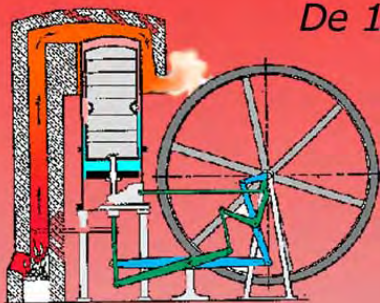


De 1816...



Le moteur Stirling

et autres moteurs à air chaud

**Une solution aux problèmes énergétiques
et environnementaux actuels.**

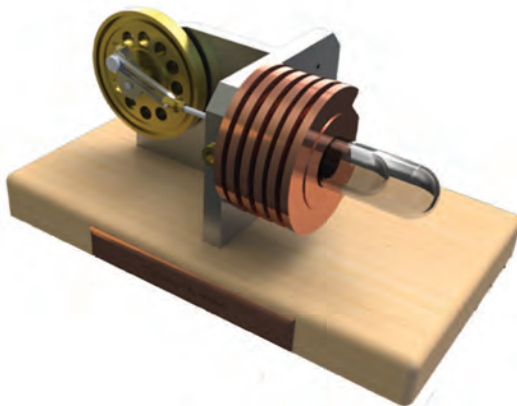
Pierre Gras



... à 2010

Le moteur Stirling

et autres moteurs à air chaud



Une solution aux problèmes énergétiques
et environnementaux actuels

Pierre Gras
16 mars 2010

Table des matières

I	Le moteur Stirling dans l’Histoire	19
1	Le dix-neuvième siècle et la mécanisation	21
1.1	Le dix-neuvième siècle et la révolution industrielle	21
1.2	La mécanisation et la motorisation industrielle	22
2	Robert Stirling (1790-1878)	27
2.1	La vie de Robert Stirling	27
2.2	Les inventions de Robert Stirling	28
2.2.1	Le moteur à air chaud	28
2.2.2	L’économiseur ou régénérateur	30
3	Le vingtième siècle et le moteur Stirling	33
3.1	Le tout début du siècle	33
3.2	L’épopée de la société Philips	34
3.3	Les dernières années du vingtième siècle	37
3.3.1	La construction navale	37
3.3.2	L’industrie automobile	37
3.3.3	Le moteur à piston libre de William Beale	38
4	Le vingt-et-unième siècle et le moteur Stirling	39
II	Comment ça marche ?	43
5	Les principes de fonctionnement d’un moteur Stirling	45
5.1	Les quatre phases élémentaires	46
5.1.1	Un chauffage isochore (à volume constant)	46
5.1.2	Une détente isotherme (à T° constante)	46
5.1.3	Un refroidissement isochore	47

5.1.4	Une compression isotherme	47
5.2	Le rôle du déplaceur	48
5.2.1	Chauffage isochore avec déplaceur	48
5.2.2	Détente isotherme avec déplaceur	49
5.2.3	Refroidissement isochore avec déplaceur	49
5.2.4	Compression isotherme avec déplaceur	50
5.3	Le diagramme PV	51
5.3.1	Les variations de volume	51
5.3.2	Le diagramme (P,V)	51
6	Les différents types de moteur	53
6.1	Moteur type alpha	53
6.1.1	Les quatre phases élémentaires	54
6.1.2	Le diagramme (P,V)	56
6.2	Moteur type Bêta	58
6.2.1	Les quatre phases élémentaires	58
6.2.2	Le diagramme (P,V)	60
6.3	Moteur type Gamma	62
6.3.1	Les quatre phases élémentaires	62
6.3.2	Le diagramme (P,V)	64
6.4	Autres moteurs	67
6.4.1	Le moteur à piston libre dit Martini	67
6.4.2	Le moteur à déplaceur libre ou Ringbom	68
6.4.3	Le moteur à piston et déplaceur libres (free piston Stirling engine)	69
6.4.4	Le moteur à double effet	70
6.4.5	Le moteur rotatif	70
6.4.6	Le moteur thermo-acoustique	71
6.4.7	Le générateur thermodynamique	71
6.4.8	Le fluidyne	72
III	Applications	73
7	Avantages et inconvénients	75
7.1	Les avantages du moteur Stirling	77
7.2	Les inconvénients du moteur Stirling	78

8	Énergie solaire et moteur Stirling	79
8.1	Présentation générale	79
8.2	Les concentrateurs de rayonnement solaire	80
8.2.1	Les capteurs cylindro-paraboliques	81
8.2.2	Les réflecteurs paraboloidaux	82
8.3	Les réalisations actuelles ou en projet	82
8.3.1	Applications à usage domestique	82
8.3.2	Installations de type industriel	83
9	Micro-cogénération	85
9.1	Qu'est-ce que la cogénération ?	85
9.2	Intérêt de la cogénération	85
9.3	Le moteur Stirling et la cogénération	87
10	Motorisation de véhicules	89
10.1	Sur terre : l'automobile	89
10.2	Sur mer : les sous-marins et les bateaux	90
10.3	Dans les airs : les avions	91
11	Pompe à chaleur - Réfrigération	93
11.1	Production de chaleur	94
11.2	Production de froid	95
11.2.1	L'utilité des grands froids	95
11.2.2	Le cycle de Stirling dans la production de grands froids	96
12	Rejets thermiques industriels	97
13	Maquettes - Modélisme	101
13.1	Les maquettes à monter	102
13.2	Les plans sur le ouëb	102
13.3	Les constructions personnelles	102
14	Autres applications	105
14.1	Domaine spatial	105
14.2	Domaine de l'informatique	106
14.3	Pompage d'eau	106

IV	Théorie	109
15	Éléments généraux de théorie	111
15.1	Les principes de base de la thermodynamique	112
15.1.1	La loi de Boyle-Mariotte, la loi d'Avogadro . . .	112
15.1.2	Le diagramme PV d'un cycle thermodynamique ou diagramme de Clapeyron	112
15.1.3	Le rendement d'un cycle thermodynamique . . .	114
15.1.4	Les différents cycles thermodynamiques	114
15.2	Cinématique	117
15.2.1	Le système bielle-manivelle simple	117
15.2.2	Le système bielle-manivelle avec deux équipages mobiles	118
15.2.3	Utilisation de ces valeurs de volume	118
15.3	Calculer son moteur	119
15.3.1	Détermination des volumes	119
15.3.2	Détermination des températures	119
15.3.3	Détermination de la pression	119
15.4	Propagation de la chaleur dans un gaz	121
15.4.1	Les principes expérimentaux	121
15.4.2	Les équations	122
15.4.3	Et nos moteurs dans tout cela?	125
16	Éléments de théorie spécifiques au moteur Stirling	127
16.1	Rendement du cycle de Stirling	128
16.1.1	Travail net récupéré W_{net}	128
16.1.2	Energie calorifique fournie Q_{totale}	129
16.1.3	Rendement du cycle	129
16.2	Régénérateur	131
16.3	Pompe à chaleur et machine frigorifique	134
16.3.1	Pompe à chaleur	135
16.3.2	Machine frigorifique	136
16.3.3	Quelques remarques	137
V	Autres moteurs à air chaud	139
17	Les différents moteurs à air chaud	141
17.1	Le moteur Ericsson	142
17.1.1	Biographie de John Ericsson	142
17.1.2	Principes de fonctionnement	143

17.1.3	Le diagramme Pression-Volume	146
17.1.4	Rendement	146
17.1.5	Avantages et inconvénients	148
17.2	Le moteur Manson	150
17.2.1	Principes de fonctionnement	150
17.2.2	Le diagramme PV	152
17.2.3	Théorie	153
17.2.4	Applications	153
VI	Conclusion	155
18	Épilogue	157
18.1	Le rôle des États	158
18.2	Le rôle des citoyens	158
18.3	Les raisons d'espérer	159
18.4	Et vous dans tout cela ?	160
VII	Annexes	163
A	Le dix-neuvième siècle	165
A.1	La physique et la chimie	165
A.2	L'électricité et ses applications	166
A.3	Les transports	166
A.4	La mécanisation	166
A.5	Autres domaines	167
B	Sous-marin SAGA	169
B.1	Principaux paramètres	170
B.2	Stockage de gaz et d'énergie	170
B.3	Les moteurs Stirling AIP	170
C	Glossaire	173
	Bibliographie	179
	Index	181

Chapitre 1

Le dix-neuvième siècle et la mécanisation

1.1 Le dix-neuvième siècle et la révolution industrielle

Le moteur Stirling, objet de ce livre, a été inventé au début du dix-neuvième siècle. Au cours de ces années, on assista à une réelle révolution des sciences et techniques¹. Les inventions et découvertes de cette époque sont nombreuses et couvrent bien des domaines. Les principales sont recensées en annexe A, page 165.

Penser que ces différentes innovations se sont produites indépendamment - ce n'est certainement pas le cas - reviendrait à sous-estimer l'émulation, la synergie, qui se créent entre chercheurs et inventeurs durant ces périodes. Les échanges entre ces acteurs, tant sur le plan théorique que sur le plan de la méthodologie, se sont révélés primordiaux.

Pour ce qui nous intéresse dans ce livre, on pourra aussi constater qu'il y eut une concentration géographique de ces savants en Grande-Bretagne.

Difficile, par exemple, d'imaginer le développement des machines à

1. L'appellation « révolution industrielle » est contestée par certains, avec arguments à l'appui, mais ce débat n'est pas le nôtre aujourd'hui. Demain peut-être.

Chapitre 3

Le vingtième siècle et le moteur Stirling

3.1 Le tout début du siècle

Comme nous l'avons vu précédemment, beaucoup de moteurs Stirling furent vendus au début du vingtième siècle, jusqu'en 1920 environ. Comme il a été déjà dit, ces fabrications s'adressaient en priorité aux agriculteurs pour pomper l'eau et irriguer leurs champs. D'autres applications, plus marginales, virent le jour sur des bateaux, dans des entrepôts, des ateliers ou même pour entraîner des machines à coudre[1]. N'oublions pas qu'en ce début de siècle la distribution d'électricité était encore embryonnaire.

Ces moteurs étaient de même facture que ceux fabriqués au cours du siècle précédent : conception, choix des matériaux, performances identiques¹.

C'est pourquoi, si vous n'y voyez pas d'inconvénient, nous ferons commencer le vingtième siècle en 1937 lorsque le société néerlandaise Philips décida de s'investir dans le moteur Stirling (cette appellation se généralisa à partir de ce moment là et remplaça celle de moteur à air chaud).

1. L'arrivée de nouveaux matériaux, dont l'acier inox, correspond à cette période. Avec du recul, on peut affirmer que ces matériaux plus nobles auraient permis de résoudre les problèmes inhérents aux moteurs Stirling : résistance, corrosion, usinabilité...

5.1 Les quatre phases élémentaires

5.1.1 Un chauffage isochore (à volume constant)

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 alors que son volume reste constant.

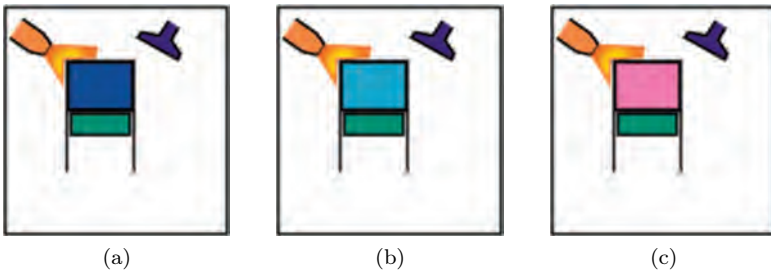


FIGURE 5.1 – Chauffage isochore

5.1.2 Une détente isotherme (à T° constante)

Le volume s'accroît alors que la pression diminue. C'est pendant cette transformation que l'énergie motrice est produite. Pour que celle-ci soit maximale, on continue de chauffer pour maintenir la température du gaz constante, sinon celle-ci diminuerait.

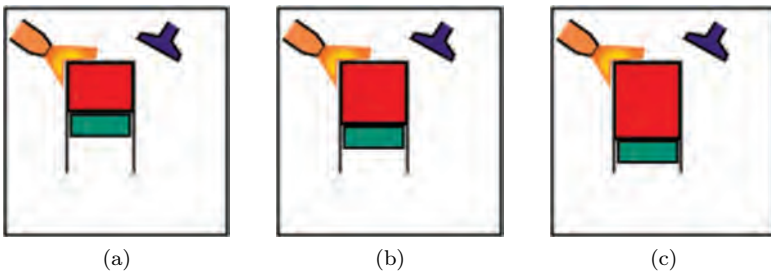


FIGURE 5.2 – Détente isotherme

5.1.3 Un refroidissement isochore

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

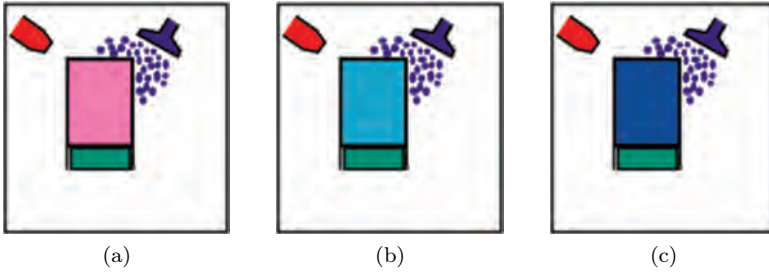


FIGURE 5.3 – Refroidissement isochore

5.1.4 Une compression isotherme

La pression du gaz augmente au fur et à mesure que son volume diminue. On doit fournir de l'énergie mécanique pendant cette période. Pour éviter que le gaz ne s'échauffe, on continue à le refroidir pour le maintenir à sa température minimale.

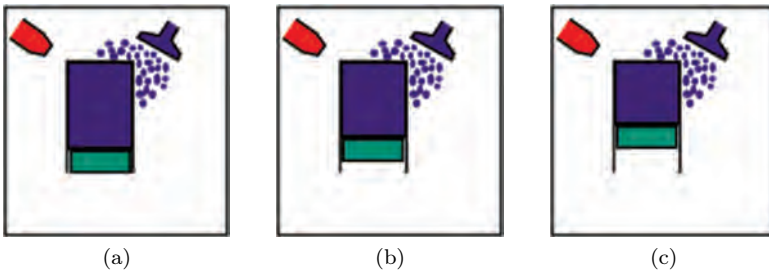


FIGURE 5.4 – Compression isothermique

C'est la fin du cycle. Les conditions sont réunies pour recommencer de nouveau un chauffage isochore.

Chapitre 9

Micro-cogénération

9.1 Qu'est-ce que la cogénération ?

La cogénération est la production simultanée de deux formes d'énergie à partir d'une source d'énergie primaire. Dans le cas le plus fréquent, on veut produire de l'électricité et des calories pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, à partir de bois sous différentes formes, de gaz, de soleil...

L'intérêt de la cogénération réside dans le rendement d'une telle installation comme nous allons le voir ci-dessous.

On parle souvent de micro-cogénération pour qualifier un usage domestique par rapport à la cogénération qui concerne plutôt de grosses installations industrielles de production d'énergie.

9.2 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. 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 %).

Chapitre 10

Motorisation de véhicules

Lorsqu'on évoque le moteur Stirling, une des premières questions à être posée est "Pourquoi n'y en a-t-il pas un sur ma voiture?".

C'est une bonne question qui peut s'étendre à d'autres véhicules terrestres mais aussi à l'avion et au bateau.

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 à placer en lui.

10.1 Sur terre : l'automobile

Ford Torino L'utilisation du moteur Stirling comme moyen de propulsion d'une automobile fait partie du passé (mais peut-être aussi de l'avenir).

La société Philips a étudié au cours des années 1940 à 1980 diverses applications du moteur Stirling. Une de celles-ci consistait à équiper une Ford Torino. Malheureusement, cet essai ne fut pas couronné de succès et le projet abandonné.

Les raisons furent probablement liées à la difficulté d'avoir un moteur capable de faire varier rapidement sa puissance et son régime, qualités indispensables dans ce domaine. Son coût a probablement constitué une difficulté face à la standardisation des moteurs thermiques traditionnels.

On regrettera l'abandon de ce projet car le prototype réalisé en 1976 développait 170 ch à 4 000 tr/min. Ce moteur était un 4 cylindres, son

Chapitre 11

Pompe à chaleur - Réfrigération

Il peut paraître curieux, au premier abord, de penser qu'un moteur puisse tenir un rôle central dans le domaine de la production de froid ou de chaleur. Quand il s'agit du moteur Stirling, il n'y a rien d'incongru !

En effet, le cycle de Stirling est un cycle réversible. Ceci veut dire qu'on peut obtenir des choses très différentes d'un moteur conçu selon ce cycle.

- On peut fournir des calories à ce moteur pour en obtenir une production d'énergie mécanique. Ce point là est banal, c'est la définition d'un moteur.
- Mais on peut, à l'inverse, apporter de l'énergie mécanique à ce même moteur, l'obliger à tourner, afin qu'il nous donne en contrepartie des calories ! Là, on appellera notre appareil une pompe à chaleur.
- Dans cette dernière configuration, ce moteur peut également nous libérer de calories non souhaitées. On nommera alors notre dispositif un réfrigérateur¹, un congélateur, un dispositif cryogénique...

Avant d'examiner la place du moteur Stirling dans ces deux derniers domaines, visualisons le principe d'une pompe à chaleur à l'aide du schéma ci-dessous :

1. Le réfrigérateur que tout un chacun possède chez lui utilise un autre cycle : le cycle de Rankine basé sur l'évaporation puis la condensation d'un élément chimique. Quand ce corps s'évapore, il absorbe des calories. Quand il se condense, il en restitue.

Examinons maintenant un cycle quelconque à partir de son diagramme de Clapeyron ou diagramme PV :

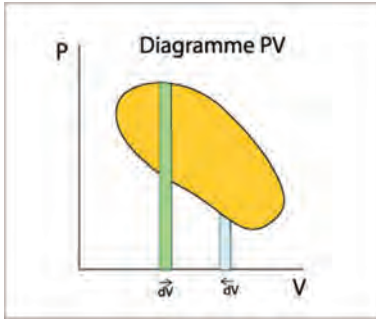


FIGURE 15.1 – Diagramme PV d'un cycle quelconque

L'aire colorée à l'intérieur de la courbe décrivant le cycle est représentative du travail recueilli au cours d'un cycle. La démonstration est apportée ci-après.

A un instant donné, la force qui s'exerce sur le piston est : $F = SP$ 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.

$$dW = F dy \text{ ou } dW = SP dy$$

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

$$dW = P dV$$

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

Le travail est positif quand le volume croît, $dV > 0$. Le travail est négatif quand le volume diminue, $dV < 0$.

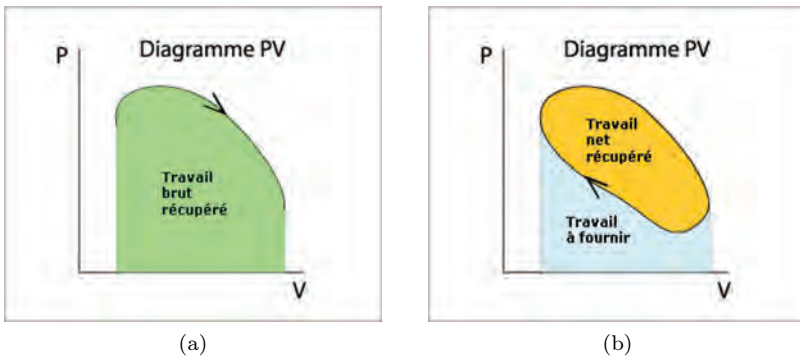


FIGURE 15.2 – Bilan énergétique d'un cycle quelconque

16.1 Rendement du cycle de Stirling

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 au cours du chauffage isochore et de la détente isotherme.

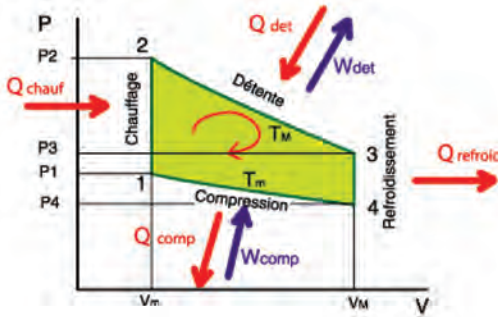


FIGURE 16.1 – Bilan énergétique d'un cycle de Stirling

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

$$W_{net} = W_{det} + W_{comp}$$

W_{comp} sera négatif quand on le calculera (voir ci-dessous).

$$Q_{totale} = Q_{chauf} + Q_{det}$$

16.1.1 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) :

$$W_{net} = W_{det} + W_{comp}$$

$$W_{net} = \int_{det} P dV + \int_{comp} P dV$$

$$\text{avec } P = \frac{nRT}{V}$$

ce qui donne :

$$W_{net} = \int_{det} \frac{nRT_{max}}{V} dV + \int_{comp} \frac{nRT_{min}}{V} dV$$

$$W_{net} = nR(T_{max} - T_{min}) \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

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

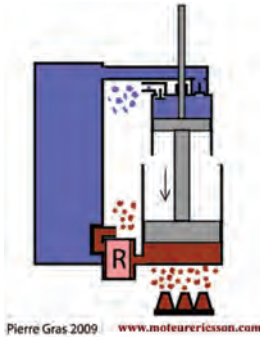


FIGURE 17.3 – Les 2 pistons descendent

L'air extérieur frais pénètre dans le cylindre en partie supérieure pendant qu'en partie inférieure s'évacue l'air chaud

Comme on peut le voir ci-contre, 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.

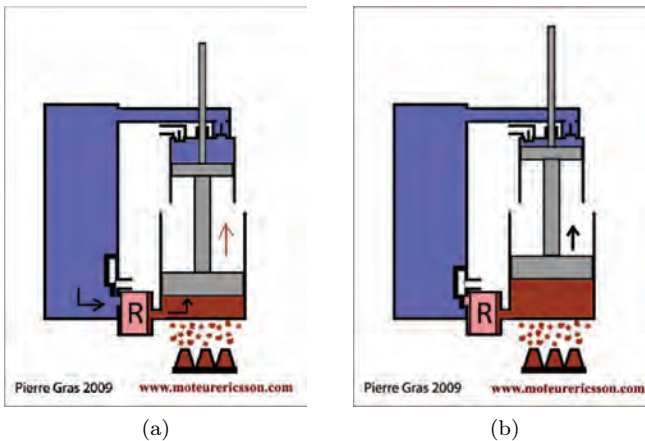


FIGURE 17.4 – Remontée des deux pistons

17.2 Le moteur Manson

Le moteur Manson est totalement inconnu. Alors pourquoi s'y intéresser ici ?

Peut-être par caprice de l'auteur de cet ouvrage. Ou bien parce que ce moteur, d'une extrême simplicité, peut donner du plaisir aux amateurs de maquettes qui marchent. A moins qu'il ne constitue une solution simple pour produire de l'énergie mécanique ou électrique à des personnes ayant peu de moyens techniques mais beaucoup de sources d'énergie gratuites.

A vous de choisir.

17.2.1 Principes de fonctionnement

Le cycle thermodynamique du moteur Manson est dans son principe très simple : il comprend 4 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. (Vous en comprendrez la raison à la fin de cette partie!)

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

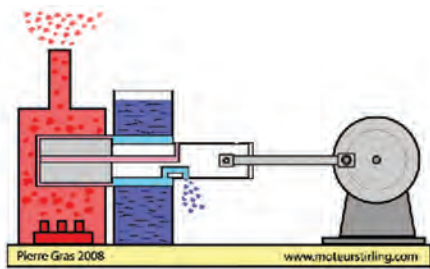


FIGURE 17.6 – Moteur Manson - Phase 1

Un moteur Stirling, Comment ça marche ? A quoi ça sert ? Qui l'a inventé et quand ?

Voici quelques questions auxquelles ce livre tente de répondre.

Il s'adresse à tous, se veut vulgarisateur même s'il détaille , parfois, quelques points à destination des forts en maths ou thermodynamique.

Ce moteur est aussi appelé "moteur à air chaud" ou "moteur à combustion externe".

Dans le contexte énergétique et environnemental actuel, le moteur Stirling représente une alternative très intéressante pour transformer différentes sources de chaleur (soleil, bois, déchets, gaz...) en énergie mécanique ou électrique d'une façon respectueuse pour l'environnement.

Ce livre passe en revue les différents domaines d'application du moteur Stirling : solaire, cogénération, spatial, production de froids extrêmes...

Actuellement ce moteur est très peu connu. Il tient pourtant une place de plus en plus importante dans des applications industrielles et domestiques, en particulier outre-Atlantique.

Sans aucun doute, il ne va pas tarder à prospérer sur notre "vieux continent".

Autant s'y préparer par la lecture de cet ouvrage.

ISBN 978-2-9537338-0-8



16,50 €

www.moteurstirling.com