

2^E PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE MACHINES THERMIQUES

1. NECESSITE D'UN DEUXIEME PRINCIPE

1.1. Notion de "qualité" de l'énergie

Une quantité de travail W , quelle qu'en soit l'origine (mécanique, électrique, magnétique...) peut être très facilement transformée intégralement en chaleur, à tel point qu'il est même impossible d'éviter une conversion partielle de travail en chaleur. Le travail est de plus une énergie convertible : mécanique \Leftrightarrow électrique \Leftrightarrow magnétique

Au contraire, une quantité de chaleur Q n'est pas convertible aussi facilement en travail, et cette conversion, qui n'est jamais intégrale, obéit à des règles strictes, qui constituent un des aspects du deuxième principe.

Le travail a donc un aspect pratique beaucoup plus important que la chaleur.

Travail = énergie "noble", "convertible"

Chaleur = forme "dégradée" de l'énergie.

1.2. Un principe d'évolution

Toute transformation réelle est irréversible. La notion de réversibilité n'est qu'une limite, utilisable dans certaines conditions très restrictives.

Une transformation irréversible se produit spontanément dans un sens bien déterminée, la transformation inverse étant impossible. Cet aspect de la thermodynamique constitue l'autre aspect du 2^e principe.

Enonçons quelques résultats :

⇒ Difficulté pour convertir de la chaleur en travail

⇒ Un moteur perpétuel de seconde espèce (puisant son énergie à une seule source de chaleur) n'existe pas.

⇒ Lors d'une transformation cyclique monotherme, un système ne peut pas fournir de travail (énoncé de Kelvin du 2^e principe).

2. ENTROPIE ET DEUXIEME PRINCIPE

2.1. Entropie

On peut construire (thermodynamique statistique) une fonction d'état qui est liée à la notion d'ordre et de désordre, à la notion d'organisation de la matière. Cette fonction d'état se nomme *entropie* et se note S . C'est une grandeur additive. Son unité : $J.K^{-1}$.

On peut dire que l'entropie est une mesure du désordre, ou plus précisément de l'absence d'organisation de la matière dans un système.

Illustration :

A la température de 0 Kelvin, la matière est "figée", à l'état solide, et parfaitement ordonnée. Les constituants de la matière sont rigoureusement fixes. C'est l'organisation maximum. L'entropie est nulle (ceci constitue d'ailleurs le 3^e principe de la thermodynamique)

A température ordinaire, pour un corps gazeux par exemple, une molécule peut être ici ou là, puisque les molécules sont en mouvement, sans que l'état macroscopique du gaz soit changé. En particulier son énergie interne est la même. Le fait qu'il existe plusieurs possibilités pour la répartition des molécules dans l'espace, pour un état thermodynamique donné, se traduit par une valeur plus grande de l'entropie. C'est comme si la nature laissait une certaine liberté à la matière, lui permettant une certaine absence d'organisation.

Voilà donc en gros la physique qui se cache derrière cette fonction S . C'est donc une notion nettement moins intuitive que l'énergie.

2.2. Deuxième principe pour un système isolé

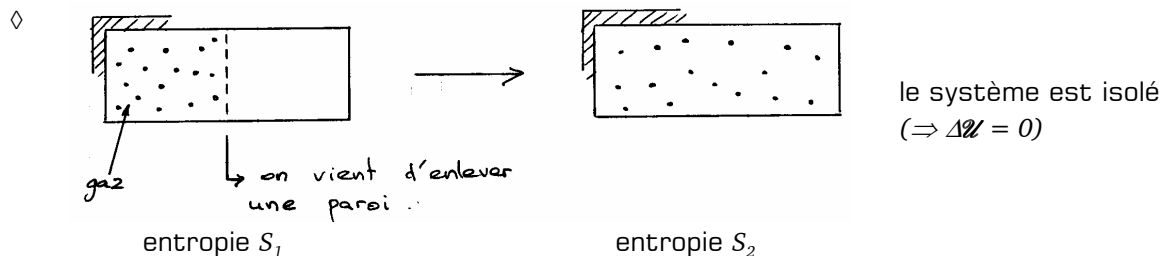
L'évolution d'un système isolé ne peut se faire spontanément que si $\Delta S \geq 0$

signification : l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter ou rester stable.

conséquence : un système isolé hors équilibre, en tendant vers un équilibre, évoluera vers l'entropie maximum.

Un équilibre, ou une évolution réversible, se caractérise donc par un maximum de S , c'est-à-dire $\Delta S = 0$.

illustrations :



$S_2 > S_1$ car les molécules ayant plus de place à leur disposition dans l'état final, les possibilités de répartition dans ce nouvel espace sont plus grandes, donc $\Delta S = S_2 - S_1 > 0$. L'évolution est irréversible.

◇ Considérons l'univers. C'est un système isolé, puisqu'au delà de *Tout...* il n'y a *rien*. Le deuxième principe affirme que l'évolution globale de l'univers se fait de manière à ce que son entropie augmente.

2.3. Deuxième principe dans le cas général

a) Origines de la variation d'entropie d'un système

Pour un système quelconque non isolé $\Delta S > 0$ ou $\Delta S < 0$.

Considérons deux systèmes A et B en contact thermique, l'ensemble étant isolé. Si A perd de l'entropie, B la récupère. C'est ce que l'on appelle *l'entropie échangée*. Mais si le phénomène est irréversible, le deuxième principe appliqué à l'ensemble A+B nous permet de dire que B gagne plus d'entropie que A n'en a cédé, puisque l'entropie de l'ensemble doit augmenter. Ce surplus, positif, est appelé *entropie créée*.

En résumé, la variation d'entropie d'un système non isolé s'écrit :

$$\Delta S = \Delta S_e + \Delta S_i$$

avec ΔS_e : entropie échangée ou variation d'entropie due à l'échange thermique

* Si contact avec une source de chaleur à la température T_e

$$\Delta S_e = \frac{Q}{T_e}$$

résultat à admettre

* Si contact avec deux sources, de températures T_{CH} et T_{FR}

$$\Delta S_e = \frac{Q_{CH}}{T_{CH}} + \frac{Q_{FR}}{T_{FR}}$$

Dans le cas où T_{CH} et T_{FR} varient : $\Delta S_e = \int_{CH} \frac{\delta Q_{CH}}{T_{CH}} + \int_{FR} \frac{\delta Q_{FR}}{T_{FR}}$

ΔS_i : entropie créée ou variation d'entropie due aux causes d'irréversibilité interne

Deuxième principe $\Rightarrow \Delta S_i \geq 0$

Analogie : système \rightarrow troupeau
 entropie S \rightarrow nombre de tête de bétail N
 ΔS_e \rightarrow ΔN_e achat-vente (échange)
 ΔS_i \rightarrow ΔN_i naissance-mort (interne)

b) Conséquences immédiates

◇ Si l'évolution est réversible ou si le système est à l'équilibre,

$$\Delta S_i = 0 \text{ et } \Delta S = \Delta S_e$$

◇ Si le système suit une transformation spontanée, c'est-à-dire irréversible,

$$\Delta S_i > 0 \text{ et } \Delta S > \Delta S_e$$

◇ Si le système est isolé,

$$\Delta S_e = 0 \text{ et } \Delta S = \Delta S_i \quad \text{on retrouve } \Delta S \geq 0$$

2.4. Transformations cycliques - inégalité de Carnot-Clausius

Nous n'aborderons pas les méthodes de calcul de ΔS , car seules vont nous intéresser les transformations cycliques, où $\Delta S = 0$ (\rightarrow applications aux machines thermiques). Alors

$$\Delta S = \Delta S_e + \Delta S_i \quad \Rightarrow \quad \Delta S_e = -\Delta S_i \leq 0$$

a) cycle monotherme (échange de chaleur avec une seule source)

$$\Delta S_e = \frac{Q}{T_e} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad Q = T_e \Delta S_e \leq 0$$

Or $\mathcal{W} = W + Q = 0$ (cycle) d'où $W = -Q \geq 0$

\Rightarrow Lors d'un cycle monotherme irréversible, un système consomme du travail et produit de la chaleur (cf. § 1.2 énoncé de Kelvin du 2^e principe)

b) cycle polytherme (échange de chaleur avec plusieurs sources) - inégalité de Carnot-Clausius

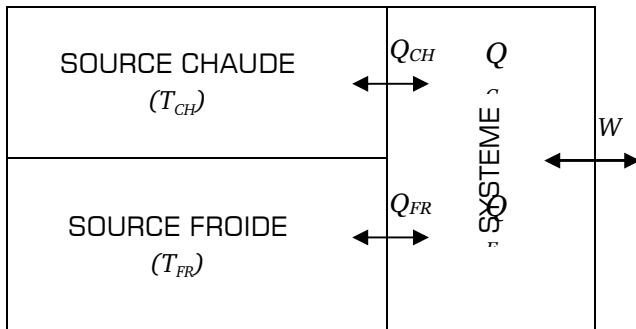
$$\Delta S_e = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \text{ et } \Delta S_e \leq 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0 \quad (\text{inégalité de Carnot-Clausius})$$

pour un cycle ditherme (échange de chaleur avec une source chaude et une source froide)

$$\frac{Q_{CH}}{T_{CH}} + \frac{Q_{FR}}{T_{FR}} \leq 0$$

3. LES DIFFERENTS TYPES DE MACHINES THERMIQUES DITHERMES

3.1. Principe



Le système est le fluide parcourant le cycle (exemple fluide frigorigène d'un réfrigérateur).

Si sa composition change (exemple mélange air/essence puis gaz d'échappements, dans un moteur) on suppose néanmoins que ses propriétés thermodynamiques restent les mêmes (C_V , C_P constantes)

Q_{CH} : quantité de chaleur échangée avec la source chaude,

Q_{FR} : quantité de chaleur échangée avec la source froide,

W : quantité de travail échangée pendant le cycle.

Remarque : dans le cas où T_{FR} ou T_{CH} ne sont pas constantes (exemple T_{CH} dans la plupart des cycles moteurs) le cycle n'est plus ditherme. Cependant, on continue à parler de sources chaude et froide, bien que le terme "source" soit alors abusif, et on raisonne comme sur un cycle ditherme.

◇ Expression des deux principes

1^{er} principe $Q_{CH} + Q_{FR} + W = 0$

2^e principe $\frac{Q_{CH}}{T_{CH}} + \frac{Q_{FR}}{T_{FR}} \leq 0$ avec $T_{CH} > T_{FR}$

Nous pouvons examiner 8 cas, selon les signes respectifs de Q_{CH} , Q_{FR} , W . Après application des deux principes, il reste deux possibilités intéressantes :

- machines motrices : $W < 0$, $Q_{CH} > 0$, $Q_{FR} < 0$
→ moteurs thermiques
- machines réceptrices : $W > 0$, $Q_{CH} < 0$, $Q_{FR} > 0$
→ réfrigérateurs ou climatiseurs, pompes à chaleur.

3.2. Cas idéal : cycle de Carnot

Un cycle de Carnot est un cycle réversible au cours duquel le fluide entre en contact avec deux sources

→ cycle = 2 isothermes T_{CH} et T_{FR} reliées par 2 adiabatiques.

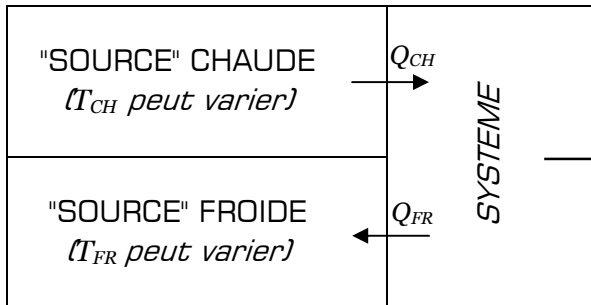
Parcouru dans le sens ABCD, c'est un cycle de Carnot moteur, dans le sens inverse c'est un cycle de Carnot récepteur.

Le cycle étant réversible, l'inégalité de Carnot-Clausius devient une égalité :

$$\frac{Q_{CH}}{T_{CH}} + \frac{Q_{FR}}{T_{FR}} = 0 \text{ d'où } \frac{Q_{FR}}{Q_{CH}} = -\frac{T_{FR}}{T_{CH}} \quad (\text{résultat utile pour la suite})$$

4. MACHINES MOTRICES

Schéma de principe d'un moteur thermique



Q_{CH} : quantité de chaleur échangée pendant la combustion ($Q_{CH} > 0$, chaleur reçue).

Q_{FR} : quantité de chaleur échangée pendant le reste du cycle ($Q_{FR} < 0$, chaleur cédée).

W : quantité de travail échangée pendant le cycle ($W < 0$, travail produit).

4.1. Rendement moteur de Carnot

Rendement d'un moteur $\eta = \frac{\text{gain}}{\text{dépende}} = \frac{|W|}{Q_{CH}} = 1 + \frac{Q_{FR}}{Q_{CH}}$

Dans le cas d'un moteur de Carnot $\frac{Q_{FR}}{Q_{CH}} = -\frac{T_{FR}}{T_{CH}}$

D'où le rendement de Carnot d'un cycle ditherme : $\eta_C = 1 - \frac{T_{FR}}{T_{CH}}$

Ce résultat constitue la 1^e partie du théorème de Carnot.

4.2. Rendement d'un moteur réel

$$\frac{Q_{CH}}{T_{CH}} + \frac{Q_{FR}}{T_{FR}} < 0 \Leftrightarrow \frac{Q_{FR}}{Q_{CH}} < -\frac{T_{FR}}{T_{CH}}$$

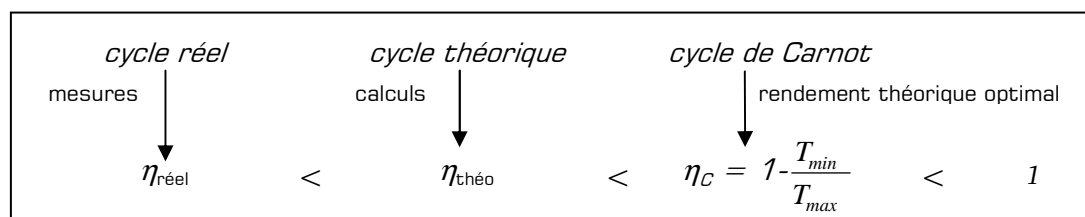
d'où $\eta < \eta_C$ 2^e partie du théorème de Carnot.

Remarques :

- On calcule généralement des rendements théoriques à partir de cycles théoriques quasistatiques, les rendements réels sont inférieurs à ces rendements théoriques.
- On calcule le rendement de Carnot correspondant à un moteur réel à partir des températures extrêmes du cycle.

◇ Rendement d'un moteur (récapitulatif)

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



4.3. Types de moteurs thermiques

Un moteur thermique est un moteur transformant l'énergie thermique en énergie mécanique. Il en existe différents types :

moteur à combustion interne :

moteur dans lequel ce sont les gaz de combustion eux-mêmes qui fournissent la force expansive agissant sur le mécanisme (exemples : moteur à explosion, moteur diesel).

moteur à combustion externe :

moteur dans lequel l'énergie thermique fournie par le combustible n'agit pas directement sur le mécanisme (exemples : turbine à gaz, machine à vapeur).

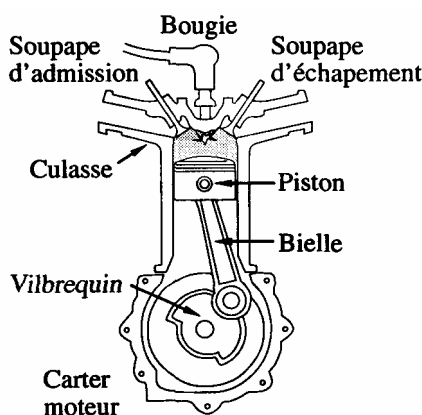
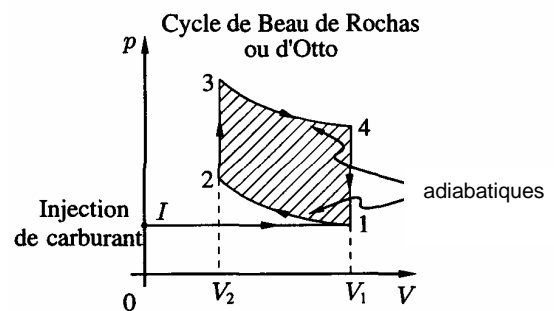
moteur à réaction :

moteur dans lequel l'action mécanique est réalisée par l'éjection d'un flux gazeux à grande vitesse, qui crée une certaine quantité de mouvement (exemples : turboréacteurs, moteurs-fusées).

4.4. Moteur à explosion : cycle de Beau de Rochas ou cycle d'Otto.

Le moteur à explosion est un moteur à combustion interne dont l'allumage est commandé et réalisé grâce à des éclateurs appelés bougies. Schématiquement, on fait subir à une masse d'air et de carburant (essence) un cycle constitué de deux isentropiques (adiabatiques réversibles) et de deux isochores.

Un tel cycle a été proposé par l'ingénieur français A. Beau de Rochas dès 1862, à partir d'une idée de E. Lenoir.



Un moteur à explosion fonctionnant sur ce principe a été réalisé par l'ingénieur allemand N. Otto et présenté pour la première fois à l'exposition universelle de Paris en 1878. Un cylindre formant une chambre de combustion admet, par une soupape d'admission, le mélange combustible et le comprime jusqu'à la mise à feu, ce qui produit la réaction chimique de combustion ; les produits gazeux de la réaction fournissent du travail au milieu extérieur puis sont expulsés à travers une soupape d'échappement sous forme de gaz brûlés.

Description du cycle

Le cycle est décrit en quatre temps :

- 1^o) Le cylindre admet le mélange à travers une soupape d'admission dans un volume V_1 (portion I \Rightarrow 1).

- 2°) Les soupapes étant fermées, le mélange est comprimé adiabatiquement jusqu'au volume V_2 (portion 1 \rightarrow 2) jusqu'à l'explosion du mélange qui augmente la pression (portion 2 \rightarrow 3).
- 3°) Les soupapes étant toujours fermées, les produits de la combustion se détendent adiabatiquement en repoussant fortement le piston (portion 3 \rightarrow 4) jusqu'à la position extrême du piston.
- 4°) La soupape d'échappement s'ouvre, ce qui diminue brutalement la pression (portion 4 \rightarrow 1) et les gaz brûlés sont évacués.

Dans la pratique, les moteurs à explosion fonctionnent généralement avec quatre cylindres, ce qui permet de réaliser une rotation quasi uniforme du moteur.

Notons que, le moteur à explosion étant un système ouvert, l'étude thermodynamique présente est relative au système fermé constitué par une masse déterminée de fluide au cours d'un cycle.

Le rendement (ou efficacité) de ce moteur ne dépend que du taux de compression α_v .

Ordres de grandeur : Comme le mélange est pratiquement de l'air assimilable à un gaz parfait diatomique, $\gamma \approx 1,4$ et que $\alpha_v \approx 9$, on trouve $\eta \approx 0,58$. Les moteurs à explosion fournissent une puissance mécanique qui peut atteindre 3 MW.

Remarques :

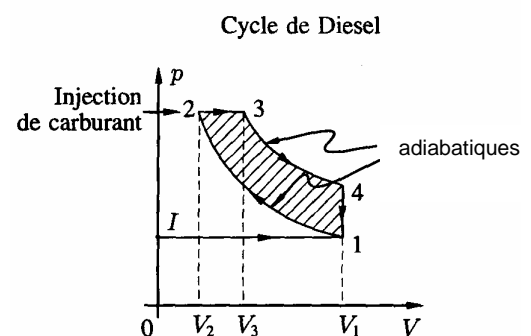
- Un moteur de Carnot idéal fonctionnant entre les deux sources aux températures extrêmes $T_3 = 1220\text{ K}$ et $T_1 = 293\text{ K}$ aurait une efficacité de $\eta_c = 0,76$.
- Le cycle réel a l'allure du cycle théorique précédent mais en diffère sensiblement, notamment au voisinage des points extrêmes 1, 2, 3, 4.

4.5. Moteur à allumage par compression : cycle de Diesel.

Le moteur Diesel est un moteur à combustion interne dont l'allumage n'est pas assuré par une bougie mais par une compression élevée, ce que l'on réalise sans risque d'inflammation en comprimant l'air seul et en injectant le carburant au point 2 du diagramme.

Ce moteur a été mis au point par l'allemand R. Diesel en 1893, fortement motivé par la recherche d'un moteur thermique fonctionnant avec un combustible rudimentaire, moins raffiné que l'essence, par exemple, du charbon pulvérulent.

Le cycle ressemble à celui du moteur à explosion, mais la portion isochore 2 \rightarrow 3 est remplacée par une isobare car, dans le moteur Diesel, le combustible est injecté sous pression en 2, de façon assez progressive.



Description du cycle

Le cycle est décrit en quatre temps :

- 1°) Le cylindre admet l'air seul à travers une soupape d'admission dans un volume V_1 (portion 0 \rightarrow 1).
- 2°) Les soupapes étant fermées, l'air est comprimé adiabatiquement jusqu'au volume V_2 (portion 1 \rightarrow 2).

3°) Les soupapes étant toujours fermées, on introduit le combustible en 2 ; une fois la combustion réalisée (portion 2⇒3), les produits de la réaction se détendent adiabatiquement en repoussant fortement le piston (portion 3⇒4) jusqu'à la position extrême du piston.

4°) La soupape d'échappement s'ouvre, ce qui diminue brutalement la pression (portion 4⇒1) et les gaz brûlés sont évacués.

Dans la pratique, les moteurs Diesel fonctionnent généralement avec quatre cylindres.

Ordre de grandeur du rendement : Pour $\gamma \approx 1,4$, un taux de compression $\alpha_v = v_1/v_2 \approx 14$ et un rapport de détente $\beta_v = v_1/v_3 \approx 9$, on trouve $\eta \approx 0,62$. La puissance motrice fournie par le moteur Diesel peut atteindre 30 MW.

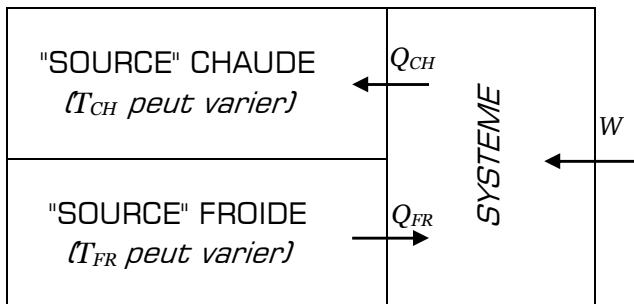
Remarque : Dans les moteurs Diesel actuels, dits à double combustion, la forme du cycle diffère légèrement de celle du cycle précédent : la portion isobare 2⇒3 est remplacée par une portion isochore 2⇒2' et une portion isobare 2'⇒3 car l'injection du combustible est avancée.

4.6. Autres exemples

Voir fascicule "Energétique" pp 38 à 45 (§3.2).

5. MACHINES RECEPTRICES

5.1. Principe



Q_{CH} : quantité de chaleur échangée avec la source chaude ($Q_{CH} < 0$, chaleur cédée).

Q_{FR} : quantité de chaleur échangée avec la source froide ($Q_{FR} > 0$, chaleur reçue).

W : quantité de travail échangée pendant le cycle ($W > 0$, travail reçu).

Le fluide prélève de la chaleur à la source froide et rejette de la chaleur dans la source chaude en recevant du travail.

1^{er} principe : $Q_{CH} + Q_{FR} + W = 0$

En déduire que $|Q_{CH}| > |Q_{FR}|$ (facile)

⇒ La machine restitue plus de chaleur à la source chaude qu'elle n'en a prélevé à la source froide (cf. paradoxe du frigo ouvert)

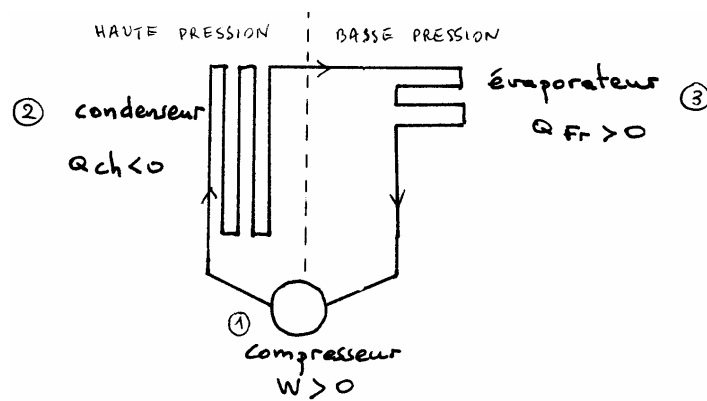
Le fluide frigorigène doit présenter une forte chaleur latente de vaporisation et doit être assez volatil. Jusqu'à la fin des années 80, on utilisait du fréon (CF_2Cl_2). Suivons son parcours (voir schéma page suivante) :

① Initialement à l'état gazeux

① Il est comprimé grâce au compresseur ($W > 0$)

② Il est refoulé dans le condenseur (serpentin) où il se liquéfie en dégageant de la chaleur ($Q_{CH} < 0$)

③ Il est introduit (détente adiabatique) dans l'évaporateur (où la pression est plus faible) et se vaporise en absorbant de la chaleur ($Q_{FR} > 0$)



5.2. Réfrigérateurs, climatiseurs

L'évaporateur est à l'intérieur du réfrigérateur ou de la pièce à climatiser.

On définit l'efficacité frigorifique :

$$e_F = \frac{\text{gain}}{\text{dépense}} = \frac{Q_{FR}}{W} = -\frac{Q_{FR}}{Q_{FR} + Q_{CH}} = -\frac{1}{1 + \frac{Q_{CH}}{Q_{FR}}}$$

On définit l'efficacité frigorifique de Carnot :

$$(e_F)_C = \frac{1}{\frac{T_{CH}}{T_{FR}} - 1} = \frac{T_{FR}}{T_{CH} - T_{FR}} \quad \text{et on a} \quad e_F < (e_F)_C$$

Exemple, congélateur : $T_{FR} = 260 \text{ K}$; $T_{CH} = 300 \text{ K}$ $\Leftrightarrow e_F < (e_F)_C = 6,5$

5.3. Pompes à chaleur

Le condensateur est à l'intérieur de la pièce à chauffer, l'évaporateur est à l'extérieur (air, ou dans le meilleur des cas rivière ou lac).

On définit l'efficacité thermique :

$$e_T = \frac{\text{gain}}{\text{dépense}} = \frac{|Q_{CH}|}{W} = \frac{1}{1 + \frac{Q_{FR}}{Q_{CH}}}$$

On définit l'efficacité thermique de Carnot :

$$(e_T)_C = \frac{1}{1 - \frac{T_{FR}}{T_{CH}}} = \frac{T_{CH}}{T_{CH} - T_{FR}} \quad \text{et on a} \quad e_T < (e_T)_C$$

Exemple, évaporateur dans un lac, en hiver : $T_{FR} = 277 \text{ K}$; $T_{CH} = 290 \text{ K}$ $\Leftrightarrow e_T < (e_T)_C = 22,3$

Le système est donc extrêmement avantageux.

Supposons que nous disposions de fioul domestique pour se chauffer. Plutôt que le brûler, il vaut mieux l'utiliser à faire tourner un moteur thermique entraînant à son tour le compresseur d'une pompe à chaleur.

Inconvénients :

- coût de l'installation,
- précautions à prendre si l'évaporateur est à l'air libre (givre).