

Installation de liquéfaction.

- Entrée des étages $(D_m + D')$; $P_E = 1 \text{ bar}$, $T_E = 300 \text{ K}$
- (C) : isentropique ; (R) isobare, T_E en sortie.
(adiabatique + A. 1.)
 $P_A = r^N P_E = 100 \text{ bars}$, $T_A = T_E$.
- $H_2O(g)$: 1 bar , $T_c = 280 \text{ K}$, $c_e = 4,19 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
- (E) $\left\{ \begin{array}{l} \text{échangeur} \\ \text{isobare} \end{array} \right. \quad P_B = P_A$.
- (V) $\left\{ \begin{array}{l} \text{détente} \\ \text{isenthalpique} \end{array} \right. \quad \text{liq. } x, D_m, 77 \text{ K}, d = 0,81, P_C = P_E$
 $\text{gaz : } D', 77 \text{ K}, P_D = P_E$.

$T_{\max}$ est la température maximale du diazote
en sortie du N^{ième} compresseur : $T_{\max} = 400 \text{ K}$.

$$T_{E_{\max}} = T'_{\max} = 350 \text{ K}$$

A. ①. G.P. diatomique : $U = \frac{5}{2} nRT$ et $H = U + PV = \frac{7}{2} nRT$

$$C_{P,m} = \frac{7}{2} R, \quad C_{V,m} = \frac{5}{2} R, \quad \gamma = \frac{7}{5}$$

• isentropique, Laplace, $P^{1-\gamma} T^\gamma = \text{cte}$; entre l'entrée
et la sortie du N^{ième} compresseur :

$$P_A = r^N P_E \text{ d'une part et } T_A' = T_E \left(\frac{P_A}{P_E} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_E r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

(pour le k-ième compresseur $T_{k+1} = T_E \left(\frac{P_k}{P_{k+1}} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}})$.

D' où $T_A' = T_E \left(\frac{P_A}{P_E} \right)^{\frac{1-\gamma}{N\gamma}}$ et finalement :

NB : J'ai noté T'_A la température de
l'azote en sortie du N^{ième}
compresseur. Pour l'AN, T'_A est pris
égal à $T_{\max}$ (cf. ci-dessus)

$$N = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\ln(P_A/P_E)}{\ln(T'_A/T_E)}$$

$N = 5 \text{ étages.}$

$$N=5 \rightarrow r = \left(\frac{P_A}{P_E} \right)^{1/5} = 2,5 \quad (2)$$

$$T'_A = T_E \left(\frac{P_A}{P_E} \right)^{\frac{0,4}{5 \cdot 1,4}} = 390 \text{ K } (< 400 \text{ K} \dots)$$

(2) Le réfrigérant est un élément de machine sans pièce mobile. On lui applique le 1^{er} ppe industriel du point de vue de l'évaluation d'apex:

$$D_{C_{P_{N_2}}} (T_E - T_R) = \dot{Q}_R, \text{ avec } \dot{Q}_R = -\dot{D}_e c_e (T'_{\text{sortie}} - T_e)$$

$$\text{soit } D_{C_{P_{N_2}}} (T_E - T_R) = -\dot{D}_e c_e (T'_{\text{sortie}} - T_e)$$

$$\text{avec } c_{P_{N_2}} = \frac{R\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{1}{M} \text{ et } T_R = T_E \cdot r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (\text{cf. (1)})$$

De plus $T'_{\text{sortie}} < T'_{\text{max}}$.

$$\frac{\dot{D}_e}{\dot{D}} = \frac{R\gamma}{(\gamma-1)M} \cdot \frac{1}{c_e} \frac{T_E (r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1)}{T'_{\text{max}} - T_e}; \text{ AN: } 0,32.$$

B. (3) Les courbes rouges ($\mathcal{E}_1$ en est une) sont des isothermes. $T_{\mathcal{E}_1} = 100^\circ \text{C}$.

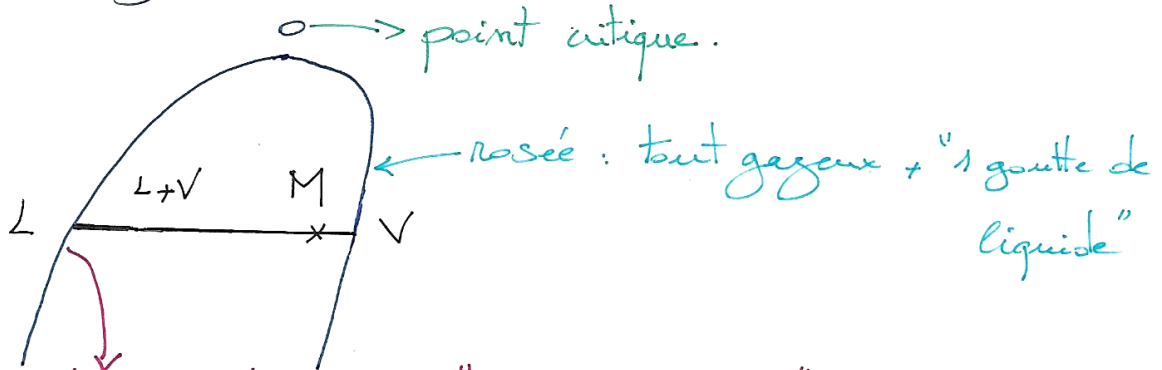
A basse pression, l'enthalpie massique est constante sur l'isotherme. Le gaz N_2 suit la deuxième loi de Joule: H n'est fonction que de T : $dH = m c_p dT$.

(4) Les courbes bleues (dont $\mathcal{E}_2$) sont des isentropiques. $S_{\mathcal{E}_2} = 3,9 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$.

(R: • $\vec{H}[P]$, $S \nearrow$ si $T \nearrow$: augmentation de l'ordonnée
 • $\vec{H}[T]$, $S \searrow$ si $P \nearrow$: augmentation de l'abscisse
 • pour une courbe $\mathcal{E}_2$ le long de $\mathcal{E}_2$: $dh = v dP + T \underbrace{ds}_{=0} = v dP$ donc $h \nearrow$ si $P \nearrow$)

⑤ $\mathcal{L}_3$ est la courbe de saturation.

③



ébullitions : tout liquide + "1 bulle de vapeur"

⑥ Des courbes noires à l'intérieur de la courbe de saturation sont les isothermes. En H on lit $x=0,1$

C. ⑦ $x_c = \frac{h_c - h_{\text{vap}}}{h_{\text{liq}} - h_{\text{vap}}}$, théorème des moments.

R: C est un point équivalent à H ci-dessus.

⑧ En R.P. la conservation de la masse entraîne la conservation des débits massiques: $D = D' + D_m$.
 Soit, sachant que x est liq et $(1-x)$ gazeux: $D_m = xD$ et $D' = (1-x)D$

⑨ Le même raisonnement que pour le réfrigérant, à la question ②, conduit à :

$$D' (h_E - h_D) + D (h_B - h_A) = 0$$

$$\text{or } D' = (1-x)D ; h_B = h_c \text{ (isenthalpique) et } h_D = h_{\text{vap}}$$

$$D(1-x)(h_E - h_{\text{vap}}) + D(x h_{\text{liq}} + (1-x) h_{\text{vap}}) - h_A = 0.$$

$$(1-x)h_E + x h_{\text{liq}} - h_A = 0, \text{ et } x = \frac{h_E - h_A}{h_E - h_{\text{liq}}}.$$

$$\textcircled{10} A: 300K, 100 \text{ bars} \Rightarrow h_A = 495 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$C: T_c = 77K = -196^\circ C \left. \begin{array}{l} P_c = 1 \text{ bar} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} h_{\text{vap}} = 82 \text{ kJ kg}^{-1} \\ h_{\text{liq}} = 280 \text{ kJ kg}^{-1} \end{array} \right.$$

$$E: 300K; 1 \text{ bar}; h_E = 520 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$x = 0,06 \text{ (lectures peu aisées ---)}$$

Si G.P. : $h_A = h_E$ car $T_A = T_E$, donc $x_{G.P.} = 0$. (4)

(11) $\begin{cases} 1^* P_B = P_A = 100 \text{ bars, échangeur isobare.} \\ 2^* h_B = h_E : \text{la vapeur fonctionne de manière isenthalpique.} \end{cases}$ cf. Annexes.

→ Avec $x_c = 0,06$ et $P_c = 1 \text{ bar}$, on place C, puis on "remonte" verticalement à 100 bars et on lit $T_B \approx -115^\circ\text{C}$

→ En B, le diazote est superfluide ou supercritique : sa température et sa pression sont supérieures aux valeurs critiques $T_c = -147^\circ\text{C}$ et $P_c = 34 \text{ bars}$

(12) Pour une compression adiabatique, le 1^{er} app industriel s'écrit $D(h_{\text{sortie}} - h_{\text{entrée}}) = \dot{Q}_m$

or $D = \frac{\dot{D}_m}{x}$ et, G.P. : $h_{\text{sortie}} - h_{\text{entrée}} = \frac{R\gamma}{(\gamma-1)\pi} (T_{\text{sortie}} - T_E)$

avec $T_{\text{sortie}} = T_E r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

D'où $\dot{Q}_m = \frac{\dot{D}_m}{x} \frac{R\gamma T_E}{\pi(\gamma-1)} (r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1)$
et $\underline{\underline{\dot{Q}_{\text{total}} = 5 \dot{Q}_m}}$ car $N = 5$.

P.N. : 245 kW.

Comparaison : 1L d'air $\rightarrow 0,8 \text{ L de } \text{O}_2/\text{h}$

or $d = 0,81 \rightarrow \text{soit } 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,81 \cdot 10^3 = 0,65 \text{ kg h}^{-1}$

soit $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ kg s}^{-1}$.

Soit $\dot{Q} = 245 \cdot \frac{1,8 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-2}} = 1,5 \text{ kW}$

Ceci représente environ 2 hp ; l'ordre de grandeur est le

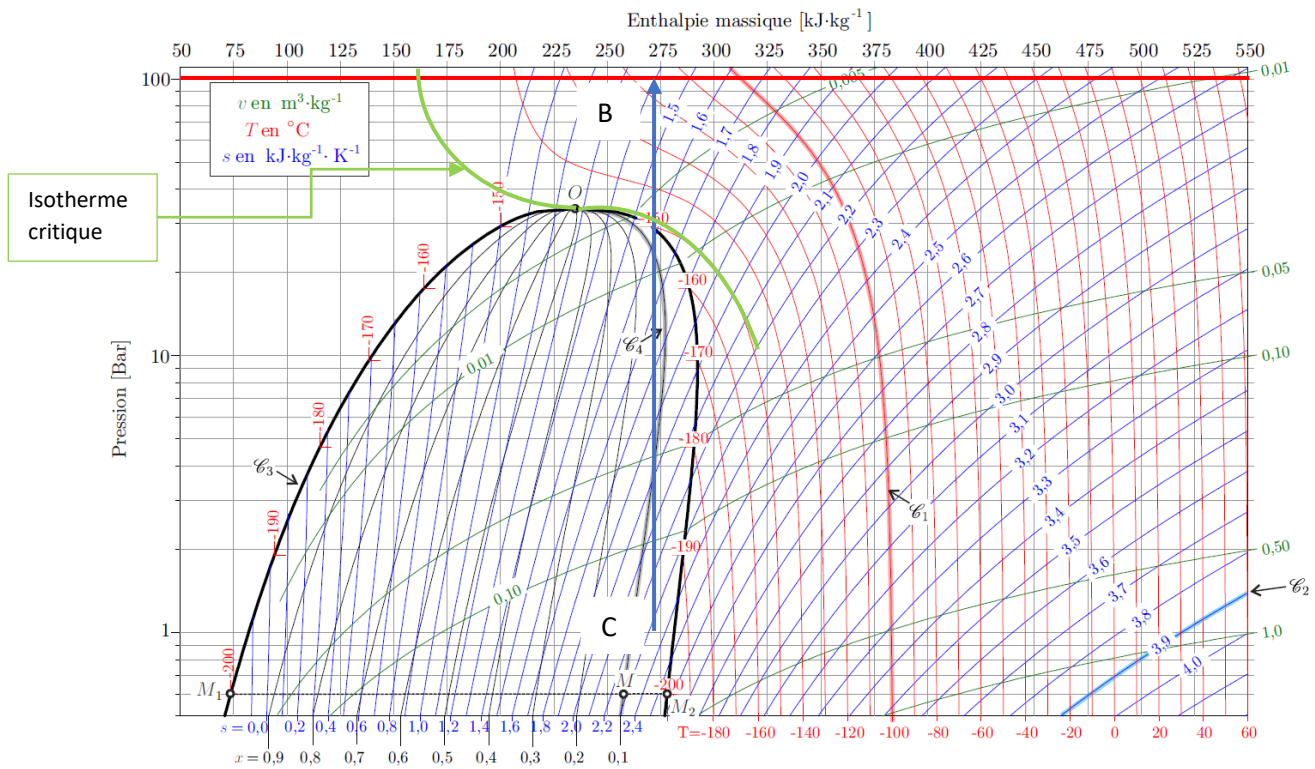


FIGURE 5 – Diagramme enthalpique du diazote