

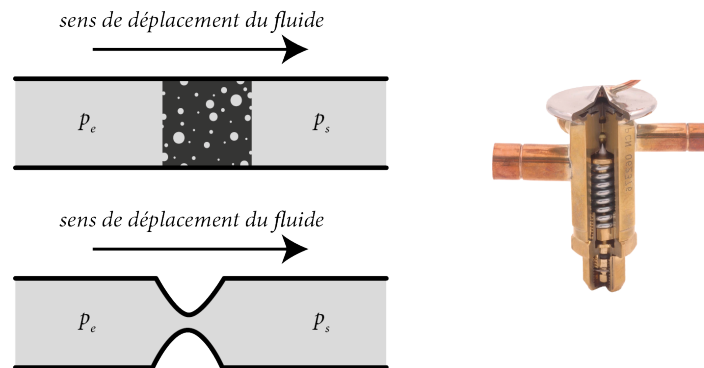
Introduction

Nécessité d'une nouvelle expression du 1er principe de la thermodynamique en système ouvert :

1. 1er principe en système ouvert

1.1 Détente de Joule Thomson

On considère un tuyau de section S dont une partie est bouchée par un milieu poreux (mousse ou grillage) ou présente un resserrement de la canalisation. Un fluide (un gaz ou un liquide), s'écoulant dans ce tuyau, passe au travers de la paroi poreuse. La pression en amont est notée p_e et celle en aval est notée p_s .



Problématique :

Le système "tuyau" n'est pas un système fermé mais bien d'un système ouvert. Il n'est donc pas possible d'utiliser directement le premier principe vu précédemment.

Bilan de masse :

Définition 1 : Débit massique

Un débit volumique correspond à la masse de fluide δm passant à travers une surface S pendant dt par unité de temps.

$$D_m = \frac{\delta m}{dt}$$

Ainsi, dans ce cas :

La masse entrante pendant dt est égale à $\delta m_e = D_{m,e} dt$.

La masse sortante pendant dt est égale à $\delta m_s = D_{m,s} dt$.

La variation de masse infinitésimale dans le système ouvert entre l'instant t et l'instant $t + dt$ est $dm = m(t + dt) - m(t)$.

Écoulement stationnaire

Lorsqu'un écoulement est dit **stationnaire** (rien évolue au cours du temps), les grandeurs extensives d'un système ouvert ne varient pas en fonction du temps.

Conséquence 1

Bilan énergétique :

Conséquence 2

1.2 1er principe en système ouvert

1er principe industriel (ou 1er principe en système ouvert)

Un fluide en écoulement stationnaire dans un système ouvert, soumis à un transfert thermique et à un travail utile. Le bilan d'énergie, entre l'entrée et la sortie du système ouvert est donnée par :

$$(h_s - h_e) + (e_{cs} - e_{ce}) + (e_{ps} - e_{pe}) = q + w_u$$

où w_u est le travail utile par unité de masse, q est le transfert thermique par unité de masse δm .

1er principe industriel en terme de puissance

Un fluide en écoulement stationnaire dans un système ouvert, avec un débit massique D_m , soumis à une puissance thermique et à une puissance utile. Le bilan de puissance, entre l'entrée et la sortie du système ouvert est donnée par :

$$D_m ((h_s - h_e) + (e_{cs} - e_{ce}) + (e_{ps} - e_{pe})) = \Phi_{th} + P_u$$

où Φ_{th} est le flux thermique ou puissance thermique (en W), P_u la puissance utile (en W).

1er principe industriel en négligeant les variations d'énergies cinétique et potentielle

Un fluide en écoulement stationnaire dans un système ouvert, soumis à un transfert thermique et à un travail utile pour lequel on néglige les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle.

$$(h_s - h_e) = q + w_u$$

où w_u est le travail utile par unité de masse, q est le transfert thermique par unité de masse.

$$D_m (h_s - h_e) = \Phi_{th} + P_u$$

où Φ_{th} est le flux thermique ou puissance thermique (en W), P_u la puissance utile (en W).

Remarques :

- On peut appliquer les différentes relations vues dans le cas des systèmes fermés :
 - Cas d'une phase indilatable et incompressible : $h_s - h_e = c(T_s - T_e)$
 - Cas d'un gaz parfait : $h_s - h_e = c_{p,m}(T_s - T_e)$
 - Avec un changement d'état : $h_s - h_e = c_{p,m}(T_s - T_e) + x_{chg} l_{chg}$ avec la fraction x_{chg} qui change d'état.
- On peut appliquer également un second principe en système ouvert qui s'écrira $(s_s - s_e) = s_c + s_e$ avec $s_c \geq 0$ et $s_e = \frac{q}{T_{env}}$.

Retour sur la détente de Joule-Thomson dans le cas d'un gaz :

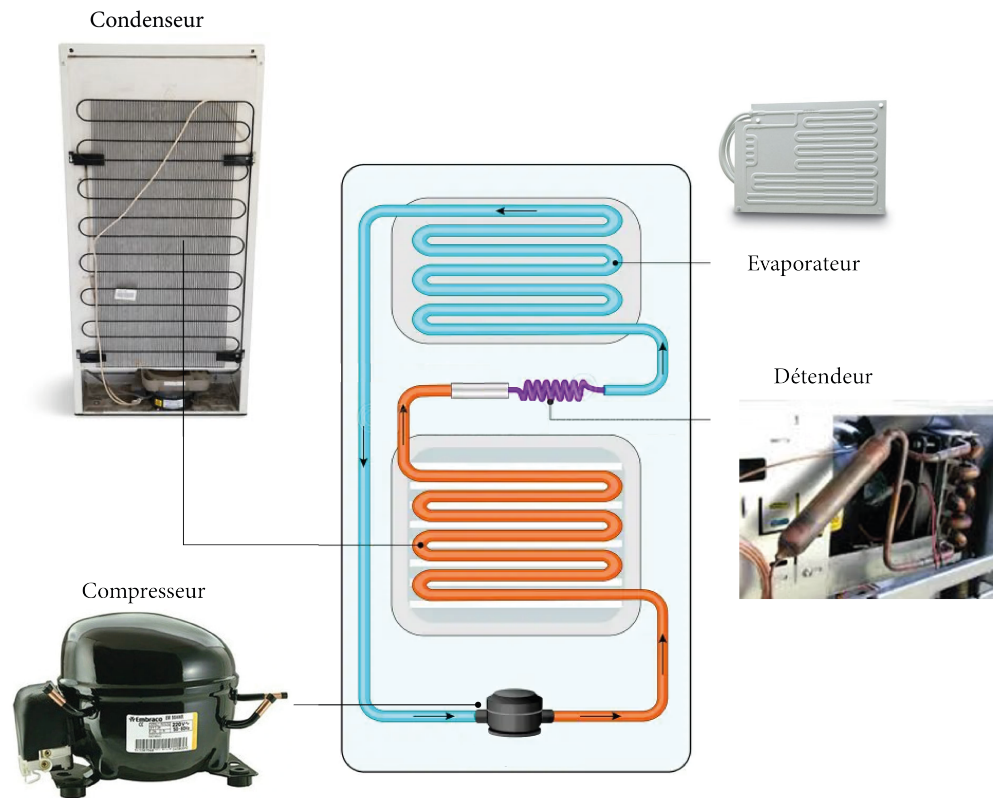
2. Exemple : Machine frigorifique

Le réfrigérateur est une machine thermique permettant le maintien dans une enceinte fermée d'une température constante, entre 2°C et 8°C, permettant la conservation de certains aliments ou de produits biologiques ou chimiques.

Le premier réfrigérateur inventé en 1858 par le français Charles Tellier utilise un gaz d'ammoniac subissant une liquéfaction. En 1876, le réfrigérateur moderne est inventé par l'Allemand Carl Von Linde. À partir de 1923, ABArtic lance la production de réfrigérateurs à usage domestique.

Un fluide caloporteur subit une succession de transformations dans différents compartiments. Pour les anciennes machines, le fluide utilisé est le R134a, le tétrafluoroéthane, $C_2H_2F_4$, qui est néfaste pour l'environnement. Pour les machines modernes, le fluide utilisé est le R600a l'isobutane ou 2-Méthylpropane.

Le fluide absorbe la chaleur à basse température et basse pression (en contact avec la source froide, comme l'intérieur d'un réfrigérateur), puis libère la chaleur à une température et une pression plus élevées (en contact avec la source chaude, comme l'extérieur d'un réfrigérateur), généralement par un changement d'état.



2.1 Principe de fonctionnement

Le transfert thermique massique $q_F > 0$ prélevé à la source froide (intérieur du réfrigérateur à la température T_F) est obtenu lors de la vaporisation du liquide réfrigérant à une température constante $T_{év}$, inférieure à T_F , dans une partie appelée évaporateur.

Le fluide réfrigérant parcourant un cycle, il y a nécessairement liquéfaction de la vapeur, au niveau d'un condenseur en contact avec la pièce où se trouve le réfrigérateur (source chaude à T_C). Cette liquéfaction se réalise à une température T_{cd} supérieure à celle de la pièce et s'accompagne d'un transfert thermique massique $q_C < 0$.

La liquéfaction s'effectuant à une température T_{cd} supérieure à la température de vaporisation $T_{év}$ et donc à une pression $p_{sat}(T_{cd})$ plus élevée que la pression $p_{sat}(T_{év})$ où s'opère la vaporisation, il est nécessaire d'utiliser un compresseur entre l'évaporateur et le condenseur. Ce compresseur fournit un travail mécanique w_u par unité de masse du fluide réfrigérant. De même, il est nécessaire de diminuer la pression du fluide réfrigérant entre le condenseur et l'évaporateur. Puisqu'un fluide s'écoule spontanément des hautes vers les basses pressions, cette détente est obtenue grâce à un détendeur (détente de Joule-Thomson).

2.2 Modélisation du cycle

1 → 2 : Le fluide, initialement sous forme diphasée à la température $T_{év}$ et à la pression de vapeur saturante $p_{sat}(T_{év})$ est complètement vaporisé suivant une transformation isobare jusqu'à l'état de vapeur saturante (état 2'). Pour éviter d'injecter du liquide dans le compresseur, on réalise une surchauffe de la vapeur à la pression $p_{sat}(T_{év})$ jusqu'à l'état 2, caractérisé par une température T_2 .

2 → 3 : la vapeur sèche subit ensuite une compression adiabatique, supposée réversible dans le compresseur calorifugé.

3 → 4 : la vapeur est refroidie jusqu'à la température T_{cd} puis complètement condensée à la pression de vapeur saturante $p_{sat}(T_{cd})$ (état 4') avant de subir un refroidissement jusqu'à la température T_4 .

4 → 1 : le liquide subit une détente isenthalpique qui le refroidit jusqu'à la température $T_{év}$ et la pression $p_{sat}(T_{év})$ en le vaporisant partiellement (détente de Joule-Thomson).

Exercice 1

Dans le cas d'un congélateur permettant une congélation à -18°C , fonctionnant avec le fluide R134a, on considère les valeurs suivantes :

Fluide	R134a
Température de la source froide	$T_F = -18^\circ\text{C}$
Température de la source chaude	$T_C = 20^\circ\text{C}$
Température de vaporisation	$T_{év} = -30^\circ\text{C}$
Chauffage	$T_2 - T_2' = 10^\circ\text{C}$
Température de condensation	$T_{cd} = 40^\circ\text{C}$
Refroidissement	$T_4 - T_4' = -10^\circ\text{C}$

1. Sur le diagramme (p,h), tracer le cycle correspondant au cycle du fluide R134a. On précisera les différentes étapes (et en particulier la nature des transformations) et les positions de chacune des étapes.
2. Déterminer grâce au diagramme :
 - Pression dans l'évaporateur et dans le condenseur.
 - Titre en vapeur à l'entrée de l'évaporateur.
 - Température à la sortie du compresseur.
 - Transfert thermique avec la source froide, avec la source chaude, le travail du compresseur.

— Efficacité du congélateur.

3. On souhaite calculer les transferts énergétiques du réfrigérateur à l'aide de données thermodynamiques tabulées, sans utiliser le diagramme (P, h). On rajoute deux données utiles au problème :

— Pression de vaporisation $P_{év} = 0,847 \times 10^5 \text{ Pa}$

— Pression de liquéfaction $P_{cd} = 10,2 \times 10^5 \text{ Pa}$

— capacité thermique massique de la phase liquide : $c' = 1,41 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

— masses molaires : $M(\text{C}) = 12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $M(\text{H}) = 1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $M(\text{F}) = 19 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

— dans le cas de l'état gazeux : $\gamma = 1,12$

— enthalpie (ou chaleur latente) de vaporisation : $l_{vap}(-30^\circ\text{C}) = 218 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

On assimile la phase liquide à une phase condensée incompressible et indilatable, et la phase gazeuse à un gaz parfait de coefficient supposé indépendant de la température.

4. Déterminer dans l'ordre suivant le titre en vapeur x_1 , la température T_3 , q_F et w_u .

5. En déduire l'efficacité e . Comparer ces résultats avec les valeurs déterminées à l'aide du diagramme (P, h) réel. Conclure.

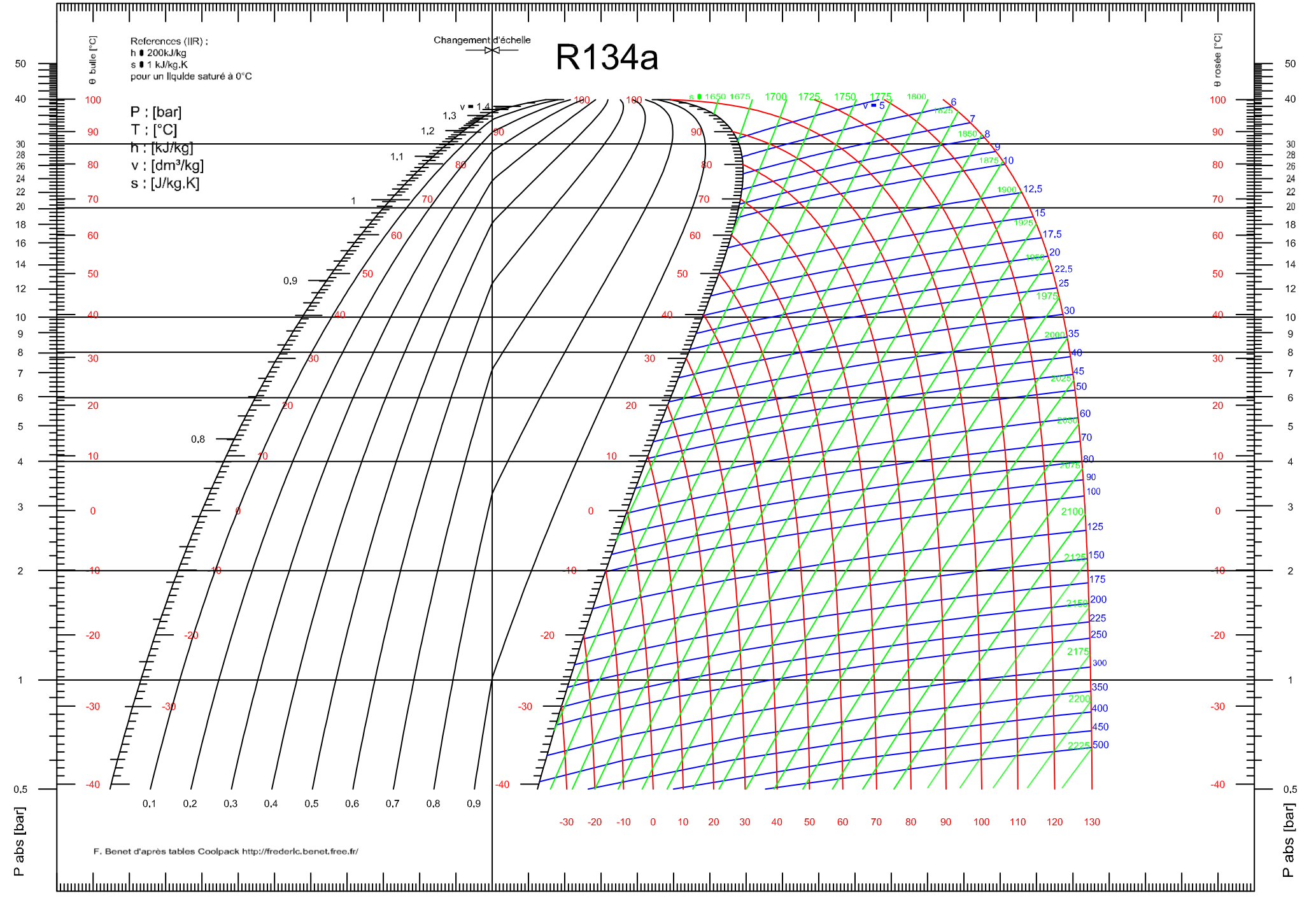
6. Comparer ces résultats avec le rendement de Carnot associé. Conclure.

R134a

Changement d'échelle

References (IIR) :
h ■ 200kJ/kg
s ■ 1 kJ/kg.K
pour un liquide saturé à 0°C

P : [bar]
T : [°C]
h : [kJ/kg]
v : [dm³/kg]
s : [J/kg.K]



F. Benet d'après tables Coolpack <http://frederic.benet.free.fr/>

Enthalpie [kJ/kg] 160 200 240 280 320 360 380 400 420 440 460 480 500 520 540 560

R134a

Changement d'échelle

References (IIR) :
h : 200 kJ/kg
s : 1 kJ/kg.K
pour un liquide saturé à 0°C

P : [bar]
T : [°C]
h : [kJ/kg]
v : [dm³/kg]
s : [J/kg.K]

