

Variation des fonctions d'état sur un cycle

Variation des fonctions d'état sur un cycle

Les variations sur un cycle des *fonctions d'état* du système d'une machine thermique subissant des transformations *cycliques* sont *nulles*. On a donc :

$$W_{\odot} + \sum_i Q_i = 0 \quad \Delta S_{\odot} = 0$$

Moteur ou récepteur

Définition : Cycles moteurs/récepteurs

- Un cycle parcouru par un système thermodynamique \mathcal{S} (nommé *agent thermique* ou *fluide caloporteur*) est dit *moteur* si le travail total W_{\odot} reçu par \mathcal{S} au cours du cycle est *négatif* $W_{\odot} < 0$: le système \mathcal{S} *fournit* du travail *au milieu extérieur*.
- Il est récepteur si $W_{\odot} > 0$: le système \mathcal{S} *reçoit* du travail *du milieu extérieur*.

Types de machines

Définition : Types de machines

La machine thermique est un *moteur* si le *cycle est moteur*. Son rôle est de fournir du travail W à *l'extérieur*.

On distingue les machines à *cycle récepteur* suivant leur destination :

Fournir de l'énergie par transfert thermique Q à une source,

Prélever de l'énergie par transfert thermique Q d'une source.

Inégalité de Clausius

Au cours d'un cycle, les transferts thermiques Q_i reçus par l'agent thermique \mathcal{S} des sources aux températures stationnaires T_i vérifient l'*inégalité* de Clausius :

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = -S_{c,\odot} \leq 0,$$

l'*égalité* étant réalisée pour un cycle idéal *réversible*.

Machine monotherme

Définition : Machine monotherme

Une machine est dite *monotherme* si l'agent thermique \mathcal{S} ne reçoit qu'un seul transfert thermique Q_0 d'*une seule source* à la température T_0 .

Impossibilité du moteur monotherme

Une machine monotherme en fonctionnement cyclique est nécessairement un *récepteur cédant à l'extérieur*, sous forme de transfert thermique, l'intégralité de l'énergie qu'elle reçoit sous forme de travail.

Il est donc *impossible de réaliser un moteur monotherme* ; une machine thermique en fonctionnement cyclique doit utiliser *au minimum deux sources de transfert thermique* à des températures *différentes* pour avoir un comportement *moteur*.

Définition

Définition : Machine ditherme

Une machine est dite ditherme si l'agent thermique \mathcal{S} échange de l'énergie par transfert thermique avec deux sources à deux températures différentes $T_f < T_c$.

- T_f est la température de la source « froide » qui fournit Q_f à l'agent thermique \mathcal{S} ,
- T_c est la température de la source « chaude » qui fournit Q_c à l'agent thermique \mathcal{S} .

Diagramme de Raveau

Définition : Diagramme de Raveau

Le *diagramme de Raveau* d'une machine thermique ditherme en contact avec des sources à T_f et T_c est le régionnement du plan Q_f, Q_c par les deux droites $Q_c(Q_f)$ représentant :

- l'une la nullité du travail sur un cycle,
- l'autre la nullité de l'entropie créée sur un cycle

réversible.

Le *point de fonctionnement* du cycle est le couple Q_f, Q_c .

Moteur ditherme

Principe de Carnot

Pour décrire un cycle *moteur*, l'agent thermique d'une machine doit *recevoir*, par transfert thermique, de l'énergie d'une *source chaude* et en *fournir* à une *source froide*. Une partie de l'énergie thermique reçue ne pourra pas être convertie en travail moteur.

Récepteur utile

Définition : Récepteur utile

Un récepteur est dit *utile* s'il *inverse le sens spontané* des transferts thermiques. On a alors :

- $Q_f > 0$: la source *froide fournit* de l'énergie thermique à l'agent thermique,
- $Q_c < 0$; l'agent thermique *fournit* de l'énergie thermique à la *source chaude*.

Théorème de Carnot

Définition : Rendement d'un cycle moteur

Le rendement d'un cycle moteur ditherme est le rapport du travail fourni par cycle à *l'extérieur*, noté $-W_\odot$, et de l'énergie thermique fournie par cycle *au système* par la source chaude, notée Q_c :

$$r \equiv \frac{-W_\odot}{Q_c}.$$

Théorème : de Carnot

Le rendement d'un moteur ditherme est toujours inférieur au *rendement dit « de Carnot »*

$r_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$, l'*égalité* étant réalisée pour un fonctionnement *réversible*.

Réalisation : cycle de Carnot

Définition : Cycle de Carnot

Un cycle de Carnot est nécessairement un cycle *réversible* composé de deux *isothermes* et de deux *adiabatiques*.

Exercice : représentations d'un cycle de Carnot

Diagramme entropique

On représente l'évolution du fluide d'un moteur ditherme au cours d'un cycle de Carnot en coordonnées T, S (abscisse S , ordonnée T)

1. Montrer qu'il s'agit d'un rectangle.
2. Que représente le produit TdS pour une transformation réversible. En déduire une lecture graphique de $Q_c + Q_f$ sur le cycle.
3. En déduire le sens de parcours du cycle et une lecture graphique du travail $-W_\odot$ fourni.

Diagramme de Clapeyron

On représente maintenant dans les coordonnées de Clapeyron (P, V) le cycle de Carnot parcouru par un *gaz parfait*.

1. Rappeler les équations en coordonnées de Clapeyron de l'isotherme et de l'isentropique passant par P_1, V_1 en fonction de P_1, V_1 et γ , supposé constant.

- En déduire l'allure du cycle. On comparera les pentes d'une isotherme et d'une adiabatique réversible en un même point du diagramme.
- Dans quel sens doit-il être parcouru pour que le cycle soit moteur ? Déterminer une lecture graphique du travail $-W_{\Sigma}$ fourni par cycle.

Exercice : Turbine à gaz et cogénération

On considère une turbine produisant de l'énergie électrique à partir de la combustion de gaz naturel (principalement du méthane CH_4). On la modélise comme un moteur ditherme suivant un cycle de Carnot dont la température de la source chaude est celle dans la chambre de combustion $T_c = 1200^\circ\text{C}$ et celle de la source froide est celle des gaz d'échappements à $T_f = 15^\circ\text{C}$.

- Calculer l'efficacité de Carnot de cette machine. Quelle puissance thermique serait fournie à la source froide si la turbine fournit une puissance électrique de 100 kW ?
- Le cycle est en fait composé de deux isentropiques et de deux isobares. Tracer son allure en coordonnées T, s et en diagramme de Clapeyron. Est-ce un cycle de Carnot ? On mesure un rendement de $\rho = 0,3$. Commenter.
- On souhaite récupérer l'énergie thermique à la source froide pour alimenter, par *cogénération*, un système d'eau chaude sanitaire. Définir l'efficacité de l'installation globale et calculer sa valeur. Dépend-elle du caractère idéal du cycle ?

Exercice : Efficacité de récepteurs dithermes

Réfrigérateur

- Définir l'efficacité e_f d'un réfrigérateur.

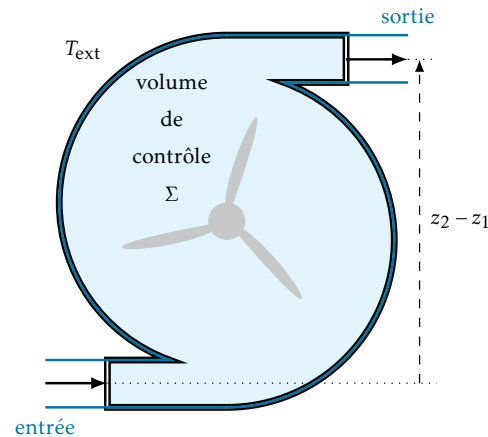
- Déterminer sa valeur maximale en fonction de T_c et T_f . A.N. pour les valeurs usuelles d'un réfrigérateur domestique.
- Peut-elle être supérieure à 1 ? Commenter. Peut-on par ailleurs atteindre une température nulle avec une telle machine ?

Pompe à chaleur

- Définir l'efficacité e_p d'une pompe à chaleur.

- Déterminer sa valeur maximale en fonction de T_c et T_f . A.N. pour les valeurs usuelles d'une pompe à chaleur domestique.
- Pourquoi est-elle supérieure à 1 ? Comparer à celle d'un simple radiateur électrique.

Présentation



Volume de contrôle

Définition : Volume de contrôle

Un *volume de contrôle*, noté Σ , est une zone de l'espace délimitée par une surface *fermée invariable*.

Débit de masse

Définition : Débit de masse

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit δm la masse de fluide traversant la section pendant une durée infinitésimale dt . On définit le *débit de masse*, noté D , à travers la section par :

$$D = \frac{\delta m}{dt}.$$

Machine en écoulement permanent

Définition : Écoulement permanent

Une machine thermique est en *écoulement permanent* (ou *stationnaire*) si les paramètres d'état du fluide et des différents organes en tout point sont *stationnaires*.

Expression**Premier principe industriel**

Pour un fluide dans un écoulement *stationnaire* :

- le débit massique est *uniforme*,
- le premier principe s'écrit, entre deux points de l'écoulement :

$$\Delta\left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right) = w_u + q,$$

avec :

- c et z respectivement la vitesse macroscopique et l'altitude du fluide aux points considérés, g l'accélération de la pesanteur
- w_u le travail massique dit *utile*, autre que celui exercé par le reste du fluide reçu par le fluide entre les deux points,
- q le transfert thermique massique reçu par le fluide entre les deux points.

Lexique

Compresseur augmente la pression d'un *gaz*, utilisé dans frigo/PAC et turbines à gaz

Pompe augmente la pression d'un *liquide* pour le faire circuler, utilisée dans la machine à vapeur

Vanne de détente robinet ou obstacle rencontré par le fluide pour diminuer sa pression

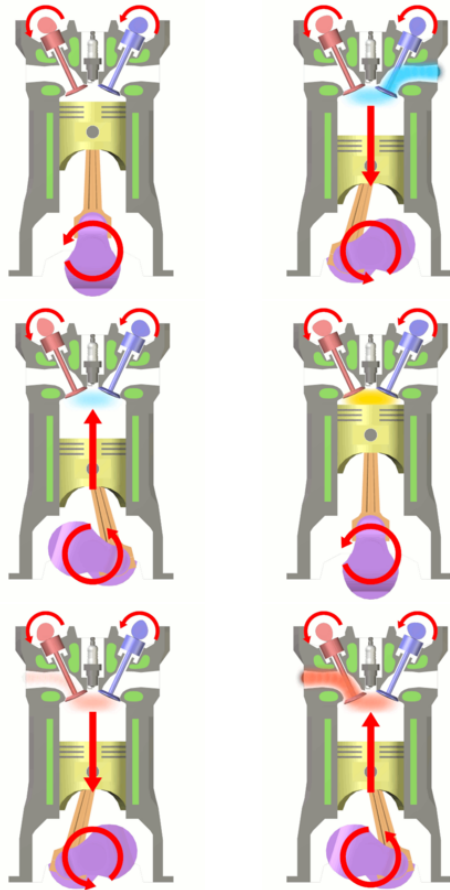
Turbine pièce mise en rotation par une vapeur, échange un *travail utile* avec le fluide. Dans les turboréacteurs ($w_u > 0$), les centrales électriques ($w_u < 0$).

Échangeur thermique variation de T par transfert thermique avec une source de chaleur ou un autre écoulement ; cas particuliers :

- *évaporateur* pour vaporiser un mélange liquide-vapeur dans frigo/PAC, *bouilleur* dans une machine à vapeur
- *condenseur* pour le liquéfier

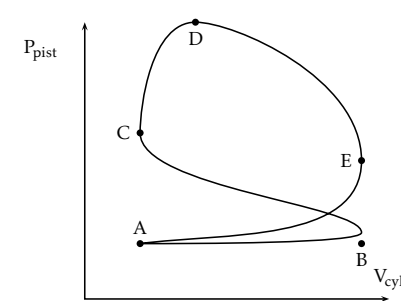
Organes caractéristiques

Réalisation : cycle de Beau de Rochas

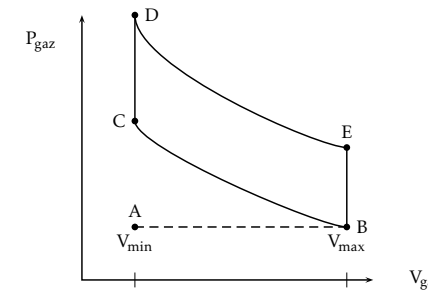


Modélisation et rendement

Machines thermiques



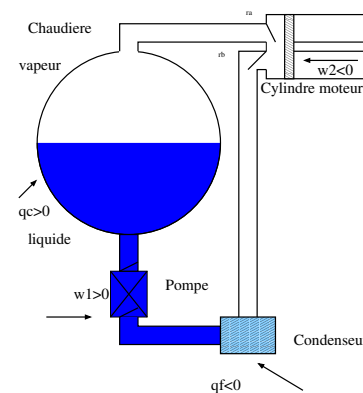
Allure du diagramme de Watt



Modélisation du cycle en coordonnées de Clapeyron

Cycle idéal

Le cycle de Beau de Rochas est un cycle *réversible* constitué de deux isochores et deux adiabatiques. Il est caractérisé par le *taux de compression* $\alpha = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$ assurant un rendement $r = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}$ pour un gaz parfait.

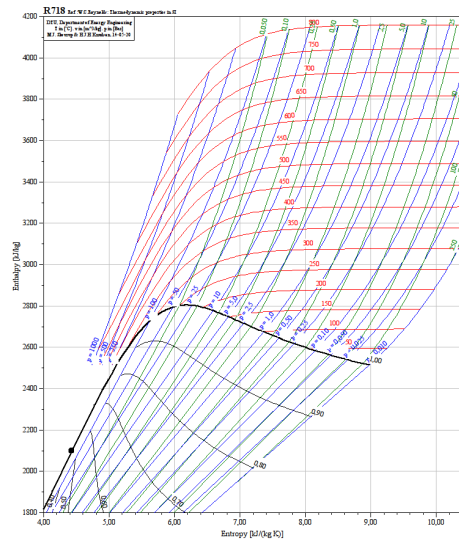
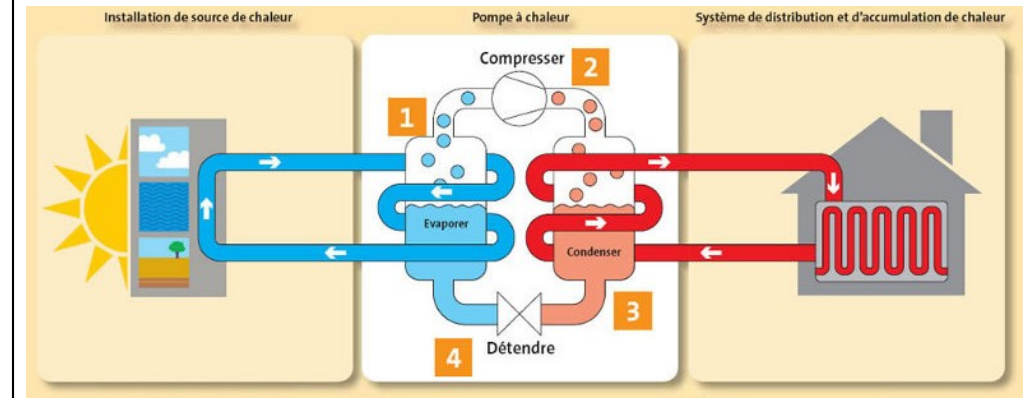
Machine à vapeur**Cycle de Rankine**

Définition : Cycle de Rankine

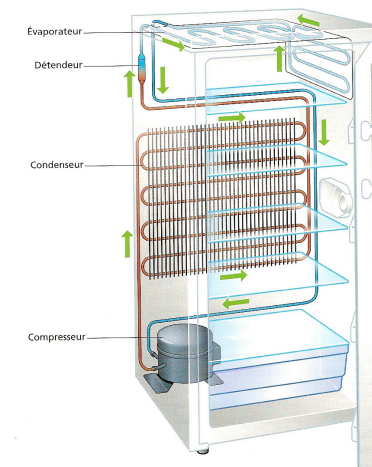
Un cycle de Rankine idéal est un cycle réversible composé de deux isobares et de deux adiabatiques. L'agent thermique est un corps pur diphasé (liquide/vapeur) dont la composition en liquide et vapeur évolue au cours du cycle.

le rendement s'exprime naturellement grâce à h :

$$r = \frac{-w}{q_{5 \rightarrow 2}} = \frac{q_{5 \rightarrow 2} + q_{3 \rightarrow 4}}{q_{5 \rightarrow 2}} = 1 - \frac{|q_{3 \rightarrow 4}|}{q_{5 \rightarrow 2}} = 1 - \frac{h_3 - h_4}{h_2 - h_5}$$

Diagramme enthalpique (de Mollier)**Réfrigérateur et pompe à chaleur**

Pompe à chaleur



Réfrigérateur