Cycle préparatoire
Semestre 2

Cours de thermodynamique

Pr. A. SAAD

Année universitaire: 2020/2021

CHAPITRE 6: Les machines thermiques

1. Définitions

1.1 Machine thermique

- On désigne par les machines thermiques des appareils ayant pour objectif de faire en sorte qu'un fluide (système thermodynamique) échange de chaleur et du travail avec son milieu extérieur.

- Les machines thermiques font subir à des fluides des transformations qui constituent des cycles fermés ou ouverts:

❖ Lorsque la machine échange de la matière avec son environnement, elle est dite à ***cycle ouvert (cas du moteur à combustion interne).***

❖ ***Dans le cas contraire, elle est dite à cycle fermé, on cite à titre d'exemples les machines à vapeur, les machines frigorifiques et les pompes à chaleur.***

CHAPITRE 6: Les machines thermiques

1. Définitions

1.1 Machine thermique

Dans une autre classification, une machine est dite:

- machine thermo-dynamique (machine motrice) si, elle fourni un travail au milieu extérieur (moteur à combustion interne, turbine à gaz, turbine à vapeur) .
- machine dynamo-thermique (réceptrice) dans le cas inverse (par exemple : machine frigorifique, pompe à chaleur) .

Les machines thermiques peuvent être, des machines monothermes (compresseur, chauffage électrique) ou des machines dithermes (machine à vapeur, machine frigorifique….) .

1.2 Source de chaleur

On appelle source de chaleur, un objet en contact avec le système et susceptible de n'échanger avec lui que de la chaleur. Si on a deux sources, celles-ci sont distinguées en source froide et source chaude par leurs températures relatives.

2. Machine thermique monotherme

C'est une machine dont le système (fluide) n'est en contact qu'avec une seule source de chaleur.

Les machines monothermes sont moins répondues en pratiques*. Il est démontré qu'un système thermodynamique subissant une transformation cyclique, et n'échangeant de la chaleur qu'avec une seule source thermique, ne peut pas produire de travail : il ne peut qu'en recevoir du milieu extérieur.*

En d'autres termes, un tel système ne peut pas se comporter comme un moteur (il n'existe pas) .

On justifie l'énoncé de Clausius qui dit qu'il n'existe pas de machine thermique monotherme motrice. Cette machine ne peut que recevoir du travail ($W > 0$) et céder de la chaleur ($Q < 0$) .

3. Machine thermique ditherme

- Puisqu'il est impossible d'aprés le deuxiéme principe de prèlever de la chaleur et de la transformer intégralement en travail, une machine thermique doit nécessairement fonctionner entre au moins deux sources de chaleur.
- La transformation de chaleur (Q) en travail (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.
- Un transfert de chaleur ne s'effectue jamais d'une source froide vers une autre chaude, d'où la nécessité d'un travail de moteur supplémentaire.
- Donc, on peut distinguer entre deux types de machines thermiques avec deux principes de fonctionnement distincts.
- On appelle rendement $\eta>0$ d'une machine thermique le rapport d'energie utile à l'energie consommée (depensée) pour la faire fonctionner.

$$\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie consommée}}$$

3. Machine thermique ditherme

Convention de signe

- si le cycle est décrit dans le sens des aiguilles d'une montre, alors le travail est négatif (W<0) et le cycle est dit moteur (figure 1).

- si le cycle est décrit dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, alors le travail est positif (W>0) et le cycle est dit cycle récepteur (figure 2).

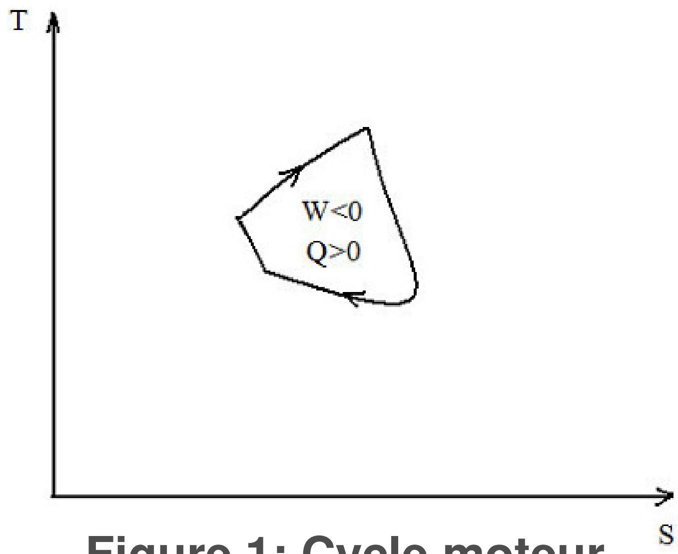


Figure 1: Cycle moteur

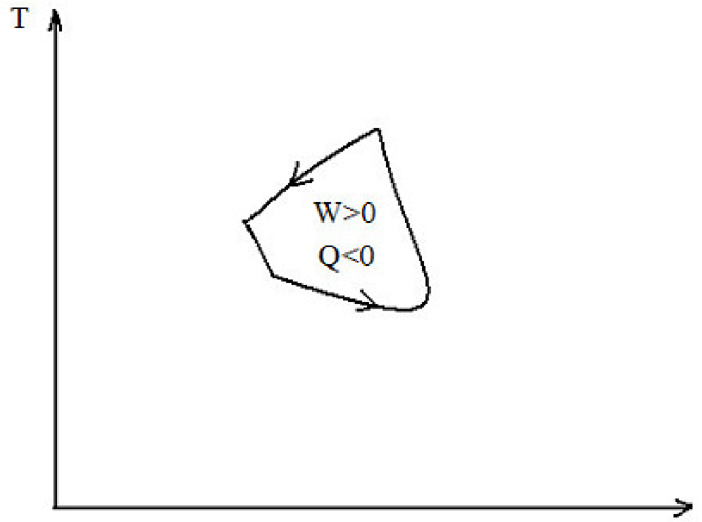


Figure 2: Cycle récepteur

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

Les machines thermodynamiques (T.D) sont des machines thermiques produisant du travail, dite machines motrices (fig. 3).
Cas des machines thermiques qui transforment une partie de la quantité de chaleur prélevée d'une source chaude en travail mécanique et le reste sera perdue.

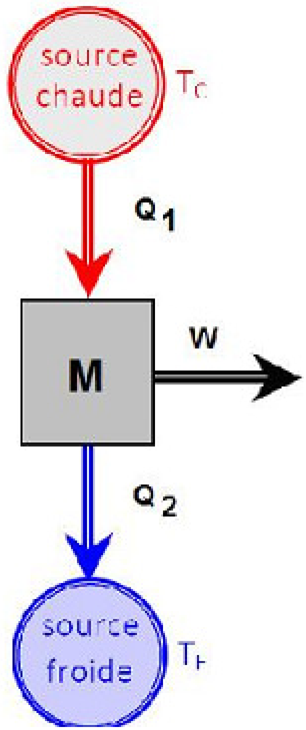


Fig. 3 : Schéma de principe d'une machine dithermes motrice

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.1 Principe de fonctionnement

La source chaude est constituée des gaz brûlés issus de la combustion de charbon, de fuel, etc.…, ou bien par le circuit d'eau primaire d'une centrale nucléaire.
La chaleur ***Q1*** est transférée de la source chaude au fluide caloporteur via ***la chaudière (fig. 4).***
L'acquisition de Q1 par le fluide permet d'accroitre sa température et sa pression, il est ensuite détendu à travers une turbine simple est constituée d'une roue mobile qui récupère le travail issu de la détente de la vapeur d'eau dans les aubages. Le fluide est ensuite mis en contact avec la source froide via ***le condenseur, où on lui retire la chaleur Q 2***

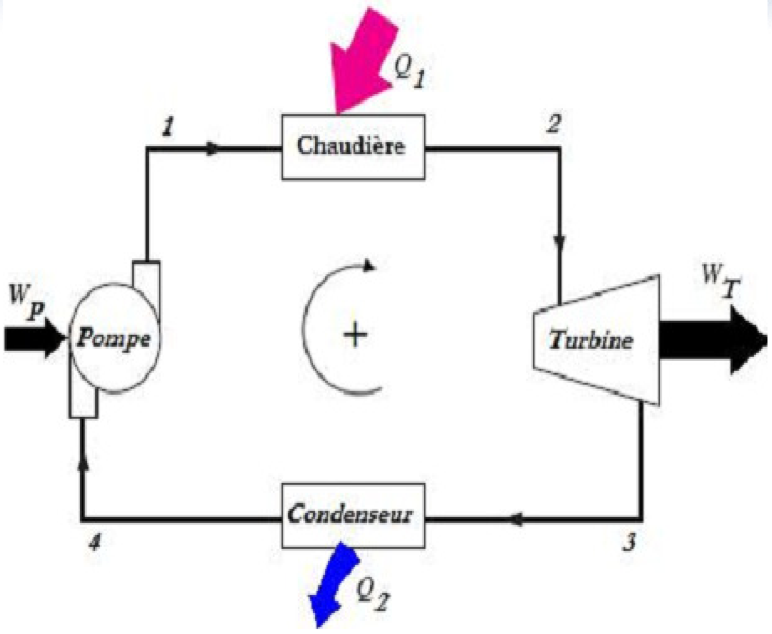


Fig. 4: Schéma de principe d'une machine dithermes motrice

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.1 Principe de fonctionnement

Enfin, le fluide cède un travail *Wt* à la turbine. Une partie de ce travail est prélevée pour faire tourner la pompe, qui entraîne le fluide dans le long du cycle. En supposant que la pompe cède un travail *Wp* au fluide, l'installation délivre le travail net *Wnet* défini par :

$$W_{net} = W_t - W_p$$

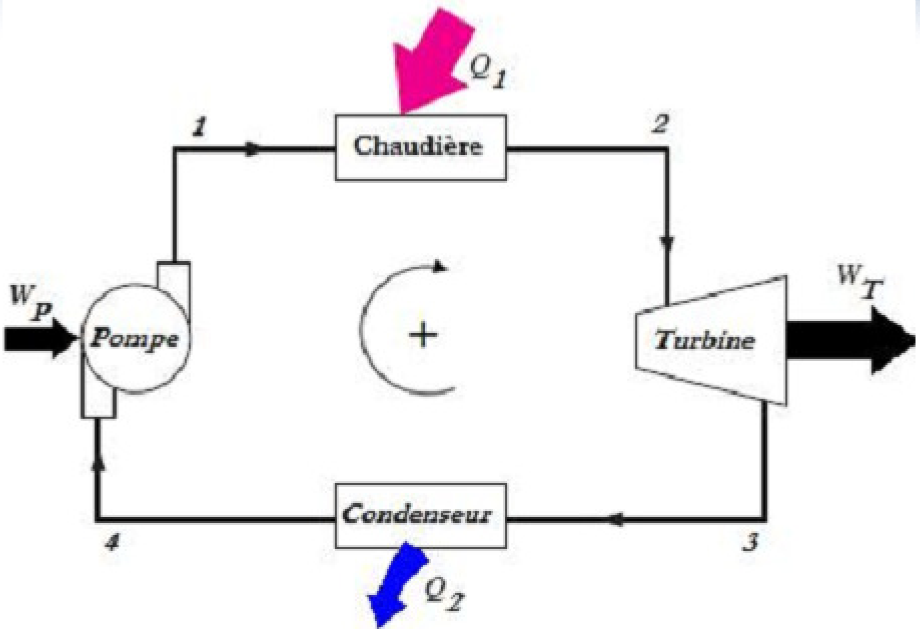


Fig. 4 Schéma de principe d'une machine dithermes motrice

Le rendement η_{th} de la machine thermique motrice est le rapport du **travail net fourni** par l'installation sur **la chaleur reçue** de la source chaude :

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_1} = \frac{W_t - W_p}{Q_1}$$

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.1 Principe de fonctionnement

Si on fait un bilan énergétique sur cette machine (T.D) ; on peut écrire :

1[er] principe : $\Delta U = W + Q_1 + Q_2 = 0 \quad \text{(cycle)}$

2[nd] principe : inégalité de Clausius $\dfrac{Q_1}{T_1} + \dfrac{Q_2}{T_2} \leq 0$

Pour un moteur réversible, $\dfrac{Q_1}{T_1} + \dfrac{Q_2}{T_2} = 0$

(Notion de rendement); $\eta = \dfrac{W_{fourni}}{Q_{prélevée}} = \dfrac{-W}{Q_1} = \dfrac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \dfrac{Q_2}{Q_1}$

$$\eta_{rév} = \frac{-W}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.1 Principe de fonctionnement

Si le cycle est irréversible :

$$\eta = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}, \text{ mais } \frac{Q_1}{T_1} < -\frac{Q_2}{T_2} \Leftrightarrow \frac{T_2}{T_1} < -\frac{Q_2}{Q_1} \quad (Q_1 > 0) \Leftrightarrow \frac{Q_2}{Q_1} < -\frac{T_2}{T_1}$$

$$\text{Donc } \eta < 1 - \frac{T_2}{T_1} = \eta_{\text{rév}} < 1$$

Le rendement de cette machine (T.D) est toujours inférieur à l'unité, puisque la quantité de chaleur prélevée de la source chaude n'est jamais transformée intègralement en travail (énoncé de Kelvin).

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.2. Cycle de Carnot:

C’est un cycle de rendement maximal et le plus efficace. L'efficacité des autres cycles et des machines réelles est toujours comparée à celle du cycle de Carnot par le biais du rendement. Le cycle de Carnot est un cycle thermodynamique théorique pour un moteur fonctionnant entre deux sources de chaleur, constitué de quatre processus réversibles (fig. 5):

- $1 \rightarrow 2$: Détente isotherme (avec apport de chaleur).
- $2 \rightarrow 3$: Détente adiabatique.
- $3 \rightarrow 4$: compression isotherme (avec refroidissement).
- $4 \rightarrow 1$: Compression adiabatique.

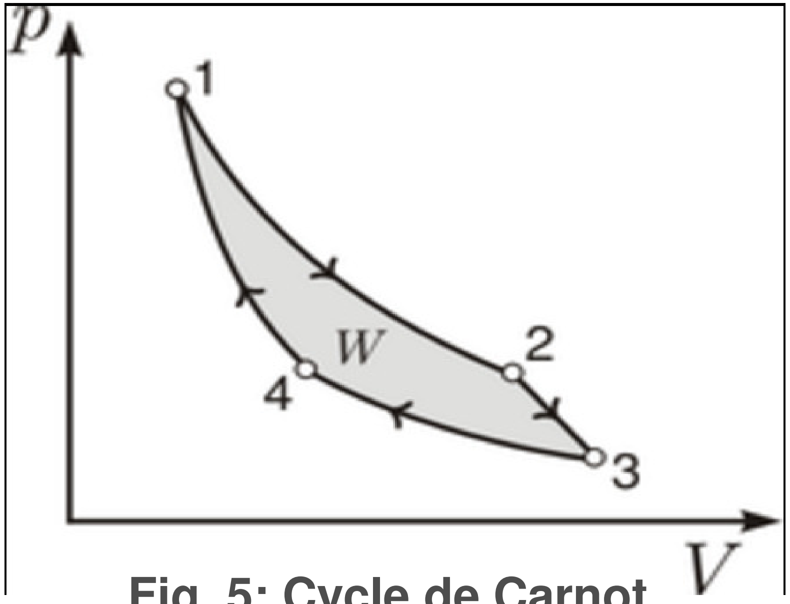


Fig. 5: Cycle de Carnot

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.2. Cycle de Carnot:

Le rendement du cycle de Carnot pour une machine thermodynamique est :

$$\eta = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

Avec :

Q_1 est la quantité de chaleur prélevée de la source chaude de température T_c; donc $Q_1 = Q_c$

Q_2 est la quantité de chaleur perdue à la source froide de température T_f; donc $Q_2 = Q_f$

Donc :

$$\eta = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.2. Cycle de Carnot:

Théorème de Carnot

Le théorème de Carnot stipule que: "aucune machine ditherme ne peut être plus efficace qu'une machine de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources"

Le théorème de Carnot nous fournit ainsi un rendement (ou une efficacité) théorique maximale (et donc impossible à dépasser)

Autrement dit, pour un moteur fonctionnant entre deux sources données:

$$\eta < \eta_{Carnot} = \eta_{max}$$

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.2. Cycle de Carnot:

Le cycle de Carnot peut être représenté plus facilement sur un diagramme entropique **(T, S) .** Les isothermes étant des droites horizontales, et les isentropiques (adiabates) des droites verticales comme sur la figure 6.

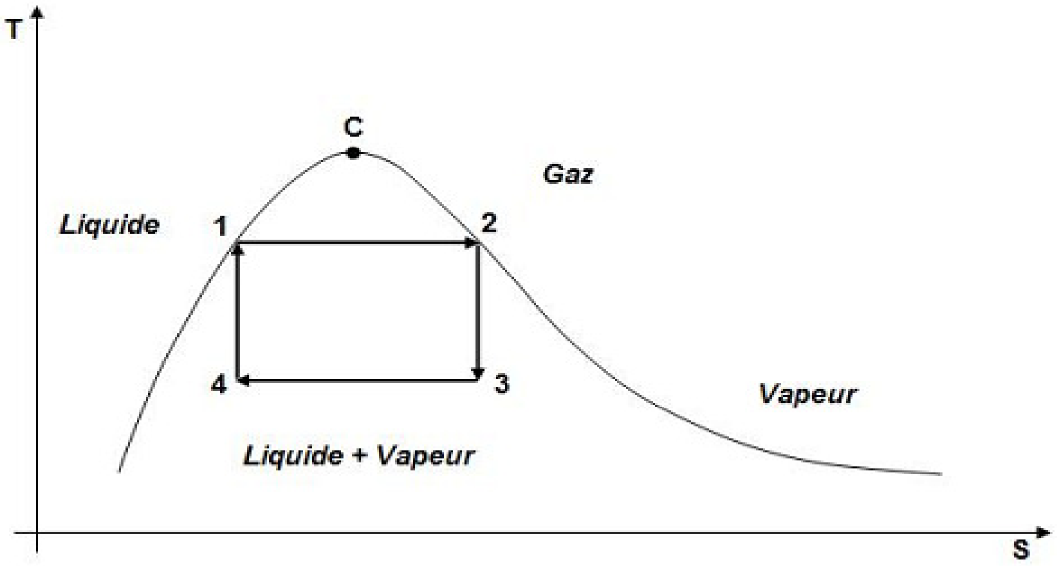


Figure. 6 Représentation du cycle de Carnot sur un diagramme (T, S)

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.2. Cycle de Carnot:

D'après le diagramme entropique de la figure 6 L'aire du cycle sur le diagramme entropique est égale à la chaleur captée Q_1 de la source chaude. En effet :

$$Q_1 = T_1(S_2 - S_1)$$

La chaleur cédée à la source froide : $Q_2 = T_2(S_4 - S_3)$

On déduit : $Q_1 + Q_2 = (T_1 - T_2)(S_2 - S_1)$

Or, $Q_1 + Q_2 = W_{net}$ qui n'est rien d'autre que la surface du cycle **1-2-3-4** décrit par le fluide moteur.

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.3. Cycles de Rankine:

Dans le cycle de Carnot, c'est un fluide diphasique qui circule dans la pompe, ce qui pose un certain nombre de problèmes techniques. La puissance consommée pour un débit de fluide donné est élevée, ce qui cause la baisse du rendement effectif de la pompe, et ses parties mécaniques subissent une érosion prématurée.

Le cycle de Rankine (figure 7) permet de remédier à cela (amélioration du cycle de Carnot) : le condenseur est dimensionné de façon à condenser la totalité du fluide, et c'est un liquide exempt de vapeur qui se présente à l'entrée de la pompe. En contrepartie, il faut ajouter une transformation isobare **1-1'** dans la première partie de la chaudière, pour amener le liquide à la saturation, avant de commencer à produire de la vapeur.

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.3. Cycles de Rankine:

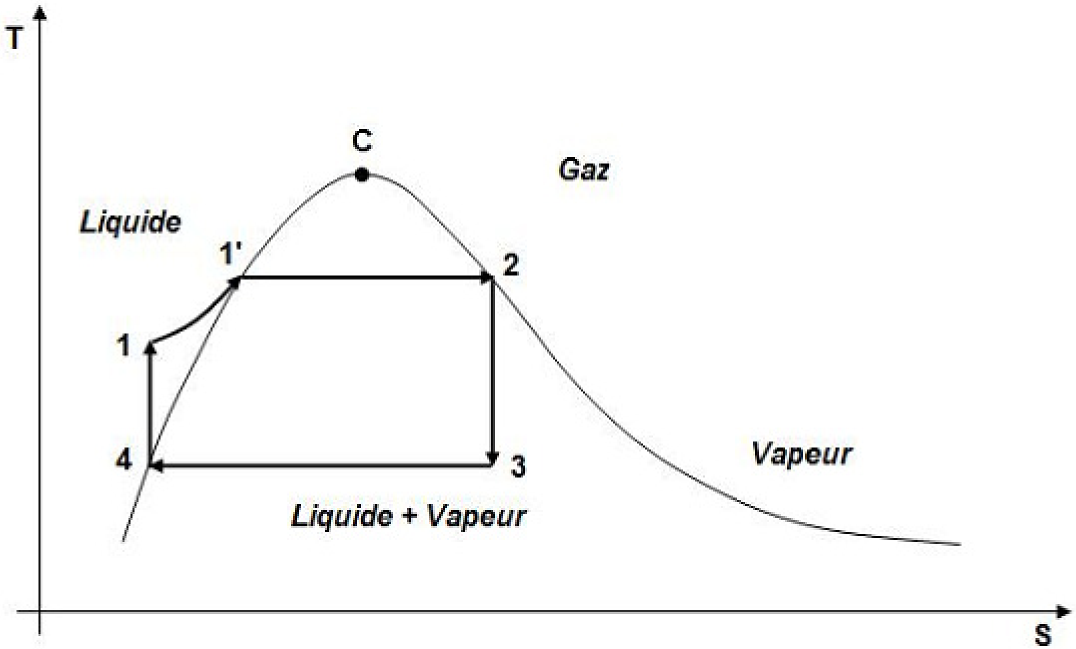


Figure 7: Le cycle de Rankine sur diagramme (T, S)

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.4. Cycles de Hirn (ou cycle à surchauffe):

Dans le même ordre d'idée, le cycle de Hirn (figur 8) permet d'éviter la présence d'un fluide diphasique dans la turbine en dimensionnant la chaudière de façon à surchauffer la vapeur dans la transformation isobare **2'-2**. De cette façon, le fluide ne revient dans la zone diphasique qu'à la sortie de la turbine.

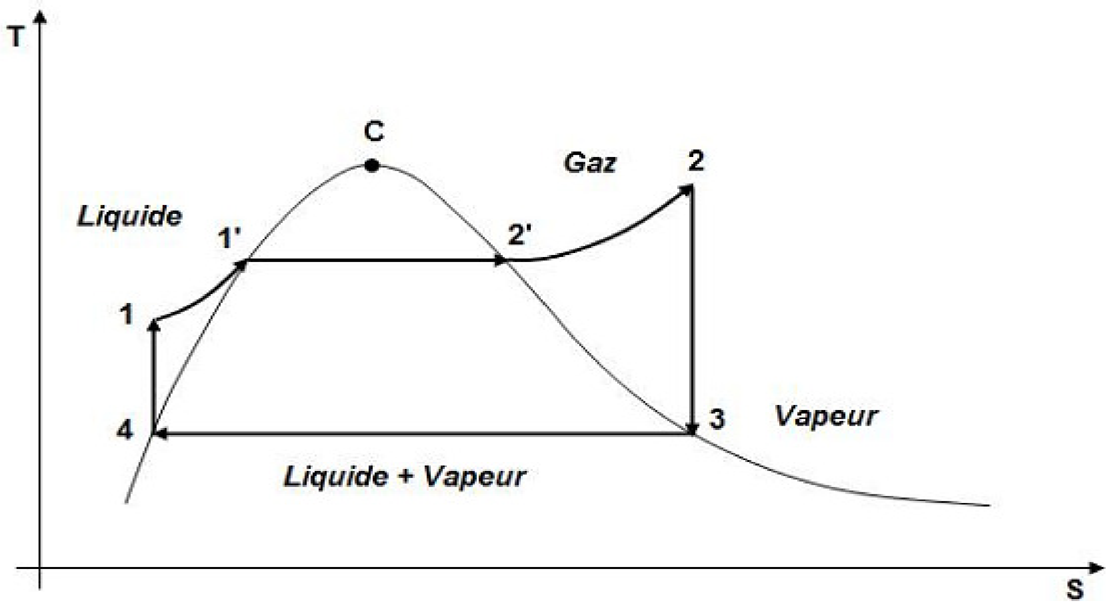


Figure 8: e cycle de Hirn sur diagramme (T, S)

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.5. Cycle de Beau de Rochas ou d'Otto (Moteur à Essence):

L'évolution des pressions dans la chambre de combustion en fonction du volume du cycle « Beau de Rochas » se représente dans un diagramme (p, V), voir (figure 9 .), comme suit :

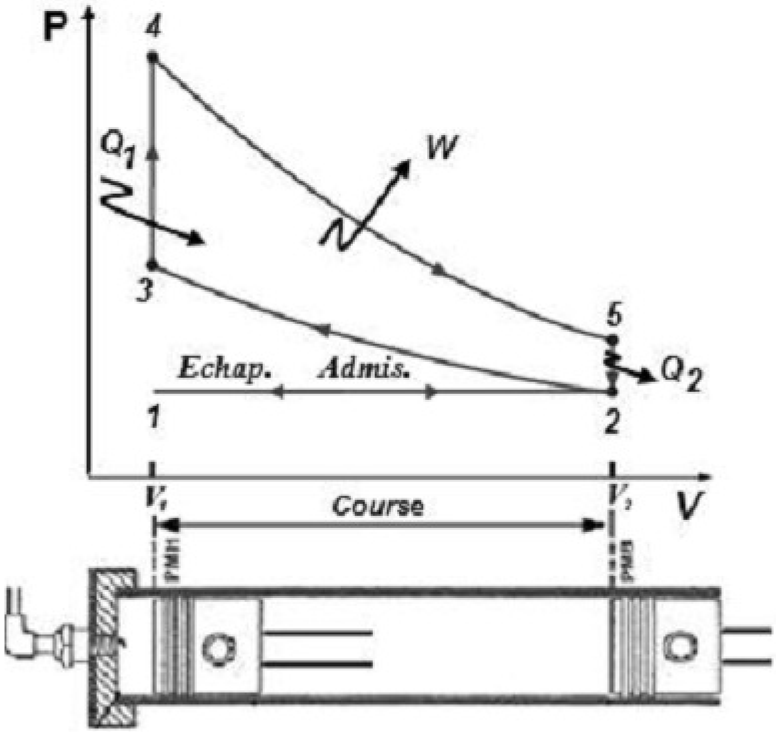


Figure 9: Cycle de Beau de Rochas

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.5. Cycle de Beau de Rochas ou d'Otto (Moteur à Essence):

1-2 : Aspiration du mélange (m_a+m_c) à la pression atmosphérique dans le cylindre.

2-3 : Compression **adiabatique 2-3** jusqu'au volume V_1 correspond au **PMB**, ou la pression est p_1.

$$pV^{\gamma} = Cte \qquad p_2V_2^{\gamma} = p_3V_3^{\gamma} \qquad \frac{p_3}{p_2} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma}$$

On pose : $\varepsilon = \dfrac{V_1}{V_2}$, (rapport de compression volumétrique).

Il vient donc : $\dfrac{p_3}{p_2} = \varepsilon^{\gamma}$

Cette équation peut être réécrite sous la forme : $\dfrac{T_3}{T_2} = \varepsilon^{\gamma-1}$

3-4 : Combustion instantanée du mélange **à volume constant** associée à de fortes augmentations de température à T_2 et de la pression à p_2. Il y a apport de chaleur :

$$Q_1 = (m_a + m_c)c_v(T_4 - T_3)$$

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.5. Cycle de Beau de Rochas ou d'Otto (Moteur à Essence):

4-5 : Détente **adiabatique**du gaz brulés qui ramène le volume à V_2, avec une pression p_3. Il s'agit du temps moteur du cycle.

$$\frac{p_4}{p_5} = \varepsilon^{\gamma} \qquad \frac{T_4}{T_5} = \varepsilon^{\gamma-1}$$

5-6 : Détente **isochore** des gaz brulés dans le cylindre, ou la pression chute instantanément à la pression atmosphérique, la température chute aussi.

$$Q_2 = (m_a + m_c).c_v(T_2 - T_5)$$

6-7 : Echappement **isobare** des gaz brûlés et retour au point de départ **1**.

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.5. Cycle de Beau de Rochas ou d'Otto (Moteur à Essence):

Le rendement théorique du cycle de Beau de Rochas :

$$\eta_{th} = \frac{-W}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

Sachant que : $\frac{Q_2}{T_3} + \frac{Q_1}{T_2} = 0$ ($2^{ème}$ principe de thermodynamique)

Il vient donc: $\eta_{th} = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_3} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma - 1}}$

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.6. Cycle Diesel (Combustion par compression):

0-1 : admission du mélange,

1-2 : compression adiabatique du mélange

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} = \varepsilon^{\gamma}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = \varepsilon^{\gamma-1}$$

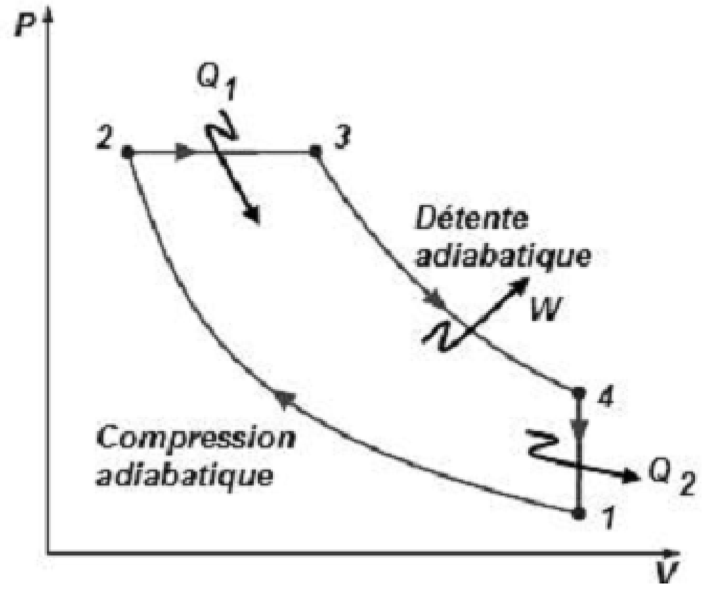


Figure 10: Cycle de Diesel

2-3 : Combustion isobare, ce qui donne un apport de chaleur :

$$Q_1 = (m_a + m_c).c_p(T_3 - T_2)$$

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.6. Cycle Diesel (Combustion par compression):

3-4 : Détente adiabatique

$$\frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{\gamma} = \varepsilon^{\gamma}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{\gamma-1} = \varepsilon^{\gamma-1}$$

4-1 : Détente **isochore** des gaz brulés dans le cylindre, ou la pression chute instantanément à la pression atmosphérique, la température chute aussi. $Q_1 = (m_a + m_c).c_v(T_1 - T_4)$

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.6. Cycle Diesel (Combustion par compression):

1-0 : Echappement **isobare** des gaz brûlés et retour au point de départ **0**.

Le rendement théorique du cycle Diesel :

$$\eta_{th_{Diesel}} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

En réécrivant, la relation du rendement en fonction du taux de compression ε et le

rapport $\delta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon'}$, avec, $\varepsilon' = \frac{V_4}{V_3}$

On obtient finalement: $$\eta_{th_{Diesel}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \left[\frac{\delta^{\gamma} - 1}{\gamma(\delta - 1)} \right]$$

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.7. Cycle mixte (Cycle de Sabathé):

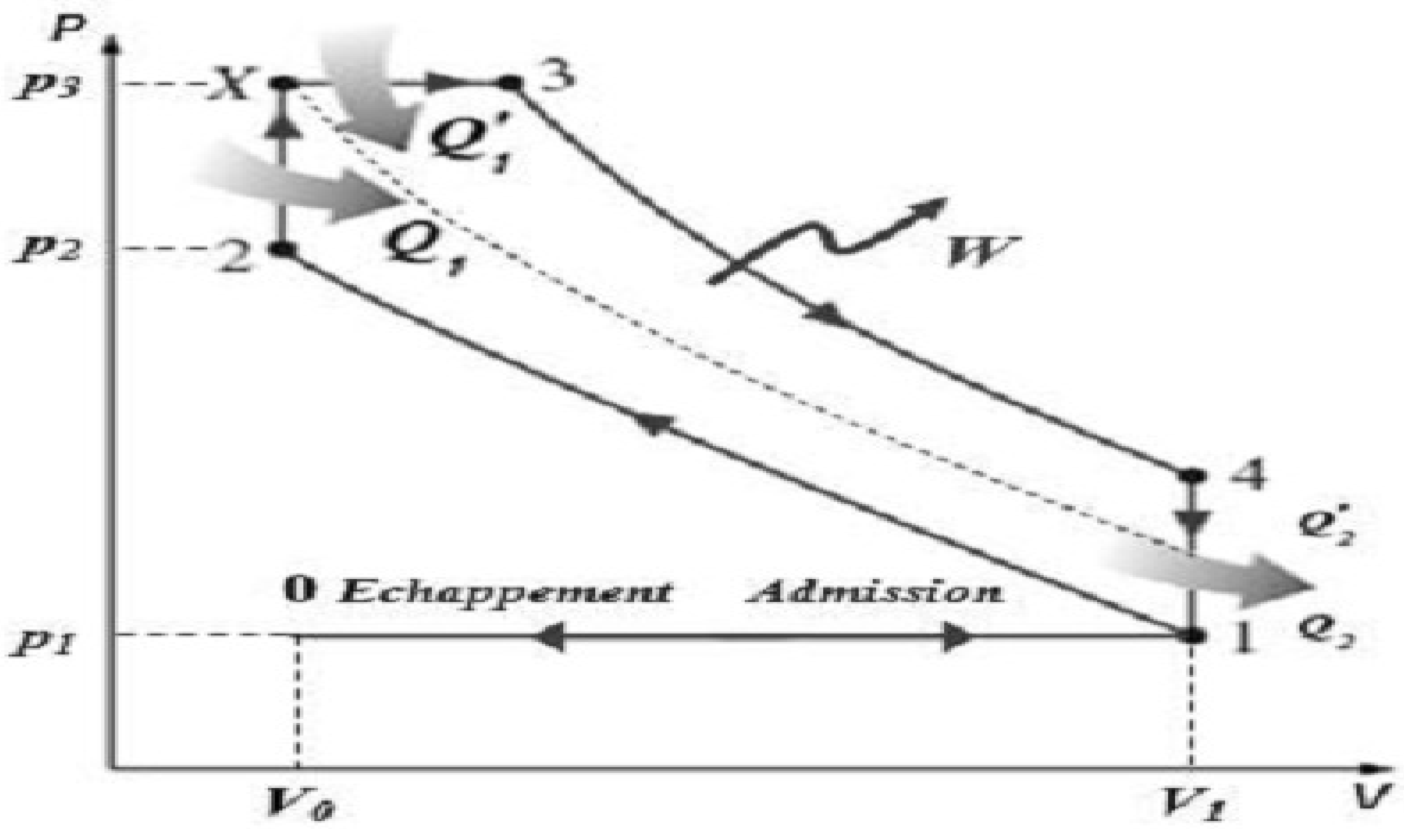


Figure 11: Cycle de Sabathé (cycle mixte)

3.1 Les machines dithermes motrices (thermo-dynamique)

3.1.7. Cycle mixte (Cycle de Sabathé):

Comme le montre le diagramme 11, le cycle mixte c'est la somme des deux cycles précédents (Otto et Diesel). Le rendement du cycle est donné par :

$$\eta_{th_{Mixte}} = \frac{Q_1 + Q_1' + Q_2 + Q_2'}{Q_1 + Q_1'}$$

$$\eta_{th_{Mixte}} = \frac{Q_1\left(1 + \frac{Q_2}{Q_1}\right) + Q_1'\left(1 + \frac{Q_2'}{Q_1'}\right)}{Q_1 + Q_1'}$$

$$\eta_{th_{Mixte}} = \frac{Q_1.\eta_{th} + Q_1'.\eta_{th\,Diesel}}{Q_1 + Q_1'}$$

3.1.8. Exercice d'application:

On considère une mole de gaz carbonique à la température $T_1 = 150\,°C$ dans un volume $V_1 = 1$ litre, et sous une pression p_1 (état A). Cette mole subit une détente adiabatique réversible jusqu'à un état B où son volume vaut $V_2 = 10.V_1$, et sa température est T_2. Le gaz subit ensuite une compression isotherme réversible qui l'amène à la pression initiale p_1 (état C). Le gaz est ensuite réchauffé jusqu'à la température T_1 à pression constante.

1°/ Tracer le cycle suivi par le gaz dans un diagramme de Clapeyron (p, V). S'agit-il d'un cycle moteur ?

2°/ Calculer la pression initiale p_1 et la température T_2 de la source froide.

3°/ Calculer les quantités de chaleur reçues par le gaz au cours des trois transformations AB, BC et CA.

3.1.8. Exercice d'application:

4°/ Établir le bilan entropique. Commenter le résultat.

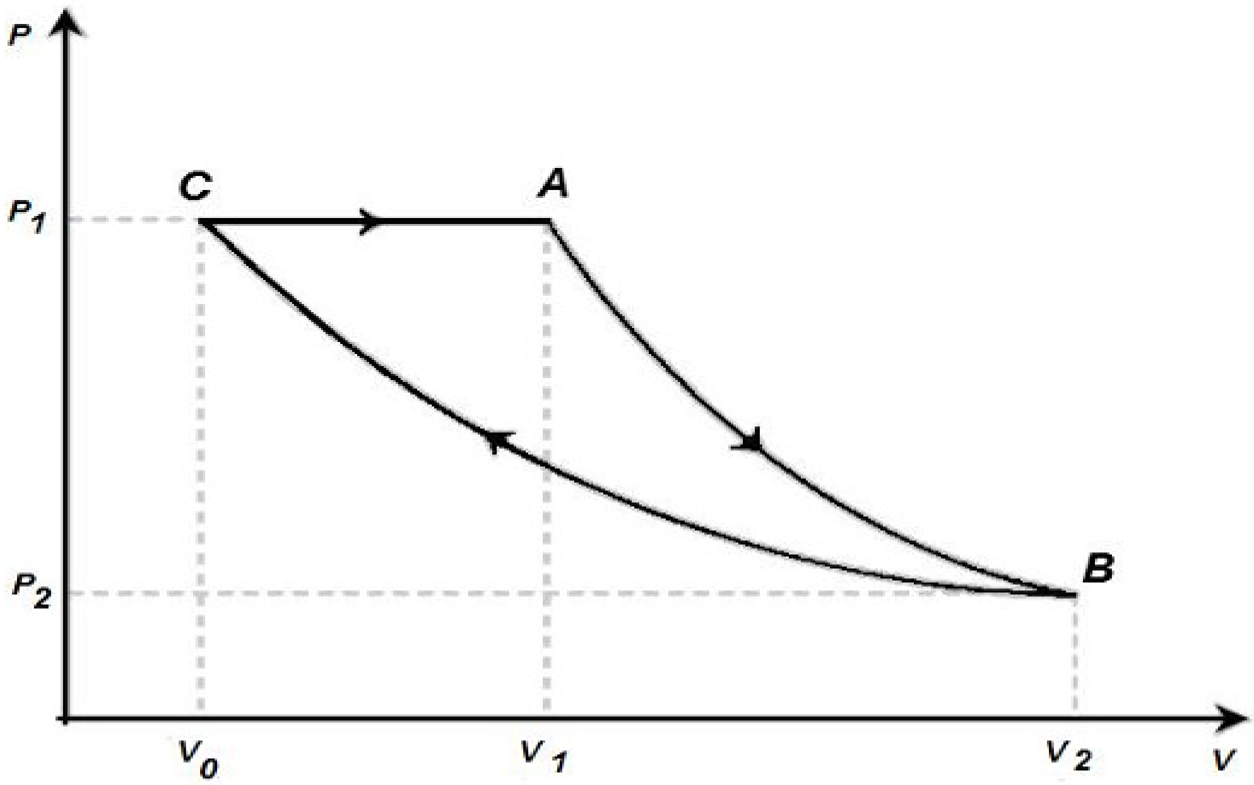
5°/ Calculer le travail fourni au gaz au cours du cycle.

6°/ Calculer l'efficacité de cette machine, et évaluer son rendement en comparant cette efficacité à celle du cycle de Carnot fonctionnant entre les mêmes températures T_1 et T_2.

On donne : - la constante des gaz parfaits est $R = 8{,}31$ J.mole/K.

- le gaz carbonique est assimilé à un gaz parfait pour lequel $\gamma = 1{,}33$.

Solution:



Cycle du gaz en diagramme (p, V).

Solution:

1°/ Le cycle thermodynamique est tracé dans un diagramme (p, V), voir la figure ci-dessus (sens horlogique). Le calcul du travail du cycle par l''intégrale $-\int p.dV$ est donc négative.

Le système fournit un travail et le cycle est moteur.

2°/ La pression p_1 se calcule à l'aide de la loi des gaz parfaits : $p_1 = \frac{n.R.T_1}{V_1} = 3{,}52.10^6$ Pa., soit $p_1 = 35{,}2$ bars.

La transformation entre les états A et B est une détente adiabatique, au cours de laquelle la quantité $T.V^{\gamma-1}$ est constante, donc $T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_2^{\gamma-1}$.

On en déduit :

$$T_2 = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

$$T_2 = 423(0{,}1)^{\frac{1}{3}} = 196 \text{ K.}$$

Solution:

3°/ La transformation entre A et B est une détente adiabatique, donc $Q_{AB} = 0$.

La transformation entre B et C est une compression isotherme que l'on peut considérer quasi-statique. Donc, l'énergie interne du gaz est conservée et la pression extérieure agissante est à tout instant celle du gaz :

De manière infinitésimale, on a :

$$\delta Q = p dV \text{ , et } Q_{BC} = \int \delta Q = nRT_2 \ln \frac{V_0}{V_2}$$

Le rapport des volumes est pour l'instant indéterminé. Mais puisque la compression est isotherme, on écrit:

$$p_2 . V_2 = p_1 . V_0$$

D'où :

$$\frac{V_0}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}.$$

Par ailleurs, $p_1 . V_1^{\gamma} = p_2 . V_2^{\gamma}$

Donc : $\dfrac{p_2}{p_1} = \left(\dfrac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma}$

Solution:

Finalement :

$$Q_{BC} = \gamma.n.R.T_2 \ln\frac{V_1}{V_2}$$

$$Q_{BC} = \frac{4}{3}.8,31.196.\ln(0,1) = -5001 \text{ Joules}.$$

De C à A, le gaz est réchauffé à pression constante et la chaleur fournie au gaz vaut

$$Q_{CA} = n.c_P(T_1 - T_2)$$

Avec : $\gamma = \frac{c_P}{c_V}$ et $R = c_P - c_V$,

Ainsi, $Q_{CA} = 4.8,31.(423-196) = 7546 \text{ Joules}.$

Solution:

4°/ La transformation entre A et B est adiabatique et réversible donc isentropique :

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

Pendant la compression isotherme BC :

$$dU = dQ + dW = T.dS - p.dV = 0$$ Donc, après intégration,

Donc $dS = n.R\dfrac{dV}{V}$

Après intégration, on obtient : $S_{BC} = n.R.\ln\left(\dfrac{V_0}{V_2}\right) = \gamma.n.R.\ln\dfrac{V_1}{V_2}$

$$S_{BC} = \frac{4}{3}.8{,}31.\ln(0{,}1) = -25{,}5\ \text{J/K}.$$

Au cours du réchauffement isobare, on a : $dH = n.c_P.dT = T.dS$

Donc, après intégration, $S_{CA} = n.c_P.\ln\left(\dfrac{T_1}{T_2}\right) = n\dfrac{\gamma.R}{\gamma-1}\ln\left(\dfrac{T_1}{T_2}\right)$

Solution:

$$S_{CA} = 4.8{,}31.\ln\left(\frac{423}{196}\right) = 25{,}5\ \text{J/K}.$$

La variation totale d'entropie sur le cycle vaut :

$$\Delta S_{Cycle} = \Delta S_{AB} + \Delta S_{BC} + \Delta S_{CA}$$

$$\Delta S_{Cycle} = 0 - 25{,}5 + 25{,}5 = 0$$

Elle est nulle car l'entropie est une fonction d'état.

5°/ Sur un cycle, la variation d'énergie interne du gaz est nulle :

$$W + \sum_{i} Q = 0$$

$$W = -Q_{BC} - Q_{CA} = 5001 - 7546 = -2545\ \text{J}.$$ (travail négatif=travail fournit)

Solution:

Le cycle produit donc du travail. L'efficacité de cette machine est quantifiée par le rapport entre travail généré et énergie dépensée sous forme de chaleur fournie au gaz :

$$\eta = \frac{|W|}{Q_{CA}}$$

$$\eta = \frac{2545}{7546} = 33{,}7\ \%$$

Le rendement r de cette machine s'évalue en comparant son efficacité à l'efficacité maximale du cycle de Carnot :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{196}{423} = 53{,}7\ \%$$

Donc : $$r = \frac{\eta}{\eta_C} = \frac{33{,}7}{53{,}7} = 62{,}8\ \%.$$

3.2. Les machines dithermes réceptrices (machines frigorifiques)

Les **machines dithermes** transformant du travail mécanique reçu en une chaleur (**W** $\rightarrow$ **Q**), elles sont par contre des machines de transfert de chaleur, c'est le cas des machines frigorifiques ou les pompes à chaleur.

3.2.1 cas d'une machine frigorifique (le réfrigérateur)

Les machines frigorifiques servent à la création de froid à l'aide d'un réfrigérateur ou d'un climatiseur.

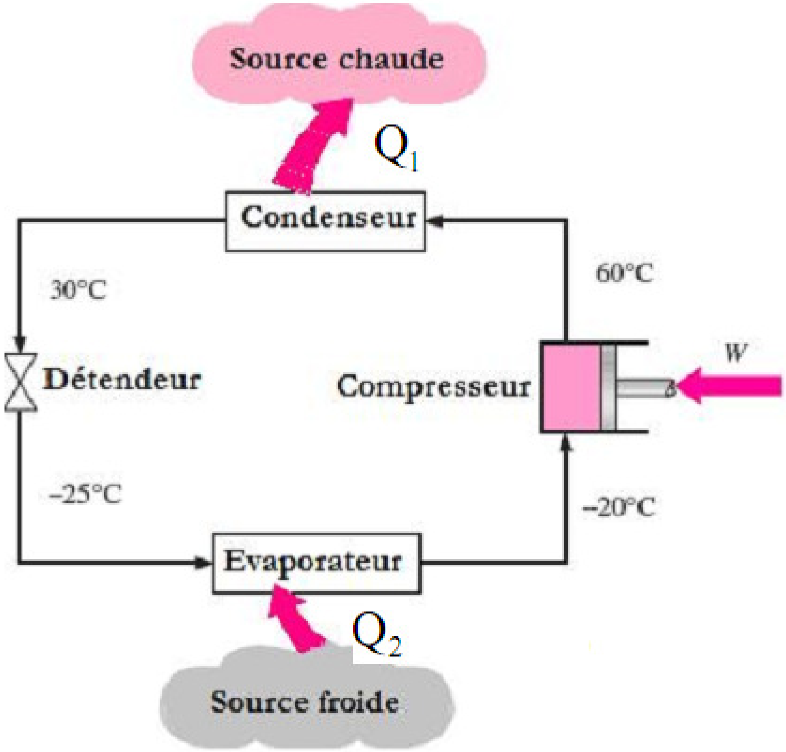


Fig.12. Machines dynamo-thermiques (Réfrigérateur)

3.2. Les machines dithermes réceptrices (machines frigorifiques)

3.2.1 cas d'une machine frigorifique (le réfrigérateur)

D'après le **1er principe**, on a:

$$Q_1 + Q_2 + W = \Delta U = 0$$

D'après le **2ème principe**

Pour un cycle réversible, on a :

$$\Delta S = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0 \quad \text{(Inégalité de Clausius)}$$

3.2. Les machines dithermes réceptrices (machines frigorifiques)

3.2.1 cas d'une machine frigorifique (le réfrigérateur)

Le coefficient de performance (**COP**) d'une machine dynamothermique, η est donné par:

$$\text{Efficacité} \quad \eta = \frac{\text{Froid produit}}{\text{Travail fourni}} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{-Q_1 - Q_2} = \frac{1}{-\dfrac{Q_1}{Q_2} - 1}$$

Pour un fonctionnement réversible :

$$\eta_{\text{rév}} = \frac{Q_2}{-Q_1 - Q_2} = \frac{1}{-\dfrac{Q_1}{Q_2} - 1} = \frac{1}{\dfrac{T_1}{T_2} - 1} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \left(= \frac{T_f}{\Delta T} \right) > 1$$

$$\eta < \eta_{\text{Carnot}} = \eta_{\max}$$

3.2.2 Cas d'une pompe à chaleur

Elle est basée sur le même principe qu'un réfrigérateur mais avec un objectif différent, c'est pomper de la chaleur d'une source froide et la restituer à une source chaude (c'est pour chauffer).

D'après le **1er principe**, on a:

$$Q_1 + Q_2 + W = \Delta U = 0$$

D'après le **2ème principe**:

Pour un cycle réversible, on a :

$$\Delta S = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0 \qquad \text{(Inégalité de Clausius)}$$

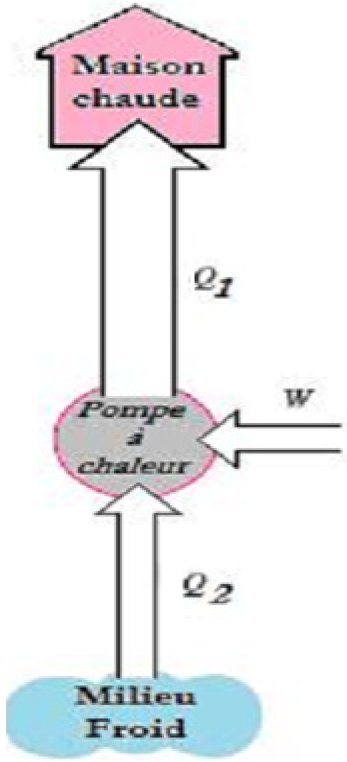


Fig.13. Machines dynamo-thermiques (Pompe à chaleur)

3.2.2 Cas d'une pompe à chaleur

Le coefficient de performance (COP) d'une machine dynamothermique, η est donné par:

Efficacité $$\eta = \frac{-Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} = \frac{1}{1 + \dfrac{Q_2}{Q_1}}$$

Pour un fonctionnement réversible :

$$\eta_{\text{rév}} = \frac{-Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} = \frac{1}{1 + \dfrac{Q_2}{Q_1}} = \frac{1}{1 - \dfrac{T_2}{T_1}} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \left(= \frac{T_c}{\Delta T} \right) > 1$$

$$\eta < \eta_{\text{Carnot}} = \eta_{\max}$$

3.2.3 Exercices d'applications

Un réfrigérateur fonctionne à une température intérieure T_2 = 4°C dans une pièce à la température T_1 = 19°C. (Pour toute l'étude on supposera que l'on a un fonctionnement réversible). On donne le schéma de principe du fonctionnement d'un réfrigérateur (machine frigorifique).

Placer sur ce schéma :

1°/ Le sens de parcours du fluide.

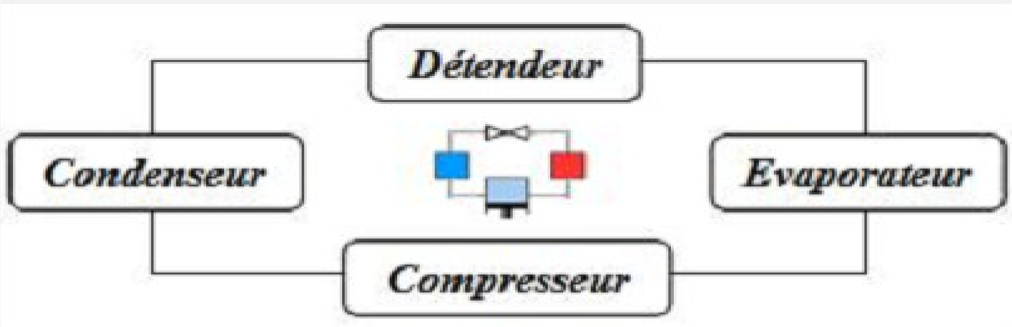
2°/ Les chaleurs et travaux échangés par le fluide en précisant leur sens

3°/ La zone haute pression et la zone basse pression

4°/ Exprimer son efficacité frigorifique η en fonction de Q_1 et Q_2 ainsi que T_1 et T_2.

5°/ Calculer la valeur numérique de η.

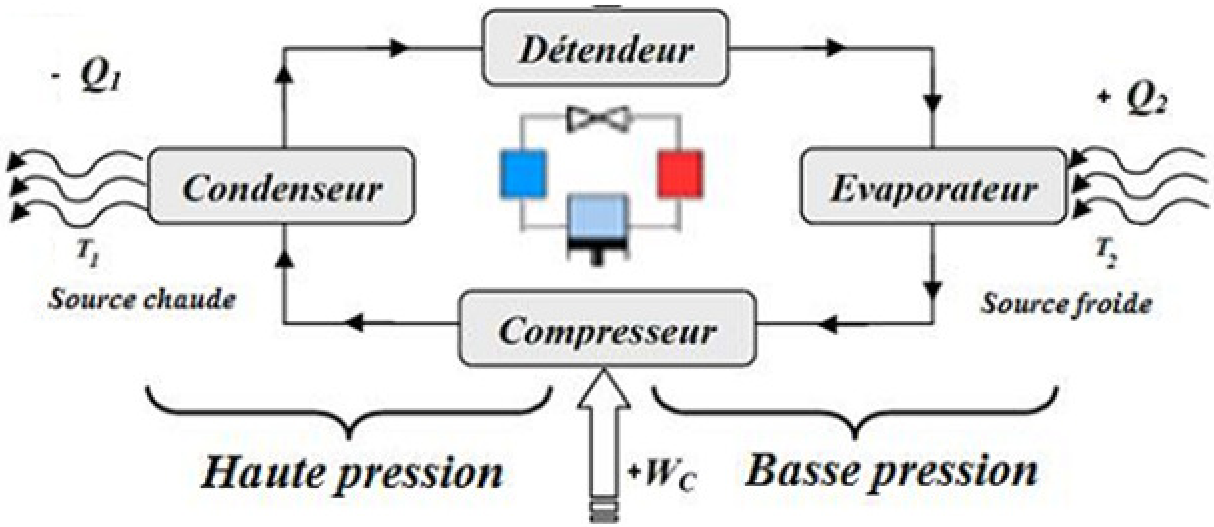
6°/ Peut-on, en été, refroidir une pièce en ouvrant un réfrigérateur ? Justifier votre réponse.



Solution:

1°/ Le sens du fluide frigorigène est représenté sur le schéma ci-dessous.

2°/ Les chaleurs et travaux échangés par le fluide avec les différents éléments avec leur signes sont précisés sur le schéma ci-dessous.



Solution:

3°/ Les zones : haute et basse pressions sont indiquées sur la figure ci-dessus.

4°/ Efficacité du réfrigérateur :

$$\eta = \frac{\text{Froid produit}}{\text{Travail consommé}} = \left|\frac{Q_2}{W_C}\right| = \left|\frac{Q_2}{-Q_1 - Q_2}\right| = \left|\frac{T_2}{T_2 - T_1}\right|$$

5°/ Application numérique :

$$\eta = \left|\frac{277}{277 - 292}\right| = \frac{277}{15} = 18{,}46$$

6°/ On ne peut pas utiliser un réfrigérateur à porte-ouverte pour refroidir une pièce en été. Cette astuce n'aboutit pas, car il y a annulation de la source froide et par conséquent rupture du principe de fonctionnement d'une machine frigorifique ($2^{ème}$ principe).

3.2.3 Exercices d'applications

Une pompe à chaleur réversible échange de la chaleur avec 2 sources, l'eau d'un lac (T_f=280K) d'un coté, et une réserve d'eau de masse M=1000 kg isolée thermiquement d'un autre cotre; la température initiale de cette dernière est T_0=293 K. La chaleur massique de l'eau c_{eau}=4190 J/kg.K. Lorsque la masse M de la réserve d'eau atteint la température de T=333 K, calculer :

1°/ Les quantités de chaleur échangées : pompe-réserve et pompe-eau du lac.

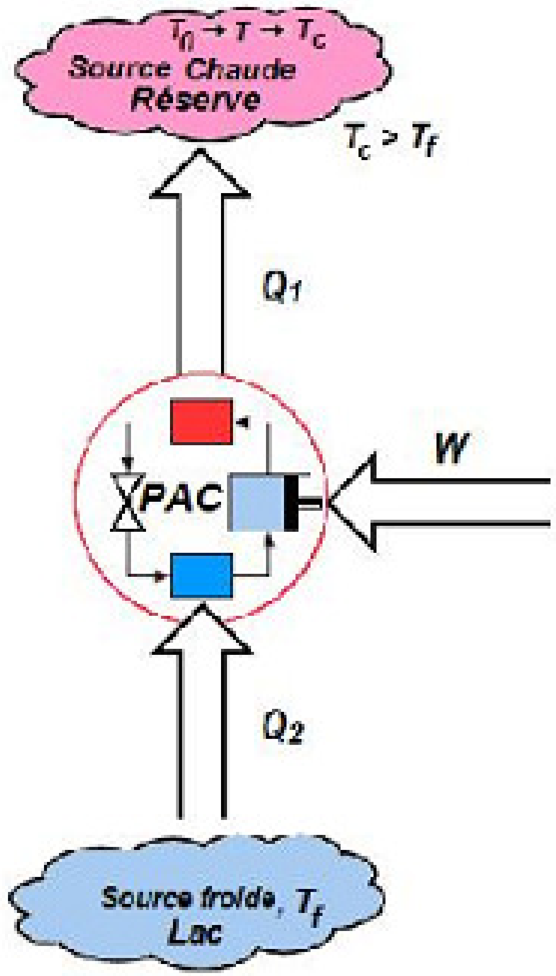
2°/ Le travail reçu par la pompe.

3°/ Le coefficient moyen de performance de la pompe à chaleur.

Solution:

1°/ Quantités de chaleur échangées :

- Représentation du problème :



Lors d'un cycle et un fonctionnement réversible:

Le premier principe permet d'écrire:

$$Q_1 + Q_2 + W = 0$$

Le second principe permet d'écrire :

$$\frac{Q_1}{T} + \frac{Q_2}{T_f} = 0$$

Avec

$$Q_1 = -m.c.dT$$

Ce que perd la pompe comme chaleur est de signe négatif.

Solution:

- Quantité de chaleur cédée par l'eau du lac :

$$\frac{Q_2}{T_f} = \frac{m.c.dT}{T}$$

$$Q_2 = T_f\,M.c.\ln\frac{T_C}{T_0}$$

$$Q_2 = 280.4190.1000.\ln\frac{333}{293} = 150\text{ MJ.}$$

- Quantité de chaleur reçue par l'eau de la réserve :

$$Q_1 = -M.c.(T_C - T_0)$$

$$Q_1 = -1000.4190.(333 - 293) = -167{,}6\text{ MJ}$$

Solution:

2°/ Travail reçu par la pompe à chaleur:

$$W + Q_1 + Q_2 = 0$$

$$W = 167{,}6 - 150 = 17{,}6 \text{ MJ}.$$

3°/ Coefficient moyen de performance de la pompe :

Le coefficient de performance est la chaleur absorbée par la source chaude sur le travail fourni :

$$\eta = \frac{|Q_1|}{W} = \frac{167{,}6}{17{,}6} = 9{,}52$$

Merci pour votre attention