

# Climatiseur à ammoniac

On s'intéresse au fonctionnement d'un appareil de climatisation, dont le but est de maintenir une température constante ( $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ) dans un local été comme hiver. Le climatiseur fonctionne donc en pompe à chaleur l'hiver, en machine frigorifique l'été. Les transferts thermiques du climatiseur se font avec 2 sources :

- L'intérieur de la pièce (à  $T_0$ ).
- L'atmosphère extérieure (on prendra  $T_1 = 0^\circ\text{C}$  en hiver ;  $T_2 = 40^\circ\text{C}$  en été afin de prévoir des conditions « extrêmes »).

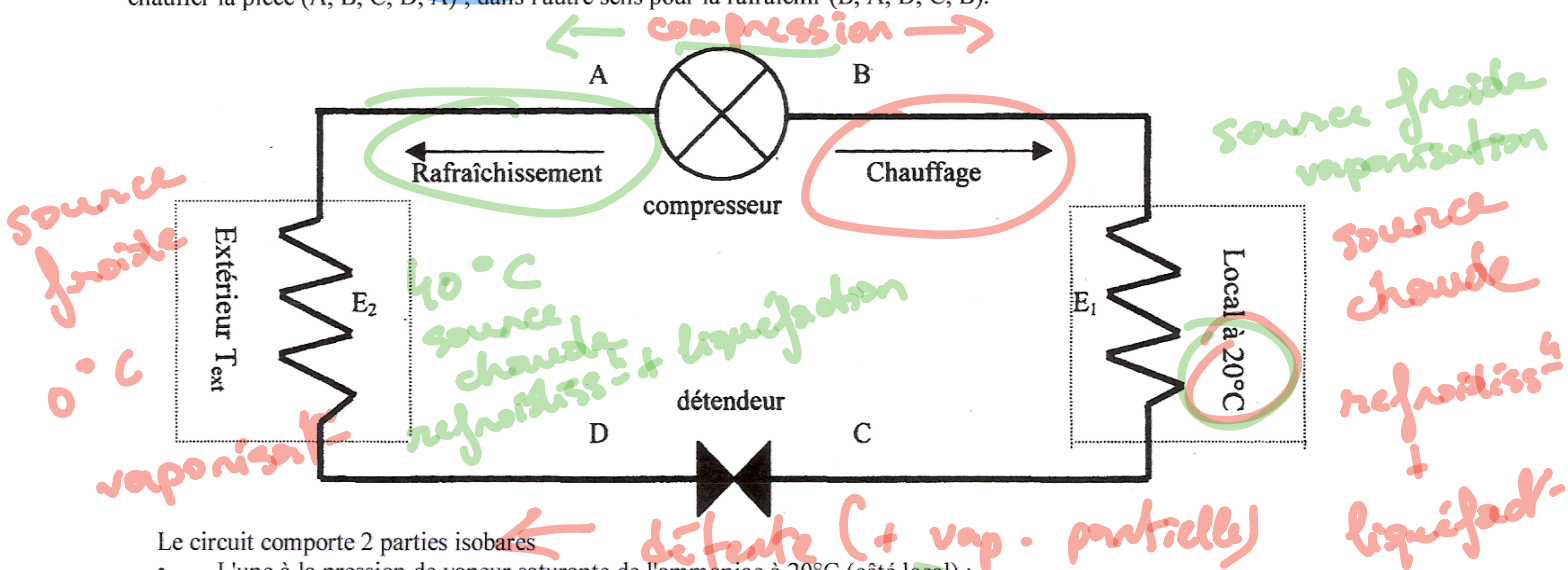
Le fluide caloporteur qui effectue des cycles dans l'appareil est l'ammoniac. Ses caractéristiques thermodynamiques sont résumées dans le diagramme entropique  $T(S)$  où sont représentées :

- les isenthalpiques ( $H$  est donné en  $\text{kJ/kg}$ );
- les isobares (représentées par  $-----$  dans le domaine « vapeur sèche »).

On donne, par ailleurs, les pressions de vapeur saturante  $P_s(T)$  aux trois températures d'étude

$P_s(0^\circ\text{C}) = 4,3 \text{ bars}$      $P_s(20^\circ\text{C}) = 8,2 \text{ bars}$      $P_s(40^\circ\text{C}) = 15 \text{ bars}$

On se limitera à l'étude du climatiseur en régime permanent. Par un jeu de vannes adéquat, le fluide peut circuler dans un sens pour chauffer la pièce (A, B, C, D, A) ; dans l'autre sens pour la rafraîchir (B, A, D, C, B).



Le circuit comporte 2 parties isobares

- L'une à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à  $20^\circ\text{C}$  (côté local) ;
- L'autre à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à  $T_{\text{ext}}$  (côté atmosphère extérieure).

Par ailleurs, on rappelle qu'à la traversée d'une partie active (compresseur, détendeur ou échangeur) l'énergie reçue par le fluide circulant en régime permanent vérifie :

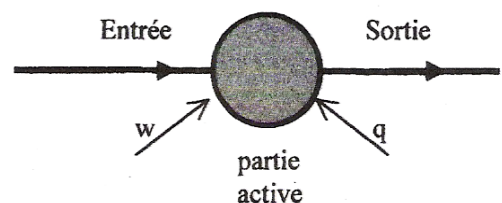
$$\Delta h = h_s - h_e = w + q$$

si  $h_e$  et  $h_s$  sont les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie ;  $w$  et  $q$  étant le travail et la chaleur utiles reçus (c'est-à-dire échangés avec l'extérieur du circuit, excluant le travail des forces de pression) par kilogramme de fluide traversant la partie active.

Le fluide subit des échanges de chaleur isobares (sans recevoir de travail utile) dans les échangeurs  $E_1$  et  $E_2$  avec les 2 sources de chaleur (local et atmosphère extérieure). Un système de ventilation permet d'améliorer les échanges thermiques : la température du fluide est celle de la source d'échange à la sortie de chacun d'entre eux.

Le compresseur comprime de manière adiabatique réversible le fluide à l'état gazeux de la plus faible à la plus forte pression. L'unité de masse de fluide traité y reçoit le travail utile  $w$ .

Le fluide subit une détente adiabatique, sans échange de travail utile, dans le détendeur (la détente est donc isenthalpique).



## I. Généralités

- I-1- Comment réalise-t-on un détendeur (détente isenthalpique d'un fluide) ? Quel autre nom porte une telle détente ?
- I-2- Le premier principe de thermodynamique est bien vérifié dans une partie active ; c'est pourtant  $\Delta h$  (et non  $\Delta u$ ) qui est égal à  $(w + q)$ ... Expliquer qualitativement (sans entrer dans le détail d'une démonstration) cette différence.
- I-3- En supposant que l'ammoniac, à l'état gazeux dans le compresseur, est assimilable à un gaz parfait de coefficient  $\gamma$  constant, exprimer le rapport  $(T_s/T_e)$  (des températures absolues de sortie et d'entrée dans le compresseur) en fonction de  $\gamma$  et  $P_s/P_e$  (rapport des pressions de sortie et d'entrée du compresseur).
- I-4- Expliquer pourquoi dans le diagramme (T,s), lorsque le liquide et la vapeur coexistent, les isobares sont des droites horizontales.
- I-5- Justifier le fait que, étant donné les hypothèses ci-dessus, la compression réalisée par le compresseur est isentropique.
- I-6- Par lecture du graphe, déduire par deux méthodes les enthalpies massiques de vaporisation de l'ammoniac à 0°C, 20°C et 40°C .

## II. Fonctionnement hivernal du climatiseur ( chauffage )

Dans ce cas :

- l'échangeur  $E_1$  est un condenseur : l'ammoniac y entre en B sous forme de vapeur sèche ; il en ressort sous forme de liquide saturant (i.e à l'extrémité gauche du palier de changement d'état) en C, à la température  $T_0$  du local (20°C)
  - l'échangeur  $E_2$  est un évaporateur : le mélange liquide vapeur qui entre en D (à 0°C) se vaporise totalement pour ressortir sous forme de vapeur saturante en A à la température de l'atmosphère extérieure  $T_1 = 0^\circ\text{C}$ .
- II-1- Tracer le cycle (en l'orientant) de l'ammoniac sur le diagramme entropique. Trouver graphiquement sa température  $T_B$  à la sortie du compresseur.
- II-2- Déterminer (graphiquement), pour 1kg d'ammoniac traité (on rappelle que  $E_1$ ,  $E_2$  et le compresseur sont des parties actives) :
- Le travail  $w$  fourni par le compresseur au fluide ;
  - La chaleur  $q_c$  reçue par le fluide (de la part du local) lors du passage dans l'échangeur  $E_1$  ;
  - La chaleur  $q_f$  reçue par le fluide (de la part de l'extérieur) lors de son passage dans  $E_2$ .
- II-3- Définir et calculer l'efficacité  $\eta$  du climatiseur. Quel intérêt présente une telle installation par rapport à un chauffage par chaudière ? Quel serait le coefficient si le fluide effectuait des cycles de Carnot en effectuant les échanges thermiques avec les mêmes sources de chaleur ?
- II-4- Quelle est la fraction massique de vapeur  $X_D$  à la sortie du détendeur ? ( le théorème des moments fonctionne aussi dans le diagramme (T,s) ).
- II-5- En utilisant le résultat de la question I-3-, évaluer le coefficient  $\gamma$  du gaz ammoniac.

## III. Fonctionnement estival du climatiseur ( rafraîchissement )

Les rôles des 2 échangeurs sont inversés :

$E_1$  est un évaporateur : le mélange liquide vapeur qui entre se vaporise totalement pour ressortir sous forme de vapeur saturante .

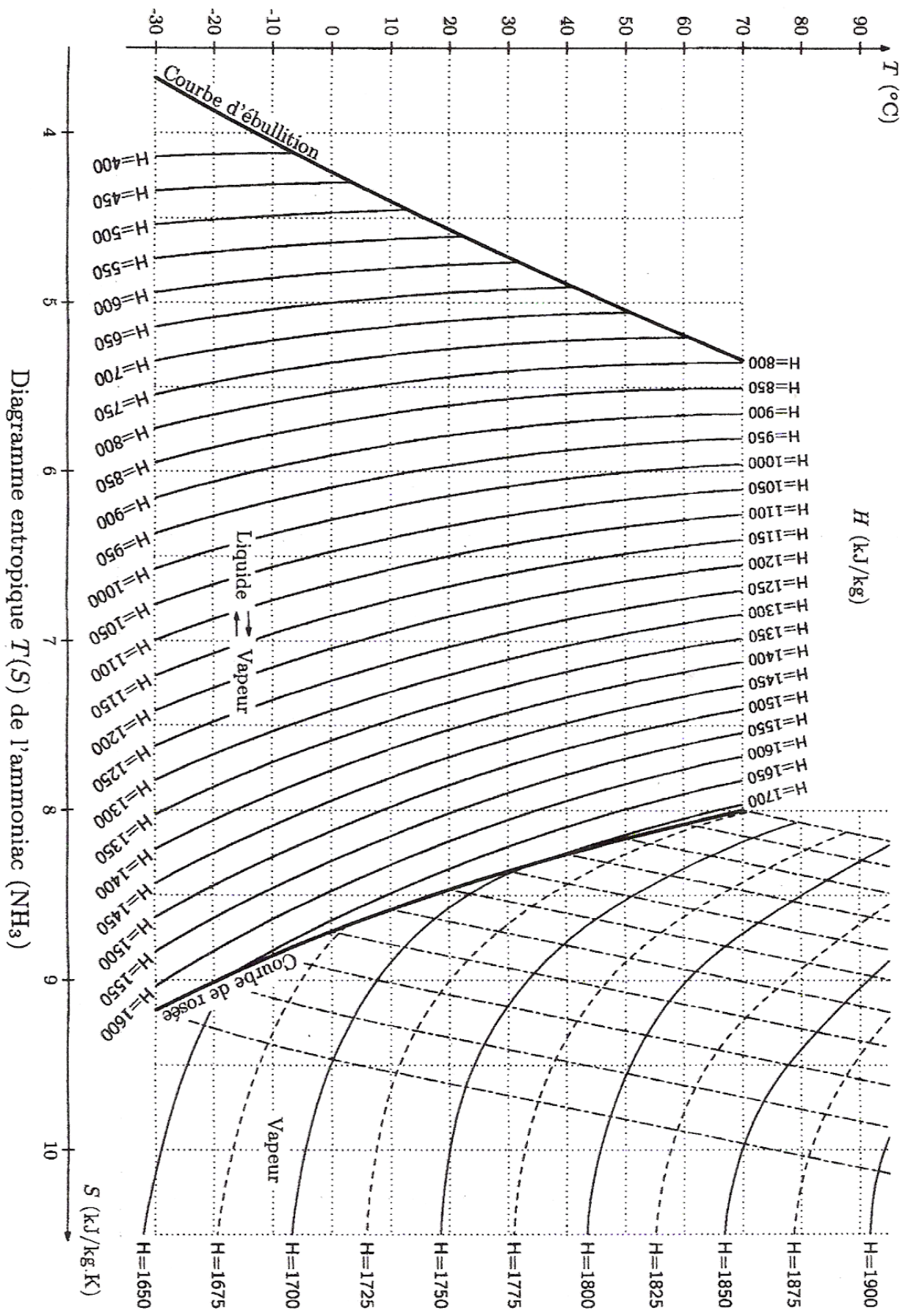
$E_2$  est un condenseur : l'ammoniac y entre sous forme de vapeur sèche ; il en ressort sous forme de liquide saturant .

III-1- Tracer le cycle (orienté) de l'ammoniac sur le diagramme entropique (on affectera les points de l'indice '). En déduire sa température  $T'_A$  à la sortie du compresseur.

III-2- Déterminer (graphiquement), pour 1 kg d'ammoniac traité (même remarque qu'en II-2-)

- Le travail  $w'$  fourni par le compresseur;
- La chaleur  $q'_1$  reçue (de la part de la pièce) lors du passage dans l'échangeur  $E_1$  ;
- La chaleur  $q'_2$  reçue (de la part de l'extérieur) lors du passage dans  $E_2$ .

III-3- Définir et calculer l'efficacité  $\eta'$  du climatiseur dans ce fonctionnement.



$\checkmark \quad \checkmark \quad K_B \ln(\Omega)$

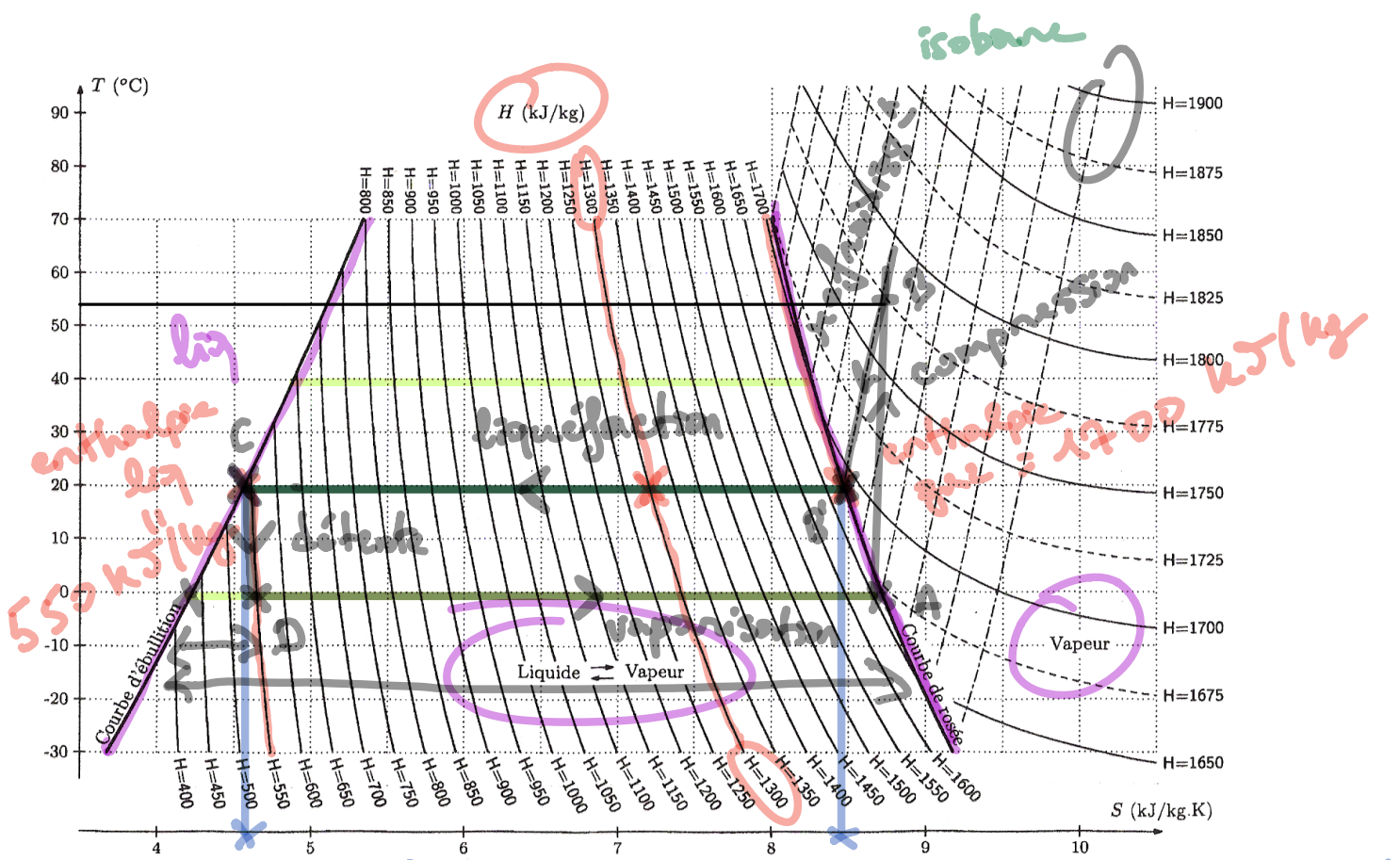


Diagramme entropique T(S) de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>)

$s_{liq} = 4,6 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

$s_{vap} = 8,4 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

## Partie I

1. rétrécissement - Joules Thomson. ( $H = c^{st}$ )

2.  $\Delta u = w + q$  pour un système fermé.  
pour un écoulement en RS on écrit:

$$\Delta u = w_p + w_u + q \rightarrow \text{Echanges thermiques}$$

travail des  
forces de pression

travail "utile",  
lié aux pièces mobiles

$$\Delta u - w_p = w_u + q$$

Rappel -

3. Loi de Joule: ( $\gamma$ )  $U = c_v T$  /  $H = c_p T$

Loi de Laplace (pour  $\gamma$ ) | Évolut = adiabatique + rev. | isentropique

$$P V^\gamma = c^{st}$$

$$\text{ou, } V = n R \frac{T}{P} = c^{st} \frac{T}{P}$$

$$\text{Donc on a } P \left(\frac{T}{P}\right)^\gamma = c^{st}$$

$$\text{D'où } P^{1-\gamma} T^\gamma = c^{st}$$

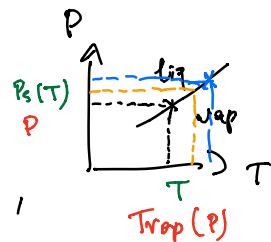
$$\text{On a donc: } P_e^{1-\gamma} T_e^\gamma = P_s^{1-\gamma} T_s^\gamma$$

$$\text{D'où } \left(\frac{T_s}{T_e}\right)^\gamma = \left(\frac{P_e}{P_s}\right)^{1-\gamma} = \left(\frac{P_s}{P_e}\right)^{\gamma-1}$$

$$\text{et donc } \boxed{\frac{T_s}{T_e} = \left(\frac{P_s}{P_e}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

$$\Delta S = S_{ech} + S_{cree}$$

4. liq + vap coexistent, P et T sont liés  
donc les isobares sont aussi des isothermes,  
donc horizontales  $T \uparrow$



5. hxp: adiabatique + réversible

2° principe:  $\Delta S = \underbrace{S_{ech}} + \underbrace{S_{créé}} = 0$  car réversible  
 $= 0$  car adiabatique

Donc  $\Delta S = 0$ .

6. enthalpies massiques de vaporisation à 0, 20 et 40°C :

1° méthode: différences des enthalpies aux 2 extrémités du palier de ch. d'état

pour 20°C:  $l(20^\circ\text{C}) = h_{\text{vap}} - h_{\text{liq}}$   
 $= 1700 - 550$   
 $= 1150 \text{ kJ/kg}$

de même:  $l(0^\circ\text{C}) = 1250 \text{ kJ/kg}$

$l(40^\circ\text{C}) = 1050 \text{ kJ/kg}$

2° méthode: pour un ch. d'état à  $P, T$  c<sup>ste</sup>  
on a  $\Delta S = \frac{L}{T}$ .

donc on calcule  $L$  par  $L = T \Delta S$

(  $l = T \Delta S$  avec les grandeurs massiques )

à 20°C:  $\Delta S = s_{\text{vap}} - s_{\text{liq}} = 8,4 - 4,6$   
 $= 3,8 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

et  $l = 293 \times 3,8 = 1115 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

plus précis mais autre de grandeurs de

de même pour les 2 autres valeurs -

## partie II

1. cf diagramme - sens trigo (récepteur).  $t_B = 55^\circ\text{C}$

2. partie active:  $\Delta h = q + w_u$

• compresseur:  $w_u = h_B - h_A = 100 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

• condenseur (à s chaude):  $q_c = h_c - h_B =$   
 $550 - 1775 =$

$-1225 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

• évaporateur (à s froide):  $q_f = h_A - h_D = 1125 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

3.  $\Delta$  on a bien  $q_c + q_f + w = 0$   
 $\eta = \frac{|q_c|}{w}$  ( le but est de chauffer )

A.N :  $\eta = 12$

Par rapport à un chauffage électrique, on consomme 12 fois moins d'électricité pour le même chauffage -

efficacité de Carnot :  $\eta_c = \frac{T_c}{T_c - T_f}$

A.N :  $\frac{293}{20} \approx 14,7$

pour retrouver l'efficacité de Carnot :  $\eta_c = \frac{|q_c|}{w} = \frac{-q_c}{-q_c - q_f} = \frac{-q_c}{-q_c - q_f}$  car  $w + q_c + q_f = 0$   
 $= \frac{q_c}{q_c + q_f} = \frac{1}{1 + q_f/q_c}$

on utilise l'égalité de Clausius :

$\Delta s_{total} = \Delta s_{ch} + \Delta s_{ref} = \frac{q_c}{T_c} + \frac{q_f}{T_f}$   
 (réversible)

donc  $\frac{q_c}{T_c} + \frac{q_f}{T_f} = 0$

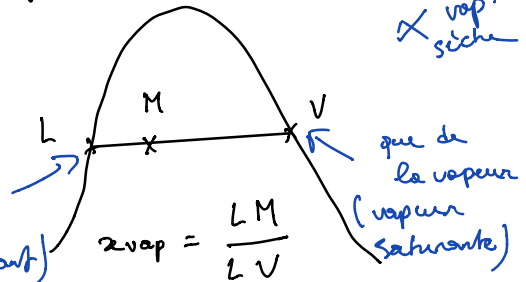
d'où  $\frac{q_f}{q_c} = -\frac{T_f}{T_c}$

et donc  $\eta_c = \frac{1}{1 - T_f/T_c} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$

4. fraction massique de vapeur à la sortie du distillateur ?  
 → proportion de vapeur ds le mélange

$x_{vap} = \frac{\text{masse vapeur}}{\text{masse totale}}$

que du liquide (liquide saturant)



On trouve  $x_D = 8,5\%$ .

5. On a trouvé  
au I.3 !

$$\frac{T_S}{T_e} = \left( \frac{P_S}{P_e} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

On a donc :  $\ln \left( \frac{T_S}{T_e} \right) = \frac{\gamma-1}{\gamma} \ln \left( \frac{P_S}{P_e} \right)$

et donc  $(\gamma-1) \ln \left( \frac{P_S}{P_e} \right) = \gamma \ln \left( \frac{T_S}{T_e} \right)$

soit  $\gamma \left( \ln \left( \frac{P_S}{P_e} \right) - \ln \left( \frac{T_S}{T_e} \right) \right) = \ln \left( \frac{P_S}{P_e} \right)$

et donc  $\gamma = \frac{\ln \left( \frac{P_S}{P_e} \right)}{\ln \left( \frac{P_S}{P_e} \right) - \ln \left( \frac{T_S}{T_e} \right)}$

$$T_e = T_A = 273 \text{ K } (0^\circ\text{C})$$

$$T_S = T_B = 328 \text{ K } (55^\circ\text{C})$$

A.N. :

$$P_e = P_A = P_{\text{sat}}(0^\circ\text{C}) = 4,3 \text{ bar}$$

$$P_S = P_B = P_{B'} = P_{\text{sat}}(20^\circ\text{C}) = 8,2 \text{ bar}$$

On trouve  $\gamma = 1,4$

pression en bar ou en pascal pour les A.W. ?

à priori, en pascal (1 bar =  $10^5$  Pa)

et :  $V = \frac{nRT}{P}$

sauf si on a un rapport de 2 pressions,  
on peut laisser en bar (ça marche aussi  
en pascal)





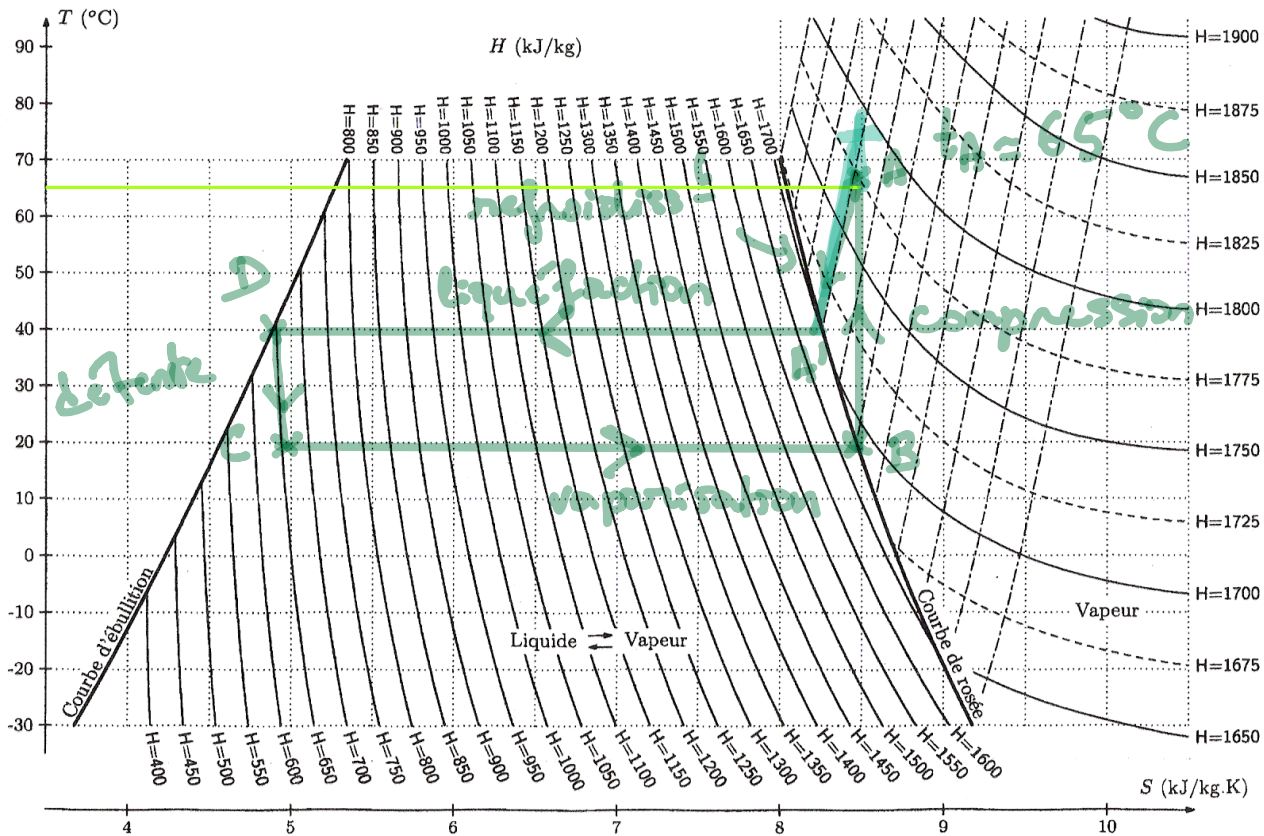


Diagramme entropique  $T(S)$  de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ )

M

1. sens trigo :  $t_A = 65^\circ\text{C}$

2.  $w = h_A - h_B = 80 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$q_F = h_B - h_C = 1050 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

$q_C = h_D - h_A = 1130 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

3.  $\eta = \frac{P_F}{w}$      A.N :  $\eta = 12$

$\eta_C = \frac{T_F}{T_C - T_F} = \frac{293}{20} \approx 14,7$