

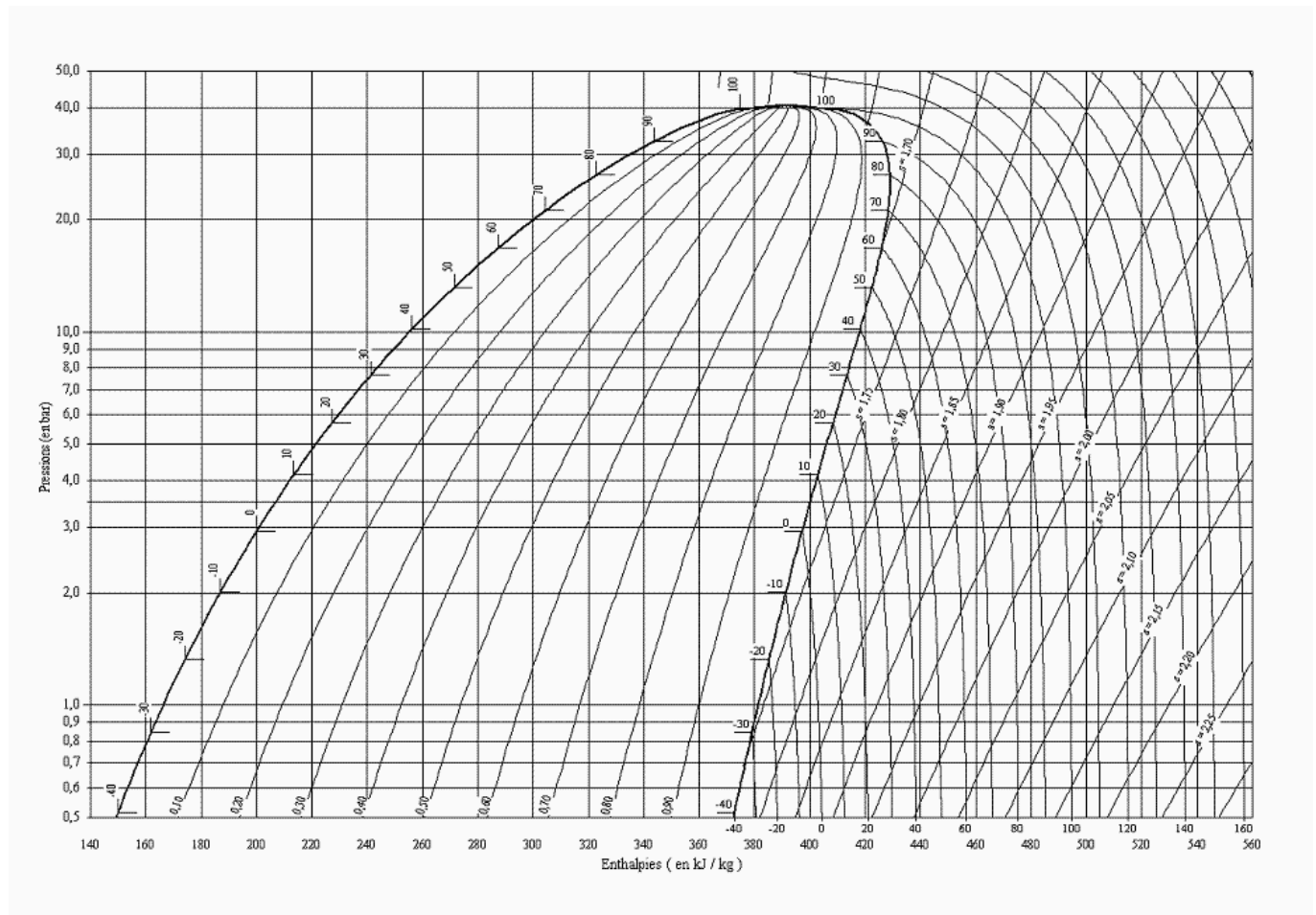
Chapitre th2 : les machines industriels

Ce chapitre porte sur l'étude des machines dithermes telles que le réfrigérateur, les pompes à chaleur ou les moteurs. Dans ces machines, un fluide se déplace dans un circuit fermé, ce fluide subit des transformations cycliques, au cours desquelles il échange du travail et des transferts thermiques avec les différents systèmes qu'il traverse (échangeur thermique, compresseur, turbine...). Au cours des transformations, ce fluide change d'état, on le rencontre à l'état liquide et à l'état gazeux.

Dans ce cours, nous allons donc:

- faire des révisions sur les changements d'état liquide-vapeur
- apprendre à utiliser un diagramme enthalpique (diagramme utilisé dans l'industrie pour faire des bilans d'énergie sur des fluides réels)
- démontrer le premier principe industriel qui est le principe de conservation de l'énergie appliquée au fluide en écoulement (système ouvert)
- réaliser des bilans d'énergie sur des machines dithermes dans le diagramme enthalpique.

I. Utilisation d'un diagramme enthalpique



Identifier les domaines d'existence (liquide, vapeur, liquide-vapeur), courbe de rosée, courbe d'ébullition et point critique. Tracer les isothermes -30°C et 40°C , l'isenthalpique 420 kJ.kg^{-1} , l'isentropique $2,00 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, l'isotritre 0,20, et l'isobare 2 bar.

A l'équilibre, liquide-vapeur, quelle est la particularité des isothermes? *ce sont aussi des isobares.*

Les changements d'état sont des transformations isobares et isothermes.

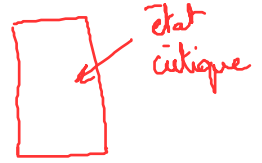
ex: évaporation pour faire cuire des pâtes : $P = 1 \text{ atm}$ $T_{\text{ébull}} = 100^{\circ}\text{C}$

Qu'est-ce que le point critique ? On lit $P_c = 40 \text{ bar}$ et $T_c = 180^\circ\text{C}$
 Pour $P > P_c$ et $T > T_c$, on ne peut plus distinguer les phases liquide et vapeur,
 car elles ont les mêmes propriétés physiques notamment la même volume

$P < P_c$ et $T < T_c$



$P > P_c$ $T > T_c$



Calculer l'enthalpie massique de vaporisation à 50 degrés Celsius. notée $h_{\text{vap}}(50^\circ\text{C})$ ou $\Delta h_{\text{vap}}(50^\circ\text{C})$
 la vaporisation est le passage de l'état liquide à l'état vapeur ; l'enthalpie de vaporisation est une variation d'enthalpie.

$$h_{\text{vap}}(50^\circ\text{C}) = \underbrace{h_v(50^\circ\text{C})}_{\text{enthalpie de la vapeur saturante}} - \underbrace{h_l(50^\circ\text{C})}_{\text{enthalpie du liquide saturant}} = 425 - 270 = 155 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Calculer l'enthalpie massique de vaporisation à 20 degrés Celsius.

$$\Delta h_{\text{vap}}(20^\circ\text{C}) = h_{\text{vap}}(20^\circ\text{C}) = h_v(20^\circ\text{C}) - h_l(20^\circ\text{C}) = 410 - 230 = 180 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Où la T est élevée et - il faut apporter d'énergie pour vaporiser un liquide

Calculer l'enthalpie massique de liquéfaction à 20 degrés Celsius.

On réalise depuis l'état initial $P_i = 20 \text{ bar}$ et $t_i = 90^\circ\text{C}$, différentes transformations jusqu'à la pression $P_f = 2 \text{ bar}$. Pour chacune des transformations placer l'état final sur le diagramme, lire la température finale, calculer la variation d'enthalpie massique et la variation d'entropie massique.

Transformation isotherme :

Transformation adiabatique et réversible :

Transformation isenthalpique :

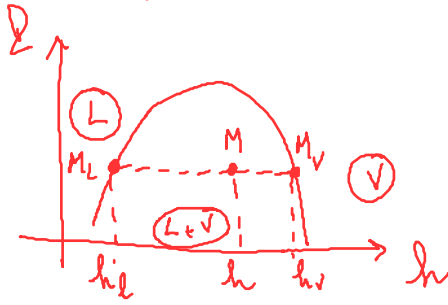
Quelle est la particularité de l'enthalpie d'un GP ? En déduire sur le diagramme, la zone où le gaz peut être assimilé à un GP.

l'enthalpie d'un GP ne dépend que de la température, les isenthalpiques sont donc confondues avec les isothermes

Lire sur le diagramme, les fractions massiques en vapeur x_v et en liquide x_l à la pression de 4 bars et pour une enthalpie massique de 240 kJ/kg . Vérifier ce résultat par le théorème des moments.

Sur la courbe d'ébullition $x_l = 1$ $x_v = 0$

la courbe de rosée $x_v = 1$ $x_l = 0$



$$x_v = \frac{M_L M_L}{M_L M_V}$$

(Vérification de la formule :
si $M = M_V$: $\frac{M_V M_L}{M_V M_L} = x_v = 1$)

le rapport $\frac{M_L M_L}{M_L M_V}$ peut se calculer à la règle ou avec les enthalpies : $x_v = \frac{h - h_L}{h_L - h_V}$

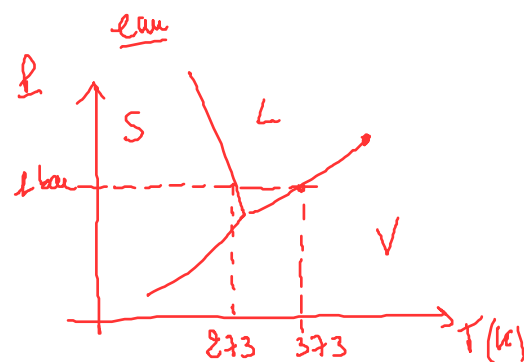
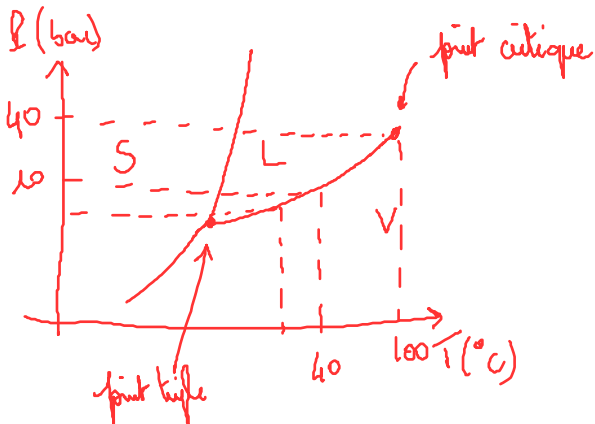
$$x_l = \frac{M_V M}{M_L M_V}$$

$$x_l + x_v = 1$$

Lire à 20°C l'enthalpie massique de la vapeur saturante et du liquide saturant ainsi que l'entropie massique de la vapeur saturante. Déduire de l'identité thermodynamique $dS = \frac{dH}{T} + \frac{VdP}{T}$, l'entropie massique du liquide saturant à 20 degrés Celsius.

On réalise la détente adiabatique et réversible de la vapeur de l'état $P_1 = 10 \text{ bar}$ et $t_1 = 120^\circ\text{C}$, jusqu'à l'état $P_2 = 2 \text{ bar}$ et t_2 . Lire t_2 . Retrouver t_2 en faisant l'hypothèse que le gaz est parfait et a pour coefficient isentropique $\gamma = 1,12$.

Représenter l'allure du diagramme d'état de ce corps. Ajouter sur ce diagramme les coordonnées de 3 points de votre choix. Donner également le diagramme d'état de l'eau.



Remarque: dans certains exercices, l'énoncé ne fournit pas le diagramme enthalpique mais un tableau de la forme suivante:

P (bar)	T (K)	h_l (kJ.kg ⁻¹)	h_v (kJ.kg ⁻¹)	s_l (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	s_v (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
5 bar	288	226	390		

Compléter le tableau pour $P = 5$ bar. A partir du tableau, calculer:

L'enthalpie massique de vaporisation à 5 bar:

L'enthalpie massique du fluide de fraction massique de liquide $x_l = 0,3$:

$$h = x_l h_l + x_v h_v = 0,3 \times \quad + 0,7 \times$$

L'entropie massique du fluide de fraction massique de vapeur $x_v = 0,7$:

La fraction massique de vapeur d'un fluide d'enthalpie massique $h = 380$ kJ.kg⁻¹:

$$x_v = \frac{M_L M}{M_L M_V} = \frac{h - h_l}{h_v - h_l} =$$

La fraction massique de liquide d'un fluide d'enthalpie massique $h = 460$ kJ.kg⁻¹: $> h_v$

$$x_l = 0 \quad x_v = 1$$

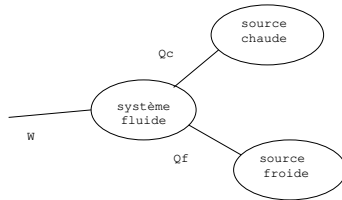
II. Les machines dithermes

Le fluide effectue des transformations cycliques au cours desquelles il échange les énergies thermiques Q_c et Q_f avec les sources chaude et froide, et le travail W . Les grandeurs W , Q_c et Q_f correspondent à un cycle du fluide. Une énergie échangée est positive quand elle est et négative quand elle est

Application du 1er principe au fluide sur un cycle:

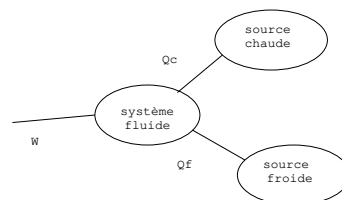
Application du 2nd principe au fluide sur un cycle:

* Les machines motrices:



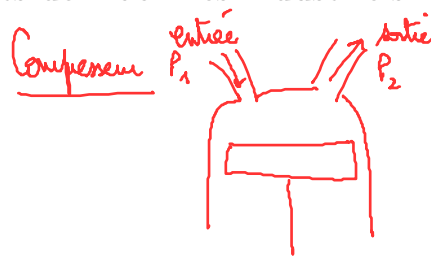
Rendement :

* Les machines réceptrices :



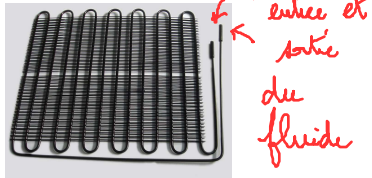
Efficacité d'une machine frigorifique et d'une PAC:

III. Exemple de composants de machines industriels

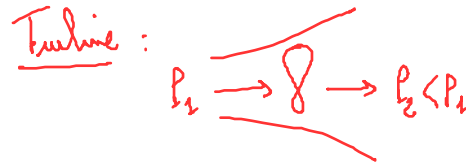


le compresseur contient un piston mobile qui comprime le gaz
 $P_2 > P_1$

$W_{\text{gaz}} > 0$ (le gaz reçoit du travail)



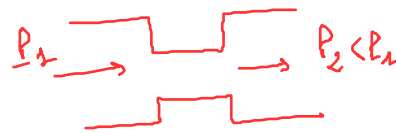
Echangeur thermique : c'est un "tuyau" long sans pièces mobiles qui permet des échanges thermiques entre le fluide et le milieu extérieur
 $T_1 \longrightarrow T_2$



le gaz sous pression fait tourner l'hélice de la turbine
 $W_{\text{gaz}} < 0$ (le gaz fournit du travail)

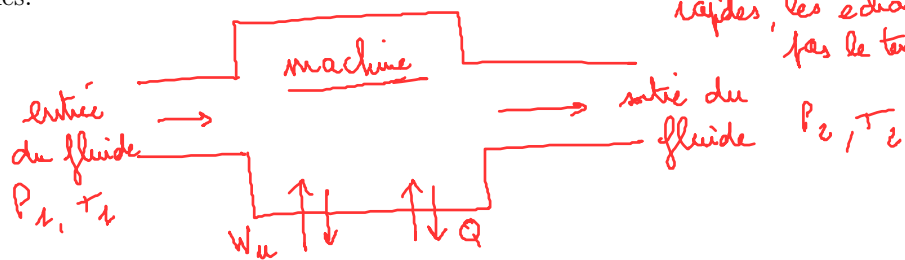


Détendeur : il ne comprend pas de pièces mobiles



Re dans les énoncés, on nous dit que le compresseur, le détendeur et la turbine sont adiabatiques les transf. sont rapides, les échanges thermiques n'ont pas le temps de se faire

Modélisation de ces systèmes:



IV. Premier principe industriel

Notations et modèle:

h représente l'enthalpie massique ($[h] = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

v représente le volume massique ($[v] = \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)

u représente l'énergie interne massique ($[u] = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

c est la vitesse du fluide

$$[c] = \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

z est l'altitude du fluide (axe Oz vertical ascendant) $[z] = \text{m}$

D_m est le débit massique ($[D_m] = \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Au sujet de l'enthalpie:

$dh = c_p dT$ pour un gaz
 c_p capacité thermique molaire à pression constante

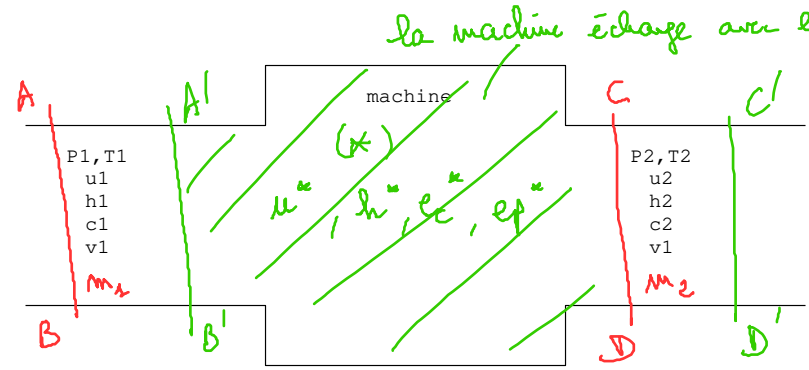
$dh = c dT$ pour un liquide ou un solide : c capacité thermique molaire

$$[c_p] = [c] = \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\boxed{P_m = \dot{m} \times w_u}$$

$$\begin{matrix} \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ W & \text{kg s}^{-1} & \text{J kg}^{-1} \end{matrix}$$

$$\boxed{P_k = \dot{m} \times q}$$



la machine échange avec le fluide le travail utile mécanique w_u et le transfert thermique q

puissance thermique P_k
puissance mécanique utile P_m

Système étudié: on étudie le système fermé et mobile compris entre AB et CD à t
A'B' et C'D' à $t + dt$

Conservation de la masse: $m_{ABCD}(t) = m_{A'B'C'D'}(t + dt)$

régime stationnaire $\downarrow$ $m^*(t) + m_{ABA'B'} = m^*(t + dt) + m_{CDC'D'}$

on note :

$$\boxed{m_1 = m_2 = \dot{m} dt}$$

Conservation de l'énergie: on applique le 1^{er} principe au système fermé et mobile

$$dU + dE_c + dE_p = \delta W + \delta Q$$

avec $dU = U_{A'B'C'D'}(t + dt) - U_{ABCD}(t) = U^*(t + dt) + U_2 - U^*(t) - U_1$

$$= \dot{m} dt (u_2 - u_1)$$

$$dE_m = E_{m,A'B'C'D'}(t + dt) - E_{m,ABCD}(t) = E_{m^*}(t + dt) + E_{m2} - E_{m^*}(t) - E_{m1}$$

$$= \frac{1}{2} dt \dot{m} C_2^2 + \dot{m} dt g z_2 - \dot{m} dt \frac{C_1^2}{2} - \dot{m} dt g z_1$$

$$\delta W = P_m dt - P_1(0 - v_1) - P_2(v_2 - 0)$$

$$= P_m dt + P_1 v_1 - P_2 v_2 = P_m \times dt + P_1 \dot{m} dt v_1 - P_2 \dot{m} dt v_2$$

$$\delta Q = P_k dt$$

d'où $\dot{m} dt (u_2 - u_1 + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2} + g z_2 - g z_1) = (P_k + P_m + \dot{m} (-P_2 v_2 + P_1 v_1)) dt$

$$\dot{m} (u_2 + P_2 v_2 - (u_1 + P_1 v_1) + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2} + g z_2 - g z_1) = P_k + P_m$$

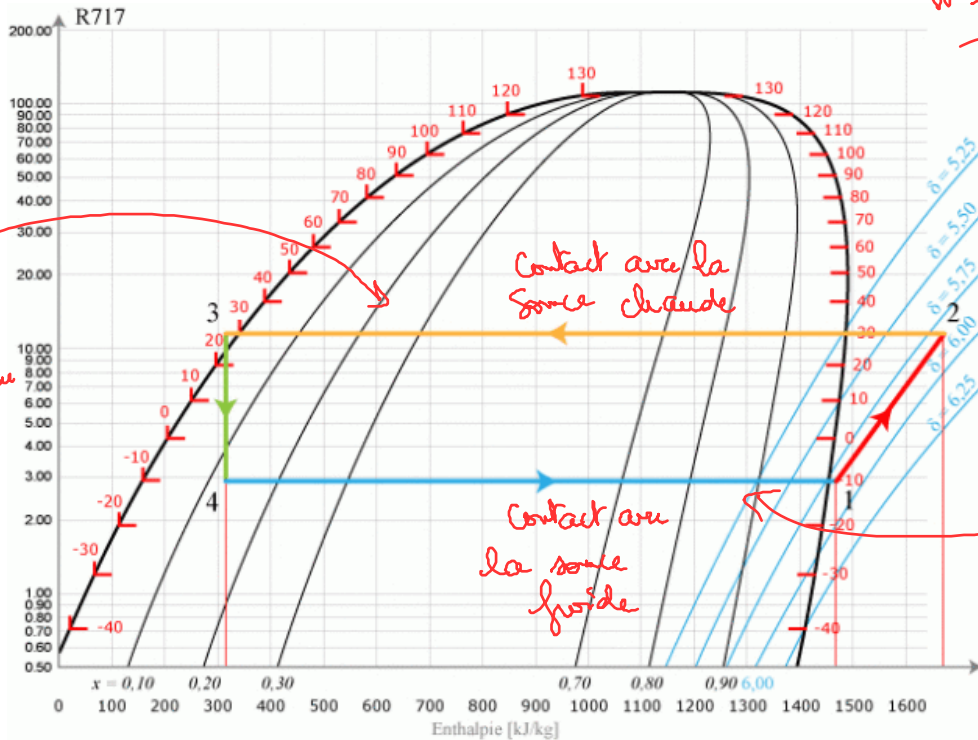
$$\boxed{\dot{m} (h_2 - h_1 + e_{c2} - e_{c1} + e_{p2} - e_{p1}) = P_k + P_m}$$

ou $h_2 - h_1 + e_{c2} - e_{c1} + e_{p2} - e_{p1} = w_u + q$

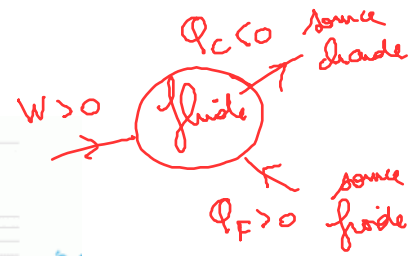
ou $\left\{ \begin{array}{l} P_k = q \times \dot{m} \\ P_m = w_u \times \dot{m} \end{array} \right.$

$$e_c = \frac{C^2}{2} \quad e_p = g z \text{ (pour } g \text{ vertical ascendant)}$$

V. Exemple de machine réceptrice avec changement d'état



ici le fluide est plus chaud que la source chaude, il cède de l'énergie à la source chaude et se condense



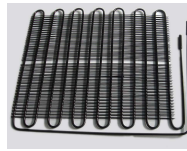
ici le fluide est + froid que la source froide il reçoit de l'énergie et se vaporise

Identifier les transformations du cycle et les associer au composant concerné:

Compresseur : 1-2 : *adiabatique réversible*
 $\Delta h_{1-2} = w_{u12} + q_{12}$
 $w_{u12} = h_2 - h_1$
 $= 1700 - 1450$
 $= 250 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} > 0$



Condenseur : 2-3 *isobare pas de pièce mobile*
 $\Delta h_{23} = w_{u23} + q_{23}$
 $q_{23} = h_3 - h_2 = 300 - 1700$
 $= -1400 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} < 0 = q_c$



Détendeur : 3-4 : *adiabatique sans pièce mobile*
 $\Delta h_{34} = 0$



Evaporateur : 4-1 : *pas de pièce mobile*
 $\Delta h_{41} = w_{u41} + q_{41}$
 $q_{41} = h_1 - h_4 = 1450 - 300$
 $= 1150 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} > 0 = q_F$



Schéma des échanges d'énergie dans une machine réceptrice:

Transfert thermique avec la source froide:

$$q_F = q_{41} = 1150 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} > 0$$

Transfert thermique avec la source chaude:

$$q_C = q_{23} = -1400 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} < 0$$

Travail utile:

$$w_u = 250 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} > 0$$

$$w_u + q_C + q_F = 0 \quad (\text{cycle})$$

Efficacité de la PAC associée:

$$e_{PAC} = \frac{-q_c}{W_m} = \frac{1400}{250} \approx 6$$

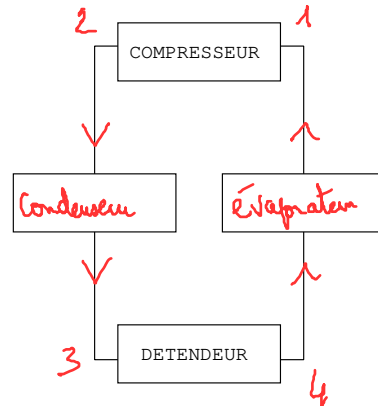
Efficacité du climatiseur associé :

$$e_{clim} = \frac{q_F}{W_m} = \frac{1150}{250} \approx 5$$

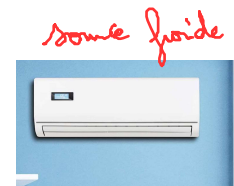
Calculer le débit massique du fluide pour un compresseur qui fournit une puissance mécanique de 1 kW:

$$\dot{Q}_m = \dot{D}_m \times W_m = \dot{D}_m \times W_{12} \Rightarrow \dot{D}_m = \frac{10^3}{250 \cdot 10^3} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$$

Retour sur le cycle décrit par le fluide dans un climatiseur

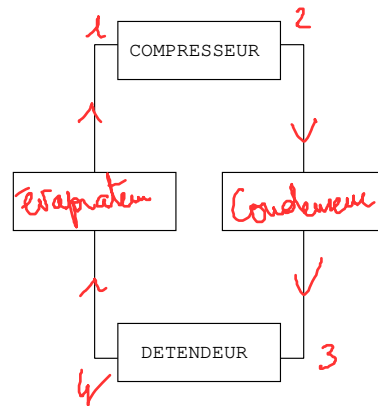


le fluide



le fluide prend du transfert thermique à la source froide pour la maintenir froide $\Rightarrow$ il se refroidit du transfert thermique et se vaporise

Retour sur le cycle décrit par le fluide dans la PAC



source froide

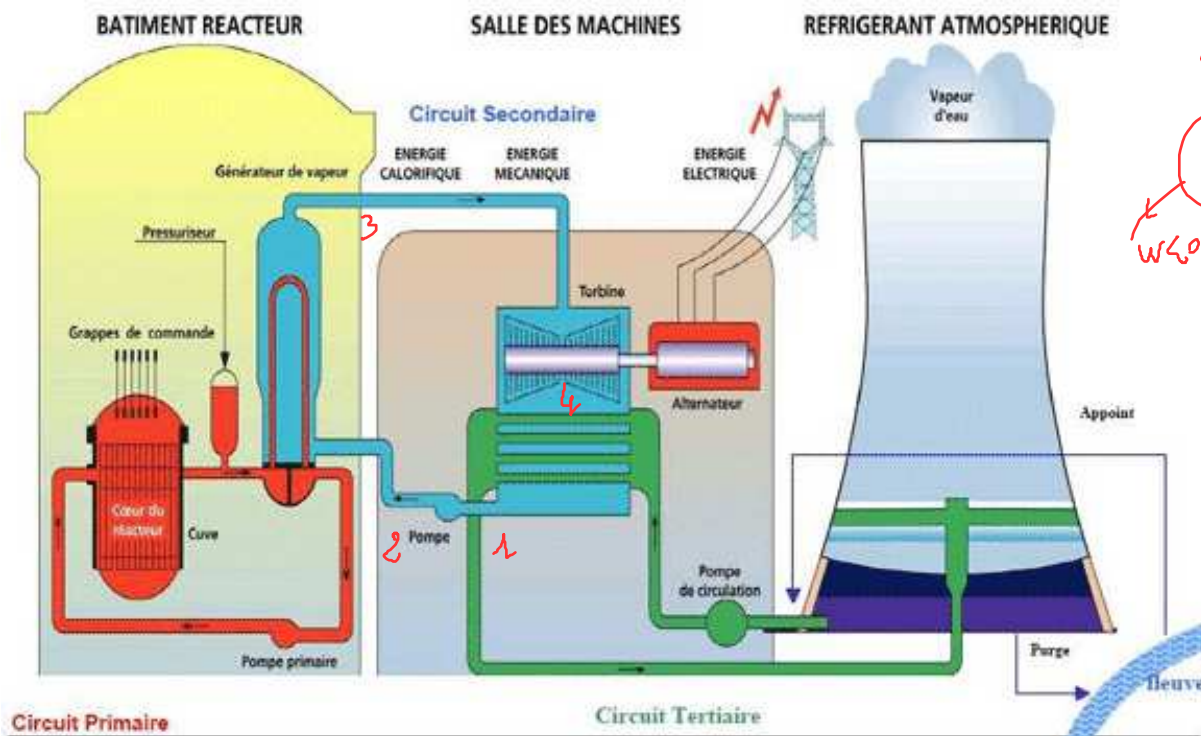


source chaude



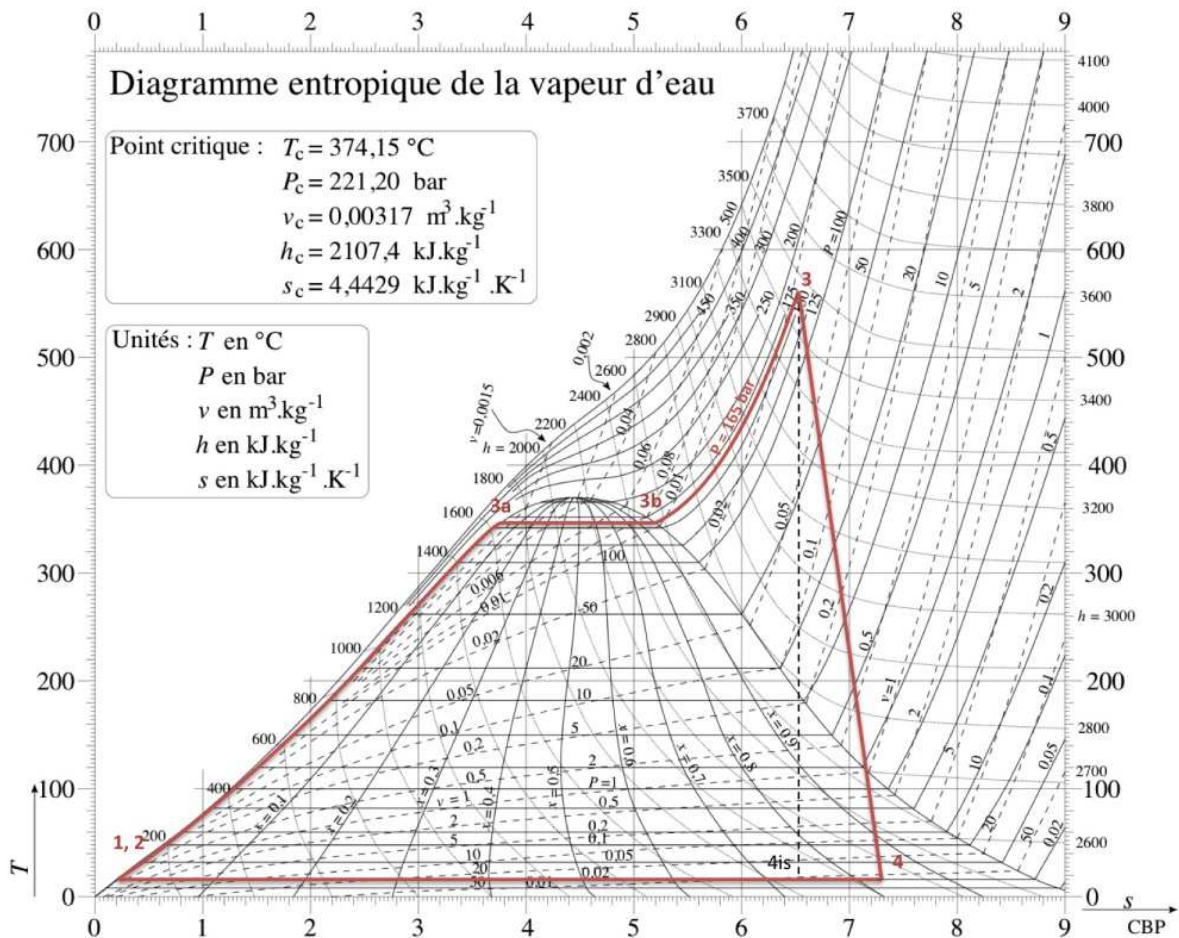
le fluide donne du transfert thermique à la source chaude pour la maintenir chaude $\Rightarrow$ il perd de la chaleur et se condense

VI. Exemple de moteur avec changement d'état : le REP



Handwritten notes:

- moteur* (engine)
- source chaude* (hot source)
- fluide* (fluid) in a circle with arrows pointing to $Q_c > 0$ and $Q_f < 0$.
- source froide* (cold source)
- $W < 0$*



$$\eta = \frac{-W}{Q_c} = \frac{-W_{234}}{Q_{23}}$$

