



Ingénierie mécanique des MOTEURS THERMIQUES



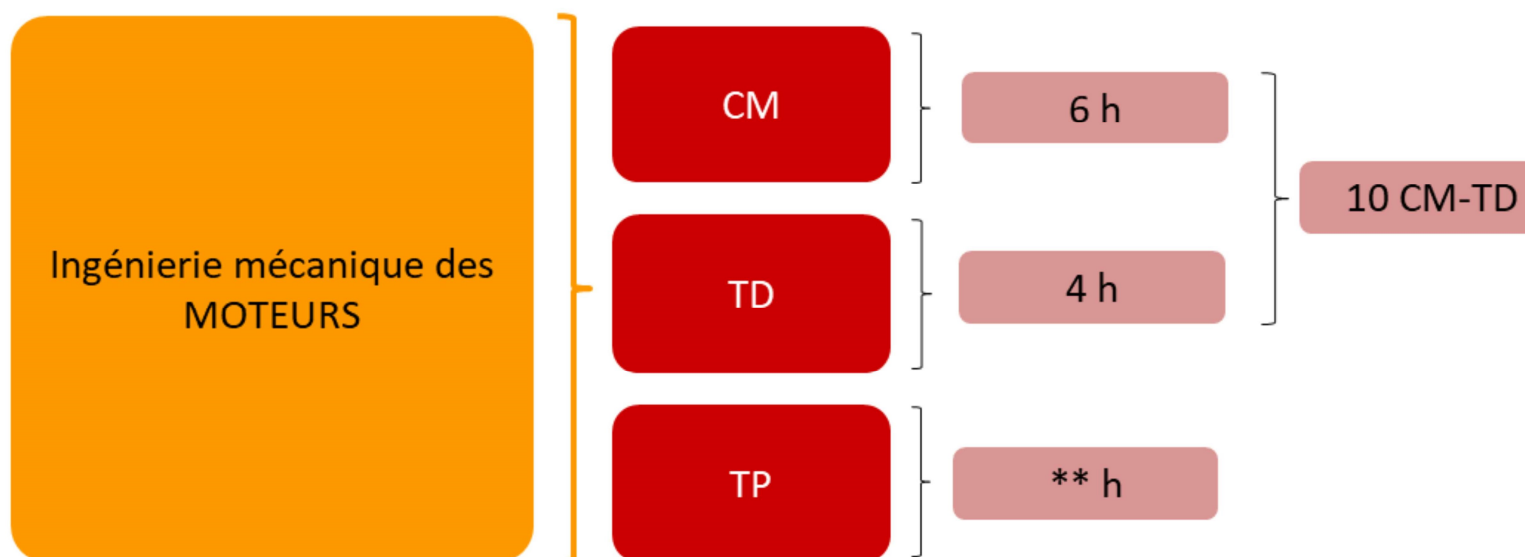
Le moteur thermique est une machine génératrice d'énergie mécanique à partir de la chaleur.

Il en existe de nombreux types technologiquement différents, moteur fusée, turbine, moteur Diesel, moteur Stirling...

*On s'intéresse ici aux moteurs à arbres tournants et pistons alternatifs
tels que ceux encore utilisés dans l'industrie automobile.*

*Les points abordés sont aussi ceux rencontrés dans le contexte plus général de la
conception et technologie mécanique des machines.*

Structuration du cours



Le Mécanologue

www.mecanologue.fr

Au programme

MOTEURS



Le Mécanologue

www.mecanologue.fr

Partie A1

Partie A2

Partie B1

Partie B2

Partie C1

Partie C2

Du cycle idéal
au cycle réel

Conception

Optimisation



MOTEURS THERMIQUES – partie 1a/3

Du cycle idéal à quelques cycles réels



Le moteur thermique est une machine génératrice d'énergie mécanique à partir de la chaleur.

Il en existe de nombreux types technologiquement différents, moteur fusée, turbine, moteur Diesel, moteur Stirling...

On s'intéresse ici aux moteurs à arbres tournants et pistons alternatifs tels que ceux encore utilisés dans l'industrie automobile.

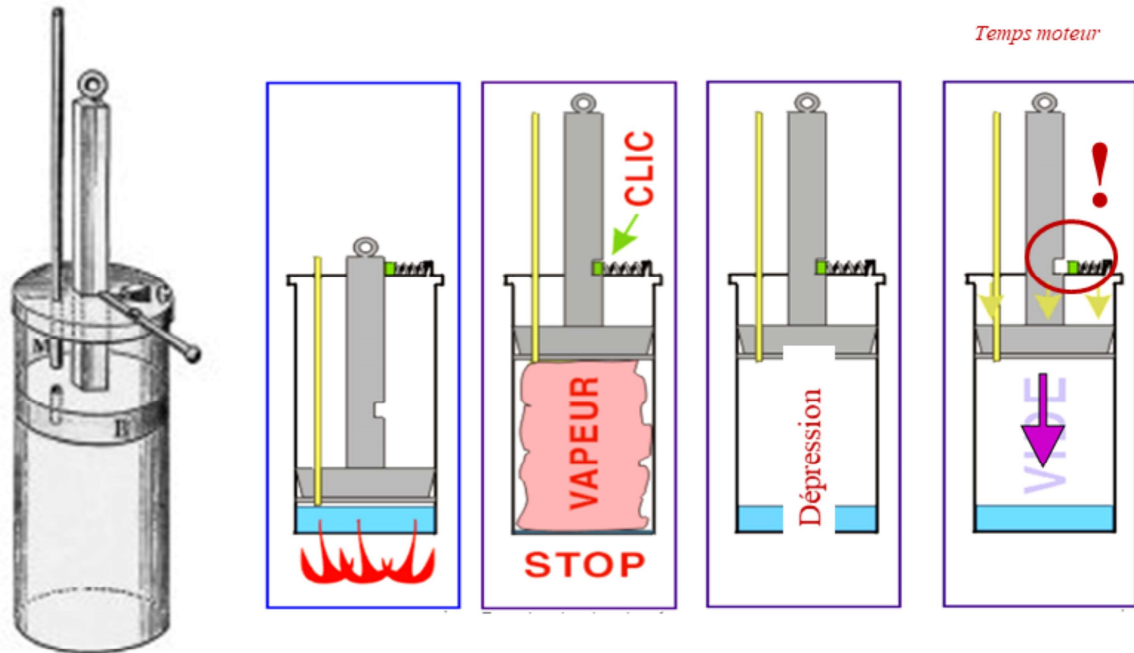
Denis Papin (1690) – les origines...

Analyse système

- ▶ Le cycle idéal
- Représentation
- Rendement

Analyse machine

- Limitations
- Cycle Beau de Rochas
- La mécanique adaptée
- Cycle réel essence
- Les 4 temps
- Rôle de la distribution
- Rendement essence
- Application 1



1690

Le français Denis Papin a beaucoup travaillé avec la vapeur, il est notamment l'inventeur du «digesteur», l'ancêtre de la «cocotte minute».

Il est considéré comme étant le père de la première machine à vapeur à piston.

Dans cette machine, un cylindre est clos par un piston et il comporte de l'eau qui est réchauffée jusqu'à l'état vapeur.

Le piston qui translate sous l'effet de la vapeur est alors bloqué au point mort haut par un cliquet.

La source de chaleur est alors retirée et l'eau commence à se condenser ce qui fait chuter très fortement la pression dans le cylindre.

Le cliquet est enfin retiré et le piston rentre alors animé par une force très importante.

Le cycle peut ensuite recommencer... Le but était de soulever des fardeaux et de soulager les hommes des peines les plus lourdes.

Au cours du siècle suivant les machines à vapeur vont évoluer considérablement sur le plan technique grâce notamment à l'anglais James Watt...

Analogie de CARNOT (1824) – une science est née

Analyse système

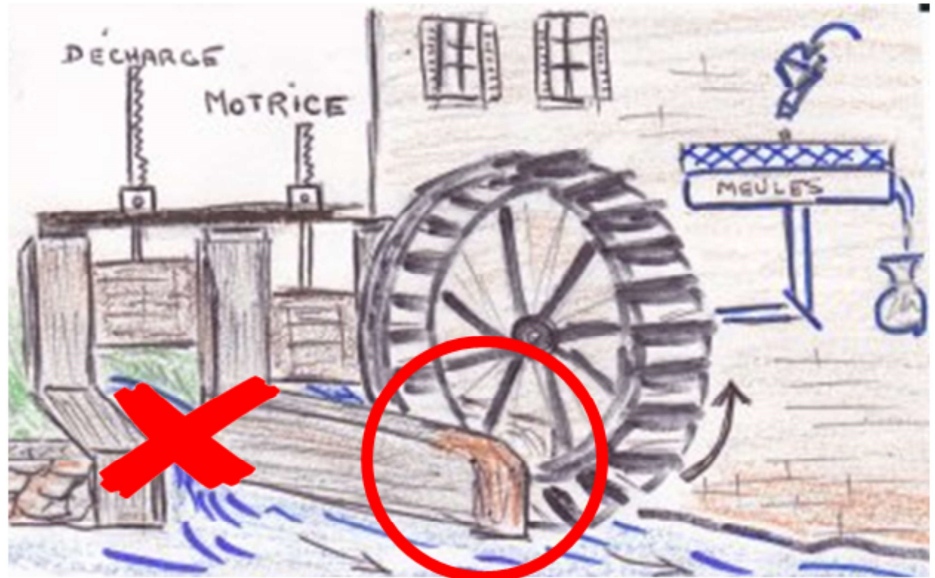
- ▶ Le cycle idéal
- Représentation
- Rendement

Analyse machine

- Limitations
- Cycle Beau de Rochas
- La mécanique adaptée
- Cycle réel essence
- Les 4 temps
- Rôle de la distribution
- Rendement essence
- Application 1



Augmenter
la différence
de niveau



Pas de passage
direct vers la sortie

Limiter la friction
du fluide sur les parois
(aubes et canal)

Plus d'un siècle plus tard...1824

A l'époque la chaleur est vue **à tort** comme un fluide appelé le calorique,
La matière serait donc capable d'absorber ou de rendre le calorique comme le fait une éponge avec de l'eau...

Le français Sadi Carnot, certainement influencé par son père qui était ingénieur et concevait des pompes à eau, établit alors une analogie entre un moulin à eau et un moteur à feu, nom donné aux machines à vapeur.

Il déduit que le **travail maximum** récupérable est notamment obtenu si les chocs et frottements sont réduits et si l'eau n'est pas mise directement en contact avec sa destination (passage par la conduite).

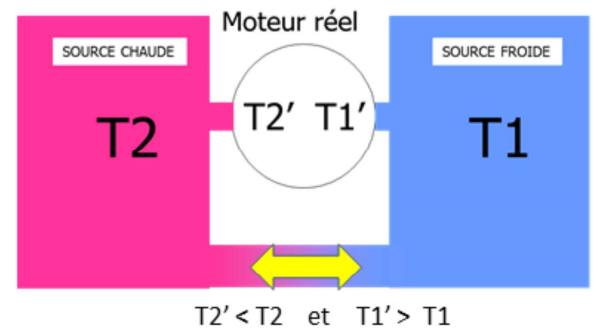
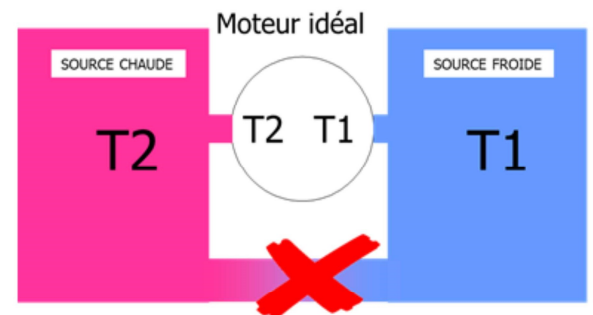
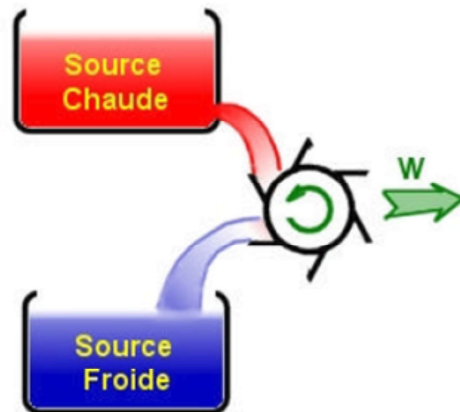
Analogie de CARNOT (1824)

Analyse système

- ▶ Le cycle idéal
- Représentation
- Rendement

Analyse machine

- Limitations
- Cycle Beau de Rochas
- La mécanique adaptée
- Cycle réel essence
- Les 4 temps
- Rôle de la distribution
- Rendement essence
- Application 1



Poursuivant son analogie, il pose que le rendement du moteur sera maxi si $T_1' = T_1$ et $T_2' = T_2$ (**soit 2 isothermes**) et si on limite les échanges directs de chaleur entre les deux sources (**soit 2 isentropes**).
⇒ C'est le cycle de CARNOT.

Partant d'un concept erroné mais tenace (la notion de calorique), Carnot avance des conclusions exactes et pose **à lui seul** les grandes bases d'une discipline nouvelle : **la thermodynamique**.

Le fait qu'un homme seul fonde les bases d'une discipline nouvelle est unique dans l'histoire de l'humanité.

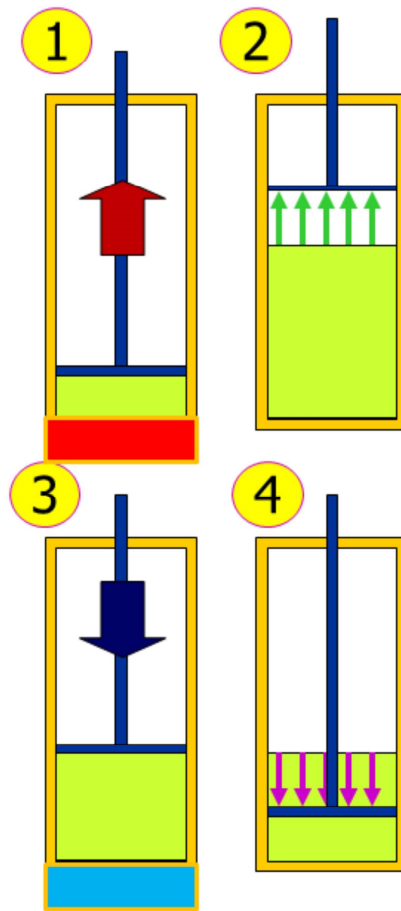
Moteur idéal de CARNOT (1824)

Analyse système

- ▶ Le cycle idéal
- Représentation
- Rendement

Analyse machine

- Limitations
- Cycle Beau de Rochas
- La mécanique adaptée
- Cycle réel essence
- Les 4 temps
- Rôle de la distribution
- Rendement essence
- Application 1



1 - Le fluide est chauffé mais subit une **détente isotherme**, puis la source chaude est retirée.

2 - Avant de mettre la source froide au contact, on abaisse d'abord la température du fluide par une **détente adiabatique réversible**.

3 - Une fois la température de la source froide atteinte on procède à la **compression isotherme** au contact de la source froide.

4 - Enfin avant de mettre la source chaude au contact, il faut d'abord élever la température à l'aide d'une **compression adiabatique réversible**...

Le moteur idéal de Carnot fonctionnerait ainsi suivant ces 4 phases.

Fidèlement à ses observations, le fluide encore chaud ne doit pas être mis en contact direct avec la source à température basse et le fluide encore froid ne doit pas être mis en contact direct avec la source à température élevée.

Cycle de Carnot décrit par le diagramme de Clapeyron (1834) – la formalisation

Analyse système

Le cycle idéal

► Représentation

Rendement

Analyse machine

Limitations

Cycle Beau de Rochas

La mécanique adaptée

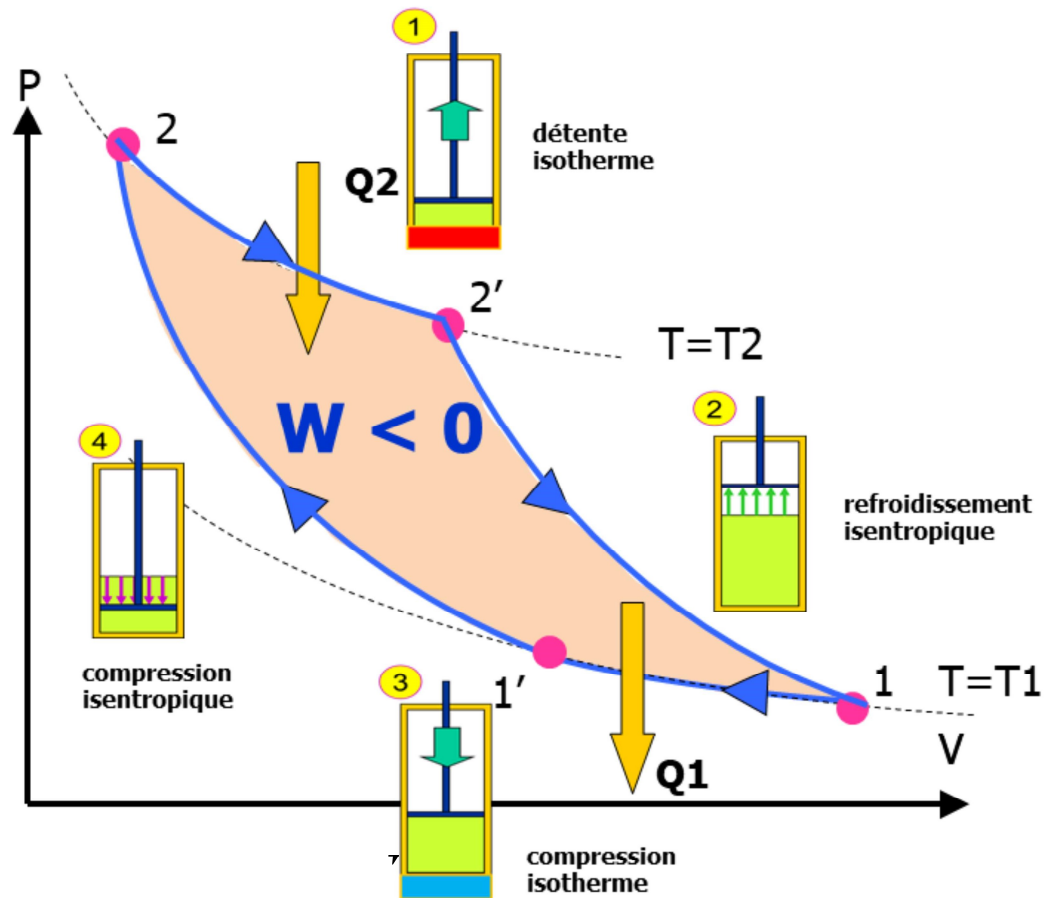
Cycle réel essence

Les 4 temps

Rôle de la distribution

Rendement essence

Application 1



1834

Le français, ingénieur et physicien Emile Clapeyron utilise la loi de Mariotte (un français également) $P.V=f(T)$ qui s'affine à ce moment là pour représenter le cycle de Carnot dans un diagramme P-V.

La caractéristique de ce diagramme est que l'aire du cycle représente le travail produit.

En effet le travail élémentaire produit par une force F sur un piston de section S en translation δx dans un cylindre est :

$$\delta W = - F \cdot \delta x$$

$$\text{or } F = p \cdot S$$

$$\text{et } \delta v = S \cdot \delta x,$$

ainsi il vient $\delta W = - p \cdot \delta v$, aire élémentaire sous la courbe...

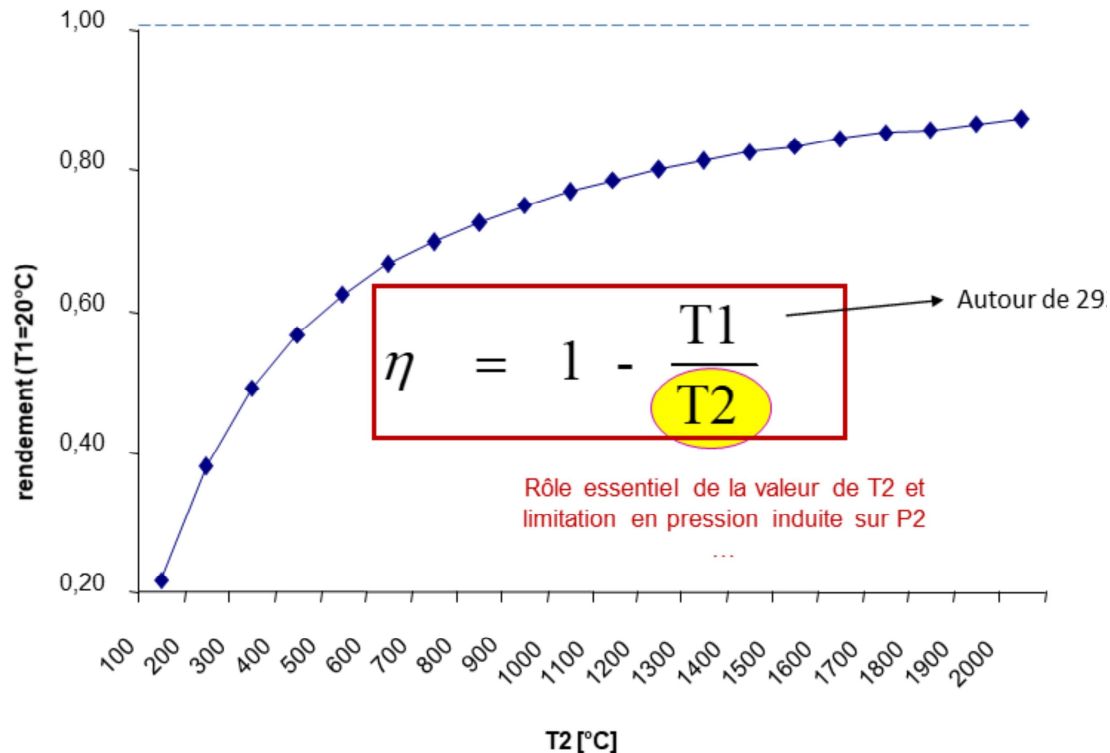
A la recherche du rendement maximum

Analyse système

- Le cycle idéal
- Représentation
- Rendement

Analyse machine

- Limitations
- Cycle Beau de Rochas
- La mécanique adaptée
- Cycle réel essence
- Les 4 temps
- Rôle de la distribution
- Rendement essence
- Application 1



Dans ces conditions, la fonction représentant le rendement (voir TD) montre qu'on a intérêt à utiliser une source chaude à la température **T_2 la plus élevée possible** pour une température T_1 dont le domaine de variation reste forcément faible (c'est l'ambiance).

L'idée du moteur à **combustion interne** est donc de brûler directement le gaz à l'intérieur de la machine, pour augmenter sensiblement T_2 .

On notera qu'au delà de 800°C une augmentation sensible de T_2 provoque malheureusement une faible augmentation du rendement...

De plus, si la température finale T_2 est très élevée, alors la pression correspondante atteint des valeurs trop élevées incompatibles avec un moteur normal.

Ainsi si $T_2 = 1800^\circ\text{C}$ et si on part de $T_1 = 15^\circ\text{C}$ avec $p_1 = 1\text{bar}$, alors on obtient **$p_2 > 200\text{ bar}$** (avec $\gamma = 1,33$ pour l'air à cette température).

Il faudrait alors surdimensionner les moteurs pour travailler à ces pressions

élevées.

Les moteurs actuels ont des taux de compression inférieurs (de **15 ou 25**), au lieu d'un taux irréalisable de **400** pour le cycle de Carnot.

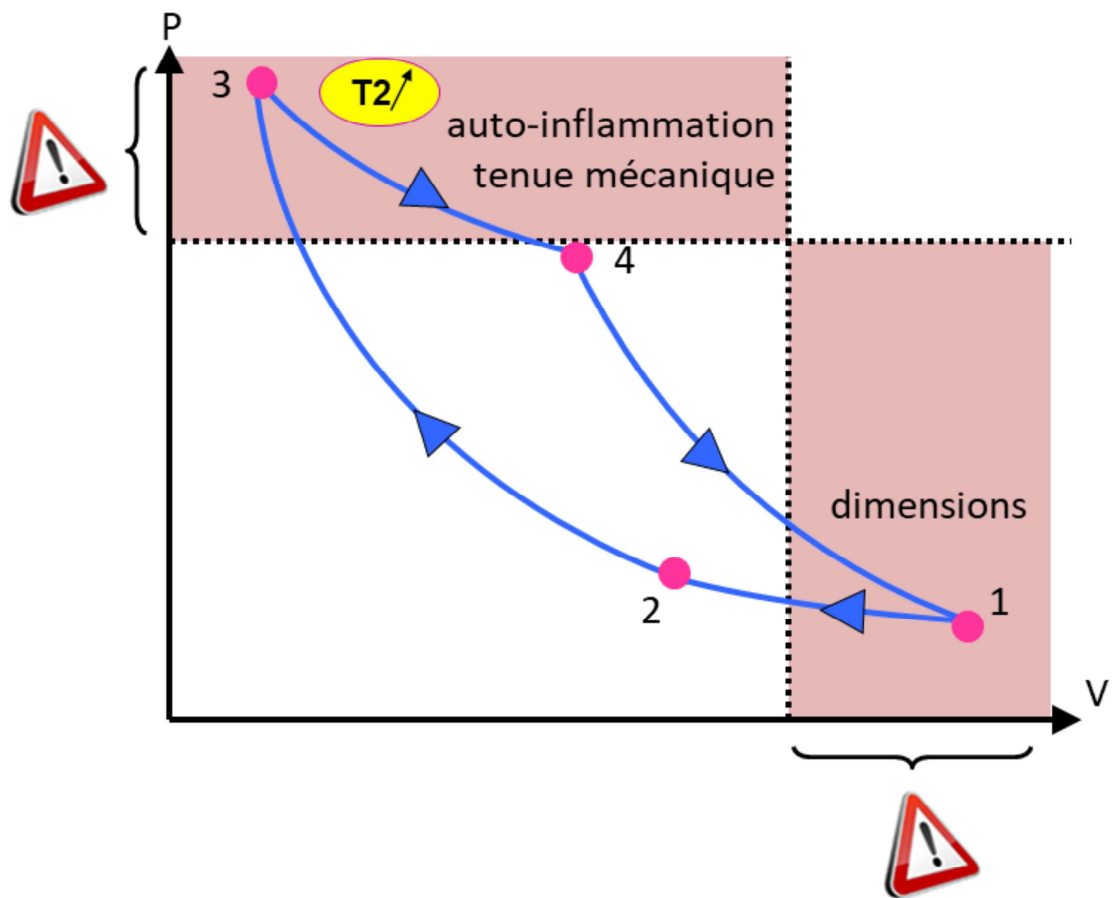
Tenir compte des contraintes mécaniques

Analyse système

- Le cycle idéal
- Représentation
- Rendement

Analyse machine

- Limitations
- Cycle Beau de Rochas
- La mécanique adaptée
- Cycle réel essence
- Les 4 temps
- Rôle de la distribution
- Rendement essence
- Application 1



Malheureusement il n'est pas possible de mettre en pratique le cycle théorique de Carnot pour réaliser les moteurs à combustion interne.

Pour obtenir une température T_2 très élevée ($\Leftrightarrow \eta$ assez élevé) il faut atteindre des pressions internes trop importantes (200 à 400 bars !!!) pour utiliser des solutions technologiques peu onéreuses telles que celles qu'on trouve dans les moteurs courants.

Sur les moteurs essence, une pression trop élevée provoque l'auto-inflammation anarchique du mélange, ce qui peut être très destructeur (voir par la suite).

La température et la pression sont propices aux déformations des pièces constitutives du moteur.

A moins de fortement sur-dimensionner les moteurs en augmentant la course de détente du piston (ainsi V augmente), il faut se limiter à une **zone restreinte** du diagramme PV telle que $T_{2\max} = 1200^\circ\text{C}$.

Par conséquent, il **faut donc modifier** le cycle de Carnot inutilisable dans les moteurs à combustion : ceci est réalisé de deux façons différentes en supprimant les deux transformations isothermes

Une première solution : le cycle essence dit « à volume constant »

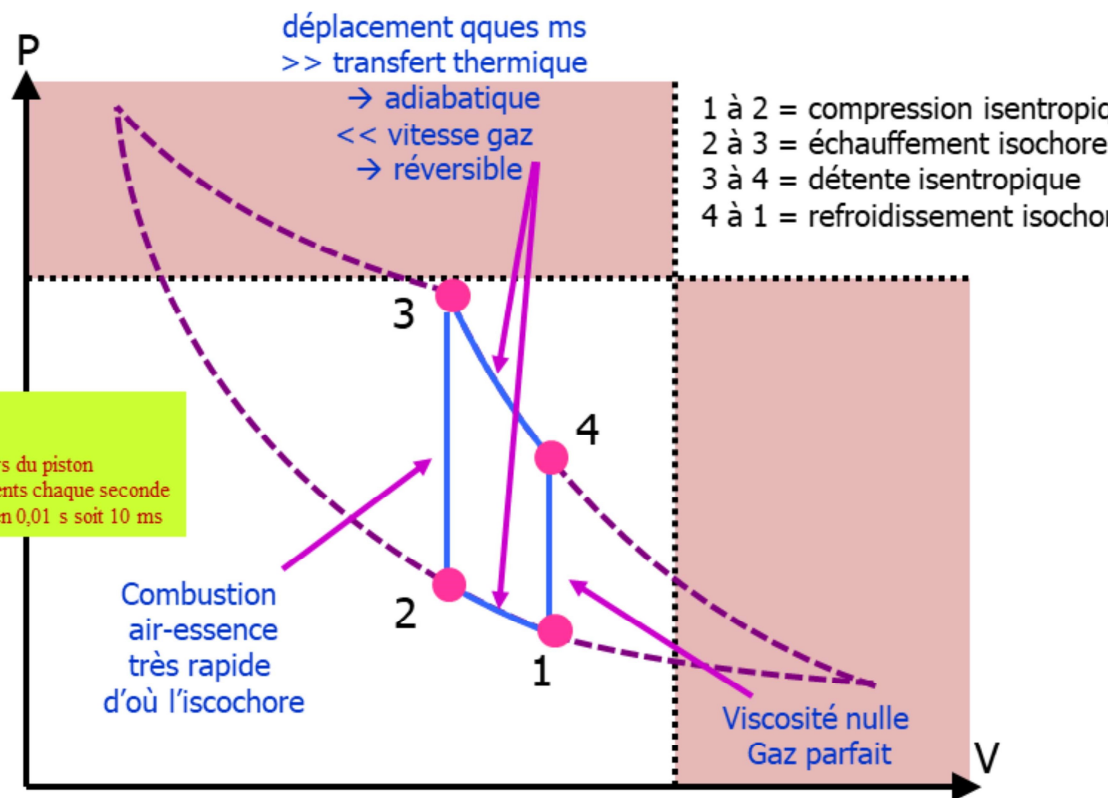
Analyse système

Le cycle idéal
Représentation
Rendement

Analyse machine

Limitations
► Cycle Beau de Rochas
La mécanique adaptée
Cycle réel essence
Les 4 temps
Rôle de la distribution
Rendement essence
Application 1

$N = 3000 \text{ tr/min}$
→ 50 Hz
→ 50 allers retours du piston
→ 100 déplacements chaque seconde
→ Déplacement en 0,01 s soit 10 ms



1862

Une première solution consiste à remplacer les isothermes par des **isochores**.

⇒ C'est le cycle BEAU DE ROCHAS (Alphonse Eugène, encore un français) encore appelé cycle à volume constant.

Le rendement est alors **moins élevé** que celui du cycle de CARNOT.

L'explosion isochore s'explique par le fait que l'explosion du mélange air - essence est très rapide (contrairement à l'explosion d'un mélange air - gasoil des diesel).

La compression et la détente sont adiabatiques du fait de la rapidité de la course du piston. En effet on a 4 temps pour 2 tours, donc à 3000 tr/min le piston effectue 6000 déplacements/min, soit 1 déplacement en 10 ms environ. Or la chaleur met beaucoup plus de 10 ms à s'évacuer (d'où les compression et détente adiabatiques.).

Lors de l'ouverture de la soupape d'échappement, la pression est égale à la pression extérieure (pas de viscosité d'un gaz parfait).

Pour finir le cycle est considéré comme quasi - statique ; cela se justifie par le fait que la vitesse des molécules d'air est de l'ordre de 700 m/s à 600K, or la course du piston (6 cm par exemple) s'effectue en 10 ms, soit une vitesse de déplacement de $6\text{cm}/10\text{ms} = 6\text{m/s} \ll 700 \text{ m/s}$ du gaz : la pression a donc le temps de s'équilibrer.

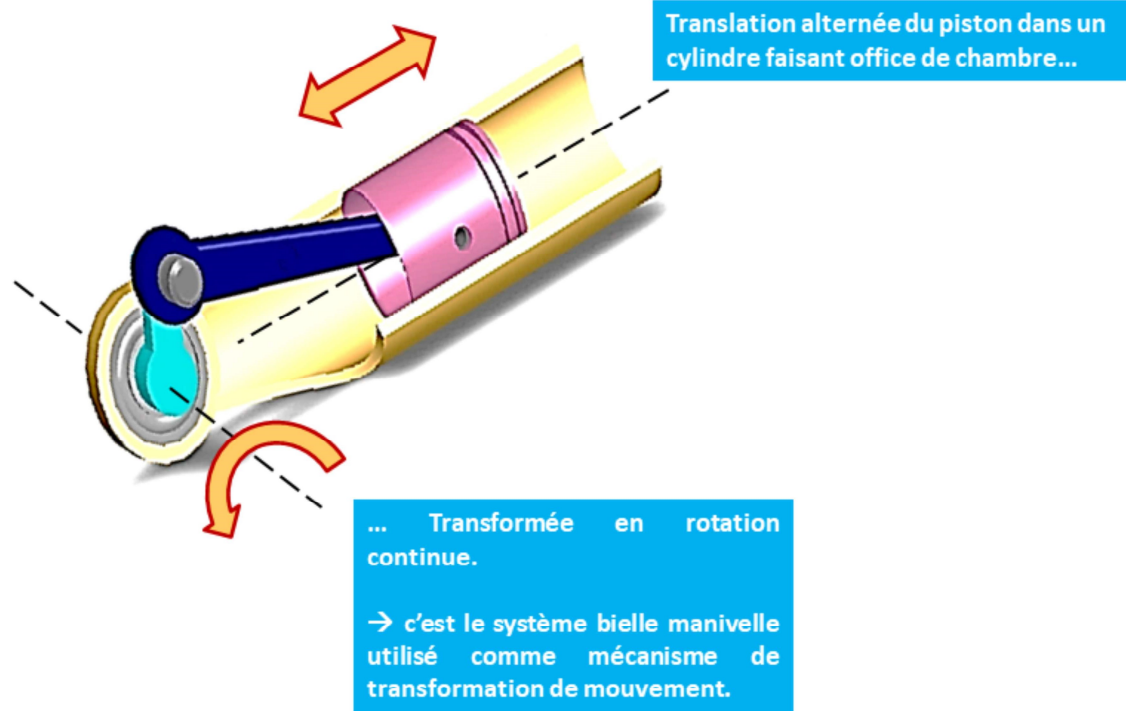
Une première solution : le cycle essence dit « à volume constant »

Analyse système

- Le cycle idéal
- Représentation
- Rendement

Analyse machine

- Limitations
- Cycle Beau de Rochas
- La mécanique adaptée
- Cycle réel essence
- ▶ Les 4 temps
- Rôle de la distribution
- Rendement essence
- Application 1



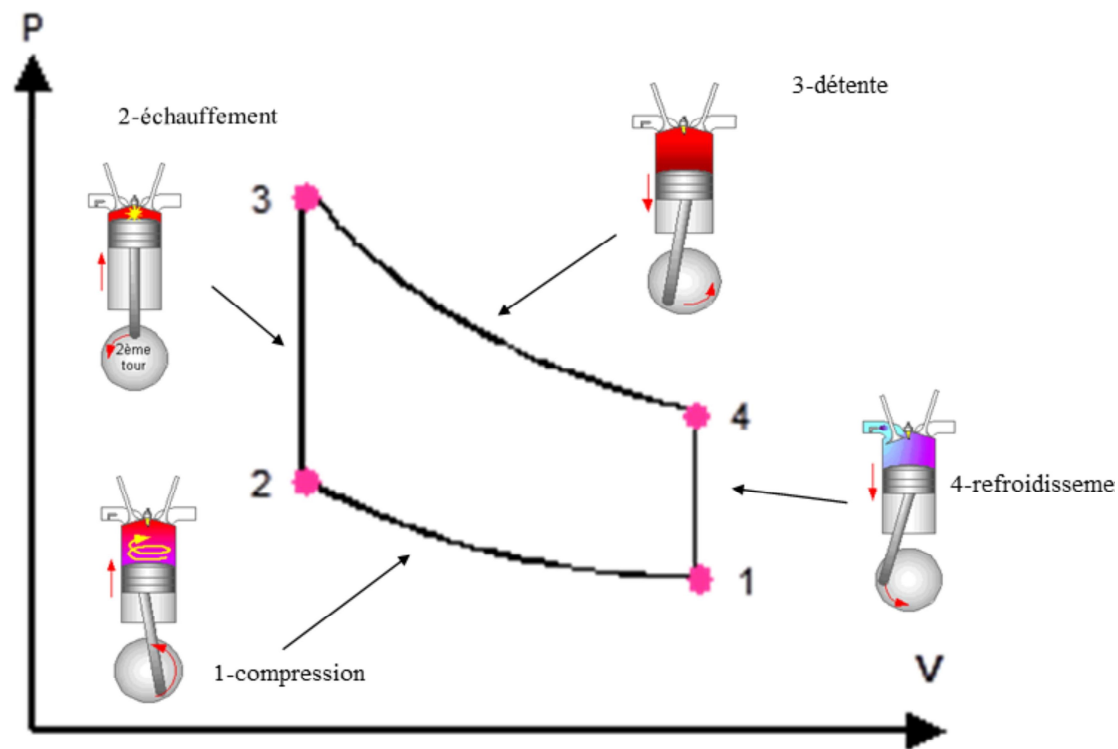
Une première solution : le cycle essence dit « à volume constant »

Analyse système

- Le cycle idéal
- Représentation
- Rendement

Analyse machine

- Limitations
- Cycle Beau de Rochas
- La mécanique adaptée
- Cycle réel essence
- Les 4 temps
- Rôle de la distribution
- Rendement essence
- Application 1



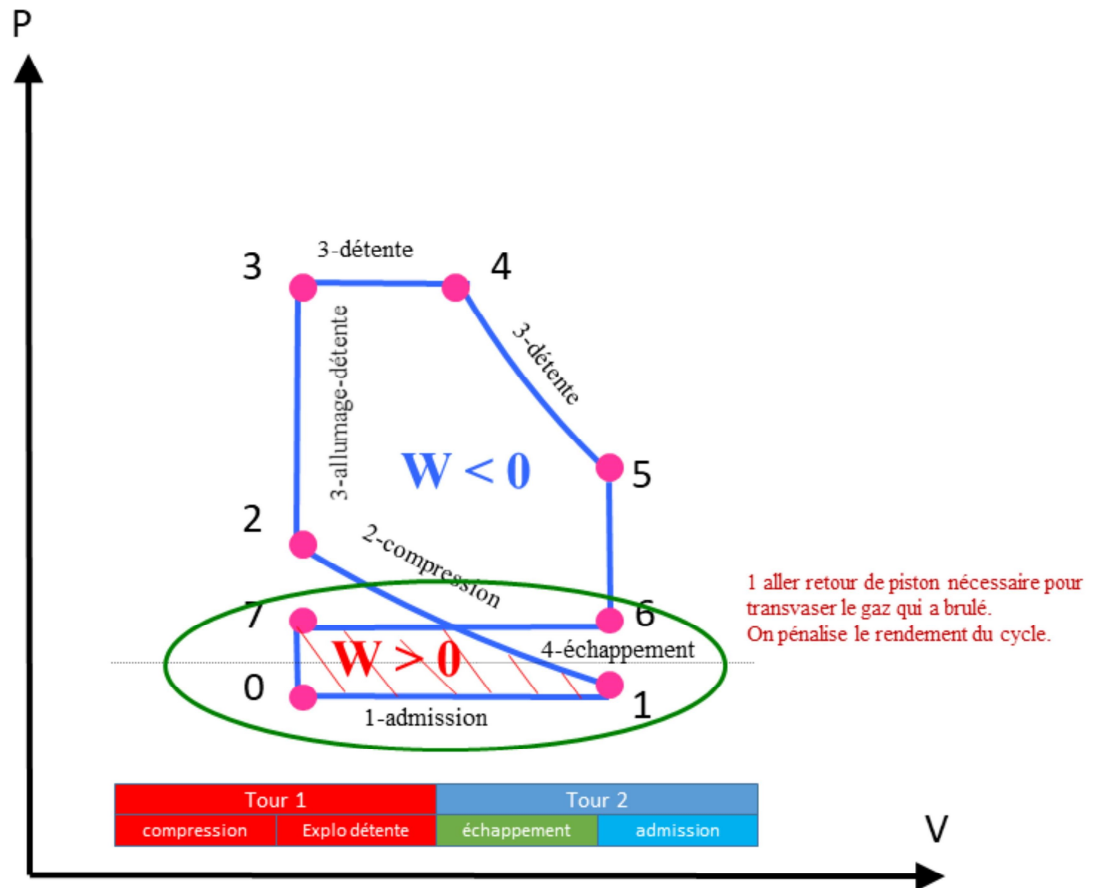
Encore des concessions !

Analyse système

Le cycle idéal
Représentation
Rendement

Analyse machine

Limitations
Cycle Beau de Rochas
La mécanique adaptée
► Cycle réel essence
Les 4 temps
Rôle de la distribution
Rendement essence
Application 1



La masse des gaz varie (admission, échappement), le cycle est donc ouvert et les transformations successives idéales et réversibles ne sont pas réalisables.

En effet :

- il y a des pertes de chaleur par les parois du cylindre refroidi en fin de compression (T_2 et P_2 réels inférieurs à T_2 et P_2 escomptés),
- il y a des pertes de charges au niveau de l'admission (soupapes) réduisant la pression pendant la phase d'aspiration 0-1 et augmentant la pression en phase d'échappement 6-7 ($W > 0$, de l'énergie est fournie au gaz...),
- la combustion n'est pas instantanée, pour cela on doit provoquer l'inflammation du mélange avant la fin de la compression (3-4),
- les chaleurs massiques C_p et C_v ne sont pas constantes...

Les 4 temps du cycle idéal en circuit fermé nécessitent dans la réalité de transvaser le fluide via un aller retour du piston (échappement et admission).

Ainsi la réalisation des 4 temps fait appel à l'exécution de 2 tours de vilebrequin.

⇒ Irrégularité du couple moteur, corrigable, cependant, par l'emploi de plusieurs pistons.

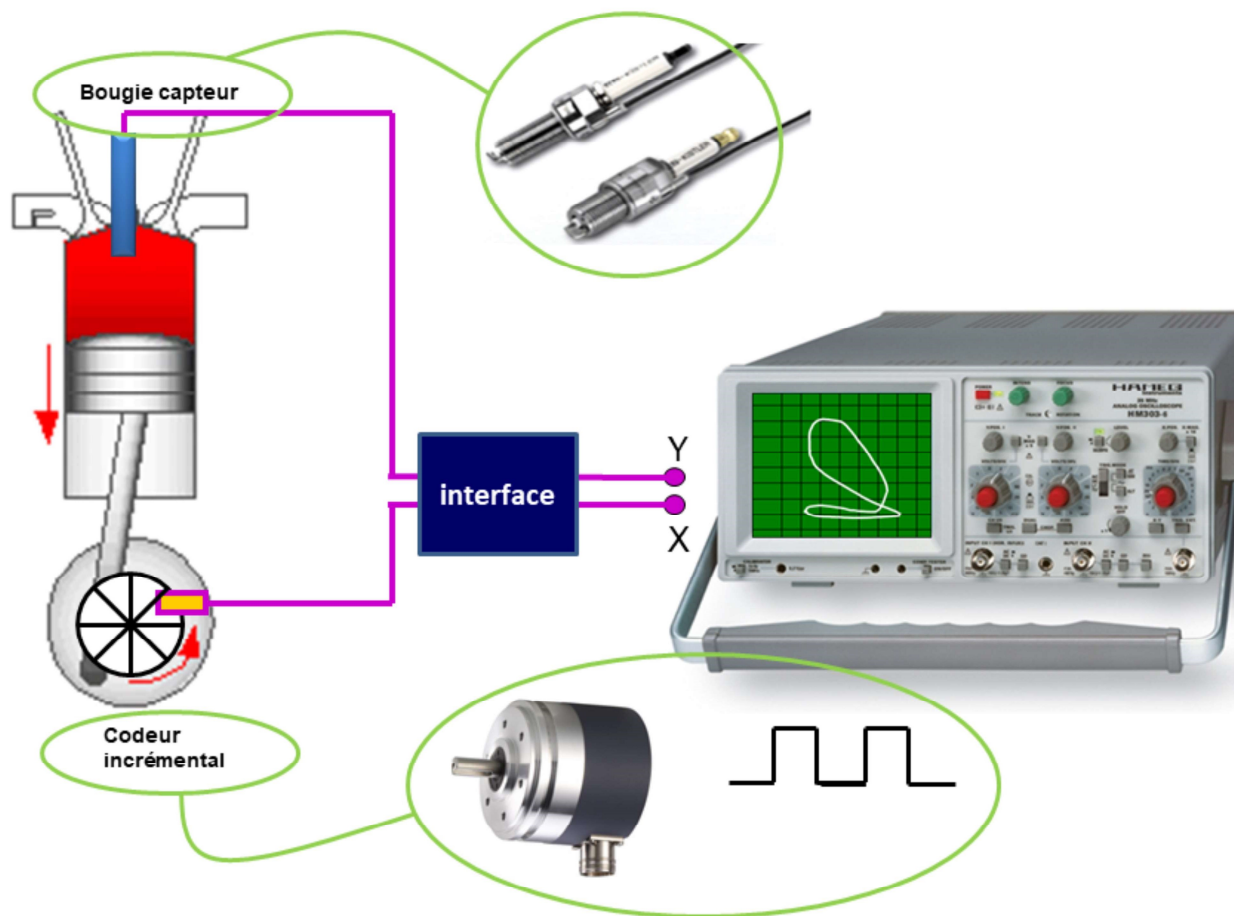
Le cycle réellement obtenu - mesure

Analyse système

- Le cycle idéal
- Représentation
- Rendement

Analyse machine

- Limitations
- Cycle Beau de Rochas
- La mécanique adaptée
- Cycle réel essence
- Les 4 temps
- Rôle de la distribution
- Rendement essence
- Application 1



Pour visualiser le cycle réel sur un digramme PV, une bougie intégrant un capteur de pression à haute performance et un codeur rotatif monté sur le vilebrequin délivrent des signaux visualisés sur l'écran d'un oscilloscope. La relation entre l'angle décrit par l'arbre moteur et le déplacement du piston est fournie par la géométrie du système de transformation de mouvement retenu (système bielle manivelle).

Le cycle apparaît alors en temps réel.

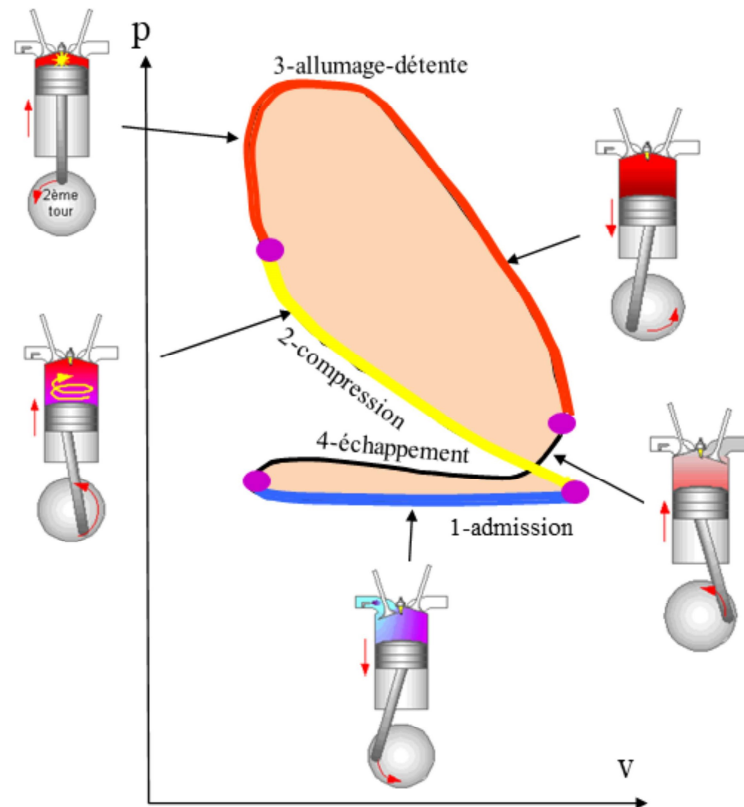
Le cycle réellement obtenu - considérations

Analyse système

Le cycle idéal
Représentation
Rendement

Analyse machine

Limitations
Cycle Beau de Rochas
La mécanique adaptée
Cycle réel essence
▶ Les 4 temps
Rôle de la distribution
Rendement essence
Application 1



4 temps = 2 tours de vilebrequin !

Dans la pratique, on observe que le cycle 4 temps diffère de la théorie et ceci pour des raisons multiples.

Notamment :

- poids et donc inerties des gaz,
- phénomène de pression et de dépression dans l'ensemble du parcours des gaz, à savoir son admission, le passage dans la chambre de combustion et l'échappement.
- échange thermique entre l'intérieur et l'extérieur du moteur,
- délai d'inflammation des gaz comprimés...

Tout ceci se traduit par une moindre efficacité du moteur thermique...

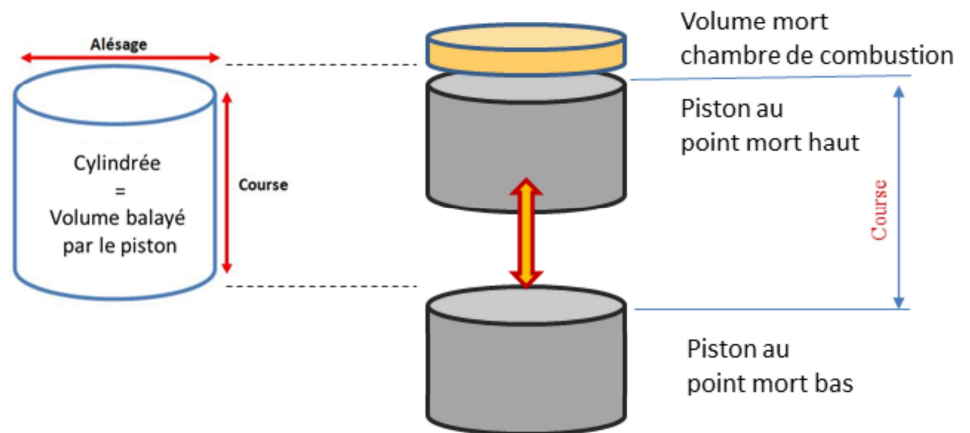
Notion de cylindrée

Analyse système

Le cycle idéal
Représentation
Rendement

Analyse machine

Limitations
Cycle Beau de Rochas
La mécanique adaptée
Cycle réel essence
Les 4 temps
Rôle de la distribution
▶ Rendement essence
Application 1



$$\text{Mono cylindrique} \quad \pi \times \left(\frac{\text{Alésage}}{2}\right)^2 \times \text{course}$$

$$\text{Poly cylindriques} \quad \pi \times \left(\frac{\text{Alésage}}{2}\right)^2 \times \text{course} \times \text{nombre de cylindres}$$

Plus on brûle de carburant, plus on génère de couple et plus on peut faire avancer rapidement une voiture.

Or, pour brûler une certaine quantité de carburant, il faut une certaine quantité de comburant, qui est de l'air dans notre cas.

On en arrive là : **pour brûler plus de carburant, il faut plus d'air.**

Pour avoir une masse d'air plus importante dans le cylindre, il faut soit diminuer sa température (pas toujours évident), soit augmenter sa pression (la suralimentation), soit augmenter son volume.

C'est un fait : plus la cylindrée unitaire est élevée, plus la masse d'air enfermée sera importante, plus on pourra brûler de carburant, plus le cylindre en question pourra fournir du couple.

On parle ici de couple instantané puisqu'un cylindre fournit un travail pendant uniquement 180° (sur les 720° d'un cycle moteur). Si on a un seul cylindre qui fournit du couple, le couple moyen sera faible. Etant donné qu'on ne peut pas augmenter à l'infini la cylindrée unitaire, **il faut multiplier le nombre de cylindres.** Plus on a de cylindres, plus le couple moyen sera élevé.

Si on parle des moteurs atmosphériques (non suralimentés), il est donc normal que les moteurs puissants aient une grosse cylindrée et un nombre de cylindres important. Attention tout de même, on sait que la puissance était la multiplication d'un couple par le régime de rotation. Il ne faut donc pas uniquement que le moteur fournisse du couple, il faut qu'il puisse tourner relativement rapidement pour être puissant.

Rendement du moteur à essence 4 temps

Analyse système

Le cycle idéal
Représentation
Rendement

→ Voir application 1

Analyse machine

Limitations
Cycle Beau de Rochas
La mécanique adaptée
Cycle réel essence
Les 4 temps
Rôle de la distribution
Rendement essence
Application 1

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\alpha^{(\gamma-1)}}$$

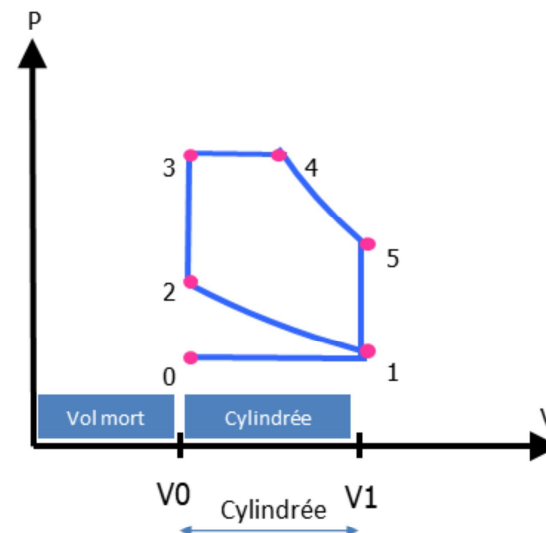
Rendement thermique théorique

avec α = taux de compression

$$\alpha = \frac{V_{chambre} + V_{cylindrée}}{V_{chambre}} = \frac{V_1}{V_0}$$

$\alpha = 8$ à 12 pour des moteurs essences classiques

Augmenter trop cette valeur remet en cause la tenue mécanique et provoque des risques d'auto inflammation du gaz.



On remarque que le rendement est d'autant plus élevé que le taux de compression α est élevé (voir TD).

Ce qui limite α est le phénomène de **détonation**.

La combustion démarre normalement, mais par suite de l'élévation de pression et de température une autre portion du mélange s'enflamme spontanément.

Le **cliquetis**, caractéristique d'une combustion anarchique, est une onde sonore dont l'énergie provoque une brutale surchauffe pouvant aller jusqu'à la destruction des éléments du cylindre (soupapes, pistons, segments, électrodes de bougie).

L'indice d'octane permet de limiter le phénomène de détonation et permet donc augmenter α et η .

Rendement du moteur à essence 4 temps

Analyse système

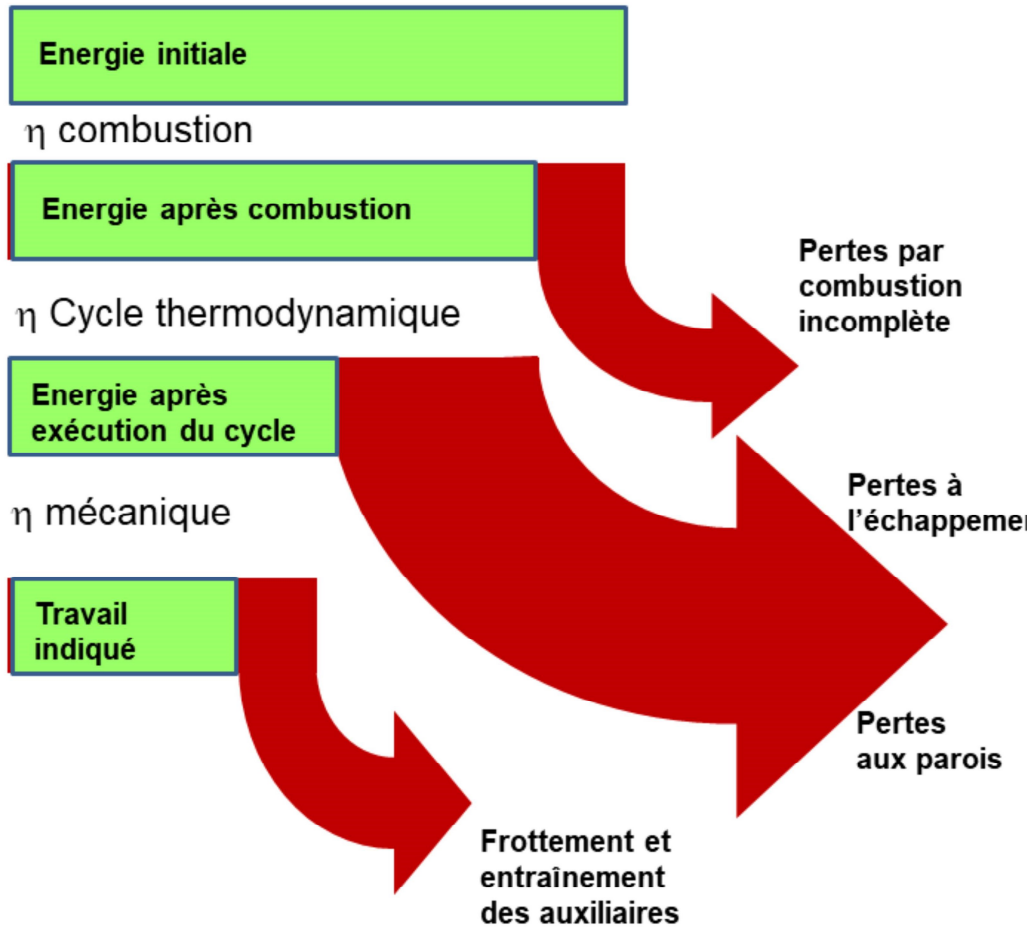
Le cycle idéal
Représentation
Rendement

Analyse machine

Limitations
Cycle Beau de Rochas
La mécanique adaptée
Cycle réel essence
Les 4 temps
Rôle de la distribution
▶ Rendement essence
Application 1

$\eta_{\text{Global}} = \text{produit des 3 rendements}$

$\eta_{\text{indiqué}}$



La puissance récupérée lors du cycle réel est appelée « Pindiquée »

La pression moyenne indiquée « pmi » est la pression constante qu'il faudrait appliquer sur le piston pendant un cycle pour obtenir le même travail que le cycle réel. Généralement $\alpha \# 10$.

Définitions des travaux et puissances – voir annexe.

Valeurs numériques : voir tableau des données sur les rendements.

Le rendement global est de plus affecté par le rendement de la transmission...

$$P_{\text{ind}} = \frac{p_{\text{mi}} \cdot \text{Cylindrée} \cdot N}{120}$$

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{indiqué}} \cdot \eta_{\text{mécanique}}$$

$$\eta_{\text{mécanique}} = \frac{P_{\text{roues}}}{P_{\text{indiqué}}} \quad \eta_{\text{indiqué}} = \frac{P_{\text{indiquée}}}{P_{\text{théorique}}}$$

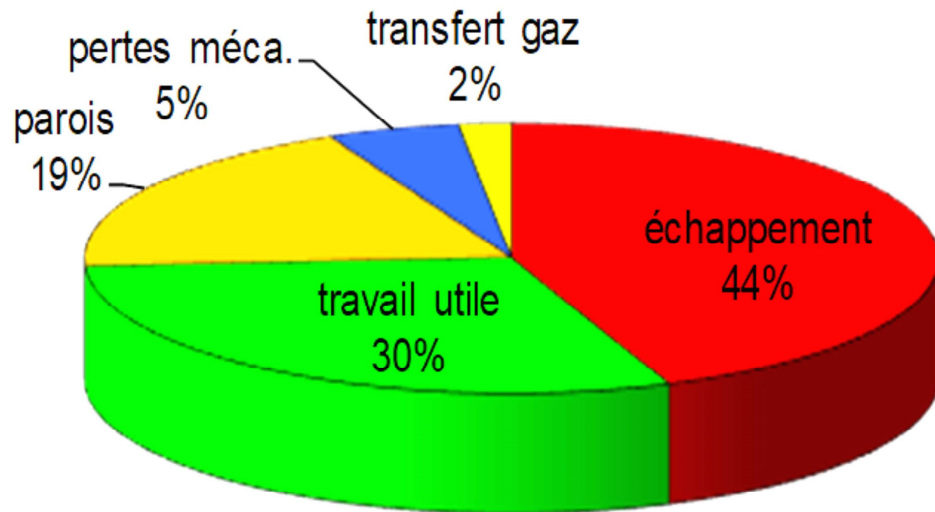
Bilan des pertes énergétiques

Analyse système

Le cycle idéal
Représentation
Rendement

Analyse machine

Limitations
Cycle Beau de Rochas
La mécanique adaptée
Cycle réel essence
Les 4 temps
Rôle de la distribution
▶ Rendement essence
Application 1



Répartition énergétique dans un moteur
à essence monocylindrique à 100% charge

Ce diagramme affligeant se passe, pour ainsi dire, de commentaires.

Disons, en imageant, que pour 100 litres achetées à la pompe, 30 litres sont réellement utiles et 70 litres sont finalement déversés à côté du réservoir...

Ce n'est pas tant l'essence qui est chère, ce sont nos moteurs qui sont peu efficaces.

Application 1

Analyse système

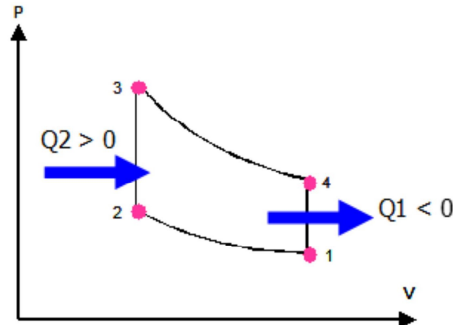
Le cycle idéal
Représentation
Rendement

Analyse machine

Limitations
Cycle Beau de Rochas
La mécanique adaptée
Cycle réel essence
Les 4 temps
Rôle de la distribution
Rendement essence

► Application 1

Pour un gaz supposé parfait le fonctionnement d'un moteur ESSENCE est représenté par le cycle idéal BEAU de ROCHAS ici en coordonnées P-V :



1 à 2 = compression isentropique
2 à 3 = échauffement isochore
3 à 4 = détente isentropique
4 à 1 = refroidissement isochore

Travail demandé :

❶ Le travail mécanique idéalement fourni par le moteur correspond à la somme des deux chaleurs algébriques échangées avec l'extérieur. Exprimer alors le rendement théorique du cycle essence en fonction des chaleurs Q_1 et Q_2 .

❷ On note C_v la capacité thermique isochore du gaz. Montrer que ce rendement peut s'exprimer comme :

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

❸ On note C_p la capacité thermique isobare du gaz. Compte tenu de l'isentropie entre 1 et 2, exprimer T_4 en fonction de T_3 et de $\gamma = C_p/C_v$ et des volumes. Faire de même avec T_1 en fonction de T_2 ...

❹ Exprimer alors η en fonction du taux de compression $\alpha = V_1/V_2$ et de γ .

❺ Calculer le rendement théorique de ce moteur si le taux de compression α est égal à 10.

❻ Calculer le volume d'essence théorique injecté pour un cycle par cylindre à $N = 4500$ tr/mn pour une vitesse de véhicule V égale à 130 km/h et une consommation C égale à 10 litres/100km si le moteur comporte 4 cylindres.

❼ Calculer enfin la puissance théorique du moteur à 4500 tr/mn sachant que 1 litre d'essence possède un pouvoir calorifique interne (PCI) égal à 43,8 MJ.

Application 1

Analyse système

- Le cycle idéal
- Représentation
- Rendement

Analyse machine

- Limitations
- Cycle Beau de Rochas
- La mécanique adaptée
- Cycle réel essence
- Les 4 temps
- Rôle de la distribution
- Rendement essence

► Application 1



4 place Tarradin - BP 71427
25211 Montbéliard Cedex

Tél. : +33 (0)3 81 99 46 62
Fax : +33 (0)3 81 99 46 61
ufr-stgi@univ-fcomte.fr

<http://stgi.univ-fcomte.fr>