TH4 MACHINES THERMIQUES

On appelle **machines thermiques** tout dispositif dans lequel **le système** (généralement un **fluide**) qui tient le rôle d'**agent thermique** subit une transformation **cyclique** au cours de laquelle il échange du travail avec le milieu extérieur, et de la chaleur avec une ou plusieurs sources.

I. Inégalité de Clausius Carnot

I.1. Système en contact avec un thermostat.

• Source de chaleur : système fermé n'échangeant aucun travail, et capable d'échanger de la chaleur sans que sa température T_S évolue.
Ainsi, un système réel s'approche d'autant mieux d'une source de chaleur qu'il est plus grand.
On les appelle aussi thermostats ou sources thermiques.

• Evolution d'un système au contact d'une source de chaleur
- Système : Σ
- Transformation : en contact avec une source thermique (S) de température T_S, Σ reçoit la chaleur Q.
- Entropie échangée : $S_{\text{échangée}} = \frac{Q}{T_S}$
- Entropie créée : $S_{\text{créée}} \geq 0$
- Le second principe $\Delta S = S_{\text{échangée}} + S_{\text{créée}}$

On obtient l'inégalité de Clausius Carnot : $\Delta S \geq \frac{Q}{T_S}$

L'égalité est réalisée pour une transformation réversible $\Delta S = \frac{Q}{T_S}$

Si la transformation est irréversible $\Delta S > \frac{Q}{T_S}$

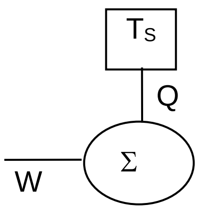
I.2. Généralisation

Le système est mis en contact avec n sources successives, chacune cédant la chaleur Q_i à la température T_{Si} .
En tenant compte des n transformations successives : $\Delta S \geq \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{T_{Si}}$
En particulier si le système décrit un cycle, c'est-à-dire qu'après avoir été mis en contact avec les n sources il revient à son état initial : $\Delta S = 0 \text{ J.K}^{-1}$.

L'inégalité de Clausius Carnot pour un cycle : $\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{T_{Si}} \leq 0$

II. Machine monotherme

Le système reçoit de la chaleur d'**une seule source.**



Système : Σ le fluide
Energie reçue : la chaleur Q de la part de la source T_S
le travail W
Transformation : cycle monotherme.
Premier principe : Cycle $\Rightarrow \Delta U = W + Q = 0$
Deuxième principe : Cycle $\Rightarrow \Delta S = 0$

Inégalité de Clausius Carnot : $\Delta S \geq Q / T_S \Rightarrow Q \leq 0$.
$\Rightarrow Q \leq 0$ et $W \geq 0$.

Ainsi, le système reçoit de l'énergie mécanique et cède de la chaleur.

Enoncé de Lord Kelvin (1851)
Un système qui subit une transformation cyclique monotherme reçoit nécessairement du travail et fournit nécessairement de la chaleur.

$$Q \leq 0 \text{ et } W \geq 0.$$

Ou encore il est impossible de trouver un moteur fonctionnant de manière cyclique qui produise du travail à partir d'une seule source de chaleur : moteur de seconde espèce.
« Un bateau muni, s'il existait, d'un tel moteur, avancerait en puisant de l'énergie dans la mer et en laissant un sillage de glace derrière lui. »

Remarque : le moteur perpétuel de première espèce fonctionnerait en puissant son énergie de nulle part, interdit par le premier principe.

III. Machines dithermes

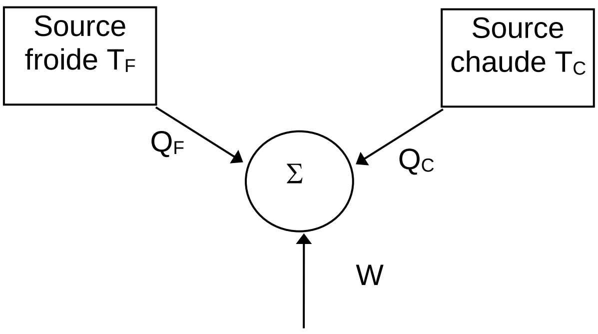
III.1. Notations et relations

Le système sur lequel on va travailler et le fluide caloporteur, attention en aucun cas le système est la « machine ».

Système Le fluide Σ
Transformation : cycle ditherme
Echanges énergétiques
- Un travail W de la part du milieu extérieur
- Un transfert thermique Q_c de la part d'une source chaude à la température T_C.
- Un transfert thermique Q_F de la part d'une source froide à la température T_F.

Remarque : le vocabulaire utilisé implique que $T_C > T_F$.

Schéma de principe



Le sens des flèches indique le sens positif des échanges. Rappelons que si le système reçoit effectivement l'énergie elle est positive, s'il la perd elle est négative.

Premier principe : Cycle $\Rightarrow \Delta U = W + Q_F + Q_C = 0$
Deuxième principe : Cycle $\Rightarrow \Delta S = 0$
Inégalité de Clausius Carnot : $\frac{Q_c}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$

III.2. Principe du moteur ditherme

• D'un point de vue industriel, il est intéressant de connaître les lois qui régissent la conversion de la chaleur (provenant de combustion) en énergie mécanique directement utilisable.

• Système : Σ Le fluide.
Energies reçues : - Un travail W de la part du milieu extérieur
- Un transfert thermique Q_c de la part d'une source chaude à la température T_C.
- Un transfert thermique Q_F de la part d'une source froide à la température T_F.

Cycle moteur : $W < 0$
D'après le premier principe : $Q_C + Q_F > 0$
Ainsi en divisant par $-T_C$: $-\frac{Q_C}{T_C} - \frac{Q_F}{T_C} < 0$
Or on a $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \Rightarrow Q_F\left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C}\right) < 0$.
Avec $T_C > T_F$ on obtient : $Q_F < 0$ le système cède de la chaleur à la source froide
$Q_C > 0$ le système prend de la chaleur à la source chaude.

• Le rendement
Définition : $r = \left|\frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie fournie}}\right|$
Ici $r = \frac{\text{travail moteur}}{\text{énergie thermique}} = \frac{|W|}{Q_c}$

D'après les calculs précédents, on obtient : $r \leq 1 - \frac{T_F}{T_C}$.

Théorème de Carnot:
Toutes les machines réversibles fonctionnant entre deux sources à températures données ont le même rendement : $r_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$.
Toutes machines irréversibles fonctionnant avec ces mêmes sources ont un rendement inférieur.

Le rendement de Carnot $1 - \frac{T_F}{T_C}$ représente la limite théorique qu'il est impossible de dépasser.

Exemples
• Compte tenu des considérations de sécurité et des matériaux pour un réacteur nucléaire :
$T_F = 300K$ (le fleuve) $T_C = 700K$ (le réacteur) $\Rightarrow r_C = 57\%$
Dans la pratique $36\% < r < 46\%$
• Dans le cas d'un moteur de voiture.
$T_F = 300K$ (l'air atmosphérique) $T_C = 3000K$ (combustion des gaz) $\Rightarrow r_C = 90\%$
Dans la pratique r = 35 % pour un moteur à essence, r = 45% pour un moteur Diesel

III.3. Etude de la machine frigorifique

Le but d'une machine frigorifique est de produire du froid.
On s'intéresse donc à la chaleur retirée à la source froide $Q_F > 0$.
La source froide : intérieur du réfrigérateur.
La source chaude : la pièce.

Comme toute machine commerciale on ne parle pas de rendement mais de coefficient d'efficacité:

$$e = \left|\frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie couteuse}}\right|$$

Remarque : alors que le rendement est toujours inférieur à 1, le coefficient d'efficacité est juste positif.

<u>Système</u> : Σ Le fluide.

<u>Energies reçues</u> :
- Un travail W de la part du milieu extérieur
- Un transfert thermique Q_c de la part d'une source chaude à la température T_C.
- Un transfert thermique Q_F de la part d'une source froide à la température T_F.

<u>Transformation</u> : cycle ditherme.

<u>Efficacité</u> : $e = \frac{Q_F}{W}$

<u>Premier principe</u> : Cycle $\Rightarrow \Delta U = W + Q_F + Q_C = 0 \Rightarrow Q_C = - Q_F - W$

<u>Deuxième principe</u> : Cycle $\Rightarrow \Delta S = 0$

<u>Inégalité de Clausius Carnot</u> : $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \Rightarrow Q_F\left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_C}\right) \leq \frac{W}{T_C}$

On en déduit $e \leq \frac{T_F}{T_C - T_F}$

L'efficacité maximale est appelée efficacité de Carnot, elle est obtenue dans le cas de machines réversibles : $e_C = \frac{T_F}{T_C - T_F}$

<u>Exemple</u>

Un réfrigérateur destiné à obtenir un froid de -5°C placé dans une pièce où règne 20°C.
L'efficacité de Carnot : $e_C = 10.7$.
Un réfrigérateur destiné à obtenir un froid de 2°C placé dans une pièce où règne 20°C.
L'efficacité de Carnot : $e_C = 15.2$.
On remarque que plus la température de la source froide est élevée (elle se rapproche de celle de la source chaude) et plus l'efficacité est importante.
Dans la pratique l'efficacité des réfrigérateurs réels varient entre 3 et 5.

III.4. Etude de la pompe à chaleur

On s'intéresse à la chaleur rejetée à la source chaude $Q_C < 0$.
La source froide : extérieur de la pièce.
La source chaude : la pièce.
Le coefficient d'efficacité est alors : $e = - \frac{Q_C}{W}$
Les calculs sont identiques à ceux menés dans le cas de la machine frigorifique..
On obtient un coefficient d'efficacité :$e \leq \frac{T_C}{T_C - T_F}$
L'efficacité maximale est appelée efficacité de Carnot, elle est obtenue dans le cas de machine réversible : $e_C = \frac{T_C}{T_C - T_F}$

<u>Exemple</u>

Sur une documentation technique d'une pompe à chaleur, le fabriquant fournit le tableau suivant :

Température extérieure	-7°C	7°C
Puissance calorifique	9.1 kW	14kW
Puissance absorbée	3.3 kW	3.1 kW
Coefficient de performance	2.8	4.5

Cohérence des résultats ?

Calculons l'efficacité à partir des énergies : $e_1 = 9.1/3.3 = 2.76$ et $e_2 = 14/3.1 = 4.52$

TABLEAU RECAPITULATIF

	Moteur ditherme	Réfrigérateur	Pompe à chaleur
W	< 0	> 0	> 0
Q_C	> 0	< 0	< 0
Q_F	< 0	> 0	> 0
Grandeur valorisable	W	Q_F	Q_C
Grandeur coûteuse	Q_C	W	W
Efficacité ou rendement	$\frac{-W}{Q_C}$	$\frac{Q_F}{W}$	$-\frac{Q_C}{W}$
r_C ou e_C	$1 - \frac{T_F}{T_C}$	$\frac{T_F}{T_C - T_F}$	$\frac{T_C}{T_C - T_F}$

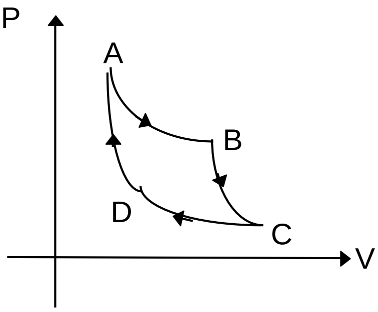
IV. Le cycle de Carnot

IV.1. Cycle de Carnot pour un gaz parfait

IV.1.1. Description du cycle

Un système décrit un cycle de Carnot lorsqu'il échange de la chaleur avec deux sources de chaleur seulement et lorsqu'il subit une transformation quasistatique.
Le cycle est constitué de deux isothermes et de deux adiabatiques.

$A \rightarrow B$ isotherme T_C
$B \rightarrow C$ adiabatique
$C \rightarrow D$ isotherme T_F
$D \rightarrow A$ adiabatique



Le sens de parcours du cycle indique que $W < 0$.
Le cycle est moteur.

IV.1.2. Travail et chaleur reçus au cours du cycle

Système : n moles de Gaz parfait
Equation d'état : $PV = nRT$

$A \rightarrow B$ isotherme T_C — Gaz parfait, première loi de Joule $\Delta U = 0J$
Premier principe $Q_{AB} + W_{AB} = 0$
Isotherme quasistatique $\delta W = - P_{ext}dV = - PdV$

$$W_{AB} = -nRT_C \ln\frac{V_A}{V_B} = -Q_C$$

Q_C représente la chaleur reçue de la source T_C.

$B \rightarrow C$ adiabatique — $Q_{BC} = 0J$
Premier principe $\Delta U = W_{BC} = nc_{VM} (T_F - T_C)$

$C \rightarrow D$ isotherme T_F — de même $W_{CD} = -nRT_F \ln \frac{V_D}{V_C} = -Q_F$
Q_F représente la chaleur reçue de la source T_F.

$D \rightarrow A$ adiabatique — $Q_{DA} = 0J$
Premier principe $\Delta U = W_{DA} = nc_{VM} (T_C - T_F)$.

IV.1.3. Relation entre Q_1 et Q_2

$Q_C = nRT_C \ln\frac{V_B}{V_A}$ et $Q_F = nRT_F \ln\frac{V_D}{V_C} \Rightarrow \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = nR\ln\left(\frac{V_B}{V_A}\,\frac{V_D}{V_C}\right)$

Sur BC $\quad T_1\, V_B^{\gamma-1} = T_2\, V_C^{\gamma-1}$

Sur DA $\quad T_1\, V_A^{\gamma-1} = T_2\, V_D^{\gamma-1} \quad \Rightarrow \frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$

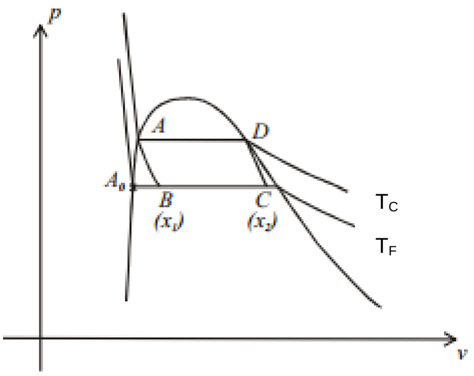
On trouve la relation de Clausius Carnot $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0$

IV.2. Le cycle de Carnot pour un système diphasé

Soit une machine frigorifique.

Système : Σ une unité de masse

$A \rightarrow B$ adiabatique réversible
$B \rightarrow C$ isotherme T_F : vaporisation partielle à pression constante $P_{sat}(T_F)$
$C \rightarrow D$ adiabatique réversible
$D \rightarrow A$ isotherme T_C : liquéfaction totale à pression constante $P_{sat}(T_C)$
Données : $\Delta_{vap}s(T_C)$; $\Delta_{vap}s(T_F)$ et c_L
Diagramme :



Le sens de parcours du cycle indique que W > 0.
• Cherchons les titres en vapeur en B et en C.

$A \rightarrow B$ adiabatique réversible $\Rightarrow s_A = s_B$

$\Rightarrow s_L(T_c) = (1-x_B)\, s_L(T_F) + x_B s_V(T_F)$

$\Rightarrow x_B = \frac{s_L(T_C) - s_L(T_F)}{s_V(T_F) - s_L(T_F)}$

Or $s_L(T_C) - s_L(T_F) = c_L \ln\left(\frac{T_C}{T_F}\right)$ et $s_v(T_F) - s_L(T_F) = \Delta_{vap}s(T_F)$

$\Rightarrow x_B = \frac{c_L}{\Delta_{vap}s(T_F)} \ln\left(\frac{T_C}{T_F}\right)$

$C \rightarrow D$ adiabatique réversible $\Rightarrow s_C = s_D$

Or $s_D - s_A = s_v(T_C) - s_L(T_C) = \Delta_{vap}s(T_C) \Rightarrow s_D = s_L(T_c) + \Delta_{vap}s(T_C)$

et $s_C = (1-x_C)\, s_L(T_F) + x_C s_V(T_F) = s_L(T_F) + x_c \Delta_{vap}s(T_F)$

$\Rightarrow s_L(T_c) + \Delta_{vap}s(T_C) = s_L(T_F) + x_c \Delta_{vap}s(T_F)$

$\Rightarrow x_c = \frac{s_L(T_C) - s_L(T_F) + \Delta_{vap}s(T_C)}{\Delta_{vap}s(T_F)}$

$\Rightarrow x_c = \frac{c_L \ln\left(\frac{T_C}{T_F}\right) + \Delta_{vap}s(T_C)}{\Delta_{vap}s(T_F)}$

Ainsi $x_C - x_B = \frac{\Delta_{vap}s(T_C)}{\Delta_{vap}s(T_F)}$

• Calculons les transferts thermiques

$B \rightarrow C$ isotherme T_F : vaporisation partielle à pression constante $P_{sat}(T_F)$

$Q_F = \Delta H = (x_C - x_B)\Delta_{vap}h(T_F) = \frac{\Delta_{vap}s(T_C)}{\Delta_{vap}s(T_F)}\Delta_{vap}h(T_F)$

Or $\Delta_{vap}h(T_F) = T_F \Delta_{vap}s(T_F)$
et $\Delta_{vap}h(T_C) = T_C \Delta_{vap}s(T_C)$

$\Rightarrow Q_F = \Delta_{vap}h(T_C)\,\frac{T_F}{T_C} = \Delta_{vap}s(T_C).T_F$

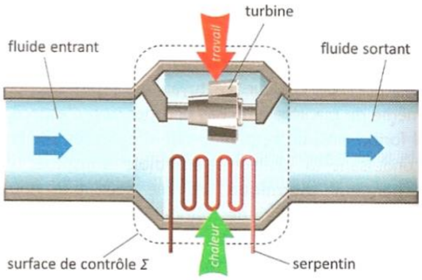
D $\rightarrow$ A isotherme T_C : liquéfaction totale à pression constante $P_{sat}(T_C)$
$Q_C = \Delta H = -\Delta_{vap}h(T_C)$

• Calculons le travail
Premier principe $\Delta U = W + Q_C + Q_F = 0$
D'où $W = -Q_C - Q_F = \Delta_{vap}h(T_C)(1-\frac{T_F}{T_C})$

• Efficacité de la machine
$e = \frac{Q_F}{W} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$

V. Système en écoulement permanent : systèmes ouverts

V.1. Modèle du système ouvert



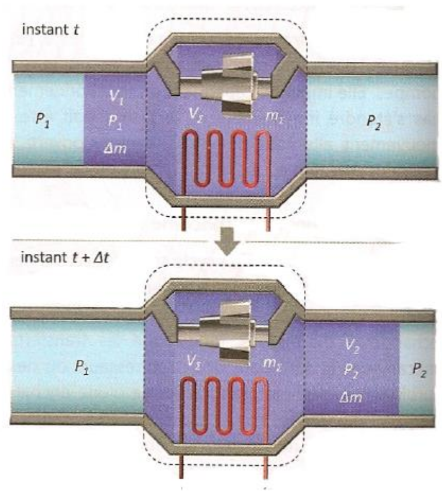
La masse du système (S) varie au cours du temps.
A l'instant t (S) est caractérisé par :
- $K_S(t)$ son énergie cinétique.
- $U_S(t)$ son énergie interne.
- $S_S(t)$ son entropie.
- $M_S(t)$ sa masse.

Ce modèle correspond au cas usuel en thermodynamique.

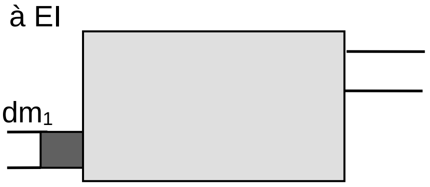
• Les échanges avec l'extérieur durant l'intervalle de temps:
$\rightarrow$ Q chaleur reçue par le système d'une source à la température T_0 : Evolution monotherme.
$\rightarrow$ $W = W_{EXT} + W_{FAA}$ avec W_{EXT} travail des forces extérieures aux fluides (Poids, piston ...) et W_{FAA} travail reçu de la part du fluide situé en amont et en aval.

• Caractérisation du fluide:
$\rightarrow$ Fluide à l'entrée : P_1, T_1, C_1 (vitesse), z_1 (Cote)
$u_1 = dU_1 / dm_1 = U_1 / m_1$ énergie interne massique.
$s_1 = dS_1 / dm_1 = S_1 / m_1$ entropie massique.
$v_1 = V_1 / m_1$ volume massique.
$D_{m1} = dm_1 / dt$ débit massique (masse entrant dans (S) par unité de temps)
$\rightarrow$ Fluide à la sortie : P_2, T_2, C_2, z_2.
u_2, s_2, v_2, D_{m2}.

V.2. Choix du système.

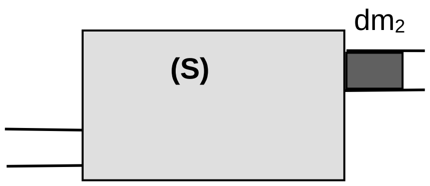


On s'intéresse à l'évolution du système entre t et t + dt.
On note $\mathcal{S}$ le système fermé sur lequel on raisonne.
à EI



$\mathcal{S}(t) = S(t) + \{dm_1\}$

à EF



$\mathcal{S}(t + dt) = S(t + dt) + \{dm_2\}$

$\mathcal{S}(t)$ et $\mathcal{S}(t+dt)$: système fermé contenant les mêmes molécules. On peut donc lui appliquer les principes de la thermodynamique.

V.3. Equation de conservation de la masse.

$\mathcal{S}$ est fermé $\Rightarrow M(\mathcal{S}(t)) = M(\mathcal{S}(t + dt))$

$\Rightarrow M_S(t) + dm_1 = M_S(t + dt) + dm_2$

En régime stationnaire ou en écoulement permanent $M_s(t) = M_s(t+dt)$

$\Rightarrow dm_1 = dm_2$

Soit $D_{m1} = D_{m2}$

Le débit en entrée est égal au débit en sortie

V.4. Le premier principe.

• Système : $\mathcal{S}$

• Le premier principe :

$U_{\mathcal{S}F} = U_{SF} + u_2\, dm_2$ et $U_{\mathcal{S}I}(t) = U_{SI} + u_1\, dm_1$

En écoulement permanent $\Delta U_{\mathcal{S}} = dm_2 u_2 - dm_1 u_1$

Pour simplifier l'étude, on suppose que l'écoulement est suffisamment lent pour pouvoir négliger les variations d'énergie cinétique : $\Delta E_{c\mathcal{S}} = 0$

• Calcul de W_{FAA}.

$W_{FAA} = P_1 v_1 dm_1 - P_2 v_2 dm_2$ (il y a une poussée en entrée et une retenue en sortie)

• Le premier principe :

$dm_2 (u_2 + P_2 v_2) - dm_1 (u_1 + P_1 v_1) = Q + W_{EXT}$.

or $u_i + P_i v_i = h_i$ enthalpie massique du fluide en entrée ou en sortie.

$\Rightarrow dm_2\, h_2 - dm_1 h_1 = Q + W_{EXT}$.

Ainsi le premier principe pour un fluide en écoulement permanent, pour lequel on peut négliger la variation d'énergie cinétique, traversant un dispositif actif à l'intérieur duquel il reçoit, de la part de parties mobiles, un travail massique w_u, et dans lequel il reçoit le transfert thermique massique q :

$$\Delta h = w_u + q$$

VI. Les diagrammes des frigoristes

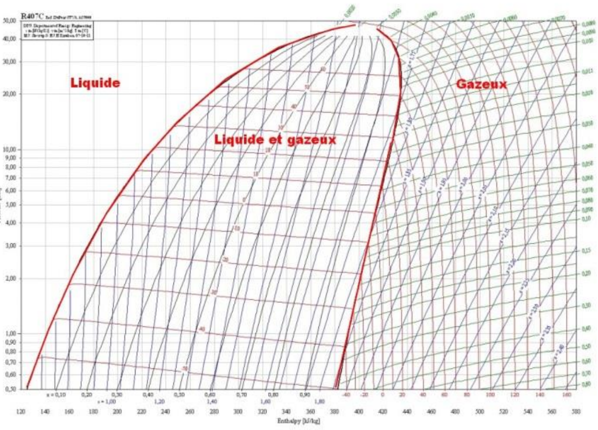
VI.1. Presentation du diagramme

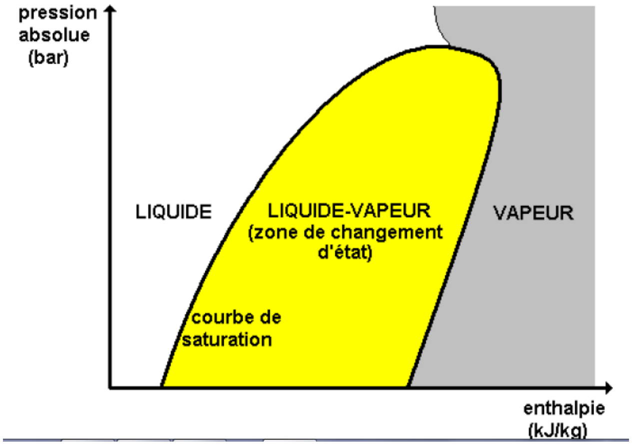
Dans l'univers des pompes à chaleur, on a souvent recours à des diagrammes enthalpiques. Dans ces diagrammes on porte en abscisse l'enthalpie massique et en ordonnée la pression. Pour pouvoir couvrir une plus grandes plage de pressions on utilise verticalement une échelle logarithmique.
Ces diagrammes comportent de nombreuses informations. Généralement, ils donnent l'enthalpie d'un élément (par exemple d'un fluide frigorigène) en fonction de sa pression absolue, et de sa température.

On visualise également son état : liquide, liquide/gazeux, ou gazeux.

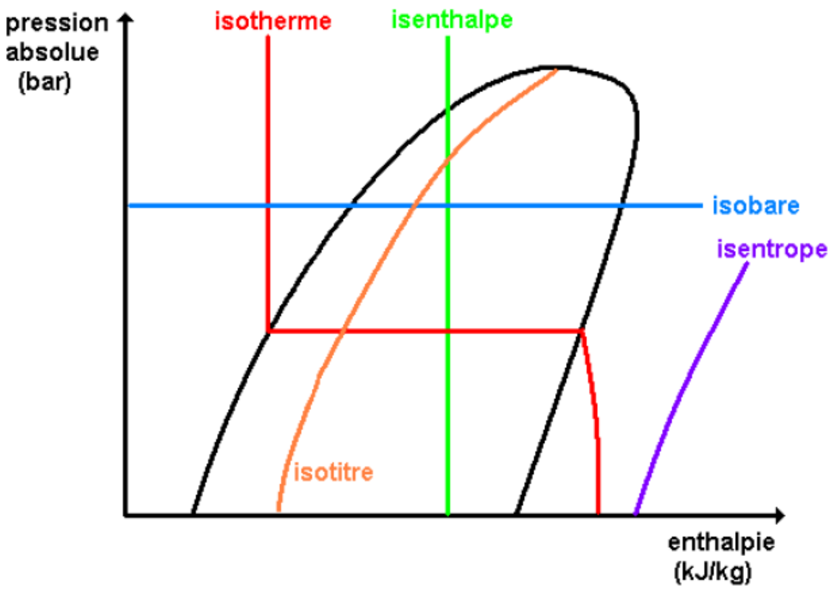
Chaque fluide frigorigène a son diagramme qui permet de suivre l'évolution de ce fluide dans son circuit au cours de son cycle. Il est l'outil indispensable du technicien en énergétique.

• Etat physique
Sur un diagramme enthalpique, on remarque 3 zones, qui correspondent aux différents états du fluide frigorigène.

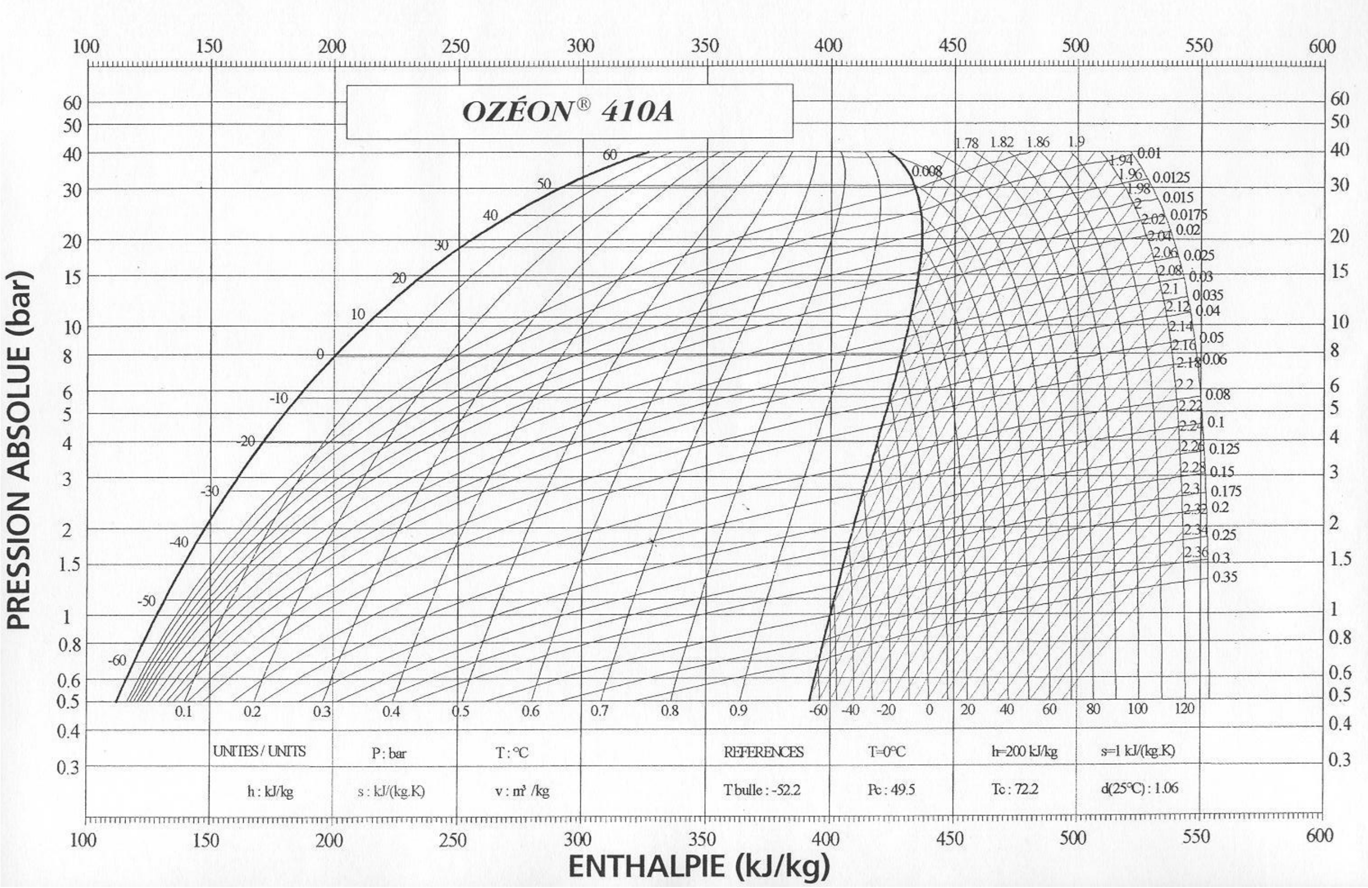




• Les différentes transformations
Le diagramme est constitué de différentes familles de courbe représentant les grandeurs physiques du fluide.
Les principales sont :
→ les **isenthalpiques** : ce sont les droites d'enthalpie massique constante, elles sont verticales.
→ les **isobares** : ce sont les droites de pression constante, elles sont horizontales
→ les **isothermes** : ce sont les courbes de température constante. Dans la zone liquide-vapeur elles sont horizontales, dans la zone du liquide elles sont quasiment verticales, dans la zones du gaz elles sont courbées. Si on a un gaz parfait $\Delta H = f(T)$ on a donc une droite verticale
→ les **isentropes** : ce sont les courbes où la transformation du fluide frigorigène s'effectue de façon réversible et sans échange de chaleur (avec l'extérieur)
→ les **isotitres** : ce sont les courbes de pourcentage de vapeur constant dans la zone liquide-vapeur

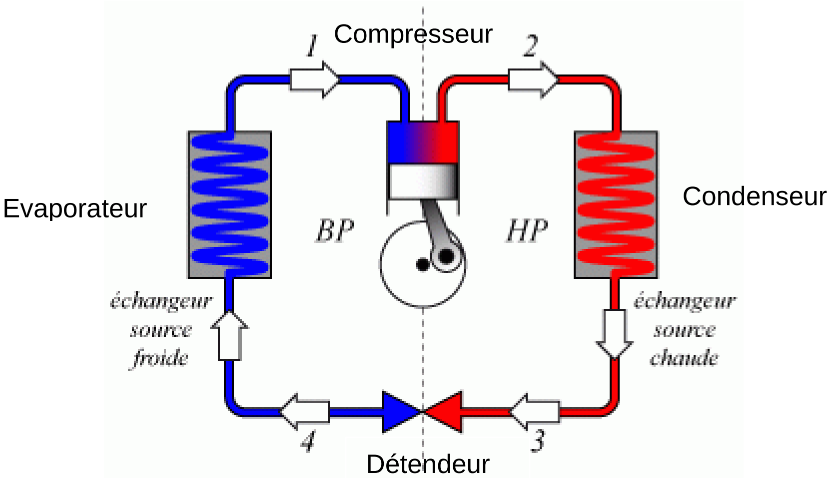


Exemple :



VI.2. Cycle d'une machine frigorifique

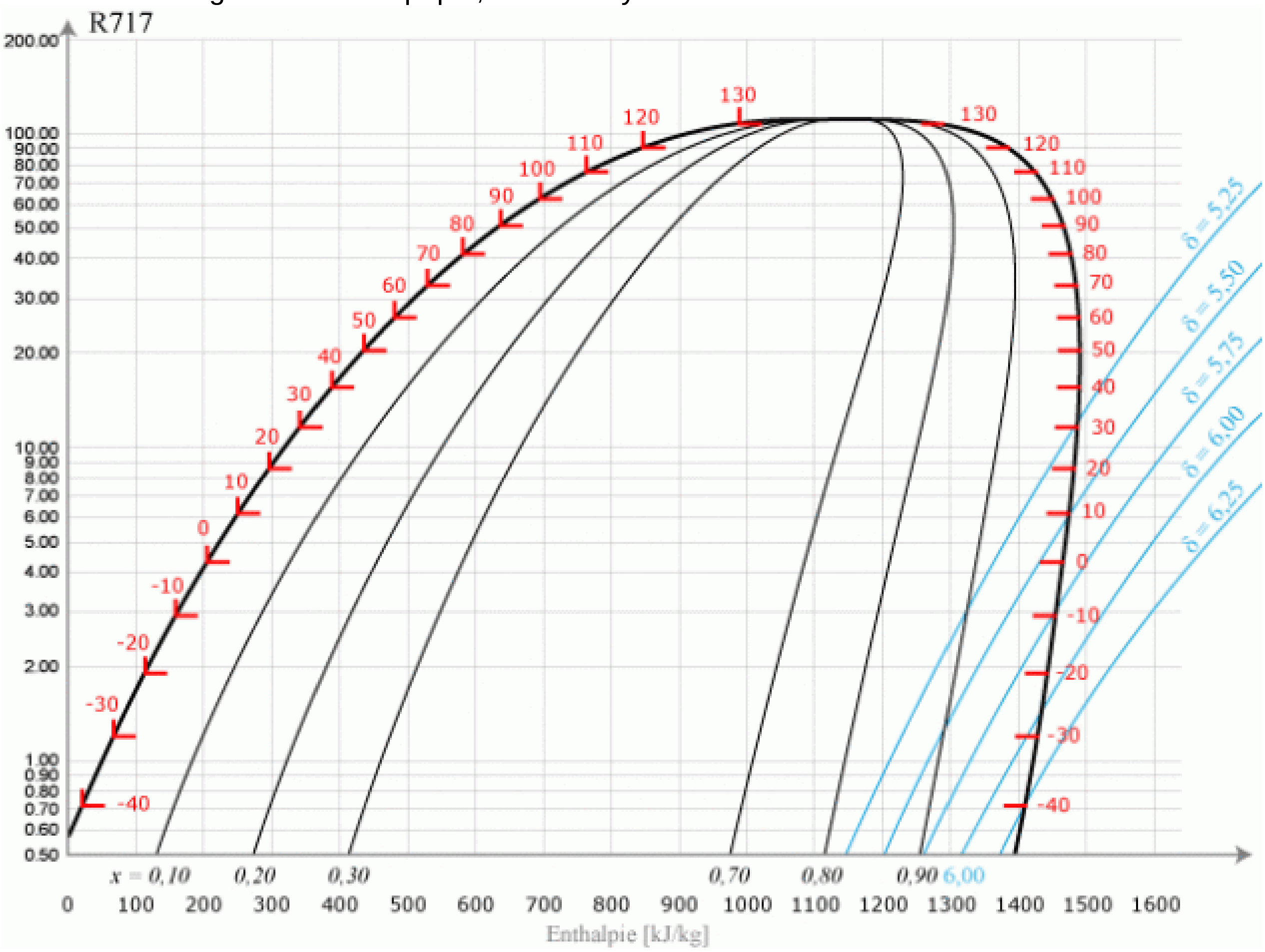
Les systèmes frigorifiques et les pompes à chaleur sont en général des systèmes à condensation dont le principe est représenté ci-dessous. On passe d'une machine frigorifique à une pompe à chaleur en changeant le centre d'intérêt.

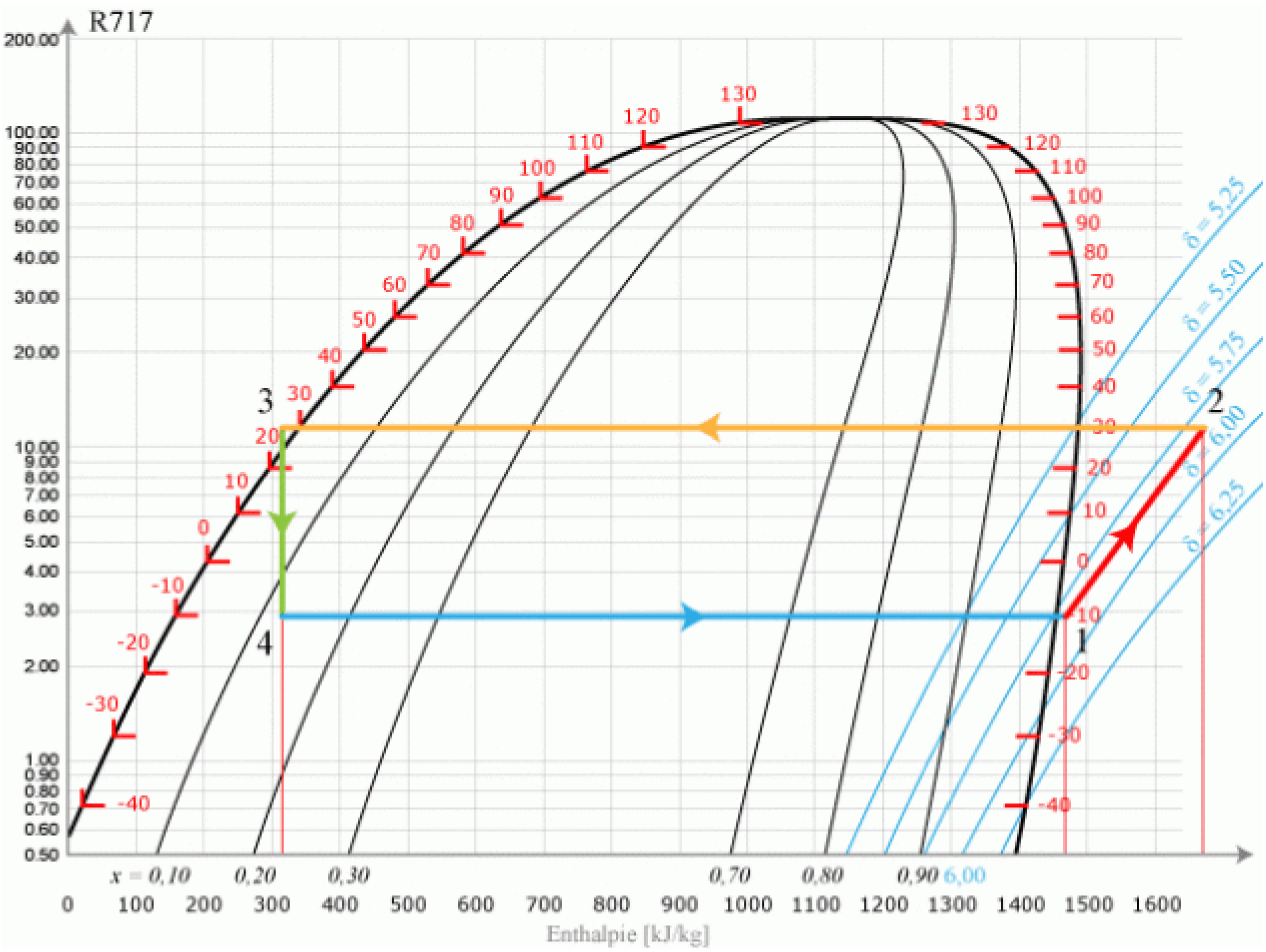


→ Dans le compresseur : le fluide reçoit du travail, il n'y a pas d'échange thermique, la transformation est isentropique.
→ Dans le condenseur : le fluide est en contact avec la source chaude à laquelle il cède un transfert thermique, il est entièrement liquéfié.
→ Dans le détendeur : Le fluide ne reçoit ni travail, ni transfert thermique, sa température s'abaisse de T_C à T_F de façon isenthalpique.
→ Dans l'évaporateur : le fluide est en contact avec la source froide où il reçoit un transfert thermique pour finir de se vaporiser.

On donne $T_C = 30°C$ et $T_F = -10°C$

On donne le diagramme enthalpique, tracer le cycle.





• Travail fourni :
Le travail est fourni au fluide durant la transformation 1-2
Premier principe système ouvert $\Delta h = w_u + q$
Il n'y a pas d'échange thermique $q = 0$
D'où $\Delta h = w_u = h_2 - h_1 = 1680\text{-}1470 = 210$ kJ/kg

• Transfert thermique retiré à la source froide
Premier principe système ouvert $\Delta h = w_u + q$
Il n'y a pas d'apport mécanique $w_u = 0$
D'où $\Delta h = q_F = h_1 - h_4 = 1470\text{-}320 = 1150$ kJ/kg

• Efficacité
$e = \frac{q_F}{w_u} = 5.5$
efficacité de Carnot $e_c = \frac{T_F}{T_C - T_F} = 6.6$
Il y a des phénomènes irréversibles.

TH4 MACHINES THERMIQUES