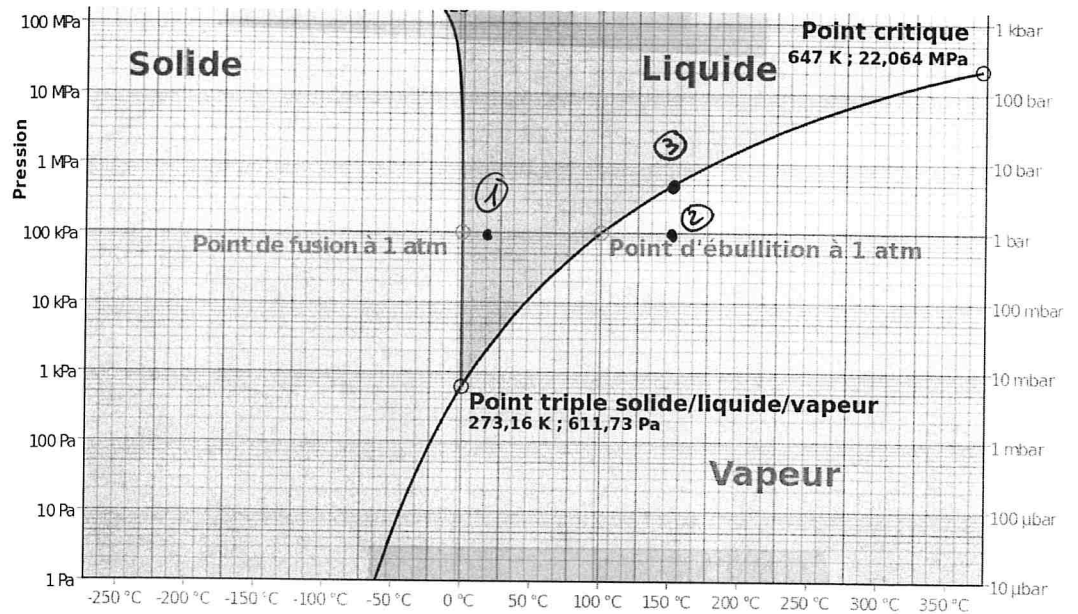


## I. Vaporisation de l'eau.

1. ① } Liq  
       }  $T_1, P_1$   
 (équilibre  
 thermique  
 et  
 mécanique)



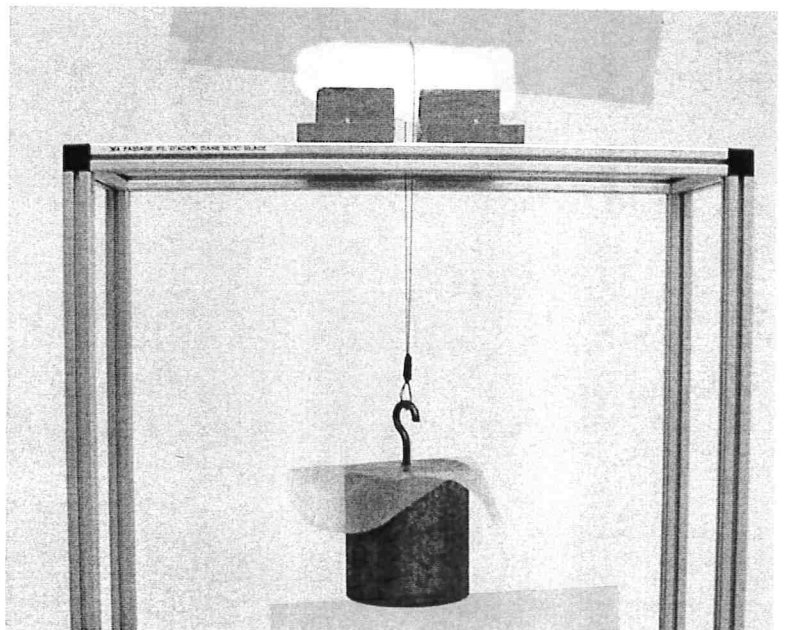
2. Particularité de l'eau : la pente de la frontière sol/liq est négative (cela est dû à  $\rho_{\text{glace}} < \rho_{\text{eau liq}}$ ).

L'expérience du REGEL met ce phénomène en évidence

Le fil de fer exerce une forte pression sur la glace fondante et la glace atteint la courbe de fusion : le fil de fer traverse l'eau qui est devenue liquide.

Après le passage du fil de fer l'eau se redevient solide car sa

température est légèrement négative (ds la zone d'équilibre du solide). Le fil de fer traverse la glace sans la couper !



3. Les équilibres thermique et mécanique conduisent à: 2.

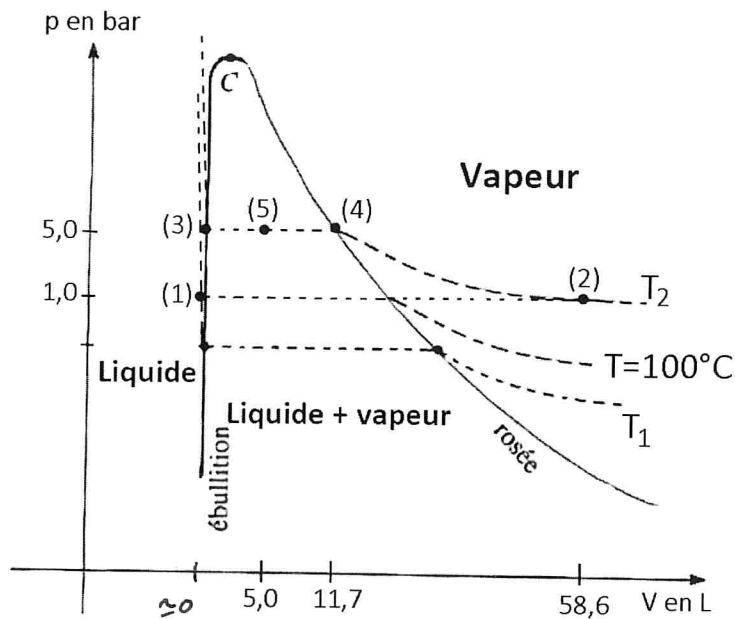
$$p_2 = p_1 \quad \text{et} \quad T_2 = 150^\circ\text{C}$$

$p_2 < p_{\text{sat}}(T_2)$  donc l'eau est sans forme de vapeur sèche :  $x_v = 1$ .

On en déduit, avec l'équation d'état :

$$V_2 = \frac{m}{M} \frac{RT_2}{p_0} = 58,6 \text{ L.}$$

4.

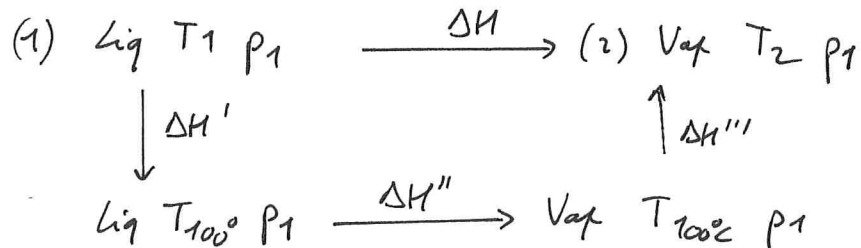


5. Système: eau - e'i : (1) e'f: (2)

Evolution: isobare

1<sup>er</sup> Principe pour une isobare :  $\Delta H = Q_{12}$  car  $W_{\text{elec}} = 0$

Or  $\Delta H = \Delta H' + \Delta H'' + \Delta H'''$  (car  $H = \text{fonct}^{\circ} \text{d'état}$ )  $\Delta E_m = 0$



$$\Delta H' = m c_{\text{liq}} (T_{100} - T_1) = 10,0 \text{ kJ.}$$

$$\Delta H'' = m \Delta h_{\text{vap}}(100^\circ\text{C}) = 67,8 \text{ kJ.}$$

$$\Delta H''' = m c_{\text{p,vap}} (T_2 - T_{100}) = 3,0 \text{ kJ.}$$

$$\Delta H = Q_{12} = 80,8 \text{ kJ.}$$



8. Si on revient à  $V_3 = V_1 \neq 0$  alors  $x_{V_3} = 0$  :  
 l'eau est entièrement liquide à  $T_2 = 150^\circ\text{C}$   
 et  $p_2 = 5,0 \text{ bar}$ .

9. éi : (2)      éf : (3)      transformation : isoT

1<sup>er</sup> p :  $\Delta U_{23} = Q_{23} + W_{p,23}$       Déf de H :  $\Delta H_{23} = \Delta U_{23} + \Delta(pV)_{23}$

Or  $\Delta H_{23} = \Delta H_{24} + \Delta H_{43} = 0 + m(-\Delta h_{\text{vap}}(T_2)) = -64,5 \text{ kJ} = \Delta H_{23}$

et  $\Delta(pV) = p_3 V_3 - p_2 V_2 = -p_2 V_2 = -\frac{m}{M} RT_2 = -5,9 \text{ kJ}$ .

Donc  $\Delta_{23} U = -58,6 \text{ kJ}$ .

10. Il reste à calculer  $W_{p,23}$  ... avec p qui varie avec V!

• Tant qu'il n'y a que de la vapeur (entre 2 et 4)  $\Rightarrow$  isoT.

$$W_{24} = \int_2^4 -p_{\text{ex}} dV = \int_2^4 -p dV = \int_2^4 -nRT_2 \frac{dV}{V} = -nRT_2 \ln \frac{V_4}{V_2}$$

avec  $V_4 = \frac{nRT_2}{p_3} = 11,7 \text{ L} \Rightarrow W_{24} = 9,44 \text{ kJ} > 0$

• Pdt le chgt d'état (entre 4 et 3)  $\Rightarrow$  isoT et isop. (compression)

$$W_{43} = \int_4^3 -p_3 dV = -p_3 (V_3 - V_4) = +p_3 V_4 = 5,85 \text{ kJ} > 0.$$

D'où  $W_{\text{tot},23} = 15,3 \text{ kJ}$  et  $Q_{23} = \Delta U_{23} - W_{\text{tot},23} = -73,9 \text{ kJ}$ .

11. Pour maintenir  $p_3 = 5,0 \text{ bar}$  l'opérateur doit exercer

une pression de  $4,0 \text{ bar} = \frac{F}{S} \Rightarrow F = S \times (p_3 - p_1)$   
 $(1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2)$   
 $= 1200 \text{ N}!$

(c'est énorme : seul un PC 1 peut y arriver! il s'agit sûrement de Simon!)

12.  $V_5 = 5,0 L$  et sans la courbe de saturation dans l'état (5) est un état liq-vap.

$T_5 = T_2 = 150^\circ C$  ;  $P_5 = P_{sat}(T_2) = 5,0 \text{ bar}$

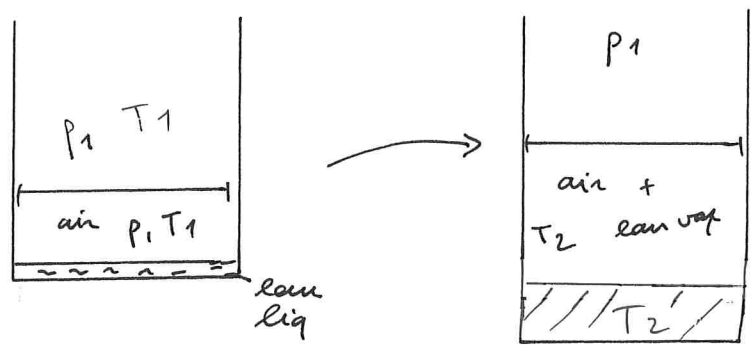
et  $x_{v_5} = \frac{[35]}{[34]} = 0,42$  grâce au th. des moments.

13. Cf question 9 avec une liquéfaction partielle :

$\Delta H_{35} = \Delta H_{34} + \Delta H_{45} = 0 + m x_{L_5} (-\Delta h_{vap}(T_2))$

$\Delta H_{35} = -m (1 - x_{v_5}) \Delta h_{vap}(T_2) = -37,4 \text{ kJ}$

14.



$P_1 = P_{eau} + P_{air}$

$x_{v_2'} = 1$

Dans l'état final, l'eau est entièrement vapeur car  $P_{eau} = P_1 - P_{air} < P_1 = 1,0 \text{ bar}$  et donc

$P_{eau} < P_{sat}(T_2) = 5,0 \text{ bar}$  : seule la vapeur peut exister.

Prends les 2 GP ensemble:  $P_1 V_2' = (n_{eau} + n_{air}) RT_2$

$\Rightarrow V_2' = 82,9 L$

Pour l'air seul :

$P_{air} = \frac{n_{air} R T_2}{V_2'} = 0,29 \text{ bar}$   
 $P_{eau} = \frac{n_{eau} R T_2}{V_2'} = 0,71 \text{ bar}$

et sans surprise :

(on a bien  $P_{air} + P_{eau} = 1,0 \text{ bar}$ ).

15. Rien!

## II Cogénération.

$$1. \quad P_{\text{prim}} = \frac{P_{\text{elec}} + P_{\text{th}}}{1} = 199 \text{ kW}$$

$$P'_{\text{prim}} = \frac{P_{\text{elec}}}{\eta_E} + \frac{P_{\text{th}}}{\eta_Q} = 305 \text{ kW}$$

$$P_{\text{perdue}} = P_{\text{prim}} - P_{\text{elec}} - P_{\text{th}} = 24 \text{ kW}$$

$$P_{\text{perdue}_1} = \frac{P_{\text{elec}}}{\eta_E} - P_{\text{elec}} = 121 \text{ kW}$$

$$P_{\text{perdue}_2} = \frac{P_{\text{th}}}{\eta_Q} - P_{\text{th}} = 9 \text{ kW}$$

$$2. \quad \text{EEP} = 34,8\%$$

3. C'est le sens de parcours du cycle qui indique que c'est un moteur : sens horaire  $\Rightarrow W_{\text{cycle}} < 0$ .  
C'est donc le moteur qui fournit du travail à l'opérateur.

[on peut aussi préciser que  $|W_{AB}| < |W_{CD}|$  (autre ad les courbes) et que  $W_{AB} > 0$  car compression alors que  $W_{CD} < 0$  car détente du gaz : bilan  $W_{\text{tot}} < 0$ ].

$$4. \quad \eta_{\text{mot}} = \frac{|W|}{Q_c}. \quad \text{Or sur un cycle } \Delta U = 0 \text{ donc}$$

$$-W = Q_c + Q_F$$

(syst = le gaz).

$$\Rightarrow \eta_{\text{mot}} = 1 + \frac{Q_F}{Q_c}$$

$$\text{Or } Q_F = Q_{DA} = \Delta U_{DA} \quad (\text{rochae}) \quad \text{avec } \Delta U_{DA} = \frac{nR}{\gamma-1} (T_A - T_D)$$

$$\text{et } Q_c = Q_{BC} = \Delta U_{BC} \quad (\text{car rochae}) \quad \text{avec } \Delta U_{BC} = \frac{nR}{\gamma-1} (T_C - T_B)$$

$$\Rightarrow \eta_{\text{mot}} = 1 + \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B}$$

De plus, entre A et B, l'évolution est adiab. rév  $\Rightarrow$  laplace.

$$T_B = T_A \cdot \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\gamma-1} : \quad T_B = T_A \cdot a^{\gamma-1} = 580 \text{ K}$$

$$\text{De m\^e} : \quad T_D = T_C \cdot a^{-\delta+1} = 1138 \text{ K} \quad \Rightarrow \quad \eta_{\text{mot}} = 48 \%$$

5.  $\eta_{\text{net}}$  correspond à la donnée du rendement électrique (35%) de la centrale électrique seule ( $\eta_E$ ).

En réalité: - les adiabatiques ne sont pas réversibles

- la combustion n'est pas parfait + isochore

- l'admission et le refoulement ne se compensent pas totalement.

6.  $\eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C} = 86\% > \eta_{\text{net}}$  car le moteur étudié n'est pas réversible.

7. En faisant le bilan sur une durée  $\Delta t$  on peut calculer la chaleur reçue par l'eau de refroidissement de l'échangeur 1:

$$Q_1 = m c_{\text{eau}} (T_2 - T_1) = \Delta H_1 \quad \text{car l'échangeur est isolé.}$$

Sur la durée  $\Delta t$ :  $m = D_{e,r} \times \Delta t$

D'où: 
$$P_{\text{th}1} = \frac{Q_1}{\Delta t} = D_{e,r} \cdot c_{\text{eau}} \cdot (T_2 - T_1) = 73,9 \text{ kW}$$

8. De  $\dot{m}$ : 
$$P_{\text{th}2} = D_{e,r} \cdot c_{\text{eau}} (T_4 - T_3) = 370 \text{ kW.}$$

9. Faisons le même bilan pour les gaz d'échappement:

$$P_{\text{ch}2} = -D_{\text{gaz}} \cdot c_{p,\text{gaz}} (T_f - T_{\text{refoul}})$$

D'où 
$$T_f = T_{\text{refoul}} - \frac{P_{\text{ch}2}}{D_{\text{gaz}} \cdot c_{p,\text{gaz}}}$$

Or  $c_{p,\text{gaz}} = c_{p,m} / M_{\text{gaz}}$  avec  $c_{p,m} = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$  \*

[\* démo:  $H = U + pV \xrightarrow{GP} H = U + nRT$   
 $\xrightarrow{\frac{d}{dT}} c_p = c_v + nR = c_{p/k} + nR$   
 $\Rightarrow c_p = \frac{nR\gamma}{\gamma - 1} \Rightarrow c_{p,m} = \frac{R\gamma}{\gamma - 1}$  ]

AN:  $c_{p,m} = 36,0 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$   $c_p = 1,24 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

$\Rightarrow T_f = 202^\circ \text{C}$  (475K.  $> T_4$ : *ouf!*)

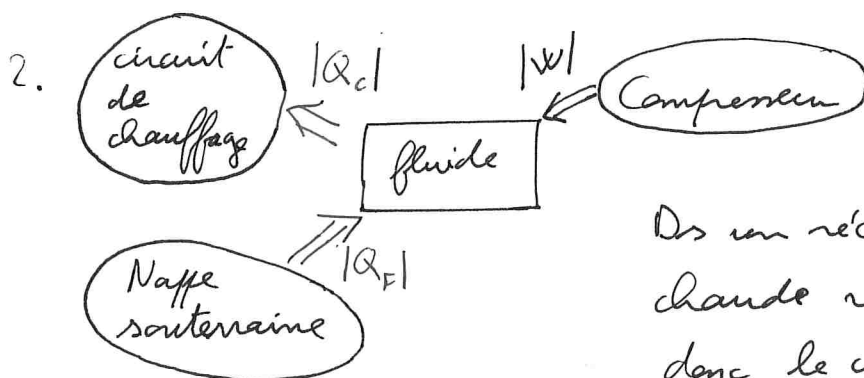
### III Pompe à chaleur géothermique.

1. Par définition :  $\Delta h_{\text{vap}}(323\text{K}) = h_{\text{v}}(323\text{K}) - h_{\text{liq}}(323\text{K})$

car  $\Delta H = \Delta h_{\text{vap}}$  lors de la transformation

1kg liq à 323K  $\longrightarrow$  1kg de vap à 323K.

D'où  $\Delta h_{\text{vap}}(323\text{K}) = 151,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$   
 et  $\Delta h_{\text{vap}}(288\text{K}) = 185,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} > \Delta h_{\text{vap}}(323\text{K})$   
 ( $\Delta h_{\text{vap}}$  diminue avec T jusqu'à  $T_c$ ).



Des son récepteur la source chaude reçoit de la chaleur donc le circuit d'eau de chauffage est la source chaude.

La nappe souterraine fournit de la chaleur: c'est la source froide.

3. Système : le fluide.

$Q_c, Q_f$  et  $W$  sont les énergies reçues par le fluide:

$W > 0 ; Q_c < 0 ; Q_f > 0.$

$$e = \frac{-Q_c}{W}$$

Par un cycle réversible (cycle de Carnot inverse):

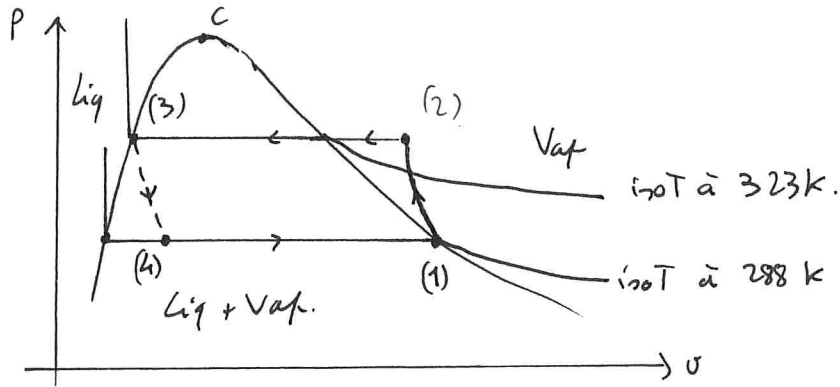
$$\Delta U = 0 = Q_c + Q_f + W \quad \text{et} \quad \Delta S = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + 0$$

D'où :  $Q_f = -W - Q_c$  et  $Q_c \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_f} \right) = \frac{W}{T_f}$

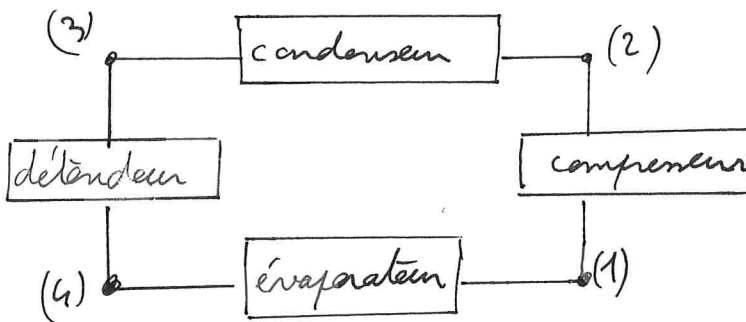
Donc :  $\frac{-Q_c}{W} = e_{\text{max}} = \frac{T_c}{T_c - T_f} = 9,2$



4.



5. Dans le condenseur le fluide se liquéfie donc il libère de la chaleur : il doit être au contact de la source chaude pour avoir  $Q_c < 0$ .  
L'échange avec la source chaude se fait lors de l'étape : 2 → 3.  
L'échange avec la source froide est l'étape 4 → 1.



6.  $W_{\text{cycle}}$  est l'aire du cycle ds le diagramme de Clapeyron.

$$\left[ W_{AB} = \int_A^B -pdV \quad \text{donc } |W_{AB}| = \text{aire sous la courbe.} \right.$$

$W_{AB} = +$  aire si compression car  $W_{AB}$  est alors positif.

Pour un cycle  $W = \text{aire du cycle}$  si c'est un récepteur  $W > 0$ .

En augmentant  $T_F$  on diminue l'aire du cycle donc le travail à fournir à la PAC :  $e = \frac{-Q_c}{W}$

augmente donc.

La température de l'aquifère (nappe sous-terreine) est plus élevée ( $\sim 15^\circ\text{C}$ ) que l'air extérieur en hiver. donc  $T_F > T_{\text{air}}$  et l'efficacité est + élevée.

7. Encore un compresseur adiabatique réversible!

On pense à Laplace car  $\text{CP} + \text{adial} + \text{rév}$ !

$$\text{D'au } T_2^\gamma P_2^{1-\gamma} = T_1^\gamma P_1^{1-\gamma} \Rightarrow T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 335\text{K}$$

car  $P_1 = P_{\text{sat}}(T_1)$  et  $P_2 = P_3 = P_{\text{sat}}(T_3)$  (62°C)

8. (2)  $\rightarrow$  (3) = transformation isobare. Pour 1 kg de fluide

on a:  $q_{23} = \Delta_{23} h = \Delta_{22'} h + \Delta_{2'3} h$  car  $h =$  fonction d'état

D'au  $q_{23} = c_p(T_3 - T_2) - \Delta h_{\text{vap}}(T_3)$  avec (2') sur la courbe de saturation à  $T_c = T_3$

De plus  $c_p = \frac{c_{p,m}}{M} = \frac{R\gamma}{(\gamma-1)M} \Rightarrow q_{23} = \frac{R\gamma}{M(\gamma-1)}(T_3 - T_2) - \Delta h_{\text{vap}}(T_3)$   
 $= -157,8 \text{ kJ.kg}^{-1}$

On a:  $|\Delta_{22'} h| \ll |\Delta_{2'3} h|$

Les chgt d'état permettent de forts échanges d' $\epsilon$  sans variations importantes de température.

9. De (3) à (4):  $\Delta_{34} h = 0$  donc  $h_3 = h_4$ .

Or  $h_3 = h_L(T_3)$  et  $h_4 = h_L(T_1)x(1-x_{v4}) + h_V(T_1)x_{v4}$

D'au  $x_{v4} = \frac{h_L(T_3) - h_L(T_1)}{h_V(T_1) - h_L(T_1)} = \frac{h_4 - h_L}{h_V - h_L} \text{ à } T_1 = 27\%$  C'est le th. des moments!  $x_v = \frac{EM}{ER}$

10. de (4) à (1): évolution isobare donc le 1<sup>er</sup> P donne, pour 1 kg de fluide:

$$q_{41} = \Delta_{41} h = (1-x_v) \cdot \Delta_{\text{vap}} h(T_1) = 135,1 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

11. Sur un cycle  $\Delta u = 0$

dans  $w_{\text{cycle}} = q_{23} - q_{41}$  car  $q_{12} = q_{34} = 0$  (adiabatiques)  
 $= 22,7 \text{ kJ.kg}^{-1}$

12.  $e = \frac{-q_{23}}{w_{\text{cycle}}} = 6,95 < e_{\text{max}}$  car les étapes 2 $\rightarrow$ 2' et 3 $\rightarrow$ 4 sont irréversibles  
 inhomogénéité de T brusque.

13.  $|q_c| = 158,8 \text{ kJ.kg}^{-1}$  or  $P_c = |q_c| \times D_{\text{max}} \Rightarrow D_{\text{max}} = 50,7 \text{ kg.s}^{-1}$   
 $P_m = D_{\text{max}} \cdot w = 1,15 \text{ kW}$