

Chapitre 3. Machines et cycles thermodynamiques

Introduction

En 1687, Denis Papin publia un mémoire intitulé "Description et usage de la nouvelle machine à soulever les eaux" qui constitue la première proposition visant à sa réalisation. Le texte aurait été inspiré par l'observation du mouvement du couvercle de sa bouilloire soulevé sporadiquement par la vapeur produite lors de l'ébullition de l'eau. Cette anecdote est une première approche pour comprendre le fonctionnement d'un moteur thermique. La machine à vapeur va petit à petit se substituer au travail à la main : les énergies musculaires, animales, éoliennes et hydrauliques sont progressivement remplacées par la vapeur.

Les machines thermiques fonctionnent généralement grâce à un fluide auquel on fait subir des transformations cycliques au cours desquelles il y a échange d'énergie avec le milieu extérieur : le système reçoit (algébriquement) du travail et de la chaleur.

3.1 Principe d'une machine à vapeur

Effectuons un calcul simple. Une goutte d'eau a une masse $m = 0,1\text{g}$ et occupe un volume de $0,1\text{cm}^3$. Lorsqu'elle se vaporise dans les conditions usuelles de température et de pression ($T = 373\text{K}$ et $P = 10^5\text{Pa}$), elle augmente son volume de façon considérable. En supposant que la vapeur d'eau se comporte comme un gaz parfait, le rapport des volumes donne :

$$V_{\text{vap}} = n \frac{RT}{P} = \frac{m}{M(H_2O)} \frac{RT}{P} \begin{cases} \text{masse molaire de l'eau : } M(H_2O) = 18\text{g}\cdot\text{mol}^{-1} \\ \text{constante des gaz parfaits : } R = 8,31\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1} \end{cases}$$

$$\text{Donc : } V_{\text{vap}} = 1700V_{\text{liquide}}$$

Ainsi, le volume occupé par chaque goutte d'eau liquide augmente d'un facteur 1700 lorsqu'elle se vaporise. Ce rapporte titanesque provoque, goutte après goutte, une augmentation considérable de la pression à l'intérieur de l'enceinte qui

donne lieu à une force d'expansion susceptible de soulever le couvercle de la marmite mais surtout de déplacer des pistons pour mettre en mouvement les bateaux et les trains.

Un moteur thermique est une machine qui réalise la conversion de chaleur en travail. La bouilloire de Denis Papin utilise le transfert naturel de la chaleur d'un corps chaud vers un corps froid pour récupérer au passage du travail. L'eau est utilisée comme agent thermique et fonctionne ainsi entre deux sources de chaleur, c'est un moteur ditherme :

- (1) la source chaude est constituée d'une plaque chauffante à la température T_c ;
- (2) la source froide est l'atmosphère extérieure à la température T_f .

Le moteur décrit un cycle à chaque fois que le couvercle retombe sur le récipient (voire la figure ci-dessous).

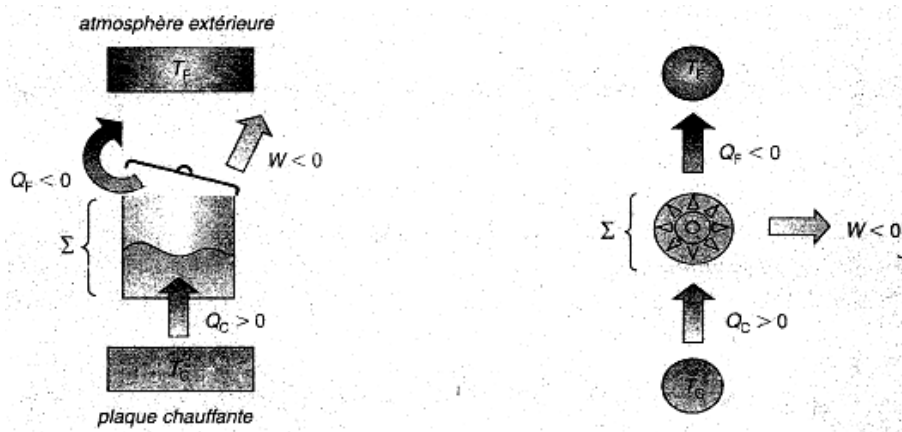


Fig. 3.1 Schéma de bouilloire de Denis Papin.

La conversion intégrale de la chaleur en travail est impossible et une partie de la chaleur est nécessairement transférée vers l'atmosphère extérieure. Cette perte d'énergie limite le rendement du moteur thermique.

3.2 Les machines thermiques

Une machine thermique est un dispositif qui permet de réaliser une conversion d'énergie. Un fluide appelé agent thermique y décrit un cycle de transformation en échangeant de l'énergie thermique avec une ou plusieurs sources de chaleur.

La machine sera dite motrice si le fluide fournit du travail à l'extérieur. Dans le cas contraire, on parle de machine réceptrice. Lorsque la machine échange de la matière (le fluide) avec l'extérieur, elle est dite ouverte. Dans ce cas, soit le fluide s'écoule en continu à travers les éléments de la machine en y subissant une suite de transformation, soit une masse donnée de fluide entre dans la machine, y subit un cycle de transformation avant d'être expulsé et remplacé par une masse égale de fluide dans le même état initial. Le moteur à réaction est un exemple de machine ouverte à écoulement continu tandis que le moteur thermique à piston (essence ou diesel) relève du second type d'écoulement. Si la machine utilise la même masse globale de fluide, elle est dite à cycle fermé. C'est le cas de la machine à froid (réfrigérateur), de la pompe à chaleur et de la machine à vapeur avec condenseur.

3.3 Classification des machines thermiques

On sait, depuis l'énoncé du deuxième principe de la thermodynamique donné par Thomson, qu'une machine thermique en relation avec une seule source thermique ne peut, après un cycle de son évolution, fournir du travail au milieu extérieur. Il est donc nécessaire, si l'on veut éviter le cas sans grand intérêt d'une machine qui reçoit du travail et fournit de la chaleur au milieu extérieur, de considérer au moins deux sources thermiques.

On est alors naturellement conduit à distinguer deux types de machines thermiques cycliques :

- (1) Les moteurs thermiques qui, après un cycle, fournissent effectivement du travail au milieu extérieur ($W < 0$) en recevant de la chaleur ($Q > 0$).
- (2) Les réfrigérateurs et les pompes à chaleur qui, après un cycle, reçoivent effectivement du travail du milieu extérieur ($W > 0$) en fournissant de la chaleur ($Q < 0$).

3.4 Machines dithermes

Les machines dithermes fonctionnent entre deux sources thermiques de températures différentes : T_c pour la source chaude et $T_f < T_c$ pour la source froide.

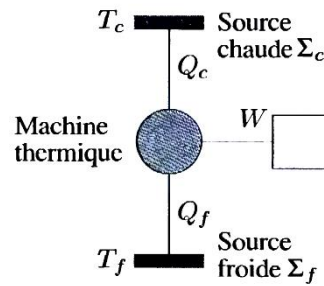


Fig. 3.2 Schéma d'une machine ditherme.

3.4.1 Bilans énergétique et entropique

Comme les fluides considérés décrivent des cycles, les variations d'énergie totale E_{tot} et d'entropie S sont nulles. Par conséquent, si l'on désigne par W , Q_c et Q_f respectivement le travail reçu par le fluide, la chaleur provenant de la source chaude et la chaleur provenant de la source froide, au cours d'un cycle, on a :

$$\Delta E_{tot} = 0 = W + Q_c + Q_f \quad \text{et} \quad \Delta S = 0 = S^r + S^p = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S^p \quad \text{avec} \quad S^p \geq 0 \quad (3.1)$$

3.4.2 Cycle de Carnot

Le moteur thermique possédant le meilleur rendement, pour un travail donné à partir de deux sources de chaleur, a été inventé par l'ingénieur Français Sadi Carnot en 1824. Portant, le cycle n'est que théorique, il sert de référence dans les bureaux d'études des motoristes. Ce cycle, réversible décrit par une machine ditherme, est constitué de deux isothermes, l'une correspondant à la température de la source chaude et l'autre à celle de la source froide, séparées par deux transformations isentropiques.

Dans le plan cartésien (T, S) , le cycle de Carnot est représenté par un rectangle. S'il s'agit d'un moteur, le cycle est décrit dans le sens des aiguilles d'une montre, puisqu'alors :

$$Q = \int_C T dS > 0 \quad \text{et} \quad W = - \int_C P dV < 0 \quad (3.2)$$

Lorsqu'il est décrit dans le sens trigonométrique, c'est l'opposé, on le qualifie de cycle inverse (machine réceptrice).

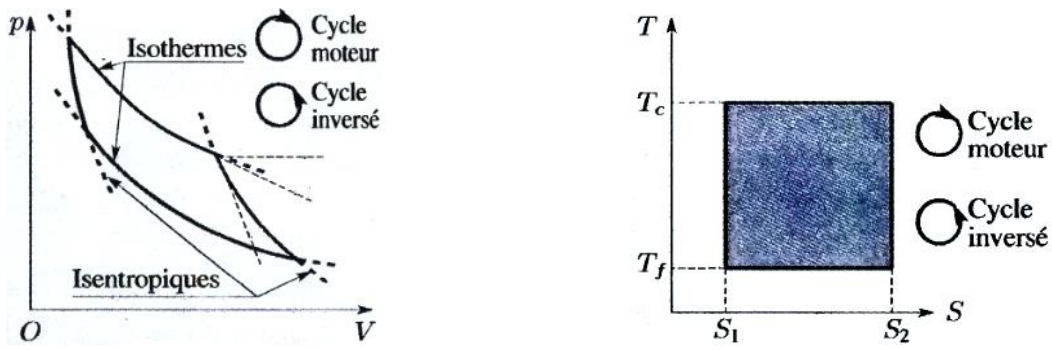


Fig 3.2 Cycle moteur et cycle inversé de Carnot dans les plans cartésien (P, V) et (T, S).

3.5 Diagramme de Raveau

Il est instructif de représenter dans un plan cartésien (Q_c, Q_f), le point de fonctionnement F de la machine ; une telle représentation est historiquement connue sous le nom de diagramme de Raveau. Ce point F appartient aux deux droites d'équations issues de l'application des deux principes :

$$Q_c = -Q_f - W \quad \text{et} \quad Q_c = -\frac{T_c}{T_f} Q_f - T_c S^p \tag{3.3}$$

Pour des températures de sources déterminées et une irréversibilité S^p donnée, la deuxième droite est fixée ; elle passe par l'origine si l'évolution est réversible.

- (1) Un moteur : $W < 0$; F admet comme coordonnées $Q_c > 0$ et $Q_f < 0$: la machine reçoit de la chaleur de la source chaude et en fournit à la source froide.
- (2) Un réfrigérateur ou une pompe à chaleur : $W > 0$; F admet comme coordonnées $Q_c < 0$ et $Q_f > 0$: la machine reçoit de la chaleur de la source froide et en fournit à la source chaude.

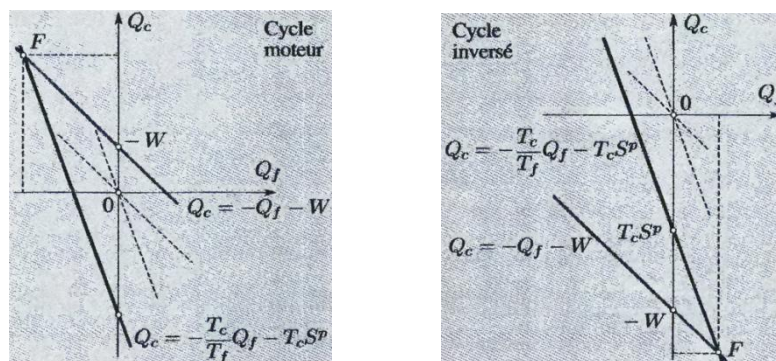


Fig. 3.3 Diagramme de Raveau pour le cycle moteur et le cycle inversé.

3.6 Efficacités

On appelle efficacité η d'une machine thermique le rapport des deux transferts d'énergie, celui qui est utile, compte tenue de la vocation de la machine, sur celui qui est dépensé pour la faire fonctionner.

a) Moteur ditherme

Rappelons le signe des échanges d'énergie dans un moteur ditherme :

$$W < 0 \quad Q_c > 0 \quad Q_f < 0 \quad (3.4)$$

Dans un tel moteur, on définit l'efficacité η_m par le nombre positif :

$$\eta_m = \frac{-W}{Q_c} \quad \text{d'où} \quad \eta_m = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} \quad (3.5)$$

En tenant compte du bilan entropique, il vient, puisque $Q_f/Q_c = -T_f/T_c - T_f S^p/Q_c$, $Q_c > 0$ et $S^p > 0$:

$$\eta_m = 1 - \frac{T_f}{T_c} - \frac{T_f S^p}{Q_c} \leq 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (3.6)$$

Ce résultat est connu sous le nom de théorème de Carnot :

"Tous les moteurs dithermes réversibles ont une même efficacité maximale qui ne dépend que des températures des sources".

Ainsi, l'efficacité η_m est limitée supérieurement par une valeur maximale qui ne dépend que de la température des deux sources :

$$(\eta_m)_{\max} = 1 - \frac{T_f}{T_c} = \frac{T_c - T_f}{T_c} \quad (3.7)$$

Souligne bien que cette limitation supérieure de l'efficacité motrice de la machine est due à la nécessité fondamentale d'avoir deux sources entre lesquelles il y a un transfert thermique et que seule la différence des transferts thermiques

effectifs $Q_c + Q_f = |Q_c| - |Q_f|$ importe. Les pertes éventuelles par frottement rendraient irréversible la transformation et réduiraient encore plus cette efficacité.

Remarque : On désignait par rendement le rapport de l'efficacité sur l'efficacité maximale :

$$r = \frac{\eta_m}{(\eta_m)_{\max}} = 1 - \frac{T_f S^p}{Q_c (1 - T_f/T_c)} \quad (3.8)$$

Lequel est toujours inférieur ou égal à 1.

b) Réfrigérateur et pompe à chaleur

La pompe à chaleur est en fait un dispositif thermodynamique qui permet de transférer la chaleur du milieu le plus froid vers le milieu le plus chaud. Une pompe à chaleur (PAC) fonctionne exactement comme un réfrigérateur sauf qu'à l'inverse de celui-ci, le but recherché est de produire de la chaleur. Plus précisément, la pompe à chaleur se compose de quatre éléments : le compresseur, le condenseur (restitue l'énergie à l'intérieur), le détendeur et l'évaporateur (capte l'énergie à l'extérieur). Le fluide frigorigène assure les transferts de chaleur lors de ses changements de phase (gaz, liquide).

De telles machines inversées (par rapport au moteur), sont caractérisées par les échanges suivants : $W > 0$, $Q_c < 0$ et $Q_f > 0$. Elles sont appelées réfrigérateurs lorsqu'on s'intéresse à la chaleur Q_f qu'on enlève à la source froide et pompe à chaleur lorsqu'on s'intéresse à la chaleur $|Q_c|$ qu'on fournit à la source chaude.

1) Réfrigérateur

On définit l'efficacité η_r d'un réfrigérateur par le rapport :

$$\eta_r = \frac{Q_f}{W} \quad \text{d'où} \quad \eta_r = \frac{Q_f}{-Q_c - Q_f} = \frac{1}{-1 - Q_c/Q_f} \quad (3.9)$$

En tenant compte du bilan entropique, il vient, puisque $Q_c/Q_f = -T_c/T_f - T_c S^p/Q_f$,
 $Q_f > 0$ et $S^p > 0$:

$$\eta_r = \frac{1}{T_c/T_f - 1 + T_c S^p/Q_f} \leq \frac{1}{T_c/T_f - 1} \quad (3.10)$$

Ainsi, l'efficacité η_r est limitée supérieurement par une valeur maximale qui ne dépend que de la température des deux sources :

$$(\eta_r)_{\max} = \frac{1}{T_c/T_f - 1} = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad (3.11)$$

2) Pompe à chaleur

On définit l'efficacité η_p d'une pompe à chaleur par le rapport :

$$\eta_p = \frac{-Q_c}{W} \text{ d'où } \eta_p = \frac{-Q_c}{-Q_c - Q_f} = \frac{1}{1 + Q_f/Q_c} \quad (3.12)$$

En tenant compte du bilan entropique, il vient, puisque $Q_f/Q_c = -T_f/T_c - T_f S^p/Q_c$,
 $Q_c < 0$ et $S^p > 0$:

$$\eta_p = \frac{1}{1 - T_f/T_c - T_f S^p/Q_c} \leq \frac{1}{1 - T_f/T_c} \quad (3.13)$$

Ainsi, l'efficacité η_p est limitée supérieurement par une valeur maximale qui ne dépend que de la température des deux sources :

$$(\eta_p)_{\max} = \frac{1}{1 - T_f/T_c} = \frac{T_c}{T_c - T_f} \quad (3.14)$$

Remarque : Comme précédemment, on définit les rendements par les quantités suivantes, inférieures ou égales à 1 :

$$r_r = \frac{\eta_r}{(\eta_r)_{\max}} = \frac{T_c/T_f - 1}{T_c/T_f - 1 + T_c S^p/Q_f} \text{ et } r_p = \frac{\eta_p}{(\eta_p)_{\max}} = \frac{1 - T_f/T_c}{1 - T_f/T_c - T_f S^p/Q_c} \quad (3.15)$$

Exemple : Climatiseur

Un local, de capacité thermique $C = 4 \times 10^3 \text{ kJ.K}^{-1}$, est initialement à la température de l'air extérieur $T_0 = 305 \text{ K}$. Un climatiseur, fonctionnant de façon cyclique réversible ditherme entre l'air extérieur comme source chaude et le local comme source froide, ramène la température du local à $T_1 = 293 \text{ K}$ en 1h. Quelle est la puissance électrique moyenne P reçue par le climatiseur?

Solution :

On sait qu'un réfrigérateur, fonctionnant réversiblement entre deux sources, a une efficacité égale à :

$$\eta_r = \frac{T_f}{T_c - T_f} \text{ soit ici } \eta_r = \frac{T(t)}{T_0 - T(t)}$$

Puisque l'extérieur, qui joue le rôle de source chaude, est à la température T_0 et que la source froide a une température $T(t)$ qui varie au cours du temps entre T_0 et T_1 . Pendant une durée élémentaire dt , les échanges d'énergies sont δW , δQ_f , δQ_c , d'où :

$$\eta_r = \frac{T(t)}{T_0 - T(t)} = \frac{\delta Q_f}{\delta W} = \frac{-CdT}{\delta W}$$

On en déduit :

$$W = \int_{T_0}^{T_1} CdT \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) = C \left[T_1 - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_1}{T_0} \right) \right] = 969,8 \text{ kJ}$$

Et la puissance électrique moyenne reçue :

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{969,8 \times 10^3}{3600} = 269,4 \text{ W}$$

3.7 Différents cycles des machines à vapeur

On distingue principalement deux types de machines thermiques : les machines dans lesquelles une masse déterminée d'un mélange gazeux monophasé subit un cycle et les machines dans lesquelles la masse de fluide qui subit le cycle est constituée de deux phases, l'une gazeuse et l'autre liquide.

3.7.1 Cycle de Carnot

Bien que le cycle de Carnot ne soit que le cycle idéal d'une machine fonctionnant entre deux sources, il permet de comprendre le fonctionnement de tous les cycles réels. En effet, ce cycle fait apparaître tous les éléments qui constituent une machine thermique réelle, en fonctionnement moteur ou inversé.

La figure (3.4.a) représente le cycle de Carnot moteur avec la turbine T qui, en fournissant au milieu extérieur un travail important ($-W_t > 0$), fait passer le fluide de la source chaude à la source froide. Parfois, on utilise un petit compresseur C qui, en fournissant un faible travail ($W_c \ll -W_t$), fait passer le fluide de la source froide à la source chaude.

En inversant le sens d'évolution du fluide (Fig. 3.4b), on retrouve les éléments précédents, mais le compresseur C fournit, dans ce cas, un travail W_c important, alors que la turbine est remplacé par un détendeur qui fournit au milieu extérieur un travail faible : $W_d < 0$ et $W_d \ll W_c$.

Initialement la machine de Carnot utilisait de l'air comme fluide, ce qui conduisait à certaines difficultés techniques pour réaliser une isotherme suivie d'une adiabatique. De plus, pour un débit donné, le travail net produit par ce cycle était faible puisqu'il ne mettait en jeu que la chaleur sensible de l'air, c'est-à-dire la chaleur nécessaire pour faire varier la température de ce dernier. Toutes ces difficultés ont été fortement diminuées en utilisant un fluide liquéfiable décrivant un cycle de Carnot entièrement inscrit à l'intérieur de la courbe de saturation (le cycle 1-2-3-4-1 de la figure 3.5).

Au niveau de chaque élément l'écoulement est stationnaire et le calcul de l'énergie mise en jeu utilise les relations du tableau ci-dessous. Dans ces relations, \dot{m} désigne le débit massique du fluide et h_i l'enthalpie spécifique massique du fluide en un point du circuit. Le rendement d'une machine de Carnot à fluide liquéfiable est alors donné par :

$$\eta_c = \frac{[(h_4 - h_1) - (h_3 - h_2)]}{(h_4 - h_3)} \quad (3.16)$$

Élément de la machine	Énergie échangée
Bouilloire	$\dot{Q}_{Evap} = \dot{m}(h_4 - h_3)$
Turbine	$\dot{W}_{Tur} = \dot{m}(h_1 - h_4)$
Condenseur	$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}(h_2 - h_1)$
Compresseur	$\dot{W}_{Comp} = \dot{m}(h_3 - h_2)$

Tableau. 3.1 Echange d'énergie dans une machine motrice.

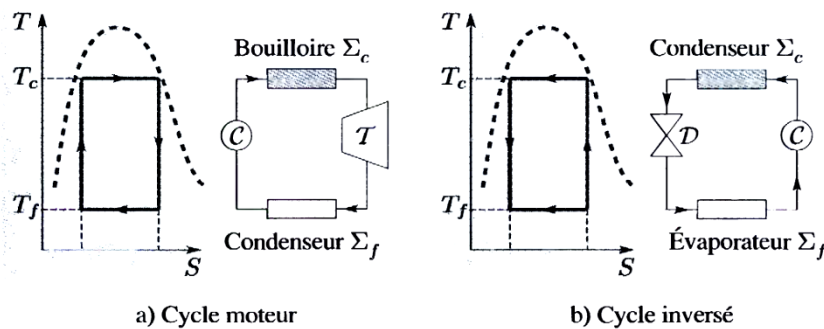


Fig. 3.4 Schéma des cycles moteur et inversé de Carnot.

3.7.2 Amélioration de la machine de Carnot

Dans la machine de Carnot à fluide liquéfiable, le travail W_{Comp} fourni au compresseur représente entre 15% et 20% du travail W_{Tur} récupéré sur la turbine. De plus, le compresseur et la turbine travaillent avec un mélange diphasique liquide/vapeur, ce qui nuit à leur bon fonctionnement et est à l'origine de problèmes d'érosion de leurs parties mécaniques. Des améliorations ont donc été apportées visant à mieux utiliser l'énergie et la haute température du brûleur et à réduire l'énergie utilisée pour la circulation du fluide. Le rendement du cycle ainsi modifié est bien entendu inférieur à celui du cycle de Carnot, mais le travail net récupéré, pour un débit de fluide fixé, est plus important.

(1) Le cycle de Rankine

L'amélioration proposée par Rankine consiste à dimensionner le condenseur de façon à obtenir une liquéfaction totale de la vapeur (étape 1-2'). Dans ces conditions de travail de compression ne porte que sur un liquide. Dès lors, le

compresseur peut être remplacé par une pompe moins consommatrice d'énergie car la variation de volume du fluide est bien plus faible. Grâce à cette économie, le travail net récupéré au niveau de la turbine est plus important. La contre partie de cette amélioration est un croit d'énergie à fournir au niveau du brûleur pour amener l'eau à son point d'ébullition, surcroit qui est l'origine de la diminution de la valeur du rendement.

(2) Le cycle de Hirn

La seconde amélioration, proposée par Hirn, consiste à surchauffer la vapeur (augmenter sa température, étape 4-5 sur la figure 2.5) avant de l'envoyer sur la turbine, de telle sorte qu'en fin de détente dans la turbine (étape 5-6) on ait de la vapeur sèche, c'est-à-dire à une température supérieur à la température d'équilibre liquide/vapeur pour la pression P_2 qui règne dans le condenseur. Cette opération, qui élimine la présence de gouttelettes d'eau liquide au niveau des aubes de la turbine, entraîne un surdimensionnement du condenseur (étape 6-2'). On ne peut pas toutefois monter trop haut en température en fin de surchauffe en raison d'un problème de tenue en température des matériaux. Pour pallier ces inconvénients on pratique, après une surchauffe initiale modérée (étape 4-5'), une détente partielle dans la turbine (étape 5'-5'') suivie d'une resurchauffe (étape 5''-6').

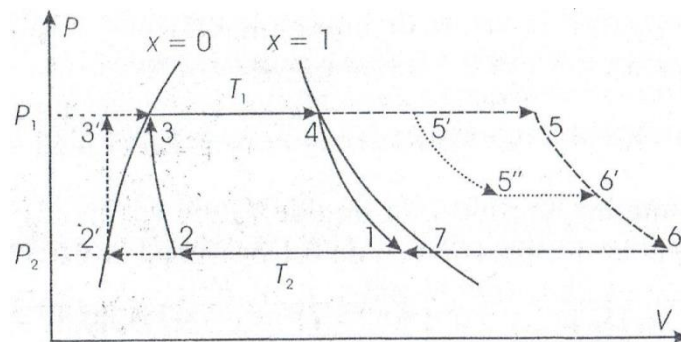


Fig 3.5 Cycles améliorés des machines motrices

3.8 Exemples de cycles moteurs

3.8.1 Moteur à explosion : cycle de Beau de Rochas ou cycle d'Otto

Le moteur à explosion est un moteur à combustion interne dont l'allumage est commandé et réalisé grâce à des éclateurs appelés bougies. Schématiquement, on

fait subir à une masse d'air et de carburant (essence) un cycle constitué de deux isentropiques et de deux isochores (Fig. 3.6). Un tel cycle a été proposé par l'ingénieur français A. Beau de Rochas dès 1862, à partir d'une idée de E. Lenoir.

Un moteur à explosion fonctionnant sur ce principe a été réalisé par l'ingénieur Allemand N. Otto. Un cylindre formant une chambre de combustion admet, par une soupape d'admission, le mélange combustible et le comprime jusqu'à la mise à feu, ce qui produit la réaction chimique de combustion ; les produits gazeux de la réaction fournissent du travail au milieu extérieur puis sont expulsés à travers une soupape d'échappement sous forme de gaz brûlés.

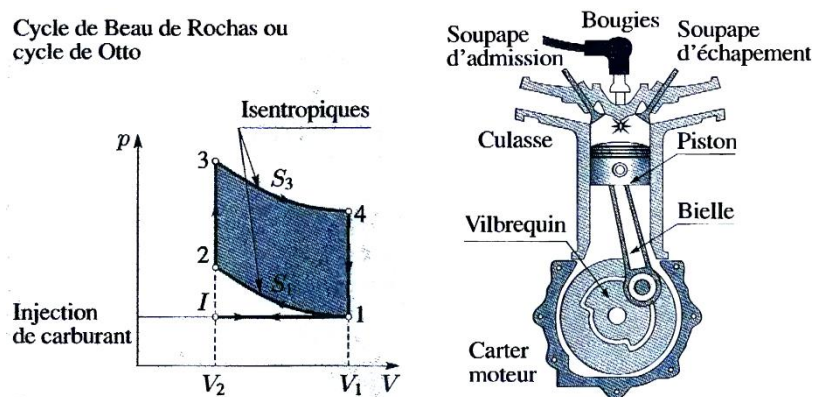


Fig. 3.6 Schéma de cycle moteur d'Otto.

a) Description du cycle

Le cycle est décrit en quatre temps :

- (1) Le cylindre admet le mélange à travers une soupape d'admission dans un volume V_1 (portion 1-1).
- (2) Les soupapes étant fermées, le mélange est comprimé isentropiquement jusqu'au volume V_2 (portion 1-2) jusqu'à l'explosion du mélange qui augmente la pression (portion 2-3).
- (3) Les soupapes étant toujours fermées, les produits de la combustion se détendent isentropiquement en repoussant fortement le piston (portion 3-4) jusqu'à une position extrême.
- (4) La soupape d'échappement s'ouvre, ce qui diminue brutalement la pression (portion 4-1) et les gaz brûlés sont évacués (1--1).

b) Étude thermodynamique

Notons que, le moteur à explosion étant un système ouvert, l'étude thermodynamique présente est relative au système fermé constitué par une masse déterminée de fluide au cours d'un cycle.

L'efficacité η_m du moteur à explosion est obtenue en faisant le rapport de l'opposé (-W) du travail reçu sur la chaleur Q_c que le moteur reçoit des sources chaudes, le long de 2-3 :

$$\eta_m = \frac{-W}{Q_c} = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} \quad (3.17)$$

Puisque, Q_f étant la chaleur provenant des sources froides le long de 4-1, on a :

$$\Delta E_{tot} = W + Q_c + Q_f = 0 \text{ avec } Q_c > 0 ; Q_f < 0 \text{ et } W < 0 \quad (3.18)$$

On exprime généralement η_m en fonction du taux de compression $\alpha_{1,2} = V_1/V_2$. On a, puisque le gaz évolue à volume constant le long de 2-3 et 4-1, sans variation d'énergie cinétique macroscopique et d'énergie potentielle extérieure :

$$Q_c = \Delta U_{2 \rightarrow 3} = C_v (T_3 - T_2) \text{ et } Q_f = \Delta U_{4 \rightarrow 1} = C_v (T_1 - T_4) \quad (3.19)$$

D'autre part, les portions (1-2 et 3-4) étant des isentropiques d'un fluide assimilable à un gaz parfait, on a les relations suivantes entre les températures et les volumes :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \quad \text{d'où} \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_1} = \alpha_{1,2}^{\gamma-1} \quad (3.20)$$

On en déduit η_m :

$$\eta_m = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\alpha_{1,2}^{\gamma-1}} \quad (3.21)$$

Ainsi, l'efficacité de ce moteur ne dépend que du taux de compression $\alpha_{1,2}$.

3.8.2 Moteur à allumage par compression : cycle de Diesel

Le Moteur Diesel est un moteur à combustion interne dont l'allumage n'est pas assuré par une bougie mais par une compression élevée, ce que l'on réalise sans risque d'inflammation en comprimant l'air seul et en injectant le carburant au point 2 du diagramme.

Ce moteur a été mis au point par l'Allemand R. Diesel en 1893, fortement motivé par la recherche d'un moteur thermique fonctionnant avec un combustible rudimentaire, moins raffiné que l'essence.

Le cycle ressemble à celui du moteur à explosion, mais la portion isochore 2-3 est remplacée par une isobare car, dans le moteur Diesel, le combustible est injecté sous pression en 2, de façon assez progressive.

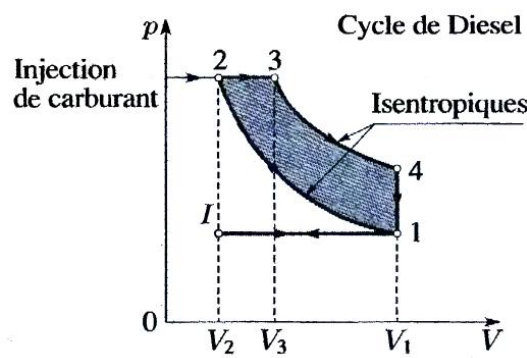


Fig. 3.6 Schéma de cycle moteur de Diesel.

a) Description du cycle

Le cycle est décrit en quatre temps :

(1) Le cylindre admet l'air seul à travers une soupape d'admission dans un volume V_1 (portion I-1).

(2) Les soupapes étant fermées, l'air est comprimé isentropiquement jusqu'au volume V_2 (portion 1-2).

(3) Les soupapes étant toujours fermées, on introduit le combustible en 2 ; une fois la combustion réalisée (portion 2-3), les produits de la réaction se détendent

isentropiquement en repoussant fortement le piston (portion 3-4) jusqu'à une position extrême.

(4) La soupape d'échappement s'ouvre, ce qui diminue brutalement la pression (portion 4-1) et les gaz brûlés sont évacués (1--1).

b) Étude thermodynamique

On considère le système fermé constitué par une masse déterminée de fluide au cours d'un cycle. Comme pour le moteur à explosion, l'efficacité η_m du moteur Diesel a pour expression :

$$\eta_m = \frac{-W}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} \quad (3.22)$$

Avec $Q_c > 0$, $Q_f < 0$ et $W < 0$. Exprimons η_m en fonction du taux de compression $\alpha_{1,2} = V_1/V_2$ et du rapport de détente $\alpha_{1,3} = V_1/V_3$. On a, puisque Q_c est reçu le long de 2-3 à pression constante, et Q_f le long de 4-1 à volume constante :

$$Q_c = \Delta H_{2 \rightarrow 3} = C_p (T_3 - T_2) \quad \text{et} \quad Q_f = \Delta U_{4 \rightarrow 1} = C_v (T_1 - T_4) \quad (3.23)$$

D'où :

$$\eta_m = 1 + \frac{C_v (T_1 - T_4)}{C_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{\gamma (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4/T_3 - T_1/T_3}{\gamma (1 - T_2/T_3)} \quad (3.24)$$

En outre, les portions 1-2 et 3-4 étant des isentropiques réversibles, on a les relations suivantes entre les températures et les volumes :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} ; \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_1}{V_3} \right)^{\gamma-1} \quad \text{d'où} \quad \frac{T_1}{T_2} = \alpha_{1,2}^{-\gamma+1} \quad \text{et} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_1} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{\alpha_{1,3}} \right)^{\gamma-1} \quad (3.25)$$

Comme, le long de la portion 2-3, la pression est constante, il vient, d'après l'équation d'état des gaz parfaits :

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3} = \frac{P_2 V_3}{T_3} \quad \text{d'où} \quad \frac{T_2}{T_3} = \frac{V_2}{V_3} = \frac{V_2}{V_1} \times \frac{V_1}{V_3} = \frac{\alpha_{1,3}}{\alpha_{1,2}} \quad \text{et} \quad \frac{T_1}{T_3} = \frac{T_1}{T_2} \times \frac{T_2}{T_3} = \alpha_{1,2}^{-\gamma+1} \frac{\alpha_{1,3}}{\alpha_{1,2}} = \alpha_{1,2}^{-\gamma} \alpha_{1,3}$$

On en déduit l'expression de η_m :

$$\eta_m = 1 - \frac{\alpha_{1,3}^{-\gamma+1} - \alpha_{1,3} \alpha_{1,2}^{-\gamma}}{\gamma(1 - \alpha_{1,3}/\alpha_{1,2})} = 1 - \frac{\alpha_{1,3}^{-\gamma} - \alpha_{1,2}^{-\gamma}}{\gamma(\alpha_{1,3}^{-1} - \alpha_{1,2}^{-1})} \quad (3.26)$$

3.8.3 Moteurs à réaction : cycle de Joule ou Brayton

a) Description du cycle

Dans la propulsion à grande vitesse en atmosphère raréfiée, les moteurs précédents sont remplacés par les moteurs à réaction dont le mode de fonctionnement est l'éjection à grande vitesse de gaz de combustion. Ce cycle, appelé cycle de Joule ou G. Brayton, ressemble aux précédents : il est constitué de deux isentropiques et de deux isobares. Les quantités de chaleur sont donc reçues à pressions constantes, ce qui présente un avantage technique intéressant. Notons que, là aussi, une masse déterminée de fluide décrit un cycle fermé.

On utilise ce cycle dans les moteurs de fusées et les turbines à gaz. Dans ce dernier cas, le travail fourni au milieu extérieur ne sert pas à la propulsion mais à la mise en rotation d'une machine tournante, par exemple un alternateur pour la production d'électricité.

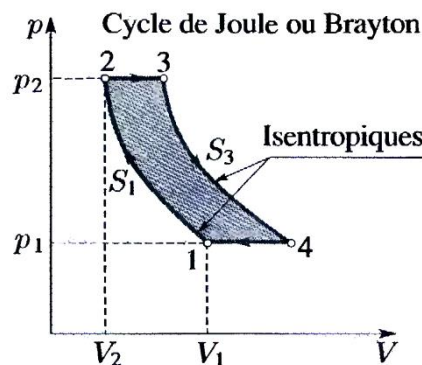


Fig. 3.7 Schéma de cycle moteur de Joule ou Brayton.

b) Étude thermodynamique

L'efficacité η_m du cycle a pour expression :

$$\eta_m = \frac{-W}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{H_4 - H_1}{H_3 - H_2} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (3.27)$$

Puisque le gaz supposé parfait évolue, à pression constante, le long de 2-3 et 4-1 :

$$Q_c = \Delta H_{2 \rightarrow 3} = H_3 - H_2 = C_p (T_3 - T_2) \text{ et } Q_f = \Delta H_{4 \rightarrow 1} = H_1 - H_4 = C_p (T_1 - T_4)$$

Exprimons η_m en fonction du taux de compression $\alpha_{1,2} = V_1 / V_2$. Comme les portions 1-2 et 3-4 sont des isentropiques, on a les relations suivantes entre les températures et les pressions :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1-1/\gamma} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1-1/\gamma} \quad \text{et} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma = \alpha_{1,2}^\gamma \quad (3.28)$$

d'où :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_1} = \alpha_{1,2}^{\gamma-1} \quad \text{et} \quad \eta_m = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{1}{\alpha_{1,2}^{\gamma-1}} \quad (3.29)$$

3.8.4 Moteur de Stirling

Ce moteur, inventé par l'ingénieur R. Stirling en 1816, a fonctionné pour la première fois en 1818. La caractéristique principale de ce moteur est que, contrairement aux autres, il forme un système fermé : comme dans un réfrigérateur, le fluide, de l'air par exemple, est contenu dans une enceinte fermée et chauffée par une source thermique extérieure. La combustion est donc externe, ce qui autorise tous les types des combustibles, notamment les déchets forestiers, animaux et industriels.

a) Description du cycle

Le cycle comporte deux isothermes et deux isochores. On peut schématiser son fonctionnement en considérant une enceinte close comportant deux pistons : un

piston de déplacement P_d et un piston de travail P_t . Le cycle est décrit en quatre étapes ; les trois premières sont représentées sur la figure :

(1) Le fluide occupant un volume V_1 est comprimé isothermiquement par P_t jusqu'au volume V_2 (portion 1-2) : il reçoit du travail et fournit de la chaleur au milieu extérieur.

(2) Le piston P_d descend alors et impose au fluide de traverser une zone de récupération de chaleur R . Le fluide est ainsi chauffé à volume constant V_2 .

(3) Les deux pistons descendent ensemble, ce qui permet au fluide de se détendre de façon isotherme sur la portion 3-4, en fournissant du travail et en recevant de la chaleur.

(4) Enfin, sur la portion 4-1, P_d remonte seul, obligeant ainsi le fluide à traverser une nouvelle fois R mais de haute en bas et en cédant de la chaleur. Ce dernier se refroidit alors à volume constant.

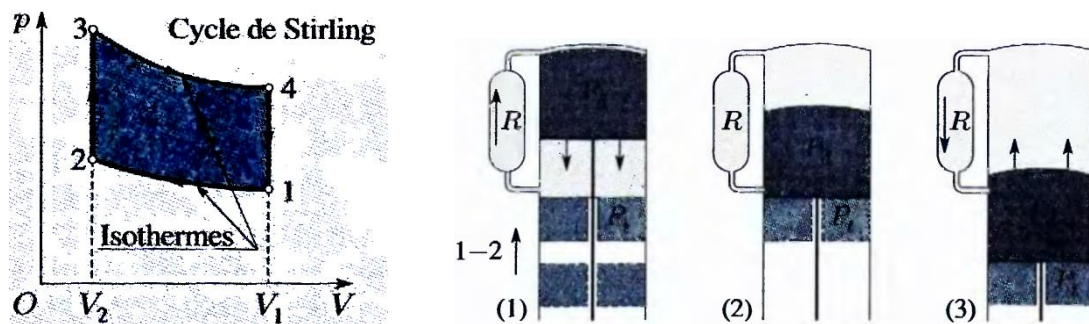


Fig. 2.8 Schéma de cycle et de fonctionnement du moteur Stirling.

b) Étude thermodynamique

Comme pour les autres moteurs, l'efficacité η_m du moteur de Stirling est donnée par :

$$\eta_m = \frac{-W}{Q_c} \quad (3.30)$$

W étant le travail reçu et Q_c la chaleur que le moteur reçoit de l'ensemble des sources chaudes le long de l'isotherme 3-4. Puisque le gaz est parfait, on a le long de cette isotherme :

$$Q_c = Q_{3 \rightarrow 4} = -W_{3 \rightarrow 4} = \int PdV = nRT_3 \int \frac{dV}{V} = nRT_3 \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (3.31)$$

On obtient W en ajoutant les contributions des quatre portions du cycle :

$$W = W_{1 \rightarrow 2} + W_{2 \rightarrow 3} + W_{3 \rightarrow 4} + W_{4 \rightarrow 1} \quad (3.32)$$

Or $W_{2 \rightarrow 3} = 0$ et $W_{4 \rightarrow 1} = 0$, puisque les volumes sont constants. En outre, le long des isothermes 1-2 et 3-4, on a :

$$W_{1 \rightarrow 2} = nRT_1 \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad \text{et} \quad W_{3 \rightarrow 4} = -nRT_3 \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (3.33)$$

Finalement :

$$W = -nR(T_3 - T_1) \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad \text{et} \quad \eta_m = \frac{nR(T_3 - T_1)}{nRT_3} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (3.34)$$

Ainsi, le moteur de Stirling a même efficacité que le moteur de Carnot fonctionnant entre les mêmes températures, et ceci grâce à la récupération de chaleur dans la zone R.