CHAPITRE 3

CYCLES CRYOGENIQUES COMBINES

1. Cycle de Claude :

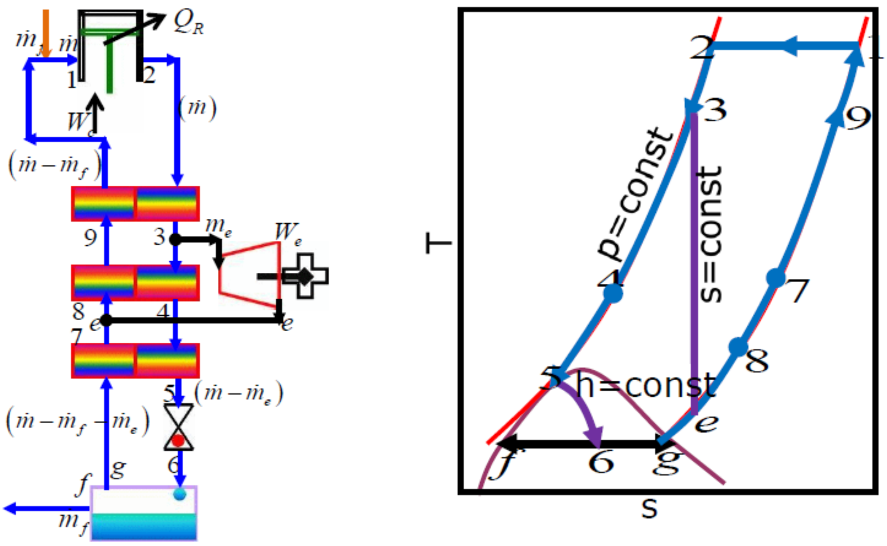


Figure-1

- Le système de Claude est se compose d'un compresseur, trois échangeurs de chaleur à 2 -Fluides, un dispositif de détente J -T et un accessoire raccordement de gaz.
- Le système comporte également une turbine fonctionnant à travers le deuxième échangeur de chaleur, comme indiqué sur la figure-1.
- Dans ce système, la teneur en énergie dans le gaz est enlevée en lui permettant de faire un certain travail dans un dispositif de détente.
- Une partie du courant principal de gaz est passée de **3** →**e** et réuni avec le flux de retour.
- Ce processus de détente est une détente isentropique

Considérons un volume de contrôle, comme indiqué dans la figure-2. Application de la 1ère loi, nous donne :

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

La sortie de turbine est donnée par :

$$W_e = \dot{m}_e h_3 - \dot{m}_e h_e$$

En substituant l'expression, nous avons :

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

Réarrangeant les termes, nous avons :

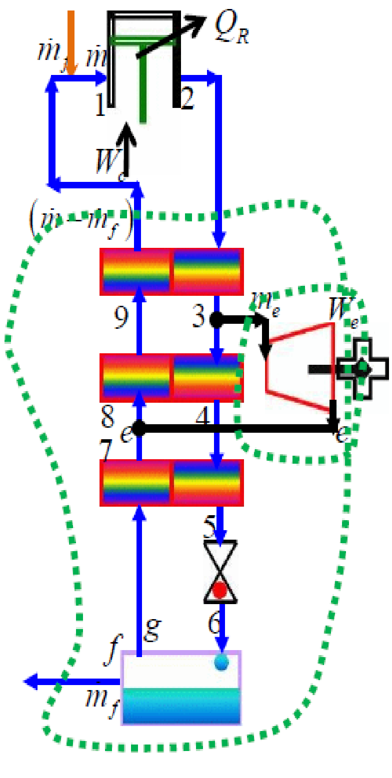


figure-2

$$y = \left(\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f}\right) + x\left(\frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_f}\right)$$

$$x = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}}$$

Où, le rapport de débit massique de détente est désigné par *x*.

- Le 1er terme est la fraction liquide d'un système L -H simple.
- Le deuxième terme correspond à la variation de la fraction liquide se produirait à cause de détente du turbine dans le cycle.
- Pour les données des conditions initiales et finales de p, la fraction liquide y dépend $h_3(T_3)$ et *x*.
- Toutefois, si T_3 est maintenue constante, la fraction liquide y est une fonction linéaire de x.
- Mais pour un cas de $x = 1$, la fraction liquide $y = 0$, qui ne sont pas régis par cette équation.
- Pour $x = 1$, le gaz dans le flux de retour (m-m_f-m_e) est 0.
- Cela signifie que, pour avoir une fraction liquide, (m-m_f-m_e) doit toujours être> 0.
- Divisant (m-m_f-m_e)> 0 par m, nous obtenons $x + y <1$.
- Par conséquent, l'équation ci-dessus est valable uniquement lorsque $x + y <1$.
- La fraction liquide *y* du système augmente avec l'augmentation de la valeur *x* pour une constante de T_3.
- Sur la base de y calculée à partir de l'équation ci-dessus, lorsque la somme $x + y < 1$, est une valeur limite de y peut être calculée à l'aide de $x + y = 0,99$.
- Réorganisation, nous avons $y = 0,99-x$.
- En résumé, *y* est calculée en utilisant l'équation ci-dessus jusqu'à ce que $x + y <1$ ou = 0,99 est valide.
- Après la valeur limite de *y* est donnée par $y = 0,99-x$.
- Cette valeur de *y* est la valeur maximale possible, mais la valeur réelle peut être inférieure à cette valeur.
- Il est clair que l'interaction de travail du système avec l'environnement est due à
  - Compresseur (vers l'intérieur)
  - Turbine (vers l'extérieur)
- L'exigence de travail net, si les travaux d'extension est utilisée dans le processus de compression, est donnée par :

$$-W_{net} = -W_c - W_e$$

Où, -W_c est le travail effectué sur le système (négative).

Comme indiqué précédemment, en utilisant un volume de contrôle, les 1ère et ^{2ème} lois pour un compresseur, nous obtenons :

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

De même, le volume de contrôle pour une turbine, on obtient :

$$W_e = \dot{m}_e(h_3 - h_e)$$

$$\frac{-W_{net}}{\dot{m}} = -\frac{W_c}{\dot{m}} - \frac{W_e}{\dot{m}}$$

En substituant les expressions, nous avons :

$$\frac{-W_{net}}{\dot{m}} = (T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)) - x(h_3 - h_e)$$

Où, x est le rapport du moteur d'extension de vitesse d'écoulement.

- Le premier terme est l'exigence de travail pour le système simple Linde -Hampson.
- Le second terme est la réduction de l'exigence de travail survenant en raison de la modification.

2. Système de Kapitza et Heylandt :

- Le transport des gaz à travers le monde se fait à l'état liquide en les stockant à des températures cryogéniques.
- La liquéfaction de l'air est d'une importance primordiale parce que L_{N2} et L_{OX} sont séparés de L_{Air}.

2.1. Système de Kapitza

- Système de Kapitza et Heylandt sont les deux différentes modifications du système de Claude qui sont généralement utilisées dans la liquéfaction de l'air.
- Un système de Kapitza est un système à basse pression utilisé dans la liquéfaction de l'air.
- Il a été inventé en 1939 par Piotr Kapitza, dans lequel le premier échangeur de chaleur est remplacé par un ensemble de régénérateurs à valve.
- Le troisième échangeur de chaleur dans le système Claude est éliminé.
- Le régénérateur / échangeur de chaleur effectue deux opérations différentes
- Refroidissement / chauffage du gaz
- Purification de gaz
- Pendant un cycle, une unité purifie en congelant les impuretés et refroidit le gaz chaud entrant.

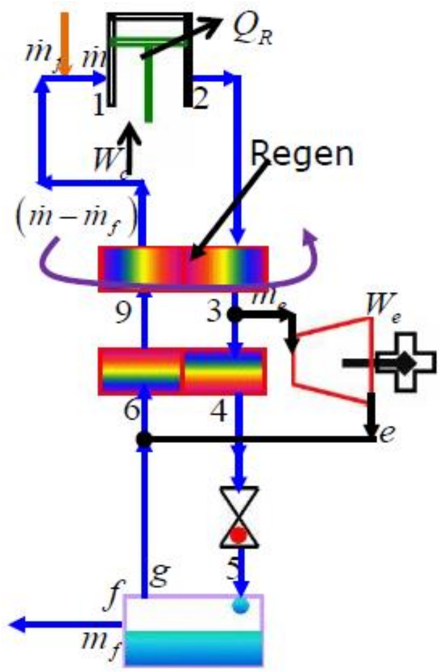


figure-3

- Pendant que l'autre unité réchauffe le gaz sortant et élimine simultanément les impuretés gelées par évaporation.
- Le mécanisme de soupape est utilisé pour passer périodiquement d'une unité à l'autre (non représenté sur la figure).

- Cette alternance périodique d'unités avec l'agencement de contre-soufflage assure une performance continue.
- Ce système a été le premier à utiliser un turbo-détendeur (type rotatif) au lieu d'un détendeur à mouvement alternatif.
- Cette modification a permis l'élimination du troisième échangeur de chaleur dans le système Claude.
- Les exigences de rendement et de travail du système sont données par les équations suivantes.

$$y = \left(\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f}\right) + x\left(\frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_f}\right)$$

$$x = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}}$$

$$\frac{-W_{net}}{\dot{m}} = (T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)) - x(h_3 - h_e)$$

Où, le rapport de débit massique du détendeur est donné par x.

2.2. système de Heylandt

- Le système de Heylandt est un système à haute pression utilisé pour la liquéfaction de l'air.
- La pression de fonctionnement typique est d'environ 200 atm.
- En 1949, Heylandt a observé que lorsqu'un système Claude fonctionnait sur Air avec 200 atm et x = 0,6, la valeur optimale de T_3 avant la turbine est proche de la température ambiante.
- Il a ensuite éliminé le premier échangeur de chaleur.
- Ce système modifié est appelé système Heylandt.
- Dans ce système, l'entrée de la turbine est à température ambiante et par conséquent, la lubrification du côté haute pression et le

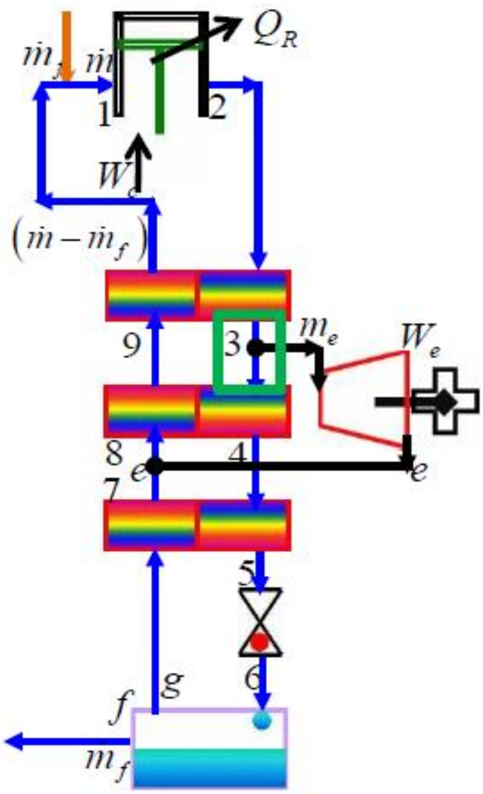


figure-4

fonctionnement du détendeur sont grandement simplifiés.

- Les exigences de rendement et de travail du système sont données par les équations suivantes.

$$y = \left(\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f}\right) + x\left(\frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_f}\right)$$

$$x = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}}$$

$$\frac{-W_{net}}{\dot{m}} = (T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)) - x(h_3 - h_e)$$

Où, le rapport du débit massique du détendeur est donné par x.

3. Système de Collins :

- Il a été inventé en l'an 1946 par Samuel C. Collins au MIT, États-Unis.
- Ce système est considéré comme l'un des plus importants événements de l'ingénierie cryogénique.
- Ce système est une extension du système Claude.
- Le système comprend un compresseur, un dispositif de détente J-T, une connexion de gaz d'appoint, cinq échangeurs de chaleur à 2 fluides et deux turbines de détente.
- Selon la pression d'entrée de l'hélium, deux à six dispositifs de détente sont utilisés.
- Les turbines de détente sont utilisées pour évacuer la chaleur du gaz et ainsi atteindre des températures plus basses.
- La température d'inversion de l'Hélium est d'environ 45 K et pour avoir un rendement, la température T_7 doit être inférieure à 7,5 K.
- Selon les débits massiques, deux à six détente sont utilisés.

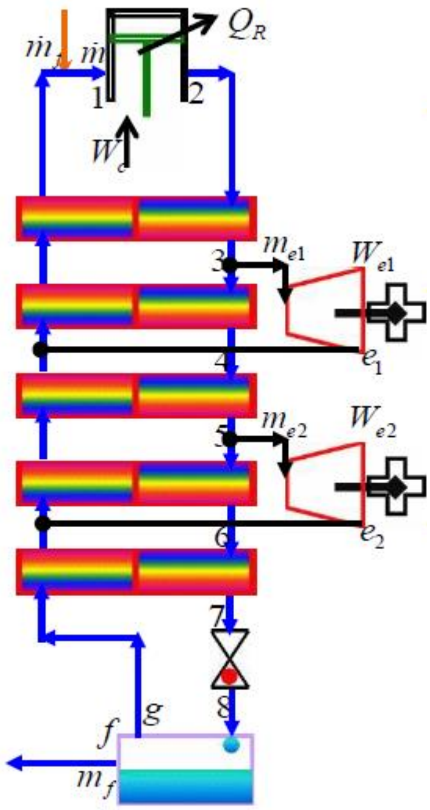
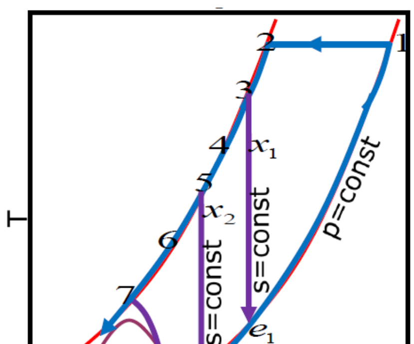


figure-5

Considérons un volume de contrôle, comme indiqué dans la figure-6.
Application de la 1ère loi, nous donne :



$$E_e = E_s$$

$$\dot{m}h_2 = W_{e1} + W_{e2} + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1 + \dot{m}_f h_f$$

Le travail effectué par chaque turbine est :

$$W_{e1} = \dot{m}_{e1}(\Delta h_1) \quad W_{e2} = \dot{m}_{e2}(\Delta h_2)$$

Δh_1et Δh_2 sont les différences d'enthalpie à travers les turbine 1 et 2 respectivement.

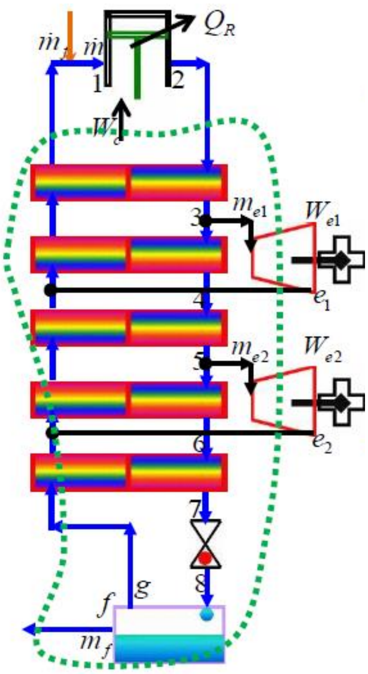


figure-6

Substituer, nous obtenons :

$$\dot{m}h_2 = \dot{m}_{e1}(\Delta h_1) + \dot{m}_{e2}(\Delta h_2) + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1 + \dot{m}_f h_f$$

Réarranger, nous avons :

$$y = \left(\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f}\right) + x_1\left(\frac{\Delta h_1}{h_1 - h_f}\right) + x_2\left(\frac{\Delta h_2}{h_1 - h_f}\right)$$

$$x_1 = \frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}} \text{ , } x_2 = \frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}}$$

$$\Delta h_1 = h_3 - h_{e1} \text{ , } \Delta h_2 = h_5 - h_{e2}$$

- Le 1er terme est le rendement pour un système L -H simple.
- Le 2nd terme correspond à la variation du rendement due à la modification.

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

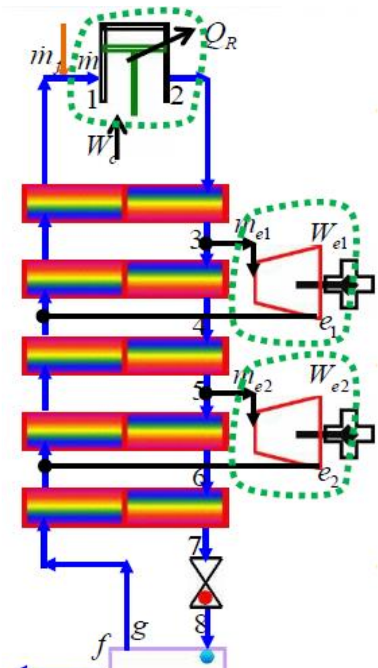
- Pour des conditions initiales et finales données de p, le rendement dépend de h_3 (T_3), h_5 (T_5), x_1 et x_2.
- Comme dans le système Claude, les valeurs de T_3, T_5, x_1 et x_2 doivent être optimisées pour obtenir un rendement maximum.
- en utilisant un volume de contrôle, 1ère et 2ème lois pour un compresseur, nous obtenons :

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

De même, le volume de contrôle pour une turbine, nous obtenons :

$$W_{e1} = \dot{m}_{e1}(\Delta h_1) \quad W_{e2} = \dot{m}_{e2}(\Delta h_2)$$

Le travail net effectué est donné par :



$$\frac{-W_{net}}{\dot{m}} = -\frac{W_c}{\dot{m}} - \frac{W_{e1}}{\dot{m}} - \frac{W_{e2}}{\dot{m}}$$

Substituer, nous obtenons :

$$\frac{-W_{net}}{\dot{m}} = (T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2)) - x_1(\Delta h_1) - x_2(\Delta h_2)$$

figure-7

$$x_1 = \frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}} \ , x_2 = \frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}}$$

Le 1er terme est l'exigence de travail pour un système L -H simple.

Le 2ème terme correspond à la réduction des besoins de travail due à la modification.

4. Système de Claude avec irréversibilités dans le compresseur et la turbine (cycle réel) :

Les processus de compression et de détente dans un cycle réel Claude sont irréversibles.

Ces irréversibilités causent des inefficacités et détériorent les performances du système.

Les résultats sont tracés graphiquement et comparées avec un système réversible résolu dans l'exposé précédent.

Le schéma T-S pour un système réversible Claude est comme indiqué.

L'irréversibilité du compresseur est représenté par le procédé 1 →2.

De même, l'irréversibilité d'extension est désignée par le processus 3→e'.

L'inefficacité du compresseur est due aux les pertes par frottement ($\eta_{mec,c}$) et au processus non -isothermale ($\eta_{iso,c}$).

L'irréversibilité nette est donnée par :

$$\eta_{oval,c} = \eta_{mec,c} \times \eta_{iso,c}$$

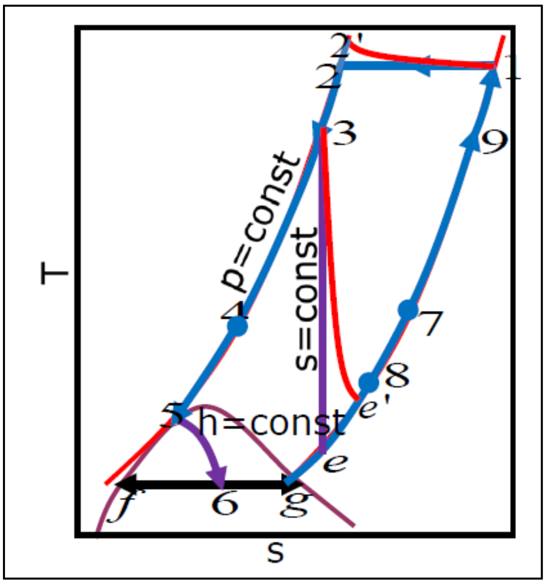


figure-8

De même, l'inefficacité de détente est due aux les pertes par frottement ($\eta_{mec,e}$) et au processus non -isentropique ($\eta_{ad,e}$).

L'irréversibilité nette est donnée par :

$$\eta_{oval,e} = \eta_{mec,e} \times \eta_{ad,e}$$

- Avec ces inefficacités prises en compte, le rendement du système diminue et l'obligation de travail augmente.
- L'exigence de rendement et le travail du système sont donnés par :

$$y = \left(\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f}\right) + x(\eta_{ad,e})\left(\frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_f}\right)$$

$$\frac{-W_{net}}{\dot{m}} = \frac{(T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2))}{\eta_{oval,c}} - x(\eta_{oval,e})(h_3 - h_e)$$