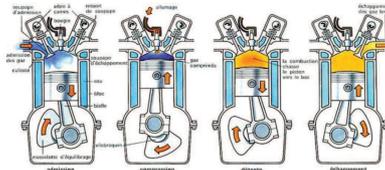


Machines Thermiques - Compléments



		1
1	Fluide et agent thermique	1
1.1	Définition et caractéristiques	1
1.2	Machine à renouvellement	1
1.3	Machines en chambre et en circuit	1
2	Les machines motrices : centrale à vapeur, turbines à gaz et moteurs thermiques	1
2.1	Machine à vapeur	2
2.2	Turbine à vapeur et Centrale à vapeur	3
2.3	Cycle de Carnot (1824) : Principe	4
2.4	Moteur à combustion interne	5
2.5	Moteur à deux temps	9
3	Réfrigérateur et Pompe à Chaleur	10
3.1	Etude d'un cycle de réfrigération	11
3.2	Technologies mises en oeuvre dans cette machine de réfrigération	12
4	Rendement : ordre de grandeur	14

1. Fluide et agent thermique

1.1. Définition et caractéristiques

L'agent thermique est le système thermodynamique auquel la machine fait subir les transformations. On choisit un fluide car il est déformable et peut ainsi circuler facilement dans les différents organes de la machine.

- les liquides ont une masse volumique très supérieure aux gaz et ont également une capacité calorifique massique supérieure : ils stockent d'avantage de chaleur pour une même élévation de température.
- les gaz ont l'avantage d'être fortement compressibles, il est possible de leur transférer un travail important.

En pratique, certaines machines comme le moteur à explosion utilisent un fluide monophasé (uniquement liquide ou gazeux) mais la plupart utilisent le changement d'état pour bénéficier des avantages de chaque phase. Le changement d'état lui-même fait intervenir des quantités de chaleur importantes.

Exemples de machines diphasées : machine à vapeur, réfrigérateur, centrales nucléaires.

1.2. Machine à renouvellement

Au cours de leur transformation, certaines machines thermiques renouvellent leur agent thermique, en général lorsque celui-ci subit des transformations chimiques au cours de son évolution. C'est le cas du moteur à explosion : le réchauffement du gaz est lié à la réaction chimique entre l'essence et l'air : ce mélange doit être remplacé après chaque cycle.

Même Fluide	Machines à renouvellement de fluide
réfrigérateur, centrales nucléaires, climatiseurs	moteur à explosion, conditionneurs d'air, turboréacteurs

1.3. Machines en chambre et en circuit

Nous pouvons distinguer deux type de conception :

- les machines thermiques dans lesquelles le fluide occupe une chambre unique (moteur à explosion). La chambre est alors fermée par un piston mobile.
- les machines dans lesquelles le fluide traverse différents organes au cours de son évolution.

2. Les machines motrices : centrale à vapeur, turbines à gaz et moteurs thermiques

Le but d'une machine motrice est de transformer la chaleur produite par la combustion de bois, de charbon ou d'hydrocarbure en un travail mécanique. Pour récupérer le travail il faut envisager la détente d'un gaz dans un cylindre fermé par un piston mobile ou dans une turbine.

De plus, pour que le moteur thermique puisse fonctionner pendant un temps important, il est nécessaire que le mouvement du piston soit cyclique, c'est à dire que la phase de détente soit suivie par une phase de refoulement du gaz hors du cylindre.

Le travail de la force pressante exercée par le gaz sur le piston est récupéré par un système mécanique composé de bielles transformant en général le mouvement de translation du piston en un mouvement de rotation de l'arbre moteur.

2.1. Machine à vapeur

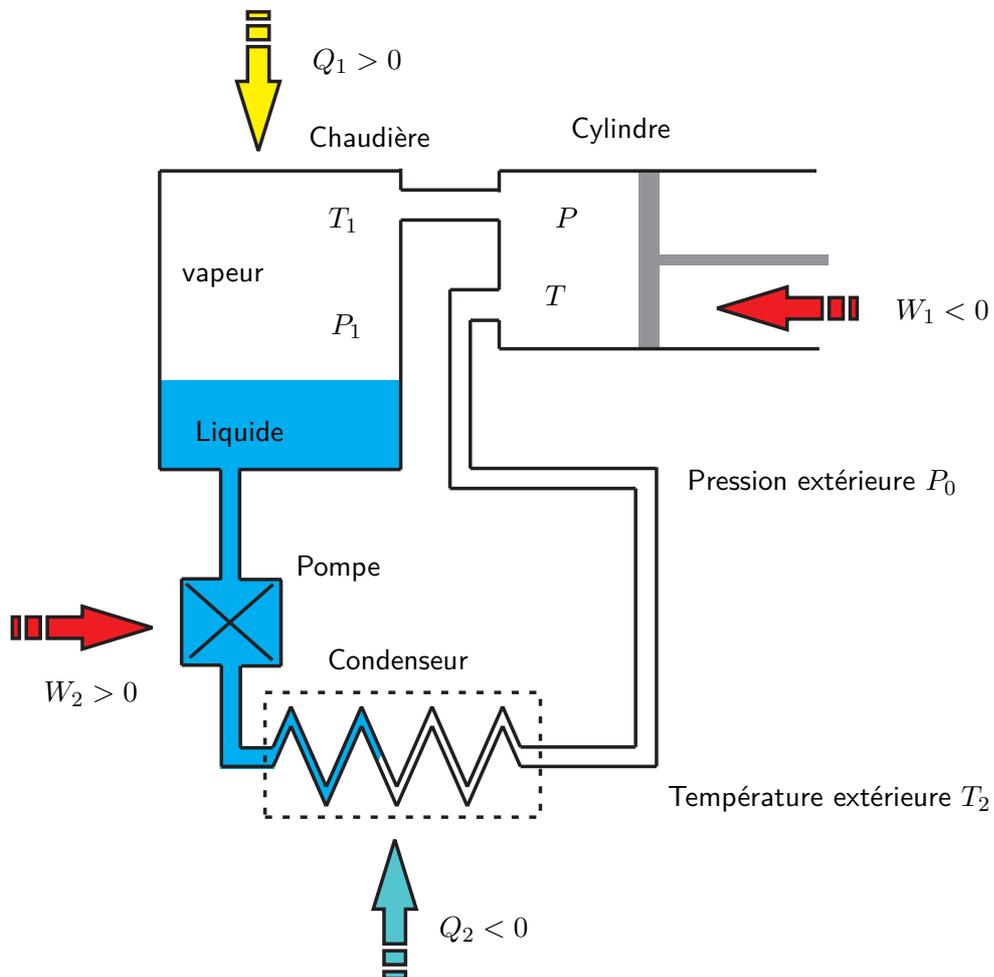
Une machine à vapeur est un moteur à combustion externe.

Pour obtenir du gaz sous pression, on utilise la vaporisation de l'eau dans un bouilleur (\Rightarrow machine à vapeur).

- \rightarrow de l'eau est vaporisée à la température T_1 à la pression de vapeur saturante P_1 . Cette vaporisation nécessite le chauffage de la chaudière soit un transfert thermique $Q_1 > 0$ pour une masse m de vapeur produite.
- \rightarrow la vapeur est ensuite injectée dans un cylindre qui fonctionne selon trois phases
 - injection de la vapeur à la pression P_1 jusqu'au volume V_1 .
 - détente adiabatique de la vapeur jusqu'à la pression atmosphérique P_0 correspondant à un volume V_2 de la chambre avec une condensation partielle possible.
 - refoulement de la vapeur sous pression réduite P_2 . Cette pression réduite est obtenue après refroidissement de la vapeur et sa condensation dans le condenseur où elle cède de la chaleur à l'atmosphère ce qui correspond à un transfert thermique $Q_2 < 0$ pour une masse m d'eau liquide obtenue.
- \rightarrow Recyclage de l'eau condensée vers la chaudière à l'aide de la pompe. Cette transformation peut être considérée comme adiabatique.

Cette machine fonctionne entre 2 sources de chaleur : une source chaude, le bouilleur et une source froide, le condenseur relié à l'atmosphère. Seul le transfert thermique au niveau de la chaudière a un coût, celui du combustible.

Cette machine fournit du travail au niveau du cylindre ($W_1 < 0$) et en consomme au niveau de la pompe ($W_2 > 0$).



2.2. Turbine à vapeur et Centrale à vapeur

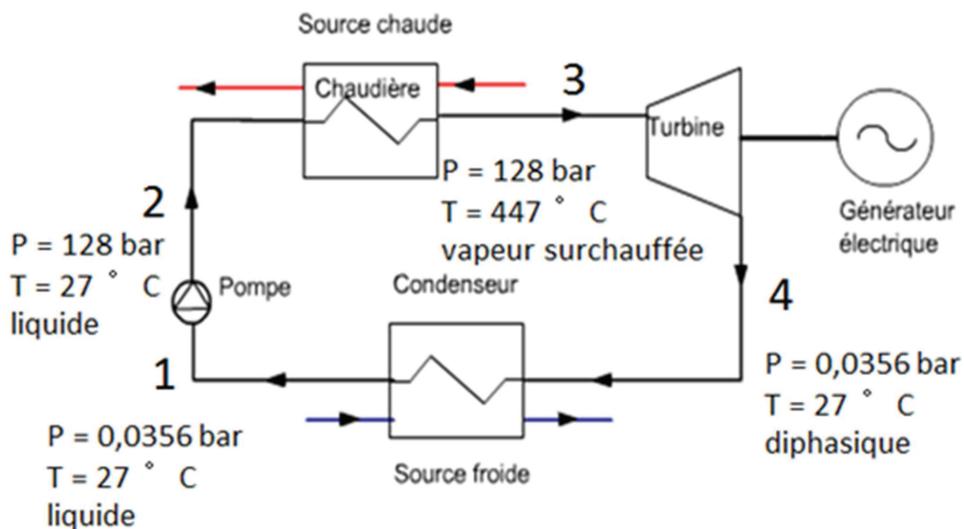
La turbine à vapeur est très proche de la machine à vapeur. Il s'agit à nouveau d'un moteur à combustion externe. Le fluide subit les mêmes transformations que dans la machine à vapeur à l'exception de la conversion en énergie mécanique. La détente du gaz n'actionne plus un piston mais une turbine, c'est-à-dire une roue à aube.

Par rapport à la machine à piston, la présence de la turbine permet :

- d'améliorer le rendement,
- d'avoir une puissance massique et une puissance volumique plus importantes.



Cycle et ordres de grandeur



- ◇ Au point **1**, l'eau entre dans la pompe à l'état liquide et à très faible pression. Elle y est comprimée et en sort au point **2** à une pression voisine de 128 bar, toujours à l'état liquide.
- ◇ Dans la chaudière, un combustible (solide, liquide ou gazeux) est brûlé, générant ainsi des gaz chauds qui sont refroidis par le fluide de travail, c'est-à-dire l'eau. En restant à peu près à la même pression, l'eau passe de l'état liquide au point **2** à celui de vapeur surchauffée au point **3**, où elle est portée à la température de 447 °C.
- ◇ La vapeur surchauffée au point **3** est ensuite détendue dans une turbine à vapeur, ce qui permet de produire du travail moteur sur son arbre. Elle sort au point **4** à la basse pression du cycle, sa température redevenant égale à 27 °C. Son état correspond à un mélange de liquide et de vapeur.
- ◇ La vapeur sortant au point **4** de la turbine est ensuite totalement liquéfiée au point **1** par refroidissement dans le condenseur. La pompe remet ensuite l'eau à la pression de la chaudière au point **2**.

Le refroidissement du condenseur est assuré par une source froide externe, généralement l'air extérieur ou l'eau d'un fleuve ou de mer.

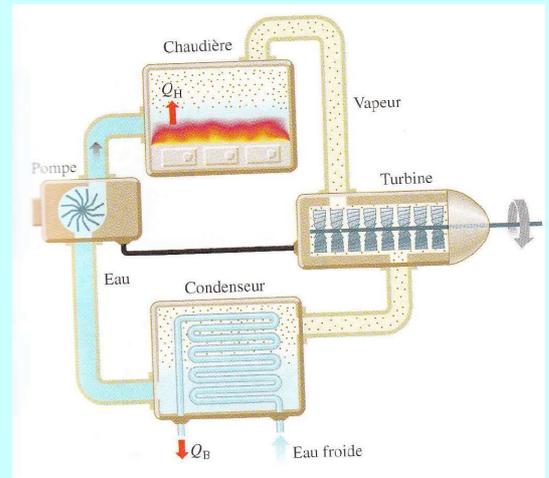
Le circuit du fluide de travail comporte deux parties à des pressions différentes, la haute pression HP de 128 bar au niveau de la chaudière, et la basse pression BP de 0,0356 bar au niveau du condenseur.

Il s'agit d'une caractéristique commune à tous les cycles des machines dithermes : ils mettent en oeuvre deux niveaux de pression, les pompes et compresseurs faisant passer le fluide de travail de la BP à la HP, et les turbines et détendeurs de la HP à la BP.

Centrale thermique

Une centrale électrique thermique moderne utilise de la vapeur surchauffée à environ 500 °C . Cette vapeur haute pression se détend dans une turbine, frappe et pousse ses lames pour la faire tourner. La turbine propulse un générateur électrique à haute tension. Une grande différence de pression est maintenue à travers la turbine. La vapeur est expulsée vers un condenseur froid à environ 100 °C où elle retourne à l'état liquide. L'eau qui circule dans le système est très pure, et le système est scellé.

Le rendement théorique maximum est de 53% mais en pratique les pertes thermiques le réduisent à 40% dans les installations modernes.



2.3. Cycle de Carnot (1824) : Principe

Le moteur de Carnot est un simple cylindre fermé par un piston contenant un gaz qu'on amène alternativement en contact avec une source de chaleur à haute température (vapeur) puis avec une source de chaleur à basse température (eau de refroidissement). Le cycle de Carnot comporte 4 étapes :

- une détente isotherme (AB) : le gaz reçoit une quantité de chaleur Q_H par la source à haute température.
- une détente adiabatique (BC)
- une compression isotherme (CD) dans laquelle le gaz rejette une quantité de chaleur : $-Q_B$ où Q_B est la chaleur reçue par le gaz.
- une compression adiabatique (DA) qui ramène le gaz à l'état initial.

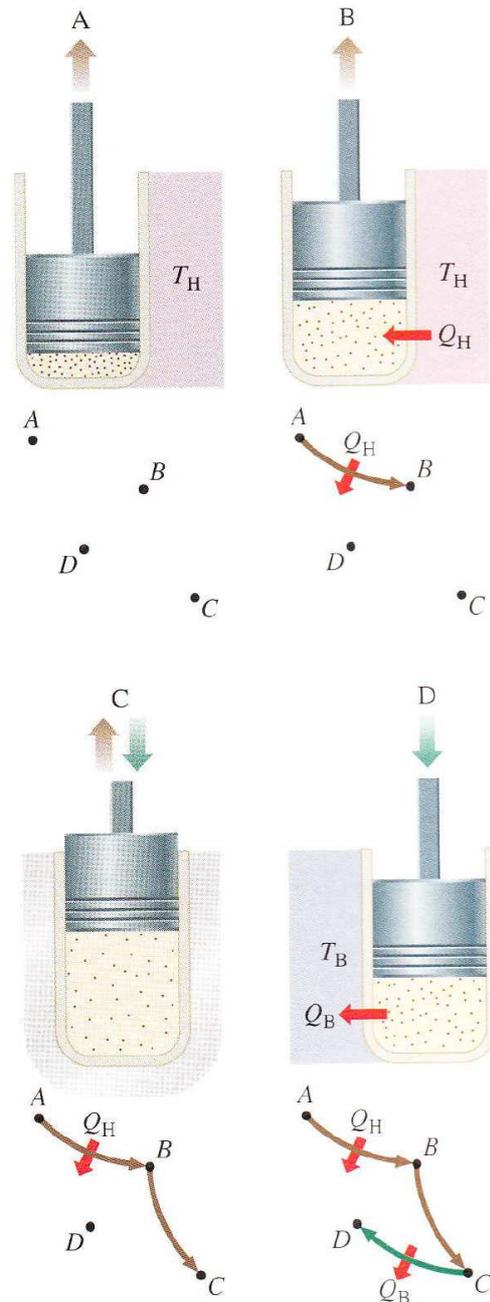
2.3.1. Principe

On voit sur la figure le fonctionnement du moteur.

La partie *ABC* représente la détente : c'est la course motrice. Le gaz fournit un travail positif au milieu extérieur. Le long de l'isotherme (*AB*), le gaz est en contact avec la source chaude. Il reçoit de la chaleur et en transforme une partie en travail et le reste en énergie interne. Le long de l'adiabatique (*BC*), le gaz ne reçoit aucune chaleur. Il transforme une partie de son énergie interne en travail (fourni au milieu extérieur), sa température diminue.

Le piston effectue donc un travail vers le milieu extérieur au moyen du vilebrequin (arbre de manivelle) et l'inertie de celui-ci reconduit le gaz de *C* à *D* suivant une isotherme au contact d'une source froide puis de *D* à *A* en effectuant une détente adiabatique. Sur la partie *CDA* le gaz rejette une quantité de chaleur et reçoit du travail du milieu extérieur.

Plus la température de la source froide est basse, moins de chaleur est rejetée vers le milieu extérieur, et plus il y a de travail effectué.



2.3.2. Rendement

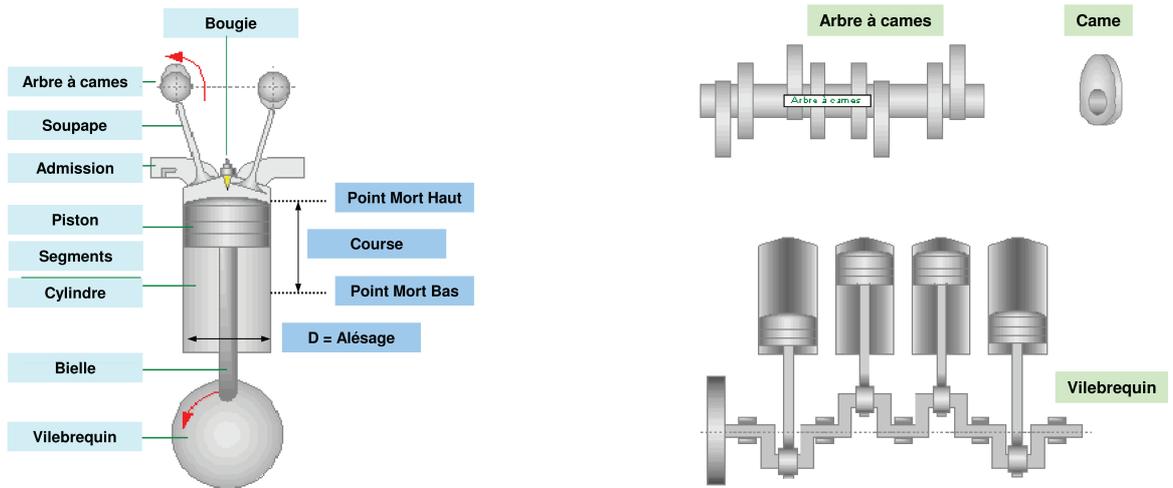
Le moteur de Carnot représente un dispositif idéal (moteur réversible). Son rendement est la limite supérieure du rendement de tout moteur thermique réel quelle que soit la manière dont il est conçu. (Calcul fait en cours). Les moteurs réels dissipent de l'énergie par frottement et perdent une quantité non négligeable d'énergie par convection, conduction et rayonnement (le capot d'une voiture devient chaud après quelques minutes de fonctionnement du moteur, et plus il chauffe, plus on gaspille de l'énergie).

2.4. Moteur à combustion interne

Otto en s'inspirant des travaux de Lenoir (1859) fut le premier à réaliser un moteur à combustion interne à 4 temps (1876). Ce moteur équipe un grand nombre de dispositifs (voiture, avion, tondeuse à gazon, 2 roues...).

Le moteur à essence est un moteur à allumage commandé (étincelle) alors que le moteur diesel est un moteur à allumage spontané.

2.4.1. Constitution



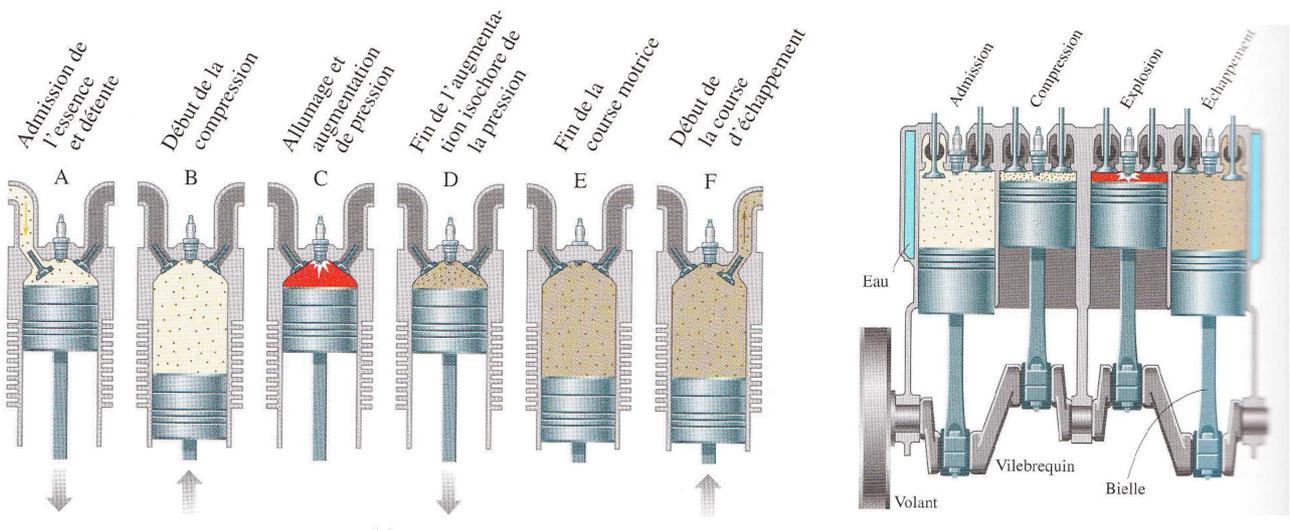
La cylindrée correspond au volume balayé par le piston, c'est-à-dire ici :

$$cyl = course \times \pi D^2 / 4$$

2.4.2. Principe

On voit sur la figure suivante la séquence des mouvements qui se produisent dans chacun des 4 cylindres :

- en *A* : un mélange d'air et de carburant (mélangés dans un carburateur) à la pression atmosphérique est admis dans le cylindre à travers la soupape d'admission pendant que le piston se déplace jusqu'en *B*. C'est l'admission.
- Le piston comprime alors rapidement (et plus ou moins adiabatiquement) le mélange jusqu'à *C* avec les deux soupapes fermées (Compression).
- La bougie produit une étincelle en *C* qui enflamme le carburant et élève la température et la pression jusqu'à *D* tandis que le volume reste presque constant.
- Ensuite le piston se déplace vers le bas, c'est le mouvement adiabatique moteur nous amenant en *E*.
- La soupape d'échappement s'ouvre alors : la pression et la température diminuent alors que le volume reste constant. Le système vient en *F* débarrassé de la plus grande partie du gaz brûlé. L'énergie mécanique emmagasinée dans le volant tournant pousse le piston vers *A* de nouveau forçant le reste des gaz inutiles vers l'extérieur. C'est l'étape d'échappement. La soupape d'échappement se ferme, la soupape d'admission s'ouvre et le cycle recommence.



Rq

Le piston est toujours en mouvement. Les transformations isochores correspondent à un piston en bout de course, c'est-à-dire au moment où la vitesse du piston s'annule (volume minimum et volume maximum).

2.4.3. Comparaison cycle théorique (Beau de Rochas) et cycle réel

◇ **Admission : 0 → 1. Transformation isobare**

La constante de temps caractéristique de l'équilibre mécanique (équilibre des pressions) est de l'ordre de $\tau_m \simeq 0,01$ ms. Cette constante de temps est très petite devant la durée de la course $\Delta t \simeq 10$ ms. Admission sous pression atmosphérique.

En réalité, $P < P_{atm}$ à cause de la viscosité du gaz (air+carburant).

◇ **Compression : 1 → 2. Transformation adiabatique**

Transformation rapide. On néglige les transferts thermiques. En effet, la constante de temps caractéristique des transferts thermiques $\tau_{th} \simeq 100$ s est très grande devant la durée de la course du piston (Δt).

En pratique, la combustion commence avant la fin de la compression : avance à l'allumage.

◇ **Combustion : 2 → 3. Transformation isochore**

La combustion du mélange air + essence est très rapide. Le piston est en bout de course.

En pratique, la combustion continue jusqu'à mi-course.

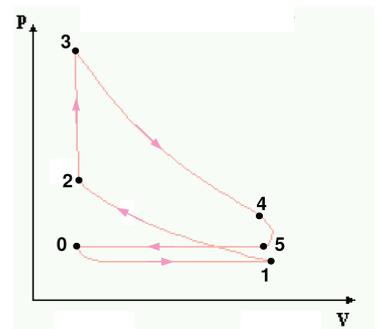
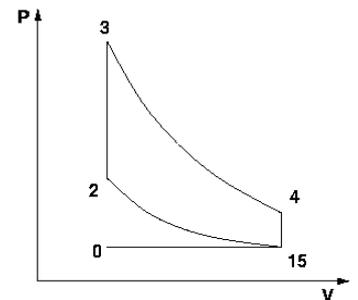
◇ **Détente : 3 → 4. Transformation adiabatique**

Mêmes hypothèses que lors de la compression.

En pratique, des frottements peuvent être à l'origine de transferts thermiques.

◇ **Échappement : 4 → 5 → 0. Transformation isochore**

La transformation est isochore jusqu'à l'ouverture de la soupape, puis l'échappement est isobare. *En pratique, il y a une surpression $P > P_{atm}$ à cause de la viscosité du gaz.*



Rq

Le rendement d'un moteur essence 4 temps augmente avec son coefficient volumétrique : $\alpha = \frac{V_{max}}{V_{min}}$. On peut chercher à augmenter α pour augmenter le rendement, mais quand α devient trop grand, la compression (plus importante) est à l'origine d'un allumage spontané non maîtrisé et non souhaité (détonation et ondes de chocs qui dégradent les pièces).

2.4.4. Quelques chiffres

En pratique, le taux de compression α est souvent proche de $\alpha \simeq 8$ (souvent compris entre 5 et 11).

→ Rendement théorique η pour $\alpha = 8$ et $\gamma = 1,4$ (voir cours TH6) : $\eta = 56$ %.

→ Rendement réel : $\eta < 35$ %. (et $\gamma \simeq 1,33$).

→ Température instantanée des gaz : 2000 °C à 3000 °C.

→ Compression du mélange jusqu'à 8 – 12 bar. Echauffement jusqu'à 300 °C.

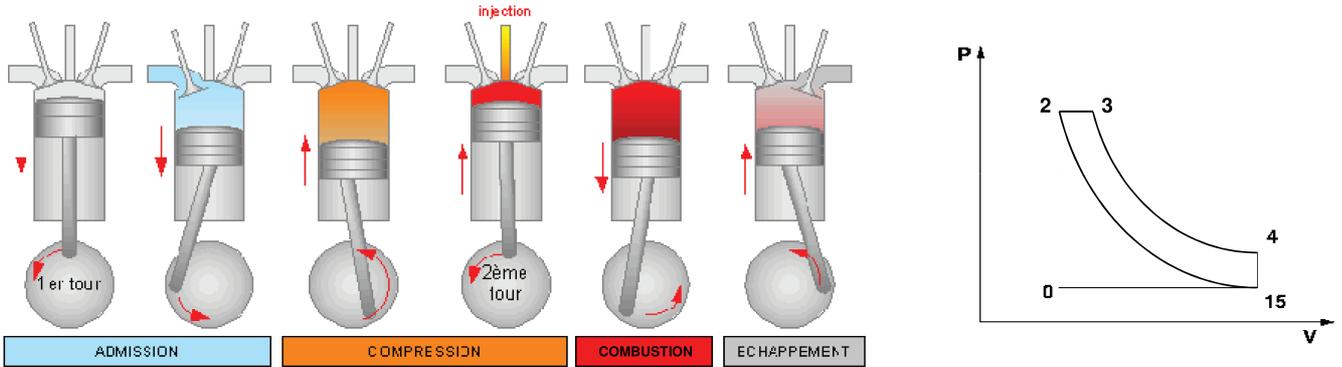
→ Couple total : 100 – 400 N · m.

→ Vitesse de rotation : 1000 – 4000 tr/min.

2.4.5. Moteur à allumage par compression : moteur Diesel

On aimerait augmenter le rendement du moteur essence. Il faudrait pouvoir augmenter le taux de compression mais sans avoir de combustion spontanée.

Solution : Comprimer et échauffer l'air puis injecter le combustible qui s'auto-inflammera.



- ◇ **Admission : 0 → 1. Transformation isobare**
Le piston descend entraîné par l'inertie du volant fixé au vilebrequin. L'air frais est aspiré.
- ◇ **Compression et injection : 1 → 2. Transformation adiabatique**
La rotation du volant fait remonter le piston. L'air est fortement comprimé. Un peu avant le point mort haut, le gazole est injecté et s'enflamme spontanément au contact de l'air surchauffé.
- ◇ **Combustion et détente : 2 → 3 → 4.**
La vitesse d'injection est ajustée pour que la combustion s'opère à pression constante. En fin de combustion, le gaz se détend, en continuant de pousser le piston vers le bas et de faire tourner le vilebrequin.
- ◇ **Détente : 4 → 5 → 0.**
L'ouverture de la soupape provoque une baisse de pression très rapide (4-5). Ensuite la rotation du volant fait remonter le piston qui chasse l'air brûlé vers le pot d'échappement (5-0).

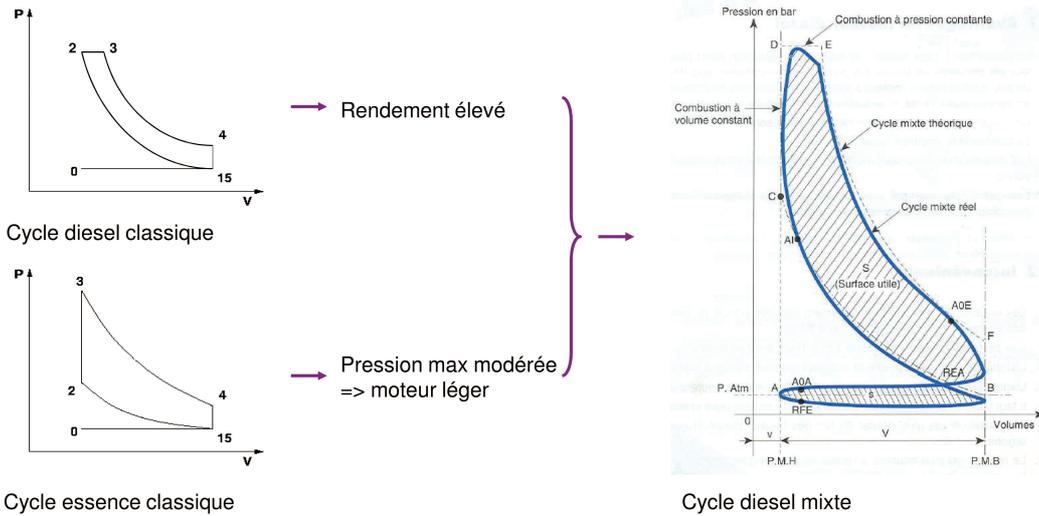
Avantages et inconvénients du moteur Diesel par rapport au moteur essence

Avantages

- Rapport volumétrique α plus élevé. Compris en général entre 14 et 24 : rendement plus élevé.
- Consommation plus faible.
- Couple moteur plus élevé et quasi constant pour ω faible.
- Moins de risques d'inflammation (incendie)

Inconvénients

- Organes mécaniques surdimensionnés à cause des fortes pressions
- Bruit de fonctionnement élevé.
- Besoin d'un refroidissement plus efficace car le chambre de combustion est plus chaude.
- Démarrage plus difficile à froid.



2.5. Moteur à deux temps

Un moteur à explosion utilise un gaz inflammable (mélange essence+air). Ce gaz en explosant libère une énergie qui pousse le piston vers le bas, entraînant un ensemble de pièces mobiles.

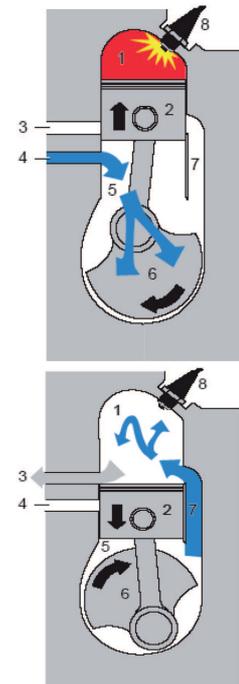
Le cycle d'un moteur "2 temps" nécessite deux étapes et fonctionne en un seul tour de vilebrequin, c'est-à-dire une montée et une descente de piston. Ce moteur n'utilise pas de soupapes pour l'admission et pour l'échappement comme le moteur 4 temps. Les lumières (trous) dans le carter permettent l'admission et l'échappement.

1er temps : admission, compression et explosion

Lors du mouvement ascendant, le piston comprime le mélange essence-air dans la chambre de combustion. La lumière d'admission est ouverte. Le mélange air/essence pénètre dans le carter. Ce mélange est comprimé et allumé par la bougie d'allumage. Les gaz de combustion qui se détendent repoussent le piston vers le bas

2e temps : échappement

Lors du mouvement descendant, une partie du travail récupéré fait tourner le vilebrequin. La lumière d'échappement s'ouvre et les gaz s'échappent de la chambre de combustion.



Ce type de moteur est courant surtout dans les plus petites cylindrées, notamment les scooters. Il a les avantages de la simplicité, d'une masse faible et d'un encombrement réduit ainsi que de fonctionner dans toutes les positions sans nécessiter de lubrification.

Avantages et inconvénients du moteur 2 temps par rapport au moteur 4 temps

Avantages

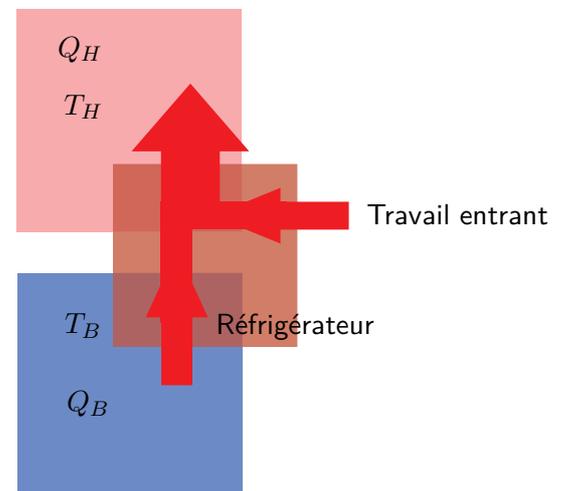
- Mécanique simple (pas de soupapes...).
- Coût de production réduit (mais l'écart se ressert avec le 4 Temps).
- Plus léger et moins encombrant qu'un moteur 4 Temps (30%).
- Plus puissant à cylindrée égale (facteur 1,7).
- Utilisable dans toutes les positions.

Inconvénients

- Combustion incomplète : des hydrocarbures ne sont pas totalement brûlés (course du piston avant la fermeture de la lumière d'échappement).
- Emission d'huile (plus ou moins brûlée) due à la présence de lubrifiant dans le carburant pour graisser le cylindre (les nouvelles huiles permettent une combustion à chaud pratiquement totale).
- Usure prématurée des bougies : à cause des résidus imbrûlés.

3. Réfrigérateur et Pompe à Chaleur

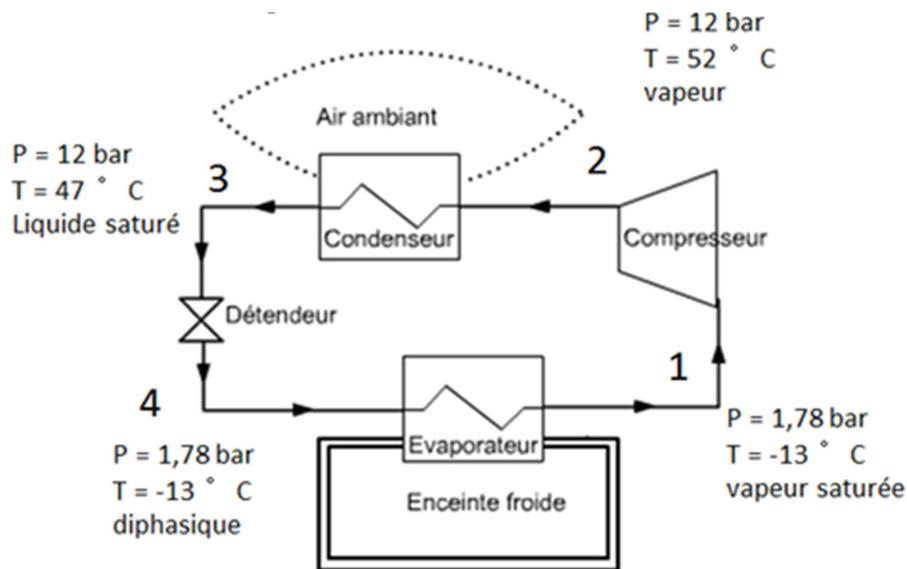
Une machine frigorifique prend une quantité de chaleur Q_B d'une région de basse température et expulse une quantité de chaleur Q_H vers une région de haute température au prix d'une certaine quantité de travail absorbé.



Dans une installation de réfrigération à compression de la vapeur, on cherche à maintenir une enceinte froide à une température inférieure à la température ambiante. Pour y arriver, on évapore un fluide frigorigène à basse pression et donc basse température dans un échangeur placé dans l'enceinte froide pour cela il faut que la température de vaporisation du fluide frigorigène soit inférieure à celle de l'enceinte froide T_F .

Le fluide est ensuite comprimé à une pression telle que sa température de condensation soit supérieure à la température ambiante T_a . Il est alors possible de refroidir le fluide par échange thermique avec l'air ambiant ou avec un fluide de refroidissement jusqu'à ce qu'il devienne liquide. Le liquide est ensuite détendu à la basse pression dans une vanne sans production de travail et dirigé dans l'évaporateur. Le cycle est ainsi refermé.

3.1. Etude d'un cycle de réfrigération



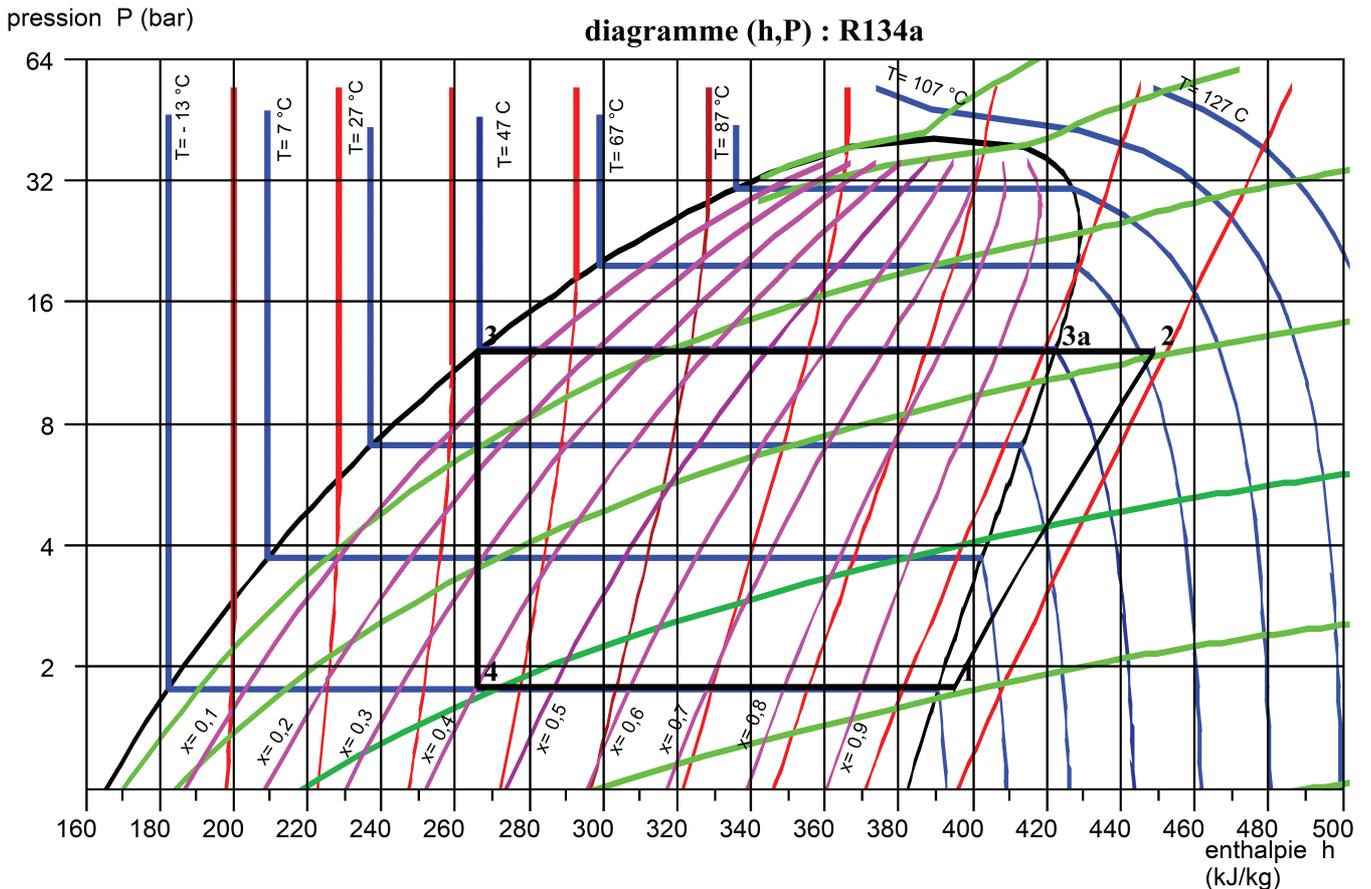
Ce cycle permet de convertir le travail sur l'arbre du compresseur en production de froid à basse température. On parle de cycle récepteur. Comme pour une centrale à vapeur on parle de cycle à juste titre. Le fluide après avoir subi les différentes transformations se retrouve dans son état initial.

Le fonctionnement de cette machine repose sur les changements d'état du fluide frigorigène dans l'évaporateur et dans le condenseur.

- ◇ Au point **1**, le fluide frigorigène R134a entre dans le compresseur à l'état de vapeur saturée. Il y est comprimé et en sort à l'état de vapeur au point **2**.
La pression de 1,78 bar a été choisie pour que la température de vaporisation du R134a soit inférieure à celle de l'enceinte froide qui est de -8 °C . La pression de 12 bar a été choisie pour que la température de vaporisation à cette pression soit supérieure à celle de l'air ambiant (35 °C).
- ◇ Le refroidissement du fluide dans le condenseur par échange avec l'air extérieur comporte 2 étapes :
 - une désurchauffe dans la zone vapeur,
 - suivie d'une condensation jusqu'au point **3** à l'état de liquide saturé.
- ◇ le fluide de travail est ensuite détendu sans production de travail jusqu'au point **4** à l'état diphasique avant d'être dirigé vers l'évaporateur.
- ◇ le fluide est enfin vaporisé jusqu'au point **1** où il se trouve à nouveau à l'état de vapeur sèche.

Le cycle opère entre deux niveaux de pression : BP à l'évaporateur et la HP au condenseur. Le compresseur et le détendeur faisant passer le fluide d'un niveau à l'autre.

Le cycle est représenté ci-dessous dans le diagramme des frigoristes où on représente la pression P en fonction de l'enthalpie.



3.2. Technologies mises en oeuvre dans cette machine de réfrigération

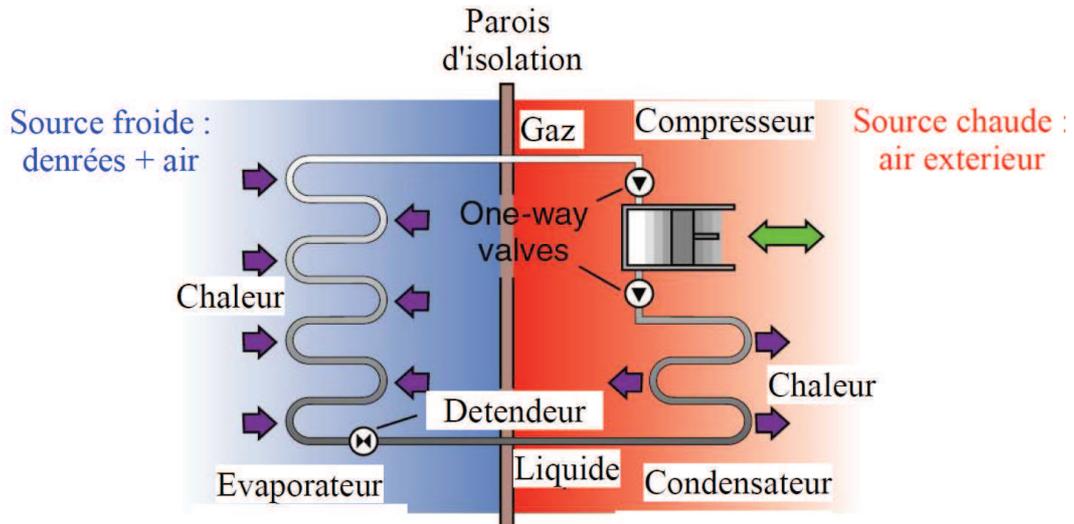
Dans un réfrigérateur domestique, l'évaporateur est en général formé de deux plaques planes ondulées soudées l'une à l'autre, le fluide frigorigène circulant dans les canaux. Il tapisse le compartiment congélation du réfrigérateur (c'est sur lui que se forme la couche de givre). La plaque entre les canaux de passage du fluide sert d'ailette pour augmenter le contact thermique entre le fluide et le compartiment froid. Cet évaporateur est relié au reste de la machine par 2 canalisations qui traversent la paroi isolante : l'une d'entre elles est reliée à la sortie du détendeur, l'autre à l'aspiration du compresseur.

Généralement le compresseur n'est pas visible car il est contenu dans un bloc métallique monté sur des coussins en caoutchouc pour éviter les vibrations et d'où sortent un fil électrique et deux tuyaux entrée/sortie du fluide. Il s'agit d'un compresseur dit hermétique à pistons qui présente l'avantage que le moteur est directement refroidi et lubrifié par le fluide thermodynamique ce qui permet de se passer d'huile.

D'autres types de compresseur existent aussi : comme les compresseurs à pistons dit ouverts, les compresseurs "scroll", les compresseurs à vis, les compresseurs centrifuges.

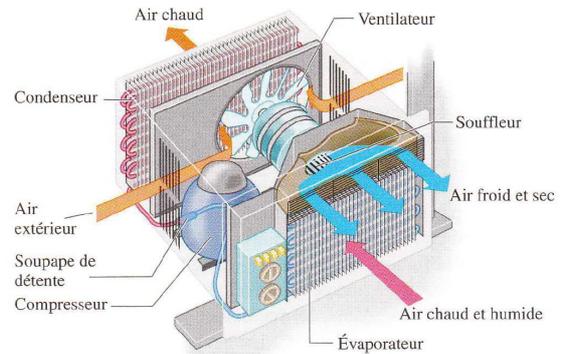
Le condenseur est la grille noire située à l'arrière d'un réfrigérateur constituée d'un tuyau enroulé en serpentin et étayé par des plaques métalliques qui d'une part augmentent les échanges thermiques avec l'air et d'autre part renforcent la rigidité mécanique. Il est relié à la sortie du compresseur et à l'entrée du détendeur.

Le détendeur est généralement constitué d'un simple tube capillaire (c'est à dire de très petit diamètre) et quelquefois il s'agit d'un détendeur thermostatique.



▪ Climatiseur

Climatiseur monté sur une fenêtre : l'air humide de la pièce est attiré vers les serpentins froids d'évaporation où il est refroidi. La vapeur d'eau se condense et coule vers un réservoir placé au-dessous.



4. Rendement : ordre de grandeur

Dispositif	Rendement (%)
Générateur électrique	70-95
Moteur électrique	50-95
Pile à combustible hydrogène-Oxygène	60
Turbine à vapeur	35-45
Centrale électrique thermique	30-40
Centrale électrique nucléaire	30-35
Réacteur nucléaire	39
Moteur d'avion	36
Laser à semi conducteurs	30
Moteur à combustion interne	20-30
Cellule solaire d'Arsenure de Gallium	20-25
Lampe fluorescente	20
Cellule solaire de silicium	12-16
Locomotive à vapeur	8
Lampe à incandescence	5
Machine à vapeur de Watt	1