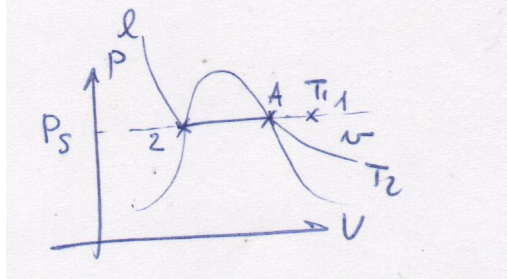


Corrigés : thermodynamique

1. Condenseur d'une machine thermique

Pour guider la réflexion, il est bon de tracer le diagramme de Clapeyron avec la courbe de saturation. L'état initial se trouve dans le domaine de la vapeur et l'état final sur la courbe de rosée.



1. Un condenseur ne comporte pas de pièce mobile. Ici, q est le transfert thermique cédé par le système, donc le premier principe industriel s'écrit $h_2 - h_1 = -q$. On utilise le point intermédiaire A, qui permet de décomposer la transformation en deux étapes : d'abord un refroidissement du gaz de T_1 à $T_A = T_2$, puis le changement d'état à T_2 . On écrit ainsi

$$h_2 - h_1 = h_2 - h_A + h_A - h_1 = -L + c_p(T_2 - T_1) \quad \text{avec} \quad c_p = \frac{\gamma R}{(\gamma - 1)M}.$$

On en déduit

$$q = L + \frac{\gamma R}{(\gamma - 1)M}(T_1 - T_2) = 149,5 \text{ kJ.kg}^{-1}.$$

2. Pour résoudre cette question, il faut utiliser l'expression de l'entropie des gaz parfaits, rappelée en cours mais que le programme n'impose pas de connaître. On utilise la même décomposition que précédemment.

$$s_2 - s_1 = s_2 - s_A + s_A - s_1.$$

Le terme $s_2 - s_A$ correspond à la variation d'entropie dans le changement de phase à la température T_2 , donc $s_2 - s_A = -L/T_2$. Le terme $s_A - s_1$ correspond à la variation de température d'un gaz parfait. Comme $s = c_p \ln T - r \ln P$, on a $s_A - s_1 = c_p \ln T_2/T_1$ et

$$s_2 - s_1 = -L/T_2 + c_p \ln T_2/T_1.$$

Le second principe s'écrit

$$s_2 - s_1 = \frac{-q}{T_2} + s_{\text{cr}}$$

d'où

$$s_{\text{cr}} = -\frac{L}{T_2} + c_p \ln T_2/T_1 + \frac{L}{T_2} + \frac{c_p}{T_2}(T_1 - T_2) = c_p \left(\ln T_2/T_1 + \frac{T_1 - T_2}{T_2} \right) \quad s_{\text{cr}} = 3,16 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}.$$

On remarque que les termes en L disparaissent et c'était prévisible : le changement d'état se fait au contact d'une source de même température que le fluide et est donc réversible. Au contraire, l'échange de chaleur dans l'étape $1 \rightarrow A$ se fait avec un écart de température et est irréversible.

2. Condensation de l'eau dans un échangeur

La machine étudiée met en jeu deux écoulements : l'un de débit D_m pour la vapeur qui se condense, l'autre de débit D'_m pour eau liquide. On peut leur appliquer séparément le premier principe industriel, sachant qu'un condenseur ne comporte pas de pièce mobile et, qu'en conséquence, le fluide n'y échange aucun travail.

Pour l'écoulement de vapeur, le mélange initial est diphasé et son enthalpie massique donnée par $h_1 = xh_v + (1-x)h_\ell$. L'état final est le liquide saturant et $h_2 = h_\ell$. La variation d'enthalpie s'écrit donc

$$h_2 - h_1 = x(h_\ell - h_v) = -x\ell_{\text{vap}}$$

ce qu'on aurait d'ailleurs pu écrire directement. Le premier principe s'écrit

$$P_q = -D_m x \ell_{\text{vap}}.$$

Pour l'écoulement d'eau liquide, dont la température passe de T_1 à $T_2 = T_1 + 10^\circ \text{C}$, le premier principe s'écrit

$$P'_q = D'_m c_p (T_2 - T_1) \quad .$$

On suppose que les fluides n'échangent de chaleur que l'un avec l'autre et dans ces conditions, $P'_q = -P_q$. On en tire

$$D'_m = \frac{x D_m \ell_v}{c_p (T_2 - T_1)} = 297,7 \text{ kg.s}^{-1} \quad .$$

On peut résoudre l'exercice plus rapidement en écrivant le premier principe pour un système à deux entrées et deux sorties sous la forme

$$D_m h_2 + D'_m c_p T_2 - D_m h_1 - D'_m c_p T_1 = 0 \quad ,$$

relation qui équivaut à $P_q = -P'_q$.

3. Détente d'un mélange liquide-vapeur dans une soupape d'étranglement

On a vu en cours les hypothèses d'étude d'un détendeur. Elle ne sont ici pas rappelées, mais nous les supposons néanmoins réalisées. Dans ces conditions, la détente est isenthalpique, c'est à dire que l'enthalpie massique est la même en entrée et en sortie. En entrée, le fluide est diphasé avec un titre en vapeur (c'est à dire une fraction massique) x inconnue. L'enthalpie massique s'exprime par

$$h_1 = x h_v(T_1) + (1 - x) h_\ell(T_1) \quad \text{avec} \quad T_1 = 212^\circ \text{C} \quad .$$

En sortie, on est en présence de vapeur sèche, c'est à dire hors de la courbe de rosée et sans présence de liquide. En effet, la pression est voisine de la pression atmosphérique et la température de 120°C est supérieure à la température d'équilibre liquide-vapeur. L'enthalpie de la vapeur sèche est fournie à 100°C et à 150°C , mais pas à 120°C . On suppose que h_v varie linéairement entre 100 et 150°C et dans ces conditions :

$$h_2 = h_v(120^\circ \text{C}) = 2675,8 + \frac{2766,6 - 2675,8}{50} \times 20 = 2716,12 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad .$$

Le caractère isenthalpique de la détente s'exprime par $h_1 = h_2$, ce qui conduit à

$$x = \frac{h_2 - h_\ell(T_1)}{h_v(T_1) - h_\ell(T_1)} = 0,957 \quad .$$

On peut voir dans cette expression une application du théorème des moments : on connaît en entrée l'enthalpie massique de la vapeur saturante, celle du liquide saturant et celle du mélange (identique à celle en sortie). On en déduit la composition du mélange d'entrée.

4. Détente de réfrigérant R-134a dans une soupape d'étranglement

Sous les hypothèses vues en cours (qui ne sont pas rappelées ici), la détente dans une soupape de détente est isenthalpique. En entrée, le fluide est sous forme de liquide saturant donc $h_1 = h_\ell(T_1) = 123,49 \text{ kJ.kg}^{-1}$. En sortie, l'enthalpie massique présente la même valeur : $h_2 = h_1$. Comme cette valeur est comprise entre $h_\ell(T_2)$ et $h_v(T_2)$, le fluide est alors diphasé et on a

$$h_2 = x h_v(T_2) + (1 - x) h_\ell(T_2) \quad .$$

Comme $h_2 = h_1$, on en déduit

$$x = \frac{h_1 - h_\ell(T_2)}{h_v(T_2) - h_\ell(T_2)} = 0,422 \quad .$$

La détente est adiabatique : $q = 0$ et il n'y a pas d'entropie échangée. Le second principe donne

$$s_{\text{cr}} = s_2 - s_1 = x s_v(T_2) + (1 - x) s_\ell(T_2) - s_\ell(T_1) = 38 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad .$$

5. Pertes thermiques dans une turbine

En entrée, $h_1 = h_v(1,6 \text{ MPa}, 350^\circ \text{C})$ et en sortie, $h_2 = h_v(P_{\text{sat}}(30^\circ \text{C}), 30^\circ \text{C})$. Le premier principe industriel s'écrit

$$P_q + P_u = D_m (h_2 - h_1) \quad \text{et fournit} \quad P_q = D_m (h_2 - h_1) - P_u \quad .$$

Dans une turbine le fluide fournit un travail à des pièces mobiles et dire que la puissance de la turbine est de 9000 kW signifie : $P_u = -9000 \text{ kW}$. On obtient $P_q = -446,4 \text{ kW}$.