Le premier principe de la thermodynamique

1. Energie interne U

L'énergie interne notée U est une fonction d'état. Elle est constituée par la somme des énergies cinétiques et des énergies potentielles d'interaction entre les molécules.
L'énergie interne d'un gaz parfait, ne dépend que de la température, soit **U = f (T)**

La variation élémentaire d'énergie interne est :

$$\mathbf{dU = mC_v dT}$$

2. Enthalpie H

Par définition, l'enthalpie d'un système thermodynamique est donnée par la relation

$$\mathbf{H = U + P.V}$$

L'enthalpie d'un gaz parfait ne dépend que de la température, soit **H=f (T)**. La variation élémentaire de l'enthalpie est :

$$\mathbf{dH = \delta Q_p = mc_p dT}$$

- **Enoncé du premier principe**

"La variation de l'énergie interne d'un système fermé, entre l'état d'équilibre initial (1) et l'état d'équilibre final (2), est égale à la somme algébrique du travail W et de la chaleur Q échangés avec le milieu extérieur"

$$\mathbf{\Delta U = U_2 - U_1 = W + Q}$$

Soit pour une variation infinitésimale :

$$\mathbf{dU = \delta W + \delta Q}$$

Dans le cas d'un cycle : $\Delta U = 0$, donc : $Q + W = 0$

Le second principe de la thermodynamique

Enoncés à la base du deuxième principe

- **Enoncé de Clausius**

Le passage de la chaleur d'une source chaude à une source froide n'a jamais lieu sans intervention du milieu extérieur.

- **Enoncé de Kelvin**

Un cycle monotherme (à une seule source de chaleur) ne peut pas fournir du travail.

Une autre formulation de l'énoncé de Kelvin :

Au cours d'un cycle, lorsqu'un système échange de la chaleur avec une seule source de chaleur il a nécessairement reçu de travail et donné de la chaleur (**W>0 et Q<0**)

Conséquence de l'énoncé de Kelvin

D'après le premier principe de la thermodynamique $\Delta U = W + Q\,;W = -Q$

Mathématiquement deux cas sont possibles :

Cas (a) : $W \geq et\ Q \leq 0$

Cas (b) :$W \leq 0\ etQ \geq 0$

D'après l'énoncé de Kelvin, le cas (b) est exclu, seul le premier cas est permis.

Variation d'entropie d'un gaz parfait

Pour calculer l'entropie d'un gaz parfait au cours d'une transformation réelle entre un état d'équilibre initial (T_i,V_i) et un état d'équilibre final (T_f,V_f), il suffit d'imaginer une évolution réversible entre ces deux états, puisque l'entropie est une fonction d'état.

Effectuons le calcule de la variation d'entropie en imaginant une évolution réversible, entres les états initial et final. On a, entre deux états infiniment voisins :

$$\mathbf{dS = \frac{\delta Q}{T} = \frac{dU - \delta W}{T} = \frac{nC_v\,dT + pdV}{T} = \frac{nC_v\,dT}{T} + \frac{nRdV}{V}}$$

En intégrant entre l'état initial et l'état final, on trouve :

$$\Delta S = n.C_v.\ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) + n.R.\ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$$

IV. Fonctions Utiles

1. Variation d'énergie interne

Pour un gaz parfait, la variation d'énergie interne entre deux états d'équilibre voisins est donnée par la relation suivante :

$$dU = nC_v dT$$

Avec C_v la capacité calorifique molaire à volume constant (en J/mol.K).
Quelque soit le fluide (parfait ou réel), la variation d'énergie interne s'exprime aussi comme suit :

$$dU = TdS - PdV$$

La quantité (-P dV) représente le travail élémentaire en vase-clos (système fermé).

Variation d'enthalpie

Pour un gaz parfait, la variation d'enthalpie entre deux états d'équilibre voisins est donnée par la relation suivante :

$$dH = nC_p dT$$

Avec C_p la capacité calorifique molaire à volume constant (en J/mol.K).

Quelque soit le fluide (parfait ou réel), la variation élémentaire d'enthalpie s'exprime aussi comme suit :

$$dH = TdS + VdP$$

La quantité (V.dP) représente le travail de transvasement (système ouvert).

3. Relation de Mayer

La relation de Mayer lie C_p, C_v et R:

$$C_p - C_v = R$$

On introduit alors le rapport γ des capacités thermiques isobare et isochore. Ainsi le rapport

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ est sans dimension. On a les relations suivantes :

$$C_p = \frac{\gamma . R}{\gamma - 1} \quad \text{et} \quad C_v = \frac{R}{\gamma - 1}$$

Pour les gaz monoatomiques on a : $C_P = \frac{5}{2}R$, $C_V = \frac{3}{2}R$ et $\gamma = \frac{5}{3}$

Pour les gaz diatomiques on a : $C_P = \frac{7}{2}R$, $C_V = \frac{5}{2}R$et $\gamma = \frac{7}{5}$

Exercices d'applications

Exercice 1

Un pneu de voiture est gonflé à la température de 20°C sous la pression de 2,1 bar. Son volume intérieur, supposé constant, est de 30 l.

1. Quel quantité d'air contient-il ?
2. Après avoir roulé un certain temps, une vérification de la pression est effectuée: la pression est alors de 2,3 bar. Quelle est alors la température de l'air enfermé dans le pneu ? Exprimer le résultat dans l'échelle de température usuelle (°C).

Données:

Constante du gaz parfait, R= 8,314 SI

Masse molaire de l'air M= 29 g/mol

<u>Réponse</u>

1.
Soit une masse m (kg) de gaz contenue dans un récipient de volume V(m^3) à la pression P(Pa) et à la température absolue T(K); M masse molaire du gaz (kg/mol)

Loi des gaz parfaits PV= nRT = mRT/M

P= 2,1 10^5 Pa ; V= 0,03 m^3 ; T= 273+20=293 K

Qté de matière d'air (mol) : n= PV/(RT) = 2,1 10^5 * 0,03/(8,31*293)=2,59 mol

Masse molaire de l'air M= 29 g/mol

masse d'air m= 2,59 *29 = **<u>75 g</u>.**

2.
P= 2,1 10^5 Pa ; V= 0,03 m^3 ; T= 273+20=293 K

Température de l'air : T= PV/(nR) = 2,3 10^5 *0,03/(2,59*8,31)=320,6 K

soit 320,6-273 = **<u>47,6 °C</u>**.

EXERCICE 2

Dans un corps de pompe muni d'un piston mobile, on place 0.02 mole d'un gaz parfait diatomique. A l'état initial le piston est en équilibre avec une pression extérieure constante Pext= 1,013 bar à la température de 300K.

On fait subir à ce gaz les transformations successives suivantes :

Etat 1-Etat 2 : compression isotherme réversible jusqu'à une pression de 2 atm

Etat2-Etat3 : chauffage isobare le ramenant à son volume initial

Etat3-Etat1 : refroidissement isochore le ramenant à l'état initial

1) Donner pour chaque état, les valeurs des variables (P, V, T). Présenter les résultats dans un tableau
2) Tracer le diagramme P=f(V)
3) Déterminer les valeurs de W, Q et ΔH correspondant à chacune des transformations

   On donne

   $C_v = \frac{5}{2}R$; R= 8.31 J.mol.$_1$.K^{-1}=0.082 l.atm.$mol^{-1}K^{-1}$

Réponse

1) – Etat 1 : état d'équilibre $P_1 = P_{ext} = 1.013$ bar ; T1=300K

L'équation d'état d'un gaz parfait s'écrit : PV = nRT

$V = \frac{nRT}{P}$; AN:$V = 0.492\ l$

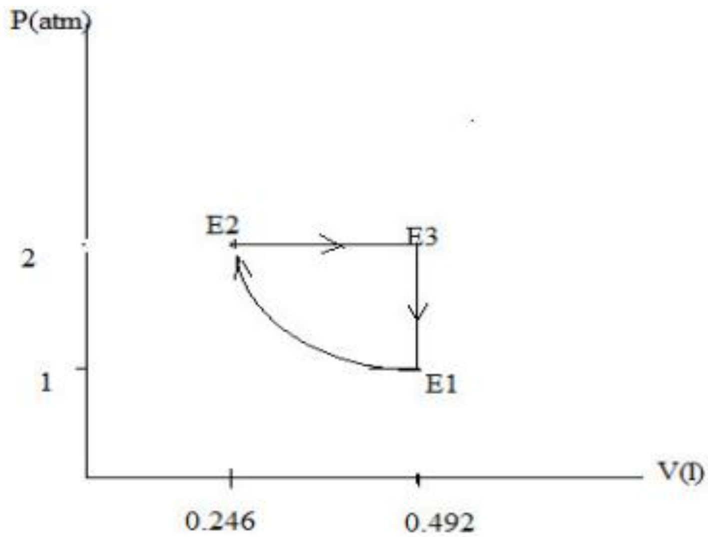
- Etat 2 : T2=T1=300K (transformation isotherme(T reste constante)) ; P_2=2atm

$V_2 = \frac{nRT_2}{P_2}$; AN:$V_2 = 0.246l$

-Etat 3 : $P_3 = P_2 = 2\ atm$ (Transformation isobare) ; $V_3 = V_1 = 0.492\ l$

$$T_3 = \frac{V_3 P_3}{nR} = 600K$$

2) Diagramme P= f(V)



3) $\delta W = -P_{ext}dV$ or on a une transformation réversible $P_{ext} = P_{int}$

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} -P_{ext}dV = \int_{V_1}^{V_2} -P_{int}\,dV = \int_{V_1}^{V_2} -nRT\frac{dV}{V} = nRT\log\frac{V_1}{V_2}$$

AN $W_{12} = 34{,}5\ J$

ΔH=0 et ΔU =0 (Car la transformation est isotherme)

Le 1[er] principe de la thermodynamique s'écrit $\Delta U1 = W_1 + Q_1 = 0$ donc

$Q_1 = -W_1 = -34.5\ J$

Transformation 2-3 : chauffage isobare (P constante)

$$W_{2-3} = \int_{V_2}^{V_3} -P_{ext}\, dV = -P_{ext} \int_{V_2}^{V_3} dV = P_{ext}(V_2 - V_3) = -49.2\ J$$

$$\Delta H = Q_p = \int_{T_2}^{T_3} nC_p dT = n * {}^{7}/_{2}\, R(T_3 - T_2) = 174.5J$$

-Transformation 3-1 : refroidissement isochore (V constant)

V=cst ; dV=0 $W_{31} = 0$

$$Q_{3-1} = \Delta U = \int_{T_3}^{T_1} nC_v dT = nC_v(T_1 - T_3) = -142.65\ J$$

$$\Delta H = \int_{T_3}^{T_1} nC_p\, dT = nC_p(T_1 - T_2) = -174.51\ J$$

Introduction à l'étude des machines thermiques

I. Machines thermiques: cycle ditherme

1. Définitions

1.1. Source de Chaleur

On appelle source de chaleur, un objet en contact avec le système et susceptible de n'échanger avec lui que de la chaleur. Si on a deux sources, celles-ci sont distinguées en source froide et source chaude par leurs températures relatives.

1.2. Machine thermique

On appelle machine thermique, un dispositif permettant de transformer une énergie sous forme de chaleur en une énergie sous forme de travail et réciproquement. Pratiquement, une machine thermique fonctionne à l'aide d'un agent thermique (qui constitue le système) subissant une transformation cyclique et échangeant avec l'extérieur du travail et de la chaleur.
On peut notamment distinguer les machines les plus simples où les échanges de chaleur se font avec un nombre réduit de sources de chaleur. Ainsi, une machine ditherme, est une machine n'échangeant de la chaleur qu'avec deux sources de chaleur.

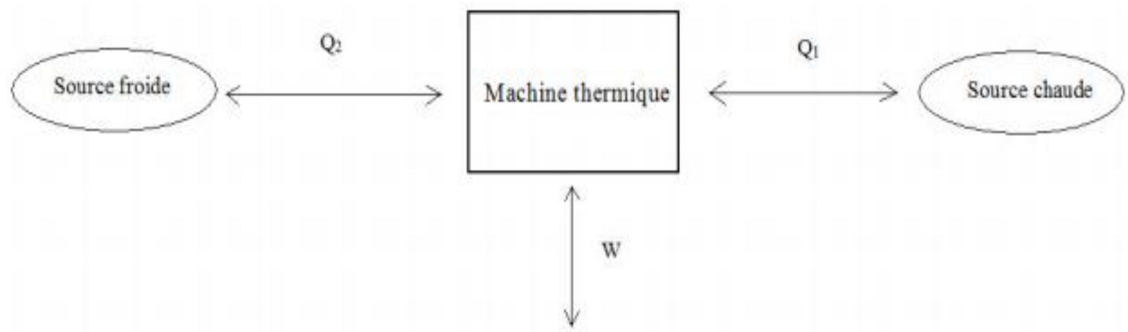


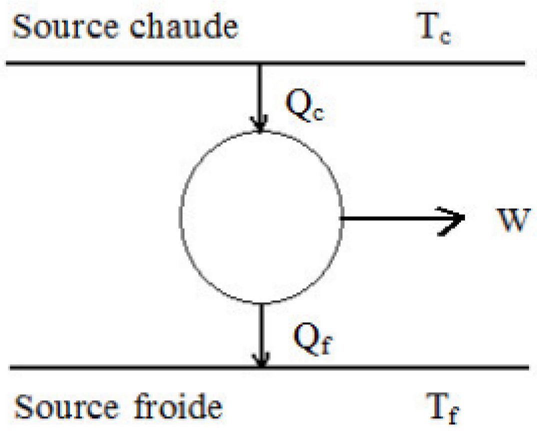
Figure 11: Machine ditherme

2. Différents types de machines thermiques

On distingue deux types de machines thermiques:

2.1. Moteur thermique

On définit un moteur thermique (figure 3.2) comme une machine qui transforme la chaleur en travail: $W<0$ et $Q_f+Q_c>0$.



Moteur thermique

2.2. Machine frigorifique et pompe à chaleur

Transforme le travail en chaleur, donc w>0 et $Q_c+Q_f<0$

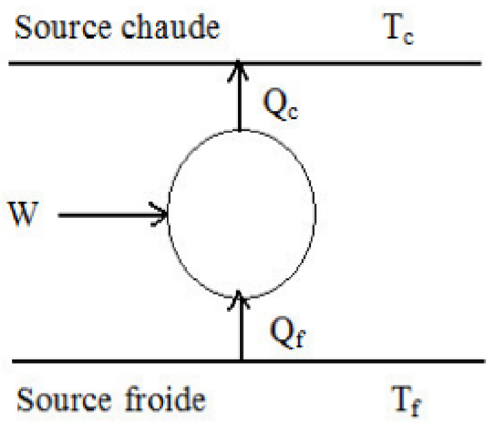


Figure 13: Machine frigorifique et pompe à chaleur

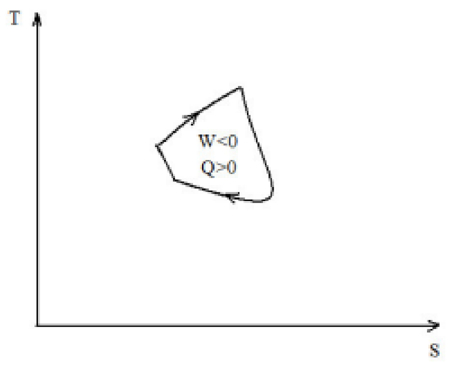
Cette machine présente un double intérêt:

- Extraire de la chaleur de la source froide, c'est-à-dire production de froid et on a une machine frigorifique
- Fournir de la chaleur à la source chaude, production de chaleur et on a une pompe à chaleur.

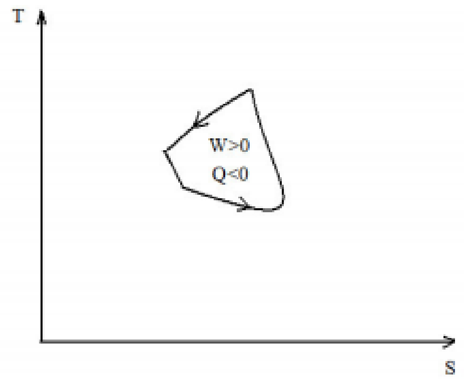
2.3. Convention de signe

- si le cycle est décrit dans le sens des aiguilles d'une montre, alors le travail est négatif (W<0) et le cycle est dit moteur (figure 3.4).

- si le cycle est décrit dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, alors le travail est positif (W>0) et le cycle est dit cycle récepteur



Cycle moteur



Cycle récepteur

3. Rendement

On appelle rendement η>0 d'une machine thermique le rapport d'energie utile à l'energie consommée (depensée) pour la faire fonctionner.

$$\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie consommée}}$$

II. Machine de Carnot/Cycle de Carnot

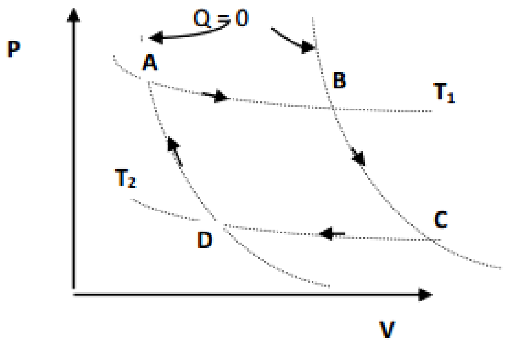
On appelle cycle de Carnot, le cycle reversible décrit par une machine thermique idéale. Il est constitué de deux portions d'isothermes (à la temperature des sources froides T_f et chaude T_c) et de deux portions adiabatiques separant les deux isothermes.

1.Moteur de Carnot

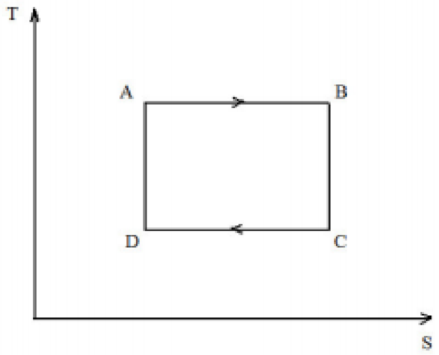
Un moteur thermique ($W<0$) fonctionnanat suivant le cycle de Carnot entre deux sources de chaleur (de temperatures respectives T_1 et $T_2<T_1$) et decriavnt le cycle ABCD correspondant aux quatre transformations reversibles suivantes:

- Transfirmation AB: detente isotherme à la temperature T_1 pendant laquelle le système fluide recoit de la chaleur Qc de la source chaude T_1.
- Transformaiton BC: detente adiabatique ($Q=0$)
- Transforamtion CD: compression isotherme à temperature T_2 pendant laquelle le système fluide fournit de la chaleur Q_F à la source froide T_2
- Transformation DA: compression adiabatique ($Q=0$)

le cycle de Carnot, pour un gaz parfait, est représenté respectivement dans le diagramme de Clapeyron PV (figure 3.6) et le diagramme entropique TS



Moteur Carnot et diagramme PV



Moteur Carnot et diagramme TS

2. Machine frigorifique de Carnot

La réversibilité du cycle de Carnot autorise l'inversion du sens des transformations, conduisant à une inversion de tous les signes des énergies échangées et constituant une machine frigorifique.

3. Performance d'une machine de Carnot

3.1. Rendement d'un moteur de Carnot

Pour un moteur, le rendement défini précédemment est le rapport entre l'énergie utile (travail fourni par le système) et l'énergie consommée (chaleur Q_c ou Q_1) et il vient:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_1} = -\frac{W}{Q_1}$$

D'après le premier principe on a: $W+Q_1+Q_2=0$ et on aura $\eta = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$

On démontre que le rendement du cycle de Carnot s'écrit: $\eta = \frac{T_1-T_2}{T_1} < 1$

3.2. Efficacité d'une machine frigorifique (COP)

Pour une machine frigorifique, la quantité importante est le rapport entre la chaleur prélevée à la source froide Q_2 et le travail nécessaire à cette opération. On définit alors l'efficacité:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = -\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} > 1$$

3.3. Efficacité d'une pompe à chaleur (COP)

Pour une pompe à chaleur, on s'intéresse au rapport entre la chaleur fournie à la source chaude Q_1 et le travail nécessaire à cette opération. On définit alors l'efficacité:

$$\varepsilon = \frac{|Q_1|}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1$$

4. Théorème de Carnot

Le théorème de Carnot stipule que: "aucune machine ditherme ne peut être plus efficace qu'une machine de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources"

Le théorème de Carnot nous fournit ainsi un rendement (ou une efficacité) théorique maximale (et donc impossible à dépasser)

Autrement dit, pour un moteur fonctionnant entre deux sources données: $\eta < \eta_{Carnot} = \eta_{max}$

Et pour une machine frigorifique (ou une pompe à chaleur) $\varepsilon < \varepsilon_{Carnot} = \varepsilon_{max}$

Exercices d'application

Exercice 1

Un cycle de Carnot est une succession de transformations réversible aux termes desquelles le système revient dans son état initial. Le cycle de Carnot étudié ci-dessous est la succession d'une compression isotherme CD (à la température T_2) suivie d'une compression adiabatique DA puis d'une détente isotherme AB (à la température T_1) et terminé par une détente adiabatique BC.

On donne : P_C= 1 atm, T_2=20°C, V_A=1l, P_A=10 atm, T_1=250°C, γ=1,4

1. Déterminer la valeur de V_C et les coordonnées des points D et B du cycle.
2. Calculer les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 et le travail W reçue par le gaz au cours du cycle. Précisez leur signe. Le système effectue-t-il un travail moteur ou résistant? Comment doit-on mesurer l'efficacité du processus? Donner le coefficient (appelé ici rendement en fonction de W, Q_1 et Q_2). Le calculer en fonction de T_1 et T_2.

Réponse

1.

	P (atm)	T(°C)	V(l)
A	10	250	1
B	7.6	250	1.315
C	1	20	5.6
D	1.315	20	4.26

Exemple de calcul

$$V_C = \frac{T_2}{T_1}\frac{P_A V_A}{P_C} = 5.6l$$

$$V_B = V_C\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = 1.315l$$

2.

Sur l'isotherme T_2: $Q_2=nRT_2\ln(V_C/V_D)=155.06$ J

Sur l'isotherme T_1: $Q_1=nRT_1\ln(V_A/V_B)=-277.13$ J refaire le calcul

Premier principe pour un cycle W=122.07 J

Rendement : première méthode: $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 0.44$

Deuxième méthode $\eta = -\frac{W}{Q_1} = 0.44$

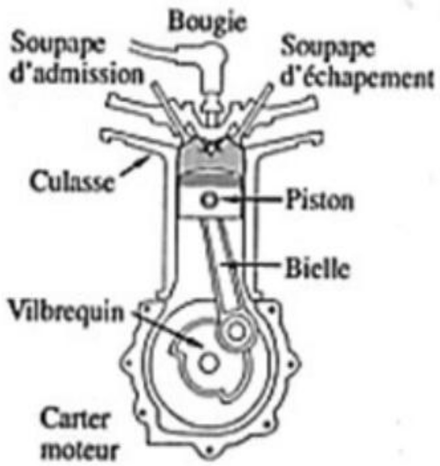
Cycles des moteurs à combustion interne

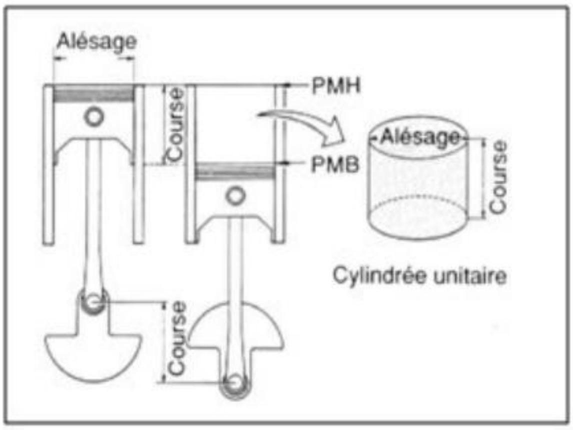
I. Introduction

Les moteurs thermiques diffèrent les uns des autres par les propriétés des fluides moteurs qu'ils emploient, par la façon dont on produit l'énergie mécanique et par les transformations thermodynamiques qui constituent le cycle.

II. Définition

On appelle moteur à combustion interne, les moteurs où la combustion se produit à l'intérieur du corps de celui-ci. La chaleur dégagée est ainsi transformée en travail mécanique.
Le but de la combustion est la récupération la plus parfaite possible de l'énergie chimique contenue dans le carburant.
La figure 4.1 présente un descriptif d'un exemple moteur à combustion interne (moteur essence).





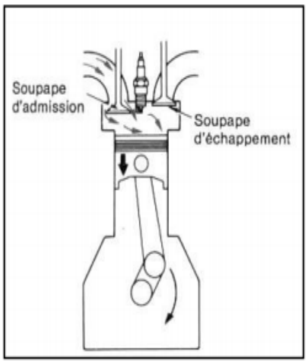
Exemple de moteur à combustion interne

Moteurs à combustion internes

1. Moteurs alternatifs

1. Principe de fonctionnement d'un moteur à essence (moteur à 4 temps)
Tous les moteurs thermiques font appel aux transformations thermodynamiques d'une masse gazeuse pour passer de l'énergie chimique contenue dans le combustible à l'énergie mécanique

directement exploitable sur l'arbre moteur.
Dans son brevet déposé en 1862, le français BEAU DE ROCHAS propose d'appliquer le processus décrit ci-dessous à une masse gazeuse emprisonnée dans un moteur à piston. Le cycle complet comprend 4 courses de piston donc 2 tours de vilebrequin.



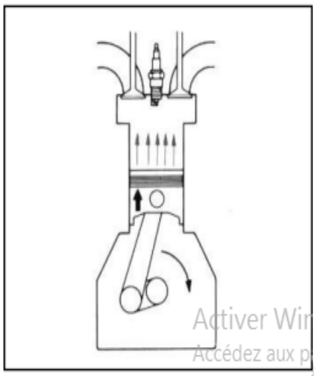
1er temps : l'admission

- le piston décrit une course descendante du PMH au PMB ;

- la soupape d'admission est ouverte ;

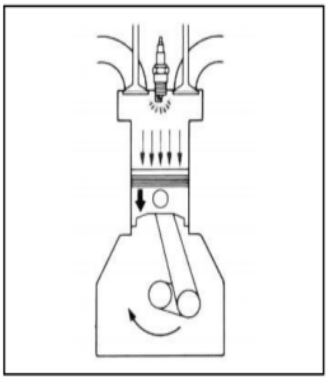
- le mélange air + carburant préalablement dosé pénètre dans le cylindre ;

- l'énergie nécessaire pour effectuer ce temps est fournie au piston par le vilebrequin par l'intermédiaire de la bielle.



2ème temps : la compression

- les 2 soupapes sont fermées ;
- le piston est repoussé par vers le PMH par la bielle ;
- la pression et la température du mélange croissent.



3ème temps : la combustion, détente

- un peu avant le PMH, une étincelle électrique déclenche le processus de combustion ;

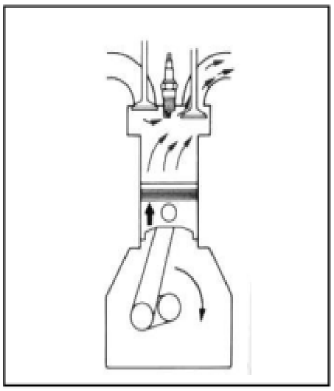
- l'accroissement de la pression qui s'exerce sur le piston engendre un effort sur la bielle et donc un moment moteur sur le vilebrequin ;

- le piston redescend au PMB.

4ème temps : l'échappement

- la soupape d'échappement s'ouvre ;

- le piston remonte vers le PMH en expulsant les gaz brûlés.



2. Cycle théorique

2.1. Cycle thermodynamique du moteur à essence : Cycle de Beau de Rochas

L'évolution des pressions dans la chambre de combustion en fonction du volume du cycle « Beau de Rochas » est représenté dans un diagramme (P, V) (figure 20).

0→1 : Aspiration du gaz à la pression atmosphérique dans le cylindre le long de la droite isobare 0-1 ($P_0 = P_1 = P_a$).

1→2 : Compression adiabatique 1-2 jusqu'au volume minimal V_1, la pression est P_1

La compression est supposé adiabatique car le transfert thermique lors cette transformation est lente par rapport à la durée de l'évolution.

2→3 : Combustion instantanée du gaz à volume constant le long de la droite isochore 2-3 avec une forte élévation de température à T_2 et de la pression à P_2.

3→4 : Détente du gaz chaud le long de l'adiabatique 3-4 qui ramène le volume à V_2, mais à une pression P_3 supérieure à celle de l'atmosphère.

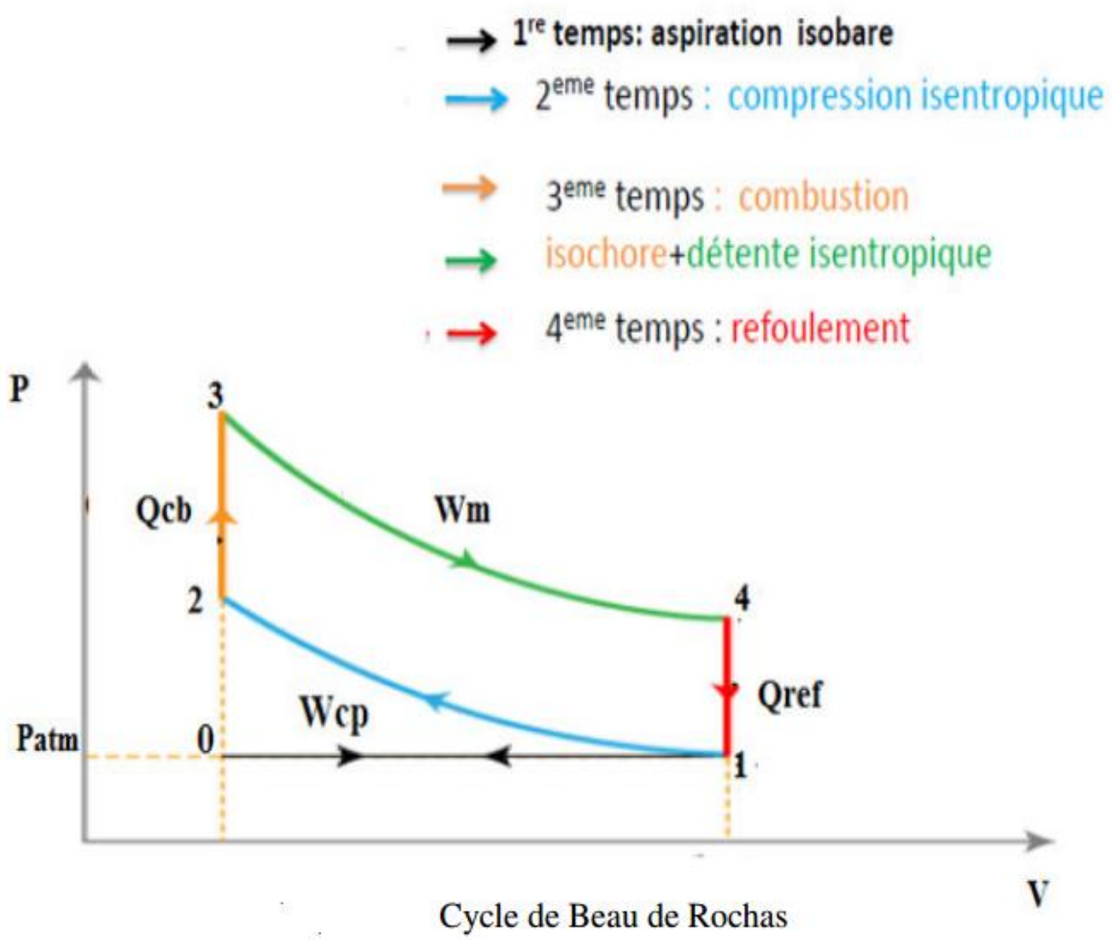
4→1 : Détente théorique des gaz dans le cylindre, donc la pression chute instantanément à la

pression atmosphérique le long de l'isochore 4-1, la température redescend.

1→0 : Echappement des gaz brûlés en décrivant l'isobare 1-0. Retour au point de départ 0.

Le cycle Beau de Rochas a été conçu pour un moteur tel que l'entrée et la sortie des gaz se fait par des orifices à soupapes placés à l'extrémité fermée d'un cylindre dont l'autre extrémité est constituée par la tête du piston.

On modélise le cycle de Beau de Rochas par les transformations suivantes :



Cycle de Beau de Rochas

Le rendement d'un moteur à essence ne dépend que du taux de compression $\alpha = \frac{V_A}{V_2}$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}$$

2.2.Cycle thermodynamique du moteur Diesel

Le moteur Diesel est un moteur à combustion interne dont l'allumage n'est pas assuré par une bougie mais par une compression élevée, ce que l'on réalise sans risque d'inflammation en comprimant l'air seul et en injectant le carburant progressivement en fin de compression. Ce moteur a été mis au point par l'allemand R. Diesel en 1893, fortement motivé par la recherche d'un moteur thermique fonctionnant avec un combustible rudimentaire, moins raffiné que l'essence.

Pour un moteur diesel, les 4 temps se déroulent de la même façon à deux différences près :

- 1ère différence

C'est de l'air pur qui est admis et comprimé lors des temps 1 et 2, puis le carburant est introduit directement dans le cylindre (par injection) en fin de compression.

- 2ème différence

Le mélange s’enflamme spontanément, sans étincelle, du fait de l'élévation de la température de l'air liée à sa compression.

On modélise le cycle Diesel par les évolutions particulières suivantes:

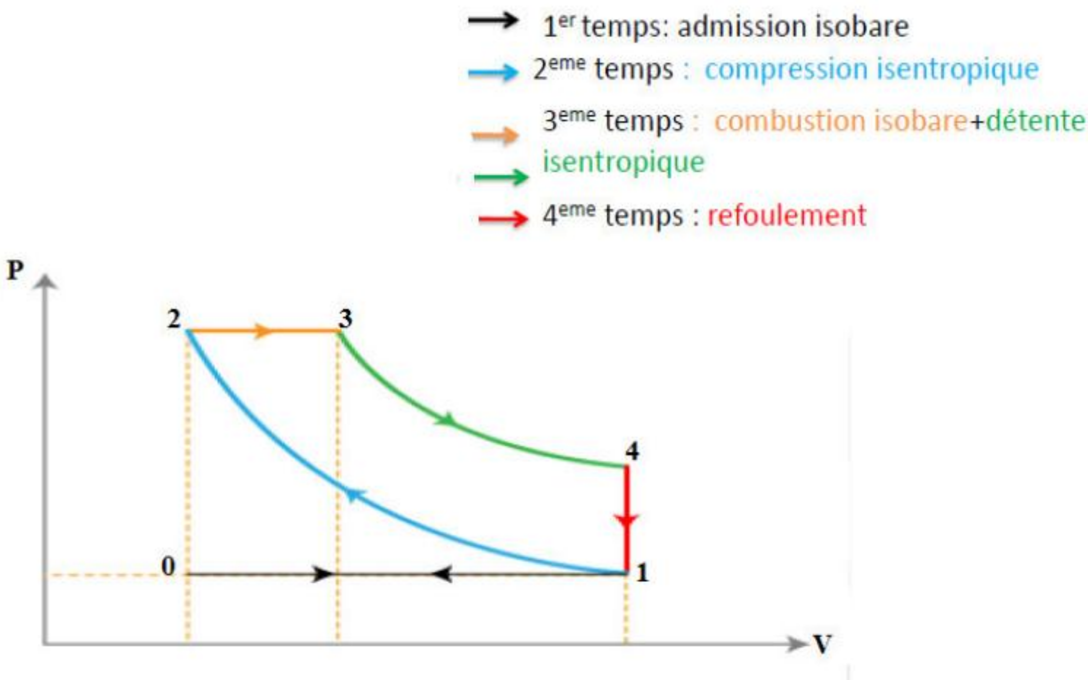


Figure :Cycle théorique d'un moteur Diesel

Le rendement est fonction du taux de compression ρ et du rapport de détente $\beta = \frac{V_1}{V_3}$

$$\eta = 1 - \frac{\beta^{-\gamma} - \rho^{-\gamma}}{\gamma(\rho^{-1} - \rho^{-1})}$$

3. Comparaison entre les moteurs à Essence et Diesel

Le tableau suivant compare les moteurs à quatre temps à essence et diesel

Comparaison entre les moteurs à Essence et Diesel

	Essence	**Diesel**
Admission	Air-essence	Air
Compression	8-10	13-25
Lieu du mélange air-carburant	Dans la tubulure d'admission près de la soupape d'admission	Dans le cylindre près du PMH injection
Combustion	Allumage par étincelle	Allumage par compression
Efficacité	22à 28%	32-38%