

## 1. THEOREME DE CARNOT

Supposons que le système reçoive d'une source extérieure à la température  $T_0$ , la quantité de chaleur  $Q$ , la variation d'entropie de la source est alors donnée comme suit :  $\Delta S_{ext} = -\frac{Q}{T_0}$  et d'après

le second principe on a :  $\Delta S_{ext} + \Delta S_{syst} \geq 0$  donc  $\Delta S_{syst} \geq \frac{Q}{T_0}$

Pour un système mis en contact successivement avec  $n$  sources, la  $i^{\text{ème}}$  source étant à la température  $T_i$ , et si le système reçoit la quantité de chaleur  $Q_i$  de la  $i^{\text{ème}}$  source, on a alors l'inégalité suivante :

$$\Delta S_{syst} \geq \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i}$$

Dans le cas particulier où le système mis en contact avec les  $n$  sources revient à son état initial ( $\Delta S_{syst} = 0$ ), cas du cycle, on a alors l'inégalité suivante dite **inégalité de Carnot-Clausius** :

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

Si les échanges de chaleur se font successivement avec les  $n$  sources de température  $T_s$  variables

continûment, on obtient alors sur un cycle :  $\oint_{\text{cycle}} \frac{dQ}{T_s} \leq 0$

Dans le cas de transformations réversibles, les inégalités deviennent des égalités.

### 11. Conséquence du second principe : cas du cycle monotherme

Soit un système qui reste en contact avec une seule source de température et revient à son état initial (cycle monotherme) et qui reçoit la quantité de chaleur  $Q$  de cette source, l'inégalité de Carnot-

Clausius nous impose :  $\frac{Q}{T} \leq 0$  ou encore  $Q \leq 0$

D'autre part  $W$  étant le travail reçu par le système au cours du cycle, le premier principe impose que  $\Delta U = W + Q = 0$ , soit  $Q = -W$ , or d'après l'inégalité précédente on en déduit que  $W \geq 0$ .

En conclusion le travail étant positif, le système ne peut alors qu'avoir reçu du travail au cours du cycle, et ne peut pas en avoir fourni.

**A partir d'une seule source de chaleur, il est impossible d'obtenir du travail.**

### 12. Rendement d'un moteur réel, rendement de CARNOT

Considérons un moteur réversible fonctionnant entre 2 sources de chaleur. La source chaude a la température  $T_1$  et la source froide a la température  $T_2$ . Soient  $Q_1$  et  $Q_2$  les quantités de chaleur échangées entre le moteur et respectivement entre la source chaude et la source froide, d'après l'inégalité de Carnot-Clausius qui devient une égalité pour les **transformations réversibles**, on a :

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad (1)$$

Le moteur reçoit la quantité de chaleur  $Q_1$  de la source chaude et en restitue une partie  $Q_2$  (ici négative puisque le moteur la perd) à la source froide.

Le rendement  $\eta$  du moteur se définit comme le rapport de la quantité de chaleur utile pour fournir du travail, sur la quantité de chaleur consommée pour le fonctionnement du moteur :

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

compte tenu de l'égalité (1), on obtient le **rendement de la machine de Carnot idéale** :

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1$$

Pour une machine réelle, ce rendement constitue une limite théorique qu'il est impossible de dépasser : soient  $Q'_1$  et  $Q'_2$  les quantités de chaleur échangée entre le moteur et les 2 sources de chaleur, on a :  $\frac{Q'_1}{T_1} + \frac{Q'_2}{T_2} < 0$  avec  $\eta'$  le rendement de la machine réelle :  $\eta' = 1 + \frac{Q'_2}{Q'_1}$  et finalement :

$$\eta' < \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1$$

Considérons l'homme comme une machine thermique, et calculons son rendement théorique de

Carnot :  $\eta = 1 - \frac{293}{293 + 37} = 0,11$  : on constate combien ce rendement est faible.

Considérons maintenant une truite, animal poïkilotherme, la calcul du rendement théorique de Carnot donne  $\eta = 0$ , en effet une machine thermique ne peut pas fournir de travail au contact d'une seule source de chaleur.

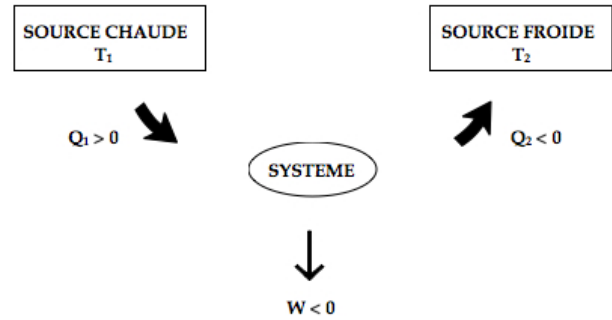
La vivant ne fonctionne pas comme une machine thermique : il ne sert pas à fournir du travail à partir de sources extérieures uniquement, mais il sert à fabriquer des protéines, du muscle...

Localement les réactions de synthèse produisent de l'information et diminue l'entropie.

## 2. MACHINES THERMIQUES

### 21. MOTEUR

C'est une machine qui prélève de la chaleur à la source chaude et en restitue une partie à la source froide, et produit du travail avec la différence.

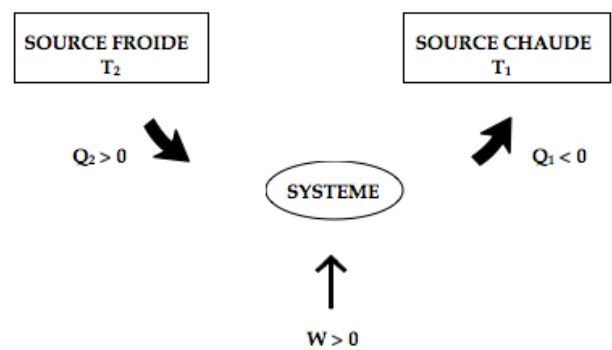


Premier principe :  $W + Q_1 + Q_2 = 0$

Deuxième principe :  $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} < 0$

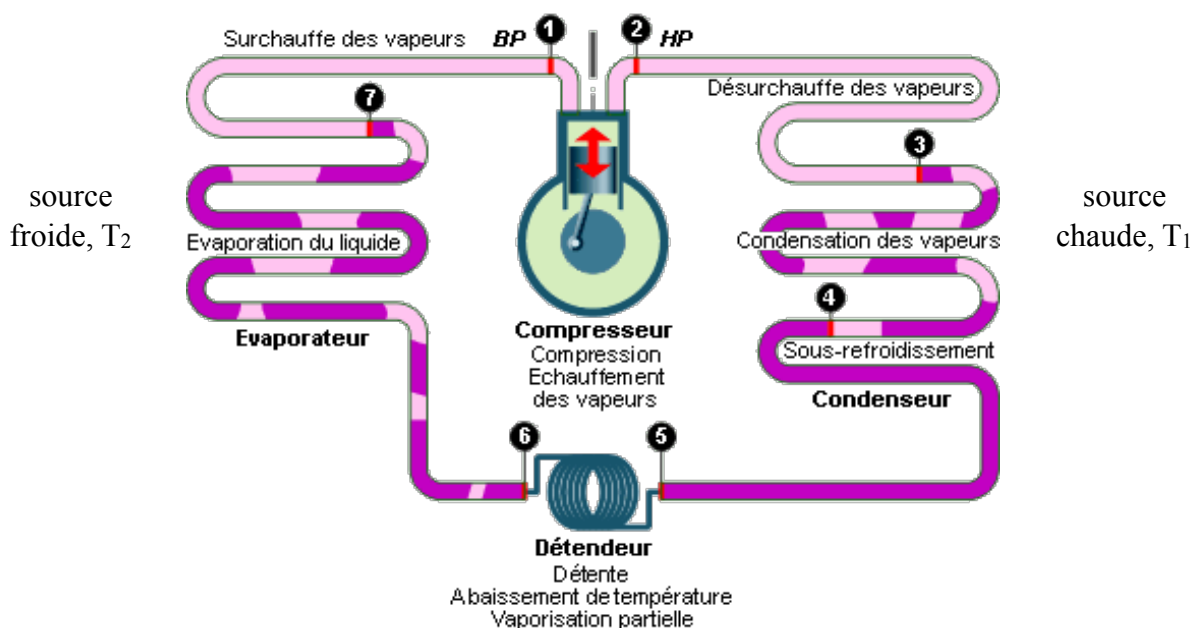
### 22. MACHINE FRIGORIFIQUE

C'est une machine à laquelle on fournit de l'énergie pour fournir du travail, elle prélève ainsi de la chaleur à la source froide (intérieur de l'enceinte à réfrigérer) et fournit de la chaleur à la source chaude (extérieur de l'enceinte) : réfrigérateur, air conditionné.



Une pompe à chaleur fonctionne selon le même principe, elle prélève de la chaleur à la source froide (l'extérieur d'une maison ou l'eau d'une rivière), et fournit de la chaleur à la source chaude (intérieur de la pièce à chauffer).

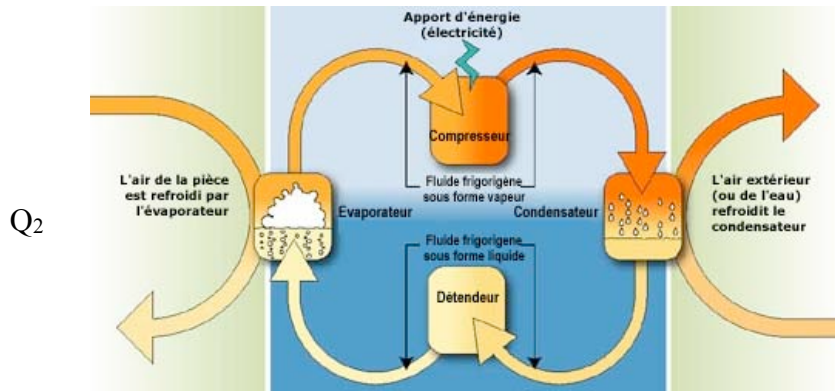
#### 221. Principe de fonctionnement



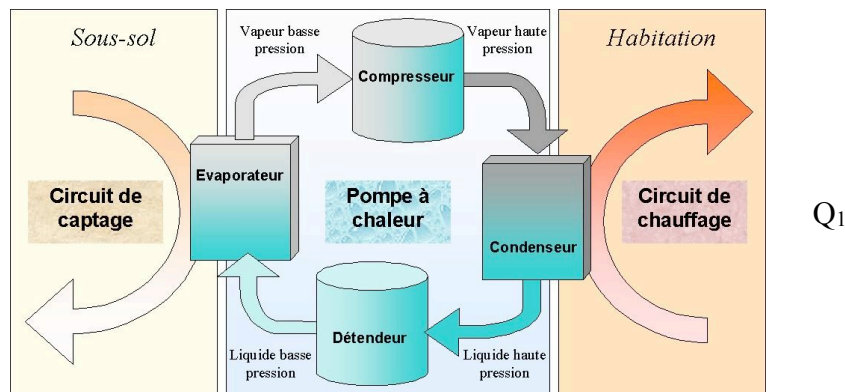
Les liquides absorbent de la chaleur pour se vaporiser (l'éther sur la peau provoque une sensation de froid). On utilise un fluide frigorigène ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ , fréon, volatil) initialement à l'état gazeux, puis comprimé grâce à un compresseur (qui fournit le travail  $W$  à la machine) et ensuite refoulé dans un serpentin condenseur où il se liquéfie ; le phénomène de liquéfaction dégage de la chaleur : pour

mieux évacuer celle-ci, le condenseur fait office de source chaude et est peint en noir. Le liquide est ensuite introduit dans un évaporateur représentant la source froide où règne une pression plus faible, et se vaporise (phénomène qui absorbe de la chaleur). La vapeur ainsi produite retourne au compresseur, et le cycle peut recommencer.

- Réfrigérateur : condenseur à l'extérieur de l'appareil et évaporateur à l'intérieur
- Air conditionné : condenseur à l'extérieur de la pièce à réfrigérer



- Pompe à chaleur : le condenseur fait office de radiateur à l'intérieur de l'appartement jouant le rôle de source chaude, alors que l'évaporateur sera placé à l'extérieur au contact de la source froide (extérieur, rivière, lac...)



## 222. Efficacité

On définit l'efficacité de ces appareils comme étant le rapport de l'énergie gagnée sur l'énergie perdue.

$$\text{Réfrigérateur, air conditionné : } e = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$\text{Pompe à chaleur : } e = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

L'efficacité d'une pompe à chaleur  $e = 7,5$  signifie qu'il est 7,5 fois plus avantageux d'utiliser l'électricité pour alimenter le compresseur de la pompe à chaleur que d'utiliser l'électricité directement pour faire chauffer un radiateur électrique.