Thermodynamique et mécanique des fluides – Chapitre 8

Thermodynamique industrielle

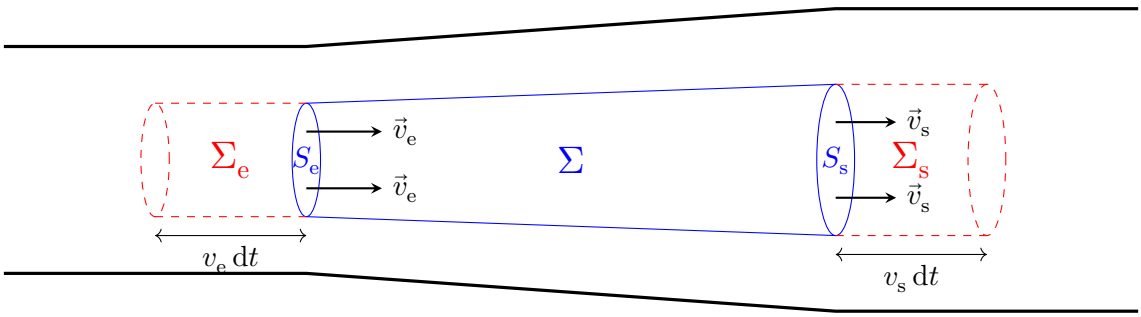
I. Principes de la thermodynamique pour un système ouvert . . . 1
I.1. Définition du système . . . 1
I.2. Premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert . . . 2
I.3. Second principe de la thermodynamique pour un système ouvert . . . 2
II. Étude de quelques dispositifs . . . 4
II.1. Compresseur et turbine . . . 4
II.2. Détendeur . . . 4
II.3. Échangeur thermique . . . 5
II.4. Récapitulatif . . . 6
III. Étude du cycle réel d'une pompe à chaleur . . . 6
III.1. Présentation du cycle . . . 6
III.2. Étude du cycle dans le diagramme des frigoristes . . . 6
III.3. Coefficient de performance . . . 7

I. Principes de la thermodynamique pour un système ouvert

I.1. Définition du système

On souhaite appliquer les principes de la thermodynamique à une portion de fluide en écoulement stationnaire dans une conduite (le fluide n'est pas forcément parfait et en écoulement incompressible, contrairement au chapitre précédent).

On définit le système Σ, appelé volume de contrôle, constitué des particules de fluide contenues dans un tube de courant entre la surface S_e et la surface S_s. Le système Σ est un système ouvert puisque des particules de fluide entrent et sortent à chaque instant. Il n'est alors pas possible d'appliquer les principes de la thermodynamique vu précédemment, car ceux-ci ne s'appliquent qu'à des systèmes fermés.



On définit ainsi :

- le système Σ_e de volume $\mathrm{d}V_\mathrm{e} = S_\mathrm{e}\,v_\mathrm{e}\,\mathrm{d}t$ et de masse $\mathrm{d}m_\mathrm{e} = \rho_\mathrm{e}\,\mathrm{d}V_\mathrm{e}$ constitué des particules de fluide qui entrent dans le système Σ entre les instants t et $t + \mathrm{d}t$;
- le système Σ_s de volume $\mathrm{d}V_\mathrm{s} = S_\mathrm{s}\,v_\mathrm{s}\,\mathrm{d}t$ et de masse $\mathrm{d}m_\mathrm{s} = \rho_\mathrm{s}\,\mathrm{d}V_\mathrm{s}$ constitué des particules de fluide qui sortent du système Σ entre les instants t et $t + \mathrm{d}t$;
- le système Σ' tel que : $\begin{cases} \Sigma'(t) = \Sigma_\mathrm{e} + \Sigma \\ \Sigma'(t + \mathrm{d}t) = \Sigma + \Sigma_\mathrm{s} \end{cases}$.

Le système Σ' est un système fermé, puisqu'il est constitué des mêmes particules de fluide entre les instants t et $t + \mathrm{d}t$.

La conservation du débit massique le long du tube de courant pour cet écoulement stationnaire donne :

$$D_\mathrm{m} = \rho_\mathrm{e}\,v_\mathrm{e}\,S_\mathrm{e} = \rho_\mathrm{s}\,v_\mathrm{s}\,S_\mathrm{s}$$

d'où on peut exprimer les masses élémentaires :

$$\mathrm{d}m_\mathrm{e} = \mathrm{d}m_\mathrm{s} = D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t.$$

I.2. Premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert

L'application du premier principe de la thermodynamique au système fermé Σ' pour un fluide en écoulement stationnaire entre les instants t et $t+\mathrm{d}t$ donne :

$$\mathrm{d}U + \mathrm{d}E_\mathrm{c} + \mathrm{d}E_\mathrm{p} = \delta W_\mathrm{P} + \delta W_\mathrm{i} + \delta Q$$

avec :

- la variation d'énergie interne : $\mathrm{d}U = U(t+\mathrm{d}t) - U(t) = \left[U + U_\mathrm{s}\right] - \left[U_\mathrm{e} + U\right]$, où $U_\mathrm{e} = u_\mathrm{e}\,\mathrm{d}m_\mathrm{e} = u_\mathrm{e}\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t$ et de façon équivalente $U_\mathrm{s} = u_\mathrm{s}\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t$, avec u_e et u_s les énergies internes massiques, soit : $\mathrm{d}U = (u_\mathrm{s} - u_\mathrm{e})\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t$;
- la variation d'énergie cinétique : $\mathrm{d}E_\mathrm{c} = \left(e_{\mathrm{c,s}} - e_{\mathrm{c,e}}\right) D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t = \Delta e_\mathrm{c}\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t$, avec Δe_c la variation d'énergie cinétique massique entre l'entrée et la sortie ;
- la variation d'énergie potentielle : $\mathrm{d}E_\mathrm{p} = \left(e_{\mathrm{p,s}} - e_{\mathrm{p,e}}\right) D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t = \Delta e_\mathrm{p}\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t$, avec Δe_p la variation d'énergie potentielle massique entre l'entrée et la sortie ;
- le travail des forces de pression d'admission et de refoulement :

  $\delta W_\mathrm{P} = \delta W_{\mathrm{P,e}} + \delta W_{\mathrm{P,s}} = P_\mathrm{e}\,\mathrm{d}V_\mathrm{e} - P_\mathrm{s}\,\mathrm{d}V_\mathrm{s} = P_\mathrm{e}\,v_\mathrm{e}\,\mathrm{d}m_\mathrm{e} - P_\mathrm{s}\,v_\mathrm{s}\,\mathrm{d}m_\mathrm{s} = (P_\mathrm{e}\,v_\mathrm{e} - P_\mathrm{s}\,v_\mathrm{s})\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t$, avec v_e et v_s les volumes massiques ;
- le travail indiqué en présence de parties mobiles : $\delta W_\mathrm{i} = w_\mathrm{i}\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t$, avec w_i le travail indiqué massique ;
- le transfert thermique reçu par le fluide : $\delta Q = q\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t$, avec q le transfert thermique massique.

On obtient :

$$(u_\mathrm{s} - u_\mathrm{e})\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t + \Delta e_\mathrm{c}\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t + \Delta e_\mathrm{p}\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t = (P_\mathrm{e}\,v_\mathrm{e} - P_\mathrm{s}\,v_\mathrm{s})\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t + w_\mathrm{i}\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t + q\,D_\mathrm{m}\,\mathrm{d}t$$

soit en simplifiant :

$$(u_\mathrm{s} + P_\mathrm{s}\,v_\mathrm{s}) - (u_\mathrm{e} + P_\mathrm{e}\,v_\mathrm{e}) + \Delta e_\mathrm{c} + \Delta e_\mathrm{p} = w_\mathrm{i} + q$$

avec $(u_\mathrm{s} + P_\mathrm{s}\,v_\mathrm{s}) - (u_\mathrm{e} + P_\mathrm{e}\,v_\mathrm{e}) = h_\mathrm{s} - h_\mathrm{e} = \Delta h$ la variation d'enthalpie massique entre l'entrée et la sortie.

Comme cette relation est valable quel que soit le tube de courant étudié, on aboutit au **premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert** en écoulement **stationnaire** :

$$\boxed{\Delta h + \Delta e_\mathrm{c} + \Delta e_\mathrm{p} = w_\mathrm{i} + q}$$

qui est aussi appelé le **premier principe industriel**.

On peut également exprimer le **premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert en terme de puissance** en multipliant l'expression précédente par D_m, on obtient alors :

$$\boxed{D_\mathrm{m}\left(\Delta h + \Delta e_\mathrm{c} + \Delta e_\mathrm{p}\right) = \Phi_\mathrm{i} + \Phi_\mathrm{th}}$$

avec :

- $\Phi_\mathrm{i} = D_\mathrm{m}\,w_\mathrm{i}$ la **puissance indiquée**, qui s'exprime en W ;
- $\Phi_\mathrm{th} = D_\mathrm{m}\,q$ la **puissance thermique** reçue par le fluide, qui s'exprime en W.

I.3. Second principe de la thermodynamique pour un système ouvert

L'application du second principe de la thermodynamique au système fermé Σ' pour un fluide en écoulement stationnaire entre les instants t et $t+\mathrm{d}t$ donne :

$$\mathrm{d}S = \delta S_\mathrm{éch} + \delta S_\mathrm{créée}$$

avec :

- la variation d'entropie $\mathrm{d}S = (s_\mathrm{s} - s_\mathrm{e})\, D_\mathrm{m}\, \mathrm{d}t = \Delta s\, D_\mathrm{m}\, \mathrm{d}t$, avec Δs la variation d'entropie massique entre l'entrée et la sortie ;
- l'entropie échangée $\delta S_\text{éch} = s_\text{éch}\, D_\mathrm{m}\, \mathrm{d}t$, avec $s_\text{éch}$ l'entropie échangée massique ;
- l'entropie créée $\delta S_\text{créée} = s_\text{créée}\, D_\mathrm{m}\, \mathrm{d}t$, avec $s_\text{créée}$ l'entropie créée massique.

On obtient :

$$\Delta s\, D_\mathrm{m}\, \mathrm{d}t = s_\text{éch}\, D_\mathrm{m}\, \mathrm{d}t + s_\text{créée}\, D_\mathrm{m}\, \mathrm{d}t$$

soit en simplifiant :

$$\Delta s = s_\text{éch} + s_\text{créée}.$$

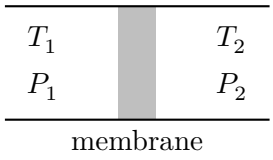
Comme cette relation est valable quel que soit le tube de courant étudié, on aboutit au **second principe de la thermodynamique pour un système ouvert** en écoulement **stationnaire** :

$$\boxed{\Delta s = s_\text{éch} + s_\text{créée}}$$

qui est aussi appelé le **second principe industriel**.

Application :

On considère la détente de Joule-Thomson, qui consiste à faire passer un gaz à travers une membrane sous l'effet d'une différence de pression dans une conduite horizontale calorifugée. On réalise l'expérience avec de l'air, assimilé à un gaz parfait de masse molaire $M = 29\,\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$. Les pressions en entrée et en sortie de la conduite sont respectivement $P_1 = 2{,}0\,\mathrm{bar}$ et $P_2 = 1{,}0\,\mathrm{bar}$. On suppose que l'écoulement est stationnaire et que l'énergie mécanique du gaz est constante au cours de la détente.



On rappelle l'expression de la variation d'entropie massique pour ce gaz parfait :

$$\Delta s = c_\mathrm{p} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - \frac{R}{M} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right).$$

Déterminons l'entropie massique créée à l'aide des deux principes de la thermodynamique.

L'application du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert entre l'entrée et la sortie donne : $\Delta h + \Delta e_\mathrm{c} + \Delta e_\mathrm{p} = w_\mathrm{i} + q$, avec :

- $\Delta h = c_\mathrm{p}\,(T_2 - T_1)$;
- $\Delta e_\mathrm{c} + \Delta e_\mathrm{p} = 0$ comme l'énergie mécanique du gaz est constante ;
- $w_\mathrm{i} = 0$ en l'absence de partie mobile ;
- $q = 0$ comme la conduite est calorifugée ;

d'où : $T_2 = T_1$, la détente est isotherme.

L'application du second principe de la thermodynamique pour un système ouvert entre l'entrée et la sortie donne : $\Delta s = s_\text{éch} + s_\text{créée}$, avec :

- $\Delta s = -\dfrac{R}{M} \ln\left(\dfrac{P_2}{P_1}\right)$;
- $s_\text{éch} = 0$ comme la conduite est calorifugée ;

d'où : $s_\text{créée} = -\dfrac{R}{M} \ln\left(\dfrac{P_2}{P_1}\right) = 2{,}0.10^2\,\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$, la détente est irréversible.

II. Étude de quelques dispositifs

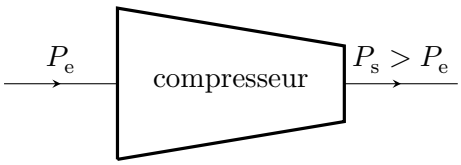
Dans cette partie, nous allons appliquer les principes de la thermodynamique pour un système ouvert à quelques dispositifs que l'on retrouve dans de nombreuses installations industrielles.

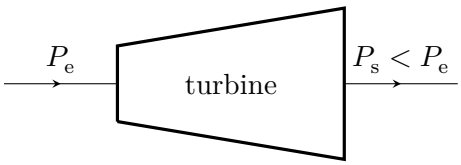
II.1. Compresseur et turbine

Un **compresseur** est un dispositif constitué de parties mobiles qui permet d'augmenter la pression d'un fluide.

Une **turbine** est un dispositif constitué de parties mobiles qui permet d'extraire un travail mécanique en faisant chuter la pression d'un fluide.

Ces deux dispositifs sont donc semblables, mais ils fonctionnent en sens opposé. Ils sont habituellement représentés sous les formes schématiques ci-dessous.





On donne quelques caractéristiques pour ces dispositifs :

- les signes de leurs travaux massiques sont opposés : $w_i > 0$ pour un compresseur et $w_i < 0$ pour une turbine ;
- les transferts thermiques sont généralement négligeables car les fluides circulent rapidement dans ces dispositifs, on peut alors considérer qu'ils sont calorifugés ;
- les variations d'énergie mécanique massique des fluides sont généralement négligeables devant les variations d'enthalpie massique.

Application :

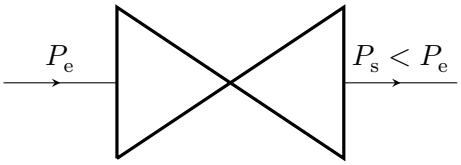
On considère une turbine dans laquelle un gaz parfait circule en écoulement stationnaire avec un débit massique $D_m = 10\,\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$. Le gaz entre dans la turbine avec une enthalpie massique $h_1 = 4{,}0.10^2\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ et sort de la turbine avec une enthalpie massique $h_2 = 3{,}4.10^2\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
Déterminons la puissance indiquée de la turbine.

L'application du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert en terme de puissance entre l'entrée et la sortie donne : $D_m\left(\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p\right) = \Phi_i + \Phi_{th}$, avec $\Delta h = h_2 - h_1$, $\Delta e_c + \Delta e_p = 0$ comme les variations d'énergie mécanique sont négligeables et $\Phi_{th} = 0$ comme les transferts thermiques sont négligeables.
On en déduit : $\Phi_i = D_m\left(h_2 - h_1\right) = -10\,\text{kW}$.

II.2. Détendeur

Un **détendeur** est un dispositif qui permet d'abaisser la pression d'un fluide à l'aide de pertes de charge.

Il est habituellement représenté sous la forme schématique ci-dessous.



On donne quelques caractéristiques pour ce dispositif :

- il n'y a pas de partie mobile ;
- les transferts thermiques sont généralement négligeables car les fluides circulent rapidement dans ce dispositif, on peut alors considérer qu'il est calorifugé ;

- les variations d'énergie mécanique massique des fluides sont généralement négligeables devant les variations d'enthalpie massique.

En utilisant ces hypothèses, le premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert en écoulement stationnaire se simplifie et on obtient :

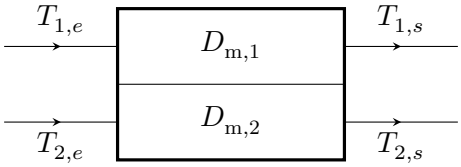
$$\Delta h = 0.$$

Les transformations à l'intérieur d'un détendeur sont donc des **détentes isenthalpiques**, aussi appelées **laminages isenthalpiques**.

II.3. Échangeur thermique

Un **échangeur thermique** est un dispositif qui permet de réaliser un transfert thermique entre deux fluides sans les mélanger.

Il est habituellement représenté sous la forme schématique ci-dessous.



On donne quelques caractéristiques pour ce dispositif :

- il n'y a pas de partie mobile ;
- un transfert thermique a lieu entre les deux fluides, mais les parois extérieures de l'échangeur sont généralement calorifugées et empêchent tout transfert thermique avec le milieu extérieur ;
- les variations d'énergie mécanique massique des fluides sont généralement négligeables devant les variations d'enthalpie massique.

Pour déterminer la relation entre les débits massiques et les variations d'enthalpie massique des fluides, nous allons appliquer le premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert en terme de puissance à chacun de ces fluides en écoulement stationnaire. En prenant en compte les hypothèses précédentes, on obtient :

- $D_{\mathrm{m},1}\,\Delta h_1 = \Phi_{\mathrm{th},2\to1}$ pour le fluide 1, avec $\Phi_{\mathrm{th},2\to1}$ le transfert thermique donné par le fluide 2 au fluide 1 ;
- $D_{\mathrm{m},2}\,\Delta h_2 = \Phi_{\mathrm{th},1\to2}$ pour le fluide 2, avec $\Phi_{\mathrm{th},1\to2}$ le transfert thermique donné par le fluide 1 au fluide 2.

L'échangeur étant calorifugé, on en déduit que : $\Phi_{\mathrm{th},2\to1} = -\Phi_{\mathrm{th},1\to2}$, et la somme des deux équations précédentes donne alors la relation :

$$D_{\mathrm{m},1}\,\Delta h_1 + D_{\mathrm{m},2}\,\Delta h_2 = 0.$$

Application :

On considère un échangeur thermique calorifugé mettant en contact deux écoulements stationnaires d'eau de même débit massique. L'échangeur permet de refroidir l'eau du circuit 1 dont la température passe de $T_{1,e} = 60°\mathrm{C}$ à $T_{1,s} = 40°\mathrm{C}$.
Déterminons la température $T_{2,s}$ de l'eau en sortie du circuit 2 sachant que sa température en entrée est $T_{2,e} = 10°\mathrm{C}$.
On peut exprimer : $\Delta h_1 = c_{\mathrm{eau}}\left(T_{1,s} - T_{1,e}\right)$ et $\Delta h_2 = c_{\mathrm{eau}}\left(T_{2,s} - T_{2,e}\right)$.
Comme $D_{\mathrm{m},2} = D_{\mathrm{m},1}$, la relation précédente donne : $D_{\mathrm{m},1}\,c_{\mathrm{eau}}\left(T_{1,s} - T_{1,e}\right) + D_{\mathrm{m},1}\,c_{\mathrm{eau}}\left(T_{2,s} - T_{2,e}\right) = 0$, d'où : $T_{2,s} = T_{1,e} - T_{1,s} + T_{2,e} = 30°\mathrm{C}$.

II.4. Récapitulatif

On peut regrouper les principales caractéristiques à retenir pour ces dispositifs dans un tableau :

Dispositif	**Application du premier principe**
Compresseur	$\Delta h = w_{\text{i}} > 0$
Turbine	$\Delta h = w_{\text{i}} < 0$
Détendeur	$\Delta h = 0$
Échangeur thermique	$D_{\text{m},1}\,\Delta h_1 + D_{\text{m},2}\,\Delta h_2 = 0$

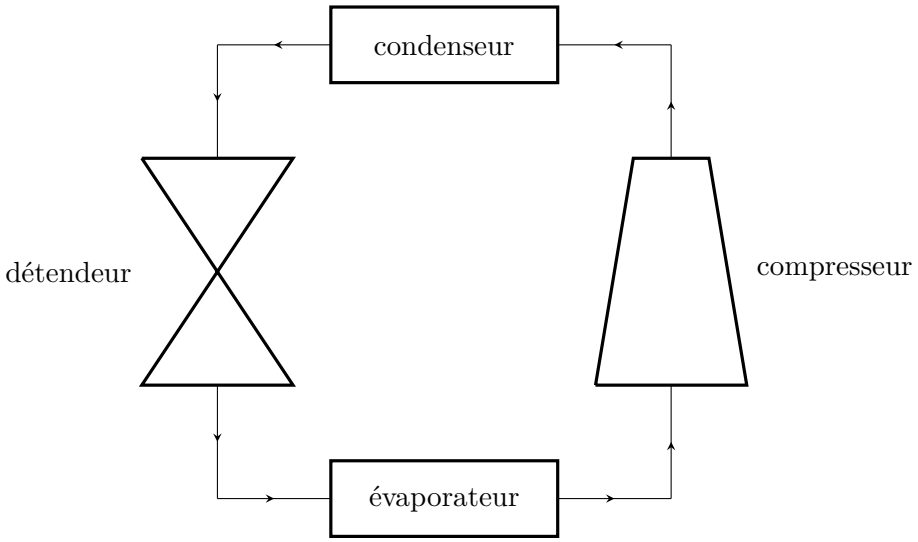
III. Étude du cycle réel d'une pompe à chaleur

Dans cette partie, nous allons étudier le cycle réel d'une pompe à chaleur. Ce cycle n'est pas à connaitre, mais il permet d'illustrer les notions vu précédemment, sachant que l'on retrouve les mêmes éléments sur la plupart des machines frigorifiques.

III.1. Présentation du cycle

On s'intéresse au fonctionnement d'une pompe à chaleur dans laquelle circule le fluide caloporteur R134a, utilisé aujourd'hui dans de nombreuses applications. Elle permet de maintenir la température $T_{\text{c}} = 35°\text{C}$ d'un plancher chauffant à l'intérieur d'une maison, en considérant que la température extérieure est $T_{\text{f}} = 7°\text{C}$.

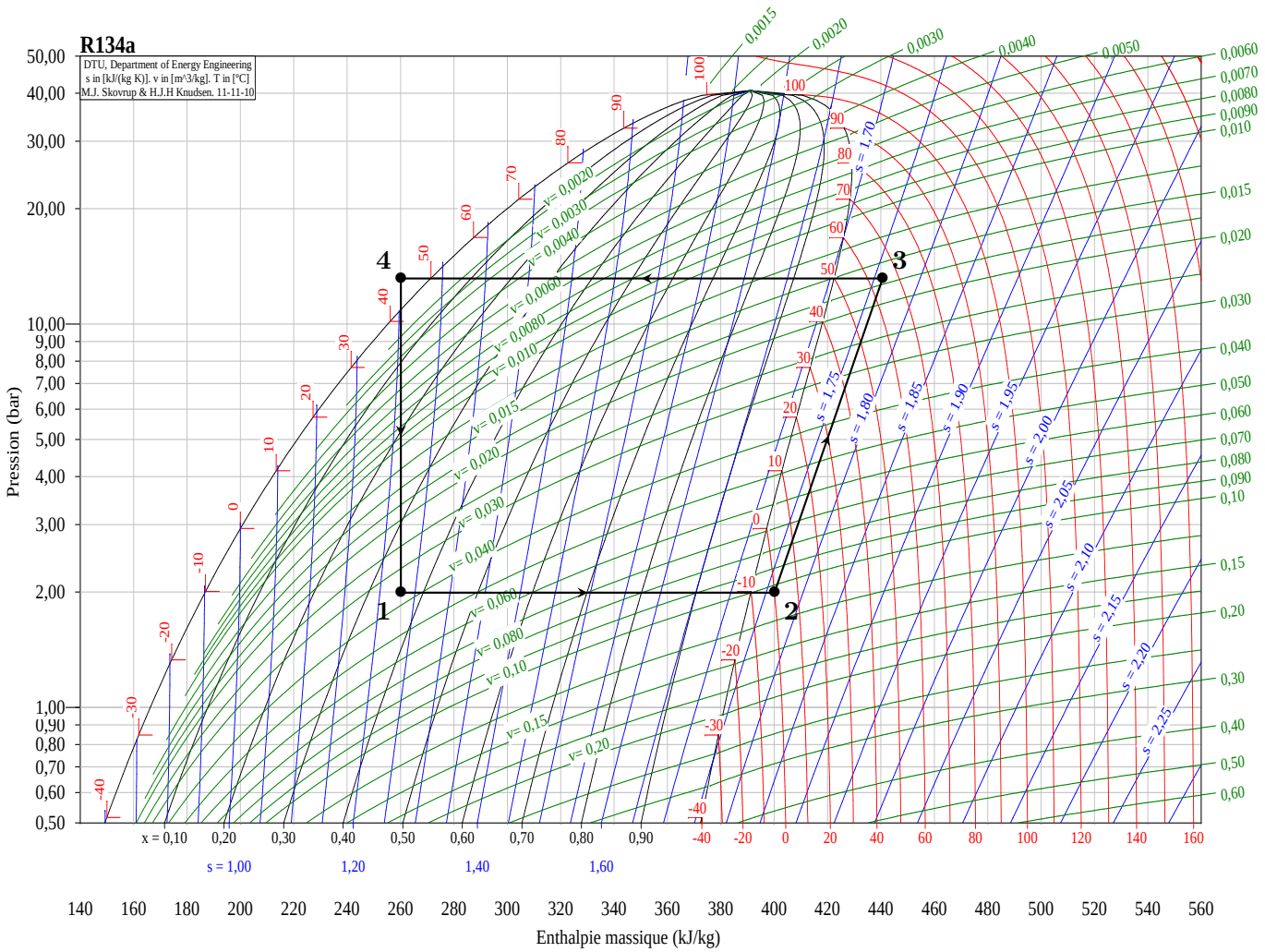
La pompe à chaleur est constitué de 4 éléments que l'on représente sur le cycle ci-dessous :



- L'évaporateur est un type d'échangeur thermique qui permet de vaporiser le fluide caloporteur en contact avec la source froide.
- Le compresseur permet d'augmenter la pression du fluide caloporteur.
- Le condenseur est un type d'échangeur thermique qui permet de liquéfier le fluide caloporteur en contact avec la source chaude.
- Le détendeur permet d'abaisser la pression du fluide caloporteur.

III.2. Étude du cycle dans le diagramme des frigoristes

On représente ci-dessous les différentes transformations du cycle dans le diagramme des frigoristes du fluide caloporteur R134a.



Application :

Associons chaque transformation du cycle à un élément constituant la pompe à chaleur.

- La transformation $1 \to 2$ correspond à une vaporisation isobare, elle est donc réalisée dans l'évaporateur.
- La transformation $2 \to 3$ correspond à une augmentation de la pression, elle est donc réalisée dans le compresseur.
- La transformation $3 \to 4$ correspond à une liquéfaction isobare, elle est donc réalisée dans le condenseur.
- La transformation $4 \to 1$ correspond à une réduction de la pression, elle est donc réalisée dans le détendeur.

La pompe à chaleur étant une machine frigorifique, son cycle est parcouru en sens inverse des aiguilles d'une montre. On retrouve cette propriété quel que soit le type de diagramme utilisé : diagramme de Clapeyron, diagramme des frigoristes ou diagramme entropique.

III.3. Coefficient de performance

On rappelle que l'efficacité d'une pompe à chaleur, aussi appelé **coefficient de performance**, est définie telle que :

$$e = COP = -\frac{Q_c}{W} = -\frac{q_c}{w_i}$$

avec q_c le transfert thermique massique reçu par la source chaude et w_i le travail indiqué massique sur le cycle.

Dans le cas idéal d'une pompe à chaleur réversible, on obtient alors l'efficacité de Carnot :

$$e_C = COP_C = \frac{T_c}{T_c - T_f}.$$

Application :

Calculons le coefficient de performance de la pompe à chaleur étudiée, puis comparons sa valeur au coefficient de performance de Carnot.

Le fluide caloporteur est en contact avec la source chaude uniquement dans le condenseur, d'où : $q_c = q_{3\to4}$, avec $q_{3\to4} = \Delta h_{3\to4}$ dans le condenseur qui est un type d'échangeur thermique, où $\Delta h_{3\to4} = h_4 - h_3 = 260 - 440 = -180\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ par lecture graphique.

Le compresseur est le seul élément du cycle qui fournit un travail au fluide, d'où : $w_i = w_{2\to3}$, avec $w_{2\to3} = \Delta h_{2\to3}$ pour le compresseur, où $\Delta h_{2\to3} = h_3 - h_2 = 440 - 400 = 40\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ par lecture graphique.

On obtient : $COP = -\dfrac{q_c}{w_i} = 4{,}5$.

On retrouve bien que : $COP < COP_C = \dfrac{T_c}{T_c - T_f} = 11$.