

CHAPITRE 4

LES CYCLES THERMODYNAMIQUES MOTEURS

1. QUELQUES RAPPELS SUR LE DEUX PREMIERS PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

Le premier principe est appelé le principe de l'équivalence. On peut le résumer de la façon suivante : chaleur et travail sont deux grandeurs équivalentes. A partir de là, il découle que nous pouvons effectuer des bilans énergétiques sur les systèmes thermodynamiques. Le premier principe peut se décliner ainsi :

Dans toute transformation au cours de laquelle un système n'échange avec l'extérieur que du travail et de la chaleur, la somme algébrique des travaux et des quantités de chaleur reçues par le système ne dépend que de l'état initial et final.

Si ce premier principe est utile pour effectuer des bilans énergétiques, par contre il n'impose aucune condition sur les types d'échanges possibles. Ce bilan énergétique ne permet donc pas de prévoir le sens d'évolution des systèmes. ex.: sens des réactions chimiques ou des transformations naturelles, ou le transfert spontané de la chaleur du chaud vers le froid. Le premier principe par son bilan n'exclut pas le transfert de la chaleur du froid vers le chaud (ce qui est impossible) et il n'explique pas l'irréversibilité de certaines transformations spontanées ou naturelles. Il faut donc introduire un deuxième principe dit aussi principe d'évolution ou principe de Carnot, déduit des faits expérimentaux, qui permettra de prévoir l'évolution des systèmes. Certaines transformations naturelles sont irréversibles, elles n'évoluent que dans un seul sens. Par exemple, la détente d'un gaz est caractérisée par l'écoulement brusque du gaz d'une HP -> BP et la détente est spontanée et irréversible.



Fig.4.1: Détente irréversible d'un gaz

On remarque que:

- l'état initial 1 (les deux gaz séparés par une cloison) est relativement ordonné, car presque toutes les molécules sont concentrées du côté HP: cet état est hautement instable.

- dans l'état final 2, en perçant un trou dans la cloison, un grand nombre de molécules passent du côté BP jusqu'à l'état d'équilibre caractérisé par une répartition homogène des molécules des deux côtés.

Cet état final 2 est plus désordonné (mélange homogène) et surtout cet état est stable. Un autre exemple est le transfert spontané de la chaleur, caractérisé par:

- l'écoulement de la chaleur des HT -> BT
- ce transfert est spontané et irréversible

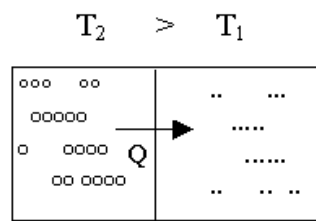


Fig.4.2 : Transfert de chaleur

Dans l'état initial 1 (cloison en place), les molécules les plus agitées sont situées du côté gauche et les molécules moins agitées du côté droit. Dans l'état final 2 (cloison enlevée), les molécules plus chaudes diffusent vers la droite et communiquent par chocs une partie de leur énergie aux molécules plus froides, pour atteindre finalement un état d'équilibre où les deux régions sont à la même température. Dans cet état final d'équilibre, les molécules ont en moyenne même énergie cinétique et le système est caractérisé par un plus grand désordre. Ces processus naturels sont irréversibles et respectent le premier principe (énergie conservée). On a vu dans les deux exemples précédents que les systèmes évoluent vers un plus grand désordre pour atteindre un état final stable ou état d'équilibre => les transformations irréversibles sont spontanées et elles satisfont à la règle d'augmentation de l'entropie des systèmes, qui prend sa valeur maximale à l'équilibre. Le deuxième principe va définir le sens privilégié suivant lequel les transformations peuvent se dérouler et préciser les conditions d'équilibre du système. C'est un postulat basé sur des observations expérimentales (principe de Carnot) :

1°) Si l'agent d'un moteur thermique (fluide, air pour le moteur à explosion, eau pour la chaudière) n'est en relation qu'avec une seule source d'énergie calorifique, il ne peut pas fournir de travail.

2°) Pour transformer de l'énergie calorifique en travail, l'agent d'un moteur thermique doit être en relation avec 2 sources à des températures différentes. De plus, l'agent ne fournit du travail que s'il prend de l'énergie calorifique à la source "chaude" et s'il en rend à la source "froide".

Par exemple, dans la turbine à vapeur, la chaudière est la source chaude et le condenseur la source froide. Ce principe stipule donc également qu'une transformation intégrale de chaleur en travail est impossible car l'agent du moteur thermique rend obligatoirement à la source froide une partie de l'énergie calorifique reçue de la source chaude. L'énergie calorifique apparaît comme une énergie de qualité inférieure à l'énergie mécanique.

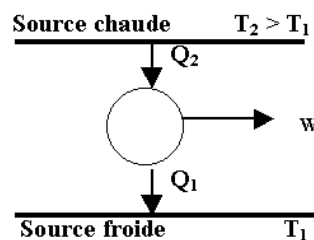
2. CONSEQUENCES DU SECOND PRINCIPE

Puisqu'il est impossible d'après ce deuxième principe de prélever de la chaleur d'une seule source de chaleur et de la transformer intégralement en travail, une machine thermodynamique doit donc nécessairement fonctionner entre au moins deux sources de chaleur :

- la transformation de chaleur en travail ($Q \rightarrow W$) à partir d'une source chaude n'est donc possible qu'à la condition de rejeter une partie de la chaleur à une autre source froide (cycle ditherme).
- cette chaleur rejetée est donc perdue et influera sur les performances de la machine thermique, d'où la notion de rendement thermique.

A partir de ce schéma à deux sources (une source chaude ou froide), on définit deux types de machines thermiques: les machines thermo-dynamiques TD et les machines dynamo-thermiques DT, dont les principes de fonctionnement sont illustrés sur les Figures ci-dessous.

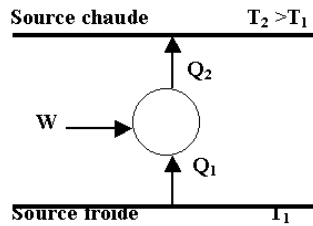
Machines thermo-dynamiques : transformant de la chaleur en travail ($Q \rightarrow W$)



1^{er} principe : $Q_2 = W + Q_1$

2^{ème} principe : notion de rendement $\eta = \frac{W_{fourni}}{Q_{prélevée}} = \frac{W}{Q} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} < 1$

Machines dynamo-thermiques : transformant du travail en chaleur ($W \rightarrow Q$)



1^{er} principe: $Q_2 = W + Q_1$

2^{ème} principe: notion de coefficient de performance $\eta = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} > 1$

Les machines thermodynamiques sont des machines thermiques produisant du travail (machines motrices), c'est le cas :

- des machines à vapeur (locomotives à vapeur, bateaux à vapeur...)
- des moteurs à combustion à essence ou diesel
- des centrales thermiques ou nucléaires (production d'électricité)

Les machines dynamo-thermiques sont par contre des machines de transfert de chaleur, exemple :

- les machines frigorifiques ou les pompes à chaleur
- les liquéfacteurs de gaz

3. QUELQUES CYCLES THERMODYNAMIQUES

Il s'agit d'étudier les moteurs utilisant comme fluide (système) un gaz, essentiellement l'air, mais encore de la vapeur d'eau ou un fluide frigorifique, et où le système décrit un cycle de transformations que nous supposons réversibles afin de pouvoir les étudier simplement.

Nous étudierons des cycles théoriques, où le système décrit des transformations élémentaires. Dans les moteurs à combustion, la nature du système change au cours du cycle: air, mélange, gaz brûlés. En général on assimile le système à de l'air tout au long du cycle, et l'air à un gaz parfait. Pour une étude plus fine, on utilise les propriétés réelles des gaz brûlés que l'on peut considérer comme un mélange de gaz parfaits. On rencontre essentiellement 2 types de moteurs :

- les moteurs à combustion externe où le système (air) est recyclé, sans renouvellement, ce qui nécessite alors 2 sources de chaleur: cycle de Stirling (moteur à air chaud), cycle d'Ericsson, cycle de Joule ou de Brayton. L'énergie est apportée sous forme de chaleur depuis l'extérieur (source chaude). Pour les turbines à vapeur, on étudiera alors le cycle de Hirn et celui de Rankine ;

- les moteurs à combustion interne où le système est renouvelé à chaque cycle. Le système est en contact avec une seule source de chaleur (l'atmosphère): cycle de Beau de Rochas ou de Otto (moteur à allumage commandé), cycle Diesel, cycle de Joule (turbines à gaz). l'apport d'énergie à lieu par transformation du système (combustion du carburant).

Le Cycle de Carnot : Un cycle de Carnot est un cycle ditherme moteur réversible (Fig.4.3) :

- évoluant entre deux sources de température T_2 et T_1 (avec $T_2 > T_1$)
- formé de deux transformations isothermes (AB et CD) et de deux transformations isentropes (BC et DA)

On réalise un tel moteur en enfermant une certaine masse m de gaz dans un cylindre fermé par un piston coulissant sans frottement. Au cours de ce cycle ABCDA, le gaz revient à son état initial après avoir :

- reçu une quantité de chaleur Q_2 à la température T_2
- fourni une quantité de chaleur Q_1 à la température T_1
- fourni un certain travail W

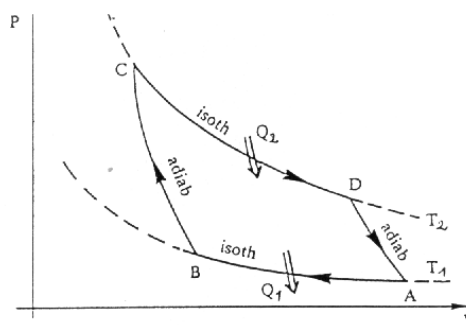


Fig. 4.3 - Cycle moteur réversible de Carnot

L'énergie interne ne changeant pas au cours d'un cycle $\Delta U = U_A - U_A = 0$, on a d'après le premier principe : $\Delta U = Q_2 + Q_1 + W = 0$ avec $|W| = Q_2 - |Q_1|$. Le rendement r du cycle de

Carnot est alors défini par $r = \frac{|W|}{Q_2} = \frac{(Q_2 - |Q_1|)}{Q_2} = 1 - \frac{|Q_1|}{Q_2}$. On démontre que le cycle de

Carnot est le cycle qui a le rendement maximum, aucun autre cycle d'une machine thermodynamique ne peut avoir un rendement plus grand. Le cycle de Carnot est un cycle idéal et c'est pour cette raison que tous les autres cycles réels sont comparés au cycle de Carnot qui sert ainsi de référence. On définit ainsi l'efficacité ε d'un cycle quelconque comme le rapport du rendement de ce cycle au rendement de Carnot : Efficacité d'un cycle: $\varepsilon = r/r_c$ (avec $0 < \varepsilon < 1$). On montre que dans un cycle de Carnot:

$$\frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} = 0 \quad (3) \text{ soit en valeur absolue, on a } \frac{Q_2}{|Q_1|} = \frac{T_2}{T_1} \text{ et par conséquent, le rendement}$$

du cycle de Carnot s'exprime simplement en fonction des températures des deux sources : $r = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ (4). Rappelons qu'un tel cycle réversible n'est pas réalisable

techniquement, mais il sert de référence à l'étude de tous les cycles thermodynamiques.

Le Cycle de Stirling (Fig. 4.4) Moteur à combustion externe il fonctionne avec 2 sources de chaleur (ditherme). Le système est en général de l'air. Il est constitué de 2 isochores et de 2 isothermes au cours desquelles ont lieu les échanges de chaleur:

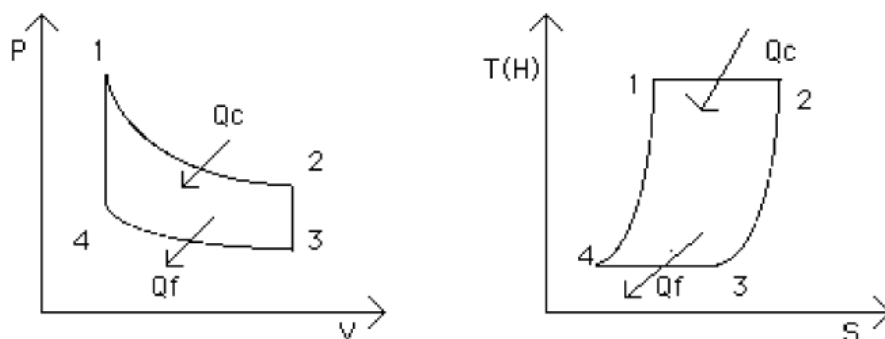


Fig. 4.4. Le cycle de Stirling

Le Cycle de Ericsson (Fig. 4.5) Il est constitué de 2 transformations isobares et de 2 transformations isothermes au cours desquelles ont lieu les échanges de chaleur.

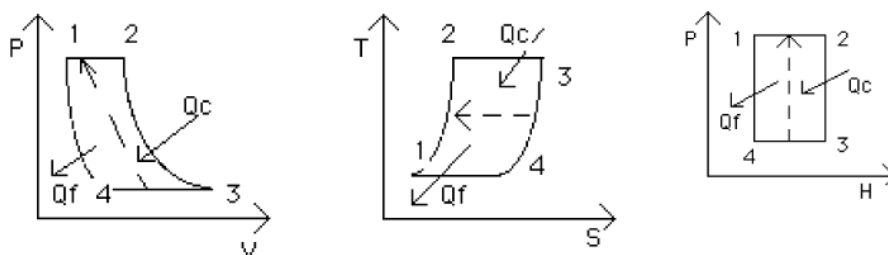


Fig. 4.5. Le cycle de Ericsson

Le Cycle de Beau de Rochas ou de Otto (Fig. 4.6) C'est le cycle des moteurs à allumage commandé. La combustion de l'essence provoque l'augmentation de température du système. Le seul échange de chaleur Q à lieu avec l'atmosphère. L'admission et l'échappement se recouvrant parfaitement dans le cycle théorique, leurs effets s'annulent. Les 4 temps du cycle (compression 1®2, combustion 2®3, détente 3®4, remise à l'équilibre 4®1) ont lieu soupapes fermées; l'étude du cycle se fait pour un système fermé.

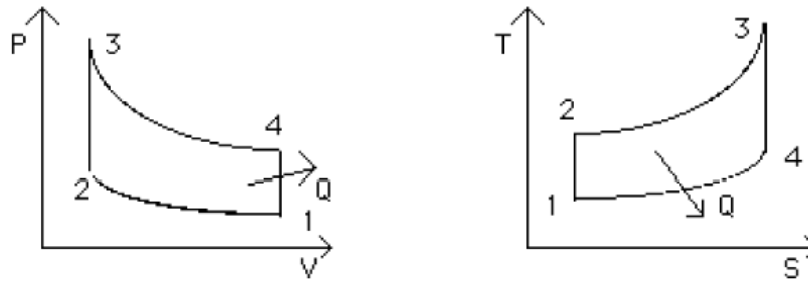


Fig. 4.6. Le cycle de Beau de Rochas

Le Cycle Diesel (Fig. 4.7) La compression 1®2 et la détente 3®4 sont isentropiques. Le rapport volumétrique de compression γ , beaucoup plus élevé que dans le moteur à allumage commandé, permet d'atteindre des températures où le gazole s'enflamme spontanément (la température d'inflammabilité du gazole étant inférieure à celle de l'essence). Le carburant est injecté progressivement de telle façon que la combustion soit isobare.

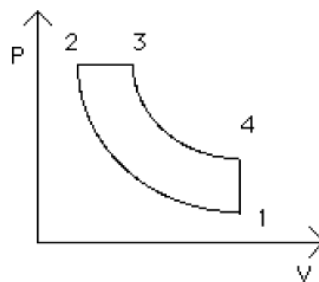


Fig. 4.7. Le cycle Diesel

Le Cycle de Joule des turbines à gaz (Fig. 4.8) Les turbines à gaz sont constituées d'un compresseur, d'une chambre de combustion et d'une turbine. Les turbines fixes (turbines de puissance), délivrent la puissance sur un arbre; les turboréacteurs ne délivrent aucune puissance sur l'arbre, mais la quantité mouvement des gaz éjectés permet la poussée. Les turbofans sont intermédiaires, une partie de la puissance est délivrée sur l'arbre et entraîne une hélice, le reste donne lieu à une poussée.

Le cycle de Joule est constitué de 2 isentropiques, la compression (1®2) et la détente (3®4), et de 2 isobares, dont la combustion (2®3). La remise à l'équilibre (4®1) a lieu à l'extérieur de la turbine, elle est accompagnée du seul échange de chaleur Q qui a lieu avec l'atmosphère.

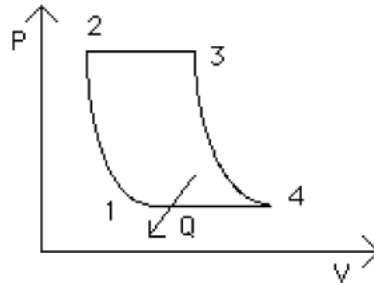


Fig. 4.8. Le cycle de Joule

4. CYCLES DES MACHINES A VAPEUR

Contrairement aux cycles étudiés en première année où le fluide caloporteur était sous forme gazeuse, le plus souvent produit par une combustion interne, les chaudières et machines à vapeur utilisent un fluide diphasique : ici l'eau qui apparaît sous forme liquide et vapeur et profite donc de la chaleur latente de changement d'état. Les machines à vapeur sont actuellement les plus utilisées pour convertir la chaleur en énergie mécanique dans le domaine des grandes puissances. Elles ont été utilisées au début sous forme de machines alternatives (pistons mobiles) notamment dans les anciennes locomotives. Actuellement, ce système a cédé la place aux machines rotatives (turbines) dans pratiquement toutes les applications.

Dans les deux cas, il s'agit de communiquer de l'énergie sous forme de chaleur à un fluide dans un domaine de température et de pression où celui-ci comporte un changement de phase liquide-vapeur. C'est ce fluide qui constitue le système thermodynamique de base. Le plus souvent on choisit l'eau pour les nombreux avantages qu'elle présente. Énergétiquement on utilise ainsi les propriétés fondamentales du changement de phase en équilibre que nous avons déjà étudiées et notamment la chaleur latente dans le fluide. Très généralement le principe est le suivant (Figure 4.9.): une quantité déterminée d'eau en phase liquide est comprimée par une pompe d'alimentation, qui lui communique une pression suffisante pour l'injecter dans un générateur de vapeur. Ce générateur utilise la chaleur Q_1 qu'il reçoit d'une chaudière pour réchauffer l'eau, puis assurer sa vaporisation, la faisant ainsi passer entièrement à l'état de vapeur saturée. La vapeur d'eau ainsi produite

est ensuite détendue, soit directement (par exemple, cycle de Rankine) dans un dispositif cylindre-piston, soit après surchauffage (cycle de Hirn) dans une turbine. C'est évidemment au cours de cette détente que la vapeur cède son énergie sous forme mécanique, soit en repoussant le piston, soit en entraînant les aubes de la turbine. En fin de détente, la vapeur restante est condensée dans un condenseur ou elle cède une quantité de chaleur Q_2 , revenant ainsi à sa forme liquide et dans les conditions qu'elle avait initialement.

4.1. LE CYCLE DE RANKINE

Il s'agit du cycle de base de la machine à vapeur qui théoriquement (réversibilité) se présente ainsi (Figs. 4.9) :

- ❶ : Etat initial : pression p_1 ; température T_1 ; enthalpie massique h_1 .
- ❶→❷ : Compression adiabatique réalisée dans une pompe d'alimentation, laquelle consomme une puissance mécanique W_+ fournie au système (liquide).
- ❷ : L'eau est injectée dans le générateur de vapeur.
- ❷→❸ : Réchauffement isobare dans le générateur à la pression de celui-ci p_2 .
- ❸ : l'eau est parvenue aux conditions fixées pour la vaporisation.
- ❸→❹ : Vaporisation dans le générateur, à pression et température constantes.
- ❹→❺ : Détente de la vapeur saturée en vapeur humide vers le condenseur.
- ❺→❶ : Retour aux conditions initiales, après condensation du reste de vapeur.

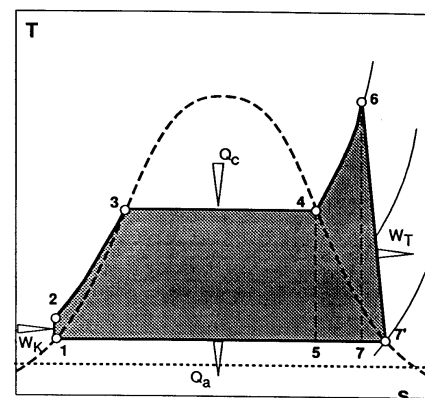
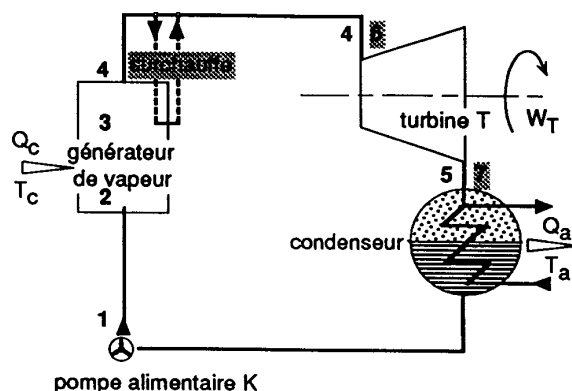


Fig. 4.9 (Gauche). Principe des machines à vapeur : Cycle de Hirn et de Rankine.

Ce schéma théorique, examiné dans la réalité des faits, amène les premières remarques suivantes :

- la quantité d'eau liquide mise en jeu est d'un volume faible devant celui de la même quantité sous forme de vapeur. C'est-à-dire que ❶ et ❷ sont

pratiquement relatifs au même volume, du fait de la très faible compressibilité de l'eau liquide.

- L'échauffement dans la partie ❶→❷ est petit, et peut être négligé devant la quantité de chaleur Q_1 . celle-ci est pratiquement employée, par unité de masse d'eau, au chauffage de l'eau de T_1 à T_3 , puis à sa vaporisation L_1 : soit : $Q_1 = c_p(T_3 - T_1) + L_1$
- Après la détente adiabatique ❸→❹, le fluide qui ne contient plus qu'une proportion x_2 de vapeur, restitue au condenseur une quantité de chaleur $Q_2 = x_2 L_2$

Ce cycle qui illustre de façon claire le principe de l'exploitation des machines thermiques à fluide diphasique, présente pourtant quelques inconvénients pour être directement appliqué aux machines modernes à hautes performances et notamment aux turbines à vapeur : en effet, l'inconvénient majeur provient du fait que la détente isentropique (adiabatique) ❸→❹ s'effectue dans le domaine diphasique ce qui pose un certain nombre de problèmes technologique dont le plus sérieux est qu'une détente en marche humide provoque des érosions des aubages de la turbine. De ce fait, il a subi diverses améliorations et on lui substitue un cycle plus conforme, connu sous le nom de cycle de Hirn.

4.2. LE CYCLE DE HIRN

De façon à éviter l'inconvénient précédent, une opération courante a été rajouté à l'initiative de Hirn sur le système de base. Il s'agit d'un surchauffeur, échangeur placé entre le bouilleur du générateur de vapeur et la turbine de détente qui permet de travailler en entrée de turbine non plus sur une vapeur saturée mais sur une vapeur sèche surchauffée (la surchauffe monte sur certaines installations jusqu'à des températures de 600°C environ). Très analogue (et même identique au départ) à celui de Rankine, Il s'en distingue de la façon suivante :

- A partir de l'état ❸ où le fluide se trouve à l'état de vapeur saturée (courbe de saturation), au lieu de détendre en vapeur humide, on lui fait subir une surchauffe isobare qui l'amène dans un état ❹ à même pression ($p_6 = p_4 = p_3$), mais à une température plus élevée ($T_6 > T_4$). Ainsi, la détente qui suit se produit pour la plus grande part dans un domaine de vapeur sèche, pour le plus grand bien des organes mécaniques de la détente.

- le retour aux conditions initiales ⑦→⑤→① demeure ensuite sans changement.

4.3. BILAN ENERGETIQUE

L'efficacité d'une machine susceptible d'exploiter de tels cycles est évidemment le rapport entre l'énergie récupérée sous forme mécanique et l'énergie fournie pour la produire : $\varepsilon = \frac{W^-}{Q_1}$. Le bilan d'opération est : $W^- = W^+ + Q_1 - Q_2 = W_{\text{moteur}}$. Dans un tel bilan

(établi en puissance), on néglige généralement la puissance fournie par la pompe d'alimentation dont la valeur est faible par rapport à la puissance mécanique produite. On parvient ainsi à l'expression classique :

$$W_{\text{moteur}} = Q_1 - Q_2 \Rightarrow \varepsilon = \frac{W_{\text{moteur}}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Un tel bilan peut se calculer à partir de la connaissance des valeurs de l'enthalpie du système (fluide moteur) tout au long des transformations du cycle choisi :

Grandeur	Cycle de Hirn	Cycle de Rankine
W_{moteur}	H ₆ -H ₇	H ₄ -H ₅
W^+	H ₂ -H ₁	H ₂ -H ₁
Q_1	H ₆ -H ₂	H ₄ -H ₂
Q_2	H ₇ -H ₁	H ₅ -H ₁

4.4. CYCLES COMPLEXES

Les cycles simples peuvent donner lieu à sophistication permettant une meilleure utilisation des systèmes. Les deux améliorations principales du cycle de Hirn consistent soit à utiliser une opération de resurchauffe, soit à rechercher un cycle à régénération à partir de soutirage.