

Thermodynamique industrielle

Utiliser le CO₂ comme fluide frigorigène

inspiré oral banque PT

Historiquement, les fluides massivement utilisés étaient des chlorofluorocarbures CFC, au très fort potentiel d'effet de serre et à fort impact sur la couche d'ozone. Ils ont été remplacés à partir des années 1980 par les hydrofluorocarbures HFC, sans impact sur la couche d'ozone mais dont le potentiel de réchauffement global à 100 ans (qui quantifie leur impact de long terme sur le réchauffement climatique) est plusieurs centaines voire milliers de fois supérieur à celui du CO₂, d'où la nécessité de leur trouver des alternatives. À ce titre, le CO₂ lui-même est un fluide frigorigène qui est de plus en plus utilisé car il est considéré comme un fluide écologique : son impact sur la couche d'ozone est nul et son impact sur l'effet de serre est faible. Ses caractéristiques thermodynamiques sont excellentes et permettent d'envisager un bel avenir pour ce fluide, malgré les pressions de service beaucoup plus élevées que celles des HFC qui peuvent poser des problèmes de sécurité. Le diagramme des frigoristes du CO₂ est représenté figure 1.

On s'intéresse à un cycle réfrigérant, parcouru par du CO₂, selon les étapes suivantes :

- ▷ une compression adiabatique réversible d'un état 1 ($P_1 = 35$ bar, vapeur saturante sèche) jusqu'à $P_2 = 90$ bar ;
- ▷ un refroidissement isobare jusqu'à $T_3 = 40$ °C ;
- ▷ une détente adiabatique jusqu'à la pression $P_4 = P_1$;
- ▷ une transformation isobare jusqu'à retrouver l'état de départ.

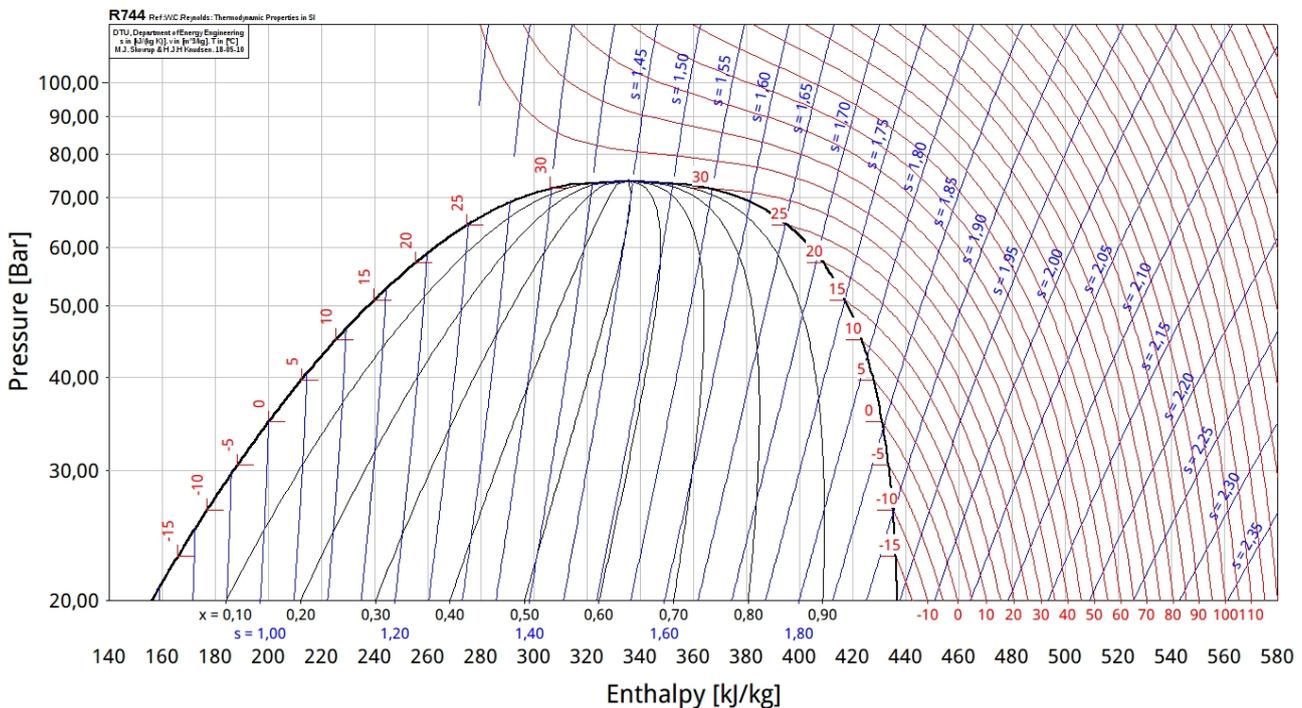


Figure 1 – Diagramme des frigoristes du CO₂.

- 1 - Justifier l'allure des courbes isothermes en utilisant les cas limites.
- 2 - Dessiner le cycle sur le diagramme.
- 3 - On utilise cette machine en fonctionnement frigorifique. Dans quel sens le cycle est-il parcouru ?
- 4 - Calculer la chaleur échangée avec la source froide.
- 5 - Calculer l'efficacité du cycle. Comment l'améliorer ?

Éléments de correction

1 • **Domaine liquide** : l'enthalpie massique d'une phase condensée indilatable incompressible ne dépend que de la température. Les isothermes sont donc confondues avec les isenthalpes, c'est-à-dire que ce sont **des droites verticales** dans le diagramme des frigoristes (qui ne sont usuellement représentées que par les encoches sur la courbe de saturation).

• **Domaine diphasé** : lorsque les deux phases coexistent, température et pression sont liées de façon univoque. Les isothermes sont donc confondues avec les isobares, il s'agit donc de **droites horizontales** (qui ne sont également représentées que par les encoches sur la courbe de saturation).

• **Domaine gazeux** : l'enthalpie massique d'un gaz parfait ne dépend que de la température. Suffisamment loin de la courbe de saturation, les isothermes deviennent donc à nouveau des **droites verticales**. C'est moins simple dans le domaine intermédiaire où le gaz n'est pas parfait.

2 Le cycle est représenté figure 2.

• **État (1)** : on part de vapeur saturante sèche, ce qui signifie que l'état (1) est sur la courbe de saturation, à droite du domaine diphasé.

• **Étape (1)→(2)** : la compression est isentropique, donc suit une isentrope (courbe bleue). L'état (2) est atteint au croisement de l'isobare (horizontale) $P = P_2 = 90$ bar.

• **Étape (2)→(3)** : les isobares sont horizontales. Le point (3) est atteint au croisement avec l'isotherme $T = T_3 = 40$ °C.

• **Étape (3)→(4)** : aucun travail n'est échangé dans un détendeur. Comme la détente est de plus adiabatique, alors d'après le premier principe elle est isenthalpique, et se représente donc par une verticale. L'état (4) est atteint au croisement avec l'isobare $P = P_1 = 35$ bar.

• **Étape (4)→(1)** : c'est une isobare, donc une horizontale jusqu'à retrouver l'état (1).

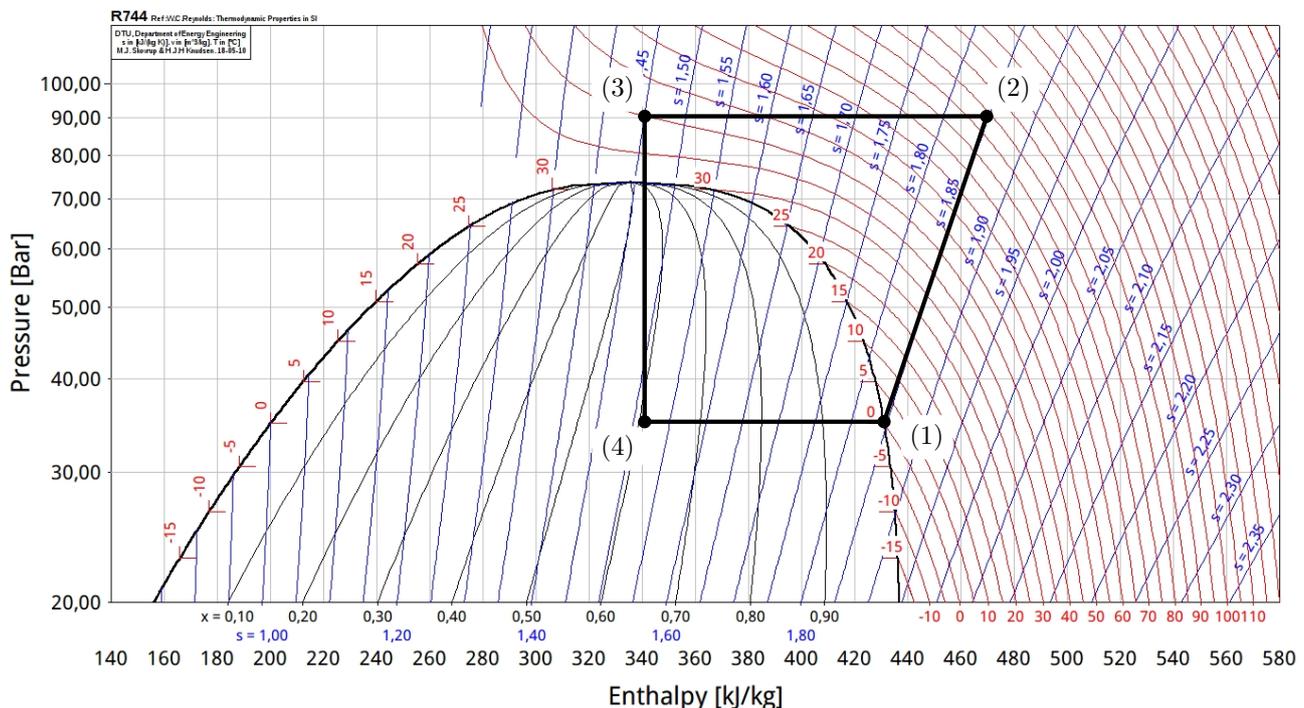


Figure 2 – Diagramme des frigoristes du CO₂.

3 Quel que soit le diagramme, un cycle frigorifique est toujours parcouru **en sens trigonométrique**, ce qui correspond bien à l'ordre dans lequel les étapes sont décrites.

4 L'échange avec la source froide a lieu lors de l'étape (4)→(1). Si elle se fait dans un évaporateur sans échange de travail mais seulement un transfert thermique massique q_f , alors d'après le premier principe

$$h_1 - h_4 = 0 + q_f \quad \text{soit} \quad \boxed{q_f = 90 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}.$$

5 Dans un cycle frigorifique, c'est le travail de compression w_{compr} au cours de l'étape (1)→(2) qui est coûteux. On peut supposer ici la source chaude gratuite puisque l'étape de refroidissement (2)→(3) se fait intégralement à des températures supérieures à la température ambiante. La compression étant adiabatique, d'après le premier principe,

$$h_2 - h_1 = w_{\text{compr}} + 0 \quad \text{soit} \quad w_{\text{compr}} = 40 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

L'efficacité vaut donc

$$e = \frac{q_f}{w_{\text{compr}}} = 2,2.$$

Cette valeur d'efficacité est typique des machines frigorifiques. Dans le cas présent, elle pourrait probablement être améliorée en laissant l'étape (2)→(3) se poursuivre jusqu'à une température plus faible, typiquement la température ambiante.