

Fabriquer de l'eau à partir de l'air

I) Cycle du fluide réfrigérant dans le système "générateur d'eau atmosphérique"

Q1) Le fluide R134a circule dans le compresseur, le condenseur, le tube capillaire et l'évaporateur. Or condenseur et évaporateur sont des échangeurs thermiques.

→ détendeur = tube capillaire (organe statique où P > (détente) par perte de charge)

L'échangeur 2 fournit de la chaleur au fluide, qui alors se vaporise ( $l_{vap} > 0$ , besoin d'un apport d'énergie) → échangeur 2 = évaporateur

L'échangeur 1 extrait de la chaleur au fluide, qui se liquéfie ( $l_{liq} = -l_{vap} < 0$ ).

→ échangeur 1 = condenseur

Q2) \* Dans un évaporateur, le fluide reçoit de l'énergie ( $l_{vap} > 0$ ).

\* Dans un réfrigérateur, le fluide prend de l'énergie à la source froide.

→ l'évaporateur est au contact de la source froide

\* Dans un condenseur, le fluide cède de l'énergie ( $l_{liq} < 0$ ).

\* Dans un réfrigérateur, le fluide cède de l'énergie à la source chaude.

→ le condenseur est au contact de la source chaude

→  $T_{B-C} > T_{D-A}$

or  $P_{sat}(T)$  est une fonction croissante de la température →  $P_B > P_A$

Or dans le compresseur,  $P \uparrow$

→ le fluide circule dans le sens 1.

Q3) Au contact de l'évaporateur, l'air cède de l'énergie au fluide R134a → l'air se refroidit. Au contact du condenseur, l'air reçoit de l'énergie de la part du fluide R134a → l'air se réchauffe.

Intérêts:

↳ si on force l'air à traverser le condenseur, ça permet de réchauffer l'air froid qui se trouve en sortie d'évaporateur.

→ on ne rejette ni un air froid, ni un air trop chaud → + de confort.

(sinon : air froid en sortie de l'évaporateur et air chaud en sortie du condenseur).

↳ la convection forcée favorise les transferts thermiques. Ce n'est pas le cas dans un réfrigérateur, où

le condenseur se trouve derrière le réfrigérateur.

On ne force pas l'air de la pièce à échanger de l'énergie (pas de convection forcée). Et les fluides des sources froides et chaudes sont distincts.

Q4) (A) : entrée du compresseur

isobare 3 bar  $\wedge$  courbe de rosée (= 0,37 bar) (vapeur saturée sèche)

A → B : isentropique  $\Delta_A$

(B) : isentropique  $\Delta_A \wedge$  isobare 20 bar = 2017 Pa

B → C : isobare 20 bar

(C) isobare 20 bar  $\wedge$  courbe d'ébullition (liquide saturant) → liquéfaction totale, pas de sous-refroidissement

C → D : 1<sup>er</sup> principe industriel (écoulement stationnaire):

$\Delta h + \Delta \frac{v^2}{2} + \Delta \phi_p = \eta_i + \dot{q}$  pas de chaleur lent négligé indéfinissable (pas de parties mobiles)

→  $\Delta h = 0$  → isenthalpique → verticale

(D) : isenthalpe  $h_c \wedge$  isobare 3 bar

D → A : isobare 3 bar

→ sens horaire (OK: cycle récepteur)

Q5) Par lecture graphique:

entrée condenseur:  $T_B = 75^\circ\text{C}$

sortie condenseur:  $T_C = 66^\circ\text{C}$

Q6) Grâce aux courbes isothermes:  $x_D \approx 0,50$

Q7) 1<sup>er</sup> principe industriel entre (D) et (A):

$$\Delta h + \Delta f_c + \Delta f_p = w_i + q_F$$

lent négligé pas de parties mobiles (évaporateur)

$$\Rightarrow q_F = h_A - h_D$$

$$\approx 400 - 300 \Rightarrow q_F \approx 100 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Q8) 1<sup>er</sup> principe industriel entre (A) et (B):

$$\Delta h + \Delta f_c + \Delta f_p = w_i + q$$

lent négligé adiabatique (isentropique = adiabatique réversible)

$$\Rightarrow w_i = h_B - h_A$$

$$\approx 438 - 400 \Rightarrow w_i \approx 38 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Q9)  $\text{COP} = \frac{\text{but}}{\text{coût}} = \frac{\text{perte de l'énergie à la source froide}}{\text{travail à fournir au compresseur}}$

$$\text{COP} = \frac{q_F}{w_i} \approx \frac{100}{38}$$

$$\text{COP} \approx 2,6$$

Q10) 1<sup>er</sup> principe sur un cycle:  $\Delta U = Q_F + Q_C + W$

$$\Rightarrow W = -Q_F - Q_C$$

cycle et U fonction d'état

2<sup>nd</sup> principe sur un cycle:  $\Delta S = \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} + S_{\text{in}}$

hypothèse:  $T_F = c^{\text{te}}$ ,  $T_C = c^{\text{te}}$

cycle et S fonction d'état

$$\Rightarrow \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} \leq 0 \text{ (inégalité de Clausius)}$$

$$\Rightarrow \frac{Q_C}{T_C} \leq -\frac{Q_F}{T_F} \Rightarrow \frac{Q_C}{Q_F} \leq -\frac{T_C}{T_F}$$

$$\text{COP} = \frac{\text{but}}{\text{coût}} = \frac{Q_F}{W} = \frac{Q_F}{-Q_F - Q_C} = \frac{-1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}}$$

$$\frac{Q_C}{Q_F} \leq -\frac{T_C}{T_F} \Rightarrow 1 + \frac{Q_C}{Q_F} \leq 1 - \frac{T_C}{T_F}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} \geq \frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_F}} \Rightarrow \frac{-1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} \leq \frac{-1}{1 - \frac{T_C}{T_F}}$$

$$\Rightarrow \text{COP} \leq \frac{T_F}{T_C - T_F} \text{ (égalité pour un cycle réversible)}$$

\* Dans le condenseur, le fluide R134a cède de l'énergie

à la source chaude  $\Rightarrow T_{\text{chaude}} < T_C = 66^\circ\text{C}$

$\Rightarrow T_{\text{chaude}} \approx 30^\circ\text{C}$  convient (température ambiante, pas trop chaude)

\* Dans l'évaporateur, le fluide R134a reçoit de

l'énergie de la part de la source froide

$$\Rightarrow T_{\text{froid}} > T_A \approx 1^\circ\text{C}$$

"autour de  $0^\circ\text{C}$ "  $\Rightarrow$  pas assez précis!  
( $T_F > 0^\circ\text{C}$ : formation d'un liquide, et pas de glace)

$$\text{COP}_{\text{mani}} = \frac{T_F}{T_C - T_F} \approx \frac{273}{30 - 0} \approx 9 > 2,6 \text{ OK}$$

\* Avec  $T_{\text{chaud}} = 66^\circ\text{C}$  et  $T_{\text{froid}} = 1^\circ\text{C}$ ,

$$\text{COP}_{\text{mani}} = \frac{274}{66 - 1} = 4,2 > 2,6 \text{ OK}$$

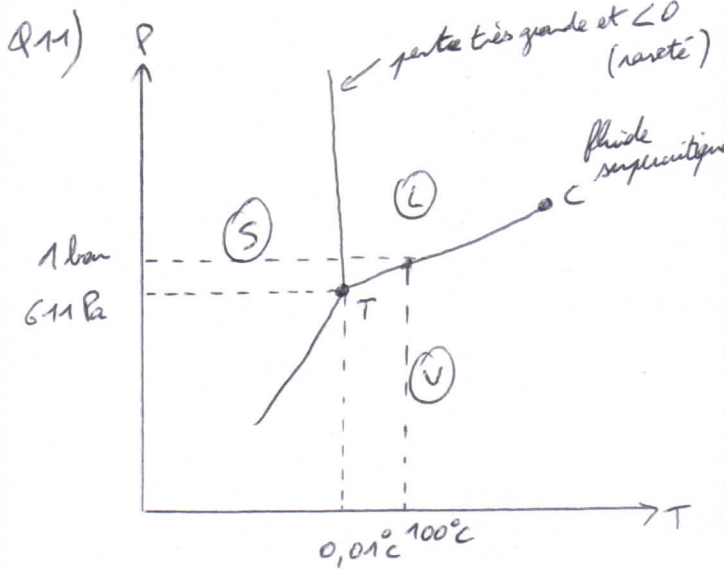
car en plus des irréversibilités thermiques

( $T_{\text{chaud}} \neq T_{B \rightarrow C}$  et  $T_{\text{froid}} \neq T_{D \rightarrow A}$ ), la détente C-D est irréversible.

Rp: si on revient au dispositif de la figure 1, la

température de l'air (et donc des sources froides et chaudes) varie en échangeant de l'énergie avec le fluide R134a dans l'évaporateur et le condenseur  $\Rightarrow$  l'analyse a ses limites et l'expression du COP n'est pas valable.

## II) L'humidité dans l'air:



Q12) égalité des potentiels chimiques à l'équilibre  
 → sur la courbe d'équilibre liquide-vapeur:

$$\mu_{\text{liq}}(T) = \mu_{\text{vap}}(T)$$

$$\rightarrow \mu_{\text{liq}}^{\circ}(T) = \mu_{\text{vap}}^{\circ}(T) + RT \ln \frac{P_{\text{sat}}(T)}{P^{\circ}}$$

$\uparrow$   
 $P = P_{\text{sat}}(T)$  si équilibre

$$\rightarrow \mu_{\text{liq}}^{\circ}(T) - \mu_{\text{vap}}^{\circ}(T) = RT \ln \frac{P_{\text{sat}}(T)}{P^{\circ}}$$

Q13)  $P = 3,6 \text{ kPa} \neq P_{\text{sat}}(10^{\circ}\text{C}) = 1,2 \text{ kPa}$

→ ce mélange n'est pas à l'équilibre

$$* \mu_{\text{liq}}(T) - \mu_{\text{vap}}(T) = \mu_{\text{liq}}^{\circ}(T) - \left( \mu_{\text{vap}}^{\circ}(T) + RT \ln \frac{P}{P^{\circ}} \right)$$

$\underbrace{\mu_{\text{liq}}^{\circ}(T) - \mu_{\text{vap}}^{\circ}(T)}_{RT \ln \frac{P_{\text{sat}}(T)}{P^{\circ}}}$

$$\rightarrow \mu_{\text{liq}}(T) - \mu_{\text{vap}}(T) = RT \ln \frac{P_{\text{sat}}(T)}{P}$$

à  $T = 10^{\circ}\text{C} = 283 \text{ K}$ :

$$\mu_{\text{liq}}(T) - \mu_{\text{vap}}(T) = 8,314 \times 283 \times \ln \frac{1,2}{3,6}$$

$$= -8,314 \times 283 \times \ln 3$$

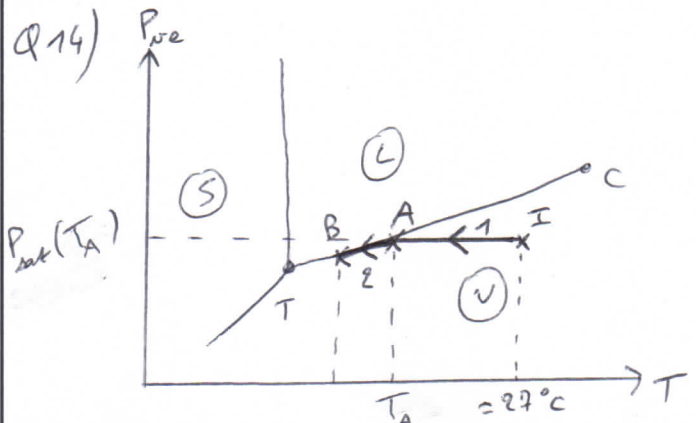
$$\mu_{\text{liq}}(T) - \mu_{\text{vap}}(T) = -2,6 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\mu_{\text{liq}}(T) - \mu_{\text{vap}}(T) < 0 \Rightarrow \mu_{\text{vap}}(T) > \mu_{\text{liq}}(T)$$

Il y a évolution vers la phase de plus bas potentiel chimique (à P et T constants)

→ évolution vers la phase liquide

→ on obtient uniquement de l'eau liquide (si on maintient P et T constants).



Phase 1: Dans l'après-midi ou en début de soirée (point initial I), il n'y a pas d'eau liquide

→ diminution de la vapeur

$$P_{\text{eau}} = P_{\text{vapeur}} = c \cdot \frac{1}{V} \quad (\text{toute l'eau est sous forme de vapeur})$$

et  $T \downarrow$  dans la nuit

(→ horizontale dans le diagramme)

Au départ  $\mu_{\text{vap}}(T) < \mu_{\text{liq}}(T)$  (uniquement du gaz)

$$\rightarrow \mu_{\text{liq}}(T) - \mu_{\text{vap}}(T) > 0$$

$$\rightarrow RT \ln \frac{P_{\text{sat}}}{P} > 0 \Rightarrow P < P_{\text{sat}}$$

ou  $T \downarrow$ , et donc  $P_{\text{sat}}(T) \downarrow \Rightarrow RT \ln \frac{P_{\text{sat}}(T)}{P}$

$\downarrow$   
diminue

et va jusqu'à s'annuler au point A

(fin de la phase 1). On a alors  $\mu_{\text{liq}}(T) = \mu_{\text{vap}}(T)$  et apparition de la 1<sup>ère</sup> goutte de rosée

Phase 2:  $T \downarrow$  encore, on a toujours équilibre liquide-vapeur, mais on forme de + en + d'eau liquide. Au cours de cette phase,  $\mu_{\text{liq}}(T) = \mu_{\text{vap}}(T)$  et  $P_{\text{vapeur}} = P_{\text{sat}}(T) \downarrow$

Q15) Si l'air est saturé en eau:  $P_{ve} = P_{sat}$   
 et c'est dans ce cas qu'on pourra récupérer  
 un maximum d'eau.

$$m_{maxi} = m_{maxi} \quad \Pi_{eau} = \frac{P_{sat} V}{RT} \quad \Pi_{air}$$

↑  
équation d'état des GP

$$m_{maxi} = \frac{P_{sat}(T) V}{RT} \Pi_{air}$$

à 27°C:  $m_{maxi} = \frac{3 \cdot 10^3 \times 1}{10 \times (27+273)} 20 \cdot 10^{-3}$

$$m_{maxi} \approx 0,02 \text{ kg}$$

Q16)  $\rho_{eau} = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \Rightarrow V_{eau} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

On obtient  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$  d'eau liquide à partir  
 d'un  $\text{m}^3$  d'air

$$V_{mini} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-5}} = 5 \cdot 10^4 \text{ m}^3 = V_{mini}$$

Cette valeur est très grande, et sera encore  
 + grande si l'air n'est pas saturé en eau!

Q17) Pour s'évaporer, l'eau a besoin d'un  
 apport d'énergie ( $l_{vap} > 0$ ), qu'elle prend  
 au thermomètre en le refroidissant

$$\Rightarrow T_h < T.$$

Q18) équation d'état des GP:  $PV = mRT$   
 $= \frac{m}{M} RT$

$$\Rightarrow m = \frac{PVM}{RT}$$

$$\Rightarrow M_{ve} = \frac{P_{ve} V \Pi_{eau}}{RT}$$

$$\text{et } M_{as} = \frac{(P - P_{ve}) V \Pi_{air}}{RT} \quad (P_{air} = P - P_{ve})$$

$$\Rightarrow X_a = \frac{M_{ve}}{M_{as}} = \frac{P_{ve} \Pi_{eau}}{(P - P_{ve}) \Pi_{air}} = \delta \frac{1}{\frac{P}{P_{ve}} - 1}$$

$$X_a = \frac{\delta}{\frac{P}{P_{ve}} - 1} \Rightarrow X_{as} = \frac{\delta}{\frac{P}{P_{sat}} - 1}$$

$P_{ve} = P_{sat}$   
 pour l'air saturé

à 27°C:  $X_{as} = \frac{20}{30} = \frac{1 \cdot 10^5}{3 \cdot 10^3} \Rightarrow X_{as} \approx 2\%$

Q19)  $\Pi_{ve} = \frac{P_{ve} V \Pi_{eau}}{RT}$  et  $\Pi_{ve} = \frac{P_{sat} V \Pi_{eau}}{RT}$

$$X_n = \frac{M_{ve}}{M_{maxi}} \Rightarrow X_n = \frac{P_{ve}}{P_{sat}}$$

$$X_a = \frac{\delta}{\frac{P}{P_{ve}} - 1} \Rightarrow \frac{P}{P_{ve}} = 1 + \frac{\delta}{X_a}$$

$$\Rightarrow P_{ve} = \frac{P}{1 + \frac{\delta}{X_a}} \Rightarrow X_n = \frac{P}{P_{sat} \left(1 + \frac{\delta}{X_a}\right)}$$

$$P_{ve} = \frac{\Pi_{ve} RT}{V \Pi_{eau}} \Rightarrow X_n = \frac{P_{ve}}{P_{sat}} = \frac{\Pi_{ve} RT}{V \Pi_{eau} P_{sat}}$$

à 27°C:  $= \frac{10 \cdot 10^{-3} \times 10 \times (27+273)}{1 \times 20 \cdot 10^{-3} \times 3 \cdot 10^3}$

$$X_n = 0,5$$

$$X_n = \frac{P}{P_{sat} \left(1 + \frac{\delta}{X_a}\right)} \Rightarrow \frac{\delta}{X_a} = \frac{P}{X_n P_{sat}} - 1$$

$$\Rightarrow X_a = \frac{\delta}{\frac{P}{X_n P_{sat}} - 1} = \frac{20}{30} = \frac{1 \cdot 10^5}{0,5 \times 3 \cdot 10^3}$$

$$\Rightarrow X_a \approx 1\% \quad \text{OK!}$$

$\left. \begin{array}{l} X_{as} = 2\% : X_n = 1 \text{ (saturé)} \\ X_a = 1\% : X_n = 0,5 \end{array} \right\}$   
 (utilisable car  $P_{ve} \ll P_{sat}$ )

Q20)  $X_a = \frac{M_{ve}}{M_{as}}$

Pour le fluide traversant une section par unité  
 de temps:  $X_a = \frac{D_{mve}}{D_{ma}} \Rightarrow D_{mve} = X_a D_{ma}$



$$Q25) * (27 - T_5)(c_p - c_{vap}) = (27 - 17)(4 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3)$$

$$\approx 2 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$* l_v(27^\circ\text{C}) \approx 2 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\gg (27 - T_5)(c_p - c_{vap})$$

$$\Rightarrow A \approx l_v(27^\circ\text{C}) \approx 2 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$* D \Delta T = c_{vap} \Delta T = 2 \cdot 10^3 \times 10$$

$$= 2 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\ll A$$

$$\Rightarrow X_a = \frac{A X_{a0} - B \Delta T}{A + D \Delta T} \approx X_{a0} - \frac{B}{A} \Delta T$$

$$\Rightarrow X_a \approx X_{a0} - \frac{c_a}{l_v(27^\circ\text{C})} \Delta T$$

$$Q26) \text{ of } Q18): X_{a0} \approx 2\% \text{ à } 27^\circ\text{C}$$

$$X_a \approx 0,02 - \frac{1 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^6} \times 10 \approx 0,015$$

$$X_a \approx 1,5\%$$

