

Chapitre I: Production de basses températures
- Systèmes Cryogéniques -

II-1/ Introduction: La production de températures cryogéniques nécessite des procédés de réfrigération à très basses températures. Bon nombre de ces procédés concernent la liquéfaction des gaz dits permanents comme l'air, l'hydrogène, l'hélium, et GN...

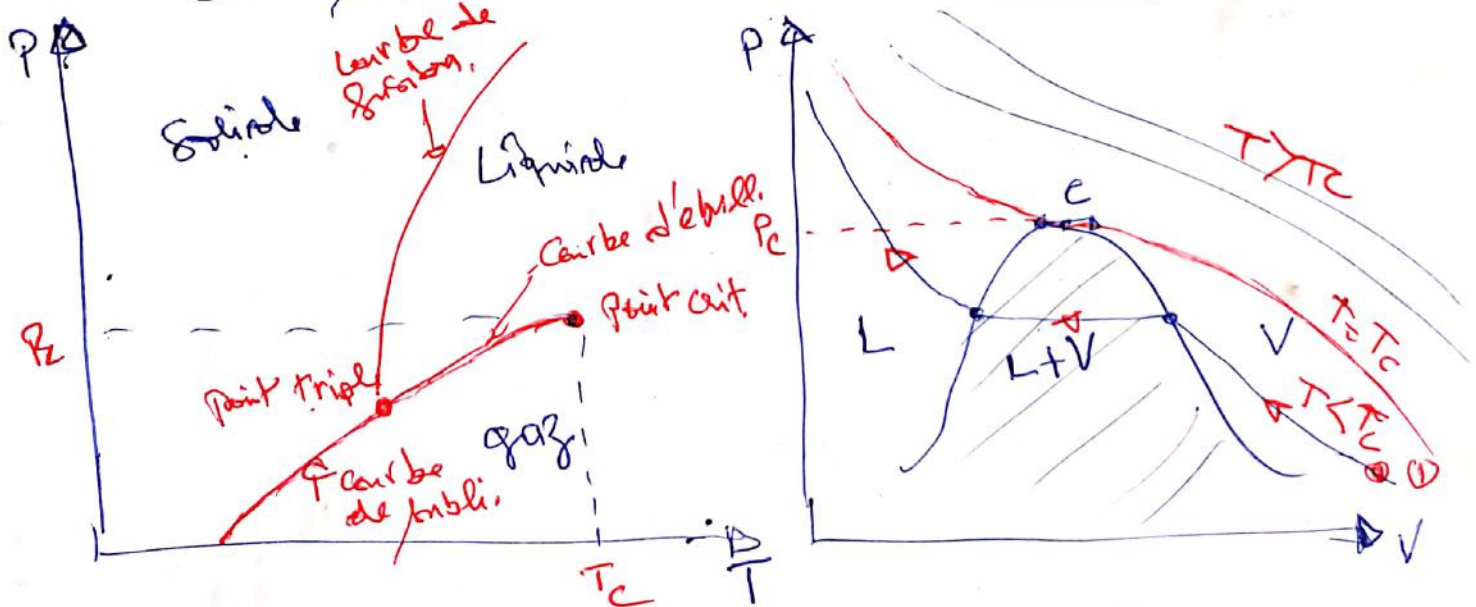
Ces procédés sont très importants dans l'industrie et principalement pour la production des gaz purs (Distillation fractionnée - ASU) et pour l'emploi de ces substances dans divers domaines industriels.

II-2/ Production de basses températures:

II-2-1/ Liquéfaction directe par compression isotherme:

Pour liquéfier un gaz par une simple compression isotherme, la condition suivante doit être satisfaite:

→ La température au début de compression doit être inférieure à la température critique de la substance à liquéfier. $T_1 < T_c$.



Quelques valeurs de température critiques
de liquides cryogéniques (en K):

On remarque que pour les liquides cryogéniques, leur température critique est beaucoup plus inférieure aux conditions à la température ambiante.

Substance	Temp. Crit. T_c (K)
NH_3	40,5
O_2	154,5
N_2	126
He	33,2
4He	5,2
3He	3,2

De ce fait, une simple compression isotherme ne suffit pas pour obtenir un effet de liquéfaction.

II-2-2/ Détente isenthalpique - Effet de Joule-Thomson!

On peut liquéfier un gaz en lui faisant subir une détente isenthalpique, à condition que:

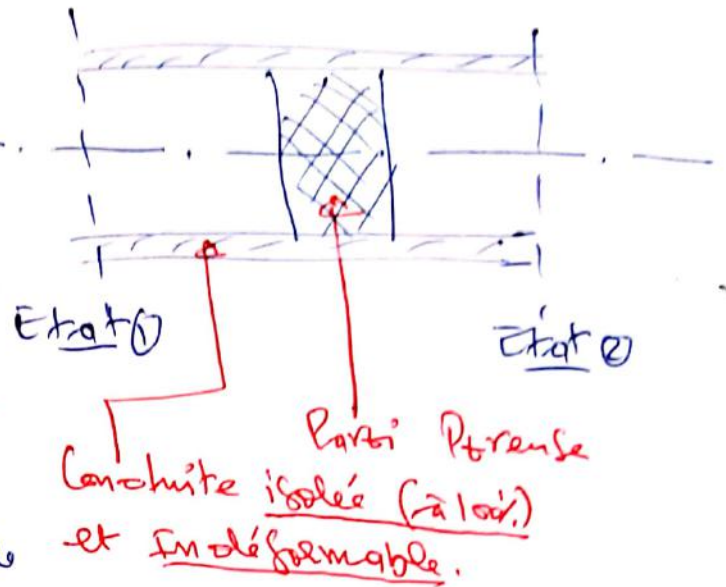
La température de départ doit être inférieure à la température d'inversion maximale du gaz.

Ce tableau présente un historique des substances liquéfiées par effet de Joule-Thomson:

Genre de gaz.	Temp. d'ébullition	Liquéfaction	Temp. d'inversion max (K)
O_2	90	1877: Cailletet & Pictet	762
H_2	77	1883: Wroblewski & Olszewski	625
He	20	1898: Dewar	203
4He	4,2	1908: Onnes	4,2

* Principe de la détente:

On veut faire redendre un fluide en le faisant passer dans une conduite à parois poreuses isolée et indéformable, munie d'une paroi poreuse.



Lors de la traversée, le fluide ayant une pression plus grande en amont "Etat 1" de la cloison, se retrouve à une pression plus basse "Etat 2" en aval.

En effectuant le bilan sur une espèce de la thermody. sur le système ouvert délimité par les parois 1 et 2 entre les deux états d'équilibre, en régime permanent; on a:

$$\cancel{Q} + \cancel{W} + \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j = 0 \quad // \text{ ("l'énergie cinétique" et potentielle étant négligeables devant l'enthalpie)}$$

Il s'agit d'une seule entrée et une seule sortie et en utilisant le principe de la conservation de la masse, on aura:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad \text{et} \quad \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 \rightarrow h_1 = h_2 \quad (\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \neq \dot{m})$$

Donc $dh = 0 \rightarrow h = \text{cte}$.

La détente s'effectue à enthalpie constante.

→ Pour un gaz parfait:

$dh = c_p dT \rightarrow dT = 0 \rightarrow$ pas de chang. de Temp°.

→ Pour un gaz réel:

$dH = m dh = C_p dT + (h + v) dp = 0 \rightarrow$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = - \frac{h + v}{C_p}$$

$$\bar{u} = -T \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_p : 2^{\text{e}} \text{ loi de Clapeyron.}$$

pb :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H = \frac{1}{c_p} \left(T \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_p - V \right) = \mu_{JT}$$

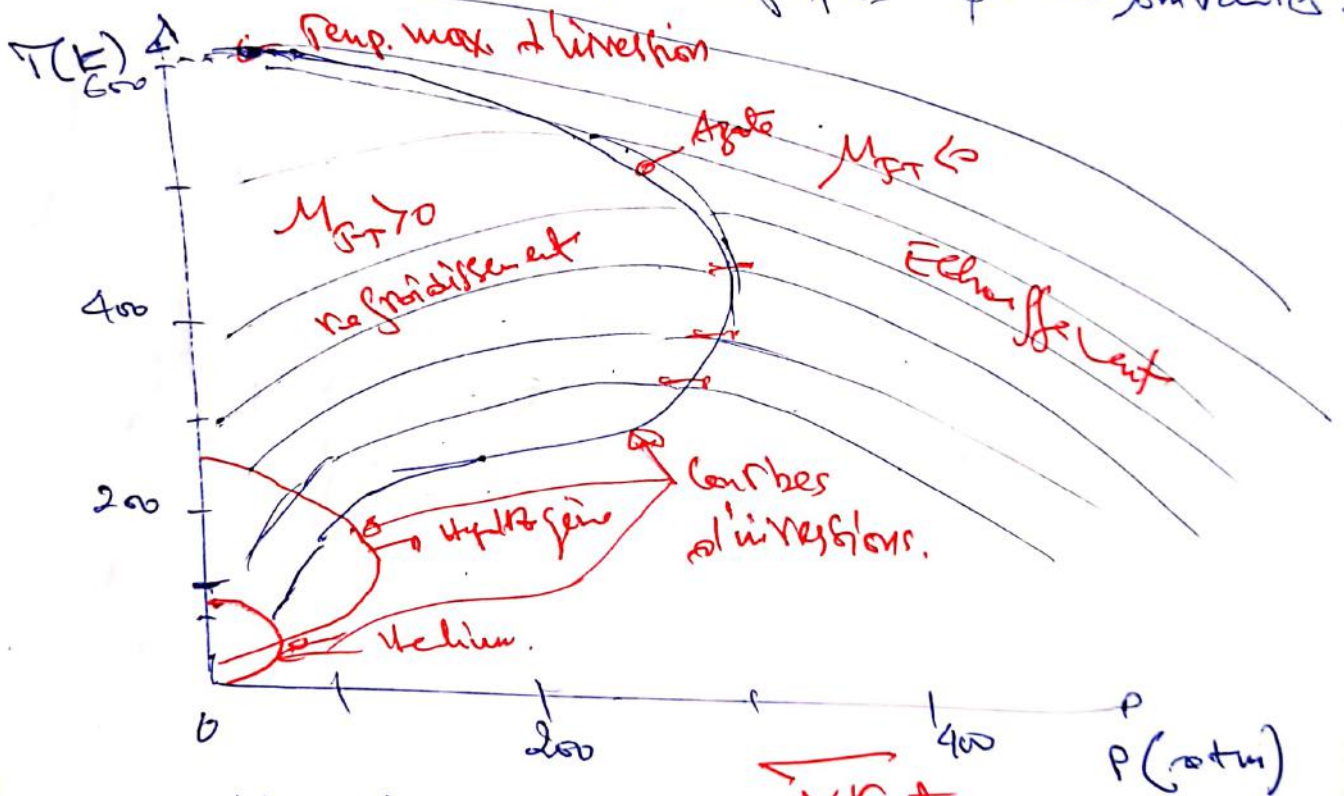
μ_{JT} est appelé coefficient de Joule-Thomson.

Il mesure la pente de la courbe isenthalpique dans un diagramme (T, p).

Pour un G. parfait $\mu_{JT} = 0$, puisque $pV = nRT$.

$$T \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_p = T \left. \frac{\partial (nRT/p)}{\partial T} \right|_p = T \cdot \frac{nR}{p} = \frac{pV}{p} = V$$

L'allure des courbes isenthalpiques sont les suivantes.



La courbe d'inversion est

l'ensemble des pts d'inversion en $\mu_{JT} = 0$ pour une substance donnée.

- si $\mu_{JT} > 0$ → la détente produit un refroidissement d'où une éventualité de liquéfaction pour un gaz.
 - si $\mu_{JT} < 0$ → la détente produit un échauffement.
- Pour la temp. initiale "Etat 0" est supérieure à $T_{i \max}$ on aura pas d'effet de liquéfaction.

II-2-3/ Détente isentropique!

Page 114

Cette détente est utilisée dans certains cycles de liquéfaction (en utilisant une turbine) et, le peut récupérer du travail par aide le compresseur.

son principe est le suivant:

théoriquement c'est une détente qui s'effectue à entropie constante $ds=0 \rightarrow S=stc$.

L'expression de "ds" entre deux états d'équilibre ① et ②, donne:

$$ds = \frac{S_{yrev}}{T} \quad \text{avec:}$$

$$S_{yrev} = C_v dT + l dV = C_v dT + T \cdot \left. \frac{\partial p}{\partial T} \right|_V dV \quad \text{--- ①}$$

$$S_{yrev} = C_p dT + T dp = C_p dT - T \cdot \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_p dp \quad \text{--- ②}$$

Comme $ds=0$

$$\text{①} \rightarrow dT = -\frac{T}{C_v} \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_V dp$$

$$\text{②} \rightarrow dT = \frac{T}{C_p} \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_p dp$$

En utilisant les coeffi thermodynamiques suivants:

$$\alpha_p = \frac{1}{p} \left. \frac{\partial p}{\partial T} \right|_V \quad ; \quad \text{Coeff. de dilatation ther. à volume}$$

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_p \quad ; \quad \dots \quad \rightarrow \alpha_p = \alpha_V$$

Alors

$$\text{①} \rightarrow dT = -\frac{T \alpha_p}{C_v} dV$$

$$\text{②} \rightarrow dT = \frac{T \alpha_V}{C_p} dp$$

Généraliser α_p et α_V sont positifs.

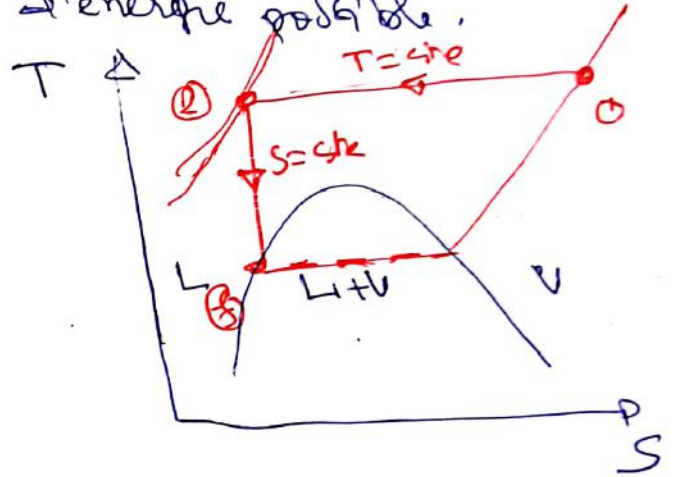
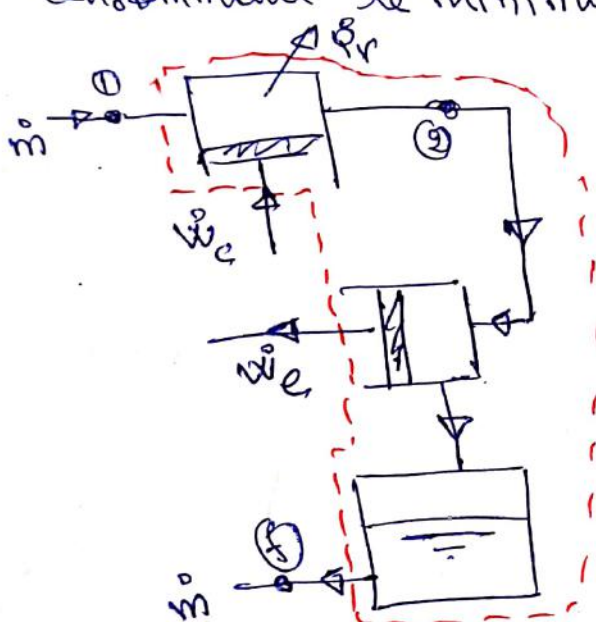
$$\text{Donc} \quad \left\{ \begin{array}{l} \left. \frac{\partial T}{\partial V} \right|_S = -\frac{T}{C_v} \alpha_p p \\ \left. \frac{\partial T}{\partial p} \right|_S = \frac{T}{C_p} \alpha_V V \end{array} \right.$$

Ces deux dernières expressions montrent que "la détente isentropique d'un gaz produit du fait un refroidissement."

II-3/ Cycles de liquéfaction des gaz:

II-3-1/ Cycle idéal de liquéfaction:

C'est un cycle idéal composé de deux transformations thermodynamiques pour liquéfier un gaz en consommant le minimum d'énergie possible.



Les deux transformations sont les suivantes:

1 → 2 : compression isotherme.

3 → 4 : détente isentropique.

bilans du 1^{er} et 2^{es} ppe pour le syst. ouvert (en pointillés):

$$\rightarrow 1^{er} \text{ ppe: } \dot{Q}_r + \dot{W}_c - \dot{W}_e + \dot{m}h_1 - \dot{m}h_f = 0$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_c - \dot{W}_e = \dot{Q}_r - \dot{m}(h_1 - h_f)$$

$$\rightarrow 2^{es} \text{ ppe: } -\frac{\dot{Q}_r}{T_1} + \dot{S} + \dot{m}s_1 - \dot{m}s_f = 0$$

$$\dot{Q}_r = T_1 \dot{m}(s_1 - s_f)$$

P. 151

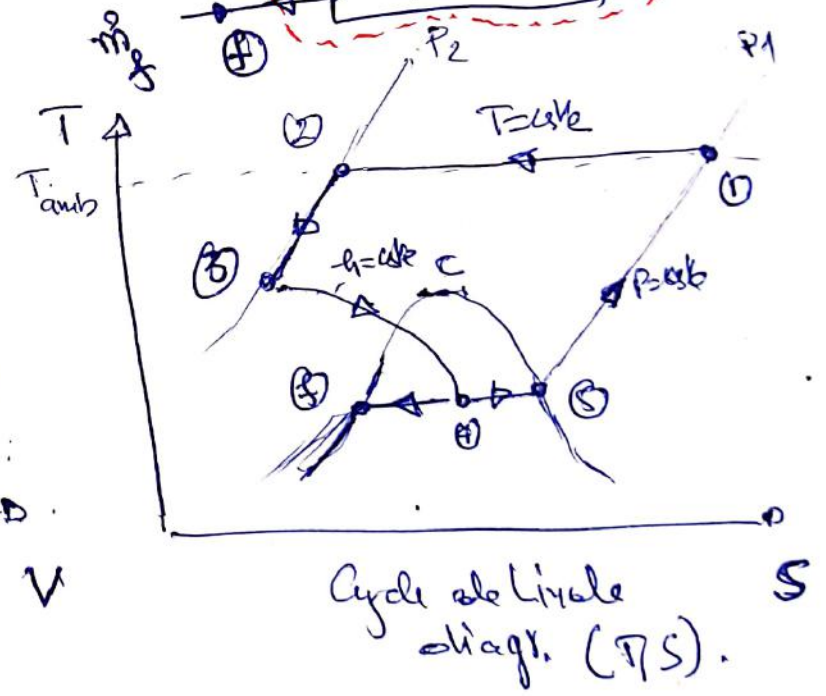
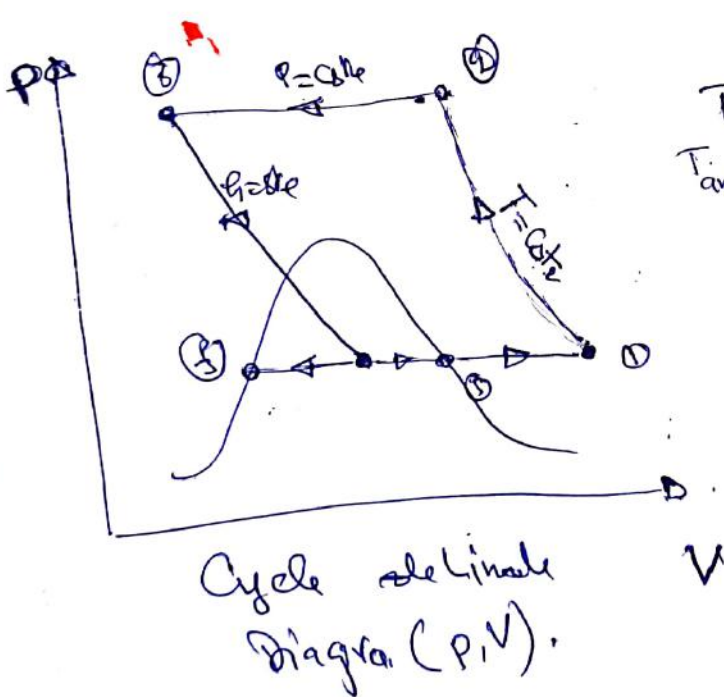
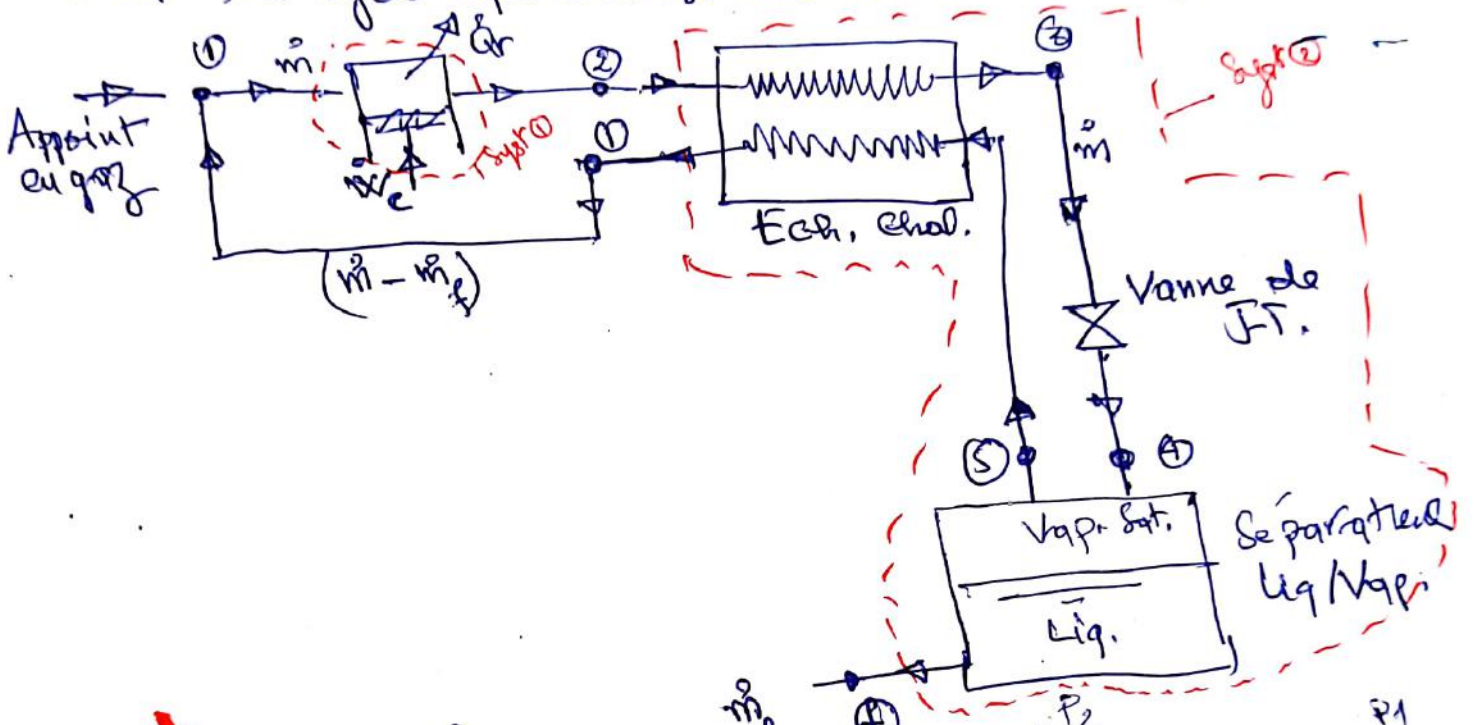
$$\dot{W}_{net} = T_1 \dot{m}(s_1 - s_f) - \dot{m}(h_1 - h_f)$$

$$W_{net} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = T_1(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)$$

Conclusion C'est l'énergie minimale théorique (vale référence) pour liquéfier, compte tenu un gaz.

II-3-2/ Cycle de Linde-Hampson:

C'est un cycle qui utilise une détente de Joule-Thomson.



* La température au pt 3 doit être inférieure à la température maximale d'inversion du gaz.

• Expression de la fraction de gaz liquéfié:

$$y = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}}$$

→ Bilan du 1^{er} ppe sur le syst ① (R. permanent):

$$\dot{Q} + \dot{W} + \dot{m} h_2 - (\dot{m} - \dot{m}_f) h_1 - \dot{m}_f h_f = 0$$

D'où:
$$y = \frac{h_1 - h_f}{h_1 - h_2}$$

• Expression du travail dépensé:

→ Bilan du 1^{er} ppe sur le syst ① (Compresseur):

$$\dot{W}_c - \dot{Q}_r + \dot{m} h_1 - \dot{m} h_2 = 0 \quad (\text{R. permanent}),$$

$$\dot{W}_c = \dot{Q}_r - \dot{m} (h_1 - h_2) \quad \dots \quad (1)$$

→ Bilan du 2^{em} ppe sur le syst ②:

$$-\frac{\dot{Q}_r}{T_1} + \dot{Q}_r + \dot{m} s_1 - \dot{m} s_2 = 0 \quad (\text{R. perm.})$$

$$\dot{Q}_r = \dot{m} T_1 (s_2 - s_1) \quad \dots \quad (2)$$

① → ②:
$$\dot{W}_c = \dot{m} T_1 (s_2 - s_1) - \dot{m} (h_1 - h_2)$$

$$\dot{W}_c = \dot{m} [T_1 (s_2 - s_1) - (h_1 - h_2)]$$

D'où:

$$w_c = \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = T_1 (s_2 - s_1) - (h_1 - h_2)$$

$\frac{W_c}{m}$ de gaz comprimé

C'est le travail dépensé par kg de gaz comprimé

$$w_f = \frac{W}{m_f} = \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_f} = \frac{1}{y} [T_1 (s_2 - s_1) - (h_1 - h_2)]$$

C'est le travail dépensé par kg de gaz liquéfié.

Le cycle de Claude associe deux détente:

- > Détente Isenthalpique (Vanne JT)
- > Détente Isentropique.

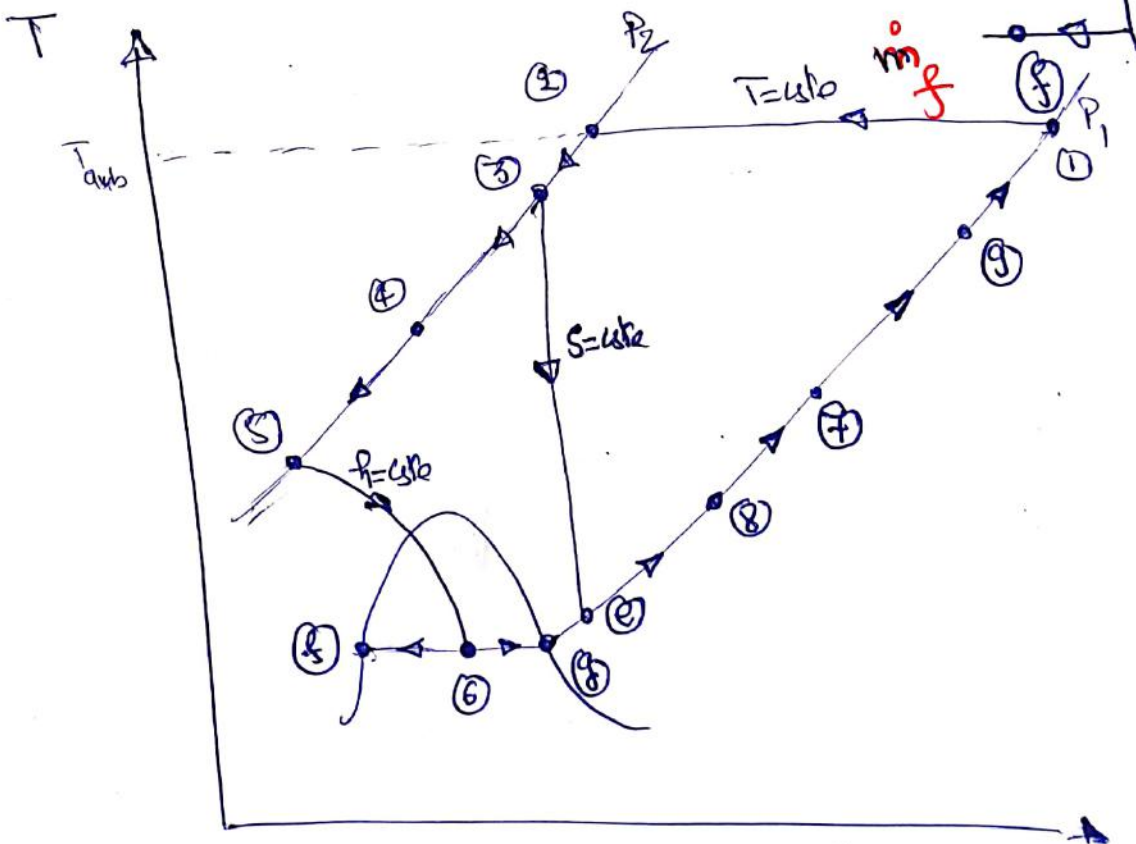
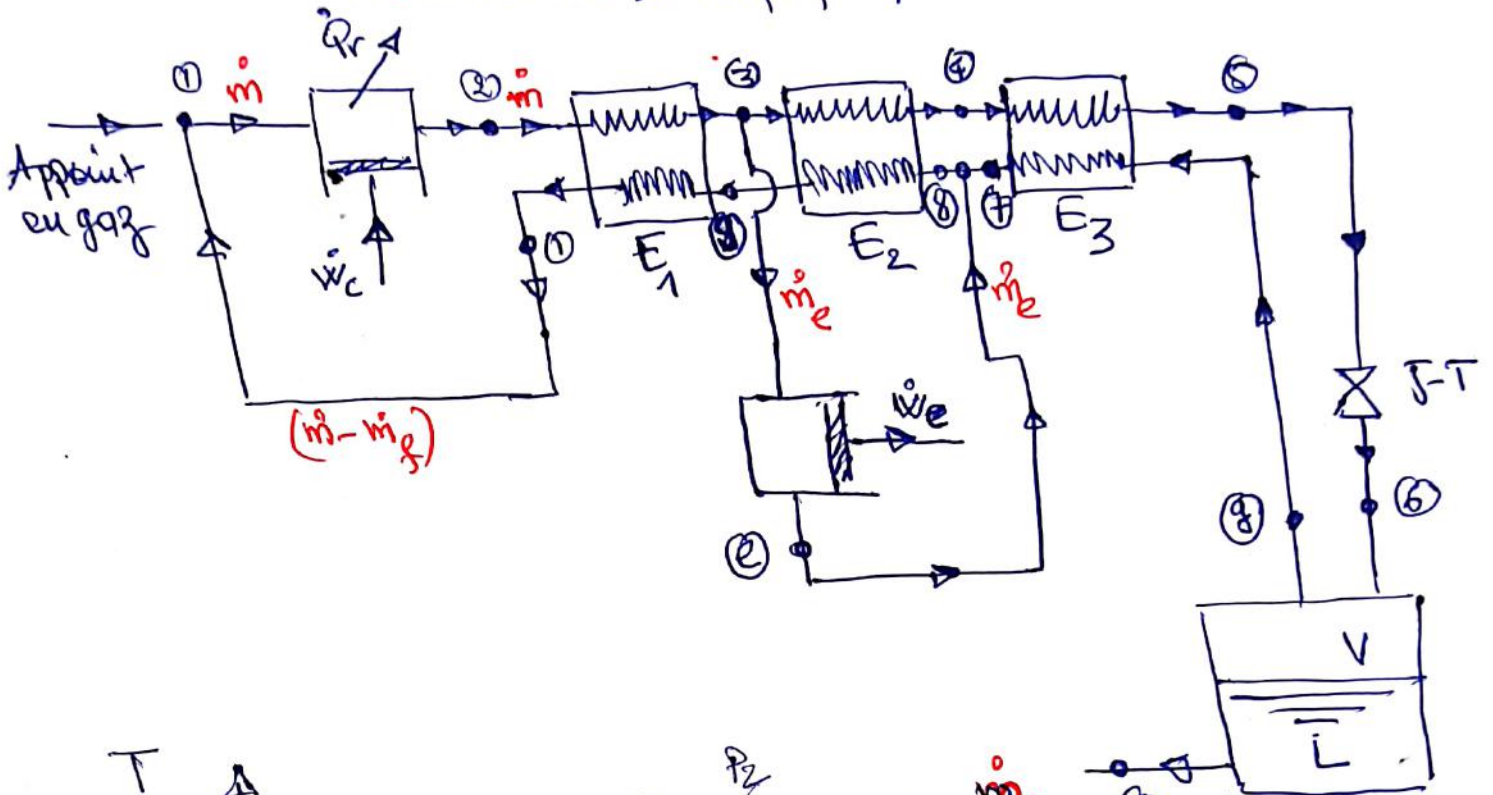


Diagramme (T,s) du Cycle de Claude.

* Expression de " $y_f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}}$ " :

Bilan du 1^{er} ppe sur le syst, comprenant tous les composants sauf le compresseur et la turbine,

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_f h_f - \dot{m}_3 h_3 - (\dot{m} - \dot{m}_f) h_1 = 0$$

On pose: $x = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}}$: la fraction rétirée à travers la turbine

D/m:
$$y_f = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + x \frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_f}$$

* Expression du travail net perçu:

* Bilan du 1^{er} et 2^{ème} ppe sur le compresseur:

$$\dot{W}_c = \dot{m} [T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] \dots \text{--- (1)}$$

* Bilan du 1^{er} ppe sur la turbine et détente:

$$-\dot{W}_t + \dot{m}_e h_3 - \dot{m}_e h_e = 0$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}_e (h_3 - h_e) \dots \text{--- (2)}$$

Combinons (1) et (2):

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_c - \dot{W}_t = \dot{m} [T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] - \dot{m}_e (h_3 - h_e)$$

D/m:
$$W = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}} = [T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] - x (h_3 - h_e)$$

 et
$$x/e = \frac{W}{y_f} = \frac{1}{y_f} [T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) - x (h_3 - h_e)]$$

W en ~~kJ~~ / kg gaz compr, W_e en kJ/kg ~~gaz~~ liquides.