2.7. Types de moteur Stirling :

Il existe une très grande diversité de moteurs Stirling. On les classe généralement 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.

2.7.1. Stirling alpha :

Le moteur bicylindre ou alpha (figurer2.7) est un moteur dans lequel un cylindre est associé à la source froide et un autre est associé à la source chaude. Le couplage cinématique des deux pistons permet au fluide de passer d'un cylindre à l'autre tout en traversant un récupérateur d'énergie (régénérateur) et de faire varier le volume selon les phases s'approchant de celles décrites dans le diagramme indicateur théorique de Stirling.

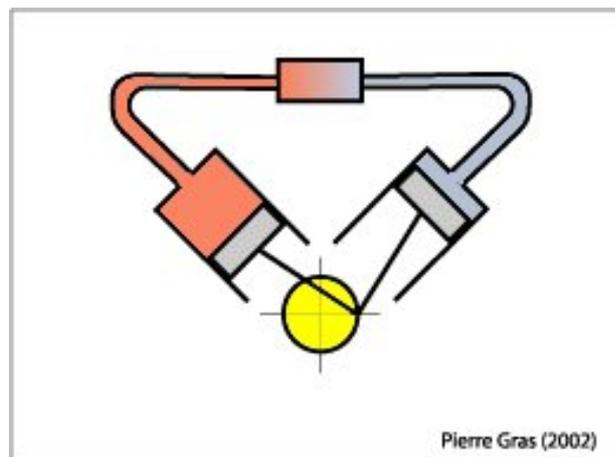


Fig.2.7.Moteur Stirling de type alpha[9].

2.7.2. Stirling bêta :

Le moteur bêta (figure 2.7) est un moteur monocylindre constitué de deux pistons. Un piston de travail (gris foncé) utile pour la compression et la détente. Un piston 'déplaceur' (gris clair) pour mettre successivement le gaz en contact avec la source froide puis la source chaude.

Un Stirling bêta utilise également un volume de gaz délimité entre ses deux pistons. Qui combinent :

- Un mouvement relatif lors du changement de volume du gaz,

- Un mouvement commun qui déplace ce volume de la partie chaude vers la partie froide, et vice-versa.

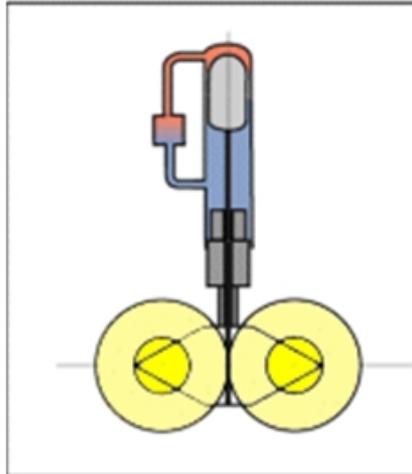


Fig.2.7.Coupe d'un moteur Stirling de type bêta[9]

2.7.3. Stirling gamma :

Ce moteur ressemble beaucoup au type bêta car il a aussi un piston de travail et un piston déplaceur (figure 2.7). La seule différence réside dans le fait que les deux pistons se meuvent dans des cylindres distincts.

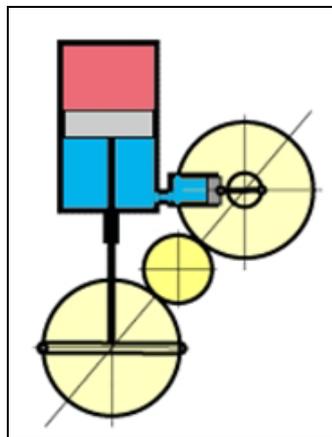


Fig.2.7.Moteur STIRLING, type gamma [9].

2 .8.Utilisation du moteur Stirling :

1. En Espagne, à la Plata forma Solar de Almería, moteur Stirling installé au foyer d'un miroir parabolique,

2. Le moteur Stirling a des applications de niches, dans des situations où le coût initial du système n'est pas un inconvénient grave par rapport aux avantages (applications militaires, de recherche, de pointe).
3. La principale application commerciale du Stirling est dans le domaine de la réfrigération
4. industrielle et militaire. Il sert de machine pour la liquéfaction des gaz et comme refroidisseur pour les systèmes de guidage militaire infrarouge.
5. Utilisé comme générateur d'électricité en Islande, au Japon et dans les milieux extrêmes tels que les déserts australiens et arctiques par de nombreuses missions scientifiques et militaires.
6. Il est utilisé par les marines suédoises, australiennes et bientôt les sous-marins d'attaque américains en tant qu'ensemble propulseur principal, notamment pour les sous-marins suédois de Classe Gotland, non seulement en raison de son silence, propriété cruciale pour les sous-marins, mais aussi pour la beaucoup plus faible production de gaz imbrûlés nécessaire à l'apport d'un gradient thermique (une différence de température) à un moteur Stirling ; en effet, un sous-marin en plongée ne peut évacuer des gaz qu'en les comprimant à une pression au moins égale à celle du milieu ambiant, nécessitant (et donc gaspillant) une part non négligeable de l'énergie disponible à bord.
7. Ce moteur équipe aussi certaines classes de frégates américaines, le système de refroidissement du réacteur nucléaire de nombreux sous-marins et porte-avions ainsi que des drones à grande autonomie.
8. En raison de sa capacité poly-carburant il a été testé avec succès par l'URSS sur quelques prototype de chars lourds dont "l'objet 167" avant d'être abandonné pour des raisons d'ordre politique autant qu'économique, lors du passage à l'économie de marché à la chute du bloc soviétique.
9. La NASA et d'autres agences spatiales l'utilisent pour fournir de l'énergie aux satellites et sondes spatiales en complément aux panneaux solaires qu'il contribue à orienter pour en optimiser le rendement.
10. Le constructeur de cartes mères d'ordinateur personnel MSI a présenté début 2008 un système de refroidissement dont le ventilateur est actionné par un moteur de Stirling utilisant comme source de chaleur l'énergie dégagée par la puce à refroidir.

11. La plupart des grands constructeurs de chaudières proposent en 2009 une centrale de micro-cogénération utilisant un moteur Stirling. Ce type de chaudière de la taille d'un chauffe-eau permet non seulement de chauffer de l'eau à utilisation domestique (chauffage, eau sanitaire) mais également de produire de l'électricité localement
12. Nombre d'exemplaires sont utilisés à des fins pédagogiques en classe de physique pour démontrer les principes de la thermodynamique. Certains fonctionnant grâce à la chaleur du Soleil concentrée par une parabole à l'instar des modèles utilisés dans certaines centrales solaires produisant de l'électricité, d'autres ne nécessitant que de la chaleur d'une tasse à café ou celle de la paume d'une main pour fonctionner.

3.1.Analyse et calcul théorique du cycle de Stirling de la configuration proposée :

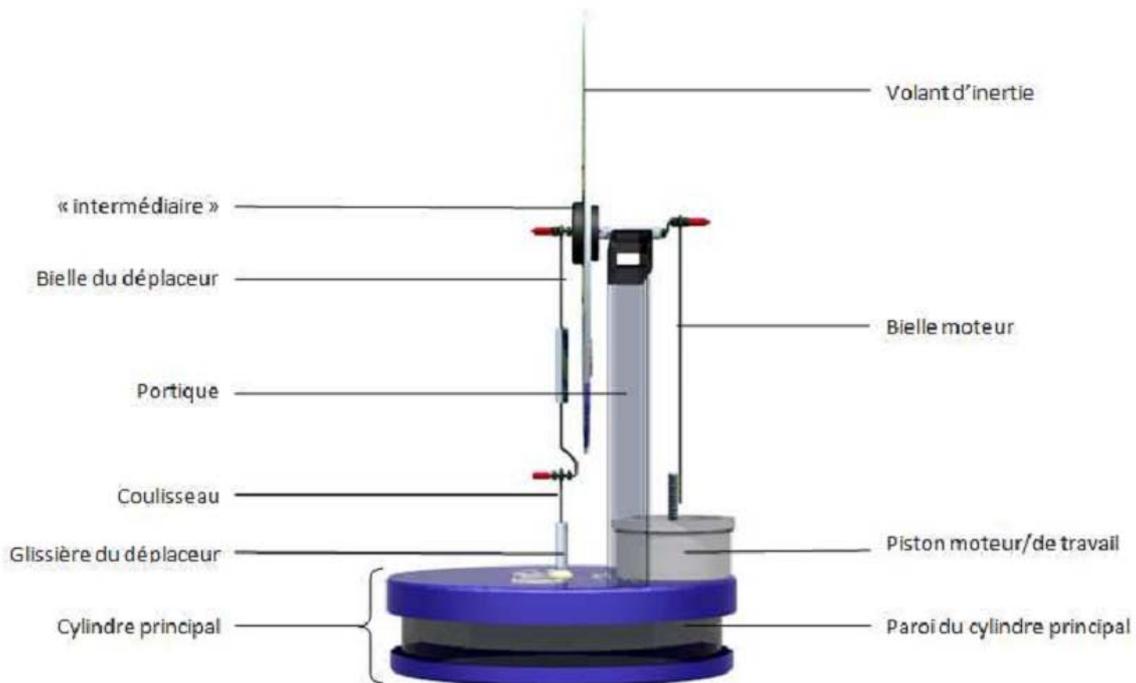


Fig.3.1. schéma de fonctionnement du moteur stirling [10]

Dans ce chapitre, nous allons examiner les effets des volumes morts et l'effet de l'efficacité du régénérateur sur un moteur Stirling « réel » non pressurisé. pour cet exemple, les paramètres initiaux de notre moteur seront les suivants:

Température chaude:	$T_3 = 773 \text{ K } (500 \text{ }^\circ\text{C}).$
Température froide:	$T_1 = 338 \text{ K } (65 \text{ }^\circ\text{C}).$
Volume de gaz déplacé par le piston de travail:	$V_P = 0.027 \text{ m}^3 \text{ (optimisé)}$
Volume de gaz déplacé par le déplaceur avec :	$V_D = 0.075 \text{ m}^3 \text{ } C_t = 0.366$
Volume mort côté chaud :	$V_{Mc} = 2 \text{ E-}4 \text{ m}^3$
Volume mort côté froid :	$V_{Mf} = 1,5 \text{ E-}4 \text{ m}^3$

La procédure de calcul d'un moteur Stirling imparfait peut maintenant être réalisée comme suit:

3.2.Calcul des volumes morts :

Disons que les volumes morts contenus dans le réchauffeur, le refroidisseur sont exprimés en mètres cubes et sont respectivement exprimés par V_{Mc} et V_{Mf} , alors le volume mort total s'exprime par:

$$V_{MT} = V_{Mc} + V_{Mf} = (k_{Mc} + k_{Mf}) V_T$$

Chapiter 3 :calcul thérique du moteur stirling

$$\text{A.N : } V_{MT} = V_{Mc} + V_{Mf} = (1.5+2) \times 10^{-4} = 0.00035 \text{ m}^3$$

Où

$k_{Mc} = \frac{V_{Mc}}{V_{MT}}$ représente le rapport du volume mort chaud sur le volume mort total et $k_{Mf} =$

$\frac{V_{Mf}}{V_{MT}}$ qui est le rapport du volume mort froid sur le volume mort total.

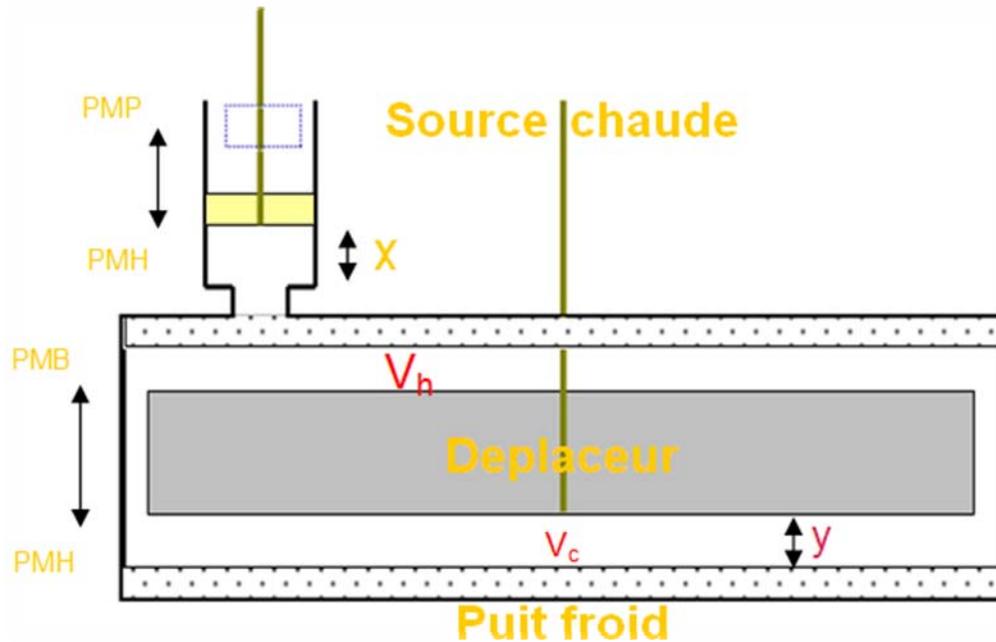


Fig. 3.2. position des pistons[10].

Représentons maintenant le rapport entre le total des volumes morts et le volume total de gaz contenu dans le moteur par $k_{MT} = \frac{V_{MT}}{V_T}$ alors le total des volumes morts peut être exprimé sous la forme :

$$V_{MT} = k_{MT} V_T = k_{MT} (V_{MT} + V_D + V_P)$$

$$\text{A.N : } V_T = (3.5 + 750 + 274.64) \times 10^{-4} = 0.102814 \text{ m}^3$$

$$k_{MT} = \frac{V_{MT}}{V_T} = \frac{0.00035}{0.102864} = 0.00340$$

$$k_{Mc} = \frac{V_{Mc}}{V_{MT}} = \frac{0.0002}{0.00035} = 0.57143$$

$$k_{Mf} = \frac{V_{Mf}}{V_{MT}} = \frac{0.00015}{0.00035} = 0.42857$$

Où 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 volumes total de gaz déplacé , cela nous donne alors :

Chapiter 3 :calcul thérique du moteur stirling

$$V_{MT} = K_{MDP} (V_D + V_P)$$

$$A.N : K_{MDP} = \frac{V_{MT}}{(V_D + V_P)} = \frac{3.5}{1024.64} = 0.00341$$

En conséquence le rapport du volume mort sur le volume total est celui du volume mort sur le total des volumes balayés. Il est exprimé par:

$$K_{MDP} = \frac{k_{MT}}{1 - k_{MT}} \quad \text{ou} \quad k_{MT} = \frac{K_{MDP}}{1 + K_{MDP}}$$

$$A.N : K_{MDP} = 0.00341 \quad \text{ET} \quad k_{MT} = 0.00340$$

3.3.Équations d'état:

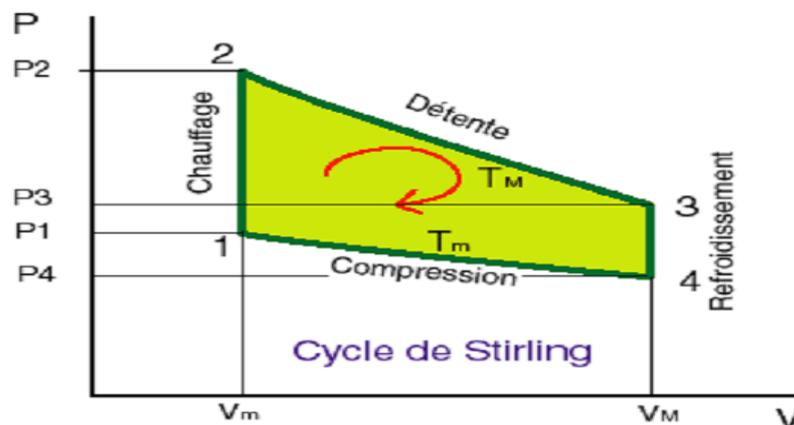


Fig3.3.schéma cycle de stiring[11].

Nous commençons par l'équation d'état correspondant à la transformation isotherme 1-2. Nous avons les espaces chaud et froid, respectivement V_c et V_f ou les températures du fluide de travail correspondent respectivement à T_3 et T_1 . Dans cette équation nous tenons compte des volumes morts V_{Mc} , V_{Mf} et Cela nous donne:

$$P = \frac{mR}{\frac{V_c + V_{Mc}}{T_3} + \frac{V_f + V_{Mf}}{T_1}} = \frac{mR}{\frac{V_c + V_{Mc}}{T_3} + K + \frac{V_f}{T_1}}$$

$$\text{Ou} \quad K = \frac{V_{Mc}}{T_3} + \frac{V_{Mf}}{T_1}$$

$$A.N : K = \frac{0.0002}{500} + \frac{0.00015}{65} = 27.077E-7$$

$$P = \frac{0.12479 \times 293}{\frac{0.0002}{500} + 0.0000027 + \frac{0.00015}{65}} = 11871.29 \text{ kg /m}^2$$

m correspond à la masse totale de gaz contenu dans le moteur (en kg).

En substituant l'équation (1) et (7a) dans l'équation (9) cela donne:

$$K = \left(\frac{K_{Mc}}{T_3} + \frac{K_{Mf}}{T_1} \right) V_{MT}$$

Chapiter 3 :calcul thérique du moteur stirling

$$\text{A.N : } K = \left(\frac{0.57143}{300} + \frac{0.42876}{65} \right) 0.00035 = 27.077\text{E-}7$$

Il devient clair maintenant que pour des températures données du fluide de travail le facteur K est fonction des volumes morts.

3.3.1. La compression isotherme. (1-2)

Durant la transformation correspondant à la compression isotherme, le fluide de travail contenue dans l'espace froid est comprimé depuis $V_{f1} = V_D + V_P$ vers $V_{f2} = V_D \cdot V_{f1}$ et V_{f2} représentent les volumes correspondant aux positions 1 et 2 du diagramme (p-v) de la figure 2.

Donc la chaleur rejetée pendant la transformation isotherme 1-2 est:

$$\begin{aligned} Q_{1-2} &= W_{1-2} = \int_{V_{f1}}^{V_{f2}} P \, dV_f \\ &= m R T_1 \int_{V_{f1}}^{V_{f2}} \frac{dV_f}{V_f + K T_1} \\ &= m R T_1 \ln\left(\frac{V_{f2} + K T_1}{V_{f1} + K T_1}\right) \\ &= m R T_1 \ln\left(\frac{V_D + K T_1}{V_D + V_P + K T_1}\right) \end{aligned}$$

$$\text{A.N : } Q_{1-2} = W_{1-2} = m R T_1 \ln\left(\frac{V_D + K T_1}{V_D + V_P + K T_1}\right) = -740.276 \text{ Joules}$$

Il est bon de noter que le travail de compression dépend seulement du facteur K , fonction des volumes morts.

3.3.2. Le chauffage isochore. (2-3) :

En principe, la chaleur ajoutée durant le chauffage isochore (2-3) est:

$$\begin{aligned} Q_{2-3} &= m C_v (T_3 - T_2) \\ &= m C_v (T_3 - T_1) \end{aligned}$$

$$C_p - C_v = r \Leftrightarrow C_v = C_p - r$$

$$\text{A.N : } C_v = 1004 - 287 = 717 \text{ (J/Kg } ^\circ\text{C)}$$

$$Q_{2-3} = 38921.37 \text{ Joules}$$

ou est la chaleur spécifique à volume constant (j/kg K) supposée être une constante. Sans régénérateur, cet apport de chaleur est obtenu depuis une source externe. Avec un régénérateur idéal, cet apport proviendrait uniquement de celui-ci.

3.3.3.L'expansion isotherme (3- 4) :

Durant la transformation isotherme (3-4) le volume chaud contenant le gaz de travail varie de $V_{C3} = V_D$ à $V_{C4} = V_D + V_P$. Le volume contenant le gaz froid V_f est supposé être à zéro. Pendant cette transformation, la chaleur apportée est:

$$\begin{aligned} Q_{3-4} &= W_{3-4} = \int_{V_{C3}}^{V_{C4}} P \, DV_C \\ &= m R T_3 \int_{V_{C3}}^{V_{C4}} dV_C / (V_C + K T_3) \\ &= m R T_3 \ln\left(\frac{V_{C4} + K T_3}{V_{C3} + K T_3}\right) \\ &= m R T_3 \ln\left(\frac{V_D + V_P + K T_3}{V_D + K T_3}\right) \end{aligned}$$

$$\text{A.N : } Q_{3-4} = W_{3-4} = m R T_3 \ln\left(\frac{V_D + V_P + K T_3}{V_D + K T_3}\right) = 5617.45 \text{ Joules}$$

Il est maintenant évident que le travail fourni est dépendant des volume morts.

3.3.4.Le refroidissement isochore: (4-1) :

La chaleur rejetée pendant la transformation isochore (4-1), phase de refroidissement du fluide est:

$$\begin{aligned} Q_{4-1} &= m C_v (T_1 - T_4) \\ &= - m C_v (T_3 - T_1) \end{aligned}$$

$$\text{A.N : } Q_{4-1} = - 38921.37 \text{ Joules}$$

Sans régénérateur, cette chaleur est dissipée dans le refroidisseur.

3.4. Chaleur totale ajoutée :

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

$$Q_e = Q_{2-3} + Q_{3-4}$$

$$\text{A.N : } Q_e = 38921.37 + 5617.45 = 44538.88 \text{ Joules}$$

3.5.Chaleur totale rejetée vers l'extérieur :

Sans aucune régénération cela donnerait:

$$Q_s = Q_{4-1} + Q_{1-2}$$

$$\text{A.N : } Q_s = - 38921.37 - 740.276 = 39661.646 \text{ Joules}$$

3.6.Travail effectif :

Le surplus d'énergie des deux transformations isothermes 1-2 et 3-4 est transformé en travail mécanique utile. Ce travail comprenant des volumes morts peut être calculé comme ceci:

$$\begin{aligned}
 W_{net} &= \sum Q \\
 &= Q_e + Q_s \\
 &= Q_{3-3'} + Q_{3-4} + Q_{1-1'} + Q_{1-2} \\
 &= Q_{3-4} + Q_{1-2} \\
 &= m R \left\{ T_3 \ln \left(\frac{V_{c4} + K T_3}{V_{c3} + K T_3} \right) - T_1 \ln \left(\frac{V_{f2} + K T_1}{V_{f1} + K T_1} \right) \right\}
 \end{aligned}$$

Il faut noter que V_{c4} est égal à V_{f1} (isochore) donc égal à $V_D + V_P = V_T$. Et que $V_{c3} = V_{c2} = V_D = V_2$ on en déduit:

$$W_{net} = m R \left\{ T_3 \ln \left(\frac{V_D + V_P + K T_3}{V_D + K T_3} \right) - T_1 \ln \left(\frac{V_D + V_P + K T_1}{V_D + K T_1} \right) \right\}$$

A.N : $W_{net} = 4877.38$ Joules

3.7.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:

$$V_{c4} + V_{c3} = V_{f1} + V_{f2} = V_1 + V_{V2} = V_P$$

cela donne :

$$W_{net} = P_m V_P$$

avec l'équation cela donne:

$$P_m = \left(\frac{m R}{V_P} \right) \left\{ T_3 \ln \left(\frac{V_D + V_P + K T_3}{V_D + K T_3} \right) - T_1 \ln \left(\frac{V_D + V_P + K T_1}{V_D + K T_1} \right) \right\}$$

A.N : $P_m = \left(\frac{86.56847}{0.027464} \right) 133.395$

$$P_m = 177591.90$$

3.8. Efficacité thermique :

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

$$E_t = \frac{W_{net}}{Q_s}$$

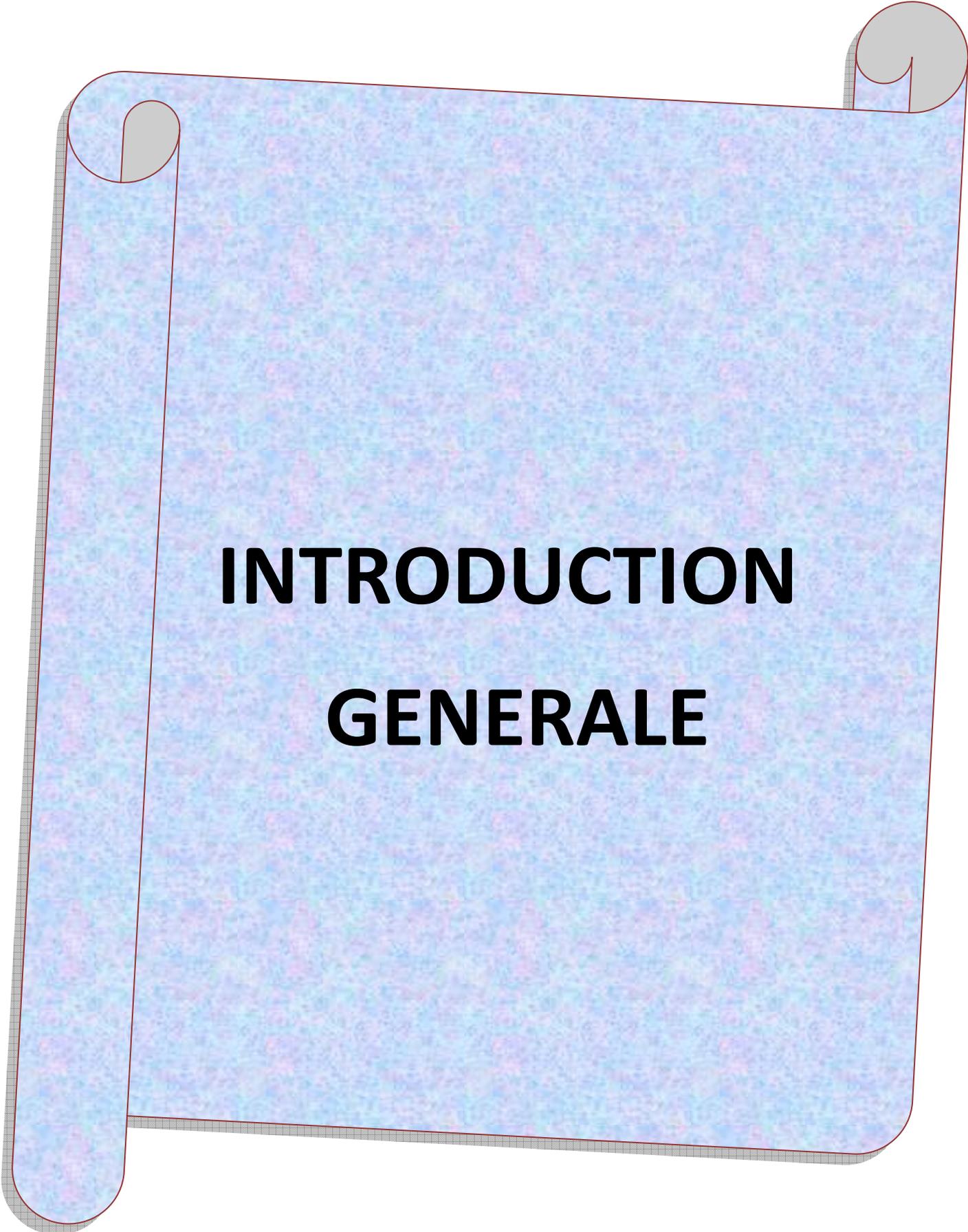
Chapiter 3 :calcul thérique du moteur stirling

cela donne pour notre moteur imparfait:

$$E_t = \frac{(T_3 \ln(\frac{V_D+V_F+K T_3}{V_D+K T_3}) - T_2 \ln(\frac{V_D+V_F+K T_2}{V_D+K T_2}))}{(T_3 \ln(\frac{V_D+V_F+K T_3}{V_D+K T_3}) + (T_3 - T_2) \frac{1-\varepsilon}{k-1})}$$

$$\text{A.N : } E_t = \frac{4877.88}{44538.88} = 0.109$$

On remarque que l'efficacité thermique du moteur Stirling dépend à la fois de la qualité du la proportion de volumes morts présents.



INTRODUCTION
GENERALE

Bibliographie

Livre :

- Bibliographie sur les machines thermiques à cycle de Stirling , Raballand Thierry
Université de Bordeaux ,France,2005 .
- Le moteur Stirling et autres moteurs à air chaud, Pierre Gras, 2010.
- Hassan Lemrani. Modélisation énergétique des moteurs Stirling. PhD thesis,
ISITEMENSTIMN, Nantes, France, 1995.
- P. Bouvier. Transferts thermiques en écoulement oscillant dans une conduite
cylindrique: Application au moteur Stirling. PhD thesis, Université de Nantes, 2000.

Web :

- [1] fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling.
- [2] fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Ericsson.
- [3] fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Manson.
- [4] fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Vapeur.
- [5] www.robert-stirling.com
- [6] www.Tpe moteur de stirling.com
- [7] www.chimix.com/moteur.htm
- [8] www.naturestirling power.com
- [9] www.moteur stirling.com
- [10] www.fr.boehm-stirling.com
- [11] www.cycle de strling.com