

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 : $r \leq r_c$

Rq: $r = \left| \frac{W_{\text{cycle}}}{Q_c} \right|$ ou $W_{\text{cycle}} = W < 0$
 $Q_c > 0$

$$r = -\frac{W_{\text{cycle}}}{Q_c} \quad r = -\frac{W}{Q_c}$$

① $\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q_c + Q_f = 0$

② $\Delta S_{\text{fluide}} = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_{\text{créée}} = 0$

$\Rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$ (Carnot classique.)

③ $-W = Q_c + Q_f \Rightarrow r = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c}$

$r = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$ (cf cycle de Carnot TD THZ)

④ $\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0 \Rightarrow \frac{Q_f}{T_f} \leq -\frac{Q_c}{T_c}$

$Q_c > 0 \Rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} \leq -\frac{T_c}{T_f}$

$1 + \frac{Q_f}{Q_c} \leq 1 - \frac{T_c}{T_f} \Rightarrow r \leq 1 - \frac{T_c}{T_f}$

Si le cycle est décrit de façon réversible :

$S_{\text{créée}} = 0 \Rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$

$\Rightarrow r_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$ rendement de Carnot

Cycle de Carnot : Cycle dont le rendement est le rendement de Carnot \Rightarrow cycle réversible.

L'échange de chaleur entre 2 corps de temp \neq est tjs irréversible.

\Rightarrow le fluide doit être à T_c lorsqu'il échange de la chaleur avec la source chaude, à T_f avec la source froide.

- 2 isothermes réversibles, 1 à T_c , 1 à T_f

- pas d'autres échanges de chaleur.

\Rightarrow 2 adiab pour relier les isothermes.

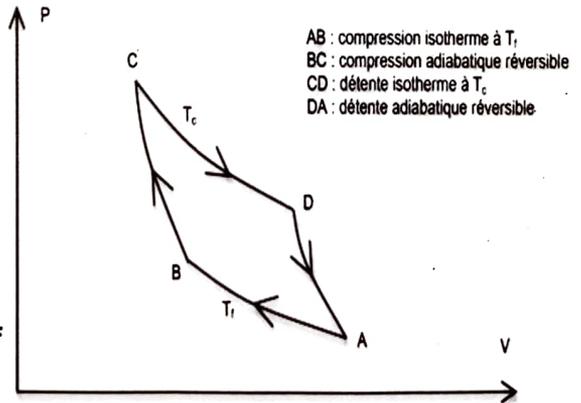
$W < 0$ Cycle décrit dans le sens horaire. Les isothermes sont moins pentues que les adiab.

*** cycle de Carnot.

faites varier de P, pour 1 aire (donc 1W) faite.

Rq: $\begin{matrix} \uparrow \\ \rightarrow \end{matrix}$ diagramme de Watt

$\begin{matrix} \uparrow \\ \searrow \end{matrix}$ diagramme de Clapeyron



AB : compression isotherme à T_f
 BC : compression adiabatique réversible
 CD : détente isotherme à T_c
 DA : détente adiabatique réversible

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 $Q_c < 0$

Réfrigérateur: Doit refroidir l'intérieur du frigo (partie la + froide)
= Prend de la chaleur à la source froide $Q_f > 0$

Le fluide reçoit pour cela un travail du système méca (qui lui reçoit un travail électrique du secteur) $W > 0$

Il évacue de la chaleur vers l'ext (cuisine = source chaude)
 $Q_c < 0$ (chauffe la cuisine)

Climatiseur: source froide = int de la maison
chaude = ext

Le fluide doit refroidir la source froide.

Pompe à chaleur: (utilisé à chauffage l'hiver)
source chaude = int de la maison
froide = ext

Le fluide chauffe la source chaude en lui donnant de la chaleur ($Q_c < 0$). Pour cela il prend de la chaleur à la source froide ($Q_f > 0$) et reçoit travail ($W > 0$)

Rq: pompe à chaleur en général réversible
(climatiseur l'été, chauffage l'hiver)

on veut $Q_f > 0$

Signe de W: ① $\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q_f + Q_c = 0$
 $\Rightarrow Q_c = -Q_f - W$

② Carat Clausius $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$

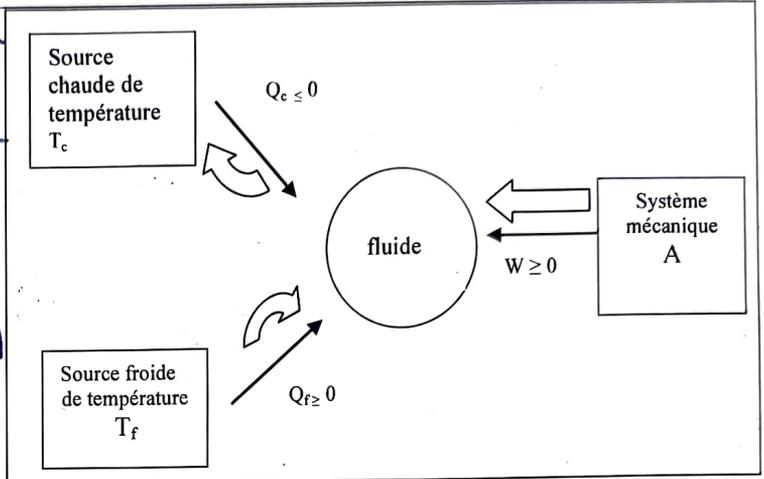
① $\frac{Q_f}{T_f} - \frac{Q_f}{T_c} - \frac{W}{T_c} \leq 0$

$\Rightarrow Q_f \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_c} \right) \leq \frac{W}{T_c}$

$\Rightarrow Q_f \left(\frac{T_c - T_f}{T_f T_c} \right) \leq \frac{W}{T_c}$

$\Rightarrow W \geq 0$

$\Rightarrow Q_c = -Q_f - W \leq 0$



→ def du sens de transfert
⇒ transferts réels.

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. $e = -\frac{Q_c}{W}$

COP: coefficient de Performance

e n'est déf de n mais ≥ 1

a) réfrigérateur ou climatiseur.

$$e = \left| \frac{Q_f}{W} \right| \quad e = \frac{Q_f}{W}$$

$$\textcircled{1} W + Q_c + Q_f = 0 \Rightarrow W = -Q_c - Q_f$$

$$e = \frac{-Q_f}{-Q_c - Q_f} = \frac{1}{\frac{Q_c}{Q_f} + 1}$$

$$\textcircled{2} \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$$

$$\Rightarrow \frac{Q_c}{T_c} \leq -\frac{Q_f}{T_f}$$

$$\Rightarrow 1 + \frac{Q_c}{Q_f} \leq 1 - \frac{T_c}{T_f}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{1 + \frac{Q_c}{Q_f}} \geq \frac{1}{1 - \frac{T_c}{T_f}}$$

$$\Rightarrow e \leq \frac{1}{1 - \frac{T_c}{T_f}}$$

$$\Rightarrow e \leq \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad e_R = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad \text{pour 1 cycle réversible.}$$

b) Pompe à chaleur (chauffage)

$$e = \left| \frac{Q_c}{W} \right| = -\frac{Q_c}{W}$$

$$\textcircled{1} \Rightarrow W = -Q_c - Q_f$$

$$e = \frac{+Q_c}{-Q_c - Q_f} = \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}}$$

$$\textcircled{2} \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$$

$$\frac{Q_c}{T_c} \leq -\frac{Q_f}{T_f}$$

$$Q_c < 0 \text{ donc } -\frac{T_f}{T_c} \leq \frac{Q_f}{Q_c}$$

$$1 - \frac{T_f}{T_c} \leq 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$$

$$\frac{1}{1 - \frac{T_f}{T_c}} \leq \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}}$$

$$e \geq \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

$$e_R = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

si cycle réversible.

IV Exemples de machines thermiques usuelles

1.) Machine à vapeur

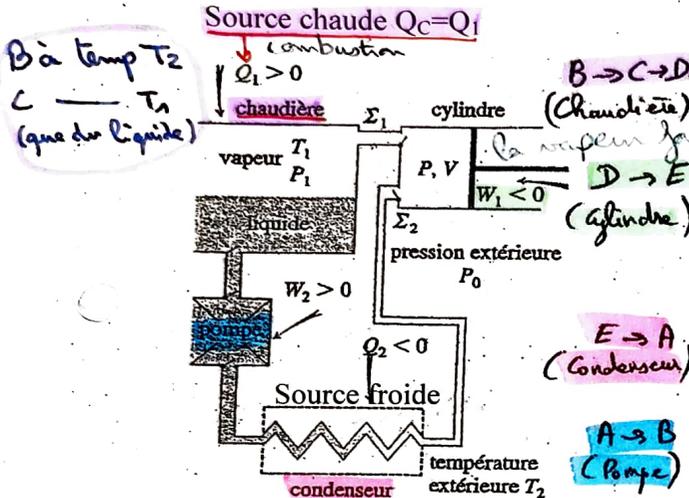
a) Principe d'un moteur thermique

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

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.

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



- 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**.

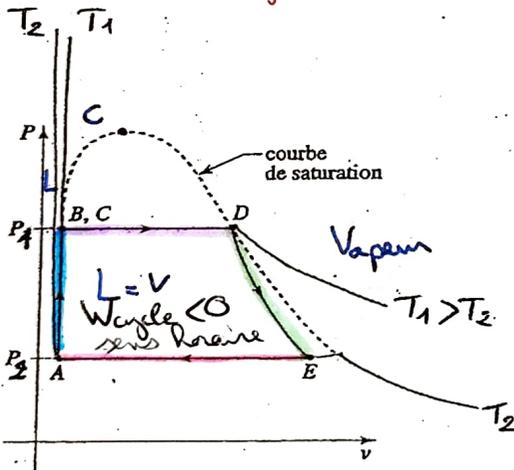
Remarquons les deux points suivants :

- 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 $W_{rec} > 0$.

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

Source froide. $Q_2 = Q_c$
air est soufflé



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.

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

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.

2.) Les moteurs à combustion interne: (ou explosion)

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.

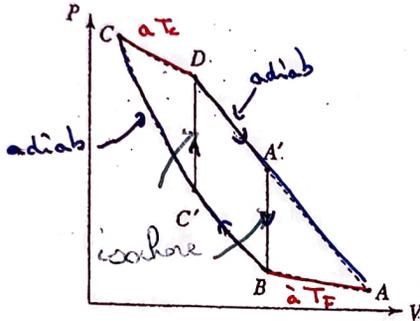
- les moteurs à allumage par compression (moteurs Diesel).

Cycle de Diesel doc 5b

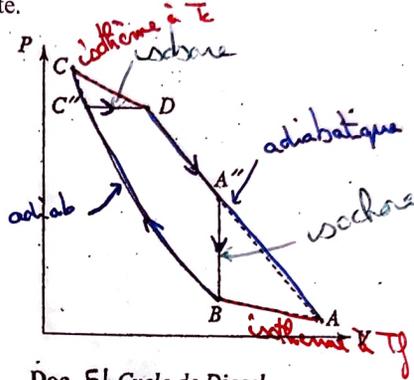
Le carburant est du gazole. On l'injecte sous pression dans la chambre de combustion contenant de l'air préalablement comprimé et chaud, au contact duquel il s'enflamme spontanément.

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

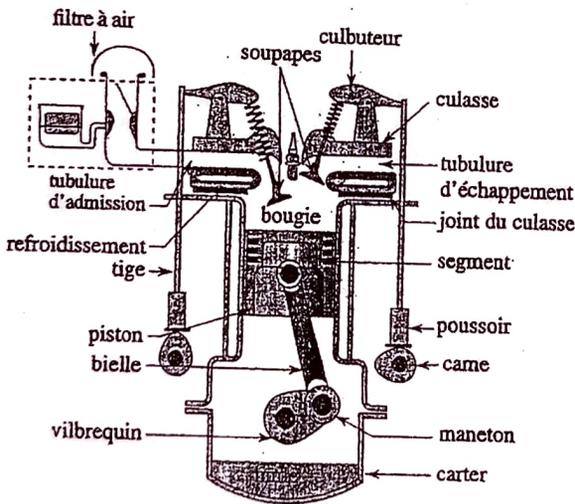
Cycle de Carnot
= 2 isothermes rev
+ 2 adiab rev



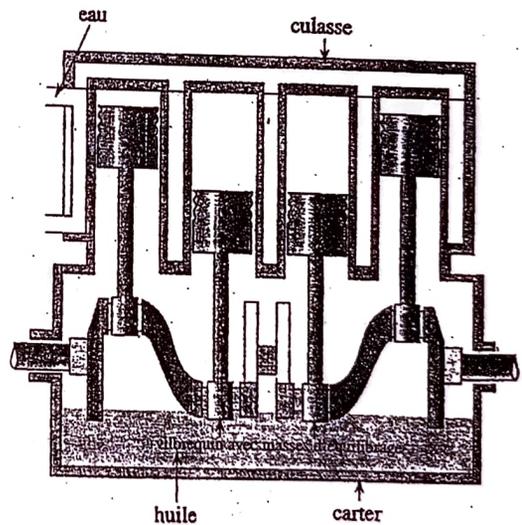
Doc. 5a Cycle de Beau de Rochas.
= moteur à essence



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.

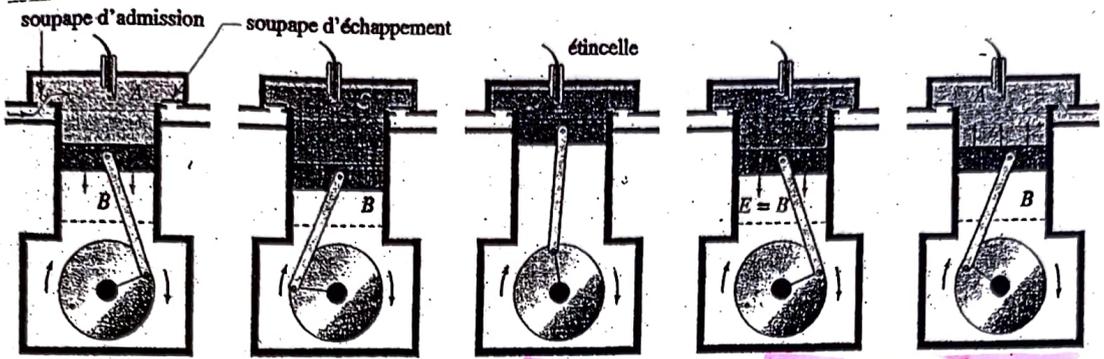
https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Thermo/Machines/4temps_FJ.php

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

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

Évite 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.
 A → B B → C C → D D → E E → B
 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 :

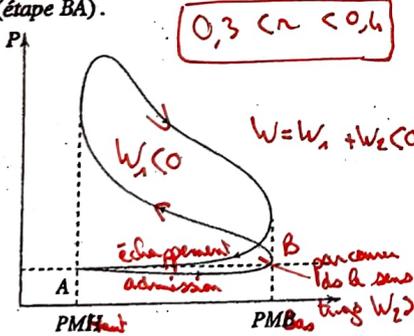
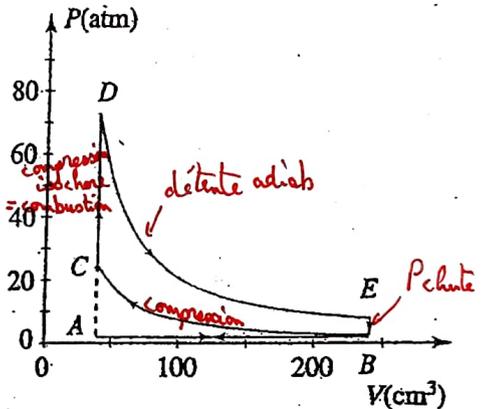
1^{er} temps : admission. La soupape d'admission s'ouvre et la soupape d'échappement est fermée. Le piston entraîné par le vilebrequin descend et aspire le mélange détonant venant du carburateur. La température du mélange est alors de l'ordre de 60 à 80 °C et sa pression de l'ordre du bar. C'est l'étape 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



- 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.

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

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

Banque PT 2018

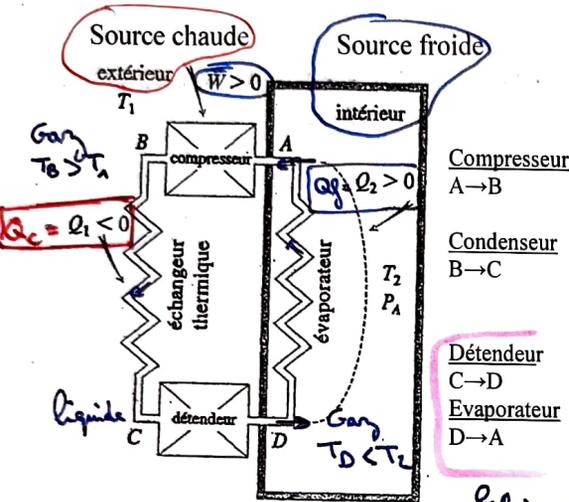
$Q_f > 0 \Rightarrow W > 0$ et $Q_c < 0$

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 frigorigère utilisé était le fréon (CF_2Cl_2) de la famille des chlorofluorocarbones, remplacés maintenant par l'hydrogénéofluorocarbonate (HFC) de la famille des fluorocarbures.

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



m cycle que la machine à vapeur décrit en sens inverse

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

- Compresseur A → B
- Condenseur B → C
- Détendeur C → D
- Evaporateur D → A

$e_{frigo} \approx 8$
 $e_{congel} \approx 2$

$3 < e_{pompe \ à \ chaleur} < 5$

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.

