

Devoir Maison 5

Pour Mercredi 4 novembre 2020

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.

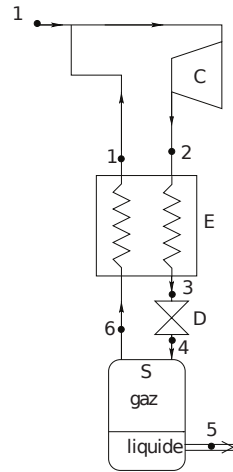


Fig. - Cycle de Linde-Hampson

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

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.

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

4. Comment se simplifie le deuxième principe pour une transformation isotherme réversible ? En déduire l'expression du transfert thermique massique $q_{1 \rightarrow 2}$. Faire l'application numérique.
5. En écrivant le premier principe pour cette transformation en déduire le travail massique $w_{1 \rightarrow 2}$ fourni par le compresseur au système. Faire l'application numérique.

On s'intéresse à l'étude du détendeur (transformation $3 \rightarrow 4$) et du séparateur (transformation $4 \rightarrow 6$). On rappelle que l'étape 5 ne fait pas partie du cycle.

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

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.
9. Exprimer le travail utile en fonction du travail utile massique, de la masse d'azote liquide extraite et de la fraction massique y . Calculer numériquement le travail pour extraire 1 kg d'azote liquide.
10. En utilisant la question 8, les isobares et isotitres, placer le point 4 sur le diagramme (P, h). En déduire l'enthalpie massique h_4 et l'entropie massique s_4 .
11. En utilisant la réaction de 3 à 4, les isenthalpes et les isobares, placer le point 3 sur le diagramme (P, h). En déduire l'enthalpie massique h_3 et l'entropie massique s_3 .
12. Calculer la différence entre les entropies à l'entrée et à la sortie du détendeur. En déduire l'entropie massique créée. Préciser l'origine de l'irréversibilité si elle existe.

13. Sachant que le prix du kWh (kilowatt-heure) en France en 2017 est de 0,15 euros, déterminer l'énergie nécessaire et le coût pour liquéfier un volume de 10 L de diazote.

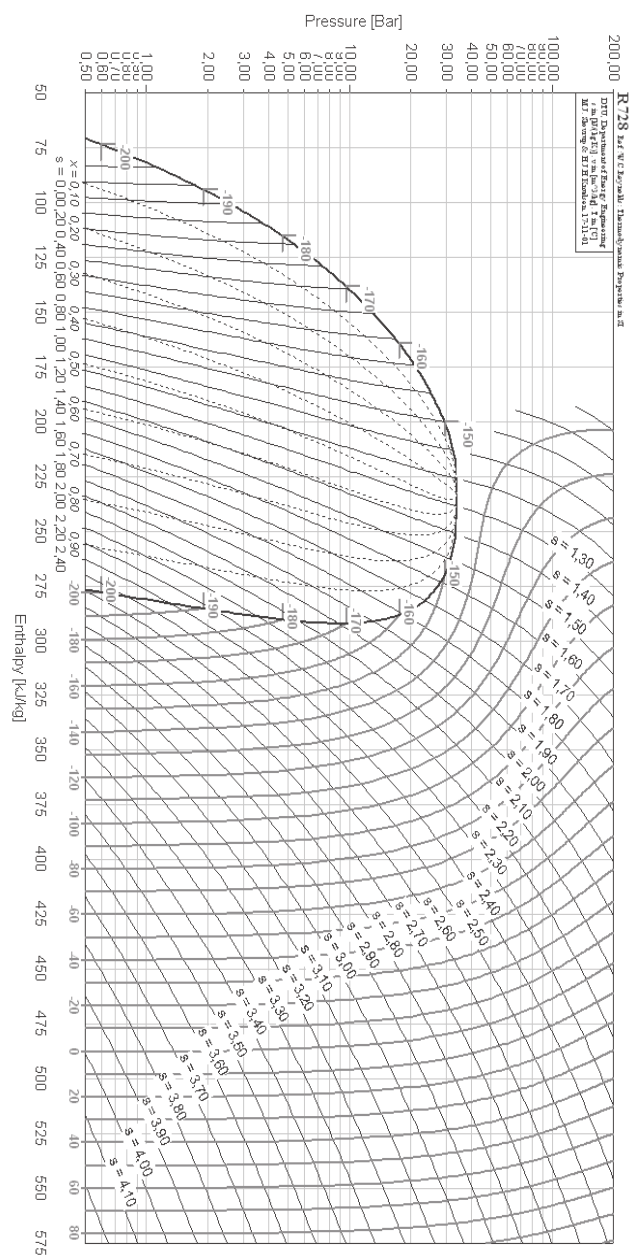


Fig. - Les entropies massiques s sont en kJ/K/kg , les volumes massiques en m^3/kg et les températures en degrés Celsius.