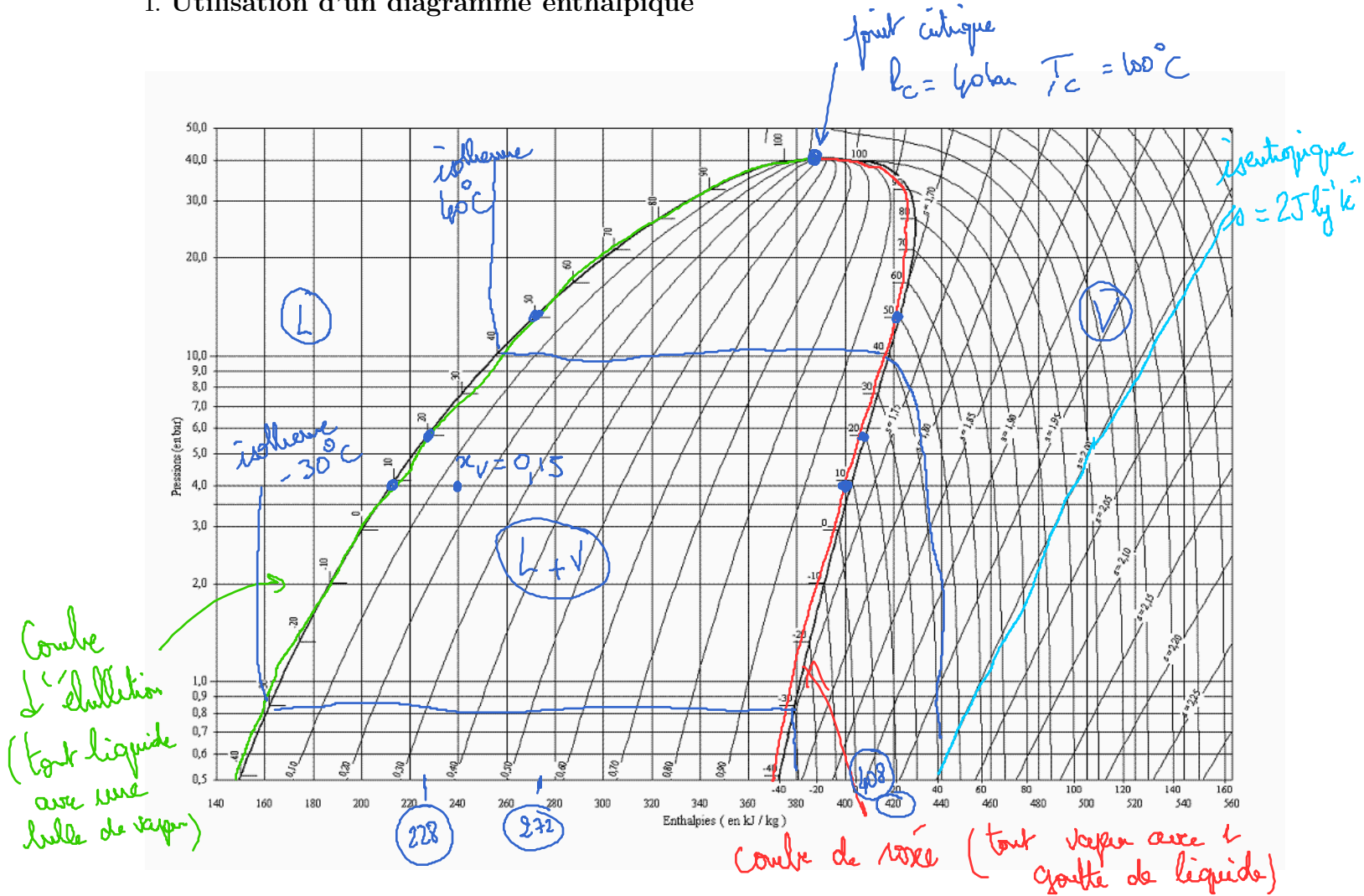


Chapitre th2 : les machines industrielles

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

Sur la courbe d'ébullition: le système est tout liquide avec 1 bulle de vapeur: liquide saturant

Sur la courbe de rosée: " " vapeur avec 1 goutte de liquide: vapeur saturante

Calculer l'enthalpie massique de vaporisation à 50 degrés Celsius.

passage de l'état liquide à vapeur
A 50°C on lit:
 $h_v = 426 \text{ kJ.kg}^{-1}$ enthalpie de la vapeur saturante
ou la courbe d'ébullition
 $h_l = 272 \text{ kJ.kg}^{-1}$ enthalpie du liquide saturant
ou la courbe de rosée

il faut donner de l'NTS au liquide pour le vaporiser

$$\Delta h_{\text{vaporisation}} = h_v - h_l$$

$$= 426 - 272$$

$$= 154 \text{ kJ.kg}^{-1} > 0 \text{ vaporiser}$$

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

A 20°C on lit:
 $h_v = 408 \text{ kJ.kg}^{-1}$
 $h_l = 228 \text{ kJ.kg}^{-1}$

$$\Delta h_{\text{vaporisation}}(20^{\circ}\text{C}) = 408 - 228 = 180 \text{ kJ.kg}^{-1} > \Delta h_{\text{vaporisation}}(50^{\circ}\text{C})$$

Plus un liquide a une température élevée, + il est agité, + c'est facile de le vaporiser.

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

passage de la vapeur au liquide

$$\Delta h_{\text{liquéfaction}}(20^\circ\text{C}) = -\Delta h_{\text{vaporisation}}(20^\circ\text{C}) = h_l - h_v = 228 - 408 = -180 \text{ kJ.kg}^{-1}(\text{C})$$

la vapeur donne de l'N₂ au milieu extérieur en devenant liquide

Qu'est-ce que le point critique ?

L'état liquide et l'état vapeur se ressemblent beaucoup car les particules ne cessent de bouger. Pour $P > P_{\text{critique}}$ et $T > T_{\text{critique}}$, la vapeur et le liquide ont les mêmes propriétés (en même volume) et donc on ne fait plus les différences avant le point critique



après le point critique



On réalise depuis l'état initial $P_i = 10 \text{ bar}$ 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 $H = U + PV$ d'un GP ne dépend que de la température. Donc pour un GP, les courbes isenthalpiques et isothermes sont confondues, soit les isothermes sont des droites verticales : c'est le cas pour $P < 1 \text{ ou } 2 \text{ bar}$.

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.

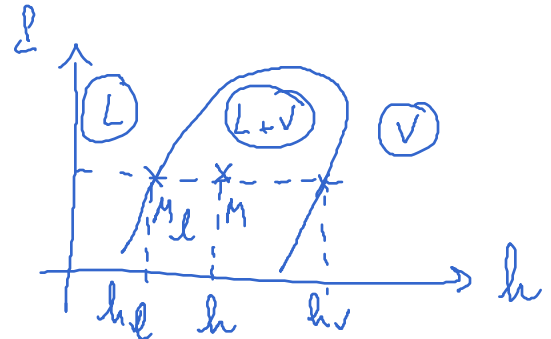
$$x_v = \frac{m_v}{m_v + m_l} \quad x_l = \frac{m_l}{m_v + m_l}$$

$$\text{et } x_v + x_l = 1$$

$$\text{On lit : } x_v = 0,15$$

$$\text{On lit : } h_l = 212 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad h_v = 400 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$x_v = \frac{h - h_l}{h_v - h_l} = \frac{240 - 212}{400 - 212} = 0,15$$

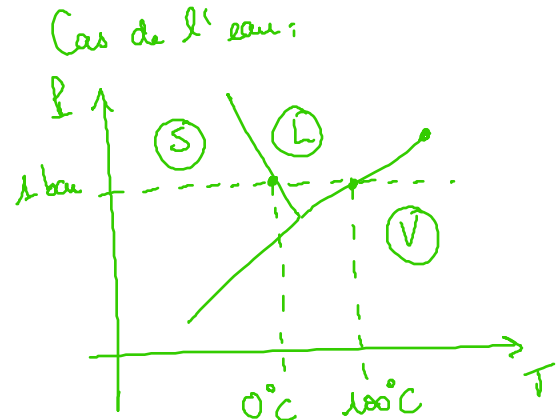
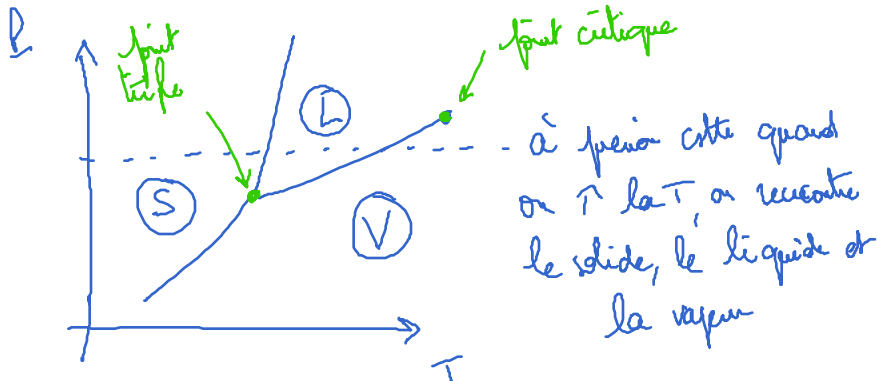


Th. des moments : $x_v = \frac{M_l M_v}{M_l M_v} \quad x_l = \frac{M_l M_v}{M_l M_v}$

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 $\gamma = 1,12$.

Pour un GP en transformation adiabatique réversible on applique les lois de Laplace:
 $PV^\gamma = \text{cte}$ avec $V = \frac{nRT}{P}$ donc $P^{1-\gamma} T^\gamma = \text{cte}$
 donc $P_1^{1-\gamma} T_1^\gamma = P_2^{1-\gamma} T_2^\gamma$ donc $T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 246 \text{ K}$

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:

$P \text{ (bar)}$	$T \text{ (K)}$	$h_l \text{ (kJ.kg}^{-1}\text{)}$	$h_v \text{ (kJ.kg}^{-1}\text{)}$	$s_l \text{ (kJ.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$	$s_v \text{ (kJ.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$
5	288	220	405	non donné	1,72

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

L'enthalpie massique de vaporisation à 5 bar:

$$h_{\text{vaporisation}}(5 \text{ bar}) = h_v - h_l = 405 - 220 = 185 \text{ kJ.kg}^{-1} > 0$$

il faut ajouter de l'NRJ pour vaporiser un liquide

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

$$h(x_l = 0,3) = \underbrace{x_l}_{0,3} h_l(5 \text{ bar}) + \underbrace{x_v}_{1-x_l=0,7} h_v(5 \text{ bar}) = 0,3 \times 220 + 0,7 \times 405 = 350 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

La fraction massique de vapeur d'un fluide d'enthalpie massique $h = 380 \text{ kJ.kg}^{-1}$:

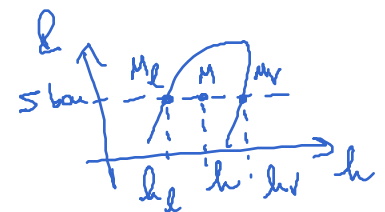
On applique le th. des moments:

$$x_v = \frac{h_l M}{h_v M} = \frac{h - h_l}{h_v - h_l} = \frac{380 - 220}{405 - 220} = 0,86$$

La fraction massique de liquide d'un fluide d'enthalpie massique $h = 460 \text{ kJ.kg}^{-1}$:

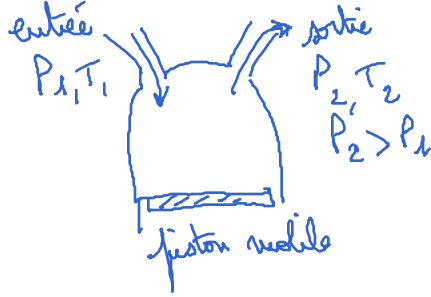
$$h = 460 \text{ kJ/kg} > h_v \text{ donc le fluide est entièrement vapeur: } x_l = 0$$

$x_v = 1$



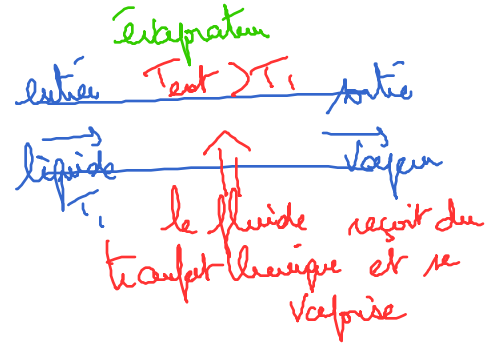
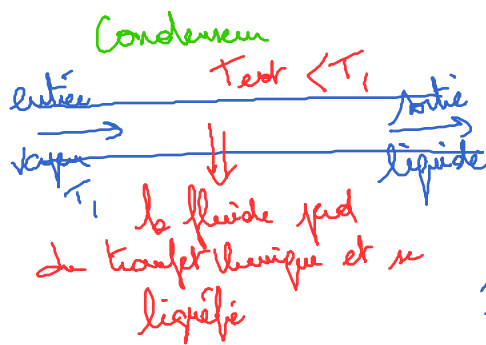
II. Exemple de composants de machines industrielles

Compresseur
Contient un piston



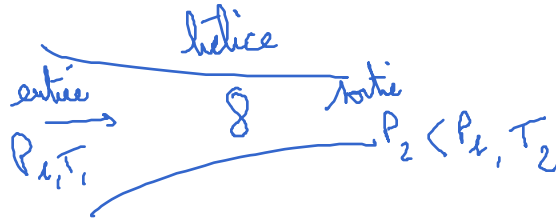
Un piston compresse le fluide
travail utile $w_u > 0$
reçu par le fluide

Échangeur thermique
pas de pièces mobiles



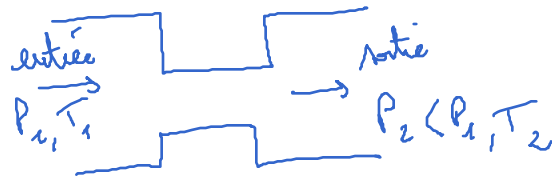
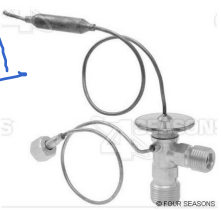
$w_u = 0$

Turbine
présence d'une hélice



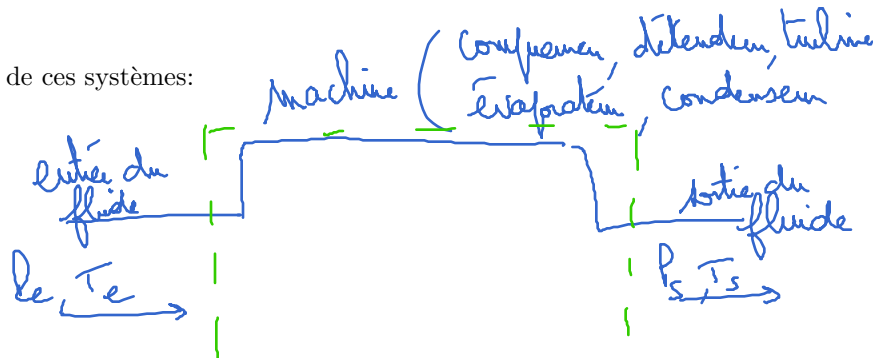
Le fluide fait tourner une hélice. Le fluide perd du travail utile: $w_u < 0$

Détendeur
pas de pièces mobiles



$w_u = 0$

Modélisation de ces systèmes:



Échange d'énergie thermique: $(J.s^{-1})$ q : transfert thermique
 (W) ϕ_{th} : puissance thermique

Échange de travail des pièces mobiles: $(J.s^{-1})$ w_u : travail utile mécanique
 ϕ_{me} : puissance utile

$\phi_{th} = q \times \Delta t$

$\phi_{me} = w_u \times \Delta t$

III. 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

z est l'altitude du fluide (axe Oz vertical ascendant)

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

Au sujet de l'enthalpie:

$v = 1/\rho$: volume massique

c'est la masse de fluide
 qui traverse la canalisation entre
 t et $t+dt$: $dm = D_m \times dt$

pour un liquide ou un solide : C : capacité thermique massique

$$h_s - h_e = C (T_s - T_e)$$

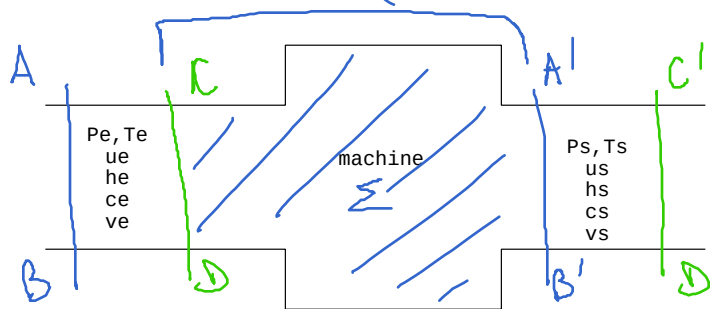
pour un gaz : C_p : capacité thermique massique à pression constante

$$h_s - h_e = C_p (T_s - T_e)$$

$$C_p = \frac{R \gamma}{\gamma - 1}$$

$$C_p = \frac{7}{5} R \quad \text{GP diatomique}$$

$$C_p = \frac{5}{3} R \quad \text{GP monoatomique}$$



Système étudié: on étudie le système fermé et mobile :

Composés entre AB et A'B' à l'instant t
 CD et C'D' " " $t+dt$

Les volumes $ABA'B'$ et $CDC'D'$ ont en commun le volume noté (σ) .

Le système (σ) est fixe et ouvert.

Conservation de la masse:

$$m_{ABA'B'}(t) = m_{CDC'D'}(t+dt)$$

écoulement
stationnaire

$$\cancel{m_{\Sigma}(t)} + m_{ABCD} = \cancel{m_{\Sigma}(t+dt)} + m_{A'B'C'D'}$$

$$D_m dt = D_m dt \quad \text{d'où} \quad D_{me} = D_{ms}$$

$$\text{Dans la suite on note : } m_{ABCD} = m_{A'B'C'D'} = D_m dt$$

Conservation de l'énergie:

On applique le 1^{er} principe au système fermé et mobile compris entre AB et A'B' à t et entre CD et C'D' à $t+dt$

$$dU + dE_m = \delta W + \delta Q$$

régime permanent

$$dU = U_{CDC'D'}(t+dt) - U_{ABA'B'}(t) = U_{\Sigma}(t+dt) + U_{A'B'C'D'} - U_{\Sigma}(t) - U_{ABCD} \\ = \dot{m} dt \times u_s - \dot{m} dt u_e$$

$$dE_m = E_{m,CDC'D'}(t+dt) - E_{m,ABA'B'}(t) = E_{m,\Sigma}(t+dt) + E_{m,A'B'C'D'} - E_{m,\Sigma}(t) - E_{m,ABCD} \\ = \dot{m} dt \left(\frac{c_s^2 - c_e^2}{2} \right) + \dot{m} dt (gz_s - gz_e)$$

$$\delta Q = P_h \times dt$$

$$\delta W = \underbrace{P_u \times dt}_{\text{travail utile (travail des pièces mobiles de la machine)}} - \underbrace{P_e (0 - \dot{m} dt u_e)}_{\text{travail des forces de pression à l'entrée}} - \underbrace{P_s (\dot{m} dt u_s - 0)}_{\text{travail des forces de pression à la sortie}}$$

$$\dot{m} dt \left(u_s - u_e + \frac{c_s^2 - c_e^2}{2} + gz_s - gz_e \right) = P_u dt + P_e dt + \dot{m} dt (-P_s u_s + P_e u_e)$$

$$\dot{m} \left(u_s + P_s u_s - (u_e + P_e u_e) + \frac{c_s^2 - c_e^2}{2} + gz_s - gz_e \right) = P_u + P_e$$

1^{er} principe industriel en Watt:

$$\dot{m} \left(h_s - h_e + \frac{c_s^2 - c_e^2}{2} + gz_s - gz_e \right) = P_u + P_e$$

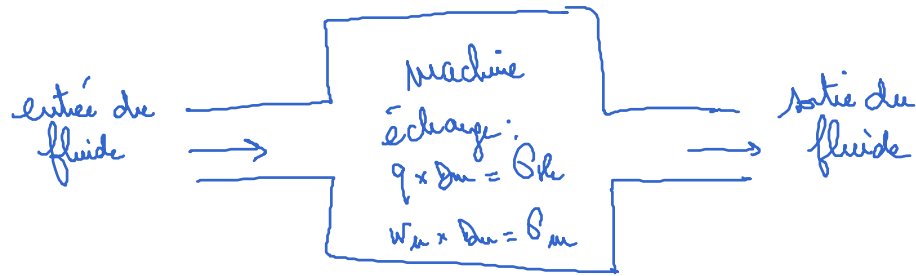
1^{er} principe industriel en J.kg⁻¹:

$$h_s - h_e + \frac{c_s^2 - c_e^2}{2} + gz_s - gz_e = w_u + q$$

$$w_u = \frac{P_u}{\dot{m}} : \text{travail utile mis en jeu dans les pièces mobiles}$$

$$q = \frac{P_h}{\dot{m}} \text{ transfert thermique moyen}$$

IV. Second principe industriel



Énoncé du 2nd principe :

$$\Delta s - s_e = \Delta s_{\text{échange}} + \Delta s_{\text{créé}}$$

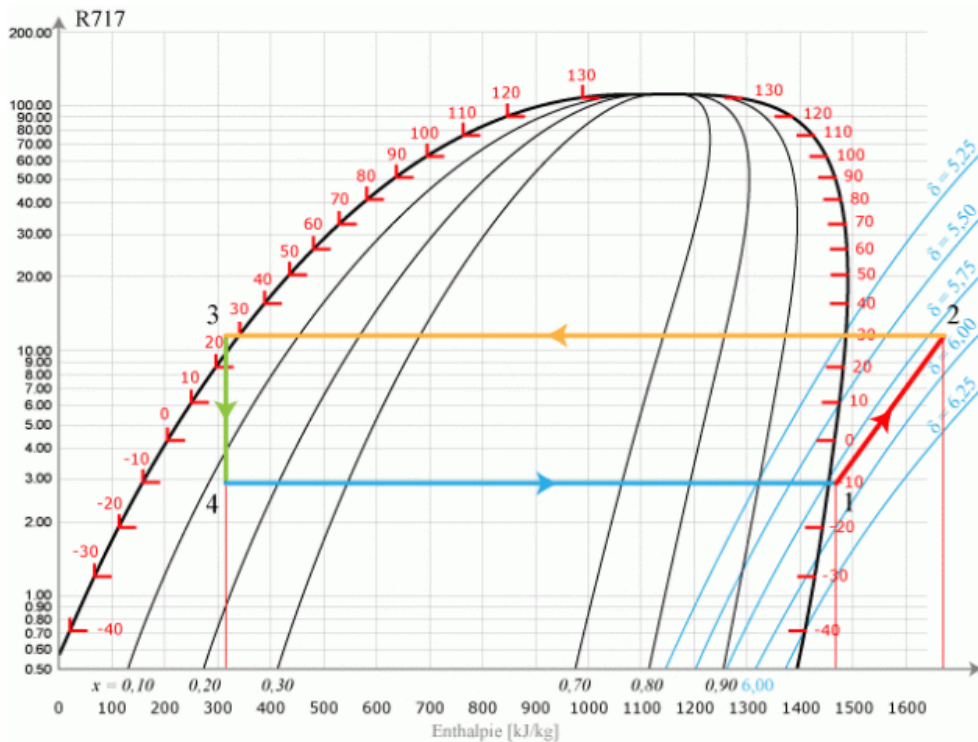
avec $\Delta s_{\text{échange}} = \frac{q}{T_{\text{ext}}}$

les expressions de Δs
sont données dans
l'énoncé

$$\Delta s_{\text{créé}} > 0 \quad \text{ou} \quad = 0$$

irréversible réversible

V. Exemple de machine réceptrice avec changement d'état

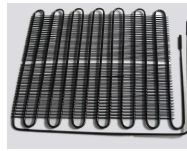


Identifier les transformations du cycle et les associer au composant concerné:

Compresseur : transformation isentropique 1-2
 $\Delta h_{12} = w_{12} + q_{12}$
 $w_{12} = h_2 - h_1$
 $= 1700 - 1480$
 $= 220 \text{ kJ.kg}^{-1} > 0$ (reçu par le gaz)



Condenseur : transformation isobare 2-3
 $\Delta h_{23} = w_{23} + q_{23}$
 $q_{23} = h_3 - h_2$
 $= 360 - 1700$
 $= -1390 \text{ kJ.kg}^{-1} < 0$ (pas de pièces mobiles, transfert thermique perdu par le fluide)



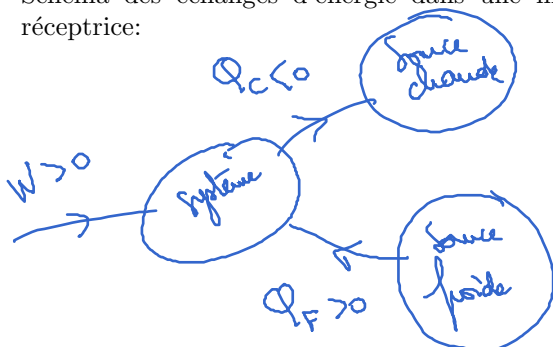
Détendeur : transformation isenthalpique 3-4
 (type Joule Thomson)
 $\Delta h_{34} = 0$
 $w_{34} = q_{34} = 0$



Evaporateur : transformation isobare 4-1
 $\Delta h_{41} = w_{41} + q_{41}$
 $q_{41} = h_1 - h_4$
 $= 1480 - 360$
 $= 1120 \text{ kJ.kg}^{-1} > 0$ (pas de pièces mobiles, reçu par le liquide par le vapeur)



Schéma des échanges d'énergie dans une machine réceptrice:



Transfert thermique avec la source froide:

$$Q_F = q_{41} = 1120 \text{ kJ.kg}^{-1} > 0$$

Transfert thermique avec la source chaude:

$$Q_C = q_{23} = -1390 \text{ kJ.kg}^{-1} < 0$$

Travail utile:

$$W = w_{12} = 220 \text{ kJ.kg}^{-1} > 0$$

Efficacité de la PAC associée:

$$e_{PAC} = \frac{-Q_C}{W} = \frac{-923}{145.12} = 6.3$$

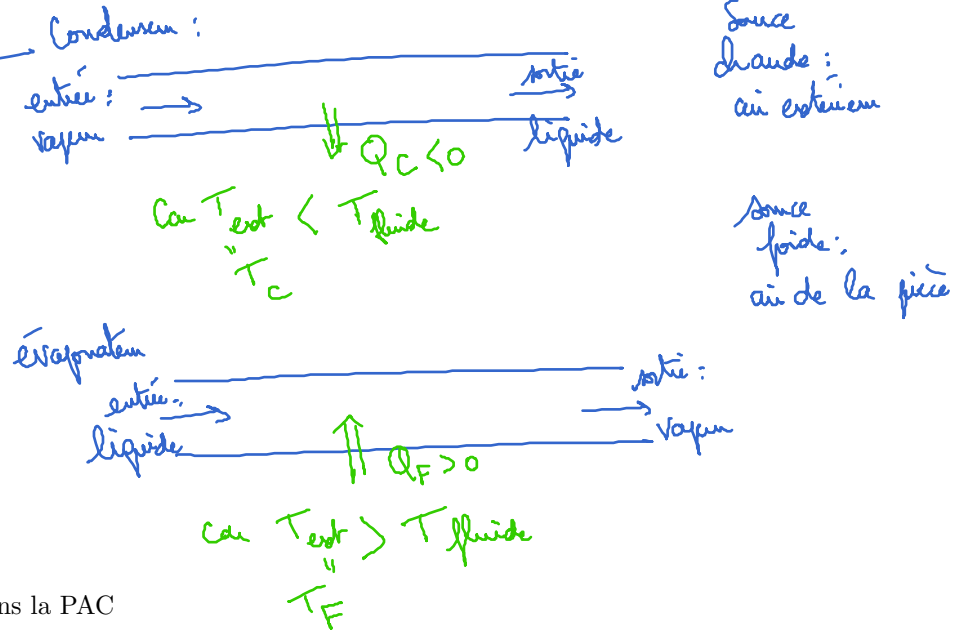
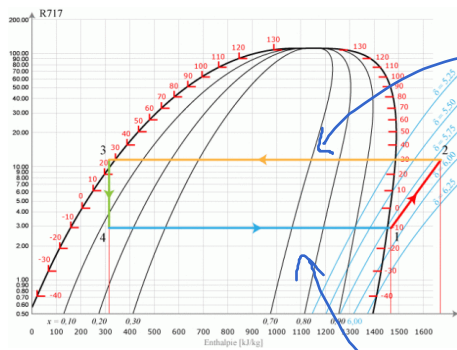
Efficacité du climatiseur associé :

$$e_{chim} = \frac{Q_F}{W} = \frac{941}{145.12} = 6.5$$

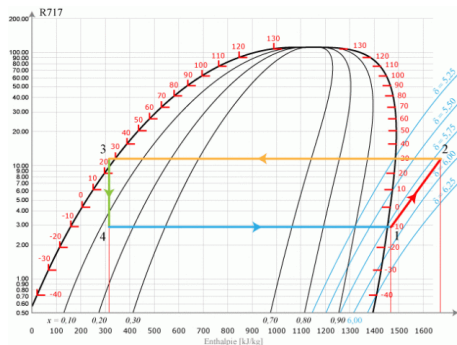
Calculer le débit massique du fluide pour un compresseur qui fournit une puissance mécanique de 1 kW:

$$\dot{Q}_m = \dot{W}_m \times D_m \quad \text{d'où} \quad D_m = \frac{\dot{Q}_m}{\dot{W}_m} = \frac{10^3}{220 \cdot 10^3} = 4.5 \text{ g s}^{-1}$$

Retour sur le cycle décrit par le fluide dans un climatiseur



Retour sur le cycle décrit par le fluide dans la PAC



En schémas pour le condenseur
 et l'évaporateur

source chaude : air de la pièce
 source froide : air extérieur

.

