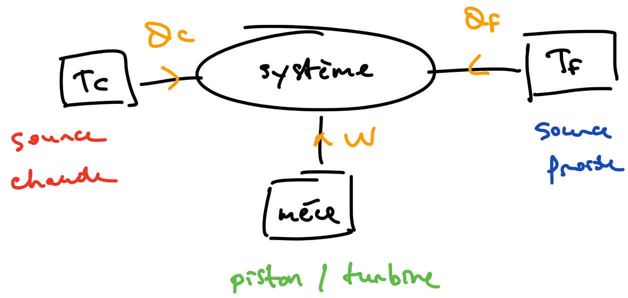
Q 8 : Machines thermiques dithermes



Carnot a mis en évidence :

→ nécessité d'un fonctionnement cyclique

→ — de 2 thermostats T_f / T_c

système = fluide qui réalise les ≠ évolutions (chauffage / refroidissement / compression / détente)

2 types de machines :

→ moteur (reçoit Q_c, donne W)

→ récepteur (reçoit W, transfère l'énergie de T_f vers T_c)

⇒ machine frigo ou pac

exemples :

machine	système	T_c	T_f	méca
machine à vapeur (moteur)	eau (liq / vap)	chaudière (charbon)	réserve d'eau froide	piston
moteur de centrale nucléaire	eau (liq / vap)	uranium	fleuve	turbine
moteur thermique (à essence)	air (toujours gaz)	combustion essence	air extérieur	piston
frigo (récepteur) clim	fréon (liq / gaz)	extérieur	intérieur frigo	compresseur
pompe à chaleur (pac) (récepteur)	idem	intérieur (habitation)	air ext. / forage	idem

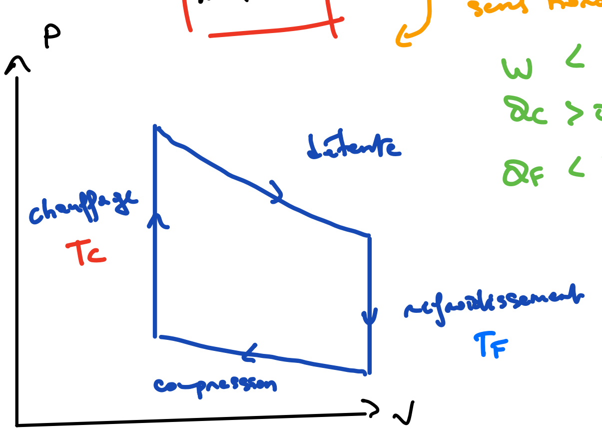
moteur

moteur : sens horaire

$W < 0$

$Q_c > 0$

$Q_F < 0$



$W = -$ aire du cycle

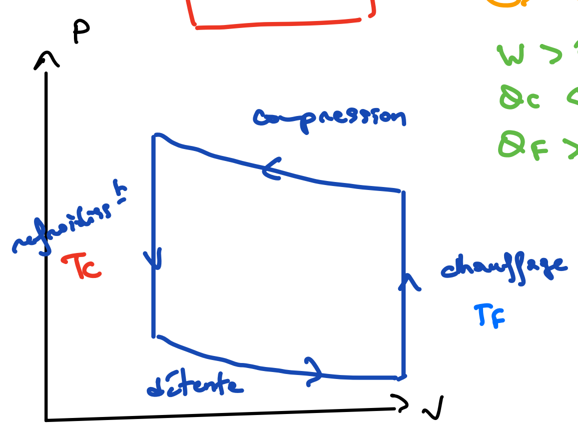
récepteur

récepteur : sens trigo

$W > 0$

$Q_c < 0$

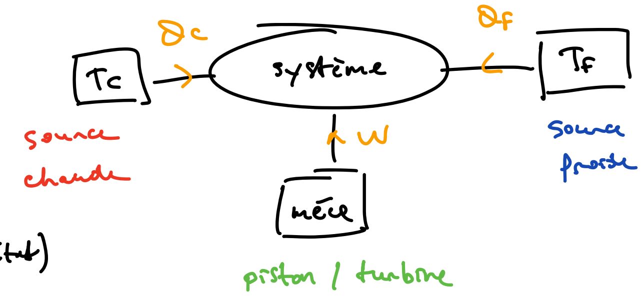
$Q_F > 0$



$W =$ aire du cycle

Q9 Applicat° : 1°, 2° principe → Carnot

W, Q_c et Q_F sont reçus par le fluide sur 1 cycle de fonctionnement



1° principe : $\Delta U_{cycle} = W + Q_c + Q_F$

Or, $\Delta U_{cycle} = 0$ (car U fct état)

d'où $\boxed{W + Q_c + Q_F = 0}$

2° principe : $\Delta S_{cycle} = S_{ech} + S_{créée}$

avec $\Delta S_{cycle} = 0$

$S_{ech} = \dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_F}{T_F}$ (sources chaude / froide = thermostats).

$S_{créée} \geq 0$

D'où $\boxed{\dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_F}{T_F} \leq 0}$ inégalité de Clausius

- rendement d'un moteur thermique : $\rho = \dfrac{\text{"utile"}}{\text{"dépensé"}}$

donc $\rho = \dfrac{-W}{Q_c}$ $(n_c < 1)$

Or, $W + Q_c + Q_F = 0 \Rightarrow -W = Q_c + Q_F \Rightarrow \rho = \dfrac{Q_c + Q_F}{Q_c} = 1 + \dfrac{Q_F}{Q_c}$

Or, $\dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_F}{T_F} \leq 0 \Rightarrow \dfrac{Q_F}{Q_c} \leq -\dfrac{T_F}{T_c}$ et donc $\boxed{\rho \leq 1 - \dfrac{T_F}{T_c}}$

On peut poser $\boxed{\rho_c = 1 - \dfrac{T_F}{T_c}}$ rendement de Carnot et écrire $\rho \leq \rho_c$ en général.

↓ meilleur rendement possible compte-tenu de T_c et T_F

- efficacité des récepteurs (ou cop : coefficient of performance)

cop $= \eta = \dfrac{\text{"utile"}}{\text{"dépensé"}}$

frigo : $\eta = \dfrac{Q_F}{W}$ 　　　 pac : $\eta = \dfrac{-Q_c}{W}$

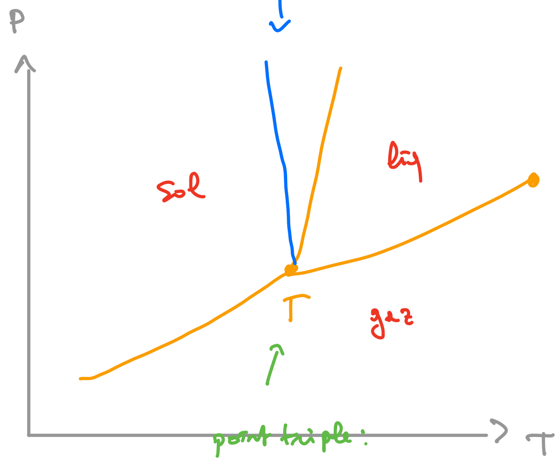
$\boxed{\eta_c = \dfrac{T_F}{T_c - T_F}}$ efficacité max 　　　 $\boxed{\eta_c = \dfrac{T_c}{T_c - T_F}}$ efficacité max

Les rendements / efficacité max sont obtenus pour des machines réversibles.

Q 10 Changements d'état

- diagramme (P, T)

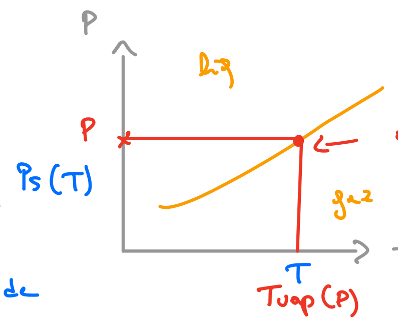
Rem : pour l'eau, la pente sol / liq est négative



point critique : au delà, pas de distinction liq / gaz

point triple : coexistence des 3 états φ

Lorsque 2 phases d'un corps pur coexistent (à l'équilibre) P et T sont liés

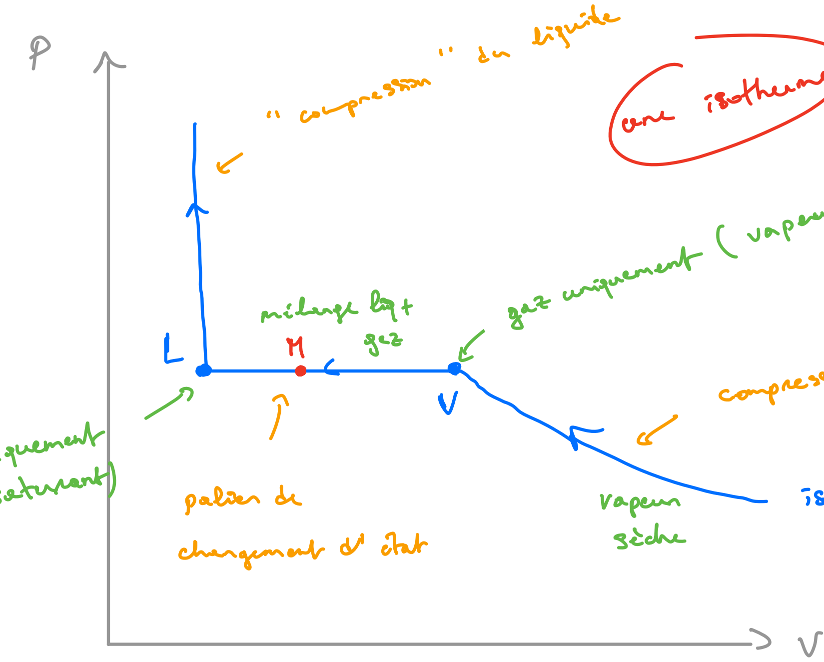


à l'eq liq / gaz, on est nécessairement sur cette courbe

pression de vapeur saturante (pression de changement d'état) à la température T

température de vaporisation à la pression P

- diagramme (P, V) (liq / gaz uniquement)



" compression " du liquide

une isotherme

$PV = nRT$

mélange liq + gaz

gaz uniquement (vapeur saturante)

compression du gaz

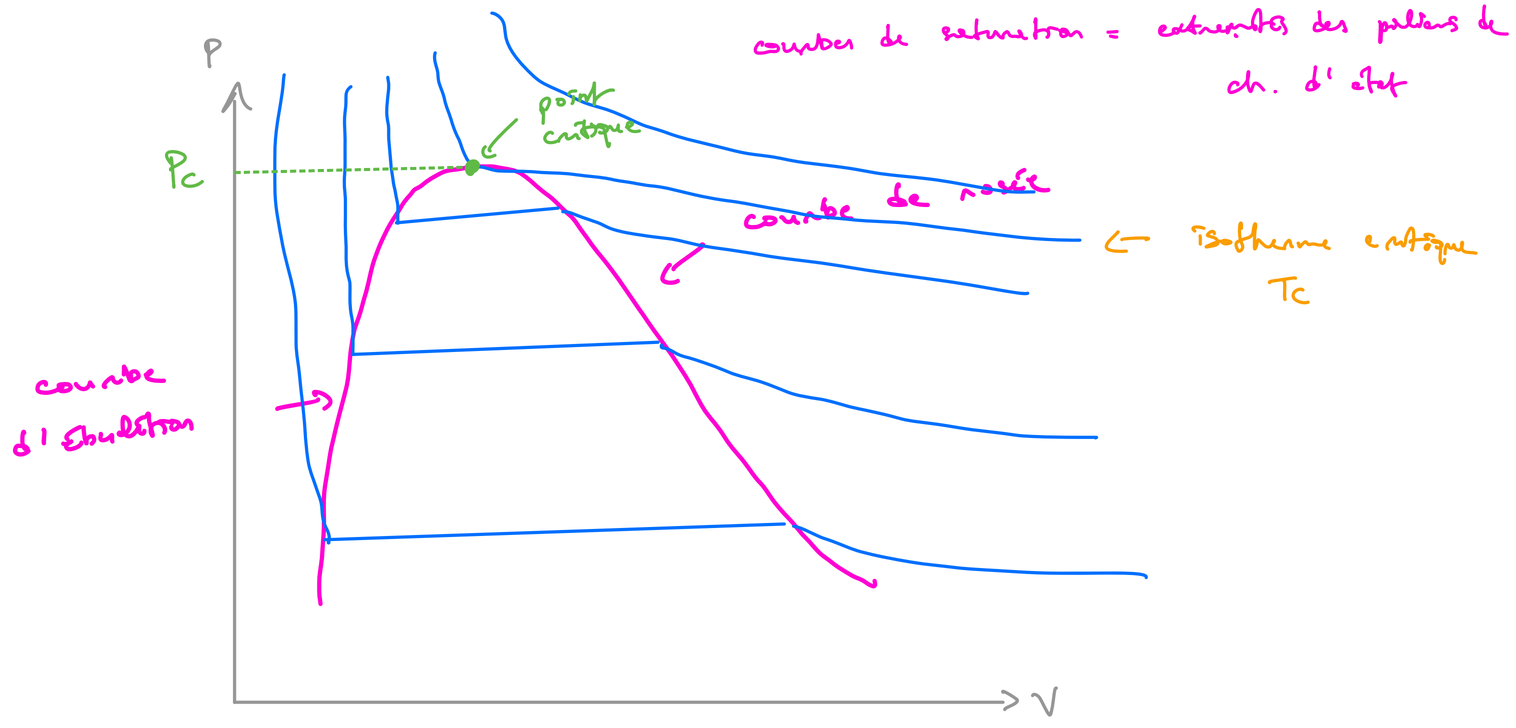
liq uniquement (liq saturant)

palier de changement d'état

vapeur sèche

isotherme (T est maintenue constante)

théorème des moments : $x_{vap} = \frac{LM}{LV}$ (x_{vap} = proportion de vapeur dans le mélange) $= \frac{m_{vap}}{m_{tot}}$

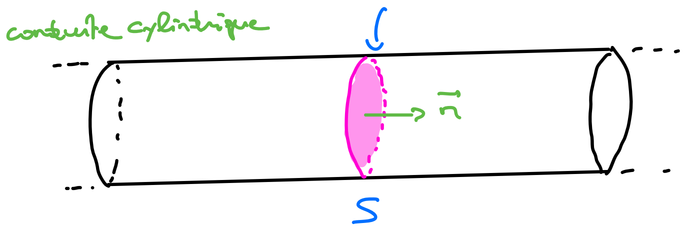

courbe de saturation = extrémités des paliers de ch. d'état
P
point critique
Pc
courbe de rosée
isotherme critique
Tc
courbe d'ébullition
V

COMPLEMENTS SUR LES MACHINES THERMIQUES

1. Ecoulement en RS

↪ régime stationnaire

1.1 Débit massique



On définit le débit massique au travers de la section S (et donc dans la conduite) :

$$\boxed{D_m = \iint_S (\mu \vec{v}) \cdot \vec{dS}}$$

- c'est algébrique, orienté par le choix de $\vec{dS} = dS\,\vec{n}$
- μ = masse volumique
- $\vec{v}$ = vitesse du fluide

Sens physique : masse de fluide qui traverse S par u. de temps.

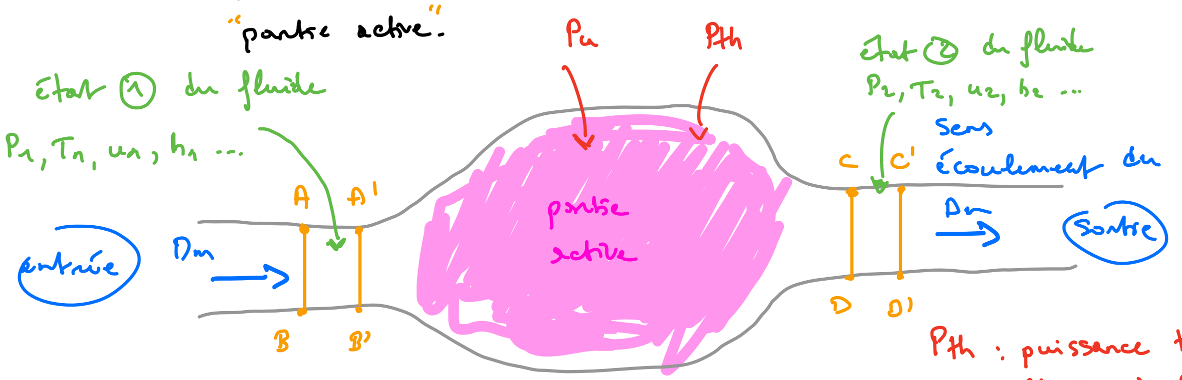
($\mu\vec{v}$ est analogue à $\vec{j} = \rho\vec{v}$ en électro-magnétisme)

Cas le + simple : $\begin{cases} S \text{ plane} \\ \mu \text{ et } \vec{v} \text{ uniformes} \\ \vec{v} \perp S \end{cases}$

alors $\boxed{D_m = \mu S v}$

1.2 Premier principe | industriel pour un écoulement en RS

Idée : faire un bilan entre les grandeurs avant et après la traversée d'une "partie active".



partie active = compresseur, détendeur, échangeur thermique

En RS, le débit massique est le même en entrée et en sortie, on le note D_m.

Pth : puissance thermique reçue par le fluide à la traversée de la partie active

Pu : puissance utile reçue par le

fluide (...) du fait de pièces mobiles dans la partie active (piston, turbine ..)

On veut appliquer le 1° principe, il faut donc définir un système fermé :

système compris entre AB et CD à l'instant t
$A'B'$ et $C'D'$ —— $t+dt$

1° principe entre t et $t+dt$:

$$dU = U(t+dt) - U(t) = U_{A'B'C'D'} - U_{ABCD}$$

Or, $U_{A'B'C'D'} = U_{A'B'CD} + U_{CDC'D'}$ et $U_{ABCD} = U_{ABA'B'} + U_{A'B'CD}$

D'où $dU = U_{CDC'D'} - U_{ABA'B'}$ le terme commun $U_{A'B'CD}$ s'élimine en faisant la différence.

Or, $U_{ABA'B'} = \delta m \, u_1$ et $U_{CDC'D'} = \delta m \, u_2$ avec $\delta m = D_m \, dt$ → masse contenue dans $ABA'B'$ et $CDC'D'$

D'où $dU = D_m \, dt \, (u_2 - u_1)$

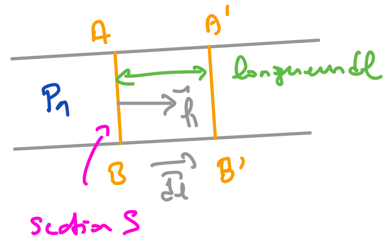
Le 1° principe s'écrit $dU = \delta Q + \delta W$, donc on évalue δQ et δW :

$\delta Q = P_{th} \, dt$

$\delta W = \delta W_p + \delta W_u$ → avec $\delta W_u = P_u \, dt$
travail exercé par les pièces mobiles dans la partie active

δW_p : travail des forces de pression, exercé par le fluide en amont / aval

Calcul de δW_p : coté entrée, c'est le travail sur la délimitation $AB \to A'B'$



$$\delta W_1 = \vec{f_1} \cdot \vec{dl} = f_1 \, dl = P_1 \underbrace{S \, dl}_{\text{volume de } ABA'B'}$$

$= v_1 \, \delta m = v_1 \, D_m \, dt$ ↖ volume massique coté entrée

⇒ $\delta W_1 = P_1 v_1 D_m \, dt$

De même, $\delta W_2 = -P_2 v_2 D_m \, dt$

On rassemble tous ces résultats : $dU = \delta W_p + \delta W_u + \delta Q$ donne

$$D_m \cancel{dt} (u_2 - u_1) = P_1 v_1 D_m \cancel{dt} - P_2 v_2 D_m \cancel{dt} + P_u \, \cancel{dt} + P_{th} \, \cancel{dt}$$

soit $D_m \left((u_2 + P_2 v_2) - (u_1 + P_1 v_1) \right) = P_u + P_{th}$

h_2 h_1

$H = U + PV \Rightarrow h = u + Pv$

finalement : $\boxed{D_m \, (h_2 - h_1) = P_u + P_{th}}$

puissance utile

puissance thermique

) reçues dans la partie active

débit massique

sortie

entrée

On peut aussi écrire, en multipliant par dt :

$$h_2 - h_1 = \underbrace{\frac{P_u \, dt}{D_m \, dt}}_{w_u} + \frac{P_{th} \, dt}{D_m \, dt}$$

$P_{th}\,dt$ → puissance thermique reçue pendant dt

$D_m\,dt$ → masse δm qui traverse la partie active pendant dt

transfert thermique par u. de masse qui traverse la partie active, noté q

D'où $\boxed{h_2 - h_1 = w_u + q}$

très utile en pratique !

Rem : Pour être plus complet, on écrit :

$$\underbrace{\Delta(h + e_m)}_{h_2 - h_1 + e_{m2} - e_{m1}} = w_u + q \qquad / \qquad D_m \, \Delta(h + e_m) = P_u + P_{th}$$

énergie méc macroscopique massique ($e_c + e_p$)

utile lorsque e_m (en particulier e_c) n'est pas négligeable – typiquement exercices sur des tuyères de réacteurs.

Rem : $e_c = \frac{1}{2} v^2$

énergie cinétique massique

1.3 Deuxième principe écoulement RS

mêmes idées, mais il n'y a pas à " repasser à gauche le travail des forces de pression "

$$D_m \, (\underbrace{s_2 - s_1}) = \underbrace{P_{S\acute{e}ch} + P_{S\acute{c}r\acute{e}\acute{e}}}$$

débit massique $kg \cdot s^{-1}$

entropies massiques $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$

entropies échangée / créée par unité de temps en $J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}$

autre forme : $s_2 - s_1 = s_{ech} + s_{créée}$

entropies échangée / créée par unité de masse de fluide qui traverse la partie active.

Rem : si l'échange se fait avec un thermostat (température T_0).

$$P_{Sech} = \frac{P_{th}}{T_0} \quad \text{et} \quad s_{ech} = \frac{q}{T_0}$$

1.4 Exemples d'application aux parties actives

Dans tous les cas, il s'agit d'utiliser $\Delta h = w_u + q$

- **compresseur** (ou turbine, sans variat° de vitesse importante) :

  présence de pièces mobiles !

  $q = 0$ (c'est l'hypothèse habituelle)

  donc $\Delta h = w_u$

- **Echangeur** (thermique) :

  c'est un "serpentin", long tuyau replié, pour avoir un max d'échanges thermiques (regarder l'arrière d'un frigo !)

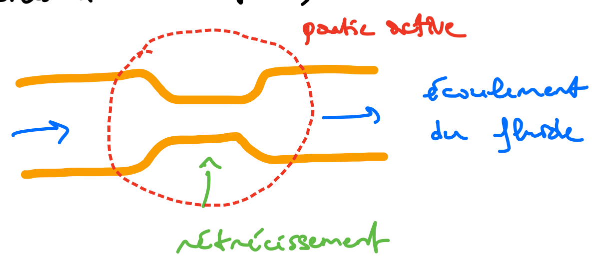
  $w_u = 0$ (pas de pièces mobiles)

  donc $\Delta h = q$

- **détendeur** (détendeur typique, sans pièces mobiles et calorifugé) :

  pas de pièces mobiles, hypothèse calorifugé

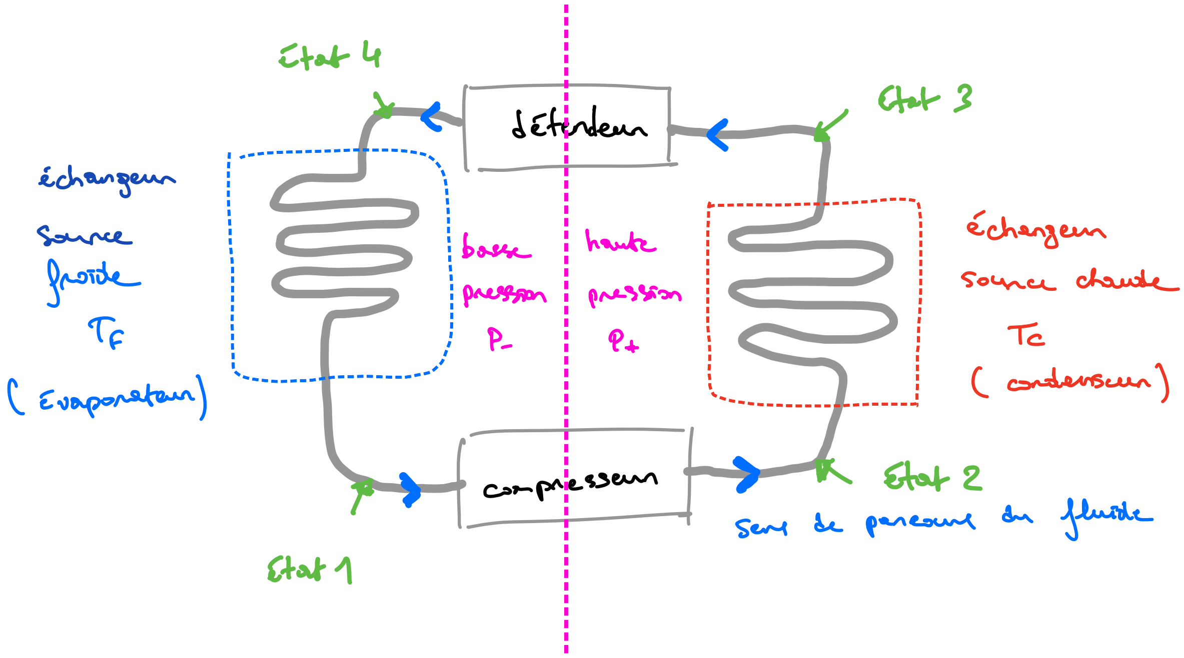
  $q = 0$ et $w_u = 0$ donc $\Delta h = 0$



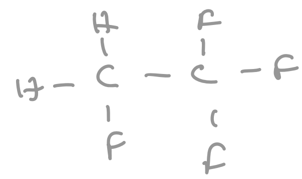
la détente est isenthalpique (détente de Joule-Thomson)

2. exemples de machines thermiques avec écoulement RS (et utilisat° de diagramme)

2.1 machine frigorifique / pac (avec ch. d'état)



le fluide est un fréon, par ex le R134a



explication fondamentale : on comprime pour ↗ T, ainsi $T_2 > T_C$

⇒ dans l'échangeur source chaude, le fluide donne de l'énergie (à la s^ce chaude)

on détend pour ↘ T, ainsi $T_4 < T_F$ ⇒ dans l'échangeur s^ce froide, le fluide prend de l'énergie à la s^ce froide

bilan : transfert d'énergie de T_F vers T_C (mais cela nécessite W ...)

Description de l'état du fluide :

① état gazeux, basse pression (P_-) et basse température.
hypothèse : vapeur saturante donc $T_1 = T_{vap}(P_-)$
↪ on est sur la courbe de rosée

② état gazeux, haute pression, haute température ($T_2 > T_C$)
vapeur sèche

③ état liquide, haute pression (P_+)
hypothèse : liquide saturant, donc $T_3 = T_{vap}(P_+)$
↪ on est sur la courbe d'ébullition

④ mélange liq / gaz (donc vaporisation partielle lors de la détente) basse pression (P_-) et $T_4 = T_{vap}(P_-)$ (il faut que ce soit < T_f)

Description des évolutions :

1 → 2 : compression isentropique (hypothèse)

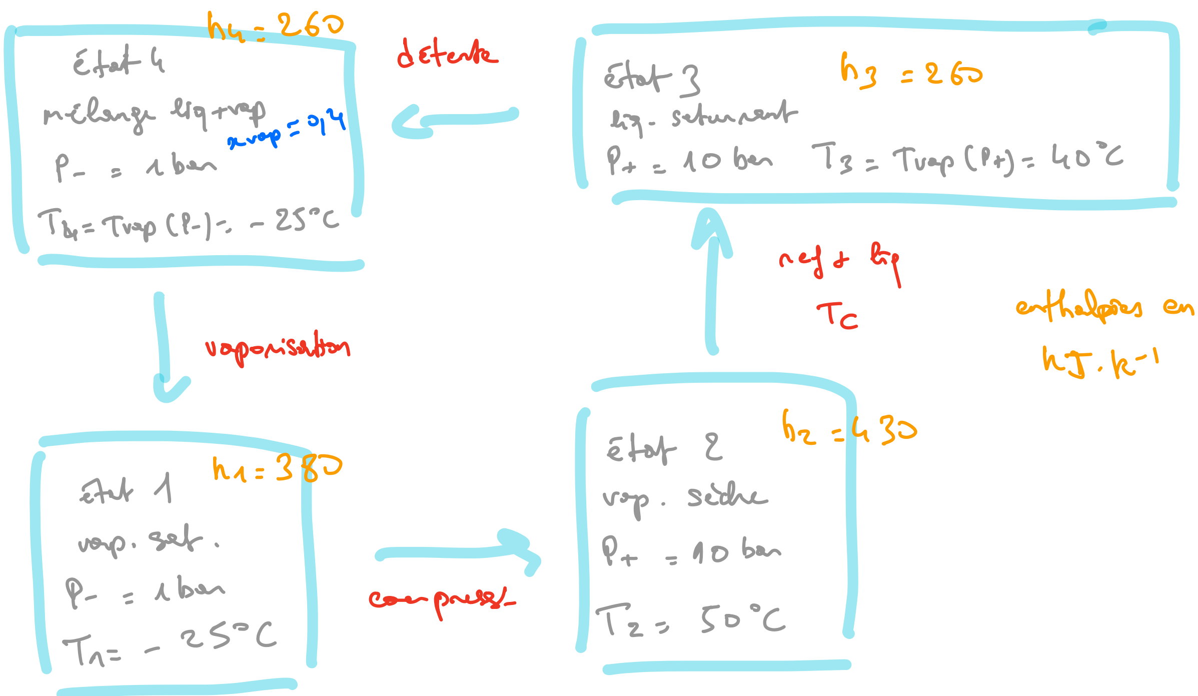
2 → 3 : refroidissement + liquéfaction isobares

3 → 4 : détente isenthalpique

4 → 1 : vaporisation isobare

Pour tracer le diagramme, on prendra $P_- = 1$ bar et $P_+ = 10$ bar

On peut relever sur le diagramme :



On peut calculer

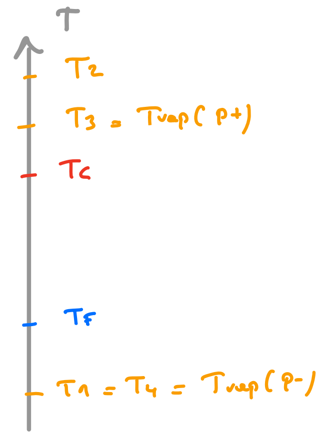
$$q_c = h_3 - h_2 = -170 \ kJ.kg^{-1}$$

$$q_f = h_1 - h_4 = 120 \ kJ.kg^{-1}$$

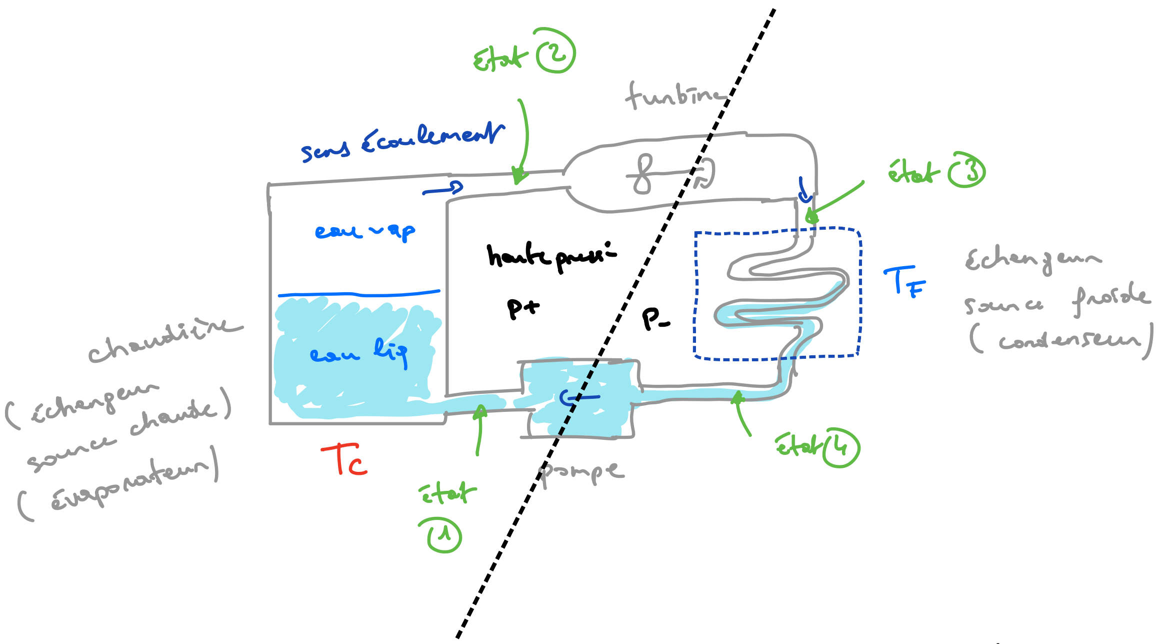
$$w = h_2 - h_1 = 50 \ kJ.kg^{-1}$$

efficacité (en tant que machine frigo.) : $\eta = \frac{q_f}{w} = \frac{120}{50} = 2,4$

Rem (importante !) : étagement des ≠ températures remarquables



2.2 Machine à vapeur (cycle de Rankine)



état (1) : eau liq haute pression ($p+$) et basse température $T_4 \simeq T_1$ (*)

état (2) : eau vap haute pression ($p+$) et haute température
hypothèse : vap saturante
$T_2 = T_{vap}(p+)$

état (3) : mélange liq + vap basse pression ($p-$) et basse température
$T_3 = T_{vap}(p-)$

état (4) : eau liq, p^-
hypothèse : liq saturant
$T_4 = T_3$

(*) pourquoi $T_4 \simeq T_1$? entre 4 et 1, on "comprime" le liquide, i.e on ↗ la pression (de $p-$ à $p+$) sans (quasiment) rien changer d'autre, en particulier T

(l'eau liq. étant ≃ incompressible, la pompe n'apporte à peu près aucun travail).

en conséquence, sauf si P est sur l'un des axes, les points (1) et (4) sont confondus dans le diagramme

hypothèses sur la nature des évolutions :

$1 \to 2$: chauffage + vaporisation isobares (chaudière = échangeur T_C)

$2 \to 3$: détente dans la turbine ≃ adiabatique / réversible (isentropique)

3 → 4 : liquéfaction isobare (échangeur T_F)

4 → 1 : à peu près rien ... P ↗ (c'est plus isentropique qu'autre chose).

On trace le cycle dans un diagramme (T, s) avec $P_- = 1$ bar et $P_+ = 15$ bar

Résumé des 4 états, avec valeurs numériques :

état ① : liquide (pas saturant)
$P_+ = 15$ bar, $T_1 = T_4 = 100$°C
$h_1 = 420$ kJ/kg

→ chauffage + vaporisation →

état ② : vap saturante
$P_+ = 15$ bar, $T_2 = 200$°C
$h_2 = 2\,800$ kJ/kg

↓ détente ↓

état ③ : mélange liq + vap ($x \simeq 0{,}85$)
$P_- = 1$ bar $T_3 = 100$°C
$h_3 \simeq 2\,350$ kJ/kg

← liquéfaction ←

état ④ : liq saturant
$P_- = 1$ bar, $T_4 = 100$°C
$h_4 \simeq 420$ kJ/kg

↑ "compression" ↑

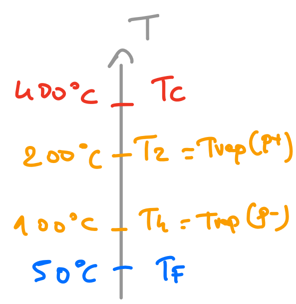
Calcul de q_C, q_F, w_u :

$q_C = h_2 - h_1 = 2\,380$ kJ/kg

$q_F = h_4 - h_3 = -1\,930$ kJ/kg

$w_u = h_3 - h_2 = -450$ kJ/kg

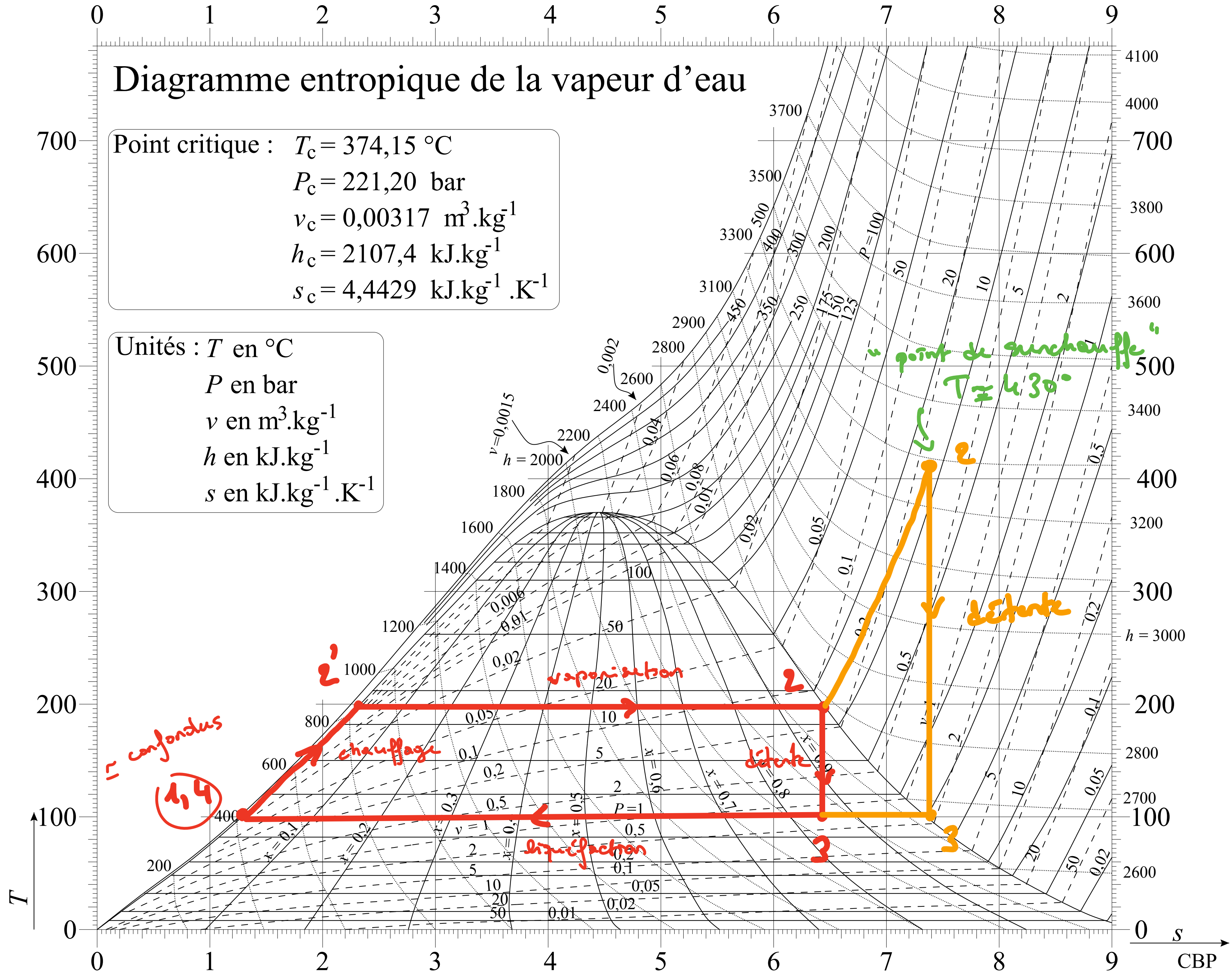
d'où le rendement : $\rho = \dfrac{|w_u|}{q_C} = 0{,}2$



rendement de Carnot (avec $T_C = 400$°C et $T_F = 50$°C) :

$\rho_C = 1 - \dfrac{T_F}{T_C} = 0{,}52$

⚠ températures en Kelvin !



Rem : la liquéfaction partielle lors de la détente n'est pas souhaitable (dégradation de la turbine).

re-heat

Solution : surchauffer (avec une 2° chaudière dans laquelle on fait passer la vapeur issue de la 1° chaudière) la vapeur avant la détente