

Chapitre V

Le second principe de la thermodynamique

V.1 Introduction

Jusqu'ici, nous avons traité le premier principe de la thermodynamique qui stipule que pendant tout cycle que subit un système, l'intégrale pour un contour fermé de la chaleur est égale à l'intégrale à contour fermée du travail. Cependant, ce principe n'impose aucune restriction quant à la direction de l'écoulement de la chaleur et du travail. Le second principe implique que les évolutions s'effectuent dans une direction et non pas dans l'autre direction (inverse).

le premier principe de la thermodynamique met en évidence les correspondances quantitatives valables pour les transformations de l'énergie et permet d'établir le bilan énergétique d'une transformation. Par contre il ne donne aucune indication sur la faisabilité de la transformation.

V.2 l'inégalité de Clausius ou *Postulat de CLAUSIUS (1850)*

Le transfert de la chaleur est l'un des modes les plus courants d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe entre eux une différence (écart) de températures. Le transfert de la chaleur s'effectue naturellement entre deux zones, de la plus chaude vers la moins chaude (froide), d'où le sens est parfaitement déterminé

Le second principe de la thermodynamique selon l'énoncé de Clausius sous sa forme la plus générale issu de l'expérience : « **toute transformation réelle spontanée et une transformation irréversible** », c'est-à-dire que. **La chaleur ne s'effectue pas d'elle-même du corps froid vers un corps chaud**. Néanmoins, il est possible de faire passer la chaleur d'un corps froid à un corps chaud, sous réserve d'une intervention extérieure et certaines modifications (mise en place de dispositifs).

Par exemple, on peut séparer deux gaz mélangés par **distillation cryogénique** (échange de travail), ensuite on ramène chaque gaz dans un récipient, on retrouve donc l'état initial.

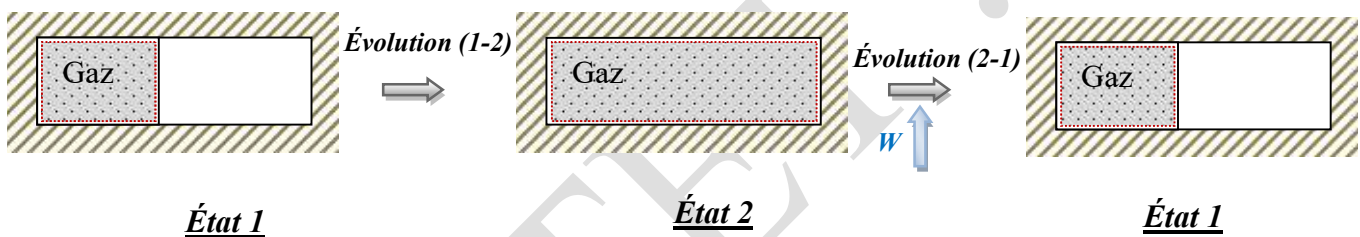
Donc, le retour à l'état initial n'a été possible que grâce à l'intervention du milieu extérieur. Un système isolé qui a subi une évolution ne peut plus revenir à son état initial.

De nombreuses méthodes peuvent être utilisées pour la séparation des mélanges gazeux, certaines à basse température. Cependant, les plus employées dans l'industrie font appel à la liquéfaction, donc aux basses températures ; c'est le cas de la distillation et de la condensation.

La distillation cryogénique est réalisée sur un gaz liquéfié. Le gaz est comprimé puis décomprimé rapidement, ce qui le refroidit et le liquéfie. En réchauffant progressivement ce gaz devenu liquide et en jouant sur les températures d'ébullition différentes, ses différents composants sont séparés.

Exemple :

Considérons un réservoir rigide isolé thermiquement subissant un changement d'état.



- Système $\equiv$ Gaz.
- L'évolution 1-2 obéit au premier principe d'un système fermé (isolé) subissant un changement d'état :

- **Évolution (1) :** $\underbrace{Q_{1-2}}_{=0} = U_2 - U_1 + \underbrace{W_{1-2}}_{=0} \Leftrightarrow U_2 = U_1$

- **Évolution (2) :** $\underbrace{Q_{2-1}}_{=0} = U_1 - U_2 + \underbrace{W_{2-1}}_{=0} \Leftrightarrow U_2 = U_1$

Dans le cas où $W=0 \Rightarrow$ L'évolution 1-2 **ne peut avoir lieu**

Avec :

$$W = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 P dV = 0 \quad (\text{Transformation quasi-statique})$$

Bien que le premier principe soit vérifié pour l'évolution 1-2 celle-ci ne peut avoir lieu sans échange de travail avec le milieu extérieur (cette évolution ne peut avoir lieu que pour une transformation réversible). Donc le **premier principe est une condition nécessaire, mais pas suffisante.**

Une transformation est dite quasi-statique si tous les états intermédiaires du système thermodynamique au cours de la transformation sont des états définis, proches d'états d'équilibre. Cela implique que le déséquilibre des variables d'état, responsable de la transformation, soit infiniment petit.

L'intérêt du second principe réside dans le fait qu'il permet d'indiquer le sens des évolutions et d'établir une condition sur le sens des échanges de chaleur à travers les frontières du système, pour que les conditions soit réalisable.

V.3 Évolution réversible et évolution irréversible

On dit qu'un système a subi une évolution réversible à partir d'un état initial jusqu'à un état finale, si à partir de ce même état final il peut être ramené à son état initial par le même chemin sans qu'il y est une modification dans le milieu extérieur.

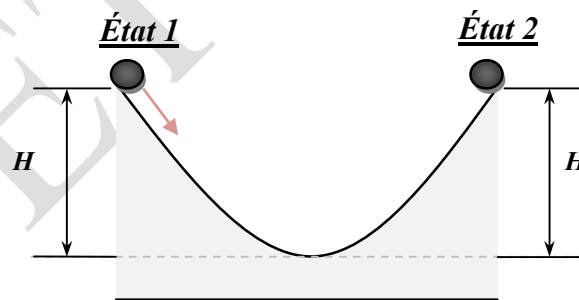
C'est une évolution qui peut être inversée sans laisser subsister (exister) un changement dans le système et le milieu extérieur.

Si le système est ramené à son initiale soit par un chemin différent soit en créant une modification dans le milieu extérieur l'évolution est dite **irréversible**.

V.4 Quelques facteurs causant les L'irréversibilité des évolutions

V.4.a frottement

Considérons le roulement d'une bille sur deux plans inclinés :



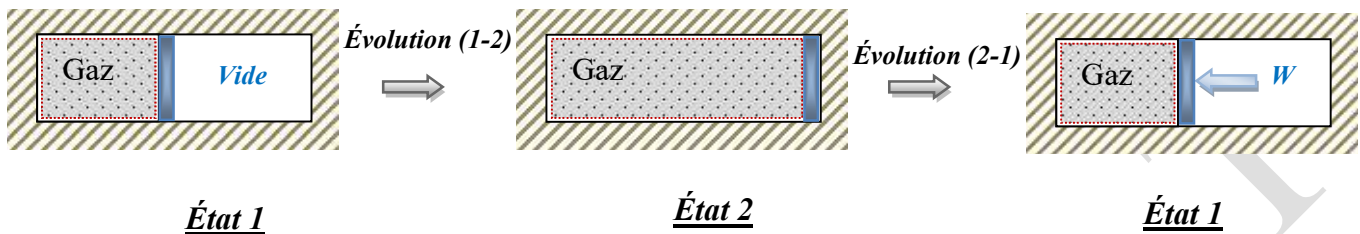
En l'absence de frottement la bille à partir de l'état 2 revient à l'état 1 (initiale), sans fournir du travail, par contre en présence de frottement pour ramener la bille à l'état initiale (au même point de départ, du travail doit être mis en jeu.

Si on effectue une modification du milieu extérieur => l'état est irréversible

V.4.b Détente libre (détente d'un gaz dans le vide)

Exemple :

Considérons un réservoir rigide isolé thermiquement subissant un changement d'état (voir figure).



L'évolution 1-2 est une évolution irréversible, car pour revenir à l'état initial du travail devra être mis en jeu.

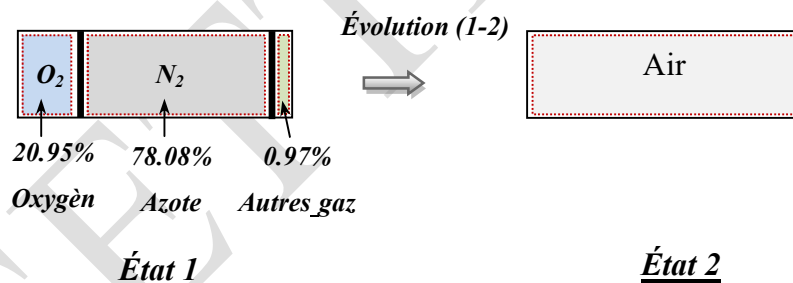
Modification du milieu extérieur implique **évolution irréversible**.

La Modification du milieu extérieur $\Rightarrow$ l'état est irréversible

V.4.c Mélange de deux ou plusieurs substances

Exemple :

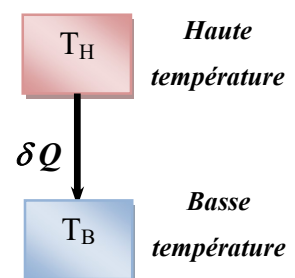
Considérons un réservoir rigide contenant : de l'oxygène, de l'azote et de l'air



L'évolution du mélange de trois gaz est une évolution irréversible, car on ne peut pas séparer l'oxygène et l'azote et l'azote des autres gaz sans la mise en jeu du travail.

V.4.d Évolution de transfert de chaleur

Par expérience, on sait que la chaleur est transmise spontanément d'un milieu à haut température vers un milieu à basse température (la chaleur ne s'effectue pas d'elle-même du corps froid vers un corps chaud). Cette évolution est irréversible, car pour transférer de la chaleur d'un milieu à basse température vers un milieu à haute température, du travail est mis en jeux (intervention extérieure et mise en place de dispositifs).



- Dans quel cas une évolution de transfert de chaleur irréversible est réversible ?

Une évolution de transfert de chaleur est **réversible** si et seulement si (ssi) :

$$\Delta T \rightarrow 0 \text{ ou bien : } (T_H - T_B) \rightarrow 0 \Rightarrow \delta W \rightarrow 0$$

- Une évolution quasi statique et une évolution réversible ou irréversible ?

Une évolution **quasi statique** et une évolution **réversible** (évolution lente), par contre une évolution **réversible n'est pas nécessairement quasi statique**.

V.5 Définition d'un réservoir de chaleur (source ou puits de chaleur)

Un **réservoir de chaleur** peut être **source** ou **puits de chaleur**, il constitue une **source de chaleur** si le **réservoir** est un milieu duquel on **extraie** de la chaleur (d'extraction de la chaleur géothermique), et un **puits de chaleur** si c'est un milieu vers lequel on **rejette** de la chaleur, **sans modifier la température** ce dernier (de ce milieu), tel que : l'océan, la mer et l'air ambiant.

V.6 Définition d'une machine thermique

On appelle **machine thermique** un appareil qui fonctionne en continu **entre deux réservoir de chaleur, décrivant un cycle** qui permet d'obtenir du travail en lui fournissant de la chaleur. Le fluide décrivant ce cycle est appelé **fluide moteur**.

Q_H : quantité de chaleur reçue par le fluide moteur

$$Q_H > 0, Q_H = |Q_H|$$

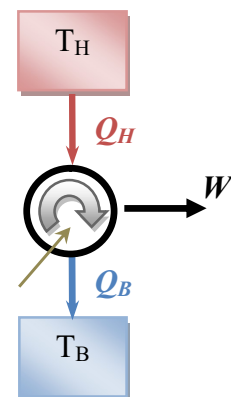
Q_B : quantité de chaleur rejetée par le fluide moteur

$$Q_B < 0, Q_B = -|Q_B|$$

W : travail net produit par la machine

$$W > 0 \Rightarrow W = |W|$$

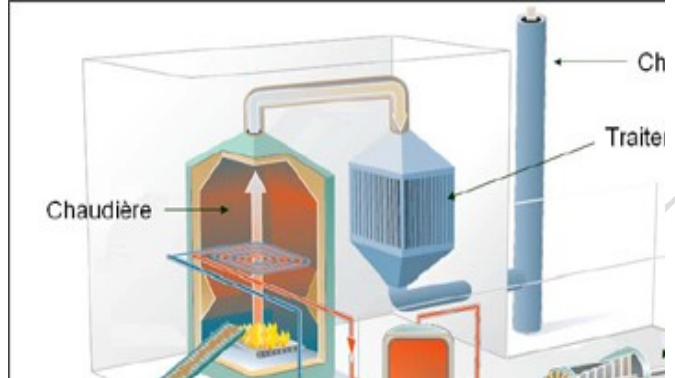
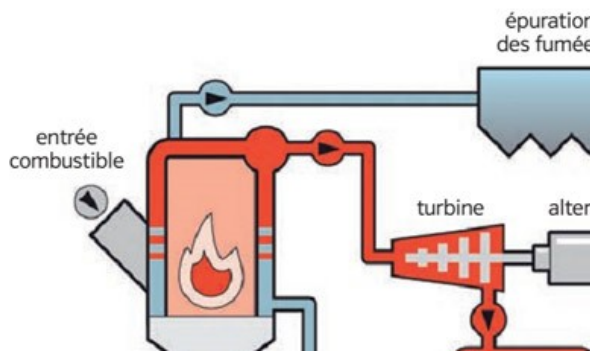
*Symbole du cycle
(ne représente pas la
rotation du moteur)*



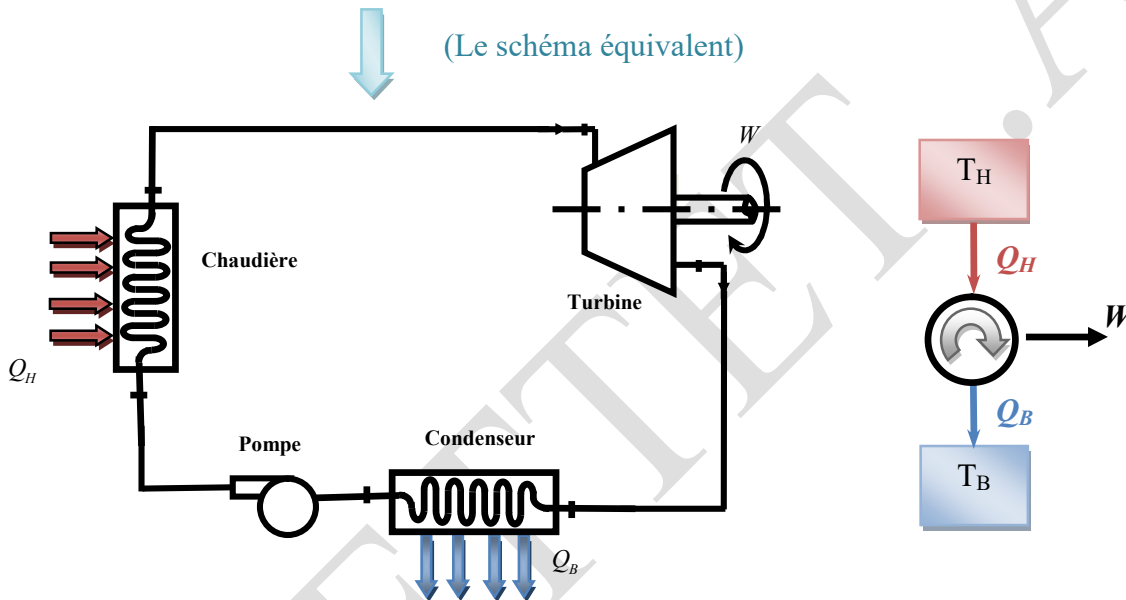
À titre d'exemple on peut citer les moteurs à combustion interne tel que : les centrale thermique, les turbine à gaz.

V.6.a Centrale thermique élémentaire

Ensemble d'unités de production d'énergie électrique qui utilisent la chaleur dégagée par la combustion d'un carburant, représentée sur la figure ci-dessous .



(Le schéma équivalent)



V.6.a.1 le rendement thermodynamique d'une machine thermique (η)

On définit le **rendement thermodynamique d'une machine thermique (η)** comme suit :

$$\eta = \frac{\text{Travail net}}{\text{Chaleur fournie}} = \frac{|W|}{|Q_H|}$$

Appliquons le 1^{er} principe pour les cycles, on a :

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \Rightarrow Q_H + Q_B = W$$

$$\Rightarrow |Q_H| - |Q_B| = |W|$$

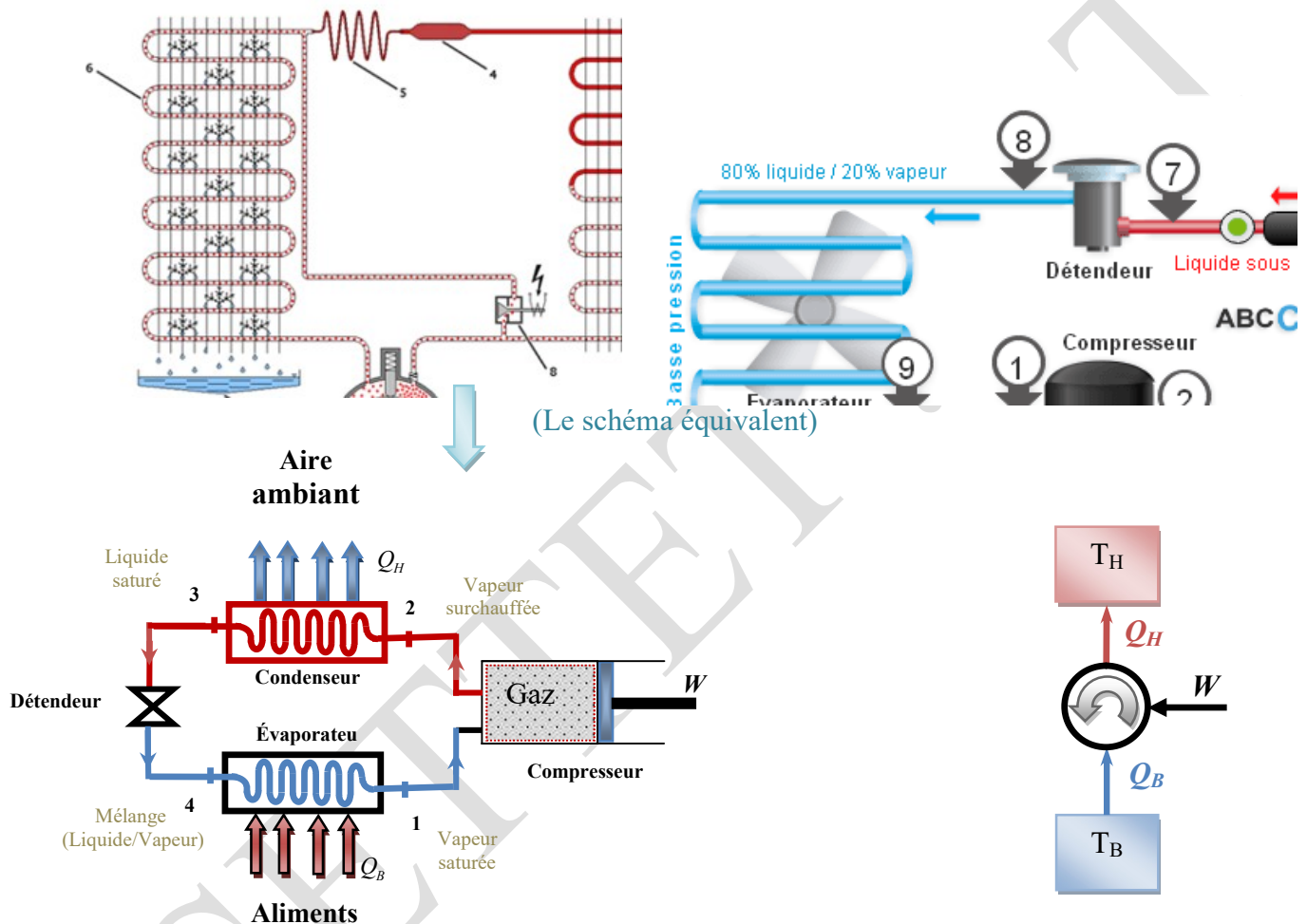
D'où :

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} = \frac{|Q_H| - |Q_B|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_H|}$$

Avec : $\eta < 1$

V.6.b Machine frigorifique et pompe à chaleur

Ce sont des appareils qui fonctionnent en continu entre deux réservoirs de chaleur décrivant un cycle qui permet de transférer de la chaleur d'un milieu ayant une température donnée vers un autre milieu ayant une température plus élevée (Pour atteindre cet objectif, ces appareils reçoivent du travail).



V.6.b.1 le coefficient de performance d'un réfrigérateur Cop, β

On définit le coefficient de performance d'un réfrigérateur Cop, β comme suit :

$$COP = \beta = \frac{\text{Chaleur extraite}}{\text{Travail fourni}} = \frac{|Q_B|}{|W|}$$

Appliquons le 1^{er} principe pour les cycles, on a :

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \Rightarrow Q_H + Q_B = W$$

$$\Rightarrow |Q_H| - |Q_B| = |W|$$

D'où :

$$\beta = \frac{|Q_B|}{|W|} = \frac{|Q_B|}{|Q_H| - |Q_B|} = \frac{1}{\frac{|Q_H|}{|Q_B|} - 1}$$

Avec : $\beta > 1$

- Si on cherche à extraire de la chaleur, on parle alors de la machine frigorifique.
- Si on cherche à rejeter une quantité de chaleur, on parle alors de pompe à chaleur.

V.6.b.1 le coefficient de performance d'une pompe à chaleur β'

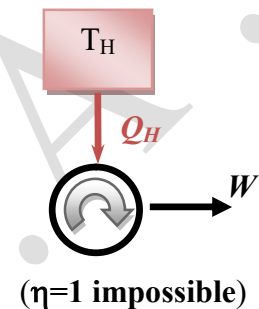
On définit le coefficient de performance d'une pompe à chaleur β' comme suit :

$$\beta' = \frac{|Q_H|}{|W|} = \frac{|Q_H|}{|Q_H| - |Q_B|} = \frac{1}{1 - \frac{|Q_B|}{|Q_H|}} \quad \text{Avec : } \beta' > 1$$

V.7 Énoncé du second principe de la thermodynamique

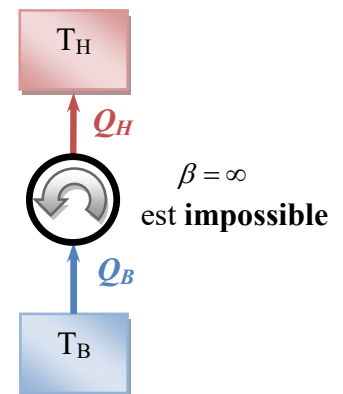
V.7.1 Énoncé de Kelvin - Plank

Il est impossible de concevoir une machine thermique qui transférerait toute la chaleur fournie en travail ($\eta=1$ impossible).



V.7.2 Énoncé de Clausius relatif au réfrigérateur

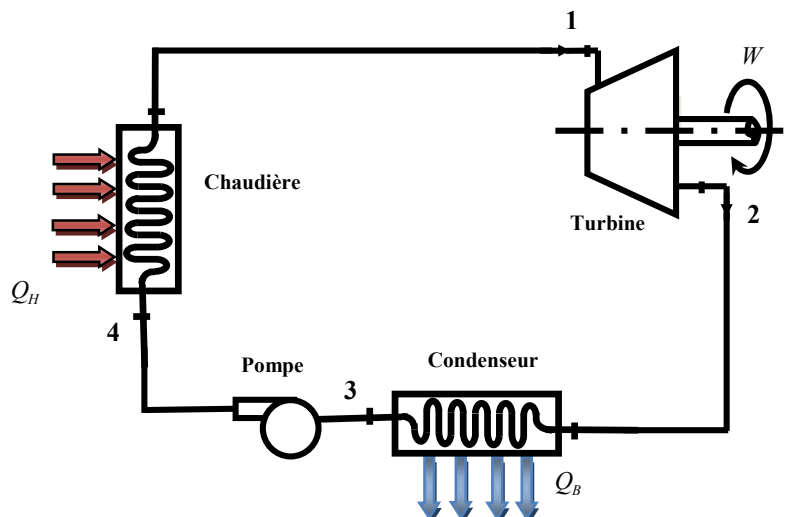
Sans dépense de travail, il est impossible de faire transférer de la chaleur d'un système ayant une température donnée vers un système ayant une température plus élevée.



V.8 Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot :

- est un cycle théorique,
- toutes les évolutions du cycle sont irréversibles,
- il peut être moteur ou réfrigérateur.



Dans quel cas le rendement de cette installation est maximale ?

- Le rendement de cette installation est maximal lorsque toutes les évolutions sont réversibles.
- L'évolution carte 1-4 est une évolution d'apport de chaleur idéale où cette évolution est réversible dont la température limite est égale à T_H .
- L'évolution carte 1-2, est une évolution de détente au cours de laquelle il y a production de travail, elle est idéale lorsqu'elle est adiabatique réversible.
- L'évolution carte 2-3, est une évolution de rejet de chaleur, elle est idéale lorsqu'elle est isotherme réversible
- L'évolution carte 3-4, est une évolution de compression, elle est idéale lorsqu'elle est adiabatique réversible

Le cycle de Carnot est constitué de quatre évolutions : deux évolutions isothermes réversibles et deux évolutions adiabatiques réversibles.

V.9 Deux propositions concernant le cycle de Carnot**V.9.1 Proposition (1)**

Pour une machine fonctionnant entre deux réservoirs de chaleur respectivement T_H et T_B , le rendement maximum (ou performance maximale) est atteint, lorsque toutes les évolutions sont réversibles. Rendement correspond au rendement du cycle de Carnot fonctionnant entre les deux réservoirs de chaleur.

V.9.2 Proposition (2)

Le rendement du cycle de Carnot ne dépend que de la température des réservoirs de chaleur T_H et T_B . Toutes les machines qui fonctionnent suivant le cycle de Carnot entre deux températures données ont le même rendement.

Pour cas le cycle de Carnot on a :

$$\frac{|Q_H|}{|Q_B|} = \frac{|T_H|}{|T_B|} \quad T_H \text{ et } T_B \text{ en Kelvin [K]}$$

Égalité entre deux pourcentages

Pour la machine thermique de Carnot on a :

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} = \frac{|Q_H| - |Q_B|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|T_B|}{|T_H|} \quad (\text{Cette égalité n'est valable que dans le cycle de Carnot})$$

Ou bien :

$$\eta = 1 - \frac{|T_B|}{|T_H|}$$

Pour les réfrigérateurs de Carnot on a :

$$\beta = \frac{|Q_B|}{|W|} = \frac{|Q_B|}{|Q_H| - |Q_B|} = \frac{1}{\frac{|Q_H|}{|Q_B|} - 1} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_B} - 1} \quad (\text{Cette égalité n'est valable que dans le cycle de Carnot})$$

Ou bien :

$$\beta = \frac{1}{\frac{T_H}{T_B} - 1}$$

Pour la pompe à chaleur de Carnot (P.A.C) on a :

$$\beta' = \frac{|Q_H|}{|W|} = \frac{|Q_H|}{|Q_H| - |Q_B|} = \frac{1}{1 - \frac{|Q_B|}{|Q_H|}} = \frac{1}{1 - \frac{T_B}{T_H}}$$

Ou bien :

$$\beta' = \frac{1}{1 - \frac{T_B}{T_H}}$$