

(Contrôle +Corrigé type)Cryogénie (Master 2 énergétique)

Exercice N°1(8pts):

- Expliquez la détente de Joule/Thomson (J/T) et interprétez le coefficient μ_{JT} (avec schémas).
- Donner le schéma et tracer le cycle du procédé de liquéfaction de l'Hélium.

En utilisant les bilans énergétiques déterminez :

Les expressions de la fraction liquide et du travail de ce procédé

Exercice N°2 (12pts):

On désire réaliser une liquéfaction de l'Azote (Nitrogène) ($T = 290K$; $P = 0,7 \text{ atm}$) selon un processus de LINDE à étranglement double où la pression intermédiaire est $P_m = 10 \text{ atm}$, le débit de retour est $0,5 \text{ Kg/s}$ et la pression finale est $P = 200 \text{ atm}$.

1. Faire le schéma du processus et tracer le cycle du procédé.
1. Quelle est l'avantage de ce procédé.
2. Déterminer l'ensemble des paramètres (P ; T ; h et s) des points figuratifs du cycle.
3. Évaluer les caractéristiques du cycle pour un débit d'azote de 2 Kg/s :
 - la fraction liquide
 - la consommation d'énergie spécifique pour les deux cas :
 - Idéal
 - Réel (Les rendements de compressions BP et HP sont $\eta_{BP} = \eta_{HP} = 0.6$)
 - le FOM pour les deux cas (interpréter le résultat).

BONNE CHANCE

Corrigé type

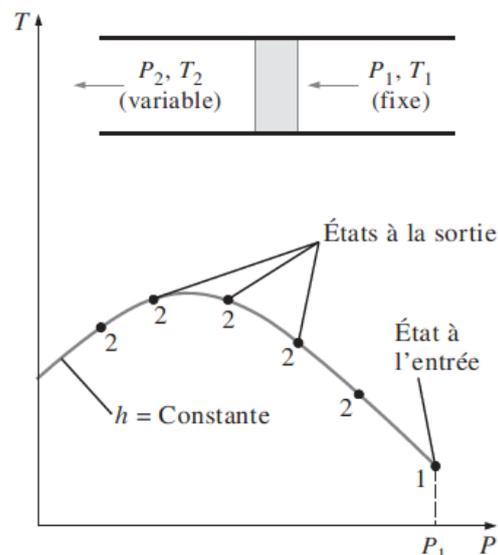
Exercice N°1 :

1.

- La détente de joule Thomson (J/T) s'effectue au moyen d'un orifice réduit à travers lequel s'écoule un gaz de P_1 à P_2 (avec $P_1 > P_2$), le gaz étant isolé thermiquement. On appelle également cette détente « laminage du gaz ».
- Le coefficient de Joule-Thompson décrit la variation de la température d'un fluide en fonction de la pression durant une détente isenthalpique. Ce coefficient est défini comme.

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_{H=cste}$$

Prenons l'expérience de J/T et supposons que pour des conditions à l'amont de l'orifice (P_1, T_1) on fait varier P_2 à l'aval. On va à chaque fois noter une température T_2 qui va varier avec P_2 . On peut représenter les différents états du fluide après la détente sur un diagramme (T, P) voir figure ci-dessous.



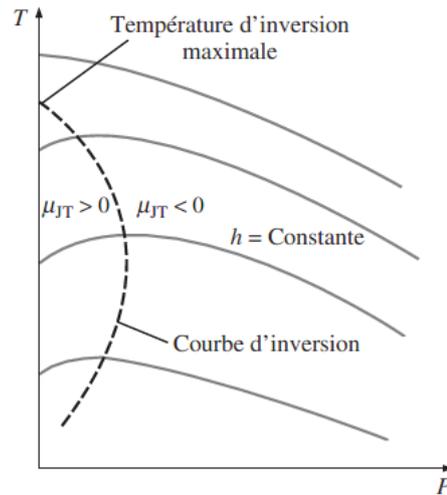
Les points ainsi représentent les états du gaz pour lesquels l'enthalpie est celle de l'état initial P_1, T_1 . Tous ces points se trouvent sur une courbe isenthalpique qui représente un maximum.

A gauche de ce maximum, on a diminution de T pour une diminution de p, donc un refroidissement $\mu_{JT} > 0$.

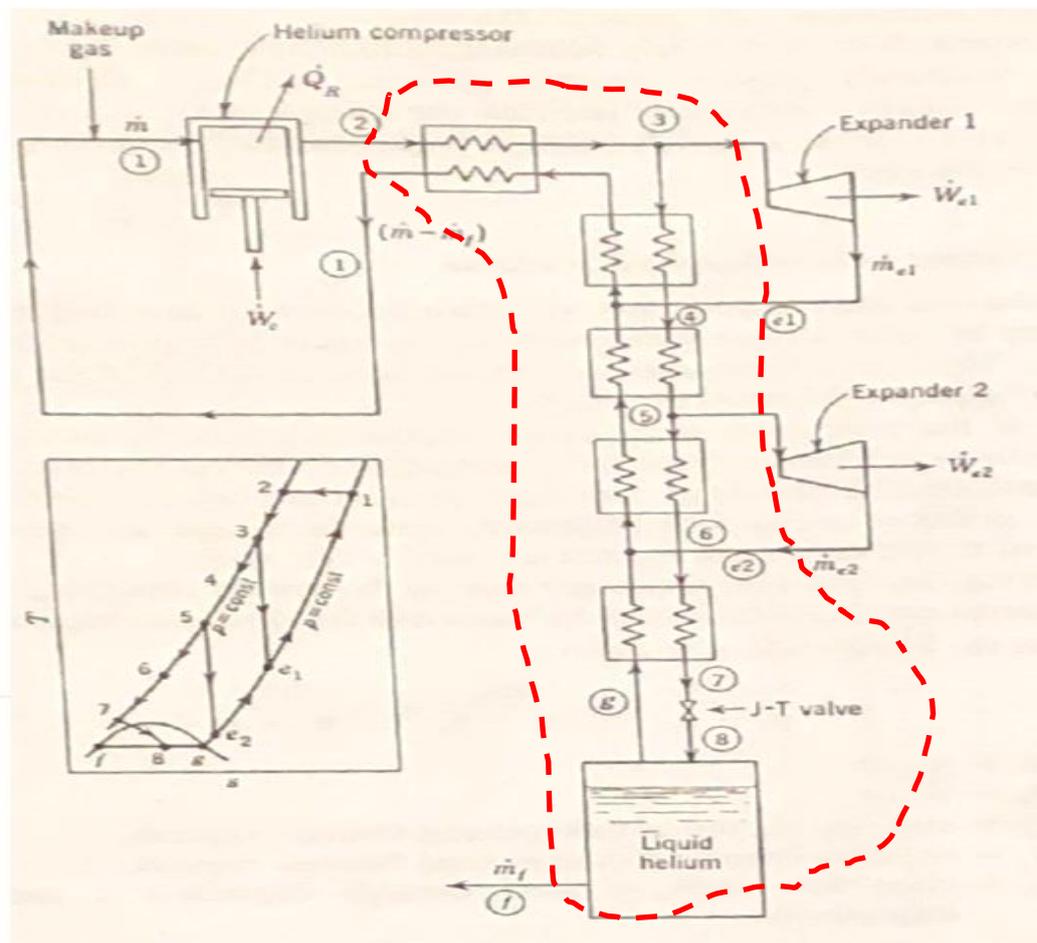
A droite de ce maximum on a une augmentation de T pour une diminution de P, donc réchauffement $\mu_{JT} < 0$.

Le maximum de la courbe est appelé **point d'inversion** car c'est là que le phénomène s'inverse. On observe que certaines des courbes isenthalpiques passent par un maximum, c'est-

à-dire un point où la pente est nulle ($\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{H=cste} = 0$). La courbe en pointillé qui relie ces points maximaux est appelée la **courbe d'inversion** et la température en ces points, la **température d'inversion**. La température au point où la courbe d'inversion intercepte l'ordonnée ($P = 0$) est appelée la **température d'inversion maximale**. On remarque que le coefficient de Joule-Thompson (la pente d'une courbe isenthalpique) est négatif à droite de la courbe d'inversion $\mu_{JT} < 0$ et positif à gauche $\mu_{JT} > 0$ (voir figure ci-dessous)



2. le schéma et le cycle du procédé de liquéfaction de l'Hélium.



La détermination de la fraction liquide y:

En appliquant le bilan énergétique au volume de contrôle:

$$\dot{m}h_2 + \dot{m}_{e1}h_{e1} + \dot{m}_{e2}h_{e2} - (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1 - \dot{m}_{e1}h_3 - \dot{m}_{e2}h_5 - \dot{m}_f h_f = 0 \Rightarrow \dot{m}(h_2 - h_1) - \dot{m}_{e1}(h_3 - h_{e1}) - \dot{m}_{e2}(h_5 - h_{e2}) - \dot{m}_f(h_f - h_1) = 0$$

$$\Rightarrow (h_2 - h_1) - \frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}}(h_3 - h_{e1}) - \frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}}(h_5 - h_{e2}) - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}}(h_f - h_1) = 0$$

Posons $\frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}} = x_1$, $\frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}} = x_2$ et $\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = y$

$$\Rightarrow y = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_f)} + x_1 \frac{(h_3 - h_{e1})}{(h_1 - h_f)} + x_2 \frac{(h_5 - h_{e2})}{(h_1 - h_f)}$$

Le travail :

$$W = W_{\text{comp}} + W_{\text{turbine1}} + W_{\text{turbine2}}$$

$$W_{\text{comp}} = T_c(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)$$

$$W_{\text{turbine1}} = \frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}} (h_3 - h_{e1})$$

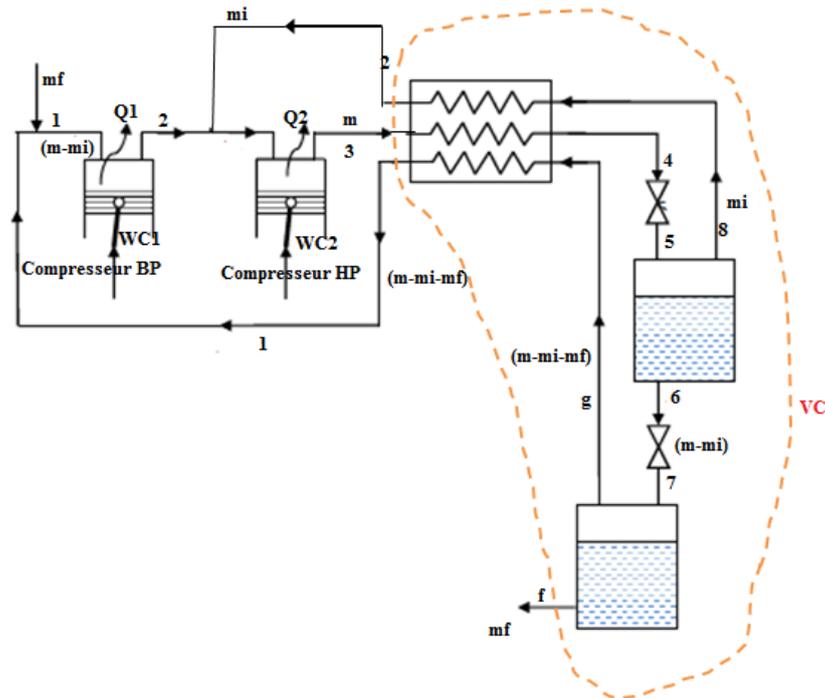
$$W_{\text{turbine2}} = \frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}} (h_5 - h_{e2})$$

$$w = T_c(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) - x_1(h_3 - h_{e1}) - x_2(h_5 - h_{e2})$$

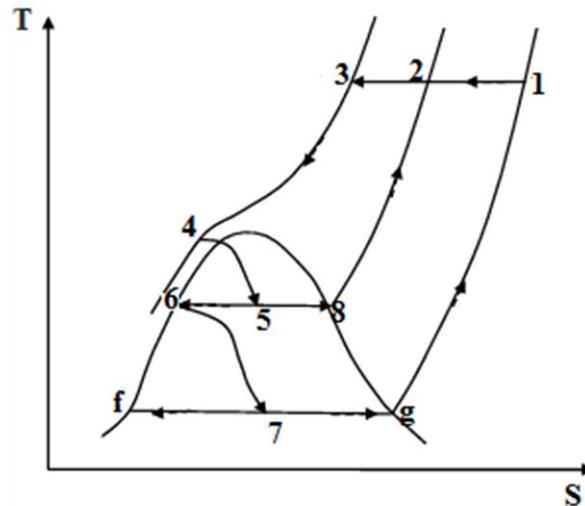
Exercice N°2 :

1.

Le schéma



Le cycle du procédé



2. L'avantage de ce procédé

L'avantage d'une double compression est de réduire le tau de compression est de réduire en conséquence le travail nécessaire par la liquéfaction du gaz.

3.

Points	1	2	3	f
T(K)	290	290	290	74
P(Atm)	0.7	10	200	0.7
h(J/g)	452	450	418	28
s (J/gK)	4.45	3.7	2.7	0.35

4.

• La fraction liquide

$$y = \frac{(h_1 - h_3)}{(h_1 - h_f)} - i \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_f)}$$

$$i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}} = \frac{0.5}{2} = 0.25$$

$$y = \frac{(452 - 418)}{(452 - 28)} - i \frac{(452 - 450)}{(452 - 28)} = 0.079$$

• La consommation d'énergie

Cas idéal :

1^{ère} méthode

La consommation d'énergie spécifique

$$w = [T(s_1 - s_3) - (h_1 - h_3)] - i[T(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$

$$w = [290(4.5 - 2.7) - (452 - 418)] - 0.255[290(4.5 - 3.7) - (452 - 450)]$$

$$W = 430.5 \text{ J/g}$$

2^{ème} méthode

Le compresseur à basse pression

$$\dot{W}_1 = (\dot{m} - \dot{m}_i)[T(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$

$$\dot{W}_1 = (2 - 0.5)[290(4.5 - 3.7) - (452 - 450)] = 345 \text{ KW}$$

Le compresseur à haute pression

$$\dot{W}_2 = (\dot{m})[T(s_2 - s_3) - (h_2 - h_3)]$$

$$\dot{W}_2 = 2[290(3.7 - 2.7) - (450 - 418)] = 516 \text{ KW}$$

La consommation totale du cycle

$$\dot{W} = 345 + 516 = 861 \text{ KW}$$

La consommation d'énergie spécifique :

$$w = \frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \frac{861}{2} = 430.5 \text{ J/g}$$

Cas réel

$$\dot{W}_{1\text{réel}} = \frac{1}{\eta_c} * \dot{W}_1 = \frac{1}{0.6} * 345 = 575 \text{ KW}$$

$$\dot{W}_{2\text{réel}} = \frac{1}{\eta_c} * \dot{W}_2 = \frac{1}{0.6} * 516 = 860 \text{ KW}$$

La consommation totale du cycle

$$\dot{W}_{\text{réel}} = 575 + 860 = 1435 \text{ KW}$$

La consommation d'énergie spécifique

$$w = \frac{575 + 860}{2} = 717.5 \text{ J/g}$$

- FOM

$$FOM = \frac{w_{\text{min}}}{w_0}$$

$$w_{\text{min}} = T_c(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)$$

$$w_{\text{min}} = [290(4.5 - 0.35) - (452 - 28)] = 779.5 \text{ J/g}$$

Cas idéal

$$w_0 = \frac{w}{y} = \frac{430.5}{0.079} = 5449.36 \text{ J/g}$$

$$FOM = \frac{779.5}{5449.36} = 0.13988 \cong 0.14$$

Cas réel

$$w_0 = \frac{w}{y} = \frac{717.5}{0.079} = 9082.27 \text{ J/g}$$

$$FOM = \frac{779.5}{9082.27} = 0.0858 \cong 0.086$$

FOM_{idéal} (0.14) \longrightarrow 100%

FOM_{réel} (0.086) \longrightarrow x

$$x = \frac{0.086 * 100}{0.14} = 61.428 \%$$

On remarque une diminution de presque 38.6 % du FOM pour le cas réel cela est due au mauvais rendement des compresseurs (0.6).