Devoir Maison 7

Pour Jeudi 14 octobre 2021

Refroidissement du supraconducteur

Pour arriver à des températures critiques basses, un supraconducteur doit être refroidi en utilisant des procédés sophistiqués. Pour les supraconducteurs haute-température, type cuprates, les températures critiques sont facilement atteignables en utilisant du diazote liquide. On étudie ici le processus de Linde-Hampson de liquéfaction du diazote.

Le principe de la machine est représenté en figure ci-dessous.

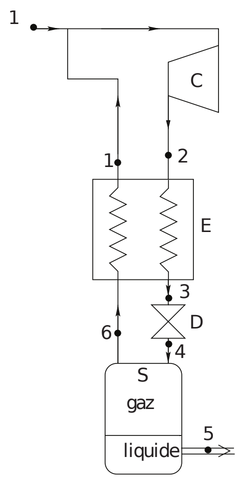


Fig. – Cycle de Linde-Hampson

- Au repère 1, le diazote entre dans le compresseur, noté C, dans l'état 1 à la pression $P_1 = 1$ bar et à la température $T_1 = 290$ K.
- Dans le compresseur, le diazote subit une compression isotherme réversible qui l'amène au repère 2 à la pression $P_2 = 200$ bar.
- Le diazote sortant du compresseur passe dans l'échangeur thermique E (repère 3) où il y est refroidi à pression constante.
- Le détendeur D détend le gaz jusqu'à la pression atmosphérique P_1. Le détendeur est un simple robinet et ne comporte donc pas de parties mobiles. À sa sortie, le diazote est un mélange de gaz et de liquide.
- Le liquide formé est extrait au niveau du séparateur S et la vapeur saturée (repère 6) est renvoyée dans l'échangeur thermique E. Le repère 5 ne fait pas partie du cycle. Le diazote gazeux est ramené à l'état 1 à la sortie de l'échangeur E.

— Le détendeur D, le séparateur S, l'échangeur E et tous les circuits de liaison sont supposés parfaitement calorifugés. Lors du passage dans le séparateur et l'échangeur thermique, les transformations sont considérées comme isobares.

Étude du cycle

Le diagramme enthalpique (P, h) est donné dans le document page suivante.

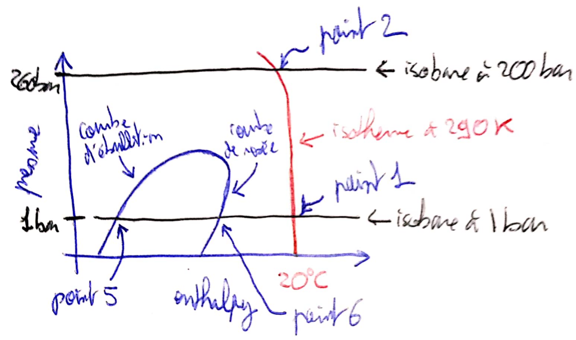
1. En se servant des isothermes et isobares, placer les points 1 et 2 sur le diagramme (P, h) du document page suivante. De même en se servant des isobares et des courbes de changement d'état placer les points 5 et 6.

on place le point 1 à l'intersection de l'isobare $p_1 = 1$ bar et de l'isotherme à $T_1 = 290$ K,

de 1 à 2 compression isotherme donc on place 2 à l'intersection isobare $p_2 = 200$ bar et isotherme $T_2 = T_1 = 290$ K,

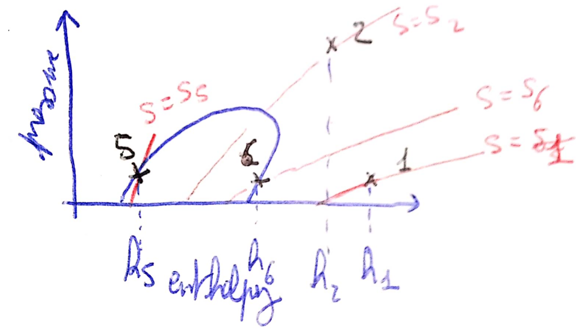
pour 5 on a liquide à la sortie du séparateur donc à l'intersection de la courbe d'ébullition et à la sortie on a la pression extérieure donc isobare $p_5 = p_1 = 1$ bar,

pour 6 séparateur isobare donc $p_6 = p_5 = p_1 = 1$ bar et vapeur saturante donc 6 sur la courbe de rosée.



2. Par lecture graphique, déterminer pour ces points leurs enthalpies et entropies massiques.

Pour lire les enthalpies massiques on regarde l'abscisse des points. Pour lire les entropies massiques on regarde la valeur sur la courbe isentropique passant par le point en question.



$h_1 = 505$ kJ.kg^{-1}, $s_1 = 3,85$ kJ.K^{-1}.kg^{-1}
$h_2 = 470$ kJ.kg^{-1}, $s_2 = 2,15$ kJ.K^{-1}.kg^{-1}
$h_5 = 80$ kJ.kg^{-1}, $s_5 = 0,05$ kJ.K^{-1}.kg^{-1}
$h_6 = 280$ kJ.kg^{-1}, $s_6 = 2,45$ kJ.K^{-1}.kg^{-1}
On s'intéresse à la validité du modèle du gaz parfait.

3. Pour un gaz parfait, on sait que l'enthalpie ne dépend que de la température, comparer alors les isothermes et les isenthalpes dans un diagramme (P, h) de gaz parfait.

   Puis pour le diagramme donné page suivante en déduire à partir du diagramme, dans quel domaine de pression on peut considérer le diazote comme un gaz parfait.

Pour un gaz parfait, l'enthalpie ne dépend que de la température, donc si la température est constante alors l'enthalpie est constante, donc isothermes = isenthalpes.

Dans le domaine des gaz, donc pour des enthalpies massiques élevées à droite de la courbe de rosée, on cherche le domaine où isothermes et isenthalpes se confondent. Donc on cherche dans quel domaine les isothermes sont verticales chez les gaz. On trouve : pour des pressions faibles et loin de la courbe de rosée.

On étudie maintenant la transformation $1 \to 2$ dans le compresseur.

4. Comment se simplifie le deuxième principe pour une transformation isotherme réversible ? En déduire l'expression du transfert thermique massique $q_{1\to 2}$. Faire l'application numérique.

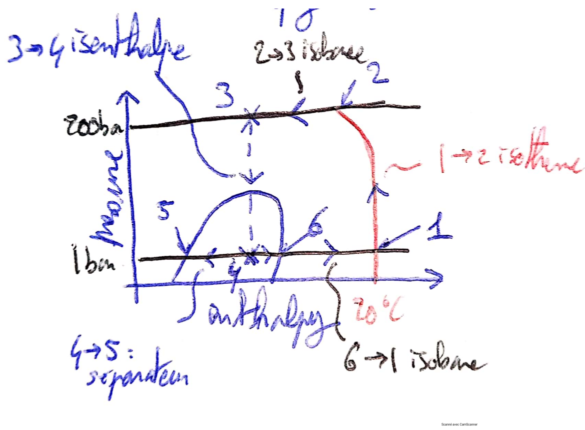
Le second principe industriel s'écrit $\Delta s = \frac{q}{T_{ext}} + s_c$.
La transformation est isotherme donc $T_{ext} = T_1$ et réversible donc $s_c = 0$, donc $\Delta s = \frac{q_{1\to 2}}{T_1}$ donc $q_{1\to 2} = T_1(s_2 - s_1) = -493$ kJ.kg^{-1}

5. En écrivant le premier principe pour cette transformation en déduire le travail massique $w_{1\to 2}$ fourni par le compresseur au système. Faire l'application numérique.

Le premier principe industriel s'écrit $\Delta h = w_{1\to 2} + q_{1\to 2}$
donc $w_{1\to 2} = h_2 - h_1 - q_{1\to 2} = 458$ kJ.kg^{-1}.
On s'intéresse à l'étude du détendeur (transformation $3 \to 4$) et du séparateur (transformation $4 \to 6$). On rappelle que l'étape 5 ne fait pas partie du cycle.

6. Déterminer w_u et q de la transformation $3 \to 4$ et en déduire sa nature.

C'est une détente sans travail utile, donc $w_u = 0$, et adiabatique, donc $q = 0$,
Le premier principe industriel devient $\Delta h = w_u + q = 0$ donc la détente est isenthalpique.



7. On note y la fraction massique en diazote liquide. À partir du point 4, le diazote est séparé en deux : le liquide d'enthalpie massique h_5 est extrait et le gaz d'enthalpie massique h_6 est envoyé dans l'échangeur thermique. Déterminer l'expression de h_4 en fonction de y, de l'enthalpie massique du liquide h_5 et celle du gaz h_6.

Le titre massique de liquide est par définition $y = \frac{h_6 - h_4}{h_6 - h_5}$ donc en inversant la relation $h_4 = yh_5 + (1-y)h_6$.

On regarde maintenant l'échangeur thermique E (transformation $2 \rightarrow 3$ et $6 \rightarrow 1$). On peut montrer en utilisant le premier principe que

$h_3 - h_2 + (1-y)(h_1 - h_6) = 0$

8. En déduire l'expression de y en fonction des enthalpies massiques h_1, h_2 et h_5. Faire l'application numérique.

   y représente la fraction de diazote liquéfié à chaque cycle dans la machine. On est donc capable de déterminer l'efficacité de la machine en fonction de ses températures et pressions de fonctionnement.

La transformation de 3 vers 4 est isenthalpique donc $h_3 = h_4$ et à la question 7 nous avons trouvé $h_4 = yh_5 + (1-y)h_6$, donc $h_3 = yh_5 + (1-y)h_6$. D'autres part $h_3 = h_2 - (1-y)(h_1 - h_6)$ donc

$$\begin{aligned}
yh_5 + (1-y)h_6 &= h_2 - (1-y)(h_1 - h_6) \\
yh_5 &= h_2 - (1-y)h_1 \\
y(h_5 - h_1) &= h_2 - h_1 \\
y &= \frac{h_2 - h_1}{h_5 - h_1} = 0,08
\end{aligned}$$