

Connaissances de base

Cycles

Les **cycles thermodynamiques** sont utilisés dans le domaine technique pour décrire la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique et inversement.

Lors de ce procédé, un fluide passe périodiquement par différentes **transformations d'état** telles que la compression et l'expansion, l'évaporation et la condensation ou le chauffage et le refroidissement. Lors d'un cycle, le fluide revient toujours à son état de départ après être passé par les différentes transformations d'état; il peut donc être de nouveau utilisé.

On peut utiliser comme fluides aussi bien des matières qui restent en permanence à l'état gazeux telles que l'air ou l'hélium, ou des matières dont l'état d'agrégation change pendant

le cycle (changement de phase) comme l'eau, l'ammoniaque, les hydrocarbures fluorés ou le CO₂.

Étant donné qu'un changement de phase convertit nettement plus d'énergie qu'un simple chauffage ou refroidissement, les procédés avec transformation de phase offrent une densité d'énergie plus élevée et requièrent des différentiels de température moindres.

Les cycles peuvent être utilisés dans les machines motrices ou les machines réceptrices. Les machines motrices transforment l'énergie thermique en énergie mécanique, p. ex. dans une centrale électrique à vapeur. Dans les machines réceptrices, on apporte de l'énergie mécanique qui est transformée en énergie thermique, p. ex. dans une installation frigorifique à compression.

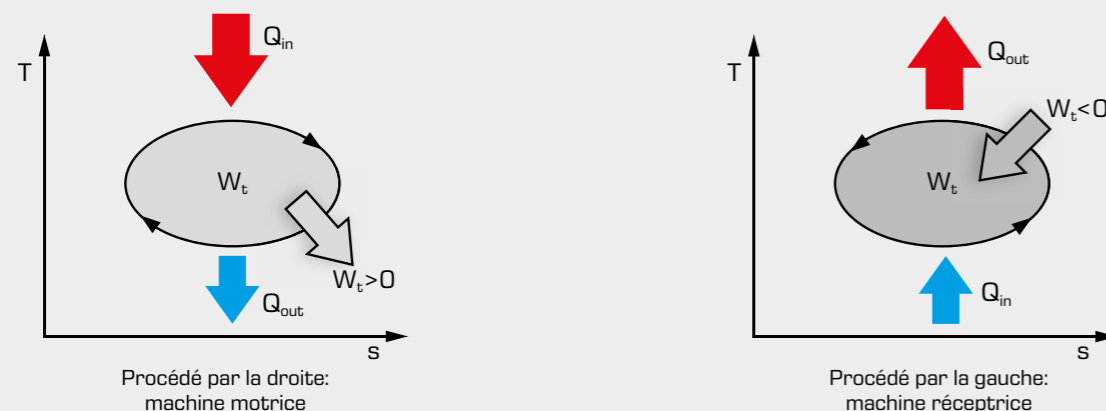
Représentation des cycles dans des diagrammes d'état

On peut représenter de manière claire un cycle thermodynamique dans ce que l'on appelle des diagrammes d'état. Les diagrammes d'état les plus fréquemment utilisés sont les suivants:

- **diagramme p,v:** pression **p** en fonction d'un volume spécifique **v**, adapté à la représentation de la puissance mécanique. Il est souvent utilisé pour les compresseurs à piston alternatif et les moteurs à combustion interne avec un fluide de travail purement gazeux. Les procédés cycliques peuvent ici bien être observés, étant donné qu'il existe un rapport fixe entre la modification du volume et le temps. La surface circonscrite donne une mesure du travail mécanique accompli, c'est ce que l'on appelle le travail utile technique.
- **diagramme h,s:** enthalpie **h** en fonction de l'entropie **s**, pour la représentation des procédés dans des turbines à vapeur. Il est utilisé pour la vapeur d'eau et sert d'outil pour le dimensionnement des turbines à vapeur.
- **diagramme log p,h:** représentation logarithmique de la pression **p** en fonction de l'enthalpie spécifique **h**; il est particulièrement bien adapté aux procédés de refroidissement en

génie frigorifique, étant donné qu'on peut lire ici directement sur le diagramme les flux thermiques qui sont représentés sous la forme de sections horizontales. Pour l'échelle de pression verticale, on utilise une division logarithmique, car elle permet d'obtenir une bonne représentation des courbes limites de phases.

- **diagramme T,s:** température **T** en fonction de l'entropie **s**, adapté à la représentation des relations thermodynamiques. Le sens de rotation du cycle indique s'il s'agit d'une machine motrice ou d'une machine réceptrice. Le **procédé par la droite** (sens des aiguilles d'une montre) indique qu'il s'agit d'une machine motrice, le **procédé par la gauche** (dans le sens antihoraire) qu'il s'agit d'une machine réceptrice. Dans le procédé par la droite, de la chaleur est absorbée à un niveau élevé de température, et libérée à une température basse. Dans le procédé par la gauche, de la chaleur est absorbée à une température basse, et libérée à une température élevée. Le procédé entraîné par la gauche est donc adapté à la pompe à chaleur ou à la machine frigorifique. La surface circonscrite donne une mesure du travail utile technique, comme c'est également le cas dans le diagramme p,v.



W_t travail utile technique, Q énergie thermique, T température, s entropie

Exemples de cycles thermodynamiques

Type	Machine motrice/ réceptrice	Fluide de travail	État d'agrégation
centrale électrique à vapeur	machine motrice	eau	liquide-gazeux
moteur à combustion interne	machine motrice	air/gaz de combustion	gazeux
turbine à gaz	machine motrice	air/gaz de combustion	gazeux
moteur Stirling	machine motrice	air, hélium	gazeux
centrale électrique ORC (Organic Rankine Cycle)	machine motrice	hydrocarbures fluorés, hydrocarbures	liquide-gazeux
machine frigorifique	machine réceptrice	hydrocarbures fluorés, hydrocarbures, ammoniaque, etc.	liquide-gazeux
machine frigorifique Stirling	machine réceptrice	air, hélium	gazeux

Quelques cycles intéressants sur le plan technique sont présentés ci-après avec leurs diagrammes.

Le cycle de Carnot

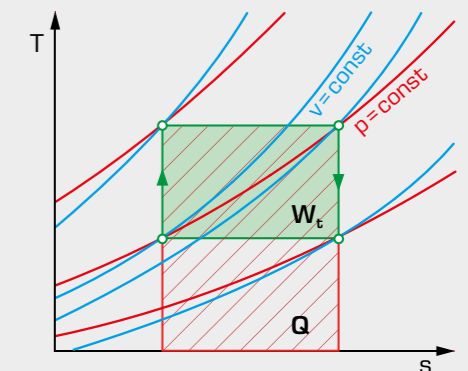
Dans le diagramme T,s, le cycle de Carnot forme un rectangle. La surface du rectangle donne une mesure du travail utile technique W_t . La surface entre la température zéro et la température de procédé maximale donne la mesure de l'énergie thermique utilisée Q . Elle permet de calculer le rendement η du cycle de Carnot:

$$\eta = \frac{W_t}{Q} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}}$$

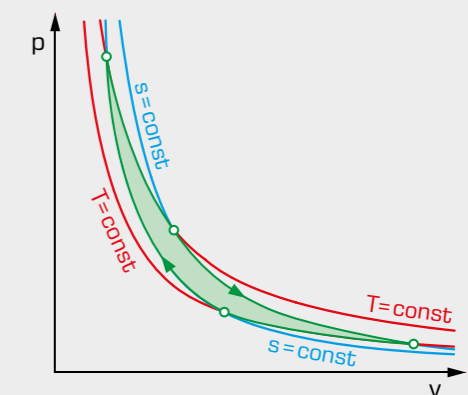
Le rendement maximum d'un cycle thermodynamique dépend donc uniquement des températures maximales et minimales absolues T_{\max} , T_{\min} . Le cycle de Carnot renseigne ainsi sur la qualité d'un cycle technique quel qu'il soit. On remarque également que tout cycle thermodynamique a besoin d'un différentiel de température pour pouvoir accomplir du travail. Le rendement du cycle de Carnot est le rendement théorique maximal possible d'un cycle.

Les transformations d'état requises pour le cycle de Carnot telles que la compression ou l'expansion isotherme et isentropique sont très difficiles à réaliser d'un point de vue technique. C'est pourquoi ce cycle, malgré son rendement élevé, n'est intéressant que d'un point de vue théorique.

Un autre inconvénient important du cycle de Carnot est représenté dans le diagramme p,v ci-contre. Malgré des différentiels de pression et de volume importants, la superficie du diagramme et donc le travail mécanique accompli sont très faibles. Ce qui signifie que la réalisation du cycle de Carnot donne une machine imposante, lourde et de faible puissance.



Cycle de Carnot dans le diagramme T,s



Cycle de Carnot dans le diagramme p,v

W_t travail utile technique, Q énergie thermique, T température, p pression, v volume spécifique, s entropie

Connaissances de base
Cycles

Centrale thermique à vapeur

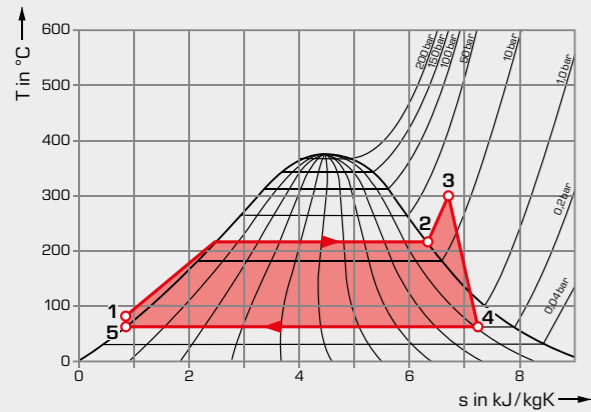


Diagramme T,s de la centrale thermique à vapeur

Le diagramme T,s montre le cycle de Clausius-Rankine d'une centrale thermique à vapeur. Le fluide de travail est l'eau ou la vapeur d'eau.

- 1 – 2 l'eau subit un chauffage **isobare** dans une chaudière à une pression de chaudière de 22 bar et s'évapore
- 2 – 3 surchauffage **isobare** de la vapeur à 300°C
- 3 – 4 la vapeur subit une expansion **polytropique** dans la turbine à vapeur et passe à une pression de 0,2 bar, ce qui libère de l'énergie mécanique
- Point 4 zone de vapeur humide: le titre de la vapeur n'est plus que de 90%
- 4 – 5 condensation de la vapeur
- 5 – 1 augmentation de la pression sur la pression de chaudière par la pompe à condensat et à eau d'alimentation, le cycle est bouclé

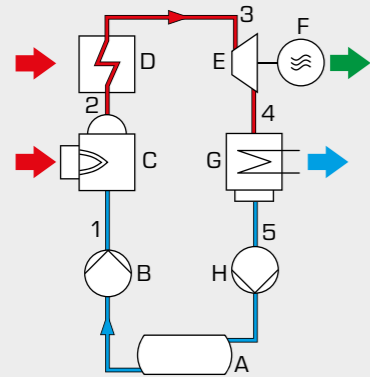


Schéma de processus de la centrale thermique à vapeur

A réservoir d'eau d'alimentation, B pompe à eau d'alimentation, C chaudière, D surchauffeur, E turbine à vapeur, F générateur, G condenseur, H pompe à condensat;

- énergie thermique, température basse,
- énergie thermique, température élevée,
- énergie mécanique / électrique

Installation de turbine à gaz

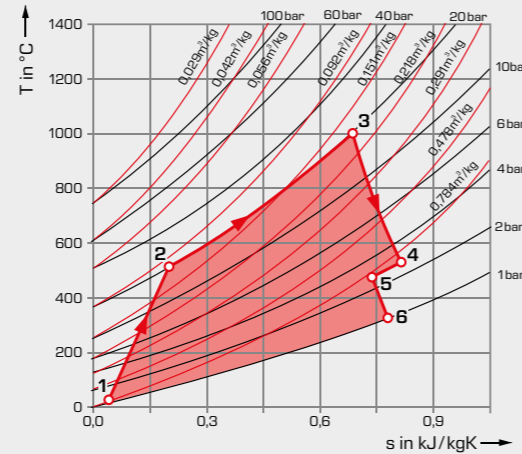


Diagramme T,s de l'installation de turbine à gaz

Le diagramme T,s montre un cycle de turbine à gaz avec expansion à deux étages dans un agencement à deux lignes d'arbres.

- 1 – 2 l'air subit une compression **polytropique** à une pression de 20bar; l'air a une température de 500°C à la sortie du compresseur
- 2 – 3 chauffage **isobare** de l'air à la température d'entrée de la turbine haute pression de 1000°C par injection et combustion de combustible
- 3 – 4 détente **polytropique** dans la turbine haute pression, qui entraîne le compresseur
- Point 5 le gaz subit un refroidissement **isobare** dans le passage qui mène à la turbine de puissance
- 5 – 6 la seconde détente dans la turbine de puissance: le gaz d'échappement usagé se détend et n'est pas reconduit dans le cycle; c'est pourquoi on parle de turbine à gaz à cycle ouvert; la chaleur de processus est ici libérée dans l'environnement

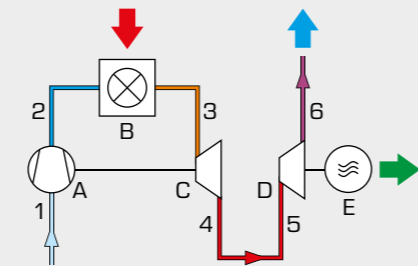


Schéma de processus de l'installation de turbine à gaz

A compresseur, B chambre de combustion, C turbine haute pression, D turbine de puissance, E générateur;

- énergie thermique, température basse,
- énergie thermique, température élevée,
- gaz d'échappement, ■ énergie mécanique / électrique

Moteur à combustion interne

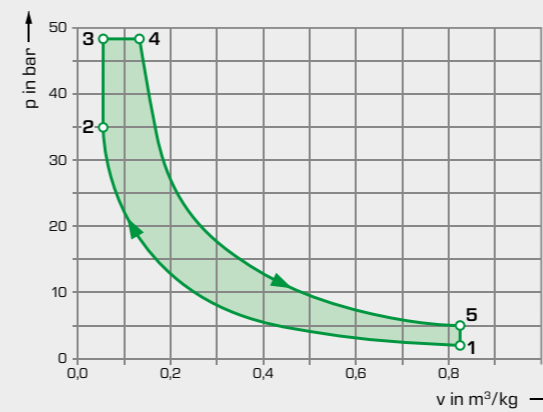


Diagramme p,v du moteur à combustion interne

Le diagramme p,v montre le cycle de Seiliger d'un moteur à combustion interne. Sur le moteur à combustion interne, toutes les transformations d'état ont lieu tour à tour dans la même chambre, celle du cylindre.

- 1 – 2 le gaz subit une compression **polytropique**
- Point 2 allumage suivi de la combustion du carburant

Division idéalisée de la combustion en:
 2 – 3 part **isochore** de la combustion
 3 – 4 part **isobare** de la combustion

- 4 – 5 expansion polytropique (**isentropique**) avec rendement effectif
- 5 – 1 détente **isochore** et changement de charge

Sur le moteur à 2 temps, cela a lieu sans course supplémentaire, sur le moteur à 4 temps, cela est suivi d'une course d'échappement et d'aspiration. Tout comme celui de la turbine à gaz, le cycle de Seiliger est un cycle ouvert.

Le cycle de Seiliger est un cycle de comparaison ou un cycle idéal basé sur l'hypothèse d'un moteur idéal. Le processus de travail réel est représenté dans le diagramme d'indicateur.

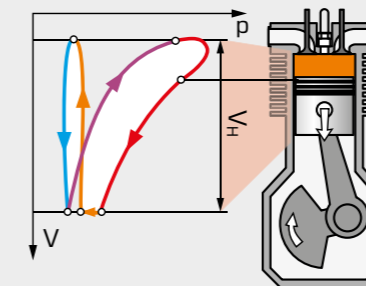


Diagramme d'indicateur d'un moteur à 4 temps

- p pression, V volume, V_H cylindrée;
- aspiration, ■ compression, ■ travail, ■ expulsion

Installation frigorifique

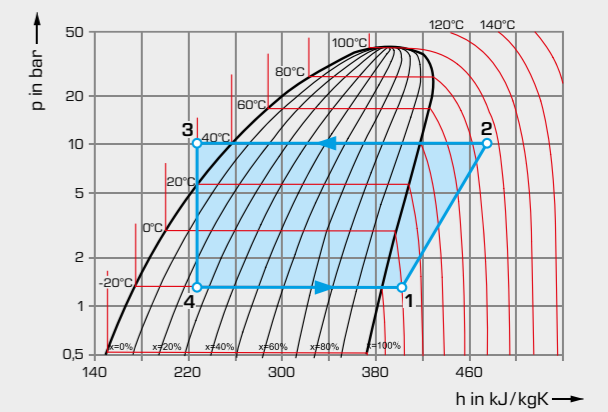


Diagramme log p,h d'une installation frigorifique

Ce diagramme log p,h représente un cycle frigorifique. Le fluide de travail est l'agent réfrigérant R134a, hydrocarbure fluoré.

- 1 – 2 compression **polytropique**
- 2 – 3 refroidissement **isobare** et condensation avec libération de chaleur
- 3 – 4 détente **isenthalpique** à la pression d'évaporation
- 4 – 1 évaporation **isobare** avec absorption de chaleur

Après une certaine surchauffe de la vapeur d'agent réfrigérant, cette dernière est à nouveau aspirée et comprimée par le compresseur au point 1. Le cycle est ainsi bouclé.

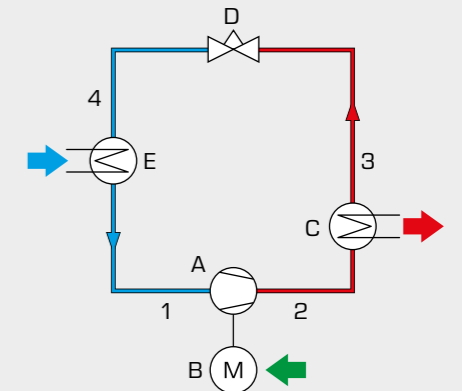


Schéma de processus de l'installation frigorifique

A compresseur, B moteur d'entraînement, C condenseur, D soupape de détente, E évaporateur;

- énergie thermique, température basse,
- énergie thermique, température élevée,
- énergie mécanique / électrique