

Sujet d'entraînement

Bilan — Électrochimie — Solution

Partie 1 — Étude d'un système frigorifique avec un cycle de Brayton inversé — banque PT 2022

1. Pour un écoulement stationnaire unidimensionnel d'un système à une entrée et une sortie, le premier principe s'écrit

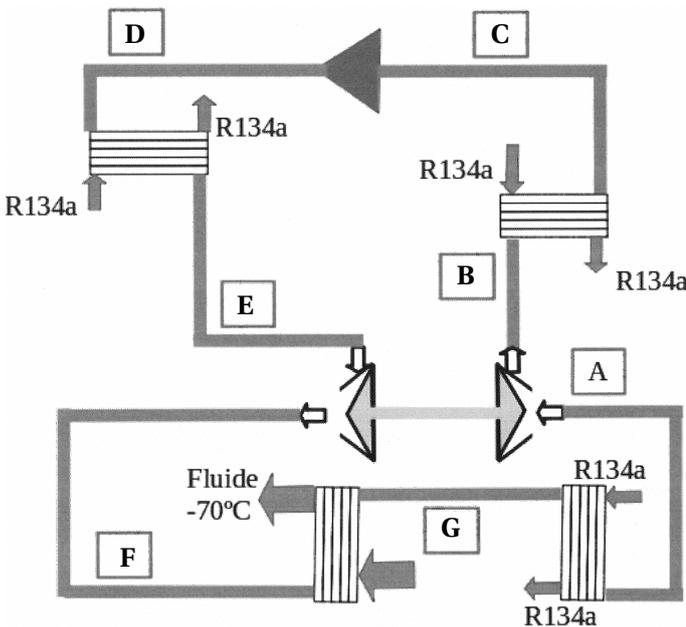
$$\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p = w_u + q,$$

où $\Delta h = h_s - h_e$ est la différence entre l'enthalpie massique du fluide à la sortie et à l'entrée, Δe_c la différence entre l'énergie cinétique massique à la sortie et à l'entrée, $\Delta e_p = e_{p,s} - e_{p,e}$ la différence entre l'énergie potentielle massique à la sortie et à l'entrée, w_u le travail massique autre que des forces de pression et q le transfert thermique massique reçu par le fluide.

Dans ce problème, on néglige les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle, d'où la forme simplifiée

$$\Delta h = w_u + q.$$

2. Schéma complété :



3. On reporte les points du cycle sur le diagramme de l'air.

On place le point E sur l'isotherme -10°C , sur l'isobare 10 bar.

L'évolution $E \rightarrow F$ étant isentropique, on interpole une isentropique à partir du point E jusqu'à l'isobare 1,0 bar, ce qui nous mène au point F

On lit $h_E = 490 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $h_F = 360 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Le travail massique reçu lors de la détente est donné par

$$w_{u,E \rightarrow F} = h_F - h_E, \text{ soit } w_{u,E \rightarrow F} = -130 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

La transmission de la puissance étant supposée intégrale entre la turbine et le compresseur, le travail massique reçu par l'air lors de la compression $A \rightarrow B$ est

$$w_{u,A \rightarrow B} = -w_{u,E \rightarrow F}, \text{ soit } w_{u,A \rightarrow B} = 130 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

4. On place le point A sur l'isobare 1,0 bar et l'isotherme -20°C . On lit $h_A = 480 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

L'évolution $A \rightarrow B$ est une isentropique. On a déterminé à la question précédente $w_{u,A \rightarrow B} = h_B - h_A = 130 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. On a donc $h_B = 610 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, ce qui permet de placer le point B sur l'isentropique qui part du point A. On lit alors $P_B = 4,5 \text{ bar}$ et $T_B = 105^\circ\text{C}$.

L'évolution $B \rightarrow C$ est une isobare 4,5 bar à amenant sur l'isotherme -10°C , ce qui permet de positionner le point C. On lit $h_C = 490 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

L'évolution $C \rightarrow D$ est une isentropique qui mène à 10 bar, ce qui permet de positionner le point D. On lit $T_D = 60^\circ\text{C}$ et $h_D = 560 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Les points E et F ont été déterminés précédemment. On lit $T_F = -140^\circ\text{C}$.

Le point G est sur l'isobare 1,0 bar, et sur l'isotherme -75°C . On lit $h_G = 430 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

États	Pression	Température	h ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
A	1,0 bar	-20°C	480
B	4,5 bar	105°C	610
C	4,5 bar	-10°C	490
D	10 bar	60°C	560
E	10 bar	-10°C	490
F	1,0 bar	-140°C	360
G	1,0 bar	-75°C	430

5. Le transfert thermique reçu par l'air en contact avec le fluide à maintenir à -70°C est donné par $q_{F \rightarrow G} = h_G - h_F$ soit $q_{F \rightarrow G} = 70 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

6. Notons T_F et T_C les températures des sources froide et chaude.

Le premier principe s'écrit

$$W + Q_C + Q_F = 0.$$

Le second principe s'écrit sous la forme de l'égalité de Clausius

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0.$$

L'efficacité est donnée par

$$e_c = \frac{\text{utile}}{\text{coûteux}} = \frac{Q_F}{W} = \frac{Q_F}{-Q_F - Q_C} = \frac{1}{-1 - \frac{Q_C}{Q_F}} = \frac{1}{-1 + \frac{T_C}{T_F}},$$

soit

$$e_C = \frac{T_F}{T_C - T_F} .$$

On calcule ¹ $e_C = 4,5$.

7. L'énergie dépensée est le travail $w_{u,C \rightarrow D} = h_D - h_C$.

L'énergie utile est $q_{F \rightarrow G} = h_G - h_F$.

L'efficacité du cycle est donc

$$e = \frac{h_G - h_F}{h_D - h_C} .$$

On calcule $e = \frac{430 - 360}{560 - 490}$, soit $e = 1,0$.

L'efficacité est sensiblement plus faible que pour le cycle de Carnot :

- l'échangeur $G \rightarrow A$ n'est pas comptabilisé comme un échange « utile » ;
- les transferts thermiques ne sont pas monothermes réversibles.

8. Il faut **refroidir le fluide frigorigène R134a** par un dispositif approprié dans l'installation : c'est une dépense supplémentaire.

9. Le transfert thermique massique reçu par l'air dans les trois échangeurs est donné par

$$q_{\text{air}} = (h_A - h_G) + (h_C - h_B) + (h_E - h_D) .$$

Le fluide R134a reçoit le transfert thermique massique $q_{R134a} = -q_{\text{air}}$, soit

$$q_{R134a} = (h_G - h_A) + (h_B - h_C) + (h_D - h_E)$$

soit $q_{R134a} = 140 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

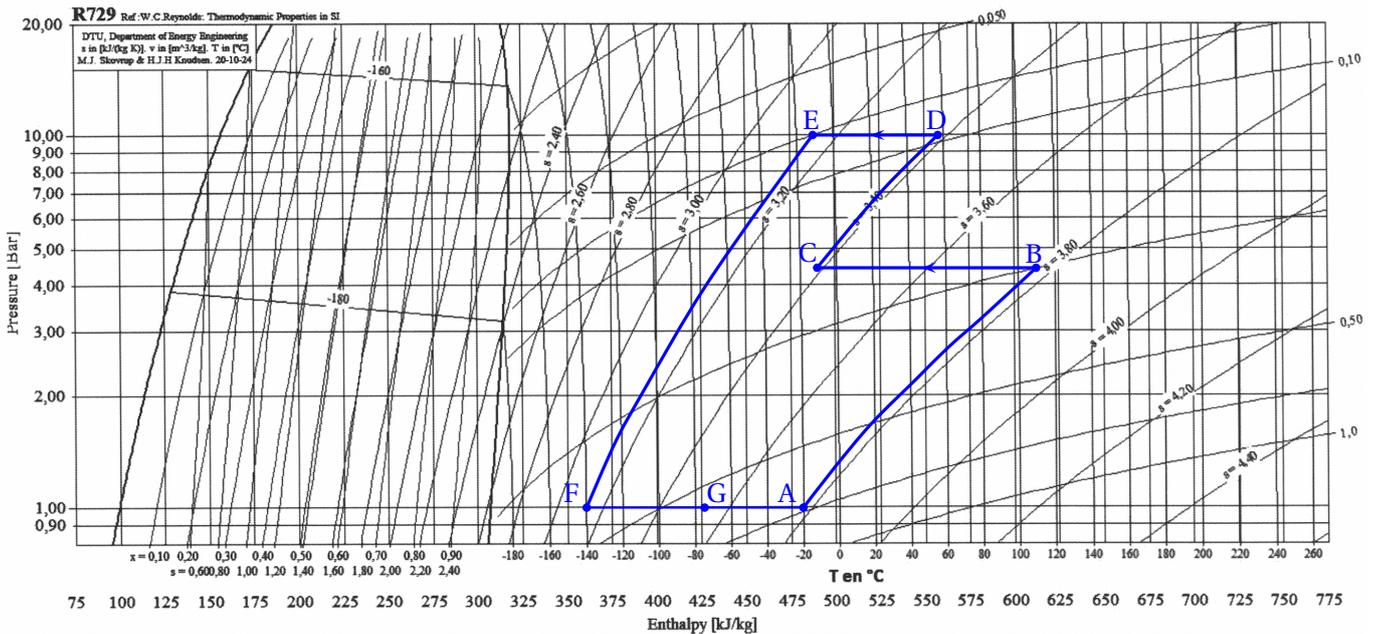
10. L'énergie massique nécessaire au refroidissement du fluide R134 est donnée par

$$w_{\text{refroid}} = \frac{q_{R134a}}{2} .$$

L'efficacité du système vaut donc

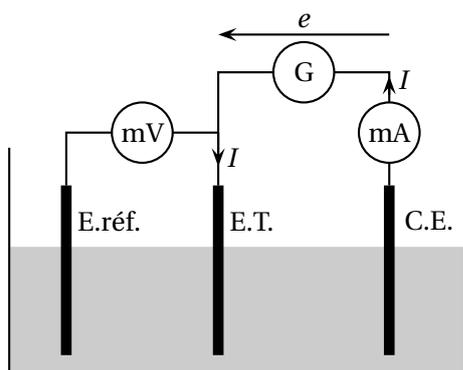
$$e = \frac{h_G - h_F}{h_D - h_C + 2q_{R134a}} .$$

On calcule $e = \frac{430 - 360}{560 - 490 + 0,5 \times 140}$ soit $e = 0,50$.



1. Convertir T_F en kelvin au numérateur.

1. Montage :



2. Le millivoltmètre doit avoir une impédance la plus grande possible (idéalement infinie) pour que l'électrode de référence ne soit parcourue par aucun courant, afin que son potentiel reste constant.

3. En mode cathodique, il se produit une réduction sur l'électrode de travail :



4. Le sens d'orientation conventionnel du courant I est indiqué sur le schéma du dispositif expérimental.

Dans le cas de la réduction, les électrons vont de l'électrode vers la solution ; le courant réel est alors orienté de la solution vers l'électrode. On a alors $I < 0$.

5. On note sur la courbe une intensité notable dès que le potentiel de l'électrode est inférieur à $E^\circ(\text{Au}(\text{CN})_2^-/\text{Au})$.

Le couple $\text{Au}(\text{CN})_2^-/\text{Au}(\text{s})$ sur électrode de platine est donc rapide.

On a intérêt à baisser suffisamment le potentiel de cathode : l'intensité du courant augmente, et la réduction des ions est plus rapide.

Cependant, les réactifs étant des solutés, il existe un palier de diffusion (courant cathodique limite). Si on impose une valeur trop faible (c'est-à-dire une valeur négative trop grande en valeur absolue...) du potentiel, on

peut atteindre la courbe de réduction de l'eau correspondant à la réaction $2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2$, conduisant à la formation de H_2 (explosif).

6. Pour $E = -1,4 \text{ V}$, on lit $J = -7,5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, soit $J = -75 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$.

La charge échangée est

$$Q = I \Delta t.$$

Le nombre $n(e)$ d'électrons échangés est donné par

$$Q = n(e)F.$$

D'après la stœchiométrie de la réaction cathodique, le nombre d'atome d'or formés est²

$$n(\text{Au}) = n(e) = \frac{Q}{F} = \frac{I \Delta t}{F}.$$

L'intensité étant donnée par $I = |J|S$, la masse d'or formée est donc

$$m(\text{Au}) = \frac{|J| S M(\text{Au}) \Delta t}{F}.$$

7. L'énergie électrique dépensée pendant une durée Δt est

$$W = UI \Delta t = U |J| S \Delta t$$

où U est la tension appliquée entre les électrodes.

La masse d'or récupéré est

$$m(\text{Au}) = \frac{M(\text{Au})}{F} |J| S \Delta t.$$

On peut donc écrire

$$W = \frac{m(\text{Au})F}{M(\text{Au})} U.$$

Pour une masse d'or récupéré donnée, l'énergie dépensée ne dépend pas de la surface de l'électrode de travail.

2. Le rendement faradique étant de 100 %, tous les électrons échangés participent à la réduction des ions aurocyanure.