T6.7. Machine de Linde pour la liquéfaction des gaz.

1. Différentes expressions et relations.

● A la fin de la transformation 3-4 le système est diphasé, l'enthalpie massique s'écrit alors :

$$h_4 = x_4 h_6 + (1 - x_4) h_5 \quad (1)$$

● On étudie le système fermé S^* et on se place en régime permanent :

$$dH_{S^*} = dH_{dm_2} + dH_{dm_6} + dH_S = 0 \text{ comme } dH_S = 0 \text{ car le régime est permanent}$$

$$(h_3 - h_2) + x_4 (h_1 - h_6) = 0 \quad (2)$$

● Comme $h_3 = h_4$ on obtient en injectant (1) dans (2) :

$$(x_4 h_6 + (1 - x_4) h_5 - h_2) + x_4 (h_1 - h_6) = 0$$
$$x_4 (h_6 - h_5 + h_1 - h_6) = h_2 - h_5$$
$$x_4 = \frac{h_2 - h_5}{h_1 - h_5} = 0{,}928$$

On peut maintenant déterminer l'enthalpie massique des états 3 et 4 à partir de la relation (1) :

$$h_4 = x_4 (h_6 - h_5) + h_5$$
$$h_4 = \frac{h_2 - h_5}{h_1 - h_5}(h_6 - h_5) + h_5$$
$$h_4 = 214 \text{ kJ/kg}$$

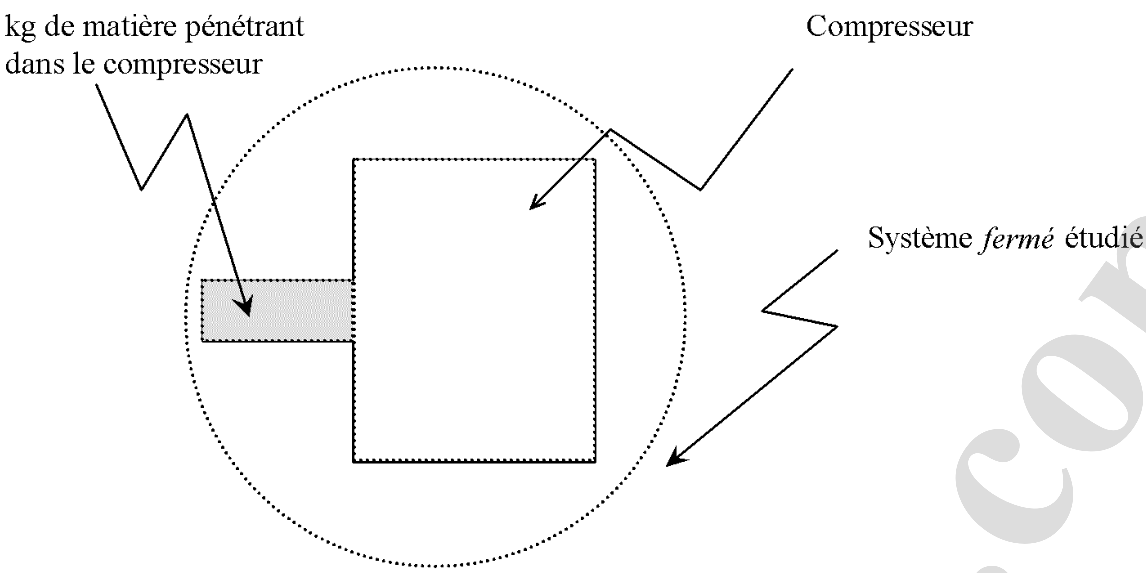
Pour l'entropie massique de l'état :

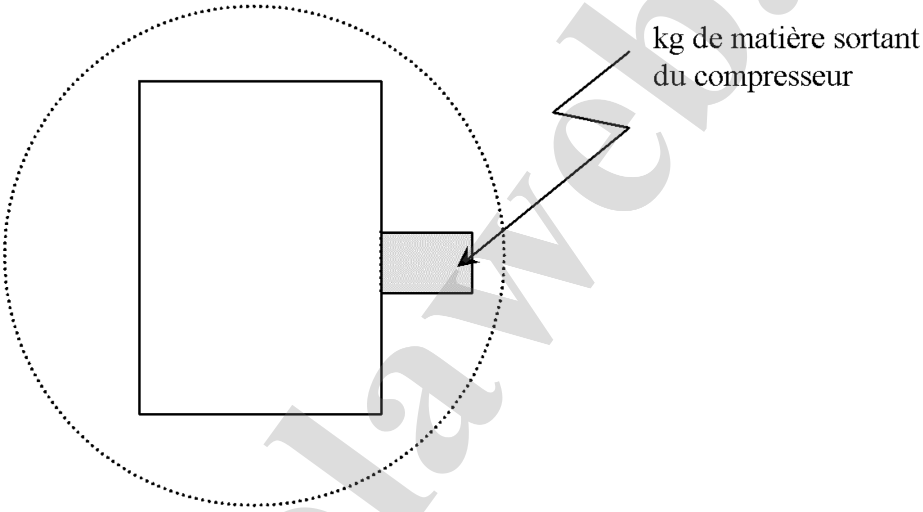
$$s_4 = x_4 s_6 + (1 - x_4) s_5$$
$$s_4 = x_4 (s_6 - s_5) + s_5$$
$$s_4 = \frac{h_2 - h_5}{h_1 - h_5}(s_6 - s_5) + s_5$$
$$s_4 = 2{,}78 \text{ kJ/(K.kg)}$$

La détente de Joule-Kelvin est irréversible car $s_4 > s_3$.

2. Etude énergétique au niveau du compresseur.

On considère le système *fermé* constitué du compresseur (Cp) et de la masse de 1 kg qui va entrer dans ce compresseur à la date *t* et ce même système fermé constitué du compresseur et de la masse de 1 kg qui en est sortie à la date *t* + *dt* :





● Entre ces deux dates, la variation d'entropie s'écrit :

$$S_{fermé}(t+dt)-S_{fermé}(t)=S_{Cp}(t+dt)+S_{\text{sortant}}(t+dt)-S_{Cp}(t)-S_{\text{entrant}}(t)=S_{échange}+S_{création}\underset{isotherme}{=}S_{échange}$$

Comme le régime est stationnaire on a :

$$S_{Cp}(t+dt)=S_{Cp}(t)$$

On obtient ainsi :

$$\Delta S_{fermé}=\int\frac{\delta Q^{réversible}}{T_{système}}=\frac{Q}{T_1}$$

En écrivant les grandeurs massiques, on obtient :

$$s_2-s_1=\frac{q}{T_1}$$

$$q=T_1(s_2-s_1)$$

$$q=-499\ \text{kJ/kg}$$

● Entre ces deux dates, la variation d'énergie interne du système s'écrit :

$$U_{fermé}(t+dt)-U_{fermé}(t)=U_{Cp}(t+dt)+U_{\text{sortant}}(t+dt)-U_{Cp}(t)-U_{\text{entrant}}(t)=W_{Forces\ pression}+W+Q$$

Comme le régime est stationnaire on a :

$$U_{Cp}\left(t+dt\right)=U_{Cp}\left(t\right)$$

On obtient ainsi :

$$\Delta U_{fermé}=W_{\substack{\text{forces}\\ \text{pression}}}+W+Q=\int\overrightarrow{F_1}.d\vec{l}_{1}+\int\overrightarrow{F_1}.d\vec{l}_{1}+W+Q$$

$$\Delta U_{fermé}=\int p_1 d\overrightarrow{S_1}.d\vec{l}_{1}+\int p_2\overrightarrow{S_2}.d\vec{l}_{2}+W+Q=p_1V_1-p_2V_2+W+Q$$

En amont, les forces de pression sont motrices et en aval résistantes. Le volume V_1 est celui de la masse entrante et V_2 celui de la masse sortante du compresseur (Cp).

En passant aux grandeurs massiques :

$$u_2-u_1=-\left(p_2v_2-p_1v_1\right)+w+q$$

$$\left(u_2+p_2v_2\right)-\left(u_2+p_2v_2\right)=w+q$$

$$h_2-h_1=w+q$$

$$w=h_2-h_1-q$$

$$w=h_2-h_1-T_1\left(s_2-s_1\right)$$

$$w=469\ \text{kJ/kg}$$

La masse m de diazote recueillie pour une durée Δt s'écrit :

$$m=\left(1-x_4\right)\frac{P}{w}\Delta t$$

$$m=\left(1-0,928\right)\frac{100}{469}3600=55\ \text{kg/h}$$