LP 14 - Machines thermiques réelles

11 juin 2021
Antoine Chauchat & Valentin Dorel

Niveau :

Bibliographie

✍ , ⟶

Prérequis

- Premier et second principe de la thermodynamique
- Premier principe industriel
- Machine thermique idéale

Expériences

☕ Moteur de Stirling

Table des matières

1 Étude d'une machine frigorifique **2**
1.1 Description du cycle . . . 3
1.2 Étude énergétique . . . 3

2 Étude du moteur Stirling **4**

3 Étude d'une machine à vapeur **5**

4 Questions et commentaires **7**
4.1 Questions . . . 7
4.2 Commentaires . . . 7

Introduction

Nous avons vu dans le dernier cours comment définir puis décrire une machine thermique idéale. À l'aide des outils que l'on a introduit nous allons pouvoir maintenant étudier des machines thermiques *réelles*.

On va notamment s'intéresser à trois exemples concrets de machines thermiques réelles : la machine frigorifique, le moteur de Stirling et la machine à vapeur.

1 Étude d'une machine frigorifique

On va commencer par l'étude d'une machine frigorifique qui est modélisée sur la figure 1.

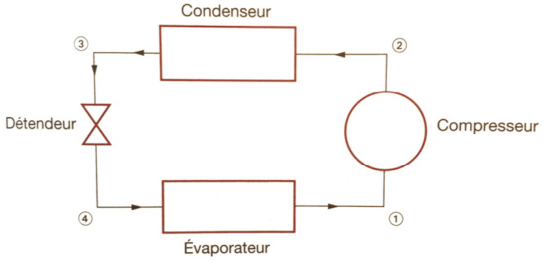

Fig. 1 : Cycle de la machine frigorifique

Le diagramme du fluide réfrigérant ainsi que le cycle étudié sont présentés sur la Figure 2. On étudie une machine frigorifique fonctionnant avec de l'isobutane qui est utilisé en alternative aux CFC et HFC pour limiter l'impact sur la couche d'ozone et l'effet de serre. En effet maintenant que l'on étudie des machines *réelles* il est important de s'intéresser aux conséquences *réelles* qu'elles peuvent avoir sur l'environnement.

OdG :

Composé	Potentiel de déplétion ozonique	Potentiel de réchauffement global
Trichlorofluorométhane (CFC)	1	4600
Duchlorudifluorométhane (CFC)	0.82	10 900
Isobutane	0	3

Tab. 1 : Propriétés néfastes des CFC

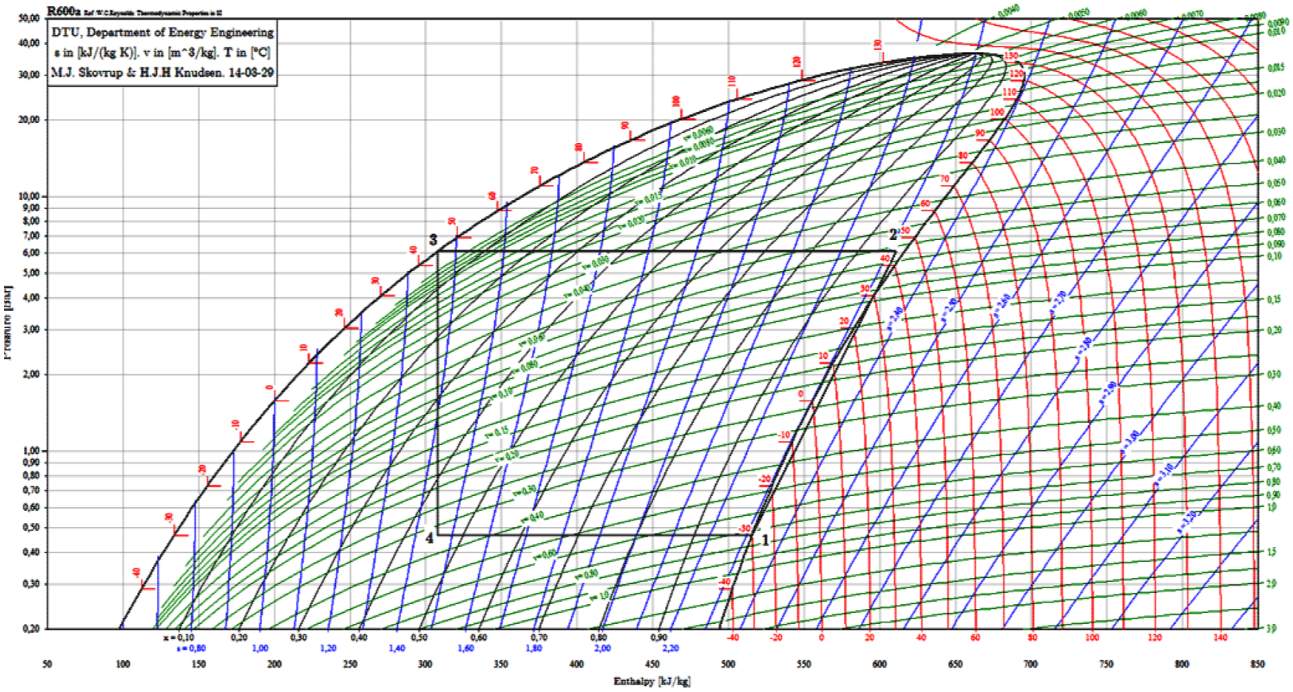

Fig. 2 : Diagramme de Mollier de l'isobutane R600a

1.1 Description du cycle

Au point 1 le fluide est dans un état de vapeur saturante $x = 1$ (point de rosée) à la température $T_1 = -30\,°C$.

- $1 \to 2$ Dans le compresseur, le fluide subit une transformation que l'on suppose *adiabatique* et *réversible*, menant à l'état 2 à la pression $P_2 = 6\,\text{bar}$. Sur le diagramme, le fluide suit l'isentropique $s = 2{,}3\,\text{kJ}\,\text{K}^{-1}\,\text{kg}^{-1}$ passant par un état de vapeur sèche avant de devenir diphasé.
- $2 \to 3$ Dans le condenseur, l'évolution est *isobare*, le fluide change d'état de manière isotherme ($T_2 = 45\,°C$). Au cours de cette transformation il y a transfert thermique du fluide vers la source chaude, thermostat qui est joué par l'atmosphère de la pièce. Au point 3, le fluide est liquide.
- $3 \to 4$ Dans le détendeur le fluide subit une détente *isenthalpique* (Joule-Kelvin). L'état 4 a même pression que l'état 1, on note $x_4 = 0.46$ le titre vapeur correspondant.
- $4 \to 1$ Transformation isobare dans l'évaporateur. Vaporisation du fluide pour retrouver l'état initial. Il y a transfert thermique de la source froide (le milieu à réfrigérer) vers le fluide. C'est la phase utile au cours de laquelle on extrait de l'énergie thermique à l'enceinte que l'on veux maintenir à basse température.

1.2 Étude énergétique

On suppose l'écoulement du fluide stationnaire, on peut alors à chaque étape utiliser le premier principe industriel :

$$\Delta h = w_u + q \tag{1.1}$$

Avec w_u le travail massique utile et q le transfert thermique massique.

Intéressons nous à l'étape utile $4 \to 1$. Sur cette étape, le premier principe industriel s'écrit $h_1 - h_4 = q_f$ avec $h_1 = 516\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$ et $h_4 = 308\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$. On trouve $q_f = 208\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$ On a donc $q_f > 0$, le fluide à reçu de la chaleur ce qui correspond bien au fonctionnement d'une machine frigorifique.

On s'intéresse aussi au travail de compression, qui représente la dépense énergétique. La compression étant *adiabatique*, on a $h_2 - h_1 = w_c$, on a également $h_2 = 611\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$ ainsi $w_c = 95\,\text{kJ}\,\text{kg}^{-1}$. On a $w_c > 0$ en effet on a du fournir du travail au fluide.

On en déduit donc l'efficacité frigorifique :

$$e_\text{f} = \frac{q_f}{w_c} = 2.2 \tag{1.2}$$

On peut la comparer à l'efficacité frigorifique de Carnot :

$$c_{\text{fc}} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = 3.2 \tag{1.3}$$

L'efficacité est bien inférieure à celle de Carnot.

Remarque :

Ici on a bien étudié un fluide réel, mais le cycle suivi réellement dans les machines frigorifiques peut présenter des écarts à celui que l'on a présenté.

2 Étude du moteur Stirling

Le moteur Stirling est un moteur qui fonctionne en cycle fermé, il est dit moteur à combustion externe. Il emploie un gaz qu'on peut considérer comme parfait. On peut modéliser son cycle par le cycle de la Figure 3. La quantité de matière du gaz est de $n = 40\,\text{mmol}$, son rapport isentropique est $\gamma = 1{,}4$.

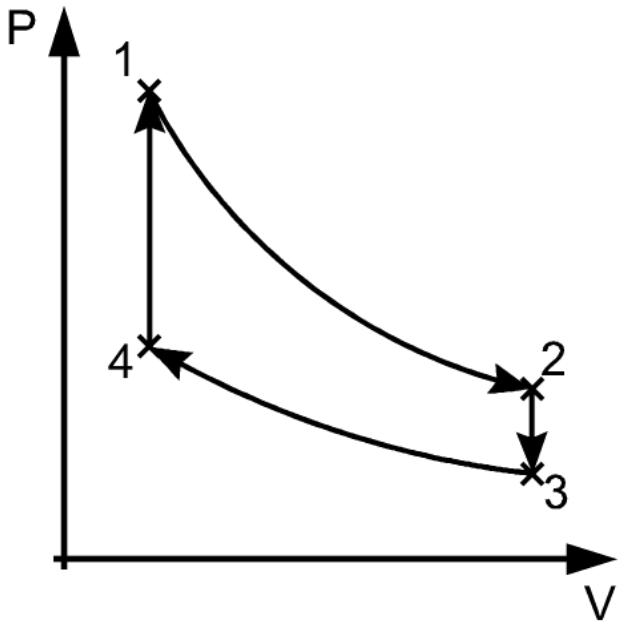

Fig. 3 : Cycle du moteur Stirling

Il se compose de quatre temps :

- $1 \to 2$ Détente isotherme. La zone de détente est chauffée par la source chaude à la température T_c
- $2 \to 3$ Refroidissement isochore.
- $3 \to 4$ Compression isotherme. La zone de compression est refroidie par l'air extérieur à la température T_f
- $4 \to 1$ Chauffage isochore.

À l'état 3, le gaz est à la pression $P_3 = 1{,}0\,\text{bar}$ et à la température $T_3 = T_f = 300\,\text{K}$, il occupe donc un volume $V_3 = \frac{nRT_3}{P_3} = 10^{-3}\,\text{m}^3$.

Lors de la compression isotherme on a alors $T_4 = T_3$ donc $P_3V_3 = P_4V_4$ d'où $P_4 = \frac{V_3}{V_4}P_3 = 10\,\text{bar}$ en sachant que $V_4 = \frac{V_3}{10}$.

Lors de l'échauffement isochore le gaz passe à la température de la source chaude $T_c = 600\,\text{K}$ donc $T_1 = T_c$ et $V_1 = V_4$ ainsi $P_1 = \frac{P_4T_1}{T_4} = 20\,\text{bar}$

Lors de la détente isotherme, $T_2 = T_1$, $V_2 = V_3$ d'où $P_2 = \frac{P_1V_1}{V_2} = 2\,\text{bar}$.

Le cycle est parcouru dans le sens horaire, c'est bien un cycle moteur.

Calculons les différents transferts thermique et travail échangés pendant le cycle pour en déduire le rendement théorique du moteur :

Lors de la première étape :

$$\begin{aligned}\Delta W_{1\to2} &= \int -P\mathrm{d}V \\ &= -nRT_\mathrm{c}\int \frac{1}{V}\mathrm{d}V \\ &= nRT_\mathrm{c}\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \\ &= -4{,}6\times10^2\,\mathrm{J}\end{aligned}$$

Le gaz parfait suit la première loi de Joule, comme $\Delta T = 0$ on a $\Delta U = 0$ donc $Q_{1\to2} = -W_{1\to2} = 4{,}6\times10^2\,\mathrm{J}$
Aucun travail n'est échangé lors de la seconde étape car le volume est constant $W_{2\to3} = 0$.

$$\begin{aligned}\Delta U &= C_V\Delta T \\ Q_{2\to3} &= \frac{nR}{(\gamma-1)}\Delta T \\ &= 2{,}5\times10^2\,\mathrm{J}\end{aligned}$$

Lors de la troisième étape de même $\Delta W_{3\to4} = nRT_\mathrm{f}\ln\left(\frac{V3}{V4}\right) = 2{,}3\times10^2\,\mathrm{J}$ et $Q_{3\to4} = -2{,}3\times10^2\,\mathrm{J}$.
Aucun travail n'est échangé lors de la quatrième étape car le volume est constant $W_{4\to1} = 0$. De même $Q_{3\to4} = \frac{nR}{\gamma-1}\Delta T = 2{,}5\times10^2\,\mathrm{J}$
Sur un cycle, ce système produit $-W_{1\to2} - W_{3\to4}$ et consomme $Q_{1\to2} + Q_{4\to1}$ Le rendement vaut donc

$$\eta = \frac{-W_{1\to2} + W_{3\to4}}{Q_{1\to2} + Q_{4\to1}} = 32\,\%. \tag{2.1}$$

Si on utilise un régénérateur pour ne pas avoir à fournir $Q_{4\to1}$ alors

$$\eta = \frac{-W_{1\to2} - W3\to4}{Q_{1\to2}} = 50\,\%. \tag{2.2}$$

On retrouve le rendement de Carnot.
Sur un cycle, l'entropie du gaz ne varie pas donc $\Delta S = S_\mathrm{ech} + S_\mathrm{créé} = 0$ donc

$$S_\mathrm{créé} = -S_\mathrm{ech} = -\left(\frac{Q_{1\to2}}{T_\mathrm{c}} + \frac{Q_{2\to3}}{T_\mathrm{f}} + \frac{Q_{3\to4}}{T_\mathrm{f}} + \frac{Q_{4\to1}}{T_\mathrm{c}}\right) = 4{,}2\,\mathrm{J\,K^{-1}} \tag{2.3}$$

En réalité le rendement est loin du rendement de Carnot du fait de l'irréversibilité des échanges thermiques avec le régénérateur et de la forme réelle du cycle.

Étude du moteur Stirling.
On utilise le moteur Stirling, on peut tracer son cycle et en estimant en préparation la masse d'éthanol brûlée par seconde on peut en déduire un rendement. On montre également les écarts du cycle réel avec le cycle théorique. On peut mentionner le fait qu'il peut être utilisé en cogénération, l'énergie thermique qui n'a pas servi au chauffage du moteur (ici il y en a beaucoup) est utilisée comme chauffage (de maison...) ce qui permet de grandement améliorer le rendement.

Le moteur Stirling reste néanmoins assez cher à produire comparé à un moteur à combustion interne, il trouve ainsi surtout des applications dans des cas précis :

- Il peut être utilisé de concert avec un miroir parabolique pour fournir de l'électricité à partir du rayonnement solaire.
- Il est utilisé dans le domaine de la réfrigération industrielle et militaire

3 Étude d'une machine à vapeur

On va maintenant étudier l'exemple d'une machine à vapeur. On va donc employer le diagramme enthalpique de l'eau. Dans une machine à vapeur, l'eau suit un *cycle de Rankine*.
C'est notamment notamment le cycle suivi dans le circuit secondaire des centrales nucléaires, dans certaines pompes à chaleur ou même comme moteur de sous-marin.

- Au point A l'eau est à l'état de liquide saturant seul, à la pression $P = 0{,}2\,\text{bar}$ et $T_1 = 60\,°\text{C}$.
- $A \to B$, l'eau est comprimée de façon adiabatique et isentropique dans une pompe jusqu'à la pression $P_2 = 15\,\text{bar}$.
- $B \to C$, l'eau est injectée dans la chaudière et s'y réchauffe de manière isobare jusqu'à la température $T_2 = 200\,°\text{C}$, telle que $P_{\text{sat}}(T_2) = P_2$.
- $C \to D$, l'eau se vaporise entièrement à la température T_2.
- $D \to E$, la vapeur est admise dans le cylindre à T_2 et P_2 et effectue une détente adiabatique et isentropique jusqu'à la température T_1, on obtient un mélange liquide-vapeur
- $E \to A$, le piston chasse le mélange liquide-vapeur dans le condenseur où il se liquéfie totalement

On peut alors représenter le cycle de Rankine sur le diagramme enthalpique de l'eau Figure 4.

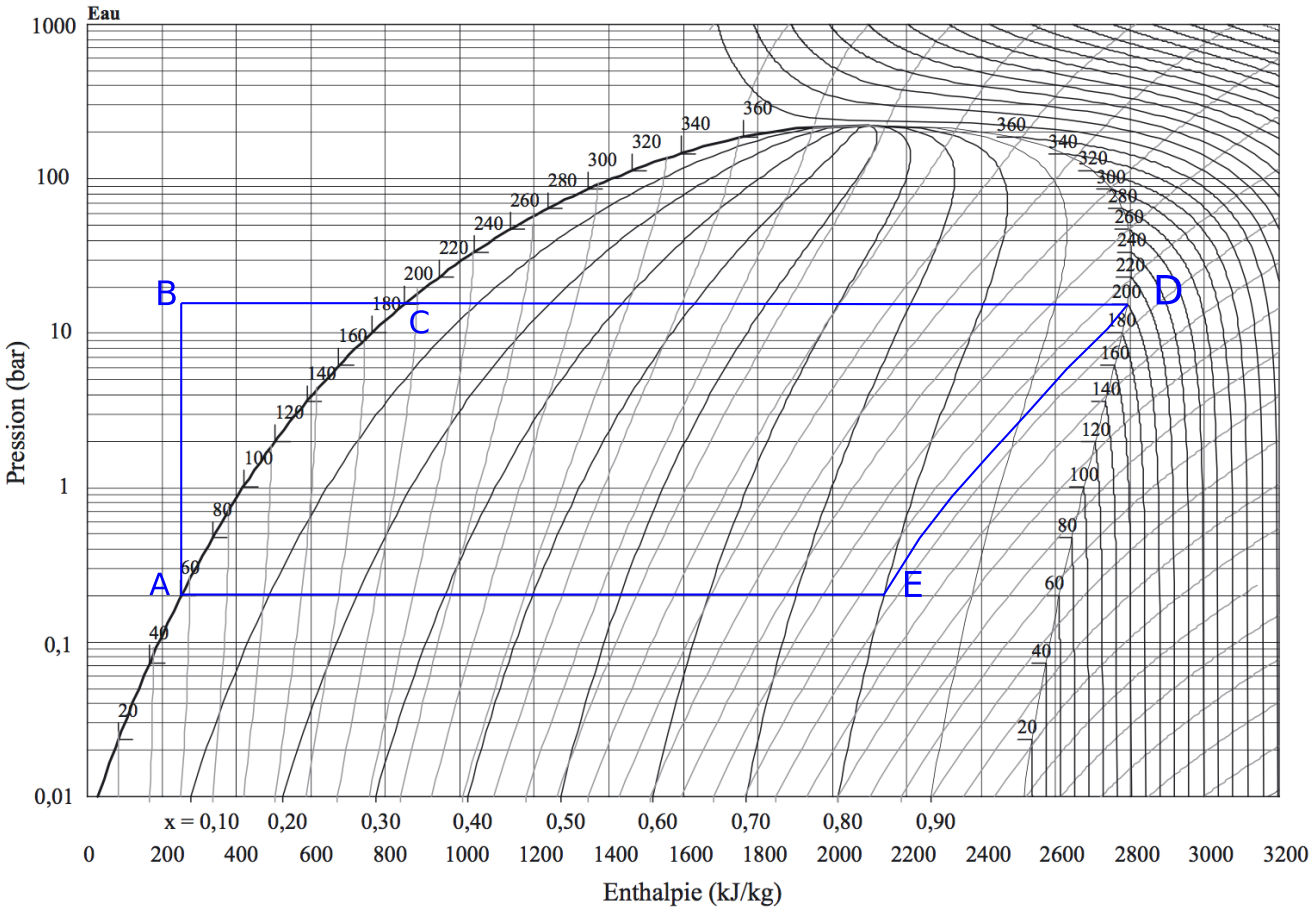

Fig. 4 : Diagramme enthalpique de l'eau et cycle de Rankine

On raisonne en grandeurs massiques, on note q la chaleur massique reçue par le fluide au cours d'une transformation. Au cours de toute transformation on pourra écrire

$$\Delta h = w + q \tag{3.1}$$

Avec w le travail autre que celui des forces de pression.

- $A \to B$ La compression est adiabatique donc $q_{AB} = 0$. On peut noter qu'elle est sans travail car isenthalpique.
- $B \to C$ Il n'y a pas de travail donc

$$h_C - h_B = q_{BC} \implies q_{BC} = 830 - 230 = 600\,\text{kJ kg}^{-1}. \tag{3.2}$$

- $C \to D$ Il n'y a pas de travail donc

$$h_D - h_C = q_{CD} \implies q_{CD} = 2800 - 830 = 1970\,\text{kJ kg}^{-1}. \tag{3.3}$$

- $D \to E$ La détente est adiabatique donc

$$h_E - h_D = w_{DE} \implies w_{DE} = 2150 - 2800 = -650\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}}. \tag{3.4}$$

  On remarque que $w_{DE} < 0$ c'est cette transformation qui fournit le travail moteur.

- $E \to A$ Il n'y a pas de travail utile

$$h_A - h_E = q_{EA} \implies q_{EA} = 230 - 2150 = -1920\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}}. \tag{3.5}$$

On peut alors calculer le rendement de ce cycle moteur comme pour une machine motrice

$$\eta = \frac{-w_u}{q_C}. \tag{3.6}$$

On a identifié $w_u = w_{DE}$ et on a $q_C = q_{BC} + q_{CD} = 2570\,\mathrm{kJ\,kg^{-1}}$ donc

$$\eta = 0.26. \tag{3.7}$$

On peut comparer ce rendement au rendement de Carnot :

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_c} = 1 - \frac{333}{573} = 0.42 \tag{3.8}$$

Le rendement est bien inférieur, ce moteur respecte le second principe. Cela est du à de l'irréversibilité dans le cycle. Les transformations $A \to B$ et $B \to E$ sont réversibles et les changements de phase se font à température constante donc de manière réversible. Seule la transformation $B \to C$ est irréversible, elle traduit un réchauffement du liquide à pression constante au contact d'une source chaude qui n'est pas à l'équilibre thermique avec le liquide à chauffer.

Conclusion

On a vu dans cette leçon l'importance de savoir décrire des machines thermiques réelles. En effet ce sont elles qui sont utilisées en pratique : le cycle de Rankine est utilisé pour fournir une partie non négligeable de l'électricité en France, le moteur Stirling est utilisé à des fins précises et on utilise tous les jours un réfrigérateur.

Il est aussi important de voir l'impact de ces machines sur l'environnement. Le développement technologique a notamment permis de bannir l'utilisation des CFC qui avaient un grave impact environnemental. La compréhension et l'utilisation des machines thermiques réelles est donc un enjeu important des prochaines années.

4 Questions et commentaires

4.1 Questions

-

4.2 Commentaires

-