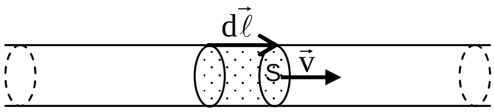
introduction à l'étude des cycles industriels
principe de fonctionnement des principales machines thermiques utilisant un fluide en régime permanent d'écoulement

la plupart des machines industrielles (turbines à gaz, machines frigorifiques à compression ou à absorption, pompes à chaleur, climatiseurs, etc...) fonctionnent en faisant décrire à un fluide, un cycle fermé, au cours duquel se produisent plusieurs (au moins deux !) échanges de chaleur.
Le principe des machines cycliques utilisant un gaz parfait, sera étendu aux machines utilisant un fluide sous deux phases (liquide-vapeur), généralement l'eau pour les moteurs, et divers fluides frigorigènes pour les machines frigorifiques.

1 thermodynamique des fluides en écoulement permanent
1.1débit massique et conservation de la masse

définition du débit massique :
considérons une canalisation dans lequel circule un fluide de masse volumique ρ, éventuellement compressible ;
appelons $\vec{v}$ la vitesse d'écoulement, supposée uniforme en tout point d'une même section
le débit massique est la masse traversant une section donnée par unité de temps: $\boxed{D_m = dm/dt}$

densité de courant de fluide :



entre t et t+dt, la masse dm traversant une section donnée est contenue dans le volume $d\tau = Svdt = Sd\ell$

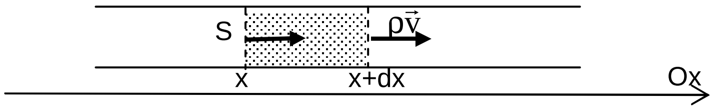
d'où $dm = \rho d\tau = \rho Sd\ell = \rho vSdt$ on en déduit $\boxed{D_m = \dfrac{dm}{dt} = \rho vS}$

expression qui se généralise sous la forme $\boxed{D_m = \dfrac{dm}{dt} = \iint_{\text{Section}} \rho\vec{v}.d^2\vec{S}}$

le débit massique est donc le flux de la "densité de courant de fluide $\rho\vec{v}$

(analogie avec l'électrocinétique $i = \dfrac{dq}{dt} = \iint \rho\vec{v}.d^2\vec{s} = \iint \vec{j}.d^2\vec{s}$ avec $\vec{j} = \rho\vec{v}$)

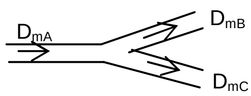
bilan de masse pour le volume compris entre x et x+dx :



en x : $dm_{entrant} = (\rho v)_{(x)}Sdt$ et en x+dx $dm_{sortant} = (\rho v)_{(x+dx)}Sdt$

mais en régime permanent, la masse contenue entre x et x+dx est constante, donc $dm_{entrant} = dm_{sortant}$
d'où $(\rho v)_{(x)} = (\rho v)_{(x+dx)}$ et *le débit massique est conservé pour toute section d'un écoulement permanent.*

dans le cas d' une dérivation on obtient $\boxed{D_{mA} = D_{mB} + D_{mC}}$



remarque : on peut établir dans le cas général une "équation de conservation de la masse" analogue à l'équation de conservation de la charge : $\dfrac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{v}) = 0$ qui conduit bien en régime permanent à

$\text{div}(\rho\vec{v}) = 0$, ou, pour un problème à une dimension $\dfrac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0$ soit $\rho v = cte$ on retrouve bien le résultat précédent.

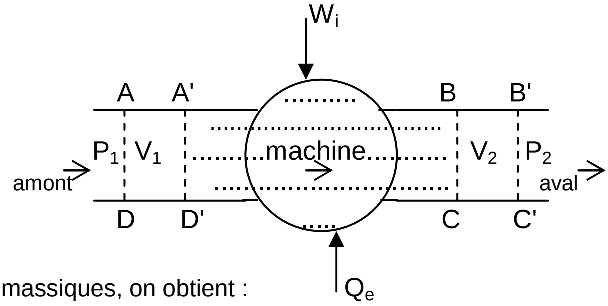
1.2 bilan d'énergie pour un fluide en régime d'écoulement permanent

on s'intéresse à un fluide traversant une machine (compresseur, turbine, échangeur etc...), ne comportant qu'une entrée et une sortie; isolons une partie de fluide limitée par la surface ABCD; le fluide échange :

-un travail des forces de pression en amont et en aval de la machine,
-un travail W_i échangé avec les parties mobiles de la machine, appelé "travail indiqué"
-un transfert thermique Q_e avec l'extérieur;

<u>bilan d'énergie :</u>
en appliquant le premier principe à la masse de fluide comprise dans le volume ABCD, on obtient :

$$U_{A'B'C'D'} - U_{ABCD} = P_1V_1 - P_2V_2 + W_i + Q_e$$



mais en régime permanent, rien ne change dans le volume A'BCD' donc :

$$U_{A'B'C'D'} - U_{ABCD} = U_{BB'C'C} - U_{AA'D'D}$$

en appelant m la masse contenue dans ces derniers volumes (indices 1 et 2) et en introduisant les grandeurs massiques, on obtient :

$mu_2 - mu_1 = mP_1v_1 - mP_2v_2 + mw_i + mq_e$ soit :

$m(u_2 + P_2v_2) - m(u_1 + P_1v_1) = m(w_i + q_e)$ ou encore $\boxed{\Delta h = w_i + q_e}$ où h est l'enthalpie massique du fluide, w_i le travail indiqué massique, et q_e le transfert thermique massique.

(remarque : en tenant compte des énergies cinétique et potentielles, on aboutit à : $\Delta(h + e_c + e_p) = w_i + q_e$

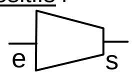
dans la plupart des cas, les variations d'énergie potentielle et cinétique seront négligeables; il faut toutefois en tenir compte si on s'intéresse par exemple à un système présentant de fortes dénivellations (conduite forcée), ou encore une tuyère : pas de travail indiqué, ni d'échange thermique, d'où : $\Delta(h + e_c) = 0$)

<u>expression des puissances</u> :
pour une machine dans laquelle on a un débit massique D_m, la puissance indiquée s'écrira :

$P_i = \dfrac{\delta W_i}{\delta t} = \dfrac{\delta W_i}{\delta m}\dfrac{\delta m}{\delta t} = w_iD_m$ et la puissance du transfert thermique : $P_{th} = \dfrac{\delta Q_e}{\delta t} = \dfrac{\delta Q_e}{\delta m}\dfrac{\delta m}{\delta t} = q_eD_m$

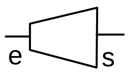
$\boxed{P_i = w_iD_m}$ et $\boxed{P_{th} = q_eD_m}$

<u>applications à différents dispositifs</u> :



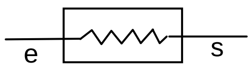
compresseur adiabatique : pas de transfert thermique donc $\boxed{\Delta h = h_s - h_e = w_i}$

le compresseur fournit du travail au fluide, donc w_i, (à prendre en compte dans le rendement), sera positif
de plus, la compression sera très souvent supposée réversible, donc isentropique : $\Delta s = s_s - s_e = 0$



turbine adiabatique : pas de transfert thermique donc à nouveau $\boxed{\Delta h = h_s - h_e = w_i}$

la turbine sert à produire du travail à l'extérieur, donc w_i, sera négatif.
de même, la détente sera très souvent supposée réversible, donc isentropique : $\Delta s = s_s - s_e = 0$

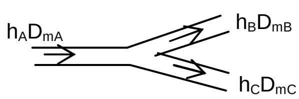


échangeur (chaud ou froid) pas de travail échangé, donc $\boxed{\Delta h = h_s - h_e = q_e}$

le signe de q_e dépendra du type d'échangeur, et du type de machine.

on remarque que *dans tous les cas, il faut calculer la variation d'enthalpie*, le travail des forces de pression $P_1V_1 - P_2V_2$ (ou travail de refoulement du fluide) n'intervenant pas dans le calcul du travail échangé avec l'extérieur.

dérivation : puissance entrante : $h_AD_{mA} = h_A(D_{mB}+D_{mC})$
puissance sortante : $h_BD_{mB}+h_CD_{mC}$



d'où $\boxed{h_A = (h_BD_{mB}+h_CD_{mC}) / (D_{mB}+D_{mC})}$

(relation analogue pour un mélangeur)

2. principe des machines thermiques

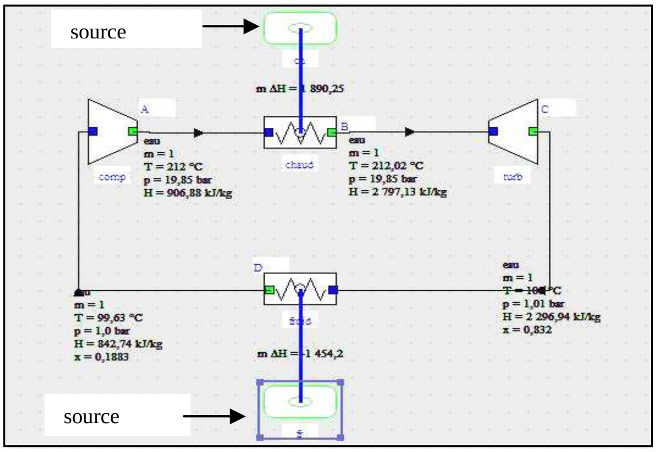
le rendement(ou l'efficacité) d'une machine thermique est le rapport -(énergie utile) / (énergie payante)
pour un moteur, l'énergie utile est le travail fourni, déduction faite du travail prélevé pour assurer le fonctionnement.

2.1. moteur à vapeur condensable

2.1.1.cycle de Carnot

<u>description</u> **:**

l'eau est vaporisée (chaudière ou source chaude, la vapeur se détend ensuite dans une turbine, se condense au contact de la source froide, puis le mélange liquide-vapeur est comprimé pour donner du liquide, et le cycle recommence.



résultats obtenus à partir des deux principes de la thermodynamique

rendement : $\eta = \frac{-W_{tot}}{Q_{ch}}$

rendement théorique : $\eta = 1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}}$

soit : $\eta = \frac{-W_{i,turb} - W_{i,comp}}{Q_{éch.chaud}}$

ce rendement s'exprime ensuite à partir des variations d'enthalpie (voir §1)

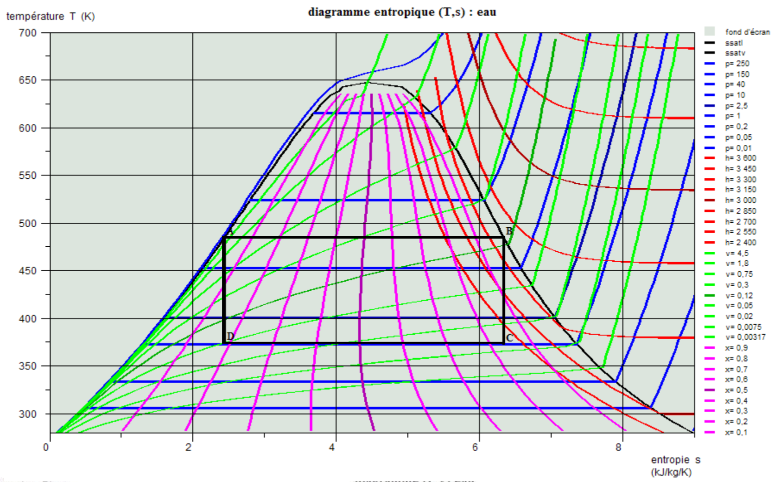
<u>cycle thermodynamique</u>

il est constitué de deux adiabatiques et deux isothermes

c'est donc un rectangle dans le diagramme T-s :

le rendement du cycle s'exprime alors comme le rapport des aires ABCD / ABC'D'

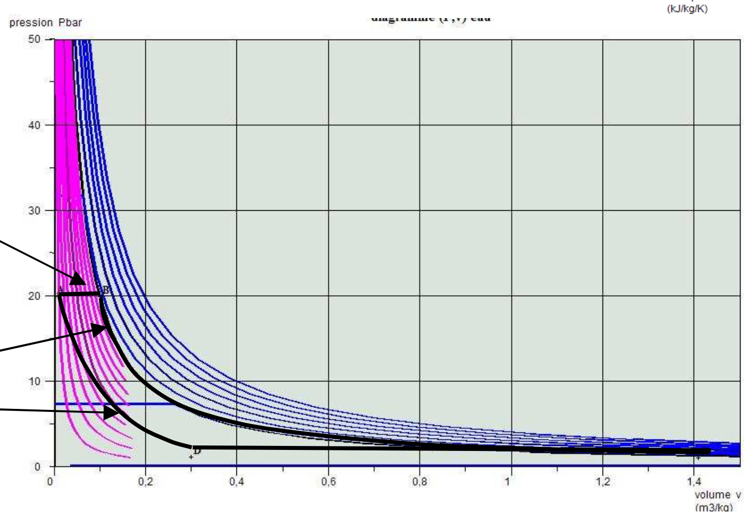
ce cycle peut être amélioré en effectuant une surchauffe isobare de la vapeur (poursuite du chauffage dans la zone sèche), afin que la condensation ne se produise pas au cours de la détente dans la turbine : cycle de Hirn, etc...



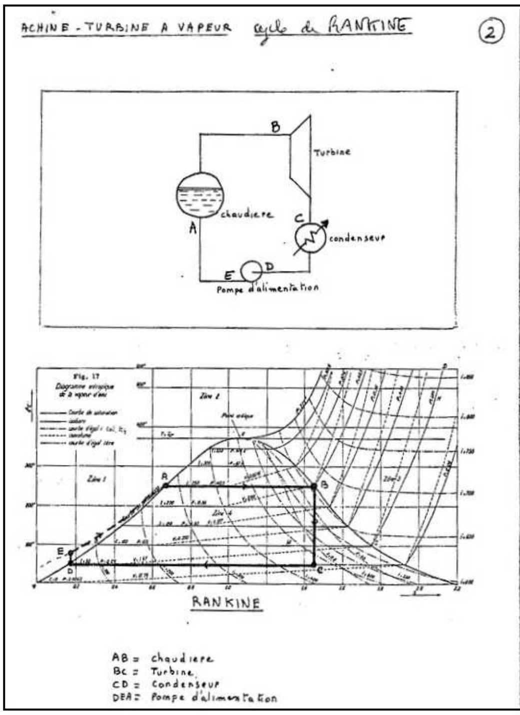
le cycle est difficile à représenter dans un diagramme P-v à l'échelle :

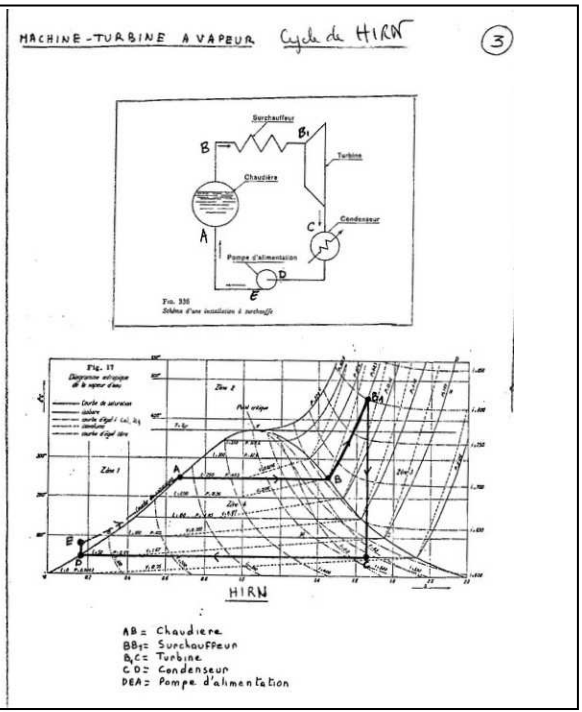
à l'intérieur de la courbe de saturation, les isothermes et les isobares sont confondues (paliers d'équilibre liquide-vapeur)

adiabatiques



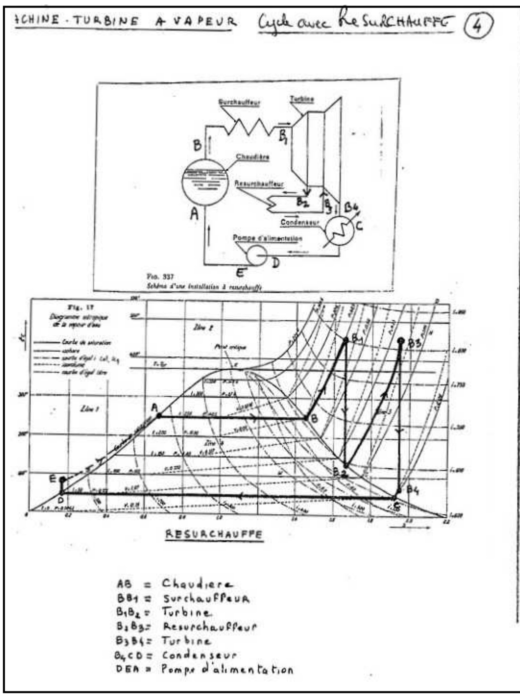
2.1.2. autres cycles :

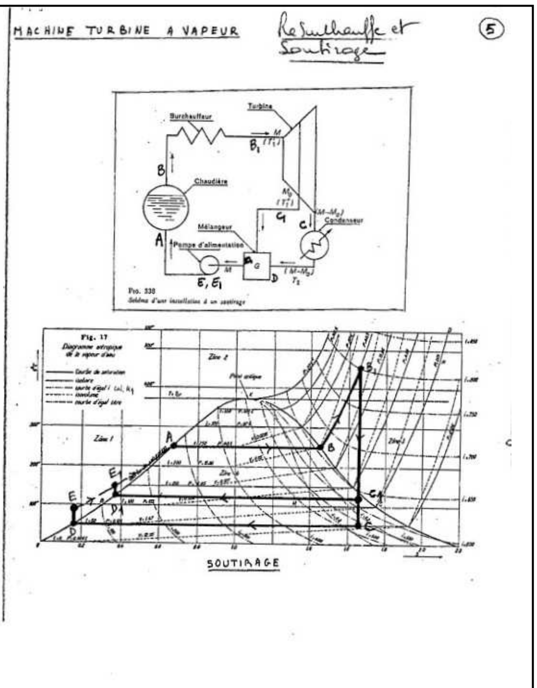




la condensation est poursuivie jusqu'à l'état liquide
compresseur remplacé par une pompe d'alimentation

surchauffe isobare de la vapeur : détente dans le domaine de la vapeur sèche, meilleur fonctionnement de la turbine





resurchauffe pour rester dans le domaine de la vapeur sèche

soutirage et mélangeur: amélioration du rendement

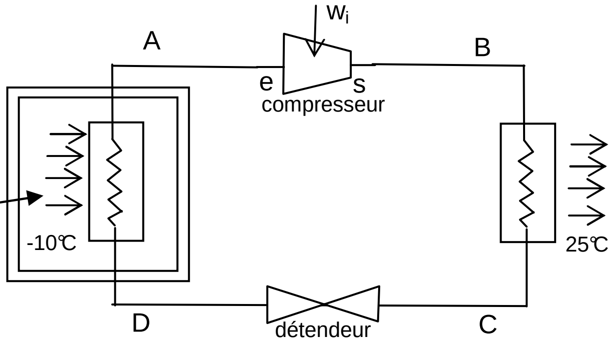
2.2. machine frigorifique à compresseur

description :

<u>réfrigérateur</u> :on désire extraire de la chaleur à la source froide, pour la transférer à une source chaude

le fluide frigorigène à l'état gazeux en A, subit les transformations suivantes :
A-B compression adiabatique
B-C refroidissement isobare, condensation
C-D détente isenthalpique, évaporation partielle
D-A réchauffage isobare, évaporation

compartiment à refroidir



résultats obtenus à partir des deux principes de la thermodynamique:

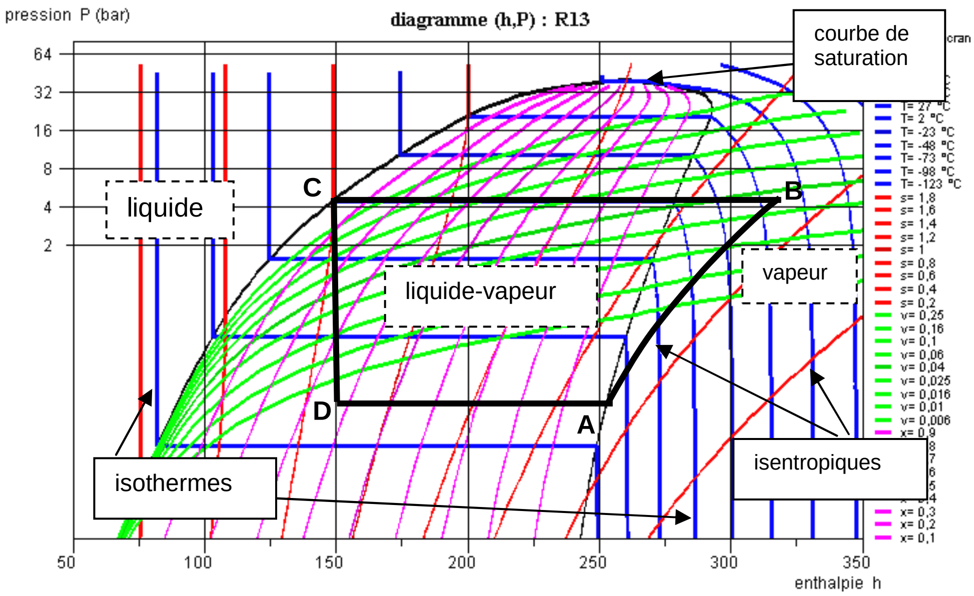
1er principe : $W_{comp} + Q_{fr.} + Q_{ch.} = 0$

2nd principe: $\dfrac{Q_{fr.}}{T_{fr.}} + \dfrac{Q_{ch.}}{T_{ch.}} \leq 0$ efficacité : $\varepsilon = \dfrac{Q_{fr}}{W_{comp}}$ >1

d'où l'expression : : $\boxed{\varepsilon \leq \dfrac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}}}$ expression en fonction des variations d'enthalpie: $\boxed{\varepsilon_{max} = \dfrac{h_A - h_D}{h_B - h_A}}$

cycle thermodynamique

on utilise un diagramme logP-h, dans lequel la courbe de saturation a une forme particulière :



le <u>climatiseur</u> fonctionne sur le même principe, mais avec des températures différentes : la source chaude est le milieu extérieur, à une température de 35℃, et la source froide est le local à refroidir, à une température de 25℃.

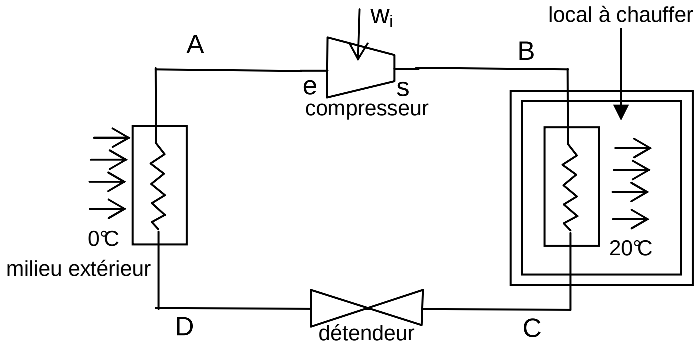
l'efficacité (ou coefficient de performance) est encore obtenue avec les expressions ci-dessus.

2.3 pompe à chaleur

cette fois, le but recherché est différent : on extrait toujours de la chaleur au milieu le plus froid, pour le transférer au milieu le plus chaud, mais c'est ce dernier échange qui nous intéresse.

le fluide frigorigène à l'état gazeux en A, subit les transformations suivantes :

A-B compression adiabatique
B-C refroidissement isobare, condensation
C-D détente isenthalpique, évaporation partielle
D-A réchauffage isobare, évaporation



résultats obtenus à partir des deux principes de la thermodynamique:

1er principe : $W_{comp} + Q_{fr.} + Q_{ch.} = 0$ 2nd principe: $\frac{Q_{fr.}}{T_{fr.}} + \frac{Q_{ch.}}{T_{ch.}} \leq 0$ efficacité : $\varepsilon = \frac{-Q_{ch}}{W_{comp}} > 1$

d'où l'expression : : $\boxed{\varepsilon \leq \frac{T_{ch}}{T_{ch} - T_{fr}}}$ expression en fonction des variations d'enthalpie: $\boxed{\varepsilon_{max} = \frac{h_C - h_B}{h_B - h_A}}$

cycle thermodynamique **:** on utilise encore un diagramme logP-h (voir au-dessus).

2.4 machine tritherme (complément)

certaines machines frigorifiques fonctionnent sans travail extérieur, mais en utilisant 3 sources de chaleur (exemple : machine à absorption, réfrigérateur de camping à gaz ou à pétrole)

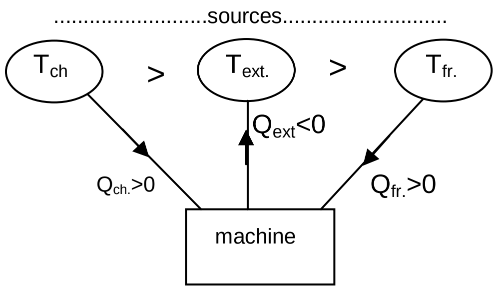
les échanges de chaleur se produisent dans un condenseur et un évaporateur, mais également dans un absorbeur et un bouilleur, où se produisent l'absorption et la désorption d'un fluide caloporteur par un fluide absorbant (ex: eau-bromure de lithium, ou ammoniac-eau) ; nous ne détaillerons pas les échanges complexes se produisant dans une telle machine.
la circulation des fluides se fait par gravité, ou au moyen de pompes de circulation; dans ce cas, le travail est à prendre en compte dans le calcul de l'efficacité.

principe thermodynamique :

source chaude : $Q_{ch.} > 0$

milieu extérieur : $Q_{ext} < 0$

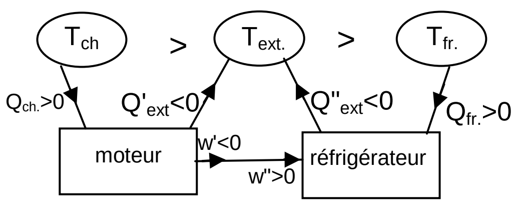
source froide : $Q_{fr.} > 0$



1er principe : $Q_{fr.} + Q_{ext} + Q_{ch.} = 0$ 2nd principe: $\frac{Q_{fr.}}{T_{fr.}} + \frac{Q_{ext.}}{T_{ext}} + \frac{Q_{ch.}}{T_{ch.}} \leq 0$ efficacité : $\varepsilon = \frac{Q_{fr}}{Q_{ch}} > 1$

d'où l'expression : : $\boxed{\varepsilon \leq \left(1 - \frac{T_{ext}}{T_{ch}}\right)\left(\frac{T_{fr}}{T_{ext} - T_{fr}}\right)}$

<u>remarque</u> : on peut envisager d'associer un moteur et un réfrigérateur pour obtenir une machine tritherme :

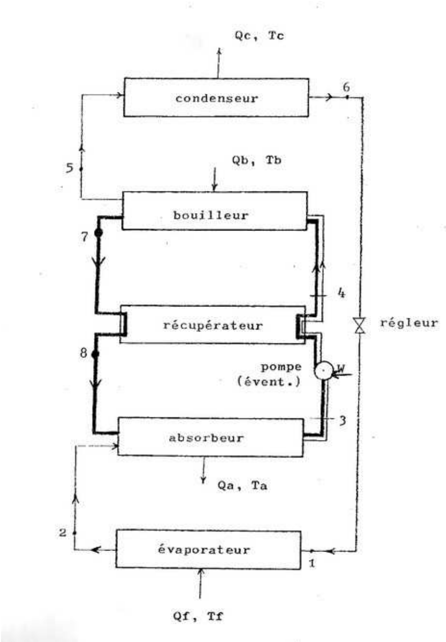


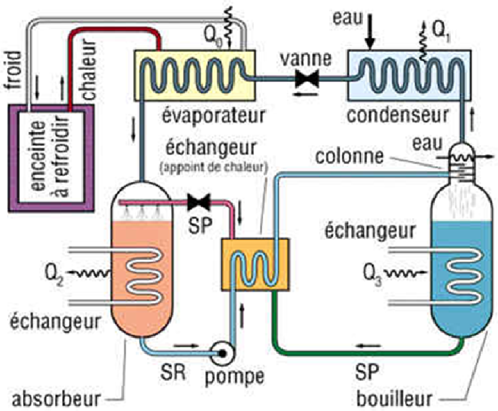
$$\varepsilon' = -\frac{W'}{Q_{ch}} = 1 - \frac{T_{ext}}{T_{ch}}$$

$$\varepsilon'' = \frac{Q_{fr}}{W''} = \frac{T_{fr}}{T_{ext} - T_{fr}}$$

or W' = -W'' on retrouve bien : $\varepsilon = \varepsilon'\varepsilon'' = \frac{Q_{fr}}{Q_{ch}} = \left(1 - \frac{T_{ext}}{T_{ch}}\right)\left(\frac{T_{fr}}{T_{ext} - T_{fr}}\right)$

exemple de machine tritherme à absorption :





Source : Internet Yahoo encyclopédie

couples de fluides possibles

eau	ammoniac
bromure de lithium	eau

fluide caloporteur seul

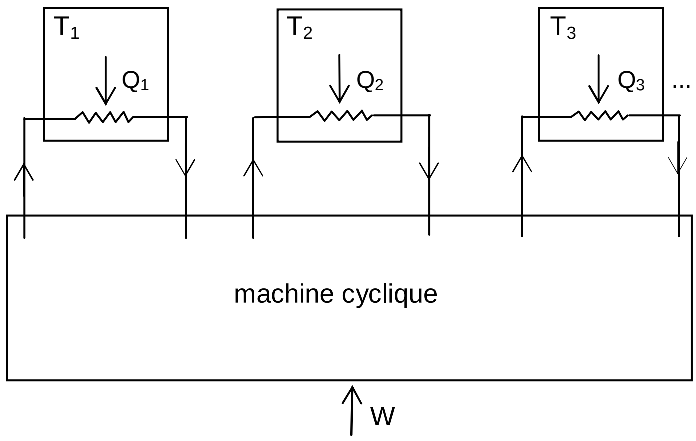
fluide absorbant seul (solution concentrée pauvre en fluide caloporteur)

solution diluée de fluide absorbant (riche en fluide caloporteur)

http://www.lemoniteur.fr/179-innovation-produits/article/solutions-techniques/700799-la-climatisation-solaire-sur-la-rampe-de-lancement

rappel-complément : relation de Clausius

une machine thermique cyclique échange du travail et de l'énergie thermique avec plusieurs sources :



le fluide circulant dans la machine échange de l'énergie thermique (chaleur) avec plusieurs sources (au moins deux) aux températures T_1, T_2, T_3 etc... la variation élémentaire d'entropie du fluide au contact d'une source s'écrit :

$$dS = \frac{\delta Q_e}{T_s} + \delta\sigma$$

où Q_e est le transfert thermique, T_s la température de la surface d'échange en contact avec la source et $\delta\sigma$ la création d'entropie, l'échange étant généralement irréversible.

Si les températures des sources ne varient pas, on obtient pour un cycle $\Delta S_{fluide} = \sum_i \left(\frac{Q_{e,i}}{T_{s,i}} + \delta\sigma_i \right)$

mais $\Delta S_{fluide} = 0$ car la machine est cyclique. On obtient ainsi : $\boxed{\sum_i \frac{Q_{e,i}}{T_{s,i}} = -\sum_i \delta\sigma_i \leq 0}$ ou $\boxed{\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_2} \leq 0}$

(nul si réversible) Cette relation est appelée inégalité de Clausius, et sera utilisée pour le calcul des rendements par exemple :

-<u>moteur thermique ditherme</u> pour un cycle: 1^{er} principe : $W_{tot.} + Q_{fr.} + Q_{ch.} = 0$ 2^{nd} principe: $\frac{Q_{fr.}}{T_{fr.}} + \frac{Q_{ch.}}{T_{ch.}} \leq 0$

rendement : $\boxed{\eta_{max} = \frac{-W_{tot.}}{Q_{ch}} = \frac{Q_{ch} + Q_{fr.}}{Q_{ch}} = 1 - \frac{T_{fr.}}{T_{ch.}}}$ <1

-<u>machine frigorifique</u> pour un cycle : 1^{er} principe : $W_{comp} + Q_{fr.} + Q_{ch.} = 0$ 2^{nd} principe: $\frac{Q_{fr.}}{T_{fr.}} + \frac{Q_{ch.}}{T_{ch.}} \leq 0$

efficacité : $\varepsilon = \frac{Q_{fr}}{W_{comp}} = \frac{Q_{fr}}{-Q_{fr} - Q_{ch}} = \frac{1}{-1 - \frac{Q_{ch}}{Q_{fr}}} = \frac{1}{-1 + \frac{T_{ch}}{T_{fr}}}$ >1 d'où l'expression : : $\boxed{\varepsilon \leq \frac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}}}$

-<u>machine tritherme à absorption:</u>

pour un cycle : 1^{er} principe : $Q_{fr.} + Q_{ext} + Q_{ch.} = 0$ 2^{nd} principe: $\frac{Q_{fr.}}{T_{fr.}} + \frac{Q_{ext.}}{T_{ext}} + \frac{Q_{ch.}}{T_{ch.}} \leq 0$

efficacité : $\varepsilon = \frac{Q_{fr}}{Q_{ch}}$ >1 d'où l'expression : : $\boxed{\varepsilon \leq \left(1 - \frac{T_{ext}}{T_{ch}}\right)\left(\frac{T_{fr}}{T_{ext} - T_{fr}}\right)}$

-<u>sources de capacités thermiques finies C_1 et C_2, à températures variables de valeurs initiales $T_{1,0}$ et $T_{2,0}$</u> :

cette fois, au cours d'un cycle, l'échange thermique est élémentaire et s'écrit par exemple $\delta Q_1 = -C_1 dT_1$, $\delta Q_2 = -C_2 dT_2$

etc.. pour un moteur ditherme la relation de Clausius devient $\frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} = \frac{-C_1 dT_1}{T_1} + \frac{-C_2 dT_2}{T_2} \leq 0$

qui s'intègre dans le cas réversible en $C_1 \mathrm{Ln}\frac{T_{1,f}}{T_{1,0}} + C_2 \mathrm{Ln}\frac{T_{2,f}}{T_{2,0}} = 0$ ou $\mathrm{Ln}\frac{(T_{1,f})^{C_1}(T_{2,f})^{C_2}}{(T_{1,0})^{C_1}(T_{2,0})^{C_2}} = 0$

le moteur s'arrête lorsque $T_{1,f} = T_{2,f} = T_f$ donnée par la relation $\boxed{(T_f)^{C_1+C_2} = (T_{1,0})^{C_1}(T_{2,0})^{C_2}}$ (d'où Q_1, Q_2 et W)