

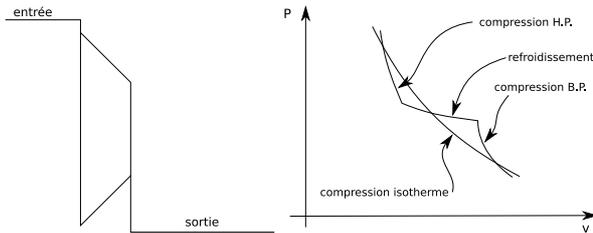
THERMODYNAMIQUE INDUSTRIELLE

1 Quelques dispositifs élémentaires

1.1 Présentation générale

Les dispositifs industriels ont pour but de produire de la chaleur, du froid ou de l'énergie mécanique. Ce sont des assemblages de dispositifs élémentaires, ils fonctionnent par cycles. Les dispositifs élémentaires sont des machines à transvasement, chacun est spécialisé dans la production d'une grandeur précise (q, w_i).

1.2 Compresseur



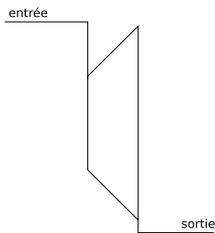
On s'intéresse aux compresseurs à aubages : une roue à aubages tournant autour d'un arbre impose au gaz un écoulement axial ou radial qui le comprime. On fera en général les approximations suivantes :

- le gaz séjourne peu de temps dans le compresseur \Rightarrow fonctionnement adiabatique.
- $\Delta e_p \simeq 0$
- $\Delta e_c \simeq 0$

Le premier principe appliqué entre l'entrée et la sortie donnera : $\Delta h = w_i > 0$

Remarque : une compression optimale serait isotherme, on l'approche par une succession de compressions adiabatiques séparées par des refroidissements : compression étagée.

1.3 Turbine



C'est un dispositif permettant d'obtenir de l'énergie mécanique ($w_i < 0$) grâce à la mise en rotation d'un système arbre+aubes entraîné par un fluide. On distingue les turbines suivantes :

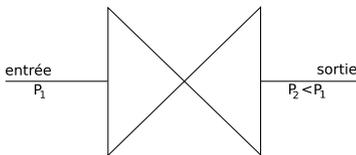
- turbines à gaz : détente du gaz à haute température et haute pression.
- turbines hydrauliques (types Kaplan, Pelton, Francis) : température ordinaire, entraînement par un flux d'eau.

Caractéristiques : fonctionnement adiabatique, $\Delta e_p \simeq \Delta e_c \simeq 0$ Le premier principe appliqué entre l'entrée et la sortie donnera : $\Delta h = w_i < 0$

Remarque : il existe des turbines étagées.

1.4 Laminage

Écoulement d'un fluide dans un conduit à parois fixes permettant la détente du fluide à travers un obstacle (c'est une détente de Joule-Thomson). On le réalise par passage à travers un passage à travers un poreux ou une vanne à pointeau.



Propriétés : $w_i = 0, \Delta e_p \simeq \Delta e_c \simeq 0$ Le premier principe appliqué entre l'entrée et la sortie donnera : $\Delta h = q$ ($\Delta h = 0$ si le dispositif est calorifugé).

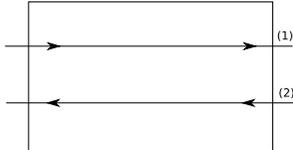
La détente est irréversible. On l'utilise dans des systèmes de refroidissement.

1.5 Échangeur thermique

Dispositif statique ($w_i = 0$), sans échange de matière permettant un échange thermique entre 2 fluides par conduction thermique.

- Les 2 fluides circulent à contre-courant.
- Le transfert thermique est favorisé par de grandes surfaces d'échange thermique.
- Gammes d'utilisation : fluides monophasiques ou changement d'état : vaporisation (évaporateur) ou condensation (condenseur).

Propriétés : $w_i = 0$, $\Delta e_p \simeq \Delta e_c \simeq 0$ Le premier principe appliqué entre l'entrée et la sortie donnera : $\Delta h = q \neq 0$ mais la totalité du dispositif est en général calorifugé, et on aura dans ce cas : $\frac{q_2}{q_1} = -\frac{D_{m_1}}{D_{m_2}}$. Si le fonctionnement est réversible, alors l'échangeur est isobare.



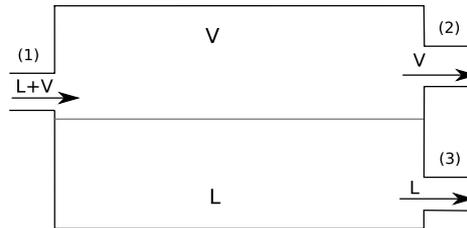
1.6 Mélangeur ou séparateur

C'est une enceinte calorifugée à n entrées et p sorties, à l'intérieur de laquelle divers fluides sont mélangés. On aura :

$$\sum_{\text{entrées}} D_{m_i}^e h_i^e = \sum_{\text{sorties}} D_{m_j}^s h_j^s$$

Un mélangeur possède plusieurs entrées et une sortie.

Un séparateur a 1 entrée et 2 sorties : pour des installations diphasiques : $D_{m_1} h_1 = D_{m_2} h_2 + D_{m_3} h_3$



1.7 Autres dispositifs

Tuyère : conduit fixe, profilé (convergent ou divergent), permettant au fluide d'acquérir de l'énergie cinétique aux dépens de sa pression ou de sa température. $w_i = 0$, $\Delta e_p \simeq 0$ Le premier principe appliqué entre l'entrée et la sortie donnera : $\Delta h + \Delta e_c = q$. Selon le type de fonctionnement (adiabatique, isotherme), l'un ou l'autre des termes peut être dominant.

Chambre de combustion : Enceinte dans laquelle est produite de la chaleur par réaction exothermique d'un combustible et d'un comburant (air). Des gaz de combustion sont produits, on considère généralement qu'il ont les mêmes propriétés que le comburant.

2 Machines cycliques dithermes

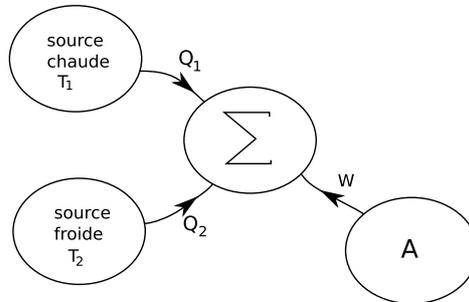
2.1 Application des deux principes

2.1.1 Autres énoncés du second principe

Kelvin : il n'existe pas de machine cyclique produisant du travail à partir d'une seule source de chaleur (pas de moteur cyclique monotherme).

Clausius : il n'existe pas de machine cyclique dont le seul effet serait de transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude (pas de réfrigérateur spontané).

Définition : machine cyclique ditherme : machine (Σ) fonctionnant par cycles, échangeant de la chaleur avec une source froide (température T_2) et une source chaude (température T_1 , $T_1 > T_2$), et recevant du travail W de l'extérieur. W , Q_1 et Q_2 sont algébriquement reçues par Σ . A est un système mécaniquement parfait, ses échanges avec Σ sont parfaits. T_1 et T_2 sont des thermostats, leurs échanges avec Σ sont isothermes.



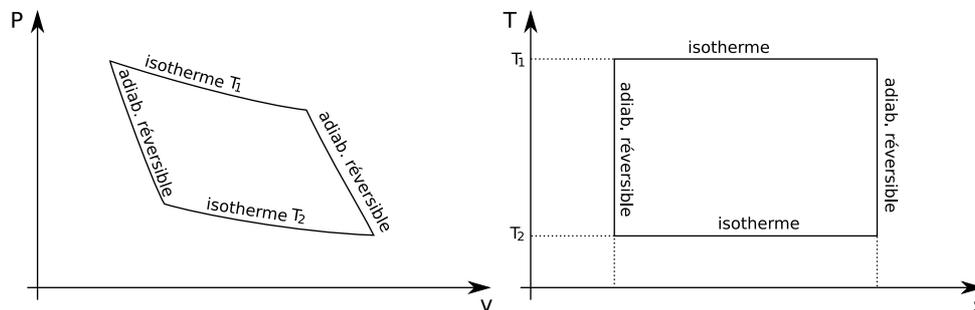
Application des deux principes :

- 1^{er} principe appliqué à Σ pendant un cycle : $W + Q_1 + Q_2 = 0$
- 2nd principe appliqué à Σ pendant un cycle : $\Delta S_{\text{cycle}} = S_e + S_c = 0$; $S_c \geq 0$ (= 0 si réversible), ce qui donne :

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0 \begin{cases} \text{égalité de Clausius si le cycle est réversible} \\ \text{inégalité de Carnot si le cycle est irréversible} \end{cases}$$

Cycle de Carnot : c'est un cycle réversible ditherme, il est composé de 2 isothermes et 2 adiabatiques réversibles.

Pour un cycle de Carnot : $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$



2.2 Machines motrices : généralités

Définition : une machine motrice fournit du travail $\Rightarrow W < 0$. On montre que dans ce cas, $Q_1 > 0$ et $Q_2 < 0$: la machine fournit du travail en refroidissant la source chaude et réchauffant la source froide.

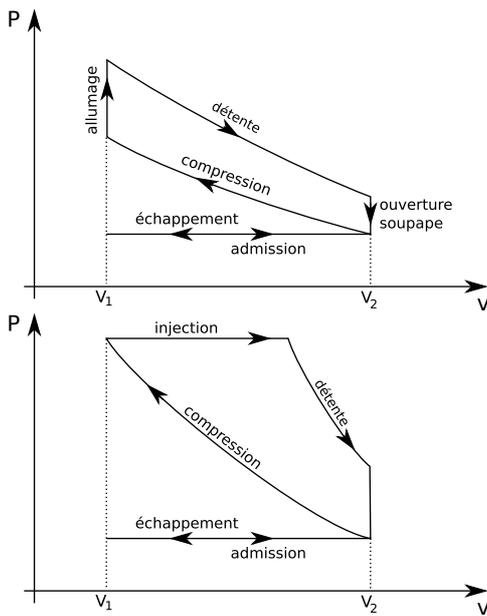
Rendement : On définit le rendement d'une machine par :

$$\eta = \frac{\text{ce que l'on veut}}{\text{ce que cela coûte}} \quad \text{ici, } \eta = \frac{-W}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

Théorème de Carnot : le rendement d'un moteur cyclique ditherme est maximal si le cycle est réversible et ce rendement maximal vaut $\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$.

2.3 Moteurs à explosion

C'est un moteur à combustion interne. La chaleur provient de l'explosion exothermique du combustible. Cette explosion entraîne le piston, et la rotation du moteur.



Cycle Beau de Rochas : cycle 4 temps, fonctionnant avec un mélange air+essence allumé par une bougie. Le cycle est composé de 2 isochores et 2 adiabatiques. Il est principalement caractérisé par un taux volumique de compression : $\tau = \frac{V_2}{V_1}$

Cycle diesel : composé d'une isobare, une isochore et deux adiabatiques. L'allumage est spontané, à l'injection. Le cycle diesel autorise des taux de compression plus importants.

2.4 Réfrigérateurs et pompes à chaleur

Le but d'une machine frigorifique est d'avoir $Q_2 > 0$. Pour une pompe à chaleur, on veut $Q_1 < 0$. On montre que les deux sont équivalents, et que l'on aura nécessairement $W > 0$. La machine reçoit du travail pour refroidir la source froide et réchauffer la source chaude.

Efficacité d'un réfrigérateur : $\varepsilon = \frac{Q_2}{W} > 0$. On montre que $\varepsilon \leq \frac{T_2}{T_1 - T_2}$ (égalité si réversible).

Coefficient de performance d'une pompe à chaleur : $C_{op} \geq 0$ $C_{op} = \frac{-Q_1}{W} \leq \frac{T_1}{T_1 - T_2}$

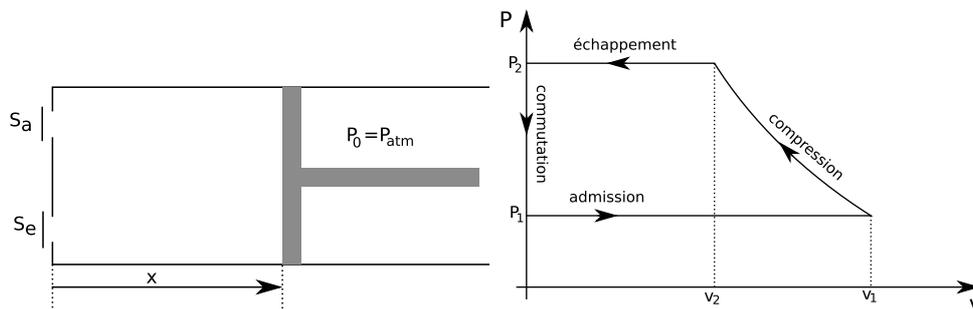
3 Compresseur à piston

3.1 Description du cycle

But : produire de l'air comprimé.

S_a : soupape d'admission. Met le cylindre en communication avec le réservoir de gaz à P_1 .

S_e : soupape d'échappement, s'ouvre après compression du gaz de la pression P_1 à la pression $P_2 > P_1$, met le cylindre en communication avec le gaz P_2 . On cherche à étudier le travail à fournir au gaz pour un cycle. Le gaz subit un cycle admission, compression, échappement, commutation (permutation des ouvertures des soupapes).



3.2 Calcul des travaux

On suppose toutes les transformations mécaniquement réversibles.

$$W_{adm} = \int_{adm} -PdV = -P_1 V_1 \quad W_{comp} = - \int_{V_1}^{V_2} PdV \quad W_{ech} = P_2 V_2 \quad W_{com} = 0$$

Sur un cycle, $W_{cycle} = - \int_{P_1}^{P_2} v dP =$ travail à fournir pour transvaser une certaine quantité de gaz d'un réservoir à la pression P_1 vers un réservoir à la pression P_2 .

3.3 Travail de transvasement

De façon générale, lorsqu'un fluide subit une transformation d'un état 1 à un état 2, on appellera *travail de transvasement* la grandeur :

$$W_t = \int_{(1)}^{(2)} V dP$$

Cas du compresseur à piston :

- La transformation est effectivement un transvasement
- Travail fourni par le piston sur un cycle : W_t . C'est aussi le travail indiqué.

Travail massique de transvasement : $w_t = \int_{(1)}^{(2)} v dP$

3.4 Propriétés du travail de transvasement

On s'intéresse à des machines à transvasement (systèmes ouverts).

Compresseur à aubages : la combinaison du 1^{er} et du 2nd principe entre l'entrée et la sortie donne : $w_i \geq w_t$. Dans le cas du compresseur à aubages, le travail de transvasement correspond au travail minimal à fournir au gaz. Il est atteint pour une transformation réversible.

Turbine à aubages : de même, on aura $w_i \geq w_t$.

Le travail maximal récupérable est $|w_i|$. $w_{rec} = -w_i \leq -w_t$

4 Exemples d'installations

4.1 Rendement

De façon générale, le rendement se définit par le rapport : $\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}} \geq 0$

4.1.1 Installation motrice

Énergie utile : travail mécanique récupéré. Une partie du travail fourni par le gaz pendant la phase motrice peut être réutilisé \Rightarrow énergie utile = W_{cycle}

Coût : énergie thermique reçue par le fluide durant la phase de combustion.

4.1.2 Installation de réfrigération

Énergie utile : énergie thermique reçue par le fluide (> 0) lors de la phase de réchauffage ou de vaporisation.

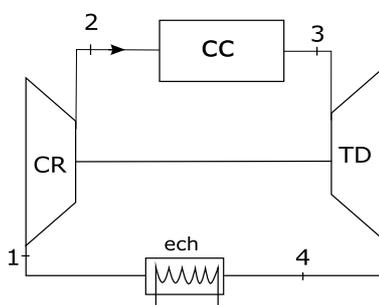
Coût : énergie mécanique/électrique reçue par le fluide au cours d'un cycle.

4.1.3 Installation de chauffage

Énergie utile : énergie thermique fournie par le fluide lors de la phase de refroidissement/condensation.

Coût : énergie mécanique/électrique reçue par le fluide au cours d'un cycle.

4.2 Installation motrice monophasique

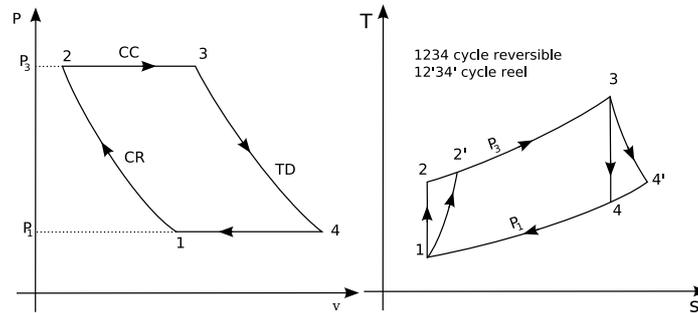


Cycle de Joule : turbine à gaz.

Un fluide subit un cycle dans un moteur composé d'un compresseur rotatif (CR), une chambre de combustion (CC), une turbine de détente (TD) et un échangeur isobare. En appliquant le 1^{er} principe avec les hypothèses habituelles sur les composants :

$$\Delta h_{12} = w_{i12} \quad \Delta h_{34} = w_{i34} \quad \Delta h_{23} = q_{23}$$

$$\eta = \frac{-\Delta h_{34} + \Delta h_{12}}{\Delta h_{23}} \quad \text{en supposant que le gaz est parfait : } \eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

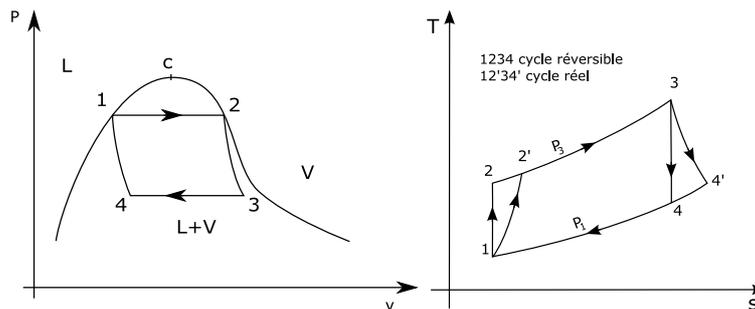


Le cycle est idéal si les transformations 1 → 2 et 3 → 4 sont isentropiques. Dans ce cas :

$$\eta_{\text{idéal}} = 1 - \frac{1}{\tau^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad \text{avec } \tau = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1}{V_2}$$

4.3 Installation motrice diphasique

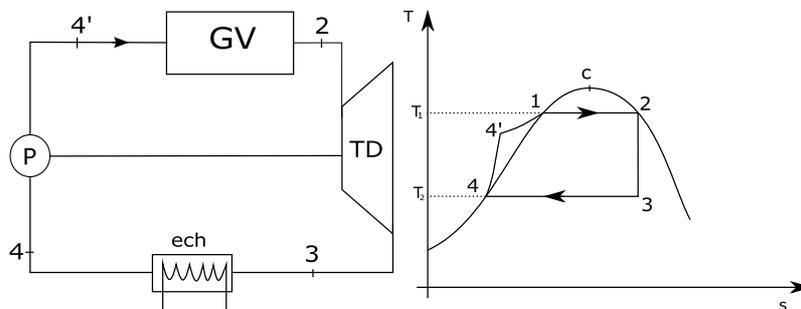
Cycle de Carnot : cycle permettant d'obtenir le rendement de Carnot, composé de 2 isothermes et de 2 adiabatiques réversibles. Diagrammes dans le cas d'une installation diphasique :



Ce cycle pose plusieurs problèmes :

1. L'isentropique 4 → 1 est difficile à réaliser avec des fluides diphasiques.
2. Durant la phase 3 → 4, il est difficile d'atteindre exactement le point 4.
3. Détente 2 → 3 : les gouttes de liquide sont très corrosives sur la turbine.

Cycle de Rankine : il a pour but de corriger les problèmes 1 et 2. La condensation 3 → 4 est totale. On rajoute un étape 4' : la transformation 4 → 4' est une compression par une pompe (travail de compression négligeable car liquide). Le point 4' est très proche de la courbe d'ébullition.



Cycle de Hirn : ce cycle propose, pour résoudre le problème 3, de faire la détente $2 \rightarrow 3$ uniquement en phase gazeuse. Pour cela, on réchauffe le fluide après vaporisation (surchauffe). Le rendement est meilleur que celui du cycle de Rankine. On peut éventuellement rajouter des surchauffes successives.

