Chapitre II

MACHINES THERMIQUES

I. GENERALITES SUR LES CYCLES

1. Machines thermiques

Une machine thermique est un dispositif qui réalise des conversions d'énergie en effectuant des cycles thermodynamiques qui font évoluer de façon appropriée un (des) fluide(s) dit(s) moteur(s) (ou agent(s) thermiques). Il existe trois catégories de machines thermiques :

- les machines motrices sont des systèmes qui convertissent de la chaleur en travail
- les machines frigorifiques transfèrent de la chaleur d'une source froide vers une source chaude, en utilisant du travail, et le but recherché est de refroidir ou de maintenir froide la source froide ;
- les pompes à chaleurs transfèrent de la chaleur d'une source froide vers une source chaude, en utilisant du travail, avec pour objectif de réchauffer ou de maintenir chaude une source chaude.

2. Sources de chaleur

On définit une source de chaleur comme étant un système capable de fournir ou d'absorber de la chaleur tout en restant à température constante: cela nécessite une grande capacité calorifique (atmosphère, océans, rivières). Dans le cas des systèmes dithermes on distingue la source chaude de température T_C et la source froide de température T_F: La source chaude est toujours la source à la température la plus élevée $T_C > T_F$.

Une machine thermique peut fonctionner:

- avec deux sources de chaleur dans le cas de systèmes (ou cycles) fermés: machines à vapeur
- en renouvelant le système à chaque cycle dans le cas des systèmes (ou cycles) ouverts: c'est le cas des moteurs à combustion où la seule source de chaleur est l'atmosphère. Dans ce dernier cas, on considère que le cycle est fermé en le complétant par une transformation hypothétique qui représente un échange de chaleur avec la source froide.

3. Réversibilité et irréversibilité

On dit qu'une transformation est réversible si après sa réalisation dans un sens puis dans le sens inverse le système thermodynamique revient à son état initial sans engendrer des effets observables sur son environnement. Les évolutions dans les machines réelles sont essentiellement irréversibles avec des degrés différents. Dans certains cas on peut admettre qu'elles sont réversibles.

Facteurs d'irréversibilité : frottement, compression et détentes rapides, mélange de deux fluides, transfert thermique sous une différence de température finie, résistance électrique, déformation inélastique d'un solide et les réactions chimiques

4. Equation de l'énergie

Au cours d'un cycle, le fluide peut

- subir une compression et une détente qui impliquent des travaux échangés avec l'extérieur;
- échanger une quantité de chaleur Q_C lorsqu'il est en contact avec la source chaude ;
- échanger une quantité de chaleur Q_F lorsqu'il est en contact avec la source froide.

Les cycles font généralement intervenir un seul courant de fluide. En vertu du premier principe, on a

$$Q_{cy} + W_{cy} = \Delta U_{cy} \tag{2}$$

où Q_{cy} est la chaleur nette échangée par le fluide moteur au cours d'un cycle (= Q_C+ Q_F), W_{cy} le travail net échangé (somme des travaux de compression et de détente lorsqu'ils existent) et ΔU_{cy} la variation de son énergie interne. Cette écriture considère que la chaleur reçue par le fluide et le travail fait sur le fluide sont positifs ; la chaleur cédée et le travail fait par le fluide sont négatifs.

Rappelons que l'énergie interne étant une fonction d'état, sa variation sur un cycle complet est nulle. En conséquence,

$$Q_{cy} = -W_{cy} \tag{3}$$

II. NOTION DE RENDEMENT

1. Définition

On appelle rendement d'une installation (ou du cycle qui lui correspond) le rapport entre l'effet utile pour lequel elle est conçue et l'énergie dépensée pour le produire.

$$\eta = \left| \frac{\text{effet utile}}{\text{énergie dépensée}} \right| \tag{4}$$

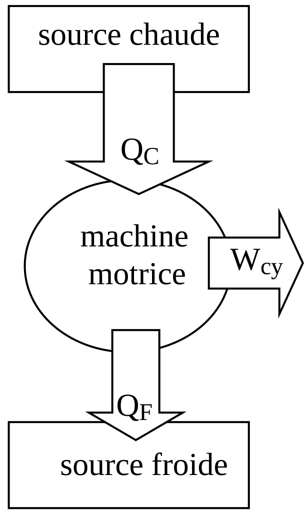
Le rendement caractérise le degré de perfectionnement de l'installation. Plus sa valeur est élevée, plus les performances du cycle sont meilleures.

a. Cas des machines motrices

Les machines motrices empruntent une quantité de chaleurs Q_C à la source chaude, une quantité Q_F de cette chaleur est cédée à la source froide et la différence est convertie en travail net W_{cy}. Ce dernier comprend l'énergie motrice produite et celle, éventuelle, qui est la contrepartie du travail de compression.

Figure1

Schéma d'une machine motrice



Ici l'effet demandé à une machine motrice est le travail net produit et l'énergie totale dépensée pour sa réalisation est la chaleur Q_C empruntée à la source chaude. Par conséquent, le rendement d'une machine motrice est

$$\eta = \left|\frac{W_{cy}}{Q_C}\right| \tag{5}$$

Comme d'après (3)

$$W_{cy} = -Q_{cy} = -Q_C - Q_F$$

Ici

$$\left|W_{cy}\right| = \left|-Q_F - Q_C\right| = Q_F + Q_C \text{ car } Q_F < 0 \text{ ; } Q_C > 0 \text{ et } \left|Q_F\right| < \left|Q_C\right|$$

Il vient

$$\eta = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{\overset{<0}{Q_F}}{Q_C} < 1 \tag{6}$$

Pour mieux se fixer les idées, considérons l'installation ci-dessous représentant uns machine thermique à vapeur.

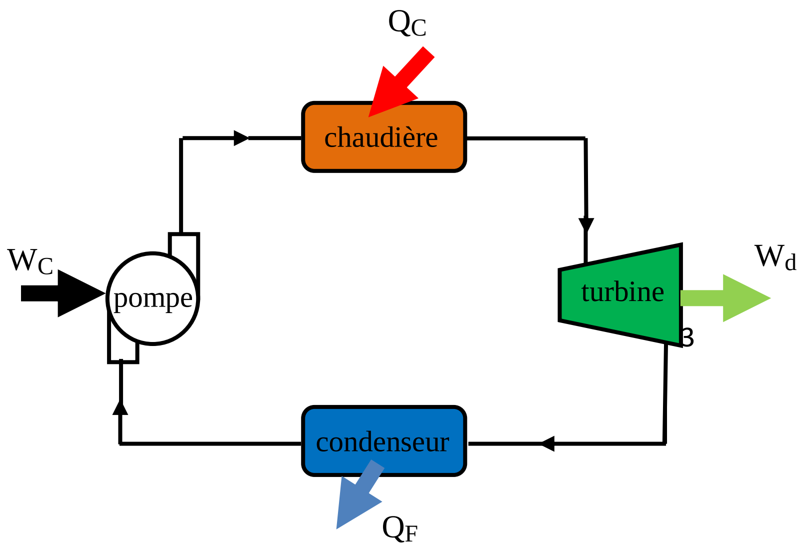


*Figure2 :*Schéma d'une machine

- Q_C est la quantité de chaleur fournie par la source chaude, représentée par le four de la chaudière, au fluide moteur ;
- Q_F est la quantité de chaleur rejetée par le fluide moteur vers l'atmosphère qui joue le rôle de source froide ;
- W_d est le travail de détente produit par la turbine ;
- W_C est le travail de compression dans la pompe.

Ainsi,

$$W_{cy} = \underbrace{W_d}_{<0} + \underbrace{W_c}_{>0} < 0 \qquad (7)$$

b. Cas des machines frigorifiques

Dans un appareil frigorifique, il s'agit de retirer, par l'intermédiaire du fluide, une quantité de la chaleur Q_F à la source froide soit pour abaisser sa température, soit pour la maintenir à une température inférieure à la température ambiante. Ce transfert est effectué grâce à un compresseur et à un détendeur qui permettent cette opération. Ce cycle nécessite de l'énergie W que l'on doit fournir mécaniquement au compresseur.

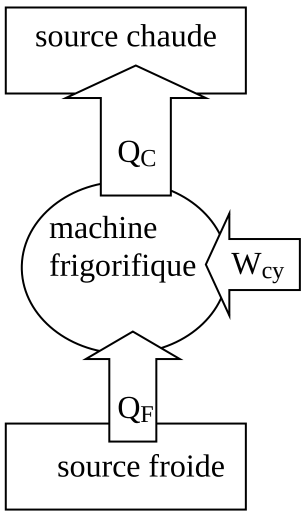


Figure3

Schéma d'une machine frigorifique et d'une pompe à chaleur

Son rendement, appelé **Coefficient d'effet frigorifique ;** il est noté ε et est égal au rapport de la quantité chaleur retirée à la source froide au travail consommé par le fluide.

$$\varepsilon = \left|\frac{Q_F}{W_{cy}}\right| \tag{8}$$

c. Cas des pompes à chaleur

La pompe à chaleur se différencie d'une machine frigorifique par le but recherché. Une pompe à chaleur transfert vers la source chaude une quantité de chaleur Q_C en utilisant une énergie W que l'on doit fournir mécaniquement au compresseur. Son rendement, appelé Coefficient de performance, est égal au rapport de la quantité de chaleur fournie à la source chaude sur le travail consommé par le fluide

$$\eta = \left|\frac{Q_C}{W_{cy}}\right| \tag{9}$$

2. Rendement des machines thermiques

a. Rendement de Carnot d'un cycle moteur

Le rendement d'une machine thermique dépend fortement de la façon avec laquelle les transformations qui constituent le cycle sont exécutées individuellement. Son optimisation peut être effectuée en utilisant des transformations réversibles. De tels cycles ne peuvent pas être réalisés car les transformations réelles sont toujours sujettes à des processus irréversibles qui ne peuvent pas être éliminés. Cependant ils sont conçus théoriquement pour servir de modèles idéaux de référence pour évaluer l'efficacité d'une installation réelle.

Le plus connu des cycles réversibles est celui de Carnot (1824) et il est l'exemple le plus simple de fonctionnement réversible pour les machines thermiques. Il est constitué de 2 transformations isothermes réversibles correspondant aux échanges de chaleur entre le système et les sources (le système étant à la même température que la source) et de 2 isentropiques. Ce cycle et représenté dans la figure et opère dans le sens $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ pour une machine motrice.

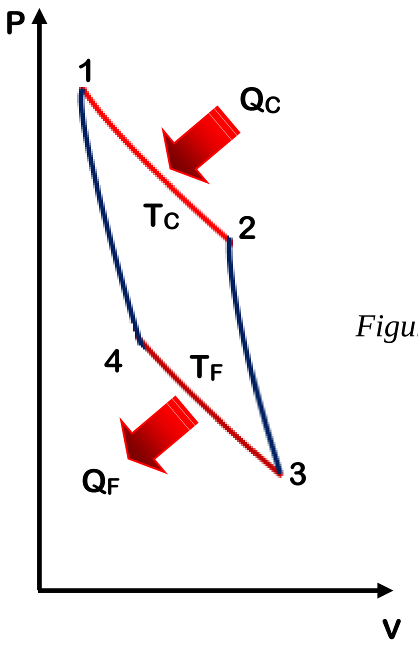


Figure4

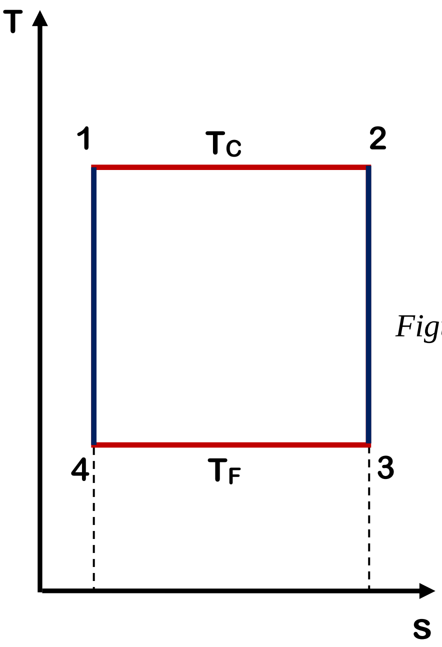


Figure5

A B

Diagrammes (P-v) et (T-s) du cycle de Carnot

On peut imaginer que ce cycle représente des transformations réversibles ayant lieu dans un système cylindre-piston isolé thermiquement et dont l'isolation de la tête du cylindre peut être enlevée pour une mise en contact avec les sources chaude et froide lors des processus isothermes $1 \rightarrow 2$ et $3 \rightarrow 4$ (figure 2)

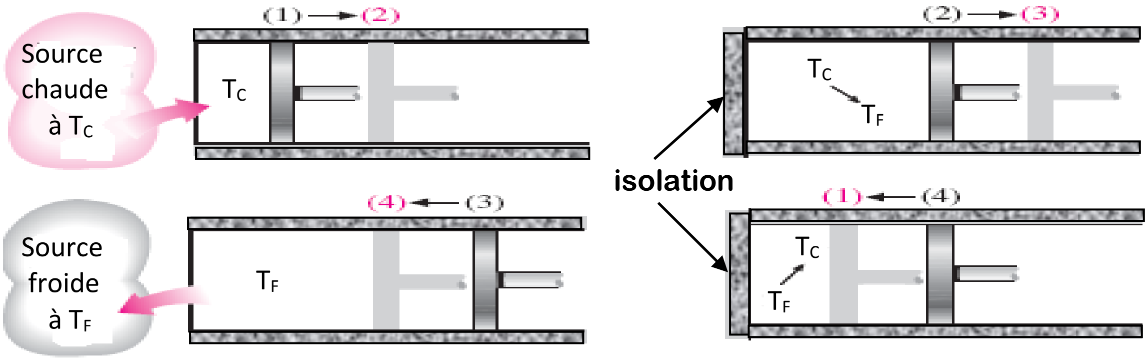


Figure 6 Exécution du cycle de Carnot dans un système cylindre-piston

S'agissant de machine motrice, le rendement (du cycle) de Carnot peut se calculer en utilisant la définition

$$\eta = 1 + \frac{\overset{<0}{Q_F}}{Q_C} \qquad (10)$$

Pour exprimer le rendement (du cycle) de Carnot, considérons le système formé par les deux sources et le fluide moteur. Ce système, n'échangeant pas de chaleur avec le reste de l'univers, est adiabatique. D'après le deuxième principe de la thermodynamique, la variation de son entropie totale est nulle :

$$\Delta S_{CY}\left(\text{cycle}\right) + \Delta S_C\left(\text{source chaude}\right) + \Delta S_F\left(\text{source froide}\right) = 0 \qquad (11)$$

Comme

$$\Delta S_{CY} = 0$$

$$\Delta S_C = \frac{1}{T_C}\int_0^{Q_C} dQ = \frac{Q_C}{T_C}$$

$$\Delta S_F = \frac{1}{T_F}\int_0^{Q_F} dQ = \frac{Q_F}{T_F}$$

la relation (11) devient

$$\frac{Q_C}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}=0$$

soit

$$\frac{Q_F}{Q_C}=-\frac{T_F}{T_C} \tag{12}$$

Nous obtenons ainsi le rendement thermique d'un cycle de Carnot, appelé souvent rendement de Carnot

$$\eta_C=1-\frac{T_F}{T_C} \tag{13}$$

Ce rendement de Carnot est la valeur (théorique) maximale du rendement d'une machine thermique motrice opérant entre les températures T_F et T_C **exprimées en Kelvin**.

b. Rendement de Carnot d'un cycle de réfrigération ou d'une pompe à chaleur

Un cycle de réfrigération (ou d'une pompe à chaleur) opérant selon le cycle inverse de Carnot est appelé machine frigorifique (ou pompe à chaleur) de Carnot. Ainsi, la relation (12) reste valable dans ce cas et elle permet, en la combinant avec les définitions (8) et (9), d'obtenir l'expression:

- du coefficient d'effet frigorifique d'une machine frigorifique;.

$$\varepsilon_C=\left|\frac{Q_F}{W_{cy}}\right|=\frac{Q_F}{-Q_F-Q_C}=\frac{1}{-1-\dfrac{Q_C}{Q_F}}=\frac{1}{\dfrac{T_C}{T_F}-1} \tag{14}$$

Ici

$$\left|W_{cy}\right|=-Q_F-Q_C \text{ car } Q_F>0\ ;\ Q_C<0 \text{ et } \left|Q_F\right|<\left|Q_C\right|$$

- du coefficient de performance d'une pompe à chaleur

$$\eta_C=\left|\frac{Q_C}{W_{cy}}\right|=\frac{-Q_C}{-Q_F-Q_C}=\frac{1}{\dfrac{Q_F}{Q_C}+1}=\frac{1}{1-\dfrac{T_F}{T_C}} \tag{15}$$

Ces rendement de Carnot donnent les valeurs (théoriques) maximales des coefficients de performance d'une machine frigorifique et d'une pompe à chaleur opérant entre les températures T_F et T_C.

c. Comparaison des rendements de cycles réversibles

Considérons un cycle de Carnot 1-2-3-4 et un cycle réversible quelconque A-B-C-D réalisé dans le même intervalle de température (voir Figure3). Le premier est caractérisé par, le rendement de Carnot

$$\eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

et le second par le rendement thermique

$$\eta_{th} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

Le cycle réversible est d'autant plus perfectionné que son rendement thermique se rapproche de celui de Carnot. La comparaison de ces deux rendements n'est cependant pas facile à cause de la difficulté que présente l'estimation de Q_F et Q_C. Aussi, utilise-t-on une des deux procédés suivants.

- **Méthode graphique**

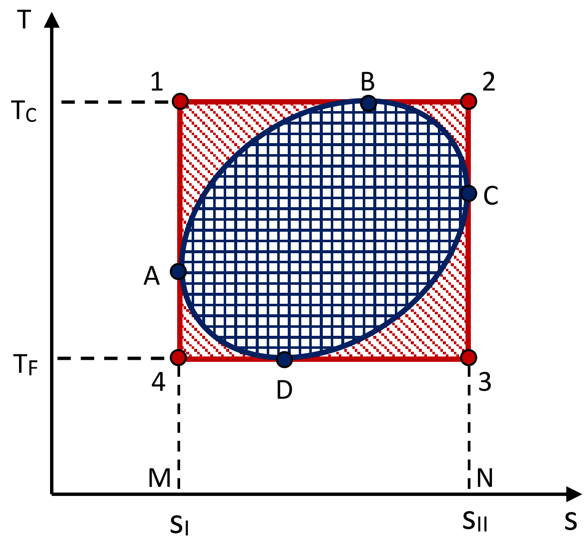


Figure 7 Représentation schématique du cycle de Carnot et d'un cycle réversible

Ce procédé consiste à utiliser le coefficient de remplissage qui est défini par le rapport, dans le diagramme T-s, de l'aire (A-B-C-D) du cycle réversible par celle (1-2-3-4) du cycle de Carnot

$$\text{coefficient de remplissage} = \frac{\text{aire}(\text{A-B-C-D})}{\text{aire}(\text{1-2-3-4})}$$

En effet,

$$|q| = \int_{s_I}^{s_{II}} T ds = \text{aire comprise entre la courbe de T(s), l'axe des abscisses,}$$
$$\text{et les droites } s=s_I \text{ et } s=s_{II}$$

<u>Pour le cycle de Carnot :</u>

- $|q_C|$ est représenté par l'aire (M-4-1-2-3-N)
- $|q_F|$ est représenté par l'aire (M-4-3-N)

et

- l'aire (1-2-3-4) représente $|q_C| - |q_F| = |W_{Carnot}|$

Pour le cycle réversible quelconque :

- $|q_C|$ est représenté par l'aire (M-A-B-C-N)
- $|q_F|$ est représenté par l'aire (M-A-D-C-N)

et

- l'aire (A-B-C-D) représente $|q_C| - |q_F| = |W_{rev}|$

Finalement le coefficient de remplissage traduit le rapport

$$\text{coefficient de remplissage} = \frac{|W_{rev}|}{|W_{Carnot}|}$$

qui compare les travaux produits par les deux cycles réversibles.

- **Méthode des températures moyennes d'échanges de chaleur**

Rappelons que l e rendement thermique du cycle réversible est donné par :

$$\eta_{th} = \frac{q_C + q_F}{q_C} = \frac{q_C - |q_F|}{q_C}$$

La chaleur q_C reçue par le fluide moteur est donnée par la relation

$$q_C = \left(\int_{s_I}^{s_{II}} Tds \right)_{A-B-C}$$

On définit la température moyenne T_{Cmoy} à laquelle le fluide moteur reçoit de la chaleur par la relation :

$$T_{Cmoy} = \frac{\left(\int_{s_I}^{s_{II}} Tds \right)_{A-B-C}}{s_{II} - s_I} \Rightarrow q_C = T_{Cmoy} \left(s_{II} - s_I \right)$$

La chaleur q_F cédée par le fluide moteur est donnée par la relation

$$|q_F| = \left(\int_{s_I}^{s_{II}} Tds \right)_{A-D-C} *$$

On définit la température moyenne T_{Fmoy} à laquelle le fluide moteur cède la chaleur par la relation :

$$T_{Fmoy} = \frac{\left(\int_{s_I}^{s_{II}} Tds \right)_{A-D-C}}{s_{II} - s_I} \Rightarrow |q_F| = T_{Fmoy} \left(s_{II} - s_I \right)$$

En reportant les expressions de q_C et de $|q_F|$ dans celle du rendement thermique du cycle réversible, il vient :

$$\eta_{th} = \frac{q_C + q_F}{q_C} = \frac{q_C - |q_F|}{q_C} = \frac{T_{Cmoy} - T_{Fmoy}}{T_{Cmoy}} = 1 - \frac{T_{Fmoy}}{T_{Cmoy}}$$

Numériquement, le rendement thermique d'un cycle réversible quelconque est égal au rendement thermique d'un cycle de Carnot réalisé entre ses températures T_{Cmoy} et T_{Fmoy}. Ce rendement est d'autant plus grand que T_{Cmoy} est plus élevée.

d. Rendement interne d'un cycle

Par rendement thermique (η_{th}) nous désignerons le rendement d'un cycle réversible et par rendement interne (η_i) celui d'un cycle réel irréversible. Le qualificatif « interne » signifie qu'il s'agit du rendement du cycle du fluide moteur proprement dit ; il ne tient pas compte des imperfections des divers organes constitutifs de l'installation. Ainsi, le rendement thermique est donné par

$$\eta_{th} = \left|\frac{W_{CY}}{Q_C}\right|_{rev} = 1 + \left(\frac{Q_F}{Q_C}\right)_{rev} \qquad (16)$$

et le rendement interne par

$$\eta_i = \left|\frac{W_{CY}}{Q_C}\right|_{irr} = 1 + \left(\frac{Q_F}{Q_C}\right)_{irr} \qquad (17)$$

e. Rendement interne relatif d'un cycle

L'efficacité des cycles réels peut être évaluée à l'aide du rendement interne défini par la relation (17). Cependant, ce dernier ne nous renseigne pas sur le degré d'irréversibilité du cycle. C'est pour cette raison que, pour l'analyse des cycles irréversibles, on utilise la notion de rendement relatif du cycle qu'on introduit en réécrivant la relation (17) sous la forme suivante

$$\eta_i = \left|\frac{W}{Q_C}\right|_{irr} = \underbrace{\left|\frac{W^{irr}}{W^{rev}}\right|}_{\eta_r}\underbrace{\left|\frac{W^{rev}}{Q_C}\right|}_{\eta_{th}} = \eta_r^{cy}\eta_{th} \qquad (18)$$

Ce qui permet de définir le rendement interne relatif

$$\eta_r^{cy} = \left|\frac{W^{irr}}{W^{rev}}\right| \qquad (19)$$

Ce rendement permet de mesurer l'écart qui sépare un cycle réel irréversible d'un cycle théorique réversible. Rappelons que le travail du cycle W est égal à la somme algébrique du travail de détente et du travail de compression. Dans les installations réelles, les deux processus s'accompagnent toujours de pertes irréversibles. Aussi, on définit pour chacun des organes qui sont les sièges de ces transformations son rendement interne relatif

- Pour la compression

$$\eta_r^{com} = \left| \frac{W_{com}^{rev}}{W_{com}^{irr}} \right| \qquad (20)$$

- Pour la détente

$$\eta_r^{det} = \left| \frac{W_{det}^{irr}}{W_{det}^{rev}} \right| \qquad (21)$$

Les valeurs de ces rendements internes relatifs sont déterminées expérimentalement.

Le rendement interne relatif (19) du cycle peut alors se mettre sous la forme

$$\eta_r^{cy} = \left| \frac{W^{irr}}{W^{rev}} \right| = \frac{\left| W_{det}^{irr} + W_{com}^{irr} \right|}{\left| W_{det}^{rev} + W_{com}^{rev} \right|} = \frac{\left| W_{det}^{rev} \eta_r^{det} + \dfrac{W_{com}^{rev}}{\eta_r^{com}} \right|}{\left| W_{det}^{rev} + W_{com}^{rev} \right|} \qquad (22)$$

Le rendement interne du cycle (18) devient alors

$$\eta_i = \eta_r^{cy} \eta_{th} = \frac{\left| W_{det}^{rev} \eta_r^{det} + \dfrac{W_{com}^{rev}}{\eta_r^{com}} \right|}{\left| W_{det}^{rev} + W_{com}^{rev} \right|} \times \frac{\left| W_{det}^{rev} + W_{com}^{rev} \right|}{Qc} = \frac{\left| W_{det}^{rev} \eta_r^{det} + \dfrac{W_{com}^{rev}}{\eta_r^{com}} \right|}{Qc} \qquad (23)$$

f. Rendement efficace de l'installation

Rappelons que le rendement interne d'un cycle caractérise uniquement les transformations du fluide moteur sans tenir compte des imperfections des divers organes constitutifs de l'installation. Une partie du travail produit par le cycle proprement dit est dépensée sous forme de pertes mécaniques, thermiques et électriques dans les différents organes de l'installation. Chacun de ces organes est de ce fait caractérisé par son rendement efficace η_{ef} . Ainsi le rendement efficace global pour l'ensemble de l'installation est donné par

$$\eta_{ef}^{ins} = \eta_{th} \eta_r^{cy} \prod_{j=1}^{N} \eta_{ef}^{(j)} \qquad (24)$$

où $\eta_{ef}^{(j)}$ est le rendement efficace de l'organe « j ». Le rendement efficace d'une installation motrice indique la fraction de la chaleur q_c transmise par le combustible de la chaudière qui est transformée en énergie produite pour être consommée, W_{utile}. Cette dernière est l'énergie électrique produite dans une centrale à vapeur ou, dans le cas d'un moteur d'automobile, le travail transmis par le piston au vilebrequin.

$$\eta_{ef}^{ins} = \left| \frac{W_{utile}}{q_c} \right| \qquad (25)$$

Il est évident que la quantité

$$\Delta q = q_c - \eta_{ef}^{ins} q_c = \left(1 - \eta_{ef}^{ins}\right) q_c \qquad (26)$$

représente la partie de la chaleur q_c non transformée en travail utile. En d'autres termes il s'agit de la différence

$$\Delta q = \left(W^{rev} - W_{utile}\right)_{cycle} \qquad (27)$$

Nous allons maintenant définir les rendements efficaces des éléments qui interviennent dans les installations motrices.

- **Rendement efficace de la turbine**

Une partie du travail produit par la détente du fluide dans la turbine est absorbée par les pertes mécaniques de ses différents organes sujets à des frottements (les paliers d'appui, la butée….) et par l'entraînement de la pompe à huile de graissage. La valeur de ces pertes de travail est caractérisée par le rendement efficace, plus souvent appelé rendement mécanique de la turbine, qui est défini par le rapport du travail mécanique utilisable, disponible sur l'axe de la turbine, W_{tur}^{m}, au travail produit par la vapeur lors de sa détente dans la turbine :

$$\eta_m = \frac{W_{tur}^{m}}{W_{det}^{irr}} \qquad (28)$$

Pour les turbines à vapeur modernes $0,97 \le \eta_m \le 0,995$

- **Rendement efficace de la génératrice**

Si le travail W_{tur}^{m} est transmis sur le manchon d'une génératrice électrique, accouplée à la turbine, une partie de cette énergie est dépensée sous forme de pertes mécaniques et électriques. On définit alors le rendement efficace de la génératrice électrique par le rapport

$$\eta_g = \frac{W_{el}}{W_{tur}^{m}} \qquad (29)$$

W_{el} étant l'énergie électrique délivrée par la génératrice pour la consommation. Pour les turbines à vapeur modernes $0,97 \le \eta_g \le 0,99$

- **Rendement efficace de la chaudière**

La chaleur potentielle que devrait produire la combustion du combustible dans le foyer de la chaudière n'est pas intégralement utilisée pour chauffer le fluide moteur. Une partie est emportée par les gaz de combustion. Une autre est perdue à cause d'une combustion chimiquement et mécaniquement incomplète et une troisième par convection et rayonnement dans le milieu extérieur. L'efficacité de la chaudière est caractérisée par le rendement

$$\eta_{ch} = \frac{\Delta h(\text{fluide})_{\text{entrée}}^{\text{sortie}}}{q_{comb}} \qquad (30)$$

$\Delta h(\text{fluide})_{\text{entrée}}^{\text{sortie}}$ est la chaleur fournie dans la chaudière au fluide moteur.

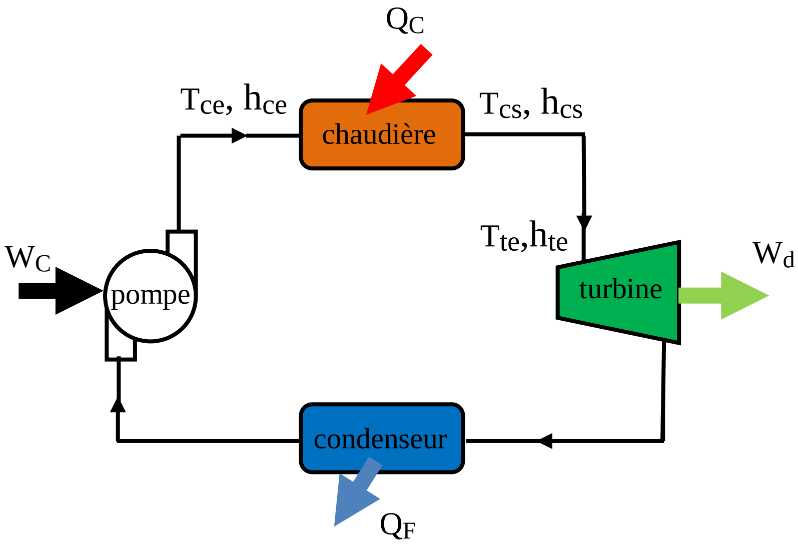
q_{comb} est la chaleur dégagée par le combustible pour chauffer 1kg de fluide moteur.

Pour les installations modernes $0,89 \le \eta_{ch} \le 0,93$

- **Rendement efficace de la tuyauterie de vapeur**

Reconsidérons le schéma ci-dessous d'une installation de turbine à vapeur

Figure 10 :
installation de machine à vapeur



La vapeur d'eau sort de la chaudière avec une température T_{CS} mais arrive à l'entrée de la turbine avec une température T_{te} inférieure à T_{CS}. Ainsi, on décrit ces pertes de chaleur par un rendement efficace de la tuyauterie de vapeur (voir figure)

$$\eta_{t.v.} = \frac{h_{te} - h_{ce}^{irr}}{h_{cs} - h_{ce}^{irr}} \qquad (31)$$

$\eta_{t.v.}$ est généralement compris entre 0,98 et 0,99. Les pertes dans la tuyauterie reliant la turbine au condenseur et dans celle qui joint le condenseur à la chaudière sont négligeables.