

# UTILISER LE CO<sub>2</sub> COMME FLUIDE FRIGORIGÈNE

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 CO<sub>2</sub>, d'où la nécessité de leur trouver des alternatives.

À ce titre, le CO<sub>2</sub> 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 frigorigères du CO<sub>2</sub> est représenté au dos de la feuille.

On s'intéresse à un cycle réfrigérant, parcouru par du CO<sub>2</sub>, 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.

1) Sur le diagramme ( $P, h$ ), mentionner les noms des courbes de saturation, puis indiquer la phase stable associée à chaque domaine. Faire apparaître le point critique que l'on définira et donner sa température et sa pression.

## Correction

Cf. diagramme ci-après. Le point critique (point  $C$ ) est le point au-delà duquel il n'est plus possible de différencier une phase liquide d'une phase gazeuse : le fluide est dans l'état supercritique.

$$P_C = 73 \text{ bar} \quad \text{et} \quad T_C = 31 \text{ °C}$$

2) Déterminer, à l'aide d'une lecture graphique, l'enthalpie massique de vaporisation du CO<sub>2</sub> à 0 °C.

## Correction

Par définition :

$$\Delta_{vap}h(T = 0 \text{ °C}) = h_1 - h_A = 433 - 200 = 233 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

3) Déterminer, à l'aide d'une lecture graphique, la capacité massique  $c$  du CO<sub>2</sub> liquide autour de 0 °C.

## Correction

Par définition :

$$c = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_P$$

Pour un liquide, on peut approximer l'expression à :

$$c \simeq \frac{\Delta h}{\Delta T}$$

Il suffit que les deux points choisis ne soit pas trop éloignés de la température souhaitée pour que cette approximation soit bonne. Prenons les points  $B$  et  $D$ .

$$c \simeq \frac{h_B - h_D}{T_B - T_D} = \frac{213 - 188}{10} = 2,5 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

4) Dessiner le cycle sur le diagramme.

## Correction

Le cycle est représenté ci-après.

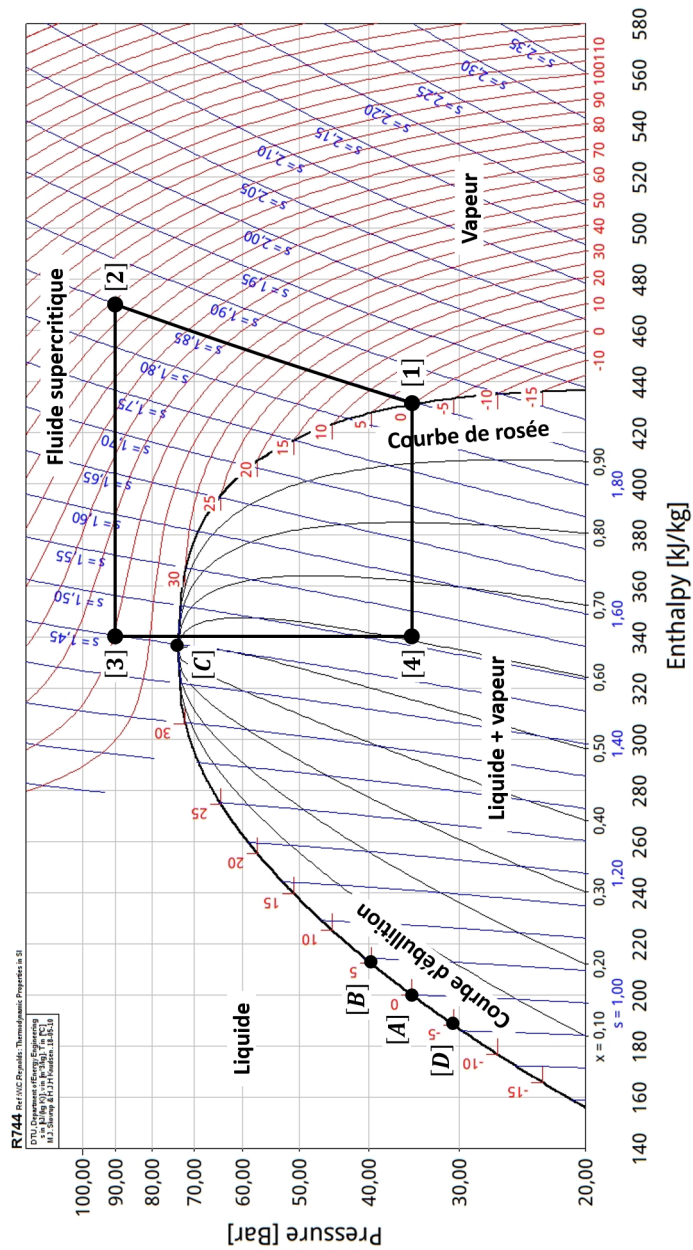
État (1) : on part de vapeur saturante sèche, ce qui signifie que l'état (1) est sur la courbe de saturation, à droite du domaine diphasé.

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).



5) On utilise cette machine en fonctionnement frigorifique. Dans quel sens le cycle est-il parcouru ?

**Correction**

Un cycle frigorifique est toujours parcouru en sens trigonométrique, ce qui correspond bien à l'ordre dans lequel les étapes sont décrites.

6) Calculer la chaleur échangée avec la source froide.

**Correction**

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 (pas de pièces mobiles) mais seulement un transfert thermique massique  $q_f$ , alors d'après le premier principe pour un écoulement stationnaire :

$$h_1 - h_4 = 0 + q_f \Rightarrow q_f = 433 - 340 = 93 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

7) Calculer l'efficacité du cycle. Comment l'améliorer ?

**Correction**

Dans un cycle frigorifique, c'est le travail de compression  $w_u$  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 :

$$h_2 - h_1 = w_u + 0 \Rightarrow w_u = 470 - 433 = 37 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

L'efficacité vaut donc :

$$e = \frac{q_f}{w_u} = 2,5$$

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.

