

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 + H. 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) $\left\{ \begin{array}{l} \text{détente} \\ \text{isenthalpique liq. } x, D_m, 77 \text{ K}, d = 0,81, P_C = P_E \end{array} \right.$

gaz : D' , 77 K , $P_D = P_E$.

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

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

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

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

• 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 :

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

$N = 5 \text{ étages.}$

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)

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

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

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'évolution d'aggrégat :

$$D c_{P_{N_2}} (T_E - T_K) = \mathcal{B}_K, \text{ avec } \mathcal{B}_K = -D_e c_e (T'_{\text{sortie}} - T_e)$$

$$\text{soit } D c_{P_{N_2}} (T_E - T_K) = -D_e c_e (T'_{\text{sortie}} - T_e)$$

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

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

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

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

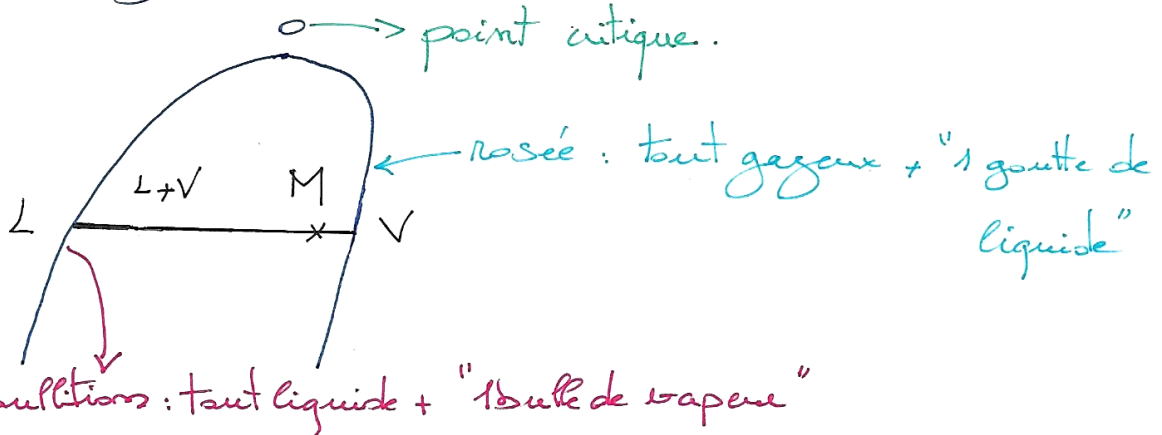
A basse pression, l'enthalpie massique est constante sur l'isotherme. Le gaz N_2 suit la deuxième loi de Joule : H_m est fonction que de T : $dH = m c_p dT$.

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

(R : • $\tilde{H}[P]$, $s \nearrow$ si $T \nearrow$: augmentation du désordre
 • $\tilde{H}[T]$, $s \searrow$ si $P \nearrow$: augmentation de l'ordre.
 • pour une courbe $\mathcal{C}_2$: $dh = v dP + \underbrace{T ds}_{=0} = v dP$ donc $h \nearrow$ si $P \nearrow$
 le long de $\mathcal{C}_2$)

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

③



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

C. ⑦ $x_c = \frac{h_c - h_{vap}}{h_{liq} - h_{vap}}$, 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 :

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

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

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

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

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

C: $T_c = T_H = -196^\circ\text{C}$
 $P_c = 1 \text{ bar}$ $\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} h_{vap} = 92 \text{ kJ kg}^{-1} \\ h_{liq} = 280 \text{ kJ kg}^{-1} \end{array} \right.$

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

$x = 0,06$ (lectures peu aisées...)

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

(11) $P_B = P_A = 100$ bars, échangeur isobare. } cf. Annexes.
 $h_B = h_C$: la vapeur fonctionne de manière isenthalpique.

→ Avec $x_c = 0,06$ et $P_c = 1$ 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 $P_c = 34$ bars

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

or $D = \frac{D_m}{\alpha}$ 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 $S_u = \frac{D_m}{\alpha} \frac{R\gamma T_E}{\pi(\gamma-1)} (r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1)$
 et $S_{\text{total}} = 5 S_u$ car $N = 5$.

P.H. : 245 kW.

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

or $d = 0,81 \rightarrow \text{soit } 0,810^{-3} \cdot 0,8110^3 = 0,65 \text{ kg h}^{-1}$

soit $1,810^{-4} \text{ kg s}^{-1}$.

soit $S = 245 \cdot \frac{1,810^{-4}}{310^{-2}} = 1,5 \text{ kW}$

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

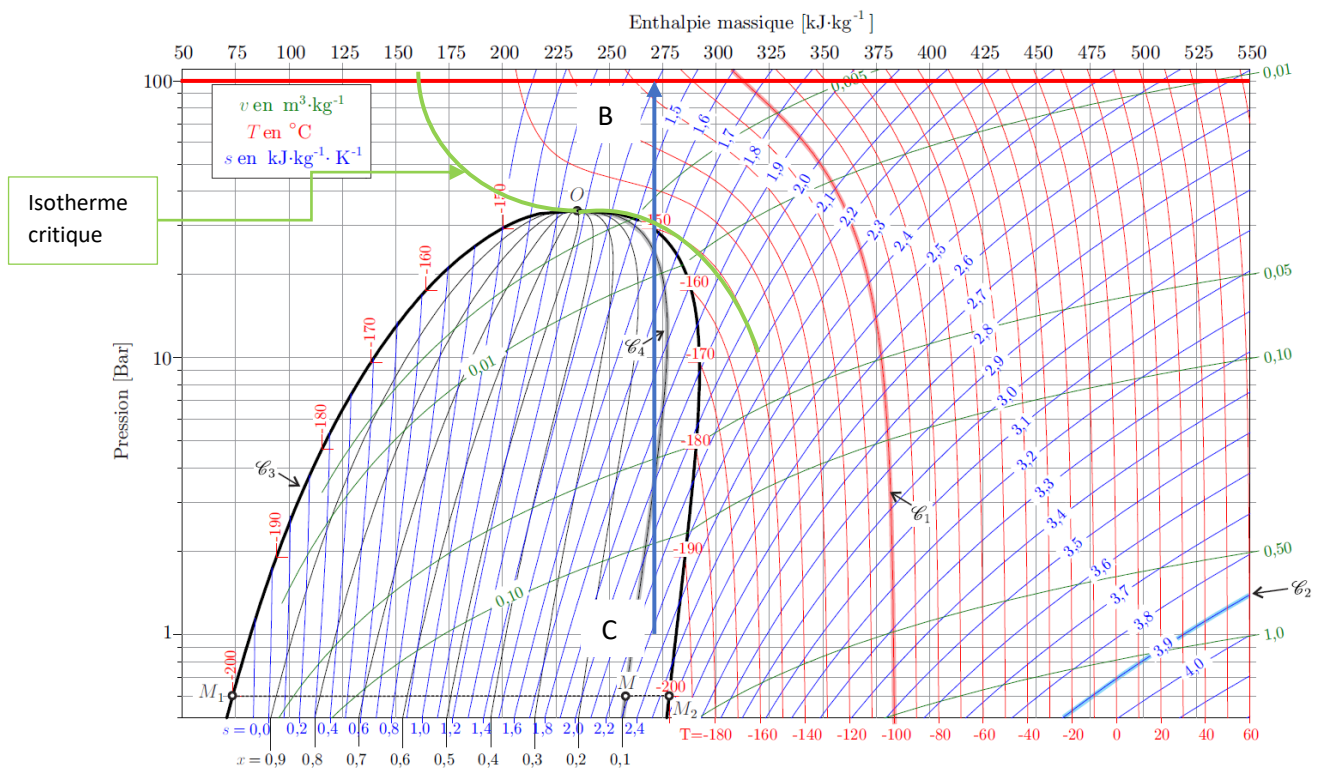


FIGURE 5 – Diagramme enthalpique du diazote

- ① - Commençons par déterminer la fréquence d'échantillonnage de chaque spectre

	$T_e = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{N}$	$f_e = 1/T_e$	$f_e/2$ (Hz)
①	0,6 s	1,7 Hz	0,85
②	0,09 s	11,5 Hz	5,6
③	0,3 s	3,4 Hz	1,7
④	0,03 s	33 Hz	16,5

- on voit alors que chaque spectre présente des pics pour $f \in [0, f_e/2]$
- La figure 2, qui donne la charge combinée, montre une fonction périodique de $T = 0,5$ s, soit $f_{\text{charge}} = 2$ Hz.
- Pour voir au moins le fondamental de cette fonction sur le spectre il faut (Shannon) $f_{\text{fonda}} < f_e/2$, soit $f_e/2 > 2$ Hz ce qui exclut ① et ③.
- Pour ②, on se voit f_{fonda} et $2f_{\text{fonda}}$ non repliés, puis inspecter ~~les~~ pour harmoniques > 4 Hz.

- ④ paraît donc le plus pertinent ②

- Donnons quelques exemples de repliement pour les spectres ① à ③ (Notons que ④ ne présente pas de pic replié car f_e est assez largement supérieure à $2H_z$).

		Pic	Repliement
①	$f_e = 1,7 H_z$	$\begin{cases} \approx 0,3 H_z \\ \approx 0,6 H_z \end{cases}$	$\begin{aligned} f_{\text{fonda}} - f_e &= 2 - 1,7 \\ 2f_{\text{fonda}} - 2f_e &= 4 - 3,4 \end{aligned}$
②	$f_e = 11,5 H_z$	$\begin{cases} 2 H_z \\ 3,3 H_z \\ 4 H_z \\ 5,3 H_z \end{cases}$	$\begin{aligned} &\text{non replié} \\ f_{\text{fonda}} - f_e &= 2 - 11,5 \\ &\text{non replié} \\ f_e - 3f_{\text{fonda}} &= 11,5 - 6 \end{aligned}$
③	$f_e = 3,4 H_z$	$\begin{cases} 1,4 H_z \\ 0,6 H_z \end{cases}$	$\begin{aligned} f_{\text{fonda}} - f_e &= 2 - 3,4 \\ 2f_{\text{fonda}} - f_e &= 4 - 0,6 \end{aligned}$

② La charge a une fréquence de $2 H_z$ et les mouvements latéraux une fréquence de l'ordre de $1 H_z$, qui correspond à la fréquence de la marche, ce qui est cohérent avec un mouvement d'ensemble des piétons créant une résonance pour l'une des fréquences propres du pont...

R : la fréquence de la charge est double de celle de la marche car les deux pids sont équivalents