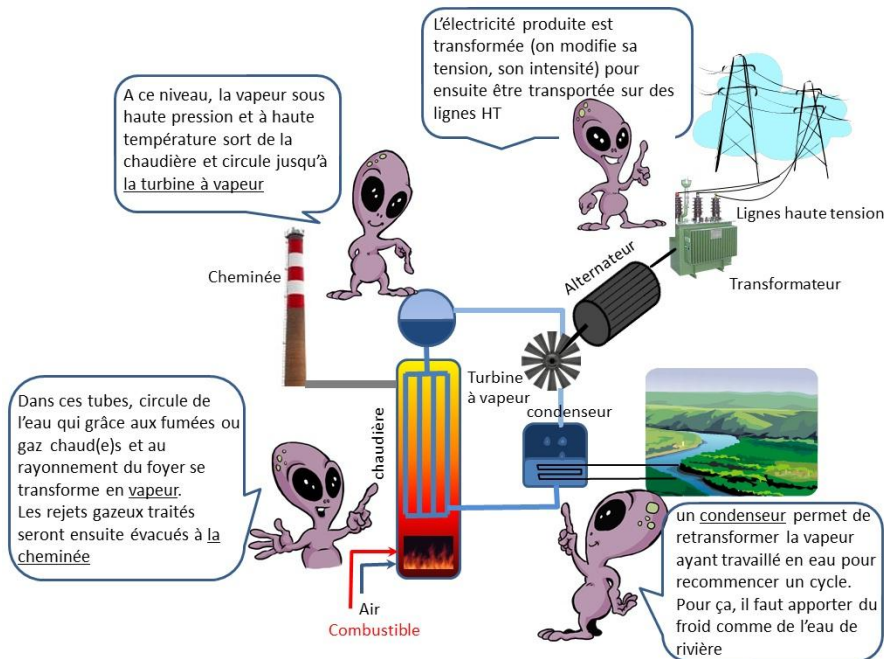


Thermodynamique

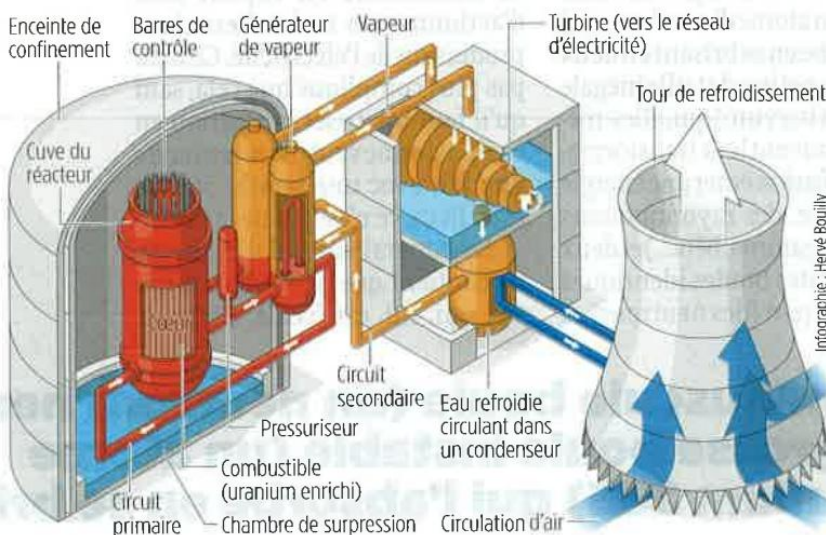
TH4 Machines thermiques

I Généralités	2
1.) Définitions	2
2.) Machine monotherme	3
3.) Généralités sur les machines dithermes	4
II Moteurs thermiques	5
1.) Fonctionnement	5
2.) Rendement	6
III Récepteurs thermiques	7
1.) Fonctionnement	7
2.) Efficacité	8
IV Exemples de machines thermiques usuelles	9
1.) Machine à vapeur	9
2.) Les moteurs à combustion interne:	10
3.) Récepteurs thermiques	12
Conclusion : principe de la cogénération	12

<https://kidiscience.cafe-sciences.org/articles/comment-produit-t-on-lelectricite-partie-ii/>



Réacteur à eau pressurisée REP



1.) Définitions

Machine thermique : Système qui réalise une conversion d'énergie.

Un fluide effectue des transformations cycliques au cours desquelles il y a échange énergétique entre la machine et le milieu extérieur.

Deux types de machines thermiques :

Moteur thermique : Transforme une partie de la chaleur qu'il reçoit en travail mécanique.

Récepteur thermique : Reçoit du travail pour refroidir ou chauffer une partie du système.

On décompose l'étude de la machine thermique en différentes parties :

Système mécanique parfait : Système fermé n'échangeant que du travail de façon réversible.

= Subit une transformation adiabatique réversible.

Source de chaleur parfaite (ou Thermostat idéal) : Système fermé n'échangeant que de la chaleur de façon réversible, sans que sa température varie = Subit une transformation isotherme réversible.

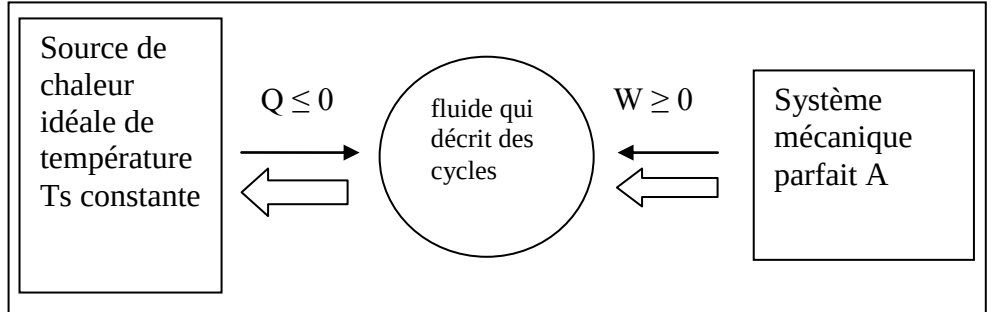
2.) Machine monotherme

Le fluide qui décrit le cycle n'échange de la chaleur qu'avec une source de chaleur à la température T_s .

Enoncé de Kelvin du second principe : Il n'existe pas de moteur cyclique monotherme : on ne peut pas fournir du travail à partir d'une seule source de chaleur.

Machine monotherme : (1) $\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q = 0$ (2) $\Delta S_{\text{fluide}} = S_{\text{ech}} + S_{\text{créée}} = \frac{Q}{T_s} + S_{\text{créée}} = 0$

Système {n moles de fluide} fermé
qui décrit des cycles.
Pour un nombre entier de cycles :



3.) Généralités sur les machines dithermes

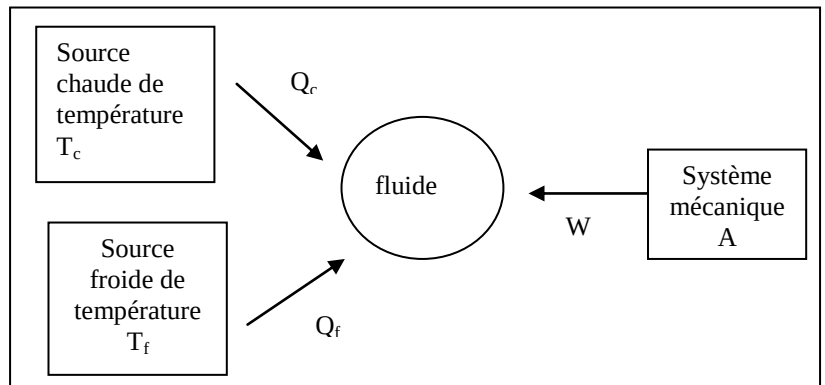
Le fluide échange de la chaleur avec deux sources de température T_f et T_c .

Machine ditherme : (1) $\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q_c + Q_f = 0$ (2) $\Delta S_{\text{fluide}} = S_{\text{ech}} + S_{\text{créée}} = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_{\text{créée}} = 0$

Inégalité de Carnot Clausius : $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$ $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$ si le cycle est réversible

Système {n moles de fluide} fermé, qui décrit des cycles.

Pour un nombre entier de cycles :



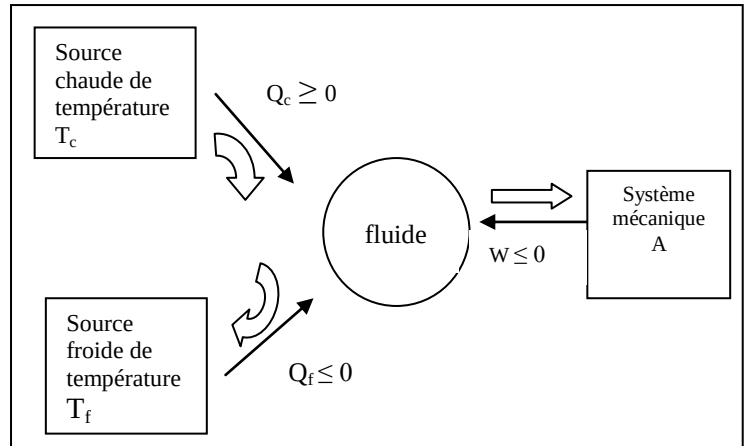
Pour plusieurs sources : (1) $\Delta U_{\text{fluide}} = W + \sum_i Q_i = 0$ (2) $\Delta S_{\text{fluide}} = S_{\text{créée}} + \sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0$

II Moteurs thermiques

1.) Fonctionnement

Moteur thermique ditherme: Transforme une partie de la chaleur qu'il reçoit en travail mécanique.

Pour fournir un travail, le fluide reçoit de la chaleur de la source chaude et cède de la chaleur à la source froide. $W < 0 \Rightarrow Q_f < 0$ et $Q_c > 0$.



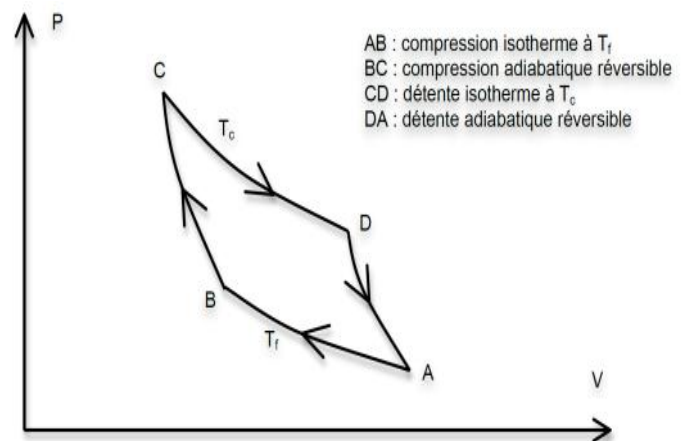
2.) Rendement

$$r = \frac{\text{grandeur valorisable ou utile}}{\text{grandeur coûteuse}} \leq 1 \quad r = -\frac{W_{\text{cycle}}}{Q_c}$$

Théorème de Carnot : Le rendement de Carnot est le rendement d'un moteur ditherme cyclique réversible. Il est indépendant du système thermodynamique qui évolue. Il ne dépend que de la température des sources.

$$r_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Le rendement d'un moteur ditherme réel est inférieur au rendement de Carnot : $r \leq r_C$

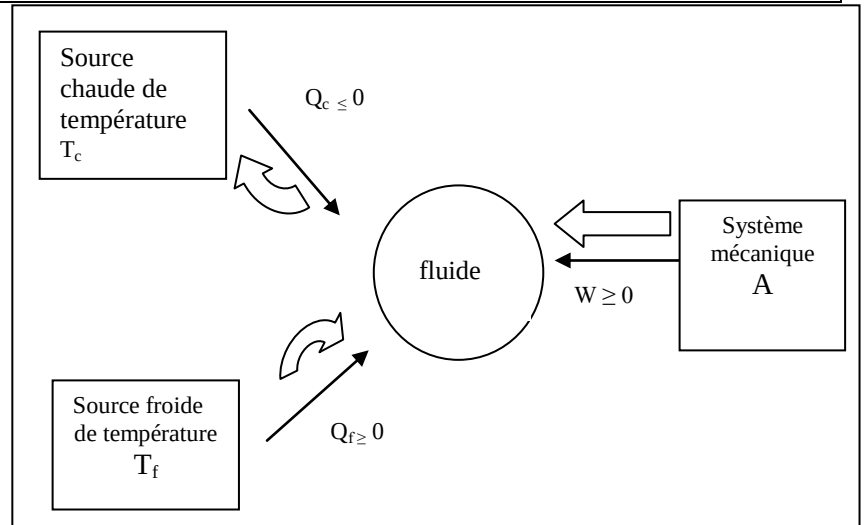


III Récepteurs thermiques

1.) Fonctionnement

Récepteur thermique ditherme: Reçoit du travail pour refroidir ou chauffer une partie du système.

Pour prendre de la chaleur à la source froide, le fluide reçoit un travail et cède de la chaleur à la source chaude. $Q_f > 0 \Rightarrow W > 0$ et $Q_c < 0$



2.) Efficacité

$$e = \frac{\text{grandeur valorisable ou utile}}{\text{grandeur coûteuse}} \geq 1$$

- réfrigérateur ou climatiseur : doit refroidir la source froide. $e = \frac{Q_f}{W}$

- pompe à chaleur (chauffage) : doit chauffer la source chaude. $e = -\frac{Q_c}{W}$

IV Exemples de machines thermiques usuelles

1.) Machine à vapeur

a) Principe d'un moteur thermique $W < 0 \Rightarrow Q_f < 0 \text{ et } Q_c > 0$

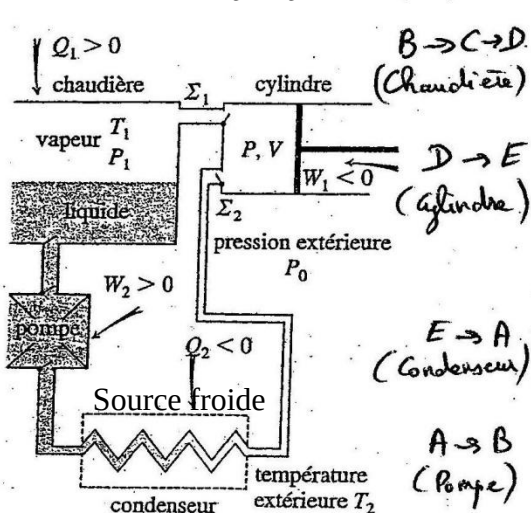
Transforme la chaleur produite par la combustion de charbon, bois, hydrocarbure en un travail mécanique.

- Pour récupérer du travail, il faut envisager la détente d'un gaz dans un cylindre muni d'un piston mobile.
- Le mouvement du piston doit être cyclique : après détente, il doit y avoir refoulement du gaz hors du cylindre.
- La bielle transforme le mouvement de translation du piston en un mouvement de rotation de l'arbre moteur.

Principe des différents moteurs : <http://rvb15.fr/ressources/moteurs/>

b) Principe de la machine à vapeur (Watt 1772 à 1782) Voir doc 1 et 2

Source chaude $Q_c = Q_1$



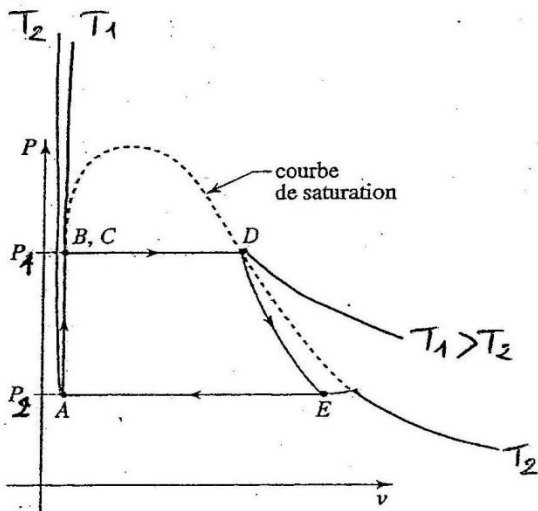
Doc. 1. Schéma de la machine à vapeur de Watt.

- De l'eau est vaporisée dans la chaudière à la température T_1 et sous la pression P_1 de vapeur saturante. Cette vaporisation nécessite le chauffage de la chaudière soit une quantité de chaleur $Q_1 > 0$ par kilogramme de vapeur.
- La vapeur est ensuite injectée dans un cylindre qui fonctionne selon trois phases :
 - admission de la vapeur à la pression P_1 jusqu'à un volume V_1 ;
 - détente adiabatique de la vapeur d'eau 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 par le refroidissement de la vapeur et sa condensation dans le condenseur où elle cède de la chaleur à l'atmosphère $Q_2 < 0$ chaleur reçue par kilogramme d'eau liquide formée.
- Recyclage de l'eau condensée vers la chaudière à l'aide de la pompe. Cette transformation peut être considérée comme adiabatique.

Remarquons les deux points suivants :

- cette machine fonctionne entre deux 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 ($W_1 < 0$ par kg de vapeur) et en consomme au niveau de la pompe ($W_2 > 0$ par kg d'eau).

Le travail total échangé W est la somme algébrique de ces deux travaux ($W = W_1 + W_2$ par kg de vapeur) ; le travail effectivement récupéré W_{rec} est l'opposé de cette quantité et $W_{\text{rec}} > 0$.



Doc. 2. Diagramme de Clapeyron du fluide. Les états B et C sont quasiment confondus sur le diagramme.

Le cycle décrit par un kilogramme d'eau dans une machine à vapeur peut être schématisé dans un diagramme de Clapeyron où les points A à E correspondent à (doc. 4)

- de A à B : la pompe ;
- de B à D : la chaudière ;
- de D à E : le cylindre ;
- de E à A : le condenseur.

On s'arrange pour modifier le cycle de façon à ce que E soit sur la courbe de saturation, car un mélange liquide-vapeur est plus difficile à refouler qu'un gaz seul.

Cycle des centrales thermiques ou nucléaires : On remplace le piston par un ensemble turbine+alternateur. Pour les centrales nucléaires, le chauffage de l'eau se fait par décomposition radioactive (fission de noyaux lourds). Il y a alors deux circuits d'eau : primaire et secondaire.

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Thermo/Machines/Turbine_FJ.php

2.) Les moteurs à combustion interne:

Le cycle de Carnot qui correspond à un rendement théorique maximal n'est pas utilisable en pratique. La présence des deux isothermes réversibles implique des écarts de températures très faibles durant les transferts de chaleur, qui seraient alors très lents. On élimine donc les deux isothermes.

Les moteurs à explosion sont classés en deux catégories suivant la technique d'inflammation du mélange carburant-air :

- les moteurs à allumage commandé (moteurs à essence).

Cycle Beau de Rochas doc 5a

Un mélange convenable essence-air, obtenu à l'aide d'un carburateur (ou pompe à injection), est admis dans la chambre de combustion du cylindre, où l'inflammation est produite par une étincelle.

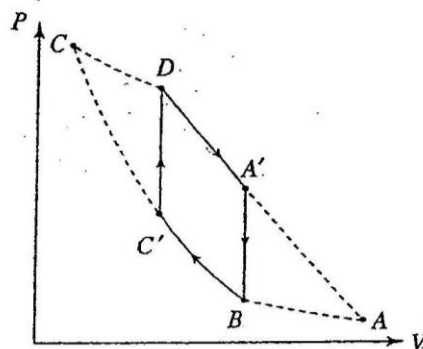
La combustion du mélange C'D s'effectue à volume constant.

- les moteurs à allumage par compression (moteurs Diesel).

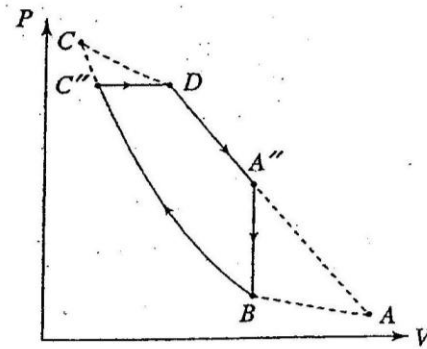
Cycle de Diesel doc 5b

Le carburant est du gazole. On l'injecte sous pression dans la chambre de combustion contenant de l'air préalablement comprimé et chaud, au contact duquel il s'enflamme spontanément.

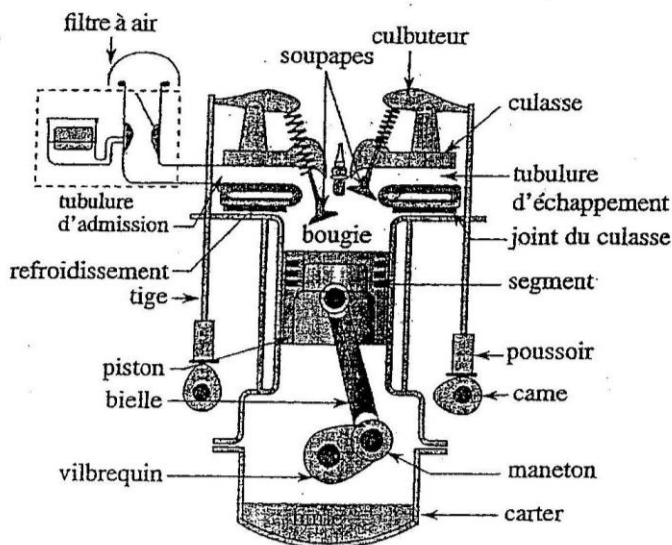
La combustion du mélange C'D s'effectue à pression constante.



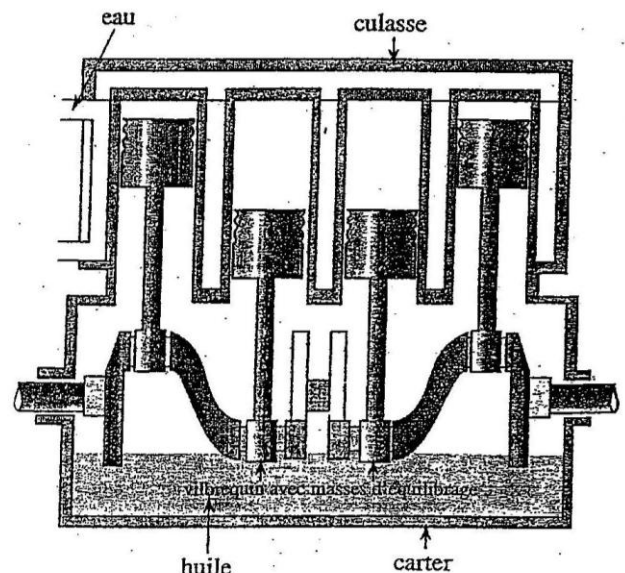
Doc. 5a Cycle de Beau de Rochas.



Doc. 5b Cycle de Diesel.



Doc. 6 Cylindre d'un moteur à essence.



Doc. 7 Coupe d'un moteur à essence à quatre cylindres.

Moteur à essence : en général à quatre cylindres. Grâce à la forme du vilebrequin, tous les cylindres parcourent le même cycle, avec un décalage temporel les uns par rapport aux autres.

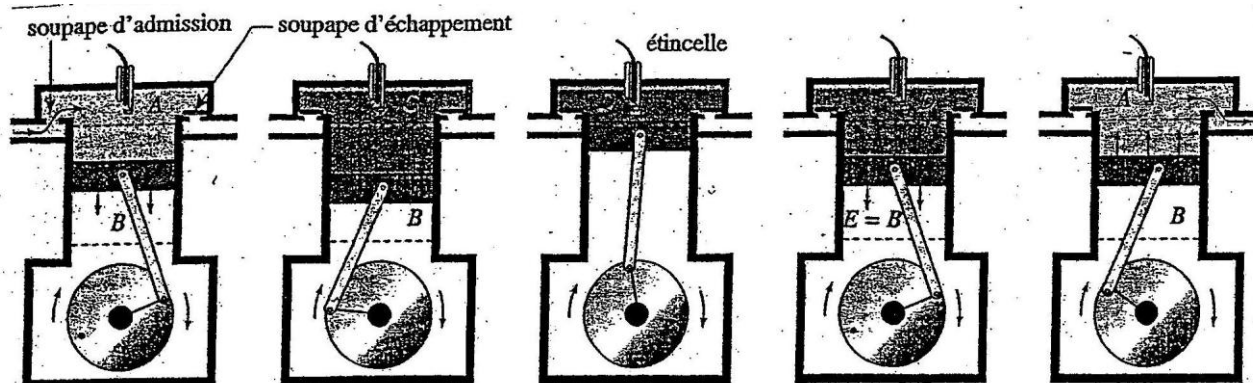
https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Thermo/Machines/4temps_FJ.php

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Thermo/Machines/4cylindres_FJ.php

Moteur Diesel : Rendement meilleur pour une même pression maximale atteinte.

Evite le phénomène parasite d'auto-allumage (explosion du mélange avant la fin de la compression, ce qui provoque un cognement du moteur).

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Thermo/Machines/Diesel_FJ.php



Doc. a. Admission. Doc. b. Compression. Doc. c. Combustion. Doc. d. Détente. Doc. e. Échappement.

Doc. 8 Mise en évidence des quatre temps du cycle Beau de Rochas (deux tours).

Le cycle d'un cylindre est parcouru en quatre temps et nécessite deux tours de vilebrequin :

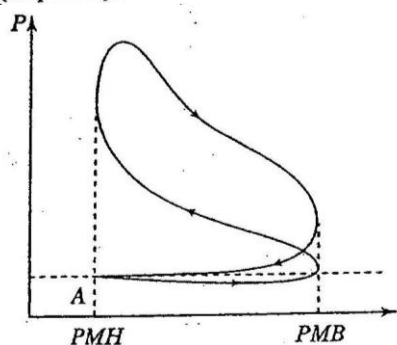
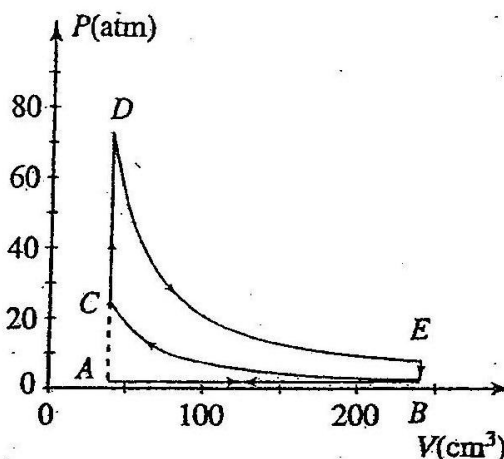
1^{er} temps : admission. La soupape d'admission s'ouvre et la soupape d'échappement est fermée. Le piston entraîné par le vilebrequin descend et aspire le mélange détonant venant du carburateur. La température du mélange est alors de l'ordre de 60 à 80 °C et sa pression de l'ordre du bar. C'est l'étape AB du diagramme de Watt du cylindre, donné en document 21, et illustré sur le document 22 par l'étape a.

2^e temps : compression et combustion. Les deux soupapes sont fermées et le piston, en remontant, comprime adiabatiquement le mélange détonant. Le volume du mélange est alors réduit de huit à dix fois son volume initial (étape BC). En C, une étincelle électrique jaillit de la bougie. La combustion du mélange détonant s'effectue, à volume constant, en une fraction de seconde. La température s'élève très rapidement entre 900 et 1 000 °C, quant à la pression elle est de l'ordre de 60 à 80 bar (étape CD) illustrée en 22b et c).

3^e temps : détente. Le piston est alors repoussé violemment vers le bas, et le gaz de combustion se détend adiabatiquement (étape DE). Ce temps est le seul temps moteur du cycle (doc. 22d).

4^e temps : échappement. La soupape d'admission restant fermée, la soupape d'échappement s'ouvre. La pression chute, à volume constant, jusqu'à une pression d'environ 1 bar (étape EB et doc. 22e). Le piston, en remontant, éjecte les gaz brûlés, à travers la soupape d'échappement, dans l'atmosphère (étape BA).

Doc 9. Diagramme de Watt d'un cylindre



Doc. 11 Diagramme de Clapeyron du mélange gazeux d'un moteur réel.

- Lors de l'admission, la viscosité du mélange gazeux crée une légère dépression.
 - L'explosion a lieu avant que le piston ne parvienne à son point mort haut. Cette avance à l'allumage est provoquée pour tenir compte de la durée de l'étincelle et de celle de la combustion.
 - La soupape d'échappement s'ouvre avant que le piston arrive à son point mort bas afin de permettre une évacuation convenable des gaz de combustion.
- Ainsi, d'une part, les deux transformations réputées isochores ne le sont pas véritablement et, d'autre part, la boucle échappement-admission est parcourue dans le sens trigonométrique, ce qui consomme du travail.

PMH : Point mort haut. Volume minimal. PMB : Point mort bas. Volume maximal.
1 cycle = deux aller-retour du piston = deux tours de l'arbre moteur

3.) Récepteurs thermiques

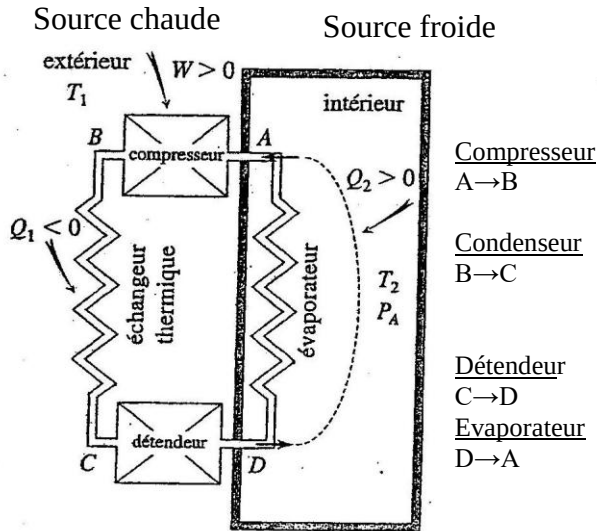
$$Q_f > 0 \Rightarrow W > 0 \text{ et } Q_c < 0$$

a) Réfrigérateur Il faut trouver un mécanisme propre à absorber de la chaleur. On pourrait songer à la détente isotherme d'un gaz, mais le phénomène est trop peu sensible. On préfère utiliser le fait que les liquides absorbent de la chaleur pour se vaporiser.

On utilise un fluide différent de l'eau car sa température de changement d'état sous pression atmosphérique doit être de l'ordre de grandeur de la température du système à refroidir.

Le fluide frigorigène utilisé était le fréon (CF_2Cl_2) de la famille des chlorofluorocarbones, remplacés maintenant par l'hydrogénéofluorocarbure (HFC) de la famille des fluorocarbures.

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Thermo/Machines/Frigo_FJ.php



Soient T_1 la température extérieure et T_2 la température du corps refroidi.

Compresseur

A → B

Condenseur

B → C

Détendeur

C → D

Évaporateur

D → A

- Un fluide est comprimé par une pompe de façon pratiquement adiabatique. Cette compression augmente la température du fluide.

- Il est donc refroidi dans un échangeur avec une source chaude à la température T_1 inférieure à sa température en sortie de compresseur. Ses caractéristiques sont telles qu'à température T_1 et sous la pression en sortie de compresseur il est liquide.

- Il traverse ensuite un détendeur (détente de type Joule-Thomson) où il se vaporise. Sa température en sortie de détendeur est inférieure à T_2 .

- Il traverse enfin un deuxième échangeur (évaporateur) en contact avec le corps à refroidir où il reçoit de la chaleur de la part de celui-ci.

Doc. 3 Principe d'une machine frigorifique.

b) Pompe à chaleur Fonctionne comme chauffage l'hiver et comme climatiseur l'été.

Il suffit de changer le sens de circulation du fluide pour passer d'un mode de fonctionnement à l'autre.

Conclusion : principe de la cogénération

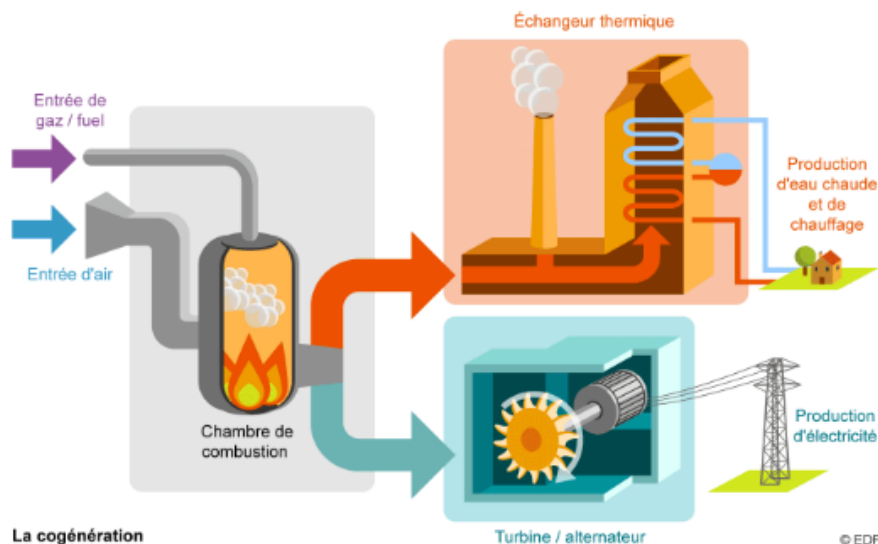
La cogénération consiste à produire en même temps et dans la même installation de l'énergie thermique à flamme et de l'énergie mécanique.

- La chaleur est utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude à l'aide d'un échangeur.

- L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique grâce à un alternateur.

Les installations fonctionnent au gaz, au fioul, avec toute forme d'énergie locale (géothermie, biomasse...) ou liée à la valorisation des déchets (incinération des ordures ménagères...).

Elles ont un excellent rendement énergétique, mais elles doivent produire au plus près des lieux de consommation en raison des pertes pendant le transport de chaleur.



La cogénération

Turbine / alternateur

© EDF