

3.1 Systèmes ouverts-Exercice 16

On étudie deux procédés mis en œuvre lors de la regazéification du méthane dans les terminaux pétroliers, où il est stocké liquide, sous le nom de GNL (gaz naturel liquéfié). Le stockage s'effectue en légère surpression sous 1,1 bar à -160°C . La pression d'émission du GNL regazéifié est en général de 80 bars à la température de 0°C .

Premier procédé : gazéification à basse pression puis compression du gaz (gazéification BP) (figure A)

- a-Le GNL est à l'état 1 sous pression $P_1 = 1,1$ bar et à sa température d'équilibre $T_1 = -160^{\circ}\text{C}$.
Placer le point 1 sur le diagramme (P, h) ci-joint. Donner par lecture l'enthalpie massique h_1 de ce point.
- b-Le GNL est gazéifié sous pression constante jusqu'à l'état de vapeur saturée, noté 2'.
La chaleur est apportée par l'eau de mer dans un regazéifieur à ruissellement d'eau de mer, énergie considérée comme « gratuite » dans les terminaux. Placer le point 2' sur le diagramme. Donner l'enthalpie massique $h_{2'}$. Déterminer la quantité de chaleur massique $q_{12'}$ échangée lors de cette regazéification.
- c-Le gaz méthane subit ensuite une compression isentropique jusqu'à 80 bars. Cet état est noté 3'.
Placer le point 3' sur le diagramme. Donner par lecture l'enthalpie massique $h_{3'}$.
On donne $\gamma = C_p/C_v = 1,34$. Calculer la température $T_{3'}$ atteinte.
- d-Déterminer le travail massique w_{BP} nécessaire à la compression.
- e-Le gaz est enfin réfrigéré de 3' en 3 pour se trouver dans les conditions d'émission, sous 80 bars à 0°C .
Placer le point 3 sur le diagramme. Donner par lecture l'enthalpie massique h_3 de ce point.
Déterminer la quantité de chaleur massique $q_{3'3}$ échangée lors de ce refroidissement isobare.

Second procédé : compression du GNL puis gazéification (gazéification HP) (figure B)

- a-Le GNL dans l'état 1 est mis sous pression de 80 bars dans une transformation 1-2 supposée isentropique.
On admet l'identité thermodynamique suivante : $dh = Tds + vdP$ où h, s et v représentent respectivement l'enthalpie, l'entropie et le volume massiques. On donne la masse volumique du GNL $\rho = 900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ supposée constante. Déterminer l'enthalpie massique h_2 . Placer le point 2 sur le diagramme.
- b-La pompe GNL a un rendement $r = 0,7$. Calculer le travail w_{HP} dépensé lors du pompage.
- c-Le GNL sous pression est enfin gazéifié dans un échangeur fluide-eau de mer à pression constante pour se trouver dans l'état 3, dans les conditions d'émission.
Déterminer la quantité de chaleur massique q_{23} échangée lors de cette gazéification.

Comparaison des deux procédés

- a-Donner pour chaque transformation w et q. Conclure sur l'intérêt du deuxième procédé.
 - b-Le débit de GNL d'un terminal méthanier est de $1000 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Calculer la puissance économisée par un terminal équipé du deuxième procédé sur celui de même production équipé du premier.
-

3.1 Systèmes ouverts-Exercice 16

FIGURE A COMPRESSION EN PHASE GAZEUSE

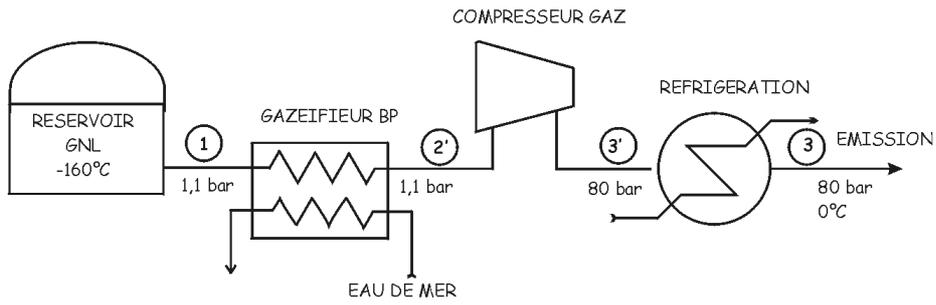


FIGURE B POMPAGE EN PHASE LIQUIDE

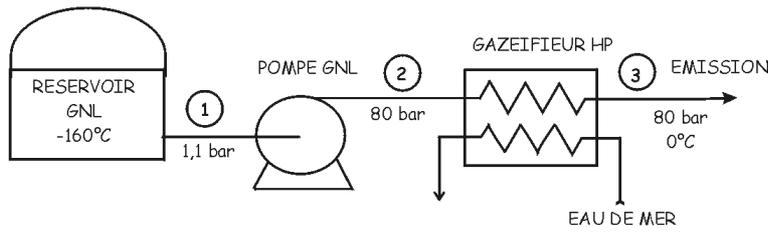
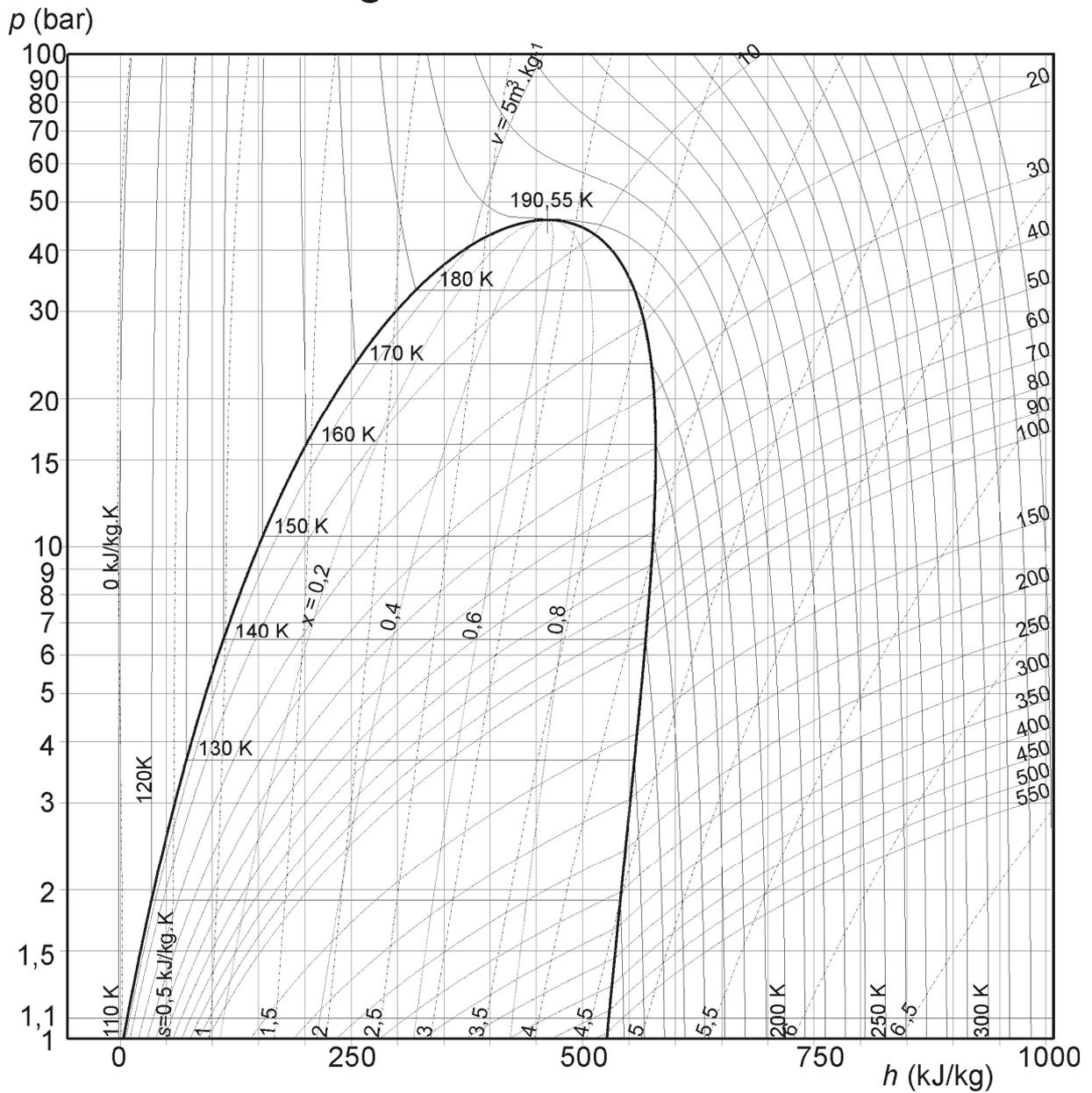


Diagramme du méthane



3.1 Systèmes ouverts-Exercice 16

Premier procédé :

a-On lit : $h_1 \approx \underline{8 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

b-On lit : $h_{2'} = \underline{528 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

Premier principe industriel en l'absence de parties mobiles et sans variation d'énergie mécanique : $\Delta h_{12'} = q_{12'}$

A.N : $q_{12'} = h_{2'} - h_1 = \underline{520 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

c-Partant du point 2, on suit une courbe isentropique jusqu'à la pression 80 bars pour placer le point 3'

On lit : $h_{3'} = \underline{944 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

Loi de Laplace pour un gaz parfait en évolution isentropique : $P_2^{1-\gamma} T_2^\gamma = P_{3'}^{1-\gamma} T_{3'}^\gamma \Rightarrow T_{3'} = T_2 \left(\frac{P_2}{P_{3'}} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$

A.N : $T_{3'} = \underline{335 \text{ K}}$

d- Premier principe industriel pour l'évolution adiabatique : $\Delta h_{2'3'} = w_{u2'3'} = w_{BP}$

A.N : $w_{BP} = h_{3'} - h_{2'} = \underline{416 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

e-On lit $h_3 = \underline{768 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

Premier principe industriel en l'absence de parties mobiles : $\Delta h_{3'3} = q_{3'3}$ A.N : $q_{3'3} = h_3 - h_{3'} = \underline{-176 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

Second procédé

a-isentropique $\Rightarrow ds = 0 \Rightarrow dh = v dP = \frac{1}{\rho} dP \Rightarrow h_2 - h_1 = \frac{1}{\rho} (P_2 - P_1) \Rightarrow h_2 = h_1 + \frac{1}{\rho} (P_2 - P_1)$

A.N : $h_2 = \underline{17 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

b-Premier principe industriel pour l'évolution adiabatique réversible : $\Delta h_{12} = w_{u12}$

Le travail à fournir w_{HP} est plus grand car la pompe n'est pas idéale. Son rendement est défini par : $r = \frac{w_{u12}}{w_{HP}}$

Donc : $w_{HP} = \frac{w_{u12}}{r} = \frac{h_2 - h_1}{r}$ A.N : $w_{HP} = \underline{13 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

c- Premier principe industriel en l'absence de parties mobiles : $\Delta h_{23} = q_{23}$ A.N : $q_{23} = h_3 - h_2 = \underline{751 \text{ kJ.kg}^{-1}}$

Comparaison des deux procédés

a-Procédé BP : $w = w_{BP} = 416 \text{ kJ.kg}^{-1}$; $q = q_{12'} + q_{3'3} = 344 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Procédé HP : $w = w_{HP} = 13 \text{ kJ.kg}^{-1}$; $q = q_{23} = 751 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Le procédé HP nécessite moins de travail

b-Le débit massique q_m est égal à la masse volumique multipliée par le volume par seconde :

$$q_m = 900 \cdot \frac{1000}{3600} = 250 \text{ kg.s}^{-1}$$

La puissance utile est alors : $P = q_m w$

Procédé BP : $P_{BP} = q_m w_{BP} = \underline{10^5 \text{ kW}}$

Procédé HP : $P_{HP} = q_m w_{HP} = \underline{3 \text{ kW}}$

Le deuxième procédé est beaucoup plus économe.

Diagramme du méthane

