

## 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 *négligeable*  $W_{\odot} < 0$  : 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  $\gamma$ , 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  $\text{CH}_4$ ). 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

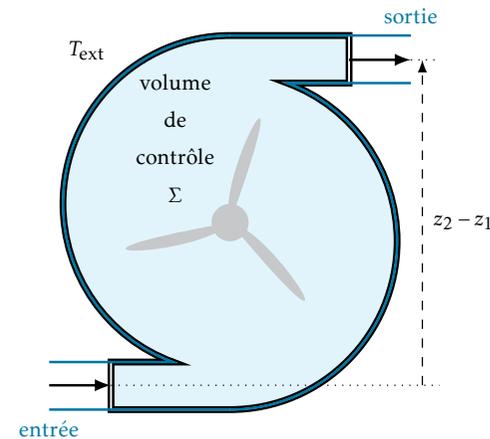
#### Réfrigérateur

- 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  $\Sigma$ , 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  $\delta m$  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

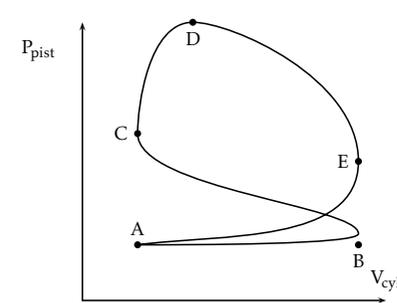
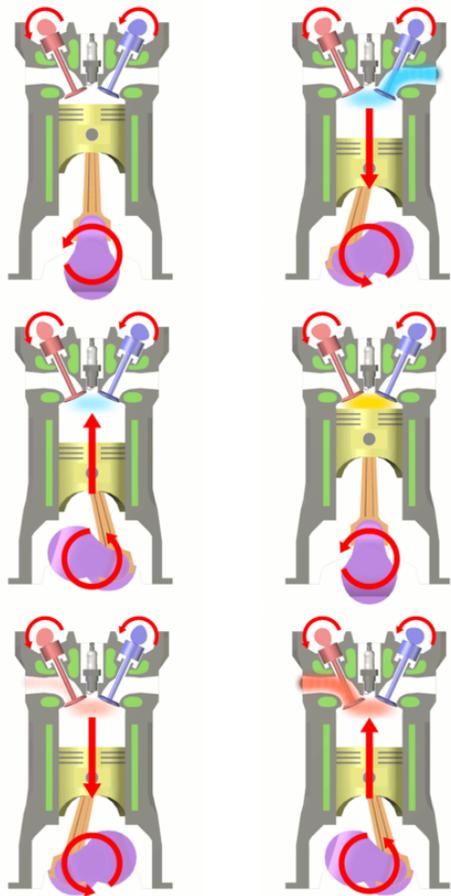
**Turbine** pièce mise en rotation par une vapeur, échange un *travail utile* avec le fluide. Dans les turboréacteurs ( $w_u > 0$ ), les centrales électriques ( $w_u < 0$ ).

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

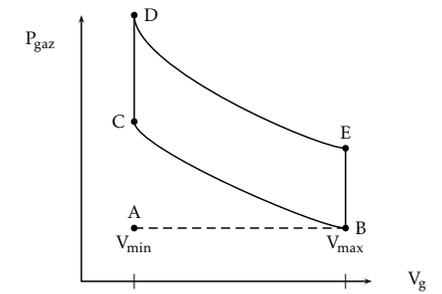
- *évaporateur* pour vaporiser un mélange liquide-vapeur dans frigo/PAC, *bouilleur* dans une machine à vapeur
- *condenseur* pour le liquéfier

**Organes caractéristiques**

Réalisation : cycle de Beau de Rochas



Allure du diagramme de Watt



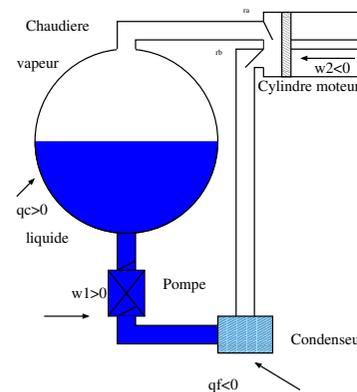
Modélisation du cycle en coordonnées de Clapeyron

**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.

**Modélisation et rendement**

**Machine à vapeur**



**Cycle de Rankine**

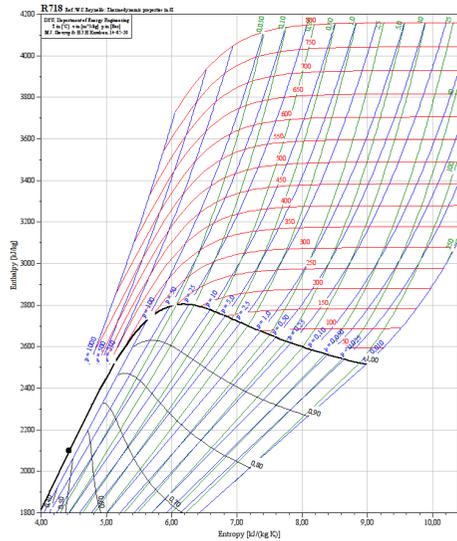
**Définition : Cycle de Rankine**

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.

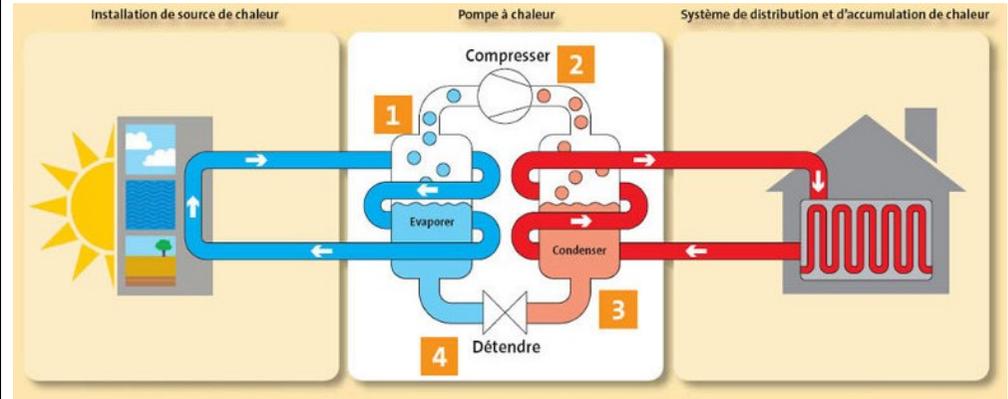
le rendement s'exprime naturellement grâce à  $h$  :

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

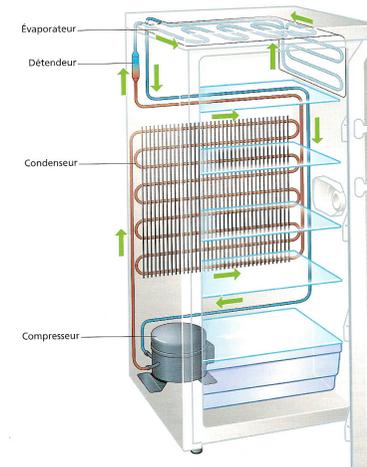
**Diagramme enthalpique (de Mollier)**



**Réfrigérateur et pompe à chaleur**



Pompe à chaleur



Réfrigérateur