

CHAPITRE 2

Procédés De liquéfaction Des Gaz (04 Semaines)

Sommaire	N° : page
1. Généralités sur la liquéfaction des gaz	3
2. Importance et utilisation des gaz liquéfiés	3
3. Liquéfaction par détente Joule-Thomson	3
3.1 Procédé de Linde Simple	3
3.2 Procédé de Linde avec refroidissement préalable du gaz de travail	8
3.3 Procédé de Linde à étranglement double	11
4. Cycle de Brayton	13

1. Généralités sur la liquéfaction des gaz :

2. Importance et utilisation des gaz liquéfiés :

On peut constater trois points d'importance des gaz liquéfiés :

- a- Obtention des gaz purs à partir d'un mélange par le phénomène d'ébullition ou bien condensation à température et pression constantes.
- b- Facilité et économie du transport : le liquide occupe un espace moins que celui occupé par le gaz ce qui permet de faciliter la tâche du transport et économiser leurs moyens.
- c- Usages des basses températures : quelque gaz a des températures de condensation inférieures à la température ambiante ($<0^{\circ}\text{C}$)

3. Liquéfaction par détente Joule-Thomson :

La détente de joule - Thomson est une détente adiabatique et Isenthalpique qui s'effectue au-dessous de la température d'inversion (détente avec refroidissement), le système de liquéfaction utilisé se compose de :

- ✓ Compresseur, Echangeur de chaleur, Vanne, Séparateur de liquide,

On distingue trois cycles de détente Isenthalpique

- a. Procédé de Linde simple
- b. Procédé de Linde avec refroidissement préalable du gaz de travail
- c. Procédé de Linde à étranglement double

3.1. Procédé de Linde simple :

Dans ce processus, le gaz comprimé à haute pression dans le compresseur à température constante (température ambiante) compression isotherme, Le réfrigérant comprimé est refroidi dans un échangeur de chaleur à contre-courant à pression constante, puis à travers une vanne de détente le gaz subit un deuxième abaissement de température (Détente de J-T) dans la zone de saturation, ce qui permet de liquéfier partiellement le fluide dans le réservoir de séparation du liquide, le reste du gaz

saturé non liquéfié subi un réchauffement isobare dans l'échangeur de chaleur (contre-courant) avant son retour vers le compresseur.

Le gaz à liquéfié s'évolue dans le cycle selon les transformations suivantes :

1-2 : Compression isotherme.

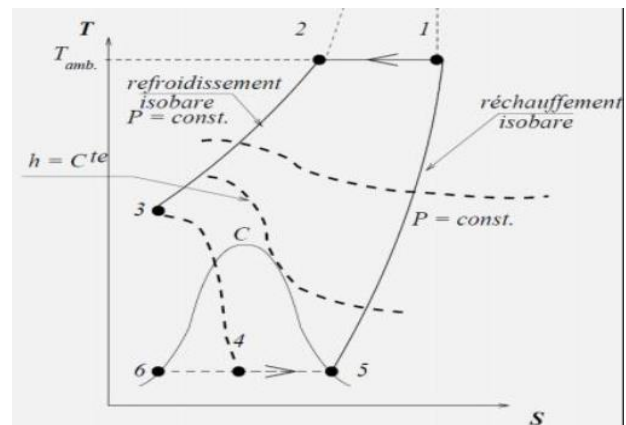
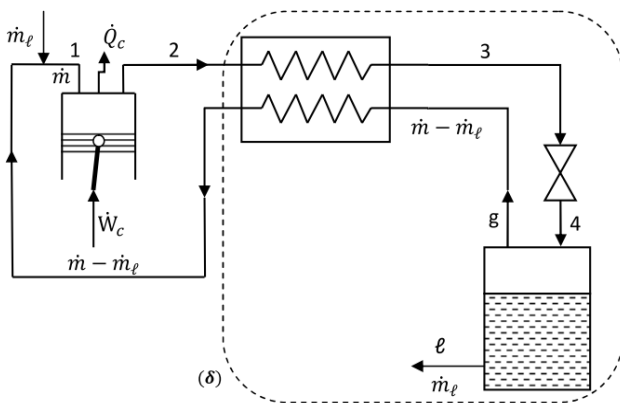
2-3 : Refroidissement Isobare du fluide.

3-4 : Détente isenthalpique dans la vanne.

4-5 : Vapeur saturée.

5-1 : Réchauffage Isobare du fluide (gaz) dans l'échangeur.

Bilan énergétique de cycle de Linde simple :



a. Cycle de Linde Linde simple

b. Représentation du cycle de Linde sur Diag (TS)

En faisant le bilan énergétique pour le volume de contrôle délimité par la surface (δ), on aura pour une masse du gaz comprimée \dot{m} et une masse soutirée \dot{m}_f

- ✓ Le volume de contrôle contient : échangeur de chaleur, vanne de détente, réservoir du liquide,

➤ Fraction du gaz liquéfié (Y)

Le 1^{er} principe de la thermodynamique (conservation de la masse) :

$$E_e = E_s$$

$$\Delta E_T = Q + W + \sum_s m_s(h_T)_s - \sum_e m_e(h_T)_e$$

Le dérivé de cette équation donne :

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_s \dot{m}_s(h_T)_s - \sum_e \dot{m}_e(h_T)_e$$

\dot{E}_T : Puissance totale échangée avec l'extérieur

\dot{Q} : Puissance thermique échangée avec le milieu extérieur

\dot{W} : Travail exercé sur la paroi

\dot{m}_i, \dot{m}_j : Débit massique du fluide

En considère que le régime est permanent :

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = 0$$

$$\dot{Q} + \dot{W} + \sum_s \dot{m}_s(h_T)_s - \sum_e \dot{m}_e(h_T)_e = 0$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum_e \dot{m}_e(h_T)_e - \sum_s \dot{m}_s(h_T)_s = 0$$

$\dot{Q} = 0$, échangeur adiabatique. $\dot{W} = 0$, hors du volume de contrôle

$$\sum_e \dot{m}_e(h_T)_e = \sum_s \dot{m}_s(h_T)_s$$

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

$$\dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}_f(h_f - h_1)$$

$$\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_f - h_1)}$$

On détermine la fraction du gaz liquéfié par Y

$$Y = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_f)}$$

$$0 < Y < 1$$

✓ Le volume de contrôle contient l'échangeur de chaleur

➤ **Quantité de chaleur échangée dans l'échangeur de chaleur) Q :**

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_s \dot{m}_s(h_T)_s - \sum_e \dot{m}_e(h_T)_e$$

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = 0 \text{ Régime permanent}$$

$$\dot{Q} = 0, \text{ échangeur adiabatique.}$$

$$\dot{W} = 0, \text{ hors du volume de contrôle}$$

$$\sum_e \dot{m}_e(h_T)_e = \sum_s \dot{m}_s(h_T)_s$$

$$\dot{m}h_2 + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_g = \dot{m}h_3 + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1$$

$$\dot{m} - \dot{m}_f = \dot{m}_g$$

$$\dot{m}_g(h_g - h_1) = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

$$Q = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

✓ Le volume de contrôle contient : le Détendeur

La détente de J-T est une détente Isenthalpique

$$h_3 = h_4$$

$$h_4 = Yh_g + (1 - Y)h_f$$

✓ Le volume de contrôle contient : le compresseur

➤ **Travail par unité de masse du gaz comprimé (\dot{W}_c / \dot{m})**

Le 1^{er} principe de la thermodynamique :

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_s \dot{m}_s (h_T)_s - \sum_e \dot{m}_e (h_T)_e$$

$$\frac{dE_T}{dt} = \dot{E}_T = 0 \text{ Régime permanent}$$

$$\dot{W} = -\dot{Q} + \dot{m}h_2 - \dot{m}h_1$$

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

Le 2^{ème} principe de la thermodynamique

$$\frac{dS}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \sum_s \dot{m}_s (S)_s + \sum_e \dot{m}_e (S)_e = 0$$

$$\dot{Q} = \dot{m}T_1(S_2 - S_1) \dots \dots \dots (2)$$

On remplace l'équation (2) dans (1) on obtient :

$$\dot{W} = -\dot{m}T_1(S_2 - S_1) + \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_c / \dot{m} = (h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1)$$

Elle représente la quantité d'énergie dépensés pour liquéfier la fraction correspondante (Y)

➤ **Travail par unité de masse liquéfiée (\dot{W}_c / \dot{m}_l)**

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l} = \frac{1}{Y} [(h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1)]$$

Elle représente la quantité d'énergie dépensés pour liquéfier (1kg) du gaz.

➤ **Facteur de mérite FOM**

Le rendement thermodynamique est le rapport entre le travail idéal et le travail réel nécessaire pour le système. Ce rapport donne la mesure d'approche de performance du système réel au système idéal.

$$FOM = \left(\frac{\dot{W}_1 / \dot{m}_l}{\dot{W}_c / \dot{m}_l} \right)$$

$$\frac{\dot{W}_1}{\dot{m}_l} = [(h_f - h_1) - T_1(S_f - S_1)]$$

3.2. Procédé de Linde avec refroidissement préalable du gaz (Pré-refroidissement):

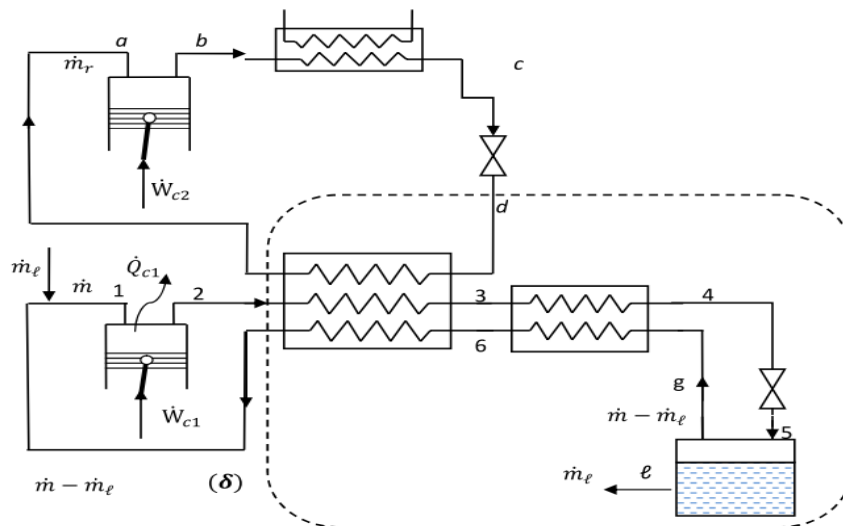
Pour améliorer la performance du cycle du *Linde* il est nécessaire d'augmenter le taux de liquéfaction et assurer que le gaz à la sortie de l'échangeur soit à une température ambiante.

Ce système comporte un autre cycle de refroidissement (cycle frigorifique) pour abaisser plus la température au point 3, et assurer une quantité du gaz liquéfiée plus importante. Donc le gaz comprimé est refroidi à la première fois dans l'échangeur de chaleur du cycle frigorifique avant de pénétrer dans celui du premier cycle.

- Le gaz à liquéfier par le système de liquéfaction est appelé fluide primaire.
- Le fluide frigorigène dans le système de pré-refroidissement est un fluide secondaire.
- La limite de pré-refroidissement du cycle de pré-refroidissement est régie par le point d'ébullition de réfrigérant, à sa pression d'aspiration.

Point d'ébullition des réfrigérants courants à 1 bar sont :

Fluide	Pt de bulle
CO ₂	216.6 K
NH ₃	240 K
R134a	247 K



Cycle de Linde avec Pré-refroidissement

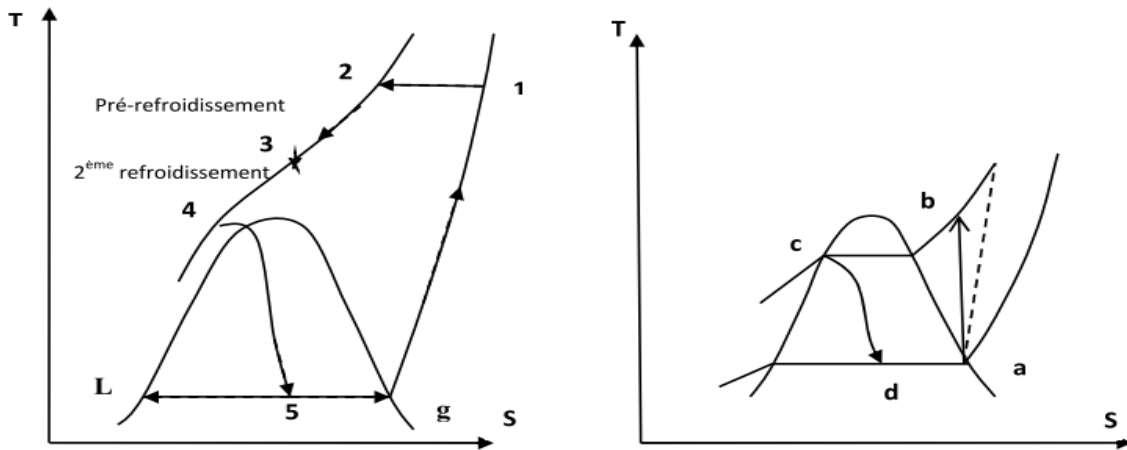


Diagramme (TS) : cycle de liquéfaction et cycle frigorifique

✚ Bilan énergétique de cycle de Pré-refroidissement :

En faisant le bilan énergétique sur le volume de contrôle délimité par la surface δ , on aura

$$\dot{m}h_2 + \dot{m}_r h_d = \dot{m}_f h_f + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1 + \dot{m}_r h_a$$

Après l'arrangement nous avons :

$$\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}} = X \quad \text{et} \quad \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = Y$$

Le taux de liquéfaction :

$$Y = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_f)} + X \frac{(h_a - h_d)}{(h_1 - h_f)}$$

Le premier terme de l'expression ci-dessus est le rendement du système simple de Linde, tandis que le deuxième est le rendement supplémentaire au résultat du pré-refroidissement.

La variation de la valeur de la fraction liquéfiée dépend les valeurs de h_a, h_d, \dot{m}_r

➤ **Travail par unité de masse du gaz comprimé ($\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}$)**

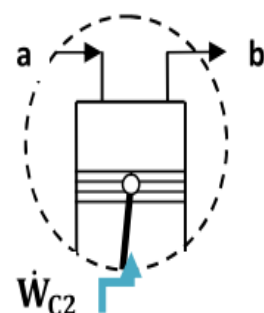
$$\dot{W}_c = \dot{W}_{c1} + \dot{W}_{c2}$$

✓ Cycle frigorifique

La compression est isentropique

Le bilan énergétique sur le volume de contrôle

$$\dot{W}_{c2} = \dot{m}_r (h_b - h_a)$$



✓ Cycle de Linde-pré-refroidissement :

La compression est isotherme

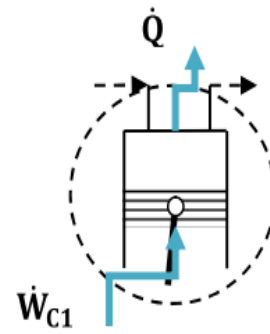
Le bilan énergétique sur le volume de contrôle

$$\dot{W}_{c1} = \dot{m}[(h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1)]$$

C/ la totalité du travail :

$$\dot{W}_c = \dot{m}[(h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1)] + \dot{m}_r(h_b - h_a)$$

$$X = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}}$$



$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = (h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1) + X(h_b - h_a)$$

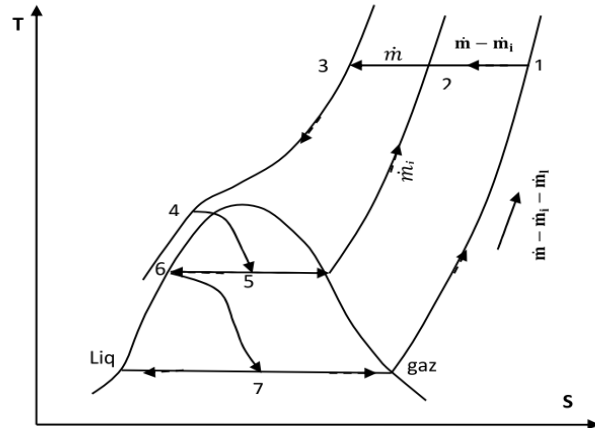
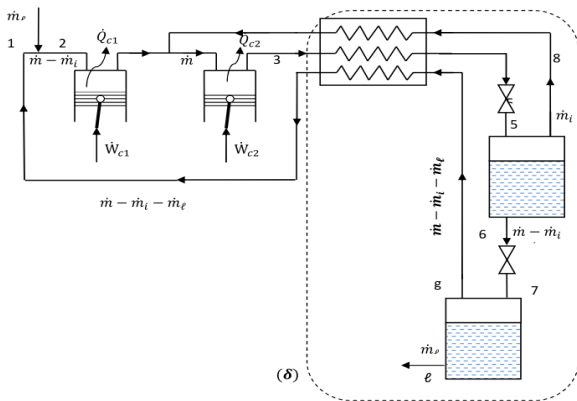
➤ **Travail par unité de masse liquéfiée (\dot{W}_c/\dot{m}_l)**

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l} = \frac{1}{Y} \{ [(h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1)] + X(h_b - h_a) \}$$

➤ **Facteur de mérite FOM**

$$FOM = Y * \frac{[(h_l - h_1) - T_1(S_l - S_1)]}{[(h_2 - h_1) - T_1(S_2 - S_1)] + X(h_b - h_a)}$$

3.3. Procédé de Linde à étranglement double :



Cycle de Linde avec double détente

Cycle de Linde avec double détente

Sur Diagramme TS

✚ Bilan énergétique de cycle avec double détente :

En faisant le bilan énergétique sur le volume de contrôle :

➤ Taux de fraction liquéfiée

$$\dot{m}h_3 = \dot{m}_l h_2 + \dot{m}_f h_f + (\dot{m} - \dot{m}_l - \dot{m}_f) h_1$$

$$\dot{m}(h_3 - h_1) + \dot{m}_l(h_1 - h_2) + \dot{m}_f(h_1 - h_f) = 0$$

$$\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}} = Z \quad \text{et} \quad \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = Y$$

$$(h_1 - h_3) = Z(h_1 - h_2) + Y(h_1 - h_f)$$

$$Y = \frac{(h_1 - h_3)}{(h_1 - h_f)} + Z \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_f)}$$

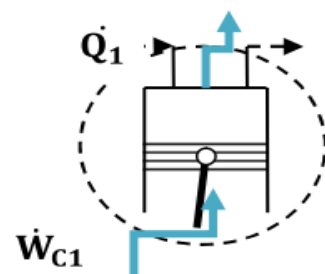
➤ Travail par unité de masse du gaz comprimé (\dot{W}_c / \dot{m})

En faisant le bilan énergétique sur les deux compresseurs isothermes :

$$\dot{W}_c = \dot{W}_{c1} + \dot{W}_{c2}$$

$$= \text{1^{er} compresseur} :$$

Le premier principe de la thermodynamique :



$$(\dot{m} - \dot{m}_l) h_1 + \dot{W}_{c1} = (\dot{m} - \dot{m}_l) h_2 + \dot{Q}$$

Compression isotherme à température constante $T=T_1$

Deuxième principe de la thermodynamique

$$\dot{Q} = (\dot{m} - \dot{m}_l) T_1 (S_2 - S_1)$$

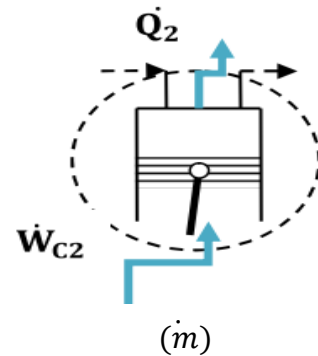
$$\dot{W}_{c1} = (\dot{m} - \dot{m}_l) [T_1 (S_2 - S_1) - (h_1 - h_2)]$$

$$\dot{m} - \dot{m}_l$$

2^{ème} compresseur :

$$T_2 = T_1$$

$$\dot{W}_{c2} = (\dot{m}) [T_1 (S_2 - S_3) - (h_2 - h_3)]$$



Le travail total de compression

$$r = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}}$$

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = [T_1 (S_2 - S_3) - (h_2 - h_3)] + r [T_1 (S_2 - S_1) - (h_1 - h_2)]$$

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = [(h_3 - h_1) + T_1 (S_1 - S_3)] - r [(h_2 - h_1) + T_1 (S_1 - S_2)]$$

➤ **Travail par unité de masse liquéfiée (\dot{W}_c / \dot{m}_l)**

$$Y = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}} \quad \longrightarrow \quad \dot{m} = \frac{\dot{m}_L}{Y}$$

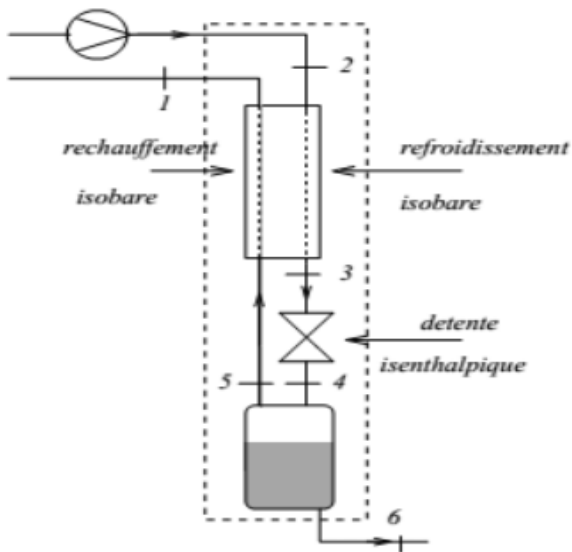
$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_l} = \frac{1}{Y} [(h_3 - h_1) + T_1 (S_1 - S_3)] - r [(h_2 - h_1) + T_1 (S_1 - S_2)]$$

➤ **Facteur de mérite FOM**

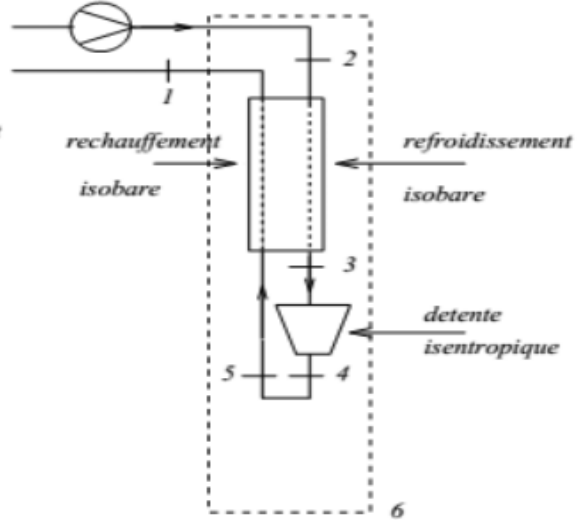
$$FOM = Y * \frac{[(h_l - h_1) - T_1 (S_l - S_1)]}{[(h_3 - h_1) + T_1 (S_1 - S_3)] - r [(h_2 - h_1) + T_1 (S_1 - S_2)]}$$

4. Cycle de BRAYTON :

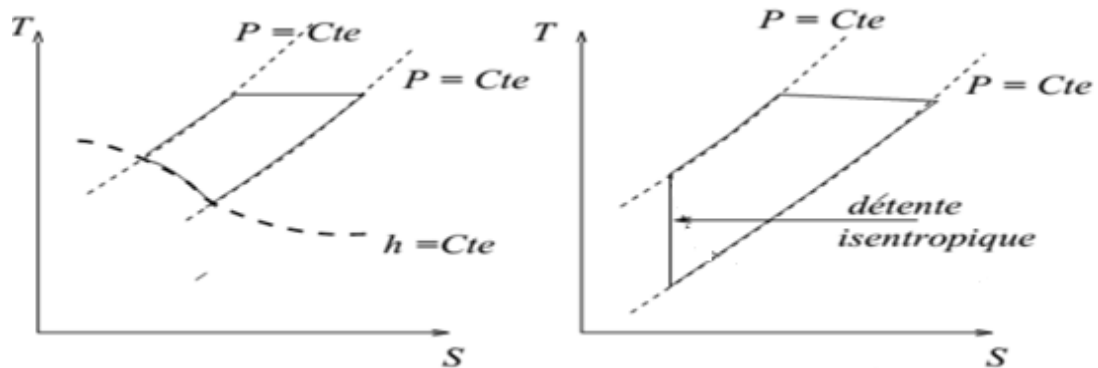
Dans le cycle de Linde, le refroidissement Isenthalpique est obtenu au cours d'une détente sans production de travail, tandis que la détente dans le cycle de BRAYTON est réalisée par une action d'une machine (turbine) qui elle-même fournit en même temps du travail, cette détente est une détente adiabatique et réversible (Isentropique).



a- Cycle de Linde



b- Cycle de Brayton



Cycle de **Linde** et **Brayton** sur diagramme(TS)