

Merci à mes parents de m'avoir donné le goût d'apprendre
et de m'avoir permis de m'instruire.

Illustrations de la couverture :

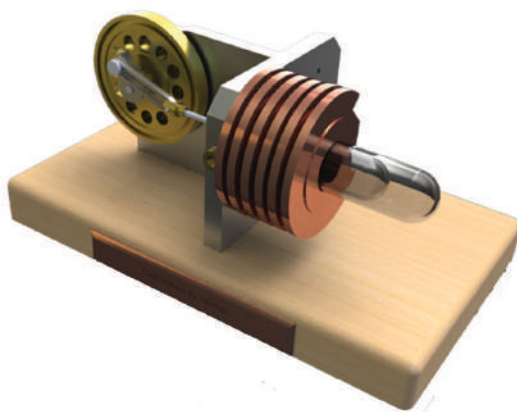
- en haut à gauche : *Thermoscope de Philon de Byzance*

- en bas à droite : *Moteur MOD II ASE de la NASA*

*Image de synthèse ci-contre : réalisée gracieusement par Michel[74],
d'après les plans de « Chenapan » dessinés par Fernand Petitjean.*

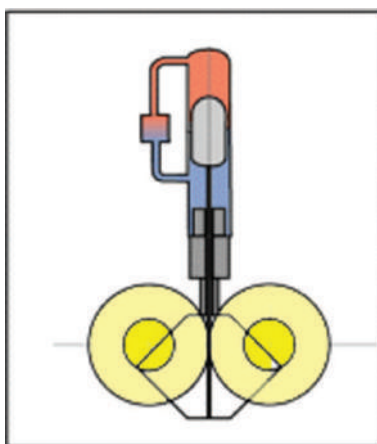
Les moteurs à air chaud

ou moteurs à apport de chaleur externe



L'histoire de ces moteurs
de l'Antiquité à la fin du XX^{ème} siècle
suivie d'une brève description
des caractéristiques de ces engins.

Pierre Gras
16 mars 2015



ISBN : 978-2-9537338-1-5

Dépôt légal : mai 2015

©Editeur :

Pierre Gras

Ambérieu en Bugey

(webmaster@moteurairchaud.com)

Imprimé par :

SARL ESPACE COURRIER

4 avenue De La Voie Domitienne 34500 BEZIERS

Préface

Les moteurs à air chaud, plus particulièrement le moteur Stirling, passionnent ou intriguent bien des personnes par leur mode de fonctionnement. Ce ne sont pas, ou pas encore, des machines connues du grand public ou qui sont utilisées couramment dans notre vie quotidienne comme peuvent l'être moteurs électriques ou moteurs à combustion interne.

Pour pallier cette méconnaissance, et non content d'avoir écrit un premier livre sur le sujet[57], je me suis remis à la tâche, lourde tâche ! Dans cet ouvrage, on peut retrouver quasiment les mêmes éléments que dans le précédent mais avec de très nombreux compléments. Ces derniers portent sur les applications potentielles qui évoluent très rapidement, sur les différents aspects techniques concernant ces engins, et principalement sur leur histoire... Qui penserait de prime abord qu'il faut rechercher l'origine de ces moteurs à l'époque de la Grèce antique ? Et pourtant, c'est le cas en attendant peut-être de trouver d'autres sources dans des civilisations encore plus anciennes sur des continents plus éloignés. Ceci ne signifie nullement que les moteurs à air chaud appartiennent au passé et sont sans avenir. Ce livre voudrait convaincre ses lecteurs que, si les circonstances sont réunies, de nouveaux domaines d'application peuvent permettre à ces moteurs de sortir de l'ombre dans laquelle ils sont aujourd'hui confinés.

La promotion des moteurs à air chaud peut prendre différents aspects. C'est peut-être la raison pour laquelle s'est créée une petite communauté tout à fait informelle d'amateurs éclairés, de brillants constructeurs ou concepteurs de moteurs. Leur travail de vulgarisation vis-à-vis du public revêt une grande importance. En débutant ce livre, je voudrais les remercier. Au travers des différents contacts que j'ai pu entretenir avec ces personnes, une chose m'a interpellé : leur générosité. Dans une société consumériste, où tout se monnaie, il est heureux de constater que des gens sont prêts à partager leurs connaissances, de nous faire part de leur réalisations sans contrepartie. Dans ce livre, vous trouverez des photos, des réflexions, des informations qui m'ont été transmises sans avoir eu le besoin de les réclamer. Souhaitons que cet état d'esprit perdure.

D'une modeste façon, j'ai essayé, au travers de l'écriture de ce livre, de calquer mon attitude sur celle des personnes dont je viens de parler. Un des plus grands plaisirs qu'on peut éprouver c'est de partager, de faire plaisir. Égoïstement, je me suis offert cette satisfaction en imaginant que le long travail que représente l'écriture de cet ouvrage sera profitable à ceux qui se donneront la peine de se le procurer et de le lire.

À la fin de l'écriture de ce livre, je garde, malgré tout, une petite insatisfaction : celle de ne pas avoir été toujours exhaustif sur tel ou tel sujet. Tout est perfectible et ce livre en est l'exemple. Toutefois, il arrive un moment où il faut se dire que le mieux peut être l'ennemi du bien et savoir arrêter son travail, laisser le temps faire son œuvre pour pouvoir, ultérieurement, se remettre à l'ouvrage. Une façon de se dire que la vie continue...

Que les lecteurs me pardonnent des imperfections, des erreurs éventuelles, des compléments qui auraient pu être apportés à ce livre... Je tiens vivement à les remercier d'avoir fait l'acquisition de cet ouvrage et de porter, à leur tour, la bonne parole concernant les moteurs à air chaud et leurs utilisations réelles ou potentielles. Si on arrive à combler le déficit de notoriété de ces engins, peut-être arriveront-ils plus vite dans notre environnement.

J'espère de tout cœur que vous éprouverez la même satisfaction à lire ce livre que celle que j'ai eu à son écriture.

Bonne lecture et merci à vous.

Pierre Gras

Remerciements : Merci à Florence qui, en plus de me supporter tout au long de ce difficile travail, m'a encouragé, aidé et apporté son regard neuf et sans a priori.

Table des matières

I	introduction	17
1	Quelques éléments préalables	19
1.1	But du livre	19
1.2	Définition d'un moteur à air chaud ou à apport de chaleur externe	20
1.3	Nouvelle dénomination des moteurs à air chaud	20
1.4	Définition du moteur Stirling	21
1.5	Préambule à l'étude de l'histoire de moteurs à air chaud ou MACE	21
II	Histoire	23
2	Les grandes périodes de l'Histoire	25
3	L'Antiquité	27
3.1	Empédocle (V ^{ème} siècle environ avant notre ère) et les quatre éléments	27
3.1.1	Le Feu	27
3.1.2	La Terre	27
3.1.3	L'Eau	28
3.1.4	L'Air	28
3.2	Philon de Byzance (fin III ^{ème} siècle avant notre ère) et le thermoscope	29
3.3	Héron d'Alexandrie (I ^{er} siècle de notre ère) un génial inventeur	29
4	Le Moyen Âge	31
5	L'Époque Moderne	33
5.1	Giovanni Branca (1571-1645)	33
5.2	Salomon de Caus (1576-1626)	33
5.3	Denis Papin (1647 - 1712)	34
5.3.1	Le digesteur et la soupape de sûreté	34
5.3.2	Les machines à vapeur de Denis Papin	35
5.3.3	Le bateau à vapeur de Denis Papin	36
5.4	Thomas Savery (1650-1715)	37
5.5	Guillaume Amontons (1663-1705)	38
5.6	Thomas Newcomen (1664-1729) et John Cawley(?-1725)	40
5.7	Jacques Leupold (1674-1727)	41
5.8	Nicolas-Joseph Cugnot (1725-1804)	41
5.9	Les frères Montgolfier Joseph et Étienne (1740-1810 / 1745-1799)	42
5.9.1	Le ballon à air chaud	42
5.9.2	Le bélier hydraulique	43
5.9.3	La machine à élever l'eau (ou le moteur à combustion interne?)	44
5.10	Henry Wood (?-1758-?)	46
5.11	Jouffroy d'Abbans (1751-1832)	46
5.12	James Watt (1736-1819)	48
5.12.1	Le condenseur	49
5.12.2	Le piston à double effet	49
5.12.3	Le régulateur à boules ou modérateur de Watt à force centrifuge	50
5.13	Les frères Joseph et Claude Niépce (1765-1833 / 1763-1828)	51
5.14	George Cayley (1773-1857)	51
5.15	Petite synthèse	52

6	L'Époque contemporaine	55
6.1	La révolution industrielle	55
6.2	Mécanisation et la motorisation de l'industrie et de l'agriculture	56
6.3	Robert Stirling (1790-1878)	60
6.3.1	La vie de Robert Stirling	60
6.3.2	Les inventions de Robert Stirling	62
6.4	Les principaux moteurs à air chaud conçus au cours du XIX ^{ème} siècle (en dehors de ceux développés par Robert Stirling).	68
6.4.1	Le moteur Franchot	68
6.4.2	Le moteur Laubereau	68
6.4.3	Le moteur Belou	69
6.4.4	Le moteur Hock	70
6.4.5	Le moteur Bénier	70
6.4.6	Le moteur Rider	71
6.5	John Ericsson (1803-1889)	72
6.5.1	Sa vie et ses principales inventions	72
6.5.2	Moteurs solaires de John Ericsson	73
6.5.3	Machine à coudre	74
6.6	Le XX ^{ème} siècle : la renaissance du moteur Stirling	75
6.6.1	Le moteur Ringbom à déplaceur libre	75
6.6.2	Les moteurs Heinrici	75
6.6.3	Autres développements du moteur à air chaud	76
6.7	La société Philips	78
6.7.1	La période noire 1937-1945	79
6.7.2	La période médiévale 1937-1945	79
6.7.3	La période des récoltes ou vendanges 1953-1970	81
6.7.4	La période des temps modernes 1970-1979	82
6.8	Développements sous licence Philips et autres	85
6.9	United Stirling	86
6.10	Programme ASE (Automotive Stirling Engine)	88
6.11	Le XXI ^{ème} siècle et le moteur Stirling	90
III	Description des moteurs à air chaud	91
7	Les principes de fonctionnement du moteur Stirling	93
7.1	Chauffage isochore (à volume constant)	93
7.2	Détente isotherme (à température constante)	94
7.3	Refroidissement isochore (à volume constant)	94
7.4	Compression isotherme (à température constante)	94
7.5	Synthèse énergétique	95
7.6	Diagramme Pression-Volume ou diagramme PV	95
8	Les différents types de moteurs Stirling	97
8.1	Le déplaceur	97
8.1.1	Chauffage isochore ou à volume constant	98
8.1.2	Détente isotherme ou à température constante	98
8.1.3	Refroidissement isochore ou à volume constant	98
8.1.4	Compression isotherme ou à température constante	99
8.1.5	Variations de volume	99
8.1.6	Diagramme Pression - Volume	100
8.2	Le moteur alpha	100
8.2.1	Chauffage isochore ou à volume constant	101
8.2.2	Détente isotherme ou à température constante	101
8.2.3	Refroidissement isochore ou à volume constant	101
8.2.4	Compression isotherme ou à température constante	102
8.2.5	Variations de volume	102
8.2.6	Diagramme Pression - Volume	103
8.3	Le moteur bêta	104
8.3.1	Chauffage isochore ou à volume constant	104
8.3.2	Détente isotherme ou à température constante	105

8.3.3	Refroidissement isochore ou à volume constant	105
8.3.4	Compression isotherme ou à température constante	105
8.3.5	Variations de volume	106
8.3.6	Diagramme Pression - Volume	106
8.4	Le moteur gamma	107
8.4.1	Chauffage isochore ou à volume constant	107
8.4.2	Détente isotherme ou à température constante	108
8.4.3	Refroidissement isochore ou à volume constant	108
8.4.4	Compression isotherme ou à température constante	109
8.4.5	Variations de volume	109
8.4.6	Diagramme Pression - Volume	110
8.5	Autres types de moteurs à cycle de Stirling	111
8.5.1	Le moteur à piston libre dit moteur type Martini	111
8.5.2	Le moteur à déplaceur libre ou Ringbom	111
8.5.3	Le moteur à piston et déplaceur libres (free piston Stirling engine)	112
8.5.4	Le moteur à double effet	112
8.5.5	Le moteur rotatif	112
8.5.6	Le générateur thermodynamique	113
9	Autres moteurs à apport de chaleur externe	115
9.1	Le moteur thermo-acoustique	115
9.2	Le fluidyne	116
9.3	Le moteur Ericsson à cycle ouvert	116
9.3.1	Premier mouvement	116
9.3.2	Deuxième mouvement	117
9.3.3	Le diagramme Pression-Volume	118
9.4	Le moteur Manson à cycle ouvert	118
9.4.1	Principes de fonctionnement	119
9.4.2	Le diagramme PV	121
9.4.3	Théorie	121
9.4.4	Applications	121
IV	Applications	123
10	Avantages et inconvénients du moteur Stirling	127
10.1	Les avantages du moteurs Stirling	127
10.1.1	Le silence de fonctionnement	127
10.1.2	Le rendement élevé	127
10.1.3	La multitude de sources chaudes possibles	127
10.1.4	L'aptitude écologique	127
10.1.5	La fiabilité et la maintenance aisée	127
10.1.6	La durée de vie	127
10.1.7	Les utilisations diverses	127
10.1.8	La production d'énergie de façon décentralisée	128
10.2	Les inconvénients du moteur Stirling	128
10.2.1	Le prix d'achat	128
10.2.2	La méconnaissance de ce type de moteur	128
10.2.3	La variété des modèles	128
10.2.4	Les problèmes d'étanchéité	128
10.2.5	Les échanges de chaleur	128
10.2.6	Les hautes températures	128
10.2.7	Le manque de souplesse	129
11	Énergie solaire	131
11.1	Concentrateurs de rayonnement solaire	132
11.1.1	Capteurs cylindro-paraboliques	132
11.1.2	Réflecteurs paraboloidaux	133
11.2	Projets réalisés ou en étude	133
11.2.1	Matériel à usage domestique	134
11.2.2	Projets industriels	134

12 Micro-cogénération	137
12.1 Intérêt de la cogénération	137
12.2 Le moteur Stirling et la cogénération	138
13 Motorisation des véhicules	139
13.1 Sur terre : automobiles	139
13.2 En mer : sous-marins et bateaux	139
13.3 Dans les airs : avions	140
14 Pompe à chaleur - Réfrigération	141
14.1 Production de chaleur ou de froid à usage domestique	141
14.2 Production de froid	142
14.2.1 Utilité des grands froids	142
14.2.2 Le cycle de Stirling dans la production de grands froids	142
15 Rejets thermiques industriels	145
16 Maquettes - Modélisme	147
16.1 Les maquettes à monter	147
16.2 Les plans sur le ouëb	147
16.3 Les livres avec des plans de construction	148
16.4 Les constructions personnelles	148
17 Domaine spatial	153
18 Électronique et informatique	155
19 Pompage d'eau	157
V Théorie - Éléments de conception	159
20 L'air : définition et propriétés physiques	161
20.1 Composition de l'air	161
20.2 Propriétés physiques de l'air ou des gaz	161
20.2.1 Loi de Boyle (1627-1691) - Mariotte (1620-1684) ou comportement d'un gaz à température constante	161
20.2.2 Loi de Charles (1746-1823) ou comportement d'un gaz à volume constant	162
20.2.3 Loi de Gay-Lussac (1778-1850) ou étude du comportement d'un gaz à pression constante	163
20.2.4 Loi d'Avogadro (1776-1856) - Ampère (1775-1836) ou relation entre nombre de molécules et volume (à pression et température constantes)	164
20.2.5 Loi générale	165
21 La thermodynamique : principes de base	167
21.1 Sadi Carnot : inventeur des bases de la thermodynamique	167
21.2 Travaux de Joule	167
21.3 Conservation d'énergie	167
21.4 Étude d'un cycle thermodynamique - Diagramme de Clapeyron ou diagramme Pression-Volume	168
21.5 Le rendement d'un cycle thermodynamique	168
21.6 Les différents cycles thermodynamiques	169
21.6.1 Le cycle de Carnot	169
21.6.2 Le cycle de Stirling	169
21.6.3 Le cycle d'Ericsson	170
21.6.4 Le cycle de Joule (ou Brayton)	170
21.6.5 Le cycle de Beau de Rochas	170
22 Cinématique	171
22.1 Bielle manivelle	171
22.1.1 Système mono-piston	171
22.1.2 Le système bielle-manivelle avec deux équipages mobiles	172
22.2 Embiellage rhomboïdal	172
22.3 Plateau cyclique ou swashplate	173

22.4 Embiellage joug	173
23 Propagation de la chaleur	175
23.1 Les principes expérimentaux	175
23.2 Les équations	175
23.3 Et nos moteurs dans tout cela ?	177
24 Calculer son moteur	179
24.1 Détermination des différents volumes	179
24.2 Détermination des différentes températures	179
24.3 Hypothèse sur la pression	180
24.4 Calculs proprement dits	180
25 Le régénérateur	181
26 Les étanchéités	183
26.1 Les étanchéités statiques	184
26.2 Les étanchéités dynamiques	184
27 Les frottements	185
28 Les volumes morts	187
29 Les variations de puissance	189
30 Éléments de théorie spécifiques au moteur Stirling	191
30.1 Le rendement du cycle de Stirling et celui du moteur Stirling équipé d'un régénérateur	191
30.1.1 Le rendement du cycle de Stirling	191
30.1.2 Le rendement d'un moteur Stirling équipé d'un régénérateur	192
30.2 La réversibilité du cycle de Stirling : faire du froid ou de la chaleur	193
30.2.1 Pompe à chaleur ayant un régénérateur	194
30.2.2 Machine frigorifique	195
30.2.3 Quelques remarques	195
31 Éléments de théorie spécifiques au moteur Ericsson	197
31.1 Détermination du diamètre D_2	198
31.2 Travail effectué au cours d'un cycle	198
31.3 Rendement du cycle d'Ericsson	199
31.3.1 Travail net récupéré :	199
31.3.2 Énergie calorifique fournie :	199
31.3.3 Rendement du cycle d'Ericsson :	200
32 Éléments pour bien concevoir un moteur	201
32.1 10 conseils pour bien concevoir son moteur Stirling	201
32.2 Nouvelle échelle logarithmique de température	202
32.3 Les 7 pertes des moteurs à air chaud	203
VI Conclusion	205
33 Entre échecs et espoirs	207
33.1 Les raisons de l'échec de l'introduction du moteur Stirling et autres moteurs à air chaud	207
33.2 Les raisons d'espérer	208
VII Annexes	209
A Blaise Pascal (1623-1662)	211
B Nicolas Léonard Sadi Carnot(1796-1832)	213
C Bessemer (1813-1898)	215

D Le XIX^{ème} siècle	217
D.1 La physique et la chimie	217
D.2 L'électricité et ses applications	217
D.3 Les transports	217
D.4 La mécanisation	218
D.5 Autres domaines	218
E Sous-marin SAGA	219
E.1 Principaux paramètres	219
E.2 Stockage de gaz et d'énergie	219
E.3 Les moteurs Stirling AIP	220
F L'aviation : pourquoi a-t-elle besoin du moteur Stirling ?	221
F.1 Les vibrations	221
F.2 Le bruit	221
F.3 la consommation et la nature du combustible	221
F.4 La puissance et l'altitude	222
G Le bus DAF équipé d'un moteur Stirling	223
H Glossaire	225
Bibliographie	229
Index	232

Table des figures

3.1	Thermoscope de Philon de Byzance	29
3.2	Eolipyle d'Héron d'Alexandrie	29
3.3	Ouverture des portes d'un temple par Héron d'Alexandrie	30
4.1	Charrue tirée par deux bœufs : « Les très riches heures du duc de Berry »	31
5.1	Système mortier-pilon et tournebroche de Giovanni Branca [40]	33
5.2	Salomon de Caus : « machine fort subtile, par laquelle on pourra faire eslever une eau dormante » [43]	34
5.3	Digesteur et soupape de sûreté de Denis Papin [56]	35
5.4	Première machine à vapeur de Denis Papin [79]	35
5.5	Deuxième machine à vapeur de Denis Papin [51]	36
5.6	Destruction du bateau de Denis Papin par des bateliers allemands [25]	37
5.7	Miner's friend de Thomas Savery [38]	38
5.8	Machine à feu de Guillaume Amontons - 1699	39
5.9	Étude économique de la machine à feu de Guillaume Amontons	39
5.10	Machine atmosphérique de Newcomen-Cawley	40
5.11	Machine de Leupold	41
5.12	Chariot à feu de Nicolas-Joseph Cugnot	42
5.13	Expérience des frères Mongolfier à Versailles le 19 septembre 1783	43
5.14	Le béliet hydraulique des frères Montgolfier	44
5.15	Pompe à feu de Joseph Montgolfier [32]	45
5.16	Pompe à feu et système propulsif des aéronefs	45
5.17	Avaleur de flamme - Entrée de l'air chaud [38]	46
5.18	Avaleur de flamme - Contraction de l'air	46
5.19	Bateau imaginé par Jouffroy d'Abbans pour naviguer sur la Seine [28]	47
5.20	Plaque commémorative de l'exploit réalisé par Jouffroy d'Abbans le 15 juillet 1783 [38]	47
5.21	Piston à double effet	49
5.22	Machine de Watt à double effet [42]	50
5.23	Modérateur de Watt à force centrifuge [86]	50
5.24	Pyréolophore des frères Niépce	51
5.25	Moteur de George Cayley	52
6.1	Chevalement de la mine d'or de Geldenhuis Estate en Afrique du Sud [29]	56
6.2	Abreuvoir alimenté grâce à un moteur à air chaud (Publicité)	57
6.3	Publicité pour le moteur Bénier	57
6.4	Locomotive de Trevithick	58
6.5	Bateau à roues à aubes Ben Campbell	58
6.6	USS Cherokee 1859	59
6.7	Robert Stirling	60
6.8	Premier modèle expérimental	61
6.9	Explosion de la chaudière d'une machine à vapeur [86]	62
6.10	Régénérateur ou économiseur	63
6.11	Moteur breveté par Robert Stirling en 1816.	63
6.12	Schéma de principe du moteur dont le brevet fut déposé en 1827 [52]	64
6.13	Motopompe De Lamater Iron Works	66
6.14	Principe de la machine de Franchot	68
6.15	Coupe et vue d'ensemble du moteur Laubereau	69
6.16	Machine de Belou	69
6.17	Le moteur de Hock	70

6.18	Aéromoteur de Bénier[27]	70
6.19	Moteur Rider	71
6.20	John Ericsson	72
6.21	Moteur Ericsson de 1851 à cycle ouvert [19]	72
6.22	Machine solaire imaginée par John Ericsson [26]	73
6.23	Machine à coudre et moteur Ericsson [61]	74
6.24	Moteur Rider-Ericsson	74
6.25	Moteur Ringbom de 1907 [87]	75
6.26	La gamme de moteurs Heinrici	76
6.27	Catalogue Manufrance de 1914	76
6.28	Catalogue Mestre et Blatgé de 1914	77
6.29	Phonographe à moteur à air chaud	77
6.30	Principe du moteur Stirling à double effet	79
6.31	Moteur Philips T102C	80
6.32	Rencontre rarissime de deux MP1002CA en ordre de marche!	80
6.33	Stand de démonstration de Jean-Jacques Plessiet à Verna	81
6.34	Voiture hybride General Motors 1967	82
6.35	Bus DAF-Philips [80]	84
6.36	Moteur Philips 4-235 [80]	84
6.37	Moteur Stirling à pistons libres développé par la NASA	85
6.38	Ford Torino équipée d'un moteur Stirling 4-215 DA	86
6.39	Moteur V4X de United Stirling	86
6.40	Moteur P40 [13]	87
6.41	AMC Siprit équipée d'un moteur Stirling	87
6.42	Évolutions des performances du moteur Stirling de 1978 à 1986 [77]	88
6.43	Comparaison motorisation à combustion interne et moteur Stirling [77]	89
6.44	Mod II développé par la NASA [9]	89
6.45	Programme ASE et cours du pétrole[2]	90
7.1	Moteur Stirling élémentaire[38]	93
7.2	Chauffage isochore	93
7.3	Détente isotherme	94
7.4	Refroidissement isochore	94
7.5	Compression isotherme	94
7.6	Diagramme Pression-Volume d'un cycle de Stirling	95
8.1	Moteur et ses différents constituants	97
8.2	Chauffage isochore - Moteur théorique	98
8.3	Détente isotherme - Moteur théorique	98
8.4	Refroidissement isochore - Moteur théorique	98
8.5	Compression isotherme - Moteur théorique	99
8.6	Variations de volume théoriques d'un moteur théorique	99
8.7	Diagramme Pression - Température d'un moteur théorique	100
8.8	Description du moteur Stirling type alpha	100
8.9	Chauffage isochore - Moteur alpha	101
8.10	Détente isotherme - Moteur alpha	101
8.11	Refroidissement isochore - Moteur alpha	101
8.12	Compression isotherme - Moteur alpha	102
8.13	Variation de volume - Moteur alpha	102
8.14	Volume total de gaz présent dans le moteur alpha	103
8.15	Diagramme Pression-Volume d'un moteur alpha	103
8.16	Description du moteur Stirling type bêta à embiellage rhomboïdal	104
8.17	Chauffage isochore - Moteur bêta	104
8.18	Détente isotherme - Moteur bêta	105
8.19	Refroidissement isochore - Moteur bêta	105
8.20	Compression isotherme - Moteur bêta	105
8.21	Variation de volume - Moteur bêta à embiellage rhomboïdal	106
8.22	Diagramme Pression-Volume d'un moteur bêta à embiellage rhomboïdal	106
8.23	Description du moteur Stirling type gamma	107
8.24	Chauffage isochore - Moteur gamma	107
8.25	Détente isotherme - Moteur gamma	108

8.26	Refroidissement isochore - Moteur gamma	108
8.27	Compression isotherme - Moteur gamma	109
8.28	Variation de volume - Moteur gamma	109
8.29	Diagramme Pression-Volume - Moteur gamma	110
8.30	Autres types de moteurs à cycle de Stirling	111
8.31	Moteur à piston libre NASA	112
8.32	Le moteur à double effet	112
8.33	Le moteur rotatif	113
8.34	Le générateur thermodynamique	113
9.1	Principe du moteur thermo-acoustique	115
9.2	Maquette de moteur thermo-acoustique	115
9.3	Schéma d'une pompe fluidyne	116
9.4	Moteur Ericsson : descente des deux pistons	117
9.5	Moteur Ericsson : remontée des deux pistons	117
9.6	Moteur Ericsson : diagramme Pression-Volume	118
9.7	Description du moteur Manson	119
9.8	Moteur manson - Phase d'aspiration de l'air	119
9.9	Moteur manson - Phase de chauffage	120
9.10	Moteur manson - Phase d'échappement à l'atmosphère	120
9.11	Moteur manson - Phase de refroidissement	121
9.12	Moteur manson - Diagramme PV	121
11.1	Surface nécessaire du Sahara pour satisfaire la consommation mondiale d'énergie finale	131
11.2	Propriété d'une parabole	132
11.3	Capteur cylindro-parabolique	133
11.4	Réflecteur paraboloidal	133
11.5	Champ de réflecteurs paraboloidaux	134
11.6	Dish-Stirling de SES (US public domain)	135
12.1	Installations séparées de production d'électricité et de chaleur	137
12.2	Installation de cogénération	138
14.1	Pompe à chaleur	141
14.2	Schéma d'un cryogénérateur	143
16.1	Moteur Manson mono-cylindre	148
16.2	Moteur Manson bi-cylindre	149
16.3	Moteur Manson tri-cylindre	149
16.4	Moteur Ringbom	149
16.5	Moteur bêta - Embiellage rhomboïdal	150
16.6	Moteur gamma - Piston membrane avec réserve d'eau supérieure	150
16.7	Moteur gamma double - Décalage de 180 degrés entre les deux moteurs	150
16.8	Moteur gamma double à embiellage oscillant	151
16.9	Moteur gamma. Déphasage réglable en fonctionnement de 60 à 120 degré	151
16.10	Moteur Rider - Ericsson	151
16.11	Moteur gamma 4 cylindres double-effet	152
16.12	Moteur Henry Essex à air chaud	152
19.1	Principe d'une pompe fluidyne	157
20.1	Exemple d'application de la loi Boyle-Mariotte	162
20.2	Exemple d'application de la loi de Charles	163
20.3	Exemple d'application de la loi de Gay-Lussac	163
20.4	Comparaison de deux gaz différents	164
21.1	Diagramme PV d'un cycle quelconque	168
21.2	Bilan énergétique d'un cycle quelconque	168
21.3	Diagrammes PV et entropique du cycle de Carnot	169
21.4	Diagrammes PV et entropique du cycle de Stirling	169
21.5	Diagrammes PV et entropique du cycle d'Ericsson	170
21.6	Diagrammes PV et entropique du cycle de Joule	170

21.7 Diagrammes PV et entropique du cycle de Beau de Rochas	170
22.1 Bielle-manivelle simple	171
22.2 Bielle-manivelle double	172
22.3 Embiellage rhomboïdal - Détails	172
22.4 Plateau cyclique ou swashplate[62]	173
22.5 Embiellage joug	173
23.1 Propagation de la chaleur dans l'air	177
24.1 Exemple de recensement de volumes en présence dans un moteur	179
25.1 Bilan calorifique d'un cycle de Stirling	181
25.2 Régénération de chaleur	182
25.3 Positionnement du régénérateur sur différents moteurs	182
26.1 Étanchéité statique et étanchéité dynamique	183
26.2 Étanchéité absolue entre pièces mobiles	184
29.1 Variations de puissance pour l'automobile[89]	189
29.2 Moteur d'Henry Ganza à déphasage réglable - Position 1	190
29.3 Moteur d'Henry Ganza à déphasage réglable - Position 2	190
30.1 Bilan énergétique d'un cycle de Stirling	191
30.2 Cycle d'un moteur Stirling équipé d'un régénérateur	193
30.3 Réversibilité du cycle de Stirling. Fonctionnement en pompe à chaleur ou machine frigorifique . .	194
31.1 Caractéristiques nécessaires au calcul d'un moteur Ericsson	197
31.2 Diagramme PV détaillé du cycle de Stirling	198
32.1 Echelle de température non linéaire	203
32.2 Échelle de température en décibel dB	203
A.1 Description de l'expérience de Pascal et de son beau-frère Florin Périer [36]	211
A.2 Baromètre de Torricelli	212
B.1 Nicolas Léonard Sadi Carnot à l'âge de 17 ans d'après une peinture de Louis-Léopold Boilly (1761-1845)	213
C.1 Convertiseur Bessemer	216
E.1 Maquette du sous-marin SAGA [8]	220
F.1 Patrouille de France - Photo de Marius Bernard	222
G.1 Moteur Philips 4-235 monté sur le bus DAF	223
G.2 Vue d'ensemble du bus DAF équipé du moteur Philips 4-235	224
H.1 Une partie des fonds bibliographiques de Mathieu Doubs et Pierre Gras	239

Première partie

Introduction

*Parler peu de ce qu'on sait et
point du tout de ce qu'on ne sait pas.
Pourquoi ne pas dire plus souvent :
« Je ne sais pas ».*

Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832)

Chapitre 1

Quelques éléments préalables

1.1 But du livre

Personne n'a rien inventé ou que très rarement. Au cours du temps, on améliore des dispositifs anciens ou les idées déjà émises. Chacun apporte, il est vrai, sa petite touche personnelle. Et petite touche par petite touche, on fait de grands et beaux tableaux diraient les peintres. Petits pas par petits pas, les randonneurs vous diront qu'ils parcourent de très longues distances. Il en est de même en sciences et techniques. Rares sont les concepts qui émergent sans que leurs auteurs ne s'appuient sur les travaux de leurs prédécesseurs.

Ce livre, en se cantonnant le plus possible aux moteurs à air chaud dont nous donnerons une définition ci-dessous, cherche à montrer la succession des découvertes liées à ces machines et leurs relations entre-elles.

Cela pour bien comprendre que ces inventions sont chronologiques et non spontanées, qu'elles ne sont pas sans relation avec l'histoire, l'environnement, les réflexions passées ou contemporaines. Il serait préférable d'écrire « chrono-logiques » pour bien mettre en évidence à la fois la notion du temps qui ordonne les choses et la notion de continuité des différentes avancées dans le domaine étudié quel qu'il soit.

Ce préambule étant fait, les objectifs qui ont présidé à l'écriture de cet ouvrage ont été les suivants :

- Faire connaître, bien sûr, les moteurs à air chaud, aussi appelés moteurs à apport de chaleur externe, et plus particulièrement celui qui, après avoir connu le succès puis l'oubli, paraît avoir le plus bel avenir à savoir le moteur Stirling.
Une description et une explication du fonctionnement seront données pour chaque type de moteur. Un chapitre sera consacré aux applications actuelles ou envisageables de ces engins.
- Donner à la fois du plaisir et du savoir à la personne qui a fait l'effort de se procurer ce livre. Ces deux notions ne sont pas incompatibles contrairement à ce qu'on peut penser à la fin d'un cursus scolaire. La connaissance ne peut être durable et profitable que si l'on éprouve de la satisfaction à l'acquérir. Inutile de souffrir pour s'instruire.
- S'adresser au plus grand nombre. On peut expliquer des choses a priori compliquées avec des mots simples. Ici, on utilisera le moins possible d'expressions abscones derrières lesquelles les experts se protègent (« *Ce que l'on conçoit bien s'énonce clairement, et les mots pour le dire arrivent aisément.* » disait Nicolas Boileau). Quelques exceptions à ce qui vient d'être énoncé seront apportées dans la partie consacrée à la théorie. Malgré cela, ces chapitres sont construits pour que la grande majorité des propos et leurs sens profonds restent compréhensibles par tout un chacun.
- Montrer, tant que faire se peut, la continuité et l'enchaînement logique des idées et des réalisations relatives aux moteurs à air chaud au cours des âges. Parfois, il faudra aborder des domaines paraissant éloignés du sujet proprement dit mais indispensables à développer. En particulier, nous parlerons souvent des machines à vapeur qui se sont développées, en bonnes concurrentes, parallèlement aux engins fonctionnant exclusivement avec de l'air. Les dispositifs, les matériaux, les objectifs visés ont été très souvent communs aux deux types de machines. De plus, rien ne nous interdit d'élargir notre champ de vision à des domaines qui ne sont pas à proprement parler ceux qui nous passionnent en premier lieu .
- Convaincre, si nécessaire, le lecteur que le moteur Stirling présente une réelle opportunité dans la crise énergétique et environnementale que nous vivons. Le persuader que ce moteur va rentrer dans nos foyers. L'inciter à porter, à son tour, la « bonne parole » et convaincre son entourage des qualités d'un tel moteur.

Ces objectifs ont-ils été atteints ? À vous, à la fin de votre lecture, d'en juger.

Faites éventuellement part de vos remarques à l'auteur afin d'enrichir la prochaine réédition.

1.2 Définition d'un moteur à air chaud ou à apport de chaleur externe

Définir ce qu'est un moteur à air chaud est un exercice risqué et un motif de critiques. Soyons téméraire et passons à l'acte :

« Un moteur à air chaud transforme de l'énergie thermique en énergie mécanique. Ceci est rendu possible par l'utilisation de la propriété des gaz de se dilater et/ou de se mettre en pression sous l'effet de la chaleur. La source calorifique est située à l'extérieur du moteur proprement dit. »

Et voilà, ce n'était pas si difficile ! Toutefois, on peut d'ores et déjà apporter quelques remarques ou précisions à cette définition.

- Paradoxalement, un moteur à air chaud peut contenir un autre gaz que de l'air lui même constitué d'oxygène, d'azote, de gaz rares et de traces d'autres gaz. À l'origine, ces moteurs utilisaient effectivement de l'air, d'où leur nom. Ensuite, quand on a su isoler l'hydrogène ou l'hélium, par exemple, on a remplacé l'air par ces gaz. En effet, ceux-ci ont des avantages en terme de poids ou d'échange de chaleur comme nous le verrons dans la partie théorique de ce livre.
- On aurait pu inclure, parmi les moteurs à air chaud, les moteurs utilisant également de l'air mais ayant leur source calorifique à l'intérieur. Ce n'est pas le cas et ceci par pure convention. On les appelle moteurs à combustion interne alors qu'on appelle parfois les moteurs à air chaud moteurs à combustion externe. Parmi les moteurs à combustion interne, les plus connus sont les moteurs, deux temps ou quatre temps, dits à explosion¹ fonctionnant avec de l'essence ou du gazole. On pourrait rajouter à ces moteurs à pistons les turbomachines comprenant les turboréacteurs, les turbo-propulseurs et les turbomoteurs utilisant du kérosène. Tous compriment l'air, le réchauffent et utilisent la détente pour en retirer de l'énergie.
- Parmi les moteurs à air chaud correspondant à la définition donnée ci-dessus, on peut déjà établir deux catégories importantes :
 - ceux qui ont un cycle fermé, c'est à dire qui utilisent constamment la même quantité de gaz enfermé dans le moteur (le moteur Stirling appartient à cette catégorie).
 - ceux qui ont un cycle dit ouvert, c'est à dire qui renouvellent en permanence le gaz de travail à chaque cycle à l'instar des moteurs à combustion interne (le moteur Ericsson est de ceux-ci).
- Ensuite nous pouvons encore créer deux sous-catégories :
 - ceux qui utilisent un régénérateur, appareil inventé par Robert Stirling et qui permet d'améliorer sensiblement le rendement de ces machines. Cet appareil sera examiné dans le détail dans la suite de ce livre en particulier dans la partie théorie.
 - ceux qui n'en ont pas parce que le régénérateur présente aussi des inconvénients qui viennent dans certaines configurations annihiler ses avantages. Aucun dispositif n'étant parfait.

À ce stade, ce sont des notions peut-être délicates à comprendre. Mais, rassurez-vous, tout cela va devenir très limpide et facile à comprendre lorsque nous détaillerons les différents types de moteurs à air chaud ou à apport de chaleur externe.

1.3 Nouvelle dénomination des moteurs à air chaud

Ci-dessus, nous venons de nous rendre compte que l'appellation « moteur à air chaud » a ses limites. Cette dénomination souffre du fait qu'elle a été inventée à une période où n'existaient pas encore tous les types de moteurs utilisant de l'air ou un autre gaz. L'air était le seul utilisé faute de disposer et même de connaître d'autres gaz plus intéressants pour atteindre les buts recherchés tels que l'hydrogène ou l'hélium par exemple. Longtemps on a ignoré que l'air était un mélange de gaz élémentaires tel que l'oxygène, l'azote.... (Voir page 161, § 20)

Aujourd'hui, dans le domaine de la recherche on préfère parler de « **Moteur à Apport de Chaleur Externe** » ou de façon abrégée MACE. Cette appellation est bien plus pertinente. Elle est compatible avec la dénomination **Moteur À Combustion Externe** qui oublie, nous le verrons, l'énergie solaire issue de la fusion de l'hydrogène.

1. En fait, dans les moteurs à combustion interne, tout est fait pour éviter le phénomène d'explosion destructeur des éléments de ces engins.

1.4 Définition du moteur Stirling

L'appellation « moteur Stirling » a mis du temps à s'imposer. H.C. Fleeming Jenkin (1833-1885), professeur d'ingénierie à l'université d'Édimbourg, l'aurait proposée le premier.

Faute de trouver mieux, les ingénieurs de la société Philips auraient adopté cette dénomination dans le milieu des années 1950. À partir de là, cette appellation s'est généralisée.

Le moteur Stirling, Monsieur de La Palice l'aurait deviné, suit rigoureusement un cycle appelé cycle de Stirling composé de quatre phases :

- un chauffage du gaz à volume constant,
- une détente à température constante,
- un refroidissement à volume constant,
- puis une compression à température constante.

Nous étudierons cela dans le détail quand les différents types de moteurs Stirling se présenteront à nous.

Cet engin peut recevoir ou non un régénérateur, principale invention de Robert Stirling. Ses performances sont théoriquement meilleures avec un régénérateur comme nous l'apprendrons dans la partie théorie de cet ouvrage.

1.5 Préambule à l'étude de l'histoire de moteurs à air chaud ou MACE

Il a fallu attendre Gay-Lussac au début des années 1800 pour énoncer les lois relatives à la dilatation des gaz. Ceci nous fait comprendre que tous les géniaux inventeurs de machine à air chaud ou à vapeur possédaient une très forte intuition et un très grand sens physique car ils ne connaissaient pas les travaux de Gay-Lussac sur la dilatation des gaz et ceux de Sadi Carnot qui jeta les bases de la thermodynamique en 1824 en publiant son ouvrage sur la puissance motrice du feu [41].

Les moteurs à air chaud, à en croire certains ouvrages, auraient été inventés et développés au cours du XIX^{ème} siècle. C'est vrai et faux à la fois. En effet, rien ne se crée ex nihilo. Comme nous le verrons ci-après, on peut affirmer que le premier moteur à air chaud date du premier siècle de notre ère.

Les discontinuités sont rares dans l'histoire des sciences et des techniques. On constate plutôt des évolutions lentes ou rapides selon les périodes. Nommer les soi-disant premiers inventeurs de telle ou telle chose ne présente qu'un intérêt très limité et n'est, souvent et malheureusement, qu'une démarche empreinte d'un pur nationalisme.

Nous allons passer en revue les principales étapes franchies au cours de l'histoire qui ont permis une évolution rapide des moteurs à air chaud au cours du XIX^{ème} siècle. On va également beaucoup parler de machines à vapeur car elles se sont développées dans les mêmes périodes. Il est illusoire de croire que les histoires respectives de ces engins sont indépendantes. C'est pourquoi nous allons étudier sans ostracisme les évolutions des uns et des autres dans le chapitre qui suit.

Deuxième partie

Histoire

*Un danger est de s'imaginer que l'art
a fait table rase, qu'il commence une
carrière toute nouvelle et n'a plus rien
à voir avec le passé. C'est à peu près
comme si l'on s'avisait, pour faire
croître un arbre, de supprimer ses
racines.*

Camille Saint-Saëns (1835-1921)

Chapitre 2

Les grandes périodes de l'Histoire

Dans cette partie, nous allons faire quelques rappels historiques. Tel que cela a déjà été dit, l'objectif est de montrer la succession de différentes inventions pour mieux comprendre l'origine et la logique de l'évolution des moteurs à air chaud. Ceux-ci ne se sont pas développés indépendamment des découvertes faites dans d'autres domaines. En particulier, leur histoire est fortement imbriquée à celle des machines à vapeur. C'est pourquoi nous allons aborder parfois l'évolution de ces dernières. Les moteurs à air chaud tentèrent de les détrôner au cours du XIX^{ème} siècle, en vain. Puis, au cours du XX^{ème} siècle, les domaines d'application de ces deux types de machines se dissocièrent et, de ce fait, leur parcours furent relativement indépendants.

Tout en nous amusant un peu, nous commencerons par faire référence au philosophe grec Empédocle, personnage atypique mais attachant. Ensuite, nous verrons que l'aventure des moteurs à air chaud commence réellement au premier siècle de notre ère avec le génial et fécond Héron d'Alexandrie.

Après l'effondrement de l'Empire romain, le moyen-âge fut une période où les sciences et les techniques marquèrent le pas. Pendant quasiment un demi millénaire, il fallut se défendre contre les envahisseurs divers : Germains, Normands, Arabes, Magyars... Ensuite, se succédèrent les luttes entre papes et empereurs d'Allemagne, puis les rivalités entre la France et l'Angleterre. Pour le moins qu'on puisse dire, cette longue période ne fut pas propice aux progrès scientifiques, techniques ou artistiques. Dans ce contexte, la seule éclaircie (le terme est-il bien approprié ?) fut la période des croisades où les échanges entre chrétiens et musulmans furent nombreux.

Le contact avec la brillante civilisation des Arabes permit d'apporter en Occident produits et savoir faire jusque-là inconnus (techniques de tissage, de fabrication du verre, canne à sucre, papier de linge, poudre à canon, boussole...)[53]. Les Arabes se cultivèrent en partie au cours de leurs pérégrinations et intégrèrent les découvertes faites par les Chinois, les Indiens sans oublier les Grecs.

Durant la période correspondant à notre moyen-âge, le savoir et la recherche furent encouragés par les gouvernants arabes contrairement à ce qui se passait en Occident où les résultats scientifiques devaient rester conformes aux dogmes religieux.

Cependant, durant le Moyen Âge, cultures chinoises, arabes ou occidentales, toutes ignorèrent, en l'état de nos connaissances actuelles, les phénomènes thermodynamiques animant les moteurs à air chaud.

La Renaissance marqua une phase nouvelle de progrès. Les Arts furent les premiers à en bénéficier puis, petit à petit les sciences et les techniques. Les savoirs se mettaient petit à petit en place pour que, dès le XVII^{ème} siècle, on assiste à un essor rapide des ces différents domaines pour aboutir, au XIX^{ème} siècle, à ce qu'on appellera la « révolution industrielle » même si celle-ci n'aurait jamais eu lieu sans les découvertes qui l'ont précédée.

Nous allons donc parcourir ces différentes époques en nous axant sur la production d'énergie mécanique à partir d'énergie thermique.

Le découpage de ces différentes périodes historiques (Antiquité, Moyen Âge, Époque moderne, Époque contemporaine) est contestable mais communément admis. Ceci n'est pas très gênant quand on s'intéresse avant tout à la chronologie des événements et leurs enchaînements. Le problème qui apparaît se situe principalement aux périodes charnières : faut-il classer tel personnage en fonction de sa date de naissance ou en fonction de la date de son ou ses inventions ? James Watt, par exemple, est né en 1736 (période dite moderne) mais est décédé en 1819 (période dite contemporaine). Le classement choisi pour parler de ce personnage, ou d'autres dans le même cas, est forcément arbitraire. Rien n'est parfait.

Souvent, nous allons citer untel ou untel pour lui attribuer telle ou telle invention. Il faut rester très prudent dans cet exercice. On ne part jamais de rien et les découvertes ne sont bien souvent que de brillantes améliorations de ce qui existait précédemment.

Les discontinuités sont rares dans l'histoire des sciences et des techniques. On constate plutôt des évolutions lentes ou rapides selon les périodes.

La recherche systématique de l'inventeur d'un engin ou d'une idée est souvent erronée car empreinte de nationalisme. Il arrive souvent, à une même époque, que deux personnes arrivent à la même conclusion sans avoir communiqué entre elles tout simplement parce qu'elles cherchaient à résoudre le même problème avec les mêmes éléments de connaissance.

Les brevets d'invention ne marquent pas toujours le génie scientifique ou technique d'une personne mais bien souvent la capacité de celle-ci à tirer profit de façon sonnante et trébuchante d'une idée géniale. Et dans ce cas là, il importe plus d'être le plus rapide à déposer le brevet que d'être le véritable auteur de l'idée en question.

Ce principe est vieux comme le monde même s'il a pris de l'ampleur au début de l'ère industrielle et s'il est toujours d'actualité dans le domaine de l'informatique ou des biotechnologies en particulier. Pour s'en convaincre, il suffit de suivre l'actualité judiciaire récente qui oppose les nouveaux monopoles du XXI^{ème} siècle.

Pour paraphraser Pierre-Joseph Proudhon, on peut se demander si la propriété intellectuelle ou le droit d'auteur ne sont pas une forme de vol ou, plus grave encore, un frein au progrès bien compris. Victor Hugo, pourtant concerné au premier chef par ce problème, écrivait : « *Le livre, comme livre, appartient à l'auteur, mais comme pensée, il appartient - le mot n'est pas trop vaste - au genre humain. Toutes les intelligences y ont droit. Si l'un des deux droits, le droit de l'écrivain et le droit de l'esprit humain, devait être sacrifié, ce serait, certes, le droit de l'écrivain, car l'intérêt public est notre préoccupation unique, et tous, je le déclare, doivent passer avant nous.* »¹

Ceci étant dit, nous allons maintenant aborder chacune des périodes historiques citées ci-dessus.

1. Victor Hugo, Discours d'ouverture du Congrès littéraire international, 7 juin 1878

Chapitre 3

L'Antiquité

De l'invention de l'écriture à la chute de l'Empire romain d'Occident (en 500 de notre ère environ).

3.1 Empédocle (V^{ème} siècle environ avant notre ère) et les quatre éléments

Empédocle, personnage haut en couleur, philosophe, politique, poète et médecin grec, était convaincu que le Feu, l'Air, l'Eau, la Terre (auxquels notre savant ajoutait l'Amour et la Haine) sont les quatre "racines" de chaque chose.

Son affirmation ne découlait pas d'un raisonnement scientifique étayé par des arguments irréfutables. On était alors plus dans la croyance ou l'intuition. On n'en tiendra pas rigueur à Empédocle car il faudra attendre le XIX^{ème} siècle pour voir apparaître et se développer une approche scientifique rigoureuse.

Tout au long de son histoire, l'Homme a cherché à maîtriser ces quatre éléments. Aujourd'hui, c'est encore le cas même si à force de jouer avec le feu on a mis en péril l'air, l'eau et la terre...

L'objet de ce livre étant consacré aux moteurs à air chaud, nous allons essayer de voir, de façon ludique, si ceux-ci n'ont pas leurs racines dans ces quatre éléments comme l'aurait probablement fait Empédocle s'il avait maîtrisé les notions d'énergie, de physique des matériaux, d'échange de chaleur, de cycle thermodynamique...

3.1.1 Le Feu

Le Feu a toujours été présent dans notre univers. C'est l'énergie première qu'on retrouve dans les étoiles, plus particulièrement notre Soleil, mais aussi sur notre Terre avec les manifestations volcaniques (coulées de lave, eaux thermales...) ou comme conséquence des caprices de la météo quand un éclair embrase la nature. L'Homme, après avoir vaincu sa peur, a très rapidement compris les avantages qu'il pouvait retirer de cet élément : pour se chauffer, pour faire cuire sa nourriture, pour entretenir ses cultures en pratiquant l'écobuage.... et, en rapport avec l'objet de ce livre, pour produire de l'énergie mécanique.

Comme on le verra plus tard, cette volonté de maîtriser et utiliser cet élément conduisit différents inventeurs à créer ce qu'ils appelaient des « machines à feu » à partir des années 1700 environ. Nicolas Léonard Sadi Carnot, le fondateur de la science appelée thermodynamique, théorisa ce sujet au travers de ses « Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance » [41].

De nos jours, les moteurs à apport de chaleur externe utilisent le Feu provenant de la combustion de différentes matières et de plus en plus le feu provenant directement du soleil. C'est ce que nous aborderons dans la partie consacrée à leurs applications.

3.1.2 La Terre

La Terre a d'abord procuré à l'Homme sa nourriture puis ensuite les matières nécessaires à la fabrication d'objets utilitaires ou décoratifs (par exemple : les outils ou armes en silex de la préhistoire, les amphores en terre cuite, les ponts en pierre puis métalliques, les bijoux et leurs pierres précieuses, les matériaux composites utilisés en aéronautique, etc).

Au cours de leur histoire, les moteurs en tout genre ont toujours eu recours à des matériaux divers et souvent complexes : on citera principalement le fer, la fonte, l'acier (voir annexe C, page 215) mais aussi des alliages spécifiques pour améliorer les échanges de chaleur, pour réduire les frottements...

Désormais, les moteurs font appel à des matériaux très sophistiqués après avoir souffert des médiocres qualités de ceux présents avant le XIX ou XX^{ème} siècle. Nous le verrons plus tard quand nous nous pencherons sur les problèmes rencontrés au cours du développement de ces machines.

On peut également rajouter que la Terre renferme aussi du Feu. Aujourd'hui, nous le savons bien car nous consommons tous les jours du gaz et surtout du pétrole sous des formes variées après que nos aïeuls consommèrent du charbon. La Terre a été et continue d'être la source des énergies fossiles dont il faudrait savoir se passer.

Les moteurs à apport de chaleur externe peuvent fonctionner avec ces carburants qui ont mis des millions d'années à se constituer. Cependant, ils sont capables d'utiliser d'autres sources du Feu : le soleil comme nous venons de le voir ci-dessus mais aussi des sources renouvelables telle que la biomasse.

3.1.3 L'Eau

Tout le monde en est conscient, cet élément, l'Eau, est vital pour les espèces vivantes. Tous les jours nous devons consommer de l'eau pour assurer nos fonctions biologiques. Les cultures et l'élevage ne peuvent se passer de cet élément. Notre confort quotidien fait appel à cette substance quand nous lançons machine à laver le linge, la vaisselle ou quand nous prenons notre douche. Les deux tiers de notre planète sont recouverts d'eau. Et nous craignons d'en manquer... Comme quoi elle nous est vraiment indispensable.

Pour capter l'eau, l'Homme a très tôt inventé la noria. Pour ses besoins en énergie mécanique, il inventa sans tarder la roue hydraulique verticale ou horizontale [60]. Très sommaire au départ, celle-ci se transforma en turbine dans les installations de puissance installées au pied des montagnes ou le long des cours d'eau. À la fin du XIX^{ème} siècle, on nomma cette utilisation la « houille blanche ». Cette expression, inventée et diffusée par Aristide Bergès [10] au travers de ses actions de promotion de cette énergie et surtout par ses nombreuses réalisations, fait référence à « la houille noire » ou « charbon de terre »¹. En fait, c'est à Cavour qu'il faudrait attribuer l'origine de cette appellation quand il nommait l'énergie hydraulique « *carbone bianco* ».

Le creusement des canaux permirent aux marchandises et matières premières de circuler en grandes quantités, toujours grâce à l'eau. Au début, il fallait utiliser l'énergie animale pour mouvoir les embarcations puis les moteurs thermiques prirent le relai. Sur les mers et océans, ces mêmes moteurs remplacèrent les voiles et la force des vents.

L'eau est souvent nécessaire aux moteurs à air chaud ou à apport de chaleur externe car elle permet de les refroidir avec une rare efficacité, bien mieux qu'on ne pourrait le faire avec de l'air. Les caractéristiques de l'eau sont très intéressantes comparativement à d'autres éléments quand il s'agit de capter ou véhiculer des calories.

À ce stade, on ne comprend pas forcément pourquoi il est si important de bien refroidir nos moteurs à air chaud. Nous verrons plus loin que pour transformer la chaleur en énergie mécanique il nous faut une source chaude et une source froide. Cette dernière est fréquemment constituée d'eau froide. Nous approfondirons ce point en examinant les principes de fonctionnement de nos moteurs et lorsqu'on fera un peu de théorie.

3.1.4 L'Air

Inutile de préciser que pour nous, êtres aérobies, l'Air nous est tout aussi vital que l'Eau ! Il ne fait pas bon manquer d'air...

Cette substance qui nous entoure est restée très longtemps une énigme quant à sa composition et à ses propriétés physiques. Il fallut caractériser mieux cet élément. C'est ce que s'efforcèrent de faire de nombreux scientifiques. Nous étudierons cela plus précisément dans le chapitre consacré à ce thème (page 161, § 20).

L'air constitutif de l'atmosphère nous protège des rayonnements nocifs du soleil en les filtrant. Il permet aussi l'effet de serre indispensable à la vie sur Terre même si ce phénomène ne doit pas devenir excessif comme c'est le cas actuellement.

1. La houille était appelée « charbon de terre » dans l'Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers éditée de 1751 à 1772 par Diderot et d'Alembert [49].

Le fluide de travail des moteurs à apport de chaleur externe fut au départ de l'air, d'où leur nom. Plus tard, au XX^{ème} siècle, il fut remplacé par d'autres gaz plus particulièrement l'hydrogène ou l'hélium nettement mieux adaptés pour augmenter les performances de ces moteurs.

L'air, parce qu'il contient de l'oxygène, est également nécessaire à toute combustion procurant l'énergie de base à nos moteurs à air chaud sauf quand les calories arrivent directement du soleil.

3.2 Philon de Byzance (fin III^{ème} siècle avant notre ère) et le thermoscope

Quelques siècles avant notre ère, Philon de Byzance fit une expérience simple montrant que l'air se dilatait si on le chauffait. Il exposait au soleil une bouteille étanche reliée à un récipient d'eau par un tuyau. Le soleil transmettant de la chaleur à la bouteille, le volume de l'air emprisonné augmentait, des bulles apparaissaient dans le récipient d'eau. Voir la figure suivante :

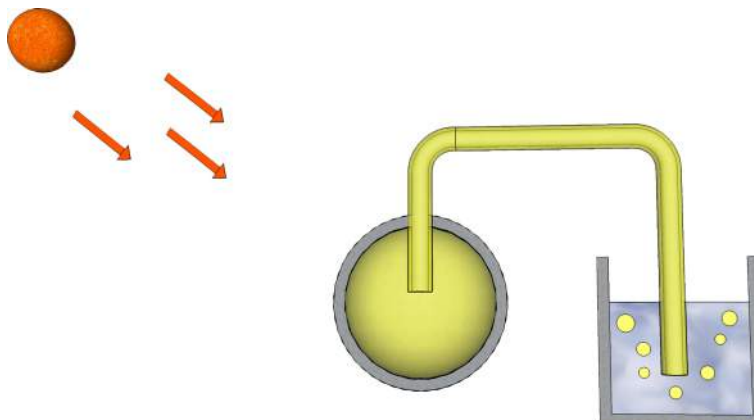


FIGURE 3.1 – Thermoscope de Philon de Byzance

Philon de Byzance, cependant, ne sut pas donner une explication correcte au phénomène. Dommage. "*Le feu est étroitement associé à l'air. De plus, il l'attire.*" telle aurait été sa conclusion. Celle-ci, bien qu'erronée, n'a pas empêché Philon d'écrire de nombreux traités qui furent exploités ensuite par Héron d'Alexandrie, entre autres, afin de réaliser des dispositifs tels que ceux que nous allons voir ci-dessous.

3.3 Héron d'Alexandrie (I^{er} siècle de notre ère) un génial inventeur

La probable première utilisation de l'Eau et du Feu pour produire de l'énergie revient à Héron d'Alexandrie (I^{er} siècle de notre ère) qui inventa l'Éolipyle (ou boule d'Éole), voir l'illustration ci-dessous.



FIGURE 3.2 – Eolipyle d'Héron d'Alexandrie

L'eau contenue dans la partie hémisphérique inférieure, sous l'action du feu, se transforme en vapeur. Grâce à deux tuyaux symétriques, celle-ci est envoyée dans la sphère montée sur un axe. Quand la vapeur sort par les 2 éjecteurs, la sphère tourne. C'est très probablement la première machine ou turbine à vapeur ! On se doit quand même de préciser que cet engin ne fut qu'un jouet n'ayant d'autre objectif que d'amuser les spectateurs. Avec un tel système, Héron d'Alexandrie ne devait aucunement espérer récupérer une quelconque énergie mécanique. Il est fort probable qu'Héron n'avait pas compris le phénomène physique qu'il mettait en évidence. En effet, pour lui, c'était l'air contenu dans l'eau qui s'échappait sous l'effet de la température.

Ci-dessous, voici la représentation d'un dispositif destiné à ouvrir les portes d'un temple grec, le premier moteur à air chaud ? Rien n'est sûr même si c'est très probable. C'est encore le génial Héron d'Alexandrie qui en est à l'origine.

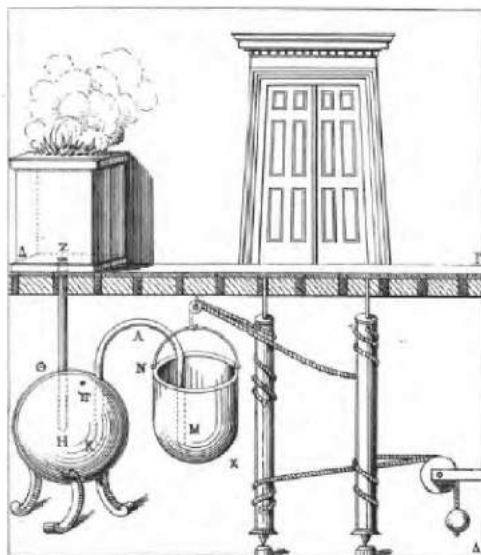


FIGURE 3.3 – Ouverture des portes d'un temple par Héron d'Alexandrie

C'est le plus ancien des systèmes connus utilisant la propriété de l'air à se dilater quand on le chauffe. Un feu était entretenu sur l'autel. Celui-ci chauffait et dilatait l'air emprisonné dessous. L'eau contenue dans le ballon de gauche était ainsi évacuée vers la petite capacité située à sa droite. Le poids de cette dernière augmentant, les portes finissaient par s'ouvrir. Quand le feu était éteint, on revenait à la situation initiale. Le système était donc parfaitement réversible !

Si on était tenté de le faire, il ne faut donc plus chercher au XVIII^{ème} ou au XIX^{ème} siècle l'inventeur du moteur à air chaud mais au premier siècle de notre ère. Il n'était ni français ni anglais ni écossais mais grec.

Chapitre 4

Le Moyen Âge

De la chute de l'Empire romain d'Occident (en 500 environ) à la prise de Grenade (1492).

Comme nous l'avons vu en introduction de cette partie consacrée à l'histoire, le Moyen Âge ne fut pas très propice aux découvertes scientifiques ou aux inventions technologiques.

Pour ne pas dresser un tableau trop noir de cette époque, il est juste de dire qu'elle fut essentielle :

- Dans les domaines de l'enseignement (bien avant Charlemagne) avec la création d'écoles et d'universités, l'invention des examens dont le baccalauréat, l'écriture d'encyclopédies.
- Dans l'organisation politique de la France avec le développement des collectivités territoriales, des juridictions, et l'instauration de l'impôt permanent et des taxes sur les marchandises.
- Dans le développement de l'agriculture avec une amorce de mécanisation de celle-ci (introduction de la charrue puis de la herse), l'amélioration de l'utilisation des terres par l'application de l'assolement triennal (blé d'hiver, céréales de printemps puis jachères) dans les régions de plaines.
- Dans l'utilisation de l'énergie hydraulique avec les moulins à eau (roues horizontales ou verticales) et de l'énergie éolienne avec les moulins à vent.
- Pour la prospérité de la finance avec la création des virements bancaires, des prêts, des assurances, de la comptabilité.
- Pour l'« art » militaire avec l'utilisation de la poudre, des canons ou autres joyeusetés plus modernes.
- Dans les progrès culturels avec la construction d'églises ou de cathédrales de plus en plus imposantes, la réalisation d'œuvres monumentales en peinture, tapisserie ou vitraux .[6]

Nous en resterons là car, sur le plan de la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique, et sauf découverte récente, il n'y a rien à développer sur ce thème.



FIGURE 4.1 – Charrue tirée par deux bœufs : « Les très riches heures du duc de Berry »

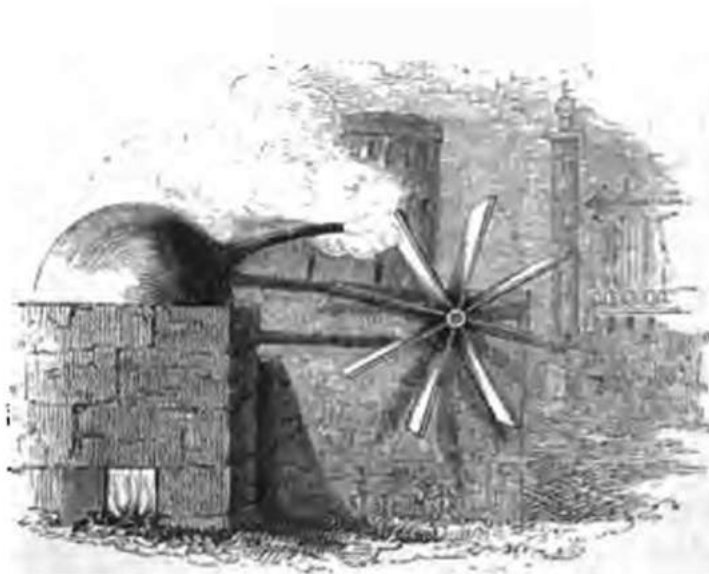
Chapitre 5

L'Époque Moderne

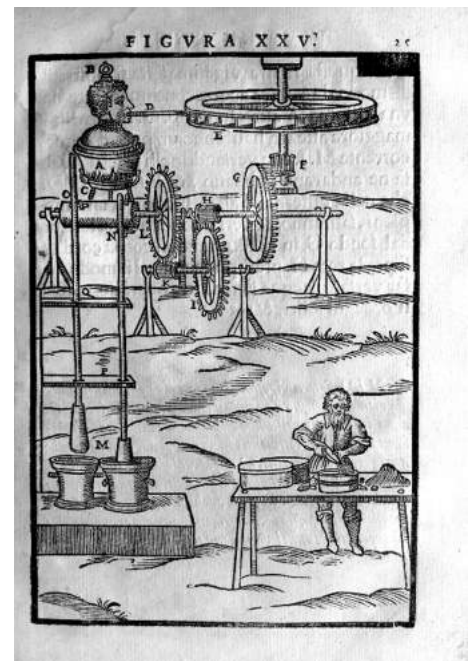
De la prise de Grenade (1492) à la Révolution française (1789).

5.1 Giovanni Branca (1571-1645)

Avec Giovanni Branca, l'éolipyle d'Héron d'Alexandrie connut un nouveau succès (voir page 29). En effet, cet ingénieur et architecte italien imagina différents appareils découlant de l'éolipyle comme le système pilon-mortier ou le tournebroche représentés ci-dessous :



(a)



(b)

FIGURE 5.1 – Système mortier-pilon et tournebroche de Giovanni Branca [40]

5.2 Salomon de Caus (1576-1626)

Salomon de Caus avait, à sa façon et sans en établir une quelconque théorie, compris que lorsqu'on chauffait de l'air celui-ci augmentait sa pression à volume constant ou se dilatait à pression constante. C'est ainsi que ce génial inventeur réalisa une pompe solaire dont on voit le schéma ci-après :

- La machine, exposée au soleil le jour, voit la pression augmenter dans les 4 récipients. L'eau passera alors dans le clapet G pour arriver dans le bassin O.
- La nuit, les réservoirs se rempliront à nouveau car, la pression chutant, l'eau remonte du bassin inférieur via le clapet H.

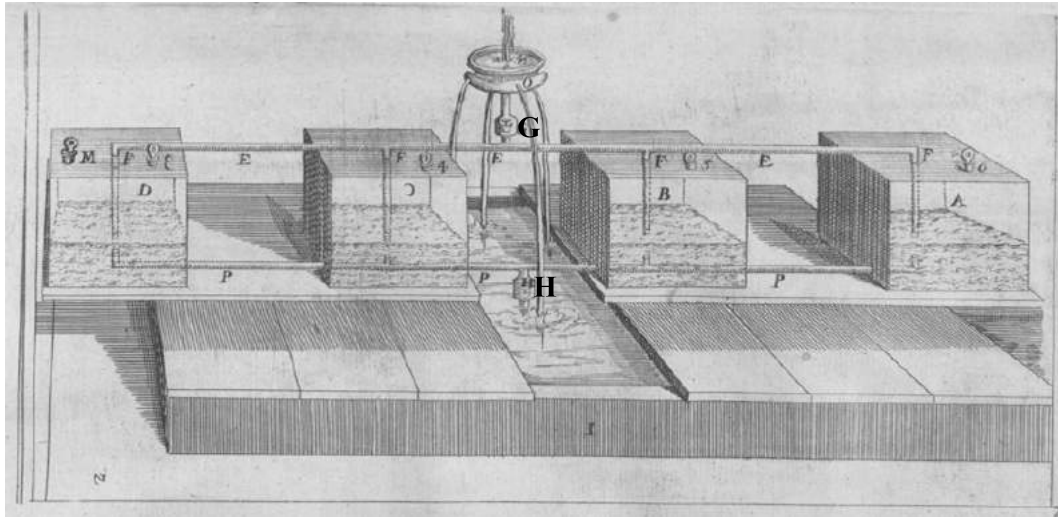


FIGURE 5.2 – Salomon de Caus : « machine fort subtile, par laquelle on pourra faire eslever une eau dormante »[43]

Aujourd'hui, cela nous paraît simple et évident. Pour l'époque, c'était la preuve d'une grande intelligence !

5.3 Denis Papin (1647 - 1712)

Ou l'invention de la soupape de sûreté et du dispositif cylindre-piston.

Médecin (mais sans passion pour la médecine), physicien, mathématicien et inventeur prolifique, tels sont les qualificatifs dont on peut honorer Denis Papin. Ses passions tournent autour de l'eau, de l'air et du vide.

Français né à proximité de Blois, calviniste, Denis Papin s'exila pour l'Angleterre avant la révocation de l'Édit de Nantes. Il connut le succès dès son jeune âge grâce à son intelligence mais aussi à la qualité des personnes qu'il a fréquentées : Boyle dont nous parlerons ci-dessous (page 161 ; § 20.2.1) mais aussi et surtout Christian Huyghens très grand mathématicien, astronome et physicien néerlandais du XVII^{ème} siècle. Ce dernier imagina, sans réussir à concrétiser son idée, le moteur à poudre. De cette invention naquit le moteur à vapeur de Papin.

Les travaux de Denis Papin ont donc été connus de nos amis anglais avant que leur réputation ne traverse la Manche.

Denis Papin séjourna temporairement en Allemagne pour enseigner les mathématiques avant de revenir en Angleterre et y mourir dans la plus grande des pauvretés malgré ses nombreuses inventions qu'il ne sut pas monnayer.

5.3.1 Le digesteur et la soupape de sûreté

Denis Papin présente dans son traité de 1682 « *Digesteur ou Manière d'amollir les os et de faire cuire toutes sortes de viande en fort peu de temps et à peu de frais ; avec une description de la machine dont il faut se servir pour cet effet.* »[78] un appareil capable d'extraire la gélatine des os et de faire reculer la faim par l'utilisation de denrées alimentaires de modeste qualité.

Réduire la famine était une des préoccupations de notre inventeur.

C'est le successeur du tajine inventé par les berbères et l'ancêtre de nos autocuiseurs qui nous permettent de préparer vite et bien différents aliments.

Cet appareil est soumis à de fortes pressions (jusqu'à 20 fois la pression atmosphérique) pour obtenir une température de fonctionnement élevée. Pour cela, Denis Papin doit concevoir une enceinte suffisamment résistante. Mais son génie consiste surtout à la munir d'une soupape de sûreté pour la protéger des pressions excessives, une invention de tout premier plan.

Denis Papin, personnage très prudent, avait pressenti le danger des machines à vapeur. Beaucoup d'entre elles exploseront par la suite faisant de nombreuses victimes (à titre d'exemple, une chaudière de locomotive explosa encore en 1935, aux environs de Tenay dans l'Ain, tuant chauffeur et mécanicien. La chaudière, d'un poids de 35 tonnes, fut retrouvée à plus de 150 m du lieu de l'explosion ! [11]).

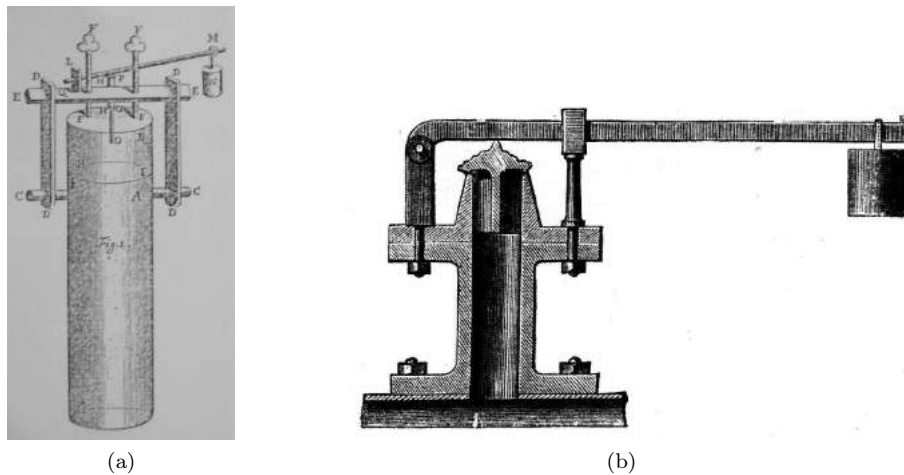


FIGURE 5.3 – Digesteur et soupape de sûreté de Denis Papin[56]

La faible énergie contenue à un instant donné dans un moteur à air chaud est sans commune mesure avec l'énergie phénoménale présente en permanence dans une machine à vapeur. Ce point est très important et explique que ces deux machines étaient en concurrence principalement en raison de cette comparaison de dangerosité. Malgré tout, les deux continuèrent à prospérer au XIX^{ème} siècle. Avec un peu de recul, on peut dire que les faibles besoins en puissance étaient satisfaits par le moteur à air chaud alors que les grosses installations étaient construites autour de machines à vapeur. C'est toujours une vérité de nos jours : les moteurs Stirling ont une puissance de quelques dizaines de kW, les turbines à vapeur de 1000 MW ou plus.

Denis Papin dut également mettre au point des joints d'étanchéité capables, eux-aussi, de résister à de fortes pressions et températures. Quand nous regardons aujourd'hui une cocotte-minute nous n'avons même pas idée des difficultés rencontrées pour mettre au point son ancêtre : le « digesteur ». Bien des matériaux qui nous sont familiers aujourd'hui n'existaient pas encore à l'époque de Denis Papin.

5.3.2 Les machines à vapeur de Denis Papin

Ce qui passionnera le plus les amateurs de moteurs est le fait que Denis Papin a mis au point la première machine à vapeur basée sur un mouvement alternatif utilisant un cycle réversible. Elle est constituée d'un cylindre et d'un piston (voir l'illustration ci-dessous). Le but est de faire monter le piston en faisant bouillir de l'eau située dans la partie inférieure de l'appareil. Ensuite, après avoir bloqué le piston en position haute, on retire la source de chaleur. Quand l'appareil s'est bien refroidi, quand la vapeur d'eau s'est condensée, on libère le piston qui est aspiré par le « vide » ainsi créé. Denis Papin, au début tout au moins, semblait plus soucieux de créer du vide dans une enceinte métallique que de mettre celle-ci en pression. C'est un paradoxe. Cela n'empêche pas d'inscrire cette invention importante dans le long développement des moteurs thermiques. L'ensemble cylindre-piston sera repris par la suite dans la grande majorité des moteurs développés.

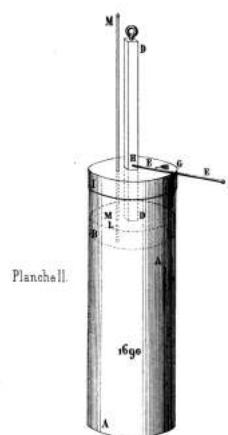


FIGURE 5.4 – Première machine à vapeur de Denis Papin [79]

Ce dispositif est considéré par certains comme étant la première machines à vapeur¹ [47]. Les successeurs de Denis Papin ont ensuite amélioré ce dispositif grâce à des moyens parfois très astucieux comme nous le verrons plus tard. Denis Papin industrialisa la machine élémentaire présentée ci-dessus en concevant un dispositif transformant l'énergie thermique en énergie mécanique en utilisant, et c'est nouveau pour lui, la force de la vapeur. Voir l'illustration ci-dessous :

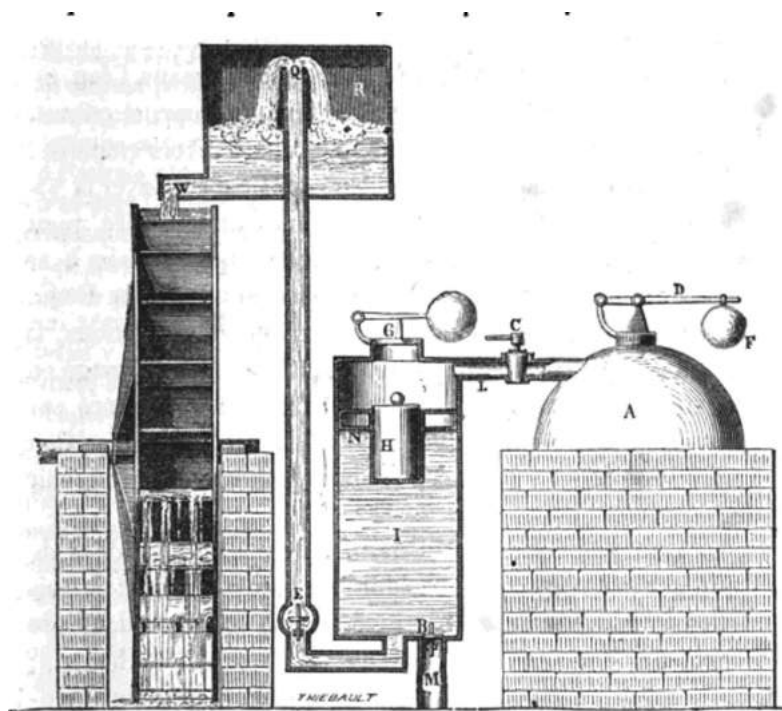


FIGURE 5.5 – Deuxième machine à vapeur de Denis Papin [51]

Cette machine ressemble étrangement à celle de Thomas Savery que nous allons étudier plus loin dans ce livre. Certains penseront que Denis Papin s'inspira très fortement de la « Miner's Friend » (voir page 37, § 5.4).

5.3.3 Le bateau à vapeur de Denis Papin

Denis Papin eut l'idée d'utiliser ce moteur pour mouvoir un bateau. Le premier bateau à vapeur² ? Certainement. Denis Papin a effectivement construit un tel bateau, celui-ci aurait navigué en 1704 sur la rivière Fulda en Allemagne sous les yeux du Langrave de Hesse.

Une telle embarcation a existé, cela ne fait aucun doute. Denis Papin chercha à rejoindre l'Angleterre avec celle-ci. Mal lui en prit. Le 25 septembre 1707, après être parti de Cassel et avoir descendu la rivière Fulda, il arriva à la confluence avec le Weser. Les bateliers, voyant en ce bateau autonome sans mât et sans voile une redoutable menace pour leur activité, le détruisirent sans ménagement. Ceci explique pourquoi on possède très peu de renseignements sur ce prototype.

La destruction brutale de ce modeste vaisseau et son parcours de Cassel à Münden sont attestés par le bailli de cette ville par une lettre envoyée au philosophe et scientifique Leibniz, protecteur de Denis Papin. [51]

1. Cette affirmation est très discutable. Pour satisfaire tout le monde, on dira que l'invention pure n'existe pas. Dans tous les domaines, scientifiques, techniques, artistiques... on assiste plutôt à des évolutions lentes ou rapides. Ce sont ces dernières qu'on peut, avec indulgence, classer dans le registre des inventions. Cette opinion n'engage que son rédacteur (ou inventeur ?).

2. Nous examinerons plus loin un bateau à vapeur semblable conçu et réalisé par Claude-François Dorothee Jouffroy d'Abbans qui connut un meilleur succès malgré l'aveuglement des membres de l'Académie des Sciences et du gouvernement de l'époque (voir page 46; § 5.11). Pour certains, le premier bateau à vapeur reste, de façon très contestable, celui de Jouffroy d'Abbans...

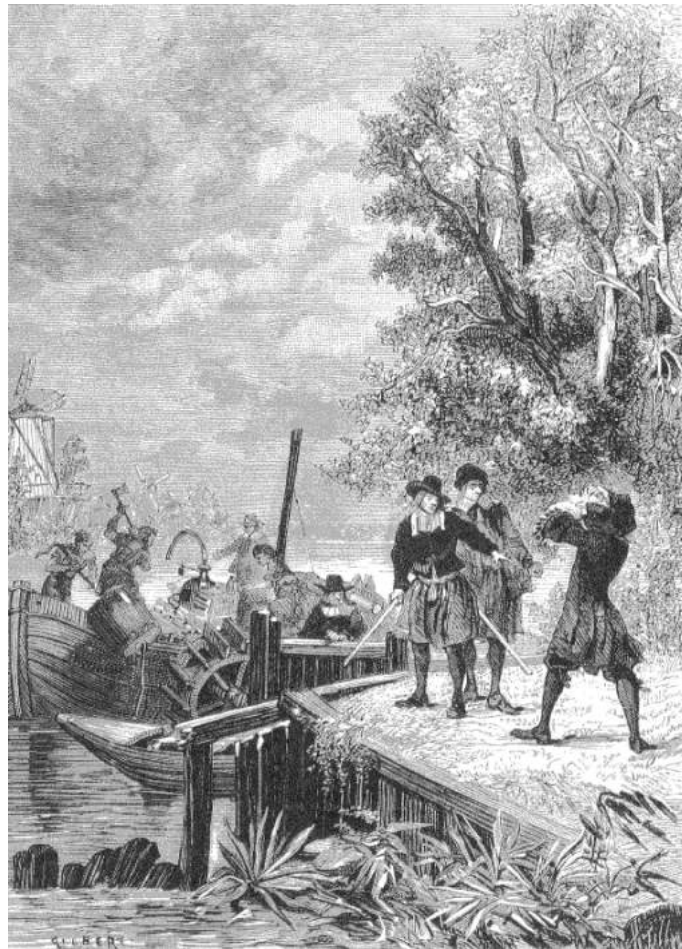


FIGURE 5.6 – Destruction du bateau de Denis Papin par des bateliers allemands[25]

Inutile de dire le désarroi de Denis Papin après une telle mésaventure doublée d'une séparation d'avec sa femme et ses enfants. Ne désirant pas rester en Allemagne après ce triste épisode, ne pouvant pas rentrer en France du fait de l'intolérance religieuse du temps de Louis XIV, il se résigna à retourner en Angleterre, son pays d'accueil. Il y mourut dans la misère à une date indéterminée entre 1712 et 1714.

Les amateurs de moteur à air chaud doivent la plus grande des considérations à Denis Papin pour avoir inventé l'ensemble cylindre-piston et la soupape de sécurité (et, accessoirement, comme tout un chacun, la cocotte-minute!).

5.4 Thomas Savery (1650-1715)

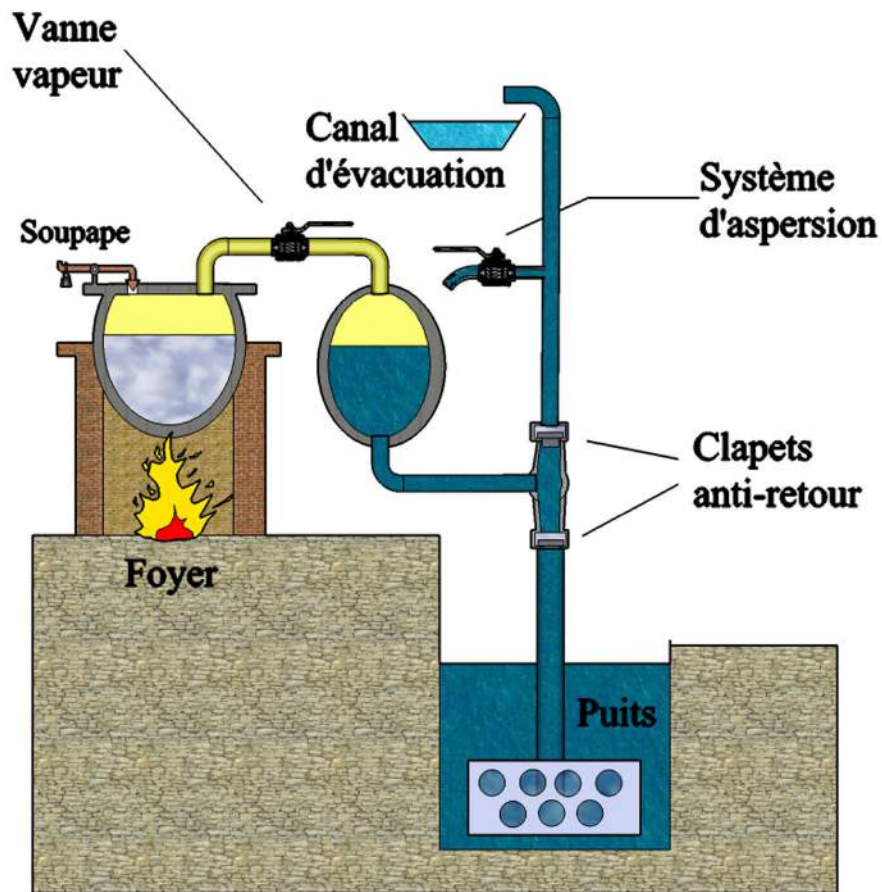
Ou la création d'une pompe utilisant la vapeur : « miner's friend ».

Très probablement inspiré par les travaux de Denis Papin, Thomas Savery construisit des pompes pour puiser l'eau des mines de cuivre ou d'étain en utilisant la vapeur comme fluide de travail.

Savery nommait son invention « miner's friend », l'amie des mineurs.

Il fut le premier à commercialiser de tels appareils mus grâce aux propriétés de la vapeur. Ce dispositif ne fut pas un réel succès du fait de son manque de fiabilité, de la difficulté d'obtenir de bonnes étanchéités, de ses modestes performances et de sa consommation, jugée excessive, de charbon[17].

Comme un petit schéma vaut mieux qu'un long discours, regardons ci-après une représentation de la pompe de Savery.



Machine de Savery



FIGURE 5.7 – Miner's friend de Thomas Savery [38]

La vapeur était transférée dans un réservoir contenant de l'eau. Cette dernière, sous l'effet de la pression, était évacuée du réservoir vers le haut. Ensuite le réservoir était isolé de la vapeur sous pression puis refroidi à l'aide d'une partie de l'eau puisée. À la fin de cette phase, quand la vapeur s'était condensée, l'eau remplissait à nouveau le réservoir car elle était aspirée du puits. Et ainsi de suite...

Dans ce dispositif, on utilise à la fois la pression de la vapeur et la dépression créée lorsqu'elle se condense.

Ce fonctionnement était possible grâce à l'installation judicieuse de clapets anti-retour. Quand nous étudierons les différentes configurations du moteur Stirling, nous examinerons la pompe fluidyne tout à fait inspirée de la réalisation de Thomas Savery.

5.5 Guillaume Amontons (1663-1705)

Ou l'utilisation de la dilatation de l'air quand on le chauffe

Une des grandes inventions de Guillaume Amontons (Membre de l'Académie Royale des Sciences) date de 1699 : il s'agit du « moulin à feu » (encore un mariage réussi, comme nous allons le voir, entre Air, Eau et Feu...).

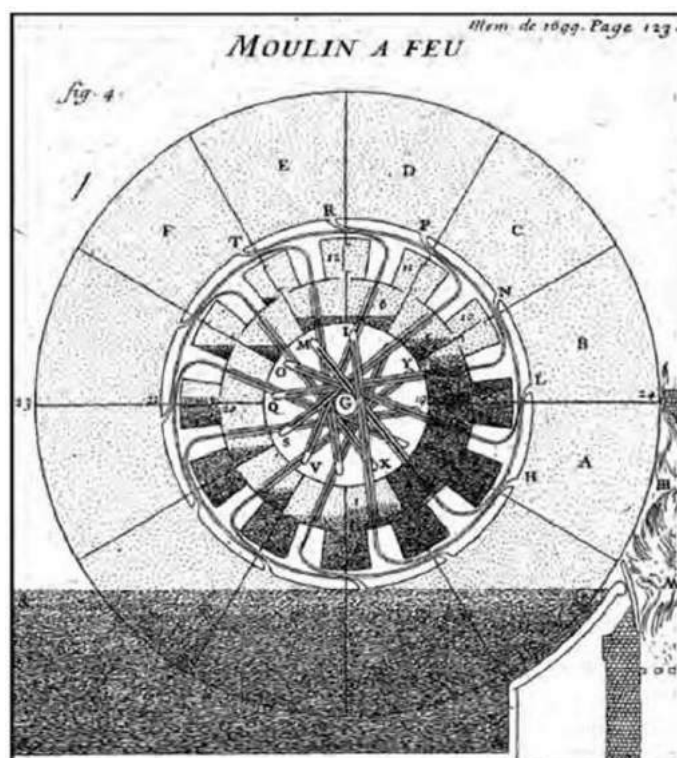


FIGURE 5.8 – Machine à feu de Guillaume Amontons - 1699

À cette époque, on connaissait bien sûr les roues hydrauliques, horizontales dans le Sud de la France, verticales dans le Nord. Toutes fonctionnaient sous réserve de bénéficier d'une chute d'eau. Une condition dont a voulu s'affranchir Guillaume Amontons en inventant « sa roue à feu » capable de fournir de l'énergie mécanique à condition d'avoir un plan d'eau et du feu !

Le principe consiste à chauffer de l'air qui, en se dilatant, va déplacer une masse d'eau dans une roue. Le centre de gravité de la roue bougeant à son tour, un nouvel équilibre est recherché par l'ensemble et notre roue va tourner !

Non content de cet exploit, Guillaume Amontons s'interroge sur les notions de travail et de puissance que nous connaissons aujourd'hui mais qui, au XVII^{ème} siècle étaient quasiment inconnues. [54]

Cette recherche aurait été motivée pour des raisons économiques (déjà !) à savoir : faut-il investir dans des chevaux ou dans un moulin à feu ? On comparait alors les prix d'achat, de fonctionnement, d'entretien... [33]

Tout
étant calculé, M. Amontons trouve que sa machine fera
au moins l'effet de 39. chevaux, & que comme on doit
compter que chaque cheval entretenu toute l'année pour un
travail qui ne va cependant que les jours ouvrables, revient
à 40. sols par chaque jour de travail, le profit de cette ma-
chine sera d'autant plus grand; que la dépense du bois qu'on
y brûlera en 24. heures, sera au dessous de 78. liv. Le mê-
me feu peut encore servir à d'autres ouvrages, c'est une
puissance qui cesse & reprend quand on veut, qui n'est
point sujette aux temps & aux lieux, &c.

FIGURE 5.9 – Étude économique de la machine à feu de Guillaume Amontons

En 1699, notre savant écrivit un mémoire à l'attention de l'Académie Royale de Sciences pour présenter son moulin à feu. Malheureusement, l'idée ne fut visiblement pas concrétisée :

« M. Amontons étant mort peu de temps après avoir exposé ses vues, a été privé de la satisfaction de les mettre en pratique, et d'apprendre que M. Savery était parvenu à ménager l'action du feu » [37]

Notre exposé ne serait pas complet si on ne mentionnait pas le fait que Guillaume Amontons fut le premier à suggérer la notion de zéro absolu (-273°C environ), température la plus basse qu'on puisse envisager sinon atteindre. Il arriva à cette conclusion en étudiant le comportement des gaz lorsqu'on les refroidit. Leur volume diminuant régulièrement au fur et à mesure que leur température baisse, il y a une limite en température quand le volume atteint zéro.

C'était une préfiguration de la loi de Gay-Lussac (voir page 163 ; § 20.2.3).

5.6 Thomas Newcomen (1664-1729) et John Cawley(?-1725)

Ou la réalisation de la « machine atmosphérique »

Inspirés par les expériences respectives de Denis Papin et de Thomas Savery, Thomas Newcomen - forgeron/mécanicien/quincailler - et John Cawley³ - vitrier - conçurent une installation basée sur la production de vapeur et sa condensation.

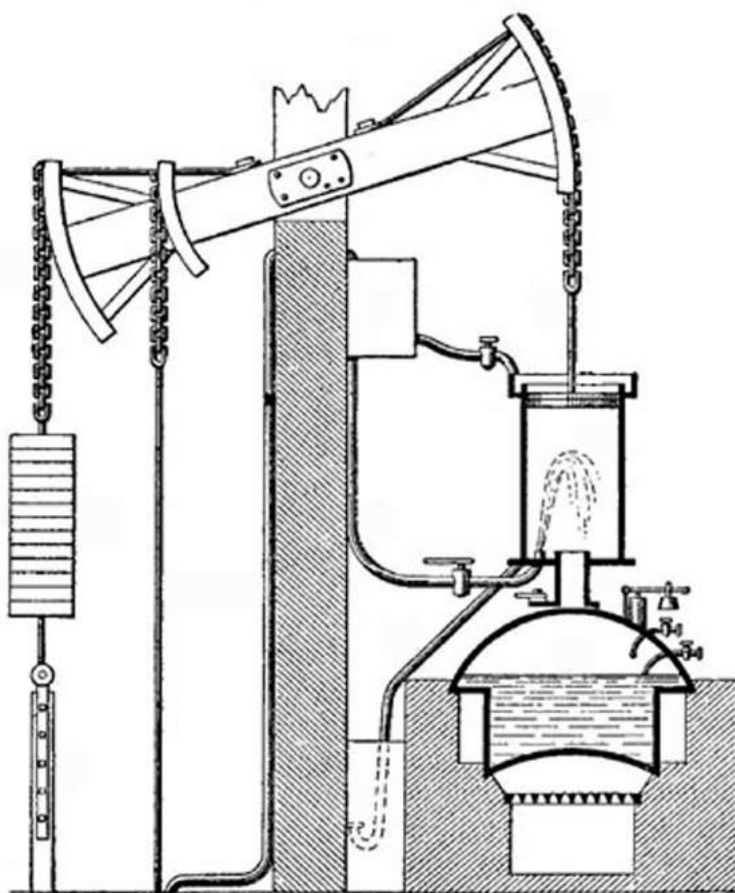


FIGURE 5.10 – Machine atmosphérique de Newcomen-Cawley

Leur machine est constituée d'un cylindre et d'un piston. La vapeur provenait d'une capacité remplie d'eau et exposée à la chaleur d'un foyer.

Ce dispositif constitue une synthèse des idées exposées précédemment quand nous avons parlé de Thomas Savery et de Denis Papin : couple cylindre-piston et système de refroidissement. La plupart des moteurs thermiques actuels reprennent cet ensemble dont, bien sûr, les moteurs à air chaud.

Un jeune enfant nommé Humphry, chargé d'ouvrir et fermer les robinets, imagina de faire exécuter son travail par le mouvement du balancier lui-même.

La machine atmosphérique était née.

3. On trouve, dans la littérature, le nom de John Calley ou John Cawley. Deux noms pour un même personnage.

5.7 Jacques Leupold (1674-1727)

Jacques Leupold s'inspira de la deuxième machine à vapeur de Denis Papin et de celle de Thomas Newcomen et John Cawley pour mettre au point une machine, la première du genre, qui travaillait avec une vapeur à haute pression et un balancier.[23]

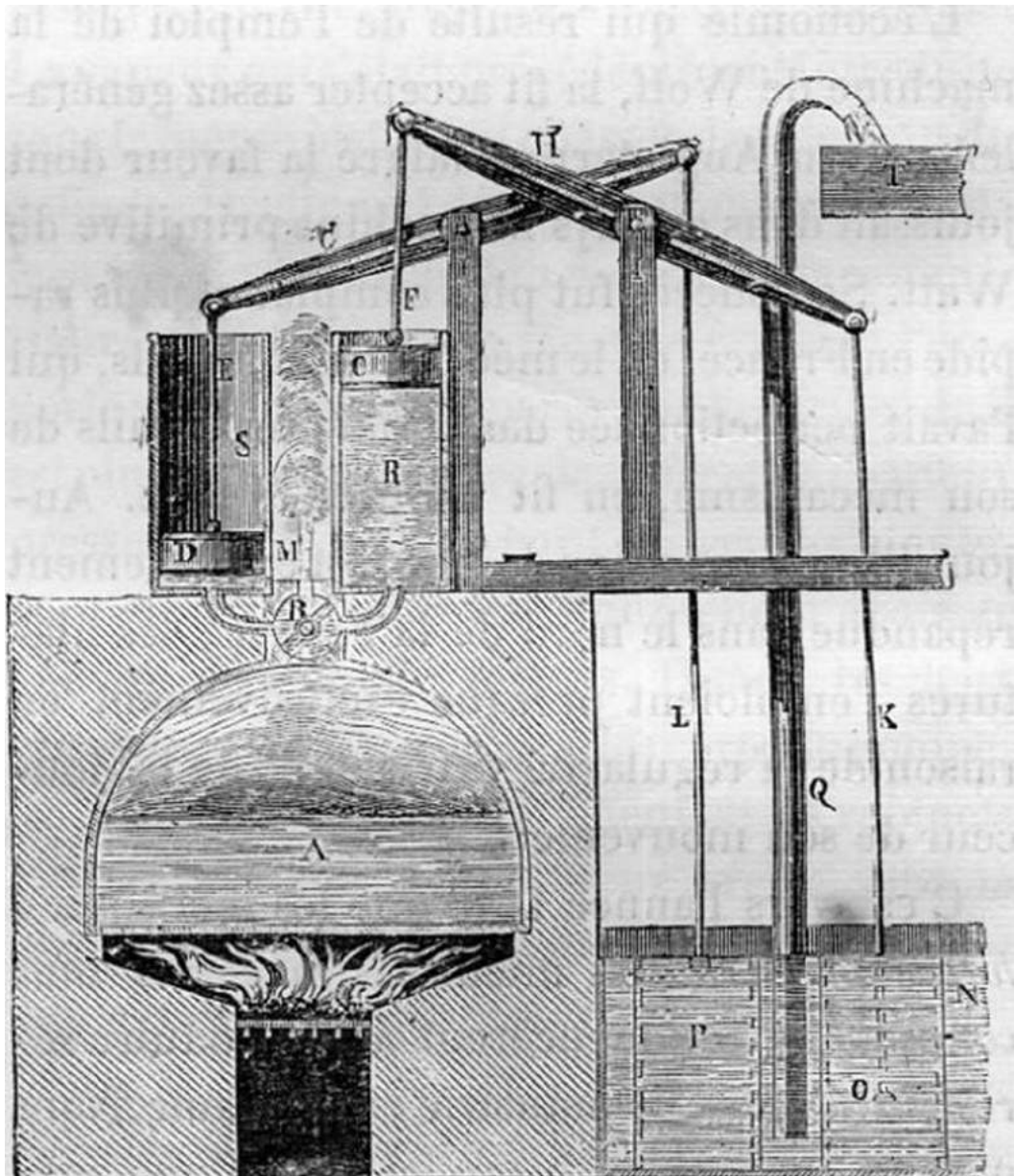


FIGURE 5.11 – Machine de Leupold

Cette machine comportait deux ensembles cylindre-piston afin de supprimer les temps morts liés à l'évacuation de la vapeur.

5.8 Nicolas-Joseph Cugnot (1725-1804)

Ou l'invention du premier véhicule auto-mobile à vapeur.

Difficile de parler de l'évolution des machines thermiques sans parler du « chariot à feu » ou « fardier » du français Nicolas-Joseph Cugnot, ingénieur militaire. Tous les engins examinés jusqu'à maintenant sont des moteurs fixes. Notre inventeur français eut l'idée de mouvoir un engin grâce à la force de la vapeur. Le « chariot à feu » de Cugnot fut donc le premier véhicule automobile au sens strict du mot.

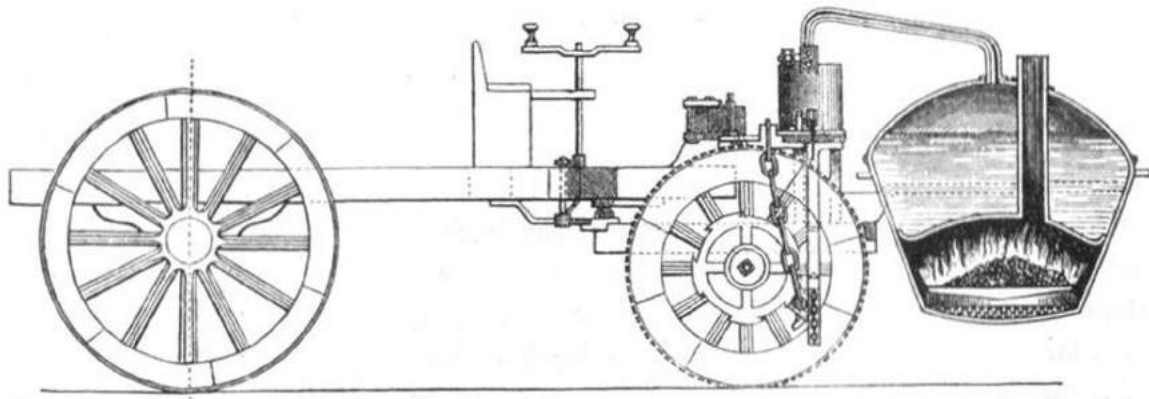


FIGURE 5.12 – Chariot à feu de Nicolas-Joseph Cugnot

Là encore, difficile de passer directement du concept à la réalisation. Cette expérience ne fut pas couronnée de succès à cause de malchance, de performances médiocres, de peu d'autonomie et de manque d'argent. Il faudra encore attendre pour assister au remplacement des vrais chevaux par des chevaux vapeur.

L'idée et le concept étaient pourtant excellents. L'histoire le prouvera. L'association « Le fardier de Cugnot » a réalisé une reproduction en vraie grandeur de ce véhicule et a réussi à le faire fonctionner durant plus d'une heure et demie le 01/09/2012 à une vitesse maximale de l'ordre de 4 km/h !^[5]

Au cours du XX^{ème} siècle, nous verrons que la société Philips, en imitant Nicolas-Joseph Cugnot, installa des moteurs Stirling sur des automobiles et des bus. Techniquement, l'idée était recevable mais, économiquement parlant, la concurrence avec les moteurs à combustion interne se montra un obstacle majeur.

5.9 Les frères Montgolfier Joseph et Étienne (1740-1810 / 1745-1799)

5.9.1 Le ballon à air chaud

Les frères Montgolfier, Joseph (le pragmatique) et Étienne (l'intellectuel), remarquèrent que l'air chaud montait dans une cheminée. Une masse d'air chaud, à la pression atmosphérique par exemple, occupe un volume plus grand que la même masse d'air froid car il s'est dilaté.

Ou, autrement dit, un volume déterminé d'air chaud pèsera moins lourd que le même volume d'air froid (en considérant, bien sûr, qu'ils sont à la même pression). Pour vous en convaincre davantage, reportez-vous à la partie de ce livre consacrée aux propriétés de l'air ou des gaz (Page 161, chapitre 20).

Que se passe-t-il alors ? Archimède nous l'avait bien dit, cette quantité d'air chaud de densité moindre va monter dans l'air froid environnant. Comme du bois, en général plus léger que l'eau à volume égal, va monter dans celle-ci. Et voilà, nous avons à notre tour théorisé le principe de la montgolfière. Facile...

Le mérite des frères Montgolfier c'est d'être passés de la théorie exposée ci-dessus à la pratique. La première expérience eut lieu à Annonay, là où étaient installées les usines familiales, le 4 juin 1783, sans passager à bord de leur engin.



FIGURE 5.13 – Expérience des frères Mongolfier à Versailles le 19 septembre 1783

Une seconde démonstration eut lieu à Versailles le 19 septembre de cette même année devant le roi Louis XVI. Un coq, un canard et un mouton eurent le privilège d'effectuer ce premier vol habité.

Les humains tentèrent ensuite l'expérience le 21 novembre 1783. L'équipage était constitué de deux aéronautes : Pilâtre de Rozier et le Marquis d'Arlandes. Il partirent des jardins de la Muette pour atterrir à la Butte-aux-Cailles à Paris. Le vol dura environ 20mn pour parcourir une distance de l'ordre de 5km.

Pilâtre de Rozier accompagné de Pierre-Auge Romain tentera plus tard la traversée de la Manche de France vers l'Angleterre, plus difficile que dans l'autre sens, le 15 juin 1785. Cette tentative lui fut funeste ainsi qu'à son équipier car le ballon, après s'être dégonflé, s'écrasa au sol.

5.9.2 Le béliet hydraulique

Les frères Montgolfier avaient aussi très bien compris que l'air était compressible. Ce sont eux, en effet, qui ont inventé le béliet hydraulique qui utilise cette propriété. Cet appareil a servi et sert encore à remonter de l'eau sans besoin d'aucune énergie à l'exception de l'énergie cinétique présente dans les cours d'eau où l'on puise ce fluide.

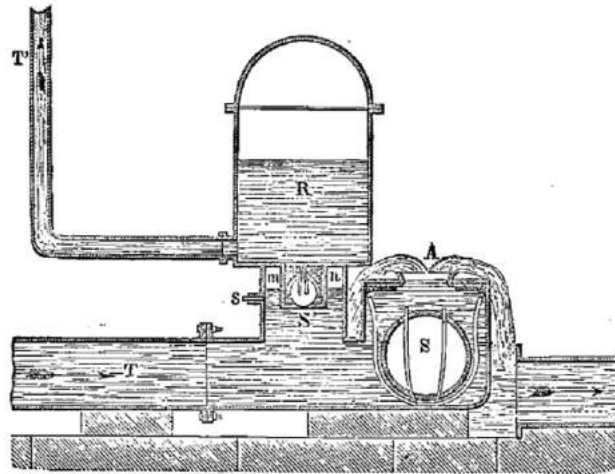


Fig. 272.

Bélier hydraulique. — En parlant du bélier hydraulique, dans le *Journal des mines* de 1802, le savant Montgolfier s'exprime ainsi :

« Telle est la machine que j'ai imaginée et exécutée en 1796, depuis plus de six ans, dans ma manufacture de papier à Voiron, pour élever l'eau d'une rivière à la hauteur de la pile de mes cylindres à la hollandaise, en profitant d'une chute de 10 pieds ; opération qui m'a dispensé de roues, de pompes et autres attirails de machines hydrauliques qu'on emploie ordinairement.

« Cette invention n'est pas d'origine anglaise, elle appartient tout entière à la France : je déclare que j'en suis le seul inventeur et que l'idée ne m'en a été fournie par personne ; il est vrai qu'un de mes amis a fait passer, avec mon agrément, à MM. Watt et Bolton, copie de plusieurs dessins que j'avais faits de cette machine avec un mémoire détaillé sur ses applications. Ce sont ces dessins qui ont été fidèlement copiés dans la patente prise à Londres par M. Bolton, le 13 décembre 1797 ; ce qui est une vérité dont il est bien éloigné de disconvenir, ainsi que le respectable M. Watt. »

C'est donc bien à notre savant Montgolfier qu'est dû le bélier hydraulique.

FIGURE 5.14 – Le bélier hydraulique des frères Montgolfier

Ce dispositif n'est pas un moteur à air chaud puisqu'il ne s'alimente pas d'énergie thermique mais il s'inscrit dans la compréhension du comportement des gaz, connaissance utile à la création de machines transformant énergie calorifique en énergie mécanique.

5.9.3 La machine à élever l'eau (ou le moteur à combustion interne ?)

Dans le cadre, cette fois-ci, des moteurs à air chaud, on se doit d'évoquer une autre machine mise au point par les frères Montgolfier : il s'agissait toujours d'une machine destinée à élever de l'eau mais en jouant sur la dilatation de l'air quand on le chauffe.

Cet engin ne fut pas un franc succès a priori car le projet fut sans suite. Dans le meilleur des cas, il a peut-être inspiré d'autres dans leurs recherches en particulier Savery dont nous étudierons ci-dessous les réalisations.

Nous pouvons voir ci-contre une reproduction sommaire de cette pompe à feu :

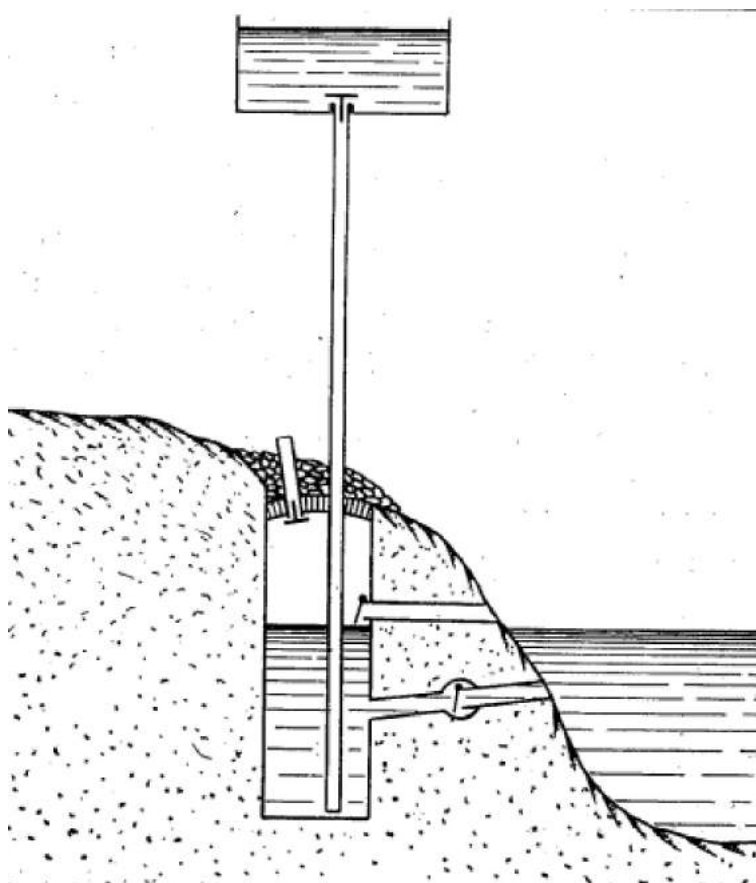


FIGURE 5.15 – Pompe à feu de Joseph Montgolfier [32]

Le principe de fonctionnement est simple. On envisageait de chauffer l'air prisonnier de la cavité avec du bois. L'air, en se dilatant, aurait fait monter l'eau car les trois clapets inférieurs se seraient fermés sous l'effet de la pression. Ce même air, en se contractant au cours de son refroidissement, aurait permis, à l'eau de remplir de nouveau la cavité. Après renouvellement de l'air contenant l'oxygène nécessaire à toute combustion, on pouvait envisager un cycle de chauffage supplémentaire.

Cela ne vous rappelle-t-il pas le fonctionnement d'un moteur à combustion interne ? On est en présence du même cycle, à l'exception de la phase compression : admission, combustion, échappement. C'est pour cette raison que certains considèrent les frères Montgolfier comme étant les créateurs du moteur à combustion interne. Les choses ne sont pas aussi simples, et nous le verrons ci-dessous, quand on examinera le moteur conçu par les frères Niépce (Page 53, §2.3.13). Ce dernier est plus élaboré que celui des frères Montgolfier.

Laissons la conclusion de cette partie à Charles Cabanes telle qu'il l'écrivait dans la revue « Nature » de 1936 [32] :

Il n'en reste pas moins que, dans l'instant même où ils réalisaient l'aérostat, ses inventeurs — croyant d'ailleurs explorer un tout autre domaine — découvraient le principe et le schéma du moteur qui, bien des années plus tard, devait permettre à d'autres hommes de parachèvement la conquête de l'air en donnant la direction au ballon et l'essor à l'avion. Si imparfaite que puisse nous paraître aujourd'hui la première ébauche, cet extraordinaire rapprochement vaut d'être noté.

CHARLES CABANES.

FIGURE 5.16 – Pompe à feu et système propulsif des aéronefs

5.10 Henry Wood (?-1758- ?)

Ou l'invention du moteur avaleur de flamme

On trouve parfois dans la littérature le nom d'Henry Wood, révérend lui-aussi comme Robert Stirling, pour affirmer qu'il est le créateur du premier moteur à air chaud en 1758. Cette affirmation n'est pas recevable compte tenu de tout ce que nous venons de voir ci-avant. Par contre, il est possible qu'Henry Wood imaginât un moteur avaleur de flamme même s'il n'existe aucune preuve de sa réalisation.

Le principe était de créer un « vide » à l'intérieur d'un réservoir pour utiliser ensuite la pression atmosphérique.

Pour mieux comprendre voir les schémas suivants relatifs à ces « moteur à vide » ou « vacuum engine » en anglais.

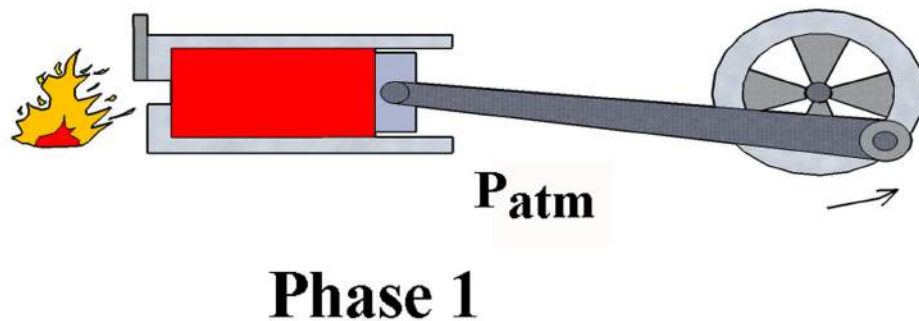


FIGURE 5.17 – Avaleur de flamme - Entrée de l'air chaud [38]

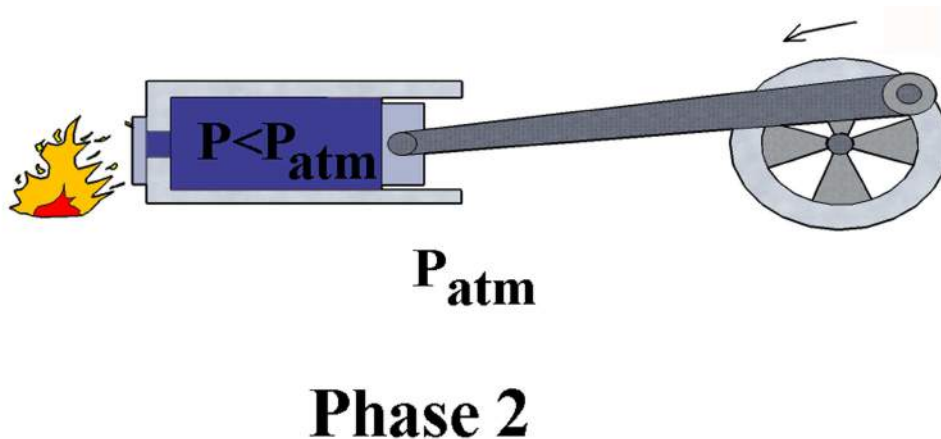


FIGURE 5.18 – Avaleur de flamme - Contraction de l'air

Le moteur à poudre imaginé par Christian Huyghens et étudié par Denis Papin inspira probablement Henry Wood.

5.11 Jouffroy d'Abbans (1751-1832)

Ou l'invention du premier bateau à vapeur ?

Claude-François Jouffroy d'Abbans imagina un bateau mû par des roues à aubes, elles-mêmes entraînées par une machine à vapeur⁴.

4. Les premiers bateaux datent de plus de 10 000 ans, 120 000 ans peut-être. Les roues à aubes furent imaginées par les romains aux IV^{ème} ou V^{ème} siècles [35].

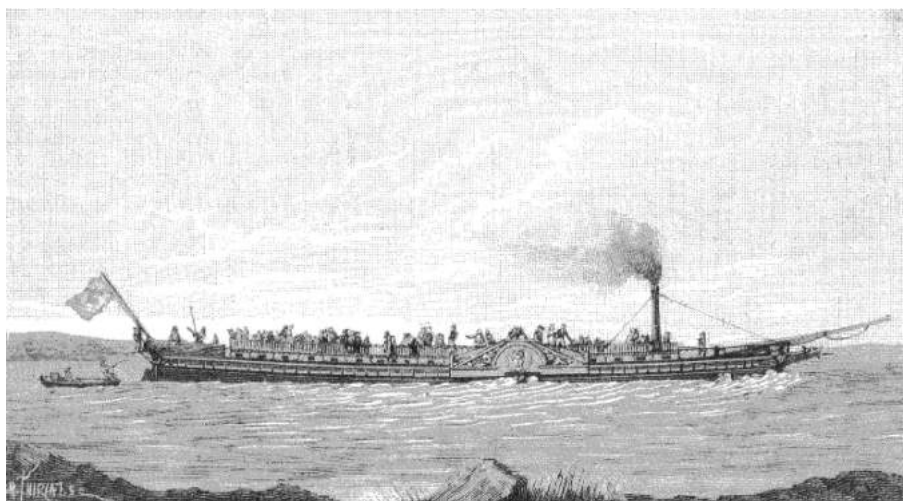


FIGURE 5.19 – Bateau imaginé par Jouffroy d'Abbans pour naviguer sur la Seine [28]

Compte tenu de ce qui est écrit dans le chapitre consacré à Denis Papin, l'affirmation selon laquelle Jouffroy d'Abbans est le premier à avoir fait naviguer un bateau à vapeur est erronée même si on la trouve dans certains ouvrages.

Ceci n'enlève rien au mérite de Jouffroy d'Abbans qui se ruina dans son aventure. De plus, il est fort probable qu'il ne connaissait pas les travaux de Denis Papin sur ce thème. Au mieux, il aurait eu vent de la mésaventure de ce dernier mais n'aurait eu aucun élément technique sur le bateau de Denis Papin car, comme on l'a vu précédemment (voir page 36, § 5.3.3), rien n'a survécu à la destruction de cette embarcation.

Le 15 juillet 1783, Jouffroy d'Abbans apporta la preuve de l'intérêt d'une machine à vapeur embarquée à bord d'un bateau. Il fit naviguer son Pyroscaphe⁵ sur la Saône en partant de la cathédrale Saint-Jean à Lyon pour remonter jusqu'à l'île Barbe située en amont, soit environ 3 km, en 15 minutes (le temps qu'il faut aujourd'hui en voiture en prenant les quais ! Mais la Saône était et reste moins embouteillée).



FIGURE 5.20 – Plaque commémorative de l'exploit réalisé par Jouffroy d'Abbans le 15 juillet 1783[38]

Cet exploit fut réalisé devant témoins (des milliers de spectateurs) et plus particulièrement en présence de membres de l'Académie de Lyon qui en attestèrent la véracité devant notaire. [51]

Ces témoignages ne suffirent pas au piètre ministre de Calonne pour accorder un « privilège » à Jouffroy d'Abbans. Cet acte aurait permis la continuation et l'amélioration du projet en facilitant le financement des travaux à engager et la protection de l'invention. Ce refus s'appuyait sur l'avis donné par Jacques-Constantin

5. Le Pyroscaphe mesurait 46 m de long, 4,6 m de large et pesait 150 tonnes.

Périer, académicien mais surtout industriel et spéculateur, qui travaillait lui-même, sans succès, à la réalisation d'un bateau à vapeur ! Comme quoi, les conflits d'intérêts des experts dits indépendants ne datent pas d'aujourd'hui...

Les bateaux qui navigueront plus tard sur le Mississippi s'inspireront fortement des réalisations de Jouffroy d'Abbans. En effet, Robert Fulton améliora ce type de navire en France puis aux États Unis, non sans subir d'échecs. Il sut tirer profit et gloire de ses travaux et du développement de la navigation fluviale sur le Mississippi avec la multiplication des bateaux à roues à aubes.

Pourquoi parler autant de bateau à vapeur dans ce livre consacré aux moteurs à air chaud ? Tout simplement parce que, plus tard, l'idée est venue à certains d'installer un moteur à air chaud sur un bateau.

Ericsson en fit la tentative avec un bâtiment modestement appelé « Ericsson ». Non seulement preuve fut faite que ce domaine d'application n'était pas pour ce type de moteur mais, ultime outrage, le navire fut rapidement équipé d'une machine à vapeur en remplacement de sa motorisation d'origine.

Les machines à vapeur et les moteurs à combustion interne se montreront bien mieux adaptés à une utilisation à bord des gros navires (hormis pour certaines applications très particulières de navires militaires).

Cependant, le moteur Stirling a trouvé un créneau sur les plans technique et commercial en tant que moteur auxiliaire pour fournir chaleur et électricité sur les voiliers de luxe.

Avec un peu de recul, on peut dire que les machines à vapeur prouvent leur supériorité dans des installations de forte puissance. À l'inverse, les moteurs à air chaud se destinent plutôt à des applications domestiques de faible ou moyenne puissance.

5.12 James Watt (1736-1819)

Ou l'invention du condenseur, du piston à double effet et l'adaptation du régulateur à boule.

Avec Watt, nous allons encore décrire des machines à vapeur ! Cependant, les améliorations apportées à celles-ci par James Watt profiteront aussi en partie aux moteurs à air chaud.

Le piston à double effet sera vite utilisé pour créer de nouveaux moteurs à combustion externe et on le retrouve dans les moteurs Stirling actuels les plus élaborés.

Une parfaite égalité entre fourniture de chaleur et besoin en énergie mécanique est essentielle pour éviter de détruire un moteur par survitesse quel que soit son principe de fonctionnement. D'où l'intérêt du régulateur à boules

Le condenseur n'existe pas sur les moteurs à air chaud mais son existence prouve que la qualité de la source froide est tout aussi importante que la qualité de la source chaude quel que soit le type de moteur thermique. Ce point n'est pas forcément estimé à sa juste valeur. Les réflexions de Sadi Carnot, quand nous les aborderons, nous en convaincront si nécessaire.

Watt naquit en Écosse dans le village de Greenock. On verra par la suite que nombre d'Écossais vont faire évoluer les machines à vapeur et surtout les moteurs à air chaud au cours du XIX^{ème} siècle.

Ce fut un enfant à la santé fragile mais très éveillé et intelligent [68].

James Watt comprit très vite le comportement de l'eau : ses changements d'état, les propriétés de la vapeur. Il analysa les machines de Papin et de Newcomen que nous avons vues ci-dessus. Il vit que le problème empêchant leur plein développement était lié à la manière de condenser la vapeur d'eau.

Rappelons-nous : pour Papin, il fallait faire refroidir l'ensemble de son dispositif. Pour Newcomen, on envoyait de l'eau froide dans le cylindre vapeur.

Dans les deux cas, on perd du temps et des calories (donc de l'argent) à réchauffer à nouveau l'ensemble piston-cylindre afin de créer à nouveau de la vapeur. Le cycle de fonctionnement de telles machines comporte par conséquent un excessif temps mort pendant la phase de condensation de la vapeur.

La grande trouvaille de Watt sera donc le condenseur. Nous allons étudier maintenant ce dispositif qui a révolutionné les machines à vapeur.

5.12.1 Le condenseur

Plutôt que de procéder comme Papin ou Newcomen, Watt imagina un principe consistant à faire en sorte que la vapeur se condense dans un réservoir spécifique maintenu à une température suffisamment froide pour que l'eau passe de l'état gazeux à l'état liquide.

Lorsqu'on souhaite faire condenser la vapeur, on met en relation le cylindre de notre moteur avec le condenseur défini ci-dessus. La vapeur s'y engouffre naturellement et se transforme en eau liquide. Ensuite, on récupère celle-ci pour l'amener dans une chaudière qui la transformera de nouveau en vapeur qu'on enverra dans le cylindre et ainsi de suite.

Le mérite de James Watt a donc consisté à décomposer les différentes fonctions nécessaires à la production d'énergie mécanique à partir de vapeur. Chaque fonction fait appel à un dispositif particulier :

- Production de vapeur : chaudière.
- Utilisation de la vapeur : ensemble piston-cylindre.
- Condensation de la vapeur : condenseur.
- Utilisation de l'énergie mécanique : ensemble bielle-manivelle (par exemple).

5.12.2 Le piston à double effet

La deuxième amélioration apportée par James Watt aux machines à vapeur fut le piston à double effet.

Dans les machines précédemment vues, les deux phases produisant de l'énergie mécanique étaient les suivantes :

- Utilisation de la vapeur pour faire monter le piston.
- Utilisation de la pression atmosphérique pour faire redescendre le piston en créant le vide sous celui-ci quand la vapeur se condense.

Il paraît évident que la pression de la vapeur est supérieure à la pression atmosphérique. Pourquoi donc ne pas l'utiliser aussi pour faire descendre le piston ? Dans cette phase, l'énergie mécanique serait plus importante.

De cette réflexion, James Watt imagina le piston à double effet piloté par un jeu de robinets.

De plus, afin d'économiser la chaleur en limitant les déperditions, il isola avec une chemise en bois, « la chemise du corps de pompe » [53]. Watt inventeur aussi du calorifuge ?

Comme on peut le pressentir, l'invention du piston à double effet marqua un très grand pas dans l'évolution des machines à vapeur.

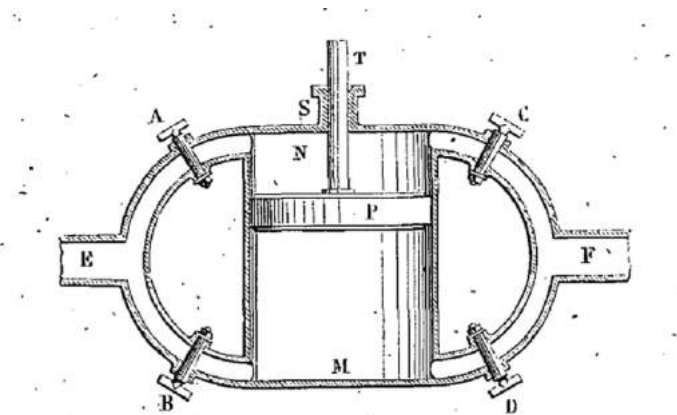


Fig. 19. — Type géométrique de la machine à double effet.

MN, cylindre. — P, piston animé d'un mouvement de va-et-vient. — T, tige du piston, traversant le couvercle du cylindre dans une boîte à étoupes, ou *stuffing-box*, S. — E, conduit qui amène la vapeur de la chaudière dans le cylindre. — F, conduit par lequel la vapeur se rend du cylindre dans le condenseur. — A, B, C, D, robinets pour la distribution. A et B sont fermés et B et C sont ouverts dans la course ascendante du piston ; A et D sont ouverts, et B et C fermés dans la course descendante.

FIGURE 5.21 – Piston à double effet

Cependant, vous en conviendrez, il y avait beaucoup de robinet à manœuvrer ! On confiait cette tâche ingrate à des enfants. Un d'eux, Henri Potter, voulant aller jouer avec ses petits camarades, raccorda astucieusement, à l'aide de cordes, la commande des robinets au balancier de la machine [68]. Et voilà, celle-ci marchait toute seule ! (Ceci ressemble à l'amélioration apportée, également par un enfant, à la machine de Newcomen et Cawley)

Watt ne s'en émut pas. Il remplaça les cordes par des tiges métalliques et les robinets par un système de tiroirs distribuant la vapeur dans le cylindre selon sa convenance.

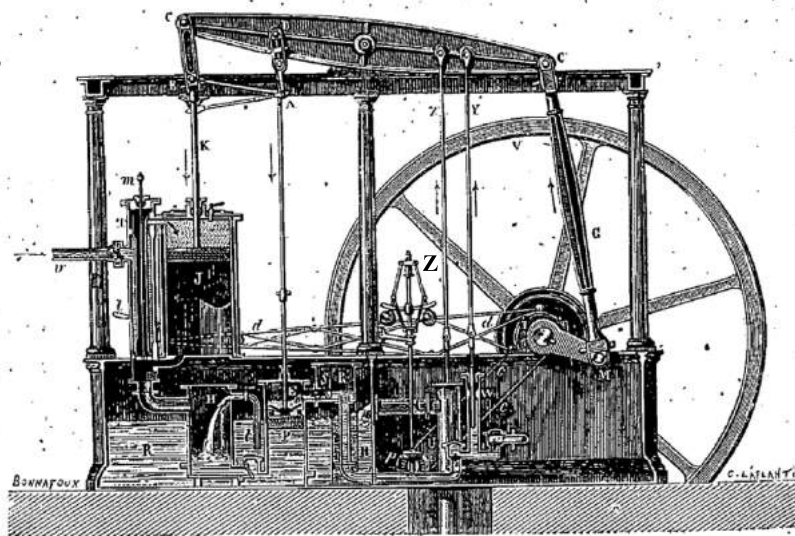


FIGURE 5.22 – Machine de Watt à double effet [42]

Le principe du piston à double effet fut vite repris et adapté pour concevoir de nouveaux moteurs à apport de chaleur externe tel que nous le verrons quand nous étudierons les différents types de moteurs Stirling.

5.12.3 Le régulateur à boules ou modérateur de Watt à force centrifuge

Sur le schéma représentant ci-dessus la machine de Watt, on peut remarquer en Z un dispositif comportant deux boules métalliques et un ensemble de tiges métalliques formant un parallélogramme. C'est le régulateur à boules. À quoi sert-il ? À réguler la vitesse de la machine.

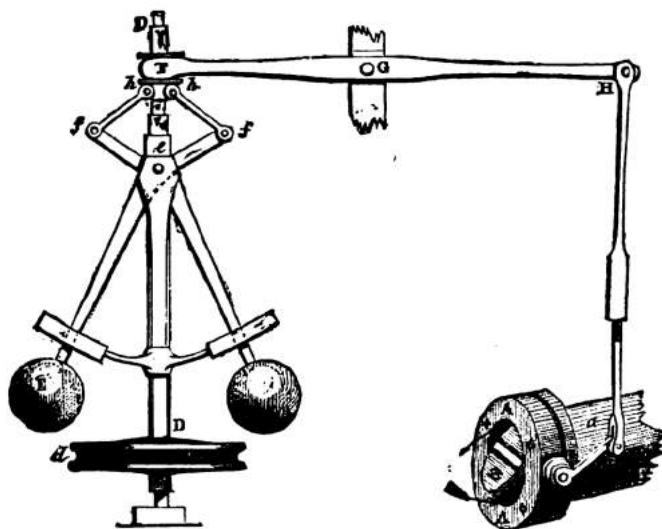


FIGURE 5.23 – Modérateur de Watt à force centrifuge [86]

Plus celle-ci tourne vite, plus les boules ont tendance à s'écarter de l'axe central en remontant légèrement. Ceci a pour conséquence de fermer un petit peu l'arrivée de la vapeur. La vitesse de la machine diminue. Par conséquent, les boules se rapprochent à nouveau de l'axe central et descendent ce qui entraîne une arrivée de vapeur plus importante. Et ainsi de suite. De la sorte, on peut obtenir une vitesse constante de la machine et ainsi éviter une destruction de celle-ci par sur-vitesse ou emballement.

Il faut préciser de façon claire que James Watt n'a jamais revendiqué l'invention du régulateur à boules contrairement à ce qu'on peut lire ça et là. En fait, ce dispositif est une adaptation du « serre-meules » des meuniers. Ceci explique pourquoi il n'a pas protégé cette innovation par le dépôt d'un brevet.

5.13 Les frères Joseph et Claude Niépce (1765-1833 / 1763-1828)

Les frères Niépce, Nicéphore ou Joseph et Claude, déposèrent en 1807 le brevet du Pyrèolophore. Un ancêtre du moteur à explosion. Ce moteur à réaction était destiné à propulser des bateaux en expulsant violemment de l'eau pour les faire avancer.

Il s'agissait d'un moteur dans lequel on injectait de la poudre de lycopode très inflammable. Vu le prix de ce combustible, il fut remplacé par de la houille pulvérisée, moins chère, elle-même détrônée par le pétrole lampant (proche de notre kérosène actuel).

L'injection directe, bien connue de nos jours et présente sur nos véhicules, a donc été inventée par les frères Niépce.

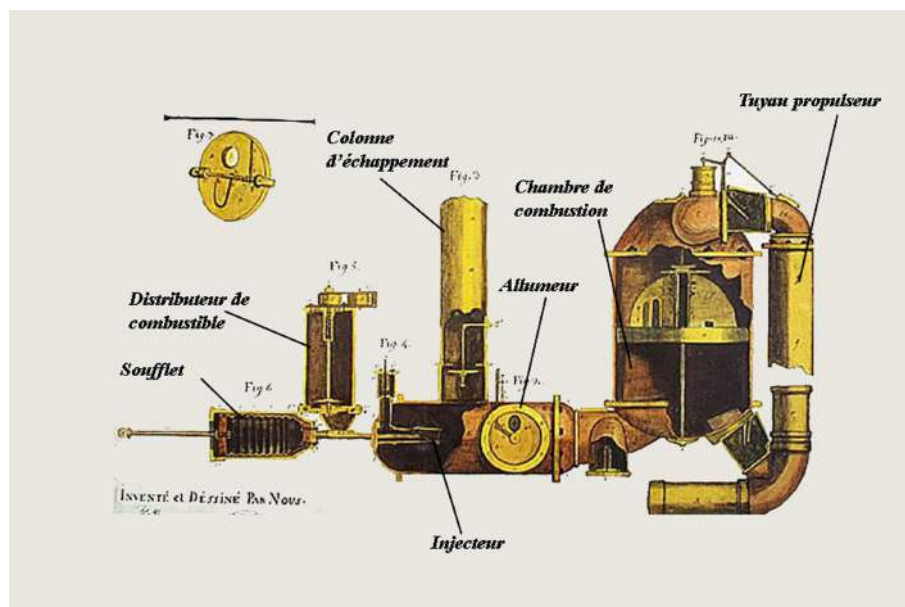


FIGURE 5.24 – Pyrèolophore des frères Niépce

En 1806, ce dispositif permit à un bateau d'un peu moins d'une tonne de remonter la Saône à raison d'une douzaine de cycles par minute [12]. Ceci fait penser à l'aventure du pyroscaphe de Jouffroy d'Abbans (voir page 46, § 5.11).

Le succès ne fut pas au rendez-vous au point que Claude en devint fou alors qu'il était en Angleterre pour y promouvoir cette invention.

Ce moteur peut être considéré comme étant un des plus vieux moteur à combustion interne imaginé avec celui des frères Montgolfier (voir page 42, § 5.9). À injection directe qui plus est !

L'étape suivante aurait pu être de remplacer le système hydraulique de propulsion par un système bielle-manivelle connu de tous aujourd'hui mais pas à l'époque.

5.14 George Cayley (1773-1857)

George Cayley est surtout connu pour ses recherches en matière aéronautique. Avant même le premier vol d'un engin plus lourd que l'air, il théorisa la mécanique du vol et les forces mises en jeu : poids, portance, traînée et force motrice. Il jeta les bases de l'aérodynamique, science qui étudie les écoulements d'air, ce qui lui permit de concevoir le profil d'une aile moderne.

Il conçut des planeurs dont l'un d'entre eux vola avec un adolescent comme pilote.

Ses travaux constituèrent la base essentielle de la réussite du premier vol des frères Wright avec un engin motorisé plus lourd que l'air en 1903.

George Cayley a aussi imaginé un moteur à air chaud. Ses motivations étaient peut-être liées au développement de l'aéronautique : passer du planeur à l'avion (terme inventé à la fin du XIX^{ème} siècle par Clément Ader).

Le moteur imaginé par lui fut, de son propre aveu, un échec quant à sa réalisation même s'il était bien conçu et aurait pu fonctionner moyennant quelques améliorations et une meilleure qualité de fabrication.

Le principe de ce moteur était simple : le moteur proprement dit et sa chaudière étaient imbriqués. Le foyer recevait de l'air frais grâce au déplacement d'un piston. L'air réchauffé par son passage dans le foyer et les gaz de combustion manœuvraient un autre piston solidaire du premier.

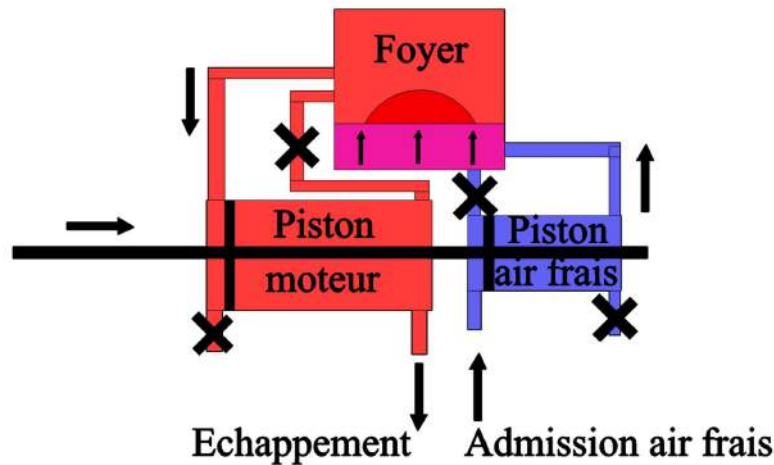


FIGURE 5.25 – Moteur de George Cayley

On voit sur l'image ci-dessus la première phase de fonctionnement. Il est facile d'imaginer la deuxième en obstruant les orifices libres durant cette première phase. Les tuyaux obstrués au cours de cette première phase seront alors ouverts et laisseront passer l'air chaud ou froid. Sur un plan pratique, il suffit d'installer sur chaque tuyaux des clapets permettant le passage de l'air dans un sens mais pas dans l'autre.

Pour être parfaitement honnête et complet, un doute subsiste : le moteur réalisé par George Cayley était-il conçu pour fonctionner dans les deux sens ou dans un seul [58] ? Ce point, s'il est important, ne remet pas en cause le principe de ce moteur.

C'est incontestablement un moteur utilisant la dilatation de l'air quand on le chauffe. Force est de constater qu'on est en présence d'un moteur à combustion interne. George Cayley n'était pas très satisfait de ce mode de combustion et envisageait l'injection et la combustion de gaz inflammable, d'huile ou autres produits qui ne produiraient pas de cendres ou produits encrassant cet ensemble.

5.15 Petite synthèse

Pour bien se rendre compte de l'évolution des différentes machines créées avant le XIX^{ème} siècle, nous allons indiquer, ci-dessous, la consommation de charbon de celles-ci pour produire une puissance de 1 cheval-vapeur durant 1 heure [45] (soit 2 647 795 Joules dans le système d'unités international) :

- Machine de Savery : 13 kg.
- Machine de Newcomen à condensation : 9 kg.
- Machine de Watt avec condenseur : 3,6 à 4 kg.

Ce long développement faisant une grande place aux machines à vapeur, dans un livre consacré aux moteurs à air chaud, peut paraître curieux mais il sert avant tout à démontrer que les origines de ces deux types d'engins sont communes.

Il a fallu tâtonner pour arriver à transformer l'énergie thermique en énergie mécanique. Tantôt on chauffait de l'eau, tantôt on utilisait de l'air. Les propriétés, les avantages et les inconvénients de ces deux corps sont apparus au fur et à mesure des différentes expériences. Quand ces caractéristiques physiques furent mieux comprises, ces deux moteurs, à vapeur et à air chaud, suivirent des routes différentes.

Par la suite, avec la création de la thermodynamique par Sadi Carnot, les deux types de machine évoluèrent afin d'avoir un meilleur rendement ou une meilleure efficacité économique pour leurs utilisateurs.

Non seulement les moteurs à air chaud ont profité sur un plan purement technique des machines à vapeur mais ils doivent beaucoup à l'émulation créée par la concurrence entre ces deux concepts. Quand on veut faire mieux que son rival, il ne suffit pas de le copier mais il faut faire preuve d'imagination pour le devancer.

C'est pourquoi, a contrario, les machines à vapeur ont, elles-aussi, bénéficié des recherches et trouvailles faites dans le cadre du développement des moteurs à air chaud.

Dans la partie qui va suivre, consacrée à l'Époque contemporaine, nous allons enfin nous focaliser sur les moteurs à apport de chaleur externe et uniquement sur eux. Plus particulièrement, on va faire la part belle au moteur Stirling qui a tiré son épingle du jeu au cours de cette période.

Le contenu du livre va devenir plus conforme à son titre et à l'intérêt du lecteur qui a choisi de se le procurer !

Chapitre 6

L'Époque contemporaine

De la Révolution française (1789) à nos jours.

Avant de passer en revue les différents moteurs à air chaud et d'étudier leur évolution, il va nous falloir encore un peu de patience car nous allons nous replonger dans le contexte de leur développement en nous rappelant ce que fut la révolution industrielle, la mécanisation et la motorisation de l'industrie et de l'agriculture.

Après que de géniaux inventeurs eurent planté le décor au cours du XVIII^{ème} siècle, d'autres inventeurs, tout aussi géniaux, mirent au point de nouvelles machines au cours du XIX^{ème} siècle. Là encore, il ne s'agit pas d'idées survenues spontanément mais d'améliorations de concepts ou théories élaborées précédemment.

Nous nous pencherons quasiment exclusivement sur l'évolution des moteurs dits à air chaud ou à apport de chaleur externe. Il va de soi que les machines à vapeur firent de très grands progrès au cours de cette même période, que d'autres furent inventés tels que les moteurs à combustion interne (appelés à l'époque moteurs à gaz ou à air dilaté) ou les moteurs électriques, mais l'objet de ce livre est de se contenter, si on peut dire, d'analyser les progrès des moteurs à air chaud.

6.1 La révolution industrielle

Au cours du XIX^{ème} siècle, on assista à une véritable explosion des sciences et techniques. Au cours des siècles précédents, que nous avons étudiés en partie ci-dessus, les ingénieurs, architectes, physiciens, chimistes... nous donnent l'impression d'avoir semé le bon grain ¹. Le XIX^{ème} siècle fut le printemps pour ces semences. Les conditions ont, semble-t-il, été favorables pour qu'elles germent puis se développent rapidement.

L'humanité n'avance que très rarement de façon linéaire mais plutôt par bonds successifs et imprévisibles.

Les domaines concernés sont nombreux : physique, chimie, production d'énergie, électricité, optique, transport, métallurgie...

Penser que les innovations dans ces différents secteurs 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.

Difficile, par exemple, d'imaginer le développement des machines à vapeur sans les avancées de la thermodynamique, de la métallurgie, de la résistance des matériaux, de la mécanique des fluides...

Au départ, on assiste à une certaine concentration des chercheurs et ingénieurs en Grande Bretagne, principalement en Écosse, et chez son ennemi de toujours : en France. Cependant, rapidement toutes les nations entrèrent dans la démarche. Les États Unis, jeune nation ayant de gros besoins de développement et dotés d'un très grand dynamisme, attirèrent de nombreux innovateurs friands d'aventure et de succès techniques et financiers.

À cette époque, on est passé d'une ère à dominante agricole et artisanale à une ère à dominante industrielle et commerciale.

La production d'énergie, l'exploitation des matières premières, la fabrication de biens industriels et domestiques prirent une place centrale dans la société. En parallèle, se développèrent des services connexes, mais pas secondaires, à savoir : la finance, les assurances...

Ce chambardement eut, bien sûr, des conséquences notables sur les plans social, démographique, politique et environnemental, même si ce dernier terme ne devait guère être utilisé à l'époque.

1. « Ex nihilo nihil, in nihilum posse reverti » Lucrèce (Rien ne vient de rien, ni retourne à rien).

« Rien ne naît ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau » Anaxagore.

6.2 Mécanisation et la motorisation de l'industrie et de l'agriculture

Une des conséquences majeures de cette révolution industrielle du XIX^{ème} siècle fut la mécanisation des principaux secteurs de l'économie. Là encore, il n'est pas question d'affirmer que la mécanisation date de cette époque. Ce serait absolument faux. Mais force est de constater qu'un bond énorme a été réalisé durant cette période.

La raison de cette transformation est indissociable de la volonté de mieux exploiter et maîtriser l'énergie et les matières premières tout en augmentant la production des biens de consommation. Ceci s'est traduit par la motorisation de nombreux mécanismes jusque là mus par la force humaine, animale ou hydraulique. Le XIX^{ème} siècle constitua donc une opportunité exceptionnelle pour développer toute sorte de moteurs dont les moteurs à air chaud et plus particulièrement le moteur Stirling.

Passons en revue les secteurs les plus concernés :

- L'exploitation minière. « Les ressources en charbon et minerai de fer, si elles eurent été moins abondantes, toute la face de la terre aurait changé » aurait pu dire Blaise Pascal². En effet, sans ces matières premières, les progrès techniques et scientifiques du XIX^{ème} siècle eurent été moindres. Il a donc fallu tout faire pour permettre une extraction rapide, en quantité et peu chère de ces ressources. Dans ce domaine aussi, la motorisation des différents moyens utilisés fut une nécessité. Chevalements, systèmes d'aération, de pompage et surtout de transport en bénéficièrent.

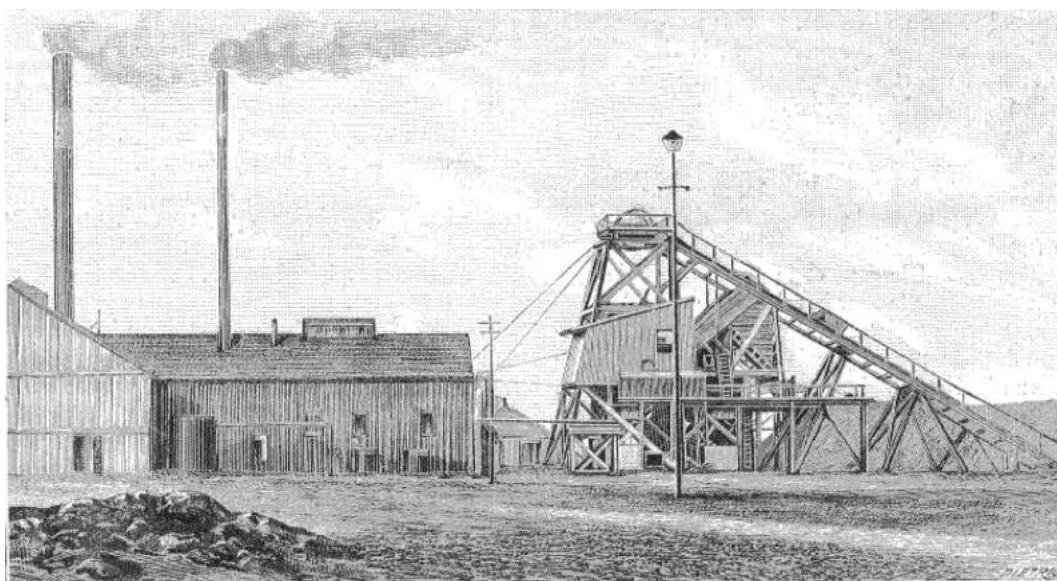


FIGURE 6.1 – Chevalement de la mine d'or de Geldenhuis Estate en Afrique du Sud [29]

- L'agriculture et ses deux composantes : la culture et l'élevage. De nombreuses tâches d'une exploitation agricole furent mécanisées au cours du XIX^{ème} siècle. Principalement, on vit apparaître ou se généraliser la batteuse, la moissonneuse-batteuse, la faucheuse, la moto-pompe à eau (appelée « pompe à feu » lorsqu'elle était actionnée à partir de chaleur), et même la première machine à traire inventée en 1862!

2. Une occasion de plus de parler de cet illustre personnage qui confirma la notion de pression atmosphérique (page 211, annexe A). Ici, nous lui faisons un pied de nez en déformant sa célèbre citation au sujet de Cléopâtre.

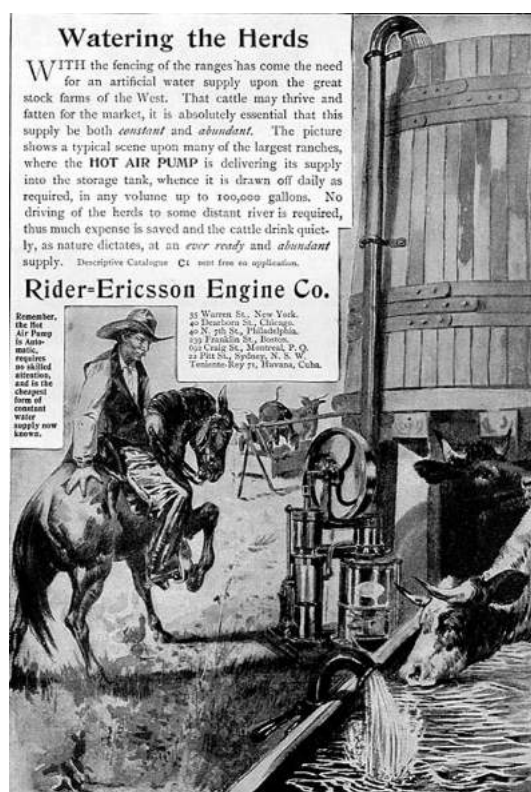


FIGURE 6.2 – Abreuvoir alimenté grâce à un moteur à air chaud (Publicité)

- La construction mécanique, l'industrie manufacturière, navale, textile, papetière. Traditionnellement, ces industries se situaient à proximité des rivières pour profiter de l'énergie hydraulique de celles-ci. Cela n'était pas sans poser de problèmes selon les saisons, pluvieuses ou pas, et il fallait s'accorder sur le partage du débit disponible entre corporations ou travailleurs d'un même corps de métier. La motorisation de ces secteurs économiques permit une plus grande autonomie de ces ateliers ou usines et leur installation de façon plus éparse. La puissance nécessaire à leur fonctionnement n'était plus limitée par des contingences géographiques. C'est ainsi qu'on est souvent passé du stade artisanal au stade industriel des secteurs concernés.

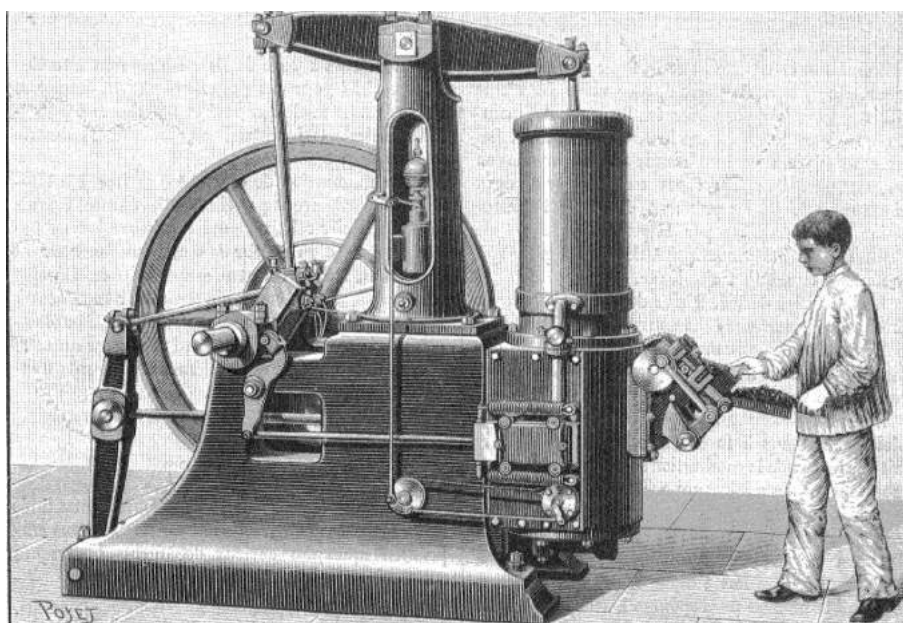


FIGURE 6.3 – Publicité pour le moteur Bénier

- Les transports terrestres, fluviaux et maritimes : quand on parle de motorisation, ce sont les secteurs du transport qui viennent les premiers à l'esprit. À juste titre probablement.

- Les chemins de fer connurent d'abord leurs premiers balbutiements au tout début du XIX^{ème} siècle avec la première locomotive en 1804. Puis, très rapidement, on assista à un essor considérable. Les britanniques furent les grands initiateurs de ce moyen de locomotion avec Trevithick et Stephenson, bien sûr.

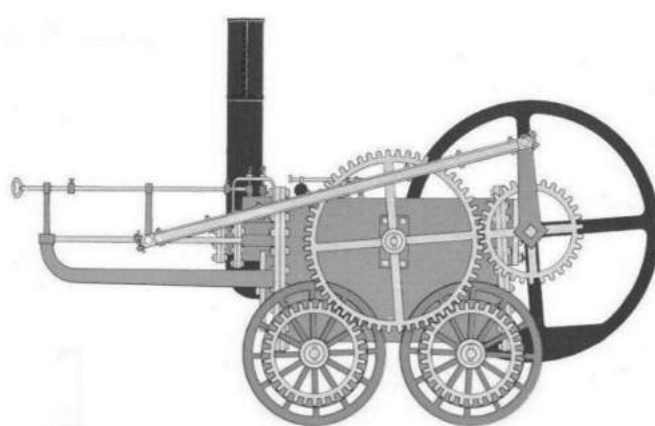


FIGURE 6.4 – Locomotive de Trevithick

En 1869, il était possible d'aller de l'Est à l'Ouest des États Unis, et réciproquement. Il est facile d'imaginer les conséquences de cette ligne transcontinentale. Toutes les grandes villes se trouvaient alors sur les côtes. Avec le train s'en était fini.

Les autres continents drainèrent aussi leurs territoires grâce au chemin de fer. Le développement économique fut la raison première mais pas la seule. Là encore, des motivations stratégiques et militaires apparurent très vite.

- Le transport fluvial de passagers et marchandises fut en pleine expansion malgré des aléas techniques et de navigation, parfois dramatiques.
Les premiers bateaux à roues à aubes naviguèrent dès la fin du XVIII^{ème} siècle comme nous l'avons vu avec l'aventure de Jouffroy d'Abbans (page 46, § 5.11) par exemple. Avec les progrès des machines à vapeur, ils se généralisèrent au cours du siècle suivant. Des lignes régulières virent ainsi le jour.



FIGURE 6.5 – Bateau à roues à aubes Ben Campbell

Malgré cela, le halage des péniches continua quand même. Les chemins nécessaires à cette activité font encore le bonheur des promeneurs...

- Le transport maritime, lui aussi, progressa spectaculairement au cours du XIX^{ème} siècle. D'abord avec des bateaux munis de roues à aubes, puis ensuite avec des navires équipés d'hélice. On assista à une compétition sur la puissance des machines, sur la vitesse des bateaux, sur leur capacité ou déplacement...

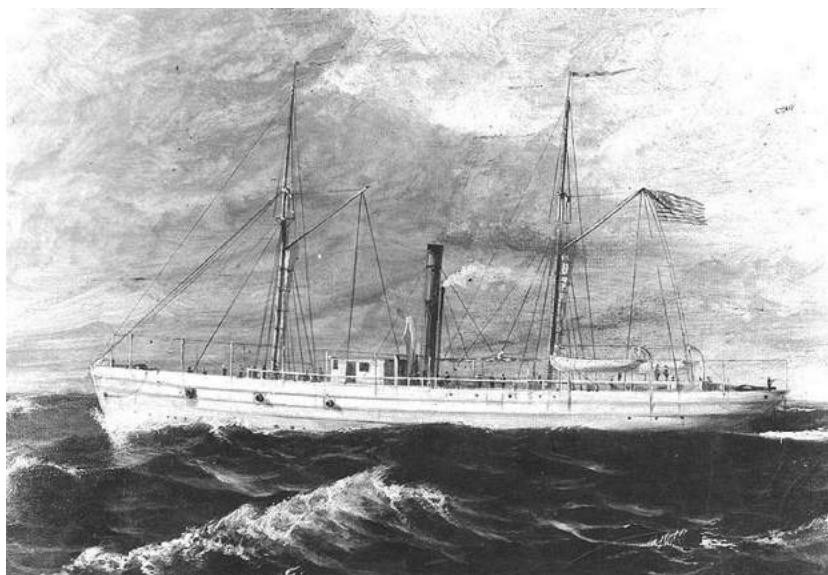


FIGURE 6.6 – USS Cherokee 1859

La mondialisation est un phénomène très ancien. Elle s'est accélérée avec le développement des transports. Les migrations, le transport des matières premières et des marchandises élaborées en furent facilités. Des bouleversements stratégiques, politiques, sociaux, économiques, financiers de grande ampleur accompagnèrent cette mutation³.

Cette mécanisation à grande échelle fut possible grâce à l'invention ou l'amélioration de différents moteurs :

- Les machines à vapeur, à piston d'abord puis, à la fin du siècle, à turbine. Sans, puis avec condenseur pour en améliorer le rendement.
- Les moteurs à combustion externe, Stirling principalement.
- Les moteurs à combustion interne, 2 temps, 4 temps, à gaz, Diesel...
- Les moteurs électriques, à courant continu ou alternatif.
- Sans oublier les progrès des machines hydrauliques. Roue hydraulique progressivement remplacée par la turbine Francis ou la turbine Pelton.

C'est donc dans ce contexte que furent inventés ou perfectionnés les moteurs à air chaud. On comprend que la lutte fut rude entre tous ces engins et que les résultats furent remis en cause par les accidents⁴ des uns ou des autres, par leurs performances sur les plans technique et économique, par l'expression de nouveaux besoins, par l'évolution des matériaux, par les découvertes scientifiques nouvelles...

Bien des choses, aujourd'hui, nous paraissent naturelles. Rarement, il ne nous vient à l'idée que les objets que nous utilisons couramment n'existaient pas avant le XIX^{ème} siècle, que nous les devons à tous ces chercheurs, inventeurs de génie aux noms d'Avogadro, de Carnot, de Joule, de Volta, de Watt... et de Robert Stirling, bien sûr.

Au quotidien, amusons-nous à faire le lien entre les objets que nous employons et les découvertes réalisées au cours du XIX^{ème} siècle.

Si nous n'avons pas à rougir des découvertes actuelles et de celles du XX^{ème} siècle, rendons hommage à ceux qui nous ont apporté un certain confort dans notre vie de tous les jours grâce à leurs travaux effectués durant la révolution industrielle.

3. Nous voyons ici que la technique, comme la science, n'est pas neutre en dehors de son domaine. « Science sans conscience n'est que ruine de l'âme » disait Rabelais il y a près de cinq siècles.

4. Les accidents qui se sont produits ont conduit à l'élaboration de textes juridiques pour réglementer les appareils à pression de gaz et de vapeur. Cette réglementation est toujours en vigueur de nos jours même si elle s'est enrichie et continue de s'enrichir grâce au retour d'expérience afin d'améliorer la conception, la fabrication, le contrôle, la maintenance des machines concernées.

6.3 Robert Stirling (1790-1878)

6.3.1 La vie de Robert Stirling

Robert Stirling est né le 25 octobre 1790, à la ferme Cloag du village de Methven dans le comté de Perthshire en Écosse. Il est mort le 6 juin 1878 à Galston, ville située à 40 km environ au sud de Glasgow.

Il était le troisième enfant d'une famille en comprenant huit. Son grand-père paternel, Michael, fabriquait des batteuses rotatives qu'il avait inventées entre 1756 et 1758. Son grand-père maternel était agriculteur.

Il poursuivit ses études à l'université d'Edimbourg de 1805 à 1808. Dans cet établissement, il fut en contact avec des experts en mathématiques ou physique qui lui donnèrent le goût et les connaissances suffisantes pour développer son inventivité.

Ensuite, il se tourna vers des études de théologie à l'université de Glasgow pour devenir pasteur. C'est une charge qu'il assumait avec courage et compassion pour ses paroissiens qui l'appréciaient fortement.

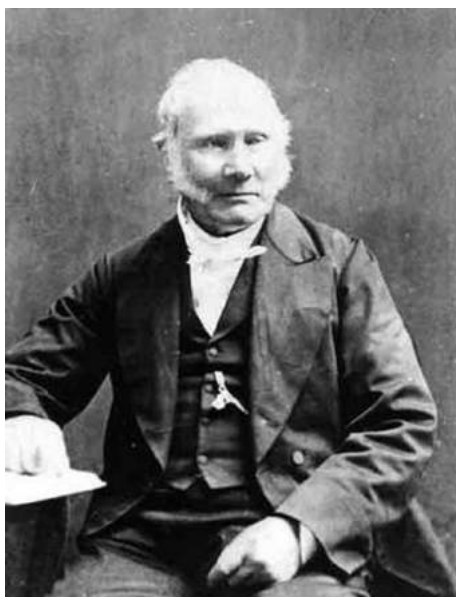


FIGURE 6.7 – Robert Stirling

Il se maria le 10 juillet 1819 avec Jane Rankine. Ils eurent sept enfants. Quatre garçons devinrent ingénieurs dans les chemins de fer (Patrick, William, Robert et James), un autre choisit de devenir à son tour pasteur (David). Quant aux deux filles, l'une fit profiter ses frères de ses idées (Jane) et l'autre se consacra au métier d'artiste (Agnès) [88].

À l'époque, au sein d'une même famille et en hommage aux anciens, il était usuel de reprendre leurs prénoms de génération en génération. Ici, à chaque fois que nous parlerons des inventions liées au moteur dit de Stirling et pour éviter toute confusion, nous ferons référence à Robert né en 1790 et à son frère James né en 1800.

Robert Stirling ne s'est pas contenté d'avoir des idées, surtout des idées, mais il construisait lui-même les prototypes des moteurs issus de ses réflexions. Il a laissé des preuves concrètes de ses réalisations. Cependant, le reproche qu'on pourrait lui faire est de n'avoir pas laissé suffisamment de traces écrites de ses recherches : textes descriptifs, plans, rédaction de brevet... Mais on lui pardonnera.

Robert Stirling vécut durant le XIX^{ème} siècle marqué par de nombreuses découvertes scientifiques et techniques, comme nous l'avons vu précédemment.

C'est probablement ce bouillonnement d'idées, sa curiosité naturelle et son pragmatisme qui le pousseront à s'intéresser au moteur à air chaud.

Il possédait, à proximité de son logement, un atelier où il lui arrivait de travailler tard sur ses réalisations après avoir accompli, durant la journée, ses obligations de pasteur vis-à-vis de ses paroissiens.

Robert Stirling collabora, à Kilmarnock, avec un autre inventeur : Thomas Morton. Ce dernier lui fournit les moyens matériels nécessaires à ses recherches. De cette rencontre, non seulement des moteurs furent expérimentés mais Robert Stirling inventa aussi des instruments optiques afin de satisfaire sa passion pour l'astronomie.[18]

En 1827, en dehors des brevets qu'il déposa et dont nous allons parler ci-après, il présenta aux universités d'Edimbourg et de Glasgow un modèle expérimental d'un moteur à deux cylindres.[71]

Ci-dessous, une photo représente ce moteur dont on peut voir l'original au Royal Scottish Museum ou une réplique en coupe au London Science Museum.



FIGURE 6.8 – Premier modèle expérimental

Ce moteur fut retrouvé à l'université de Glasgow en 1847 par William Thomson qui y enseignait la physique. Il fut le premier à donner une explication rigoureuse et scientifique du fonctionnement de ce moteur. Il révéla également que le cycle de Stirling utilisé était réversible : en fournissant de l'énergie mécanique à cet engin, il est en mesure de faire du chaud ou du froid. Nous étudierons cette propriété plus tard dans cet ouvrage et nous verrons, à cette occasion et contre toute attente, que la production de grand froid est aujourd'hui encore l'utilisation principale du moteur de Robert Stirling.

Peut-être ne connaissez-vous pas William Thomson cité dans le paragraphe précédent ? Et bien si ! En effet, en récompense de ses nombreux travaux, cet irlandais fut anobli et devint par là même Lord Kelvin. Ce nom a été choisi pour devenir l'unité internationale de mesure de la température. Un kelvin (on ne dit pas degré kelvin) est égal à un degré Celsius. Zéro kelvin correspond au zéro absolu, la plus basse température qu'on puisse imaginer compte tenu des lois physiques (Amontons, comme nous l'avons vu, fut le premier à pressentir cela, voir page 38, § 5.5). Cette limite inférieure est égale à $-273,15^{\circ}\text{C}$. Il n'y a donc pas de température négative quand on l'exprime en kelvin. Nous verrons, dans la partie théorie en particulier, que cette unité est très pratique pour étudier un moteur et ses performances.⁵

Il est souvent écrit, même si on n'en a pas la preuve formelle, qu'une des motivations de Robert Stirling à inventer des moteurs à air chaud proviendrait du fait que les machines à vapeur faisaient, à son époque, de nombreuses victimes quand elles explosaient.

S'il y a une chose vraie, c'est bien ce dernier point. Voir ci-après, à titre d'exemple, une démonstration de ceci.

5. La rivière Kelvin passe au pied de l'université de Glasgow, d'où le choix de ce nom par William Thomson pour devenir Lord.

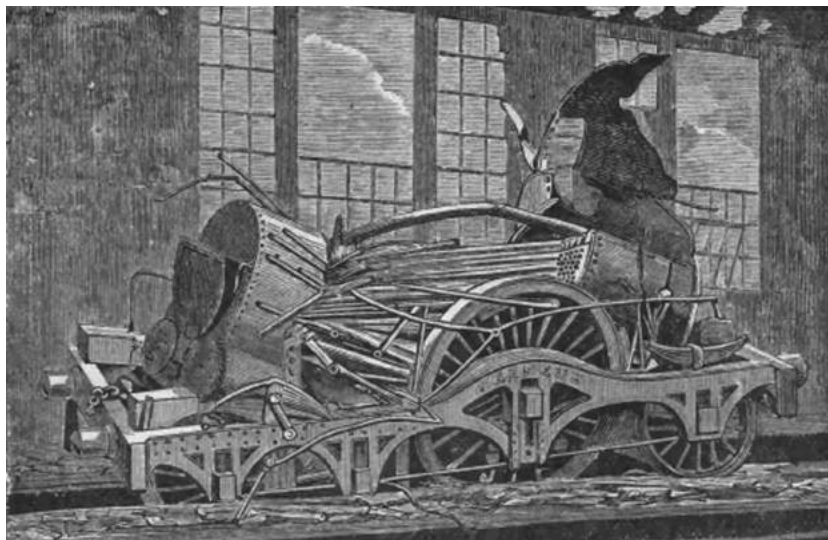


FIGURE 6.9 – Explosion de la chaudière d’une machine à vapeur [86]

Il est certain que l’énergie potentielle emmagasinée dans une machine à vapeur est bien supérieure à celle présente dans un moteur à air chaud. Quand elle se libère brutalement en une fraction de seconde, suite à une défaillance matérielle ou humaine, la déflagration qui s’en suit est équivalente à celle produite par une bombe.

6.3.2 Les inventions de Robert Stirling

Le brevet n°4081 de 1816

Robert Stirling déposa un brevet en Écosse et en Angleterre le 16 novembre 1816. Celui-ci portait le n° 4081. Il s’intitulait « Improvements for diminishing the consumption of fuel, and in particular an engine capable of being applied to the moving of machinery on a principle entirely new », soit en français : « Améliorations pour diminuer la consommation de carburant, et en particulier un moteur d’un principe entièrement nouveau susceptible d’entraîner une machine ».

Ce brevet présentait en fait ce qu’on appelle désormais un régénérateur (« an economiser » comme l’appelait Robert Stirling en bon Écossais) dont nous parlerons très souvent dans cet ouvrage. C’est, comme nous le démontrerons dans la partie théorie (page 192, § 30.1.2), un appareil qui permet d’obtenir un rendement théorique équivalent à celui d’un moteur respectant le cycle de Carnot. Ce dernier étant celui qui permet d’atteindre le rendement maximal quand on est en présence d’une source froide et d’une source chaude déterminées.

Au XIX^{ème} siècle, on souhaitait déjà faire des économies d’énergie car celle-ci devenait chère du fait de l’essor de l’industrie.

Ceci peut nous faire sourire aujourd’hui, confrontés nous-mêmes à la raréfaction et à la hausse du prix du pétrole. N’y aurait-il pas des processus industriels actuels prêts à recevoir un régénérateur ?

Un meilleur rendement sur les moteurs à air chaud, grâce au régénérateur ou économiseur, permettait de consommer moins de carburant, principalement le charbon à l’époque. On dépensait donc moins d’argent (ou on faisait plus de bénéfice).

Cette invention était vraiment très importante au moment de la révolution industrielle et le demeure de nos jours. C’est probablement l’invention majeure de Robert Stirling.

Cet appareil présente un intérêt pour tout système cyclique ayant des flux de fluide s’inversant, s’échauffant ou se refroidissant selon le sens de circulation. Lorsque le fluide passe dans un sens, le régénérateur stocke une partie de l’énergie véhiculée par ce fluide. Lorsque le sens de circulation s’inverse, le régénérateur restitue cette énergie en totalité ou presque. On évite ainsi un apport de chaleur externe coûteuse. Avant d’étudier dans le détail les principaux types de moteurs Stirling et de percevoir concrètement l’intérêt de cet appareil, voir le schéma ci-dessous [57] :

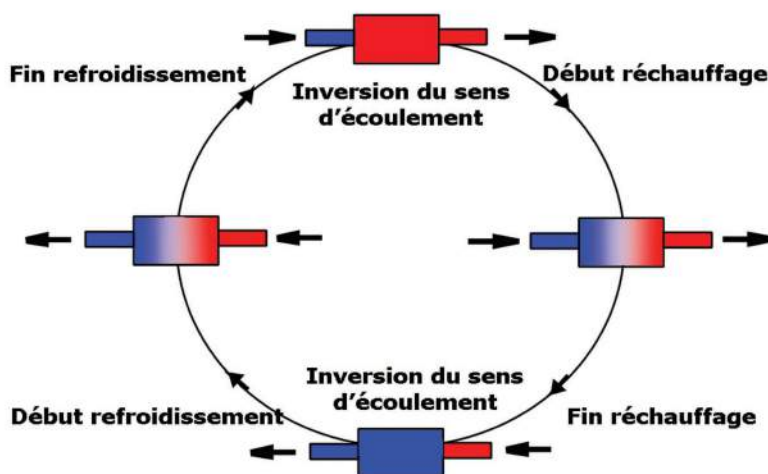


FIGURE 6.10 – Régénérateur ou économiseur

Robert Stirling est donc célèbre pour le brevet déposé en 1816 et portant, non exclusivement sur un moteur à air chaud, mais sur une amélioration de celui-ci appelée « économiseur » et connue aujourd'hui sous le nom de « régénérateur ».

Le moteur à air chaud décrit dans ce brevet n'en était pas moins d'une grande inventivité. Il comportait un déplaceur et un piston moteur mus par un savant embiellage comme on peut le voir sur l'illustration suivante.

Ce moteur ne comportait qu'un seul cylindre contenant à la fois déplaceur et piston moteur. Ce genre de conception de moteur Stirling fait partie des trois types principaux de moteurs qui furent développés par la suite et encore de nos jours.

On était en présence d'un moteur à cycle fermé, devenu depuis le cycle de Stirling, que nous détaillerons plus loin dans cet ouvrage. L'air, à l'intérieur du cylindre, n'a pas besoin d'être renouvelé.

La combustion se faisait à l'extérieur du moteur.

Le fonctionnement de ce moteur, comme nous le verrons page 93, est très simple. Encore fallait-il y penser...

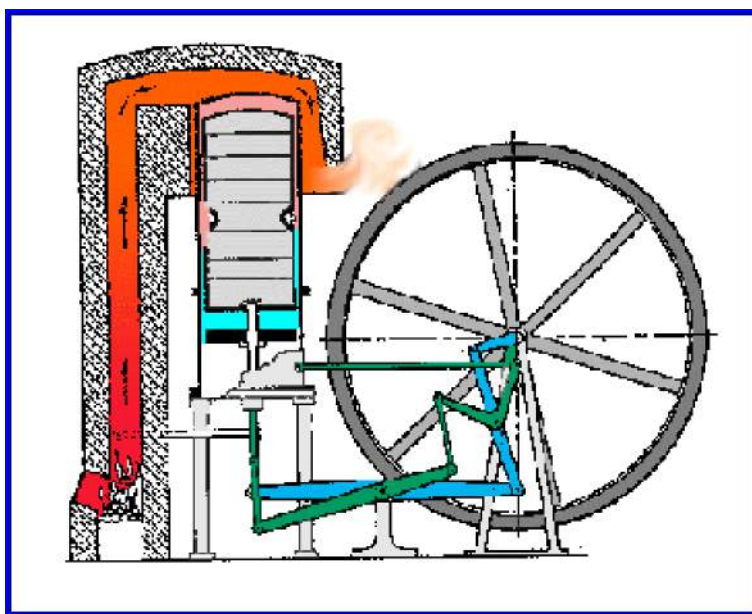


FIGURE 6.11 – Moteur breveté par Robert Stirling en 1816.

Aussi bizarre que cela puisse paraître, ce brevet tomba dans l'oubli pour la seule et bonne raison que Robert Stirling ne s'acquitta pas des frais d'inscription de ce document, soit 5 £ ! Pourquoi ? Faute de moyens, par oubli ou négligence ?

Cependant, il semblerait qu'un tel moteur fût installé en 1818 dans une carrière par James, le frère de Robert, dans le but d'y pomper de l'eau.

Une copie de ce brevet fut exhumé, tout à fait fortuitement, un siècle plus tard au cours d'un tri de documents par un particulier. Ce dernier remis cet exemplaire à Agnes Hunter, la fille de Robert Stirling. Celle-ci s'empessa de faire passer ce document à la postérité en le confiant à la bibliothèque du bureau des enregistrements. La revue britannique « The Engineer » publia cet opuscule dans son numéro du 14 décembre 1917.

Est-ce juste ou pas, bien souvent l'invention du premier moteur à air chaud correspond, dans de nombreux ouvrages ou articles, au dépôt de ce brevet ?

Après la lecture de ce livre, le lecteur s'interrogera sur le bien-fondé et la simplicité de cette affirmation.

Comme nous allons le voir maintenant, Robert Stirling déposa deux autres brevets. Contrairement à celui-ci datant de 1816, il le fit conjointement avec son frère James qui était ingénieur mécanicien (ne pas confondre avec le fils de Robert Stirling, James, qui suivit, lui aussi, des études d'ingénieur).

Le brevet n°5456 de 1827

Robert et James Stirling déposèrent en 1827 un brevet intitulé « Certain improvements in air engines for the moving of machinery » (Certaines améliorations des moteur à air pour l'entraînement de machines).

On peut s'interroger sur la répartition des rôles entre Robert et James. En dehors de toute preuve factuelle, on est en droit de penser que Robert avait une vue d'ensemble des moteurs conçus, de leur principe de fonctionnement, alors que James apportait ses connaissances d'ingénieur reconnu pour améliorer dans le détail certains éléments constitutifs de ces moteurs, pour en augmenter leurs performances. Peu importe ce qu'il en fut réellement. Dans ce cas comme dans la majorité des cas, un plus un est très supérieur à deux. Le travail d'équipe bien pensé enrichit significativement les idées des uns puis des autres par un échange constant, en faisant la critique - au sens noble du terme - des idées émises, en apportant des améliorations constructives.

Pour en revenir à ce nouveau moteur, il comportait deux cylindres contenant chacun un déplaceur, reliés par de petites tuyauteries à la partie supérieure et à la partie inférieure d'un troisième cylindre, beaucoup plus petit, dans lequel se déplaçait le piston moteur à double-action (comme l'avait imaginé Watt, souvenez-vous, voir page 48, § 5.12).

Un mécanisme à balancier permettait aux déplaceurs de se mouvoir en harmonie. Quand l'un montait, l'autre descendait et vice versa.

Ce balancier était aussi relié au mécanisme de commande du piston moteur afin d'obtenir un mouvement d'ensemble cohérent.

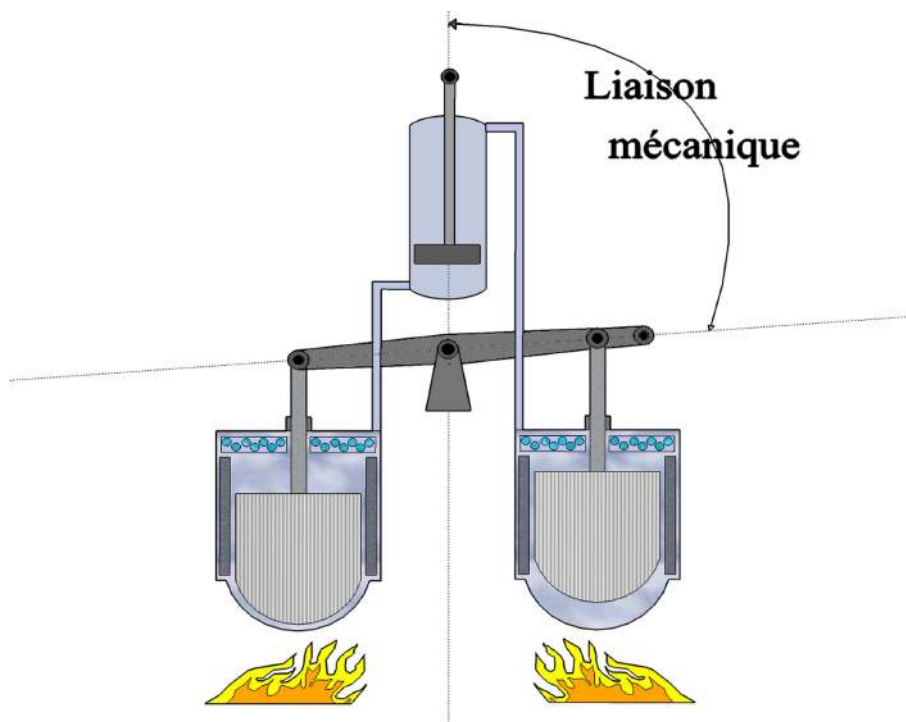


FIGURE 6.12 – Schéma de principe du moteur dont le brevet fut déposé en 1827 [52]

Cette configuration présentait un inconvénient : celui de créer des espaces morts nuisibles à l'efficacité globale du moteur comme nous le verrons plus tard dans la partie théorique. Malgré cela, la conception d'ensemble était bien pensée.

Ce moteur était relié à un compresseur d'air. Les deux frères Stirling avaient compris que la puissance pouvait être fortement améliorée en augmentant la quantité de gaz présente dans le moteur sans en modifier les dimensions.

De fines lames métalliques percées et disposées autour des déplaceurs assuraient le rôle de régénérateur.

La source chaude est constitué d'un foyer traditionnel et la source froide, innovation supplémentaire, par un faisceau tubulaire dans lequel circule de l'eau.

Ce type de moteur, chose qui peut nous faire sourire aujourd'hui, avait un rapport poids-puissance d'environ 3 tonnes par cheval-vapeur ! Mais, si on se replace dans le contexte de l'époque, ce n'était pas si mal que ça.

Le brevet n°8652 de 1840

« Certain improvements in air engines » (certaines améliorations pour les moteurs à air) tel fut l'intitulé de ce dernier brevet déposé par les frères Stirling.

Il s'agit bien de cela. Au niveau du principe, il n'y a pas de révolution ou de grosse nouveauté. On est toujours en présence d'un piston moteur à double effet. Par contre, tout se joue dans les détails (là où se cache habituellement le diable !).

Les volumes morts sont réduits autant que faire se peut, le système de refroidissement et le régénérateur sont désormais à l'extérieur du cylindre, les déplaceurs sont capables de résister à une pression de 700 psi (pounds per square inch ou livre par pouce carré) soit environ $4,8 \cdot 10^6$ Pa (ou environ 48 fois la pression atmosphérique), on voit apparaître des systèmes améliorant l'étanchéité entre parties fixes et parties mobiles, tout est fait pour limiter les transferts de chaleur par conduction entre parties froides et parties chaudes.

Ce moteur était conçu pour travailler à une pression de 150 psi soit environ 10^6 Pa (ou environ 10 fois la pression atmosphérique). Comme dans le brevet de 1820, un compresseur fournissait et maintenait cette pression à l'intérieur du moteur.

On peut penser que toutes ses améliorations très pointues doivent beaucoup aux sciences de l'ingénieur que possédait James.

Pour prouver le bien-fondé de ces améliorations, un moteur fut construit selon ces différents concepts. C'est le célèbre moteur, connu des passionnés, qui vit le jour à la fonderie de Dundee en Écosse où travaillait James.

Celui-ci déclarait que la puissance de ce moteur était de 37 chevaux-vapeur. Toujours selon la même source, cet engin était beaucoup plus économique en combustible et son rendement meilleur comparativement aux machines à vapeur. Ces affirmations étaient probablement exactes.

Il fonctionna durant un peu moins de trois ans [88] dans la fonderie Dundee. Une série d'avaries mit fin à l'expérience. Ces défaillances étaient dues à une mauvaise tenue du fond inférieur au contact du foyer. Cette pièce était en fonte. Elle aurait été en acier, dont le procédé de production industrielle fut inventé plus tard par Bessemer, elle aurait probablement posé moins de problème. Cet élément aurait été moins épais ce qui aurait amélioré les échanges de chaleur et, par conséquent, les performances de la machine.

Il fallut remplacer, à deux reprises en quatre ans, ce fond inférieur du moteur.

La sentence fut très dure car ce moteur fut transformé en machine à vapeur !

Un retour au source en fait, car le moteur à air chaud de la fonderie Dundee avait été construit à partir d'éléments d'une machine à vapeur présente dans l'usine.

Domage pour Robert et James Stirling que Bessemer n'ait pas inventé son procédé d'élaboration de l'acier 35 à 40 ans plus tôt car le moteur Stirling aurait eu une toute autre destinée. Robert en était pleinement conscient et il le déclarait en 1876, deux ans avant de mourir.

Plein d'optimisme, il pensait que l'avenir lui donnerait raison. C'est peut-être à notre époque que cette prophétie s'accomplira pleinement.

Voir l'annexe consacrée à Henry Bessemer (1813-1898), voir page 215, § Annexe C.

Ce qui paraît étonnant de nos jours, c'est que les moteurs à air chaud de Robert et James Stirling, tout comme les machines à vapeur d'ailleurs, ont été inventés en l'absence de toute connaissance théorique structurée.

Les travaux de Sadi Carnot (1796-1832) [41], de Clapeyron (1799-1864), de Joule (1818-1889), de Rankine (1820-1872), de Kelvin (1824-1907), de Clausius (1822-1888)... sont postérieurs à 1816 ! La plupart de ces illustres personnages n'étaient même pas encore nés à cette date.

La thermodynamique, science couramment utilisée par les ingénieurs d'aujourd'hui et qui met en équation les transformations entre les différentes formes d'énergie, était complètement inconnue à l'époque.

Il fallut donc un très grand sens physique, une forte intuition pour concevoir des machines thermiques en ce début de XIX^{ème} siècle.

La machine à vapeur fut, d'une certaine façon, la bête noire ou la grande rivale du moteur Stirling. Elle profita des améliorations apportées principalement par James Watt au cours du XVIII^{ème} siècle : invention de la chambre à condensation ou condenseur, machine à double effet, contrôle de la vitesse par un régulateur à boules... comme nous l'avons vu précédemment, page 48, § 5.12.

Watt était également un homme d'affaire avisé qui brevetait tout ce qui lui paraissait intéressant, qu'il en fût l'inventeur ou pas.

Certains lui reprochent de ne pas avoir voulu concevoir des machines véhiculant de la vapeur à haute pression. Une chance, peut-être, pour le moteur Stirling...

La diffusion large du moteur Stirling, que Robert et son frère James appelaient de tous leurs vœux, fut limitée dans le temps. La machine à vapeur prit les devants, puis ce fut le tour, à la fin du XIX^{ème} siècle, du moteur à combustion interne. Otto présenta son moteur à explosion en 1876, Diesel déposa son brevet en 1891. Ensuite, on vit les premières applications industrielles de la motorisation électrique s'imposer rapidement.

A cette époque le rapport puissance/poids devenait favorable aux moteurs à combustion interne et aux moteurs électriques d'encombrement moindre.

Cependant, à la fin du XIX^{ème} siècle et au début du vingtième, à l'extinction des brevets, beaucoup de moteurs Stirling furent vendus et utilisés principalement pour pomper de l'eau et irriguer les champs des agriculteurs indiens, sud et nord-américains ou européens. À la campagne, quel que soit le pays, il est facile de trouver du combustible bon marché : bois, déchets de végétaux, paille, sciure, bouses... et une source froide adaptée : rivière, puits ...

Ces moteurs étaient commercialisés sous les marques Rider, Lehman, Robinson, Bremen, Roper...

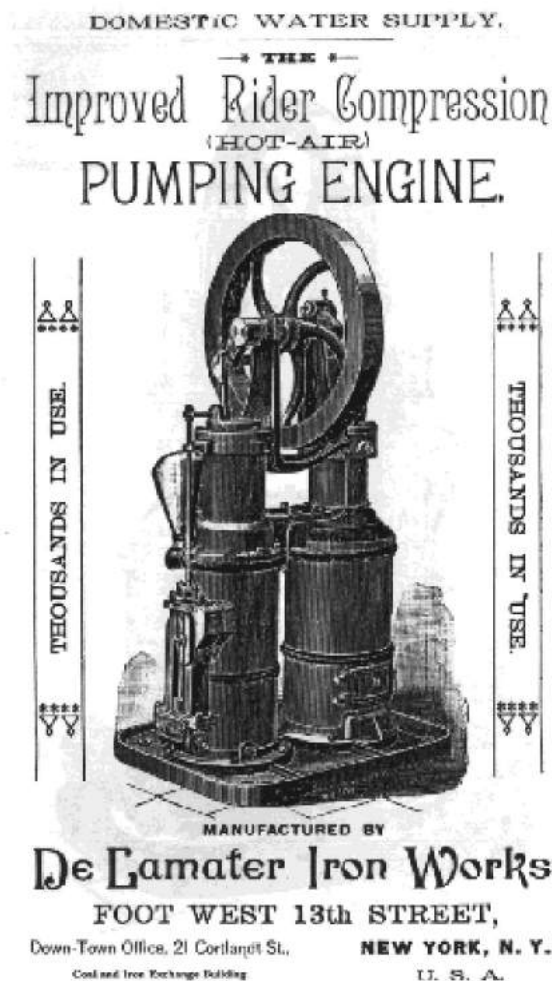


FIGURE 6.13 – Motopompe De Lamater Iron Works

On peut penser que plusieurs dizaines de milliers de moteurs utilisant le cycle dit de Stirling ont été fabriqués au cours du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème} jusqu'à l'entre-deux-guerres.

Il faut porter le regard principalement aux États-Unis pour faire ce constat. Cependant, ce type de moteurs étaient aussi commercialisés en Europe. La France ne s'est pas trop montrée intéressée même si certains modèles y étaient vendus.

L'utilisation des moteurs Stirling, à l'époque, se concentrait principalement dans le domaine agricole pour pomper l'eau, la stocker ou s'en servir pour l'irrigation.

Ces groupes motopompes auraient également été utilisés pour alimenter en eau les locomotives à vapeur. Le chauffeur remplissait le tender de sa machine avec l'eau d'un réservoir situé à proximité de la voie. Ce dernier était alimenté grâce à un groupe motopompe Stirling. Avant de repartir, le chauffeur ne devait pas oublier de mettre un peu de bois dans le foyer pour que le train suivant dispose à son tour de la précieuse eau.

Les mines de minerai ou de charbon, pour améliorer leur productivité, avaient de bonnes raisons de se mécaniser et de remplacer la force humaine ou animale par des moteurs. Par exemple, le pompage de l'eau présente dans ces mines constituait un champ d'application du moteur Stirling.

Un groupe motopompe tel que celui représenté ci-contre, ayant une puissance d'un demi cheval-vapeur, permettait un débit d'eau de 2,7m³ par heure en la refoulant à 20 mètres de hauteur. Sa consommation de charbon était alors de 2 kg par heure. Sa vitesse de rotation atteignait 140 tours par minute.

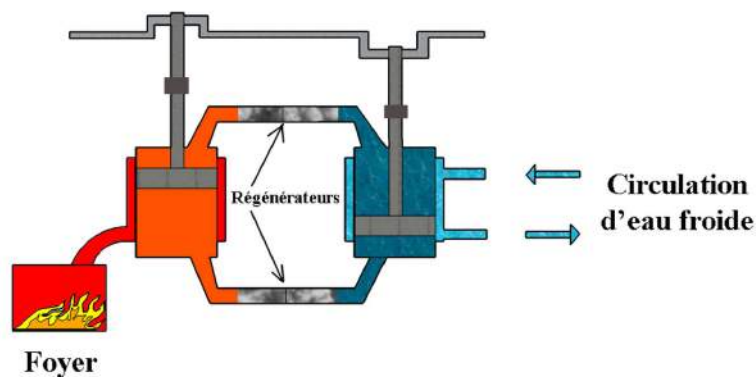
Il suffisait d'entretenir le feu dans la petite chaudière et de mettre un peu d'huile sur les paliers toutes les heures ou deux.[22]

6.4 Les principaux moteurs à air chaud conçus au cours du XIX^{ème} siècle (en dehors de ceux développés par Robert Stirling).

Ci-après, nous allons passer en revue quelques uns des moteurs à air chaud imaginés au cours du XIX^{ème} siècle. Nous ne pouvons tous les citer. Nous ne retiendrons que les plus marquants. Comme tout choix, celui-ci a sa part d'arbitraire.

6.4.1 Le moteur Franchot

Le premier moteur à air chaud à avoir été présenté à l'exposition universelle est le moteur de Monsieur Franchot en 1855.



Machine de Franchot

FIGURE 6.14 – Principe de la machine de Franchot

Ce moteur semble être d'une grande simplicité. En fait, il est très bien pensé.

Il possède une séparation nette entre la partie froide et la partie chaude. En effet, on est en présence de deux ensembles cylindre-piston. Un reçoit la chaleur du foyer, l'autre est refroidi par de l'eau. Il semblerait que Monsieur Franchot ait bien compris la théorie de Sadi Carnot insistant sur la notion de source froide et de source chaude et de transfert de calories entre les deux (voir les principes de thermodynamique exposés page 167, § 21).

Les parties supérieures et inférieures de ces ensembles sont réunies par des tuyauteries comportant de la toile métallique afin de constituer un régénérateur dont nous avons exposé les avantages au chapitre consacré au brevet de 1816 de Robert Stirling (page 62 ; § 6.3.2).

Les deux pistons sont reliés à la même manivelle mais le piston chaud a une avance de 90° sur le piston froid afin d'optimiser le cycle thermodynamique.[45]

Le moteur de Monsieur Franchot inspira très fortement Rider, dont nous allons voir ci-dessous sa machine, mais aussi la société Philips dans la conception de son moteur avec pistons à double effet (voir page 85, § 6.8).

Certains moteurs actuels présents sur le marché reprennent la conception de ce moteur Franchot.

6.4.2 Le moteur Laubereau

Les moteurs mis au point par Monsieur Laubereau connurent du succès car ils étaient performants et, surtout, avaient un encombrement réduit compte tenu de ce qui existait à l'époque.

Ci-après, on voit le moteur à deux cylindres :

- à gauche, un cylindre et son piston moteur qui utilise les variations de pression créées dans le cylindre de droite.
- à droite, un cylindre de travail comportant un piston qui déplace l'air de la partie chaude (en bas) vers la partie froide (en haut).

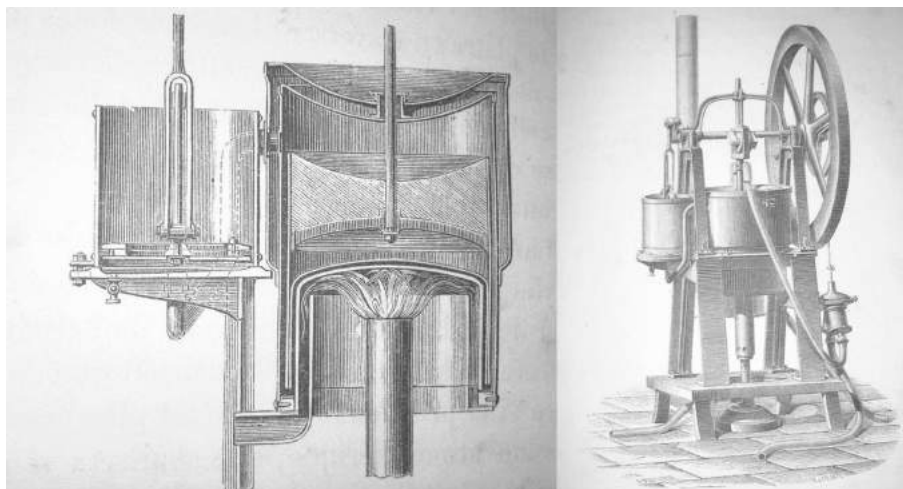


FIGURE 6.15 – Coupe et vue d'ensemble du moteur Laubereau

On retrouve ici les idées de James et Robert Stirling quand ils déposèrent leurs brevets de 1827 et 1840.

Ce moteur a probablement inspiré Monsieur Rider pour créer son propre moteur, voir ci-dessous page 71.

Monsieur Laubereau conçut également un moteur très proche de celui faisant l'objet du dépôt de brevet par Robert Stirling en 1816. Le principe est strictement le même, seuls sa disposition horizontale et son embiellage différent.

6.4.3 Le moteur Belou

Le moteur Belou fonctionne comme le moteur de George Cayley (exposé page 51 ; § 5.14). L'air de travail provient directement du foyer et est renouvelé grâce à un compresseur. On peut penser que les fines particules de produits de combustion en suspension dans l'air posaient de graves problèmes au niveau des frottements entre pièces mobiles les unes par rapport aux autres. Monsieur Belou avait pris en considération cet inconvénient en créant un « boîte à feu » dans laquelle étaient censées se déposer escarbilles et autres poussières.

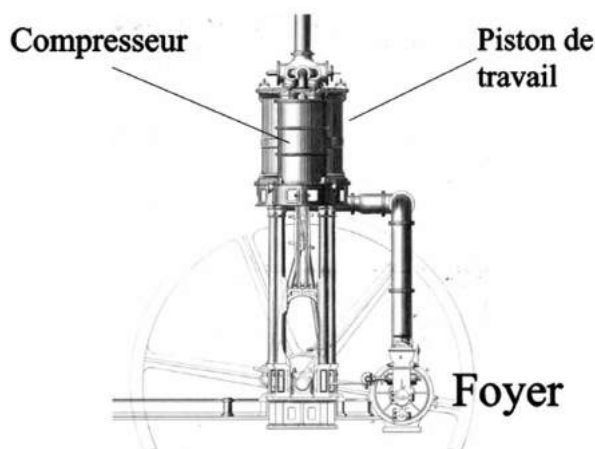


FIGURE 6.16 – Machine de Belou

Sur cette illustration [24], on devine, en partie basse à droite, le foyer qui alimente en air chaud le piston de travail. Le mouvement et le renouvellement de l'air est assuré par le compresseur.

6.4.4 Le moteur Hock

Le moteur Hock, présenté à l'exposition universelle de 1878, est très comparable à la machine de Belou que nous venons de voir ci-dessus.

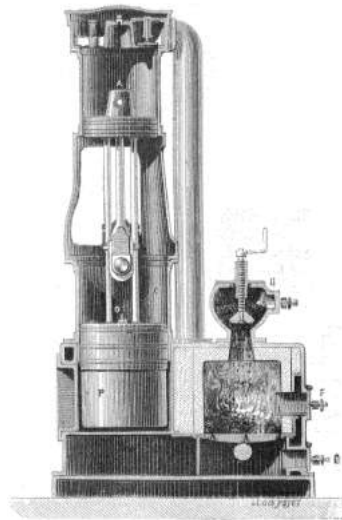


FIGURE 6.17 – Le moteur de Hock

Nul besoin d'eau pour refroidir ce moteur. Ceci représentait un avantage énorme car on pouvait le déplacer et le faire fonctionner en tout lieu.

Les inconvénients d'un tel moteur sont équivalents à ceux exposés pour la machine de Belou : destruction des pièces en mouvement les unes par rapport aux autres à cause des impuretés liées à la combustion, maîtrise délicate de la température des différents organes du fait de l'inertie thermique du foyer malgré son mode de régulation.

Monsieur Hock était autrichien, ce qui démontre qu'à la fin du XIX^{ème} siècle les concepts avaient franchi les frontières, quand ce n'est pas les océans lorsqu'on pense aux États Unis.

6.4.5 Le moteur Bénier

Comme le moteur de Belou, le moteur Bénier est un moteur à mi-chemin entre les moteurs à air chaud à combustion externe et les futurs moteurs à combustion interne qui brûleront d'abord du gaz avant de consommer du pétrole lampant, du gazole ou de l'essence.

Ces moteurs portaient au XIX^{ème} siècle l'appellation « aéromoteur ».

Il a été présenté à l'exposition universelle de 1889 pour la première fois.

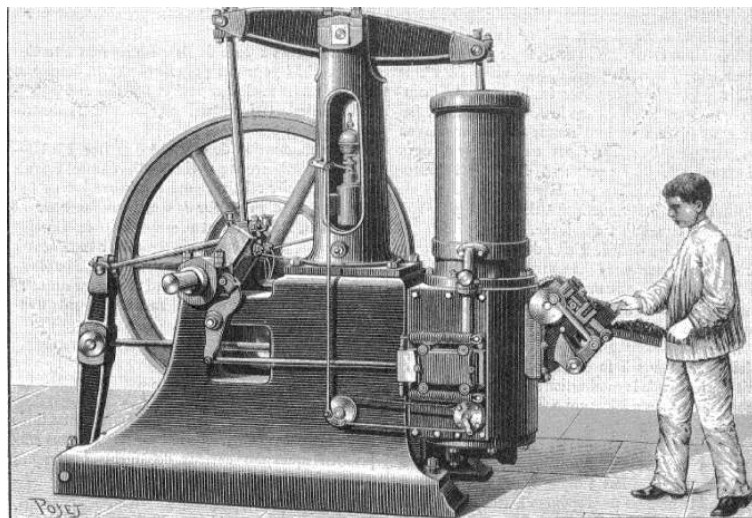


FIGURE 6.18 – Aéromoteur de Bénier[27]

Le foyer alimenté en coke se trouvait en dessous du cylindre de travail et de son piston. Le compresseur, ou pompe de compression comme on l'appelait à l'époque, est situé horizontalement et perpendiculairement au cylindre moteur dans le bâti de la machine.

La partie basse du cylindre principal était refroidie à l'eau.

Un système d'injection d'air permettait de nettoyer l'espace entre cylindre et piston pour éviter l'encrassement par les produits de combustion tout en refroidissant le piston. Ce même système, en régulant le débit d'air arrivant dans le foyer, adaptait la puissance du foyer à la demande en énergie mécanique.

La puissance des machines de Monsieur Bénier allait de 1 à 9 chevaux-vapeur.

À l'époque, et il est difficile d'en avoir les résultats, des études étaient faites pour comparer les machines entre-elles : quelle consommation de combustible à l'heure pour maintenir une puissance d'un cheval-vapeur, quel coût d'achat, quels frais de maintenance... pour établir finalement le prix de l'énergie fournie sur une durée de vie de chaque machine.

6.4.6 Le moteur Rider

Le moteur de Rider, comme le moteur de Franchot mais sans avoir de pistons à double effet, comporte très distinctement un ensemble cylindre-piston chaud et un autre froid. Le piston froid et le piston chaud sont reliés à la même manivelle avec un décalage de 90° environ.

Nous étudierons dans le détail le fonctionnement de ce moteur dans la partie de cette ouvrage intitulée « Comment ça marche » page 93, § 7.

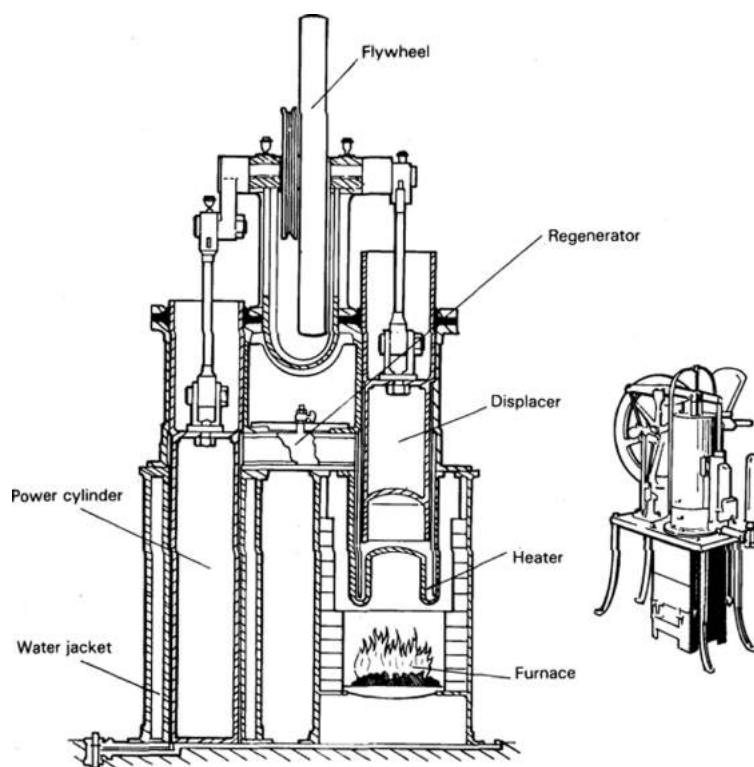


FIGURE 6.19 – Moteur Rider

Ce moteur eut *a priori* un grand succès commercial avec pour application principale le pompage de l'eau (voir la publicité pour ce moteur page 66, § 6.13).

Ce moteur fut développé par A. K. Rider en 1876 à Philadelphie aux États Unis.[85]

Il fut fabriqué et distribué à la fois aux États Unis et en Angleterre. Il se déclinait en différentes tailles et puissances.

6.5 John Ericsson (1803-1889)

6.5.1 Sa vie et ses principales inventions



FIGURE 6.20 – John 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.

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.⁶

John Ericsson travailla sur différents modèles de bateaux propulsés par l'hélice de son invention, en particulier l'USS Princeton, bateau à vapeur construit par l'US Navy.

En 1851, il déposa un nouveau brevet de moteur à air chaud. C'est le moteur Ericsson étudié dans ce livre et utilisant le cycle thermodynamique du même nom.

Ce moteur équipa le bateau Ericsson. Malgré son inauguration en grande pompe et faute de performances équivalentes à celles des bateaux à vapeur classiques, l'Ericsson fut modifié pour recevoir un moteur à vapeur avant de couler un peu plus tard !

Ce moteur était à cycle ouvert, c'est à dire qu'au cours de chaque cycle il rejetait l'air chaud qui venait de se dilater et aspirait la même masse d'air frais.

Il disposait d'un régénérateur, idée reprise à Robert Stirling. Ce moteur, dont on peut voir une représentation ci-dessous, sera étudié de façon plus approfondie page 197, § 31.

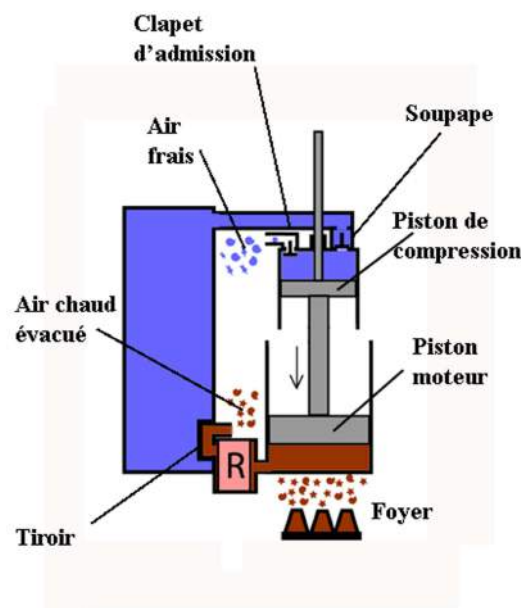


FIGURE 6.21 – Moteur Ericsson de 1851 à cycle ouvert [19]

6. Cette invention est parfois attribuée à John Ericsson. En France, on avance que Frédéric Sauvage en est le véritable inventeur. Pour les tchèques, il s'agit de Josef Ressel... Pour mettre tout le monde d'accord, on dira que le premier à l'avoir décrite, et pas forcément inventée, est Archimède ! Et ce, quelques deux mille ans auparavant.

John Ericsson continua sa collaboration avec l'US Navy. Il connut la célébrité avec la construction (en 100 jours!) en 1862, du bateau de guerre Monitor célèbre pour avoir contribué à la fin de la guerre de sécession.

John Ericsson apprit à ses dépens que les moteurs à air chaud devaient se contenter de modestes puissances pour des besoins domestiques, agricoles ou industriels classiques.

Les besoins en forte puissance seront satisfaits par les machines à vapeur, en particulier quand apparaîtront les turbines, et par les moteurs à combustion interne de fortes cylindrées.

John Ericsson, avant d'être un chercheur émérite, était surtout un industriel imaginatif et audacieux. Il était entrepreneur au sens premier du mot.

On doit à John Ericsson de nombreuses autres réalisations qu'il sut diffuser en grande série. Nous allons en citer arbitrairement deux ci-dessous.

Mais auparavant, nous allons reproduire les arguments développés à l'époque pour promouvoir les engins de John Ericsson :

Inexplosive, economical, easily managed, requires no engineer!, uses no water, consumes little fuel, is adapted for all kinds of mechanical and agricultural labors.[61]

Soit :

N'explose pas, économique, facile d'utilisation, ne requiert pas d'ingénieurs!, n'utilise pas d'eau, consomme très peu combustible, est adapté à toutes sortes de travaux mécaniques ou agricoles.

6.5.2 Moteurs solaires de John Ericsson

Les moteurs solaires de John Ericsson sont imaginés dès la fin du XIX^{ème} siècle! Ceux-ci concentraient l'énergie solaire à l'aide d'une parabole. Les fermiers américains ont accueilli favorablement cette invention pour entraîner des pompes d'irrigation sans frais de combustible. Nous détaillerons ce type de moteur solaire dans la partie consacrée aux applications du moteur Stirling (page 131, § 11).

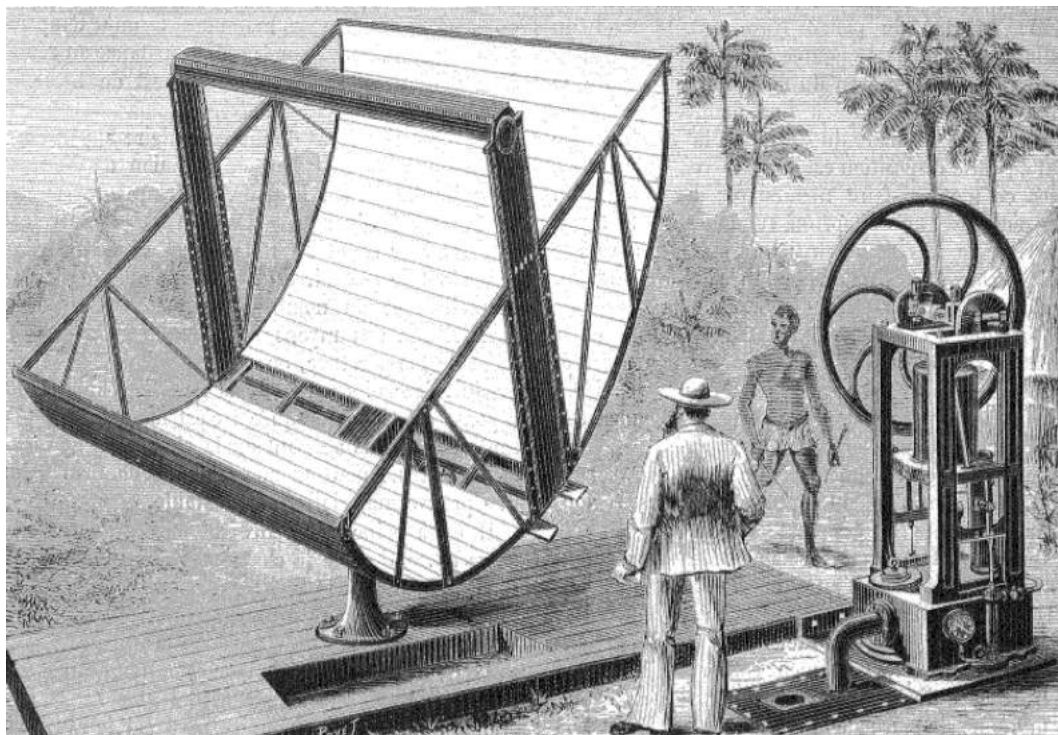


FIGURE 6.22 – Machine solaire imaginée par John Ericsson [26]

6.5.3 Machine à coudre

Une autre application originale proposée par John Ericsson est la machine à coudre entraînée par un moteur à air chaud. Elle préfigurait les futures machines électriques.

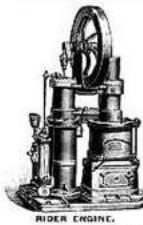


FIGURE 6.23 – Machine à coudre et moteur Ericsson [61]

Machine solaire et machine à coudre sont un petit peu anecdotiques face aux nombreux moteurs vendus par l'entreprise Rider-Ericsson Engine Company fruit du rapprochement des sociétés De Lamater Iron Works et de Rider Engine Company. Ces moteurs entraînaient, la plupart du temps, des pompes (voir l'affiche publicitaire page 66).

1907
The Review of Reviews—Advertising Section

IMPORTANT NOTICE!



RIDER ENGINE.

Rider-Ericsson Engine Company begs to announce an important reduction in prices of its Rider and Ericsson Engines, due to greatly improved facilities in their new plant. The introduction of special machinery has not only resulted in the absolute standardization of all parts, but also in decreased costs and we want our customers to share with us in these benefits.

We give below the present as well as the old prices:

OLD PRICES.			
	4-inch	6-inch	8-inch
Rider Engines	\$210.00	\$300.00	\$420.00
Ericsson Engines	\$120.00	\$170.00	\$210.00

NEW PRICES.			
	4-inch	6-inch	8-inch
Rider Engines	\$180.00	\$240.00	\$350.00
Ericsson Engines	\$80.00	\$130.00	\$160.00

No extra price for deep well attachment. These prices are L. & N. New York.

In view of the enormously increased demand, orders should be placed as much in advance of requirements as possible.

For further information apply to our nearest store, asking for catalogue "C."

Rider-Ericsson Engine Co.

35 Warren St., New York.
 40 Dearborn St., Chicago.
 233 and 234 Franklin St., Boston.
 40 North 2nd St., Philadelphia.
 11 Pitt St., Sydney, N. S. W., Australia.
 111 Craig St., W., Montreal, P. Q.
 Amagosa 70, Havana, Cuba.



ERICSSON ENGINE.

Please mention the Review of Reviews when writing to advertisers.

FIGURE 6.24 – Moteur Rider-Ericsson

John Ericsson mourut le 8 mars 1889.

6.6 Le XX^{ème} siècle : la renaissance du moteur Stirling

Le XX^{ème} siècle marqua la renaissance du moteur Stirling. Mais il vaut mieux considérer que celle-ci eut lieu à partir de 1937, moment où la société Philips commença à développer différents moteurs Stirling.

Les années qui précédèrent furent, pour ce qui est de la conception des moteurs, dans la lignée de ce qui se faisait à la fin du XIX^{ème} siècle.

Nous nous préoccupons plus que tout aux recherches de la société Philips. Cependant et auparavant, nous allons nous intéresser à quelques moteurs qui ont marqué le début de ce XX^{ème} siècle.

6.6.1 Le moteur Ringbom à déplaceur libre

En 1907, Ossian Ringbom déposa un brevet relatif à un moteur à air chaud dans lequel le mouvement du déplaceur était obtenu sans lien mécanique avec les autres pièces mobiles.

On peut voir ci-dessous le plan qui était joint à ce dépôt de brevet. Nous verrons plus tard, page 107, que ce moteur est du type gamma.

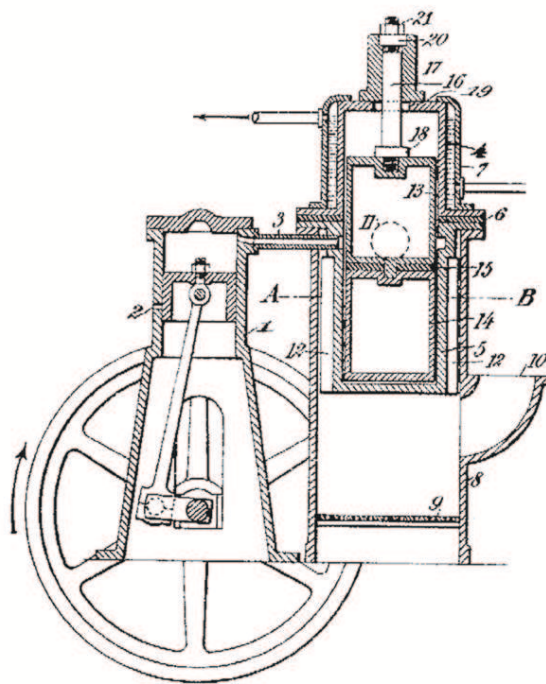


FIGURE 6.25 – Moteur Ringbom de 1907 [87]

On peut considérer que ce moteur est l'ancêtre des moteurs à pistons libres.

6.6.2 Les moteurs Heinrici

Il y eut plusieurs générations de moteurs de marque Heinrici. La version améliorée datant de 1920 a connu un très grand succès. Des milliers de moteurs Heinrici furent fabriqués et vendus jusqu'en 1940.

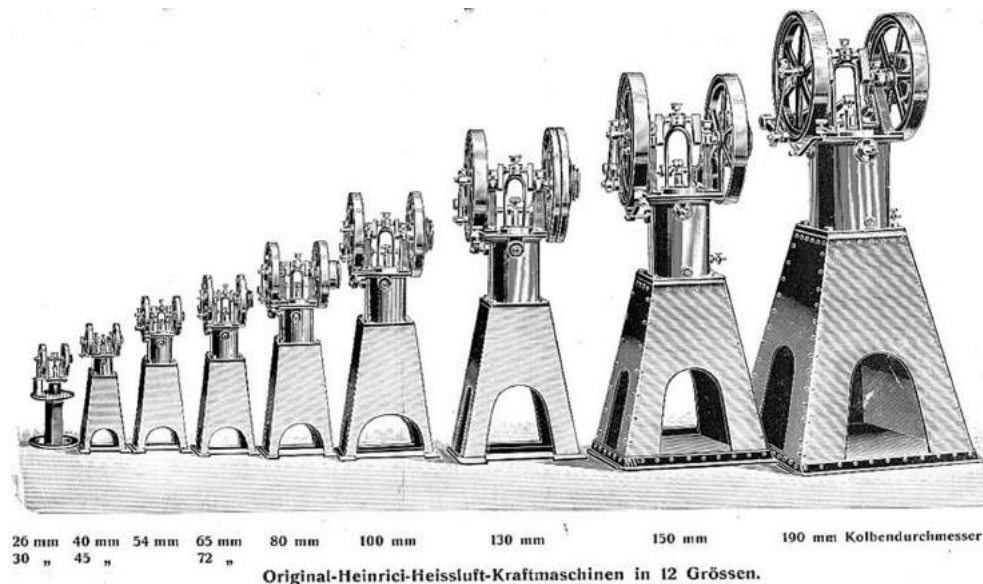


FIGURE 6.26 – La gamme de moteurs Heinrich

Ces moteurs, comme on peut le voir ci-dessus, se déclinaient en différentes puissances allant d'un cinquième de cheval-vapeur à un demi cheval-vapeur.

6.6.3 Autres développements du moteur à air chaud

À titre anecdotique, on peut voir ci-après l'ingéniosité qui s'est développée autour des moteurs à air chaud pour des applications que nous aurions à peine imaginées.

- Catalogue Manufrance : [30]

Au début du siècle, dans le célèbre catalogue de la Manufacture Française d'Armes et Cycles de Saint-Étienne, on pouvait trouver de petits objets ludiques construits autour d'un moteur Stirling. C'est ce que nous pouvons voir à la page suivante.

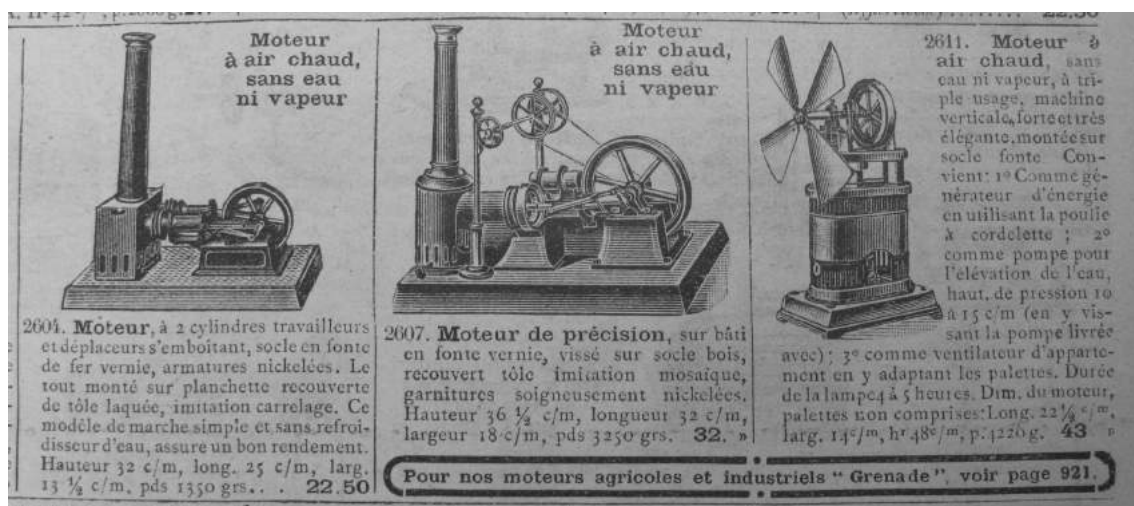


FIGURE 6.27 – Catalogue Manufrance de 1914

Dans ce même catalogue, on trouvait des équipements plus sérieux comme des pompes destinées au monde agricole, des moteurs pour les entraîner, ou bien d'autres choses qui nous paraissent curieuses aujourd'hui : armes diverses dont canons à poudre à usage des particuliers...

- Catalogue Mestre et Blatgé [31]

Cette société, concurrente de la précédente, proposait aussi, à la même période, des articles ayant une motorisation « à air dilaté ».



Maestrophone est une marque déposée en 1904 par la société E. Paillard Cie SA. Elle fournissait un très grand choix de machines parlantes avec, au début, des pavillons en zinc nickelé (intérieur rouge) ou laiton poli. Les premiers mouvements sont en laiton et sans marque. Un modèle très ingénieux, le Polyeucte n°205 que nous pouvons voir ci-après, était équipé d'un moteur à air chaud. La première version était en chêne avec pavillon nickelé ensuite en noyer avec grand pavillon à fleurs.

Un petit réchaud à alcool situé dans le socle de l'appareil chauffe l'air qui, en se dilatant, actionne un piston entraînant le plateau. Marche silencieuse, consommation très faible, 3 décilitres suffisent pour une marche de 12 heures. De ce fait, ce magnifique objet était utilisé surtout dans les salles de danse.



Le berceau du phonographe se situait dans le Jura suisse, à Sainte-Croix et sa région, où petits et grands fabricants étaient réunis. Cette industrie créa des milliers d'emplois.[16]

6.7 La société Philips

Sans la société Philips, ses lourds investissements, ses recherches nombreuses, la qualité et la détermination de ses ingénieurs, parlerait-on encore aujourd'hui du moteur Stirling ?

Rien n'est moins sûr.

De 1937 à 1990 environ, la société néerlandaise Philips mit au point plusieurs modèles de moteurs Stirling. La conception de ces moteurs était différente tant dans le principe de chacun d'eux que dans les détails de leurs éléments constitutifs tels que brûleur, embiellage, étanchéité, échangeur thermique...

Le livre de référence retraçant l'histoire des moteurs Stirling Philips écrit par C.M. Hargreaves « The Philips Stirling engine » [58] nous servira de fil conducteur tout au long de ce chapitre.

Il rappelle en particulier les périodes marquantes du moteur Stirling telles que définies par les ingénieurs de la société Philips :

- la préhistoire
 Cette période couvre le XIX^{ème} et le XX^{ème} siècle jusqu'en 1937 date à laquelle débutèrent les travaux de la société Philips.
 C'est toute la période que nous venons de parcourir ci-dessus. Il ne faut pas la sous-estimer. Les efforts consentis au cours du XIX^{ème} siècle ont constitué une base de travail indispensable aux recherches de la société Philips.
- la période noire de 1937 à 1945
 Cette période couvre les événements tragiques qui se déroulèrent pendant la seconde guerre mondiale. Elle correspond également aux tâtonnements des ingénieurs qui s'aperçurent très rapidement que le moteur Stirling était difficile à maîtriser.
 Les performances attendues ne furent pas toujours obtenues. Les points à approfondir apparurent d'eux-mêmes.
 Pour ne pas attirer l'attention des occupants allemands, il était dit que les travaux concernaient un nouveau modèle de compresseur et non un nouveau type de moteur.
 À la fin de la guerre, certains modèles durent être détruits ou cachés pour qu'ils ne tombent pas aux mains de l'ennemi. D'autres disparurent suite au bombardement des usines par la RAF le 6 décembre 1942.
- la période médiévale de 1946 à 1953
 Le succès fut un peu plus au rendez-vous même si la puissance des moteurs développés restait modeste. Mais cette étape permit de dégager des solutions technologiques mis à profit pour concevoir des moteurs plus performants et puissants.
- la période des récoltes ou vendanges jusqu'en 1970
 Les connaissances et expériences accumulées au cours des périodes précédentes permirent enfin le développement de moteurs à caractère industriel. La conception de ceux-ci variait d'un modèle à l'autre. Les rendements devinrent comparables à ceux des moteurs à combustion interne et parfois ils étaient bien meilleurs. La gamme de puissance, selon les besoins, s'élargit pour atteindre environ 70kW.
- les temps modernes après 1970
 La société Philips continua au cours des années 70 à améliorer ses moteurs en y apportant d'intéressantes avancées technologiques. Le départ à la retraite de R.J. Meijer en 1979 marqua la fin de cette magnifique épopée. Toutefois, la vente de brevets ou la signature d'accords de partenariat avec de grosses entreprises permit la poursuite, l'amélioration et la survivance des travaux réalisés grâce aux lourds investissements consentis par Philips.

Ce petit parcours historique nous permet de comprendre que si le principe d'un moteur Stirling est simple il n'en est rien de son développement de façon concrète. La réussite n'est venue qu'après de lourds investissements en heures et argent, après de nombreux échecs, et grâce à l'obstination d'une équipe d'ingénieurs soutenus par leurs responsables d'entreprise.

Cette aventure a mis en évidence la difficulté de passer d'un concept à un objet concret, d'une maquette validant un principe à son application industrielle.

Plus concrètement, nous allons voir ci-dessous et de façon non exhaustive, sinon arbitraire, les principaux moteurs développés par la société Philips ainsi que certains équipements nécessaires à leur fonctionnement.

Dans cette partie, le nom de Philips sera souvent associé à celui d'autres entreprises car des accords de partenariat ou de licence furent conclus dès 1958.

6.7.1 La période noire 1937-1945

- Type 1 : le principe de ce moteur était le même que celui du premier moteur de Robert Stirling (voir pour mémoire page 62, § 6.3.2), il comportait un seul cylindre dans lequel se déplaçaient le déplaceur et le piston moteur. Cette réalisation de 1938 développait 16 W à 1000 tours par minute. Ce modèle apporta du baume au cœur à ses constructeurs et confiance pour la suite.
- Type 3 : un moteur comportant deux cylindres tête-bêche et deux pistons moteurs capable, du haut de ses 40 W, d'entraîner un ventilateur. Ce produit présentait un intérêt commercial pour les pays tropicaux n'ayant pas encore l'électricité à l'instar des « ventilateurs coloniaux présents dans le catalogue Mestre et Blatgé (voir page 76, § 6.6.3).
- Type 4 : ce moteur expérimental de 100 W à 1000 tr/mn reprenait la conception du moteur Rider vu page 71, § 6.4.6.
- Type 10 : dans le principe, c'est également un moteur identique à celui de Robert Stirling de 1816. Par contre, il comportait un réchauffeur, un régénérateur et un système de refroidissement annulaire. L'embellage, assez complexe, se situait à l'intérieur d'un carter étanche ce qui facilitait un travail à une pression de l'ordre de 5 fois la pression atmosphérique. Cet engin développait une puissance de 500 W à 1500 tr/mn.
C'est à partir de ce moteur que fut développé le groupe électrogène 102C que nous étudierons plus longuement ci-dessous.
- Type 19 : ce moteur fut la tête de série des moteurs à double effet mis au point par la société Philips. Nous en voyons le principe ci-dessous :

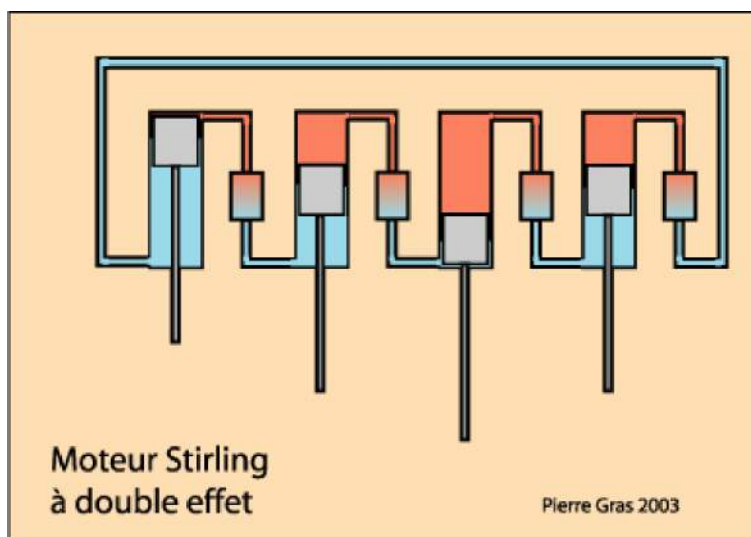


FIGURE 6.30 – Principe du moteur Stirling à double effet

Ce type de moteur reprend l'idée de Monsieur Franchot (pour vous remémorer voir page 68 ; § 6.4.1) présentée à l'exposition universelle de 1855.

Le moteur mis au point en 1943 développait une puissance de 6 kW à 3000 tr/mn.

6.7.2 La période médiévale 1937-1945

- Type 25 : il s'agissait d'un moteur miniature appelé « radio generator » d'une puissance espérée de 20 W. Les ingénieurs de Philips espéraient un coût faible de ce petit générateur. Beaucoup de pièces étaient embouties. Les pertes par frottement sur ce minuscule moteur le rendirent trop peu performant pour espérer un grand succès.
Il comportait 4 cylindres et il était à double effet comme le moteur présenté ci-dessus. Les pistons avaient 20 mm de diamètre et leur course était de 12 mm ! Un plateau oscillant réalisait le déplacement de ces pistons. Nous étudierons plus loin, dans ce livre, ce type de dispositif.
- Type 102C : ce petit groupe électrogène, appelé « bungalow set » pour mieux préciser sa destination, fut construit en série au tout début des années 1950. Sur un plan technique, c'est une petite merveille. Sur un plan commercial, son prix était rédhibitoire pour une diffusion à grande échelle.
La puissance électrique de ce moteur était d'environ 200 W, son rendement de 5% approximativement, sa vitesse de rotation autour de 1500 tr/mn et sa pression de fonctionnement entre 5 et 10 fois la pression atmosphérique. L'influence du niveau de pression était, aussi curieux que ça puisse paraître, insignifiante sur les performances du moteur.

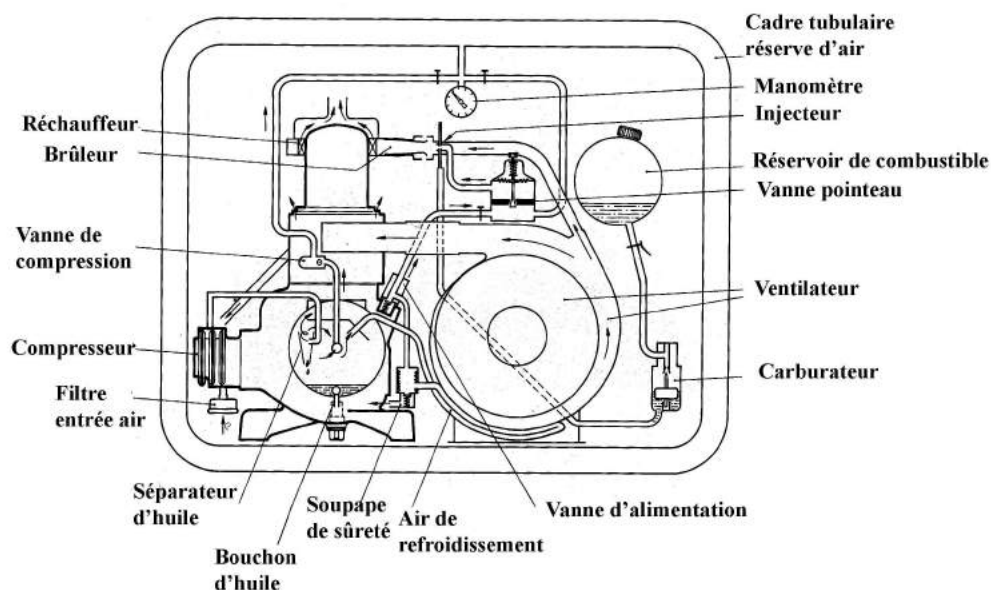


FIGURE 6.31 – Moteur Philips T102C

Ce moteur fut construit en 150 exemplaires sous l'appellation MP 1002CA. Aujourd'hui, combien en reste-t-il ? Certains furent donnés à des musées et universités. D'autres sont en possession d'amateurs très éclairés et parfois fonctionnent à merveille !



FIGURE 6.32 – Rencontre rarissime de deux MP1002CA en ordre de marche !

En 1953, pendant les terribles inondations que connut la Hollande (plus de 1800 morts), ce moteur permit d'informer la population en fournissant l'électricité à des postes radio à lampes. L'arrivée du transistor et de sa faible consommation d'énergie remet en cause cette utilisation.



FIGURE 6.33 – Stand de démonstration de Jean-Jacques Plessiet à Verna

- En 1953, fut créé un moteur miniature de 3 We pour alimenter un poste radio. Ce moteur, mono-cylindre avec piston moteur et déplaceur, revêt une grande importance car il avait un embiellage de type rhomboïdal (en forme de losange) qui fut très utilisé par la suite, comme nous allons le voir ci-dessous, sur des moteurs beaucoup plus gros.
Ce type d'embiellage fera l'objet d'un développement plus important dans le chapitre consacré à la cinématique des moteurs (page 172 ; § 22.2).

6.7.3 La période des récoltes ou vendanges 1953-1970

Durant cette période, plusieurs moteurs à embiellage rhomboïdal furent développés directement par Philips ou par des entreprises ayant passé des accords de licence avec la société d'Eindhoven.

- 30-15 : ce moteur avait pour fluide de travail de l'hydrogène. Il développait 30 HP (22 kW) à 1500 tr/mn. La pression maximale de travail autorisée était de 140 fois la pression atmosphérique, la cylindrée de son mono-cylindre ou plutôt le volume balayé était de 365 cm³.
Sur ce moteur, les variations de puissance étaient rendues possibles grâce à un système de régulation jouant à la fois sur la pression interne du moteur et sur le débit de combustible envoyé dans la chambre de combustion. Le gros reproche fait au moteur Stirling est de manquer de souplesse, tel qu'on peut l'entendre à tort ça et là. Par la conception de ce dispositif de régulation, Philips mettait ainsi fin à toute polémique à ce sujet.
Par rapport aux moteurs passés en revue précédemment, un énorme progrès était accompli avec ce moteur. La « récolte » commençait...
Ce moteur 30-15 fut amélioré en augmentant sa pression interne et sa vitesse. Il fournissait une puissance de 40 HP (30 kW) à un bateau de tourisme fluvial le « Johan de Witt » qui navigua plus de 18 ans avec cette motorisation.
Le 30-15 fut aussi la base du moteur de 10 HP (7,5 kW) développé conjointement entre les ingénieurs de la division Allison de General Motors et ceux de la société Philips. Ce moteur tournait à 3600 tr/mn. Ce programme de recherche avait pour but la production d'électricité à bord du premier satellite US avant la généralisation de l'électronique économe en énergie.
- 360-15 : ce moteur de 4 cylindres, conçu pour développer 360 HP (268 kW) à 1500 tr/mn, fonctionnait toujours à l'hydrogène comme gaz de travail. La pression de travail admissible était de 140 fois la pression atmosphérique, le volume balayé dans chaque cylindre de 1218 cm³.
Comme son prédécesseur le 30-15, une attention particulière avait été apportée à la conception du brûleur, du régénérateur et des échangeurs de chaleur côté chaud et côté froid. De plus, pour une même puissance, le niveau sonore de ce moteur Stirling était très bas comparé à celui d'un moteur Diesel classique (95 dB pour le premier, 135dB pour le second). Cette caractéristique est un atout considérable dans le domaine militaire, en particulier pour les sous-marins, pour lutter contre la détection acoustique de l'adversaire potentiel.

- Durant cette période furent développés des groupes électrogènes conjointement par Philips et General Motors, plus particulièrement avec sa division Allison.

La base de ces groupes était le moteur 10-36 (10 HP à 3600 tr/mn) copie, en moins puissant, du moteur 30-15.

Virent ainsi le jour les générateurs électriques Allison PD 46 et 67 d'une puissance de 3 kWe. Ce dernier était destiné à alimenter en énergie un satellite. Il ne le fit jamais. La faible consommation des tout nouveaux composants électroniques embarqués en est la probable raison. Cette expérience est à rapprocher de celle du T102C destiné à des postes radio à lampes juste avant l'invention du transistor.

Dans la même veine, furent mis au point les groupes électrogènes commandés par l'armée américaine : les GPU pour Ground Power Unit. Ils avaient également une puissance électrique disponible de 3 kWe.

- General Motors, dès cette époque, créa une voiture à motorisation hybride. Le moteur Stirling utilisé dérivait du GPU dont on vient de parler ci-dessus. Il entraînait un alternateur triphasé qui chargeait des batteries via un redresseur. Les batteries alimentaient à leur tour, en fonction de la puissance nécessaire, un moteur électrique triphasé via un onduleur.

Les performances de ce dispositif monté sur une Opel Kadett étaient des plus satisfaisantes : vitesse de pointe de 90 km/h, une consommation de 6,7 litres aux 100 km à 50 km/h, une accélération de 0 à 50 km/h en 10 secondes.

La viabilité d'une telle voiture était donc prouvée dès 1967 ! Et ce avec un surpoids dû aux batteries d'environ 500 kg.

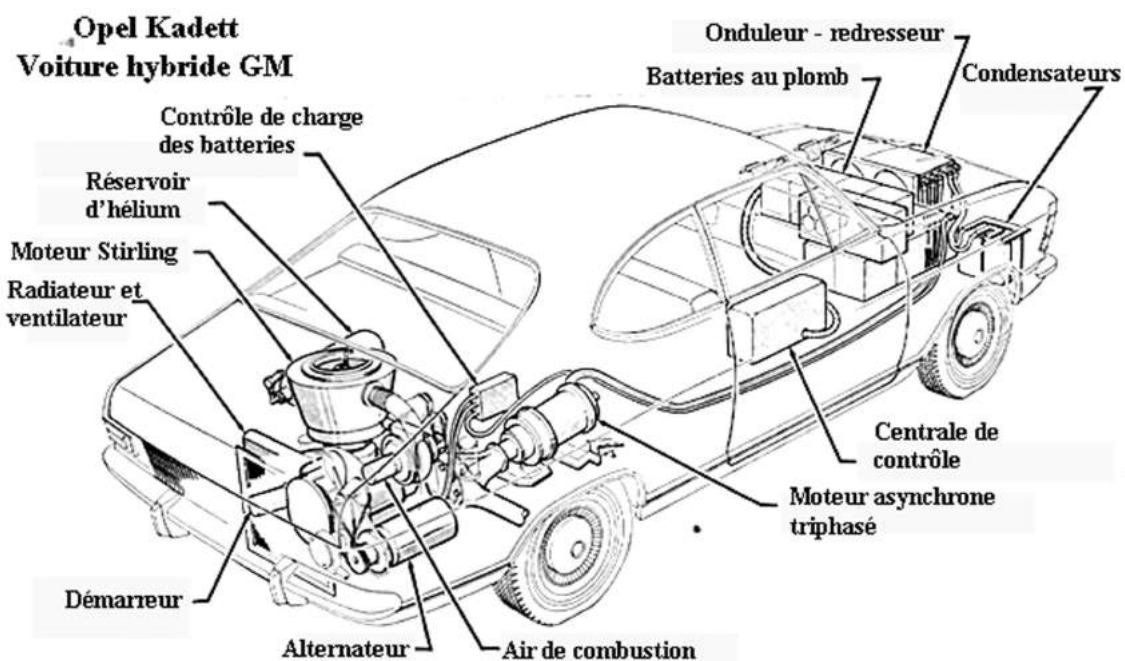


FIGURE 6.34 – Voiture hybride General Motors 1967

6.7.4 La période des temps modernes 1970-1979

Maîtrisant parfaitement le moteur à embiellage rhomboïdal, Philips adapta ce type de moteur afin de répondre à des applications très diverses. Nous allons en voir quelques unes ci-dessous :

- simulation d'un moteur de 400 HP (300 kW) : cette étude a surtout permis d'affiner les moyens de calcul, de prédiction des performances d'un moteur et d'estimer les effets d'échelle entre deux moteurs de conception identique mais de dimensions différentes.
- développement d'un moteur flat-twin de 4 cylindres pour les bateaux. Philips espérait obtenir une puissance de 100 HP (75 kW) avec de l'hélium comme gaz de travail à une pression de 100 fois la pression atmosphérique. Il était envisagé d'augmenter la pression de travail et de remplacer l'hélium par de l'hydrogène.

Ce moteur extra-plat pouvait être installé sous un plancher du fait de sa faible épaisseur : 50 cm !

Ce projet ne fut pas mené à son terme car la priorité fixée alors par les dirigeants de Philips pour les années 1970 fut de réaliser un moteur peu polluant. En effet, dès cette époque, la qualité de l'air dans les villes devenait problématique. La raison principale en était la multiplication des moteurs à combustion interne et plus particulièrement du Diesel.

Si pour Robert Stirling, au cours du XIX^{ème} siècle, le défi était de rivaliser avec les machines à vapeur, un siècle plus tard, Philips voulut faire prévaloir l'intérêt du moteur Stirling face aux moteurs conventionnels équipant voitures, bus, camions tel que nous allons le voir ci-dessous...

- moteur 4 cylindres en lignes pour motoriser les bus : ce moteur reprenait en grande partie les éléments constitutifs du moteur flat-twin destiné aux bateaux : pré-chauffeurs, têtes de cylindre, régénérateurs et réfrigérants. Par contre, la disposition des cylindres était différente.

Ce moteur fut monté en lieu et place du moteur Diesel d'un bus DAF en 1971. La puissance disponible était de 68 kW à 2500 tr/mn.

Le bus ainsi équipé présentait des avantages non contestables : son faible niveau de bruit et un niveau de pollution faible, un excellent rendement, un rapport poids-puissance intéressant.

Alors pourquoi l'aventure en est-elle restée là ? Probablement pour des questions de coût de fabrication à grande échelle et peut-être à cause du risque industriel encouru à développer en grande série ce type de moteur.

Enfin, pour être juste, le moteur Diesel était capable, lui aussi, d'améliorations à plus faible coût pour diminuer à la fois son niveau sonore et ses rejets polluants.
- Une expérience similaire fut réalisée par les constructeurs MAN et MWM, associés pour ces recherches, afin d'équiper des bus avec un moteur Stirling . MAN-MWM développa en particulier un moteur de 180HP (135 kW) de 2630 cm³ de cylindrée travaillant sous une pression d'hélium de 150 fois la pression atmosphérique. Le rendement obtenu était supérieur à 38% !

Là aussi, la réussite technique était incontestable. Par contre, le coût du moteur Stirling à embiellage rhomboïdal était rédhibitoire pour qu'on envisage de l'installer dans un bus en lieu et place d'un moteur Diesel. L'objectif était d'obtenir un coût de fabrication du moteur Stirling deux fois supérieur, et pas plus, à celui d'un moteur Diesel. Les avantages du moteur Stirling (pollution faible, silence de fonctionnement, fiabilité et maintenance allégée) autorisaient ce sacrifice en terme de surcoût. Dans la réalité, d'après les calculs les plus réalistes faits à l'époque, le coût d'un moteur Stirling s'avéra être trois fois supérieur à celui d'un moteur Diesel de même puissance.[91]
- C'est à la même époque que débutèrent les travaux de United Stirling, société suédoise, sur les moteurs Stirling en utilisant les brevets de Philips et en collaboration avec l'entreprise néerlandaise.

United Stirling voulait tout d'abord étudier l'intérêt des moteurs Stirling dans les mines de fer. Ensuite, cette société pensa équiper les bus des grandes villes de ce moteur et réfléchit aux utilisations potentielles dans la marine suédoise.

Cette société fut impliquée dans le développement du moteur MAN-MWM à embiellage rhomboïdal dont nous venons de parler. Par la suite, comme nous le verrons ci-dessous, United Stirling développera d'autres moteurs de haute technologie mais en adoptant des pistons à double-effet et un système bielle-manivelle classique.
- Toujours en utilisant un petit moteur rhomboïdal, les sociétés Philips et Westinghouse conçurent un groupe moto-pompe pour réaliser un cœur artificiel. L'isotope servant de source chaude était du Pu 238. Le gaz de travail choisi était de l'argon travaillant à une pression de 15 fois la pression atmosphérique. La puissance thermique fournie par le PU 238 était de 30 W afin d'avoir une puissance disponible sur la pompe de 5 W. Un flexible assurait la transmission du mouvement de rotation entre le moteur Stirling et la pompe.[91]

Les aspects purement techniques ne sont pas les seuls devant être pris en compte pour le développement d'un tel appareil devant assurer une fonction biologique très complexe. Aujourd'hui, le cœur artificiel autonome et implantable dans un organisme fait encore partie des rêves des médecins et des patients. Rêve qui semble devenir réalité à en croire l'actualité correspondant à l'écriture de ce livre.

Philips arrêta toutes ses activités relatives au moteur Stirling en 1979. Cependant, cette décision fut prise après que de nombreux accords de licence eurent été passés avec de grosses entreprises telles que General Motors, MAN-MWM, United Stirling, DAF, Ford...

La pérennité des travaux de recherche et développement de Philips était assurée.



FIGURE 6.35 – Bus DAF-Philips [80]

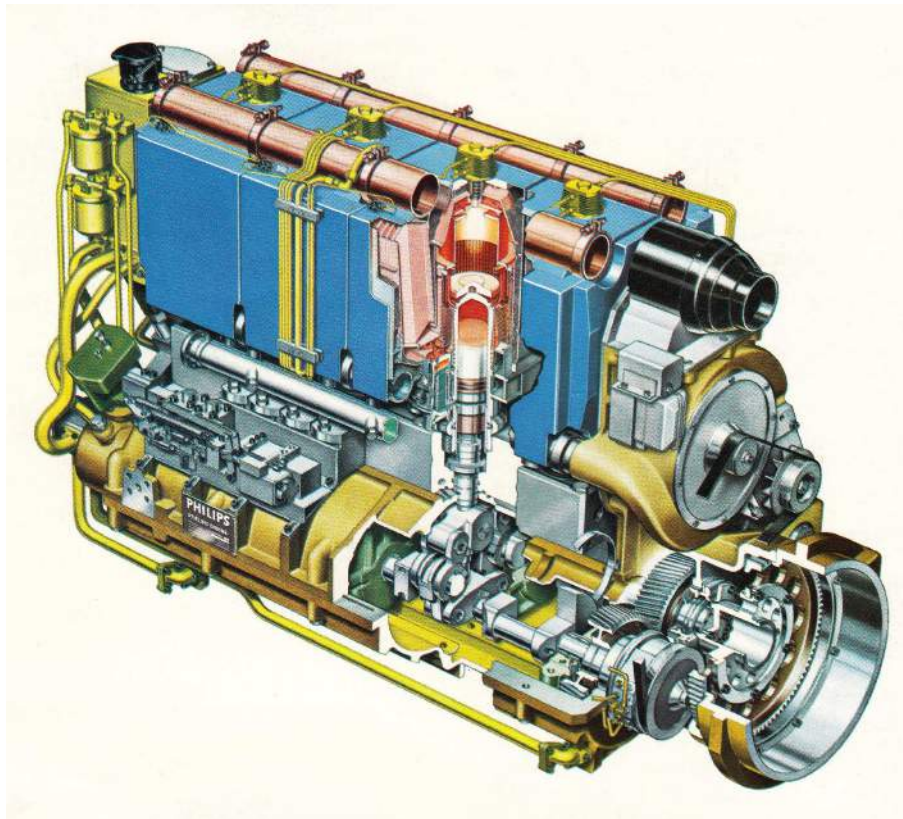


FIGURE 6.36 – Moteur Philips 4-235 [80]

6.8 Développements sous licence Philips et autres

- Le moteur à pistons libres : les ingénieurs travaillant sur le moteur Stirling cherchèrent très rapidement à s'affranchir des systèmes mécaniques reliant les pistons entre eux, système bielle-manivelle, système rhomboïdal, plateau tournant...

Le but recherché était de provoquer le déplacement des différentes pièces constitutives d'un moteur par un système de masses et ressorts.

Le premier à atteindre de façon concrète ce but fut William Beale. Ce ne fut pas sans phase de découragement. Andy Ross rapporte dans son ouvrage [85] que William Beale, excédé de ne pas réussir à faire fonctionner son moteur à pistons libres, confia ce dernier à un étudiant fraîchement arrivé dans son université de Ohio. William Beale passa un week-end loin de ses soucis universitaires. En rentrant et croisant l'étudiant en question, il lui demanda s'il avait réussi à apporter les quelques modifications suggérées avant le week-end et si le moteur fonctionnait. Il lui fut répondu « C'est sûr, ce n'est pas le meilleur moteur du monde mais il fonctionne tranquillement ». Si William Beale peut être considéré comme l'un des inventeurs du moteur à pistons libres, on ne peut pas dire qu'il est le premier à l'avoir fait fonctionner !

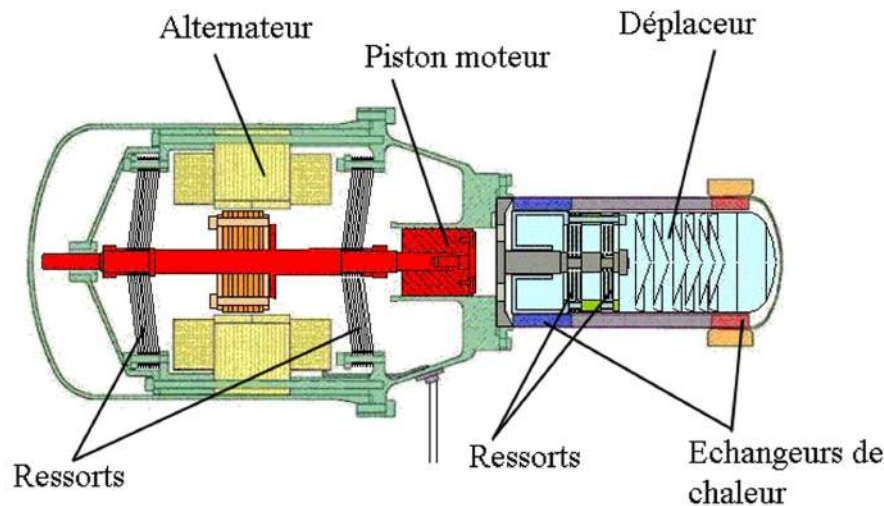


FIGURE 6.37 – Moteur Stirling à pistons libres développé par la NASA

On peut voir ci-dessus une configuration de moteur Stirling à pistons libres. Le moteur proprement dit se situe à droite. À gauche, on voit l'alternateur linéaire produisant l'électricité. Comme on peut s'en rendre compte, ce groupe moteur-alternateur est parfaitement étanche. Le gaz de travail est parfaitement emprisonné.

- moteur automobile pour la Ford Torino : tout comme General Motors, Ford participa à l'élaboration, en liaison avec Philips, d'un moteur à installer dans une voiture automobile, une Ford Torino en l'occurrence. À la fin des années 1960, Philips mis au point un remarquable moteur le 4-65 DA à plateau tournant (voir le chapitre consacré à la cinématique des moteurs page 171, § 22). Impressionnés par ce moteur qui correspondait à leurs attentes (encombrement, rapport poids-puissance, performances, émissions faibles de polluants, silence), les ingénieurs de Ford décidèrent, en 1971, de fabriquer un moteur reprenant ses caractéristiques principales mais en améliorant sa puissance.

Ainsi naquit le moteur 4-215 DA : un moteur 4 cylindres double-effet ayant de l'hydrogène à 185 fois la pression atmosphérique comme gaz de travail, une puissance disponible pour la traction de 127 kW à 4000 tr/mn et un couple de 428 Nm à 1350 tr/mn. Les variations de puissance pouvaient être très rapides en maintenant la température chaude constante mais en jouant sur l'admission de l'air et le débit de combustible et en faisant varier la pression de fonctionnement du moteur.

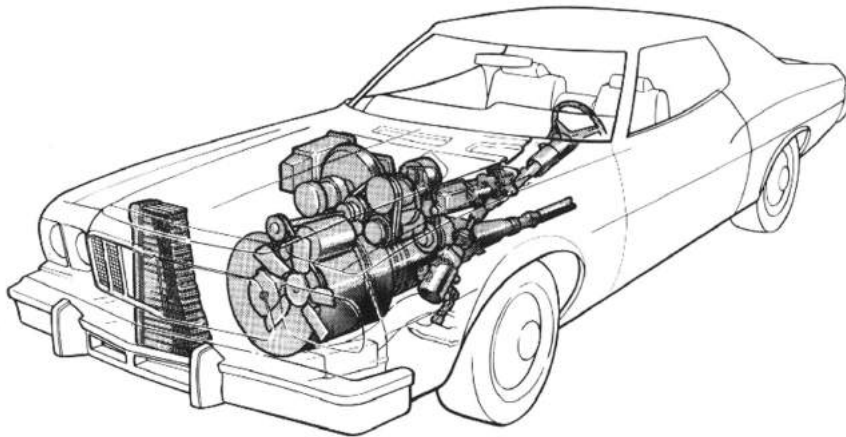


FIGURE 6.38 – Ford Torino équipée d'un moteur Stirling 4-215 DA

La présentation de la Ford Torino équipée d'un moteur Stirling eut lieu en avril 1976 devant la presse et les managers de Ford. Malheureusement, pour des raisons stratégiques, l'expérience en resta là après que les managers de Ford décidèrent, en 1978, de tout arrêter.

Ce choix fut probablement la raison principale pour laquelle la société Philips décida de stopper ses travaux sur le moteur Stirling en 1979.

6.9 United Stirling

- United Stirling, entreprise suédoise construisit un moteur Stirling à pistons double-effet et un système bielle-vilebrequin classique : le V4X [91]. Ce moteur quatre cylindres développait une puissance de 30 à 40 kW à 4500 tr/mn. Son rendement était de 30% et le gaz de travail choisi était l'hydrogène. Tout au long des années 1970, La mise au point de ce moteur, au-delà de sa conception générale, nécessita d'importants travaux de recherches afin de disposer d'équipements connexes les plus performants : échangeurs de chaleur chaud et froid, étanchéité, brûleur, contrôle de la puissance...

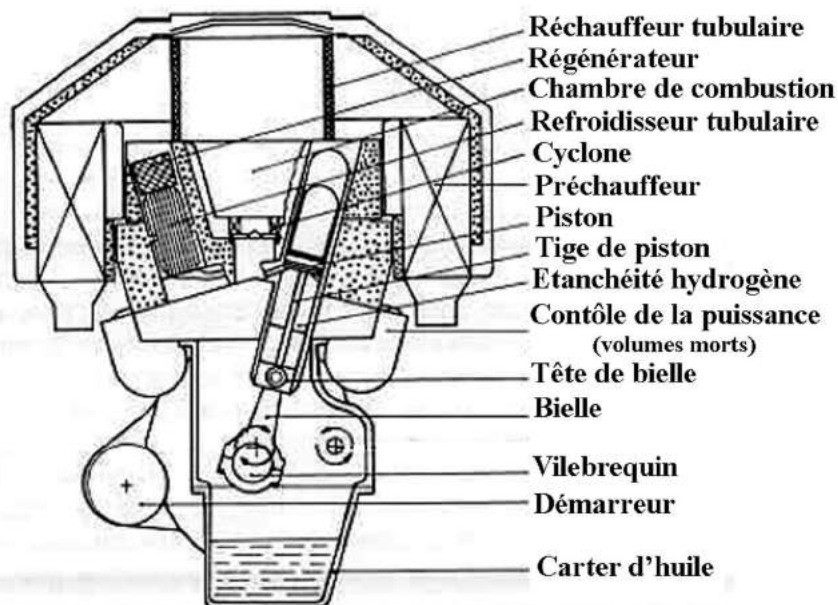


FIGURE 6.39 – Moteur V4X de United Stirling

La conception de ce moteur permit de diminuer par deux le rapport poids-puissance par rapport à un moteur à embiellage rhomboïdal. Pour une même puissance, le poids était divisé par deux mais, tout aussi intéressant, le prix de ce moteur en était aussi diminué. Nous avons vu que le coût du moteur à embiellage

rhomboïdal fut excessif pour envisager de l'installer sur un bus. Avec le moteur V4X, l'objectif était de renverser la donne.

Ce type de moteur fut installé dans une Ford Pinto puis dans une Ford Taunus. Techniquement, la réussite fut incontestable.

Trois modèles de puissances différentes furent construits : le P40, le P75 et le P150. Les chiffres correspondent à leur puissance exprimée en kW.

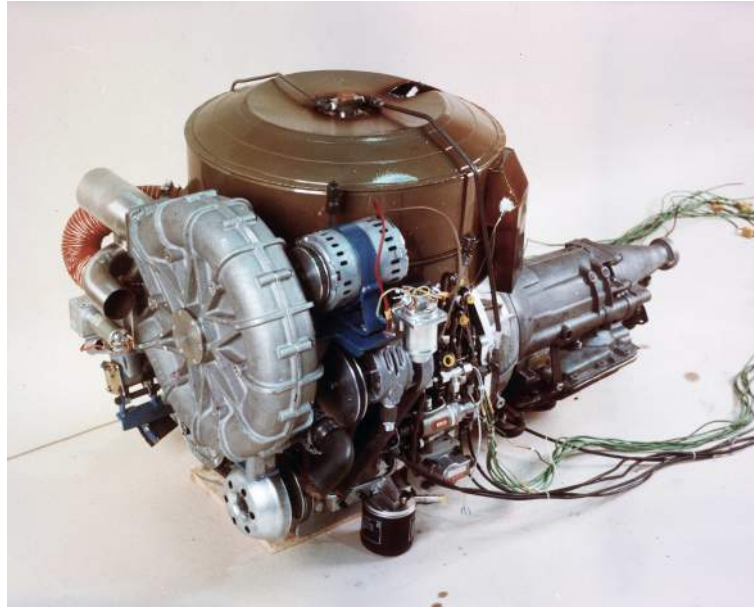


FIGURE 6.40 – Moteur P40 [13]

Les espoirs d'une production en grande série de ce type de moteur ne se concrétisèrent pas. Cependant, des accords furent passés entre United Stirling et des sociétés américaines sous la houlette du Département de l'Énergie US. La NASA se montra très intéressée par le développement du P40 qui lui servit de base pour le programme ASE (Automotive Stirling Engine) que nous allons étudier page 88, au chapitre 6.10. Ce moteur P40, après les chocs pétroliers des années 1970, fut monté à bord d'une AMC Spirit et d'une AMC Concord. Là encore, le pari technique fut réussi mais il n'y eut pas de lendemain. Les raisons en furent probablement le coût, pourtant intéressant sur la durée de vie du véhicule, et l'impact sur la structure de production automobile.



FIGURE 6.41 – AMC Siprit équipée d'un moteur Stirling

- United Stirling développa également, au cours des années 1980, un moteur Stirling AIP (Air Independent Propulsion).

Ce moteur de 75 kW a pour gaz de travail de l'hélium à 130 fois la pression atmosphérique. Sa vitesse de rotation nominale est de 2400 tr/mn. La combustion est réalisée à 22 fois la pression atmosphérique à partir de fuel et d'oxygène stocké à l'état liquide.

Ce moteur équipa, dès 1988, des sous-marins militaires suédois. C'est toujours le cas aujourd'hui. La société Kockums située à Malmö, après avoir absorbé United Stirling, propose de convertir des sous-marins à propulsion classique en remplaçant leurs moteurs par des moteurs Stirling de type AIP. Ceci ne concerne pas uniquement les navires militaires suédois mais également les sous-marins japonais par le biais d'une collaboration avec le groupe Kawasaki.

Ce type d'installation permet de prolonger de quelques heures ou jours à plusieurs semaines l'autonomie en plongée des sous-marins qui sont ainsi équipés. Les moteurs Stirling sont incomparablement plus silencieux que les moteurs traditionnels Diesel. L'équipement ne grève pas le budget du bâtiment qu'il soit en construction ou en rénovation. Il est nettement moins cher qu'une chaudière nucléaire installée à bord, moins complexe, tout en ne posant pas de problème de sûreté insurmontable vis-à-vis de l'environnement. Cependant, il semblerait que le futur de la propulsion des sous-marins soit dans l'utilisation de pile à combustible et d'hydrures métalliques aptes à stocker en grande quantité de l'hydrogène sous un faible volume [7]. Pour savoir si le moteur Stirling a toujours un avenir dans ce domaine, il nous faut attendre la stratégie que choisira Saab qui vient de racheter la société Kockums.

Le moteur AIP de Kockums a également équipé le sous-marin d'exploration sous-marine SAGA construit par Ifremer et Comex. Cet équipement est d'un tel intérêt qu'il fait l'objet d'une annexe à ce livre, page 219, annexe E.

6.10 Programme ASE (Automotive Stirling Engine)

Les chocs pétroliers survenus au cours des années 1970 incitèrent le gouvernement nord-américain à bâtir un programme de recherches sur de nouveaux moteurs pour équiper les automobiles. Préservation des sources d'énergie et protection de l'environnement sur le long terme en étaient les buts principaux.

Ces nouveaux moteurs devaient être produits en grandes séries et à un prix raisonnable.

Ce programme était piloté par le Secrétariat à l'énergie avec pour acteurs principaux le MTI (Mechanical Technology Incorporated) et la NASA (National Aeronautics and Spatial Administration). Les objectifs principaux fixés à ces deux entités étaient de transférer le savoir technologique européen vers les États Unis et de concevoir une automobile équipée d'un moteur Stirling. Le modèle représentatif du parc automobile américain à cette période était la Ford Celebrity.

D'énormes progrès ont été réalisés dans ce cadre durant la période 1978-1987. Pour s'en convaincre, il suffit de regarder les tableaux suivants. Ils démontrent de façon incontestable que la motorisation Stirling est parfaitement adaptée à une automobile.

	1978	1986
Rapport masse-puissance	8,52 kg/kW	3,35 kg/kW
Prix de fabrication*	5000 \$	1200 \$
Accélération 0→100 km/h**	36 s	12,4 s
Consommation	12,3 litres aux 100km	5,7 litres aux 100 km
Durée de vie des joints	100 heures	2000 heures
* pour 300 000 unités par an		
** Masse de 1417 kg		

FIGURE 6.42 – Évolutions des performances du moteur Stirling de 1978 à 1986 [77]

Ce tableau illustre les efforts accomplis en sachant que le moteur de base était le P40 de United Stirling, voir plus haut (page 87, § 6.9). Pour vraiment apprécier les résultats, il faut comparer maintenant les caractéristiques du moteur à combustion interne installé initialement sur la Ford Celebrity et le moteur Stirling de remplacement.

Chevrolet Celebrity	Combustion interne	Moteur Stirling
Type de moteur	4 cylindres en ligne	V4
Cylindrée	2,5 l	0,5 l
Puissance	69 kW à 4800 tr/mn	62 kW à 4000 tr/mn
Couple	182 Nm à 2800 tr/mn	212 Nm à 1000 tr/mn
Masse à vide	1252 kg	1297 kg
Consommation moyenne	7,5 l aux 100 km	5,7 l aux 100 km
Accélération 0→100 km/h	13,0 s	12,4 s

FIGURE 6.43 – Comparaison motorisation à combustion interne et moteur Stirling [77]

Pour être totalement juste, on se doit de signaler un petit inconvénient intrinsèque au moteur Stirling à savoir le temps nécessaire à son démarrage et la surconsommation de carburant associée (125 g).

Le bilan du programme ASE fut très positif au vu des résultats apparaissant dans les tableaux ci-dessus. Mais ce n'est pas tout. Les rejets d'oxydes de carbone ou d'azote étaient nettement inférieurs avec un moteur Stirling qu'avec un moteur à combustion interne. Le moteur Stirling était capable d'utiliser un large éventail de combustibles. L'objectif de transfert de technologie de l'Europe vers les États Unis était plus qu'atteint car ces derniers devenaient les leaders dans le domaine. [50]

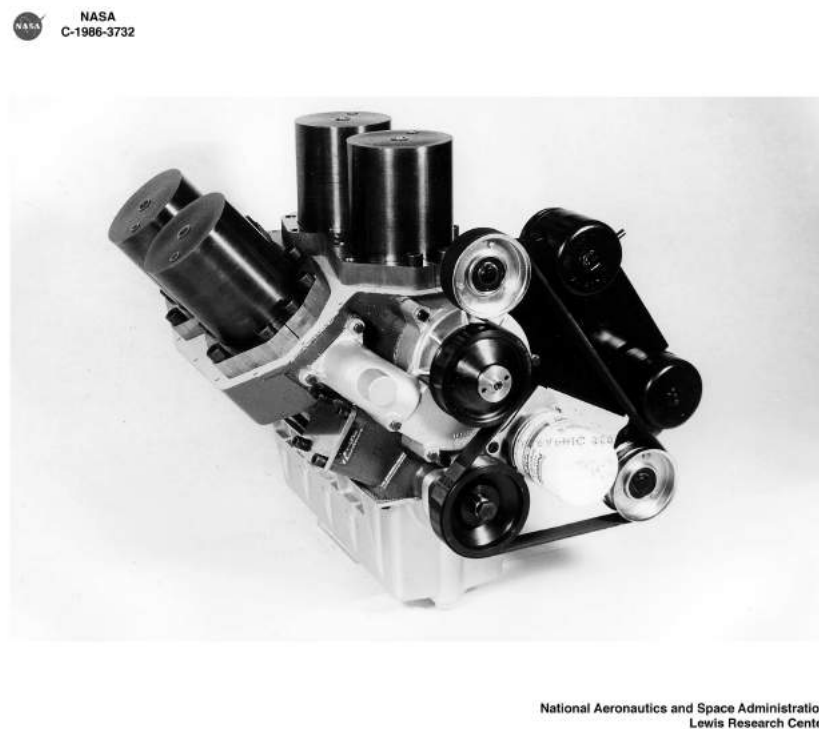


FIGURE 6.44 – Mod II développé par la NASA [9]

Comme quoi, quand une volonté politique est bien affirmée et accompagnée des moyens nécessaires, on peut parfois inverser le cours de l'histoire. Cependant, dans ce cas particulier, comme le montre la figure page suivante, la disparition des craintes sur les cours à venir du pétrole, dès 1986, a annihilé les bons sentiments des politiques en terme de réduction de la consommation d'énergie primaire et de protection de l'environnement ...



FIGURE 6.45 – Programme ASE et cours du pétrole[2]

Les réticences à modifier le tissu industriel en place font qu'aujourd'hui, même si on est en droit de s'interroger en regardant la courbe ci-dessus, les moteurs à combustion interne et plus particulièrement le Diesel sont toujours les maîtres absolus en automobile malgré les alertes lancées par d'éminents organismes internationaux :

« Les données scientifiques étaient sans appel et la conclusion du Groupe de Travail, unanime : les gaz d'échappement des moteurs Diesel provoquent le cancer du poumon chez l'homme » a déclaré en juin 2012 le Dr Christopher Portier, Président du Groupe de Travail du CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer - Organisation Mondiale de la Santé), Directeur du « National Center for Environmental Health » et de « l'Agency for Toxic Substances and Disease Control and Prevention » (USA).

« Étant donné l'impact supplémentaire des particules émises par les moteurs Diesel sur la santé, l'exposition à ce mélange de produits chimiques devrait être réduit à travers le monde », a-t-il ajouté.[59]

6.11 Le XXI^{ème} siècle et le moteur Stirling

L'aventure du moteur Stirling continue au cours du siècle actuel. De nombreuses études et développements sont en cours. Nous les verrons plus particulièrement et dans le détail dans le chapitre consacré aux applications actuelles, page 123, § IV.

Troisième partie

Description des moteurs à air chaud

*Je ne sais pas pourquoi l'on confond ces deux mots :
le bon sens et le sens commun.
Il n'y a rien de moins commun
que le bon sens.[69]*

Nicolas Léonard Sadi CARNOT (1796-1832))

Chapitre 7

Les principes de fonctionnement du moteur Stirling

Dans ce qui va suivre, nous allons examiner les 4 phases du cycle d'un moteur Stirling :

- un chauffage isochore (à volume constant)
- une détente isotherme (à température constante)
- un refroidissement isochore (à volume constant)
- une compression isotherme (à température constante).

Pour cela, nous nous servirons d'un moteur élémentaire constitué d'un cylindre, en partie transparent, et d'un piston mobile au sein du cylindre. Difficile de faire plus simple !

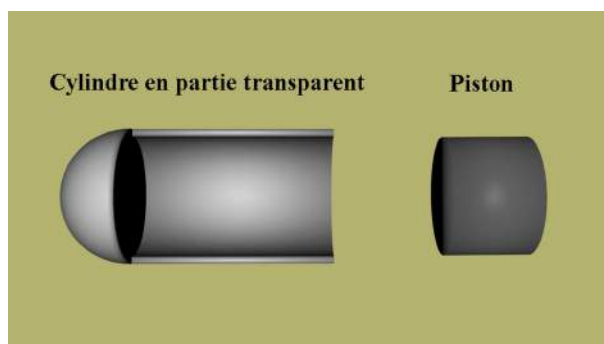


FIGURE 7.1 – Moteur Stirling élémentaire[38]

7.1 Chauffage isochore (à volume constant)

Le brûleur (la source chaude) cède de l'énergie thermique. On imagine aisément, à l'instar d'une cocotte-minute avant l'ouverture de la soupape de sécurité, que la pression et la température du gaz augmentent durant cette phase alors que son volume reste constant.

Nous examinerons ce comportement de l'air ou du gaz emprisonné de façon plus rigoureuse et détaillée dans le chapitre théorie (voir 161, § 20)



FIGURE 7.2 – Chauffage isochore

7.2 Détente isotherme (à température 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 la plus grande possible, on continue de maintenir le gaz à sa température maximale, sans cela il aurait tendance à se refroidir au cours de cette détente et le travail récupéré serait moindre.



FIGURE 7.3 – Détente isotherme

7.3 Refroidissement isochore (à volume constant)

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

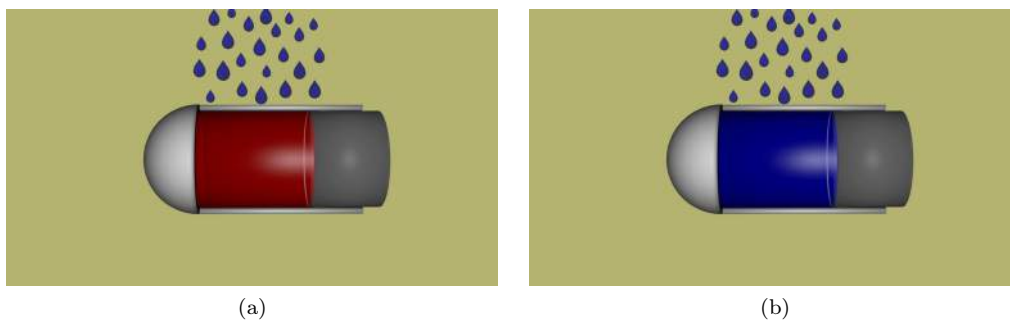


FIGURE 7.4 – Refroidissement isochore

7.4 Compression isotherme (à température constante)

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. On continue de refroidir pour maintenir le gaz à sa température minimale, sans cela il aurait tendance à s'échauffer au cours de cette compression. On revient ainsi aux conditions dans lesquelles a commencé le cycle au § 7.1.

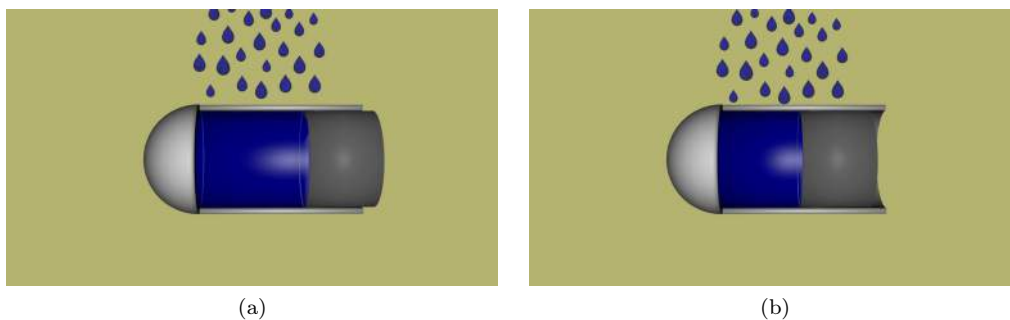


FIGURE 7.5 – Compression isotherme

7.5 Synthèse énergétique

Comme nous venons de le voir :

- nous avons récupéré de l'énergie au cours de la détente isotherme. C'est l'objectif de tout moteur thermique : transformer calories en énergie mécanique.
- par contre, il nous a fallu fournir de l'énergie à notre moteur au cours de la compression isotherme. Rien n'est parfait...
- qu'on se rassure, et c'est ce qu'on pressentait, le bilan nous est favorable. Au cours de chaque cycle, nous récupérerons plus d'énergie mécanique qu'il est nécessaire d'en fournir. Dans la partie théorique, § 21, page 167, pour ceux qui le veulent, on verra que ce bilan énergétique est d'autant meilleur que l'écart entre température minimale et température maximale est grand.

Avec un grand écart entre ces températures, on obtiendra plus d'énergie, ce qu'on sent bien, mais le moteur sera plus efficace, aura un meilleur rendement. Pour une même quantité de calories fournies au cours du chauffage isochore et de la détente isothermique, l'énergie mécanique récupérée sera d'autant plus grande que l'écart de température entre source chaude et source froide sera grand. Ceci découle des réflexions de Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), voir page 213, annexe B. [41]

7.6 Diagramme Pression-Volume ou diagramme PV

Il est pratique de représenter ces 4 phases de fonctionnement sous la forme d'un diagramme avec les valeurs de pression en ordonnées et les valeurs de volume en abscisse. On obtient alors ceci :

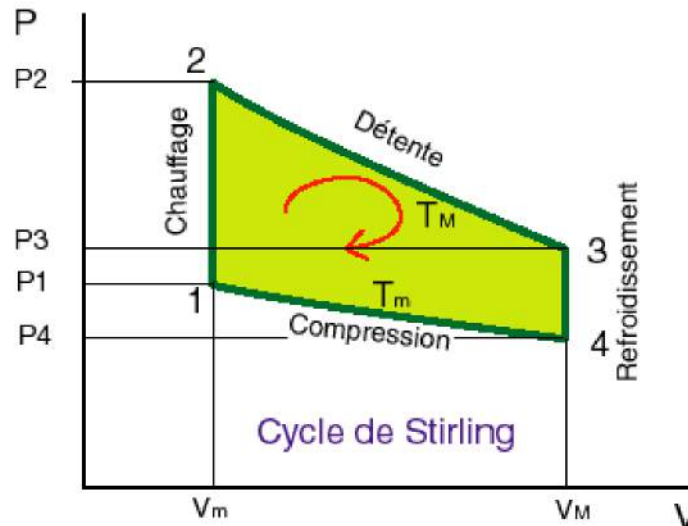


FIGURE 7.6 – Diagramme Pression-Volume d'un cycle de Stirling

Dans la réalité, les dispositions constructives imaginées, même les meilleures, arrivent difficilement à obtenir un diagramme PV aussi pur. Nous le verrons quand nous passerons en revue ci-après les différents types de moteurs Stirling.

Dans la partie théorie, nous verrons que la surface contenue dans ce diagramme, verte ici, est directement proportionnelle au travail effectué au cours d'un cycle.

Chapitre 8

Les différents types de moteurs Stirling

Nous venons d'examiner le principe du moteur Stirling à partir d'une configuration très élémentaire de celui-ci. Pas besoin d'être un bricoleur de génie pour s'apercevoir qu'une telle conception n'est pas viable. Difficile de manier avec rapidité un chalumeau pour le remplacer par un jet d'eau, ce dernier lui-même remplacé à son tour par le chalumeau et ainsi de suite.... Quand bien même nous aurions la dextérité de réaliser ces acrobaties, les chocs thermiques successifs subis par le moteur feraient qu'il casserait très vite. Le génie des hommes est heureusement passé par là ! On peut désormais rencontrer différentes configurations de moteurs Stirling. C'est ce que nous allons voir ci-dessous.

Dans un premier temps, nous allons « inventer » un nouveau moteur semblable à celui que nous venons de voir mais comportant un artifice intéressant : le déplaceur. Ce moteur restera malgré tout très théorique car nous ferons abstraction du pilotage de ces éléments mobiles.

Ensuite, nous étudierons des modèles plus concrets : le moteur alpha, le moteur bêta, le moteur gamma avant d'examiner encore d'autres modèles. À partir de ce moment là, il paraîtra évident qu'on ne respecte pas à 100% le cycle de Stirling même si on ne s'en écarte pas significativement. Nous passerons alors d'un moteur théorique à des moteurs réels ou, autrement dit, de la théorie à la pratique.

La classification utilisée (alpha, bêta...) n'est pas exempte de critique mais nous allons nous y conformer car elle est très usitée et présente le grand intérêt, au cours d'une discussion, de parler de la même chose sans ambiguïté.

8.1 Le déplaceur

Comme nous l'avons déjà dit précédemment, la réalisation d'un moteur tel que celui décrit au chapitre 7, page 93, poserait des difficultés : allumer le brûleur, l'éteindre, asperger puis arrêter le refroidissement en créant des chocs thermiques successifs....

Nous allons cependant reprendre cette configuration en introduisant 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. Un schéma valant mieux qu'un long discours, voir ci-dessous.

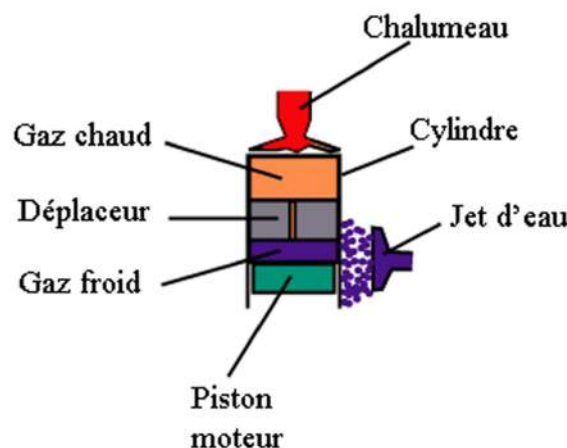


FIGURE 8.1 – Moteur et ses différents constituants

Nous découvrons, sur le schéma précédent, le déplaceur qui navigue entre le piston moteur et le haut du cylindre. Lorsqu'il monte, le gaz est chassé en partie basse car il passe par le trou central prévu dans le déplaceur. Il est ainsi refroidi.

À l'inverse, quand le déplaceur se rapproche du piston moteur, le gaz est expulsé en partie haute près du chalumeau. Il est alors réchauffé.

À partir de ce principe, nous allons examiner ci-dessous les quatre phases du cycle de Stirling.

8.1.1 Chauffage isochore ou à volume constant

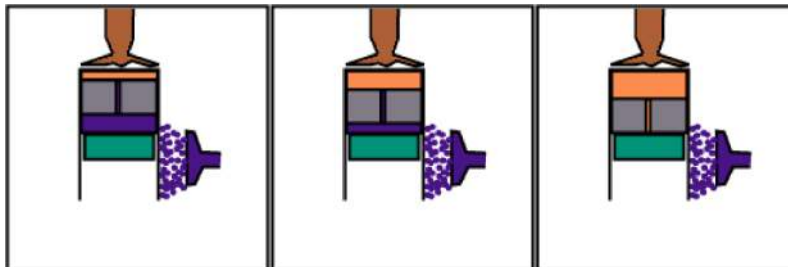


FIGURE 8.2 – Chauffage isochore - Moteur théorique

Le piston moteur est immobile. Le volume du gaz ne change donc pas.

Le déplaceur descend ce qui a pour effet de faire passer le gaz en partie haute où il se réchauffe.

8.1.2 Détente isotherme ou à température constante

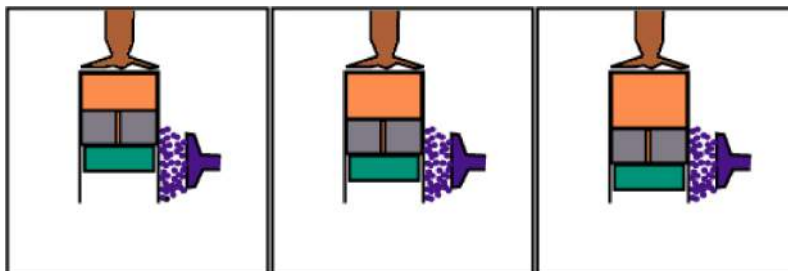


FIGURE 8.3 – Détente isotherme - Moteur théorique

Le déplaceur est arrivé au contact du piston moteur. Ils descendent ensemble ce qui permet au gaz de se détendre à température constante.

8.1.3 Refroidissement isochore ou à volume constant

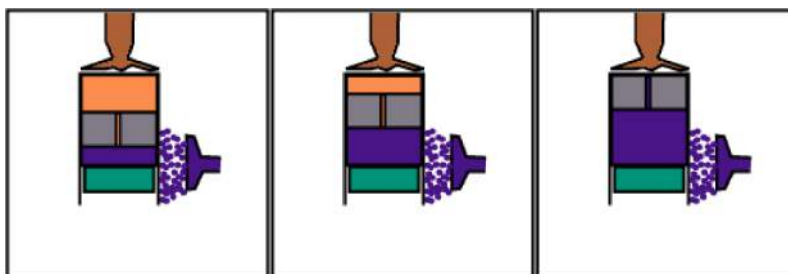


FIGURE 8.4 – Refroidissement isochore - Moteur théorique

Le piston moteur reste immobile en partie basse. Le déplaceur remonte. De ce fait, le gaz est refroidi, à volume constant, en partie basse.

8.1.4 Compression isotherme ou à température constante

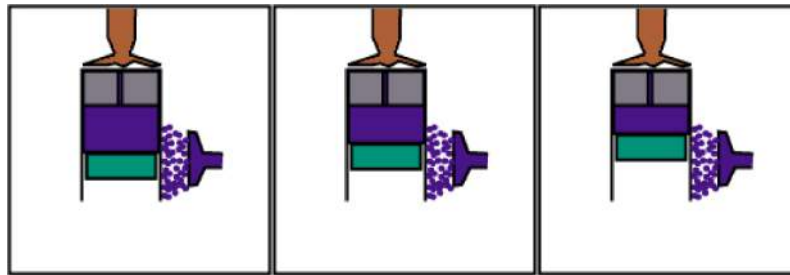


FIGURE 8.5 – Compression isotherme - Moteur théorique

Le déplaceur reste en partie haute. Le gaz est maintenu à sa température froide. Cependant, le piston moteur remontant, le gaz est comprimé.

8.1.5 Variations de volume

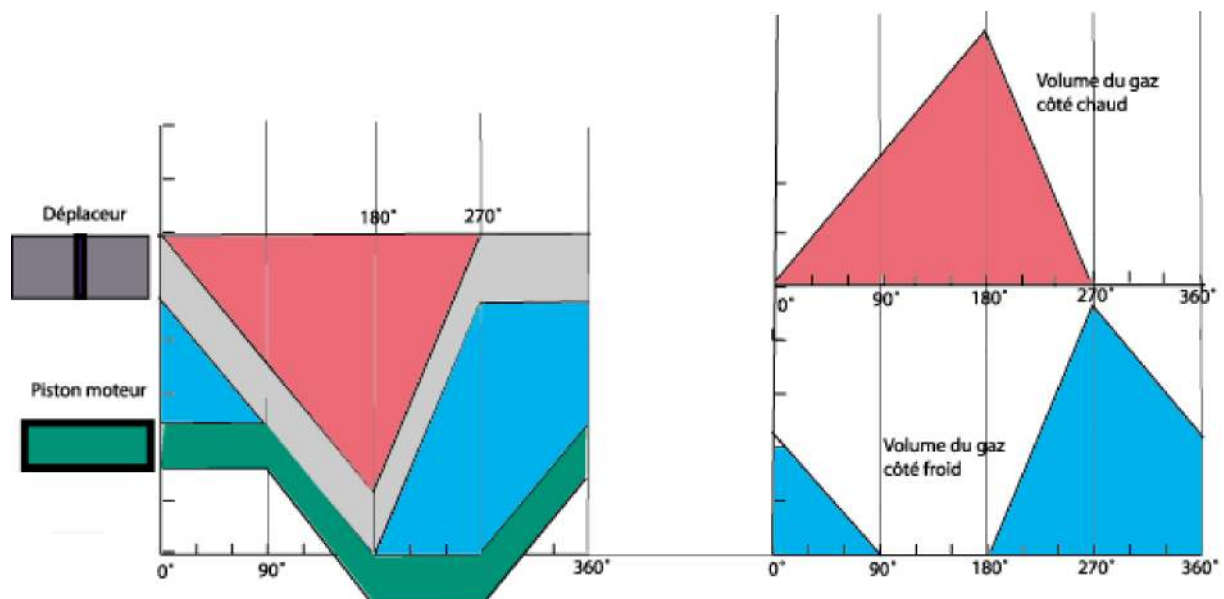


FIGURE 8.6 – Variations de volume théoriques d'un moteur théorique

Pour tracer ces diagrammes, on imagine un arbre d'entraînement qui impose, au cours de sa rotation, le déplacement du piston moteur et celui du déplaceur.

Les variations de volume, en fonction de l'angle de rotation de l'arbre, sont très théoriques car on suppose des déplacements linéaires du déplaceur comme du piston moteur ce qui est impossible à réaliser dans la pratique.

À chaque phase, on peut estimer le volume de gaz chaud, en rouge, et le volume de gaz froid en bleu.

Connaissant les valeurs des températures, chaude et froide, on peut tracer le diagramme Pression-Volume ou diagramme PV. C'est ce que nous allons voir ci-après.

8.1.6 Diagramme Pression - Volume

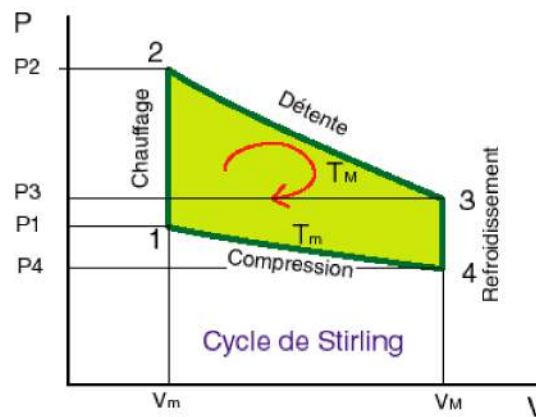


FIGURE 8.7 – Diagramme Pression - Température d'un moteur théorique

Avec ce moteur, encore une fois très théorique, nous obtenons un diagramme parfait. En effet, les déplacements du piston moteur et du déplaceur se sont réalisés selon notre stricte convenance.

Dans la réalité, il est impossible d'effectuer une cinématique des éléments mobiles aussi pure. Nous aurons l'occasion d'aborder les différents moyens utilisés pour approcher le cycle théorique, sans y arriver totalement, comme le système bielle-manivelle, l'embigliamento rhomboïdal... au chapitre 22, page 171.

Comme nous le verrons très bientôt, ce moteur théorique peut être qualifié de moteur de type bêta.

8.2 Le moteur alpha

Dans cette configuration, on découpe physiquement la fonction chauffe de la fonction refroidissement en leur attribuant à chacune un cylindre. On se retrouve donc avec un moteur bicylindre tel que représenté ci-dessous.

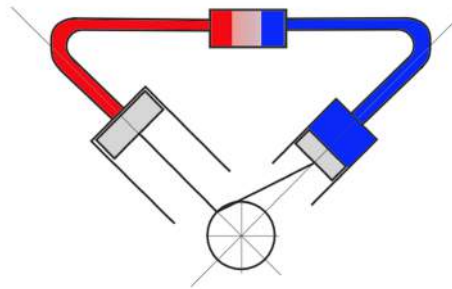


FIGURE 8.8 – Description du moteur Stirling type alpha

Comme on peut le deviner en regardant ce schéma, on dispose d'un ensemble cylindre-piston où le gaz va être refroidi et d'un deuxième ensemble cylindre-piston où le gaz va au contraire se réchauffer.

On aperçoit également un dispositif situé entre la partie chaude et la partie froide. C'est le régénérateur dont on démontrera plus loin l'intérêt. Il permet en effet un meilleur rendement du moteur en économisant des calories.

Les deux pistons sont reliés par un système bielle-manivelle à un même arbre d'entraînement. On peut voir que le piston côté source chaude a une avance de 90° par rapport au piston côté source froide. Par exemple, il sera à son point le plus haut avant le piston situé côté froid. Ce dernier devra attendre que l'arbre tourne de 90° pour être dans la même position haute.

Ce décalage est voulu pour que le cycle réel soit le plus proche du cycle théorique exposé ci-dessus page 93, chapitre 7.

Nous allons maintenant étudier les quatre phases de fonctionnement de ce moteur.

8.2.1 Chauffage isochore ou à volume constant

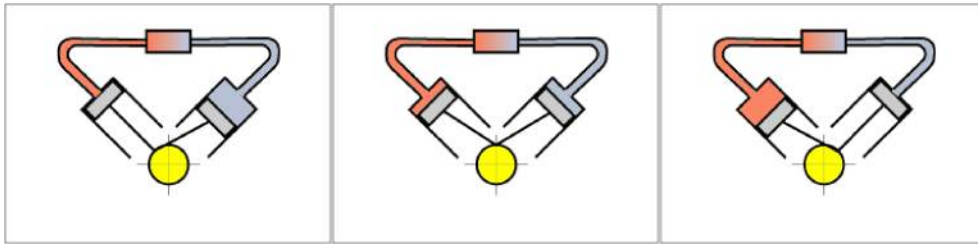


FIGURE 8.9 – Chauffage isochore - Moteur alpha

Le gaz arrive dans le cylindre chaud en provenance du cylindre froid, il se réchauffe. Ceci se fait à volume (à peu près) constant au cours de cette phase. Le cycle réel ne pouvant « coller » parfaitement au cycle théorique.

8.2.2 Détente isotherme ou à température constante

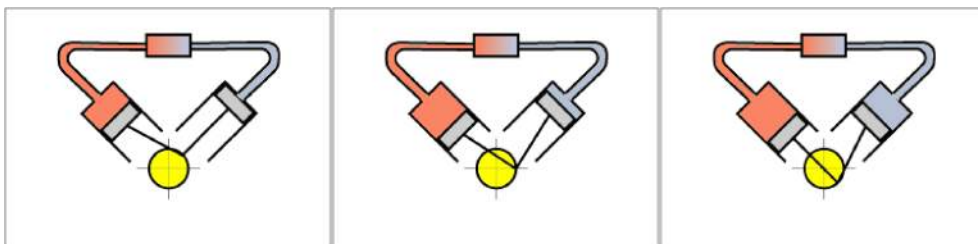


FIGURE 8.10 – Détente isotherme - Moteur alpha

Au cours de la détente, les deux pistons descendent et on récupère ainsi de l'énergie mécanique. La température reste (à peu près) constante au cours de cette phase. Là aussi, comme précédemment, on essaie d'approcher au mieux le cycle théorique sans y parvenir totalement.

8.2.3 Refroidissement isochore ou à volume constant

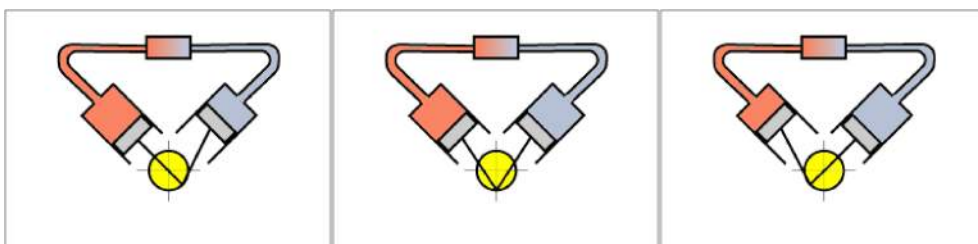


FIGURE 8.11 – Refroidissement isochore - Moteur alpha

Le gaz passe du cylindre chaud au cylindre froid pour y être refroidi. Ceci se fait à volume (à peu près) constant au cours de cette phase. Là encore, le cycle réel ne pouvant « coller » parfaitement au cycle théorique.

8.2.4 Compression isotherme ou à température constante

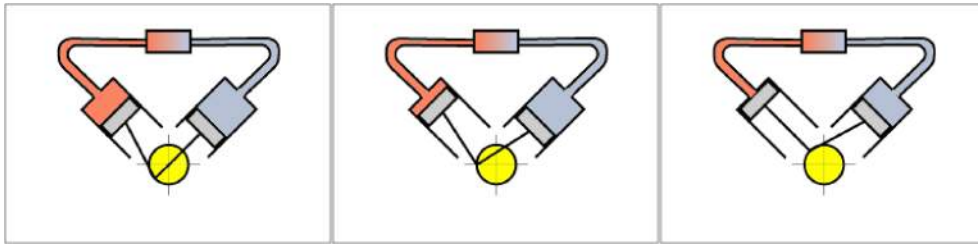


FIGURE 8.12 – Compression isotherme - Moteur alpha

Au cours de la compression, les deux pistons remontent. Il faut fournir de l'énergie mécanique à l'ensemble. La température reste (à peu près) constante au cours de cette phase. Là encore, on essaie d'approcher au mieux le cycle théorique sans y parvenir totalement.

Comme on peut le constater, on retrouve la situation initiale du § 8.2.1

8.2.5 Variations de volume

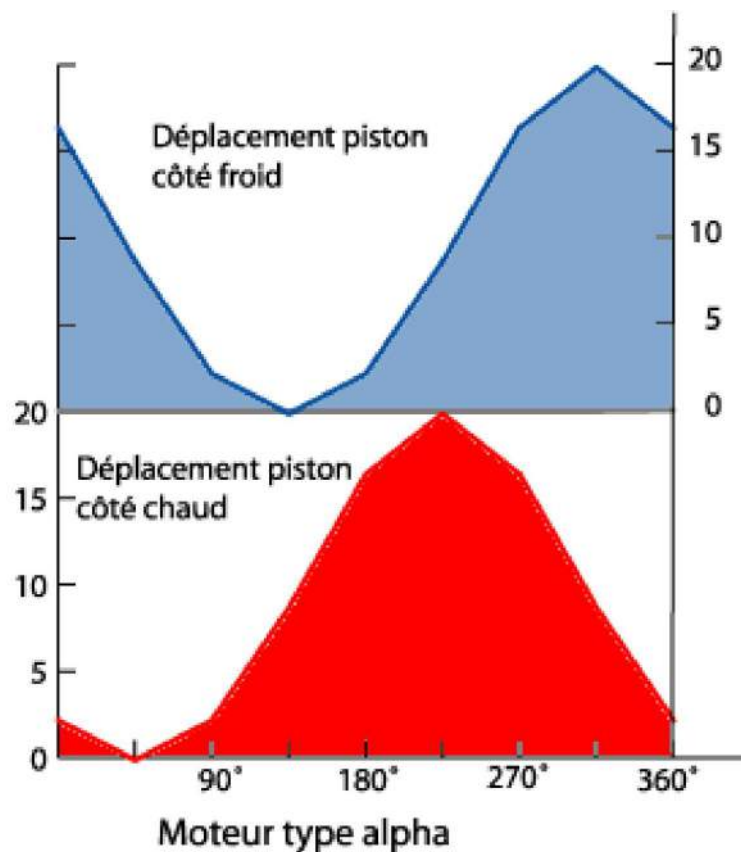


FIGURE 8.13 – Variation de volume - Moteur alpha

Sur le diagramme ci-dessus, on peut examiner les variations de volumes côté froid et côté chaud en fonction de l'angle de rotation de l'arbre. Le 0° étant la situation occupée par les bielles dans l'image centrale relative à la phase compression.

Ci-contre, est représenté le volume total de gaz présent dans le moteur :

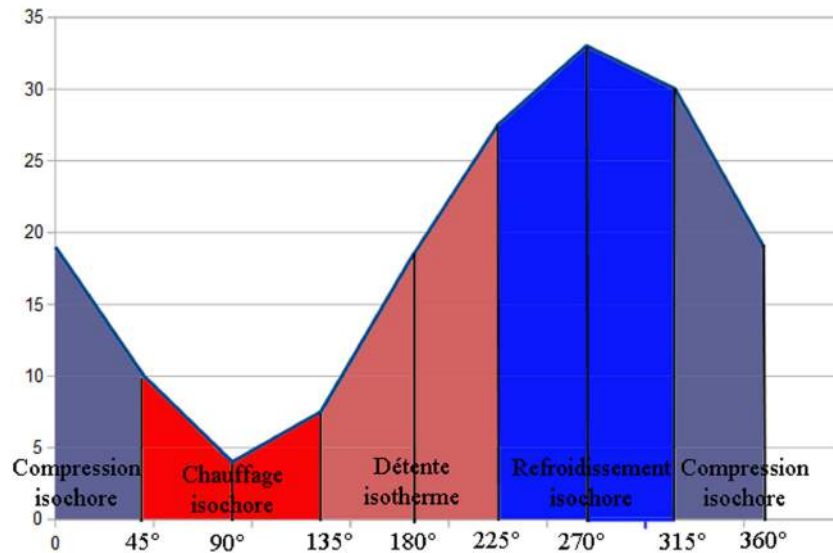


FIGURE 8.14 – Volume total de gaz présent dans le moteur alpha

Tout compte fait, avec un peu d'indulgence, on peut considérer que le chauffage et le refroidissement ne sont pas loin de se faire à volume constant ou d'être isochore.

8.2.6 Diagramme Pression - Volume

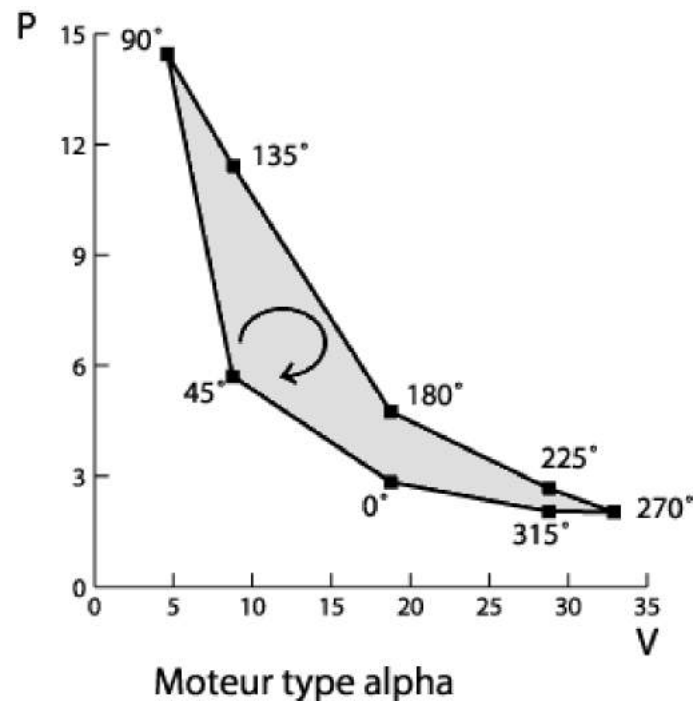


FIGURE 8.15 – Diagramme Pression-Volume d'un moteur alpha

Ce diagramme est caractéristique du moteur alpha décrit ci-dessus.

Les calculs ont été faits avec $T_{Max} = 2 T_{min}$.

Le rendement théorique serait alors de 0,5.

Évidemment, on n'obtient pas un diagramme Pression-Volume aussi pur que celui du cycle théorique présenté page 95. Mais il faut bien nous en contenter.

8.3 Le moteur bêta

Le moteur bêta est similaire au moteur théorique étudié au § 8.1, page 97.

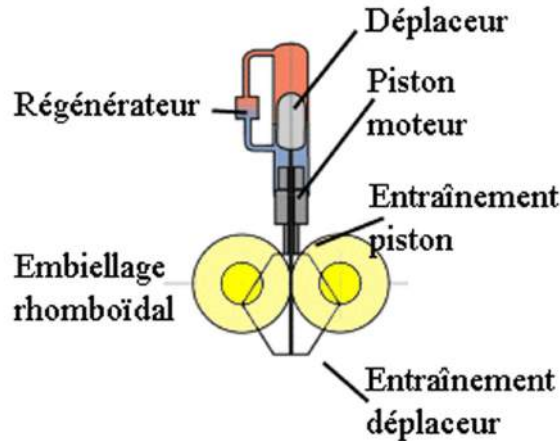


FIGURE 8.16 – Description du moteur Stirling type bêta à embiellage rhomboïdal

Ici, nous avons rajouté le mode de déplacement du piston moteur et du déplaceur. Il s'agit d'un embiellage rhomboïdal (voir sa description plus détaillée page 171, § 22) : le piston moteur est entraîné par la partie horizontale supérieure de cet embiellage alors que le déplaceur est mu par la partie horizontale inférieure de ce même dispositif.

Pour ne pas alourdir le schéma, le dispositif de chauffe, en partie supérieure du cylindre, et le dispositif de refroidissement, en partie basse, ne sont pas représentés.

8.3.1 Chauffage isochore ou à volume constant

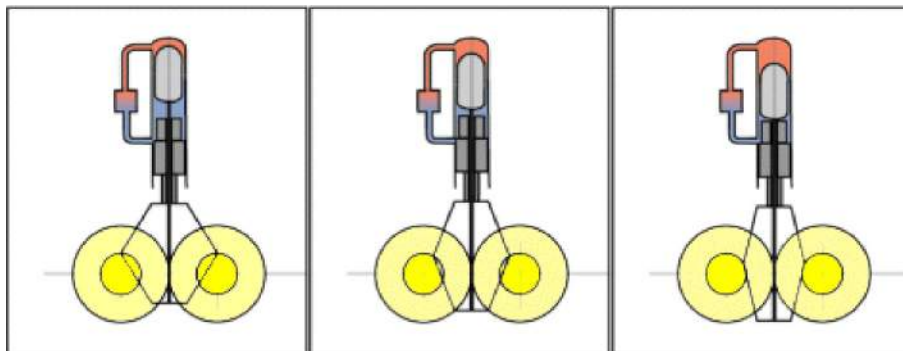


FIGURE 8.17 – Chauffage isochore - Moteur bêta

Le piston moteur ne bouge quasiment pas. Le volume de gaz reste donc pratiquement constant. Par contre, le déplaceur, en descendant, fait passer le gaz de la partie froide vers la partie chaude. Sa température augmente alors.

8.3.2 Détente isotherme ou à température constante

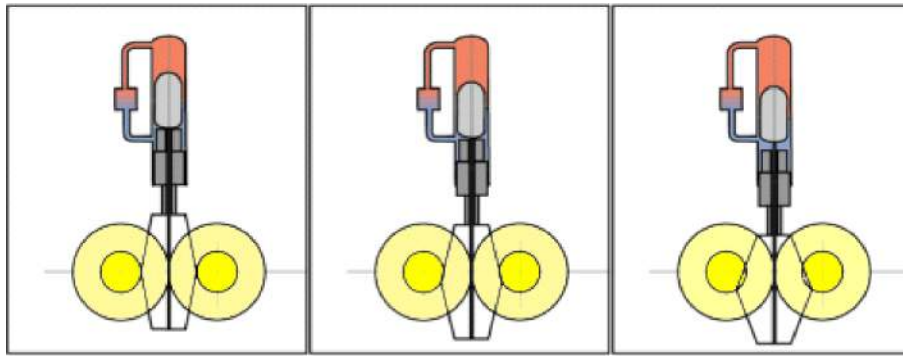


FIGURE 8.18 – Détente isotherme - Moteur bêta

Le déplaceur reste en contact ou presque avec le piston moteur. Le gaz maintient donc sa température mais augmente de volume quand le piston moteur baisse. On a bien une détente du gaz.

8.3.3 Refroidissement isochore ou à volume constant

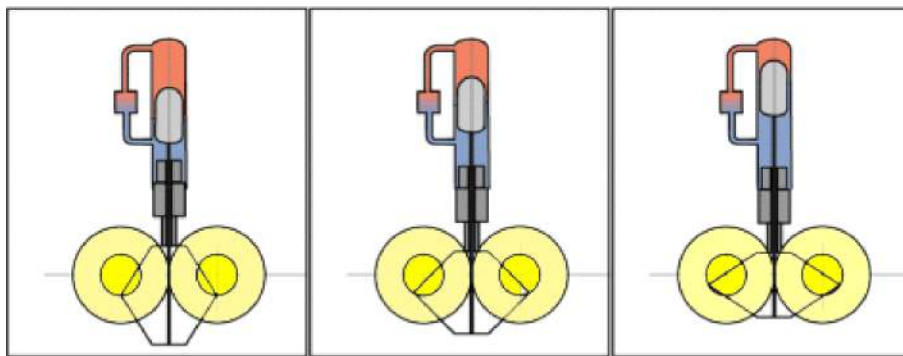


FIGURE 8.19 – Refroidissement isochore - Moteur bêta

Le piston moteur restant en partie basse, le volume du gaz est constant. Par contre, le déplaceur en montant fait passer le gaz de la partie chaude vers la partie froide. Sa température baisse.

8.3.4 Compression isotherme ou à température constante

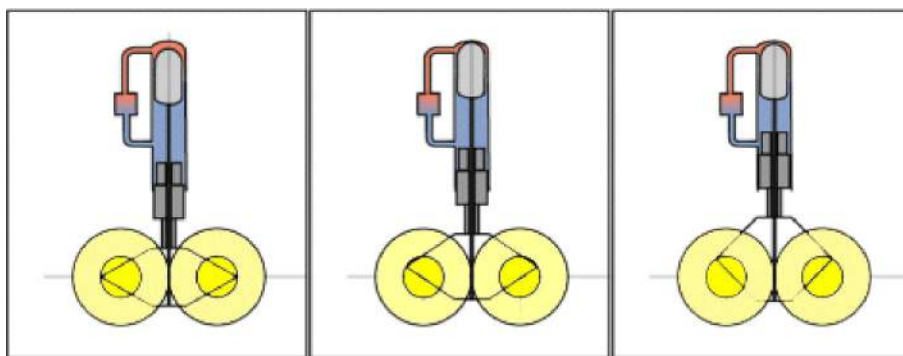


FIGURE 8.20 – Compression isotherme - Moteur bêta

Le déplaceur se maintient ou presque en partie haute. Par conséquent, le gaz reste froid. Le piston moteur, en remontant, comprime le gaz.

8.3.5 Variations de volume

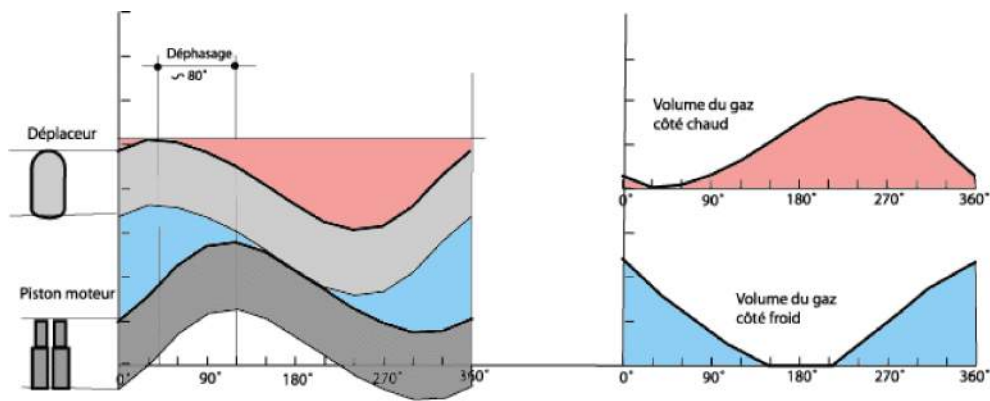


FIGURE 8.21 – Variation de volume - Moteur bêta à embiellage rhomboïdal

Sur le diagramme ci-dessus, on peut voir, en fonction de l'angle de rotation de l'arbre moteur :

- la variation du volume chaud en partie haute au cours du cycle (zone rouge).
- la variation du volume froid en partie basse au cours du cycle (zone bleue).

8.3.6 Diagramme Pression - Volume

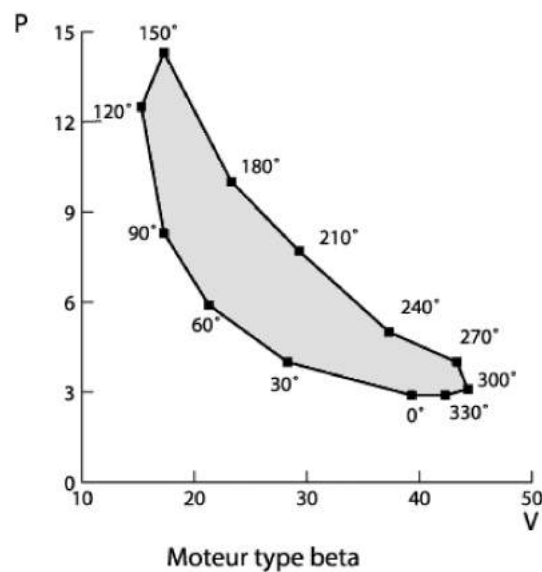


FIGURE 8.22 – Diagramme Pression-Volume d'un moteur bêta à embiellage rhomboïdal

Ce diagramme est caractéristique du moteur décrit ci-dessus. Les calculs ont été faits avec une température de la source chaude égale à deux fois la température de la source froide (températures absolues exprimées en kelvin).

Soit avec $T_{Max} = 2 T_{min}$.

Le rendement théorique serait alors de 0,5.

On peut voir que ce cycle s'éloigne du cycle théorique, bien qu'il lui ressemble encore.

L'important est d'avoir la surface grisée la plus grande possible. Elle est représentative du travail récupéré au cours d'un cycle

8.4 Le moteur gamma

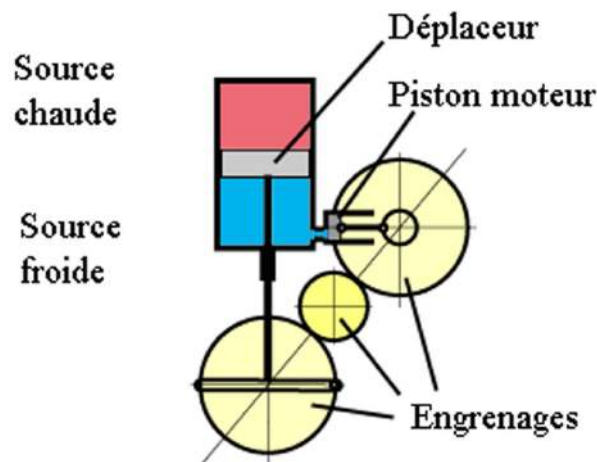


FIGURE 8.23 – Description du moteur Stirling type gamma

Dans cette configuration, le moteur Stirling présente un grand cylindre où le déplaceur fait passer le gaz de la partie froide vers la partie chaude et inversement. À un instant donné, la pression est uniforme dans ce cylindre. Elle varie lorsque le déplaceur monte ou descend comme nous allons le voir.

Pour récupérer les augmentations de pression ou pour comprimer le gaz, on trouve, sur le côté, un ensemble piston-cylindre moteur.

Le fonctionnement détaillé est expliqué ci-dessous.

8.4.1 Chauffage isochore ou à volume constant

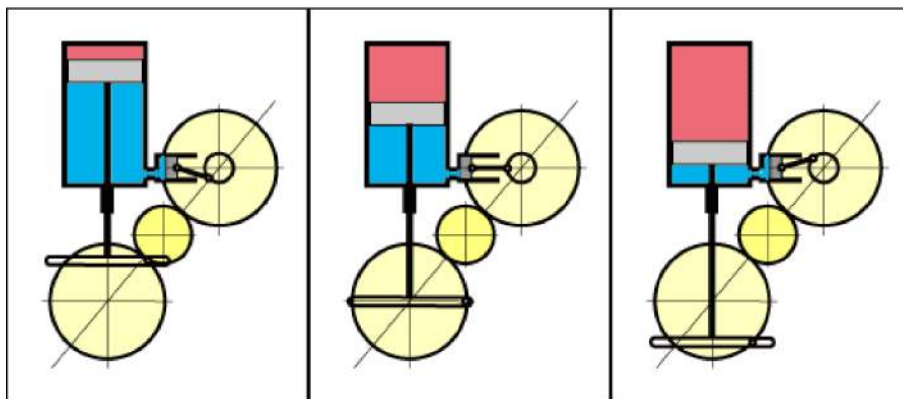


FIGURE 8.24 – Chauffage isochore - Moteur gamma

Durant cette phase, le piston moteur bouge peu, le volume global est minimal et quasiment constant. Par contre, le déplaceur effectue une longue course et le gaz se réchauffe en passant de la partie froide vers la partie chaude. La pression augmente au cours de cette phase.

8.4.2 Détente isotherme ou à température constante

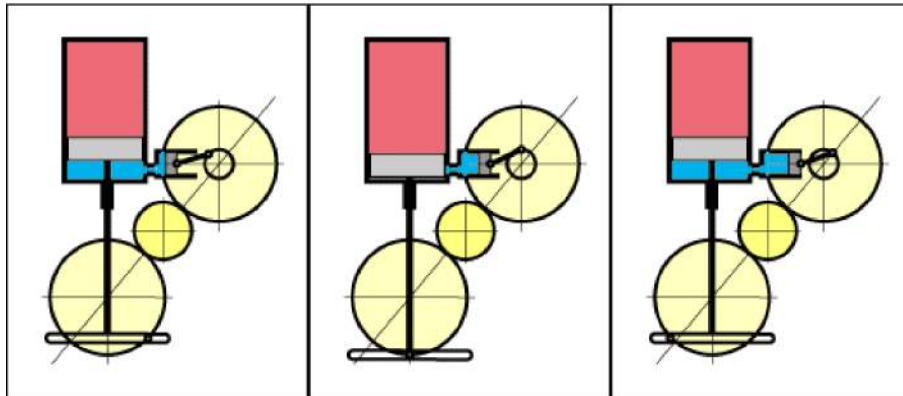


FIGURE 8.25 – Détente isotherme - Moteur gamma

Le déplaceur bouge peu. La température du gaz varie très peu.

Par contre, le piston moteur effectue plus de 70% de sa course. Il récupère l'énergie motrice liée à la détente du gaz.

8.4.3 Refroidissement isochore ou à volume constant

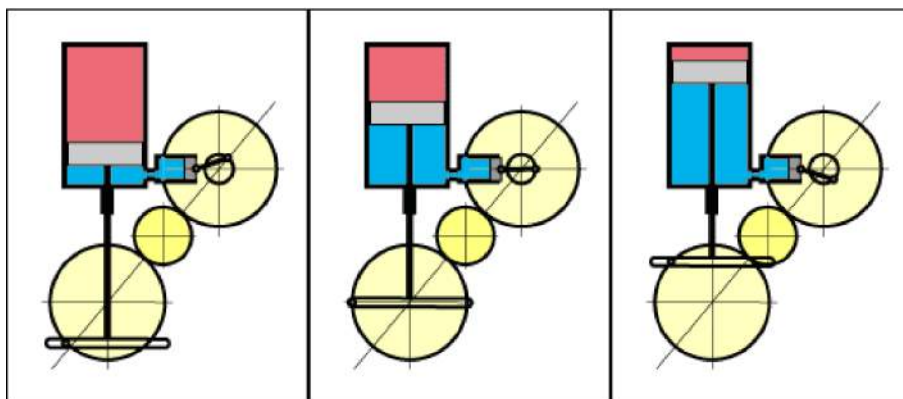


FIGURE 8.26 – Refroidissement isochore - Moteur gamma

Le déplaceur effectue une grande partie de sa course : le gaz est refroidi. Le piston moteur bouge peu. Le volume global est quasiment constant. La pression diminue.

8.4.4 Compression isotherme ou à température constante

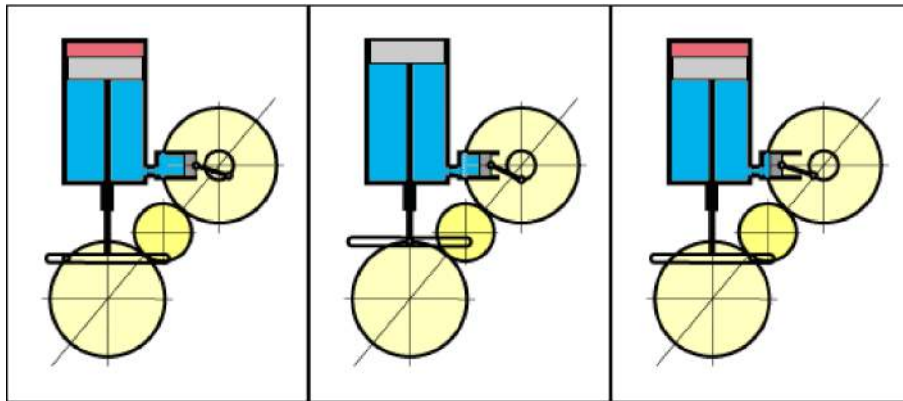


FIGURE 8.27 – Compression isotherme - Moteur gamma

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

8.4.5 Variations de volume

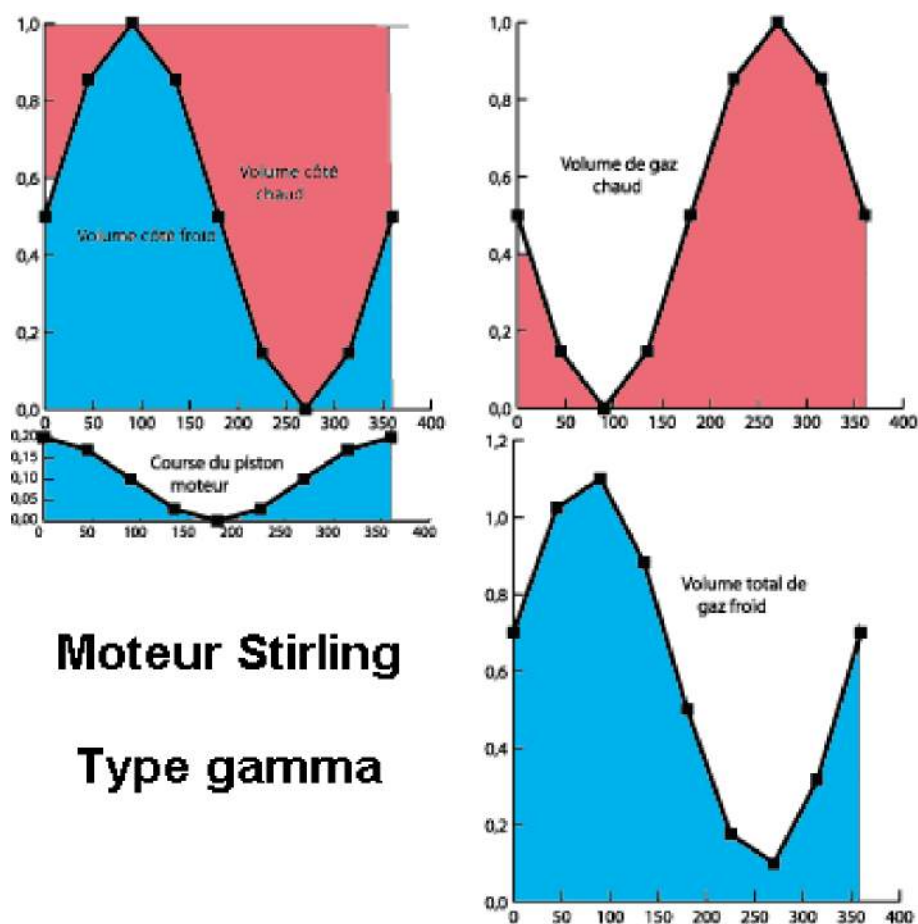


FIGURE 8.28 – Variation de volume - Moteur gamma

Sur ce schéma, on peut voir les variations de volume de gaz chaud et de gaz froid dans le cylindre du déplaceur et dans le cylindre moteur.

Sur la gauche, apparaissent les quantités totales de gaz chaud et de gaz froid en fonction de l'angle de rotation de l'arbre moteur.

8.4.6 Diagramme Pression - Volume

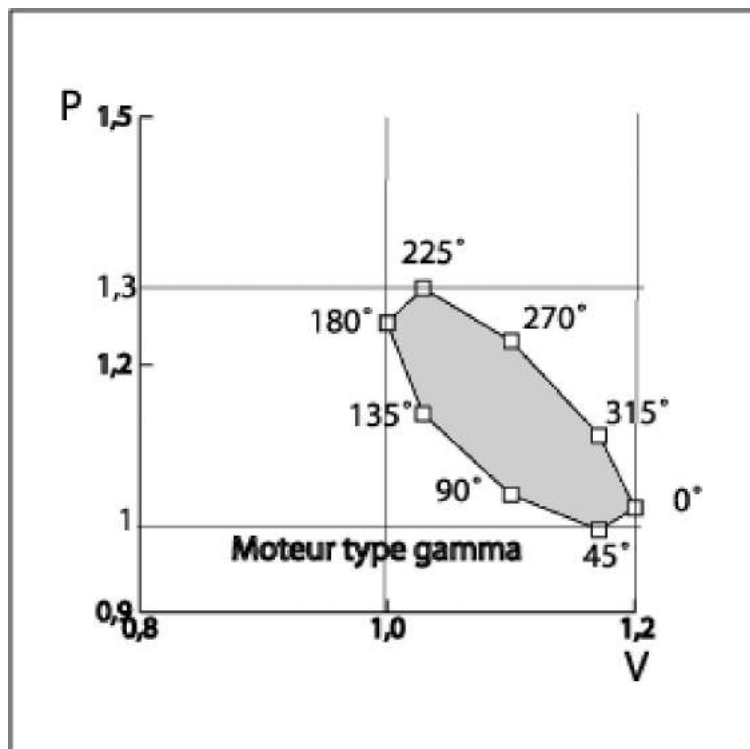


FIGURE 8.29 – Diagramme Pression-Volume - Moteur gamma

Ce diagramme est caractéristique du moteur présenté ci-dessus.

Le volume couvert par le piston moteur est 5 fois inférieur à celui couvert par le déplaceur.

Les calculs ont été faits avec : $T_{Max} = 290\text{ K}$ (17°C) et $T_{min} = 348\text{ K}$ (75°C).

Le rendement théorique serait alors de 17%.

On peut voir que ce cycle s'éloigne du cycle théorique.

L'important est d'avoir la surface grisée la plus grande possible. Elle est représentative du travail récupéré au cours d'un cycle .

8.5 Autres types de moteurs à cycle de Stirling

D'autres types ou variantes de moteurs Stirling que ceux étudiés précédemment existent.

Si nous prenons le moteur type gamma pour référence, différentes variantes peuvent être présentées. C'est ce que nous pouvons voir sur le schéma ci-dessous avant de recevoir quelques explications sur chacun des modèles :

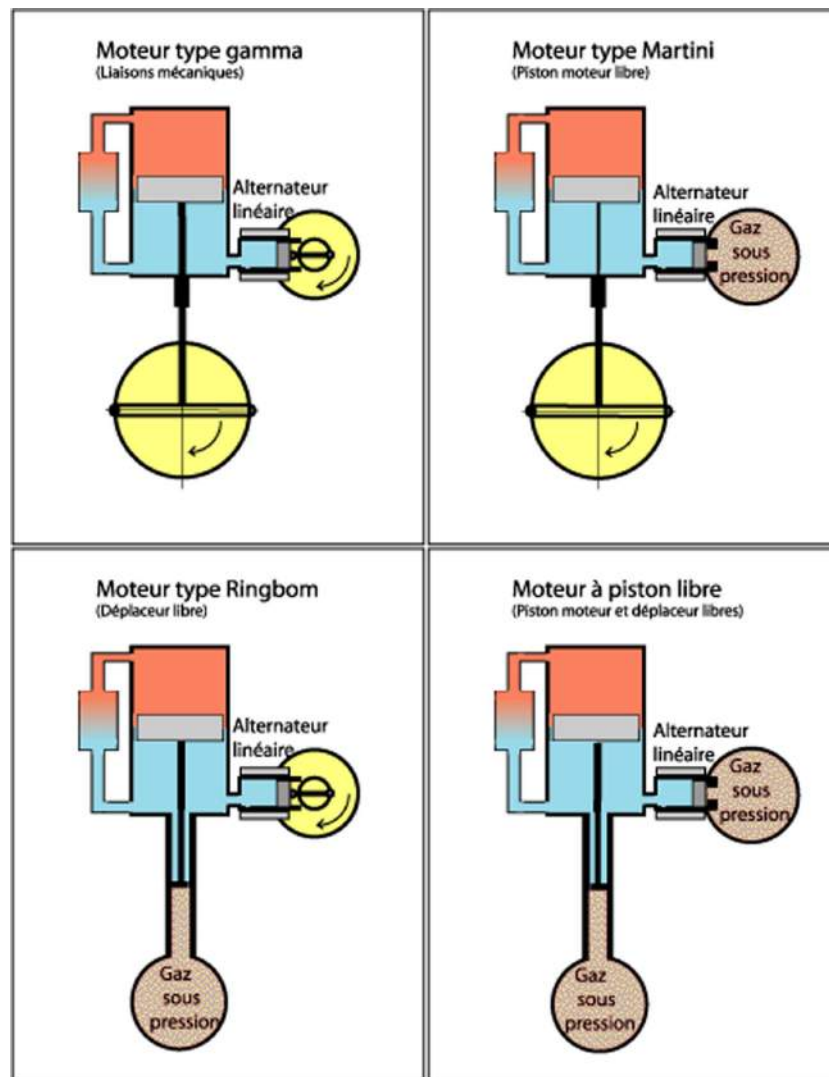


FIGURE 8.30 – Autres types de moteurs à cycle de Stirling

8.5.1 Le moteur à piston libre dit moteur type Martini

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.

8.5.2 Le moteur à déplaceur libre ou Ringbom

A l'inverse du précédent, le piston moteur est entraîné mécaniquement. Par contre, le déplaceur se positionne en fonction de la pression du moteur et de la pression du gaz enfermé dans une capacité. Comme précédemment, cette capacité peut être remplacée par un ressort taré à une valeur adéquate.

Nous avons découvert ce moteur page 75 dans la partie historique.

8.5.3 Le moteur à piston et déplaceur libres (free piston Stirling engine)

Ce moteur cumule les propriétés 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.

La NASA a développé un tel moteur représenté ci-dessous (image du domaine public)

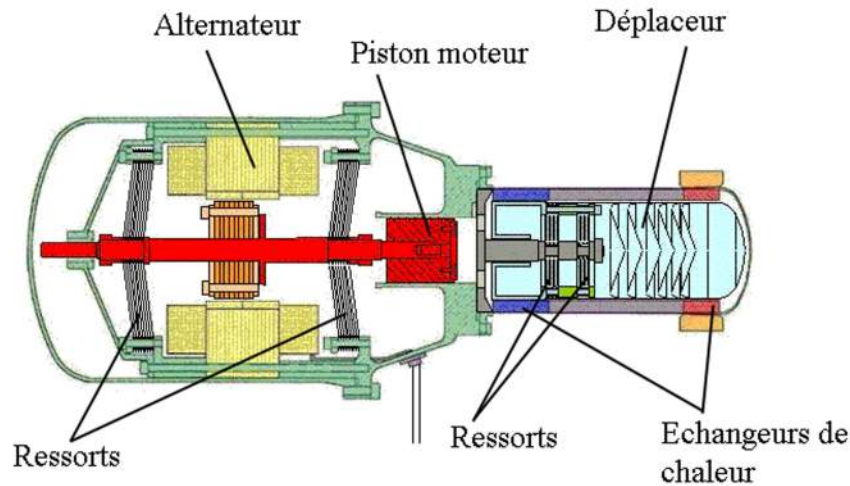


FIGURE 8.31 – Moteur à piston libre NASA

8.5.4 Le moteur à double effet

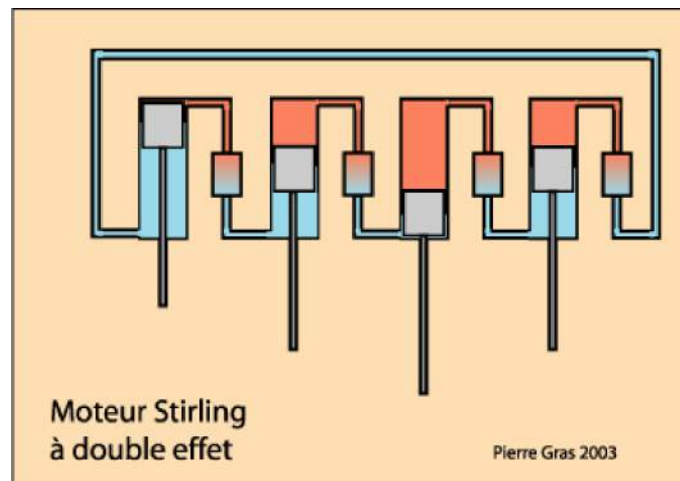


FIGURE 8.32 – Le moteur à double effet

Le principe consiste à mettre des moteurs de type alpha en « série ». Il y a un seul piston par cylindre. Le déphasage entre chacun des pistons est de 90° .

8.5.5 Le moteur rotatif

Faire un moteur Stirling rotatif paraît séduisant. Certains cherchent à développer un tel moteur. On peut, dans ce cas, penser au moteur Wenkel ou au compresseur à palettes.

Le gaz est enfermé entre partie mobile et partie fixe. Avec une bonne géométrie, on peut supposer que ce gaz voit approximativement les quatre phases d'un cycle de Stirling.

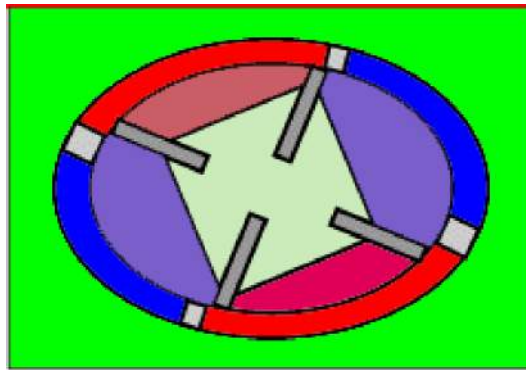


FIGURE 8.33 – Le moteur rotatif

Les problèmes d'équilibrage et surtout d'étanchéité sont très pointus et difficiles à résoudre correctement.

8.5.6 Le générateur thermodynamique

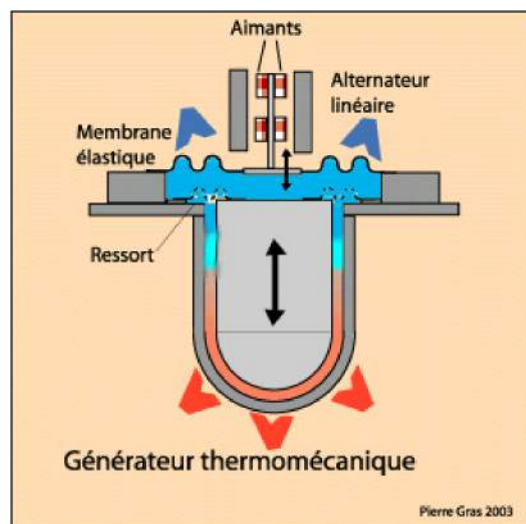


FIGURE 8.34 – Le générateur thermodynamique

L'ancêtre du moteur à piston moteur et déplaceur libre ?

Le déplaceur oscille avec les variations de pression, il est soutenu par un ressort annulaire percé de nombreux trous.

Le piston moteur est une membrane élastique entraînant un aimant dans un entre-fer ce qui permet de générer un courant électrique.

Chapitre 9

Autres moteurs à apport de chaleur externe

9.1 Le moteur thermo-acoustique

Dans le cas d'un moteur thermo-acoustique, est-on vraiment en présence d'un moteur suivant le cycle de Stirling ? Certains n'hésitent pas à l'affirmer. D'autres, dans de longues thèses très intéressantes et érudites, ne font aucune mention de ce cycle...

Peu importe. Nous allons quand même examiner le principe d'un tel moteur.

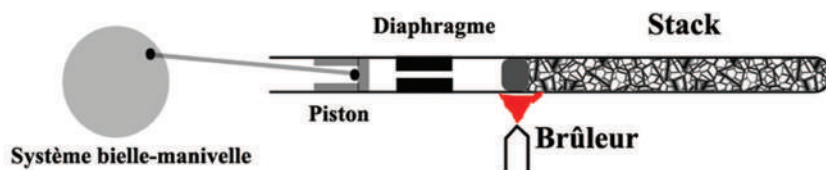


FIGURE 9.1 – Principe du moteur thermo-acoustique



FIGURE 9.2 – Maquette de moteur thermo-acoustique

Ce moteur est basé sur la transformation de l'énergie calorifique en énergie acoustique ou vice versa. Le chauffage d'une des extrémités d'un élément appelé « stack » produit des variations de pression à l'intérieur du tube. Ces dernières sont exploitées par le piston de notre moteur.

Le cycle étant réversible, en entraînant ce dispositif avec un moteur, cet appareil peut se transformer en pompe à chaleur ou en machine frigorifique. C'est une configuration utilisée pour produire du froid.

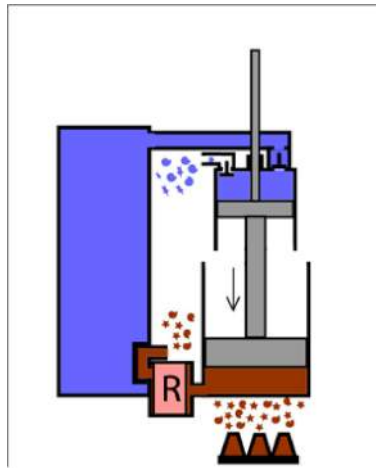


FIGURE 9.4 – Moteur Ericsson : descente des deux pistons

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 après avoir cédé ses calories au régénérateur R.

9.3.2 Deuxième mouvement

Compression de l'air frais, remplissage du cylindre inférieur puis détente de l'air chaud

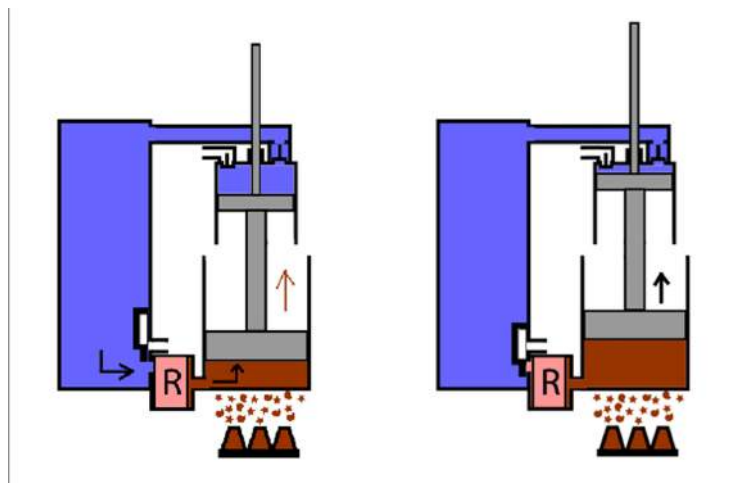


FIGURE 9.5 – Moteur Ericsson : remontée des deux pistons

Le piston remonte, l'air frais est comprimé dans le cylindre supérieur à température constante.

L'air frais du réservoir est admis dans le cylindre inférieur via le régénérateur qui le réchauffe.

Deuxième phase : pendant toute la remontée des pistons, 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 à l'intérieur du cylindre supérieur atteint celle du réservoir d'air.

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 grâce au régénérateur.

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.

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

Quatrième phase : les pistons terminent leur course vers le haut. L'air dans le cylindre inférieur se dilate à température constante : celle de la source chaude.

Quelques observations :

- l'air de travail est renouvelé au cours des différents cycles de fonctionnement.
- l'énergie calorifique est fournie à l'extérieur du cylindre de travail.

Le moteur Ericsson peut donc être qualifié de « moteur à air chaud », « moteur à combustion externe » ou « moteur à apport de chaleur externe ».

9.3.3 Le diagramme Pression-Volume

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

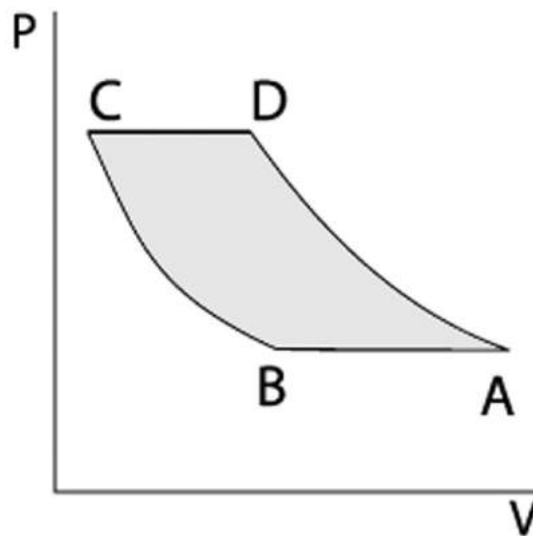


FIGURE 9.6 – Moteur Ericsson : diagramme Pression-Volume

Les différentes phases, décrites précédemment, 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.

9.4 Le moteur Manson à cycle ouvert

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, voir celles d'Henry Ganza page 148, § 16.4. 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.

Voici, une petite description de ce moteur :

- La partie chaudière chauffe l'air de travail lorsqu'il est à gauche.
- Le réservoir d'eau refroidit l'air quand il est à droite.
- Le piston est entraîné par un système bielle-manivelle. Il est équipé d'un conduit qui permet à l'air chaud de s'évacuer quand le piston est dans la position adéquate par rapport à la lumière située dans le fourreau fixe extérieur.

Il comporte un autre conduit permettant d'aspirer l'air frais par l'autre lumière du fourreau fixe.

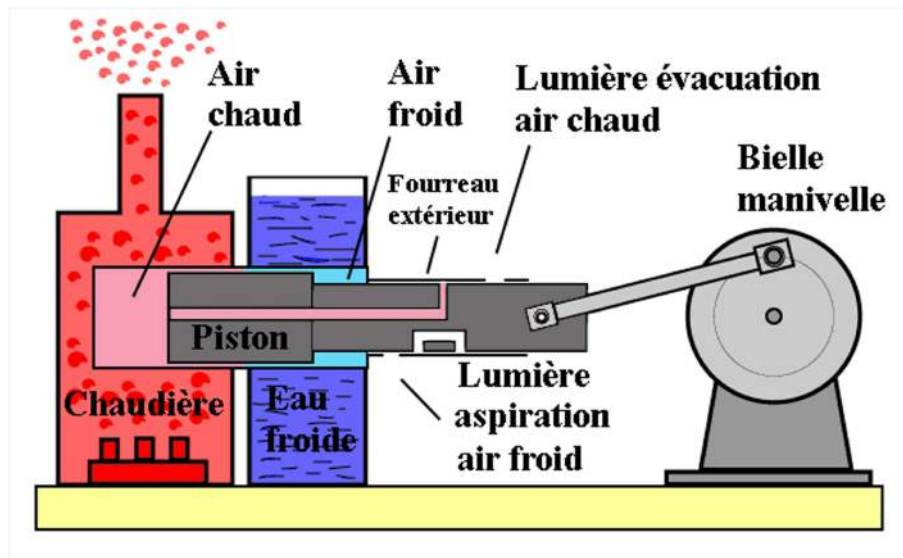


FIGURE 9.7 – Description du moteur Manson

9.4.1 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.

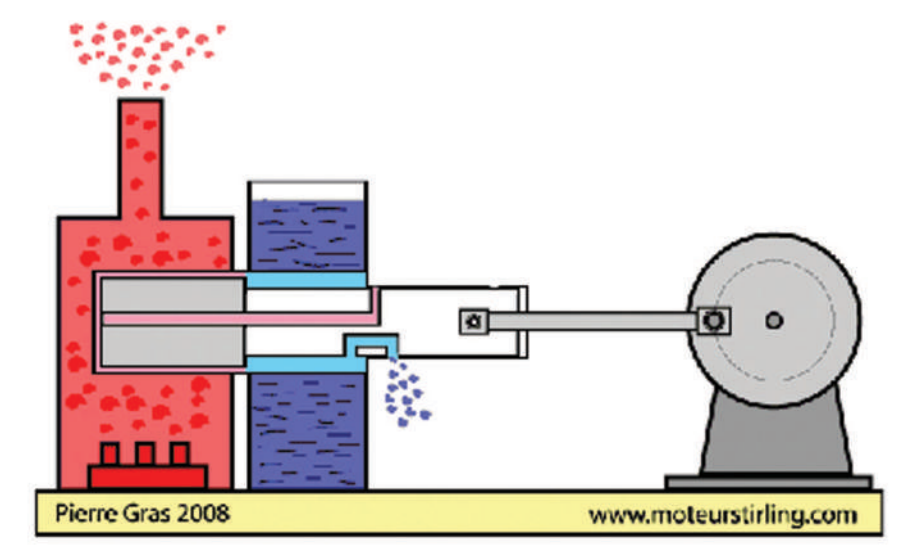


FIGURE 9.8 – Moteur manson - Phase d'aspiration de l'air

Un chauffage

Le piston recule pendant cette phase. L'air frais est ainsi envoyé côté chaudière. 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.

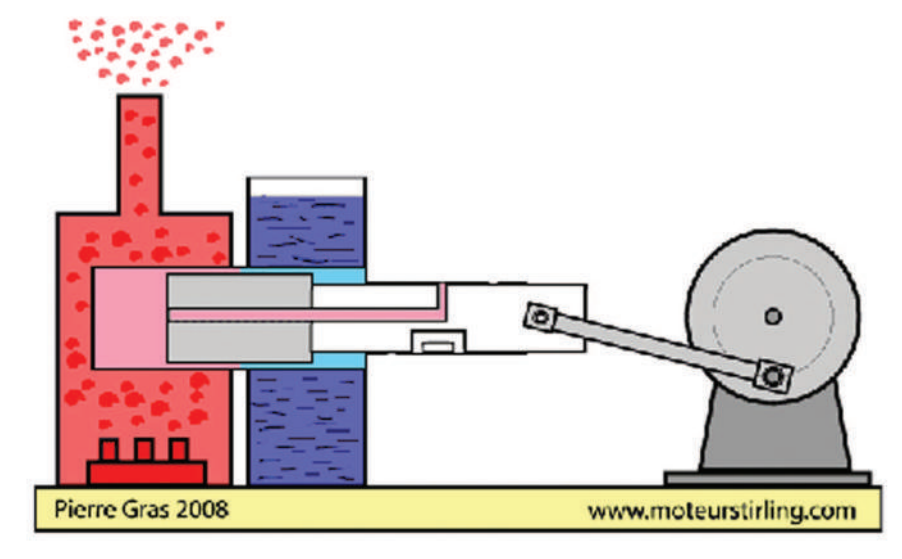


FIGURE 9.9 – Moteur manson - Phase de chauffage

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.

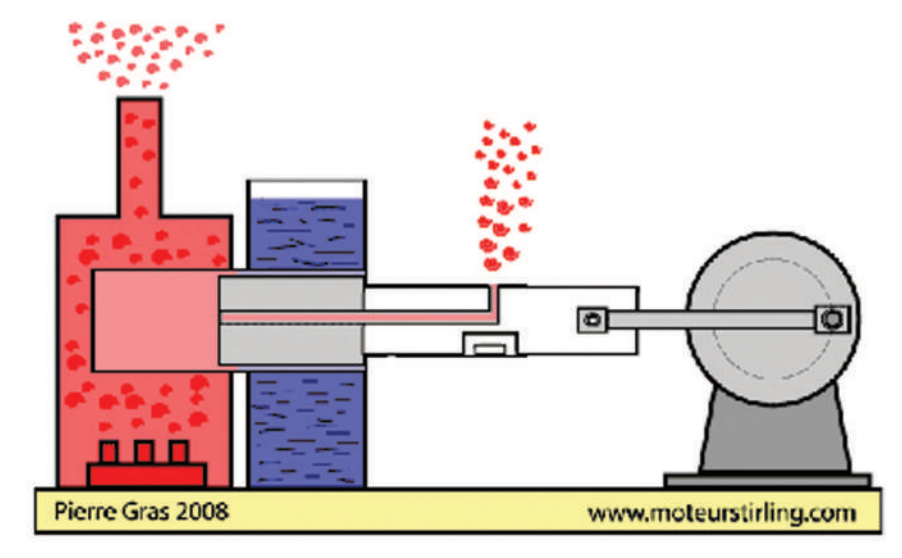


FIGURE 9.10 – Moteur manson - Phase d'échappement à l'atmosphère

Un refroidissement

Le piston avance pendant cette phase. Le gaz passe progressivement côté froid. La réserve d'eau prend de l'énergie thermique à l'air enfermé dans le cylindre. 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 (C'est la confirmation de ce qui est dit ci-dessus dans le paragraphe « Une aspiration d'air »). Pendant cette transformation on récupère encore de l'énergie mécanique.

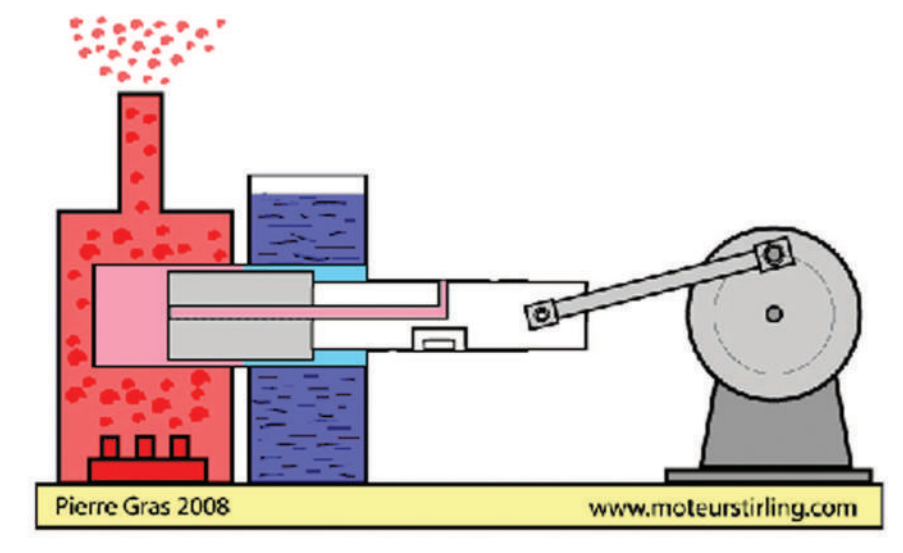


FIGURE 9.11 – Moteur manson - Phase de refroidissement

9.4.2 Le diagramme PV

Le diagramme ci-dessous est donné à titre indicatif. 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.

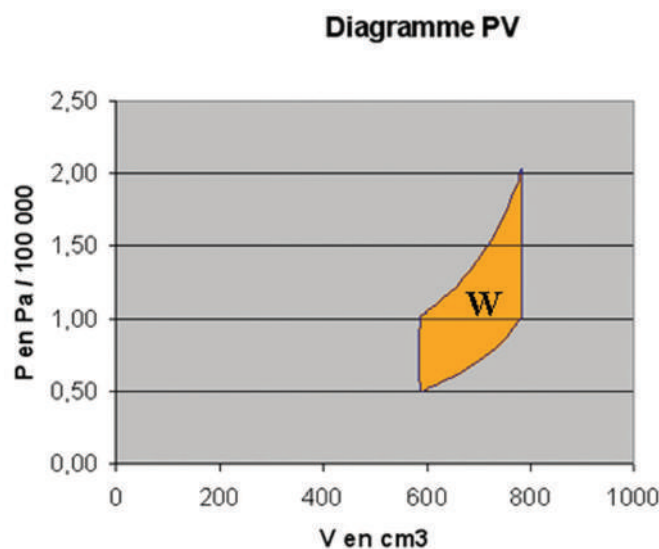


FIGURE 9.12 – Moteur manson - Diagramme PV

9.4.3 Théorie

Pour les amateurs de calculs savants, le moteur Manson est étudié sur le site internet qui lui est consacré [20]. On y verra que la puissance espérée et le rendement ne peuvent être que modestes.

9.4.4 Applications

Le rendement de ce moteur est médiocre. On peut penser qu'il est bruyant. Cependant, il est aisément réalisable, à faible coût, par des personnes ne disposant que de moyens d'usinage élémentaires, par exemple :

- Les amateurs de maquettes simples à réaliser et qui marchent.
- Les populations ne bénéficiant pas de source d'énergie locale mais disposant de carburants non valorisés (bois, déchets de céréales, déjections animales...). Pourquoi ne pas croire à une utilisation de ce type de moteur pour apporter un soulagement à des gens qui en ont besoin pour pomper de l'eau, irriguer, s'éclairer...?

Rêver puis agir...

Quatrième partie

Applications

*Ne soyons pas exigeants. La perfection est si rare.
De l'indulgence, de l'indulgence ! [69]*

Nicolas Léonard Sadi CARNOT (1796-1832)

*Osez et vous réussirez, osez : l'exemple que vous donnerez fera éclore de nouveaux préceptes qui
épureront les anciens. [66]*

Claude Nicolas LEDOUX (1736-1806)

Avant de voir dans le détail les différentes applications possibles du moteur Stirling, il n'est guère possible de faire l'économie de lister les avantages et les inconvénients de ce moteur. Et ce, de la façon la plus honnête possible.

Mais auparavant, il paraît nécessaire de préciser succinctement le contexte actuel de la planète tant sur le plan énergétique que sur le plan environnemental et sur le plan politique.

Ceci nous éloigne des aspects purement techniques de ce livre mais il n'est guère possible de dissocier la technique (recherche, développement de nouveaux produits, applications de terrain...) des points cités précédemment.

Sur le plan énergétique pur, deux constats s'imposent :

- La demande d'énergie va croissante. L'énergie n'est plus un luxe réservé aux pays dits développés. Ces 25 dernières années, la consommation d'énergie primaire a augmenté de 65% environ. Selon l'Agence internationale de l'énergie, elle devrait croître encore de 50% d'ici 2035.
- Les réserves en énergie fossile diminuent et ne suffisent plus à envisager un avenir basé uniquement sur ces ressources. Les échéances d'épuisement restent cependant éloignées, d'un siècle à plusieurs siècles selon leur nature. Mais, comme on va le voir ci-dessous, il serait salutaire d'en diminuer très rapidement leur utilisation.

Au plan environnemental, en se limitant au domaine de l'énergie, sans tomber dans le catastrophisme, se posent de graves problèmes :

- Le taux de CO_2 dans l'atmosphère augmente et est corrélé avec le développement industriel. Ce n'est probablement pas la seule explication mais certainement la principale. Laissons les experts se quereller entre eux, c'est le propre des experts, et agissons pour réduire ce type d'émanation qui obère l'avenir des nouvelles générations.
- Il est difficile d'analyser tous les aspects, positifs ou négatifs, d'une filière de production d'énergie. Quid par exemple des déchets à vie longue produits par les centrales nucléaires ? Sans parler du risque immédiat lié à leur fonctionnement. A-t-on tiré toutes les leçons des plus graves catastrophes industrielles de tous les temps constituées par l'accident de Tchernobyl ou celui de Fukushima ? Même les réacteurs dits de nouvelle génération suscitent débat au sein des experts. Ce qui n'empêche pas leurs constructions...
- Le transport des marchandises est devenu le pire casse-tête. Ceci se concrétise par la circulation de camions, de bateaux, d'avions mais aussi par la construction de lignes à haute tension, d'oléoducs, d'autoroutes, de voies ferrées à grande vitesse... Et pour quel bénéfice à long terme dans un monde où tout doit être rentable immédiatement ?

Faisons nôtre l'adage « Produire et consommer localement » toutes les fois que faire se peut [82].

- L'exploitation des matières premières nécessaires à la production d'énergie (pétrole, charbon, uranium...) est elle-même source de graves pollutions.
L'explosion de la plate-forme Deepwater Horizon, dans le golfe du Mexique en 2010, est là pour nous le rappeler.
Le débat sur l'exploitation des gaz de schistes met en relief les risques irréversibles liés à leur extraction. Les conséquences environnementales et sanitaires liées à l'exploitation des mines d'uranium, en France ou au Niger, sont sources de graves débats.

Dernier point de vue : l'aspect politique. Pour changer les politiques énergétiques au niveau mondial, ils serait nécessaire de réunir :

- Une volonté politique affirmée de vouloir changer les orientations prises jadis en matière énergétique dans un contexte différent des réalités actuelles.
Par exemple, il y a une cinquantaine d'années, il était compréhensible de rechercher une indépendance énergétique quand notre énergie primaire venait pour une très grande part des pays du golfe persique soumis aux soubresauts des conflits régionaux.
Le problème du changement climatique lié aux émanations de gaz à effet de serre ne faisait pas encore partie des préoccupations et des connaissances avérées scientifiquement.
Les tragédies de Tchernobyl et Fukushima n'étaient pas encore survenues.
Aujourd'hui, ce ne sont pas les constats qui manquent et qui devraient alarmer la classe politique pour que des orientations courageuses soient prises afin de limiter les risques à venir.
- Un pouvoir politique fort et indépendant des différents groupes de pression industriels, économiques et financiers. Aujourd'hui, sur la planète qui détient le pouvoir ?
Après la catastrophe de la plateforme Deepwater Horizon, n'a-t-on pas entendu dire par le président des États Unis :

« le moment est venu de saisir cette crise pour mettre fin à l'addiction de l'Amérique aux énergies fossiles... la tragédie en cours nous rappelle que l'heure des énergies propres est venue... la seule approche que je n'accepterai pas est l'inaction. »

Plusieurs années après ces déclarations, le seul point où les promesses ont été tenues est le dernier : l'inaction n'a pas été de mise. En effet, depuis, l'extraction des gaz de schistes s'est développée de façon exponentielle aux États Unis... permettant à ce pays d'être plus indépendant sur le plan de ses ressources énergétiques. Tout un chacun jugera si cette richesse est à classer dans les énergies propres préconisées par le président des USA...

Ceci nous interpelle tant sur le plan de la volonté politique que sur la réalité du pouvoir prétendument détenu par les dirigeants politiques. Même les crises de grande ampleur ne font pas réagir ces derniers.

- Enfin, une solidarité au niveau de la planète. La radioactivité ne s'arrête pas aux frontières, pas plus que l'air que nous respirons.

La recherche de solutions aux graves problèmes environnementaux cités ci-dessus passent donc par une collaboration très étroite entre les différents pays de la planète. Peut-on promouvoir le sacrosaint libre échange sans uniformiser les législations relatives à la protection de l'environnement, les règles fiscales et les droits des travailleurs et des populations ? Ne pas le faire nous « mène tout droit dans le mur » à grande vitesse. Les égoïsmes et les intérêts propres à chaque nation, bien compréhensibles, doivent s'effacer pour être remplacés par une solidarité et une fraternité universelle.

Dans ce cadre, et après ce qui peut passer pour un sévère réquisitoire, qu'on en pardonne son auteur, nous allons présenter les atouts indéniables des moteurs à apport de chaleur externe et plus particulièrement du moteur Stirling. Ils sont en mesure d'utiliser toutes les formes d'énergie thermique, en particulier celles provenant de ressources durables, renouvelables, inépuisables.

Ils constituent, à condition de bien choisir leurs sources d'énergie, un moyen propre de production d'énergie, neutre au plan de l'émanation de CO_2 . Ils sont tout à fait aptes à remplir cette mission au plus près du consommateur, de façon décentralisée.

Ils constituent indubitablement une des réponses au défi que nous devons relever si on veut préserver notre Terre et les espèces qui y vivent à commencer par la nôtre.

Chapitre 10

Avantages et inconvénients du moteur Stirling

10.1 Les avantages du moteurs Stirling

10.1.1 Le silence de fonctionnement

Il n'y a pas de détente à l'atmosphère, source importante de bruit, comme dans le cas des moteurs à combustion interne. La combustion est continue à l'extérieur du ou des cylindres.

Les différents type de moteur sont faciles à équilibrer afin de limiter au minimum les vibrations.

10.1.2 Le rendement élevé

Le rendement est fonction de l'écart de température entre source chaude et source froide. Celui-ci approche le rendement maximal du cycle de Carnot si le moteur est équipé d'un régénérateur de chaleur.

Comme nous le verrons, il est intéressant de faire fonctionner ce moteur en cogénération (production simultanée d'énergie mécanique et de chaleur), le rendement global est alors très élevé.

10.1.3 La multitude de sources chaudes possibles

La source de chaleur étant externe, on peut envisager que celle-ci soit entretenue par la combustion de gaz divers, de bois, sciure, déchets, énergie solaire ou géothermique...

10.1.4 L'aptitude écologique

Le système de chauffage étant externe et continu, il est plus facile de réaliser une combustion complète du carburant utilisé. La production de monoxyde de carbone ou d'oxydes d'azote est limitée par un meilleur contrôle de la combustion.

10.1.5 La fiabilité et la maintenance aisée

La relative simplicité technologique permet d'avoir des moteurs d'une très grande fiabilité nécessitant peu de maintenance.

Après plusieurs milliers d'heures de fonctionnement, sans vidange, sans remplacement de filtres à huile ou de bougies, il est seulement nécessaire d'effectuer une révision du brûleur et, éventuellement, de pressuriser périodiquement le moteur avec de l'hélium, de l'hydrogène ou de l'air.

10.1.6 La durée de vie

L'expérience a montré que ces moteurs ont une grande longévité du fait de leur « rusticité ».

10.1.7 Les utilisations diverses

Ces moteurs peuvent avoir un fonctionnement autonome. Ils s'adaptent à tout niveau de puissance et à toute nature de la source chaude.

10.1.8 La production d'énergie de façon décentralisée

Avec ces moteurs, on peut envisager une utilisation au plus près du consommateur. Nul besoin de réseaux complexes et d'unités de forte puissance.

10.2 Les inconvénients du moteur Stirling

10.2.1 Le prix d'achat

Le frein au développement de ce type de moteur a été et reste encore son coût initial d'acquisition même si le retour sur investissement est assuré.

Les moteurs à combustion interne ont toujours su s'améliorer et réduire leur coût quand il le fallait pour préserver leur suprématie principalement lié à leur grande diffusion depuis le tout début du développement de l'automobile.

Dans un autre domaine, celui de l'énergie solaire, on constate une concurrence sans merci entre le moteur Stirling utilisant le solaire thermique et les panneaux photovoltaïques dont les caractéristiques (rendement, coût et facilité de mise en oeuvre) ne cessent de progresser.

10.2.2 La méconnaissance de ce type de moteur

Le grand public ne connaît pas ce moteur, donc ne le plébiscite pas. Ce point est lié au point précédent. Dans un marché concurrentiel, lorsque les preuves techniques et économiques auront été apportées, la diffusion de ce type de moteur sera grandement facilitée. Mais ce n'est pas encore le cas hormis dans certains secteurs industriels comme la cryogénie ou la vision nocturne.

10.2.3 La variété des modèles

Pour faire un produit le moins cher possible, il faut le fabriquer en grandes séries pour rentabiliser les coûts de recherche, les investissements nécessaires pour l'usiner, l'assembler...

Aujourd'hui, et compte tenu de la faible demande, les moteurs Stirling sont d'un coût élevé même si la tendance, et c'est cela qu'il faut regarder, est à une baisse constante des prix.

On a l'impression d'assister à une standardisation des modèles. Les produits les plus performants sur un plan technico-économique ne peuvent qu'émerger.

10.2.4 Les problèmes d'étanchéité

Dès qu'on désire un moteur compact, il faut augmenter sa pression de service. De suite surgissent les problèmes d'étanchéité. Il ne faut pas perdre de fluide moteur car la pression, et par conséquent la puissance du moteur, va diminuer. Malgré sa dangerosité, l'hydrogène reste le gaz idéal mais il est cher. Autant de pas trop en perdre...

Les solutions à cette difficulté existent mais, pour les adopter, il faut se situer dans le domaine industriel ou militaire vu leurs coûts élevés de développement et de mise en oeuvre.

10.2.5 Les échanges de chaleur

Transmettre de la chaleur d'un corps solide à un autre corps solide est chose aisée. Pour ce qui est des liquides via des éléments solides, ce n'est guère plus difficile. Par contre, pour échanger de la chaleur avec un gaz, le cas de figure est nettement plus complexe. C'est bien sûr possible mais il faut des astuces technologiques bien étudiées et, malgré tout, les appareils nécessaires deviennent vite encombrant si les écarts de température ne sont pas très importants. Pour s'en convaincre, il faut lire l'excellent article de Jean-Pierre Van Doramel page 175, § 23. Il est un peu ardu mais on peut se contenter d'en lire uniquement les conclusions.

10.2.6 Les hautes températures

Comme nous le verrons dans ce livre, le rendement d'un moteur est d'autant plus élevé que l'écart de chaleur entre sa source froide et sa source chaude est important. Il faut imaginer une circulation de la chaleur dans le moteur comme on imagine plus facilement la circulation d'eau dans une turbine hydraulique. Dans le cas de cette dernière, plus la turbine est située en position basse par rapport à sa source d'alimentation, plus sa puissance sera élevée.

Dans le cas d'un moteur à air chaud, il en est un peu de même : plus le « réservoir » de calories aura une température élevée, plus la puissance qu'on pourra en retirer sera importante.

Ceci n'est pas sans conséquence au moment de la conception de ce type de moteur. Il faut choisir des matériaux conservant leurs propriétés mécaniques malgré la température élevée qu'on va leur imposer. Tout est possible. Cependant les coûts de ces matériaux risquent de mettre en péril la viabilité économique de nos moteurs. Rien n'est simple et c'est en partie pour cela que nous nous passionnons pour ces moteurs...

Robert Stirling a, en particulier, regretté de n'avoir pu bénéficier en son temps du procédé Bessemer d'élaboration des aciers. La fonte, utilisée à l'époque, n'avait pas les caractéristiques souhaitées par les concepteurs de moteurs.

De plus, qui dit hautes températures dit aussi nécessité de gérer les dilatations de chacune des pièces et les dilatations différentielles entre les éléments constitutifs du moteur.

10.2.7 Le manque de souplesse

Un reproche souvent fait au moteur Stirling est son manque de souplesse : les variations rapides de puissance sont en effet difficiles à réaliser sur un moteur ordinaire. Ce point est un gros handicap dans le domaine de l'automobile sauf à faire marcher notre moteur à puissance constante pour alimenter les batteries d'une voiture hybride.

Par contre, si cette idée est communément répandue, elle est loin d'être exacte. Les moteurs pour automobiles ou bus conçus par Philips ou à partir de ses brevets démontrent le contraire. Il est envisageable de créer, moyennant certaines astuces constructives, un moteur capable de variations de puissance importantes et quasiment instantanées.

Chapitre 11

Énergie solaire

Cette énergie est gratuite. Pourquoi attendre pour l'exploiter pleinement de différentes façons ? Les deux manières possibles sont :

- le solaire photovoltaïque : le principe est connu et visible lorsqu'on parcourt ville ou campagne. On aperçoit de plus en plus de panneaux voltaïques installés sur les toits. Ceux-ci transforment directement le rayonnement solaire en énergie électrique. Des progrès sont réalisés de jour en jour pour améliorer leur rendement, diminuer leur coût et améliorer le retour sur investissement tant sur le plan purement économique que sur le plan énergétique. Si tous les pans de toit exposés au sud étaient équipés, la France pourrait être auto-suffisante en terme de production d'électricité [46].
- le solaire thermique : celui-ci est moins connu et moins utilisé. C'est pourtant un moyen efficace de faire son eau chaude sanitaire ou pour le chauffage à moindre coût. L'installation est simple, d'un bon rendement et d'un entretien facile.

Un autre aspect de l'utilisation possible du solaire thermique est la production d'électricité par l'intermédiaire d'un moteur à apport de chaleur externe ou d'une turbine à vapeur.

Ici, nous allons nous concentrer, et le mot est bien choisi, sur la transformation de l'énergie solaire en énergie mécanique via un moteur Stirling.

Avant de voir cela dans le détail, nous allons rappeler l'importance de la quantité d'énergie solaire reçue par notre planète et la comparer à nos besoins.

L'image suivante nous donne la conclusion de cette comparaison. On verra ensuite les éléments qui ont permis d'arriver à une telle affirmation.



Le carré rouge représente environ 40 000 km²

FIGURE 11.1 – Surface nécessaire du Sahara pour satisfaire la consommation mondiale d'énergie finale

- L'énergie solaire absorbée par le Terre, en une année, est estimée à 3 850 zettajoules (un zettajoule = 10^{21} joules ou 280 000 milliards de kWh ou 24 milliards de tonnes d'équivalent pétrole).
- En 2010, la consommation d'énergie finale mondiale annuelle était d'environ 0,36 zettajoule soit 8,7 milliards de tonnes d'équivalent pétrole ou, environ, 100 000 milliards de kWh. [34]

- Ce besoin est donc 10 620 fois inférieur à l'énergie reçue du soleil. Cela mérite réflexion !
- À titre d'exemple, le Sahara reçoit du soleil environ $7 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ ou, d'après le Centre de Développement des Énergies Renouvelables d'Alger, environ $2\,500 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. [39]
- Si on réunit les différentes informations qui précèdent, pour produire l'énergie totale finale consommée dans le monde, il nous faut $40\,000 \text{ km}^2$ de Sahara (0,078% de la surface totale de la Terre !). Ceci représente un carré de 200 km de côté si le système de conversion a un rendement de 100%, 280 km de côté avec un rendement de 50% ou 365 km de côté avec un rendement de 30%.

Ces chiffres représentent des ordres de grandeur mais sont assez réalistes.

11.1 Concentrateurs de rayonnement solaire

Les différents concentrateurs utilisent les propriétés de la parabole que nous rappelons succinctement ci-dessous :

- l'équation de la parabole est de la forme $y = ax^2$
- tout rayon parallèle à l'axe de la parabole, après réflexion sur celle-ci, passe par un point unique appelé le foyer F de cette construction géométrique.

En alignant l'axe de la parabole vers le soleil, toute l'énergie venant de celui-ci sera concentrée en un seul point : le foyer de la parabole.

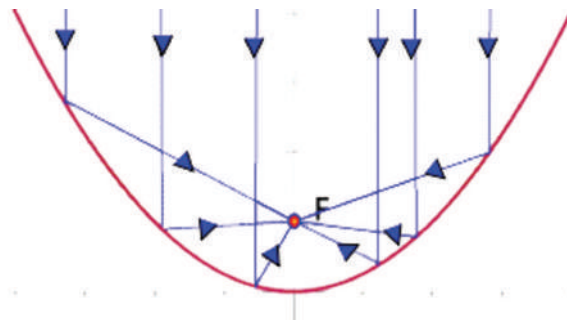


FIGURE 11.2 – Propriété d'une parabole

On va maintenant étudier les deux principales configurations tirant parti de cette propriété.

11.1.1 Capteurs cylindro-paraboliques

On crée un solide engendré par une droite qui se déplace parallèlement à elle-même en s'appuyant sur une courbe, la directrice, ayant un profil parabolique.

Un tube est placé au foyer de la parabole. Dans celui-ci, on fait passer un fluide afin de le chauffer à haute température. L'énergie ainsi récupérée est utilisée pour produire de la vapeur entraînant un turbo-alternateur ou pour servir de source chaude à un moteur à apport de chaleur externe.

Dans la pratique, il n'est pas rare d'obtenir des températures de l'ordre de $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ce qui permet d'espérer de bons rendements.

Ce dispositif présente un énorme avantage : le fluide chauffé par le soleil le jour peut être stocké dans un réservoir calorifugé pour être utilisé la nuit afin de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique ou électrique au moment où on en a besoin.

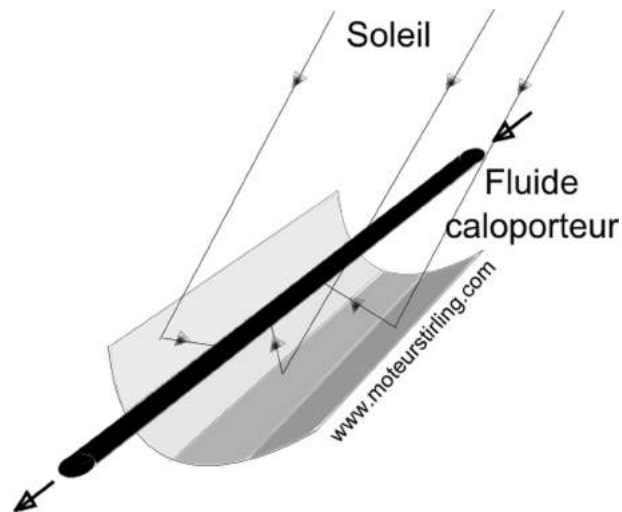


FIGURE 11.3 – Capteur cylindro-parabolique

11.1.2 Réflecteurs paraboloidaux

Comme dans le cas d'une parabole de télévision, un réflecteur paraboloidal a la propriété de concentrer en un seul point, son foyer, tous les rayons qui lui parviennent parallèlement à son axe.

On place alors au foyer de la parabole un moteur à apport de chaleur externe pour transformer l'énergie thermique du soleil en énergie mécanique puis électrique.

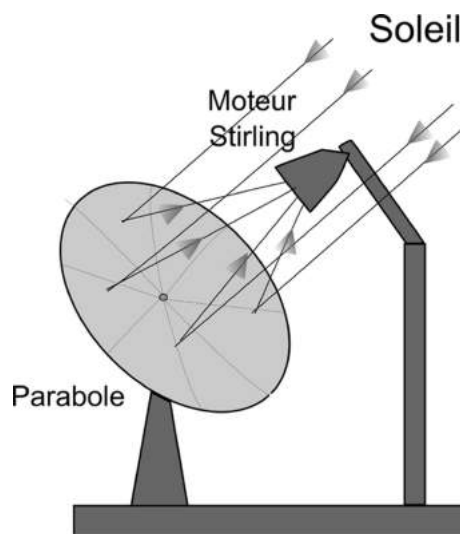


FIGURE 11.4 – Réflecteur paraboloidal

Pour obtenir un fonctionnement optimal d'un tel dispositif, il est nécessaire de le munir d'un dispositif de suivi du soleil de son lever à son coucher.

Il faut un premier système pour s'orienter d'Est en Ouest, et un deuxième pour suivre le soleil de bas en haut, le matin, puis de haut en bas l'après-midi.

Dans les applications mises en œuvre, on arrive à atteindre des températures très élevées proche des 1 000°C, ce qui est plus important que dans le cas des récepteurs cylindro-paraboliques et permet d'obtenir d'excellents rendements.

11.2 Projets réalisés ou en étude

L'utilisation de moteurs Stirling associés à des réflecteurs paraboloidaux est la seule application développée actuellement de façon industrielle. On parle, dans les pays anglo-saxons, de dish-Stirling.

Le premier dispositif connu de ce genre a été imaginé par John Ericsson en 1872, voir page 73, § 6.5.2. Maintenant, nous allons passer en revue les appareils disponibles sur le marché et les projets en cours.

11.2.1 Matériel à usage domestique

Pour un usage personnel, on peut trouver des systèmes comportant une parabole, un moteur Stirling et un dispositif de suivi du soleil.

L'intérêt de ces matériels consiste à produire de l'électricité et de l'eau chaude pour sa consommation personnelle.

L'expérience montre que la durée de vie des sociétés proposant ce genre de matériel est pour le moins des plus aléatoires.

Cependant, vous trouverez dans le tableau ci-dessous quelques caractéristiques de ce genre de dispositifs :

	Puissance électrique	Puissance thermique	Diamètre
Modèle 1	3 kW	10 kW	4,5 m
Modèle 2	1 kW	3 kW	3,75m

Difficile de connaître le coût d'investissement de ces équipements. En 2012, le modèle 2 était proposé aux alentours de 20 000 €. On n'établira pas ici la durée du retour d'investissement compte tenu de la jungle tarifaire des différentes formes d'énergie mais on peut dire, après un calcul rapide, que ce type d'équipement devient intéressant lorsqu'on est loin, très loin, de tout réseau électrique ou de gaz.

Cela peut changer. N'injurions pas l'avenir.

11.2.2 Projets industriels

Quand on dispose de déserts ensoleillés sur son territoire, quand on a investi dans le domaine de la recherche et développement, en particulier pour mettre au point des moteurs Stirling de puissance, on peut envisager construire des centrales électriques de puissance.

Pour cela, il faut installer en très grand nombre des réflecteurs paraboloidaux équipés en leurs foyers de moteur Stirling.

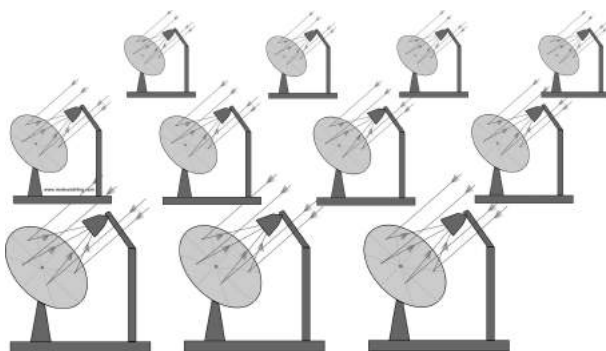


FIGURE 11.5 – Champ de réflecteurs paraboloidaux

En Arizona, une centrale de ce type a été inaugurée en janvier 2010. Elle est composée de 60 ensembles parabole-moteur Stirling de 25 kW chacun, soit 1,5 MW en tout. Cette installation ne nécessite pas d'eau pour la source froide. Elle produit directement du courant alternatif.

Après cette réalisation, il fut envisager de construire des centrales bien plus puissantes telle que celle de Calico en Californie d'une puissance de 850 MW équipée de 34 000 paraboles ! On pouvait penser, qu'enfin, c'était une merveilleuse occasion de produire en grande série des moteurs Stirling et, ainsi, de faire baisser leur prix unitaire. Que nenni, l'entreprise qui avait ce marché l'a cédé à une autre société qui va installer des panneaux photo-voltaïques en lieu et place de nos chers (trop chers ?) moteurs Stirling.

Difficile de cerner les raisons profondes de ce revirement : coût final du kWh trop important ? Exigences rédhibitoires des créanciers vis-à-vis d'une technologie non éprouvée à une telle échelle ? Fiscalité non adaptée ?



FIGURE 11.6 – Dish-Stirling de SES (US public domain)

Dans le domaine de la production d'électricité à partir de l'énergie reçue du soleil, en plus des moteurs à apport de chaleur externe, il ne faut pas oublier :

- Les installations thermodynamiques utilisant un cycle de Rankine qui produisent de la vapeur dirigée vers une turbine de puissance. Il s'agit, souvent, de tours sur lesquelles on concentre en partie supérieur le rayonnement solaire. Le fluide ainsi chauffé est utilisé pour produire de la vapeur d'eau.
- Les tours solaires qui créent un « effet cheminée » utilisé pour entraîner des turbines. Un projet australien envisage une tour de 1000m de haut et un collecteur de chaleur, à sa base, de 7 km de diamètre.

Comme on le voit, en plus des panneaux solaires, il y a beaucoup de concurrence pour exploiter le rayonnement solaire !

Chapitre 12

Micro-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 sanitaire à partir de bois, de gaz, de soleil...

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

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

12.1 Intérêt de la cogénération

Nous allons supposer dans un premier temps que nous disposons de deux installations dissociées :

- une pour faire de l'électricité avec une puissance électrique de 2 kW et un rendement de 33%.
- une autre pour se chauffer ayant une puissance de 10 kW et un rendement de 90%.

Essayons d'établir le rendement global d'un tel dispositif.

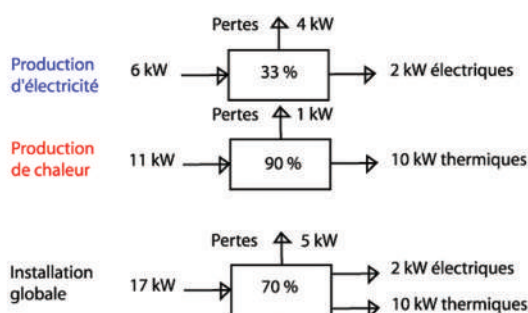


FIGURE 12.1 – Installations séparées de production d'électricité et de chaleur

Pour l'installation globale, nous avons additionné les différentes puissances et avons calculé le rendement $\frac{12}{17} = 0.70$ ou 70%.

Maintenant, imaginons que nous voulons obtenir 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 réinjecter dans le système de production de chaleur. Voir la représentation ci-après :

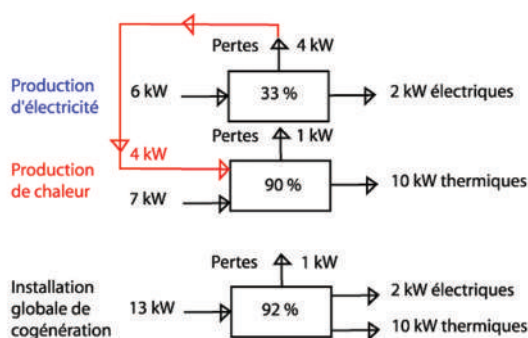


FIGURE 12.2 – Installation de cogénération

Belle démonstration de l'intérêt d'un système de cogénération. Le rendement global de notre installation, grâce à la cogénération, est passée de 70 à 92 %. Quand, avec des installations indépendantes, on doit acheter 100 kg de combustible, on n'en a plus besoin que de 76 kg avec une installation de cogénération. Ce qui représente une économie de près de 25 %. Pas si mal !

12.2 Le moteur Stirling et la cogénération

Actuellement, il semblerait que le domaine de la cogénération domestique soit une voie qui va permettre de grands développements au moteur Stirling. Plusieurs constructeurs de chaudières à gaz commencent à proposer, encore discrètement certes, des chaudières permettant de se chauffer et de produire de l'électricité.

Difficile de faire un état des lieux à l'heure actuelle, mais on peut raisonnablement penser que ce type d'appareil va se développer afin de faire des économies d'énergie, de réduire la production de gaz à effet de serre et d'aller progressivement vers un système décentralisé de production d'électricité proche du consommateur. Produire et consommer localement, y compris l'énergie.¹

Cependant, il reste encore, a priori, un gros écueil à franchir : celui du coût de telles installations bien supérieur aux solutions actuelles. Difficile d'être vertueux quand le retour sur investissement se compte en de (trop) nombreuses années.

Aux constructeurs de communiquer et de ne pas s'enfermer dans le silence lorsqu'on les questionne car cela passe pour un aveu de faiblesse.

1. Les grosses unités de production d'électricité ont un rendement d'un tiers environ. On rejette donc deux tiers de l'énergie thermique dans les rivières ou dans l'atmosphère. De plus, ces centrales vont de pair avec un réseau très haute tension important. Non seulement ce réseau n'est pas d'une esthétique à louer mais les pertes de celui-ci représentent 7 à 10 % de l'énergie électrique véhiculée. À méditer...

Chapitre 13

Motorisation des 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.

13.1 Sur terre : automobiles

Comme nous l'avons vu dans la partie historique de ce livre, de nombreux développements ont concernés l'utilisation de moteurs Stirling sur des véhicules automobiles au cours du XX^{ème} siècle. Nous les devons à la société Philips elle-même mais aussi à toutes les entreprises ayant acquis les brevets déposés par Philips.

Le programme ASE (Automotive Stirling Engine) mené par la NASA pour le compte du gouvernement nord-américain est tout à fait remarquable et prouve l'intérêt qu'on peut porter au moteur Stirling pour une application dans le secteur automobile (se reporter page 88, § 6.10).

Les deux principales conclusions qu'on peut tirer de toutes ces expériences sont les suivantes :

- Techniquement parlant, le moteur Stirling a toutes les qualités pour être monté sur un véhicule automobile : puissance, couple, accélération, souplesse d'utilisation, rapport poids-encombrement et consommation sont des caractéristiques comparables sinon meilleures que dans le cas d'un moteur à combustion interne.

- Par contre, l'écueil principal à une généralisation de ce type de moteur sur un véhicule automobile est son coût. Est-ce un défaut intrinsèque insurmontable ou le fait d'une absence de production en grande série ? En faisant preuve d'un grand optimisme, l'avenir nous montrera peut-être que c'est la dernière raison qu'il faut retenir.

Un petit espoir point à l'horizon : les voitures hybrides font progressivement mais sûrement leur entrée sur le marché. Il s'agit de combiner un moteur thermique et un moteur électrique pour améliorer les performances du véhicule : confort de conduite, diminution des émanations de CO_2 , consommation réduite...

Certains organismes de prévisions pensent que la part de marché des voitures hybrides va augmenter très rapidement dans les années à venir (entre 5 et 10 % en 2020). Dans ce cadre, est-ce que les constructeurs ne penseront pas à monter des moteurs Stirling en lieu et place des moteurs à combustion interne traditionnels ? General Motors, dès 1967, avait déjà pris cette option en créant une Opel Kadett hybride ! (Voir page 82)

13.2 En mer : sous-marins et bateaux

Nous avons vu dans la partie historique que la société suédoise Kockums a équipé des navires de guerre et surtout des sous-marins militaires de moteurs Stirling du type AIP (Air Independent Propulsion), voir page 88. Là aussi, la faisabilité technique n'est plus à démontrer et le retour d'expérience est très positif.

À l'instar du domaine automobile, on peut s'interroger sur l'aspect purement économique de ce genre de moteur pour le voir, un jour, sur un bateau de plaisance par exemple. La réponse est probablement dans ce qui précède : seuls les militaires ou grosses entreprises à des fins scientifiques ont adopté le moteur Stirling. Nous savons parfaitement que, dans ces domaines, l'aspect financier n'est pas le plus prépondérant lorsqu'on s'est fixé des objectifs purement techniques pour satisfaire des visées stratégiques.

Pour ne pas rester trop pessimiste, il nous faut signaler que des groupes électrogènes à base de moteur Stirling équipent certains bateaux de plaisance. À la plus grande satisfaction de leurs heureux (et fortunés) propriétaires. Pourquoi ne pas espérer une démocratisation de cette application ?

13.3 Dans les airs : avions

Les moteurs équipant les avions de tourisme actuels, bien qu'ils se soient grandement améliorés, sont conçus selon les mêmes principes que le moteur que les frères Wright avaient monté sur leur Flyer, le premier avion à avoir effectué un vol contrôlé le 17 décembre 1903.

Ce constat incite à s'intéresser à de nouvelles motorisations possibles. Le moteur Stirling fait partie de celles-ci. Nous allons voir quels sont ses atouts.

Contrairement à ce qu'on demande à un moteur automobile, un moteur d'avion fonctionne essentiellement à puissance constante. Une configuration qui convient parfaitement au moteur Stirling.

Le silence de fonctionnement de ce dernier, par rapport à un moteur traditionnel à combustion interne, constitue 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.

En altitude, l'air se raréfie et se refroidit. La conséquence directe est la perte de puissance des moteurs atmosphériques traditionnels.

Pour ce qui est du moteur Stirling, il voit la température de sa source froide diminuer avec l'altitude donc son rendement augmenter !

Le choix du combustible étant plus large avec le moteur Stirling, on pourrait en imaginer un moins volatil, moins explosif, moins polluant que les carburants actuels.

Dernier détail à régler : le rapport poids/puissance a priori défavorable au moteur Stirling par rapport à son concurrent direct, le moteur à combustion interne. Ce sont les propos qu'on rencontre habituellement dans la littérature mais ceci est en contradiction avec les résultats du programme ASE mené par la NASA (Voir page 88). En effet, à puissance égale, les poids respectifs d'un moteur Stirling et celui d'un moteur à combustion interne sont équivalents.

D'après la même étude, le moteur Stirling est moins gourmand en combustible. Pour parcourir une même distance, un avion équipé de ce moteur emporte moins de combustible et est donc plus léger qu'un avion ayant un moteur à combustion interne.

Pour les passionnés d'aviation, une annexe est consacrée à cette problématique pour la développer, l'argumenter (voir page 221, Annexe F).

Chapitre 14

Pompe à chaleur - Réfrigération

Il peut paraître curieux, au premier abord, de penser qu'un moteur puisse tenir un rôle central dans 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 engin conçu pour respecter ce cycle.

- On peut fournir des calories à cet engin pour en obtenir une production d'énergie mécanique. Ce point-ci est banal : c'est la définition d'un moteur thermique.

- On peut, à l'inverse, apporter de l'énergie mécanique à ce même moteur, l'obliger à tourner, afin qu'il nous procure 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 ou un dispositif cryogénique si on produit de grands froids.

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

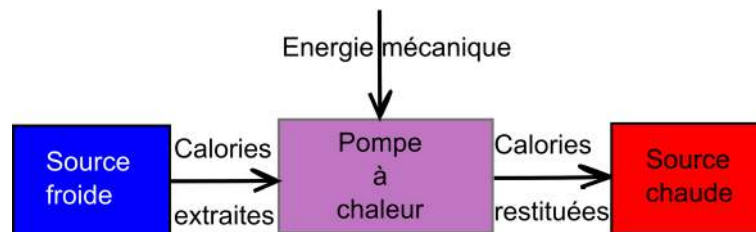


FIGURE 14.1 – Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur, contrairement à la première idée qui vient à l'esprit, va chercher les calories dans la source froide pour les restituer à la source chaude. Elle a donc tendance à accentuer la différence de température entre ces deux milieux.

À l'inverse d'un moteur, le rendement d'une pompe à chaleur diminue quand l'écart de température augmente entre source chaude et source froide. Pour plus de détails sur ce point voir page 193, § 30.2.

14.1 Production de chaleur ou de froid à usage domestique

Le marché des pompes à chaleur ne cesse de croître. La raison est liée au coût de fonctionnement réduit de ce type d'installation par rapport aux chaudières classiques.

En consommant 1 kWh électrique, on peut espérer 3 à 4 kWh thermiques.

Les calories sont puisées soit dans le sol, soit dans une source d'eau froide (rivière, nappe phréatique), soit encore dans l'air extérieur.

Il n'existe pas encore, sauf avis contraire, de dispositif conçu à partir d'un moteur Stirling. Les appareils disponibles sur le marché utilisent le cycle de Rankine qui consiste à évaporer un fluide (à partir de la source froide) puis de le faire condenser (pour réchauffer la source chaude) à l'instar de ce qui se passe dans un réfrigérateur.

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 fluide. Quand ce corps s'évapore, il absorbe des calories. Quand il se condense, il en restitue. Les calories sont prises à l'intérieur du réfrigérateur, puis restituées dans la pièce où il est installé via le radiateur situé à l'arrière de cet appareil.

Rien ne nous empêche de rêver qu'un jour on utilisera le cycle de Stirling mais, il faut être réaliste, c'est peu probable dans un proche avenir même si la couche d'ozone s'en porterait mieux (les liquides utilisés dans les réfrigérateurs sont en grande partie responsable de la destruction de la couche d'ozone qui nous protège des rayonnements néfastes du soleil).

Cependant, le protocole de Kyoto menace la pérennité des fluides frigorigènes (HFC hydrofluorocarbure) après que celui de Montréal a permis la suppression des CFC (chlorofluorocarbure). Un espoir pour le cycle de Stirling ? [70]

14.2 Production de froid

14.2.1 Utilité des grands froids

La cryogénie est une activité peu connue. Pourtant, elle a une place essentielle dans le développement de technologies de pointe : liquéfaction des gaz, recherche médicale, supra-conducteurs, domaine spatial, vision nocturne...

À des températures proches du zéro absolu, soit -273°C , les corps se comportent de façon très particulière et intéressante.

- Certains métaux deviennent supra-conducteurs, ils offrent une résistance quasi-nulle au passage d'un courant électrique.

- Certains fluides sont super-fluides, ils n'ont plus de viscosité, se déplacent sans perte de charge et passent par des orifices extrêmement petits, de dimension atomique.

Sans ces propriétés, à titre d'exemple, les IRM² n'existeraient pas avec leurs très forts champs magnétiques obtenus grâce au refroidissement de leurs aimants supra-conducteurs par de l'hélium liquide et super-fluide à quelques kelvins de température (4 à 5 K, soit -269°C environ!).

Des modèles de cryogénérateurs³ ont également été développés pour l'industrie spatiale et embarqués à bord de satellites ou de navettes.

La recherche scientifique, les hôpitaux, différentes industries (bâtiment, météorologie, militaires...) manifestent un besoin essentiel de ce type d'appareils.

Les appareils de thermographie sont parfois équipés de cryogénérateurs afin d'obtenir des images d'une très grande résolution.

Les détecteurs à infra-rouge travaillent fréquemment à des températures de 50 à 100 K (ou -223°C à -173°C) sinon moins.

14.2.2 Le cycle de Stirling dans la production de grands froids

La production des grands froids est une spécialité de longue date du moteur Stirling. La société Philips a commercialisé dès 1955 son premier réfrigérateur basé sur le cycle de Stirling. [58]

D'autres grandes entreprises ont pris le relai en développant des cryogénérateurs basés sur le même cycle. Un moteur électrique linéaire comprime le gaz dans la partie chaude, la détente se produisant dans la partie froide volontairement éloignée de la précédente.

Voir le schéma ci-après qui rappelle le moteur Ringbom présenté page 111, § 8.5.2.

2. Imagerie par Résonance Magnétique : permet d'établir des images en 2D ou 3D des « corps mous » riches en hydrogène, le cerveau par exemple.

3. Que les académiciens pardonnent à l'auteur de cet ouvrage, que nul remords ne ronge à ce propos, l'invention de ce mot par nécessité. Les anglo-saxons, plus pragmatiques, ont depuis plusieurs décennies inventé un mot adapté : « cryocooler ». Les mots sont le reflet du monde et du niveau de développement technologique...

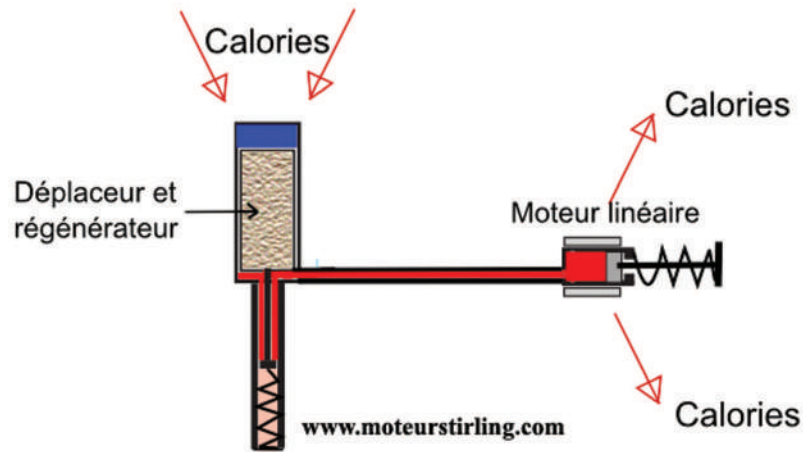


FIGURE 14.2 – Schéma d'un cryogénérateur

Des modèles thermo-acoustiques sont également sur le marché (pour rappel voir page 115, § 9.1).

Ces dispositifs présentent les avantages suivants :

- Un large éventail d'utilisations.
- Une très grande modularité.
- Une fiabilité prouvée hors du commun. Ces appareils sont garantis sans entretien pour des milliers d'heures de fonctionnement.
- Un niveau vibratoire maîtrisé.
- Une très grande robustesse.
- Une consommation minime d'énergie.

S'ils n'ont pas encore su pénétrer notre univers domestique, les cryogénérateurs basés sur le cycle de Stirling sont, d'ores et déjà et à notre insu, présents par milliers dans des environnements que nous côtoyons souvent.

Chapitre 15

Rejets thermiques industriels

Nous vivons dans une période où nous sommes contraints de faire des économies d'énergie. La raréfaction des ressources naturelles en énergie fossile nous y oblige. Les atteintes à notre environnement, que ce soit la pollution de l'atmosphère, bien évidemment, mais aussi de l'eau, de la mer et des sols, rendent impératif de consommer moins d'énergie et avec une meilleure rationalité.

Pour positiver, on dira que toute crise a du bon. Dans de telles circonstances, nous sommes acculés à la réflexion et à trouver des solutions nouvelles en terme de production et de consommation.

Pour illustrer le propos, nous prendrons pour exemple, et il y en a beaucoup d'autres¹, le fait qu'une centrale nucléaire rejette deux fois plus d'énergie dans l'atmosphère, la rivière ou la mer, selon où elle est située, qu'elle n'en envoie dans les câbles électrique haute tension !

Allons-nous continuer à l'accepter ? Ou faut-il chercher des solutions, économiquement rentables sur le long terme, à ce genre de constat ?

Posez la question est un début de réponse...

La difficulté essentielle pour récupérer ces rejets thermiques réside dans le fait qu'ils sont à des températures basses, proches de la température ambiante.

Les dispositifs capables de valoriser ces rejets doivent se satisfaire de faibles écarts de température entre source chaude et source froide. Les lois de la thermodynamique s'imposant de façon incontournable, le rendement de ces récupérateurs d'énergie sera forcément faible.

Revenons à l'exemple cité ci-dessus : un tiers d'énergie envoyé dans les fils électriques, deux tiers perdus. Supposons que notre centrale ait une puissance de 1000 MW électriques, soit 3000 MW thermiques. Nous sommes d'accord pour dire que 2000 MW sont rejetés en pure perte.

Avec un système de conversion ayant un médiocre rendement de 10 % (rendement d'un moteur Stirling ayant une source froide à 15°C et une source chaude de 50°C), nous récupérerions quand même 200 MW électriques. Avec cinq centrales traitées, nous économiserions la construction d'une sixième. Cela mérite que nous y réfléchissions. Non ?

Une autre solution consisterait à utiliser cette énergie pour chauffer des habitats en ville. Nous serions, dans cette optique, devant un bel exemple de cogénération industrielle. Mais accepterions-nous la construction de centrales thermiques classiques ou nucléaires à proximité des agglomérations ?

Quelle conclusion pouvons-nous tirer de ce constat ? Probablement qu'il serait judicieux de faire des efforts de recherche et développement pour récupérer toute cette énergie perdue.

Le moteur Stirling peut s'avérer être une des solutions. Les moteurs LTD (Low Temperature Difference, encore de l'anglais !) existent aujourd'hui sous forme de maquettes qui surprennent et amusent les novices parce qu'ils sont capables de fonctionner sur une tasse d'eau chaude ou sur la main. Ils sont de type gamma, voir page 107, § 8.4.

En électronique, on aime dire « Small is beautiful ! », c'est un hymne à la miniaturisation. Dans le domaine de l'énergie, et concernant les moteurs Stirling LTD, si on pouvait dire « Great is beautiful ! », ce serait un hymne à l'industrialisation, dans le bon sens du terme.

La conception de moteurs LTD de puissance représenterait une avancée majeure dans le domaine de l'énergie.

1. On peut également penser à l'industrie chimique, à l'industrie métallurgique, à l'industrie pétrolière... et, plus près de nous, à nos automobiles qui ont un rendement de l'ordre de 40% au mieux.

Il n'en reste pas moins que la façon de résoudre définitivement notre problème énergétique ardu serait d'utiliser directement les énergies renouvelables telles que le rayonnement solaire, la force des vents, la puissance des marées et des courants marins, la biomasse... après avoir limité notre consommation à nos stricts besoins.

Aujourd'hui, la crise énergétique et environnementale commence à être perçue avec une grande acuité et gravité. Cette prise de conscience peut donner une bonne raison de rester ou de redevenir optimiste.

Chapitre 16

Maquettes - Modélisme

Le moteur Stirling a un petit côté magique. On ne comprend pas spontanément son fonctionnement. Parfois même, on doute qu'on puisse faire tourner un moteur avec de tels principes !

La meilleure des méthodes pour convaincre les sceptiques consiste à leur montrer une ou des maquettes fonctionnant d'après les règles établies par Robert Stirling.

Quand la chaleur d'une bougie permet au moteur de s'animer, c'est très surprenant. Mais quand il s'agit d'utiliser la chaleur d'une tasse d'eau chaude ou, encore mieux, la chaleur de la main, cela devient franchement fantastique.

En dehors de cet aspect pédagogique, certaines personnes se passionnent pour la réalisation de maquettes toutes plus belles les unes que les autres. On peut également constater qu'à partir des mêmes principes on peut obtenir des réalisations très différentes.

Merci à tous ces habiles et ingénieux constructeurs qui contribuent d'une façon insoupçonnée à la promotion du moteur Stirling.

Chacun peut se lancer dans l'aventure et construire son propre moteur. Il suffit d'adapter ses ambitions à son habileté ou son expérience. On commencera par réaliser des choses faciles pour finir par des maquettes de sa conception plus complexes et délicates à usiner, à monter et à faire marcher.

Nous allons ci-dessous, et sans être exhaustifs, montrer les différentes possibilités qui s'offrent à nous. Et elles sont nombreuses !

16.1 Les maquettes à monter

Pour débiter ou s'initier, assembler une maquette est certainement la meilleure des méthodes.

Cependant, il ne faut pas croire que la réalisation est facile et qu'on gagne au premier coup. Il y a, en effet, des kits simples, d'autres nettement plus complexes. Tous nécessitent une très grande minutie.

Il faut être particulièrement vigilant aux problèmes d'étanchéité et de frottements parasites. La puissance de ces maquettes est extrêmement faible et il faut faire en sorte que celle-ci ne soit pas perdue en raison des difficultés que les pièces mobiles ont à se mouvoir.

Inutile, au début, de casser sa tirelire car on peut trouver les premières maquettes à partir de quelques dizaines d'euros. Ensuite, on pourra se laisser tenter par de superbes moteurs bien plus chers, mais magnifiques et aptes à sortir de l'atelier pour décorer le salon...

16.2 Les plans sur le ouèb

Une autre façon de procéder, à condition d'avoir quelques outillages et talents, est de réaliser une maquette à partir de plans trouvés sur internet. Pour guider son choix, on peut aller sur « Tout savoir sur le moteur Stirling » [21] pour télécharger les plans de « Chenapan », un excellent modèle mis à disposition par le regretté Fernand Petitjean. Attention cependant, il ne s'adresse pas au débutant. Sur ce même site, un forum permet d'échanger sur ce thème en particulier.

On trouvera également son bonheur sur le site d'Hubert Roussel consacré à la photologie forestière, un sujet passionnant, mais aussi à la construction de moteurs Stirling [14]. Différentes maquettes sont proposées. Toutes dignes d'intérêt.

Enfin, citons un excellent portail relatif aux machines à vapeur, moteurs à air chaud et bateaux pop pop « blooo.fr » [15] mais il en existe d'autres.

16.3 Les livres avec des plans de construction

Difficile dans un livre généraliste tel que celui-ci de mettre également des plans de construction à destination des amateurs éclairés. Chaque moteur nécessite de nombreuses pages de descriptions côtéées de chacune des pièces.

C'est pourquoi a été pris le parti de renvoyer le lecteur à des livres qui ont été spécifiquement faits pour donner de la matière aux constructeurs.

En dehors des sites internet mentionnés ci-dessus, les ouvrages dignes de respect en la matière sont ceux de Rudy Mémin dont on trouvera les références dans la bibliographie de cet ouvrage [72] [73]. Les modèles y sont nombreux, divers et d'un grand intérêt tant sur le plan technique qu'esthétique.

16.4 Les constructions personnelles

Pourquoi ne pas se prendre pour un disciple de Robert Stirling et improviser autour de ses concepts ?

Concevoir un nouveau moteur fonctionnant parfaitement constitue la plus grande des satisfactions à s'offrir et le plus grand des hommages à rendre à Robert Stirling.

Il ne faut pas craindre les échecs souvent à la source des plus grandes innovations et inventions, à condition d'avoir le courage de les analyser.

Pour l'instant, nous allons admirer les magnifiques réalisations d'Henry Ganza. La lecture du livre « Le moteur Stirling et autres moteurs à air chaud » [57] l'a incité à construire des maquettes de moteurs Stirling et Manson d'une magnifique facture.

Les moteurs construits sont d'une grande originalité et plein d'astuces. Ils inspireront sans aucun doute d'autres amateurs éclairés.

Avec l'autorisation d'Henry Ganza, et pour notre plus grand plaisir, nous allons maintenant en examiner quelques uns.

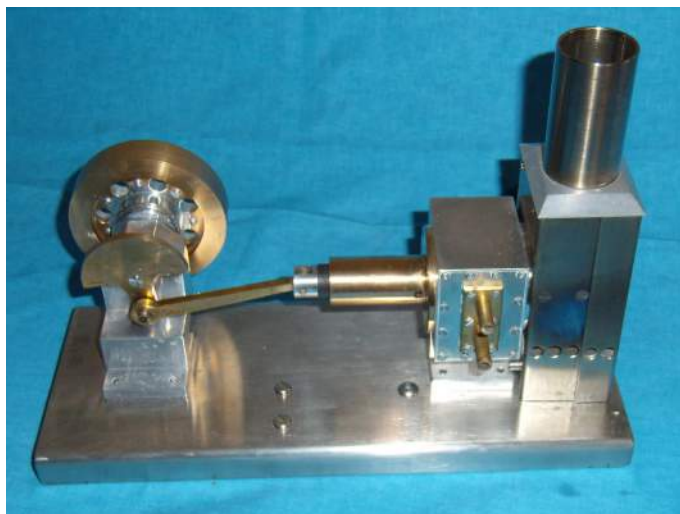


FIGURE 16.1 – Moteur Manson mono-cylindre



FIGURE 16.2 – Moteur Manson bi-cylindre



FIGURE 16.3 – Moteur Manson tri-cylindre



FIGURE 16.4 – Moteur Ringbom



FIGURE 16.5 – Moteur bêta - Embiellage rhomboïdal



FIGURE 16.6 – Moteur gamma - Piston membrane avec réserve d'eau supérieure

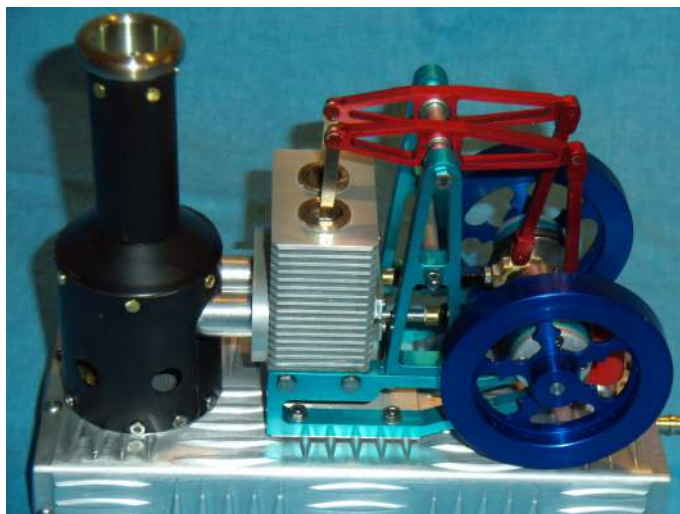


FIGURE 16.7 – Moteur gamma double - Décalage de 180 degrés entre les deux moteurs



FIGURE 16.8 – Moteur gamma double à embiellage oscillant



FIGURE 16.9 – Moteur gamma. Déphasage réglable en fonctionnement de 60 à 120 degré

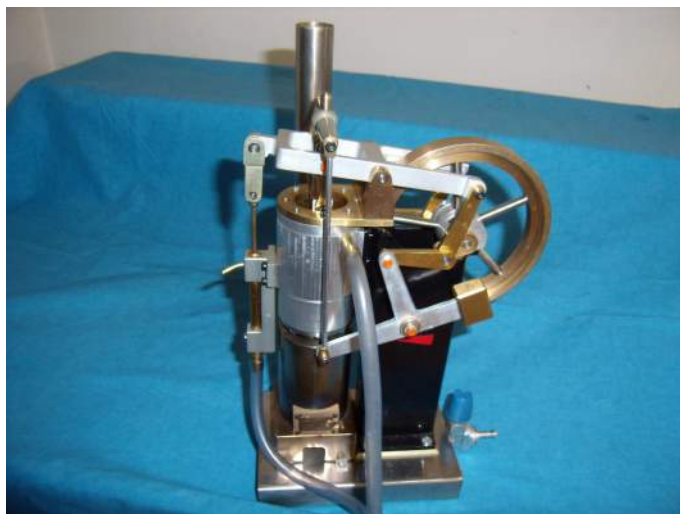


FIGURE 16.10 – Moteur Rider - Ericsson



FIGURE 16.11 – Moteur gamma 4 cylindres double-effet

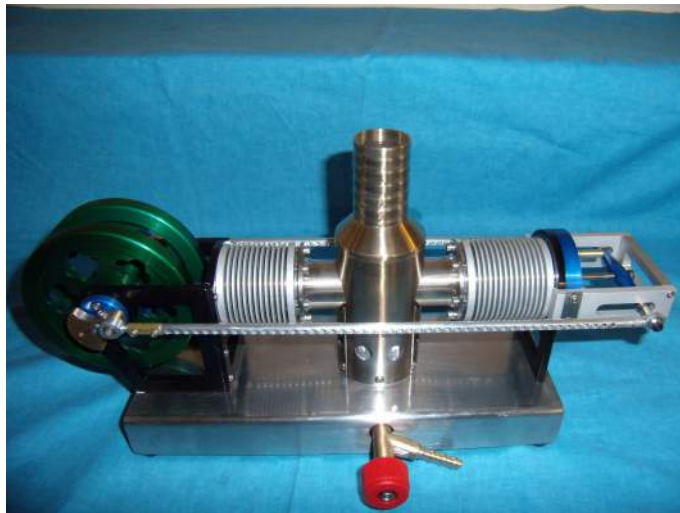


FIGURE 16.12 – Moteur Henry Essex à air chaud

Chapitre 17

Domaine spatial

Les satellites ont besoin d'énergie électrique. Dans cette optique, la NASA, toujours en pointe dans ce domaine, a développé un moteur Stirling à piston libre (Voir page 112, § 8.5.3). Le rendement serait particulièrement élevé vu les grandes différences de température disponibles. La source chaude serait constituée par des radio-isotopes instables qui, en se désintégrant, produisent de l'énergie sous forme de rayonnement. La source froide n'est autre que l'espace lui-même.

Jusqu'à maintenant, les satellites étaient équipés d'un système de production d'électricité basé sur la transformation des calories fournies par les radio-isotopes en électricité par l'intermédiaire de thermocouples. Le rendement est estimé quatre fois moindre que dans le cas où on utilise un moteur Stirling.

Une autre solution, à l'étude, est de réaliser une réaction nucléaire de fission pour produire, à petite échelle, de l'énergie thermique ensuite transformée en électricité via un moteur Stirling.

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 les panneaux solaires peuvent se salir ou être détruits dans certaines zones de l'espace, comme à proximité de Mars. Là encore, tout est question de compromis et d'acceptation ou non des risques associés à un procédé industriel.

Chapitre 18

Électronique et informatique

On a vu apparaître, en 2008, une utilisation très spécifique du moteur Stirling pour refroidir le microprocesseur d'un ordinateur.

Il s'agit d'un tout petit moteur Stirling qui utilise la majeure partie de l'énergie thermique dissipée par ce composant. Ce petit moteur entraîne un ventilateur qui élimine le restant de chaleur évacué par le microprocesseur.

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 ». La chaleur dissipée de la sorte est évaluée à 70%.

C'est la société MSI qui développait cette idée. Depuis, étrangement, on n'entend plus parler de cette utilisation. On n'en retiendra donc que le principe technologique, très intéressant (et le coup de pub associé!).

Une autre application, toujours à prendre avec précaution, consiste à recharger une batterie, de téléphone mobile par exemple, à partir d'un chargeur intégrant un moteur Stirling de type gamma.

Avec un tel appareil, il vous suffira de réaliser un écart de température en utilisant des glaçons ou alors une tasse d'eau chaude.

Là aussi, le principe est passionnant. Qu'en sera-t-il du développement de ce type de composant sachant qu'il existe des chargeurs solaires sur le marché pour assurer la même fonction ?

Chapitre 19

Pompage d'eau

Basée sur le cycle de Stirling, la pompe fluidyne permet de véhiculer de l'eau. Hormis des clapets, aucune pièce mécanique en mouvement n'est présente! Les pistons ont été remplacés par des colonnes d'eau qui se mettent en vibration. On peut y voir un moteur de type alpha ou un moteur de type gamma. Colin West théorisa le fonctionnement d'une telle pompe en 1987 [92] [65].

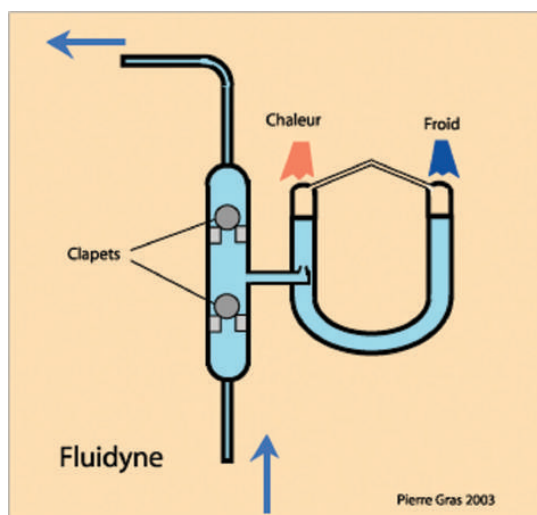


FIGURE 19.1 – Principe d'une pompe fluidyne

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 qui deviennent acceptables si on dispose d'énergie bon marché et abondante, le soleil par exemple.

Cette pompe fluidyne peut constituer un moyen économique d'irrigation des terres cultivées dans les pays chauds.

Pour cela, une production plus industrielle de cet appareil serait nécessaire. Actuellement, seuls quelques prototypes amateurs existent et marchent.

Ceci ne doit pas nous faire oublier le dispositif plus traditionnel consistant à coupler un moteur Stirling avec une pompe classique. Rappelons-nous que le pompage d'eau était devenu la principale application du moteur Stirling à la fin du XIX^{ème} siècle et au tout début du XX^{ème}.

Les déchets végétaux (bois, paille, branches, sciure, etc) sont souvent disponibles à proximité des exploitations agricoles utilisatrices de motopompes pour l'irrigation. Ils pourraient constituer le combustible de base, sans oublier la transformation des déjections animales en méthane par digestion anaérobique.

Cinquième partie

Théorie - Éléments de conception

*Le savant n'est pas l'homme qui fournit les vraies réponses,
c'est celui qui pose les vraies questions [67]*

Claude LÉVY STRAUSS (1908-2009)

Chapitre 20

L'air : définition et propriétés physiques

20.1 Composition de l'air

L'air n'est pas un corps simple tel qu'on l'entend en chimie en se référant au tableau périodique de Mendeleïev. Lavoisier le pressentit dès 1774 grâce à ses expériences.

L'air est principalement un mélange de plusieurs gaz mais pas exclusivement, à savoir :

- de l'azote : à 78%.
- de l'oxygène à 21%.
- de gaz rares à 1% : ceux-ci sont eux-mêmes constitués à 93% d'argon, puis de néon, de krypton et de xénon en faibles proportions.
- de dioxyde de carbone, de méthane, d'hydrogène, d'hélium, de monoxyde, dioxyde et protoxyde d'azote, d'ozone, de radon... en faibles ou très faibles quantités.
- d'eau dans des proportions très variables et fonction de la température. Par exemple, à -15°C l'air peut contenir au maximum 1g d'eau par kilo d'air, 27g à 30°C .
- Enfin de la poussière et des aérosols : sous forme liquide ou solide et mis en suspension de façon naturelle (volcans, incendies de forêts, érosion des sols par le vent) ou par les activités humaines (pollutions industrielles, automobiles).

20.2 Propriétés physiques de l'air ou des gaz

Ici, on n'étudiera les propriétés de l'air que sous sa forme gazeuse. D'ailleurs, il est illusoire de parler d'air liquide ou même solide sachant, qu'en fait, il s'agit d'un mélange constitué de corps qui ont leurs propres points de fusion ou d'ébullition.

C'est évident, mais ça va mieux en le disant.

L'air réagit aux variations de température, de pression ou de volume. Les inventeurs ou créateurs d'engin fonctionnant avec de l'air ne connaissaient nullement de façon théorique le comportement de ce gaz qui nous entoure. Cependant, tous avaient une forte intuition, un profond sens physique. À la lecture de cet ouvrage, vous serez probablement impressionnés que d'aussi nombreuses découvertes aient pu être faites par des techniciens, des ingénieurs bien avant que les théoriciens, les scientifiques ne mettent en équation les phénomènes physiques en jeu.

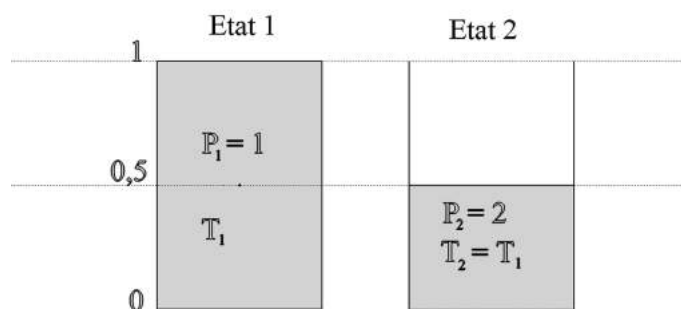
Ci-dessus, nous avons précisé les trois paramètres à suivre quant au comportement d'un gaz : température, volume et pression. Pour étudier sereinement les réactions d'un gaz à ces différents paramètres, nous allons patiemment et successivement imposer à un de ces paramètres de rester constant et voir le lien qui unit, dans chaque cas, les deux paramètres restants.

20.2.1 Loi de Boyle (1627-1691) - Mariotte (1620-1684) ou comportement d'un gaz à température constante

Boyle, irlandais, et Mariotte, français, sans se connaître, arrivèrent à la même conclusion :

À température constante, la pression d'un gaz est inversement proportionnelle à son volume.

Exemple : soit 1 m^3 d'air à la pression atmosphérique. Si on diminue son volume de moitié, sa pression va doubler à condition que sa température reste la même. Voir ci-dessous :



Loi de Boyle - Mariotte

FIGURE 20.1 – Exemple d'application de la loi Boyle-Mariotte

On peut résumer par une petite formule cette loi, à savoir :

$$PV = \text{constante} \quad (1)$$

pour une température donnée.

20.2.2 Loi de Charles (1746-1823) ou comportement d'un gaz à volume constant

Jacques Alexandre César Charles est surtout connu pour l'invention et la réalisation du premier ballon à hydrogène. Un concurrent aux frères Montgolfier ! (Voir page 42, chapitre 5.9)

Mais ici, on s'attachera à la loi qui porte son patronyme car c'est lui qui l'établit en premier même si c'est à Gay-Lussac que nous devons de la connaître :

**À volume constant, la pression d'un gaz
est proportionnelle à sa température absolue.**

Définition de la température absolue : cette échelle de température a pour unité le kelvin symbolisé K. La valeur d'un kelvin est la même que celle d'un degré Celsius. Par contre, 0 K est la température la plus basse qu'on puisse imaginer compte tenu des connaissances de la physique. Cette température minimale correspond, aux décimales près, à $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pour passer d'une température exprimée en kelvins à sa valeur en degrés Celsius, on retranche donc 273. Et vice versa, on ajoute 273 à une température exprimée en degrés Celsius pour l'obtenir en kelvins.

En physique et surtout en thermodynamique, science nécessaire à l'étude de nos moteurs à air chaud, on utilise cette échelle de température absolue.

Une petite formule encore pour écrire cette loi de Charles :

$$\frac{P}{T} = \text{constante} \quad (2)$$

pour un volume déterminé.

Maintenant, un exemple d'application de la loi de Charles : enfermons dans une enceinte étanche un gaz à la température de 27°C , soit $273 + 27 = 300\text{ K}$. Chauffons ce gaz à 327°C , soit $273 + 327 = 600\text{ K}$. La pression de notre gaz va doubler car sa température absolue a doublé en passant de 300 à 600 K. Voir ci-après :

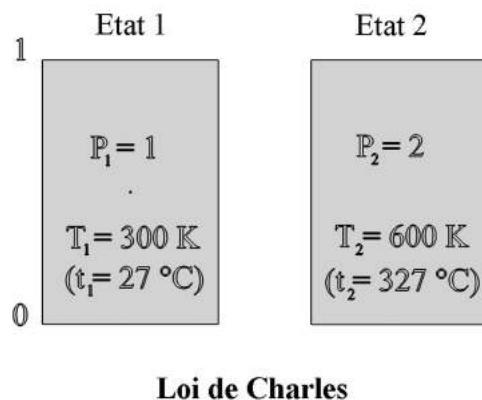


FIGURE 20.2 – Exemple d'application de la loi de Charles

Autre exemple pour les automobilistes que nous sommes presque tous : en été, par une température de 27°C ou 300 K , je gonfle mes pneus à $2,4 \text{ bar}$ (le bar est depuis longtemps une unité de pression abandonnée mais toujours utilisée parce que proche de la valeur de la pression atmosphérique). En hiver par -3°C ou 270 K , alors que le constructeur me conseille d'avoir la même pression de mes pneus, je n'aurai plus que :

$$2,4 \times \frac{270}{300} = 2,16 \text{ bar.}$$

Ma voiture sera donc sous-gonflée !

20.2.3 Loi de Gay-Lussac (1778-1850) ou étude du comportement d'un gaz à pression constante

Précédemment, nous avons travaillé à température puis à volume constant. Avec Gay-Lussac, nous allons voir le comportement d'un gaz à pression constante.

Dans cette configuration, la loi dite de Gay-Lussac s'énonce :

**À pression constante, le volume d'un gaz est proportionnel
à sa température absolue.**

Comme vous commencez à bien aimer les formules, on écrira cette loi ainsi :

$$\frac{V}{T} = \text{constante} \quad (3)$$

si la pression ne bouge pas.

Maintenant que nous savons ce qu'est la température absolue, nous allons prendre un exemple : soit un gaz à la pression atmosphérique, si nous faisons passer sa température de 27°C ou 300 K à 327°C ou 600 K nous allons doubler son volume initial. Voir ci-dessous :

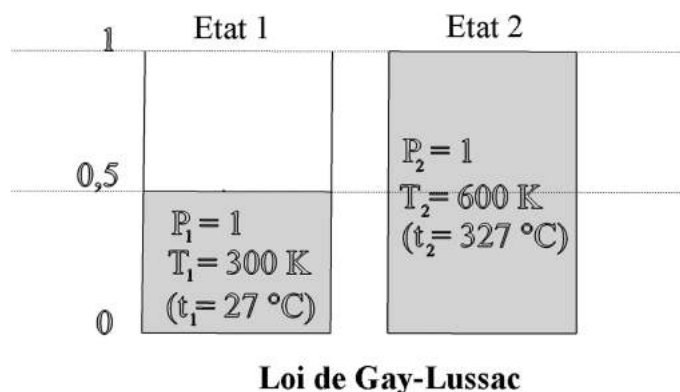


FIGURE 20.3 – Exemple d'application de la loi de Gay-Lussac

Une application de cette loi a été faite par les frères Montgolfier quand ils ont créé leur ballon. En chauffant l'air d'une montgolfière, celui-ci occupe plus de place. Il devient à volume égal plus léger que l'air froid qui entoure l'appareil. D'après les conclusions d'Archimède, le ballon s'envole. (Voir page 42, § 5.9)

20.2.4 Loi d'Avogadro (1776-1856) - Ampère (1775-1836) ou relation entre nombre de molécules et volume (à pression et température constantes)

Comme dans le cas de Boyle et Mariotte, sans se concerter, l'italien Avogadro et le lyonnais Ampère postulerent la loi suivante :

Si on considère deux volumes identiques mais contenant des gaz différents à une même température et une même pression, on a dans chacun des deux cas le même nombre de molécules.

Cette loi peut également s'énoncer de la façon suivante : le nombre de molécules d'un gaz est proportionnel à son volume dans des conditions de température et pression identiques. Ce nombre de molécules est le même quelle que soit la nature du gaz.

En équation, cela donne :

$$\frac{V}{n} = \text{constante} \quad (4)$$

À pression et température constantes, n est représentatif du nombre de molécules enfermées dans le volume V . On exprime ce nombre en moles pour des raisons pratiques en éviter d'avoir à manipuler des chiffres faramineux.

Une mole contient $6,02214 \cdot 10^{23}$ molécules ou 602 214 milliards de milliards de molécules. Ce nombre de molécules contenues dans une mole fut assez logiquement appelé nombre d'Avogadro symbolisé N_A .

Rassurez-vous, ni Avogadro ni Ampère n'ont compté une à une ces molécules. Ils se sont contentés, si on peut dire, d'énoncer la loi notée ci-dessus. Aujourd'hui, cette loi nous paraît évidente mais à l'époque de nos deux brillants chercheurs, celle-ci était révolutionnaire et même remise en cause par certaines « autorités » scientifiques de l'époque.

Ce nombre d'Avogadro a été déterminé bien plus tard par des chimistes qui s'appuyèrent sur une expérience d'électrolyse du cuivre en comparant la masse récupérée sur la cathode et le nombre d'électrons nécessaires à cette réaction. Ce comptage d'électrons n'a été possible qu'après les travaux de Millikan (prix Nobel 1923) qui détermina la valeur de la charge élémentaire (ou charge électrique d'un proton ou électron).[4]

Précédemment, Meyer, Loschmidt ou Maxwell déterminèrent eux aussi, de façon moins précise, la dimension d'une molécule.[64]

Quant au français Jean Perrin (pris Nobel en 1926), il détermina de différentes façon la valeur du nombre d'Avogadro en s'inspirant des travaux d'Einstein ou de Maxwell.

Un petit exemple d'application de la loi d'Avogadro-Ampère :

Air	Hydrogène
$V = 1 \text{ m}^3$	$V = 1 \text{ m}^3$
Pression atmosphérique	Pression atmosphérique
$t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
$m = 1293 \text{ g}$	$m = 90 \text{ g}$
Nb de moles : 44,6	Nb de moles : 44,6

FIGURE 20.4 – Comparaison de deux gaz différents

Pour mettre en évidence la loi d'Avogadro-Ampère, on compare ci-dessus les caractéristiques de l'air et de l'hydrogène. Le volume, la pression et la température sont identiques. L'hydrogène est 14 fois plus léger. Cependant, le nombre de moles ou molécules est identique dans les deux cas.

20.2.5 Loi générale

Difficile cette partie relative au comportement des gaz ? On va résumer cela en une seule formule !

D'abord, rappelons nous les équations écrites ci-dessus, à savoir :

- loi de Boyle-Mariotte : $PV = \text{constante}$ (1) si T est constante
- loi de Charles : $\frac{P}{T} = \text{constante}$ (2) si V est constant
- loi de Gay-Lussac : $\frac{V}{T} = \text{constante}$ (3) si P est constante
- loi d'Avogadro-Ampère : $\frac{V}{n} = \text{constante}$ (4) si P et T sont constantes.

La formule suivante devrait satisfaire les quatre premières :

$$\frac{PV}{T} = nR(5)$$

En éliminant P, T ou V quand ces valeurs ne changent pas, on vérifie les équations précédentes.

n représente la quantité de matière exprimée en moles (une mole = $6,02214 \cdot 10^{23}$ molécules pour mémoire).

**R est appelé constante universelle des gaz parfaits,
elle vaut $8,3144621 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$**

Cette formule est donc universelle et s'applique à tous les gaz.

Si on préfère travailler avec la masse m du gaz étudié et non son nombre de moles n, il nous faut alors introduire sa constante spécifique R_S , ce que nous allons voir ci-dessous :

Si M est la masse d'une mole ou masse molaire, la masse de n moles de gaz vaut $m = nM$

on peut écrire cette équation ainsi : $n = \frac{m}{M}$

l'équation (5) devient : $\frac{PV}{T} = \frac{m}{M}R$ ou

$$\frac{PV}{T} = mR_S(6) \text{ où}$$

$$R_S = \frac{R}{M}$$

R_S est nommée constante spécifique ou individuelle du gaz concerné.

Chapitre 21

La thermodynamique : principes de base

La Thermodynamique est une partie de la Physique qui étudie, pour ce qui nous concerne, les transformations d'énergie calorifique en énergie mécanique, et réciproquement. Ci-dessous, nous allons passer en revue les idées forces qu'il est nécessaire d'avoir à l'esprit pour mieux comprendre le fonctionnement de nos moteurs à apport de chaleur externe. Nous allons faire ceci avec des mots et des concepts simples.

21.1 Sadi Carnot : inventeur des bases de la thermodynamique

Les grandes idées de Sadi Carnot issues de son livre « Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance » [41] sont rappelées ci-dessous :

- Pour obtenir de l'énergie mécanique à partir de chaleur, il faut nécessairement une source froide et une source chaude.

On peut faire le parallèle avec l'énergie hydraulique : pour obtenir de l'énergie mécanique sur la roue hydraulique ou la turbine, il nous faut un réservoir d'eau en hauteur et un autre plus bas pour que le fluide puisse circuler.[84]

Il en va de même pour les calories qui vont se véhiculer de la source chaude vers la source froide en concédant de l'énergie mécanique sur leur parcours.

- Sadi Carnot parle de la notion de « calorique », une sorte de fluide véhiculant les calories, car à l'époque les notions de quantité de chaleur, de transfert thermique n'avaient pas encore été théorisées.

- La transformation de chaleur en énergie mécanique est possible. À l'inverse on peut transformer de l'énergie mécanique en énergie calorifique.

Ces notions, aujourd'hui, nous paraissent évidentes. Elles ne l'étaient pas en 1824, quand le livre fut écrit.

21.2 Travaux de Joule

Des nombreux travaux de Joule, nous retiendrons ici celui qui a consisté à établir l'équivalence entre énergie calorifique exprimée en calories et énergie mécanique exprimée en joules. À savoir :

1 calorie équivaut à 4,1855 joules

Rappel :

- pour élever la température d'un gramme d'eau d'un degré Celsius, il faut lui fournir une calorie.
- un joule correspond au travail produit par une force d'un newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force.

21.3 Conservation d'énergie

De nombreux physiciens pressentaient cette notion de conservation d'énergie mais le premier à l'avoir formulée de façon rigoureuse est Julius Robert von Mayer. Cette loi constitue le premier principe de la thermodynamique.

Pour faire simple, ce principe revient à dire qu'on peut transformer une énergie sous une forme déterminée en une autre forme d'énergie mais la quantité d'énergie d'origine et la quantité finale auront la même valeur. Il n'y a pas de pertes au cours de la transformation.

D'autres l'avaient dit bien avant :

« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme », telle était la maxime de Lavoisier.

« Rien ne naît ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau » affirmait Anaxagore, 500 ans avant notre ère.

21.4 Étude d'un cycle thermodynamique - Diagramme de Clapeyron ou diagramme Pression-Volume

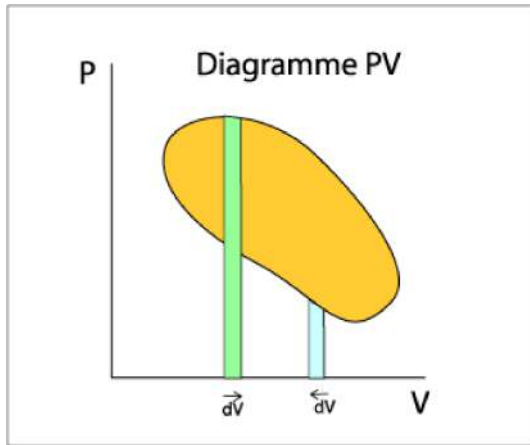


FIGURE 21.1 – Diagramme PV d'un cycle quelconque

Après ce qui vient d'être dit précédemment sur la conservation d'énergie, on peut aborder les échanges d'énergie au cours d'un cycle et écrire 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.

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

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.

$$dW = F dy \text{ ou } dW = S P dy$$

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, $dV < 0$.

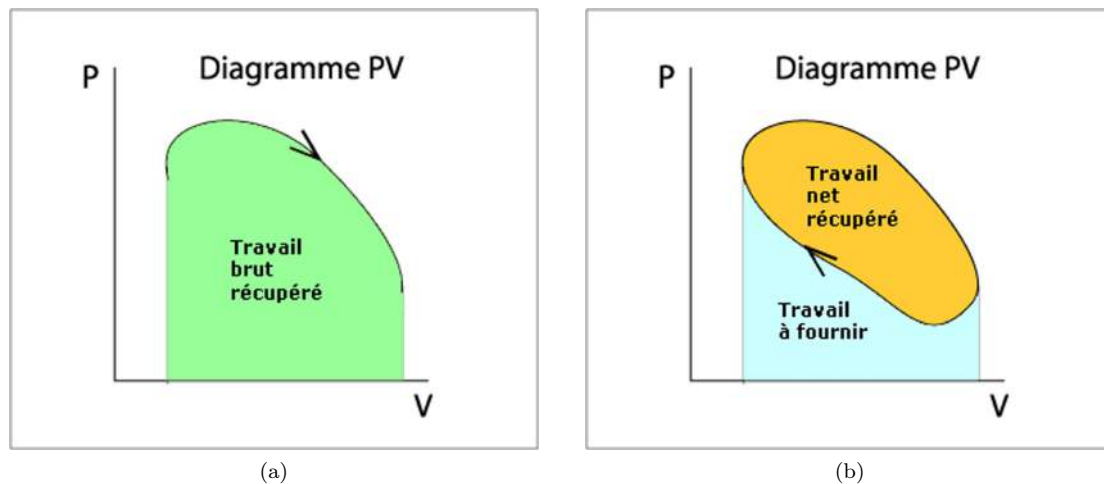


FIGURE 21.2 – Bilan énergétique d'un cycle quelconque

Le travail résultant au cours d'un cycle est donc représenté par la surface sous la courbe quand $dV > 0$ (zone verte de la figure 21.2) diminuée de la surface sous la courbe quand le volume décroît, $dV < 0$ (zone bleue de la même figure).

C'est donc la surface comprise entre les courbes (zone jaune de la figure 21.2). cqfd!

21.5 Le rendement d'un cycle thermodynamique

Le rendement d'un moteur est défini comme étant le rapport entre le travail net récupéré au cours d'un cycle et la quantité de chaleur qu'il a fallu fournir au cours de ce même cycle. Il est toujours inférieur à 1.

L'équation définissant ce rendement est fonction du cycle considéré. Dans cet ouvrage, seuls les cas concrets des rendements du moteur Stirling et du moteur Ericsson seront étudiés.

Dans le cas d'une pompe à chaleur, c'est tout l'inverse : on doit fournir de l'énergie mécanique pour récupérer des calories. Pour mesurer l'efficacité d'une telle machine, plutôt que de parler de rendement, on

définit le coefficient de performance ou COP. Celui-ci est égal au rapport entre l'énergie calorifique récupérée et l'énergie mécanique (ou électrique) fournie. Il est nettement supérieur à 1, en général de 3 à 5.

Le moteur Stirling sera étudié en tant que moteur réversible capable de se transformer en pompe à chaleur ou machine frigorifique. La valeur du COP sera déterminée selon qu'on cherche à faire du chaud ou du froid (voir page 193, § 30.2).

21.6 Les différents cycles thermodynamiques

Chaque moteur à air chaud ou à apport de chaleur externe utilise un cycle thermodynamique bien précis. C'est pourquoi nous allons passer en revue les plus connus.

Mais auparavant, nous allons donner quelques définitions pour mieux comprendre les différents graphiques :

Transformation isotherme : qui se réalise à température constante.

Transformation isochore : qui se réalise à volume constant.

Transformation isobare : qui se réalise à pression constante.

Transformation isentropique : qui se réalise à entropie constante ou sans échange de chaleur avec le milieu extérieur.

Transformation adiabatique : idem transformation isentropique.

On trouve ainsi :

21.6.1 Le cycle de Carnot

Deux isothermes (AB-CD), deux isentropiques ou adiabatiques (BC-DA).

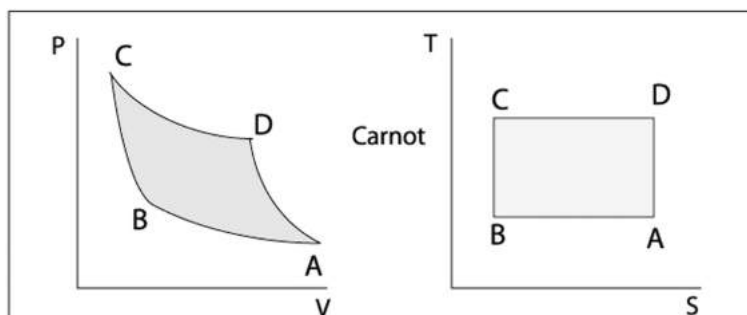


FIGURE 21.3 – Diagrammes PV et entropique du cycle de Carnot

21.6.2 Le cycle de Stirling

Deux isothermes (AB-CD), deux isochores (BC-DA).

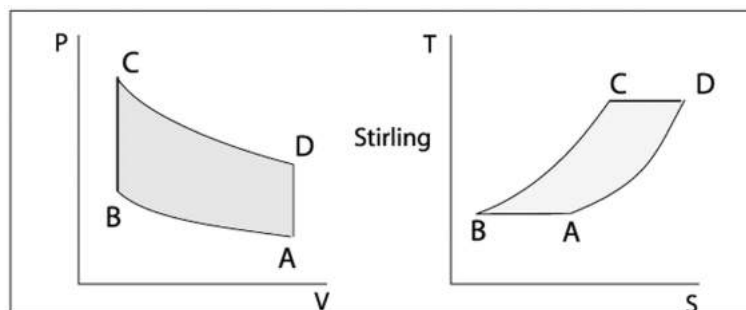


FIGURE 21.4 – Diagrammes PV et entropique du cycle de Stirling

21.6.3 Le cycle d'Ericsson

Deux isobares (AB-CD), deux isothermes(BC-DA).¹

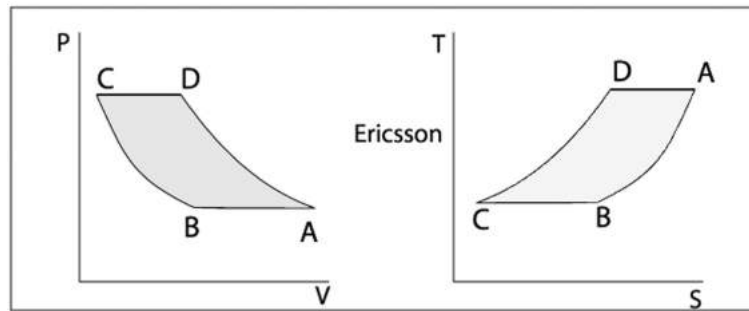


FIGURE 21.5 – Diagrammes PV et entropique du cycle d'Ericsson

21.6.4 Le cycle de Joule (ou Brayton)

Deux isobares (AB-CD), deux isentropiques ou adiabatiques (BC-DA).

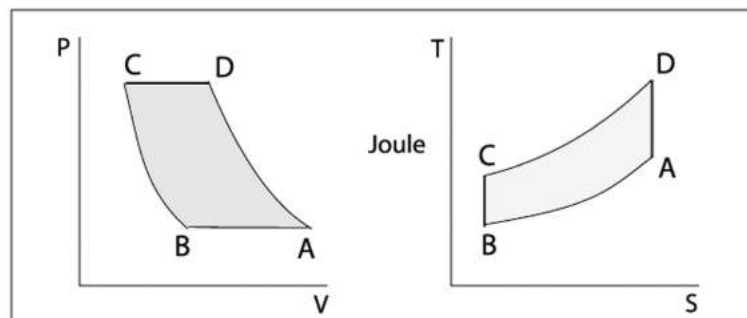


FIGURE 21.6 – Diagrammes PV et entropique du cycle de Joule

21.6.5 Le cycle de Beau de Rochas

Deux isochores (AB-CD), deux isentropiques ou adiabatiques (BC-DA).

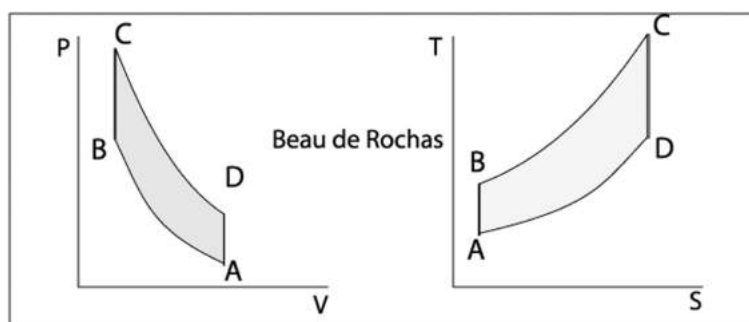


FIGURE 21.7 – Diagrammes PV et entropique du cycle de Beau de Rochas

Tous ces cycles sont purement théoriques. Dans la réalité, l'ingénieur, le concepteur, cherchera toujours à obtenir un cycle le plus proche du cycle idéal sans y parvenir totalement.

1. Ericsson a d'abord utilisé le cycle de Joule avant d'adopter celui qui porte son nom, puis de s'intéresser au cycle de Stirling.

Chapitre 22

Cinématique

Dans un moteur Stirling ou tout autre moteur thermique, à apport de chaleur externe ou non, il est bien souvent nécessaire de transformer un mouvement mécanique linéaire en un mouvement de rotation et vice versa.

Au cours de l'histoire, les ingénieurs ont réfléchi à la meilleure façon de résoudre ce problème. Ci-dessous sont présentés, de manière non exhaustive, les principaux mécanismes mis au point au fil du temps.

22.1 Bielle manivelle

22.1.1 Système mono-piston

Dès le début de notre ère, les Chinois utilisaient le système bielle-manivelle pour actionner les soufflets de leurs hauts-fourneaux [60]. Il fallut attendre plusieurs siècles pour que l'Occident s'intéresse à ce dispositif. Aujourd'hui, notre univers serait tout différent si ce mécanisme n'avait pas été inventé !

Nous allons maintenant étudier un système bielle-manivelle tel que celui qui est utilisé pour animer un piston à partir de la rotation d'un arbre moteur.

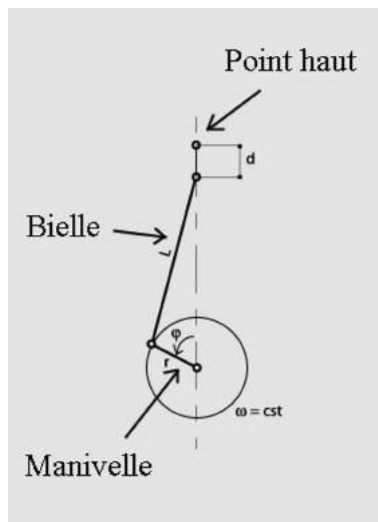


FIGURE 22.1 – Bielle-manivelle simple

On suppose, tout d'abord, que les mouvements des pièces mobiles du moteur sont la conséquence de la rotation uniforme (Vitesse angulaire $\omega = \text{constante}$) d'un arbre moteur de 0° à 360° à chaque cycle.

On commence par définir la valeur

$$\lambda = \frac{r}{L}$$

En supposant λ petit, quand l'angle parcouru est ϕ , la valeur de d est :

$$d = r (1 - \cos \phi) + 0,5 \lambda \sin^2 \phi$$

Quand on connaît la section du piston S , il est facile de déterminer le volume V de gaz situé au dessus du piston à chaque instant, pour un angle ϕ donné.

$$V = d S$$

22.1.2 Le système bielle-manivelle avec deux équipages mobiles

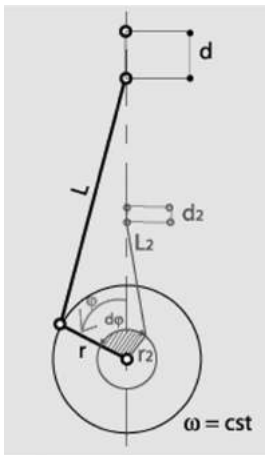


FIGURE 22.2 – Bielle-manivelle double

Quand on a plusieurs pistons (moteur Stirling alpha par exemple) ou un piston moteur et un déplaceur (moteurs Stirling bêta et gamma par exemple), il convient de prendre en compte le déphasage $d\phi$ entre les deux équipages.

L'équation (22.1.1) devient alors, pour le second élément :

$$d_2 = r_2 [1 - \cos(\phi - d\phi)] + 0,5 \lambda_2 r_2 \sin^2(\phi - d\phi)$$

$$\text{où } \lambda_2 = \frac{r_2}{L_2}$$

De la même façon que ci-dessus, à chaque instant, pour chaque valeur angulaire ϕ , on obtient la valeur du volume instantané V_2 correspondant :

$$V_2 = d_2 S_2$$

22.2 Embiellage rhomboïdal

La société Philips au cours de ses nombreux travaux de recherche a étudié et adopté un moteur ayant un embiellage rhomboïdal (voir § 6.7.3, page 81). Quand nous avons examiné le moteur Stirling bêta, c'est avec un moteur de ce type que nous avons raisonné.

Ci-dessous, on peut voir une vue d'ensemble de ce dispositif d'entraînement et les détails de l'embiellage.

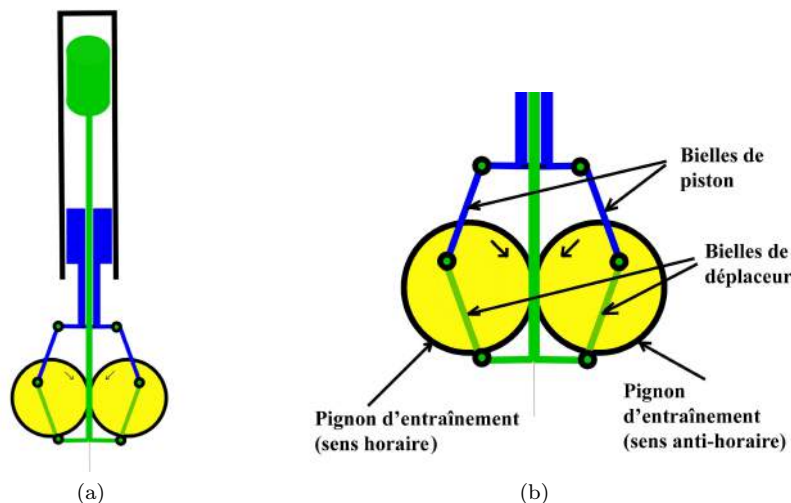


FIGURE 22.3 – Embiellage rhomboïdal - Détails

En fait, deux pignons tournent de façon solidaire, un dans le sens horaire, l'autre dans le sens anti-horaire. Les manetons fixés sur ces pignons imposent le déplacement des bielles qui y sont rattachées.

On déforme ainsi deux losanges, un bleu et un vert qui ont leurs grands côtés communs (non représentés sur le schéma).

Le déplaceur et le piston montent et descendent ainsi à chaque rotation des pignons.

Ce système, très original, présente les avantages listés ci-dessous [58] :

- Une absence d'effort latéral car les pistons ont un mouvement selon l'axe du cylindre. Ceci facilite la réalisation d'une bonne étanchéité au niveau des pièces en mouvement.

- Une capacité à accepter de fortes pressions et d'autres fluides que l'air tels que l'hydrogène ou l'hélium.

- Un équilibrage facilité.

- Des vibrations très réduites.

- Un respect plus strict du cycle de Stirling en maîtrisant mieux l'avance de phase entre les deux pistons.

(Pour rappel voir les diagrammes PV et variations de volumes présentés aux § 8.3.5 et 8.3.6, pages 106 et 106)

22.3 Plateau cyclique ou swashplate

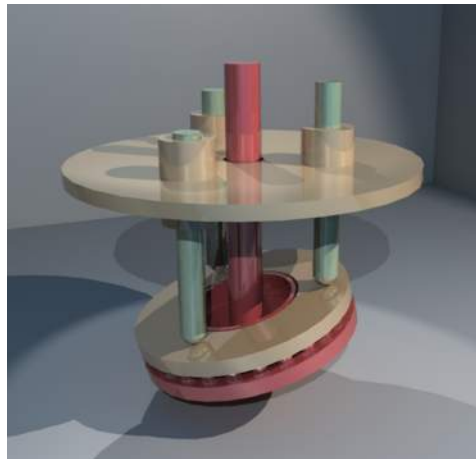


FIGURE 22.4 – Plateau cyclique ou swashplate[62]

Pour piloter plusieurs pistons avec des courses ayant un décalage angulaire entre eux, on peut utiliser un plateau cyclique ou swashplate. Différents moteurs Stirling l'utilisèrent ou l'utilisent encore. En particulier, la société Philips développa plusieurs moteurs de ce type au cours des années soixante.

Le principe est simple, voir l'image ci-dessus :

Le plateau et l'arbre gris rose sont solidaires et constitue la partie tournante.

Quand l'arbre est en rotation, le plateau fixe gris oscille comme son homologue rose.

Les axes des différents pistons montent et descendent de façon cyclique à chaque rotation.

Ce système est réversible c'est-à-dire que le mouvement des pistons peut faire tourner l'arbre.

(NB : dans un tout autre domaine, les plateaux cycliques constituent la pièce maîtresse d'un hélicoptère pour orienter les pales d'un hélicoptère au cours de leur rotation.)

22.4 Embiellage joug

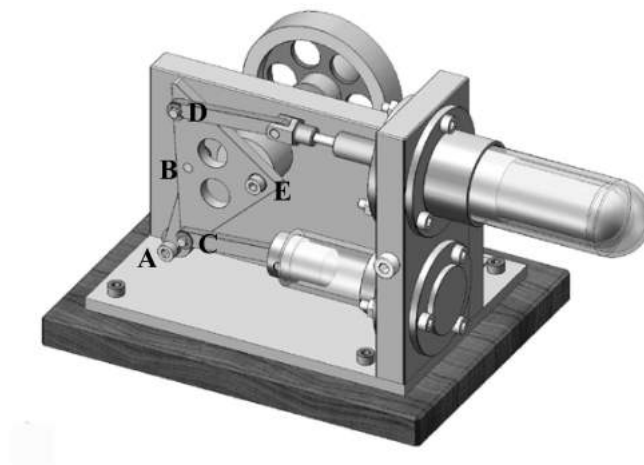


FIGURE 22.5 – Embiellage joug

Merci à Jean Rousseau pour la réalisation de cette magnifique image de synthèse.

- le point A est fixe.
- la bielle AB est reliée par le point B à la pièce triangulaire.
- cette dernière est animée par la manivelle via le point E.
- les pistons sont actionnés grâce aux bielles fixées en C et D.

L'embiellage joug présente les avantages suivants :

- Les efforts radiaux sont limités ce qui réduit frottement et usure. Un fonctionnement sans huile est rendu possible.
- L'encombrement est réduit pour un faible poids. L'équilibrage est aisément faisable.

Dès le XIX^{ème} siècle, des machines à vapeur étaient équipés d'un tel dispositif, plus particulièrement celles de John Musgrave et celles de Joseph Bernays [1].

Chapitre 23

Propagation de la chaleur

Dans ce livre, nous avons souvent parlé de gaz parfait et de sa température en différents endroits de notre moteur.

Nous avons implicitement supposé que ce gaz se réchauffait ou se refroidissait instantanément au contact des pièces chaudes ou froides.

Ce n'est pas le cas. Certains gaz possèdent une meilleure capacité de se mettre en température que d'autres : l'hydrogène et l'hélium se montrent supérieurs à l'air et à l'azote par exemple.

Pour en être persuadé, la propagation de la chaleur au sein d'un gaz est étudiée de façon théorique ci-dessous.

Il est profitable de prendre quelques minutes pour bien comprendre ce phénomène. En effet, il est indispensable de bien assimiler cette « mécanique » de transmission de chaleur pour concevoir correctement un moteur, choisir le fluide moteur, assurer sa propre sécurité...

Jean-Pierre Van Dormael est à l'origine de ces explications. Merci à lui de les avoir fournies gracieusement au site internet relatif au moteur Stirling [21].

Si vous êtes rétifs aux équations complexes, allez directement au sous-chapitre 23.3 pour voir les retombées concrètes de cette analyse sur la conception d'un moteur.

Introduction On sait que le son se déplace dans l'air à environ 340 mètres par seconde. Pour un moteur à air chaud, cette vitesse élevée permet d'admettre que, si on fait abstraction des pertes de charge dans les échangeurs, la pression instantanée est la même dans tout le moteur et à tout moment. Cette hypothèse est souvent faite dans les méthodes de calcul élémentaires des moteurs.

La vitesse de propagation de la chaleur dans un gaz est beaucoup moins connue parce que les mécanismes en présence sont beaucoup plus compliqués. Essayons d'y voir un peu plus clair.

23.1 Les principes expérimentaux

L'équation qui décrit la propagation de la chaleur dans une substance se déduit de trois constatations expérimentales simples.

- La première est qu'en tout point d'une substance, la chaleur s'écoule du chaud vers le froid. La quantité de chaleur s'écoulant par seconde (c'est-à-dire son courant) est proportionnelle à deux choses : la conductivité thermique (voir définition page 225) de la substance et la pente avec laquelle la température décroît à l'endroit de l'écoulement.

- La deuxième, expérimentale, est que la température d'un volume contenant une substance augmente lorsqu'une quantité de chaleur y pénètre. Cette augmentation de température est bien sûr proportionnelle à la quantité de chaleur reçue et inversement proportionnelle au volume, à la densité de la substance qui s'y trouve et à sa chaleur spécifique (voir définition page 225).

- La troisième, toujours expérimentale, est qu'aucune énergie ne se crée à partir de rien. Il en résulte un principe de continuité : la chaleur qui pénètre dans un élément de volume (selon la première constatation) doit nécessairement correspondre à celle qui en fait augmenter la température (selon la deuxième constatation). Autrement dit, en l'absence d'une source de chaleur dans le volume même, les deux chaleurs susdites doivent être égales sinon il y aurait création de chaleur spontanée, ce qui n'est pas possible.

23.2 Les équations

Pour exprimer mathématiquement ces réalités physiques, nous nous contenterons d'une seule dimension de l'espace. Cela suffit à décrire ce qui se passe dans un fil ou dans un tube long et fin rempli de gaz. On indiquera par $T(x,t)$ que la température T est une fonction de la position x dans le tube et du temps t de l'observation.

Nous ferons encore l'hypothèse simplificatrice que la conductivité thermique et la chaleur spécifique des matériaux sont des constantes. Ce n'est pas le cas mais sans très grande importance pour nous : ce qui nous intéresse c'est de comprendre les mécanismes physiques en présence.

La première constatation exprimée ci-dessus peut s'écrire comme suit :

$$\delta Q = -k S \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \delta t \quad (23.1)$$

C'est-à-dire que la quantité de chaleur δQ (en joule) s'écoulant pendant un court laps de temps δt (en sec) à travers une surface S (en m^2), est proportionnelle à la chute de température δT (en Kelvin) constatée à l'endroit x au moment t , sur une courte distance δx (en m) prise dans le sens de l'écoulement.

Le rapport $\frac{\delta T(x, t)}{\delta x}$ n'est autre que la dérivée partielle première de T par rapport à x , c'est-à-dire sa pente. Le coefficient de proportionnalité **k est la conductivité thermique** de la substance (ou sa capacité de conduire la chaleur) et le signe moins indique que l'écoulement se fait dans le sens de la chute de température.

Si on considère un petit volume de tube ou de fil, de section S et d'épaisseur δx , la quantité nette de chaleur qui y pénètre est égale à celle qui y entre à l'endroit x , moins celle qui en sort à $(x + \Delta x)$. On peut écrire en tenant compte des signes :

$$\delta Q = k S \left[\frac{\delta T(x + \Delta x, t)}{\delta x} - \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \right] \delta t \quad (23.2)$$

La seconde constatation expérimentale peut s'écrire de la façon suivante :

$$\delta Q = \rho c \delta T S \Delta x \quad (23.3)$$

c.-à-d. que la quantité de chaleur δQ (en joule), qui a pénétré dans le petit volume $S \Delta x$ (en m^3), y a provoqué une augmentation de température δT (en K).

Les coefficients de proportionnalité **ρ et c sont respectivement la densité de la substance (en kg/m^3) et sa chaleur spécifique (en $Joule/kg/K$).**

Cette dernière exprime la quantité de chaleur qu'il faut pour élever d'un degré la température d'un kg de la substance.

Pour les gaz qui sont compressibles, cette quantité est différente selon que l'opération se fait à volume ou à pression constante. Nous avons utilisé ci-dessous les valeurs correspondant au volume constant.

Enfin, le troisième fait physique, celui de la continuité, s'écrit en égalant les termes δQ des équations (23.2) et (23.3).

$$\rho c \delta T S \Delta x = k S \left[\frac{\delta T(x + \Delta x, t)}{\delta x} - \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \right] \delta t \quad (23.4)$$

En réarrangeant cette équation en la divisant par δt , par (ρc) , par S et par Δx , on obtient :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{k}{\rho c \Delta x} \left[\frac{\delta T(x + \Delta x, t)}{\delta x} - \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \right] \quad (23.5)$$

Cette équation dit que la variation de température δT pendant le court laps de temps δt , c.-à-d. la vitesse avec laquelle la température varie, est proportionnelle à la variation de la pente de la température ($\delta T/\delta x$) sur la distance Δx .

Le coefficient de proportionnalité est $\frac{k}{\rho c}$.

Si on fait tendre Δx vers zéro, l'expression $\frac{1}{\Delta x} \left[\frac{\delta T(x + \Delta x, t)}{\delta x} - \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \right]$ devient la dérivée partielle seconde de T par rapport à x qui s'écrit $\frac{\delta^2 T}{\delta x^2}$.

L'équation (23.5) devient finalement :

Équation différentielle partielle de la chaleur.

$$\boxed{\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{k}{\rho c} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2}} \quad (23.6)$$

Cette équation permet de calculer le profil de température en fonction du temps, dans un tube isolé, rempli de gaz et terminé aux deux bouts par une source chaude et une source froide. Sa résolution n'est pas évidente. Pour ce faire, on utilise les fameuses séries harmoniques de Fourier. On n'en fera pas usage ici mais il est possible,

sous certaines conditions, de résoudre numériquement l'équation avec un tableur par approximations successives au moyen de la méthode des différences finies.

C'est ce que nous avons fait et voici ci-dessous le résultat. La source chaude à 800 K est à l'extrémité gauche du tube ($x = 0$). Au départ tout le gaz est à 300 K.

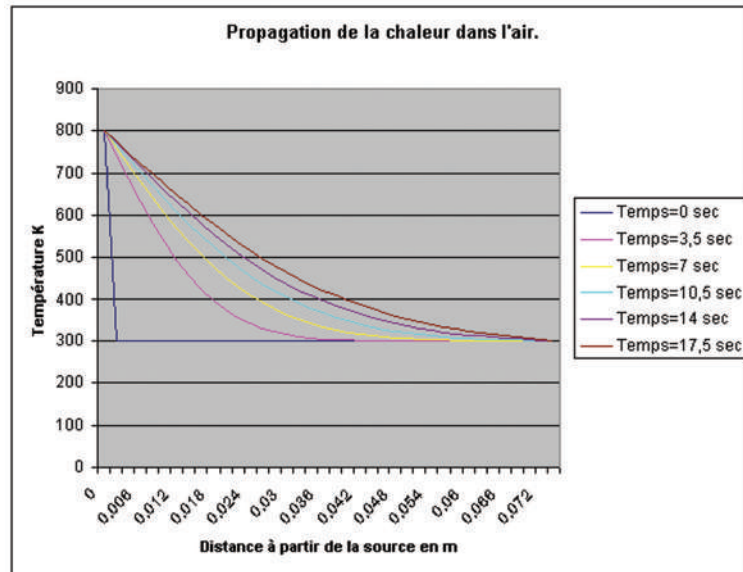


FIGURE 23.1 – Propagation de la chaleur dans l'air

23.3 Et nos moteurs dans tout cela ?

L'équation (23.6) montre en tout cas que la vitesse $\frac{\delta T}{\delta t}$ avec laquelle la température varie en un point, est proportionnelle à la « constante » $\frac{k}{\rho c}$ du gaz utilisé. Et c'est là que l'hydrogène et l'hélium montrent une supériorité par rapport à l'air ou l'azote. Dans ce qui suit, k s'exprime en watt/mètre/K, ρ en kg/m^3 et c en joule/kg/K.

$$\text{Pour l'air : } \frac{k}{\rho c} = \frac{0,025}{(1,29)(718)} = 0,000027 m^2/sec).$$

$$\text{Pour l'hélium : } \frac{k}{\rho c} = \frac{0,14}{(0,164)(3116)} = 0,00027 m^2/sec \text{ (10 fois plus que l'air).}$$

$$\text{Pour l'hydrogène : } \frac{k}{\rho c} = \frac{0,18}{(0,083)(10183)} = 0,00021 m^2/sec \text{ (8 fois plus que l'air).}$$

$$\text{Pour l'azote : } \frac{k}{\rho c} = \frac{0,026}{(1,15)(743)} = 0,00003 m^2/sec \text{ (quasi comme l'air).}$$

A titre de comparaison avec un métal :

$$\text{Pour le cuivre : } \frac{k}{\rho c} = \frac{401}{(8900)(386)} = 0,00012 m^2/sec \text{ (4,4 fois plus que l'air).}$$

$$\text{Pour l'acier : } \frac{k}{\rho c} = \frac{80,2}{(7840)(450)} = 0,0000227 m^2/sec \text{ (un peu moins que l'air).}$$

Plus vite la chaleur diffuse dans le gaz, plus vite on pourra faire tourner le moteur et gagner en puissance et/ou en rendement. Lorsqu'on résout l'équation (23.6) numériquement (voir le graphique), on est surpris de constater que la vitesse de diffusion chute rapidement à moins de 3 mm/sec ! C'est plus de 100.000 fois plus lent que la vitesse du son ou de la pression.

Ce n'est vraiment pas rapide et montre que dans un moteur, la totalité du gaz à réchauffer ou à refroidir doit être en contact très intime avec les échangeurs. C'est ce qui fait généralement défaut dans les moteurs insuffisamment étudiés qui ont un rendement et une puissance très inférieurs à ce qu'un calcul grossier « sur un cul de lettre » ¹ laissait espérer.

1. Probablement une expression belge bien sympathique.

Il est encore important de retenir que si on utilise de l'air ou de l'azote par exemple et que si le moteur ne tourne pas trop vite et que si les échangeurs sont efficaces sans trop de pertes de charge (= chutes de pression), de telle sorte que le gaz a le temps de s'échauffer et de se refroidir dans toute sa masse durant le cycle, il est tout à fait inutile de passer à l'hélium ou à l'hydrogène si toutes les autres conditions restent les mêmes par ailleurs. Dans ce cas, la seule façon d'augmenter la puissance d'un moteur sans changer sa configuration ou sa vitesse initiales, est d'augmenter la pression moyenne interne du gaz, quel qu'il soit. Une mise en garde s'impose ici à l'attention de ceux qui aimeraient essayer cette technique sur un modèle.

L'utilisation de l'air à haute pression dans un moteur peut provoquer l'explosion des vapeurs de l'huile de lubrification par effet diesel et la destruction du moteur. Ce genre d'explosion a déjà causé la mort d'expérimentateurs chevronnés, entre autres chez Philips lors de la mise au point d'un moteur Stirling. Mieux vaut s'en tenir à des pressions faibles quand on utilise de l'air ou passer à un gaz inerte tel que l'azote ou l'hélium si on veut utiliser de fortes pressions.

Enfin, il faut encore se rappeler que la vitesse de propagation de la chaleur dans le gaz n'est pas le seul facteur jouant sur le rendement et la vitesse de rotation d'un moteur. La qualité du transfert de chaleur entre les échangeurs et le gaz influe aussi sur ces paramètres. La vitesse de ce transfert est grosso-modo proportionnelle à la différence de température et à la surface de l'échangeur. La théorie est fort complexe mais on constate, en pratique, que l'échange de chaleur est inversement proportionnel à la densité du gaz. On voit que, là aussi, l'hydrogène et l'hélium ont un net avantage sur l'air ou l'azote.

Chapitre 24

Calculer son moteur

Calculer un moteur, c'est facile !

Il suffit de réunir nos connaissances en thermodynamique et en cinématique acquises précédemment aux chapitres 21 et 22.

Dans un premier temps, nous allons définir les différents volumes présents dans notre moteur. Ensuite, nous attribuerons à chacun de ces volumes leur température de travail.

Enfin, nous pourrons calculer la pression régnant dans le moteur pour chaque valeur de rotation de l'arbre principal.

24.1 Détermination des différents volumes

En fonction de votre moteur, il y a plusieurs volumes à considérer, par exemple :

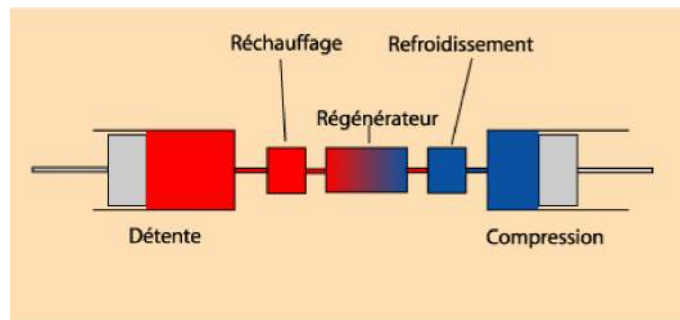


FIGURE 24.1 – Exemple de recensement de volumes en présence dans un moteur

- un volume de détente,
- un volume de refroidissement,
- un volume de régénération de la chaleur,
- un volume de réchauffage,
- un volume de compression,
- des volumes morts,
- etc.

Ceci est vrai quel que soit le type de moteur.

Selon les moteurs, ce qui change c'est l'expression de ces différents volumes.

Ceux-ci varient, ou non, dans le temps en fonction de la variable d'entrée qui est l'angle de rotation (pour les systèmes bielle-manivelle en particulier) de l'arbre moteur.

24.2 Détermination des différentes températures

À chacun des volumes définis ci-dessus, on associe une température. Par exemple :

- la température maximale,
- la température minimale,
- la température moyenne (pour le régénérateur par exemple),
- etc.

24.3 Hypothèse sur la pression

On fait l'hypothèse que la pression est uniforme dans tout le moteur à un instant donné.

24.4 Calculs proprement dits

En vertu de la loi d'Avogadro (voir page 164), il faut appliquer la relation suivante qui somme les différentes masses n_i de gaz présentes dans les différents volumes déterminés ci-dessus (n est le nombre de molécules-gramme total enfermées dans le moteur).

$$n = \sum_i n_i = \sum_i \frac{P V_i}{R T_i}$$

Dans cette expression i prend, par exemple, les valeurs suivantes :

- $i = 1$ pour le volume de détente,
- $i = 2$ pour le volume de refroidissement,
- $i = 3$ pour le volume du régénérateur,
- $i = 4$ pour le volume de réchauffage,
- $i = 5$ pour le volume de compression,
- $i = \dots$

Pour trouver la valeur de la pression à chaque rotation de l'arbre, et pouvoir tracer le diagramme PV, il faut donc résoudre plusieurs fois l'équation suivante :

$$P = \frac{n R}{\sum_i \frac{V_i}{T_i}}$$

En sachant que le volume total au même moment est $V = \sum_i V_i$

Il faut déterminer la valeur de n quand on remplit le moteur, par exemple. Les températures sont alors égales dans tout le moteur.

Ensuite, il n'y a plus qu'à faire tourner les calculettes ou utiliser un tableur ou un logiciel. Il en existe pour certains moteurs : Stirling [21], Manson [20], Ericsson [19]... Pour cela, il faut aller sur le site internet spécifique qui leur est consacré.

La valeur de R est 8,314472 J / mol K (quel que soit le gaz)

Nota : si vous ne voulez pas travailler avec le nombre de molécules-gramme n mais avec la masse de gaz m , il faut alors utiliser la constante spécifique du gaz utilisé R_s .

($R_s = 287$ J / kg K pour l'air, 4124 pour l'hydrogène, 2077 pour l'hélium, ...)

On utilise alors l'équation de base : $P V = m R_s T$

Chapitre 25

Le régénérateur

Quand on songe à Robert Stirling, vient à l'esprit son moteur éponyme. En fait, il vaudrait mieux penser à son économiseur ou régénérateur qui est probablement son invention principale. Le rendement global du moteur Stirling est lié à la différence de température entre la source chaude et la source froide, mais aussi au rôle joué par le régénérateur comme on va le voir ci-dessous. Ceci est également démontré, de façon plus théorique, dans la partie de cet ouvrage relative au rendement du moteur Stirling, chapitre 30, page 191.

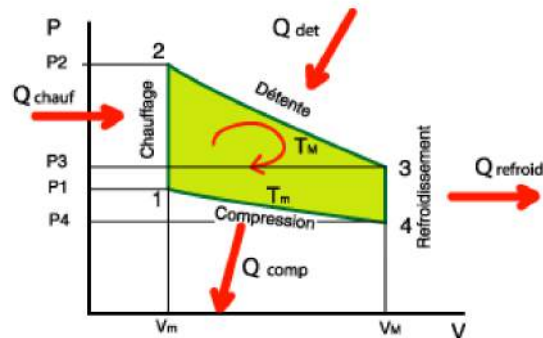


FIGURE 25.1 – Bilan calorifique d'un cycle de Stirling

Le diagramme ci-dessus nous rappelle les 4 phases de fonctionnement :

- Chauffage isochore (pour faire passer le gaz de T_m à T_M). De l'énergie calorifique doit être fournie pendant le chauffage : Q_{chauf} .
- Détente isotherme (de V_m à V_M). De l'énergie thermique, Q_{det} , doit être fournie pour maintenir le gaz en température T_M pendant la détente.
- Refroidissement isochore de T_M à T_m , l'énergie calorifique cédée par le gaz est égale à $Q_{refroid}$. Celle-ci est la même que celle utilisée pour réchauffer le gaz à volume constant : $Q_{refroid} = Q_{chauf}$.
- Compression à température constante T_m . Pendant cette phase, on fournit du travail mais on récupère de l'énergie thermique Q_{comp} . Il faut en effet refroidir le gaz pour le maintenir à température constante.

L'énergie mécanique nette récupérée est égale à l'énergie mécanique récupérée au cours de la détente W_{det} moins l'énergie mécanique W_{comp} qu'on doit fournir pour recomprimer le gaz.

Maintenant, si on fait nos comptes (en Ecossais ou Auvergnat) :

- on dépense $Q_{chauf} + Q_{det}$
- en énergie mécanique, on récupère $W_{det} - W_{comp}$

Si on savait récupérer $Q_{refroid}$ pour la "ré-injecter" au moment du chauffage à volume constant, on économiserait Q_{chauf} .

Les comptes deviendraient :

- on dépense Q_{det}
- en énergie mécanique, on récupère $W_{det} - W_{comp}$

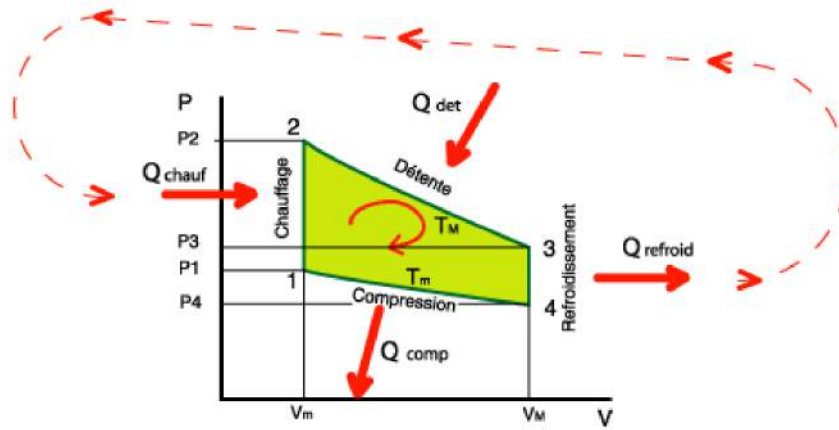


FIGURE 25.2 – Régénération de chaleur

Pour le même gain mécanique, on dépense moins de calories. Le régénérateur inventé par Robert Stirling permet cette économie!

Voir le diagramme ci-dessus.

Sur un plan pratique, le régénérateur est un échangeur de chaleur qu'on place entre la source chaude et la source froide. Voir les schémas ci-dessous.

En réalité, c'est un appareil délicat à concevoir. Les échanges de chaleur avec un gaz sont difficiles et demandent en général des dispositifs encombrants. Avec ce dispositif, on peut récupérer une grande partie des calories mais certainement pas la totalité.

Enfin, le régénérateur constitue un volume "mort" qui contrecarre en partie le bénéfice de sa présence. Il n'y a jamais de vérité absolue!

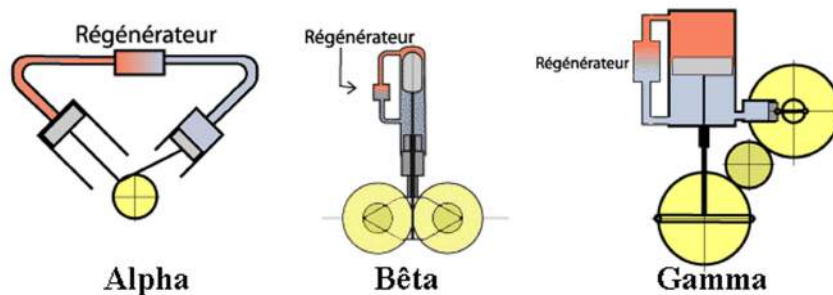


FIGURE 25.3 – Positionnement du régénérateur sur différents moteurs

Le régénérateur ne constitue donc pas toujours la panacée. Bien au contraire. Dans le cas de petits moteurs fonctionnant à la pression atmosphérique, avec de faibles écarts de température, il peut être judicieux de se passer de ce dispositif.

Chapitre 26

Les étanchéités

Pourquoi faire un chapitre consacré aux étanchéités dans ce livre ? Tout simplement parce qu'un moteur à apport de chaleur externe, quel qu'il soit, verra son rendement fortement diminué, voire ne fonctionnera pas, si son gaz de travail a la possibilité de migrer vers l'extérieur. Ceci est d'autant plus vrai lorsque les moteurs fonctionnent à de fortes pressions ou s'ils utilisent des gaz tels que l'hydrogène ou l'hélium qui ont la mauvaise habitude de diffuser au travers de certains corps comme par exemple les matériaux constitutifs des membranes souples mais pas uniquement.

Ici, nous évoquerons les grands principes relatifs aux étanchéités. Chaque cas est un cas particulier qui mérite un examen spécifique comprenant la recherche de solutions adaptées grâce à des dispositions constructives appropriées ou grâce à des produits adéquats disponibles sur le marché.

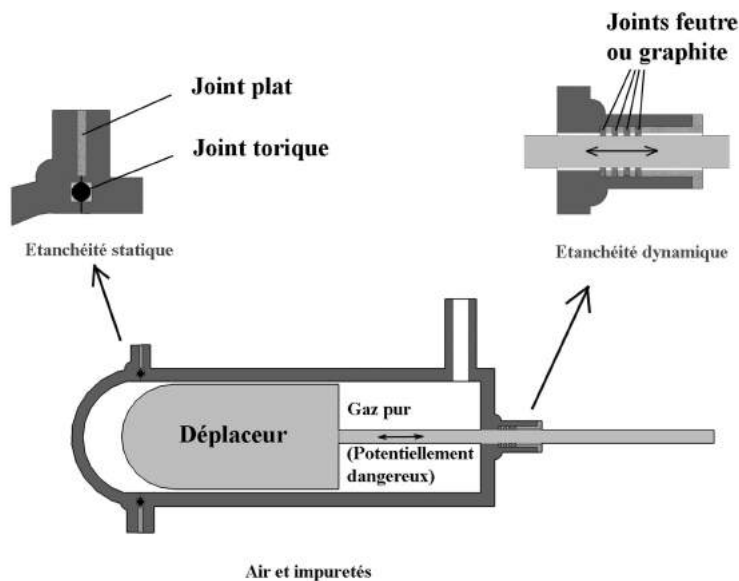


FIGURE 26.1 – Étanchéité statique et étanchéité dynamique

Sur le schéma ci-dessus, nous voyons qu'il faut réaliser une étanchéité la meilleure possible entre l'enceinte constituée par le cylindre et l'extérieur :

- Le gaz enfermé peut présenter des risques, en particulier si c'est de l'hydrogène. Toute fuite doit être évitée.
- Ce même gaz peut être cher. Il faut donc faire l'économie de fuites onéreuses.
- L'air extérieur ne doit pas pénétrer dans le cylindre. Les poussières contenues, même microscopiques, peuvent, à terme, nuire au bon glissement de la tige par exemple.

Maintenant, nous allons passer en revue les deux grandes catégories d'étanchéité rencontrées : les étanchéités statiques et les étanchéités dynamiques.

26.1 Les étanchéités statiques

Dans ce cas, nous cherchons à réaliser une étanchéité la meilleure possible entre deux pièces fixes l'une par rapport à l'autre.

Une façon d'étancher parfaitement deux pièces est de les assembler par soudage. De ce point de vue, c'est la solution idéale. Encore faut-il à ne pas avoir à démonter ces deux pièces ! C'est ce que nous pouvons voir sur le schéma précédent là où il y a des bourrelets de matière sur la calotte hémisphérique ou au niveau du manchon assurant l'étanchéité avec la tige du déplaceur.

On peut également mettre entre les deux pièces un joint liquide qui va polymériser et assurer ainsi une étanchéité de qualité. Le démontage des deux pièces peut s'avérer très délicat.

On obtiendra une étanchéité correcte, moins bonne que précédemment certes, en plaçant entre les deux pièces un joint. Par contre, le démontage ne présentera pas de difficulté.

C'est le domaine des joints toriques ou des joints plats.

Les étanchéités statiques paraissent simples à réaliser. Pourtant, elles peuvent poser de gros problèmes : le serrage des deux pièces concernées doit être correctement réalisé, il ne faut pas déformer les pièces par un serrage excessif, ne pas extruder le joint, il est nécessaire de disposer d'un état de surface et d'une géométrie des pièces en contact sans reproche....

26.2 Les étanchéités dynamiques

Les pièces à étancher entre peuvent avoir un mouvement relatif entre elles : translation et/ou rotation.

On est alors dans le domaine des étanchéités dynamiques. Diverses solutions peuvent être choisies :

- Mise en place d'un soufflet ou d'une membrane à l'instar de ce qui est représenté sur le schéma ci-dessous montrant une étanchéité dynamique absolue entre deux milieux.

- Pose de joints en feutre ou graphite, de segments montés sur les pistons.

- Utilisation de joints toriques ou de joints à lèvres.

- Création de chicane pour accroître les pertes de charges entre intérieur et extérieur d'un assemblage .

- Injection d'un liquide faisant barrière entre les deux espaces à étancher.

- Etc.

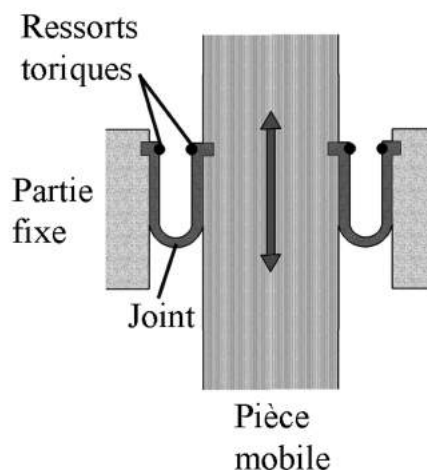


FIGURE 26.2 – Étanchéité absolue entre pièces mobiles

Dans tout moteur thermique, petite maquette ou gros moteur industriel, un soin tout particulier doit être apporté aux différents problèmes d'étanchéité rencontrés. La réussite d'une bonne conception est fortement liée à l'adoption de dispositions constructives adéquates en ce domaine.

Chapitre 27

Les frottements

Au cours de la conception et de la réalisation d'un moteur Stirling , il faut garder à l'esprit que différentes pièces sont mobiles les unes par rapport aux autres. Il se produit donc des frottements entre elles qu'il est nécessaire de limiter pour ne pas perdre de puissance. Il faut donc choisir les bons matériaux, les bons jeux entre les différents éléments, les meilleures géométries de pièces...

Il est facile de résoudre ce problème. Mais, si on veut aussi parfaire les étanchéités comme on l'a entraperçu au chapitre précédent, on est vite confronté à un casse-tête : en mettant des jeux confortables entre pièces, on va perdre sur le plan de l'étanchéité ; en mettant des jeux trop serrés pour être étanche, on risque le grippage ! Dur, dur.

De plus, à ce stade, il faut être conscient que les pièces, lorsqu'elles vont se dilater chacune de leur manière propre, vont modifier les caractéristiques de notre moteur en terme d'étanchéité et de frottement.

Il faut donc beaucoup de métier, d'expérience et être un artiste à sa façon (d'où les expressions « arts et métiers », « règles de l'art »...).

Pour terminer avec ce point, on se doit de rappeler qu'un lubrifiant peut nous aider dans la réduction des frottements mais, de suite, il faut en signaler le danger potentiel dans certaines conditions de température et de pression quand il est mélangé avec de l'air : il y a risque d'explosion. C'est l'effet diesel sur lequel est basé le principe du moteur éponyme. Dans le cas de cette machine, des dispositions sont prises pour avoir une combustion maîtrisée plutôt qu'une détonation brutale.

Chapitre 28

Les volumes morts

Comme nous l'avons vu au chapitre 24.4, page 180, la pression du moteur, à chaque instant est régie par la formule :

$$P = \frac{n R}{\sum_i \frac{V_i}{T_i}}$$

Cette formule est un peu barbare, certes. Mais en la regardant un peu, on s'aperçoit de deux choses évidentes :

- plus les températures seront élevées, plus la pression le sera (le dénominateur diminue donc la valeur de pression obtenue est grande).
- plus il y aura de volumes, moins la pression sera élevée (le dénominateur augmente, la valeur de la pression diminue). Conclusion : il faut faire la chasse aux volumes inutiles ou volumes morts. Ce sont par exemple les tuyauteries entre cylindres, les espaces morts de ces mêmes cylindres, le régénérateur (et oui!)...

Là encore, il faut raisonner au cas par cas. Dans ce livre, nous louons l'invention du régénérateur par Robert Stirling. Et bien, dans certains cas, son avantage incontestable peut être annihilé par l'importance de son volume propre !

Les règles de conception immuables d'un moteur Stirling ne sont pas pour demain. Pour notre plus grand bonheur....

Chapitre 29

Les variations de puissance

Dans la littérature, il est souvent de bon ton de considérer le moteur Stirling comme incapable de faire varier sa puissance rapidement et à la demande.

Le programme ASE que nous avons abordé page 88, § 6.10, nous a démontré, de longue date, le contraire.

Acceleration and Response

Mod II development testing using the Mod I engine in the Spirit test vehicle has demonstrated the Mod II control systems should satisfy all vehicle response requirements. Vehicle accelerations should also be comparable to the production spark-ignition vehicle.

FIGURE 29.1 – Variations de puissance pour l'automobile[89]

Sur cet extrait de document, faisant le bilan du programme ASE, il est clairement dit que le moteur Stirling installé à bord de la voiture AMC Spirit répondait à toutes les exigences d'un moteur monté sur un véhicule automobile, avec une accélération comparable à celle des voitures équipées de moteurs à combustion interne.

Ceci étant acquis, plusieurs solutions sont possibles pour faire varier la puissance d'un moteur Stirling :

- réguler la puissance de chauffe : c'est la solution qui vient en premier à l'esprit. Si elle est efficace, son temps de réponse n'est pas en sa faveur. Il faut en effet un certain temps pour que toute l'énergie thermique emmagasinée dans les différentes parties du moteur soit utilisée pour voir la puissance mécanique décroître et réciproquement lors des demandes de puissance.

- faire varier la pression du gaz de travail : celle-ci est directement proportionnelle à la quantité de gaz emprisonné dans le moteur (voir page 180, § 24.4). Si on retire du gaz, la pression va diminuer très rapidement, la puissance de même. En cas de demande de puissance, il faudra, au contraire, réinjecter du gaz dans le moteur.

- jouer sur l'avance entre pistons : les pistons des différents types de moteurs Stirling ont en général un décalage angulaire optimal sur l'arbre de rotation de 90°. Si on modifie ce déphasage, la puissance va varier car on modifie le cycle réel.

Sur la maquette représentée sur les images suivantes, Henry Ganza a réalisé un système permettant de faire varier ce décalage angulaire de 60° à 120°. D'après sa propre expérience, 90° est la valeur autorisant la plus grande puissance.

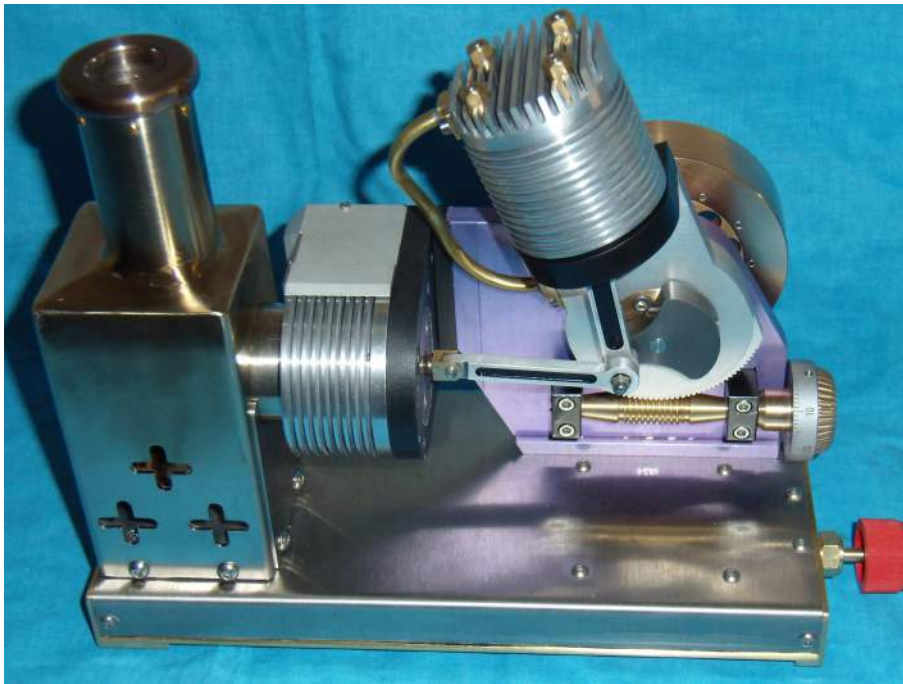


FIGURE 29.2 – Moteur d'Henry Ganza à déphasage réglable - Position 1

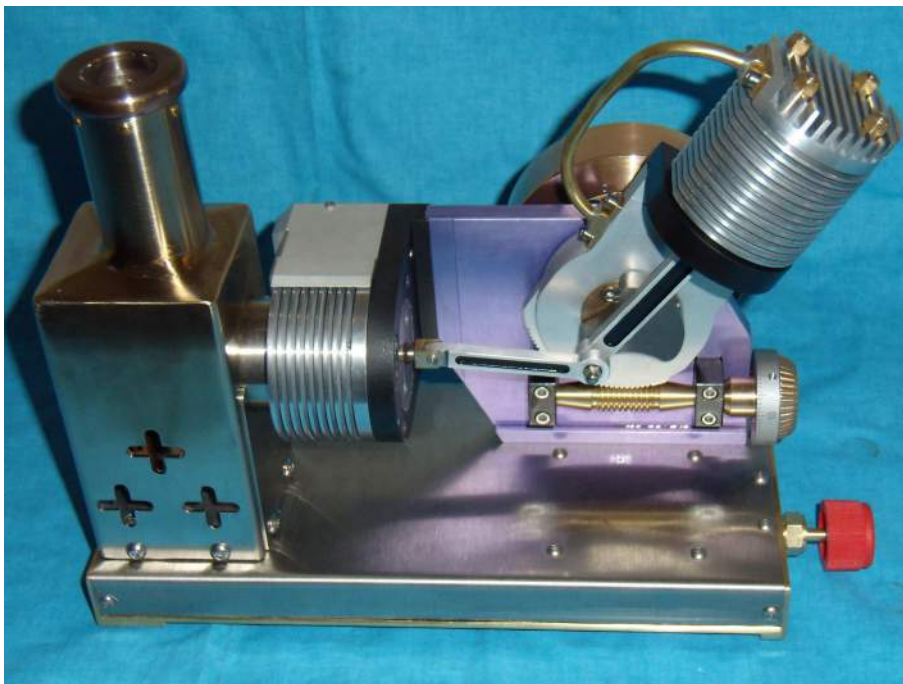


FIGURE 29.3 – Moteur d'Henry Ganza à déphasage réglable - Position 2

Comparez ces deux photos et tout va s'éclaircir !

Chapitre 30

Éléments de théorie spécifiques au moteur Stirling

Dans ce chapitre, nous allons nous arrêter sur des points théoriques spécifiques au moteur Stirling.

- Le rendement du cycle de Stirling puis celui du moteur Stirling équipé d'un régénérateur, ce qui n'est pas la même chose.

- La réversibilité du moteur Stirling pour faire du froid ou le transformer en pompe à chaleur.

Ces éléments permettront de mieux comprendre les particularités du moteur Stirling. Certaines applications, dans des domaines de prédilection pour cette machine, découlent directement de ces spécificités.

30.1 Le rendement du cycle de Stirling et celui du moteur Stirling équipé d'un régénérateur

Il convient, et nous comprendrons vite pourquoi, de bien faire la différence entre le rendement théorique du cycle de Stirling et celui d'un moteur Stirling équipé d'un régénérateur. C'est la meilleure façon de mettre en valeur l'intérêt de cet appareil inventé par Robert Stirling, probablement son invention essentielle.

Pour l'instant, ceci peut paraître abscons mais après lecture des deux sous-chapitres suivants cela deviendra évident.

Espérons-le.

30.1.1 Le rendement du cycle de Stirling

Le rendement du cycle thermodynamique 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.

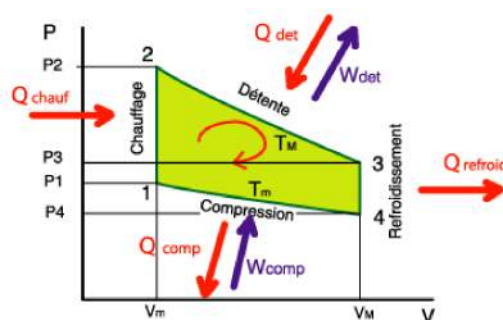


FIGURE 30.1 – Bilan énergétique d'un cycle de Stirling

D'après le diagramme ci-dessus, on peut écrire :

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

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

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

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) :

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

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

$$\text{avec } P = \frac{n R T}{V}$$

ce qui donne :

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

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

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 :

$$Q_{det} = \int_{det} P dV$$

$$Q_{det} = n R T_{max} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

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

$$Q_{chauf} = n C_v (T_{max} - T_{min})$$

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 de :

$$Q_{totale} = n C_v (T_{max} - T_{min}) + n R T_{max} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

Rendement du cycle

On peut, en faisant le rapport entre travail net récupéré et énergie calorifique totale fournie, écrire la valeur du rendement du cycle de Stirling :

Rendement d'un cycle de Stirling :

$$\eta = \frac{R (T_{max} - T_{min}) \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}{C_v (T_{max} - T_{min}) + R T_{max} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}} \quad (30.1)$$

Le rendement du cycle de Stirling est égal au rendement du cycle de Carnot.

L'affirmation barrée ci-dessus, qu'on trouve trop souvent, est fausse si on a suivi le raisonnement exposé dans ce chapitre. En effet, le cycle de Carnot (voir page 169, la figure 21.3) a pour valeur :

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

ce qui est différent de la formule propre au rendement du cycle de Stirling.

Par contre, si on suppose que l'énergie nécessaire au réchauffage isochore est entièrement récupérée au cours du refroidissement isochore (c'est le rôle du régénérateur étudié en 25, page 181), alors l'efficacité du moteur Stirling sera égale au rendement d'une machine de Carnot, jamais conçue, ayant les mêmes températures extrêmes de fonctionnement.

30.1.2 Le rendement d'un moteur Stirling équipé d'un régénérateur

Comme cela a déjà été dit précédemment, on peut considérer que la plus grande invention de Robert Stirling est celle du régénérateur ou économiseur tel qu'il l'appelait.

Grâce au graphique ci-après, souvenons-nous de l'intérêt de cet appareil :

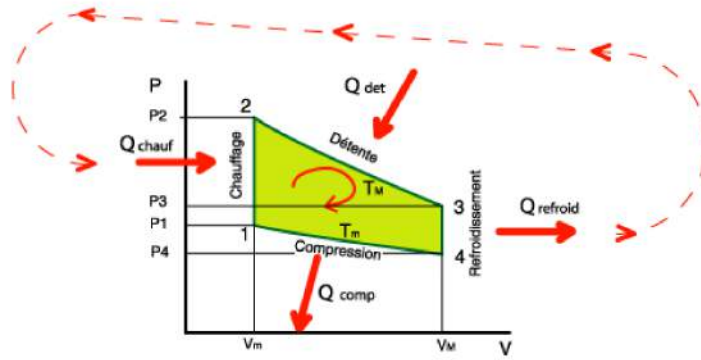


FIGURE 30.2 – Cycle d'un moteur Stirling équipé d'un régénérateur

Le régénérateur permet d'économiser l'énergie restituée au cours du refroidissement isochore en la réinjectant au cours du chauffage isochore.

Précédemment, nous avons vu que la valeur du rendement d'un cycle de Stirling était :

$$\eta = \frac{R(T_{max} - T_{min}) \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}{C_v(T_{max} - T_{min}) + RT_{max} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}$$

Si nous n'avons plus besoin de fournir de l'énergie durant le chauffage isochore, à savoir $C_v(T_{max} - T_{min})$, cette équation devient :

$$\eta = \frac{R(T_{max} - T_{min}) \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}{RT_{max} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}$$

ou, après simplification :

$$\eta = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}}$$

ou encore :

Rendement d'un moteur Stirling avec un régénérateur :

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = \eta_{Carnot}} \quad (30.2)$$

Maintenant, on peut affirmer que le rendement d'un moteur Stirling équipé d'un régénérateur est égal à celui du cycle de Carnot sachant que ce dernier ne peut être dépassé.

30.2 La réversibilité du cycle de Stirling : faire du froid ou de la chaleur

Le cycle de Stirling est réversible. Derrière ce mot barbare se trouve le principe suivant : au lieu de fournir des calories à un ensemble (un moteur) afin d'obtenir de l'énergie mécanique, on peut fournir à ce même ensemble (une pompe à chaleur ou une machine frigorifique) de l'énergie mécanique afin de transférer des calories d'une source froide vers une source chaude.

C'est le principe de nos réfrigérateurs ou des pompes à chaleur.

Dans l'industrie cryogénique, cette propriété est exploitée de longue date pour obtenir des froids extrêmes. Des gaz sont ainsi liquéfiés.

À l'inverse, on peut imaginer puiser des calories dans une nappe phréatique pour les réinjecter dans l'atmosphère douillette d'une habitation en hiver.

Petit paradoxe : une pompe à chaleur refroidit la source froide pour réchauffer la source chaude. C'est le contraire de ce qui se produit dans le cas du fonctionnement en moteur.

Sur le diagramme page suivante, on voit les quatre phases du cycle de Stirling pour une utilisation en pompe à chaleur.

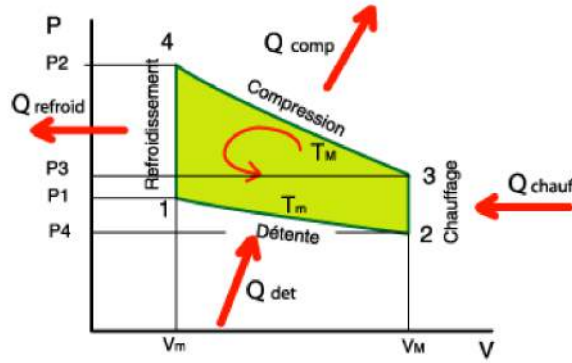


FIGURE 30.3 – Réversibilité du cycle de Stirling. Fonctionnement en pompe à chaleur ou machine frigorifique

- De 1 à 2 : détente à température constante. Des calories sont puisées à la source froide pour maintenir la température.
- De 2 à 3 : le gaz est réchauffé de T_{min} à T_{max} en prenant des calories à la source chaude.
- De 3 à 4 : le gaz est comprimé à température constante. Des calories sont alors cédées à la source chaude.
- De 4 à 1 : le gaz est refroidi de T_{max} à T_{min} par la source froide.

L'aire délimitée par le cycle (en vert) est proportionnelle à l'énergie qu'on doit fournir au système selon le même raisonnement que celui développé quand nous avons étudié le fonctionnement en moteur.

Dans le cas d'une pompe à chaleur ou d'une machine frigorifique, on ne définit pas le rendement de l'ensemble mais son coefficient de performance COP (Coefficient Of Performance, sorry!). C'est ce que nous allons faire maintenant.

30.2.1 Pompe à chaleur ayant un régénérateur

On définit le COP, ou coefficient de (of) 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, on écrira, en prenant les valeurs absolues de Q et W :

$$COP = \frac{Q_{comp} - Q_{chauf}}{W_{comp} - W_{det}} \quad (30.3)$$

Si, comme dans le cas d'un moteur, la pompe à chaleur est équipée régénérateur, Q_{chauf} sera procuré par $Q_{refroid}$. L'équation (30.3) devient :

$$COP = \frac{Q_{comp}}{W_{comp} - W_{det}} \quad (30.4)$$

Nous avons vu l'expression page 192, § 30.1.1, définissant la valeur de W_{net} , à savoir :

$$W_{net} = n R (T_{max} - T_{min}) \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} = W_{comp} - W_{det}$$

Dans le cas d'une pompe à chaleur, nous pouvons écrire :

$$W_{comp} = n R T_{max} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}} = Q_{comp}$$

On obtient la valeur du COP d'une pompe à chaleur :

$$COP = \frac{n R T_{max} \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}{n R (T_{max} - T_{min}) \ln \frac{V_{max}}{V_{min}}}$$

ou, en enlevant les éléments redondants en numérateur et dénominateur :

$$COP = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}}$$

En observant la formule (30.2), de la page 193, on peut maintenant écrire :

COP d'une pompe à chaleur Stirling avec régénérateur

$$COP_{Pac} = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}} \quad \left(= \frac{1}{\eta} \right) \quad (30.5)$$

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 PV de fonctionnement équivalent.

Exemple : prenons une source froide à 5°C (278 K), la nappe phréatique par exemple, et une source chaude à 50°C (323 K), l'eau d'un chauffage central à tout hasard.

- un moteur, dans ces conditions, aura un rendement de 14%.

- une pompe à chaleur aura un COP de 7 ! C'est-à-dire qu'avec 1 kWh électrique consommé par le moteur de la pompe à chaleur, cette dernière va restituer 7 kWh thermiques. Pas mal... Par rapport à un chauffage tout électrique, on économise 6 kWh ! Dans la réalité, on se doit de tempérer ce gain mais il reste très intéressant.

30.2.2 Machine frigorifique

Il se peut que nous voulions faire du froid pour réfrigérer notre maison ou pour créer de grands froids à l'aide d'une machine de cryogénie. Nous nous intéresserons alors aux calories extraites de la source froide.

Notre machine sera d'autant plus performante qu'elle prendra des calories à la source froide en dépensant le moins possible d'énergie mécanique ou électrique.

À l'instar de ce qui a été fait dans le cas de la pompe à chaleur étudiée ci-dessus, nous allons déterminer le coefficient de performance d'une machine frigorifique. Nous ferons d'entrée l'hypothèse que notre machine est équipée d'un régénérateur. Nous allons donc fixer notre attention sur Q_{det} qui représente la quantité de calories extraites de la source froide. L'énergie mécanique fournie est toujours $W_{comp} - W_{det}$ si on considère les valeurs absolues de ces grandeurs.

$$COP = \frac{Q_{det}}{W_{comp} - W_{det}} \quad (30.6)$$

En faisant le même travail de simplification que dans le cas de la pompe à chaleur, nous obtenons :

COP d'une machine frigorifique Stirling avec régénérateur

$$COP_{Frigo} = \frac{T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (30.7)$$

On remarque que $COP_{Pac} = COP_{Frigo} + 1$ pour une même machine.

Prenons quelques exemples :

- Supposons que nous voulions conserver une température de -18°C (255 K) dans notre congélateur avec une source chaude de 20°C (293 K). Le COP de notre machine sera alors de 6,7. Pour extraire 100 joules, il faudra en fournir mécaniquement 15.

- Maintenant, on veut atteindre -200°C (73K) avec la même source chaude. Le COP sera alors de 0,33 soit vingt fois moins que précédemment. Pour extraire 100 joules, il faudra alors en fournir mécaniquement 300 ! La performance a un prix...

30.2.3 Quelques remarques

Dans les deux cas, pompe à chaleur ou machine frigorifique, plus les températures de la source froide et de la source chaude sont proches, meilleur est le COP. C'est tout l'inverse de ce qu'on constate pour le rendement d'un moteur.

Cependant, plus la différence de température est faible, plus les échangeurs de chaleur devront avoir une grande surface, un encombrement important et un coût élevé. La nature est contrariante et nous oblige à trouver des optima technico-économiques.

Le COP_{Pac} est toujours supérieur à 1. On est toujours gagnant.

Par contre, le COP_{Frigo} peut être inférieur à 1 comme nous l'avons vu dans un de nos exemples quand nous voulons obtenir des températures basses à partir d'une température ambiante.

Chapitre 31

Éléments de théorie spécifiques au moteur Ericsson

Nous allons nous fixer comme objectif de dimensionner de façon purement théorique un moteur Ericsson.

Sur le petit schéma ci-dessous apparaissent les principales caractéristiques permettant le calcul de notre moteur :

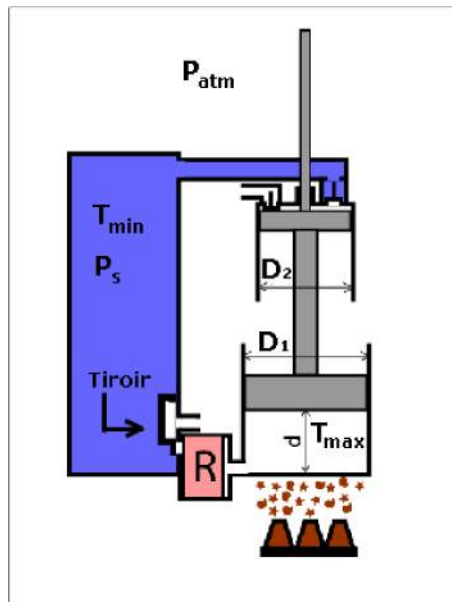


FIGURE 31.1 – Caractéristiques nécessaires au calcul d'un moteur Ericsson

Les dimensions permettant de calculer un moteur Ericsson sont les suivantes :

- la course du piston : d
- le diamètre du piston moteur : D_1

En choisissant :

- la température de la source chaude T_{max}
- la température de la source froide T_{min}
- la pression du réservoir d'air stocké P_s

On pourra déterminer :

- le diamètre du compresseur : D_2
- le travail effectué au cours d'un cycle : W
- le rendement du moteur : η

Nous déterminerons également à quel moment le tiroir doit cesser de mettre en relation le réservoir d'air avec le cylindre moteur ou, autrement dit, à quelle valeur de la course d_{inter} la quantité d'air de travail nécessaire a été introduite dans le cylindre moteur et quelle est, à ce moment là, la valeur du volume V_1 correspondant :

V_{1inter}

31.1 Détermination du diamètre D_2

Lorsque le piston est en position haute, le cylindre moteur est rempli d'air à la température T_{max} . Cet air est aussi à la pression atmosphérique juste avant que le tiroir ne mette en relation ce cylindre avec l'atmosphère. On peut donc écrire :

$$P_{atm} V_{1max} = nRT_{max} \quad (1)$$

Dans cette expression, toutes les valeurs sont déterminées (voir ci-dessus), elles nous permettent donc de connaître le nombre de molécules-grammes mises en jeu à chacune des phases de ce cycle d'Ericsson.

$$n = \frac{P_{atm} V_{1max}}{RT_{max}}$$

La valeur de n étant la même au cours des 4 phases du cycle, nous allons pouvoir dimensionner le cylindre de compression de l'air frais.

Quand le piston est en position basse, pour le cylindre supérieur, nous pouvons écrire :

$$P_{atm} V_{2max} = nRT_{min} \quad (2)$$

En associant les équations (1) et (2), on obtient :

$$V_{2max} = V_{1max} \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Connaissant la valeur de la course d , nous pouvons calculer D_2 :

$$D_2 = 2 \sqrt{\frac{V_{1max} T_{min}}{\pi d T_{max}}}$$

Nous allons maintenant préciser la valeur de V_1 qui correspond au déplacement du tiroir afin d'interrompre le remplissage du cylindre moteur :

$$n = \frac{P_{atm} V_{1max}}{RT_{max}} = \frac{P_s V_{1inter}}{RT_{max}}$$

$$V_{1inter} = V_{1max} \frac{P_{atm}}{P_s}$$

La valeur de la course à ce moment-là est :

$$d_{inter} = d \frac{P_{atm}}{P_s}$$

De même, nous allons calculer le volume V_2 min qu'occupe l'air amené à la pression du réservoir P_s par le piston compresseur.

$$n = \frac{P_{atm} V_{1max}}{RT_{max}} = \frac{P_s V_{2min}}{RT_{min}}$$

$$V_{2min} = V_{1max} \frac{P_{atm} T_{min}}{P_s T_{max}}$$

31.2 Travail effectué au cours d'un cycle

Nous allons réexaminer le diagramme PV du cycle Ericsson et porter sur celui-ci les valeurs décrites ci-dessus.

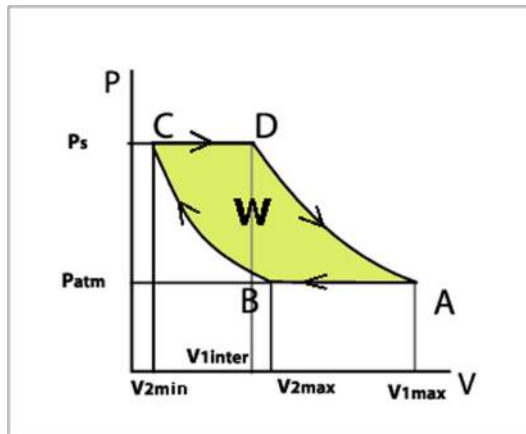


FIGURE 31.2 – Diagramme PV détaillé du cycle de Stirling

Nous voyons que nous connaissons maintenant toutes les valeurs qui apparaissent sur ce diagramme.

En application des notions de thermodynamique que nous avons acquises, nous allons calculer le travail récupéré au cours d'un cycle.

Pour cela, nous allons calculer l'intégrale $W = \int p dV$ pour chacune des 4 phases.

- phase de mise à l'atmosphère AB : $W_1 = P_{atm}(V_{2max} - V_{1max})$
- phase de compression BC : $W_2 = \int p dV = \int \frac{nRT_{min}}{V} dV = nRT_{min} \ln \frac{V_{2min}}{V_{2max}}$
- phase de remplissage CD : $W_3 = P_s(V_{1inter} - V_{2min})$
- phase de détente DA : $W_4 = nRT_{max} \ln \frac{V_{1max}}{V_{1inter}}$

Si on cumule l'ensemble des travaux élémentaires, on obtient :

$$W = \sum W_i \text{ pour } i \text{ allant de } 1 \text{ à } 4.$$

On remarquera que W_1 et W_2 sont négatifs et que W_3 et W_4 sont positifs.

En développant W_1 et W_3 en fonction des données d'entrée, on trouvera que :

$$W_1 = -W_3 = -P_{atm}V_{1max}\left(1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}\right)$$

Ceci était prévisible car la quantité de chaleur à fournir à l'air pour le chauffer de T_{min} à T_{max} est identique à la quantité de travail récupérée quand cet air passe de T_{max} à T_{min} .

L'expression du travail récupéré au cours d'un cycle se simplifie pour devenir :

$$W = W_2 + W_4$$

En développant, on obtiendra :

$$W = nRT_{max}\left(1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}\right) \ln \frac{P_s}{P_{atm}}$$

Il n'y a plus qu'à sortir les caulettes ou utiliser le logiciel disponible sur le site consacré au moteur Ericsson.[19]

31.3 Rendement du cycle d'Ericsson

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

31.3.1 Travail net récupéré :

Ce travail W a été calculé ci-dessus et vaut :

$$W = nRT_{max}\left(1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}\right) \ln \frac{P_s}{P_{atm}}$$

31.3.2 Énergie calorifique fournie :

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

$$Q_{det} = \int_{det} P dV = W_4$$

$$Q_{det} = nRT_{max} \ln \frac{V_{1max}}{V_{1inter}}$$

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

$$Q_{chau} = nC_p(T_{max} - T_{min})$$

où C_p est la chaleur molaire du gaz considéré pour un chauffage, à pression constante, d'une température T_{min} à une température T_{max} .

La quantité totale d'énergie calorifique fournie est donc de :

$$Q_{totale} = nC_p(T_{max} - T_{min}) + nRT_{max} \ln \frac{V_{1max}}{V_{1inter}}$$

ou

$$Q_{totale} = nC_p(T_{max} - T_{min}) + nRT_{max} \ln \frac{P_s}{P_{atm}}$$

31.3.3 Rendement du cycle d'Ericsson :

On peut donc écrire la valeur du rendement d'un cycle d'Ericsson :

Rendement d'un cycle d'Ericsson :

$$\eta = \frac{R T_{max} \left(1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}\right) \ln \frac{P_s}{P_{atm}}}{C_p (T_{max} - T_{min}) + R T_{max} \ln \frac{P_s}{P_{atm}}} \quad (31.1)$$

~~Le rendement du cycle d'Ericsson est égal au rendement du cycle de Carnot.~~

L'affirmation barrée ci-dessus, qu'on trouve trop souvent, est fausse. En effet, le cycle de Carnot a pour valeur : $\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$ ce qui est différent de la formule propre au rendement du cycle d'Ericsson.

Par contre, si on suppose que l'énergie nécessaire au réchauffage isobare est entièrement récupérée au cours de l'évacuation de l'air chaud vers l'atmosphère, c'est le rôle du régénérateur, alors l'efficacité du moteur Ericsson sera égale au rendement d'une machine de Carnot, jamais conçue, ayant les mêmes températures extrêmes de fonctionnement.

En effet, dans l'équation définissant le rendement η , le terme correspondant à l'énergie utile au chauffage isobare $C_p (T_{max} - T_{min})$ disparaît.

L'expression du rendement du moteur devient :

Rendement d'un moteur Ericsson avec un régénérateur :

$$\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = \eta_{Carnot} \quad (31.2)$$

Maintenant, on peut affirmer que le rendement d'un moteur Ericsson équipé d'un régénérateur est égal à celui du cycle de Carnot. Dans la réalité, l'hypothèse émise de récupérer totalement la chaleur du refroidissement isobare pour la restituer au cours du chauffage isobare paraît très optimiste pour ne pas dire impossible à réaliser sur un plan pratique. Il faudrait pour ça que le régénérateur ait une efficacité de 100%. Concevoir un tel échangeur est une vraie gageure.

Conclusion : Si le moteur Ericsson a le même rendement qu'un cycle de Carnot, c'est grâce à l'invention du régénérateur par Robert Stirling qui en a eu le premier l'idée ! On peut penser que John Ericsson enrageait face à une telle situation...

Chapitre 32

Éléments pour bien concevoir un moteur

32.1 10 conseils pour bien concevoir son moteur Stirling

Ces précieux conseils sont issus de l'article de Darryl Phillips dont il est fait référence dans une des annexes page 221, annexe F, relative à l'utilisation du moteur Stirling dans l'aviation de tourisme.

C'est une chance que d'avoir eu l'autorisation de les publier.

1. Gardez à l'esprit qu'un moteur est juste une machine qui convertit une forme d'énergie en une autre. L'énergie stockée dans un combustible ou tout autre source est transformée en énergie cinétique. Le but ultime est de maximiser l'énergie récupérée et de réduire les pertes.

2. Approchez au mieux les températures souhaitées. La première des différences de température n'est pas mesurable instantanément. C'est l'écart entre la température qu'un combustible est capable de produire et celle qui est effectivement produite. Ayant choisi un carburant donné, l'utilisateur doit être capable d'utiliser le potentiel maximum contenu dans ce carburant. La seconde perte se traduit par la différence entre la température effective de la combustion et celle atteinte par le réchauffeur. Ainsi de suite, à chaque étape on s'efforcera de minimiser les pertes en température. Idéalement les variations de température entre celle de combustion et celle de l'environnement devraient se retrouver dans les variations de température du gaz de travail lui-même. Les pertes sont bien sûr inévitables mais elles doivent être minimisées dans la mesure du possible.

3. Considérez la nature logarithmique de la température en opposition avec la nature linéaire de l'énergie thermique. Une perte de température sur le côté froid est plus dommageable que la même perte en degrés sur le côté chaud. Penser la température en degrés sur une échelle linéaire distord la vision du problème. Il est préférable de travailler en décibels de température qu'en degrés linéaires. Voir page 202, § 32.2.

4. Minimisez les pertes aérodynamiques. C'est le problème majeur rencontré lors de la conception d'un moteur moderne. Pensez comme un aérodynamicien en prenant en compte la vitesse du gaz de travail. Évitez les angles vifs, les changements brutaux de sections, toutes choses dont les molécules à haute vitesse ont horreur. Pensez comme un électricien. Faites mouvoir le gaz en parallèle plutôt qu'en série. Gardez un alésage important et une course faible de l'ordre de 10%. Privilégiez le couple plutôt que la vitesse ! Étudier un moteur avec un faible delta de température présentera l'avantage de montrer plus clairement les problèmes rencontrés sur des moteurs à forts gradients thermiques.

5. Minimisez les volumes morts. Essayez de transférer 100% du gaz de la région chaude vers la région froide. Un moteur à air chaud idéal a la totalité de son gaz à la température « chaude » à une extrémité de son cycle et la totalité de son gaz à la température « froide » à l'autre extrémité. Ce n'est jamais complètement possible dans le monde réel. Essayez encore et encore.

6. Utilisez le meilleur taux de compression. Mieux encore .. oubliez la compression et utilisez le meilleur taux d'expansion. Ce sont les mêmes chiffres, mais l'expansion reflète mieux la conversion de la chaleur en énergie cinétique. Le rapport d'expansion idéal est la racine carrée de la moyenne des températures absolues du gaz aux points le plus chaud et le plus froid du cycle. Notez que toutes parties du gaz incorrectement chauffées ou refroidies réduisent cette moyenne. C'est la raison fondamentale pour laquelle il est si important de chauffer/refroidir la quasi-totalité du gaz.

7. La pressurisation. Il est tentant de doubler la puissance d'un moteur en doublant sa pression interne. Le double de puissance signifie le double d'énergie thermique transférée au moteur. Si la surface des échangeurs reste constante, les pertes de température vont s'accroître et le double de puissance visée ne sera pas obtenu. De plus, une pression plus élevée entraînera un accroissement des pertes d'écoulement entraînant une perte d'efficacité du moteur. Une augmentation de pression entraîne une augmentation du volume de matériaux utilisés pour contenir le gaz. Ces matériaux auraient été mieux utilisés en augmentant les surfaces d'échanges thermiques. Comme tous les compromis de conception, la pression est un outil à utiliser. Cependant, rappelez-vous qu'une pression excessive est aussi nocive que des volumes morts excessifs ou des pertes de débits excessives.

8. Le régénérateur. Il ne fait aucun doute que le régénérateur est la partie qui fascine le plus les développeurs de moteurs Stirling. La simple idée d'utiliser la même énergie thermique plus d'une fois est fascinant et très intéressant. Ne faites pas une fixation sur le régénérateur en laissant de côté le reste de votre développement. Il a été observé que certains moteurs Stirling fonctionnaient de la même manière, voire mieux, après avoir enlevé le régénérateur. Si les règles exposées auparavant n'ont pas été observées, rien dans le régénérateur ne sauvera sa conception. Le régénérateur augmente le volume mort, ajoute des difficultés à l'écoulement du fluide, il devient l'ennemi du moteur. Faites-le aussi simple que possible.

9. Toutes les promesses thermiques du régénérateur peuvent être réalisées avec le récupérateur. C'est une idée analogue. Celle de récupérer les calories des gaz d'échappement pour les transférer à l'air nécessaire à la combustion. Si l'énergie contenue dans le carburant ne sort que par le vilebrequin, alors l'objectif d'efficacité est atteint. Il est plus facile de composer avec les volumes morts et les flux tortueux des gaz de combustion qu'avec ceux situés à l'intérieur même du moteur.

10. Construisez ! Aucun modèle informatique ne remplacera un véritable moteur. La révolution industrielle doit son succès au fait que l'ordinateur n'avait pas encore été inventé. Sinon nous en serions encore à simuler la machine à vapeur, le télégraphe et le chemin de fer. Construisez votre moteur. Le marché l'attend.

32.2 Nouvelle échelle logarithmique de température

Le troisième conseil exposé ci-dessus suggère de considérer la nature logarithmique de la température. Darryl Phillips, dans son article, élargit ce propos en donnant quelques explications utiles.

Nous allons en reprendre l'esprit au travers des développements qui suivent.

La thermodynamique n'est pas vraiment intuitive pour au moins deux raisons :

- La première est que nous percevons la température dans une plage très étroite. Ce que nous ressentons comme « chaud » ou « froid » est lié à nos capacités sensorielles, physiologiques. Dès qu'on est dans le domaine de températures très élevées ou très faibles, il nous est difficile sinon impossible d'en apprécier la valeur.

- La seconde est que nous confondons souvent les mots « chaleur » et « chaud ». L'énergie calorifique contenue dans un corps et sa température sont deux notions différentes même si la qualité de la première dépend de la valeur de l'autre, ce que nous allons voir.

La chaleur est une grandeur mesurable. Avec deux fois 50 calories, on va faire la même chose qu'avec 100 calories.

À l'inverse, la température n'est pas une grandeur mesurable. Si on verse deux quantités d'eau ayant des températures différentes dans le même récipient, le mélange obtenu n'aura pas une température égale à la somme des deux autres. C'est évident mais ça va mieux en le rappelant.

Revenons à nos moteurs. Peut-on, à partir d'un simple écart de température, en définir les caractéristiques ? Non. Deux exemples pour le vérifier :

- premier moteur ayant une source chaude de 100°C (373 K) et une source froide de 0°C (273 K), soit 100°C d'écart. Comme nous l'avons vu précédemment, son rendement sera de $\eta = 1 - \frac{273}{373}$ soit 27%.

- deuxième moteur avec une source chaude de 1000°C (1273 K) et une source froide de 900°C (1173 K), soit toujours 100°C d'écart. Le rendement sera $\eta = 1 - \frac{1173}{1273}$ soit 8%.

On voit ainsi qu'avec une telle échelle de température il est difficile de sentir les phénomènes physiques.

Pour avoir le même rendement avec le deuxième moteur que le premier, si on conserve le même source froide de 900°C, il nous faudra une source chaude de $\frac{T_{chaud}}{1173} = \frac{373}{273}$ d'où $T_{chaud} = 1603$ K ou 1330°C d'où un écart de température de 430°C.

Pour bien sentir les phénomènes thermodynamiques, il nous faudrait donc une échelle de température non linéaire du type :

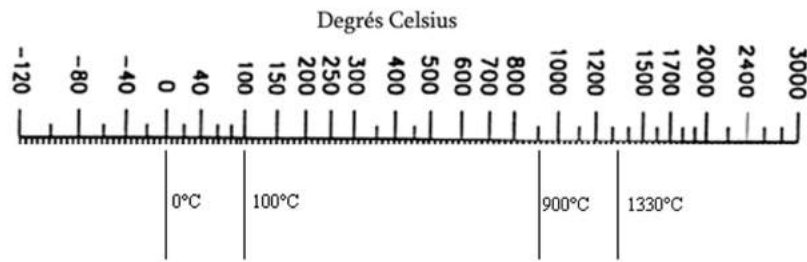


FIGURE 32.1 – Echelle de température non linéaire

Sur cette figure, on voit que la distance entre le repère 0°C et celui 100°C est la même qu'entre 900°C et 1330°C.

Il nous reste à adjoindre à cette échelle de température non linéaire, une échelle linéaire de température exprimée en décibel dB. On calera le 0 dB avec 0°C. C'est ce que nous propose Darryl Phillips ci-dessous :

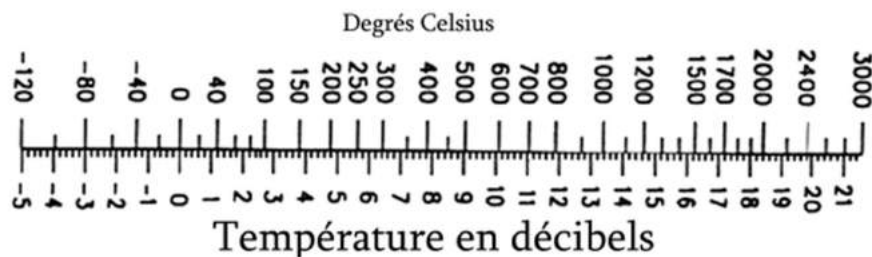


FIGURE 32.2 – Échelle de température en décibel dB

$$\text{Nous avons : } T_{dB} = 20 \log \frac{t + 273}{273}$$

T_{dB} est la valeur de la température exprimée en dB, t est la valeur de cette même température exprimée en degré Celsius.

On peut ainsi affirmer ainsi qu'un moteur fonctionnant avec un écart de température ΔT_{dB} donné aura le même rendement où que se situe cet écart sur l'échelle de température.

32.3 Les 7 pertes des moteurs à air chaud

Darryl Phillips a ensuite recensé les différentes pertes auxquelles on est confronté face à un moteur.

Perte 1 Cette première perte correspond au combustible imbrûlé à cause d'injecteurs imparfaits, d'un mauvais réglage du mélange carburant-comburant ou autres défauts.

Perte 2 Cette perte représente la différence de température entre la température que le carburant pouvait produire dans des conditions optimales et la température réellement mesurée. Dans ce cas, la qualité du mélange combustible-air est peut-être à mettre en cause.

Perte 3 Ces pertes thermiques se produisent par conduction dans les parties métalliques ou par rayonnement avant que notre énergie disponible puisse être transformée par le cycle de Stirling.

Perte 4 Cette perte est due à la différence de température entre celle que nous avons fini par obtenir dans le brûleur et celle mesurée sur la surface interne du réchauffeur. Il n'y a pas un transfert parfait de chaleur entre les gaz de combustion et les parois du réchauffeur. On compte également des déperditions calorifiques par conduction dans la structure du réchauffeur.

Perte 5 De façon similaire à ce qui se passe dans le réchauffeur, nous constatons également des pertes d'énergie dans le refroidisseur.

Perte 6 C'est la différence entre la température interne du réchauffeur et la température moyenne du gaz de travail au point le plus chaud du cycle. Température moyenne veut dire température du gaz dans l'enceinte chaude mais aussi dans l'ensemble des volumes morts. (régénérateur, refroidisseur, réchauffeur et tubulures). Voyez-vous pourquoi il faut chasser les volumes morts ?

Perte 7 C'est le pendant de la perte précédente au point le plus froid du cycle. Encore une fois, les volumes morts y sont pour quelque chose. La totalité du gaz n'est pas refroidi et la température moyenne du gaz excède celle de la surface interne du refroidisseur.

Et voilà. Pas trop découragé ? Ensuite, quand de l'énergie mécanique sera produite, il faudra vaincre l'inertie des pièces en mouvement, les frottements entre-elles... Logiquement, si cette énergie mécanique n'a pas été totalement consommée, le moteur va tourner !

Sixième partie

Conclusion

*Ce n'est pas parce les choses sont
difficiles que nous n'osons pas,
c'est parce que nous n'osons pas
qu'elles sont difficiles.*

Sénèque (? - 65)

Chapitre 33

Entre échecs et espoirs

33.1 Les raisons de l'échec de l'introduction du moteur Stirling et autres moteurs à air chaud

Sur un plan technique, la lecture de cet ouvrage peut être suffisante pour convaincre toute personne que ces moteurs constituent une parfaite réussite technologique. Comme nous l'avons vu, la preuve en a été apportée par des organismes aussi sérieux que la NASA ou des entreprises de pointe telle que la société Philips. Ces moteurs fonctionnent et même parfaitement en étant économe de combustible, ils sont d'une très grande flexibilité pour s'adapter à la nature du carburant choisi, capables de réaliser des combustions quasiment parfaites afin de réduire la pollution, leurs éventail de puissance est très large tout en ayant un parfait rendement, ils sont très souples et permettent sans conteste des variations de puissance rapides, ils sont silencieux, leur maintenance est allégée, leur durée de vie longue...

Tout cela mérite, comme nous l'avons vu, de bien soigner la conception et la réalisation de ces moteurs proprement dits et des différents appareils connectés à eux.

Malgré cela, pas de moteur à air chaud à proximité !

Il faut donc chercher ailleurs les raisons de cette absence. Les principales sont développées ci-dessous.

Sur le plan économique ou industriel, les moteurs à air chaud ou à apport de chaleur externe ont de sérieux concurrents !

Pour les besoins en énergie mécanique dans des lieux fixes, l'installation d'un moteur électrique est aisée et son coût sera bien inférieur vu les grandes séries développées et la fiabilité de ces engins.

En ce qui concerne les besoins mobiles, les moteurs à combustion interne malgré leurs grands défauts restent très concurrentiels en terme de coût et ont été capables, il faut le reconnaître, de s'adapter aux nouvelles exigences en terme de pollution même s'ils auront toutes les difficultés à devenir aussi propres qu'un moteur à combustion externe.

De plus, de très lourds investissements ont été réalisés pour concevoir, améliorer, fabriquer et distribuer les moteurs thermique à combustion interne. Difficile d'imaginer à brûle-pourpoint la transformation des usines existantes afin de construire des moteurs à apport de chaleur externe en lieu et place des moteurs à combustion interne. Ceci nécessiterait également des moyens de formation conséquents des différents acteurs et de gros budgets de communication pour convaincre les acheteurs éventuels.

Dans le domaine automobile ou de la propulsion de navires ou sous-marins, on sent poindre l'arrivée des piles à combustibles au détriment des moteurs à air chaud. Pour l'instant, de gros efforts sont faits pour promouvoir la voiture électrique sans trop se poser la question de savoir d'où viendra cette électricité : de sources renouvelables et propres, de combustibles fossiles avec la production de gaz à effet de serre, de centrales nucléaires.... ? À nous d'obtenir une réponse satisfaisante à ce problème pour éviter d'avoir des voitures électronucléaires tel qu'on peut le deviner au travers du discours de nos politiques.

Dans celui de la production d'électricité, les rares projets de construction de parcs solaires à base de moteurs Stirling se transforment en champs de panneaux voltaïques compte tenu des progrès constants réalisés dans ce domaine.

Il nous reste à espérer que les avions de tourisme seront demain équipés de moteurs à apport de chaleur externe, voir annexe F page 221. Mais, là aussi, pourquoi changer quelque chose qui marche, dont les investissements ont été amortis, par un autre modèle de motorisation fût-il bien plus performant ?

Sur un plan purement commercial, l'introduction de nouveaux produits rencontrent souvent un obstacle psychologique de la part des acheteurs. La nouveauté est souvent vue comme comportant des risques à terme.

Il est nécessaire d'apporter les preuves irréfutables des avantages du produit qu'on cherche à introduire sur le marché.

Pour pallier ses réactions, la nouveauté doit d'abord être apportée dans des domaines marginaux, récents, occupant des niches du marché.

Les constructeurs et leurs commerciaux connaissant la frilosité de leur clientèle ne sont pas enclins à proposer des produits révolutionnaires. C'est le serpent qui se mord la queue.[76]

Sur un plan politique, pour essayer de contrer les sacro-saintes loi du marché et imposer des modes de production d'énergie plus propres, il faudrait attendre de nos responsables une très grande volonté et un très grand courage pour changer le cours des choses. Autant rêver ! La règle étant de penser à la prochaine élection, difficile de se projeter dans l'avenir.

De façon plus globale, il suffit pour se convaincre de la pusillanimité de nos gouvernants face aux pouvoirs économiques et financiers d'observer leurs réactions face aux alertes du GIEC sur le plan climatique ou leur apathie suite aux catastrophes nucléaires de Fukushima et Tchernobyl.

Ce n'est donc pas de ce côté-ci qu'il faut attendre quoique ce soit pour promouvoir les moteurs à apports de chaleur externe.

33.2 Les raisons d'espérer

Après le triste constat fait ci-dessus, nous allons essayer de trouver des raisons d'espérer. En dehors de la brillante réussite des cryogénérateurs (voir pour mémoire page 142, § 14.2) basés sur le cycle de Stirling, peut-être qu'une embellie viendra de la micro-cogénération domestique. L'ère de la production de l'électricité nucléaire semblant enfin se terminer et avec elle l'abandon du principe d'une production centralisée de cette électricité, il est probable que dans un proche avenir celle-ci sera fabriquée localement grâce aux panneaux photovoltaïques, aux éoliennes terrestres ou off-shore, à la biomasse et en utilisant des systèmes produisant à la fois de la chaleur et de l'électricité. Pourquoi rejeter des calories à l'atmosphère quand on sait les utiliser comme nous l'avons vu page 137, au chapitre 12 relatif à la cogénération ?

Le coût des chaudières fonctionnant en micro-cogénération est encore prohibitif pour qu'un particulier songe à s'en équiper mais une généralisation peut diminuer ce handicap si elle est associée à des mesures fiscales appropriées.

Pour terminer sur une note d'optimisme, nous nous disons que bien des innovations ont trouvé des applications dans des secteurs très éloignés de ceux envisagés par leurs inventeurs.

Par exemple, au moment de l'invention du chemin de fer, on n'imaginait pas que celui-ci servirait à véhiculer des voyageurs. Sa fonction était destinée à transporter uniquement des marchandises.

Qui, au XIX^{ème} siècle, aurait imaginé qu'un moteur Stirling pouvait servir à faire du froid ?

Robert Stirling l'aurait peut-être pressenti mais difficile pour lui de penser que son invention allait servir dans un domaine médical de pointe, celui des IRM, en maintenant de l'hélium sous forme liquide pour permettre la supraconductivité nécessaire à ces appareils.

Et pour cause : l'hélium a été découvert en 1868, la supraconductivité en 1911 et la résonance magnétique nucléaire en 1938 !

Dans cette logique, dans notre monde actuel bouillonnant d'idées et face aux nombreux défis technologiques et environnementaux à relever, il ne nous est pas interdit d'espérer de nouveaux horizons pour les moteurs à air chaud.

Septième partie

Annexes

*Quelques exemples rapportés en peu de mots
donnent plus d'éclat, plus de poids aux réflexions...*

Vauvenargues (1715-1747)

Annexe A

Blaise Pascal (1623-1662)

Aujourd'hui, tout le monde scrute son baromètre pour y lire la pression atmosphérique ou sa variation pour avoir une idée du temps qu'il va faire. Il nous paraît évident que l'air qui nous entoure exerce sur nous une pression et que celle-ci diminue quand on monte en montagne.

Pourtant, ne faut-il pas attendre le 19 septembre 1648 et l'expérience pilotée par Blaise Pascal au Puy de Dôme pour mettre en évidence de façon indubitable la notion de pression atmosphérique ?

Une mesure de pression fut réalisée au sommet du Puy de Dôme (1465m) par son beau-frère Florin Périer. Une autre à Clermont-Ferrand à environ 390m. Il fut trouvé un écart d'environ 10% entre les deux mesures. La preuve de l'existence de la pression atmosphérique était donc apportée malgré l'hostilité de certains des pairs de Blaise Pascal à cette théorie.

Voir ci-dessous le compte rendu qui en est fait :

789. Pour mieux faire connoître ces différences, on a exprimé par la Figure dix-septième les expériences qui furent faites à Clermont en Auvergne par un parent de M. Pascal : il y a proche cette Ville une montagne de 500 toises de hauteur, nommée *le Puy de Dôme*, où l'on fit en même tems trois Observations : la première A dans un jardin de Clermont, le mercure se trouva dans le tuyau à 26 pouces 3 lignes $\frac{1}{2}$; la seconde B environ au tiers de la côte, le mercure se trouva dans le tuyau à 25 pouces de hauteur, étant descendu, en montant, de 15 lignes $\frac{1}{2}$; la troisième C au sommet de la montagne où le mercure ne s'est plus trouvé qu'à la hauteur de 23 pouces 2 lignes, étant descendu en tout de 3 pouces 1 ligne $\frac{1}{2}$.

FIGURE A.1 – Description de l'expérience de Pascal et de son beau-frère Florin Périer [36]

L'air est donc un élément qui a une masse. Plus tard, on saura qu'il est compressible, que sa pression, sa température et son volume sont des paramètres liés entre eux. Nous avons examiné cela de façon plus précise dans le chapitre « Théorie » (page 161, § 20).

Quatre ans avant Blaise Pascal, Torricelli était déjà convaincu par cette notion de pression atmosphérique. Par prudence, pensant peut-être à Galilée, il ne fit guère état de ses réflexions pour ne pas froisser les autorités religieuses et attirer leur ire ? À cette époque, il était souvent fait l'amalgame entre théologie et sciences exactes.

Des inondations avaient eu lieu en Italie. Puiser de l'eau à plus de 10 mètres de profondeur était impossible et posait question. Pour Torricelli, dans ce cas de figure, il se créait un vide entre l'eau et la pompe, tout comme en partie supérieure de la colonne de mercure de ce qui allait devenir le baromètre à mercure.



FIGURE A.2 – Baromètre de Torricelli

Cette notion de vide était fortement rejetée, à l'époque, par les autorités religieuses et certains scientifiques convaincus de la véracité du dogme « La nature a horreur du vide ». Heureusement, les idées de Torricelli et la démonstration de Pascal permirent de revenir sur cette « évidence ».

Annexe B

Nicolas Léonard Sadi Carnot(1796-1832)

Pour commencer, une petite précision : Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) dont nous parlons ici en tant que physicien est l'oncle de Marie François Sadi Carnot (1837-1894) qui fut président de la République française de 1887 jusqu'en 1894 date à laquelle il fut assassiné par Caserio à Lyon.

Il s'agit donc de deux personnages différents même s'ils ont des liens proches de parenté.

Nicolas Léonard Sadi Carnot est très connu dans la sphère des ingénieurs et scientifiques.

Marie François, son neveu, est passé à la postérité du fait de ses fonctions politiques et de son destin tragique.



FIGURE B.1 – Nicolas Léonard Sadi Carnot à l'âge de 17 ans d'après une peinture de Louis-Léopold Boilly (1761-1845)

Nicolas Léonard Sadi Carnot était lui-même le fils du « Grand Carnot » qui fut mathématicien, ingénieur, général, homme politique très proche de la Révolution française et ministre de Napoléon Bonaparte. Le rôle de ce père, Lazare Nicolas Marguerite Carnot (1753-1823), fut essentiel dans la formation scientifique de son fils Nicolas Léonard Sadi.

Il passe le concours d'entrée à l'école polytechnique à l'âge de 16 ans, le minimum requis. Il est reçu avec brio.

La carrière militaire ne l'inspirait guère. Pour preuve cette déclaration qui lui est attribuée « *Les lois de la guerre, dit-on, comme si la guerre n'était pas la destruction de toutes les lois* ».

Sa passion pour les sciences le poussera à démissionner de l'armée, acte courageux compte tenu de ses ressources à cette époque. Son travail de recherche restera longtemps confidentiel avant d'être reconnu comme étant d'une importance capitale pour le développement des machines thermiques. Parmi les personnes qui reconnurent la qualité du travail de Sadi Carnot, on citera principalement Lord Kelvin (1824-1907) et Rudolf Clausius (1822-1888).

À l'époque, les connaissances relatives à l'énergie thermique, appelée alors le calorique, étaient pour le moins balbutiantes. Avec son livre publié en 1824 : « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*[41] », Sadi Carnot jeta les bases de la science qu'on appelle aujourd'hui la

thermodynamique. Cet opuscule est en prose, sans formule mathématique ou presque. Sa lecture diffère donc de façon significative de celle d'un livre scientifique écrit de nos jours.

Ici, nous retiendrons quelques idées force :

- Pour obtenir de l'énergie mécanique à partir de chaleur, il faut nécessairement une source froide et une source chaude.
- Sadi Carnot parle de la notion de « calorique », une sorte de fluide véhiculant les calories, car à l'époque les notions de quantité de chaleur, de transfert thermique n'avaient pas encore été théorisées.
- La transformation de chaleur en énergie mécanique est possible. À l'inverse on peut transformer de l'énergie mécanique en énergie calorifique.
- Sadi Carnot pressent que les moteurs utilisant un gaz supplanteront les machines à vapeur.
- Le principe de conservation de l'énergie, premier principe de la thermodynamique, n'est pas attribué à Sadi Carnot mais à Julius Robert von Mayer. Cependant, il est quasiment certain que Sadi Carnot était convaincu qu'on assistait à des changements de formes des différentes énergies (mécanique, calorifique, chimique) tout en conservant leur valeur. Ou, autrement dit, il n'y a pas de perte lors d'un changement de forme de l'énergie.

Sadi Carnot ne se mettait pas en avant. D'une grande humilité, n'écrivait-il pas :

« Combien la modestie ajoute au mérite ! Un homme de talent qui cache son savoir semble une branche inclinée sous le poids de ses fruits ».

De santé fragile, Nicolas Léonard Sadi Carnot est mort du choléra en 1832, à l'âge de 36 ans, sans avoir obtenu de son vivant toute la reconnaissance qui lui était dû pour ses travaux. Par contre, depuis, il est désormais passé à la postérité.

Annexe C

Bessemer (1813-1898)

Pourquoi parler de Bessemer dans ce livre ? Par caprice de son auteur ? Peut-être, mais pas uniquement. La raison principale de cette insertion nous est donnée par Robert Stirling lui-même à la fin de sa vie et après les déboires que ses moteurs rencontrèrent :

« ...These imperfections have been in a great measure removed by time, and especially by the genius of the distinguished Bessemer. If Bessemer iron or steel had been known thirty-five or forty years ago, there is scarce a doubt that the air engine would have been a great success... It remains for some skilled and ambitious mechanist in a future age to repeat it under more favourable circumstances and with complete success. »

On peut traduire cette réflexion de la façon suivante :

« ...Ces imperfections ont été en grande partie corrigées au cours du temps, et plus particulièrement grâce au génie du respectable Bessemer. Si l'acier ou le fer de Bessemer avait été connu il y a trente-cinq ou quarante ans, il ne fait aucun doute que le moteur à air chaud aurait eu un grand succès. Il reste, à l'avenir, à des mécaniciens ambitieux et compétents de répéter ces travaux dans des circonstances plus favorables et d'obtenir un plein succès. »

Qu'a donc apporté Bessemer avec son convertisseur ? Pourquoi son introduction plusieurs dizaines d'années plus tôt aurait modifié le développement et le succès des différents moteurs ou machines à vapeur ?

Pour répondre à ces questions, on va d'abord rappeler les caractéristiques de trois matériaux qui sont souvent confondus :

- Le fer : c'est un élément chimique de numéro atomique 26 et de masse atomique 55,85, de densité 7,8. Il fond vers 1530°C. Il est malléable, surtout quand il est chaud, et ductile (qui se laisse étirer, battre, travailler sans se rompre). Il est dur, c'est le plus résistant des métaux usuels. Il est magnétique. Il s'oxyde facilement en présence d'air humide. Il ne comporte aucune impureté ou aucun additif.

- La fonte : c'est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2,5%. Elle devient liquide à 1200°C environ en fonction de sa teneur en silicium.

La fonte se moule facilement pour obtenir des formes complexes et massives comme un bâti de moteur par exemple.

Afin de réduire les frottements entre pièces mécaniques, celles-ci peuvent être réalisées en fonte (paliers, coussinets). La présence de carbone sous forme de graphite contribue à cet objectif.

La fonte est un matériau qui résiste bien à la corrosion de solutions acides ou à l'oxydation, d'où son utilisation dans les industries chimiques ou pétrolières.

Associée au chrome, au nickel, au silicium, à l'aluminium, la fonte est réfractaire. Cette qualité est intéressante pour fabriquer des pièces de four ou de chaudières.

- L'acier : c'est aussi un alliage de fer et de carbone mais avec des teneurs en carbone beaucoup plus faible (inférieures à 2%, voire 1% dans la majorité des cas). Sa température de fusion est de 1400°C environ, fonction de sa constitution en éléments d'alliage.

Les utilisations de l'acier sont très nombreuses et fonction de son mode d'élaboration, de la teneur des éléments qu'on peut lui rajouter pour réaliser des alliages spéciaux.

On compte les aciers de construction, les aciers à aimant, les aciers rapide destinés à l'usinage, les aciers de décolletage, les aciers inoxydables, les aciers réfractaires...

Ils ont des propriétés mécaniques excellentes, ils sont en général faciles à usiner et à souder... tout cela en fonction, bien sûr, de leur teneur en carbone ou autres éléments rajoutés.

Ce bref exposé montre que l'acier offre beaucoup plus de possibilités de réalisation au concepteur de machines, d'ouvrages d'art... que ne le permet la fonte même si celle-ci garde des propriétés intéressantes et qui lui sont spécifiques.

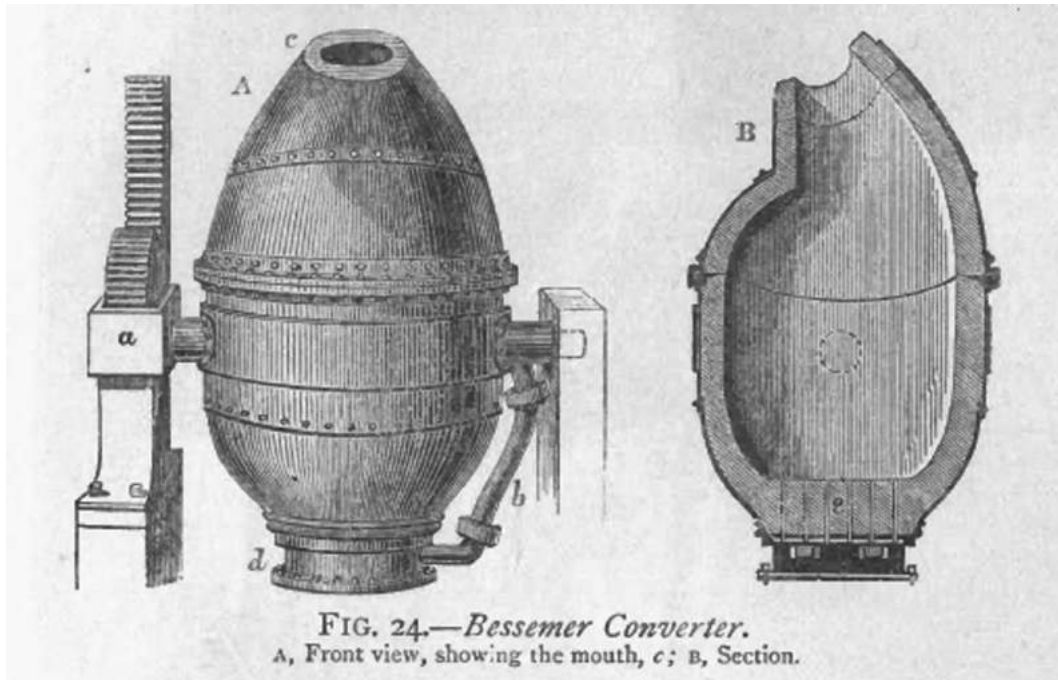


FIGURE C.1 – Convertiseur Bessemer

Dans un convertisseur Bessemer, on diminue le taux de carbone présent dans la fonte en injectant de l'air afin de le brûler. Cette réaction produit elle-même de la chaleur du fait de cette combustion ce qui maintient le contenu du convertisseur en température.

Si le procédé est simple, sa mise en œuvre demanda de nombreux travaux et astuces. C'est là que l'intelligence et la perspicacité de Bessemer sont à honorer.

Annexe D

Le XIX^{ème} siècle

Le XIX^{ème} siècle n'a pas à rougir par rapport à la période actuelle. De nombreuses découvertes et innovations de cette époque ont complètement transformé notre façon de vivre ayant permis aux sciences et techniques de réaliser des progrès rapides et impressionnants. Sans doute les avons-nous perdues de vue tellement elles font désormais partie de notre quotidien. Dans les plus grandes lignes, elles sont rappelées ci-dessous.

D.1 La physique et la chimie

- Travaux de Gay-Lussac sur la dilatation des gaz, d'Avogadro sur la constitution moléculaire des gaz.
- En 1824, Sadi Carnot pose les bases de la thermodynamique.
- Mesure de la vitesse de la lumière par Fizeau en 1829.
- Loi de Joule en 1840.
- Loi de conservation de l'énergie par Helmholtz en 1847.
- Invention de l'analyse spectrale en 1859 par Kirchhoff et Bunsen.
- Théorie électromagnétique de la lumière en 1864 par Maxwell.
- Classification périodique des éléments par Mendeleïev en 1869.
- Découverte des rayons X en 1895 par Röntgen, de la radioactivité de l'uranium en 1896 par Becquerel, du radium en 1899 par Pierre et Marie Curie.
- Spectroscopie et l'analyse de la lumière solaire par Fraunhofer.
- Perfectionnement des télescopes.
- Fresnel et la diffraction de la lumière.
- Etc...

D.2 L'électricité et ses applications

- Volta invente la pile en 1800.
- Oersted découvre l'électromagnétisme en 1820.
- Loi d'Ohm en 1826.
- Faraday et l'induction électromagnétique en 1831.
- Télégraphe de Morse en 1845.
- Invention du téléphone par Bell en 1876.
- Edison invente l'ampoule électrique en 1879.
- Etc...

D.3 Les transports

- Bateau à vapeur : première liaison régulière sur l'Hudson dès 1807, premier steamer à traverser l'Atlantique en 1838.
- Locomotive de Stephenson en 1814, première voie ferrée en 1825 en Angleterre, en 1832 en France, en 1855 au Brésil, en Egypte, en Australie... traversée des Etats-Unis, d'est en ouest, en 1869.
- Invention de l'hélice en 1832.
- Mise au point du moteur à explosion par Otto en 1876, ce qui donne naissance à l'âge industriel de l'automobile.
- 1881 voit les premiers tramways électriques à Berlin.
- Clément Ader crée le premier avion en 1890.

- Brevet du moteur Diesel en 1891.
- En 1892, Michelin brevète le pneu démontable.
- Etc...

D.4 La mécanisation

- Métier à tisser de Jacquard breveté en 1801.
- Invention de la presse rotative en 1845.
- Mécanisation de l'agriculture dès 1875 (moissonneuse lieuse).
- Etc...

D.5 Autres domaines

- Henry Bessemer invente un nouveau procédé d'affinage de la fonte pour obtenir de l'acier en 1855.
- Première exposition universelle à Londres en 1851.
- Invention de la dynamite par Nobel en 1867.
- Mise au point du béton armé en 1867.
- Premiers procédés de photographie en couleur en 1869.
- Invention du cinéma par les frères Lumière en 1895.
- Etc...

Annexe E

Sous-marin SAGA

Avertissement : Il est difficile aujourd'hui de savoir ce qu'est devenu SAGA, si celui-ci a été exploité et a répondu aux attentes de ses concepteurs.

Même en l'absence de réponses à ces interrogations, il paraît intéressant de présenter ici cette magnifique réalisation industrielle.

L'article qui suit est un résumé de l'exposé de messieurs J. Mollard et D. Sauzade lors du colloque ISM 90 des 3, 4 et 5 décembre 1990 à Toulon.[75]

SAGA, sous-marin à grande autonomie lancé en 1987 par COMEX et IFREMER, est le premier prototype d'une nouvelle génération de sous-marins industriels, capables de réaliser des opérations avec plongeurs ou ROVs à proximité immédiate du site de travail, sans aucune assistance en surface.

Ce sous-marin de 28 mètres, avec un déplacement en plongée de 550 tonnes, comporte un équipage de 6 personnes et intervient jusqu'à 600 mètres de profondeur.

Son autonomie opérationnelle est d'environ deux semaines, sans faire surface.

Il peut ainsi parcourir en plongée 150 milles nautiques (environ 280 km)

E.1 Principaux paramètres

- Longueur hors tout : 28,06 m
- Largeur hors tout : 7,40 m
- Hauteur hors antennes : 8,50 m
- Déplacement en surface : 303 T
- Tirant d'eau en surface : 3,65 m
- Déplacement en plongée : 545 T
- Immersion maximale : 600 m
- Immersion pour la plongée humaine : 450 m
- Générateurs de puissance :
 - En surface : 1 moteur Diesel HISPANO-SUIZA 175 kW
 - En immersion : 2 moteurs STIRLING 2 x 75 kW

E.2 Stockage de gaz et d'énergie

- Combustible : 6200 l
- Stockage cryogénique de l'oxygène : 6500 kg
- Air, gaz de plongée et oxygène : 5600 Nm³
- Batterie principale : 700 kWh
- Energie totale stockée à bord sous forme électrique et chimique : 10 500 kWh

SAGA est équipé de deux moteurs Stirling qui fournissent en plongée la puissance nécessaire à la propulsion et à l'alimentation électrique. Ils produisent également la chaleur utilisée pour le chauffage du compartiment hyperbare ainsi que la protection contre le froid des plongeurs pendant leurs sorties en scaphandre.

Le développement, l'industrialisation et la commercialisation du moteur Stirling pour la propulsion marine ont été entrepris depuis les années 1970 en Suède par la société United Stirling maintenant intégrée au chantier naval Kockums à Malmo.

E.3 Les moteurs Stirling AIP

- Gaz de travail : Hélium (130 bars)
- Pression de combustion : 22 bars
- Vitesse : 2400 tr/mn
- Consommation de fuel : 260 g/kWh
- Consommation d'oxygène : 980 g/kWh
- Puissance maximale sur arbres : 75 kW
- Chaleur récupérable sur les gaz de combustion : 18 kW

Les principaux problèmes de développement ont concerné :

- La tenue mécanique des matériaux soumis à de fortes variations de température.
- L'étanchéité des pièces en mouvement vis-à-vis de l'hélium à forte pression (130 bars).
- Le contrôle des écoulements complexes des fluides à très haute température (de 200 à 2000 K) dans la chambre de combustion.
- La réalisation d'échangeurs (régénérateurs) à très grande surface d'échange et faible inertie thermique.

Les gaz brûlés, à une pression de 22 bars, s'évacuent directement pour des immersions inférieures à 200 mètres. Au-delà et jusqu'à l'immersion maximale de 600 mètres, les gaz brûlés et les condensats doivent être surcomprimés nécessitant la mise au point d'un surpresseur spécifique réalisé par le GIE SAGA.

SAGA est équipé de deux réservoirs cryogéniques situés à l'extérieur de la coque résistante, donnant une capacité totale de 6,5 tonnes. L'oxygène gazeux et sa pressurisation sont obtenus par vaporisation dans des échangeurs chauffés par l'eau de mer ambiante.

La densité gravimétrique du module énergie du sous-marin, comprenant le fuel, l'oxygène, les stockages et les deux moteurs Stirling, est environ de 0,25 kilowattheure électrique par kilogramme sans tenir compte de la chaleur récupérée pour les plongeurs. Cette performance est très supérieure à celles des sources électrochimiques et comparable à celles des piles à combustible encore en développement.



FIGURE E.1 – Maquette du sous-marin SAGA [8]

Comme nous venons de l'apprendre avec cet article, le moteur Stirling peut constituer une solution élégante, performante et très industrielle à certains problèmes spécifiques.

Annexe F

L'aviation : pourquoi a-t-elle besoin du moteur Stirling ?

Ce qui va suivre est une traduction libre et partielle d'un article de Darryl Phillips présentant un très grand intérêt¹ et paru sur le site « airport-corp.com ». L'autorisation de cette traduction et de sa publication ont été aimablement accordées par Todd Lieske propriétaire de Airport Avionics [81]. Pour Darryl Phillips, le moteur à combustion interne, malgré les nombreuses améliorations qui lui ont été apportées, conserve ses défauts intrinsèques, à savoir : il est bruyant, il engendre des vibrations, il consomme du carburant. Quant aux turbines, elles ont aussi leurs propres problèmes : on ne peut les dimensionner pour en équiper des avions de tourisme, malgré un bon rapport puissance-poids leur consommation est excessive. Nous allons détailler, ci-dessous, les avantages que présente le moteur Stirling par rapport à ses concurrents.

F.1 Les vibrations

Le couple vu par l'arbre de transmission d'un moteur Stirling comportant 4 cylindres est quasiment constant à quelques pourcents près. Ce n'est pas le cas d'un moteur 4 cylindres à combustion interne. Ceci nécessite de lui adjoindre un volant d'inertie forcément lourd ce qui constitue un inconvénient pour un avion.

Le niveau vibratoire d'un moteur à combustion interne et de son environnement découle directement de ces irrégularités de couple. Ceci n'est pas bon pour le moteur lui-même et pour la structure de l'avion.

F.2 Le bruit

Le bruit de l'avion, à l'intérieur et à l'extérieur de celui-ci, provient du niveau vibratoire dont nous venons de parler ci-dessus mais également de la détente à l'atmosphère des gaz de combustion du moteur à combustion interne.

Non seulement le niveau vibratoire d'un moteur Stirling est plus bas mais il n'y a pas de détente à l'atmosphère d'un quelconque gaz. Le gaz de travail est enfermé dans les cylindres, la combustion du carburant est continue et se fait généralement à la pression atmosphérique.

Quand le bruit émis par un avion est faible, c'est tout bénéfice pour les passagers et l'équipage qui arrivent moins fatigués au terme d'un vol.

Les riverains des aéroports ou ceux situés sous les couloirs aériens auraient tout avantage à observer des avions silencieux.

Psychologiquement parlant, tout appareil silencieux (un avion, une moto...) est perçu comme étant plus sûr que son homologue bruyant.

F.3 la consommation et la nature du combustible

Lors de la période de développement des moteurs Stirling, la société Philips a testé avec succès différents types de combustible [91][58]. Pour le domaine de l'aviation, on pourrait imaginer : pétrole brut, huile de lubrification, gasoil, huile d'olive... ou d'autres produits plus sophistiqués à mettre au point. L'intérêt est de trouver un carburant non explosif pour éviter ou limiter tout incendie en cas d'accident.

1. Darryl Phillips a reçu, en 1994, le prix décerné par le Wolf Aviation Fund pour son travail de promotion du moteur Stirling dans l'aviation et, d'une façon plus générale, pour sa volonté de réduire le bruit des avions.

Grâce à son rendement élevé, dû à la fois à son régénérateur et aux différences de température importantes, le moteur Stirling consomme moins de carburant qu'un moteur à combustion interne. Pour un avion, cela signifie une plus grande autonomie.

F.4 La puissance et l'altitude

Un avion équipé d'un moteur traditionnel à combustion interne perd très rapidement de la puissance quand il prend de l'altitude. La densité de l'air diminuant, le moteur est moins performant.

C'est tout l'inverse pour un moteur Stirling. Plus il vole haut, plus l'air est froid, plus son rendement, sa puissance et sa vitesse sont importants.

	Moteur traditionnel	Moteur Stirling
Puissance au niveau de la mer	100%	100%
Puissance à 3000 m d'altitude	70%	110%
Puissance à 10 000 m d'altitude	0%	125%
Vitesse au niveau de la mer	100%	100%
Vitesse à 3 000m d'altitude	110%	110%
Vitesse à 10 000m d'altitude	0%(dès 6 000 m)	170%

Sur ce tableau, on aurait pu faire apparaître les performances d'un avion équipé d'un moteur turbocompressé. Elles sont meilleures que celles d'un avion à moteur traditionnel mais bien inférieures à celles d'un avion utilisant un moteur Stirling.

Pour un avion avec un moteur traditionnel, la vitesse décroche à environ 3 000 m. Lorsqu'on a affaire à un moteur turbocompressé, la vitesse chute rapidement dès 6 000 m environ. Ce phénomène est inconnu du moteur Stirling.

Pour résumer, un avion équipé d'un moteur Stirling vole plus facilement au-dessus des nuages, il a donc une meilleure visibilité, il va plus vite et consomme moins de carburant.



FIGURE F.1 – Patrouille de France - Photo de Marius Bernard

Au vu de ce qui précède, on peut se demander, à juste titre, pourquoi les avions de tourisme actuels ne sont pas équipés de moteur Stirling. Les réponses possibles ne sont pas d'ordre technique mais d'ordre économique (coût d'un tel moteur, remise en cause d'une filière où les frais de recherche et les investissements sont amortis...), d'ordre psychologique (résistance au changement, à la nouveauté...) et peut-être d'ordre politique (incitation fiscale, aspect réglementaire, volonté ou non d'atteindre des objectifs écologiques...).

Darryl Phillips a toujours été confiant et plein d'optimisme. À nous de suivre son exemple et de perpétuer ses idées.

Annexe G

Le bus DAF équipé d'un moteur Stirling

Comme nous avons pu le voir dans la partie historique, Philips a développé un moteur dans le but d'équiper un bus DAF. Ce moteur est le Type 4-235 dont nous pouvons admirer un plan en coupe ci-dessous :

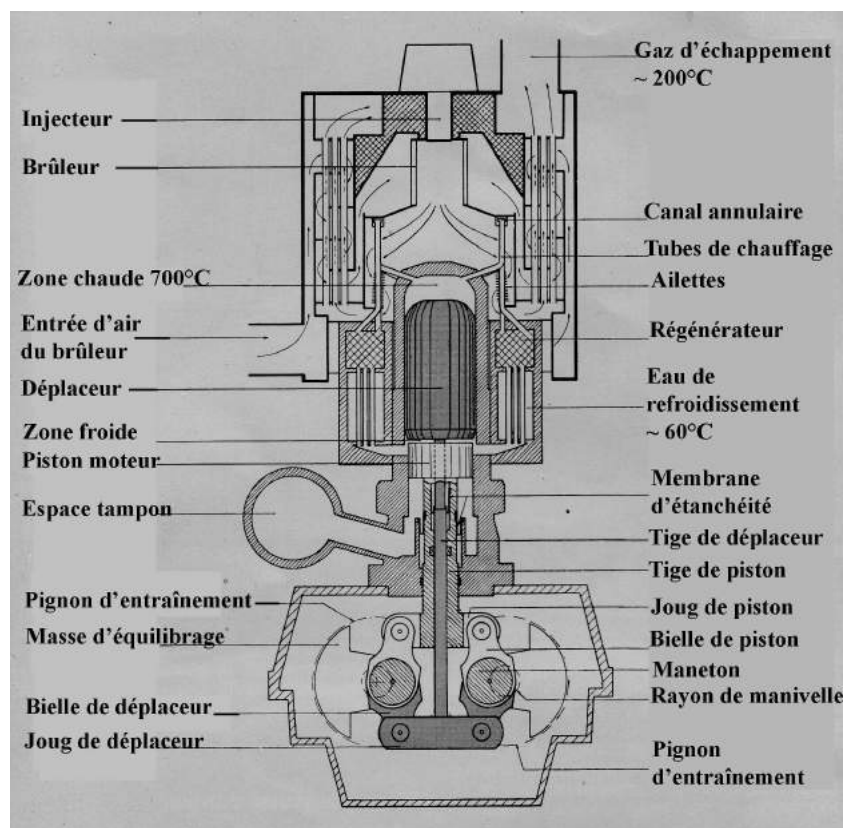


FIGURE G.1 – Moteur Philips 4-235 monté sur le bus DAF

Les buts recherchés étaient les suivants :

- Une faible pollution de l'air grâce à une combustion complète du carburant.
- Supprimer au maximum les vibrations afin de réduire le niveau de bruit.
- Réaliser une combustion à l'extérieur des cylindres afin de permettre l'utilisation de différents types de combustible.
- Abaisser la consommation de carburant.
- Obtenir des caractéristiques intéressantes en terme de puissance, couple, souplesse d'utilisation.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs solutions étaient envisageables : pots catalytiques, motorisation électrique, moteurs hybrides, turbines à gaz ou à vapeur de nouvelles générations...

Philips choisit le moteur Stirling pour ses qualités et sa possible mise en œuvre rapide. De plus, Philips avait déjà acquis une parfaite maîtrise de ce type de moteur au cours du développement de différents modèles mais aussi au travers de ses travaux sur les cryogénérateurs.

Philips a opté pour l'hélium comme gaz de travail à une pression de 110 fois celle de l'atmosphère. La puissance peut varier très rapidement, de l'ordre de 0,3 seconde, soit pour croître, soit pour décroître.

Le brûleur utilise du gas-oil pour moteur diesel mais est capable d'utiliser d'autres combustibles. L'air de combustion est préchauffé à environ 250°C en récupérant une partie des calories présentes dans les gaz d'échappement.

Le moteur comporte 4 cylindres de 235 cm³ chacun, d'où son appellation 4-235. L'embellage est de type rhomboïdal.

Sa puissance maximale est de 75 kW (100 horsepower) à 3000 tr/mn permettant une vitesse de pointe de 80 km/h. En doublant la pression du gaz de travail, 220 fois la pression atmosphérique, on double également sa puissance et la vitesse maximale est alors de 90 km/h. La température haute du gaz de travail est de 700°C, et de 60°C pour sa température basse.

Ce moteur pèse 760 kg, ses dimensions sont de 1250 mm de long, 520 mm de large et 1100 mm de haut.

Le moteur choisi fut monté sur un châssis de bus DAF carrossé par la société belge Jonckheere. Un soin particulier fut apporté au confort des 31 passagers et au chauffeur : air conditionné, vitres teintées d'une haute qualité isolante sur le plan thermique, musique stéréo... Le chauffeur, non plus, n'a pas été oublié avec un poste de conduite confortable et des automatismes pour faciliter son travail.

Se reporter page 84 pour voir des illustrations de cette magnifique réalisation en plus de celle ci-dessous.

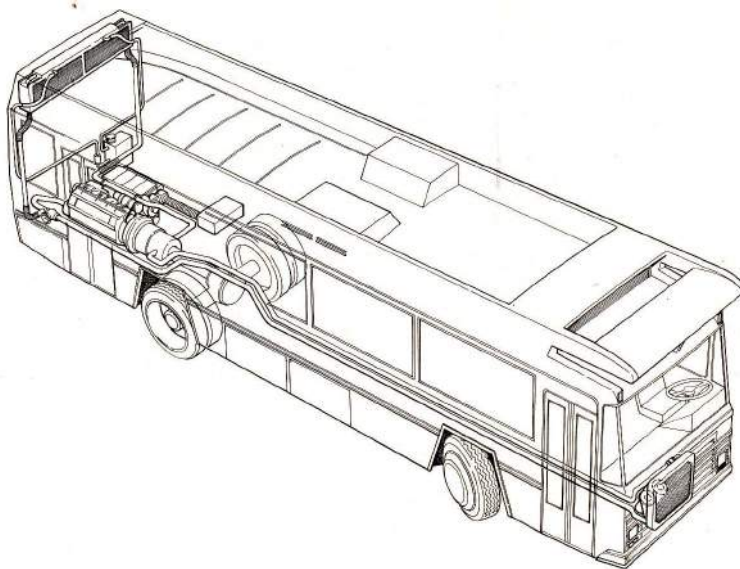


FIGURE G.2 – Vue d'ensemble du bus DAF équipé du moteur Philips 4-235

Annexe H

Glossaire

Adiabatique

Cet adjectif qualifie une transformation thermodynamique qui se produit sans échange de chaleur avec le milieu extérieur. On parle aussi de transformation isentropique.

Chaleur spécifique.

C'est la quantité d'énergie qu'il est nécessaire d'apporter à une unité de masse d'un corps pour élever sa température de 1 K. Elle s'exprime en joule par kilogramme et kelvin ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$). Pour un gaz, on distingue la chaleur spécifique à pression constante C_p de la chaleur spécifique à volume constant C_v .

Cinématique

Science qui étudie le mouvement des corps indépendamment des causes de celui-ci. Ce mouvement est décrit par des équations.

Cogénération

Une installation de cogénération fournit en même temps deux types d'énergie : de l'énergie mécanique transformée en énergie électrique et de l'énergie calorifique. Un appareil de ce type peut fournir électricité, chauffage et eau chaude sanitaire à une maison. Le rendement global est alors proche de 100%. On parle plutôt de micro-cogénération pour désigner des installations domestiques de faible puissance.

Conductivité thermique

Elle est une image de la capacité d'un corps à propager la chaleur en son sein. C'est la quantité de chaleur qui passe dans une section de $1\ m^2$, avec un gradient de température de $1\ K\ m^{-1}$ et dans une unité de temps. Elle s'exprime donc en $W\ m^{-1}\ K^{-1}$.

COP

Coefficient de (Of) Performance d'une pompe à chaleur. C'est le rapport entre l'énergie calorifique extraite d'un milieu ou apportée dans un autre et l'énergie mécanique nécessairement fournie. Ce rapport peut être supérieur à 1. C'est le pendant du rendement pour un moteur.

Cryogénie

Science et technologie des températures inférieures à 100 K (ou $-173^\circ C$). De nombreux domaines requièrent de telles températures : médical (IRM...), alimentaire (conservation des produits), physique (supraconducteurs, super-fluides...).

Cycle thermodynamique

Le cycle thermodynamique associé à un appareil définit les différentes transformations répétitives que subit le gaz utilisé. Ce cycle se représente sous la forme du diagramme Pression-Volume complété utilement parfois par le diagramme Température-Entropie.

Dépliceur

Élément d'un moteur Stirling qui permet, au cours d'un cycle, de faire passer le gaz de travail de la partie froide vers la partie chaude et vice versa. C'est en fait, un piston qui se déplace dans un cylindre. Ne pas confondre avec le "piston moteur" dont la définition est donnée dans ce glossaire.

Diagramme PV

Le diagramme PV (Pression - Température) permet de visualiser un cycle thermodynamique et les différentes transformations que subit le gaz au cours de chacune des phases. Il permet également d'estimer le travail recueilli au cours du cycle.

Énergie finale

C'est l'énergie qui est utilisée directement par le consommateur après transformations et transport de l'énergie primaire (voir ci-dessous). La différence entre ces deux concepts correspond donc aux différentes pertes.

Énergie primaire

C'est l'énergie brute nécessaire, en amont, pour satisfaire les besoins finaux des consommateurs. Elle inclut donc les différentes pertes liées à la production ou transformation de l'énergie, à son transport...

Fiabilité

Science qui étudie le taux de défaillance d'un matériel. Quand ce taux est faible, le matériel est dit fiable.

Isentropique

Cet adjectif qualifie une transformation thermodynamique qui se produit sans échange de chaleur avec le milieu extérieur. On parle aussi de transformation adiabatique.

Isobare

Ce terme qualifie une transformation thermodynamique qui se produit à pression constante. Seuls la température et le volume du fluide changent au cours d'une telle transformation.

Isochore

Cet adjectif qualifie une transformation thermodynamique qui se produit à volume constant. Seules la pression et la température du fluide changent au cours d'une telle transformation.

Isotherme

Une transformation thermodynamique qui se produit à température constante est qualifiée d'isotherme. Seuls la pression et le volume du fluide changent au cours d'une telle transformation.

Kelvin

C'est l'unité de mesure des températures dans le système international. Un kelvin (sans majuscule !) équivaut à un degré Celsius. La température de 0 K correspond à -273,15 °C, c'est la température minimale qu'on peut concevoir en vertu des lois de la thermodynamique. On l'appelle le zéro absolu. Lord Kelvin, physicien britannique du XIX^{ème} siècle, est à l'origine de cette unité.

Maintenance

Définition AFNOR : "La maintenance vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé". On parle souvent de l'entretien d'un matériel, ce qui est équivalent.

Moteur à air chaud

C'est le nom que donna Robert Stirling à son moteur. Voir aussi ci-dessous "Moteur à combustion externe".

Moteur à apport de chaleur externe ou MACE

C'est le nom que donna Robert Stirling à son moteur. Voir aussi "Moteur à combustion externe".

Moteur à combustion externe

Nom donné à tous les moteurs qui puisent l'énergie calorifique dont ils ont besoin à l'extérieur d'eux-mêmes. Ceci les différencie des moteurs à combustion interne (moteurs à essence, diesels, turbines à gaz...) à l'intérieur desquels la chaleur est produite.

Moteur Alpha

Moteur Stirling constitué d'un cylindre chaud et d'un cylindre froid. Le gaz passant de l'un à l'autre.

Moteur Bêta

Moteur Stirling à cylindre unique dans lequel se meuvent un piston moteur et un déplaceur.

Moteur Gamma

Moteur Stirling à deux cylindres, un associé au piston moteur, l'autre au déplaceur.

Piston moteur

Éléments d'un moteur Stirling qui récupère l'énergie mécanique produite pendant la phase de détente isotherme. Il en restitue une partie durant la compression isotherme.

Pompe à chaleur

Dispositif qui permet de prendre des calories à une source froide pour les restituer dans un milieu plus chaud. Contrairement à ce qui se produit dans la nature, les calories vont du milieu froid vers le milieu chaud. C'est un principe utile, par exemple, pour chauffer une maison ou bien la rafraîchir selon la saison.

Régénérateur

Appareil qui permet de récupérer les calories envoyées à la source froide lors de la phase de refroidissement pour les utiliser de nouveau lors du chauffage suivant. Robert Stirling l'appelait "Économiseur".

Rendement

Le rendement d'un moteur est le rapport entre l'énergie mécanique nette recueillie et l'énergie calorifique totale fournie.

Rhomboïdal

Qui a la forme d'un losange. Philips a inventé l'embiellage rhomboïdal basé sur la déformation d'un losange. Pour un moteur Stirling, ce principe présente des avantages par rapport au système bielle-manivelle classique bien que plus complexe (meilleur respect du cycle, élimination des efforts radiaux...) .

Source chaude

Durant tout cycle thermodynamique, le système considéré (moteur, pompe à chaleur) échange de l'énergie calorifique avec une source froide **et** une source chaude. L'écart de température entre ces deux sources influe sur le rendement du dit-système.

Source froide

Voir ci-dessus : "source chaude".

Thermodynamique

Science qui étudie les transformations des systèmes sous l'effet de la chaleur ou de la température. Elle traite des relations entre les phénomènes mécaniques et calorifiques.

Bibliographie

- [1] Animated Engines - (<http://www.animatedengines.com/index.htm>).
- [2] Evolution du prix du baril de petrole depuis 1970, Graphiques et cours actuel (http://france-inflation.com/graph_oil.php).
- [3] Histoire de la production de l'acier - Wikipédia.
- [4] La loi de Boyle et la loi d'Avogadro - (<http://mendeleeiev.cyberscol.qc.ca/>).
- [5] Le Fardier de Cugnot de Void-Vacon en Meuse (<http://lefardierdecugnot.fr/>).
- [6] Le Moyen âge a tout inventé! (Historia Septembre-Octobre 2012).
- [7] Le portail des sous-marins - État des lieux de la propulsion anaérobie des sous-marins (<http://www.corlobe.tk/article17342.html>).
- [8] Le sous-marin SAGA (<http://bateaux.trucs.free.fr/ageneral.html>).
- [9] MOD II AUTOMOTIVE STIRLING ENGINE : NASA/glenn research center : Free download & streaming : Internet archive.
- [10] Musée de la Houille blanche ou Maison Aristide Bergès à Villard-Bonnot (<http://www.musee-houille-blanche.fr/>).
- [11] Musée du Cheminot d'Ambérieu en Bugey (<http://musee.cheminot.free.fr>).
- [12] Musée Maison Nicéphore niépce - Histoire de l'Inventeur de la Photographie.
- [13] P-40 OPEL STIRLING ENGINE : NASA/glenn research center : Free download & streaming : Internet archive.
- [14] Photologie forestière (<http://www.photologie.fr/>).
- [15] portail francophone de machines à vapeur, moteurs à air chaud et bateaux pop pop (<http://www.blooo.fr/>).
- [16] Radio Phono Mania - Collection privée de gramophones (<http://www.radiophonomania.ch/>).
- [17] Science Museum, London (<http://www.sciencemuseum.org.uk/>).
- [18] Stirling engine news - csowiki.
- [19] Tout savoir sur le moteur Ericsson (<http://www.moteurairchaud.com/ericsson/>).
- [20] Tout savoir sur le moteur Manson (<http://www.moteurairchaud.com/manson/>).
- [21] Tout savoir sur le moteur Stirling (<http://www.moteurstirling.com/index.php>).
- [22] Water lifting devices (<http://www.fao.org/docrep/010/ah810e/ah810e09.htm>).
- [23] *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*. 1847.
- [24] *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*. 1867.
- [25] La Nature :Revue des sciences et de leurs applications à l'art et à l'industrie. *Masson*, 1879.
- [26] La Nature : Revue des sciences et de leurs applications à l'art et à l'industrie. *Masson*, 1884.
- [27] La Nature : Revue des sciences et de leurs applications à l'art et à l'industrie. *Masson*, 1886.
- [28] La Nature : Revue des sciences et de leurs applications à l'art et à l'industrie. *Masson*, 1889.
- [29] La Nature : Revue des sciences et de leurs applications à l'art et à l'industrie. *Masson*, 1896.
- [30] *Catalogue Manufrance 1914*. 1914.
- [31] *Catalogue Mestre et Blatgé 1914*. 1914.
- [32] La Nature :Revue des sciences et de leurs applications à l'art et à l'industrie. *Masson*, 1936.
- [33] Académie des sciences . *Histoire de l'Académie royale des sciences ... avec les mémoires de mathématique et de physique... tirez des registres de cette Académie*. Imprimerie de Du Pont (Paris), 1699.
- [34] International Energy Agency. Key World Energy Statistics, 2012.

- [35] Anonyme. *De rebus bellicis*.
- [36] Belidor. *Architecture hydraulique ou l'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie*. 1739.
- [37] Belidor. *Architecture hydraulique ou l'art d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie, Tome second*. Chez L. Cellot Libraire-Imprimeur, 1782.
- [38] Marius Bernard. Photos de Marius Bernard (<http://www.fbpq.fr/mariusbernard/>).
- [39] Mefti et Bouroubi. Estimation et Cartographie de la Composante Globale du Rayonnement Solaire, 1999.
- [40] Giovanni Branca. *Le machine : volume nuovo et di molto artificio da fare effetti maraviglio si tanto spirituali quanto di animale operatione arichito di bellissime figure con le dichiarazioni a ciascuna d esse in lingua volgare et latina ([Reprod.]) / del Signor Giovanni Branca*. Giacomo Mascardi (Roma), 1629.
- [41] Sadi Carnot. *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Bachelier (Paris), 1824.
- [42] Edouard-Charles-Romain Collignon. *Les machines par Edouard Collignon ; ouvrage illustré de 82 vignettes par Bonnafox, Jahandier et Marie*. Hachette (Paris), 1873.
- [43] Salomon de Caus. *Nouvelle invention de lever l'eau plus eau que sa source...* 1644.
- [44] Albert de Rochas. *Les pneumatiques de Héron d'Alexandrie et de Philon de Byzance*. G. Masson éditeur edition, 1882.
- [45] Jules Dejust. *Machines à vapeur et machines thermiques diverses*. vve Ch. Dunod (Paris), 1899.
- [46] Syndicat des énergies renouvelables. Le développement du photovoltaïque en france. www.enr.fr, March 2009.
- [47] Dr Ducoux. *Notice sur Denis Papin inventeur des machines et des bateaux à vapeur*. 1854.
- [48] Rider Ericsson engine Co. *The improved Rider and Ericsson hot-air pumping engines*. 1906.
- [49] Diderot et d'Alembert. *L' Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. 1751.
- [50] Ernst et Shaltens. Automotive Stirling Engine Development Project, February 1997.
- [51] Louis Figuier. *Exposition et histoire des principales découvertes scientifiques modernes, tome premier : machine à vapeur - bateaux à vapeur - chemins de fer... de leyde - paratonnerre - pile de volta*. 1858.
- [52] Theodor Finkelstein and Allan J. Organ. *Air Engines : The History, Science, and Reality of the Perfect Engine*. ASME Press (American Society of Mechanical Engineers), 1 edition, September 2001.
- [53] Adolphe Focillon. *Les grandes inventions des temps modernes (2ème édition)*. A. Mame et fils (Tours), 1887.
- [54] Yannick Fonteneau. Et voilà le travail ! la riche impureté de la naissance d'un concept. 2009.
- [55] Yannick Fonteneau. Les antécédents du concept de travail mécanique chez Amontons, Parent et Daniel Bernoulli : de la qualité à la quantité (1699-1738). *Dix-huitième siècle*, 41, 2009.
- [56] Henry de Graffigny. *Les moteurs*. 1888.
- [57] Pierre Gras. *Le moteur Stirling et autres moteurs à air chaud*. Pierre Gras, July 2010.
- [58] C. M. K. Hargreaves. *The Philips Stirling Engine*. Elsevier Science Ltd, December 1991.
- [59] Centre international de Recherche sur le Cancer. Les gaz d'échappement des moteurs diesel cancerogènes. June 2012.
- [60] Bruno Jacomy. *Une histoire des techniques*. Seuil, September 1990.
- [61] Jno B. Kitching. *Ericsson's Caloric Engine*. 1860.
- [62] KoenB. Swashplate-simple.png
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/swashplate-simple.png>, February 2007.
- [63] Ivo Kolin. *The evolution of the heat engine*. 1972.
- [64] Henk Kubbinga. *L'Histoire du concept de "molécule"*. Springer Editions, July 2008.
- [65] Lanzetta-Boucher-Nika. *Etude et réalisation d'une pompe à eau Fluidyne*. FEMTO-ST Belfort, 2004.
- [66] Claude Nicolas Ledoux. *L'architecture considérée sous le rapport de l'art, des mœurs et de la législation*. 1804.
- [67] Claude Lévi-Strauss. *Le cru et le cuit*. Plon edition.
- [68] Albert Lévy. *James Watt (deuxième édition)*. Hachette (Paris), 1882.
- [69] Maurice Lévy. *Livre du Centenaire de l'Ecole polytechnique, 1897*.

- [70] Jacques Loigerot. *La production de froid sans fluide frigorigène...* 2005.
- [71] D. W. Loveridge. Robert stirling, preacher and inventor. *Newcomen (The) Society for the Study of the History of Engineering and Technology, Transactions London*, 50 :1–10.
- [72] Rudy Mémin. *Les moteurs STIRLING*. 2002.
- [73] Rudy Mémin. *Des étranges machines à air chaud*. 2006.
- [74] Michel. Photos de Micheld (<http://www.michel08.book.fr/>).
- [75] J. Mollard and Didier Sauzade. SAGA, first industrial autonomous submarine (<http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/1166/>). December 1990.
- [76] NASA. Stirling commercialization final report, May 1990.
- [77] Noel Nightingale. Automotive Stirling Engine MOD II Design report, October 1986.
- [78] Denis Papin. *Digesteur ou Manière d'amollir les os et de faire cuire toutes sortes de viande en fort peu de temps et à peu de frais ; avec une description de la machine dont il faut se servir pour cet effet....* 1688.
- [79] Denis Papin. *Nouvelle manière de produire à peu de frais des forces mouvantes extrêmement grandes*. Actes des érudits de Leipzig edition, 1690.
- [80] Philips. *Toward cleaner air - a passenger coach powered by a Philips Stirling engine*. Philips, 1971.
- [81] Darryl Phillips. AirSport Four-Part Stirling Engine Article Reprint - SMW march 1993-march 1994 (<http://www.airsport-corp.com/fourpartstirling.htm>).
- [82] Pierre Rabhi. *Conscience et environnement : La symphonie de la vie*. Les éditions du relié, 2013.
- [83] James G. Rizzo. *Robert Stirling's models of the "air engine"*. 2009.
- [84] Jean Rosmorduc. *Une histoire de la physique et de la chimie*. Seuil, November 1985.
- [85] Andy Ross. *Stirling Cycle Engines*. Solar Engines, 2nd edition, June 1981.
- [86] Robert Routledge. *Discoveries and inventions of the nineteenth century*. London ; New York : G. Routledge, 1881.
- [87] James R. Senft. *Miniature Ringbom engines*. 2009.
- [88] Robert Sier. *Reverend Robert Stirling, D.D. : A Biography of the Inventor of the Heat Economiser and Stirling Cycle Engine*. L.A.Mair, December 1995.
- [89] William K. Tabata. Automotive Stirling Engine - Development Program - a Success, August 1987.
- [90] Israel Urieli and David M. Berchowitz. *Stirling cycle engine analysis*. A. Hilger, 1984.
- [91] Graham Walker. *Stirling Engines*. Oxford University Press, USA, March 1980.
- [92] C.D. West. *Stirling engines and irrigation pumping*. 1987.

Index

- étanchéités, **183**
- académie de Lyon, 47
- accélération, 189
- acier, 177, 215
- Ader Clément, 217
- Ader Clément, 51
- adiabatique, **225**
- aéromoteur, 70
- aérosols, 161
- Agence internationale de l'énergie, 125
- Agency for Toxic Substances and Disease Control and Prevention, 90
- agriculture, 56
- Ain, 34
- AIP, **88**, 139, 220
- air, 161, 177
- Air Independent Propulsion, 88, 139
- Airspport Avionics, 221
- d'Alembert, 28
- Allemagne, 36
- Allison, 81
- alternateur linéaire, 85
- AMC Concord, 87
- AMC Spirit, 87, 189
- Amontons Guillaume, 38
- Ampère, 164
- Anaxagore, 55, 167
- Annonay, 42
- Antiquité, 27
- applications du moteur Stirling, **123**
- Archimède, 72
- argon, 161
- arts et métiers, 185
- ASE, **88**, 139, 189
- autocuiseur, 34
- automobiles, 139
- Automotive Stirling Engine, 87, **88**, 139
- autoroutes, 125
- avaleur de flamme, 46
- avance entre pistons, 189
- avion, 51
- avions de tourisme, 207
- Avogadro, 59, 164, 217
- azote, 161, 175, 177
- batteuse, 56
- Beale William, 85
- Beau de Rochas, 170
- Becquerel, 217
- bélier hydraulique, 43
- Bell, 217
- Belou, 69
- Béna Florence, 5
- Bénier, 70
- Bergès, 28
- Bernays Joseph, 174
- Bessemer, 65, 215, 218
- bielle-manivelle, 49, 171
- bingalow set, 79
- biomasse, 146, 208
- Blatgé, 76
- Boileau Nicolas, 19
- bois, 157
- bombardement usines Philips, 78
- Bonaparte, 213
- Boule d'Éole, 29
- Boyle, 161
- Branca Giovanni, 33
- Brayton, 170
- Bremen, 66
- brevet n°4081 de 1816, 62
- brevet n°5456 de 1827, 64
- brevet n°8652 de 1840, 65
- Bunsen, 217
- bus DAF, 83, 223
- Butte-aux-Cailles, 43
- cœur artificiel, 83
- Cabanes Charles, 45
- Calico, 134
- Californie, 134
- Calley John, 40
- Calonne, 47
- caloric engine, 72
- calorie, 167
- calorifuge, 49
- calorique, 167
- canal Göta, 72
- cancer du poumon, 90
- capteur cylindro-parabolique, 132
- carbone bianco, 28
- Carnot, 17, 21, 27, 59, 65, 91, 167, 169, 192, 193, 200, **213**, 217
- Carnot Grand, 213
- Carnot Lazare Marguerite, 213

- Carnot Marie François Sadi, 213
 Caserio, 213
 Cassel, 36
 cathédrale Saint-Jean, 47
 Cawley John, 40
 Cayley George, 51
 centrale nucléaire, 125, 145
 Centre de Développement des Énergies Renouvelables
 d'Alger, 132
 Centre International de
 Recherche sur le Cancer, 90
 Chaleur
 'équation différentielle, **176**
 chaleur, 202
 chaleur spécifique, 175, **225**
 chariot à feu, 41
 Charles, 162
 chaudière, 49
 chaudières, 208
 chauffage isochore, 93
 chemin de fer, 58
 chemise de corps de pompe, 49
 Chenapan, 147
 chevalement, 56
 chicanes, 184
 Chouette bergère, 5
 cinématique, **171**, 225
 CIRC, 90
 Clapeyron, 65, voir Diagramme
 de Clapeyron
 Clausius, 65, 213
 Cléopâtre, 56
 Clermont-Ferrand, 211
 Cloag, 60
 cocotte-minute, 35
 Coefficient de performance d'une
 PAC, voir COP
 coefficient de performance, 169
 cogénération, 137, 225
 Comex, 88, 219
 composition de l'air, 161
 compression isotherme, 94
 Concentrateurs de rayonnement solaire, 132
 conclusions, 208
 condenseur, 48, 49
 conductivité thermique, 175, **225**
 Conseils de conception, 201
 conservation d'énergie, 167, 214
 consommation d'énergie finale, 131
 consommation d'énergie primaire, 125
 consommation de charbon, 52
 constante spécifique d'un gaz, 165
 constante universelle des gaz parfaits, 165
 construction mécanique, 57
 convertisseur Bessemer, 215
 COP, 169, **194**, 225
 couche d'ozone, 142
 courants marins, 146
 croisades, 25
 cryocooler, 142
 cryogénérateur, 142
 cryogénie, 142, 195, 225
 Cugnot Nicolas-Joseph, 41
 cuivre, 177
 culture, 56
 Curie
 Marie, 217
 Pierre, 217
 cycle thermodynamique, **225**
 d'Ericsson, 170
 de Beau de Rochas, 170
 de Carnot, 169, 200
 de Joule, 170
 de Rankine, 135, 141
 de Stirling, 61, 169
 cylindre-piston, 34

 DAF, 83, 223
 Darryl Phillips, 221
 De Lamater Iron Works, 66, 74
 déchets végétaux, 157
 Deepwater Horizon, 125
 déjections animales, 157
 Département de l'Énergie US, 87
 déplaceur, 63, 97, 225
 détente isotherme, 94
 Diagramme
 Bilan énergétique, 168, 191
 de Clapeyron, **168**
 Pression-Volume, 95, 168, 225
 PV, 95
 Régénération de chaleur, **182**
 Diderot, 28
 Diesel, 66, 218
 digesteur, 34
 digestion anaérobie, 157
 dioxyde de carbone, 161
 dish-Stirling, 133
 Dix-neuvième siècle, 217
 domaine spatial, 142, 153
 Doubs Mathieu, 239
 Dundee, 65

 Eau, 28
 échecs, 207
 échelle logarithmique de température, 202
 école polytechnique, 213
 économiser, 62
 économiseur, **181**
 Écosse, 60
 Edimbourg, 60
 Edison, 217
 effet diesel, **178**, 185
 Einstein, 164
 éléments de conception, 159
 élevage, 56
 embiellage joug, 173
 embiellage rhomboïdal, 81, 172
 Empédocle, 25
 énergie
 finale, **226**

- primaire, **226**
- énergie solaire, 131
- énergies renouvelables, 146
- éoliennes, 208
- Éoplipyle, 29
- Époque contemporaine, 55
- Époque Moderne, 33
- équation différentielle partielle de la chaleur, **176**
- Ericsson, 170
 - bateau, 72
 - cycle, 72
 - John, 72
- étanchéité, 220
- étanchéités dynamiques, 184
- étanchéités statiques, 184
- États Unis, 58
- exploitation minière, 56
- explosion, 185
- exposition universelle de 1855, 79
- exposition universelle de 1878, 70
- exposition universelle de 1889, 70
- exposition universelle, Londres, 1851, 218
- Faraday, 217
- fardier, 41
- faucheuse, 56
- fer, 215
- Feu, 27
- fiabilité, **226**
- fission, 153
- Fizeau, 217
- fluidyne, 116, 157
- Flyer, 140
- fonderie Dundee, 65
- fonte, 215
- Ford, 83
- Ford Celebrity, 88
- Ford Pinto, 87
- Ford Taunus, 87
- Ford Torino, 85
- Franchot, 68
- Fraunhofer, 217
- frères Montgolfier, 42
- frères Niépce, 51
- frères Wright, 51, 140
- Fresnel, 217
- frottements, 185
- Fukushima, 125, 208
- Fulda, 36
- Fulton Robert, 48
- Galston, 60
- Ganza Henry, 148, 189
- gasoil, 221
- Gay-Lussac, 21, 163, 217
- gaz de schistes, 125
- gaz rares, 161
- General Motors, 81
- générateur thermodynamique, 113
- générateurs électriques Allison, 82
- GIEC, 208
- Glasgow, 60
- Glossaire, 225
- golfe du Mexique, 125
- Göta, 72
- GPU, 82
- Grand Carnot, 213
- grands froids, 142
- Gras Pierre, 4
- Greenock, 48
- Ground Power Unit, 82
- guerre de sécession, 73
- Hargreaves, 78
- Heinrici, 75
- hélice, 58
- Hélice de bateau, 72
- hélium, 161, 175, 177, 183
- Helmoltz, 217
- Héron d'Alexandrie, 25, 29
- Hesse, 36
- Hock, 70
- Hollande, 80
- Houille blanche, 28
- Hudson, 217
- Hugo Victor, 26
- huile d'olive, 221
- huile de lubrification, 221
- Humphry, 40
- Hunter Agnes, 64
- Huyghens Christian, 34, 46
- hydrogène, 161, 175, 177, 183
- Ifremer, 88, 219
- île Barbe, 47
- incendies de forêts, 161
- industrie, 56
- industrie cryogénique, 193
- industrie manufacturière, 57
- injection directe, 51
- inondations Hollande, 80
- isentropique, **226**
- isobare, **226**
- isochore, **226**
- isotherme, **226**
- Jacquard, 218
- jardins de la Muette, 43
- Johan de Witt, 81
- John Ericsson, voir Ericsson John
- joints
 - à lèvres, 184
 - d'étanchéité, 35
 - en feutre, 184
 - graphite, 184
 - toriques, 184
- Jonckheere, 224
- Jouffroy d'Abbans, 46
- Joule, 59, 65, 167, 170, 217
- joule, 167
- Jura suisse, 77
- Kawasaki, 88

- Kelvin, 61, 65, 213
 kelvin, 162, **226**
 Kilmarnock, 61
 Kirchhoff, 217
 Kockums, 88, 139, 219
 krypton, 161
- Langban, 72
 Langrave de Hesse, 36
 Laubereau, 68
 Lavoisier, 161, 167
 Ledoux Claude Nicolas, 123
 Lehman, 66
 Leupold Jacques, 41
 Lévy Strauss Claude, 159
 Lieske Todd, 221
 lignes haute tension, 125
 liquéfaction des gaz, 142
 London Science Museum, 61
 Lord Kelvin, 61, voir Klvin213
 Loschmidt, 164
 Louis XVI, 43
 low temperature difference, 145
 LTD, 145
 Lucrèce, 55
 Lumières frères, 218
 lycopode, 51
 Lyon, 47, 213
- MACE, 226
 Machine à coudre, 74
 machine à élever l'eau, 44
 machine a traire, 56
 machine atmosphérique, 40
 machine de Newcomen, 52
 machine de Savery, 52
 machine de Watt, 52
 machine frigorifique, 193, 195
 machines hydrauliques, 59
 machines parlantes, 77
 Maestrophone, 77
 maintenance, **226**
 Malmö, 88
 MAN, 83
 Manche, 43
 Manufrance, 76
 maquettes, 147
 marées, 146
 Mariotte, 161
 Marquis d'Arlandes, 43
 Mars, 153
 Maxwell, 164, 217
 Mayer Julius Robert, 167, 214
 mécanique du vol, 51
 mécanisation, 56
 Mechanical Technology Incorporated, 88
 Meijer, 78
 membrane, 184
 Mendeleïev, 161, 217
 Mestre et Blatgé, 76
 méthane, 157, 161
- Methven, 60
 Meyer, 164
 Michel, 2
 Michelin, 218
 micro-cogénération, 137, 208
 microprocesseur, 155
 Millikan, 164
 miner's friend, 37
 mines d'uranium, 125
 Mississippi, 48
 modélisme, 147
 modérateur de Watt, 50
 moissonneuse-batteuse, 56
 mondialisation, 59
 Monitor bateau, 73
 Montgolfier Étienne, 42
 Montgolfier Joseph, 42
 Morse, 217
 Morton Thomas, 61
 Moteur
 - à air chaud, 20, 226
 - à air dilaté, 76
 - à air ou gaz dilaté, 55
 - à apport de chaleur externe, 20, 226
 - à combustion externe, 59, 207, 226
 - à combustion interne, 59, 207
 - à double effet, 79
 - à pistons libres, 85
 - à vide, 46
 - alpha, 226
 - bêta, 226
 - électrique, 59
 - Ericsson, 197
 - Ericsson à cycle ouvert, 116
 - flat-twin, 82
 - fluidyne, 116
 - free piston Stirling engine, 112
 - gamma, 226
 - Manson, 118
 - Martini, 111
 - Ringbom, 111
 - solaire, 73
 - thermo-acoustique, 115
- Moteur Philips
 - 10-36, 82
 - 30-15, 81
 - 360-15, 81
 - 4-215 DA, 85
 - 4-235, 84, 223
 - 4-65 DA, 85
 - Type 1, 79
 - Type 10, 79
 - Type 102C, 79
 - Type 19, 79
 - Type 25, 79
 - Type 3, 79
 - Type 4, 79
 - Type MP 1002CA, 80
- Moteur Stirling
 - à déplaceur libre, 111
 - à double effet, 112

- à piston et déplaceur libres, 112
- à piston libre, 111
- alpha, 100
- avantages, 127
- bêta, 104
- définition, 21
- différents types, 97
- gamma, 107
- inconvenients, 128
- LTD, 145
- rotatif, 112
- Moteur United Stirling
 - AIP, 88
 - P150, 87
 - P40, 87, 88
 - P75, 87
 - V4X, 86
- moto-pompe à eau, 56
- motorisation, 56
- motorisation de véhicules, 139
- moulin à feu, 38
- MSI, 155
- MTI, 88
- Münden, 36
- Musgrave John, 174
- MWM, 83

- Napoléon Bonaparte, 213
- NASA, 87, 88, 139, 153, 207
- National Aeronautics and Spatial Administration, 88
- National Center for Environmental Health, 90
- néon, 161
- Newcomen Thomas, 40
- Niépcé Claude, 51
- Niépcé Joseph ou Nicéphore, 51
- Nobel, 218
- nombre d'Avogadro, 164

- obstacles psychologiques, 207
- Oersted, 217
- Ohm, 217
- oléoducs, 125
- OMS, 90
- Opel Kadett, 82
- Organisation Mondiale de la Santé, 90
- Otto, 66, 217
- oxyde d'azote, 161
- oxygène, 161
- ozone, 161

- PAC, 227
- Paillard Cie SA, 77
- paille, 157
- panneaux photovoltaïques, 207
- panneaux voltaïques, 131
- Papin Denis, 34, 46
- parabole, 132
- parcs solaires, 207
- Pascal Blaise, 56, **211**
- Périer Jacques-Constantin, 48
- Périer Florin, 211

- période des récoltes, 81
- période des temps modernes, 82
- période médiévale, 79
- période noire, 79
- Perrin Jean, 164
- pertes aérodynamiques, 201
- Perthshire, 60
- Petitjean Fernand, 2, 147
- pétrole brut, 221
- Philips, 78
- Phillips Darryl, 221
- Philon de Byzance, 29
- phonographe, 77
- Pilâtre de Rozier, 43
- piston à double effet, 48, 49
- piston moteur, 63, 227
- piston-cylindre, 49
- planeur, 51
- plans, 147
- plateau cyclique, 173
- Plessiet Jean-Jacques, 81
- pollutions industrielles, 161
- Polyeucte, 77
- pompe à chaleur, 141, 193, 227
- pompe à feu, 56
- pompe fluidyne, 116
- pompe solaire, 33
- Portier Christopher, 90
- Potter Henri, 49
- poudre de lycopode, 51
- poussière, 161
- pouvoirs économiques, 208
- pression atmosphérique, 211
- pressurisation, 202
- production de chaleur, 141
- production de froid, 142
- programme ASE, 87, 88
- propagation de la chaleur, 175
- propriétés physiques de l'air ou des gaz, 161
- Proudhon, 26
- Pu 238, 83
- puissance de chauffe, 189
- puissance motrice du feu, 167
- Puy de Dôme, 211
- Pyréolophore, 51
- Pyroscaphe, 47

- Rabelais, 59
- radio generator, 79
- radio-isotopes, 153
- radon, 161
- RAF, 78
- Rankine, 65
- Rankine Jane, 60
- rayonnement solaire, 146
- réaction nucléaire, 153
- recherche médicale, 142
- réflecteur paraboloidal, 133
- réfrigérateur, 193
- réfrigération, 141
- refroidissement isochore, 94

- Régénérateur, **181**, 192, 193, 200, 220
régénérateur, 62, 187, 202, 227
règles de l'art, 185
régulateur à boule, 48
régulateur à boules, 50
rejets thermiques industriels, 145
Rendement
 d'un cycle ou d'un moteur, 227
 d'un cycle thermodynamique, 168
 d'un moteur Stirling équipé d'un régénérateur, 192
 du cycle d'Ericsson, 199
 du cycle de Stirling, 191
 Moteur Ericsson équipé d'un régénérateur, **200**
 Moteur Stirling avec régénérateur, **193**
Ressel Josef, 72
réversibilité du cycle de Stirling, 193
Révolution française, 55, 213
révolution industrielle, 25, 55
rhomboïdal, 81, 227
Rider, 66, 71
Rider Engine Company, 74
Rider-Ericsson Engine Company, 74
Robert Stirling, voir Stirling Robert
Robinson, 66
Romain Pierre-Ange, 43
Röntgen, 217
Roper, 66
roue à feu, 39
roue à aubes, 58
roues hydrauliques, 39
Rousseau Jean, 173
Royal Scottish Museum, 61
Rozier - Pilâtre de, 43

Sadi Carnot, voir Carnot
SAGA, 88, **219**
Sahara, 131, 132
Saint-Saëns, 23
Sainte-Croix, 77
Salomon de Caus, 33
Saône, 47, 51
Sauvage Frédéric, 72
Savery Thomas, 37
sciure, 157
secrétariat à l'énergie, 88
Sénèque, 205
SES, 135
société Philips, 78
solaire photovoltaïque, 131
solaire thermique, 131
soufflet, 184
soupape de sûreté, 34
source chaude, 28, 167, **227**
source froide, 28, 167, **227**
sous-marins, 88, 219
steamer, 217
Stephenson, 58, 217
Stirling, 169
 Agnes, 60
 David, 60
 James, 60
 James (frère), 60, 64
 Jane, 60
 Michael, 60
 Patrick, 60
 Robert, **60**, 200
 Robert Junior, 60
 William, 60
Stockton Robert, 72
super-fluide, 142
supra-conducteur, 142
swashplate, 173

tableau périodique, 161
taux d'expansion, 201
taux de compression, 201
Tchernobyl, 125, 208
température, 202
température absolue, 162
Tenay, 34
Terre, 27
The engineer, 64
théorie, **159**
thermo-acoustique, 143
thermocouples, 153
thermodynamique, **167**, 214, 227
Thomson William, 61
Todd Lieske, 221
Torricelli, 211
tourisme fluvial, 81
tours solaires, 135
transistor, 80
transport de marchandises, 125
transports
 fluviaux, 57
 maritimes, 57
 terrestres, 57
Trevithick, 58
turbine Francis, 59
turbine Pelton, 59

United Stirling, 83, 219
université de Ohio, 85
US Navy, 72
USS Princeton, 72

vacuum engine, 46
Van Dormael Jean-Pierre, 175
variations de puissance, 189
Värmland, 72
Vauvenargues, 209
véhicule auto-mobile, 41
vent, 146
Versailles, 43
vingt-et-unième siècle, 90
voies ferrées à grande vitesse, 125
voiture hybride, 82, 139
volcans, 161
Volta, 59, 217
volumes morts, 201
von Mayer Julius Robert, 167, 214

Watt James, 48, 59

West Colin, 157
Westinghouse, 83
Wolf Aviation Fund, 221
Wood Henry, 46
Wright, 51, 140

xénon, 161

NOTES