

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

**UNIVERSITE d'ADRAR**  
**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT D'AGRICULTURE SAHARIENNE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en vue de l'obtention du diplôme de**  
**MASTER en PHYSIQUE ENERGETIQUE**

**THEME**

**Le Moteur Stirling et ses Applications**

(Application : la transformation d'un compresseur d'air en un moteur Stirling).

Soutenu le : 13/12/2012

**Présenté par :**

BEKRAOUI Amina

CHABANI Asma

**Membres de jury :**

**Président :**

Dr M. HAMOUDA (M.C.A) Univ.d'ADRAR

**Encadré par :**

Dr M.ABDELLAOUI (M.C.B) Univ.d'ADRAR

**Examineurs**

Mr F. BOUSSEM Univ.d'ADRAR

Mr M. GHUNFOUD Univ.d'ADRAR



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciements

*Ce travail est le fruit d'une année passée au sein de la faculté des Sciences et de la technologie. Ce travail n'aurait pas abouti sans la contribution et l'encouragement de plusieurs personnes, je tiens à les remercier.*

*Nous tenons en tout premier lieu à témoigner mon profond respect à Monsieur HAMOUDA Messaoud pour avoir présidé le jury.*

*Nous remercions également Monsieur ABDELAOUI Moustapha pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de rapporter ce travail et pour avoir partagé ses connaissances.*

*Nous exprimons toutes nos gratitudees à Monsieur GUNFOUD Mohamed pour sa participation au jury.*

*Nous exprimons nos sincères et respectueux remerciements à Monsieur BOUSSEM Fayçal pour sa participation au jury.*

*Nos sincères remerciements vont à Monsieur GHOU MRI Abdelhafid pour ses conseils, ses idées et sa collaboration lors de la réalisation pratique.*

*Enfin, un grand merci à tous ceux qui n'ont moralement ou pratiquement soutenue et dont ces lignes les oublié accidentellement.*

## *Résumé*

---

Le réchauffement climatique entraîne une adaptation du mode de production et de consommation. Les sources d'énergies renouvelables contribuent au rejet de gaz à effets de serre. Dans le monde énergétique actuel, nous assistons au développement des technologies de production d'énergie propre. Ainsi, la conversion thermodynamique de l'énergie solaire ou la valorisation des déchets sont offertes à la recherche sur les "énergies renouvelables".

Pour palier à l'utilisation abondantes de l'énergie par les moteurs et résoudre ce problème, il existe un moteur plus performant, non polluant, adaptable, économiquement fiable, en l'occurrence le moteur à air chaud appelé moteur Stirling. Il possède une particularité intéressante du point de vue écologique, il accepte tous les types de carburants et sa consommation est inférieure de presque la moitié des carburants consommables par les moteurs actuels. Le principe du moteur Stirling est le même qu'une pompe servant à gonfler les pneus du vélo. Le soleil est la meilleure source pouvant faire fonctionner ce type de moteur. Notre étude sur le moteur Stirling a pour but de montrer son fonctionnement et sa cohabitation avec la vie énergétique et écologique, pour le mettre en évidence pour une utilisation éventuelle dans l'industrie locale.

Notre mémoire porte tout d'abord sur l'étude théorique des moteurs thermiques par la présentation des moteurs à air chaud. Ensuite, nous sommes intéressés à s'étaler sur l'étude des différents types de moteur Stirling, et par la suite les applications dans le monde actuel.

A la fin de cette étude, nous avons partagé notre travail entre la réalisation d'une maquette d'un moteur Stirling et la transformation d'un compresseur à moyen piston à un moteur Stirling.

**Mots clés :** Moteur thermique, machine thermique, moteur Stirling, moteur à air chaud, compresseur à air.

## *Table des matières*

Dédicace .....	i
Remerciement.....	ii
Résumé .....	iii
Table des matières .....	v
Liste des figures.....	ix
Liste des abréviations .....	ix
Introduction générale.....	1

### **Chapitre I : Généralité et théorie des moteurs à air chaud et le moteur Stirling**

I.1 introduction.....	5
I.2 Historique .....	5
I.3 Théorie.....	6
I.3.1 La loi de Boyle-Mariotte, la loi d'Avogadro.....	7
I.3.2 Rappel thermodynamiques .....	8
I.3.2.1 Premier principe de la thermodynamique .....	8
I.3.2.2 Deuxième principe de la thermodynamique.....	8
I.3.3 Le diagramme PV d'un cycle thermodynamique ou diagramme de Clapeyron .....	9
I.3.4 Le rendement d'un cycle thermodynamique .....	10
I.4 Les cycles thermodynamiques.....	10
I.4.1 Cycle de Carnot .....	11
I.4.2 Cycle de Stirling .....	11
I.4.2.1 Bilan énergétique.....	12
I.4.2.2 Bilan Global .....	12
I.5 Les moteurs à air chaud.....	13
I.5.1 Machine thermique .....	13
I.5.2 Moteur à combustion externe .....	14
I.5.3 Le fonctionnement des moteurs a air chaud .....	14

I.5.4 Moteur d'Ericsson.....	15
I.5.4.1 Historique et présentation du moteur Ericsson.....	15
I.5.4.2 Les principes de fonctionnement du moteur Ericsson.....	16
I.5.4.2.a Les quatre phases élémentaires.....	16
I.5.4.2.b Le diagramme Pression-Volume .....	19
I.5.4.3 Avantages du moteur Ericsson .....	19
I.5.4.4 Inconvénients du moteur Ericsson .....	20
I.5.4.5 Applications possibles du moteur Ericsson.....	20
I.5.5 Moteur Manson.....	21
I.5.5.1 Le principe de fonctionnement du moteur Manson.....	21
I.5.5.1.a Les quatre phases élémentaires.....	21
I.5.5.1.b Le diagramme Pression-Volume .....	23
I.5.5.2 Les avantages du moteur de Manson .....	24
I.5.5.3 Les inconvénients du moteur de Manson .....	25
I.5.5.4 Les applications possibles du moteur Manson .....	25
I.6 Moteur de Stirling.....	25
I.6.1 Principe de fonctionnement .....	26
I.6.1.1 Les quatre phases élémentaires .....	26
I.6.2 Le diagramme Pression-Volume et le rendement du cycle .....	30
I.6.2.1 Les variations de volume.....	30
I.6.2.2 Le diagramme (P,V).....	31
I.6.3 Le rendement du cycle.....	31
I.7 Conclusion :.....	34

**Chapitre II :**

**Différents types, applications et évolution du moteur  
Stirling**

II.1 Introduction :.....	35
II.2 Les types des moteurs de Stirling : .....	35
II.2.1 Le moteur alpha : .....	35

II.2.1.1 Les quatre phases élémentaires :	36
II.2.2 Le moteur bêta :	38
II.2.2.1 Les quatre phases élémentaires :	39
II.2.3 Le moteur gamma :	41
II.2.3.1 Les quatre phases élémentaires :	42
II.3 Autre moteur :	44
II.3.1 Le moteur à piston libre dit Martini :	45
II.3.1.1 Structure du moteur Stirling à piston libre:	46
II.3.1.2 Principe de moteur Stirling à piston libre :	46
II.3.2 Le moteur à déplaceur libre ou Ringbom :	47
II.3.3 Le moteur à piston et déplaceur libres (free piston Stirling engine) :	47
II.3.4 Le moteur à double effet :	48
II.3.5 Le moteur rotatif ou moteur quasiturbine:	49
II.3.6 Le générateur thermodynamique :	50
II.3.7. Le fluïdine ou moteur à piston liquide :	51
II.3.7.2 Les avantages et les inconvénients de ce moteur :	52
II.4 Applications des machines de Stirling	53
II.4.1 L'énergie solaire et le moteur Stirling :	53
II.4.1.1 Les réflecteurs paraboloidaux plus communément appelés paraboles:..	55
II.4.1.2 Les réalisations actuelles ou en projet :	55
II.4.1.3 Le système d'énergie de Stirling "Stirling Energy Systems" (SES): ....	56
II.4.1.3.a Le principe de fonctionnement :	57
II.4.2 Le moteur Stirling et la cogénération :	58
II.4.2.1 La cogénération :	58
II.4.2.2 La Micro-cogénération	59
II.4.2.3 Intérêt de la cogénération :	59
II.4.2.4 Micro-cogénération par moteur Stirling :	60
II.4.2.5 Le moteur Stirling et la cogénération :	62
II.4.2.6 Moteur de Stirling et la réfrigération :	62
II.4.3 Motorisation et moteur Stirling :	64
II.4.3.1 Sur terre : l'automobile	65
II.4.3.2 Sur mer : les sous-marins et les bateaux.....	66
II.4.3.3 Dans les airs : les avions.....	68
II.4.4 Pompage d'eau :	69
II.4.5 Autre application :	70



II.4.5.1 domaine de l'informatique : .....	70
II.4.5.2 Domaine spatial : .....	72
II.5 Avantages et inconvénients : .....	73
II.5.1 les Avantages : .....	73
II.5.2 Inconvénients : .....	74
II.6 Évolution du moteur de Stirling .....	75
II.7 Conclusion.....	77

**Chapitre III :**  
**La partie pratique**

III.1 Introduction .....	79
III.2 Partie A.....	79
III.3 Application de générateur de moteur Stirling.....	85
III.3.1 La partie thermique et mécanique.....	86
III.3.1.1 Le fonctionnement de la partie mécanique.....	89
III.3.1.2 La partie électronique.....	90
III.3.2 Conclusion.....	93
III.4 Partie B.....	93
III.4.1 Conclusion .....	99
Conclusion générale.....	101

Bibliographie

# Liste des figures

Figure I-1 : le premier moteur de Stirling [6].	6
Figure I-2 : diagramme PV d'un cycle thermodynamique [2].	9
Figure I-3 : Le travail résultant au cours d'un cycle [2].	9
Figure I-4 : Diagramme indicateur d'un moteur STIRLING théorique [3].	12
Figure I-5 : structure générale d'une machine thermique [11].	14
Figure I-6 : Premier moteur d'Ericsson, 1833 [3].	16
Figure I-7 : aspiration d'air frais et une évacuation d'air chaud [12].	17
Figure I-8 : compression de l'air frais [12].	18
Figure I-9 : la phase de remplissage [12].	18
Figure I-10 : diagramme PV de moteur d'Ericsson [12].	19
Figure I-11 : l'aspiration d'air [13].	22
Figure I-12 : le chauffage [13].	22
Figure I-13 : échappement à l'atmosphère [13].	23
Figure I-14 : le refroidissement [13].	23
Figure I-15 : diagramme PV du moteur de Manson [13].	24
Figure I-16 : le chauffage isochore [2].	27
Figure I-17 : la détente isotherme [2].	27
Figure I-18 : le refroidissement isochore [2].	28
Figure I-19 : la compression isotherme [2].	28
Figure I-20 : le chauffage isochore [2].	29
Figure I-21 : Détente isotherme [2].	29
Figure I-22 : le Refroidissement isochore [2].	30
Figure I-23 : la Compression isotherme [2].	30
Figure I-24 : schéma représentative de variation de volume [2].	30
Figure I-25 : les quatre phases de cycle de Stirling [2].	31
Figure I-26 : le rendement de cycle [2].	31

<i>Figure II-1: Coupe d'un moteur Stirling de type alpha [2].....</i>	<i>36</i>
<i>Figure II-2 : la phase de chauffage de moteur alpha [2]. .....</i>	<i>36</i>
<i>Figure II-3 : la phase de détente de moteur alpha [2].....</i>	<i>37</i>
<i>Figure II-4 : la phase d refroidissement de moteur alpha [2]. .....</i>	<i>37</i>
<i>Figure II-5 : la phase de compression du moteur alpha [2].....</i>	<i>38</i>
<i>Figure II-6 : moteur beta [7]. .....</i>	<i>39</i>
<i>Figure II-7 : Coupe d'un moteur Stirling de type bêta [6].....</i>	<i>39</i>
<i>Figure II-8 : la phase de chauffage de moteur beta [6].....</i>	<i>39</i>
<i>Figure II-9 : la phase de détente de moteur beta [6].....</i>	<i>40</i>
<i>Figure II-10 : la phase de refroidissement de moteur beta [6].....</i>	<i>40</i>
<i>Figure II-11 : la phase de compression de moteur beta [6]. .....</i>	<i>41</i>
<i>Figure II-12 : moteur Stirling de type gamma [17]. .....</i>	<i>41</i>
<i>Figure II-13: Coupe d'un moteur Stirling de type gamma [2].....</i>	<i>42</i>
<i>Figure II-14 : la phase de chauffage de moteur gamma [2].....</i>	<i>42</i>
<i>Figure II-15 : la phase de détente d moteur gamma [2].....</i>	<i>43</i>
<i>Figure II-16 : la phase de refroidissement de moteur gamma [2].....</i>	<i>43</i>
<i>Figure II-17 : la phase de compression de moteur gamma [2]. .....</i>	<i>44</i>
<i>Figure II-18 : comparaison entre le moteur gamma et moteur à piston libre [2]. .....</i>	<i>45</i>
<i>Figure II-19 : prototype d'un type moteur à piston libre [18].....</i>	<i>45</i>
<i>Figure II-20 : principe du moteur à piston libre [18].....</i>	<i>46</i>
<i>Figure II-21 : moteur gamma et moteur type Ringbom [2]. .....</i>	<i>47</i>
<i>Figure II-22 : le moteur Stirling de piston et de déplaceur libre [4].....</i>	<i>48</i>
<i>Figure II-23 : le moteur Stirling à double effet [17].....</i>	<i>49</i>
<i>Figure II-24 : Le moteur rotatif [4]. .....</i>	<i>50</i>
<i>Figure II-25 : le générateur thermomécanique [2].....</i>	<i>51</i>
<i>Figure II-26 : le moteur à piston liquide ou le fluydine [2].....</i>	<i>51</i>
<i>Figure II-27: le schéma de base de moteur à piston liquide [21].....</i>	<i>52</i>
<i>Figure II-28 : le carré représente la Sahara algérienne [2].....</i>	<i>54</i>
<i>Figure II-29 : le réflecteur parabolique [2].....</i>	<i>55</i>
<i>Figure II-30 : les paraboles d'une centrale solaire [2].....</i>	<i>56</i>
<i>Figure II-31 : Composants du moteur Stirling SES [25].....</i>	<i>57</i>

<i>Figure II-32: sun catcher SES [25].....</i>	<i>57</i>
<i>Figure II-33 : exemple de la production de l'électricité et la chaleur sans cogénération [29].....</i>	<i>59</i>
<i>Figure II-34: la production de l'électricité et la chaleur avec cogénération [29]. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figure II-35 : le système de micro-cogénération fondé sur un moteur Stirling [26].....</i>	<i>61</i>
<i>Figure II-36 : la chaudière Sunmachine [29].....</i>	<i>62</i>
<i>Figure II-37 : l'efficacité de cycle de Stirling par apport aux autres cycles [5]. ....</i>	<i>63</i>
<i>Figure II-38 : les quatre phases du cycle réversible de Stirling [2]. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figure II-39 : une voiture équipée par un moteur Stirling [6]. ....</i>	<i>66</i>
<i>Figure II-40 : la voiture hybride électrique [6]. ....</i>	<i>66</i>
<i>Figure II-41 : le principe de système AIP Stirling [31]. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figure II-42 : un avion équipé par un moteur Stirling [4]. ....</i>	<i>68</i>
<i>Figure II-43 : Schéma de principe d'une pompe Fluidyne [32]. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figure II-44 : le ventilateur de MSI [33]. ....</i>	<i>70</i>
<i>Figure II-45 : Stirling solaire devant le Pentagone en juin 1998 [6]. ....</i>	<i>72</i>
<i>Figure III-1 : la maquette réaliser.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure III-2 : les cylindres avec ses pistons.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure III-3 : le déplaceur.....</i>	<i>82</i>
<i>Figure III-4 : le vilebrequin et la polie.....</i>	<i>83</i>
<i>Figure III-5 : le fonctionnement de Stirling alpha [36].....</i>	<i>84</i>
<i>Figure III-6 : maquette de générateur de moteur Stirling [37].....</i>	<i>85</i>
<i>Figure III-7 : la fabrication de du cylindre [37].....</i>	<i>86</i>
<i>Figure III-8 : la préparation du piston [37].....</i>	<i>87</i>
<i>Figure III-9 : le vilebrequin du moteur [37].....</i>	<i>88</i>
<i>Figure III-10 : le diaphragme [37].....</i>	<i>89</i>
<i>Figure III-11 : le montage de vilebrequin, diaphragme et polie [37].....</i>	<i>90</i>
<i>Figure III-12 : l'alternateur relié avec le moteur Stirling [37].....</i>	<i>91</i>
<i>Figure III-13 : l'application du générateur avec un poste radio [37].....</i>	<i>92</i>
<i>Figure III-14 : le compresseur en phase d'élimination des soupapes.....</i>	<i>94</i>
<i>Figure III-15 : les pistons en mouvement.....</i>	<i>95</i>
<i>Figure III-16 : la phase d'assemblage.....</i>	<i>96</i>
<i>Figure III-17 : Phase d'échauffement.....</i>	<i>97</i>
<i>Figure III-18 : la création de différence de température.....</i>	<i>98</i>

# Liste des abréviations

*P* : Pression

*V* : Volume

*N* : Nombre de molécule-gramme

*R* : Constante des gaz parfaits, constante de Boltzmann ( $R = 8,314\ 472\ \text{J} / \text{K mol}$ )

*T* : Température

*W* : Travail

*Q* : Chaleur

*U* : l'énergie interne

*F* : Force

*S* : Surface du piston

*Dt* : temps court "dt"

*Dy* : déplacement "dy"

*Dv* : variation de volume

$\eta$  : rendement

*W<sub>det</sub>* : Travail détente

*W<sub>comp</sub>* : Travail de compression

*W<sub>net</sub>* : Travail net

*Q<sub>chauf</sub>* : Quantité de chaleur de chauffage

*Q<sub>det</sub>* : Détente

*T<sub>max</sub>* : Température maximale

*T<sub>min</sub>* : Température minimal

*V<sub>max</sub>* : Volume maximal

*V<sub>min</sub>* : Volume minimal

*C<sub>v</sub>* : Chaleur molaire du gaz

**TMG** : Thermo-Mechanical Generator

***kWh*** : kiloWatt

***ZJ*** : Zetta Joules

***CDER*** : Le Centre de Développement des Energies Renouvelables d'Alger

***M*** : Mètre

***SES*** : Systèmes d'Énergie de Stirling

***ECS*** : Eau Chaude Sanitaire

***COP*** : Coefficient de Performance

***SAGA*** : Autonomie Assistance grand sous-marin

***AIP*** : Air-Independent Propulsion

***NASA*** : National Aeronautics and Space Administration

# Introduction générale

L'énergie est une source essentielle de toute sorte de vie. Nous avons besoin de cette source vitale dans notre vie quotidienne. Cette source énergétique provient de la nature comme elle peut prévenir par le biais de découvertes scientifiques.

Le contexte énergétique et environnemental de ce début de XXI<sup>e</sup> siècle est marqué par la question de la pérennité à tous les niveaux : ressources minérales et énergétiques, cadre de vie, santé, biodiversité. Sur le plan énergétique, le déséquilibre entre une production énergétique fondée sur des ressources minérales limitées issues de l'écorce terrestre et une consommation en forte croissance favorisent les tensions de tous ordres (économique, géographique, social etc.). Sur le plan environnemental, les activités humaines exploitent les ressources procurées par la biosphère terrestre et rejettent les résidus de leurs productions sous forme de déchets dans cette même biosphère. Le fort accroissement de ces activités induit, à plus ou moins long terme, des impacts conséquents, à toutes les échelles (locale, régionale, globale).

Fournir de l'énergie propre en quantité suffisante et à un bon prix, constitue de nos jours un impératif majeur pour le développement de toute nation. Réduire en plus sa dépendance énergétique vis-à-vis de l'extérieur, constitue un défi que doit relever les pays en voie de développement, pauvres en ressources fossiles, pour alléger la facture énergétique qui pèse lourdement sur leur économie. En effet, l'augmentation de la demande en énergie, la détérioration accélérée de l'environnement liée aux résidus des ressources énergétiques utilisées, et l'épuisement incontournable de ces ressources, posent de sérieux problèmes à l'échelle globale. L'impact socioéconomique de ces problèmes ne peut que s'intensifier à court et moyen terme. Pour résoudre ces problèmes, des alternatives innovatrices dans le secteur de l'énergie sont indispensables. Des nouvelles perspectives comme le solaire ou la valorisation des déchets sont offertes à la recherche sur les "énergies renouvelables".

Pour résoudre ce problème majeur, il est indispensable d'avoir une énergie en abondance de qualité propre et protectrice de l'environnement. Il faudrait trouver des solutions fiable et durable qui collaborant à réduire une partie de phénomène industriel polluant.

Dans le cadre de ce mémoire nous allons étudier les différentes sortes de moteurs pouvant transformer l'énergie thermique en énergie mécanique et mettre en évidence la possibilité d'utilisation de ces moteurs à l'échelle industrielle. Pour cela notre mémoire est répartie en trois chapitres : Le premier chapitre décrit des généralités et théorie des moteurs à



air chaud et le moteur Stirling. Le deuxième chapitre étudie et démontre les différents types d'application et évolution du moteur Stirling. Le dernier Chapitre exposera la partie pratique d'étude.

## Chapitre I :

Généralité et théorie des  
moteurs à air chaud et le  
moteur Stirling

## I.1 introduction

Les moteurs thermiques sont des dispositifs permettant de produire du travail mécanique à partir de la chaleur. Ces machines sont à la source de la révolution industrielle du XIX<sup>e</sup> siècle, ce sont elles qui ont permis l'essor de l'industrie avec d'abord les machines à vapeur, puis, à partir du XX<sup>e</sup> siècle, les moteurs à explosion. L'enjeu colossal de ces machines a donné naissance à la branche de la physique connu sous le nom de thermodynamique. L'un de ses buts fondamentaux est de trouver et comprendre les quelques principes de bases utiles pour décrire le fonctionnement des machines thermiques, puis d'utiliser ce savoir pour améliorer et optimiser les machines réelles. De par les problèmes énergétiques actuels, la thermodynamique demeure une discipline aux enjeux cruciaux [1].

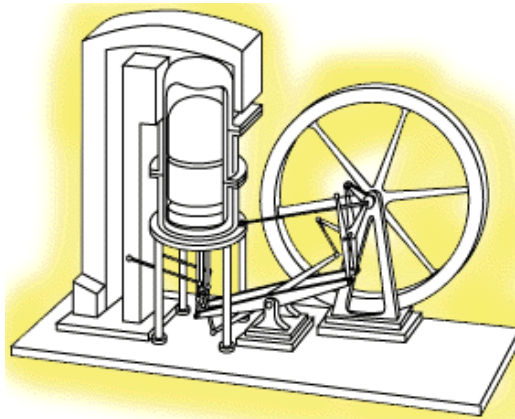
## I.2 Historique

Le moteur Stirling, objet de ce mémoire, a été inventé au début de dix-neuvième siècle. Au cours de ces années, on assista à une réelle révolution des sciences et technique. Les inventions et découvertes de cette époque sont nombreuses et couvrent bien des domaines [2]. Le XIX<sup>e</sup> siècle a donné lieu à de nombreuses découvertes scientifiques et techniques. C'est peut-être toute cette activité qui a poussé le Pasteur Robert Stirling à inventer le " moteur à air chaud " dont le brevet fut déposé en 1816 [3].

Robert Stirling est né en 1790 à Gloag dans le comté de Perthshire. Il était un pasteur, mécanicien et métallurgiste écossais.

Robert Stirling décida de construire un moteur sans chaudière, car à l'époque les accidents avec les machines à vapeur étaient fréquents. Il s'est avéré que son moteur était moins dangereux et surtout plus performant que les moteurs de l'époque. Historiquement, ce moteur fut construit avant que les lois relatives au second principe de la thermodynamique n'aient été formulées (avant le cycle de Carnot). Toutefois le moteur n'eut pas le succès espéré, car le moteur à explosion fit son apparition et s'imposa largement, et la découverte de Stirling fut oubliée. Il fallut attendre 1938 pour que la société Philips investisse dans le projet, qui prit ensuite le nom de : « moteur de Stirling » ; à cette époque une application majeure fut développée dans l'automobile avec un moteur de 200 chevaux et un rendement supérieur à 30 % vit le jour [5].

En parallèle, Robert Stirling eu l'idée d'un régénérateur de chaleur permettant d'améliorer le rendement global de l'installation. C'est son frère James qui industrialisa ce moteur en 1843 pour une utilisation dans l'usine où il était ingénieur.



*Figure I-1: le premier moteur de Stirling [6].*

Cette invention fut beaucoup utilisée dans les fermes et les industries jusqu'en 1922, par exemple pour pomper de l'eau ou entraîner des machines. Mais, dès le début du XXe siècle, ce moteur eut beaucoup de mal à s'imposer face à la concurrence nouvelle des moteurs à combustion interne et des moteurs électriques. Durant la seconde moitié du XXe siècle, différents moteurs, fortement pressurisés, et utilisant soit de l'hélium, soit de l'hydrogène, ont été conçus et réalisés.

Certains de ces moteurs ont des rendements globaux remarquables, en comparaison des moteurs à combustion interne de puissance comparable. Pour différentes raisons qu'il n'est pas opportun de développer ici, les moteurs Stirling ne connaissent pas encore d'industrialisation à grande échelle à l'heure actuelle. Robert Stirling n'a pas la renommée qu'il mérite. Peut-être qu'avec les problèmes d'énergie et d'écologie, on assistera au développement de ce type de moteur et à la réparation de l'injustice subie par cet inventeur [3].

### **I.3 Théorie**

On peut dater les premiers développements de la thermodynamique des travaux de Carnot (1824) sur les machines thermiques, qui ont conduit par la suite aux énoncés des deux principes fondamentaux. La thermodynamique est donc dès le début l'expression de la confluence entre deux disciplines jusque là disjointes, à savoir la thermique et la mécanique.

Depuis, les applications de la thermodynamique se sont multipliées, de la mécanique à la chimie et à la biologie, en passant par l'électromagnétisme. Il ne s'agit pas à proprement parler d'une nouvelle science, mais bien plus d'un formalisme unificateur qui traite des transformations de l'énergie, sous toutes ses formes. L'histoire atteste d'ailleurs de cette position transversale : c'est ainsi que le premier principe de la thermodynamique fut énoncé presque simultanément par trois scientifiques, vers 1840 :

- Von Mayer, un médecin qui se fondait sur des observations physiologiques pour justifier de l'équivalence entre travail, chaleur et énergie chimique ;
- Joule, qui montra les équivalences entre énergie électrique et travail mécanique ;
- Carnot, qui avait exploré la transformation de chaleur en travail.

Le second principe de la thermodynamique, que Carnot énonça paradoxalement avant le premier (à une époque où la nature exacte de la chaleur n'était pas encore comprise) traite de l'évolution des systèmes, en introduisant la notion essentielle d'entropie. Sa lecture dans le cadre de la thermodynamique des phénomènes irréversibles en fait l'un des outils essentiels de la compréhension de l'évolution de l'univers et de la nature du temps : il est devenu l'une des bases de la réflexion philosophique moderne.

La conjonction des deux principes permet de définir de façon très rigoureuse des conditions d'équilibre d'un système, c'est à dire l'état vers lequel il évoluera en fonction des conditions extérieures qui lui sont imposées. La thermodynamique de l'équilibre est une discipline essentielle et a des applications dans tous les domaines industriels : toute installation industrielle produit ou consomme de l'énergie, et est le siège de phénomènes physico-chimiques qui évoluent vers un état d'équilibre qui peut être prédit par la thermodynamique [4,7].

### **I.3.1 La loi de Boyle-Mariotte, la loi d'Avogadro**

Pour comprendre le principe du fonctionnement d'un moteur, il est nécessaire de connaître peu de choses. On considère que le gaz utilisé (air, hydrogène, hélium, azote..) est un gaz "parfait", c'est à dire qu'il obéit à la loi, dite de Boyle-Mariotte suivante : pour une masse de gaz donnée et à température constante, le produit de la pression du gaz par son volume reste constant. On peut écrire cette loi de la façon suivante :

$$(p \cdot v = \text{constante}) \dots \dots \dots (I.1)$$

Où P représente la pression du gaz et V son volume.

Cette loi devient la loi d'Avogadro, si on introduit maintenant la température du gaz :

$$p \cdot v = n \cdot R \cdot T \dots \dots \dots (I.2)$$

Où P représente la pression du gaz, V son volume, n le nombre de molécule-gramme (ou la quantité de gaz), R la constante des gaz parfaits ( $R = 8,314\ 472\ \text{J} / \text{K mol}$ ) et T la température du gaz (exprimée en Kelvin :  $T = t + 273$ , si t est la température exprimée en degré Celsius).

### I.3.2 Rappel sur la thermodynamique

#### I.3.2.1 Premier principe de la thermodynamique

Le premier principe est une loi de conservation de l'énergie appliquée aux phénomènes thermiques. L'énergie interne d'un système peut être modifiée au cours d'une transformation par échange de travail et de chaleur :

$$\Delta U = W + Q \dots \dots \dots (I.3)$$

Le travail W et la chaleur Q sont des quantités d'énergie transférées ; elles n'ont de sens que pendant la transformation, alors que l'énergie interne U est une fonction d'état mesurant le contenu en énergie du système [8].

#### I.3.2.2 Deuxième principe de la thermodynamique

L'étude de la transformation de la chaleur en travail au moyen d'une machine idéale (sans frottement) opérant en cycle fermé périodique est à la base du deuxième principe de la thermodynamique. Il en existe plusieurs énoncés, par exemple :

- Il est impossible de transformer intégralement en travail, au moyen d'une machine à fonctionnement périodique, la chaleur échangée avec un seul réservoir de chaleur à température T. Autrement dit, pour produire du travail, une machine thermique reçoit de la chaleur d'une source chaude mais doit nécessairement en céder une partie à une source froide.

- Un second énoncé, équivalent au premier, régit le fonctionnement des machines frigorifiques et des pompes à chaleur : on ne peut, au cours d'un cycle, sans dépense de travail, faire passer de la chaleur d'une source froide à une source chaude [8].

### I.3.3 Le diagramme PV d'un cycle thermodynamique ou diagramme de Clapeyron

Selon le bon vieux principe "rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme" on peut aborder les échanges d'énergie au cours d'un cycle par exemple : toute perte d'énergie calorifique au cours d'un cycle est égale au gain en énergie mécanique au cours de ce même cycle. Maintenant, examinons maintenant un cycle quelconque à partir de son diagramme PV.

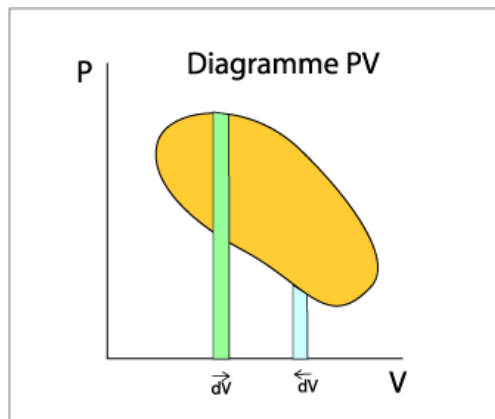


Figure I-2 : diagramme PV d'un cycle thermodynamique [2].

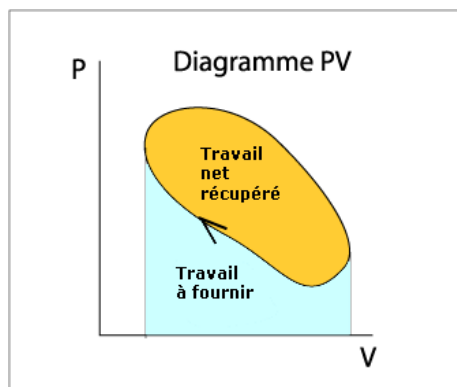


Figure I-3 : Le travail résultant au cours d'un cycle [2].

L'aire colorée à l'intérieur de la courbe décrivant le cycle est représentative du travail recueilli au cours d'un cycle [1]. La démonstration est apportée ci-après. A un instant donné, la force qui s'exerce sur le piston est :

$$F = S.P \dots \dots \dots (I.4)$$

Où S est la surface du piston et P la pression instantanée.

Le travail élémentaire fourni au cours d'un temps court "dt" est égal à la force instantanée multipliée par le déplacement "dy" du piston au cours de ce laps de temps "dt".

$$dW = F.dy \dots \dots \dots (I.5)$$

Ou :

$$dW = S.P.dy \dots \dots \dots (I.6)$$

ou, si on remarque que  $S.dy = dV$ , variation de volume au cours du laps de temps "dt"

donc :  $dW = P.dV \dots \dots \dots (I.7)$

Sur le diagramme (P, V) cette dernière expression n'est rien d'autres que la surface élémentaire située sous la courbe au point considéré.

Le travail résultant au cours d'un cycle complet est donc bien représenté par la surface colorée emprisonnée par la courbe.

### I.3.4 Le rendement d'un cycle thermodynamique

Le rendement est défini comme étant le rapport entre le travail net récupéré au cours du cycle et la quantité de chaleur qu'il a fallu fournir au cours de ce même cycle. L'équation définissant ce rendement est fonction du cycle considéré, de la nature des différentes transformations se produisant au cours de ce cycle.



## **I.4 Les cycles thermodynamiques**

Un cycle thermodynamique est une suite de transformations successives qui part d'un système thermodynamique dans un état donné puis le transforme et le ramène finalement à son état initial, de manière à pouvoir recommencer le cycle. Au cours du cycle, le système voit sa température, sa pression ou d'autres paramètres d'état varier, tandis qu'il échange du travail et réalise un transfert thermique avec l'extérieur [4].

### **I.4.1 Cycle de Carnot**

Le cycle de Carnot est un cycle thermodynamique idéal constitué de quatre processus réversibles : une détente isotherme, une détente adiabatique (donc isentropique car réversible), une compression isotherme, et une compression adiabatique. C'est le cycle le plus efficace pour obtenir du travail à partir de deux sources de chaleur de températures constantes ; le cycle inverse est le moyen le plus efficace de transférer de la chaleur d'une source froide à une source chaude à partir d'une source de travail. L'efficacité des autres cycles et des machines réelles est comparée à celle du cycle de Carnot par le biais du rendement, un nombre sans dimension compris entre 0 (efficacité nulle) et 1 (efficacité parfaite) [4, 8].

On peut montrer les deux théorèmes de Carnot :

1. le rendement d'un cycle de Carnot ne dépend pas de la nature du gaz et n'est fonction que des températures absolues des réservoirs chaud et froid ;
2. la machine de Carnot a le meilleur rendement parmi toutes les machines travaillant entre les mêmes réservoirs de chaleur [8].

### **I.4.2 Cycle de Stirling**

Le cycle de Stirling correspond à un processus cyclique réversible. Ce cycle est constitué de deux isothermes et de deux isochores (Processus à volume constant). Pour obtenir les changements de pression et de température du gaz de transfert ce moteur utilise deux pistons. Un piston déplaceur met alternativement le gaz en contact avec la source froide et avec la source chaude. Le piston de travail est déplacé par les compressions et détentes du gaz [8, 10].

**Fonctionnement en moteur :**

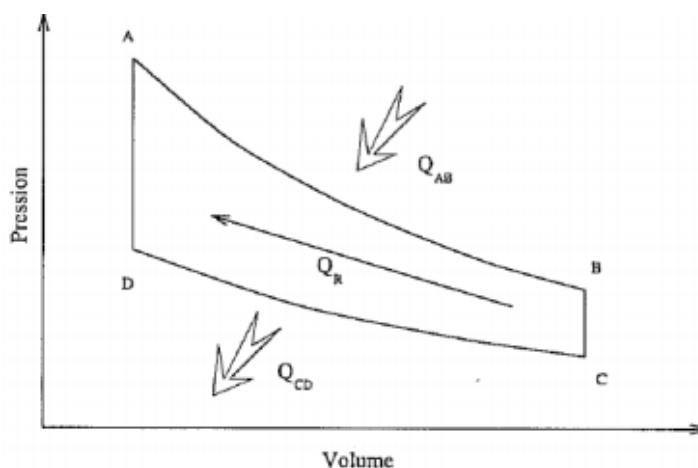
Le cycle est parcouru dans le sens CDABC.

**Isotherme CD (T = T<sub>c</sub>) :** Le gaz est en contact avec la source froide. Il faut fournir de l'énergie pour comprimer le gaz.

**Isochore DA :** Le gaz est transféré de la source froide vers la source chaude.

**Isotherme AB (T = T<sub>a</sub>) :** Le gaz est en contact avec la source chaude. La détente du gaz fournit une énergie supérieure à celle nécessitée par la compression.

**Isochore BC :** Le gaz est transféré de la source chaude vers la source froide [3].



*Figure I-4 : Diagramme indicateur d'un moteur STIRLING théorique [3].*

**I.4.2.1 Bilan énergétique**

On suppose que le cycle est réversible et que le gaz de transfert est parfait. On pose N le nombre de particules du gaz et R la constante de Boltzmann. L'équation d'état du gaz est :

$$PV = NRT \dots \dots \dots (I.8)$$

Compression isotherme CD : T est constante donc  $dU = 0$  et  $dW = p \times dV \dots \dots \dots (I.9)$

Par intégration, on tire  $W_{cd} = NRT_c \times \ln\left(\frac{V_d}{V_c}\right) = -NRT_c \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right) \dots \dots \dots (I.10)$

Réchauffement isochore DA :  $V = cst$  donc

$$W_{da} = 0 \dots\dots\dots (I.11)$$

Dilatation isotherme AB : T est constante donc  $dU = 0$  et  $dW = p \times dV \dots\dots\dots (I.12)$

Par intégration, on tire  $W_{ab} = NRT_c \times \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right) \dots\dots\dots (I.13)$

Refroidissement isochore BC :  $V = cst$  donc  $W_{bc} = 0 \dots\dots\dots (I.14)$

**I.4.2.2 Bilan Global**

Energie interne :  $\Delta U = 0$  (Processus cyclique réversible)

Travail :  $W = W_{ab} + W_{bc} + W_{cd} + W_{da} = NR(T_a - T_c) \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right) > 0$  C'est un cycle moteur.

Rendement :  $\eta = 1 - \frac{T_c}{T_a} \dots\dots\dots (I.15)$

En parcourant le cycle dans l'autre sens, le système fonctionne en pompe à chaleur (fourniture de chaleur à la source chaude) ou en réfrigérateur (extraction de chaleur à la source froide) [10].

**I.5 Les moteurs à air chaud**

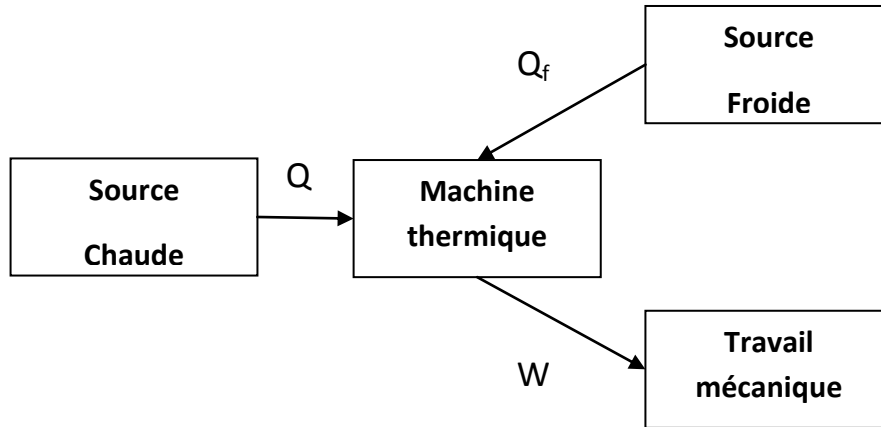
**I.5.1 Machine thermique**

Une machine thermique est un dispositif permettant au milieu extérieur d'agir sur un gaz qui décrit un cycle. La machine thermique la plus simple fonctionne entre deux réservoirs de chaleur à des températures différentes. Pendant un cycle, le système subit une suite de transformations qui le ramène à son état initial. L'énergie interne étant une fonction d'état, sa variation est nulle au cours d'un cycle et par le premier principe, on a:

$$Q = -W \dots\dots\dots (I.16)$$

La chaleur échangée est donc égale au travail échangé. Dans un diagramme de Clapeyron, l'aire limitée par l'intérieur du cycle représente le travail échangé par la machine thermique. Si le cycle est effectué dans le sens des aiguilles d'une montre, le système fournit du travail à l'extérieur et reçoit de la chaleur. La machine thermique fonctionne alors comme un moteur thermique. Inversement, si le cycle est effectué dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, le système reçoit du travail et utilise ce travail pour faire passer la chaleur du réservoir de chaleur à basse température au réservoir de chaleur à haute température. On parle

alors de machine frigorifique ou de pompe à chaleur selon l'usage de la machine thermique [8].



*Figure I-5 : structure générale d'une machine thermique [11].*

### I.5.2 Moteur à combustion externe

Le moteur à énergie externe ou moteur à combustion externe est une machine thermique où l'énergie est fournie par deux sources de température externes (une chaude et une froide) est convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur subissant un cycle thermodynamique fermé. Aucune combustion n'a lieu à l'intérieur du moteur et le fluide demeure confiné dans le moteur. Le chauffage peut se faire aussi sans combustion; soleil, moteur thermique ou centrale nucléaire [4].

Ces moteurs sont aussi connus sous le nom de « moteurs à air chaud » car historiquement ils utilisaient l'air comme fluide de travail. Aujourd'hui, d'autres fluides sont plus largement utilisés comme l'hydrogène, l'hélium ou l'azote, ce qui fait que l'expression « moteur à air chaud » tend à disparaître. Dans les années 1970, ces moteurs affichaient une consommation inférieure, aux moteurs thermiques classiques, pour la même puissance, ce qui en fait une bonne solution du point de vue énergétique, mais ce type de moteur ne fut pas exploité industriellement. Ces moteurs à combustion externe sont :

- Moteur Ericsson ;
- Moteur de Manson ;
- Moteur Stirling [2,4].

### **I.5.3 Le fonctionnement des moteurs à air chaud**

Un moteur à air chaud est une machine thermique qui utilise l'expansion et la contraction de l'air sous l'influence d'une variation de température pour convertir l'énergie thermique en travail mécanique. Ces moteurs peuvent être fondés sur un certain nombre de cycles thermodynamiques englobant les deux appareils à cycle ouvert, comme ceux de John Ericsson et le moteur à cycle fermé de Robert Stirling. Dans une mise en œuvre type, l'air est chauffé et refroidi plusieurs fois dans un cylindre et d'expansion et de contraction est utilisé pour déplacer un piston et produire un travail mécanique [2,4].

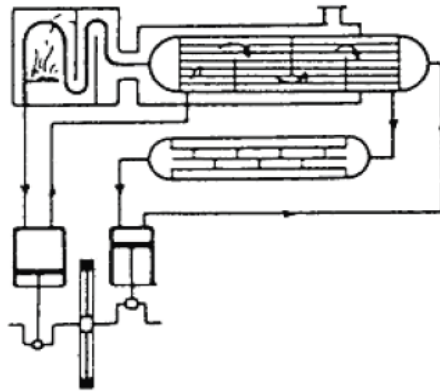
### **I.5.4 Moteur d'Ericsson**

#### **I.5.4.1 Historique et présentation du moteur 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 [4].

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 inventé, est Archimède ! Et ce, quelques deux mille ans auparavant. En 1851, il déposa un nouveau brevet de moteur à air chaud. C'est le moteur Ericsson étudié en utilisant le cycle thermodynamique du même nom. Ce moteur équipa le bateau *Ericsson*. John Ericsson mourut le 8 mars 1889 [3,4].



*Figure I-6 : Premier moteur d'Ericsson, 1833 [3].*

#### **I.5.4.2 Les principes de fonctionnement du moteur Ericsson**

Dans sa description la plus simple, le moteur Ericsson est constitué d'un premier cylindre où est comprimé l'air et d'un deuxième cylindre moteur où l'air est dilaté par chauffage.

Cette partie propose de découvrir le principe de fonctionnement de ce moteur. Ceci se fait progressivement en étudiant les étapes suivantes :

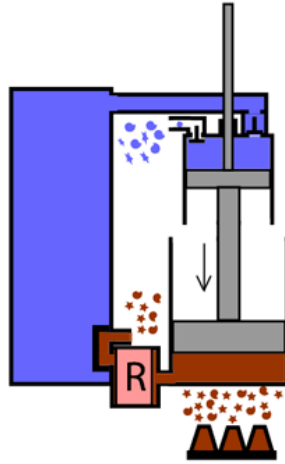
- les quatre phases élémentaires ;
- le diagramme Pression-Volume

le gaz utilisé, l'air, est renouvelé au cours des différentes phases de fonctionnement. C'est un moteur "ouvert" [2].

##### **I.5.4.2.a Les quatre phases élémentaires**

Le cycle thermodynamique du moteur Ericsson est dans son principe très simple : il comprend deux mouvements pendant lesquels se produisent quatre phases. Le gaz utilisé subit les transformations suivantes :

- Premier mouvement : une aspiration d'air frais et une évacuation d'air chaud.



*Figure I-7 : aspiration d'air frais et une évacuation d'air chaud [12].*

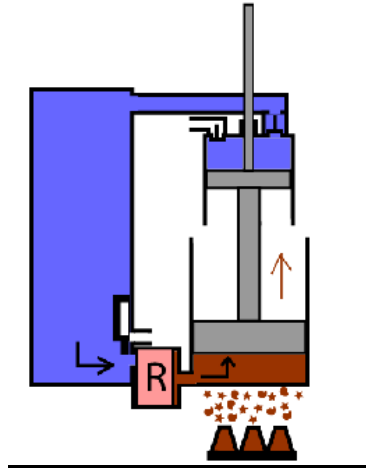
Comme on peut le voir ci-dessous, de l'air rentre dans le cylindre supérieur qui est mis en dépression par le mouvement du piston se déplaçant vers le bas. Le clapet de gauche est ouvert alors que celui de droite est fermé.

La pression à l'intérieur du cylindre supérieur est égale à la pression atmosphérique.

**Première phase** : pendant cette même descente de piston, l'air chaud contenu dans le cylindre inférieur est évacué à l'atmosphère car le tiroir met en relation le piston inférieur avec l'extérieur. Au cours de cette phase, l'air est à la pression atmosphérique, sa température devient progressivement celle de l'air extérieur.

- Deuxième mouvement : compression de l'air frais, remplissage du cylindre inférieur puis détente de l'air chaud.

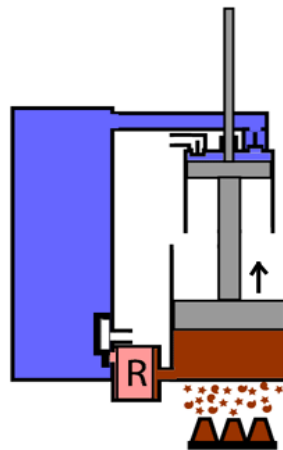
**Deuxième phase** : pendant toute la remontée du piston le gaz frais est mis en pression à température constante. Le clapet de gauche est alors plaqué fermé, le clapet de droite s'ouvre dès que la pression du gaz est égale à celle du réservoir d'air.



*Figure I-8 : compression de l'air frais [12].*

**Troisième phase** : pendant la première partie de la remontée du piston de l'air frais est envoyé dans le cylindre inférieur. Cet air reste à la pression du réservoir d'air mais se met à la température de la source chaude.

On voit que pour que cela se produise ainsi, il a fallu mettre le tiroir en position haute pour que le cylindre inférieur du moteur soit mis en relation avec le réservoir d'air.



*Figure I-9 : la phase de remplissage [12].*

Quand la phase de remplissage est terminée, le tiroir descend légèrement pour obstruer le passage de l'air entre réservoir et piston inférieur.

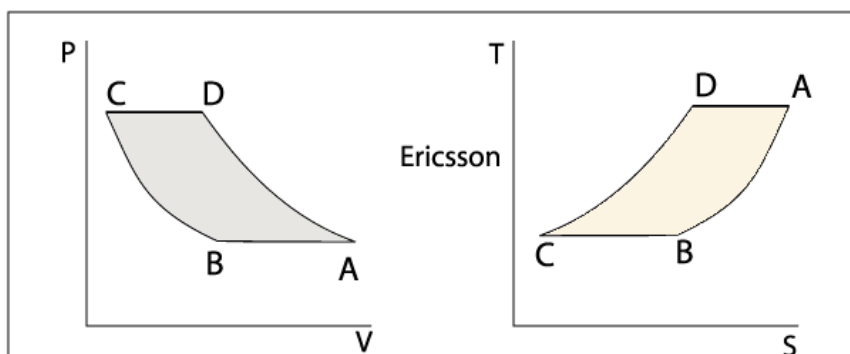
**Quatrième phase** : le piston termine sa course vers le haut, l'air dans le cylindre inférieur se dilate à température constante : celle de la source chaude.



Dans le cylindre supérieur, l'air frais est toujours comprimé à température constante

#### I.5.4.2.b Le diagramme Pression-Volume

On peut tracer un diagramme Pression-Volume représentant le cycle thermodynamique.



*Figure I-10 : diagramme PV de moteur d'Ericsson [12].*

Ce diagramme est présenté ci-dessous avec le diagramme entropique.

Les différentes phases, décrites dans la partie précédent, se retrouvent sur ce diagramme :

- première phase AB : évacuation de l'air chaud vers l'atmosphère ;
- deuxième phase BC : compression de l'air frais à température constante ;
- troisième phase CD : chauffage isobare de l'air ;
- quatrième phase DA : détente à température constante.

Le travail fourni au cours d'un cycle est proportionnel à la surface grise du diagramme PV [2,3].

#### I.5.4.3 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 [12].

#### **I.5.4.4 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 [12].

#### **I.5.4.5 Applications possibles du moteur Ericsson**

- Compte tenu des avantages et inconvénients du moteur Ericsson, on peut faire quelques suppositions quant aux utilisations possibles d'un tel moteur :
  - sa capacité à consommer de l'énergie provenant de sources diverses (bois ou déchets divers tels que résidus de céréales, bouses...) et sa relative rusticité peut permettre d'envisager une utilisation pour produire de l'énergie à faible coût et de façon très indépendante.
  - si on associe la possibilité présentée ci-dessus et le fait que le moteur Ericsson rejette de l'air

chaud, on peut imaginer un fonctionnement en cogénération : énergie motrice et énergie calorifique. Produire par exemple son électricité tout en se chauffant.

- Le problème qu'il ne faut pas se cacher est que le moteur Ericsson est très peu connu, sa notoriété est à construire. De plus, on trouve d'autres moyens plus connus, moins onéreux remplissant ce genre de fonction. La concurrence est sérieuse ! Y compris avec un autre moteur à air chaud : le moteur Stirling qui présente des avantages sérieux par rapport au moteur Ericsson. Et ce n'est pas nouveau; John Ericsson lui même en a fait la dure expérience à son époque. Tous ses brevets devaient contourner ceux déposés par Robert Stirling [12].

### **I.5.5 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.

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 [2,13].

#### **I.5.5.1 Le principe de fonctionnement du moteur Manson**

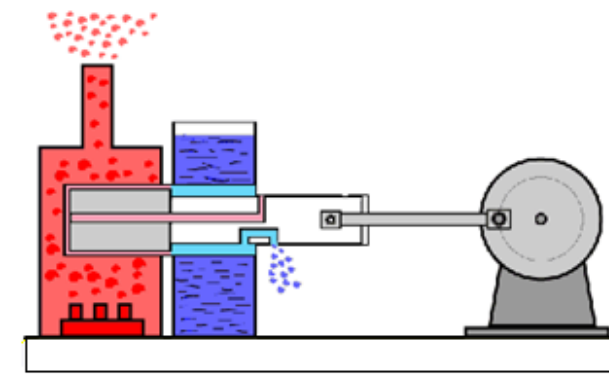
Dans sa description la plus simple, le moteur Manson est constitué d'un cylindre renfermant de l'air et d'un piston récupérant l'énergie mécanique tout en déplaçant le volume d'air du côté chaud vers le côté froid, et vice versa. Le gaz utilisé, l'air, est renouvelé au cours des différentes phases de fonctionnement.

##### **I.5.5.1.a Les quatre phases élémentaires**

Le cycle thermodynamique du moteur Manson est dans son principe très simple : il comprend quatre phases pendant lesquelles le gaz utilisé subit les transformations suivantes :

❖ Une aspiration d'air :

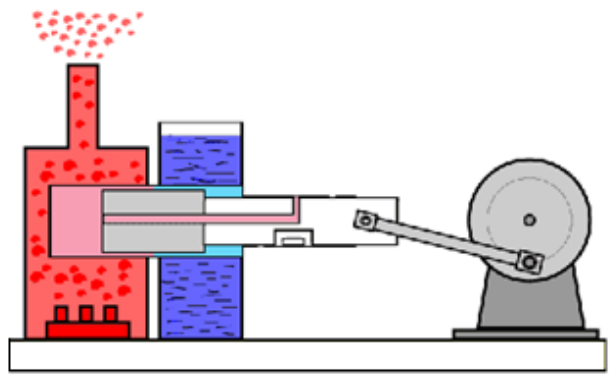
Comme on peut le voir ci-dessous, de l'air rentre dans le cylindre qui est en dépression à ce moment-ci. La pression à l'intérieur du cylindre devient égale à la pression atmosphérique.



*Figure I-11 : l'aspiration d'aire [13].*

❖ Un chauffage :

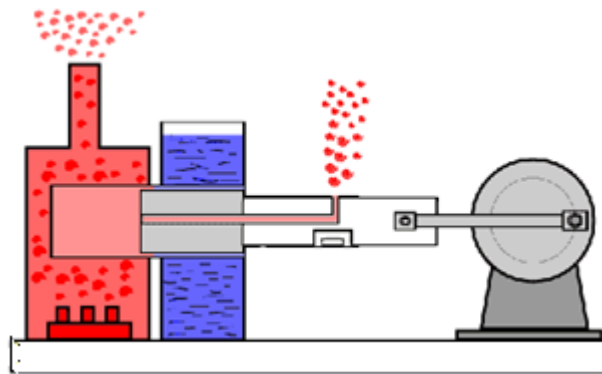
Le piston recule pendant cette phase. Le brûleur (la source chaude) cède de l'énergie thermique. On s'imagine aisément que la pression et la température du gaz augmentent durant cette phase. Pendant cette transformation de l'énergie motrice est produite.



*Figure I-12 : le chauffage [13].*

❖ Un échappement à l'atmosphère :

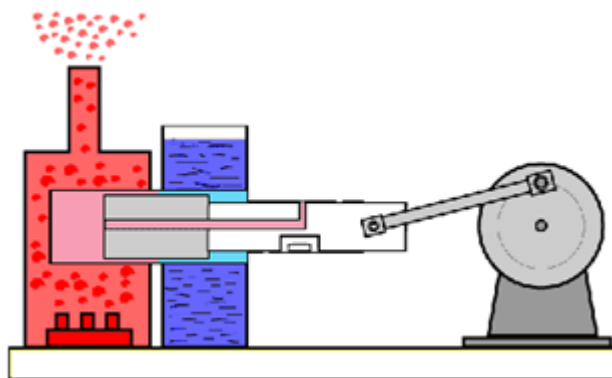
Lorsque le piston est en fin de course arrière, le cylindre du moteur est mis en relation avec l'atmosphère. Du gaz sous pression s'échappe. La pression à l'intérieur du cylindre devient égale à la pression atmosphérique.



*Figure I-13 : échappement à l'atmosphère [13].*

❖ Un refroidissement :

Le piston avance pendant cette phase. La réserve d'eau prend de l'énergie thermique à l'air. On s'imagine aisément que la pression et la température du gaz diminuent durant cette phase. On se retrouve donc à une pression inférieure à la pression atmosphérique. Pendant cette transformation on récupère encore de l'énergie mécanique.

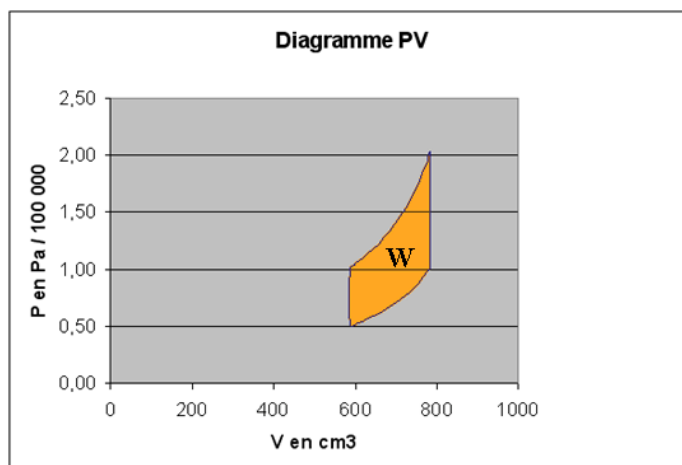


*Figure I-14 : le refroidissement [13].*

### I.5.5.1.b Le diagramme Pression-Volume

On peut tracer un diagramme Pression-Volume représentant le cycle thermodynamique.

Il ne faut surtout pas oublier que la masse du gaz de travail n'est pas la même pendant la phase de chauffage que pendant la phase de refroidissement. Ce diagramme est présenté ci-dessous :



*Figure I-15 : diagramme PV du moteur de Manson [13].*

Avec ce type de moteur, il ne faut probablement pas rechercher la performance des autres moteurs à combustion externe ou interne. Mais il peut être intéressant de l'utiliser pour tirer parti d'une source de chaleur peu onéreuse et non exploitée. Sa conception simple est son principal atout [2,13].

#### **I.5.5.2 Les avantages du moteur de Manson**

- 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 une 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 utilisation très variée du fait de son adaptabilité au besoin et à la nature de sa source chaude [13].

### **I.5.5.3 Les inconvénients du moteur de Manson**

- un rendement médiocre : ce moteur à 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 ;
- un manque de souplesse probable : il faut probablement envisager un fonctionnement à puissance constante pour ce type de moteur [13].

### **I.5.5.4 Les applications possibles du moteur Manson**

Comme on a pu le voir en étudiant les avantages et inconvénients du moteur Manson, celui-ci est relativement facile à concevoir sur un plan thermodynamique et cinématique. Avec quelques astuces sur le plan technologique, ce moteur est aisément réalisable par des personnes disposant de moyens d'usinage élémentaires. Dans certains pays ne disposant pas de source d'énergie locale mais disposant de carburants non utilisés (bois, déchets de céréales...), pourquoi ne pas croire à une utilisation de ce type de moteur pour apporter un soulagement à des populations qui en ont besoin ?

## **I.6 Moteur de Stirling**

Dans sa description la plus simple, le moteur Stirling est constitué d'un cylindre renfermant du gaz et d'un piston récupérant l'énergie mécanique [2]. On se rend vite compte qu'il ne serait pas commode de dilater indéfiniment un gaz emprisonné dans un cylindre fermé par un piston (très long...) pour récupérer de l'énergie mécanique à partir d'énergie calorifique. Il faut donc faire accomplir à ce gaz un cycle : dilatation, contraction, dilatation... [14].

### **I.6.1 Principe de fonctionnement**

Le fonctionnement du moteur repose sur le fait qu'un fluide se détend lorsque sa température augmente, poussant ainsi le piston. Il se contracte dans le cas inverse et le piston revient dans sa position initiale. Dans ce moteur, on chauffe et on refroidit alternativement le gaz (air, hélium, hydrogène) contenu dans le cylindre. Pour fonctionner correctement, un moteur doit réaliser un tel cycle plus de 50 fois par seconde. On peut favoriser le fonctionnement en maintenant une extrémité du moteur (cylindre) à une température élevée constante, tandis que l'autre extrémité reste à une basse température, le gaz devant se déplacer d'un côté à l'autre (source chaude / source froide). La particularité pratique est donc d'utiliser un " déplaceur " en plus du piston qui fournit le travail. Le déplaceur est une pièce mobile qui permet le passage du fluide et qui sépare la source chaude de la source froide. Le cycle comprend quatre étapes :

1. Au départ, le déplaceur se trouve à l'extrémité chaude du cylindre et le piston dans la partie froide. Le gaz, alors dans la partie froide, est donc à sa pression la plus faible. Une légère dépression fait se mouvoir le piston. Celui-ci comprime le gaz.

2. Le déplaceur est mis en mouvement vers le piston et chasse l'air froid dans la partie chaude.

3. L'air est chauffé et sa pression augmente (le volume est constant). La pression de l'air pousse le piston (temps moteur).

4. Le déplaceur redescend à sa position basse et transfère l'air dans la partie froide [2, 14, 15].

L'avantage d'un tel moteur est que les conditions de combustion sont propres. En effet, un même gaz subit les transformations (pas de rejets dans l'atmosphère) et on peut alimenter en continu la source chaude par différents moyens (résistance électrique chauffante, panneaux solaires). Ce moteur pourrait être une alternative très intéressante au moteur à combustion interne, les ressources en pétrole ne pouvant que diminuer dans les décennies à venir [11].

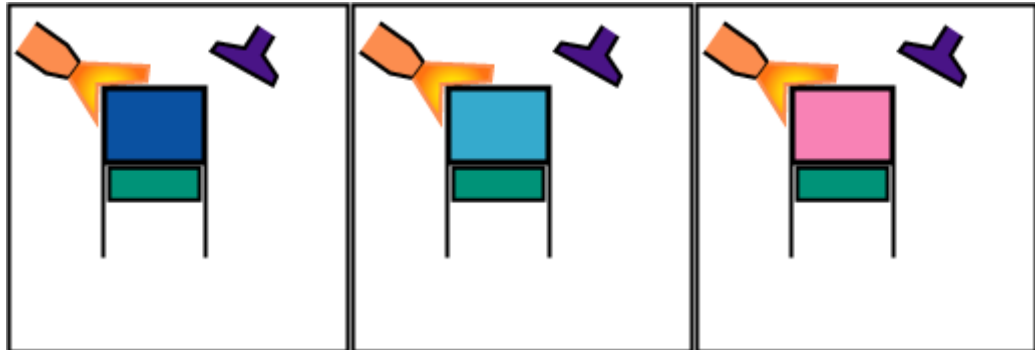
#### **I.6.1.1 Les quatre phases élémentaires**

Le cycle thermodynamique du moteur Stirling est dans son principe très simple : il comprend quatre phases pendant lesquelles le gaz utilisé subit les transformations suivantes :



❖ Un chauffage isochore :

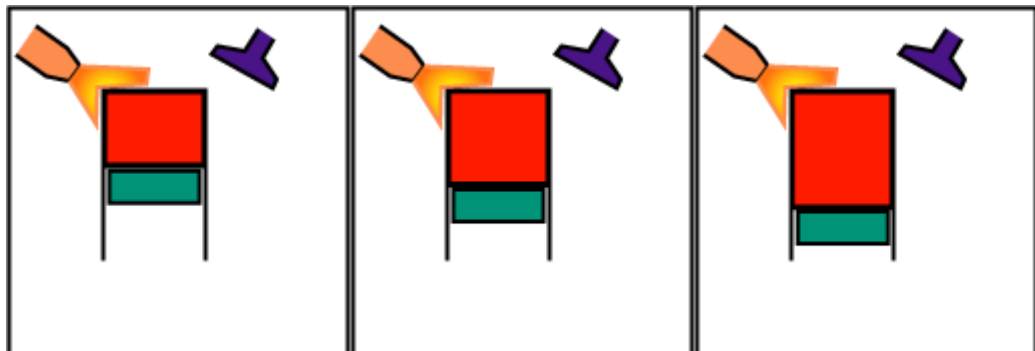
Le brûleur (la source chaude) cède de l'énergie thermique. On s'imagine aisément que la pression et la température du gaz augmentent durant cette phase.



*Figure I-16 : le chauffage isochore [2].*

❖ Une détente isotherme:

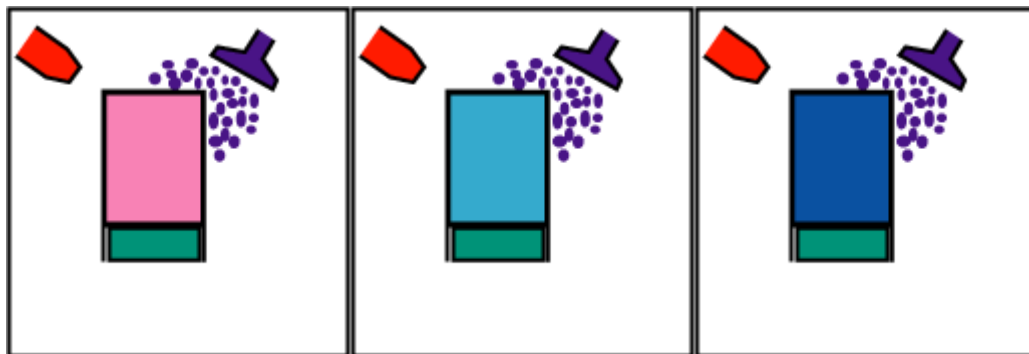
Le volume s'accroît alors que la pression diminue. C'est pendant cette transformation que l'énergie motrice est produite.



*Figure I-17 : la détente isotherme [2].*

❖ Un refroidissement isochore :

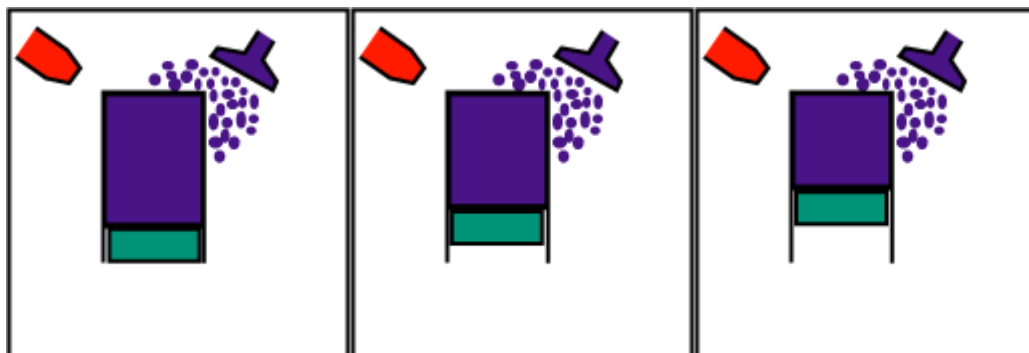
L'eau projetée (la source froide) récupère de l'énergie thermique. La température et la pression diminuent pendant cette phase.



*Figure I-18 : le refroidissement isochore [2].*

❖ Une compression isothermique :

La pression du gaz augmente au fur et à mesure que son volume diminue. On doit fournir de l'énergie mécanique au gaz pendant cette période.



*Figure I-19 : la compression isotherme [2].*

➤ 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 située en partie supérieure, soit vers la source froide située en partie inférieure [2].

❖ Chauffage isochore :

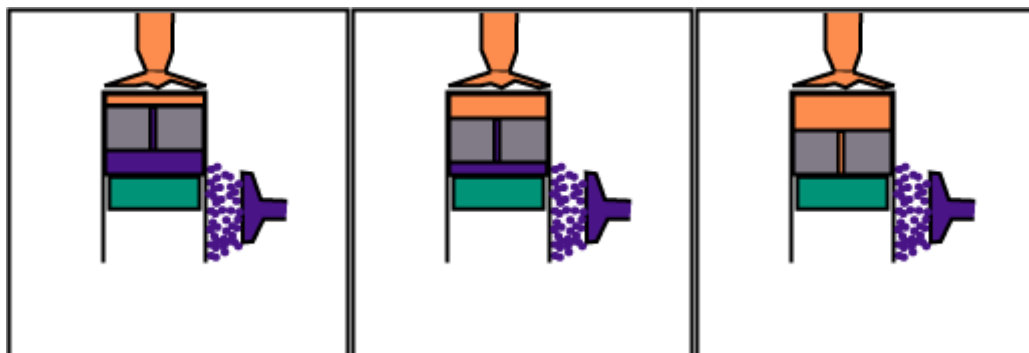


Figure I-20 : le chauffage isochore [2].

Le volume reste constant, mais le déplaceur, en descendant, chasse le gaz de la partie basse (froide) vers la partie haute (chaude).

❖ Détente isotherme :

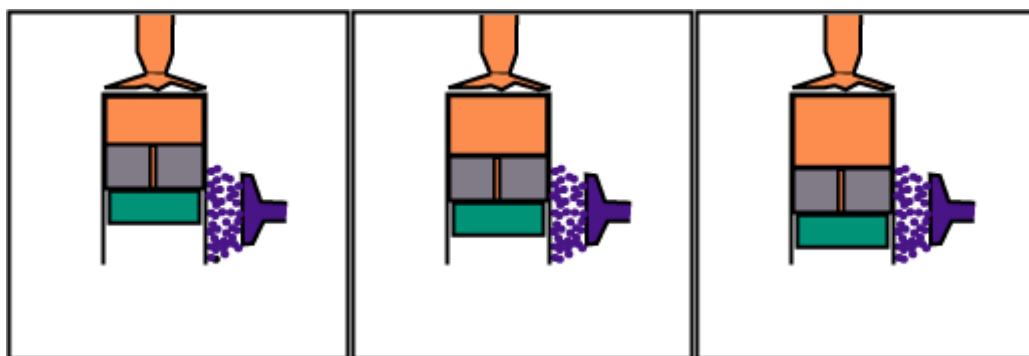


Figure I-21 : Détente isotherme [2].

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

❖ Refroidissement isochore :

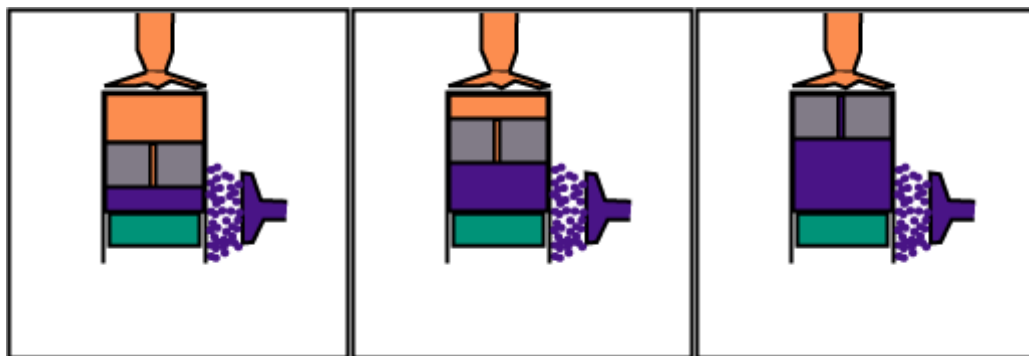


Figure I-22 : le Refroidissement isochore [2].

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

❖ Compression isotherme :

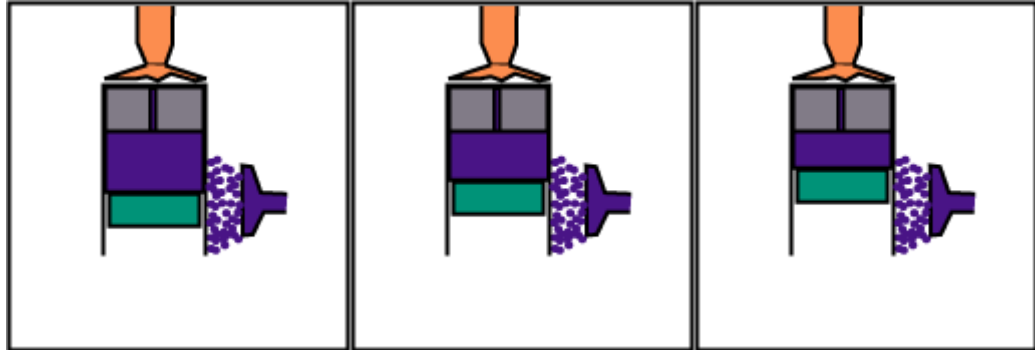


Figure I-23 : la Compression isotherme [2].

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

## I.6.2 Le diagramme Pression-Volume et le rendement du cycle

### I.6.2.1 Les variations de volume

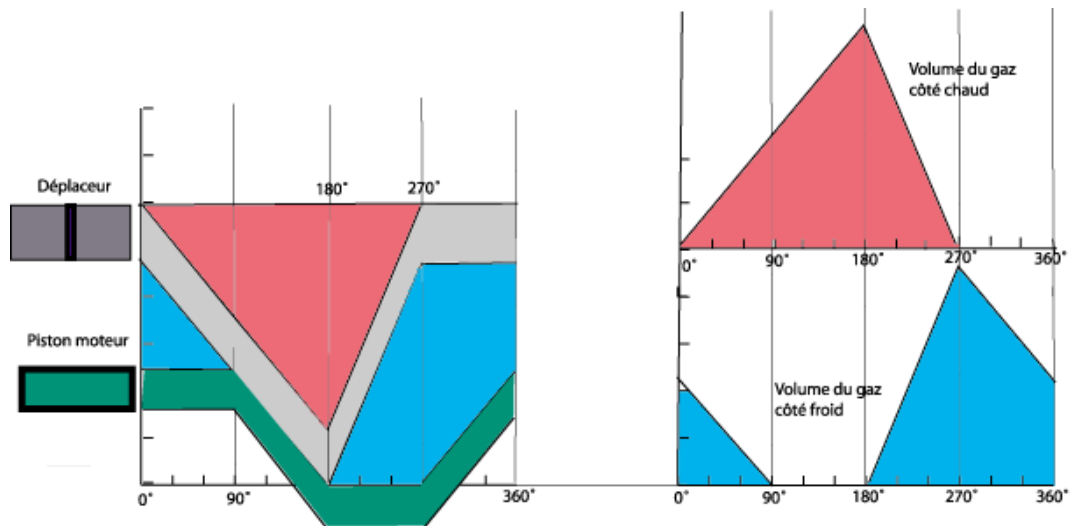


Figure I-24 : schéma représentative de variation de volume [2].

Sur le diagramme ci-dessus, on peut voir :

- la variation du volume chaud en partie haute au cours du cycle (zone rouge).
- la variation du volume froid en partie basse, entre déplaceur et piston moteur, au cours du cycle (zone bleue).

### I.6.2.2 Le diagramme (P,V)

Le principe de fonctionnement, exposé ci-dessus, peut se représenter sur un schéma appelé "diagramme Pression-Volume" ou diagramme (P,V) :

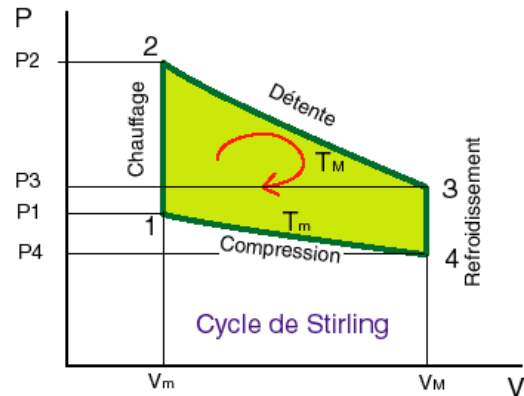


Figure I-25 : les quatre phases de cycle de Stirling [2].

Sur ce diagramme, on voit aisément les quatre phases détaillées plus haut en images, en n'oubliant pas que détente et compression se font à températures constantes ( $T_{\max}$  et  $T_{\min}$ ). NB : les températures  $T$  sont exprimées en Kelvin (rajouter  $273^{\circ}$  à la température Celsius) L'aire colorée comprise entre les quatre segments décrivant le cycle est représentative du travail recueilli au cours d'un cycle.

### I.6.3 Le rendement du cycle

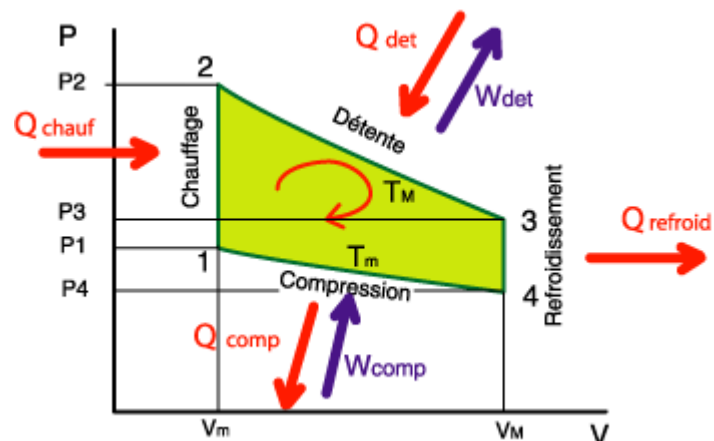


Figure I-26 : le rendement de cycle [2].

Le rendement du moteur est égal au rapport entre l'énergie mécanique nette  $W_{net}$  effectivement récupérée et l'énergie calorifique  $Q_{totale}$  qu'il est nécessaire de fournir au moteur. Cette dernière est fournie au cours du chauffage isochore et au cours de la détente isotherme.

Si on regarde le diagramme ci-contre, on peut écrire :

$$W_{net} = W_{det} + W_{comp} \dots \dots \dots (I.17)$$

Comme il est expliqué ci – dessus,  $W_{comp}$  sera négatif quand on le calculera.

$$Q_{totale} = Q_{chauf} + Q_{det} \dots \dots \dots (I.18)$$

❖ **Travail net récupéré  $W_{net}$  :**

Ce travail  $W_{net}$  est égal à la somme du travail récupéré au cours de la détente (travail positif) et du travail qu'il est nécessaire de fournir au cours de la compression du gaz (travail négatif) :

$$W_{net} = W_{det} + W_{comp} \dots \dots \dots (I.19)$$

$$W_{net} = \int P_{det} dV + \int P_{comp} dV \dots \dots \dots (I.20)$$

Avec  $P = \frac{NRT}{V}$  ce qui donne :

$$W_{net} = \int \left(\frac{NRT_{max}}{V}\right)_{det} dV + \int \left(\frac{NRT_{min}}{V}\right)_{comp} dV \dots \dots \dots (I.21)$$

$$W_{net} = NR(T_{max} - T_{min}) \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} \dots \dots \dots (I.22)$$

❖ Energie calorifique fournie  $Q_{totale}$  :

Au cours d'une détente isotherme, la quantité de chaleur fournie au système est égale au travail récupéré au cours de cette même phase :

$$Q_{dét} = \int P dV_{dét} \dots \dots \dots (I.23)$$

$$Q_{dét} = NRT_{max} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} \dots \dots \dots (I.24)$$

Au cours du chauffage isochore, il a fallu fournir l'énergie suivante :

$$Q_{chauf} = NC_v(T_{max} - T_{min}) \dots \dots \dots (I.25)$$

où  $C_v$  est la chaleur molaire du gaz considéré pour un chauffage, à volume constant, d'une température  $T_{min}$  à une température  $T_{max}$ .

La quantité totale d'énergie calorifique fournie est donc :

$$Q_{totale} = NC_v(T_{max} - T_{min}) + NRT_{max} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} \dots \dots \dots (I.26)$$

**Rendement du cycle :**

On peut donc écrire la valeur du rendement d'un cycle de Stirling par :

$$\eta = \frac{[R(T_{max} - T_{min}) \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}]}{[C_v(T_{max} - T_{min}) + RT_{max} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}]} \dots \dots \dots (I.27)$$

## **I.7 Conclusion :**

De la création de la machine à vapeur jusqu'à nos jours, de nombreux moteurs ont été créés dans le but d'être mieux adaptés aux différents domaines dans lesquels ils sont utilisés. Les diverses modifications peuvent être apportées pour des raisons de masse, de volume, de puissance, de vitesse, de couple. .... L'évolution des moteurs thermiques est due aux inconvénients rencontrés avec les modèles précédents. La machine à vapeur étant peu fiable et de faible rendement, les « moteurs à air chaud » ont été inventés afin de corriger ces défauts. Cependant, ces moteurs étaient coûteux, volumineux et méconnus du grand public en raison de la domination de la machine à vapeur. De plus, ces deux types de moteurs étaient peu pratiques d'utilisation étant donné que la source de température était située à l'extérieur du moteur. Nous pouvons donc constater que l'évolution des moteurs influe dans le domaine de l'industrie, mais également sur le plan de l'économie mondiale et le développement de certains pays.



## Table des matières

I.1 introduction.....	5
I.2 Historique .....	5
.....	6
<b>Figure I-1:</b> le premier moteur de Stirling [6]. .....	6
I.3 Théorie .....	6
I.3.1 La loi de Boyle-Mariotte, la loi d'Avogadro .....	7
I.3.2 Rappel thermodynamiques .....	8
I.3.2.1 Premier principe de la thermodynamique .....	8
I.3.2.2 Deuxième principe de la thermodynamique .....	8
I.3.3 Le diagramme PV d'un cycle thermodynamique ou diagramme de Clapeyron.....	9
<b>Figure I-2 :</b> diagramme PV d'un cycle thermodynamique [2]. .....	9
.....	9
<b>Figure I-3 :</b> Le travail résultant au cours d'un cycle [2]. .....	9
I.3.4 Le rendement d'un cycle thermodynamique .....	10
I.4 Les cycles thermodynamiques .....	11
I.4.1 Cycle de Carnot .....	11
I.4.2 Cycle de Stirling .....	11
<b>Figure I-4 :</b> Diagramme indicateur d'un moteur STIRLING théorique [3]. .....	12
I.4.2.1 Bilan énergétique .....	12
I.4.2.2 Bilan Global .....	13
I.5 Les moteurs à air chaud .....	13
I.5.1 Machine thermique.....	13
<b>Figure I-5 :</b> structure générale d'une machine thermique [11]. .....	14
I.5.2 Moteur à combustion externe .....	14
I.5.3 Le fonctionnement des moteurs à air chaud .....	15
I.5.4 Moteur d'Ericsson .....	15

I.5.4.1 Historique et présentation du moteur Ericsson.....	15
<b>Figure I-6</b> : Premier moteur d'Ericsson, 1833 [3].....	16
I.5.4.2 Les principes de fonctionnement du moteur Ericsson.....	16
I.5.4.2.a Les quatre phases élémentaires.....	16
<b>Figure I-7</b> : aspiration d'air frais et une évacuation d'air chaud [12].....	17
.....	18
<b>Figure I-8</b> : compression de l'air frais [12].....	18
<b>Figure I-9</b> : la phase de remplissage [12]. ....	18
I.5.4.2.b Le diagramme Pression-Volume .....	19
<b>Figure I-10</b> : diagramme PV de moteur d'Ericsson [12]. ....	19
I.5.4.3 Avantages du moteur Ericsson.....	19
I.5.4.4 Inconvénients du moteur Ericsson.....	20
I.5.4.5 Applications possibles du moteur Ericsson.....	20
I.5.5 Moteur Manson .....	21
I.5.5.1 Le principe de fonctionnement du moteur Manson.....	21
I.5.5.1.a Les quatre phases élémentaires.....	21
<b>Figure I-11</b> : l'aspiration d'aire [13].....	22
<b>Figure I-12</b> : le chauffage [13]. ....	22
<b>Figure I-13</b> : échappement à l'atmosphère [13]. ....	23
<b>Figure I-14</b> : le refroidissement [13]. ....	23
I.5.5.1.b Le diagramme Pression-Volume .....	23
.....	24
<b>Figure I-15</b> : diagramme PV du moteur de Manson [13]. ....	24
I.5.5.2 Les avantages du moteur de Manson .....	24
I.5.5.3 Les inconvénients du moteur de Manson.....	25
I.5.5.4 Les applications possibles du moteur Manson .....	25
I.6 Moteur de Stirling .....	25

I.6.1 Principe de fonctionnement.....	26
I.6.1.1 Les quatre phases élémentaires.....	26
<b>Figure I-16</b> : le chauffage isochore [2]. .....	27
<b>Figure I-17</b> : la détente isotherme [2]. .....	27
<b>Figure I-18</b> : le refroidissement isochore [2]. .....	28
<b>Figure I-19</b> : la compression isotherme [2]. .....	28
➤ Le rôle du déplaceur : .....	28
<b>Figure I-20</b> : le chauffage isochore [2]. .....	29
<b>Figure I-21</b> : Détente isotherme [2]. .....	29
<b>Figure I-22</b> : le Refroidissement isochore [2]. .....	29
<b>Figure I-23</b> : la Compression isotherme [2]. .....	30
I.6.2 Le diagramme Pression-Volume et le rendement du cycle .....	30
I.6.2.1 Les variations de volume.....	30
<b>Figure I-24</b> : schéma représentative de variation de volume [2]. .....	30
I.6.2.2 Le diagramme (P,V) .....	31
<b>Figure I-25</b> : les quatre phases de cycle de Stirling [2]. .....	31
I.6.3 Le rendement du cycle .....	31
<b>Figure I-26</b> : le rendement de cycle [2]. .....	31
3.3.3 Rendement du cycle : .....	33
I.7 Conclusion : .....	34

## Chapitre II :

Différents types, applications  
et évolution du moteur Stirling

## **II.1 Introduction :**

Bien que le moteur Stirling est une vieille machine, le matériel et les méthodes modernes de conception rendent beaucoup plus attrayant que jamais. Ce type de moteur Stirling peut brûler tout combustible local comme sa source de chaleur pour produire de l'électricité, pompe à eau, ou effectuer des tâches nécessitant une puissance mécanique comme la transformation alimentaire. Machine très simple utilisant l'air atmosphérique comme fluide de travail, peut être construit à partir de matériaux locaux tels que des récipients en métal.

## **II.2 Les types des moteurs de 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.

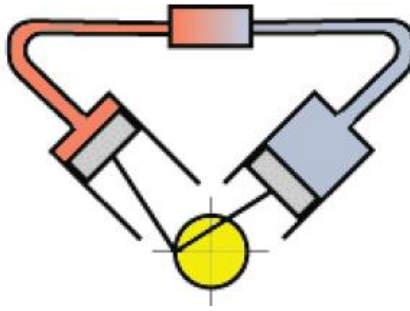
### **II.2.1 Le moteur alpha :**

C'est un moteur d'une grande simplicité mécanique: pas de soupape, pas d'arbre à came, pas d'allumage ou d'injection. Son cycle est d'apparence simple. Il fut décrit au

XIX<sup>ème</sup> siècle. A cette époque le deuxième principe de la thermodynamique n'existait pas. Il se trouve que le cycle est beaucoup plus complexe. En effet, comme dit ci-dessus, la géométrie a beaucoup d'importance. De plus, les échanges de températures au niveau de la source chaude et surtout de la source froide jouent un rôle crucial. Enfin, il peut y avoir des "fuites" thermiques entre la source chaude et la source froide.

Le moteur bicylindre ou alpha est un moteur dans lequel un cylindre est associé à la source froide et un autre est associé à la source chaude et a deux pistons moteurs séparés l'un dans le cylindre froide et l'autre dans le cylindre chaude.

Le couplage cinématique des deux pistons permet au liquide de passer d'un cylindre à l'autre tout en traversant un récupérateur d'énergie (régénérateur) et de faire varier le volume [2, 3, 4,]

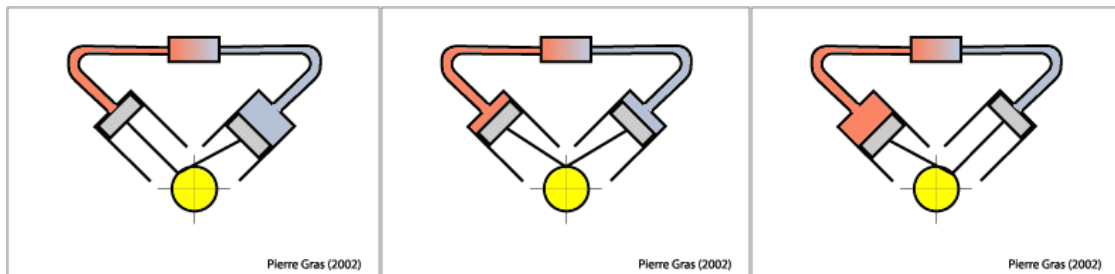


**Figure II-1:** Coupe d'un moteur Stirling de type alpha [2].

### II.2.1.1 Les quatre phases élémentaires :

❖ *Chauffage :*

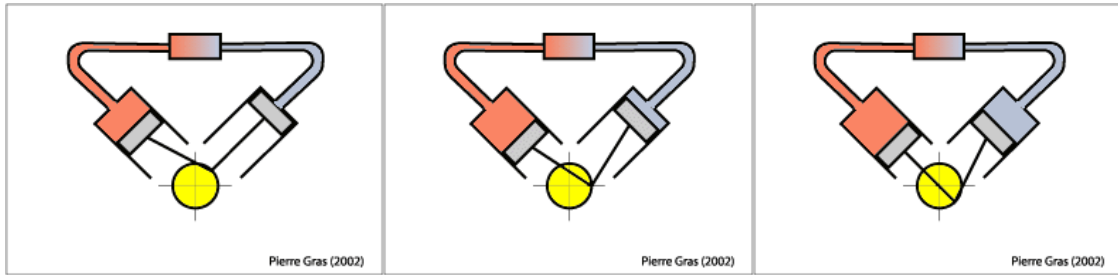
Le piston chaud se déplace en bas et le piston froid vers le haut. Le gaz est chauffé par la source chaude et son volume augmente. En même temps le gaz froid remonte pousser par le piston froid : la majorité du gaz est en contact avec la source chaude.



**Figure II-2 :** la phase de chauffage de moteur alpha [2].

❖ *Détente :*

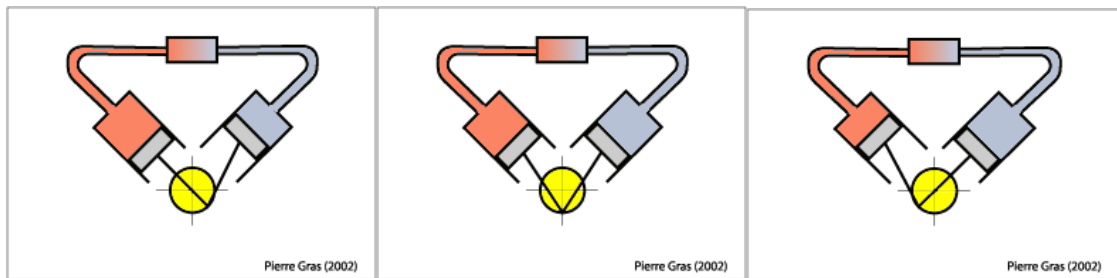
Comme le piston chaud arrive en bout de course, l'expansion du gaz se fait vers la source froide. La remontée du piston froid (par l'intermédiaire du volant et des bielles continue à pousser le piston chaud vers le haut). Le piston chaud pousse tout le gaz vers la source froide : la température du gaz diminue et il se contracte [10].



**Figure II-3 :** la phase de détente de moteur alpha [2].

❖ *Refroidissement :*

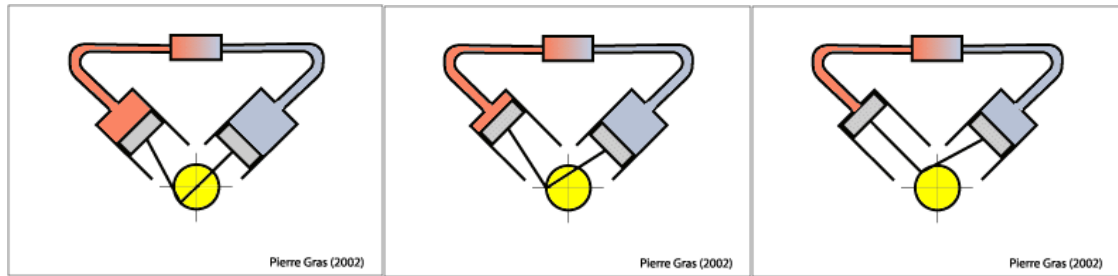
Le gaz continu à se refroidir dans le cylindre froid et sa pression est minimal. Le piston froid entraîné par le volant commence sa descente et comprime le gaz dont la pression augmente [10].



**Figure II-4 :** la phase d refroidissement de moteur alpha [2].

❖ *Compression :*

Toujours grâce à l'inertie du volant le gaz est chassé vers le cylindre chaud et voit sa température augmenter à nouveau et les deux pistons remontent en même temps. Le volume global diminue : c'est la phase de compression [10].



**Figure II-5 :** la phase de compression du moteur alpha [2].

Ces moteurs sont utilisés pour le milieu aux charges lourdes parce qu'ils peuvent fournir un meilleur rapport de compression  $\frac{V_{max} V_{max}}{V_{min} V_{min}}$ , comparé aux autres types, qui permet un meilleur résultat de puissance. Mais il exige que deux cylindres doivent être scellés qui a comme conséquence une construction plus complexe. Par exemple, il y a sous-marins et bateaux qui les emploient [6 ,16].

### II.2.2 Le moteur bêta :

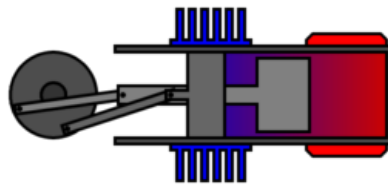
La bêta configuration est la configuration classique de moteur de Stirling et a popularité appréciée de son commencement jusqu'à aujourd'hui. Le moteur original de Stirling du sien schéma de brevet de 1816 expositions un bêta arrangement [6].

Le moteur bêta est un moteur monocylindre constitué de deux pistons : un piston de travail utile pour la compression et la détente, un piston 'déplaceur' pour mettre successivement le gaz en contact avec la source froide puis la source chaude [2]. Lors de ses déplacements le piston déplaceur chasse le gaz alternativement vers la zone froide et la zone chaude du cylindre. Comme ce piston décrit un mouvement alternatif, le cycle du gaz s'écarte sensiblement du cycle de Stirling théorique. Le volume balayé par le déplaceur ne peut pas être occupé par le piston de travail et constitue un volume "mort" : il est impossible d'obtenir un fort taux de compression ce qui limite le rendement. Par contre la conception mécanique est simple et il est possible de coupler plusieurs cylindres avec un vilebrequin [10].





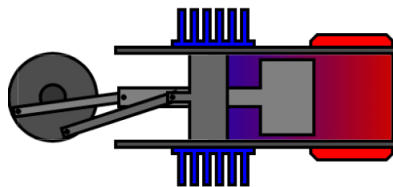
*Figure II-6 : moteur beta [7].*



*Figure II-7 : Coupe d'un moteur Stirling de type bêta [6].*

### II.2.2.1 Les quatre phases élémentaires :

❖ *Chauffage :*

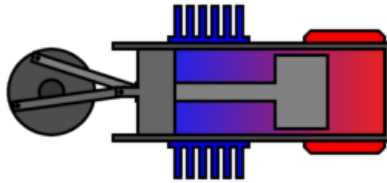


*Figure II-8 : la phase de chauffage de moteur beta [6].*

Le gaz est transféré de la partie froide vers la partie chaude.

- le piston moteur est quasi-immobile.
- le déplaceur descend.

❖ *Détente :*

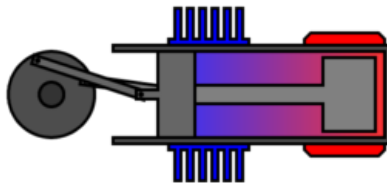


*Figure II-9 : la phase de détente de moteur beta [6].*

Le gaz est détendu en restant au droit de la source chaude.

- le piston moteur descend.
- le déplaceur l'accompagne quasiment.

❖ *Refroidissement*



*Figure II-10 : la phase de refroidissement de moteur beta [6].*

Le gaz est transféré de la partie chaude vers la partie froide.

- le piston moteur est quasi-immobile.
- le déplaceur monte.

❖ Compression :

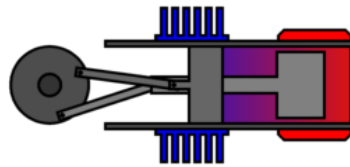


Figure II-11 : la phase de compression de moteur beta [6].

Le gaz est comprimé en restant au droit de la source froide.

- le piston moteur monte.
- le déplaceur est quasi-immobile en partie supérieure.

### II.2.3 Le moteur gamma :

Le moteur Stirling de type gamma est tout simplement un moteur bêta dans lequel le piston de travail est monté dans un cylindre séparé à côté du cylindre de piston de déplaceur, mais relié au même volant. Dans un cylindre le déplaceur joue son rôle, dans l'autre le piston moteur fait varier le volume global et récupère l'énergie. Ce type de moteur est fréquemment utilisé pour mettre à profit de faibles écarts de température entre source froide et source chaude [2,5].

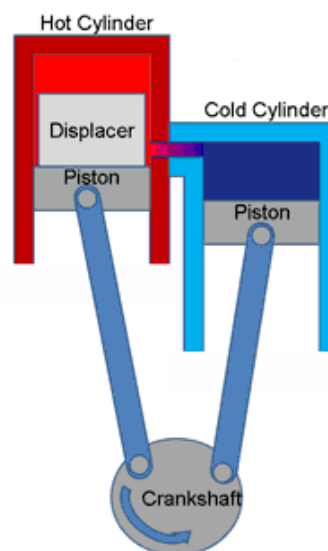


Figure II-12 : moteur Stirling de type gamma [17].

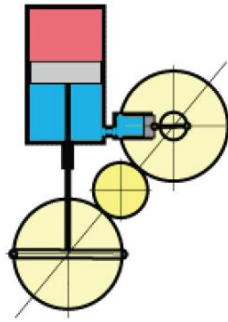


Figure II-13: Coupe d'un moteur Stirling de type gamma [2].

### II.2.3.1 Les quatre phases élémentaires :

❖ *Chauffage :*

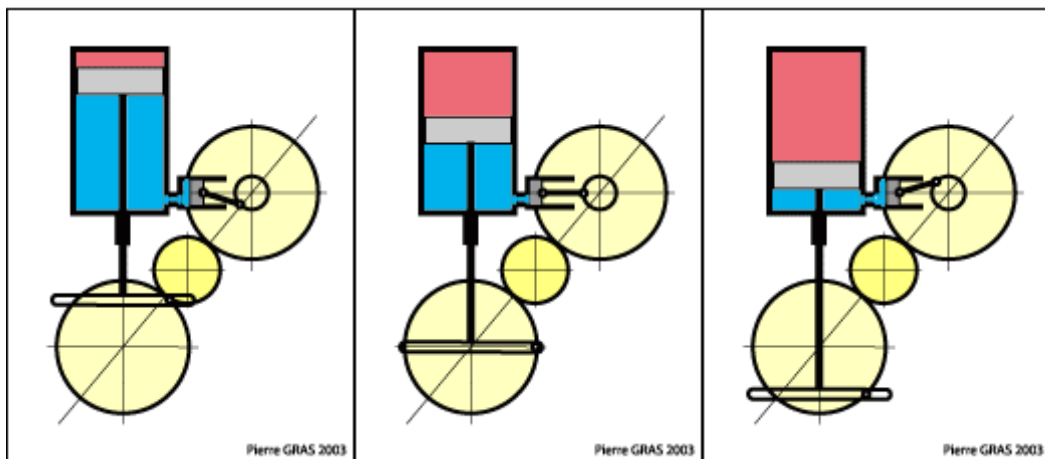
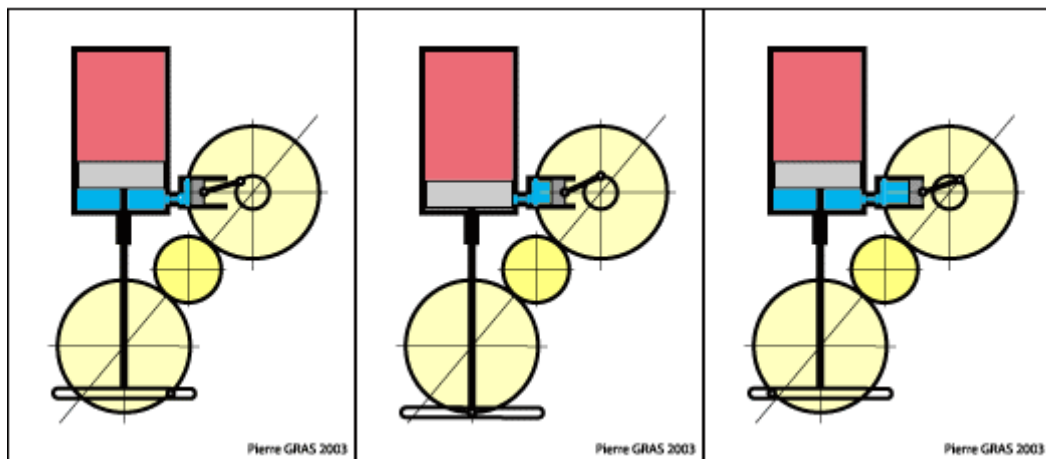


Figure II-14 : la phase de chauffage de moteur gamma [2].

Durant cette phase, le piston moteur bouge peu, le volume global est minimal. Par contre, le déplaceur effectue une longue course et le gaz se réchauffe.

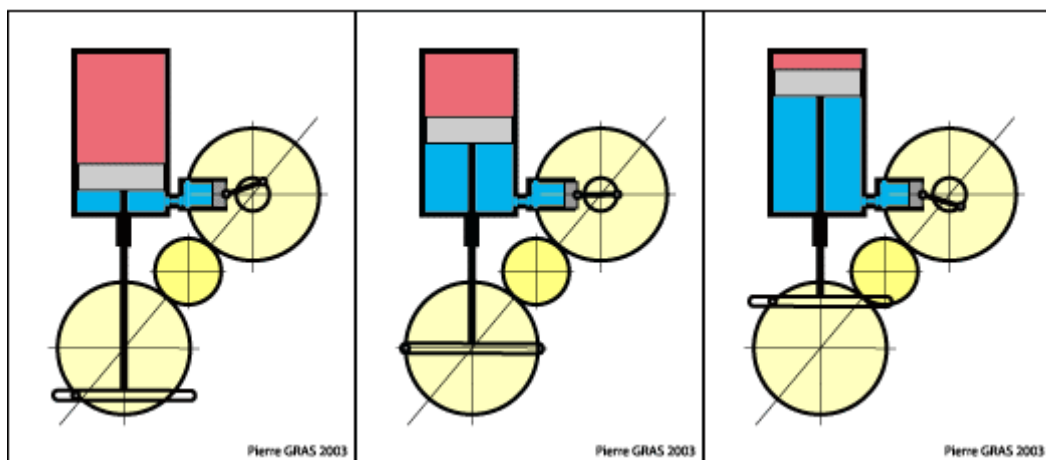
➤ *Détente :*



*Figure II-15 : la phase de détente d moteur gamma [2].*

Le déplaceur bouge peu. Par contre, le piston moteur effectue plus de 70% de sa course. Il récupère l'énergie motrice.

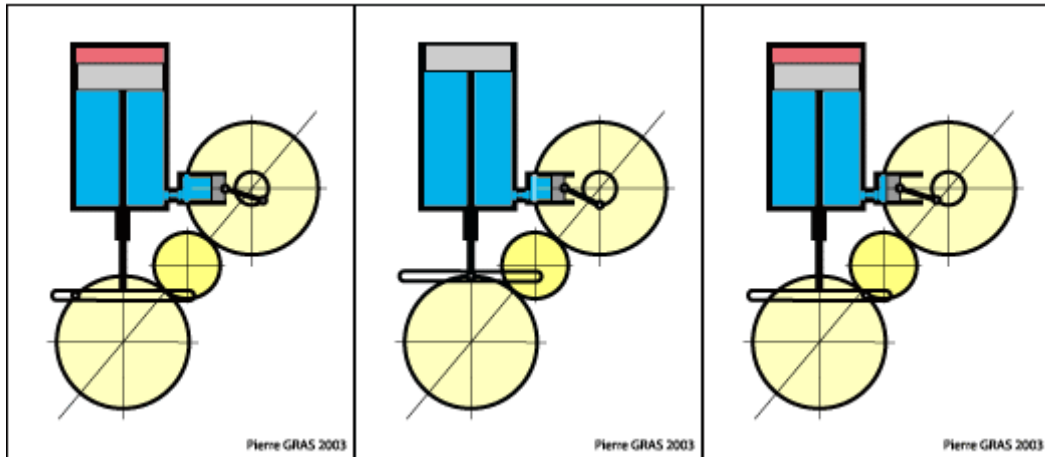
➤ *Refroidissement :*



*Figure II-16 : la phase de refroidissement de moteur gamma [2].*

Le déplaceur effectue une grande partie de sa course : le gaz est refroidi. Le piston moteur bouge peu.

➤ *Compression :*



*Figure II-17 : la phase de compression de moteur gamma [2].*

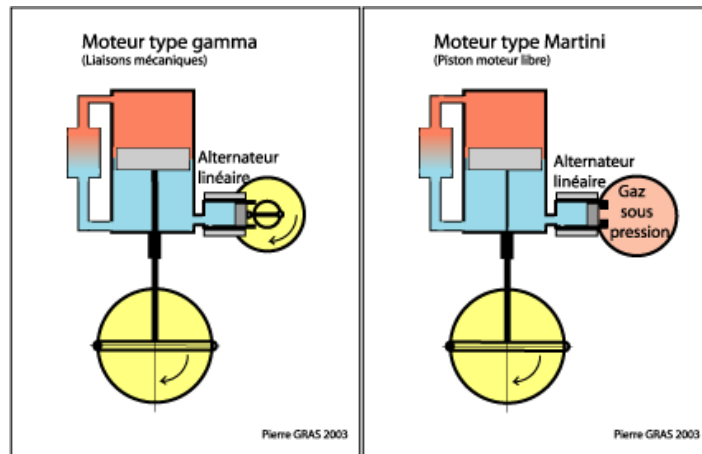
Le déplaceur reste en partie supérieur : globalement le gaz est froid. Par contre, le piston moteur effectue la majorité de sa course : il comprime le gaz en cédant de l'énergie mécanique.

L'avantage de cette conception est qu'elle est mécaniquement plus simple en raison du convenance de deux cylindres dans lesquels seulement le piston doit être scellé. L'inconvénient est le rapport inférieur de compression mais la configuration gamma est plus adoptée par les modeleurs et les amateurs [5, 6].

### **II.3 Autres moteurs :**

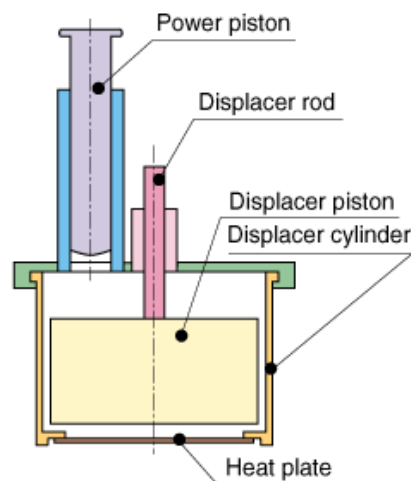
Les changements à la configuration des moteurs mécaniques de Stirling continuent à intéresser les ingénieurs et les inventeurs qui créent beaucoup de version différente du moteur Stirling. Il y a également un grand champ des moteurs de cycles de Stirling "de piston libre", y compris ceux avec les pistons liquides et ceux avec des diaphragmes comme pistons. Parmi ces moteurs on cite les suivants :

### II.3.1 Le moteur à piston libre dit Martini :



*Figure II-18 : comparaison entre le moteur gamma et moteur à piston libre [2].*

Le piston moteur se déplace en fonction de la pression du moteur. Quand la pression monte, il est poussé dans un sens. Quand la pression baisse, il revient dans l'autre sens à sa position initiale. Ceci nécessite la présence d'une force moyenne sur la face "extérieure" du piston, elle est générée par un gaz enfermé dans une enceinte ou par le tarage d'un ressort. Si le piston moteur est un aimant, on peut installer en périphérie un alternateur linéaire et générer du courant électrique.

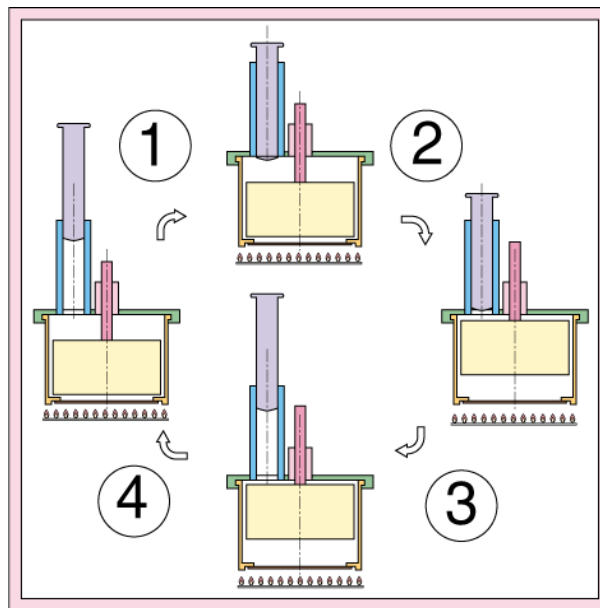


*Figure II-19 : prototype d'un type moteur à piston libre [18].*

### II.3.1.1 Structure du moteur Stirling à piston libre:

Ce moteur a une structure très simple. Dans le cas de ce prototype de moteur, le piston de puissance, bielle et leurs cylindres sont construits en utilisant des seringues médicales. Les diamètres sont de 15 mm et 3,5 mm. Le piston et la tige doit être élevée et les performances d'étanchéité à faible frottement. Le matériau du piston plongeur est en mousse de polystyrène. Le piston plongeur doit avoir un faible poids. Le cylindre plongeur utilise un récipient de nourriture de vinyle. La plaque de chaleur est réalisée en cuivre [18].

### II.3.1.2 Principe de moteur Stirling à piston libre :



*Figure II-20 : principe du moteur à piston libre [18].*

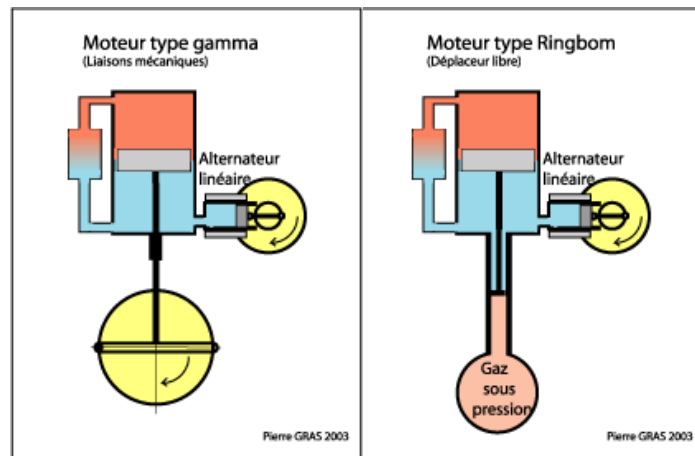
- Le piston de puissance descend par gravitation ;
- Le volume dans le moteur diminue et la pression du gaz de travail devient plus élevée. La pression plus élevée augmente le plongeur et le piston et la tige ;
- L'espace chaud devient plus grand et la pression dans le moteur devient plus élevée. Le piston de puissance s'élève ensuite en raison de la pression plus élevée ;
- Le volume diminue et la pression devient inférieure. Puis le piston plongeur se déplace vers le bas. L'espace froid devient plus grand et la pression dans le moteur devient inférieure.

La Nasa a conçu un système à piston libre assurant la conversion directe d'énergie solaire en électricité. Il suffit pour cela d'associer au piston un alternateur linéaire. Le



rendement est supérieur à celui des cellules photovoltaïques et la durée de vie impressionnante (seulement deux pièces en mouvement).

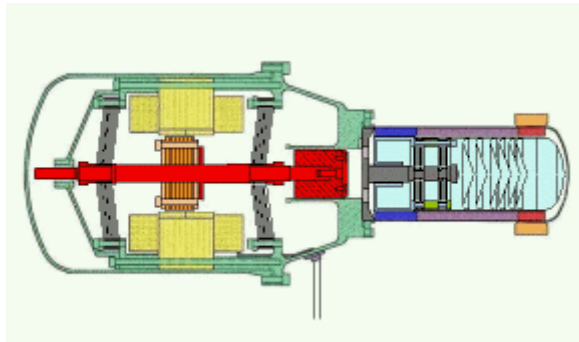
### II.3.2 Le moteur à déplaceur libre ou Ringbom :



*Figure II-21 : moteur gamma et moteur type Ringbom [2].*

En 1907, un inventeur russe, Osian Ringbom, imagine de supprimer la liaison entre le déplaceur et le piston. Et cela fonctionne encore. A condition que le déplaceur soit tenu par un guide offrant une assez large surface de contact avec l'air extérieur ! Il se déplacera tout seul en fonction de la différence de pression entre l'air extérieur et l'air intérieur au niveau de ce guide. Rappelons que l'air intérieur est successivement chauffé et refroidi au contact des sources et que sa pression sera tantôt plus élevée et tantôt plus petite que celle de l'air extérieur. A l'inverse du précédent, le piston moteur est entraîné mécaniquement. Par contre, le déplaceur se positionne en fonction de la pression du gaz enfermé dans une capacité et de la pression du moteur [2, 4].

### II.3.3 Le moteur à piston et déplaceur libres (free piston Stirling engine) :



*Figure II-22 : le moteur Stirling de piston et de déplaceur libre [4].*

Ce moteur cumule les avantages des deux précédents. Le gros avantage est qu'on peut obtenir une étanchéité absolue car il n'existe aucune liaison mécanique avec l'extérieur. L'énergie produite est évacuée par un alternateur linéaire totalement étanche.

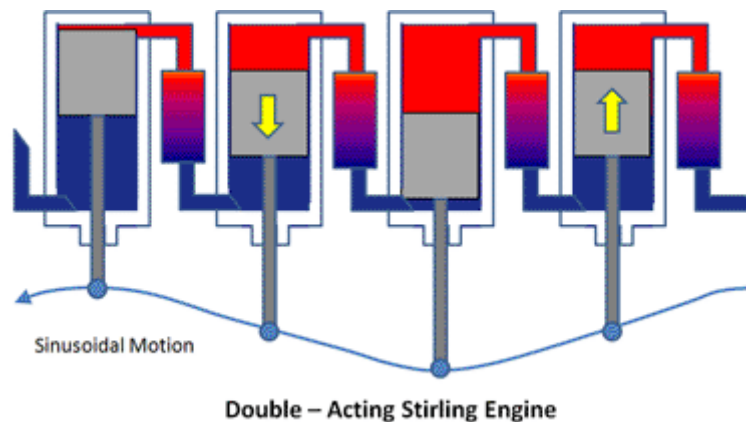
### II.3.4 Le moteur à double effet :

Le principe consiste à mettre des moteurs de type alpha en "série". Il y a un seul piston par cylindre qui joue le rôle de déplaceur et de piston moteur. Le déphasage entre chacun des pistons est de  $90^\circ$ .

Le gaz fonctionnant est fait la navette dans les deux sens par l'intermédiaire des régénérateurs entre les cylindres adjacents qui sont chauffés au dessus et refroidis au fond. Cet arrangement n'a pas besoin de déplaceur pendant que les pistons dans les cylindres adjacents exécutent cette fonction. Les cylindres doivent être fermés aux deux extrémités et les bielles doivent passer par des joints dans les chapeaux inférieurs de cylindre de sorte que le gaz dans les cylindres ne s'échappe pas. Il a l'avantage que la force exercée par le gaz d'extension d'un côté du cylindre est augmenté par la force due au gaz se contractant de l'autre côté, ou pour le mettre une autre manière, la différence de pression efficace à travers les pistons est augmentée.

Dans le cas d'une machine de cylindre quatre, le mouvement des pistons est de 90 degrés hors de phase avec chacun de ses voisins. Le mouvement d'échange des pistons est converti en mouvement rotatoire par une commande de plateau oscillant [2, 4, 17].

Cette configuration a moins de parties mécaniques que les autres conceptions et est plus appropriée aux applications de puissance plus élevée.



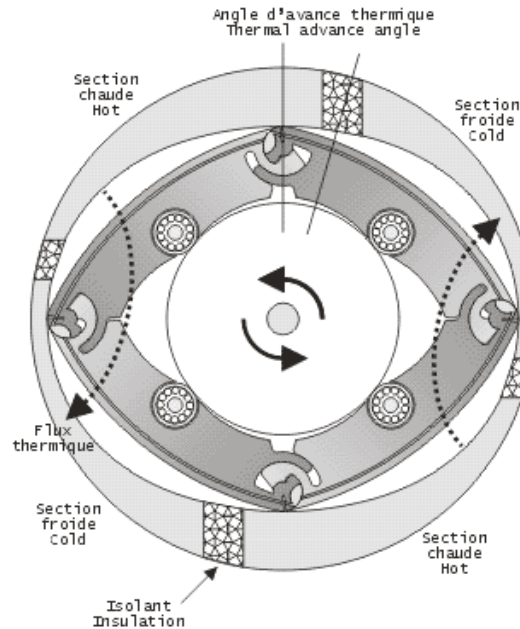
*Figure II-23 : le moteur Stirling à double effet [17].*

### II.3.5 Le moteur rotatif ou moteur quasiturbine:

Le moteur Quasiturbine ou Qurbine est un type de moteur rotatif à combustion, inventé par la famille québécoise Saint-Hilaire et initialement breveté en 1996. Ce moteur sans vilebrequin utilise un rotor articulé à quatre faces tournant dans un ovale et formant des chambres à volume croissant et décroissant lors de la rotation. L'objectif originel était de concevoir un turbo-moteur dont la turbine de la partie compresseur et la turbine chaude de puissance seraient dans le même plan. Pour réaliser cela, il a fallu conceptuellement détacher les pales de l'arbre central et les joindre les unes aux autres comme une chaîne tournant à la manière d'un rotor unique, et agissant pendant un quart de tour comme compresseur, et comme moteur le quart de tour suivant [19].

Ce moteur, en cours de développement, est du même principe, a priori et si on en reste à la géométrie, que le moteur rotatif Wankel ou qu'un compresseur à palettes. C'est un "carré" qui se déplace dans une ellipse. Le gaz est enfermé entre ces deux éléments et voit les quatre phases du cycle Stirling [2].

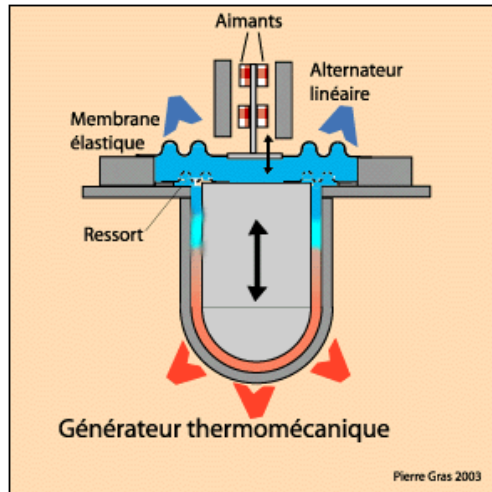
Les moteurs Quasiturbine sont plus simples, ils ne contiennent aucun engrenage et ont beaucoup moins de pièces mobiles. Puisque son centre de masse est immobile durant la rotation, la Quasiturbine a très peu ou pas de vibration [19].



*Figure II-24 : Le moteur rotatif [4].*

### II.3.6 Le générateur thermodynamique :

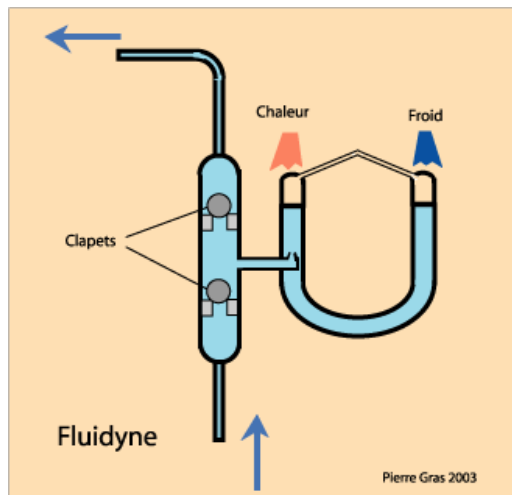
Le TMG Harwell moteur Stirling , une abréviation pour «Thermo-Mechanical Generator», a été inventé en 1967 par EH-Cooke Yarborough à la Labs Harwell de l' Autorité britannique de l'énergie atomique [4], Ce moteur permet de convertir l'énergie thermique, ce qui a conduit à la réussite du développement d'un moteur thermique avec un système efficace capable de fournir une plusieurs dizaines de watts de courant alternatif. Il n'a pas de rotation ou de surface de glissement, ne nécessite ni lubrification, et l'on croit être capable de fonctionne en continu pendant de nombreuses années sans usure ni besoin d'attention. Il est capable d'utiliser la chaleur à partir d'une variété de sources et il est auto à partir de la demande de chaleur [20]. Le TMG est un moteur à piston libre. Il n'y a pas de roulement roulements ou coulissantes phoques , il n'y a donc très peu de friction ou de l'usure. L'espace de travail est hermétiquement scellé, lui permettant de contenir sous pression de gaz d'hélium pour des milliers d'heures [4].



*Figure II-25 : le générateur thermomécanique [2].*

Le déplaceur oscille avec les variations de pression, il est soutenu par des ressorts. Le piston moteur est une membrane élastique entraînant un aimant dans un entre-fer ce qui permet de générer un courant électrique [2].

### II.3.7. Le fluidyne ou moteur à piston liquide :

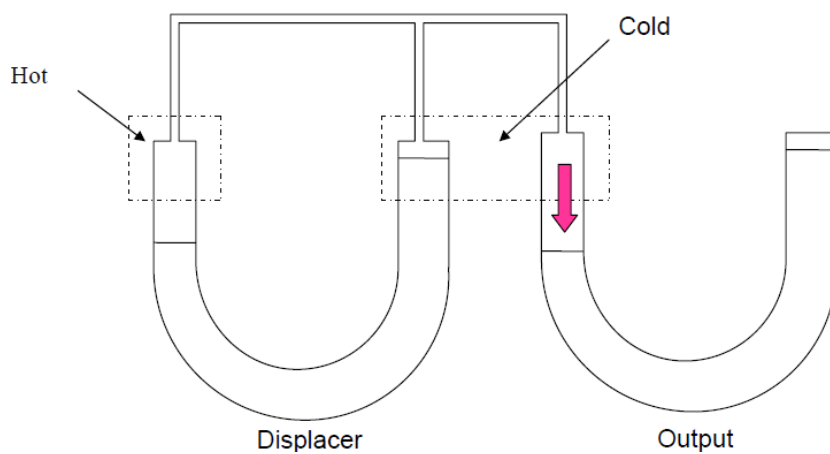


*Figure II-26 : le moteur à piston liquide ou le fluidyne [2].*

Basé sur le cycle de Stirling, ce dispositif permet de véhiculer de l'eau. Hormis des clapets, il n'y a aucune pièce mécanique en mouvement [2].

### II.3.7.1 Principe de fonctionnement :

Le piston liquide de Stirling fonctionne très différemment du moteur Stirling générique. Le plus évident est le fait que les pistons mécaniques sont remplacés par l'eau. Par conséquent, comme le côté chaud est chauffé, la pression d'air accrue soulève l'eau sur le côté froid et abaisse l'eau sur le côté chaud. Le tube en U gauche a une extrémité qui est chauffée et les fonctions d'extrémité autres froid sous forme de plongeur, et le tube de droite, qui a une extrémité ouverte à l'atmosphère, fonctionne en tant que sortie. Cette configuration est généralement connue pour être la configuration de gamma [21].



*Figure II-27: le schéma de base de moteur à piston liquide [21].*

### II.3.7.2 Les avantages et les inconvénients de ce moteur :

Un système Fluidyne peuvent être construits avec des matériaux relativement simples et peu coûteux, Tuyau en PVC, qui sont principalement pas cher et viennent également dans différentes tailles standard, peut suffisamment compte des besoins d'un système de Fluidyne. Un moteur Stirling à piston liquide peut être construit sans la nécessité pour l'usinage sophistiqué qui est certainement un plus. Un deuxième avantage majeur de moteurs Stirling à pistons liquides est qu'ils sont silencieux pendant le fonctionnement. Par rapport aux moteurs Stirling à pistons mécanique ainsi que d'autres pompes, fluidynes sont extrêmement silencieux pendant le fonctionnement, qui est un avantage supplémentaire.

Les moteurs à Pistons liquides ne nécessitent pas de précision dimensionnée de cylindres et ils permettent une grande flexibilité dans la conception mécanique avec la construction relativement simple.

Comme n'importe quel autre moteur Stirling, le moteur à piston liquide peut également être utilisé comme un réfrigérateur ou une pompe à chaleur et plusieurs personnes ont proposé d'exploiter cela [21].

## **II.4 Applications des machines de Stirling**

Etant donné sa simplicité de fabrication, le moteur Stirling fait l'objet d'études théoriques et de travaux pratiques afin de mieux connaître son fonctionnement, d'améliorer son rendement et augmenter sa compétitivité vis-à-vis d'autres sources d'énergie. Ces travaux permettront de "modéliser" le fonctionnement du moteur, c'est à dire mettre en équations les échanges de chaleur [5, 8]. Grâce à son silence de fonctionnement, il est utilisé à des fins militaires comme par exemple dans un sous-marin. Son mode de fonctionnement le rend également utile dans le domaine spatial, en effet les grandes différences de températures disponibles dans l'espace fournissent un rendement très élevé au moteur qui peut être utilisé par des satellites. Il a également des applications biomédicales comme le cœur artificiel. Il sert à la production d'électricité comme moteur de groupes électrogène dans des endroits peu accessibles avec comme source de chaleur le soleil ou la biomasse.

Le domaine vaste de L'utilisation de moteur Stirling le rend un moteur de plus en plus facile a utiliser et aussi simple a réaliser grâce a ses outils employé comme Une tasse de café qui ne peut pas devenir une tasse d'essence, mais elle peut être également employée comme un Conducteur de moteur Stirling.

Les grands axes des applications de moteur de Stirling qui sont très répondu actuellement sont les suivants :

### **II.4.1 L'énergie solaire et le moteur Stirling :**

L'énergie solaire est l'une des sources les plus attractifs de l'énergie renouvelable qui peut être utilisée comme source d'énergie d'entrée pour moteurs thermiques. En fait, toute source d'énergie thermique peut être utilisée avec le moteur Stirling. Le rayonnement solaire peut être focalisé sur le plongeur chaud d'extrémité du moteur Stirling, en créant ainsi un

moteur à énergie solaire actionné. La conversion directe de l'énergie solaire en énergie mécanique réduit à la fois le coût et la complexité de la machine motrice [22]. En théorie, les principaux avantages des moteurs Stirling sont leur utilisation d'une source de chaleur externe et leur rendement élevé. Les moteurs Stirling sont capables d'utiliser l'énergie solaire qui est une source d'énergie pas chère.

➤ **Présentation générale :**

La terre reçoit plus d'énergie du soleil en juste une heure que les utilisations de la population du monde en toute une année.

Il semble, actuellement, que le plus grand domaine de développement du moteur Stirling est celui de la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique.



**Figure II-28 :** le carré représente la Sahara algérienne [2].

La production d'énergie primaire mondiale annuelle est d'environ 12 milliards de tonnes Ou 504 milliards de milliards de Joules ou encore 140 000 milliards de kWh. 25% de cette énergie est consommée par l'Amérique du Nord, 5% par l'Amérique Centrale et du Sud, 26% par l'Europe et l'Eurasie, 5% par le Moyen-Orient, 3% par l'Afrique et 36% par l'Asie.

Aujourd'hui, on estime à 0,1%, au maximum, la part du solaire dans cette production. L'énergie solaire absorbée par la Terre en une année est estimée à 3 850 zetta joules ( $10^{21}$  joules, ZJ) soit 4640 fois la production mondiale annuelle.



Le Centre de Développement des Energies Renouvelables d'Alger (CDER) estime que le Sud de l'Algérie, le Sahara, reçoit en moyenne annuelle un rayonnement solaire de  $7 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ . Si on résume ce qui précède,  $54\,800 \text{ km}^2$  de Sahara suffiraient à alimenter la Terre entière en énergie ! (1/10 000 ème de la surface totale de la Terre). Soit un carré de  $235 \text{ km}$  de côté si le système de conversion à un rendement de 100% (c'est le carré rouge sur la carte ci-dessus !), de  $330 \text{ km}$  de côté avec un rendement de 50% ou  $520 \text{ km}$  de côté avec un rendement de 20% [2].

#### II.4.1.1 Les réflecteurs paraboloidaux:

Nous sommes ici dans la configuration la plus utilisée pour transformer l'énergie solaire en électricité grâce à un moteur Stirling. Quand on met à profit l'énergie du Soleil, on utilise une parabole réfléchissante qui concentre les rayons du soleil en un seul point : le foyer de la parabole où on installe le moteur Stirling [23]. Il est nécessaire de munir cet ensemble d'un dispositif qui suit le soleil de son lever à son coucher. Pour cela, il faut un dispositif de rotation d'Est en Ouest, et un autre pour suivre le soleil de bas en haut et réciproquement.

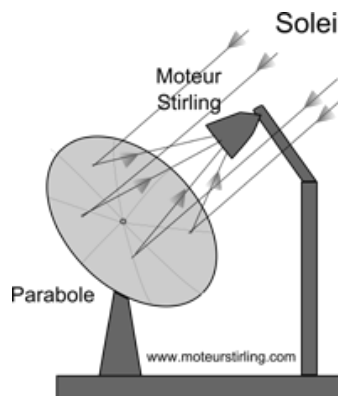


Figure II-29 : le réflecteur parabolique [2].

#### II.4.1.2 Les réalisations actuelles ou en projet :

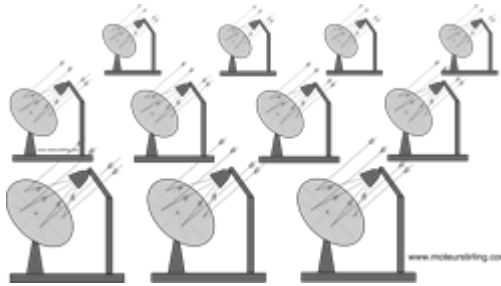
Nous ne parlerons dans cette partie que de l'utilisation de moteurs Stirling associés à des réflecteurs paraboloidaux. On parle de dish-Stirling dans les pays anglo-saxons. Deux catégories s'imposent : les applications destinées à un usage domestique et les installations de type industriel.

##### ➤ Applications à usage domestique :

La société Sunmachine développe actuellement une machine avec une parabole de  $4,5 \text{ m}$  de diamètre. Ce dispositif ressemble à la figure ci-dessus. Il serait capable de fournir une

puissance de 3 KW d'électricité et 10 kW de chaleur via sa source froide. De plus, il semblerait qu'en cas de manque de soleil, un dispositif de brûleur à gaz pourrait prendre le relais. Utiliser l'énergie du soleil, fonctionné en cogénération (fourniture de chaleur et d'électricité) avec un secours en cas de manque de soleil. L'avenir de ce type d'appareil réside dans sa compétitivité économique.

➤ **Installations de type industriel :**



**Figure II-30 :** les paraboles d'une centrale solaire [2].

Celle-ci est composée de 60 ensembles parabole-moteur Stirling développant chacun 25 kW, soit un total de 1,5 MW. Chaque parabole a un diamètre d'environ 12 m. La source froide est constituée par l'air ambiant ce qui évite d'avoir recours à l'eau, rare dans un désert. Cette centrale solaire ne comprendra pas moins de 34 000 paraboles [2].

#### **II.4.1.3 Le système d'énergie de Stirling "Stirling Energy Systems" (SES):**

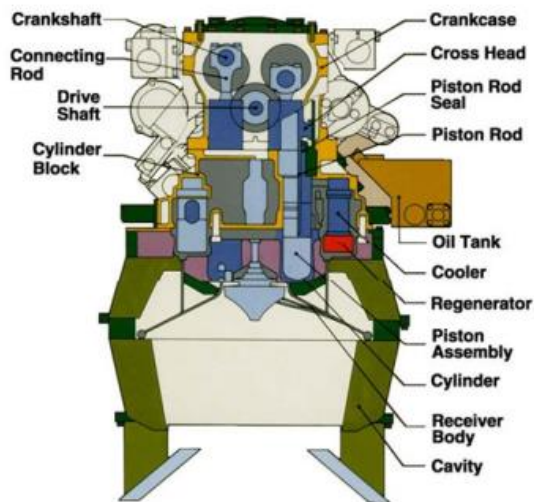
Un moteur de Stirling désigné généralement sous le nom "d'un moteur de combustion externe" contrairement "aux moteurs à combustion interne" trouvés dans la plupart des véhicules. Combiner un moteur de Stirling avec l'énergie solaire comme source de chaleur, et nous avons des moyens fortement efficaces de convertir l'énergie solaire en énergie utilisable.

C'est ce que les systèmes d'énergie de Stirling avaient perfectionné pendant les 20 dernières années. Les systèmes d'énergie de Stirling (SES) est une intégration de systèmes et de gestion de projet qui est le développement d'équipement pour l'utilité des centrales d'énergie renouvelable et des systèmes qui produisant l'électricité répartis («groupes électrogènes»). SES est fait équipé avec Kockums Submarine Systems, les laboratoires de NASA-Glenn, le ministère de l'énergie des ETATS-UNIS (DAINE), et le Boeing Company pour les centrales

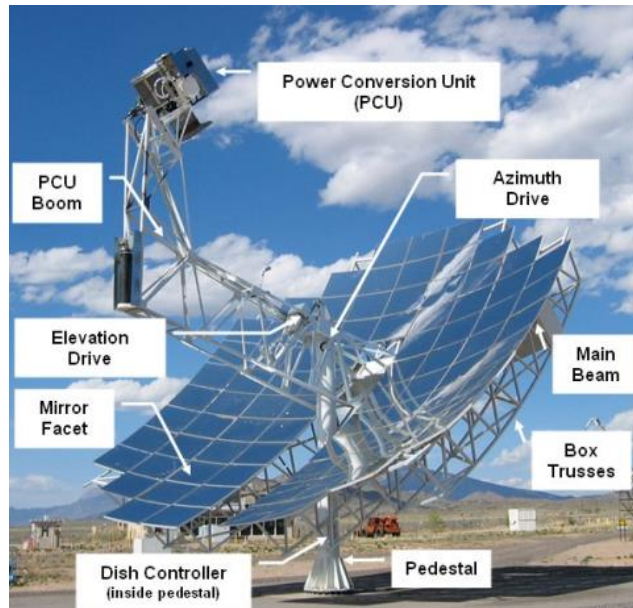
solaires. SES est placé pour aller bien à une compagnie mondiale de technologie d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande mondiale des technologies renouvelables par la commercialisation de sa propre technologie de moteur de cycle de Stirling pour des applications solaires et groupe électrogène. Dans l'avenir, SES participera également aux biogaz, et aux marchés d'hydrogène [24]. SES a également acquis la totalité des propriétés intellectuelles, y compris des secrets commerciaux importants concernant les aspects techniques et de fabrication du système de concentrateur d'énergie solaire [25].

#### II.4.1.3.a Le principe de fonctionnement :

Chaque unité plate se compose de 82 miroirs formés dans une forme de cuvette pour focaliser la lumière pour avoir un faisceau intense. Le plat solaire produit de l'électricité en focalisant les rayons du soleil sur un récepteur, qui transmet l'énergie thermique à un moteur de Stirling. Le moteur est un système fermé rempli de l'hydrogène. Pendant que le gaz se réchauffe et se refroidit, sa pression monte et descend. La variation de pression entraîne les pistons à l'intérieur du moteur, produisant une puissance mécanique, qui à son tour conduit un générateur et produit de l'électricité [4, 25].



*Figure II-31 : Composants du moteur Stirling SES [25].*



*Figure II-32: sun catcher SES [25].*

#### **II.4.2 Le moteur Stirling et la cogénération :**

Selon les lois de la thermodynamique, la conversion de chaleur en travail (puis en électricité) ne peut être totale. Si elle n'est pas valorisée, la chaleur qui n'est pas convertie, est simplement dissipée dans l'environnement (par exemple, dans la tour de réfrigération d'une centrale thermique).

Cette dissipation constitue une perte énergétique nette pénalisant fortement l'efficacité globale de la conversion. La valorisation de cette chaleur permet d'accroître la part d'énergie primaire valorisée et ainsi de réduire la consommation d'énergie primaire à énergie finale constante : c'est la cogénération [26].

##### **II.4.2.1 La cogénération :**

Un système de cogénération permet de convertir une unique ressource énergétique sous deux formes d'énergie secondaires utilisables : une forme d'énergie à haut contenu énergétique (mécanique ou électrique) et une énergie thermique [26]. La cogénération est un procédé aujourd'hui largement répandu. En 1999, l'électricité produite par cogénération représentait 10 % de l'électricité dans le monde et jusqu'à 50 % au Danemark, pays où cette technologie est la plus développée, mais seulement 3 % en France [27]. Selon leur dimensionnement, les systèmes de cogénération peuvent être employés pour des procédés

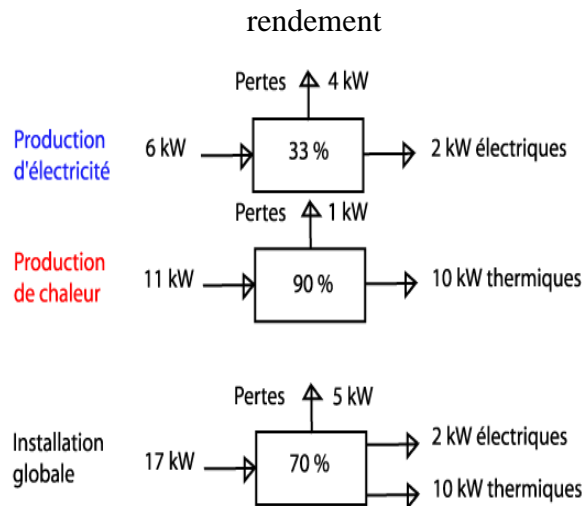
industriels, des réseaux de chaleurs, des bâtiments tertiaires ou résidentiels. De plus, les usages d'un système de cogénération peuvent être étendus à la production de froid par le couplage de machines à absorption (*trigénération*) [26].

#### II.4.2.2 La Micro-cogénération

La micro-cogénération est une forme de cogénération de petite puissance (puissance électrique inférieure à 10 kWe) dont le dimensionnement semble adapté aux besoins thermiques des petits bâtiments, notamment des logements individuels et des petits tertiaires [28]. Il existe actuellement cinq familles de systèmes de micro-cogénération qui diffèrent par leur système de conversion [26]. On parle souvent de micro-cogénération pour qualifier un usage domestique par rapport à la cogénération qui concerne plus particulièrement de grosses installations industrielles de production d'énergie [2].

#### II.4.2.3 Intérêt de la cogénération :

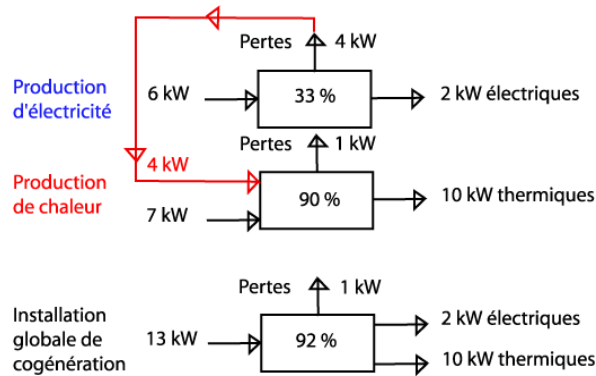
Supposons dans un premier temps que nous disposons de deux installations. Une pour faire de l'électricité, une autre pour se chauffer. Etudions les rendements de chacune d'elles et le rendement global.



**Figure II-33 :** exemple de la production de l'électricité et la chaleur sans cogénération [29].

Nous ferons l'hypothèse, réaliste, que nous souhaitons obtenir 2 kW électriques (avec un rendement de 33 %) et 10 kW de chauffage (avec un rendement de 90 %).

Maintenant, imaginons que nous voulons avoir le même résultat au niveau des puissances espérées, mais avec une installation de cogénération. Celle-ci a pour particularité de récupérer les pertes thermiques liées à la production d'électricité pour les réutiliser dans la production de chaleur. Voir la représentation ci-dessous :

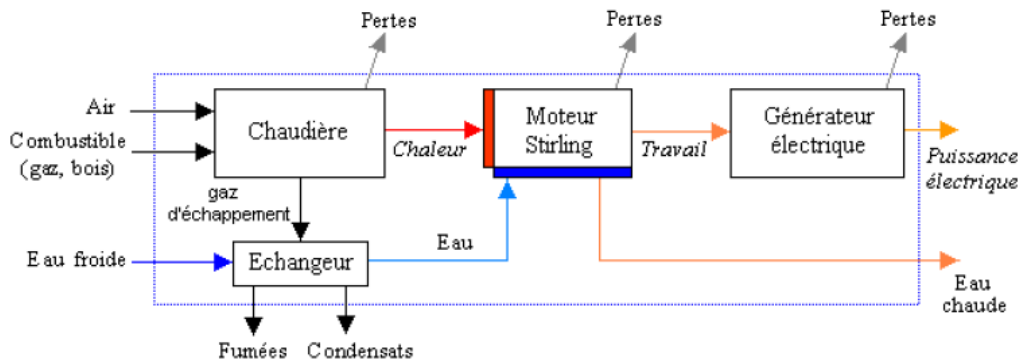


**Figure II-34:** la production de l'électricité et la chaleur avec cogénération [29].

Le rendement global de cette installation de cogénération est passé de 70 à 92 %. Quand, avec des installations indépendantes, on doit acheter 100kg de bois, on n'en a plus besoin que de 76 kg avec une installation de cogénération [2, 29].

#### II.4.2.4 Micro-cogénération par moteur Stirling :

Un système de micro-cogénération fondé sur un moteur Stirling est constitué d'une source de chaleur externe (chaudière ou concentrateur solaire), d'un moteur Stirling, d'une génératrice et d'un ou plusieurs échangeurs visant à récupérer la chaleur produite. Son architecture la plus courante est représentée sur la Figure :



**Figure II-35 :** le système de micro-cogénération fondé sur un moteur Stirling [26].

Dans un bâtiment, la source de chaleur est une chaudière qui peut être alimentée par divers types de combustibles : gaz, fioul, mais aussi agro carburant, biogaz et bois. La chaleur est récupérée sur les gaz d'échappement à partir de l'eau froide de retour du circuit de chauffage. Une partie de la vapeur d'eau émise par la combustion est ainsi condensée dans l'échangeur. L'eau partiellement réchauffée, constituant la source froide, reçoit la chaleur  $Q_f$  émise par le moteur Stirling. La chaleur ainsi récupérée peut être utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) ou pour le chauffage du bâtiment. La force motrice du moteur est exploitée pour produire de l'électricité, par l'intermédiaire d'une génératrice. Cette électricité peut être soit consommée localement, soit exportée sur le réseau public d'électricité [26].

#### II.4.2.5 Le moteur Stirling et la cogénération :



*Figure II-36 : la chaudière Sunmachine [29].*

On intègre un moteur Stirling avec une installation de chauffage. Le moteur Stirling est utile pour produire l'électricité. Ses pertes, comme nous l'avons vu précédemment, sont récupérées pour participer au chauffage.

La source chaude peut être une paroi comme dans le cas de l'installation de Sunmachine. Ce peut être également des chaudières à gaz ou à bois. Dans cette dernière catégorie, on trouve des installations alimentées en granulés de bois [9].

Aussi des petites installations domestiques ont été développées dans le domaine de la cogénération, c'est à dire dans la production simultanée d'électricité et chaleur : il s'agit d'optimiser la dépense énergétique d'une installation de chauffage central dans une maison en plaçant dans le foyer de la chaudière un moteur de Stirling qui transformera l'énergie thermique en énergie électrique (le refroidissement s'effectuant par le circuit d'eau du sanitaire). Ce dispositif permettrait des économies pendant la saison où on consomme le plus d'énergie (l'hiver) [8].

#### II.4.2.6 Moteur de Stirling et la réfrigération :

Au cours des dernières années une nouvelle technologie, le cycle de Stirling, a commencé à recevoir beaucoup d'attention dans la recherche de technologies toujours plus performantes. Parmi les appareils ménagers, réfrigérateurs et congélateurs domestiques sont le numéro un des consommateurs d'électricité. Tous les réfrigérateurs et congélateurs ménagers



dans le monde ont une chose en commun: le système d'évaporation de Rankine de refroidissement (reconnaisable par le pot compresseur noir et condenseur). Le système de refroidissement du cycle de Rankine est la véritable barrière de refroidissement super efficace de l'énergie et la congélation [30].

La réversibilité du moteur permet également en fournissant du travail de produire du froid, il est en particulier utilisé pour la production des basses températures (jusqu'à 10 °K). Comme on peut le voir sur le graphique ci dessous, la machine de Stirling est plus efficace que les procédés habituels [8].

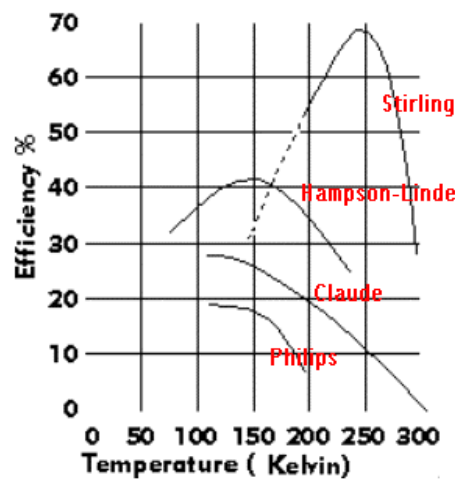


Figure II-37 : l'efficacité de cycle de Stirling par rapport aux autres cycles [5].

### Principe de fonctionnement :

Le moteur Stirling est un moteur réversible. C'est à dire qu'on peut le faire tourner à l'envers. Dans ce cas, il faut lui fournir de l'énergie mécanique. L'intérêt d'un tel fonctionnement est qu'on retire des calories à la source froide pour les transférer à la source chaude. C'est le principe du réfrigérateur ou de la pompe à chaleur. Dans l'industrie cryogénique cette propriété est depuis longtemps exploitée pour produire des froids extrêmes. Ainsi, on liquéfie des gaz.

Sur le graphique on voit les quatre phases du cycle de Stirling dans une telle utilisation :

- de 1 à 2 : détente à température constante. Ceci nécessite de prendre des calories à la source froide ;

- de 2 à 3 : on chauffe le gaz de  $T_m$  à  $T_M$  dans le régénérateur ;
- de 3 à 4 : on comprime le gaz à température constante. Ceci nécessite de le refroidir et de fournir des calories à la source chaude ;
- de 4 à 1 : on refroidit le gaz dans le régénérateur ;

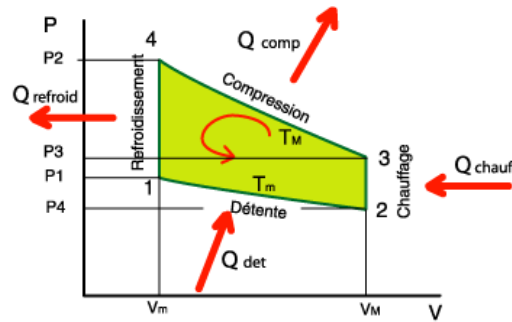


Figure II-38 : les quatre phases du cycle réversible de Stirling [2].

L'aire délimitée par le cycle (en vert) est représentative de l'énergie qu'on doit fournir au dispositif.

On définit le COP, ou coefficient de performance, de la pompe à chaleur comme étant le ratio de la chaleur récupérée sur la quantité d'énergie mécanique consommée. Si on observe le diagramme ci-dessus, ça revient à écrire :

$$COP = \frac{Q_{comp}}{Q_{comp} + Q_{det}} \dots \dots \dots (II.1)$$

En regardant des équations du rendement mécanique

$$\eta = \frac{W_d + W_c}{W_d} = 1 + \frac{W_c}{W_d} \dots \dots \dots (II.2)$$

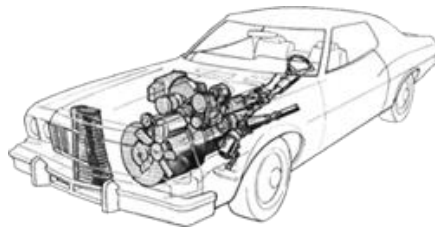
On s'aperçoit que le COP, coefficient de performance de la pompe à chaleur, est l'inverse du rendement d'un moteur qui aurait un diagramme de fonctionnement équivalent [2].

### II.4.3 Motorisation et moteur Stirling :

Lorsqu'on parle d'un moteur quelconque, le moteur Stirling par exemple, une des moteurs quand peut utiliser, on s'interroge de façon plus large en citant l'automobile, certes, mais aussi l'avion, le bateau et d'autres véhicules.

Ci-dessous, nous allons essayer de recenser les différents domaines d'application du moteur Stirling en tant que moyen de propulsion. En faisant cela, nous allons également répertorier les succès, les échecs du moteur Stirling mais aussi les espoirs qu'on peut placer en lui.

#### II.4.3.1 L'automobile :



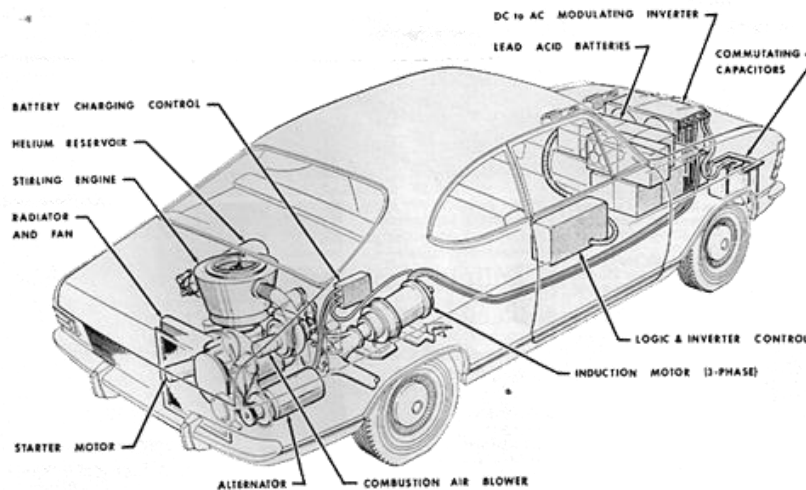
*Figure II-39 : une voiture équipée par un moteur Stirling [6].*

L'utilisation du moteur Stirling comme moyen de propulsion d'une automobile fait partie du passé (mais peut-être aussi de l'avenir) [2]. Dans les années 70 et les années 80 plusieurs compagnies d'automobile comme « General Motors » ou « Ford » recherchaient au sujet du moteur de Stirling. Ce dispositif est bon pour l'arrangement de puissance constante, mais c'est un défi pour le démarrage et l'arrêt de l'automobile. Son coût a pu également constituer une difficulté face à la standardisation des moteurs thermiques traditionnels [4].

Une bonne voiture peut changer la puissance rapidement, la possibilité pour obtenir cette caractéristique importante est la conception d'un mécanisme de commande de puissance. C'est une méthode lente de changement des niveaux de puissance [6]. Les principales difficultés liées à l'utilisation du moteur Stirling dans une application automobile sont le temps de démarrage, réponse à l'accélération, le temps d'arrêt, et le poids, ne sont pas tous qui ont des solutions toutes faites [4].

La meilleure solution malgré ces difficultés dans les automobiles est les voitures hybrides électriques où le moteur de Stirling pourrait donner assez de puissance pour faire des longs voyages où pourrait obtenir l'essence ou diesel, selon laquelle le carburant est moine

chère. Les batteries pourraient donner l'accélération instantanée qu'elle est utilisé par les conducteurs. Cette invention rend la voiture fonctionnée d'une manière silencieuse et propre [6].



*Figure II-40 : la voiture hybride électrique [6].*

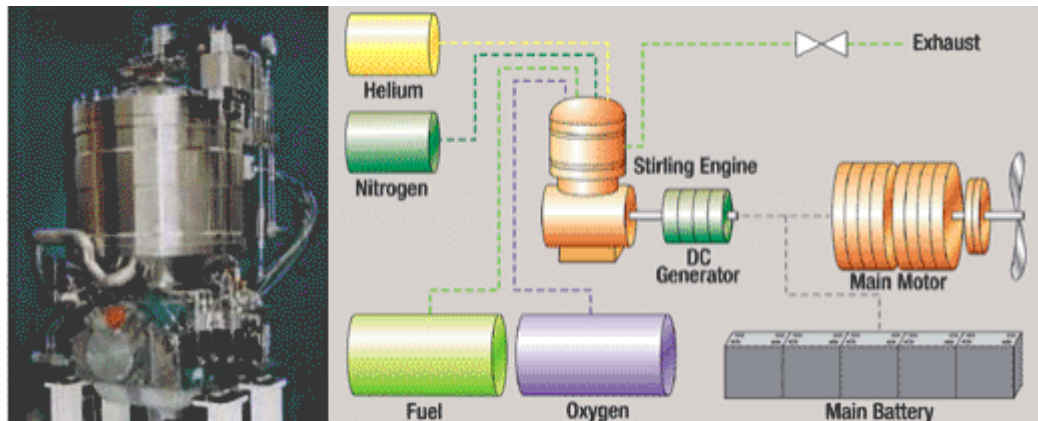
De nombreuses recherches sont effectuées sur la conception d'automobile hybride. Ces véhicules bénéficient des avantages du moteur de Stirling (silencieux, écologique..) mais pour qu'ils soient performant il faut utiliser une source très froide et un fluide de travail à très haute pression ce qui implique nécessairement des aménagements coûteux [5].

#### **II.4.3.2 Les sous-marins et les bateaux:**

Le moteur Stirling peut être bien adapté pour les systèmes d'alimentation sous-marins, où des travaux d'électricité ou de la puissance mécanique sont requis à un niveau intermittent ou continu. General Motors a fait une quantité considérable de travaux sur les moteurs de pointe à cycle de Stirling qui comprennent le stockage thermique pour les applications sous-marines. Unis Stirling, dans Malmö, en Suède, est l'élaboration d'un expérimental moteur à quatre cylindres à l'aide de peroxyde d'hydrogène comme oxydant dans les systèmes électriques sous-marins. La SAGA (Autonomie Assistance grand sous-marin) sous-marin est devenu opérationnel dans les années 1990 et est entraînée par deux moteurs Stirling fournis avec le carburant diesel et de l'oxygène liquide [2, 4].

Constructeur naval suédois Kockums a construit 8 sous-marins Stirling alimentés avec succès depuis les années 1980 [10, 16]. Ils transportent l'oxygène comprimé pour permettre la combustion de combustibles immergée, fournissant de la chaleur pour le moteur Stirling. Ils sont actuellement utilisés sur les sous-marins des *Gotland* et *Södermanland* classes. Ils sont les premiers sous-marins dans le monde à comporter Stirling propulsion anaérobie (AIP), qui s'étend leur endurance sous-marine de quelques jours à plusieurs semaines [4].

Cette haute-technologie air-Independent propulsion (AIP) a quatre équipements de sous-marins avec l'AIP de Stirling. Les modèles sont *HMS Näcken*, qui était lancé en 1978 et après dix ans 1988 sont devenus les premiers sous-marins équipés du système AIP [6].



**Figure II-41** : le principe de système AIP Stirling [31].

Ce moteur a ensuite été installé à bord de sous-marins militaires de l'armée suédoise. L'autonomie de ces bâtiments a été fortement augmentée de quelques jours de plongée à plusieurs semaines. Avec ce système, le sous-marin est aussi capable de recharger ses batteries tout en restant immergé. En effet, les gaz après combustion sont à une pression supérieure à celle de l'eau. La marine militaire japonaise a adopté les moteurs AIP de Kockums pour ses sous-marins Soryu (84 m de long et 4 200 tonnes de déplacement). Ils sont associés à un moteur diesel-électrique. Des bâtiments militaires de surface bénéficient également de cette technologie.

Il n'est pas impossible de voir, dans un proche avenir, des sous-marins de recherche robotisés équipés de moteur Stirling pour leur propulsion. (Ce moteur est déjà utilisé pour fournir l'électricité à bord de certains bateaux de plaisance) [2].

### II.4.3.3 Les avions :



*Figure II-42 : un avion équipé par un moteur Stirling [4].*

Dans la relation au sujet des moteurs de Stirling dans l'avion, les communautés qui se trouvent près des aéroports peuvent se bénéficier des moteurs silencieux [6].

Contrairement à ce qu'on demande à un moteur d'automobile, un moteur d'avion fonctionne quasiment tout le temps à puissance constante. Dans ce cas-ci, le moteur Stirling est vraiment dans son domaine de prédilection. Son silence, par rapport à un moteur traditionnel, peut constituer un atout tant pour les passagers de l'avion que pour les riverains. Le faible niveau vibratoire du moteur Stirling plaide également en sa faveur. Quand on prend de l'altitude, l'air extérieur baisse en température. Cet air constitue la source froide du moteur Stirling. Il n'y a donc pas de pertes de puissance quand on monte. Ceci permettrait de voler plus vite qu'avec un moteur traditionnel. Le choix de combustible étant plus large, on pourrait en imaginer un moins volatil, moins explosif, moins polluant. Il faudrait mettre au point un moteur Stirling ayant également un bon rapport puissance/poids pour devenir un concurrent crédible dans le domaine de l'aviation. Cet aspect est essentiel [4,6].

Pour voir un jour un moteur Stirling équiper un avion de tourisme, il paraît nécessaire de réaliser d'importants travaux de recherche et développement pour prouver, tant sur le plan économique que sur le plan technique, qu'il peut être le meilleur dans ce domaine. Les lourds investissements réalisés dans le passé ou récemment, dans d'autres secteurs, peuvent permettre de réduire les coûts nécessaires à la réalisation d'un moteur Stirling spécifique à l'aviation [2].

#### II.4.4 Pompage d'eau :

Il existe un grand nombre de technologies utilisant l'énergie solaire pour pomper de l'eau [2]. Ces systèmes ont été élaborés afin de pallier les problèmes de disponibilité d'électricité ou d'énergies fossiles dans certaines régions défavorisées ou isolées. On peut distinguer deux grandes familles de pompes à eau solaire, l'une utilisant une conversion directe de l'énergie solaire, l'autre utilisant des cycles thermodynamiques. La première convertit l'énergie solaire en électricité pour alimenter des pompes traditionnelles. La seconde famille utilise l'énergie solaire pour alimenter la source chaude du système thermodynamique.

Parmi celles qui utilisent un cycle thermodynamique, on distingue deux groupes, les conventionnelles et les non-conventionnelles. Les pompes conventionnelles utilisent l'énergie solaire couplée à des pompes traditionnelles (souvent des pompes de circulation), ce qui implique une présence d'une autre énergie même en faible puissance. Les pompes non-conventionnelles n'utilisent que l'énergie solaire pour pomper de l'eau, le système pouvant fonctionner en autarcie complète. Les pompes non conventionnelles connaissent depuis quelques années un succès de plus en plus important par rapport aux pompes conventionnelles. Ceci grâce à leurs faibles coûts de matériel, de maintenance, de leur facilité d'assemblage et l'absence de pièces en mouvement (à l'exception de quelques valves). Parmi ces pompes non-conventionnelles on distingue la pompe Fluidyne [32].

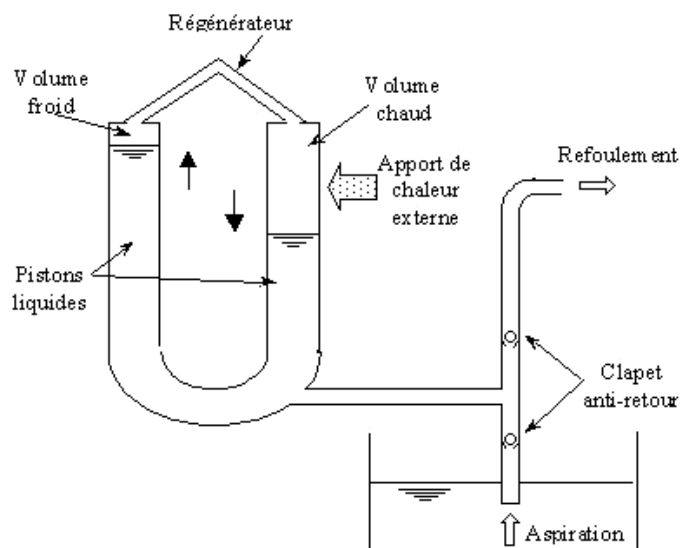


Figure II-43 : Schéma de principe d'une pompe Fluidyne [32].

Basé sur le cycle de Stirling, ce dispositif permet de véhiculer de l'eau. Hormis des clapets, il n'y a aucune pièce mécanique en mouvement. Une telle "moto-pompe" est simple, rustique, peu chère, facile à mettre en œuvre. Toutes ces qualités lui font pardonner son rendement et ses performances médiocres si on dispose d'énergie peu chère et abondante, le soleil par exemple. Le fluïdine peut constituer un moyen économique d'irrigation des terres cultivées dans les pays chauds.

#### **II.4.5 Autre application :**

Le moteur Stirling occupe aussi une place dans des applications bien particulières, comme le domaine d'informatique, spatial et d'autres domaines

##### **II.4.5.1 Domaine de l'informatique :**

Un ventilateur ça consomme du jus à pure perte. En effet, il est déjà énergétiquement assez peu efficace d'avoir un processeur qui se prend pour un barbecue coréen mais griller des watts supplémentaires pour évacuer cet excédent calorifique ne fait qu'aggraver encore 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 de Stirling !! [33].



**Figure II-44 :** le ventilateur de MSI [33].

On a vu apparaître, récemment, une utilisation très spécifique du moteur Stirling pour refroidir un micro-processeur d'ordinateur.



C'est bien là la bonne idée de MSI, utilisé un tel moteur en prenant la zone chaude du processeur comme source d'énergie. Le cycle compression/décompression va ainsi activer un piston qui va à son tour faire tourner un ventilateur [33].

Il s'agit d'un micro-moteur Stirling qui utilise l'énergie thermique dissipée par le micro-processeur. Ce petit moteur entraîne un ventilateur qui dissipe le restant de chaleur évacué par le micro-processeur.

Il n'y a donc pas besoin d'énergie électrique supplémentaire pour assurer cette fonction de refroidissement contrairement à ce qui se passe sur un ordinateur "usuel". Certains évaluent à 70% la chaleur dissipée de la sorte [2].

Le ventilateur ne refroidit évidemment pas directement le processeur, mais deux caloducs (ou « heatpipes »). Pour info, un caloduc se présente sous la forme d'un tube fermé ne contenant qu'un seul gaz. D'un côté le tube touche la zone chaude du processeur, de l'autre il est soudé à une multitude d'ailettes pour augmenter la surface de contact avec l'air. Le gaz en équilibre liquide va se vaporiser au contact de la zone chaude « pompant » ainsi des calories. Maintenant plus léger, le gaz monte vers la partie « à ailettes ». Là notre ventilateur « de Stirling » souffle un air plus froid qui va provoquer la condensation du gaz. A nouveau liquide et donc plus lourd, notre gaz retombe sur la zone chaude, et ainsi de suite. Simple, et efficace.

Ceci dit l'utilisation du moteur de Stirling pour du refroidissement existe déjà depuis longtemps du côté industriel et militaire. Mais malgré cela, et même si pour l'instant prix et efficacité réel ne sont pas connus, l'arrivée de cette technologie permettant de limiter l'énergie consommée par nos consommateurs de watts est en soit une nouveauté qui méritait d'être soulignée [33].

#### II.4.5.2 Domaine spatial :



*Figure II-45 : Stirling solaire devant le Pentagone en juin 1998 [6].*

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

La NASA et la société Cummins effectuent actuellement des recherches pour la production d'électricité à partir du soleil [8].

Elle a toujours été en pointe dans ce domaine. Elle a développé un moteur Stirling à piston libre qu'on peut voir sur la figure. La NASA réfléchit à une petite centrale nucléaire produisant la chaleur nécessaire à un moteur Stirling à piston libre. La source froide serait constituée par de grands radiateurs [9]. Le moteur Stirling devra avoir un bon rendement et surtout un très bon rapport Puissance / Masse. Ce dernier point est capital dans le domaine spatial pour limiter la masse de carburant embarqué par la fusée de lancement.

Cette configuration de la machine de Stirling est utilisée dans les cryogénérateurs en spatial pour refroidir les capteurs infrarouges. Le milieu militaire est également intéressé par cette application : vision infrarouge (ex : refroidisseurs cryogéniques SUNPOWER) [8].

## II.5 Avantages et inconvénients :

Il existe une multitude de machines appelées moteur Stirling. Cette multitude se retrouve donc au niveau du champ d'application de ce moteur : il s'étend du cœur artificiel alimenté par un petit réacteur nucléaire implanté dans un corps humain au gros moteur de sous-marin en passant par les installations de récupération sur des effluents gazeux à basse température ou les systèmes de conversion de l'énergie solaire....[3] les moteurs Stirling actuels ont des performances énergétiques comparables à celles des meilleurs moteurs Diesel de même puissance il n'y a ni explosions, ni combustion interne. Parmi les avantages de se moteur on trouve les suivants :

### II.5.1 Avantages :

Les moteurs Stirling possèdent, par rapport à d'autres types de moteurs thermiques, un certain nombre d'atouts parmi lesquels on peut citer les suivants :

Comme la combustion est externe, on peut utiliser des combustibles les plus divers et optimiser celle-ci.

- 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 (pas d'explosions, pas de soupapes, pas de bruits d'échappement) [2] ;

- 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 [5] ;

- 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 ;

➤ Réversible le cycle de Stirling est réversible : un moteur Stirling entraîné par un autre moteur devient une pompe à chaleur capable de refroidir à  $-200\text{ °C}$  ou de chauffer à plus  $700\text{ °C}$ , 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 où la combustion est imparfaite [2, 4, 5, 6] ;

### **II.5.2 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.) ;

➤ Difficile à commander : l'un des inconvénients est le manque de réactivité. Pour faire varier la puissance du moteur on fait en général varier la puissance de chauffe. Or à cause de la grande inertie thermique des échangeurs, l'augmentation de puissance est beaucoup plus lente que celle des moteurs à combustion interne courants ;

➤ La variation de régime de ce moteur est difficile à réaliser, car elle ne peut se faire qu'en agissant sur le taux de compression du fluide de travail ou en augmentant la chaleur de la source chaude, ou en diminuant celle de la source froide. Cet inconvénient peut se corriger, à l'aide de procédés tels qu'une boîte de vitesses dans le cas de l'entraînement d'un arbre de transmission vers des roues, ou de changement de pas dans celui de l'entraînement d'une hélice. C'est pourquoi le moteur Stirling est considéré comme ayant une très mauvaise aptitude à produire une puissance et un couple variable, inconvénient considéré comme très important pour la propulsion automobile, notamment, alors que c'est justement cette application qui a fait la fortune du moteur à combustion interne. Cependant cet inconvénient pourrait se réduire dans le cas d'un « système hybride » (le moteur marche alors à régime constant, la modulation de puissance étant prise en charge par le système électrique), mais ils sont encore rares ;

➤ Prix élevé : n'ayant aujourd'hui que peu d'applications en grande série, contrairement au moteur à combustion interne, il est bien plus cher ; de plus, pour la même raison, les industriels ne lui accordent pas le même intérêt en termes de recherche et développement, ce qui ne lui permet pas de combler son retard (en supposant cela possible). Cette situation pourrait évoluer favorablement avec le développement des recherches sur la production d'énergie et particulièrement sur celles concernant les énergies renouvelables [2, 4, 5, 6].

## **II.6 Évolution du moteur Stirling**

Le Dr Stirling a inventé le moteur de Stirling en 1880. Au cours des 100 années à venir il a trouvé des applications en espace, médical, transport et méthane brûlant des emplacements de rebut. Les changements mineurs se sont produits, mais rien de neuf d'une conception éventuelle.

Alors dans les années 80 le microprocesseur est venu sur le marché et a ajouté la

commande précise au moteur de Stirling. Le moteur de Stirling est un moteur thermique et donc environ des 80 à un 90% efficaces. En outre le moteur de base se compose de 2 cylindres avec un échangeur de chaleur au milieu. Ainsi en chauffant un cylindre, l'autre va froid en raison de l'échangeur de chaleur au milieu. Kockums ab marin, Malmö, Suède a lancé un sous-marin en 1978 avec 1000 heures sur la puissance de Stirling en sa première année.

C'était un grand pas en avant avec les cylindres multiples et toute autre technologie. Ce moteur a été alors utilisé dans des sous-marins dans tout le monde occidental. En outre pendant ce temps la NASA l'a employé pour des expériences de l'espace, puisque le moteur est presque silencieux en courant. Actuellement une compagnie des USA a été formée pour construire les moteurs des USA Stirling, avec le moteur nommé Inc. de Stirling et a revendiqué des droits de propriété intellectuelle, quand copyright avait expiré en 1930. C'est quelque chose que les organismes des USA semblent faire sous la menace de l'action judiciaire.

En juillet 1992 « le monde de l'électronique de magasin » plus « monde sans fil » a eu un article intitulé la « électricité hors du magnétisme » quel DR Harold Aspden et John que Scott Strachan avait produit un moteur à semi-conducteurs de Stirling. Ceci a causé beaucoup de renversement avec les chercheurs de cellules de carburant.

La prochaine étape d'évolution avait lieu vers la fin des années 90 avec des moteurs de Nanotechnologie Stirling, cela pourrait être implanté dans les pièces humaines et être relié à leur système nerveux et obtenir leurs mains ou jambes se déplaçant encore. Ainsi de conduire un vélo de poussée à sa position actuelle, le moteur de Stirling s'est déplacé par un certain nombre d'étapes évolutives

Combiné avec les cellules actionnées solaires il pourrait faire à la voiture électrique du bon poids un produit viable. Avec les applications il a été déjà appliqué là n'est aucune vraie limite à où il pourrait être appliqué après. Son inventeur serait totalement surmonté avec sa position actuelle [34].

En conséquence de cela et d'autres évolutions récentes, l'autrefois perspectives faibles pour l'application des moteurs Stirling dans les pays en développement ont amélioré énormément. Des plans sont maintenant en mouvement pour apporter un nouveau design du moteur Stirling en production commerciale dans une forme beaucoup améliorée. Cette version moderne sera beaucoup plus puissante pour son poids et beaucoup plus efficace;

dans le même temps, il sera aussi silencieux, facile à utiliser, fiable et robuste que le moteur d'origine. D'autres modèles, capables de générer de l'électricité, le refroidissement, le pompage de l'eau, et de servir dans d'autres moyens utiles pas possible avec l'ancien moteur à air chaud, sont également l'entrée en production commerciale [35].

## **II.7 Conclusion**

Le moteur Stirling est la seule alternative simple et fiable au moteur à combustion externe. C'est une alternative bénéfique parce que sa fiabilité et son coût d'entretien sont inégalables. Son fonctionnement est facilement automatisable. Son coût, même s'il est plus élevé qu'un moteur conventionnel, s'amortit plus facilement parce que ses frais de fonctionnement sont quasiment nuls et ses rendements bien plus élevé.

Le moteur Stirling est donc un système de production d'énergie à bon rendement connu comme tel depuis plus d'un siècle. Cependant il est, comme de nombreux autres systèmes, resté dans l'ombre du fait du prestige de Watt et de sa machine à vapeur. De nos jours, grâce aux nouveaux impératifs énergétiques et écologiques, cette injustice pourrait bien être réparée. En effet, grâce à son bon rendement et à sa propreté, le moteur Stirling est d'ores et déjà une des principales solutions d'avenir.

Chapitre III :

La partie pratique



### III.1 Introduction :

L'énergie apportée par certain moteur contribue à résoudre certain problème énergétique, le moteur Stirling est choisie pour cela.

Ce moteur fonctionnant à partir d'une source de chaleur externe apportant une énergie propre durable comme celle apporté par d'autre énergie renouvelable.

A partir de ces données nous avons l'idée de commencer notre travail avec une maquette qui représente le moteur Stirling et qui peut nous aider à comprendre le fonctionnement réel de ce moteur.

Parallèlement avec tout ça et à partir des notions mentionné au chapitres précédents nous avons l'idée de convertir un compresseur à moyenne piston ou plutôt compresseur en V en moteur Stirling de type alpha.

Ce chapitre est divisé en deux parties :

La partie A qui contient la fabrication de la maquette ;

La partie B qui présente la transformation du compresseur en un moteur de Stirling.

### III.2 Partie A :

Le moteur Stirling a longtemps captivé des inventeurs et des rêveurs [36]. Nous exposons les plans complets pour la construction et l'exploitation d'un modèle à deux-cylindre qui fonctionne sur presque n'importe quelle source de chaleur à hautes températures.

Les moteurs Stirling sont des moteurs à combustion externes, ce qui signifie qu'aucune combustion n'a lieu à l'intérieur du moteur et il n'y a aucun besoin de soupapes d'admission et d'échappement. Puisque le cycle de Stirling emploie une source extérieure de chaleur, elle peut utiliser tout ce qui est disponible comme chaleur comme l'énergie solaire, l'essence ou plutôt le gaz.

Notre moteur Stirling se compose de deux pistons immergés dans deux boîtes de conserve. Une boîte contient l'eau chaude et l'autre froide.

La différence de la température entre les deux blocs provoque le fonctionnement du moteur. La différence dans les températures chaudes et froides latérales crée des variations de pression d'air et de volume à l'intérieur du moteur. Cette différence de pression tourne un

système des poids à inertie et des liens mécaniques, qui commandent à son tour la pression et le volume du cylindre d'air.



*Figure III-1 : La maquette réaliser [37].*

Cette maquette ci-dessus représente notre réalisation primaire qu'est composée à partir de :

- Deux boîtes de conserves représentent les cylindres, ils sont connectés entre eux avec un déplaceur ;

- Deux pistons à partir de deux canettes.
- Un vilebrequin en métal relié avec deux polies raccordé par deux barrières en bois ces derniers portent les pistons. Toute cette installation est montée sur un support en bois.



**Figure III-2** : les cylindres avec ses pistons [37].



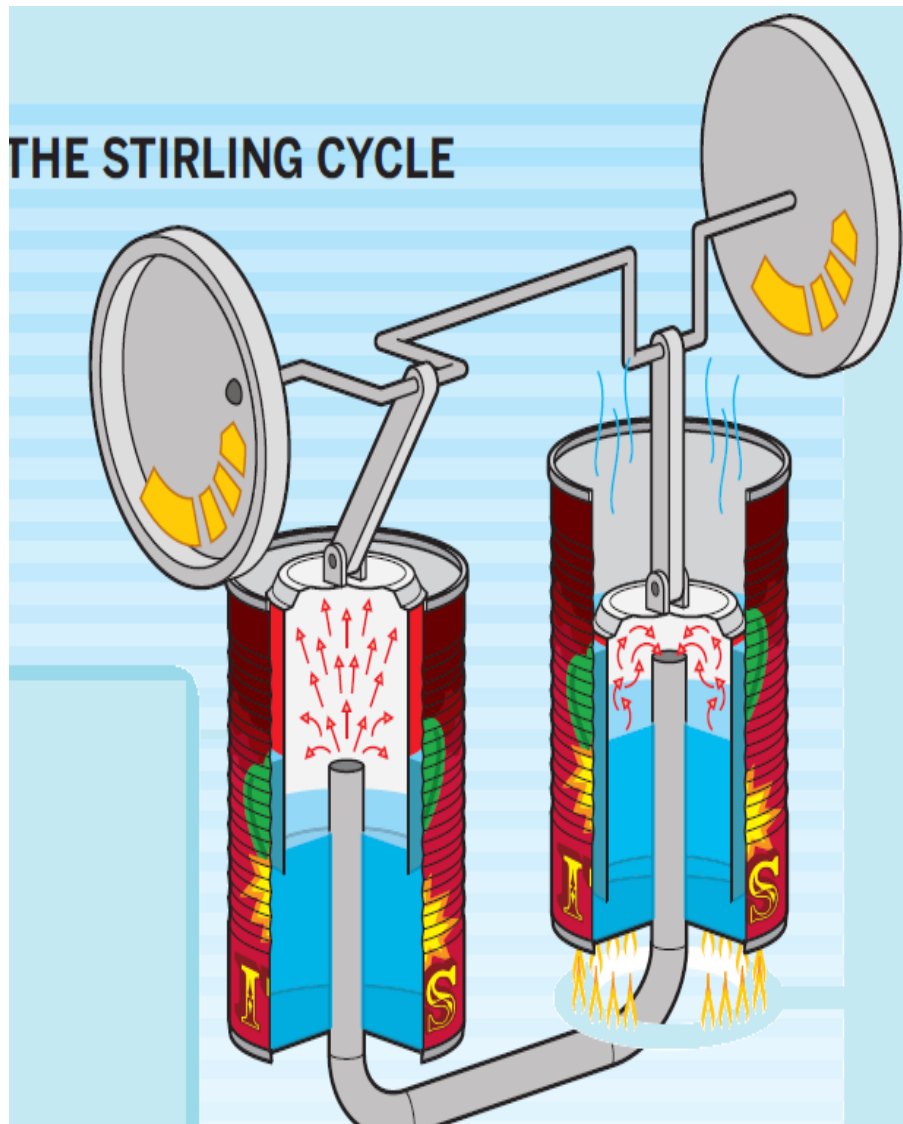
*Figure III-3 : le déplaceur [37].*

La pièce qui relie les deux cotés chaud et froid à travers les cylindres c'est le déplaceur, son rôle est d'obliger le gaz dégager par la source chaude puis vers la source froide.



*Figure III-4 : le vilebrequin et la polie [37].*

L'énergie thermique dégager de la partie inférieur va se transformé en énergie mécanique qui va tourner le vilebrequin qui fera tourner les deux polis.



**Figure III-5 :** le fonctionnement de Stirling alpha [37].

Cette représentation montre le fonctionnement et les démarrages du moteur Stirling. Chaque moteur de chaleur travaille avec un cycle. Dans notre cas le cycle fermé concerné est de Stirling. Quand la chaleur est appliquée à un fluide de fonctionnement ce dernier subit un changement de sa pression et son volume. L'énergie thermique obtenue va donner un mouvement au piston puis cette énergie se transforme en énergie mécanique qui tourne l'objet mécanique.

### III.3 Application de générateur de moteur Stirling :

Cette maquette ci-dessous représente un générateur de moteur Stirling, elle est simple à réaliser. Il suffit des petits moyens pour le fabriquer et sa mise en marche. Ce moteur utilise l'air qui est chauffé et refroidi. Pour permettre à l'air d'être chauffé et refroidi dans le cylindre, ce dernier peut contenir un déplaceur qui ressemble à un piston libre qui peut se déplacer et forçant l'air dans le moteur. Lorsque l'air est chauffé, il pousse le diaphragme (ballon) vers l'extérieur qui transforme les manivelles. Quand le piston descendre l'air est près du sommet, où il est refroidi causant la compression d'air, qui bien sûr se déplace le piston vers le haut permettant à l'air d'être chauffée au fond et cette action va se répète encore et encore.



*Figure III-6 : maquette de générateur de moteur Stirling [37].*

### III.3.1 La partie thermique et mécanique :

Pour mieux comprendre les différentes étapes pour avoir ce petit moteur à air chaud nous allons voir :

- Pour préparer un cylindre il faut ramener une canette de boisson puis couper le morceau supérieur pour avoir un cylindre ouvert.



*Figure III-7 : la fabrication de du cylindre [37].*



- Le piston est facile à réaliser à partir de la laine fine de fil d'acier roulée et à l'intérieur nous plongeons un trombone d'une façon qui va porter et relier le piston par le diaphragme et le vilebrequin.



*Figure III-8 : la préparation du piston [37].*

- Le vilebrequin sa réalisation est très difficile et demande beaucoup de précision, pour le fabriquer nous pouvons utiliser un fil de cuivre ou un fil de fer. Avec la pince nous plions le fil pour avoir 90 degrés entre les deux temps qui permettent la permutation de tournage entre le déplaceur et le diaphragme, qui donne au moteur le mouvement mécanique.



*Figure III-9 : le vilebrequin du moteur [37].*

- Le diaphragme de ce moteur est constitué d'un ballon. Elle est renforcée par un morceau de tube interne au centre d'abord couper le cou à un ballon et s'étendent de la fin de la bulle sur le dessus d'une canette. Une fois le diaphragme est placé sur la canette, nous pouvons utiliser une épingle de dessin pour percer un trou dans le centre du diaphragme pour passer le fil de piston et puis relie le avec le vilebrequin.



*Figure III-10 : le diaphragme [37].*

### **III.3.1.1 Le fonctionnement de la partie mécanique :**

Après le montage des objets nécessaire nous plaçons le moteur sur une source chaude par exemple une chandelle puis nous ajoutons de l'eau froide dans la partie qui contient le diaphragme, et pour faire fonctionner ce petit moteur nous lui donnons un coup de pouce pour le lancer. La température de l'air interne va ce augmenté qui implique la dilatation de ce dernier qui va pousser le piston vers le haut, automatiquement le diaphragme va se gonfler et donne un premier mouvement au vilebrequin. La deuxième phase de changement de pression

va nous donner une compression de l'air qui bouge le déplaceur vers le bas et c'est un deuxième mouvement et ainsi de suite.



*Figure III-11 : le montage de vilebrequin, diaphragme et polie [37].*

### **III.3.1.2 La partie électronique :**

Pour générer l'électricité nous allons relier le moteur par un alternateur qui va transférer l'énergie mécanique en un 'énergie électrique. Cette étape est suivie par une série de condensateurs pour stocker de l'énergie qui sera utilisé pour alimenter un appareil électronique.



**Figure III-12** : l'alternateur relié avec le moteur Stirling [37].

La figure suivante nous montre l'application d'un générateur de moteur Stirling ou se dernier est relie avec l'alternateur puis un ampèremètre qui contrôle le courant et enfin un poste radio qui marche avec cette énergie propre.



*Figure III-13 : l'application du générateur avec un poste radio [37].*

### **III.3.2 Conclusion :**

Par des simples moyens nous pouvons réaliser un matériel qui résoudra les problèmes énergétique actuels.

Le peu des matériel et les contraintes croisées pendant notre expérience nous a pas permis d'avoir des résultats plus précis.

### **III.4 Partie B :**

Ce travail porte sur l'étude et la mise au point d'un moteur de Stirling convertit à partir d'un compresseur a moyen piston.

La ressemblance entre l'architecture de ce compresseur et le moteur de Stirling de type alpha nous a permis de le transformer ce compresseur en moteur Stirling.



*Figure III-14 : le compresseur en phase d'élimination des soupapes.*

La première étape consiste à éliminer les soupapes pour démontrer la différence entre le compresseur d'air et le moteur Stirling car dans le fonctionnement de compresseur les soupapes ont pour rôle d'effectuer l'aller et le retour de gaz par contre dans notre cas le moteur Stirling n'utilise pas des soupapes et le gaz circule dans les deux sens.





*Figure III-15: les pistons en mouvement.*

Le mouvement manuel de la poulie montre le déplacement des pistons dans les deux côtés, qui nous a permis de marquer le point haut et bas de grand piston.



*Figure III-16 : la phase d'assemblage.*

Cette étape d'assemblage demande une grande patience plus beaucoup d'énergie physique pour placer les têtes des cylindres et bien serrer les vis, après les cylindres à été remplie avec le gaz  $\text{CO}_2$ , cela demande des précautions pour éliminer les pertes et avoir un bon fonctionnement.



*Figure III-17 : Phase d'échauffement.*

Comme une supposition primaire nous avons essayé de chauffer la partie supérieure du moteur pour augmenter la température du gaz qui conduit à élever sa pression. Normalement l'augmentation de la pression et la différence de température entre les deux côtés de moteur pousse le rand piston puis tourne la poulie ; l'échauffement appliqué était insuffisant pour faire déplacer le piston.



*Figure III-18 : la création de différence de température.*

Dans la deuxième supposition nous avons commencé par le refroidissement des différentes parties du moteur pour créer une grande différence de température avant d'appliquer aucun échauffement, puis nous avons donné une pousée à la polie pour aider le piston à se déplacer, enfin nous avons chauffé la partie supérieure de cylindre qui contient le grand piston de la partie chaude.

### **III.4.1 Conclusion :**

Après les étapes d'échauffement et de refroidissement, nous avons constaté que le moteur tourne en suivant les différentes étapes décrites ci-dessus, sa taille, sa complexité et le manque de moyen nous ont confrontés.

# Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire constitue à donner l'idée d'étudier profondément la possibilité de transformer un compresseur à moyen piston en un moteur à air chaud en moteur dite Stirling.

L'étude général des différent types des moteurs a air chaud nous a démontré on détail le fonctionnement de ces moteurs.

Pour arriver à cette conclusion nous étaients astreints a étudié l'évolution historique de ces moteurs dans un contexte industrielle.

Notre constatation nous révèle que l'architecteur des moteurs thermiques peuvent être adapté à d'autre type de moteur, par des simple moyens nous somme arriver a réalisé un proto type que nous avons envisagé pour confectionner un moteur Stirling.

En plus de ce travail nous avons essayé d'adapter un compresseur à moyen piston pour arriver à démontrer que cela est possible dans l'industrie dans un avenir proche.

# Bibliographie



- [1] <http://hebergement.u-psud.fr/lpa/spip/img/pdf/tpthermomoteurstirling.pdf>
- [2] 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.
- [4] [http://fr.wikipedia.org/wiki/moteur\\_stirling](http://fr.wikipedia.org/wiki/moteur_stirling).
- [5] boulant Anthony, Vivet Nicolas, le moteur de Stirling : conception et performances, université du maine (le mans), 2003.
- [6] Maier Christophe, Gil Arnaud, Aguilera Rafael, Shuang li, Yu Xue, stirling engine, university of Gävle, 11/11/2007.
- [7] jp Vernet président d'eosgen-technologies, les moteurs Stirling:  
une véritable alternative aux méthodes classiques de conversion de l'énergie des biogaz.
- [8] moteur Stirling, département génie thermique et énergie de lorient, université de Bretagne sud, année 2002 / 2003.
- [9] <http://www.stirlinginternational.org/allegati/docs/booklet.pdf>
- [10] <http://ressources.univ-lemans.fr/acceslibre/um/pedago/physique/02/thermo/stirling.html>.
- [11] <http://membres.multimania.fr/ascarnot/>
- [12] <http://www.moteurairchaud.com/ericsson/avantages.php>
- [13] <http://www.moteurairchaud.com/manson/histoire.php>
- [14] 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.
- [15] le moteur à air chaud, maison de la science, janvier 2004.

- [16] Gunther Cronenberg, the Stirling engine, Uppsala University, mars 2005.
- [17] [http://www.mpoweruk.com/stirling\\_engine.htm](http://www.mpoweruk.com/stirling_engine.htm)
- [18] <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/fpse.htm>
- [19] <http://fr.ekopedia.org/quasiturbine>.
- [20] <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/5247218/5251870/05251919.pdf?arnumber=5251919>.
- [21] frank Kyei-manu, Aloysius Obodoako, design and development of a liquid piston Stirling engine, may 2006.
- [http://www.engin.swarthmore.edu/academics/courses/e90/2005\\_6/e90reports/fk\\_ao\\_final.pdf](http://www.engin.swarthmore.edu/academics/courses/e90/2005_6/e90reports/fk_ao_final.pdf)
- [22] Bancha Kongtragool , Somchai Wongwiset , a review of solar-powered stirling engines and low temperature differential Stirling engines, renewable and sustainable energy reviews,2003.
- [23] <https://sites.google.com/site/techba0131g3/le-moteur-stirling/les-applications-du-moteur-stirling>
- [24] [http://www.pureenergysystems.com/news/2005/08/119600147\\_edison\\_stirling\\_largest\\_solar\\_index.html](http://www.pureenergysystems.com/news/2005/08/119600147_edison_stirling_largest_solar_index.html)
- [25] [http://www.projetstirling.fr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=74&itemid=28](http://www.projetstirling.fr/index.php?option=com_content&task=view&id=74&itemid=28)
- [26] Stéphane Thiers, bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, thèse pour obtenir le grade de docteur de l'école nationale supérieure des mines de paris spécialité "énergétique", novembre 2008.
- [27] Projet Européen Educogen. (2001). a guide to cogeneration.  
<http://www.cogen.org/projects/educogen.htm>
- [28] Dentice d'accadia, m., Sasso, m., Sibilio, s., Vanoli, l. (2003). microcombined heat and power in residential and light commercial applications, applied thermal engineering.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431103000309>

[29] pascal Stouffs, les moteurs à apport de chaleur externe, université de Pau et des pays de l'adour laboratoire de thermique, énergétique et procédés latep, mars 2009.

[30] : <http://archive.greenpeace.org/ozone/excuse/7excuse.html>

[31] [www.kockums.se](http://www.kockums.se)

[32] François Lanzetta, Julien Boucher, Philippe Nika, étude et réalisation d'une pompe à eau fluidyne, institut femto-st, cnrs umr 6174, département crest parc technologique, 2 avenue Jean Moulin, 90000 Belfort, décembre 2004.

[33] <http://artisan.karma-lab.net/msi-refroidit-chaleur>

[34] <http://www.fruitymag.com/%c3%a9volution-du-s70365.htm>

[35] Frank Kyei-Manu, Aloysius Obodoako, solar Stirling-engine water pump proposal draft, November 2005.

[36] William Gurstelle, tow can Stirling engine.

[37] <http://www.scraptopower.co.uk/can-stirling/stirling-generator>