

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

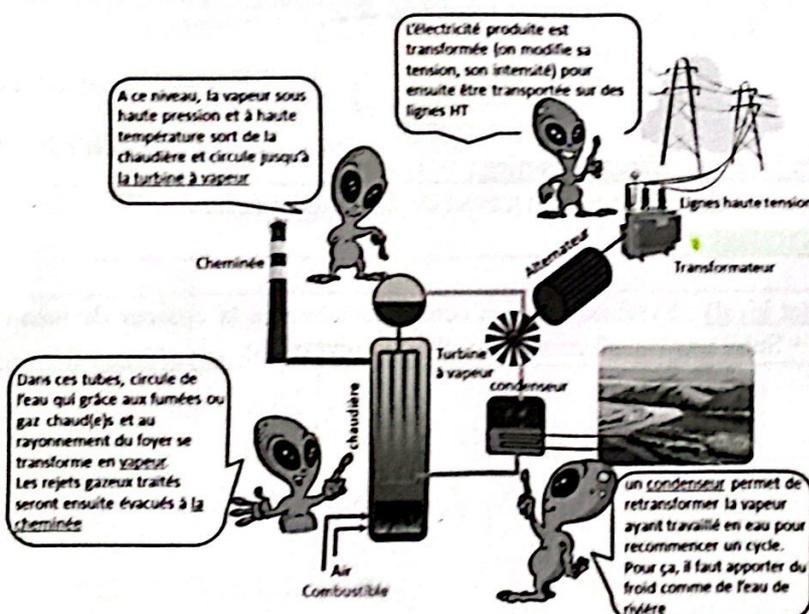
IV Exemples de machines thermiques usuelles ..... 9

    1.) Machine à vapeur ..... 9

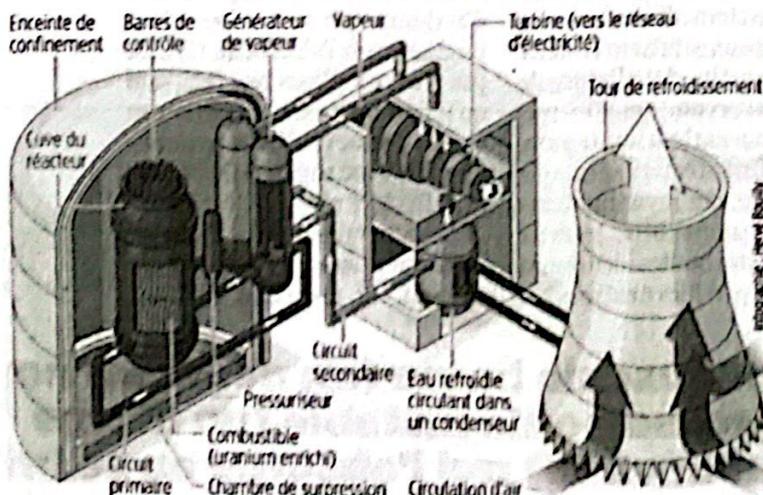
    2.) Les moteurs à combustion interne: ..... 10

    3.) Récepteurs thermiques ..... 12

Conclusion : principe de la cogénération ..... 12



**Réacteur à eau pressurisée REP**



## I Généralités

### 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.

exemple de moteur : il fournit du travail  $W < 0$

ex : moteur à explosion fluide : mélange air essence

machine à vapeur fluide : eau vaporisée

centrale nucléaire fluide : eau sous pression.

de =

exemple de récepteur : il reçoit du  $W$ ,  $W > 0$

ex : pompe à chaleur

réfrigérateur

climatiseur

fluide : frigorigère

frigorifère remplacé par des HFC.

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**.

Syst mécanique : ex : piston, turbine

2<sup>nd</sup> principe :  $\Delta S = S_{ech} + S_{rec}$

$S_{rec} = 0$  (transfo réversible)

$S_{ech} = \int \frac{\delta Q}{T} = 0$  (transfo adiabatique)

$\Rightarrow \Delta S_{syst\ méca} = 0$  transfo isentropique

Source de chaleur : ex : air ext ou lac, océan → fraîche  
combustion de charbon, décompos' endotherme → chaude

Second principe :  $\Delta S = S_{ech} + S_{rec}$

$S_{rec} = 0$  (réversible)

$S_{ech} = \int \frac{\delta Q}{T_s}$  ( $T_{ext} = T$ , réversible)

$= \frac{Q}{T}$  car  $T = cste$ .

$\Delta S_{source\ ext.} = \frac{Q_{source}}{T_{source}}$

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 :

1<sup>er</sup> principe :  $\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q = 0$   
car U est une fonction d'état,  $\Delta U$  ne dépend que de EI et EF

2<sup>nd</sup> principe :  $\Delta S_{\text{fluide}} = S_{\text{ech}} + S_{\text{créée}} = 0$   
car S est une fct d'état,  $\Delta S$  ne dépend que de EI, EF.

Au cours du cycle, le fluide n'échange de la chaleur qu'avec le thermostat, source de chaleur de  $T_s$  supposée cste

$$S_{\text{ech}} = \int \frac{\delta Q}{T_s} = \int \frac{\delta Q}{T_s} = \frac{Q}{T_s}$$

$$\Rightarrow \Delta S_{\text{fluide}} = \frac{Q}{T_s} + S_{\text{créée}} = 0.$$

$$\frac{Q}{T_s} = -S_{\text{créée}} \quad \text{or } S_{\text{créée}} \geq 0 \text{ (fjn)}$$

$$\text{donc } \frac{Q}{T_s} \leq 0 \quad T_s \text{ en Kelvin, } T_s > 0$$

$$\Rightarrow Q \leq 0$$

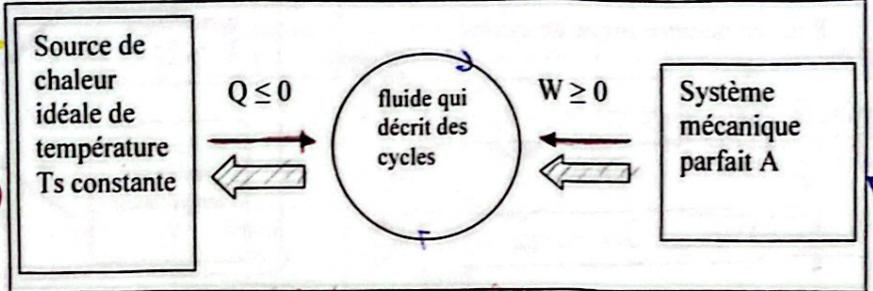
$$\text{or } W = -Q \Rightarrow W \geq 0$$

Au cours du cycle, le fluide reçoit un travail et fournit de la chaleur

( On a créé un moyen de chauffage

ex: radiation à fluide calorifique, type "bain d'huile"

( le fluide reçoit un W (qui entraîne sa circulation) et fournit de la chaleur



→ : définition des transferts.  
← : sans réel des échanges

Alimentation électrique

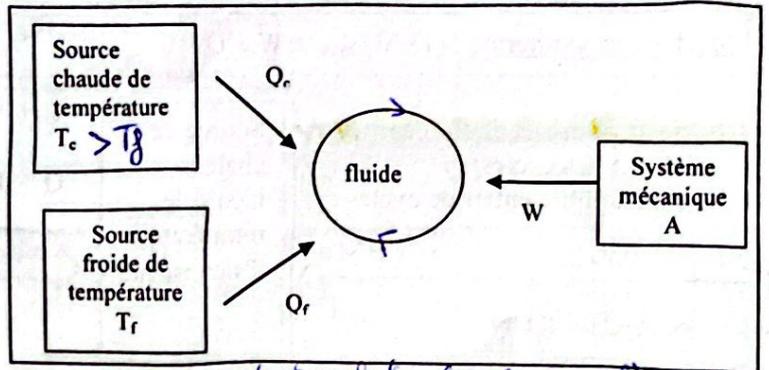
3.) Généralités sur les machines dithermes

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.



→ : définition des transferts (pas la sens réel).

Pour un nombre entier de cycles :

le fluide échange  $W$  (travail) et  $Q = Q_c + Q_f$  (chaleur)

1<sup>er</sup> principe :  $\Delta U_{\text{fluide}} = W + Q_c + Q_f = 0$  (1)

car U fonction d'état.

2<sup>nd</sup> principe :  $\Delta S_{\text{fluide}} = S_{\text{ech}} + S_{\text{créée}} = 0$  (2)

car S fonction d'état.

$S_{\text{ech}} = \int_{E_i}^{E_f} \frac{\delta Q}{T_{\text{ext}}} = \int_{E_i}^{E_f} \frac{\delta Q_c}{T_c} + \int_{E_i}^{E_f} \frac{\delta Q_f}{T_f}$  car  $T_c, T_f$  const.

donc  $S_{\text{ech}} = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f}$   $\left\{ \Delta S_{\text{fluide}} = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_{\text{créée}} = 0 \right.$

Source  $\geq 0$

(2)  $\Rightarrow S_{\text{ech}} = -S_{\text{créée}} \Rightarrow S_{\text{ech}} \leq 0$ .

$\rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$  Inégalité de Carnot-Clausius. (2')

2<sup>e</sup> Si le cycle est décrit de façon réversible :  $S_{\text{créée}} = 0$

$\Rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$  égalité de Carnot-Clausius.

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  $Q_c > 0$ .

On veut créer un moteur thermique. Le fluide doit donc fournir un travail au cours du cycle.  $W \leq 0$

Signe de  $Q_f$ ?

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

② Canot classique:  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$

①  $\Rightarrow Q_c = -Q_f - W$

②  $\Rightarrow -\frac{Q_f}{T_c} - \frac{W}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$

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

$\Rightarrow Q_f \left( \frac{T_c - T_f}{T_f T_c} \right) \leq \frac{W}{T_c} \leq 0$

$T_c > 0, T_f > 0, T_c > T_f, \frac{T_c - T_f}{T_c T_f} > 0$

$\Rightarrow Q_f \leq 0$

Signe de  $Q_c$ ?

①  $\Rightarrow Q_c = -(Q_f + W)$  où  $Q_f \leq 0, W \leq 0$ .

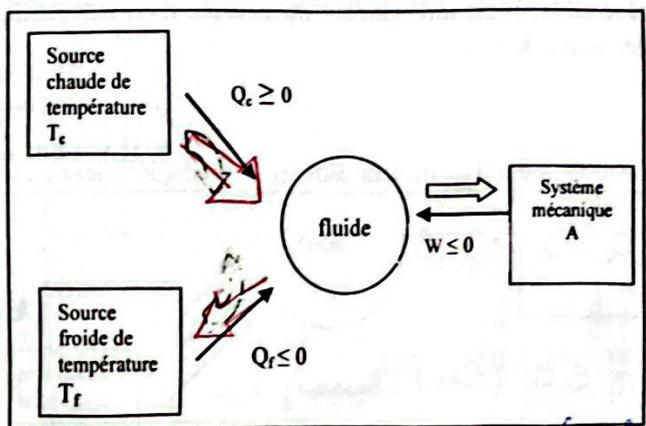
$\Rightarrow Q_c \geq 0$

$W \leq 0$ , le fluide fournit du travail au syst. méca (piston ou turbine)

Rq: le syst méca peut être relié à un alternateur pour fournir de l'électricité

$Q_c \geq 0$ : le fluide reçoit de la chaleur de la source chaude (lieu de la combustion du charbon ou du mélange air/essence)

$Q_f \leq 0$ : l'évacuation de la chaleur vers la source froide (air ext ou motory, à l'aide d'ailettes de refroidissement ou fleuve ou océan pour 1 centrale nucléaire)



$\rightarrow$ : définition des transferts  
 $\Rightarrow$ : sens réel des échanges

Rq:  $\rightarrow$  def des transferts

tes les grandeurs sont algébriques:

$> 0$  reçues par le fluide

$< 0$  sinon.

## 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 :  $r \leq r_c$

$$\textcircled{1} W + Q_c + Q_f = \Delta U = 0$$

$$W = W_{\text{cycle}} \quad \triangle$$

$$\textcircled{2} \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \quad (\text{Carnot Clausius})$$

$$\eta = -\frac{W}{Q_c}$$

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

$$\text{donc } \eta = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$$

$$\textcircled{2} \rightarrow \frac{Q_f}{T_f} \leq -\frac{Q_c}{T_c}$$

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

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

démo à connaître.

$$\triangle R = \left| \frac{W_{\text{cycle}}}{Q_c} \right| \quad \text{ou } \begin{cases} W = W_{\text{cycle}} < 0 \\ Q_c > 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow R = -\frac{W}{Q_c}$$

$$\text{Rq: pour un cycle réversible: } \textcircled{2} \rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$$

$$\Rightarrow R_c = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad \text{Rendement de Carnot } R_c$$

pour un cycle quelconque:  $R \leq R_c$

Cycle de Carnot: cycle réversible au cours duquel le fluide échange:

$$\begin{array}{l} | Q_c \text{ avec la source à } T_c \\ | Q_f \text{ avec la source à } T_f \end{array}$$

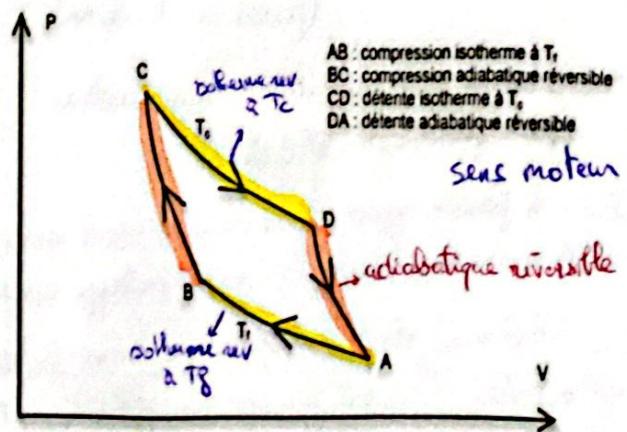
Un échange de chaleur entre 2 corps de  $T \neq$  est toujours réversible.

$\rightarrow$  les échanges doivent se faire en ayant le fluide à température  $T_c$ , puis  $T_f \rightarrow$  2 isothermes réversibles ( $T_c, T_f$ )

$\rightarrow$  2 adiabatiques réversibles pour relier les isothermes.

Le cycle n'est jamais utilisé en pratique :  
 • les échanges de chaleur isothermes seraient beaucoup trop lents  
 • l'aie est très faible, pour des variations de pression importantes.

diagramme de WATT.



adiabatiques + pentues que les isothermes.

### III Récepteurs thermiques

#### 1.) Fonctionnement

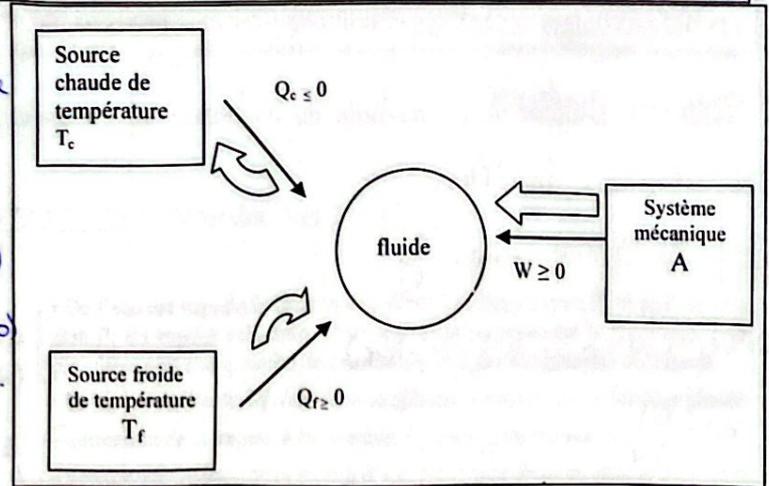
**Récepteur thermique ditherme:** Reçoit du travail pour refroidir ou chauffer une partie du système.

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  $Q_c < 0$

Exemple: Réfrigérateur : doit refroidir la source  
 $Q_f > 0$  : il reçoit de la chaleur de la source froide  
 ↑ fluide  
 intérieur du frigo

Pour réaliser cette fonction, il doit recevoir du travail du système ( $W > 0$ ) (système du moteur de l'élect) et il fournit de la chaleur à la source chaude ( $Q_c < 0$ ) il chauffe la source chaude (ext du frigo = chaleur).

climatiseur : source froide: int de la maison  
 --- chaude: ext ---



Pompe à chaleur : (en mode chauffage) (int c réversible)  
 chauffe l'air dans la pièce etc

source chaude: int de la maison.  
 --- froide: ext ---

⚠ Les signes des échangeant ne changent pas.

démo des signes: hypothèse:  $Q_f \geq 0$ .

on cherche d'abord celui de  $W$ .

$$(1) W + Q_c + Q_f = \Delta U = 0 \Rightarrow Q_c = -W - Q_f$$

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

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

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

$$\Rightarrow Q_f \frac{T_c - T_f}{T_f T_c} \leq \frac{W}{T_c} \quad \text{or} \quad \begin{cases} T_c > 0, T_f > 0, Q_f > 0 \\ \text{et } T_c > T_f \end{cases}$$

donc  $W > 0$

Signe de  $Q_c$ ?  $Q_c = -(Q_f + W)$

or  $Q_f > 0$  et  $W > 0$  donc  $Q_c < 0$ .

## 2.) Efficacité

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

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

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

⚠ on l'appelle pas rendement pq on & veut  $> 1$ .

a) réfrigérateur ou climatiseur :

$$e = \left| \frac{Q_f}{W} \right| \quad Q_f > 0, W > 0 \Rightarrow e = \frac{Q_f}{W}$$

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

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

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

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

$$\Rightarrow 1 + \frac{Q_c}{Q_f} \leq 1 - \frac{T_c}{T_f} \quad \left. \begin{array}{l} \text{inverse (z)} \\ \times (-1) \quad (\leq) \end{array} \right\}$$

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

$$\text{donc } e \leq \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad \text{à redémon}$$

pour un cycle réversible:  $e_f = \frac{T_f}{T_c - T_f}$

b) pompe à chaleur (chauffage)

$$e = \left| \frac{Q_c}{W} \right| \quad Q_c < 0, W > 0 \Rightarrow e = -\frac{Q_c}{W}$$

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

$$\text{donc } e = \frac{Q_c}{Q_c + Q_f} = \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}}$$

$$\textcircled{2} \rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \Rightarrow \frac{Q_f}{T_f} \leq -\frac{Q_c}{T_c} \Rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} \geq -\frac{T_f}{T_c}$$

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

$$\Rightarrow e \leq \frac{T_c}{T_c - T_f} \quad \text{à redémon}$$

pour un cycle réversible:  $e_r = \frac{T_c}{T_c - T_f}$



$e$  est aussi appelée COP

Coefficient de performances.

IV Exemples de machines thermiques usuelles

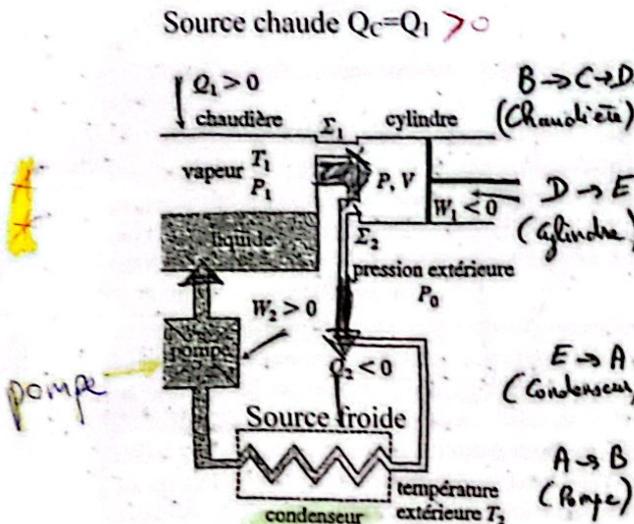
1.) Machine à vapeur

a) Principe d'un moteur thermique  $W < 0 \Rightarrow Q_f < 0$  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



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.

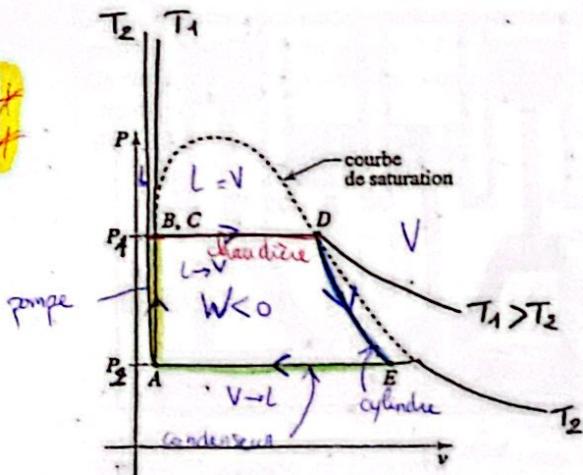
Remarquons les deux points suivants :

- 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  $W_{rec} > 0$ .

$$W = W_{cyl} = \underbrace{W_1}_{< 0} + \underbrace{W_2}_{> 0} < 0$$

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)



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

- 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.

## 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.

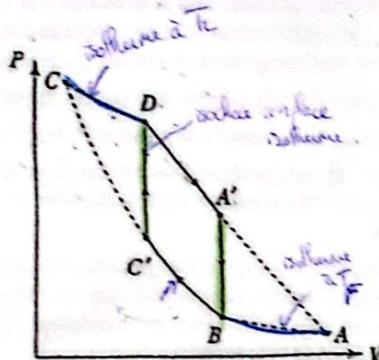
- les moteurs à allumage par compression (moteurs Diesel).

Cycle de Diesel doc 5b

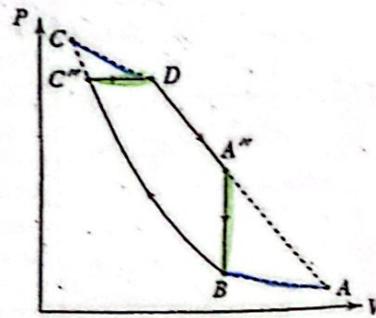
Le carburant est du gazole. On l'injecte sous pression dans la chambre de combustion contenant de l'air préalablement comprimé et chaud, au contact duquel il s'enflamme spontanément.

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

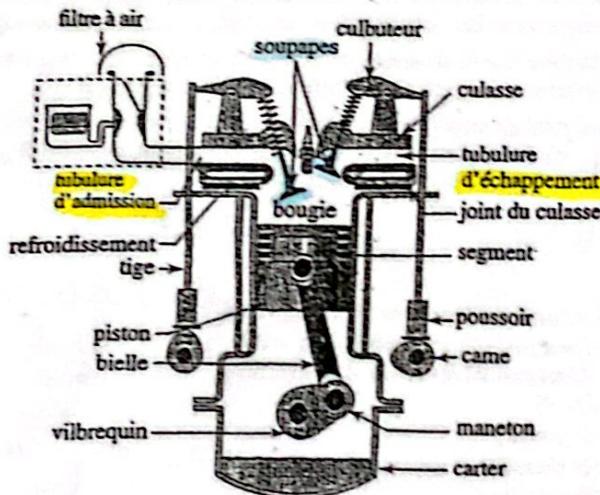
cycle de Carnot  
en pointillés



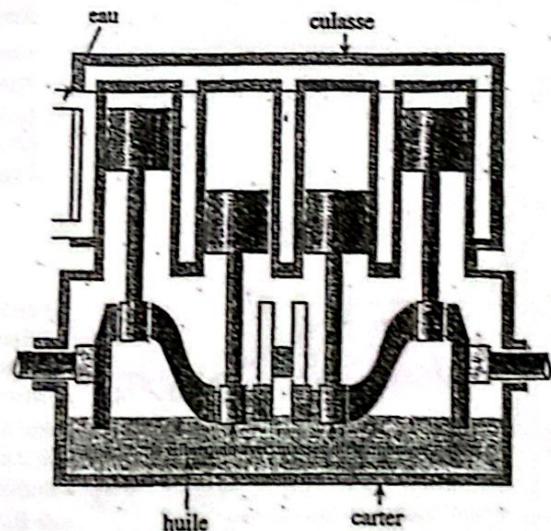
Doc. 5a Cycle de Beau de Rochas.



Doc. 5b Cycle de Diesel.



Doc. 6 Cylindre d'un moteur à essence.

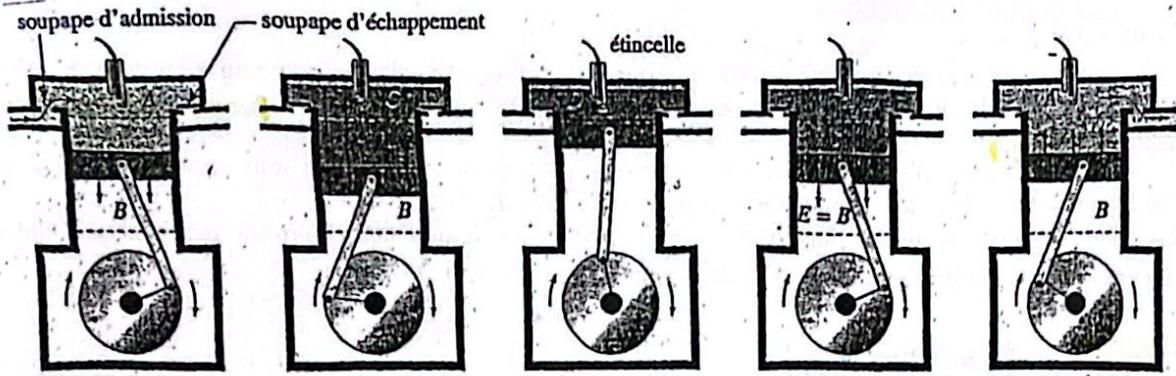


Doc. 7 Coupe d'un moteur à essence à quatre cylindres.

**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.

**Rendement meilleur pour le moteur Diesel** 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).



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).

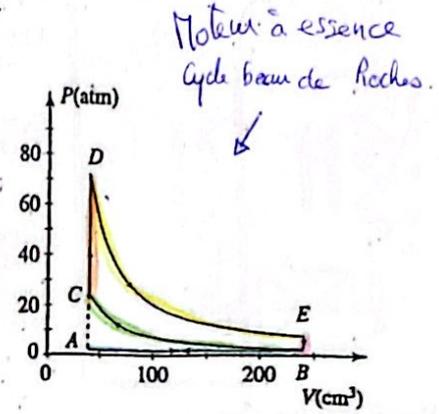
Le cycle d'un cylindre est parcouru en quatre temps et nécessite deux tours de vilebrequin :

1<sup>er</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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).

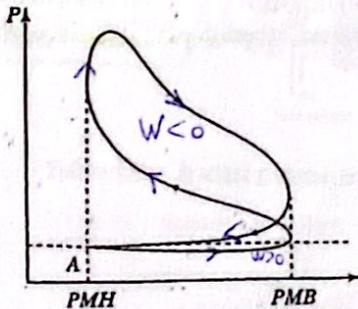
4<sup>e</sup> temps : échappement. La soupape d'admission restant fermée, la soupape d'échappement s'ouvre. La pression chute, à volume constant, jusqu'à une pression d'environ 1 bar (étape EB et doc. 22e). Le piston, en remontant, éjecte les gaz brûlés, à travers la soupape d'échappement, dans l'atmosphère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



Doc. 9. Diagramme de Watt d'un cylindre.

$0,3 < \pi < 0,4$

adiabatique (piston descend)



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

} important

tout sera donné/exploqué à l'élect → intéressant de connaître qd même

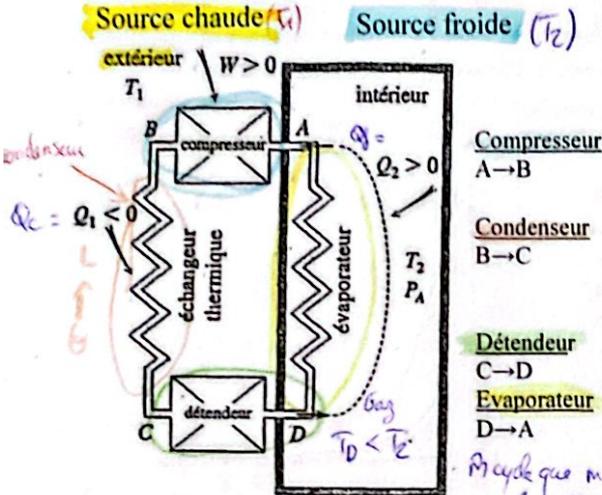
3.) Récepteurs thermiques

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

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



- Soient  $T_1$  la température extérieure et  $T_2$  la température du corps refroidi.
- Compresseur A → B:** Un fluide est comprimé par une pompe de façon pratiquement adiabatique. Cette compression augmente la température du fluide.
  - Condenseur B → C:** 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.
  - Détendeur C → D:** Il traverse ensuite un détendeur (détente de type Joule-Thomson) où il se vaporise. Sa température en sortie de détendeur est inférieure à  $T_2$ .
  - Évaporateur D → A:** 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.

