

Le cycle de Linde-Hampson pré-refroidi

Rappels :

- Nous avons étudié l'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur les performances d'un cycle de Linde - Hampson.
- Mathématiquement,

$$\varepsilon = \frac{Q_{act}}{Q_{max}}$$

- Dans un cycle Linde - Hampson, l'efficacité de l'échangeur de chaleur ε est exprimée par :

$$\varepsilon = \frac{h_{1'} - h_g}{h_1 - h_g} \quad \text{ou} \quad \varepsilon = \frac{h_{3'} - h_2}{h_3 - h_2}$$

- La fraction de liquide y pour un cycle de Linde – Hampson est donné par :

$$y = \frac{(h_1 - h_2) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g)}{(h_1 - h_f) - (1 - \varepsilon)(h_1 - h_g)}$$

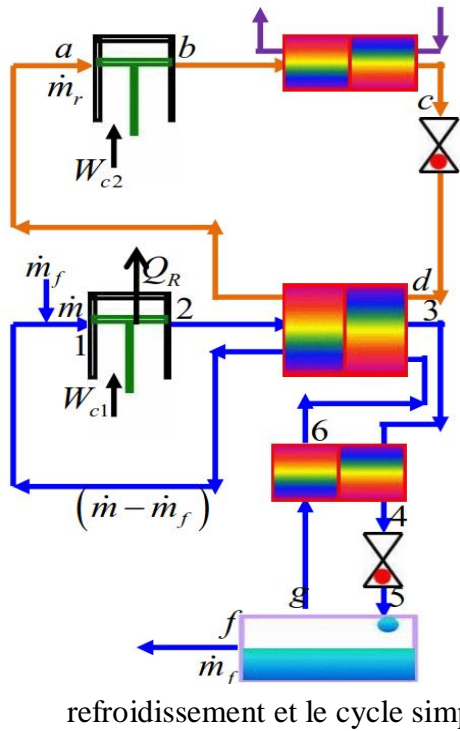
- L'efficacité devrait être supérieure à 85% afin d'avoir une fraction de liquide dans le cycle de Linde - Hampson.

Sujet : Le cycle de liquéfaction de Linde – Hampson pré-refroidi (suite)

Dans ce cours nous allons établir :

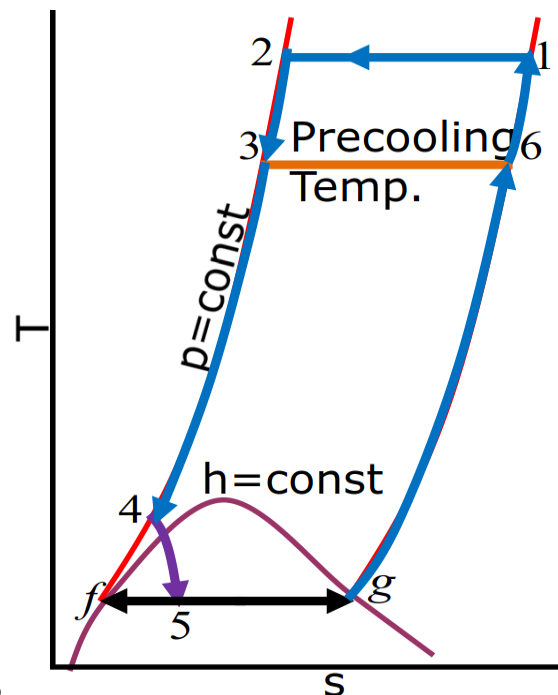
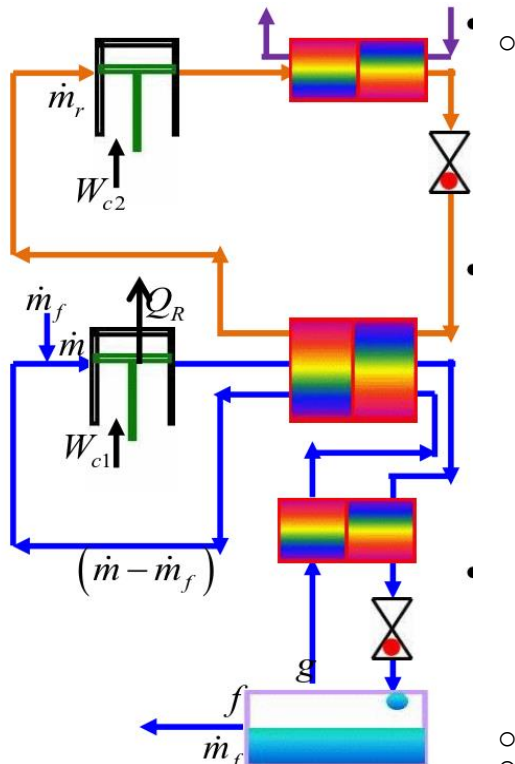
- L'expression de la fraction de liquide,
- L'expression du travail nécessaire,
- L'expression de la fraction de liquide maximal,
- La comparaison entre le cycle de Linde – Hampson simple et le pré-refroidi.

Nous avons vu plus tôt que, comme la température de la compression diminue, la fraction liquéfiée y augmente pour un cycle de Linde - Hampson.



- La méthode de refroidissement du gaz après la compression ou avant l'entrée dans l'échangeur chaleur est appelée pré-refroidissement.
- Le cycle Linde - Hampson avec pré-refroidissement arrangement est appelé cycle de Linde - Hampson pré-refroidi.
- Ici, nous référons à ces deux cycles par cycle simple de Linde - Hampson et cycle pré-refroidi de Linde - Système Hampson respectivement.
- Le cycle simple de Linde - Hampson est schématisé sur la figure ci-contre.
- Un échangeur de chaleur à 3 voies est utilisé pour coupler thermiquement le cycle de pré-refroidissement et le cycle simple de Linde - Hampson.

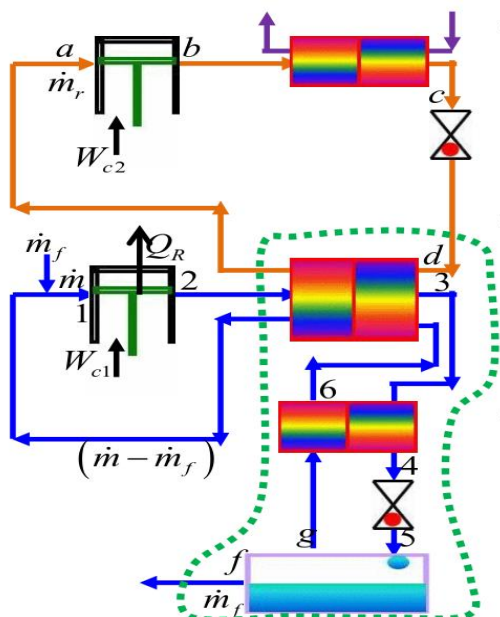
- Par conséquent, la température est abaissée après compression ou avant l'entrée dans l'échangeur de chaleur primaire (du cycle de liquéfaction).
- Les caractéristiques de cycle avec pré-refroidissement sont comme-suit :



○ C'est un cycle de réfrigération fermé avec un évaporateur couplé thermiquement (à travers l'échangeur de chaleur à trois voies) à un cycle simple de Linde - Hampson.

- En d'autres termes, l'objectif de ce réfrigérateur le est le refroidissement du cycle simple de Linde - Hampson.

- L'échangeur de chaleur du cycle de pré - refroidissement (le condenseur) est refroidi par de l'eau et la vanne de J-T est utilisé pour atteindre des températures inférieurs.
 - Le procédé de compression est supposé être adiabatique. Par conséquent, $Q_R = 0$.
 - Des réfrigérants communs sont utilisés dans le cycle de pré-refroidissement c'est par exemple du : R134a, NH3, CO2.
- Les principales caractéristiques d'un cycle de Linde -Hampson pré-refroidi sont les suivantes :
 - Le système consiste en deux compresseurs C_1 et C_2 , de deux échangeurs de chaleur, (un à 2 voies et l'autre à 3 voies) et de deux vannes de détente de J - T.
 - Le processus de compression est isotherme (tandis qu'il est supposé adiabatique dans système de pré-refroidissement), les deux vannes de J-T sont isenthalpique.
 - Tous les procédés sont supposés être idéals et qu'il n'y a pas de baisses de pression dans le système.
 - Les échangeurs de chaleur sont supposés être efficaces à 100% et les procédés sont isobares comme spécifié ci-dessus.
 - Le gaz à liquéfier par le système de liquéfaction est appelé fluide primaire, alors que le réfrigérant du cycle de pré-refroidissement est appelé fluide secondaire.
 - La limite de la température de pré-refroidissement du cycle de pré-refroidissement est régi par la température ou point d'ébullition de réfrigérant à sa pression d'aspiration.



- Les points d'ébullition de quelques réfrigérants communs à 1 bar sont :

| Fluid | Boiling Pt. |
|-----------------|-------------|
| CO ₂ | 216.6 K |
| NH ₃ | 240 K |
| R134a | 247 K |

- Considérons un volume de contrôle pour ce système comme indiqué sur la figure ci-contre.
- Ce volume de contrôle renferme l'échangeur de chaleur à 3 voies, la vanne de détente J - T du cycle de liquéfaction et le réservoir de liquide.

- Le premier principe de la thermodynamique s'écrira, si on suppose les variations de l'énergie potentielle et cinétique du fluide négligeables.
- Les quantités entrant et sortant le volume de contrôle sont les suivantes.

| IN | OUT |
|-----------------|---------------------------|
| $\dot{m}_r @ d$ | $\dot{m}_r @ a$ |
| $\dot{m} @ 2$ | $\dot{m} - \dot{m}_f @ 1$ |
| | $\dot{m}_f @ f$ |

- En appliquant le 1er principe, nous aurons :

$$\dot{m}_r h_{d,r} + \dot{m} h_2 = \dot{m}_r h_{a,r} + (\dot{m} - \dot{m}_f) h_1 + \dot{m}_f h_f$$

- En réorganisant les termes, nous aurons :

$$\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \left(\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \right) + \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}} \left(\frac{h_{a,r} - h_{d,r}}{h_1 - h_f} \right)$$

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

- Si on désigne le rapport :

- Nous aurons :

$$y = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + r \left(\frac{h_{a,r} - h_{d,r}}{h_1 - h_f} \right)$$

- Le premier terme de cette expression est la fraction liquéfiée d'un cycle simple de Linde – Hampson.
- Le deuxième terme est la fraction liquéfiée supplémentaire survenant en raison du pré-refroidissement du cycle Simple.

$$y = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + r \left(\frac{h_{a,r} - h_{d,r}}{h_1 - h_f} \right)$$

- Cette augmentation dans la fraction liquéfiée dépend du :

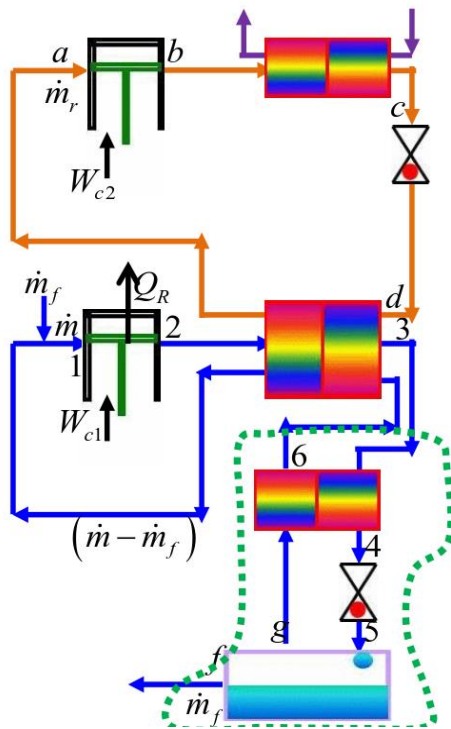
- De la variation d'enthalpie de valeurs de ($h_d \rightarrow h_a$) du réfrigérant et,
- Du débit du réfrigérant (\dot{m}_r).
- Comme, l'échangeur la chaleur à 3-voies est supposé être efficace à 100%, les conditions suivantes sont remplies.

- La valeur minimale de T_3 serait égal à T_d , qui est le point d'ébullition du réfrigérant.
- La valeur maximale de T_6 serait égal à T_d , qui est le point d'ébullition du réfrigérant.

- À cette condition, le système produit la fraction y maximale pour un réfrigérant donné.
-
- Mathématiquement,
-

$$y = y_{\max} \text{ Pour } T_3 = T_6 = T_d$$

- Considérons un volume de contrôle renfermant l'échangeur chaleur, la vanne de J - T et le récipient de liquide, comme montré sur la figure ci-contre.



-
- Les quantités entrant et sortant du volume de contrôle sont les suivants :
-

| IN | OUT |
|---------|---------------|
| $m @ 3$ | $m_f @ f$ |
| | $m - m_f @ 6$ |

- En appliquant le 1er principe, nous aurons :

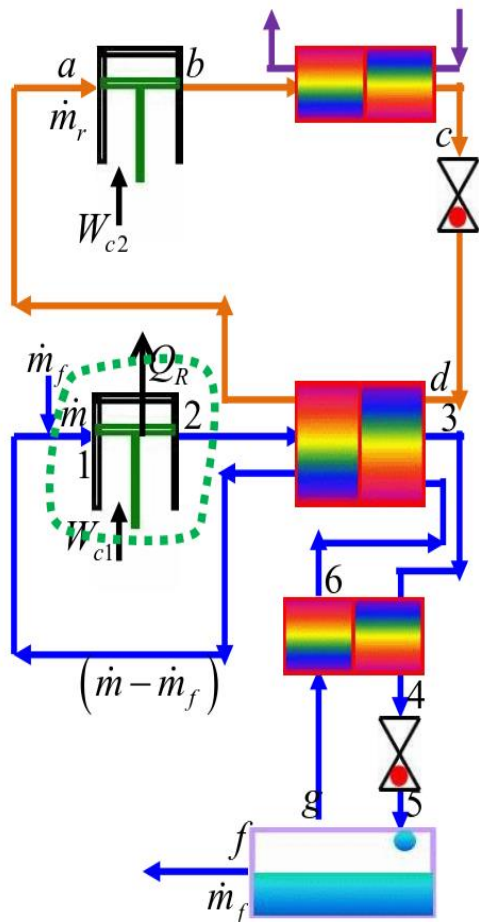
$$\dot{m}h_3 = \dot{m}_f h_f + (\dot{m} - \dot{m}_f) h_6$$

- Réarrangeant les termes, nous aurons :

$$\dot{m}_f (h_6 - h_f) = \dot{m} (h_6 - h_3)$$

$$y_{\max} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{h_6 - h_3}{h_6 - h_f}$$

-
- Les quantités h_3 et h_6 sont évalué au point s'ébullition du réfrigérant (T_d).
- Considérons maintenant un volume de contrôle comprenant le compresseur dans le cycle de liquéfaction comme indiqué sur la figure ci-après.
-
- Les quantités entrant et sortant de ce volume de contrôle sont comme indiqué ci-dessous.
-



| IN | OUT |
|-----------|---------|
| $m @ 1$ | $m @ 2$ |
| $-W_{c1}$ | $-Q_R$ |

- En utilisant le 1^{er} principe pour, nous obtenons :

$$\dot{m}h_1 - W_{c1} = \dot{m}h_2 - Q_R$$

- En réarrangeant les termes,

$$Q_R - W_{c1} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

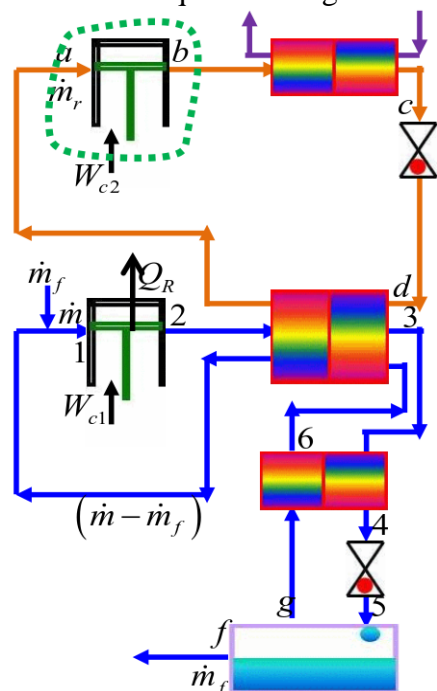
- La chaleur de compression Q_R peut être obtenue en utilisant le 2^{ème} principe de la thermodynamique pour une compression isothermique :

$$Q_R = \dot{m}T_1(s_2 - s_1)$$

- La combinaison des deux équations donne :

$$-W_{c1} = \dot{m}T_1(s_1 - s_2) - \dot{m}(h_1 - h_2)$$

- De même, pour un volume de contrôle enfermant le compresseur frigorifique comme indiqué sur la figure ci-contre.



- Les quantités entrant et sortant de ce volume de contrôle sont :

| IN | OUT |
|-----------|-----------|
| $m_r @ a$ | $m_r @ b$ |
| $-W_{c2}$ | 0 |

La chaleur de compression est zéro parce que le procédé est adiabatique.

- En utilisant le 1^{ère} principe de la, nous obtenons :

$$\dot{m}_r h_{a,r} - W_{c2} = \dot{m}_r h_{b,r}$$

- Réarrangeant les termes, nous aurons :

$$-W_{c2} = \dot{m}_r (h_{b,r} - h_{a,r})$$

- Le travail total nécessaire pour ce cycle est :

$$W_c = W_{c1} + W_{c2}$$

- En substituant les expressions de chacun des travaux nous aurons :

$$-W_c = \dot{m}T_1 (s_1 - s_2) - \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{m}_r (h_{b,r} - h_{a,r})$$

- Le travail requis pour une unité de masse de gaz primaire comprimé est donné par :

$$-\frac{W_c}{\dot{m}} = T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) + \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}} (h_{b,r} - h_{a,r})$$

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

- En désignant le rapport $\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}} = r$ on aura :

$$-\frac{W_c}{\dot{m}} = T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) + \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}} (h_{b,r} - h_{a,r})$$

- Les premier et deuxième termes représentent le travail nécessaire dans un cycle simple de Linde - Hampson.
-
- Le troisième terme est le travail supplémentaire requis pour le cycle pré-refroidi.
-