Chapitre IV

IV. Machine thermique

On appelle ***machine thermique*** un dispositif permettant de ***transformer*** une énergie sous forme de chaleur en une énergie sous forme de travail et réciproquement (permis par le principe d'équivalence). Pratiquement, une machine thermique fonctionne à l'aide d'un *agent thermique* (qui constitue le système) subissant une transformation cyclique et échangeant avec l'extérieur travail et chaleur. On peut notamment distinguer les machines les plus simples où les échanges de chaleur se font avec un nombre réduit de sources de chaleur. Ainsi, on appelle machine ***monotherme*** une machine échangeant de la chaleur avec une seule source, et machine ***ditherme*** une machine n'échangeant de la chaleur qu'avec deux sources. L'expérience montre qu'il est très facile de produire un échauffement. Le problème se situe donc dans la réalisation de machines susceptibles de produire du travail ou de prélever de la chaleur.

IV.1. La 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 ($Q < 0$).

Ce moteur se caractérise par un seul thermostat (i=1). La mise en équation de cette machine est comme suit :

$$\Delta U = 0 \quad \Rightarrow \quad Q + W = 0 \quad \Rightarrow \quad Q = -W$$

$$\Delta S = 0 \;\Rightarrow\; \Delta S = S_{échangée} + S_{crée} = 0 \Rightarrow S_{échangée} = -S_{crée}\,,\, S_{crée} > 0$$

$$S_{échangée} = \frac{Q}{T} \Rightarrow S_{crée} = -\frac{Q}{T} \Rightarrow \frac{Q}{T} \leq 0 \;\Rightarrow W \geq 0$$

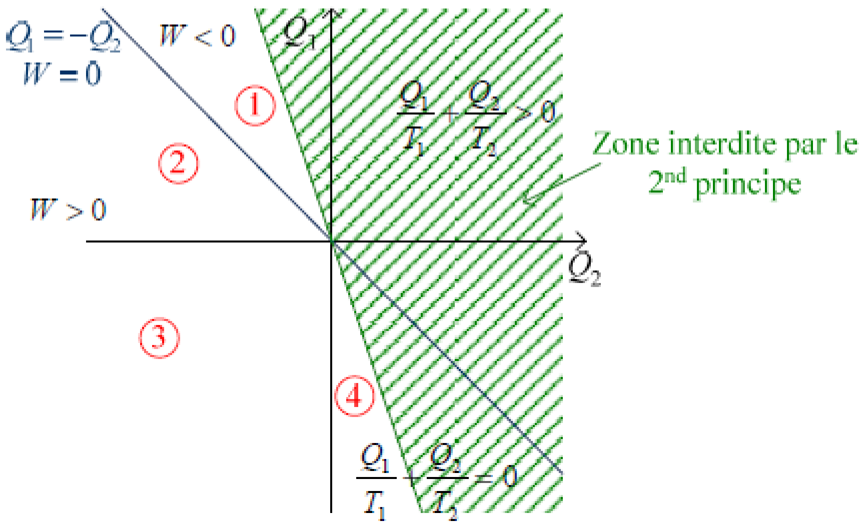
$$(W \geq 0) \Rightarrow \begin{bmatrix}\text{Le travail se fait de l'extèrieur} \\ \text{vers la machine}\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix}\text{La machine monotherme est} \\ \text{un système récepteur}\end{bmatrix}$$

IV.2 Machine thermique ditherme

a)

$$\begin{cases} 1^{er} \ \text{Principe : } \Delta U = Q_1 + Q_2 + W = 0 \quad \text{(cycle)} \\ 2^{nd} \ \text{Principe : inégalité de Clausius } \dfrac{Q_1}{T_1} + \dfrac{Q_2}{T_2} \leq 0 \end{cases}$$

b) Diagramme de Raveau



Zone 1 : $W < 0$, $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$

Le système reçoit Q_1 et le transforme en travail $-W$ et chaleur $-Q_2$ cédés au milieu extérieur et à la source froide. Ce type de système est appelé un moteur thermique.

Zone 2 : $W > 0$, $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$

Type de fonctionnement inutile : on fournit un travail pour faire un transfert de chaleur d'une source chaude vers une source froide.

Zone 3 : $W > 0$, $Q_1 < 0$, $Q_2 < 0$

Fonctionnement aussi inutile : un cycle monotherme suffit pour transformer du travail en chaleur.

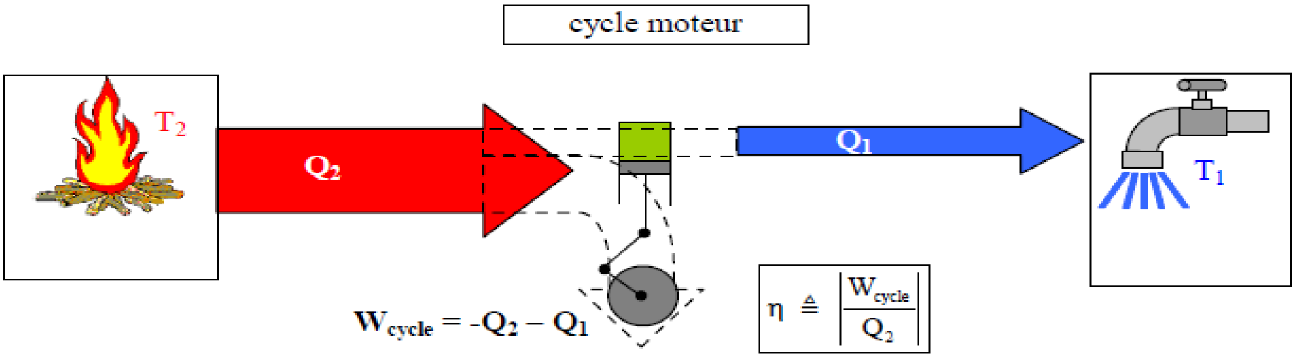
Zone 4 : $W > 0$, $Q_1 < 0$, $Q_2 > 0$

Transfert de chaleur d'une source froide vers une source chaude grâce à un travail. Ce type de système est une machine frigorifique.

IV.2.1. Moteur thermique

On appelle ***moteur thermique*** une machine fournissant du travail $\boxed{(W < 0)}$. Le premier principe appliqué à un système subissant des transformations cycliques impose alors qu'au bout d'un cycle $\boxed{Q = -W > 0}$, c'est-à-dire que le système doit prélever de la chaleur à l'extérieur.

IV.2.1.1. Les moteurs thermiques dithermes.



A/ Moteur réversible en contact avec 2 sources : cycle de Carnot.

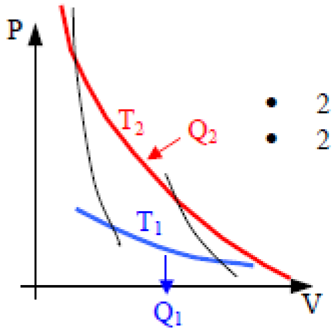
Rappelons qu'un cycle réversible est un cycle pour lequel le système d'étude est constamment en équilibre thermodynamique avec son environnement immédiat (appelé "extérieur") : pour les systèmes simples que l'on étudie1 cela se traduit par un équilibre thermique (égalité des températures intérieure et extérieure lors des contacts thermiques) et mécanique (égalité des pressions intérieure et extérieure). Le cycle est dit ditherme s'il se déroule entre 2 thermostats uniquement (ou *sources de chaleur*2).

Ces définitions rappelées, le seul cycle ditherme réversible possible est donc le cycle composé de 2 isothermes et de 2 adiabatiques (qui permettent, sans contact avec les sources, de passer de l'isotherme chaude T2 à l'isotherme froide T1) : ce cycle est appelé cycle de Carnot. Les chaleurs échangées lors du cycle Q1 et Q2 sont alors forcément échangées sur les isothermes puisque les adiabatiques n'échangent pas de chaleur avec les sources (par définition d'une adiabatique). Le cycle de Carnot est le cycle ditherme réversible : il assure le rendement maximal du moteur en contact avec 2 sources.

Si l'extérieur évolue à la même température que le système, alors il peut y avoir également réversibilité (ou plutôt *quasi* réversibilité) et donc même rendement, mais dans ce cas, si on veut s'assurer de la réversibilité du cycle (c'est-à-dire obtenir un rendement maximal) on ne peut plus appeler un tel cycle "ditherme" car lors de l'évolution de sa température le système est alors forcément en contact furtif avec une infinité de thermostats (ou four) et non plus 2 seulement. On peut cependant assimiler un cycle quelconque à un cycle "ditherme" en considérant comme source chaude un thermostat (fictif) de température égale à la température maximale T_2 de contact du système avec l'extérieur (ce qui exclut la température maximale obtenue par compression adiabatique où il n'y a pas contact avec l'extérieur), et comme source froide un thermostat de température égale à la température minimale T_1 de contact. On aura alors $\eta = \eta max = 1 - T_1/T_2$ mais dans un tel cas on ne peut plus dire que le cycle est à la fois ditherme et réversible : il est soit

réversible (rendement maximum) , soit ditherme (2 thermostats uniquement).

cycle moteur de Carnot = meilleur cycle moteur réversible ditherme possible.



- 2 adiabatiques
- 2 isothermes T_1 et T_2

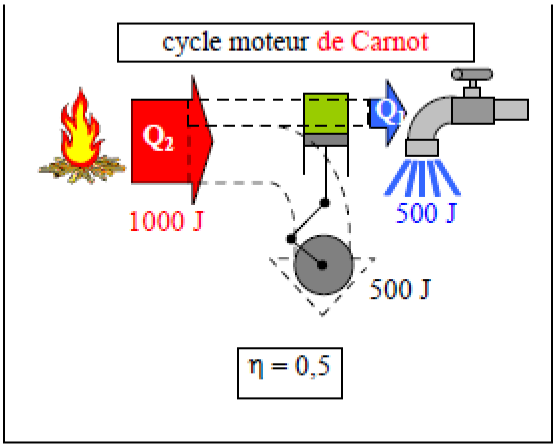
1[er] principe et cycle quelconque $\Rightarrow W = -Q_2 - Q_1$

2[nd] principe et cycle ditherme réversible $\Rightarrow \dfrac{Q_2}{T_2} = -\dfrac{Q_1}{T_1}$

$$\boxed{\eta = \eta_{max} = 1 - \frac{T_1}{T_2}}$$

on a bien évidemment $0 \leq \eta < 1$

Un rendement de 100% est donc impossible avec un moteur thermique, même avec le moteur idéal de Carnot.



Il existe d'autres types de cycle qui sont parfois qualifiés de réversibles…mais qui ne sont alors plus dithermes : (liste non exhaustive)

2 adiabatiques et 2 isochores : cycle de Beau de Rochas (essence)

2 isothermes et 2 isochores : cycle de Stirling (souvent avec de l'hydrogène).

2 adiabatiques, 1 isochore, 1 isobare : cycle Diesel.

B/ Exemple d'un moteur "ditherme" réel : le cycle de Beau De Rochas (essence).

Un moteur de Carnot est très compliqué (donc très cher) à réaliser, pour des raisons techniques et non théoriques (isothermes difficiles à assurer, pressions élevées). On fabrique donc des moteurs plus simples (moins cher) mais non réversibles (donc avec un rendement plus faible ou bien un travail perdu plus faible).
Le cycle de l'air du moteur vu ici est constitué de 4 temps : un "temps" correspondant à une course totale du piston et non à un type de transformation sur le diagramme P(V). Le fluide utilisé est un mélange air - essence .

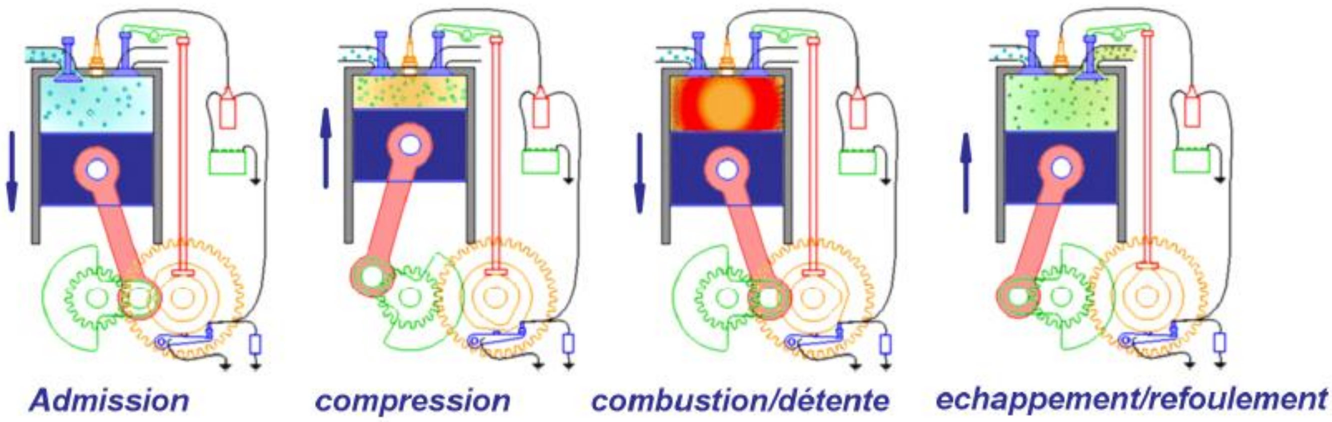
* L'admission et la compression sont possibles car le moteur a été préalablement lancé (au moyen d'un moteur électrique) et un volant d'inertie permet d'emmagasiner l'énergie cinétique du lancement pour permettre l'aspiration de l'air. Par la suite, la présence de 3 autres cylindres, chacun fonctionnant sur un temps différent, permet une rotation plus régulière du moteur ainsi qu'un travail fourni 4 fois plus élevé. La compression est nécessaire pour permettre l'explosion du mélange à l'aide des bougies.

* La détente est possible car elle correspond à la surpression due à l'explosion du mélange air-essence qui provoque une chaleur intense et très rapide.

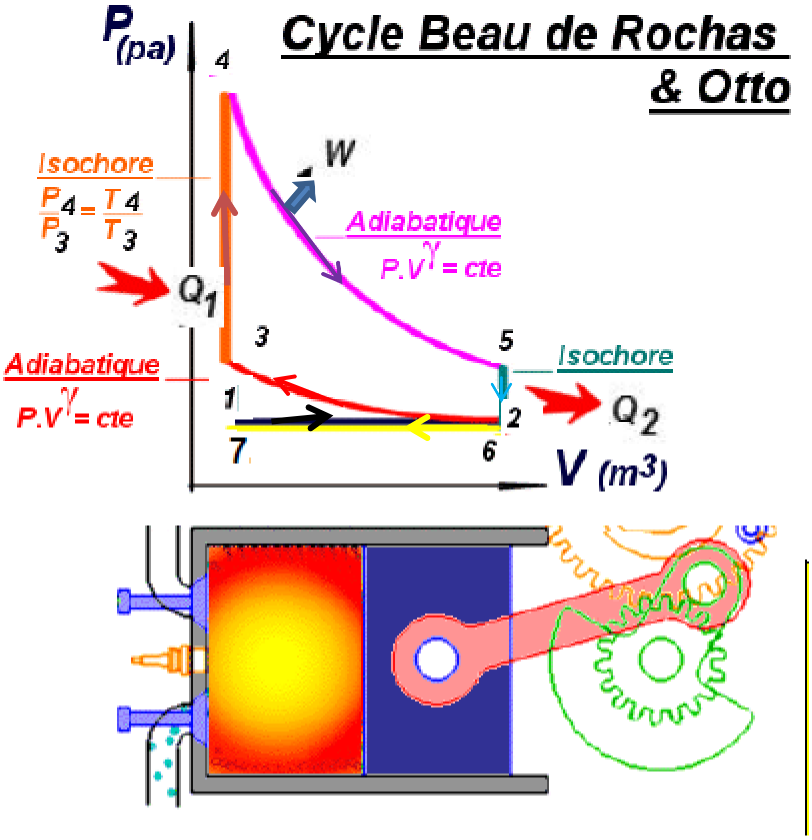
* L'échappement est possible car le moteur a été lancé par la phase de détente, et est donc entraîné par l'inertie et la présence des autres cylindres. Seule la phase de détente correspond en fait à l'apport de travail à l'extérieur. Les soupapes sont commandées par un arbre à cames5 solidaires de la rotation de l'arbre moteur.

Seule la phase de détente correspond en fait à l'apport de travail à l'extérieur. Les soupapes sont commandées par un arbre à cames solidaires de la rotation de l'arbre moteur.

Rotation régulière et multiplication du travail avec 3 autres cylindres qui travaillent chacun sur un trajet (temps) différent. C'est la détente d'un piston qui entraine les 3 autres pistons.



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 , comme suit :



1-2 : Aspiration du mélange (*ma*+*me*) à la pression atmosphérique dans le cylindre.

2-3 : Compression ***adiabatique 2-3*** jusqu'au volume V_1, ou la pression est P_1 .

$$P.V^{\gamma} = \text{cte}$$

$$P_2 \ V_2^{\gamma} = P_3 \ V_3^{\gamma} \quad \Rightarrow \frac{P_3}{P_2} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma}$$

Cette équation peut être réécrite sous la forme :

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

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 :

$$Q_1 = (m_a + m_e).C_V.(T_4 - T_3)$$

.

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.

$$\frac{P_4}{P_5} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma}$$

$$\frac{T_4}{T_5} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

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

$$Q_2 = (m_a + m_e).C_V.(T_2 - T_5)$$

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

Le rendement théorique du cycle de Beau de Rochas :

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

Sachant que :

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

Il vient donc:

$$N_{th} = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_3} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}}$$

RELATION FONDAMENTALE DES MOTEURS THERMIQUES.

Soit V, le volume engendré par le ou les pistons du moteur lors d'une course (V est la cylindrée du piston) (m^3)

Le travail par cycle est : $W_{cycle} = Pme.V$

Le nombre de cycles par secondes : $n_{cycle/s}$

La **puissance effective** du moteur est donnée par la relation :

$$P = W_{cycle} \cdot n_{cycle/s}$$

$$P = P_{me} \cdot V \cdot n_{cycle/s}$$

POUR AUGMENTER LA PUISSANCE, ON PEUT :

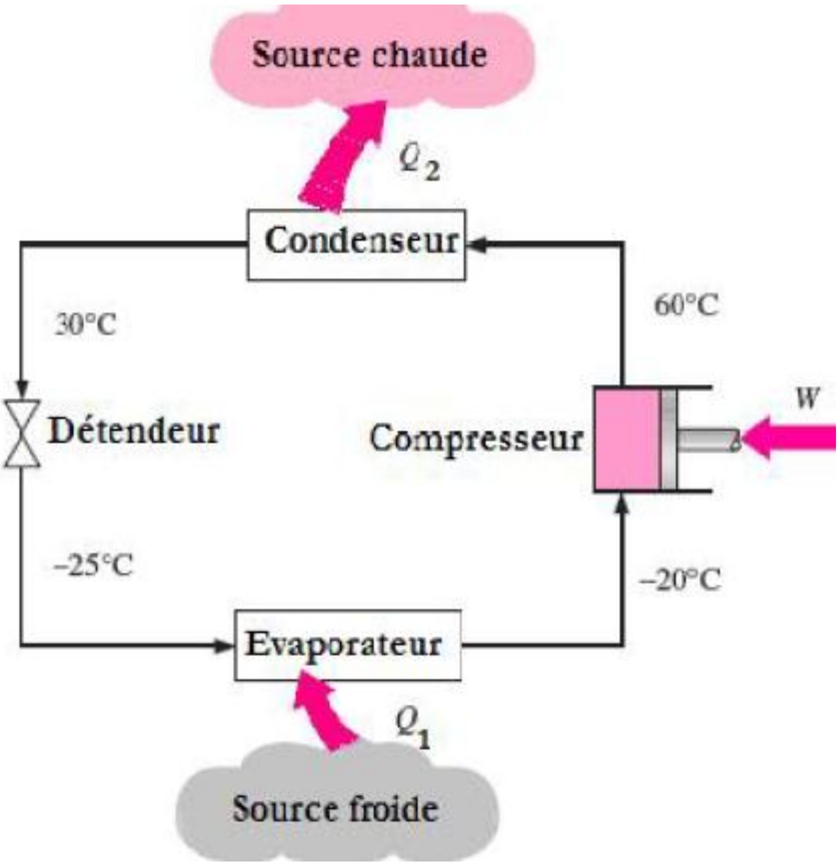
- AUGMENTER LA PME EN GONFLANT LE CYCLE REEL, DONC EN ADMETTANT DANS LE CYLINDRE UNE MASSE M (KG) DE MELANGE CARBURE AUSSI ELEVEE QUE POSSIBLE.
- AUGMENTER LA CYLINDREE V (M^3). GRAND NOMBRE DE CYLINDRES DE CYLINDREE UNITAIRE ELEVEE MAIS LE REFROIDISSEMENT EFFICACE D'UN GROS CYLINDRE EST DIFFICILE.
- AUGMENTER LE NOMBRE DE CYCLES PAR SECONDE EN AUGMENTANT LE REGIME MOTEUR, MAIS LES FORCES D'INERTIE DEVIENNENT ELEVEES QUE LA VITESSE MOYENNE DU PISTON NE DEPASSE PAS 14 M/S. ON PEUT ADOPTER LE CYCLE 2 TEMPS EN SOIGNANT LE REFROIDISSEMENT.

IV.3. Machine frigorifique et pompe à chaleur

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

IV.3.1. Cas d'une machine frigorifique (le réfrigérateur)

Ils pompent de la chaleur d'un corps (qui se refroidit) et la transmettent à un autre corps (qui s'échauffe) grâce à un compresseur et à un détendeur qui permettent cette opération. 1er principe sur un cycle quelconque



Machines dynamo-thermiques (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 :

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

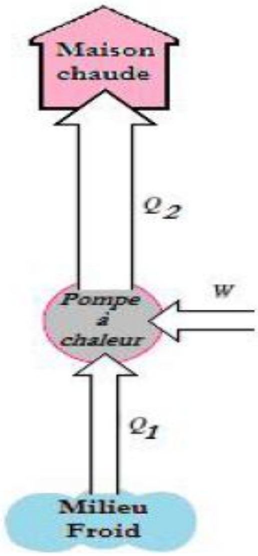
$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0 \quad \text{(Inégalité de Clausius)}$$

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

$$\eta = \frac{\text{froid produit}}{\text{Travail fourni}} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} > 1$$

IV.3.2. Cas d'une pompe à chaleur

Le principe est simple : absorber de l'énergie thermique (chaleur) de l'extérieur de la maison pour la rejeter à l'intérieur de la maison (d'où son nom). Il s'agit donc simplement d'un réfrigérateur ouvert sur l'extérieur et dont la grille arrière est placée dans notre appartement.



Machines dynamo-thermiques (Pompe à chaleur)

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 :

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

Le coefficient de performance (***COP***) d'une machine dynamo-thermique, $\boldsymbol{\eta}$ est donné par:

$$\eta = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} > 1$$