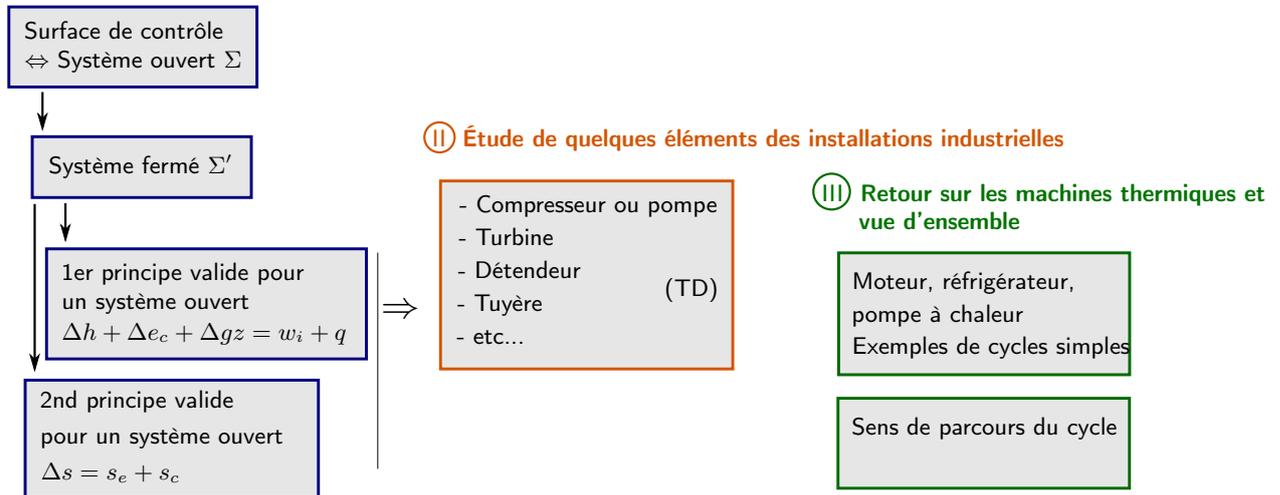


Thermodynamique des systèmes ouverts, applications industrielles

Plan schématique du cours

I 1er et 2nd principes pour un système ouvert en régime permanent



Plan du cours

I - Premier et second principe pour un système ouvert en régime permanent

- 1 - Définition du système ouvert et d'un système fermé
- 2 - Premier principe
- 3 - Second principe

II - Étude de quelques éléments des installations industrielles

- 1 - Exemples : voir TD
- 2 - Bref bilan

III - Retour sur les machines thermiques et vue d'ensemble

- 1 - Les machines thermiques dithermes
- 2 - Exemples de cycles simples
- 3 - Sens de parcours du cycle

Ce qu'il faut connaître

————— (cours : I)

- ▶₁ Quel est l'énoncé du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert en régime permanent ?
- ▶₂ Quel est l'énoncé du second principe pour un système ouvert en régime permanent ?
- ▶₃ Qu'est ce que le travail massique indiqué w_i ?
Quelle est la relation entre travail massique indiqué, puissance indiquée Ψ_i et débit massique D_m ?
- ▶₄ Quelle est la relation entre transfert thermique massique q , flux (ou puissance) thermique Ψ_{th} et débit massique D_m ?

————— (cours : III)

- ▶₅ Quel est le sens de parcours du cycle dans le diagramme $p-v$ ou $T-s$ pour une machine motrice ? et pour une machine réceptrice ?

Ce qu'il faut savoir faire

Remarque : La liste ci-dessous comporte les savoir faire généraux, ainsi que des exemples concrets de questions qui peuvent être posées. Ces exemples ne sont pas exhaustifs : d'autres questions peuvent aussi être abordées.

————— (cours : I)

- ▶₆ Expliquer pourquoi le premier principe de la thermodynamique vu dans les chapitres précédents ne s'applique pas directement à un système où le fluide entre et sort.
Pour un écoulement unidimensionnel dans une conduite, définir une surface de contrôle Σ qui définit un système ouvert, puis définir un système fermé Σ' qui suit l'écoulement. Utiliser le premier principe sur ce système fermé afin de démontrer le premier principe version "système ouvert". (Question qui apparaît parfois à l'écrit en étant guidée.)

————— (cours : II)

- ▶₇ Appliquer le premier et second principe pour un système ouvert afin d'étudier un compresseur, une turbine, un détendeur, une tuyère.
 - À quoi sert un compresseur ? Appliquer le premier principe, quels termes peut-on usuellement négliger ? Même question pour une turbine, un détendeur et une tuyère. (correction : voir tableau récapitulatif dans le II.2, voir également TDII.)

————— (cours : III)

- ▶₈ Pour une machine thermique dont on donne les éléments constitutifs (compresseur, condenseur, etc.), repérer les sources chaudes et froides, le sens des échanges thermiques et mécaniques (c'est-à-dire le signe de $q_{reçu}$ ou de w_i).
 - Dans un machine frigorifique, le condenseur sert-il à refroidir ou réchauffer le milieu extérieur au fluide ? Et l'évaporateur ? Quels sont les transferts mis en jeu dans le compresseur ?¹
- ▶₉ Définir le rendement, l'efficacité ou le coefficient de performance d'une machine thermique.
 - On considère une machine motrice ditherme. Définir son rendement et l'exprimer en fonction des échanges d'énergie thermique avec les deux sources. Donner son expression en fonction des températures des sources dans le cas réversible. (revoir le tableau récapitulatif dans les rappels sur les machines thermiques).
 - Question identique avec une machine frigorifique, avec une pompe à chaleur.

1. La condensation du fluide réfrigérant est exothermique ($q_{reçu\ par\ le\ fluide} < 0$), donc elle tend à réchauffer le milieu extérieur au fluide : elle doit avoir lieu en dehors du compartiment à refroidir. L'évaporation du fluide est endothermique ($q_{reçu\ par\ le\ fluide} > 0$), donc elle tend à refroidir le milieu extérieur au fluide : elle doit avoir lieu dans le compartiment à refroidir. Dans le compresseur le fluide reçoit un travail indiqué massique $w_i > 0$, et dans l'idéal aucun transfert thermique (s'il est calorifugé).

- ₁₀ Citer des ordres de grandeurs de puissances thermique et mécanique mises en jeu pour différentes tailles de dispositifs (revoir le tableau récapitulatif dans les rappels sur les machines thermiques).

————— (La suite de ce polycopié contient les parties II et III du cours)

II Étude de quelques éléments des installations industrielles

II.1 Exemples : voir TD

Étude d'un compresseur, d'une turbine, d'un détendeur, d'une tuyère, d'un échangeur thermique.

II.2 Bref bilan

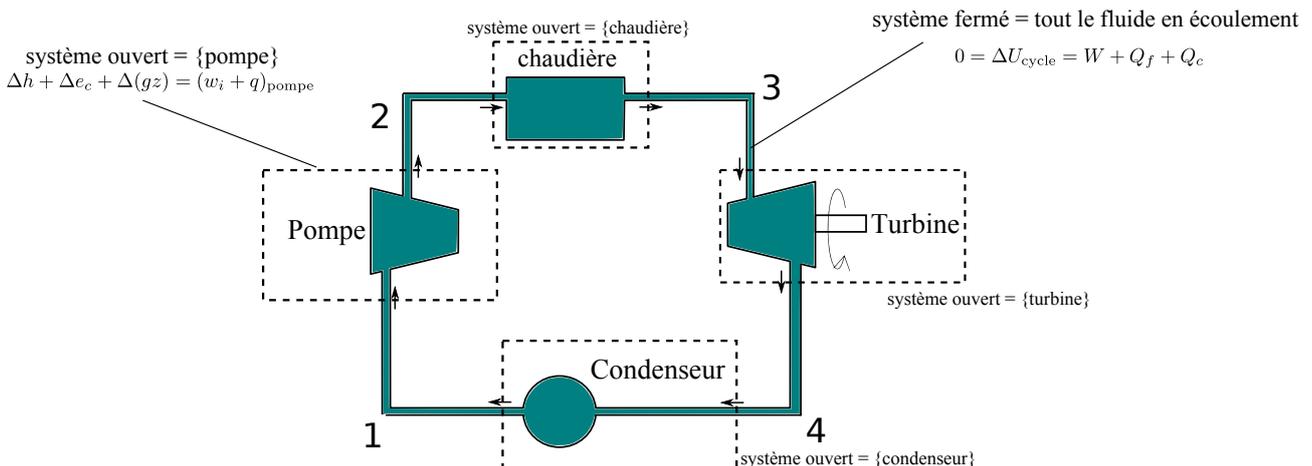
Dispositif	Travail massique indiqué w_i reçu par le fluide	Premier principe appliqué au système ouvert	Effet recherché
Compresseur ou pompe			Faire augmenter la pression du fluide : $p_s > p_e$
Turbine			Convertir l'enthalpie du fluide en travail (typiquement, produire la rotation d'un arbre moteur)
Détendeur			Faire diminuer la pression du fluide : $p_s < p_e$
Tuyère			Convertir l'enthalpie du fluide en énergie cinétique macroscopique : $\Delta e_c > 0$
Échangeur thermique		Pour le système complet : $D_{m1}\Delta h_1 + D_{m2}\Delta h_2 = 0$	Permettre l'échange d'énergie thermique entre deux fluides.

Remarque : Ce tableau n'est pas à connaître par cœur, mais il faut savoir le reconstruire. On se reportera au TD pour les hypothèses exactes qui permettent d'écrire le premier principe ainsi, en particulier tous les dispositifs sont supposés **calorifugés**.

III Retour sur les machines thermiques et vue d'ensemble

Remarque sur le système auquel on applique les principes

Il faut bien distinguer deux types d'applications des deux principes. On prend l'exemple de la machine motrice ci-dessous.



- Avant d'aborder ce chapitre nous appliquons les principes au système fermé {tout le fluide dans la machine}, sur un cycle.

On a alors (par exemple) $\Delta U = W + Q_c + Q_f$ et $\Delta U = 0$ car il s'agit d'un cycle.

- On peut maintenant appliquer les principes au système ouvert constitué par la pompe : $\Delta h + \Delta e_c + \Delta(gz) = w_{i,pompe} + q_{pompe}$, où $\Delta h = h_{sortie\ pompe} - h_{entrée\ pompe}$.

De même, on peut l'appliquer au générateur de vapeur, à la turbine, au condenseur.

Il ne faut pas mélanger les deux approches !

En particulier pour définir le rendement, on a $\eta = \frac{-W}{Q_c}$ avec le premier point de vue,

et $\eta = \frac{-w_{i,turbine} - w_{i,pompe}}{q_{chaudière}}$ avec le second, mais pas un mélange de ces deux expressions.

III.1 Les machines thermiques dithermes

Voir la fiche de rappels sur les machines thermiques.

Nous recopions ici quelques informations clés.

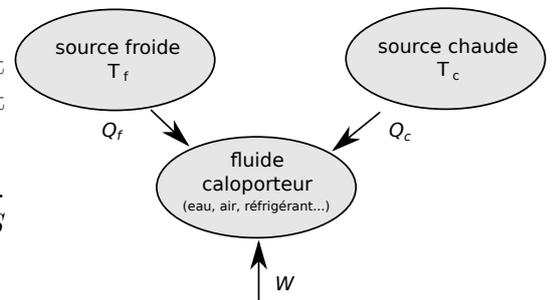
Un fluide caloporteur circule et effectue des cycles. Il reçoit pendant chaque cycle un travail W , un transfert thermique Q_f de la part de la source froide, et Q_c de la part de la source chaude.

L'entropie et l'énergie interne du fluide sont des fonctions d'état. Comme à chaque cycle le fluide revient dans le même état, U et S n'ont pas changé.

→ On a $\Delta U = 0$ et $\Delta S = 0$ pour un cycle.

On a donc : $W + Q_f + Q_c = 0$ et $\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} + S_c = 0$.

Attention, on a utilisé ici l'approche où on considère le système {tout le fluide en écoulement dans la machine}, système **fermé**.



	Moteur	Réfrigérateur	Pompe à chaleur
Grandeur utile	$-W$	Q_f	$-Q_c$
Grandeur coûteuse	Q_c	W	W
Rendement ou efficacité	$\eta = \frac{-W}{Q_c}$ soit $\eta = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c}$	$e = \frac{Q_f}{W}$ soit $e = \frac{Q_f}{-Q_c - Q_f}$	$e = \frac{-Q_c}{W}$ soit $e = \frac{Q_c}{Q_c + Q_f}$
Expression dans le cas réversible car 2 nd ppe ⇒ $\frac{Q_f}{Q_c} = -\frac{T_f}{T_c}$	$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c} \leq 1$	$e = \frac{T_f}{T_c - T_f} \in [0, +\infty[$	$e = \frac{T_c}{T_c - T_f} > 1$

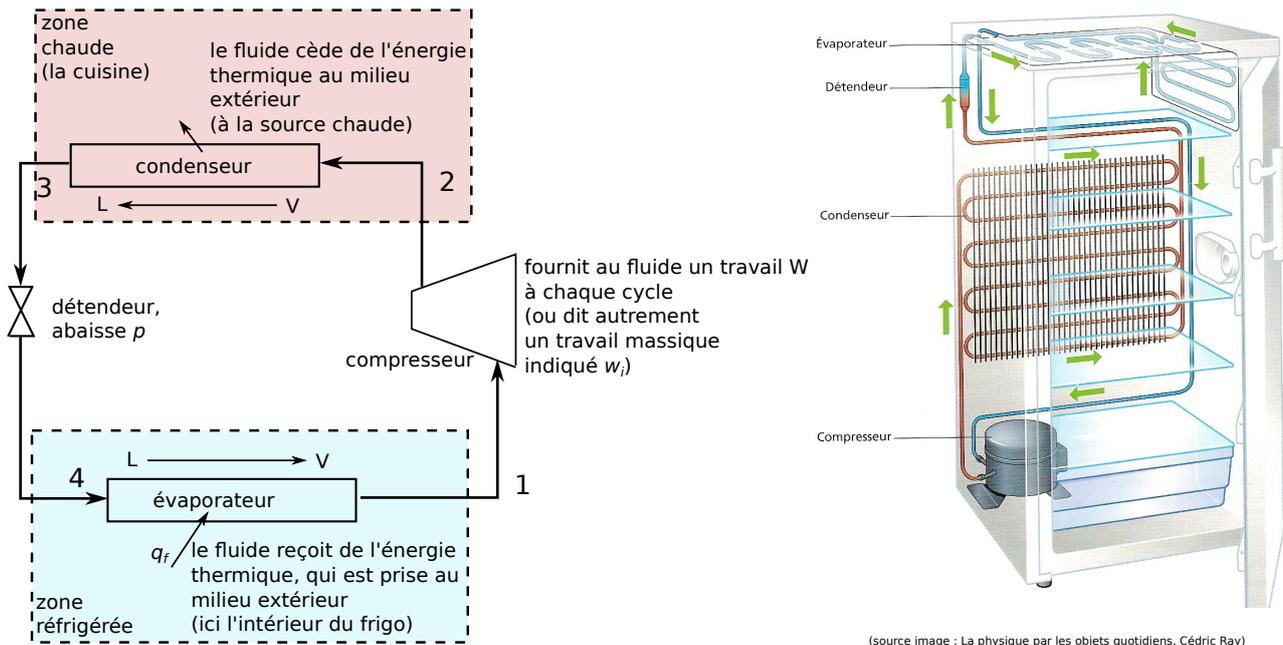
III.2 Exemples de cycles simples

Le contenu de cette partie n'est pas à retenir. L'objectif ici est de vous présenter un certain nombre de cycles en les classifiant par catégorie, afin de vous permettre de prendre un peu de recul sur le sujet, et de réaliser que tous ces cycles fonctionnent sur le même principe.

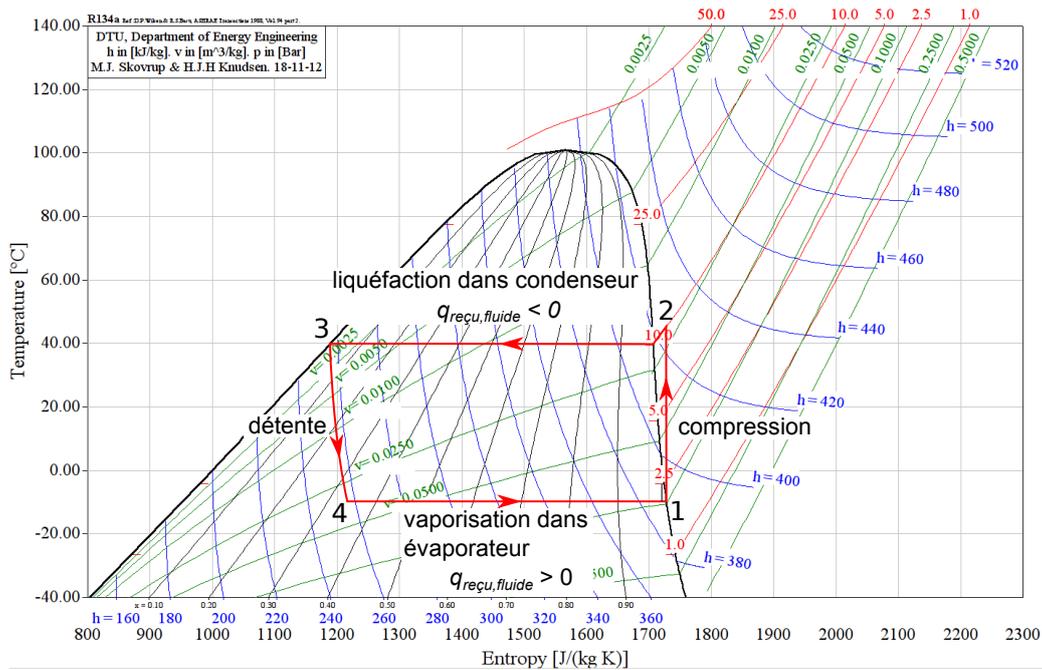
Cycle classique pour les machines dithermes réfrigérantes

Le cycle classique pour une machine réfrigérante (frigo, congélateur, climatiseur) utilise les changements d'état pour transférer efficacement de l'énergie thermique entre le compartiment à refroidir et l'extérieur. Il est schématisé ci-dessous.

L'évaporateur est situé à l'intérieur du compartiment à refroidir.



(source image : La physique par les objets quotidiens, Cédric Ray)



Ci-dessus : exemple d'un cycle simple pour un réfrigérateur dont le compartiment interne est à $T_f = +4^\circ\text{C}$.

Dans le cas le plus idéal, ce cycle est modélisé par la succession d'étapes suivantes, qui sont aussi tracées sur le diagramme T - s ci-dessus :

- $1 \rightarrow 2$: compression adiabatique réversible.
- $2 \rightarrow 3$: condensation isobare du fluide (vapeur vers liquide), le fluide cède de l'énergie thermique au milieu extérieur.
- $3 \rightarrow 4$: détente isenthalpique adiabatique.
- $4 \rightarrow 1$: vaporisation isobare du fluide, il reçoit de l'énergie thermique de la part du milieu extérieur, ce qui refroidit le milieu extérieur (qui est le compartiment du frigo).

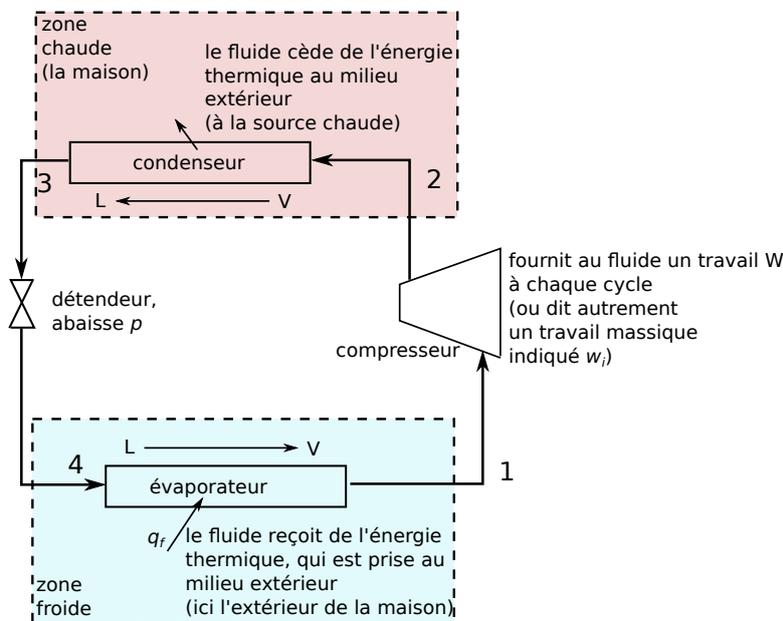
Remarque : On rappelle qu'il existe également le cycle de Carnot (isentropique \rightarrow isotherme \rightarrow isentropique \rightarrow isotherme parcouru dans le sens anti-horaire dans les diagrammes $p-v$ ou $T-s$), qui réalise le maximum du rendement s'il est réversible. Pour avoir réversibilité, il faut que la température du fluide lors des échanges thermiques isothermes soit identique à celle des sources chaude ou froide. Ceci est impossible en pratique : les échanges thermiques prennent alors un temps infini. On ne l'utilise donc pas.

Exemple de cycle pour les machines dithermes de type pompe à chaleur

Le cycle simple pour une pompe à chaleur est le même que celui décrit pour le réfrigérateur ci-dessus.

\rightsquigarrow Cette fois, l'évaporateur est situé ...

et le condenseur est situé ...



Exemples de cycle pour les machines dithermes motrices

Il existe de nombreux type de cycles pour les machines motrices, qui ont été développés et perfectionnés par les ingénieurs au fil du temps.

On peut mentionner les cycles suivants (mais il y en a d'autres) :

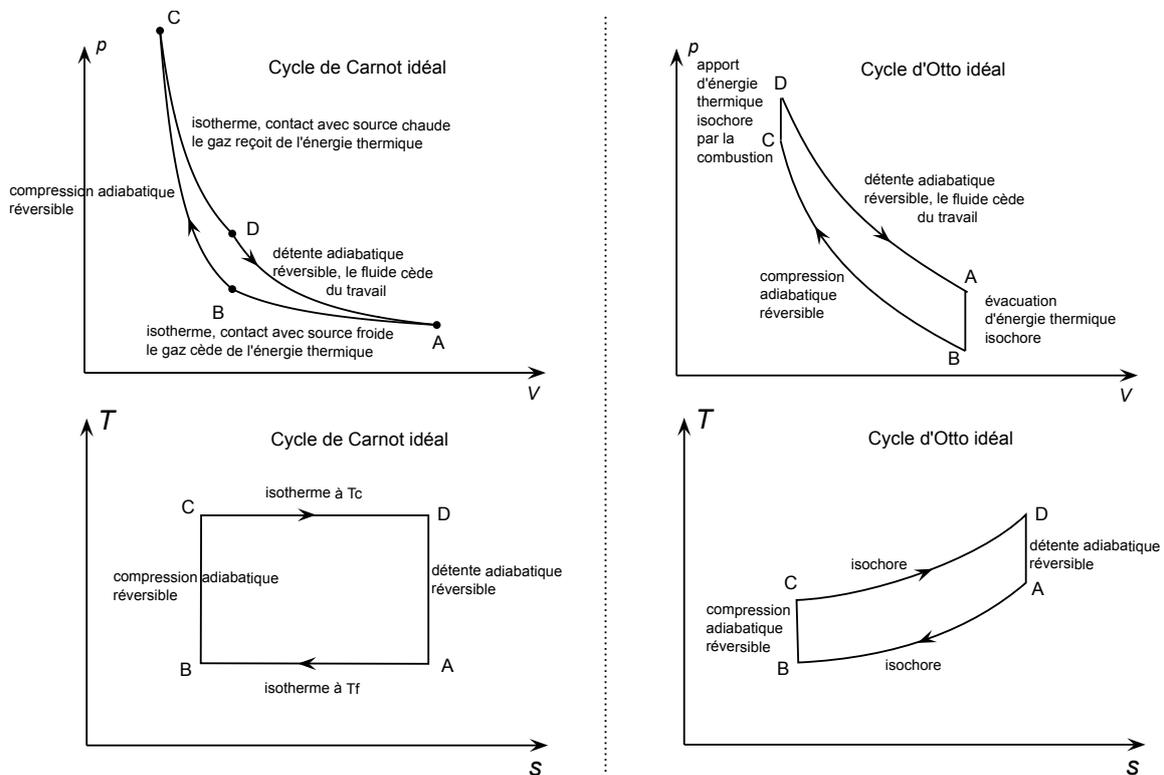
★ **Les cycles dits "à gaz"**, qui font circuler des gaz et qui n'exploitent pas de changement d'état. Ils se distinguent par les différentes évolutions que subit le gaz :

- Le cycle de Carnot à gaz : isentropique \rightarrow isotherme \rightarrow isentropique \rightarrow isotherme.
Non utilisé en pratique car les échanges thermiques sont trop lents.
- Le cycle de Stirling : isochore \rightarrow isotherme \rightarrow isochore \rightarrow isotherme et transfert d'énergie thermique entre les deux isochores.
Système à cylindre+piston. Utilisé pour certains moteurs de sous-marins, sondes spatiales, etc. Étudié dans le TD de rappels.

- Le cycle d'Ericsson : isobare → isotherme → isobare → isotherme et transfert d'énergie thermique entre les deux isobares.
Système à cylindre+piston.
- Le cycle de Brayton ou de Joule : isentropique → isobare → isentropique → isobare.
En général système en écoulement : compression du gaz dans un compresseur, détente dans une turbine. Étudié dans le TD du chapitre 7.
- Le cycle de Beau de Rochas (ou d'Otto) : isentropique → isochore → isentropique → isochore
Système à cylindre+piston. Principe du moteur à essence. Étudié dans le DM 6.
- Le cycle Diesel : isentropique → isobare → isentropique → isochore.
Système à cylindre+piston. Principe du moteur Diesel.
- Etc...

Remarque : Le rendement des cycles idéaux (donc réversibles) de Stirling et d'Ericsson sont égaux à celui de Carnot ($\eta = 1 - T_f/T_c$) si on les réalise de façon réversible (donc en particulier température du gaz égale à la température de la source extérieure lors des échanges thermiques isothermes, ce qui en pratique prend un temps infini).

Exemples de cycles à gaz : la figure ci-dessous illustre les cycles moteurs de Carnot et d'Otto, dans le cas idéal :



Moteur Diesel de puissance de 25 MW propulsant un pétrolier de 290 000 tonnes. Chacune des portes donne sur un des sept cylindres du moteur. Les pistons ont une course de plusieurs mètres, avec une vitesse assez lente. Ceci permet d'être assez proche du rendement maximal réversible, et d'atteindre η de l'ordre de 50%.

(Source : CC-by-sa par H. Cozanet, issue du livre de O. Cleynen, Thermodynamique de l'ingénieur, p. 330)

En comparaison, un moteur de voiture développe environ 100 kW.

★ **Les cycles dits “à vapeur”**, qui exploitent les changements d’état du fluide qui circule :

- Le cycle de Carnot à vapeur (avec changement d’état du fluide).

Non utilisé en pratique car les échanges thermiques sont trop lents.

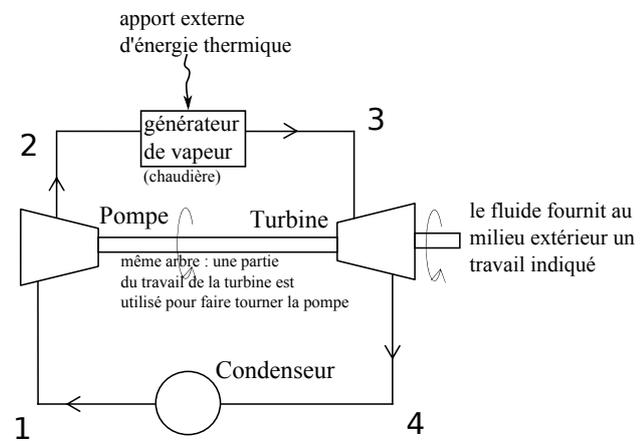
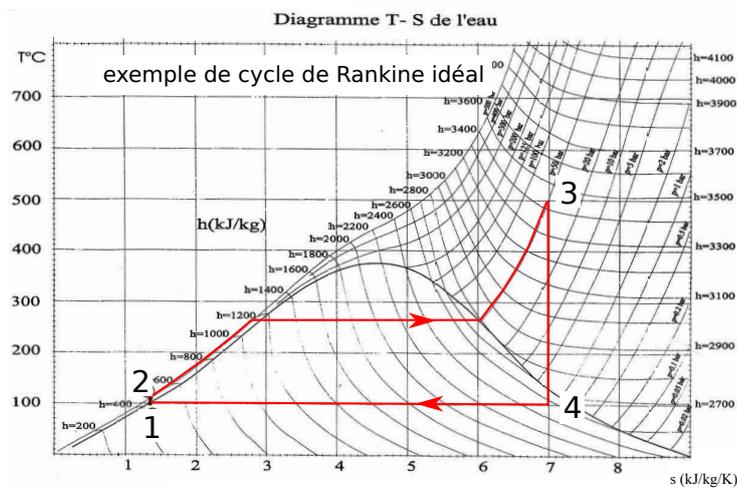
- Le cycle de Rankine : isentropique → isobare → isentropique → isobare.

Système en écoulement : compression du liquide par une pompe, détente de la vapeur dans une turbine. Utilisé dans les centrales nucléaires, au fioul, à charbon... afin d’entraîner un alternateur et de générer de l’électricité. Étudié dans le DM du chapitre 7.

- Etc...

Il existe ensuite des variantes de chacun de ces cycles, où des étapes peuvent être ajoutées afin d’améliorer le rendement.

Exemple de cycle à vapeur, qui fait intervenir des changements d’état : le cycle de Rankine :



III.3 Sens de parcours du cycle

(cours)